

Utilización de imágenes hiperespectrales AHS para el estudio de zonas afectadas por incendios forestales

Using AHS hyperspectral images for the study of areas affected by forest fires

F. González-Alonso¹, M. Huesca², J. M. Cuevas¹, S. Martínez³, J. A. Gómez⁴ y E. de Miguel⁴
alonso@inia.es

¹Laboratorio de Teledetección, CIFOR – INIA, Ctra. A Coruña, km 7,5 28040, Madrid España.

²Dept. de Silvopascicultura, ETSI Montes, UPM, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España.

³Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Rural de la Junta de Castilla-La Mancha, Toledo, España.

⁴Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial INTA, Ctra Ajalvir s/n, Torrejón de Ardoz, 28850, Madrid, España.

Recibido el 04 de marzo de 2010, aceptado el 27 de abril de 2010

RESUMEN

Se lleva a cabo un análisis de la potencialidad de los datos hiperespectrales AHS para el seguimiento de áreas afectadas por los incendios forestales. El incendio estudiado se produjo en la provincia de Guadalajara en julio de 2005. El laboratorio de Teledetección del CIFOR-INIA dispone de cuatro imágenes, de 2005, 2006, 2007 y 2008, hiperespectrales AHS de la zona quemada. A partir de la imagen de 2005 se ha realizado una cartografía de superficie quemada y de grados de severidad de una gran precisión. El área quemada determinada ha sido de 12.983,50 ha de la que 2.544,84 han sido clasificadas como severidad baja, 3.152,57 como severidad alta y 7.280,08, como severidad media. Los resultados obtenidos muestran la gran utilidad de las imágenes AHS para el seguimiento de la regeneración de las áreas quemadas, suministrando una información muy valiosa para el gestor en la planificación de los futuros trabajos sobre el área afectada y en la evaluación de sus resultados.

PALABRAS CLAVE: AHS, incendios forestales, severidad, regeneración.

ABSTRACT

The present research studies the potentiality of hyperspectral data to monitor forest burned areas. The study area is located in Guadalajara province (Spain) where a large forest fire occurred in July 2005. The Remote Sensing Laboratory of CIFOR-INIA has four hyperspectral images of the affected area. Burnt area estimation and burnt severity analysis were carried out using the hyperspectral image of 2005. Total affected area accounted for 12.983,50 ha. This was classified into three categories: high severity (2.544,84 ha), median severity (7.280,08 ha) and low severity (3.152,57 ha). Images from 2006 to 2008 were used for monitoring of the post-fire vegetation recovery. The results show that AHS images were accurate in order to describe burned area and vegetation recovery behaviour. This information could be very useful for the future recuperation activities.

KEYWORDS: AHS, forest fire, severity, vegetation recovery

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales causan anualmente daños muy importantes tanto a nivel humano (pérdida de vidas) como en el medio ambiente (daños a la fauna y la flora), además favorecen el calentamiento global al emitir gases de efecto invernadero, concretamente dióxido y monóxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno. A su vez, el cambio climático está incrementando el riesgo de incendios forestales, tendencia que seguirá aumentando en las próximas décadas (Levine, 1991).

El último informe de IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático) 2007 prevé un aumento tanto en el número de incendios como en la superficie afectada por los mismos en los ecosistemas mediterráneos (Moreno, 2007), lo que unido a las irregularidades de las precipitaciones pueden agravar el riesgo de desertificación. El fuego también afecta notablemente al suelo a través del incremento de la temperatura y la deposición de cenizas, la desaparición de la vegetación y de los horizontes orgánicos total o parcialmente, modificando la acción de la lluvia sobre la superficie del suelo, lo que puede ocasionar dinámicas de degradación del mismo de una gran magnitud, modificar el ciclo hidrológico y favorecer la escorrentía.

