



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-451

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Delimitación y análisis del incendio forestal de Sierra de Gata (Cáceres) mediante imágenes de los satélites Landsat 8 y Sentinel 2

NIETO MASOT, A.¹, NAVAZO ARENAS, G.² y MORENO MARCOS, G.³

¹ Área de Geografía Humana. Departamento de Arte y Ciencias del Territorio, Grupo DESOSTE, Universidad de Extremadura. ananieto@unex.es

² Investigadora en Formación. Área de Geografía Humana. Departamento de Arte y Ciencias del Territorio, Grupo DESOSTE, Universidad de Extremadura. gnavazoa@alumnos.unex.es.

³Ingeniería Forestal y del Medio Natural, Universidad de Extremadura, Avenida Virgen del Puerto 2, 10600 Plasencia, España. gmoreno@unex.es

Resumen

En los estudios de teledetección ambiental las técnicas de fusión de imágenes son cada vez más utilizadas para superar limitaciones de resolución espacial, espectral o temporal asociadas al uso de un único sensor. En este contexto, este trabajo explora, en el marco del estudio de los incendios forestales, la combinación de los sensores de los satélites Landsat 8 y Sentinel 2 a través de índices de severidad de incendios como NBR, y de cambios en la vegetación como NDVI. La evaluación de estos índices ha sido desarrollada en el área afectada por el incendio forestal de Sierra de Gata (Cáceres) en el verano de 2015. Se han analizado imágenes anteriores y posteriores al fuego para comparar con los índices de severidad (dNBR) y vegetación (dNDVI) el nivel de daños causados por los mismos en las distintas especies forestales. Se han analizado a nivel estadístico y cartográfico, combinando las resoluciones espaciales, espectrales y temporales de ambos satélites y demostrando así, su capacidad para evaluar el estado del área quemada inmediatamente después del fuego y estudiar su regeneración vegetal posterior.

Palabras clave

Combustión, severidad, regeneración forestal, teledetección, Extremadura.

1. Introducción

El fuego en la región mediterránea tiene diversos efectos sobre la vegetación como consecuencia de la gran complejidad que presentan las comunidades vegetales y de la influencia ejercida por el pastoreo, el aclareo y las actividades de quema; aunque también condicionada por las diferentes respuestas al tipo de intensidad de cada fuego, la estación del año en la que tuvo lugar y la frecuencia de quema (LE HOUEROU, 1973). Las diferentes intensidades del incendio son debidas sobre todo a la carga y características del combustible presente (humedad, componentes volátiles e inflamables, etc.), a las condiciones meteorológicas en las que se desarrolla el incendio (con la importante influencia de la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura), y a la variabilidad topográfica de la zona afectada (WHELAN, 1995). Así, en la mayoría de incendios forestales, sus efectos se revelan en un mosaico de niveles de daño causados a la vegetación y al suelo en función de la virulencia con la que las llamas transcurrieron por cada zona y, cuanto más amplia sea la superficie afectada, mayores serán las diferencias en los patrones de severidad (CAETANO et al, 1994).

Mediante el uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica se puede desarrollar un sistema de gestión de incendios forestales en distintas fases: desde la evaluación global de las áreas afectadas con la delimitación del perímetro, hasta la determinación del nivel de daño provocado en la vegetación y el suelo (AYALA-CARCEDO & OLCINA, 2002; MILLER & YOOL, 2002 y CHUVIECO y MARTÍNEZ, 2003). En este trabajo se aplicará en el área incendiada el verano de 2015 en la Sierra de Gata (Cáceres).

Más concretamente, la teledetección se ha utilizado ampliamente para determinar a diferentes escalas el nivel de severidad de los incendios (KEY y BENSON, 2006), la pérdida de cobertura vegetal (MILLER & YOOL, 2002), la tasa de recuperación o regeneración de las comunidades vegetales tras el

incendio (DÍAZ, 2003; BASTARRIKA et al, 2011; GARCÍA-MARTÍNEZ & PÉREZ-CABELLO, 2015) y la evolución de los suelos (CHUVIECO, 2002). Un elemento común dentro de este tipo de estudios es la utilización de información espectral con el diseño de índices de diferentes bandas que han demostrado tener niveles de correlación con parámetros biofísicos de la vegetación como la cantidad de biomasa, la actividad fotosintética, la productividad y el contenido hídrico (DE SANTIS & CHUVIECO, 2007).

Para esta caracterización espectral de las masas vegetales se diferencian dos tipos distintos de señal: la proveniente de la formación y deposición de carbón y cenizas, y la procedente de la alteración de la estructura y cantidad de la vegetación. El primer tipo es consecuencia de la combustión de la vegetación, y tiene el inconveniente de tener una corta duración en el tiempo, ya que se degrada por la acción de los agentes externos, que pueden eliminarlo a las pocas semanas o meses después de ocurrido el incendio. La segunda señal es más estable, pero es menos nítida para discriminar los efectos del fuego, puesto que otros factores pueden también causar cambios en la vegetación (PEREIRA et al, 1999) como el estado fisiológico y fenológico de la vegetación que varía estacionalmente (e.g., secado estival del pasto, caída de hoja).

En este estudio con el fin de determinar el límite del incendio y el grado de afectación de la vegetación se emplearon los siguientes índices: la Ratio Normalizada de Área Quemada (Normalized Burn Ratio; NBR) (NAVAZO et al, 2016) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) (MANZO & LÓPEZ, 2013) con la comparación entre imágenes, antes y después del incendio. Estos índices son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen (ESPERANZA & ZERDA, 2002). Están condicionados por cambios en el estado fisiológico de las coberturas vegetales, y sus variaciones pueden ser utilizadas para estudios espacio-temporales del comportamiento de la vegetación y realzar las diferencias espectrales de las zonas quemadas respecto a las demás cubiertas.