Analizar la superficie afectada por un incendio es de vital importancia, la magnitud del impacto ecológico causado por un incendio forestal está directamente relacionada con la severidad del mismo. Se puede definir la severidad como la medida del nivel de daño ocasionado a la vegetación, materia orgánica y suelo. La severidad del fuego es un término descriptivo que integra los cambios físicos, químicos y biológicos que ocasiona un incendio en el ecosistema (White *et al.*, 1996). Tradicionalmente la superficie afectada por un incendio así como la severidad ocasionada por el mismo, ha sido cartografiada mediante trabajos de campo o reconocimientos desde un avión. El contorno exterior de la superficie afectada es habitualmente delimitado mediante la utilización de un GPS. La superficie afectada por un incendio así como la severidad del mismo, se puede cartografiar de una forma rápida, económica y efectiva mediante el uso de técnicas de teledetección, que proporcionan una cobertura espacial y temporal adecuada para este tipo de estudios, reduciendo el costoso trabajo de campo (Chuvienco y Martín., 2004). La integración de datos espaciales en un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite almacenar y procesar una gran cantidad de in-

formación, así como llevar a cabo análisis espaciales con información procedente de varias fuentes y con distintos formatos (Sunar & Özkan, 2001).

Las imágenes de satélite han sido ampliamente utilizadas para la estimación y cartografía de superficies quemadas (Huesca *et al.*, 2008; Merino-de-Miguel *et al.*, 2005; González-Alonso *et al.*, 2005, Martín *et al.*, 2002, Barbosa *et al.*, 1999), sin embargo la discriminación de distintos grados de severidad dentro del área quemada no ha sido tan frecuente. En los estudios de severidad del fuego a partir de datos de satélites se han empleado principalmente imágenes de media y/o alta resolución espacial, como las proporcionadas por los satélites Envisat, Landsat, Spot etc. (Roldán-Zamarrón *et al.*, 2006, Millar & Thode, 2007; De-Santis & Chuvienco, 2007, González-Alonso *et al.*, 2007). Recientes avances en la tecnología de los sensores han conducido al desarrollo de instrumentos hiperespectrales, capaces de medir simultáneamente la radiación reflejada en una amplia gama de longitudes de onda. En estos sistemas, se adquiere información en un gran número de bandas espectrales para una misma zona de la superficie terrestre, facilitando así la identificación de ciertas características de las cubiertas vegetales que sólo serían perceptibles en determinadas regiones del espectro electromagnético. Hasta ahora no se han realizado muchos estudios que utilicen datos hiperespectrales en la cartografía de superficies quemadas y grados de severidad (Parra-Uzcátegui, 2005). La teledetección también es una herramienta de gran utilidad para el seguimiento de la vegetación post-incendio (Díaz-Delgado *et al.*, 1998, Riaño *et al.*, 2002), permitiendo al gestor tomar decisiones sobre las futuras intervenciones necesarias sobre la zona afectada.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es obtener una cartografía precisa de la superficie quemada en diferentes grados de severidad así como realizar un seguimiento detallado de la regeneración en la zona. Esta información permitirá extraer conclusiones que puedan facilitar la toma de decisiones en la gestión forestal post-incendio.

ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio se centra en el incendio forestal que se produjo en el Rodenal de la provincia de Guadala-

jara, entre los días 16 y 21 de julio 2005. El fuego se inició en el paraje conocido como la Cueva de Casares, en el municipio de la Riba de Saelices, a causa de una negligencia en una barbacoa. La magnitud y gravedad de este incendio hace que su estudio presente un gran interés, ya que podrán extraerse conclusiones que ayudarán a comprender los diversos factores que provocaron un desenlace tan trágico desde el punto de vista humano y ecológico. Dichas conclusiones ayudarían a prever y tratar de evitar situaciones de alto riesgo de incendios en el futuro.

El área afectada cuenta con una orografía complicada, caracterizada por un entramado de valles encajados con pendientes importantes, a esto hay que sumarle que durante los días del incendio las condiciones climáticas fueron muy desfavorables, con una humedad relativa que llegó a bajar del 20 por ciento, los vientos llegaron a ser de 30 a 50 kilómetros por hora y la temperatura superior a 30 grados centígrados. Estos factores favorecieron enormemente la propagación del incendio, dificultando notablemente la lucha contra el mismo. Según estudios realizados por expertos, parece que dicho incendio se produjo bajo algunas de las condiciones más adversas que se han podido dar en la zona desde que se tienen registros climatológicos. También es importante destacar la alta continuidad espacial de la vegetación presente en la zona, dominada por *Pinus pinaster* Ait. y *Cistus laurifolius* L. entre otras especies. La superficie afectada alcanza las 12.887 ha, de las que 3.147 pertenecen al Parque Natural del Alto Tajo lo que representa un 2,9 por ciento de la superficie total del parque.

La vegetación afectada corresponde principalmente a un pinar de pino resinero con un sotobosque de rebollo y quejigo, y a un matorral acompañante dominado por jara, estepa y brezinal. El incendio alcanzó carácter de tragedia nacional debido a la muerte de once personas pertenecientes a un retén que perecieron al llevar a cabo las tareas de extinción del mismo.

MATERIAL

Imágenes AHS

El laboratorio de Teledetección del CIFOR-INIA ha adquirido cuatro imágenes de la zona quemada, captadas por el sensor hiperespectral aerotransportado AHS (Advanced Hyperspectral Sensor) del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). El sensor AHS es un sensor hiperespectral aeropor-

tado de barrido mecánico (whiskbroom scanner). El sensor fue adquirido en el año 2003 por el INTA a la empresa Sensytech actualmente Argon ST (www.argonst.com). El AHS se opera desde la aeronave CASA C-212 del INTA, adecuadamente equipada para realizar campañas de teledetección. El sensor adquiere la imagen mediante el barrido de un espejo giratorio, con óptica primaria reflectiva, con IFOV (Instantaneous Field of View) único y común para todas las bandas. El AHS posee 80 bandas, un FOV de 90° y un IFOV de 2.5 mrad. La velocidad de barrido del espejo se ajusta a diferentes valores: 6.5, 12.5, 18.7, 25, 31.2, 35 rps. Una vez captada la energía procedente del terreno, el sensor divide dicha energía en cinco puertos ópticos que cubren las regiones espectrales VIS/NIR, SWIR, MIR y TIR, cuyos anchos de banda varían según la región espectral. El sensor digitaliza la información en 12 bits y cada línea de imagen AHS está compuesta por 750 píxeles. Posee dos fuentes de referencia internas, dos cuerpos negros cuyas temperaturas son seleccionables. Estos cuerpos negros son observados y registrados en cada línea imagen, proporcionando un valor de radiancia cero en los canales reflectivos (PT1, PT2 y PT2A) y niveles de referencia para la calibración de los canales emisivos (PT3 y PT4).

El primer vuelo se llevó a cabo el 6 de octubre de 2005, antes de las primeras lluvias, por lo que refleja perfectamente como quedó la zona tras el paso del fuego.

Esta imagen hiperespectral constituye la información más completa de la zona afectada de la que se puede disponer actualmente en Europa. La campaña se compuso por siete pasadas paralelas, con rumbos que coinciden con el plano solar de forma que se eviten o en todo caso minimicen posibles problemas de iluminación diferencial. Además los ejes de vuelo de las pasadas se trazan para que las imágenes posean cierto solape que permitirá componer a posteriori un mosaico de imágenes. La altura de vuelo y las revoluciones de giro del espejo se configuran para que la resolución espacial teórica de las imágenes AHS sea de 3,5 metros. Las otras tres campañas se llevaron a cabo el 6 de octubre de 2006, el 25 de septiembre de 2007 y el 15 de septiembre de 2008 (figura 1). Para mantener estables las condiciones de adquisición de las imágenes se conserva la configuración de vuelo para cada una de las campañas, manteniendo los rumbos de las pasadas y la hora de adquisición de las imágenes de forma que se minimicen los efectos que las diferencias en la iluminación pueden producir sobre las imágenes.