El área del incendio se sitúa en Sierra de Gata (Cáceres), al norte de la Comunidad Autónoma de Extremadura y fue afectada por un incendio forestal que comenzó el 6 de agosto del 2015, y que dadas las condiciones climatológicas de alta ventosidad y el relieve accidentado produjo un gran impacto superficial. Se produjeron grandes daños y pérdidas valoradas en cerca de 50 millones de euros, siendo las mayores en la actividad forestal (www.incendiogata-institucional.es). El incendio afectó a 7.832,82 ha según el INFOEX (Servicio de Prevención y Extinción de Incendios Forestales de Extremadura), afectando a 8 municipios: Acebo, Cilleros, Gata, Hoyos, Moraleja, Perales del Puerto, Villamiel y Villasbuenas de Gata) y el 90% del área quemada en solo tres de ellos: Acebo, Perales del Puerto y Hoyos. Las poblaciones afectadas tenían una baja densidad de habitantes concentrándose en los principales núcleos de población de la comarca aunque existían zonas de viviendas dispersas que fueron lugares de potencial peligro.

El 29% de la superficie afectada por el incendio estaba cubierta por matorrales con una gran combustibilidad (especies que por composición vegetal producen una propagación rápida en un incendio, BURGAN & ROTHERMEL, 1984), seguida de pinares que presentaban la misma problemática. Un 20% del área estaba poblada de melojares, la mayoría sin ningún tipo de manejo (sin pastoreo, claras o desbroces recientes), por lo que presentaban sotobosque abundante, indicando un alto nivel de combustibilidad previo al incendio (aunque el roble melojo es una especie poco pirófito). El área ocupada por las formaciones de escaso combustible corresponde a la cuarta parte de la zona quemada: núcleos de población, zonas de cultivos, roquedos y cubiertas vegetales con baja combustibilidad como encinares o alcornocales. En general, el área afectada incluía formaciones vegetales con un alto nivel de combustibilidad a lo que se le suma una gran continuidad de las masas vegetales. El incendio afectó a importantes espacios protegidos, siendo los más importantes: LIC de Sierra de Gata, LIC Riveras de Gata y Acebo y la ZEPA Sierra de Gata y Valle de Pilas. Es además, una zona con abundancia de hábitats y especies de interés comunitario como son los brezales oromediterráneos, quirópteros cavernícolas y odonatos, y de zonas de valor ambiental para aves en peligro de extinción o amenazadas, como es el caso del águila real o el halcón peregrino (NAVAZO et al, 2016).

2. Objetivos

En este estudio se persiguen dos fines diferentes, (i) delimitar la zona incendiada y, (ii), determinar y cartografiar el grado de severidad del incendio. Para estos fines se utilizan los índices NDVI y NBR comparando imágenes satelitales anteriores y posteriores al incendio de dos satélites, Landsat 8 y Sentinel 2. Las metodologías con Landsat, ya están altamente consolidadas y se pretende obtener con este estudio un avance en el análisis de incendios forestales al emplear las nuevas imágenes de Sentinel, con mejor resolución espacial y temporal, y al comprobar, si los resultados son óptimos, un avance metodológico en el uso de imágenes de satélite.

3. Metodología

Se han utilizado imágenes de los satélites Landsat 8 y Sentinel 2A para, en primer lugar, delimitar el área afectada y, posteriormente, realizar un estudio del grado de severidad del incendio.

Se han empleado imágenes de Landsat, porque se ha validado el empleo de la mismas en estudios de incendios forestales en trabajos previos (RÖDER et al., 2005; KEY & BENSON, 2006; WIMBERLY & REILLY, 2007; NIETO et al, 2009; BASTARRIKA et al; 2011 MICHALIJOS y UBOLDI, 2013; BORINI et al,2016), que se pueden adaptar a nuestro caso de estudio; y en segundo lugar, porque son imágenes gratuitas, con una óptima resolución espacial, espectral y temporal para el análisis de un incendio de grandes dimensiones como es este caso. De los dos satélites Landsat disponibles en el momento del incendio, el 7 y el 8, se seleccionaron las imágenes de Landsat 8, ya que Landsat 7 presenta problemas de GAPS (bandas con ausencia de información en sus imágenes) desde 2003. Además, Landsat 8 presenta mayor calidad de los datos al haber ampliado la resolución radiométrica a 16 bits respecto a los 8 bits de los anteriores satélites Landsat, proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre.

Las imágenes Landsat 8 constan de ocho bandas espectrales (del 1 al 7 y 9), que comprenden desde el visible hasta los infrarrojos lejanos, con una resolución espacial de 30 metros, y, que se complementan con la resolución espacial para la banda 8 (pancromática) de 15 metros. También tiene dos bandas térmicas 10 y 11, útiles para proporcionar temperaturas precisas de la superficie, con 100 metros de resolución espacial, pero que en este estudio no se emplearán.

Por otro lado, aunque Landsat tiene una óptima resolución espacial se han empleado como apoyo las imágenes del satélite Sentinel 2A por su mayor resolución espacial, de 30 m a 10 m y temporal, de 16 a 10 días. Este satélite ha sido desarrollado por la ESA (European Space Agency) en el marco del programa Global Monitoring for Environment and Security (GMES) y se obtienen imágenes del mismo desde 2015 con una periodicidad de 10 días. Este satélite se compone de un escáner multi-espectral que permite obtener información en las longitudes de onda del visible e infrarrojo, permitiendo monitorizar los cambios en el suelo y en la vegetación empleando sus 13 bandas espectrales (443-2190 nm) con diferentes resoluciones.

En primer lugar, para delimitar el incendio digitalmente, se calcularon dos índices espectrales, el Normalized Burn Ratio (NBR) y el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) que aportan información de la actividad fotosintética después del incendio, con imágenes del satélite Landsat 8 obtenidas el 9 de septiembre del 2015 y las imágenes del Sentinel 2A del 21 de agosto de 2015.

El NBR, desarrollado por HUNT & ROCK en 1989, pretende estimar la severidad del incendio forestal. Para ello emplea el contraste entre el infrarrojo cercano (IRC, Banda 5 del Landsat 8, Banda 8 del Sentinel) por ser sensible al contenido de agua en la vegetación y el suelo; y el infrarrojo de onda corta (SWIR, Banda 7 del Landsat 8, Banda 12 de Sentinel) que es sensible a la detección de vegetación sin actividad fotosintética, en el medio post-incendio (JIA et al, 2006). Este índice se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$NBR = \frac{\rho_{i, IRC} - \rho_{i, SWIR}}{\rho_{i, IRC} + \rho_{i, SWIR}}$$

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI, descrito por ROUSE et al, 1973, permite la estimación de la actividad fotosintética de la vegetación. Este cálculo se basa en medir la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que refleja la vegetación. Estas bandas son la del infrarrojo cercano (IRC, Banda 5 del Landsat 8, Banda 8 de Sentinel) y el rojo (R, Banda 4 del Landsat 8, Banda 4 de Sentinel). El NDVI se expresa con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{\rho_{i, IRC} - \rho_{i, R}}{\rho_{i, IRC} + \rho_{i, R}}$$

Para calcular los posibles errores en la determinación de la superficie quemada se calculó un área de influencia hacia el exterior del área quemada vectorizada, tomando como valor de incertidumbre la resolución espacial de la imagen (30 m para todas las mediciones de Landsat y, 10 m para las mediciones obtenidas a partir de Sentinel).

En una segunda fase, para realizar el análisis espacial de la severidad se han obtenido las diferencias entre dos imágenes que recogen la zona afectada antes e inmediatamente después del fuego (imágenes del satélite Landsat 8 obtenidas el 2 de julio y el 9 de septiembre del 2015; y las imágenes del Sentinel del 5 de agosto de 2015 y del 21 de agosto de 2015). La teledetección es una técnica adecuada para el estudio de la severidad del fuego ya que el proceso de combustión origina cambios en la reflectividad superficial asociados a la eliminación de la vegetación, la exposición del suelo, los cambios en el contenido de humedad y la aparición de nuevas cubiertas vegetales. El máximo exponente de estos cambios es el descenso en las regiones del visible e infrarrojo cercano y el incremento en la reflectividad del infrarrojo medio de onda corta (KEY y BENSON, 2006; WHITE et al, 1996).

El análisis de la severidad del fuego en áreas quemadas mediante la diferencia de NBR posibilita la identificación de las zonas donde la pérdida de vegetación ha sido más elevada. Esto es debido a la combinación de dos bandas espectrales que responden al fuego de manera más acusada y contrastada: el infrarrojo cercano (IRC), cuya reflectividad desciende debido a la desaparición de la vegetación activa, y el infrarrojo medio de onda corta (SWIR), cuya reflectividad incrementa por la pérdida de humedad, la mayor exposición del suelo y las menores sombras proyectadas por la vegetación (HUNT & ROCK, 1989).

El rango de valores de severidad y de regeneración post-incendio fue fijado por el proyecto FIREMAN (LUTES et al, 2006), tomando los valores recogidos en la Tabla 1. Con los resultados obtenidos en Landsat se han propuesto unos valores equivalentes en Sentinel y se han cartografiado los resultados.

Tabla 1. Valores de severidad y regeneración post-incendio según FIREMAN (LUTES et al, 2006). $dNBR = NBR2 - NBR1$ (1 y 2 son las dos fechas que se comparan) y propuesta de Sentinel.

Nivel	Rango de ΔNBR Landsat 8	Rango de ΔNBR Sentinel 2
Alta severidad	< - 0,5	< - 0,5
Media severidad	- 0,5 a -,25	- 0,5 a -,25
Baja severidad	- 0,25 a -0,1	- 0,25 a 0
Nula severidad	- 0,1 a 0,1	0 a 0,15
Baja regeneración	0,1 a 0,27	0,15 a 0,3
Media regeneración	0,27 a 0,44	0,3 a 0,5
Alta regeneración	0,44 a 0,66	0,5 a 0,8

Muy alta regeneración	0,66 a 1,3	> 0,8
-----------------------	------------	-------

Para completar los resultados anteriores, se utiliza el NDVI como índice que estima la cantidad de biomasa verde, independientemente de las especies que formen la comunidad (BLACKBURN y MILTON, 1995) y constituye una buena herramienta para cuantificar globalmente el recubrimiento vegetal (DUNCAN et al, 1993). Este índice de vegetación ha sido uno de los más aplicados por su alto éxito, debido a la fuerte relación existente entre la severidad del fuego y la cantidad de vegetación consumida (DE SANTIS y CHUVIECO, 2007).

El resultado del NDVI se puede agrupar en las siguientes clases (Tabla 2) según la actividad fotosintética para Landsat 8, (DUNCAN et al, 1993) y, del mismo modo, que con el índice anterior se proponen unos valores para Sentinel 2.

Tabla 2. Clasificación de la actividad fotosintética según NDVI para imágenes Landsat 8 y Sentinel 2.

Actividad fotosintética	Rango Landsat 8	Rango Sentinel 2
Nula	< 0	< 0
Muy baja	0 a 0,1	0 a 0,1
Baja	0,1 a 0,2	0,1 a 0,3
Media	0,2 a 0,3	0,3 a 0,5
Media - Alta	0,3 a 0,4	0,5 a 0,6
Alta	0,4 a 0,6	0,6 a 0,8
Muy alta	> 0,6	> 0,8

4. Resultados

4.1. Delimitación del área quemada

Realizando la unión de las capas obtenidas por la vectorización de los dos índices (NBR y NDVI) se determina una perimetración de 7.217,76 +/- 1303,32 ha (18,06% de error) para Landsat y 6.716,63 +/- 686,57 ha (10,22% de error) para Sentinel. Se compara estos resultados con la perimetración oficial del INFOEX y supone una diferencia de 615,06 ha para el primero y 1.116,19 ha para el segundo, respecto a los límites del INFOEX (7.832,82 ha) (Figuras 1 y 2). Estas superficies quemadas son más precisas que la perimetración oficial, obtenida por vuelo del "Halcón" (el helicóptero de coordinación aéreo del plan INFOEX) y con esta técnica se generalizaron los límites, no se depuraron las pequeñas zonas con una extensión menor a 500 m y no se discriminaron zonas interiores del perímetro total del incendio donde la vegetación no sufrió daño aparente. Aunque siguen existiendo limitaciones en el empleo de índices espectrales con estos satélites debido a su resolución espacial, porque todavía en áreas menores, como pueden ser casas aisladas, pequeñas zonas de cultivos, caminos, roquedos, etc... pueden quedar excluidas de la delimitación de la superficie quemada (o con daño observable).

Las zonas coincidentes entre las perimetraciones obtenidas con el satélite Landsat, ocupan 3.362,52 ha (47% de la perimetración calculada), y estas zonas se corresponden con zonas de elevada pendiente y altitud donde la intensidad del fuego ha sido mayor y por ello, se discriminan mejor con los índices espectrales. La vegetación principal de estas zonas un 29,3% es de pinares, un

28,4% de brezales y un 20,2% de escobonales lo que supone que el 77,9% de esta superficie coincidente en los distintos análisis tienen masas de alta combustibilidad.