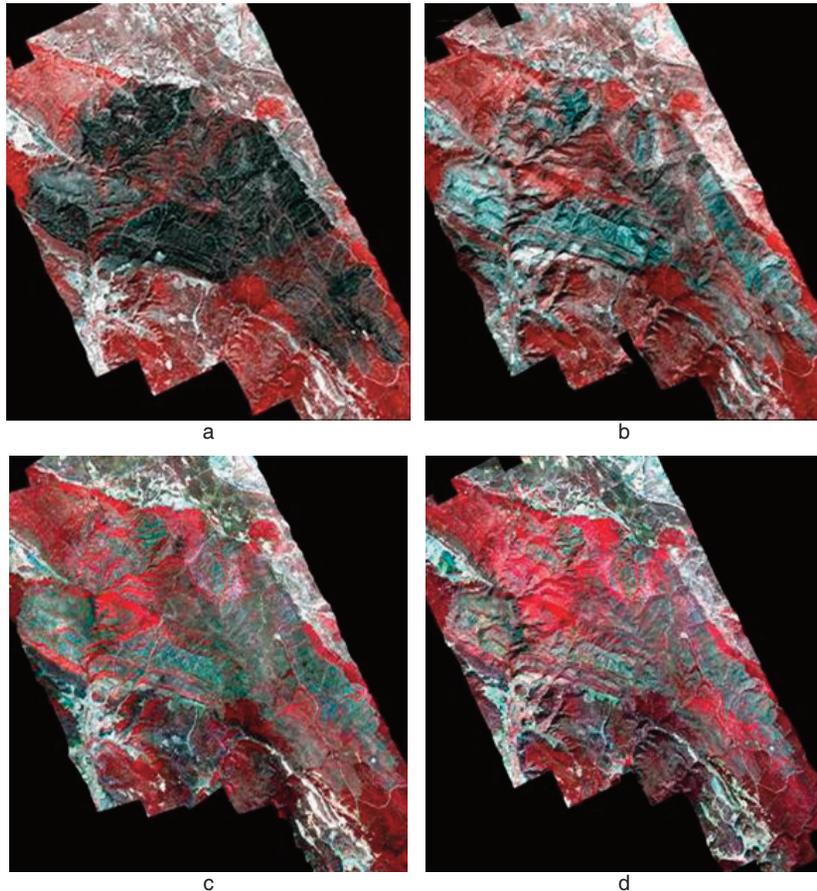


Figura 1. Mosaico de las 7 pasadas de las imágenes AHS captadas por el sensor hiperespectral aerotransportado AHS del INTA el 6 de octubre de 2005 (a), el 6 de octubre de 2006 (b), el 28 de septiembre de 2007 (c) y el 15 de septiembre de 2008(d).

Imágenes MODIS

También se ha dispuesto de una serie temporal de imágenes MODIS adquiridas por el satélite TERRA lanzado en 1999. Estas imágenes han sido seleccionadas por ser las que tienen una mejor relación entre resolución temporal y espacial, lo que las hace apropiadas para el estudio temporal de la dinámica de la vegetación. De los productos proporcionados por el servidor de MODIS, se ha seleccionado el MOD09A, que se compone de siete bandas de reflectividad superficial que abarcan la zona del espectro que va desde el azul hasta los canales SWIR (las bandas están centradas en las siguientes longitudes de onda: 648 nm, 858 nm, 470 nm, 555 nm, 1240 nm, 1640 nm, y 2130 nm, correspondiendo a las bandas azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, SWIR1, SWIR2 y SWIR3 respectivamente) con una resolución espacial de 500 metros y una resolución temporal de ocho días. Este producto proporciona

una estimación de la reflectividad superficial de cada banda como si esta hubiera sido medida al nivel del suelo, suponiendo que no hubiera distorsiones atmosféricas ni absorción de la misma. La serie temporal utilizada va desde febrero del año 2000 a diciembre del año 2007 y será utilizada para analizar los patrones seguidos por el regenerado a nivel monte.

METODOLOGÍA

Campañas de campo

Se han realizado tres visitas al área afectada por el incendio del Rodenal, los días 6, 17 y 25 de octubre de 2005, cada una de ellas de uno o más días de duración. En la primera de estas visitas se realizó un reconocimiento general del área afectada por el incendio y se tomaron datos destinados a la elaboración de un muestreo del área. En las siguientes

visitas se tomaron los datos de campo en las parcelas elegidas siguiendo el protocolo de toma de datos de campo elaborado previamente.