Las zonas coincidentes entre las perimetraciones obtenidas con Sentinel ocupan 4.386,37 ha (65%), y estas zonas no se corresponden con cubiertas vegetales y orografías distintas.

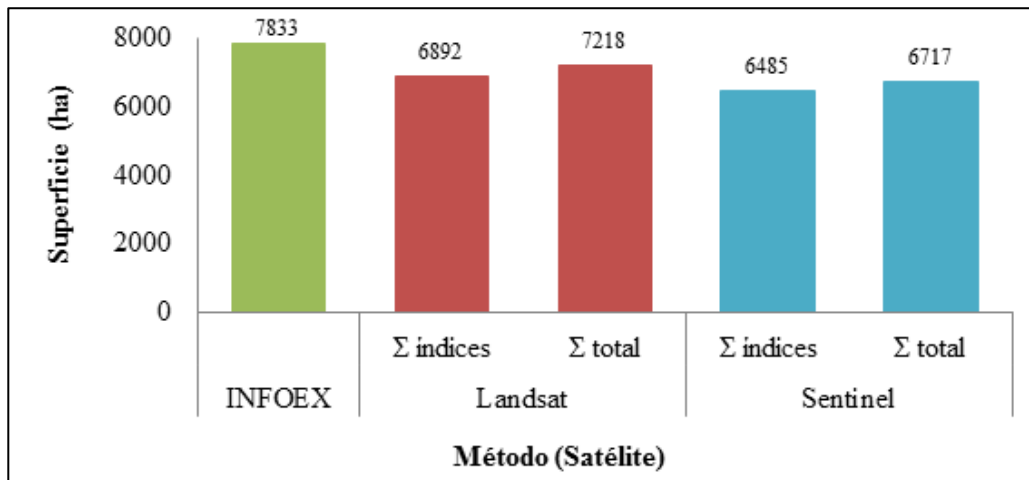


Figura 1. Superficie quemada según los métodos calculados, que se comparan con la cifra oficial ofrecida por el INFOEX. Fuente: Elaboración propia.

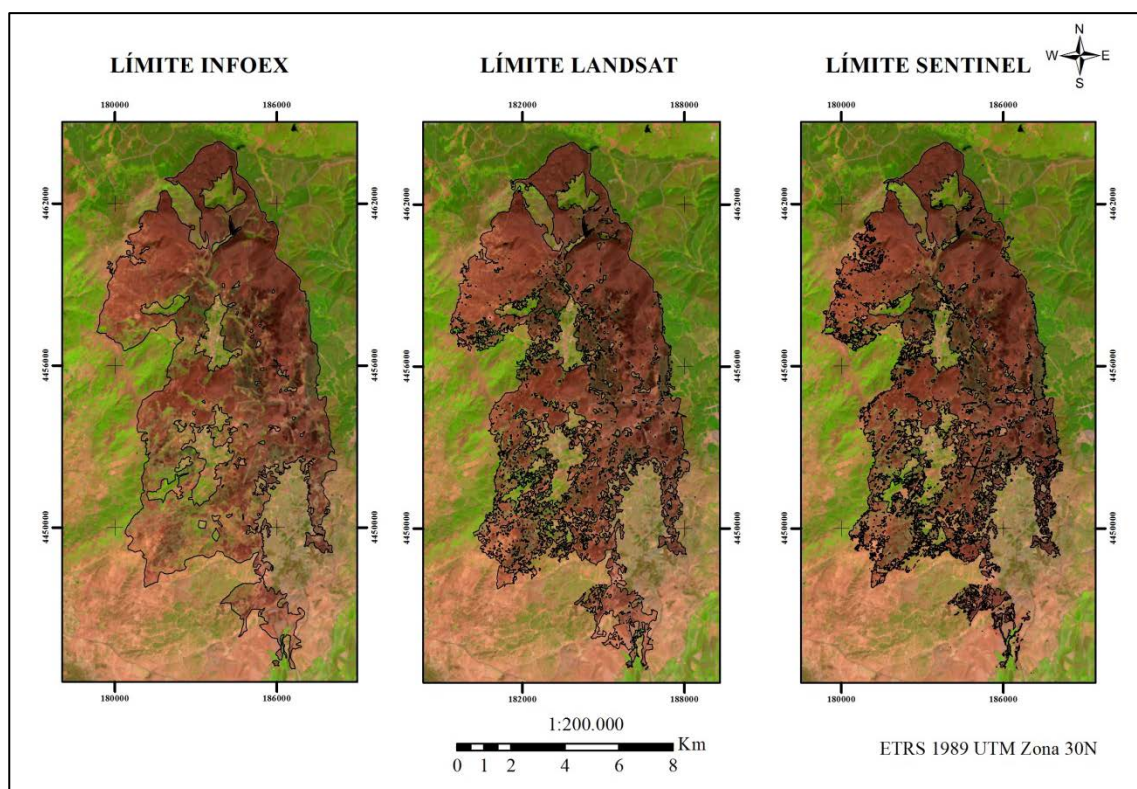


Figura 2: Comparativa de la suma de los límites previamente calculados con la medición oficial (combinación de bandas en falso color). Fuente: Elaboración propia.

La intersección entre los límites calculados por ambos satélites es de 6.295,68 ha, lo que supone una coincidencia del 91,35 % con la imagen Landsat y del 93,73% para la imagen Sentinel. Estos resultados nos demuestran que las metodologías de delimitación empleadas son adecuadas para los dos satélites, ya que se obtienen altas coincidencias de zonas quemadas (Figura 2).

4.2. Análisis del grado de daños a la vegetación

Antes del incendio, con los datos obtenidos con el cálculo del NBR el 87,85% de la superficie presentaba valores positivos, con diferentes intensidades de vegetación. Tras el fuego, la superficie con valores positivos se redujo al 13,20% de la superficie total, lo que equivalen a 1.028,61 ha, de las cuales más de la mitad coinciden con zonas que no fueron quemadas, y el resto corresponde en su mayoría a zonas de melojar quemadas con copas que no sufrieron daños de consideración.

La Figura 3 muestra el índice NBR antes y después del incendio, y el grado de severidad del mismo (por comparación de imágenes) obtenidas con Sentinel 2. Las especies más afectadas fueron las arbustivas que sufrieron el cambio más acusado en el índice NBR, sufriendo el 68% de los escobonales y el 72% de los brezales incendios de severidad media o superior. Los pinares sufrieron el incendio con severidad algo menor, aunque también relevante, localizándose el 62% de los mismos dentro de las categorías de severidad media o superior. En el caso de las frondosas la severidad fue menor, siendo el 48% de su superficie afectada con severidad media o superior. Por ello, se puede afirmar que las masas que sufren menor severidad son las frondosas, y las de mayor severidad las masas de matorral y pinares.

El matorral presenta alta combustibilidad por su baja humedad en verano y su alto contenido en aceites esenciales. Los pinares son conocidos por su alta combustibilidad debido al alto contenido de sustancias resinosas, y ayudada por la rápida propagación en focos secundarios, las piñas que saltan incendiadas desde los pinos a bastante distancia.

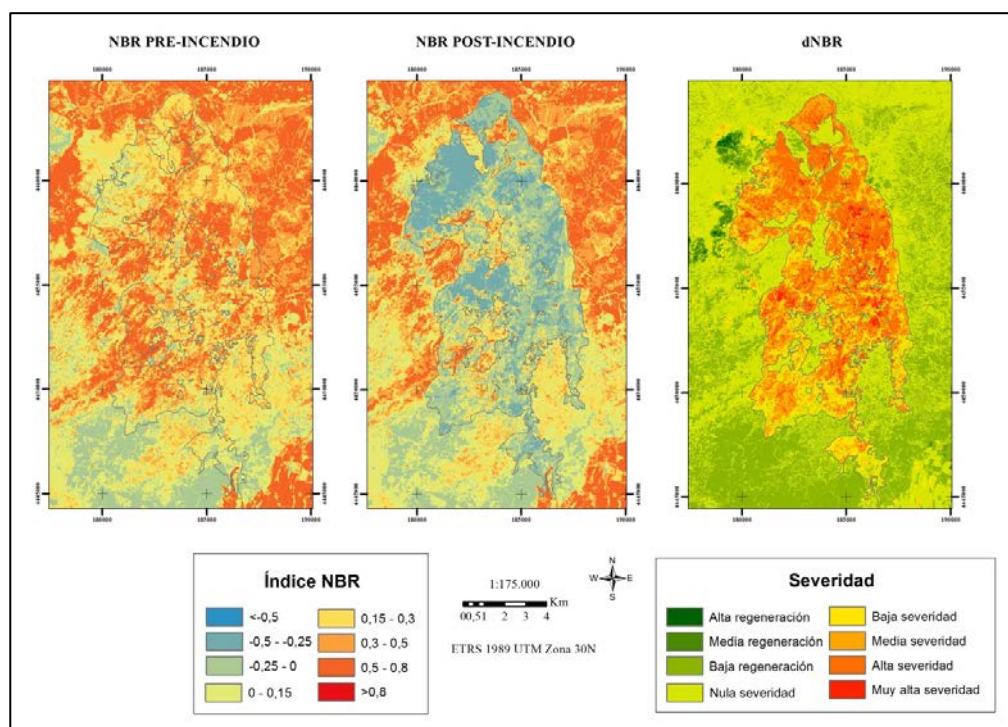


Figura 3. NBR anterior (5 de agosto de 2015) y posterior (21 de agosto de 2015) del incendio, y el grado de Severidad del mismo estimado a partir de la diferencia de índice NBR entre las 2 fechas (dNBR) a partir de las imágenes Sentinel. Fuente: Elaboración propia.

Los bosques de frondosas sufrieron el incendio con menor severidad. Las frondosas, especies de hoja ancha, forman bosques en Sierra de Gata fundamentalmente con robles melojos (*Quercus pyrenaica*) y castaños (*Castanea sativa*). Se localizan en zonas de mayor altitud y necesitan más humedad que otras especies de frondosas como las encinas o los alcornoques. Estos últimos son escasos en la zona incendiada, aunque buena parte del espacio ocupado por los pinos y matorrales de baja altitud podrían soportar formaciones arbóreas con encinas y alcornoques como especies dominantes. Las frondosas sufren un menor daño con el incendio por su mayor contenido de

humedad, detectado en los índices de vegetación de meses anteriores (NAVAZO et al, 2016), lo que dificulta la quema de sus tejidos, por su menor contenido en resinas y aceites esenciales, y la presencia de yemas durmientes que reponen la parte aérea muerta por el fuego.

Tabla 3. Porcentaje de superficie según la severidad del incendio (comparación de índice NBR antes y después del incendio), y tipo de vegetación. Fuente: Elaboración propia.

% Sup. Severidad	Pinares	Melojares	Escobonales	Brezales
Nula	4,5	7,75	5,72	5,1
Baja	33,89	44,16	26,55	22,93
Media	51,34	37,47	59,38	67,77
Alta	9,97	10,34	8,2	4,06
Muy alta	0,3	0,28	0,16	0,14

Se puede comprobar también con la Tabla 3 que son las zonas de matorral (escobonales y brezales) las que sufrieron un incendio más severo con valores de severidad media y alta en el 70% de su territorio, lo que indica que más de la mitad de la masa ha quedado totalmente calcinada o muerta. Se localizaban además en zonas llanas y laderas donde el fuego se propagó con mayor rapidez ayudado por las condiciones de relieve y atmosféricas.

En el caso de los pinares, la severidad del incendio fue la segunda más alta (60% de su superficie con severidad media y alta) debido a que se produce la calcinación de los pies quedando solo los fustes mayores, además de la quema completa del manto de acículas del suelo. En Gata existían grandes extensiones de pinar en unas altitudes superiores a 1.000 metros y sin ninguna infraestructura, especie o espacio que actuará como cortafuego natural en el interior de estas formaciones vegetales extensas. La fragmentación de las formaciones de pinar, dedicando parte de espacio a otros usos o formaciones (mosaico de usos del suelo), sería una forma de evitar la rápida propagación de los incendios por grandes extensiones de territorio.

Una parte importante de los melojares sufrieron un incendio de severidad baja (44% del melojar quemado), lo que confirma que es una especie más resistente al incendio, debido al alto contenido de humedad en sus hojas, su composición foliar y su tendencia a localizarse en laderas y vaguadas con mayor humedad ambiental y/o edáfica.