Debido a las limitaciones de tiempo y personal fue necesario plantear una campaña de muestreo que permitiera evaluar las variables necesarias de una forma rápida, para poder cubrir el máximo de superficie. Asimismo, fue necesario estratificar la superficie de estudio según los criterios que se consideraron más convenientes (tipo de vegetación, grado de afección, cercanía a carreteras) para muestrear las zonas de mayor interés. Se trató de muestrear todas las combinaciones posibles de grado de severidad y tipo de vegetación previa al incendio. Se tomaron dos tipos de puntos de muestreo: Los puntos A, definidos como los localizados en zonas quemadas para estimar el grado de severidad causado por el incendio, y los puntos B, tomados en zonas no quemadas, utilizados para definir zonas de entrenamiento (endmembers) de vegetación sana y suelo desnudo. En las parcelas tipo A se tomaron las coordenadas GPS y se estimó el grado de severidad. En las parcelas tipo B se tomaron las coordenadas GPS y se recogieron los siguientes datos referidos a la vegetación: composición florística, % de cobertura, tipo estructural, altura de la hojarasca y mantillo (hasta llegar al suelo mineral). Posteriormente en gabinete se extrajeron los datos de la vegetación pre-incendio en las parcelas tipo A. La información de campo será utilizada para validar la cartografía obtenida de los grados de severidad del incendio.

Para estimar los grados de severidad se han seguido los siguientes criterios: se define como **severidad cero** (parcelas tipo B) cuando no hay efectos aparentes del paso del fuego sobre la vegetación. **Severidad baja** cuando, como media, menos del 50 % de la cobertura vegetal (arbórea y sotobosque) ha sido afectada. Siempre menos del 30% de los árboles (tanto dominantes como codominantes) están completamente quemados. Pueden encontrarse algunos árboles intactos, sólo con la base del tronco quemada o el tercio inferior de su copa sofocada y generalmente muerta. Pueden aparecer islas de vegetación sin afectar. La cubierta principalmente afectada suele ser la arbustiva y herbácea. **Severidad media** cuando entre el 50 y el 90 % de promedio de la vegetación ha sido afectada por el fuego. Siempre menos del 75% de los pies arbóreos están totalmente quemados: la mayor parte de los árboles pequeños están muertos, aunque algunos pueden retener hojas verdes y sobrevivir. Los árboles dominantes pueden tener hasta 2/3 de su copa quemada.

La mayor parte o la totalidad del sotobosque aparece muerto (aunque pueda tener capacidad de rebrote). Aparecen los restos visibles y en pie de la mayor parte de los tallos quemados de las plantas leñosas de porte medio y alto (coscojas, enebros). Finalmente se define como **severidad alta** cuando más del 90% de la vegetación que constituye el área aparece totalmente quemada y muerta (aunque pueda tener capacidad de rebrote). En ocasiones, los tallos de los matorrales han sido completamente consumidos, apareciendo sólo su base o las partes más inferiores. Los árboles pueden mantener o no las hojas en las ramas.

En el año 2007 se llevó a cabo un muestreo sistemático con un total de 2468 parcelas con una intensidad de muestreo de 1 parcela cada 4 ha sobre una superficie a inventariar de 8295,25 ha y 1 parcela por cada 2 ha sobre 773,31 ha, que corresponden a las zonas de refuerzo de pinar. Las parcelas fueron cuadradas de 2x2 m para la estimación de la regeneración de las coníferas y circulares de 3 m de radio para la medición de la fracción de cubierta para las frondosas. Este trabajo fue proporcionado por la Junta de Castilla La Mancha al laboratorio de Teledetección del CIFOR-INIA y realizado por la empresa Tragsa. La campaña de campo se llevó a cabo durante los meses de agosto a octubre de 2007.

En los años 2005, 2007 y 2008, coincidiendo con los vuelos, se realizaron campañas de recogida de espectros de referencia para la corrección de las imágenes.