La severidad del incendio también fue evaluada mediante la comparación del índice NDVI antes y después del incendio, confirmando los resultados obtenidos con el índice NBR. La actividad fotosintética antes del incendio (2 de agosto 2015) entraba dentro de la categoría de Media o Superior (NDVI > 0,2) en un 88,61 % de la superficie total. Estos niveles son adecuados y típicos para pleno verano, cuando la sequía resta actividad fotosintética a la vegetación. Las zonas que tenían una actividad fotosintética menor (categoría Baja, NDVI 0,1 - 0,2) eran los matorrales esclerófilos, con escasa actividad vegetativa en los meses de verano (Figura 4).

En la imagen posterior al incendio, la actividad fotosintética es principalmente muy baja, debido a la pérdida o calcinación de las hojas que concentran la actividad fotosintética. De hecho, tras el incendio las superficies con NDVI en las categorías Media o Superior (NDVI > 0,2) sumaban sólo el 11,41% de la superficie (frente al 88,61% antes del incendio). Se puede apreciar que las zonas con mayor daño partían de una actividad fotosintética media (tonalidad amarilla) y evolucionaron con mayor intensidad a muy baja o nula (colores naranjas y rojos). La vegetación con media-baja actividad fotosintética se quema más intensamente por presentar bajo contenido de humedad, lo que favoreció su rápida combustión (Figura 5).

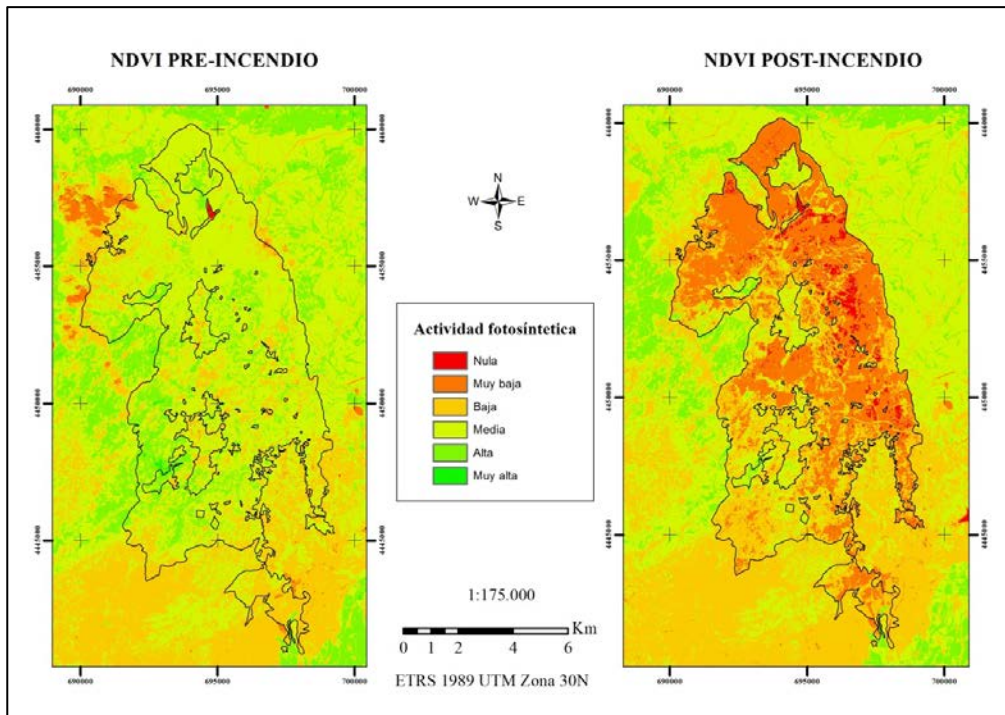


Figura 4. NDVI antes (5 de agosto de 2015) y después (21 de agosto de 2015) del incendio. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel.

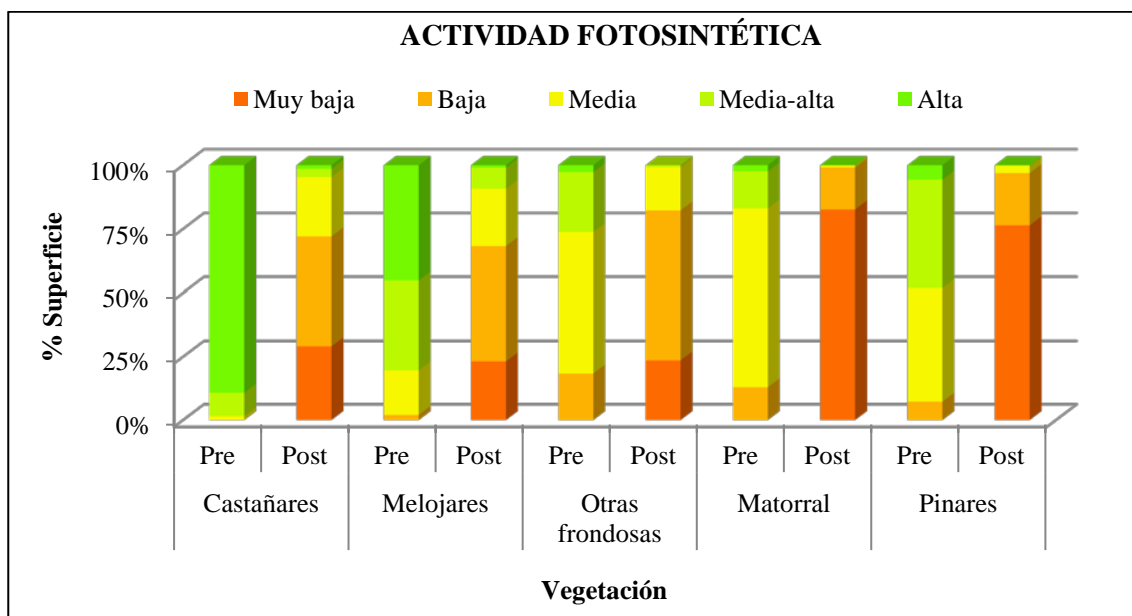


Figura 5. NDVI comparativo para las distintas cubiertas vegetales y momentos. Fuente: Elaboración propia.

La actividad fotosintética de los castañares (Figura 5) sufrió una grave reducción, de ser mayoritariamente alta pasó a baja o muy baja, principalmente por la pérdida de las hojas durante el incendio. Son árboles de hoja caduca que en agosto las mantenían con actividad fotosintética superior a otras especies esclerófilas (hojas duras y gruesas) y más resistentes a las temperaturas altas como las encinas o en esta zona los matorrales.

Los melojares redujeron su actividad fotosintética, pasando de las categorías media y alta de NDVI del 98% al 32% de su superficie. Esto indica la calcinación de las hojas en un alto porcentaje de la superficie afectada.

Las zonas de pinar, que ya presentaban valores discretos de actividad fotosintética antes del incendio, pasaron a presentar tras el incendio valores de actividad fotosintética muy baja en la mayoría de su superficie (más del 90% de su extensión pasó a los valores bajos, muy bajos o nulos), confirmando que estas masas vegetales experimentaron un incendio de alta severidad, con calcinación de sus hojas y ramas.

Los matorrales presentaban una actividad fotosintética previa más baja, típica del verano para estas formaciones, lo que favoreció la combustibilidad, y originó que la fotosíntesis se redujera al mínimo (sólo el 3% de su superficie mantenía valores de NDVI medios o superiores).

En resumen, el NDVI (actividad fotosintética) pasó de media-baja a muy baja-nula tras el incendio. La actividad fotosintética previa era media y baja debido en parte a las elevadas temperaturas y a la sequía propia del verano lo que favoreció la combustión y evoluciona a muy baja y muy baja en las zonas más castigadas por el incendio como las de matorral y pinares (Figura 5).

5. Conclusiones

A través del estudio de la zona quemada del verano de 2015 en la Sierra de Gata y sus efectos, se observa que el incendio se propagó rápidamente por las zonas de alta combustibilidad (pinares y matorrales) y continuidad, además de estar altamente favorecido por las condiciones de alta ventosidad, con vientos de sur a norte, propagándose el fuego en esa dirección, siendo este tipo de incendios los más frecuentes en las áreas del norte de Extremadura.

Los efectos del incendio se podrían haber reducido si las especies no fueran tan combustibles y la continuidad de las masas forestales más reducida. Para ello se propone el modelo de mosaicos de cultivos presentado por INDEHESA en sus investigaciones. El modelo consiste en romper la continuidad de las masas forestales de mayor inflamabilidad y combustible con la introducción de otros aprovechamientos del territorio a través de prácticas agroforestales que incluyan cultivos y manejo pastoral. Es decir, diversificar el paisaje de manera que incluya zonas de explotación maderera, de cultivo y de pastoreo. La heterogeneidad del paisaje tiene una ventaja muy clara, evita la propagación de incendios y reduce las dimensiones de estos. Además, se proponen áreas cortafuegos con vegetación de baja combustibilidad, que en estas áreas podrían ser de cubiertas vegetales autóctonas como los melojares que son los que menores daños sufrieron en este incendio analizado.

Laimetración oficial del incendio, calculada grosso modo a través de un vuelo aéreo, es más elevada que la obtenida con los índices espectrales desarrollados en este trabajo, debido a la falta de precisión al no tenerse en cuenta pequeñas zonas que no se quemaron como cultivos, prados, huertos, casas aisladas y algunas pequeñas manchas de monte. Laimetración obtenida en este trabajo es más precisa y se distinguen varias zonas sin quemar correspondientes a núcleos urbanos, zonas de viviendas aisladas, cultivos de regadío y una zona de baja vegetación en el paraje de la Cervigona, que es una cuenca cerrada y profunda, que no se calcinó ya que el fuego llegó por la cumbre de día y continuó dirección norte sin bajar al valle, en contraste con la delimitación oficial del INFOEX.

La delimitación final calculada obtenida de la suma de los perímetros calculados por distintos métodos y a partir de imágenes multiespectrales de dos satélites, presenta un mayor error relativo en Landsat 8, que es de 0,09 ha, y por ello, para distinguir correctamente un objeto, éste debe cubrir de 6 a 10 píxeles, por lo que no se tienen en cuenta superficies menores a 0,54 ha que realmente no están quemadas dentro de grandes incendios. De hecho, se considera que los incendios menores, con una superficie inferior a 3 o 4 ha, generalmente son difícilmente apreciables en las imágenes Landsat (SACRISTÁN, 2006). Estos cálculos, trasladados a las imágenes Sentinel se reducen a 0,01 ha de resolución, lo que indica que sólo superficies menores de 0,06 ha no son apreciables. Por ello, con este trabajo se ha mejorado la delimitación espacial del incendio de Gata, y supone un avance, en el estudio de incendios de menor magnitud.

También existe una diferencia de 615,06 ha (Landsat) y 1.116,19 ha (Sentinel) entre los perímetros (calculados y oficial) debido esencialmente a que mediante la teledetección sólo se tienen en cuenta las superficies realmente destruidas, sin ser considerada la severidad del fuego en

valores mínimos y que, por tener especies que previamente tenían poca actividad fotosintética, como los matorrales en verano, no producen grandes cambios antes y después del incendio (solo se comprueban en meses posteriores, cuando en invierno estos matorrales tampoco presentan actividad fotosintética cuando si deberían tenerla) en el cálculo de índices como el NDVI.

Por otro lado, el grado de severidad tras un incendio es un conocimiento necesario para la planificación de las actuaciones posteriores. La severidad de las formaciones de matorral y pinar fueron las más altas según el NBR, y las más leves las sufridas por las frondosas. Se puede concluir de lo anterior, que las masas de pinar son las que sufren mayor severidad por las características de sus hojas y también que las frondosas, sufren severidades variables que se recuperan con el tiempo, al iniciarse antes la regeneración natural de la vegetación.

Con los índices de NDVI se obtienen las especies que producen mayores cambios en cuanto a su actividad fotosintética, siendo los castaños que sufrieron una grave reducción, de ser mayoritariamente alta pasó a baja o muy baja, debido sobre todo a la pérdida total de las hojas durante el incendio. Son árboles de hoja caduca que en agosto mantenían actividad fotosintética superior a otras especies xerófilas más resistentes a las temperaturas altas (con hojas más oscuras y duras) como las encinas o en esta zona los matorrales. También las zonas de pinar sufrieron los mayores efectos de la combustión en sus hojas y ramas y por ello, se obtiene después del incendio en casi la totalidad de su superficie valores de actividad fotosintética baja y muy baja.

Las especies que experimentaron menos cambios son los matorrales, porque tenían una actividad baja, típica del verano, y por ello, no se observan cambios bruscos en la imagen posterior al incendio.

Como resultados obtenidos se ha comprobado con los Índices NDVI que tras el incendio la actividad fotosintética cambió a muy baja y nula, siendo en el ciclo anterior media y baja, debido en parte a las elevadas temperaturas y a la sequía propia del verano y evoluciona a baja y muy baja en las zonas más castigadas por el incendio como las de matorral y pinares.

Este proyecto nos ha demostrado la validez de estas metodologías con el usos de nuevas imágenes, como Sentinel y puede ser mejorado y ampliado a través del estudio a más largo plazo y exhaustivo de la regeneración de la vegetación, evaluando su respuesta a través del NDVI, con el fin de cuantificar la repercusión de los incendios forestales a largo plazo.

6. Bibliografía

- AYALA-CARCEDO, J. y OLCINA, J. (Coord.) (2002): *Riesgos naturales*. Barcelona, Ariel Ciencia.
- BASTARRIKA A., CHUVIECO E., y MARTÍN M. (2011): Mapping burned area from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sens Environ* (115), 1003-1012.
- BLACKBURN G., y MILTON E. (1995): Seasonal variations in the spectral reflectance of deciduous tree canopies. *Int J Remote Sens* (16), 709-720.
- BURGAN, R. E. y ROTHERMEL, R.C. (1984). *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System. Fuel Subsystem*. Ogden, Utah, USDA Forest Service.
- CAETANO M., MERTES L., y PEREIRA J. (1994): Using spectral mixture analysis for fire severity mapping. En ADAI (Ed.), *Proceedings of the 2nd Conference on Forest fire research*. Coimbra.
- CHUVIECO E. (2002). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- CHUVIECO, E. y MARTÍNEZ, J. (2003): Tipologías de incidencia y causalidad de incendios forestales basadas en análisis multivariante. *Ecología*, 17, 47-63.
- DE SANTIS A. y CHUVIECO, E. (2007): Burn severity estimation from remotely sensed data: performance of simulation versus empirical models. *Remote Sens Environ* (108), 422-435.
- DÍAZ, R. (2003): Efectos de la recurrencia de los incendios sobre la resiliencia postincendio de las comunidades vegetales de Cataluña a partir de imágenes satélite". *Ecosistemas* (3). vol. XII, núm. 3, Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante, España
- DUNCAN J., STOW D., FANKLIN J. y HOPE J. (1993): Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *Int J Remote Sens* (14), 3395-3416.

- ESPERANZA F. y ZERDA H. (2002): *Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales*. Santiago de Estero: Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales.
- GARCÍA, E., y PÉREZ-CABELLO F. (2015): Análisis de la regeneración vegetal mediante imágenes Landsat-8 y el producto MCD15A2 de MODIS: el caso del incendio de P Pindo (Galicia). En *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. 621-630). Universidad de Zaragoza.
- HUNT E., y ROCK B. (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sens Environ* (30), 43-54.
- JIA Z., YANG J., WU X., WANG F. y LIU, S. (2006). The sensitive determination of nucleic acids using a fluorescence-quenching method. *Luminescence*, 4 (21), 207-212.
- KEY C., y BENSON, N. (2006). Landscape Assessment (LA). Sampling and Analysis Methods, en FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. En Lutes,D. et al (Edits.), *Integration of Standardized Field Data Collection Techniques and Sampling Design With Remote Sensing to Assess Fire Effects*. Fort: Department of Agriculture, Forest.
- LE HOUEROU, H. (1973). Fire and vegetation in Mediterranean basin. *Proceedings of 13th Annual Tall Timber Fire Ecology Conference (13)*, 237-277.
- LUTES D., KEANE R., CARATTI J., KEY C., BENSON N., SUTHERLAND S., y GANGI L. (2006). FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 1 CD.
- MANZO, L. y LÓPEZ, J. (2013). Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post - incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS. *Geofocus. Rev. int. cienc. tec. inf. geogr.*, 2(13), 66-83.
- MICHALIJOS, M.P. y UBOLDI, J. (2013): Propuesta metodológica para la evaluación de áreas afectadas por incendios mediante el uso de imágenes satelitales (Sierra de la Ventana, Argentina). *Rev Geogr Norte Gd.*, 56: 223-234
- MILLER, A., y YOOL, S. (2002). Mapping forest post fire canopy consumption in several overstory types using multitemporal Landsat. *Remote Sens Environ* (82), 481-496.
- NAVAZO, G., NIETO, A. y MORENO, G. (2016): Análisis de incendios forestales mediante sistemas de información geográfica y Teledetección. Estudio de caso en sierra de Gata (2015). En Nieto, A. (Ed.) *Tecnologías de la Información Geográfica en el Análisis Espacial. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario*. Universidad de Extremadura.
- NIETO A., GARCÍA C. y FERNÁNDEZ, A. (2011): Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales, *Geofocus. Rev. int. cienc. tec. inf. geogr.*, 11, 375-408.
- PEREIRA J., SA A., SOUSA A., MARTÍN M., y CHUVIECO E. (1999). Regional-scale burnt area mapping in Southern Europe using NOAA-AVHRR 1 km data. En E. Chuvieco (Ed.), *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Springer-Verlag. Berlín.
- RÖDER, A., BÄRISCH, S., HILL, J. (2005): An interpretation framework for fire events and post-fire dynamics in Ayora / Spain using time-series of Landsat-TM and -MSS data, *New Strateg. Eur. Remote Sens.*, 51-60
- ROUSE J., HAAS R., SCHELL J. y DEERING D. (1973). Monitoring vegetation system in the great plains with ETRS. En *Third ERST Symposium*. NASA.
- SACRISTAN, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, nº 24, 13-41.
- WHELAN J. (1995). *The ecology of fire*. Cambridge: University Press.
- WHITE J., RYAN K., Y RUNNING S. (1996). Remote sensing of forest fire. *International Journal of Wildland Fire severity and vegetation recovery. Int J Wildland Fire*, 3(6), 125-136.
- WIMBERLY, M.C., REILLY, M.J. (2007): Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery. *Remote Sens Environ*, 108, 189-197.