Los espectros utilizados para corregir las imágenes han de ser tomados en superficies lo suficientemente amplias para poder seleccionar un píxel puro de la imagen y lo más homogéneas posible. Se seleccionaron tres tipos de superficies de referencia que son las siguientes: una pista de deportes, un camino de grava y un suelo desnudo. El radiómetro utilizado para la recogida de espectros ha sido ASD Field Spec 3. Este es un radiómetro portátil diseñado para recoger datos de reflectividad solar, luminosidad e irradiancia en el rango VIS/NIR/MIR. En cada tipo de superficie anteriormente citada se han llevado a cabo tres series de recogida de espectros tomando diez mediciones en cada una de dichas series. Es importante calibrar con el blanco tanto al principio de la primera serie como entre serie y serie. Posteriormente en gabinete se analizaron una a una las distintas mediciones, descartando aquellas que claramente se veían erróneas. Tomando como espectros finales la media de las tres series.

Imágenes hiperespectrales

Partimos de los datos brutos del sensor. Es decir, imágenes AHS que han sido importadas desde el formato binario original en el que se almacenan a un formato de imagen. Estas imágenes no han sufrido ninguna transformación radiométrica ni geométrica por lo que la información que contienen sus píxeles son simplemente los Niveles Digitales (ND) grabados en el momento de adquisición. El primer paso fue la corrección radiométrica de las imágenes, para ello es necesario aplicar los parámetros de calibración del sensor, calculados en laboratorio de forma que el valor de cada píxel en este caso es la radiancia en $nW/(cm^2 sr nm)$ recibida en el sensor. Este proceso fue realizado por el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial).

El siguiente paso fue la corrección geométrica, para obtener imágenes con valores de radiancia en el sensor georreferenciadas, para ello se utilizó el software PARGE (PARAmetric GEocoding). Para evaluar y corregir los posibles errores de posición cometidos en la georreferenciación de las imágenes hiperespectrales AHS en este estudio multitemporal, se ha utilizado un método de correlación por ventanas móviles a lo largo de las imágenes entre las que se pretende evaluar su ajuste geométrico desarrollado por Prado *et al.*, (2007). Reducir los errores en la geolocalización de los píxeles es de gran importancia en los estudios multitemporales.

Por último se realizó una corrección atmosférica utilizando el software ATCOR4. Se intentó aplicar el módulo “rugged terrain” debido a la orografía complicada de la zona de estudio. Analizando los resultados obtenidos se observó una gran cantidad de artefactos por lo que se decidió aplicar una corrección topográfica previa, para eliminar el efecto de la topografía sobre las imágenes y así poder aplicar el módulo “flat terrain” con el que se obtuvieron mejores resultados. La corrección topográfica permitió compensar las diferencias de iluminación solar, debidas a la variación altitudinal del terreno. Las zonas de umbría presentaban menos reflectividad de lo que debieran, mientras que las zonas en solana presentaban una reflectividad más alta de lo esperado. La corrección topográfica se llevó a cabo con el software ATCOR4 y el módulo TOPOCOR. Para la aplicación de este módulo los input necesarios, además de la propia imagen a corregir, son: el modelo digital del terreno que se utilizará para tener información sobre la elevación, las pendientes y la orientación. Además es necesario introducir varia-

bles de la geometría solar en el momento del vuelo, como la fecha, la hora y los ángulos zenital y azimutal, entre otros. La corrección atmosférica se lleva a cabo para intentar eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por parte de los gases y partículas en suspensión de la atmósfera, para que los datos obtenidos a partir de las imágenes sean independientes de las condiciones atmosféricas. Para aplicar el módulo “flat terrain” es necesario introducir una serie de parámetros para simular la atmósfera más probable de ese día. Por ejemplo, se deben introducir parámetros como la fecha y hora de las pasadas, variables de la geometría solar y del vuelo, como la altura de vuelo, del terreno, el rumbo geográfico, y los ángulos zenital y azimutal solares. Además hay que indicar el tipo de sensor, los parámetros de calibración y finalmente información sobre las condiciones atmosféricas el día del vuelo, como tipo de aerosoles, concentración de los mismos, vapor de agua en la atmósfera, visibilidad, etc. Finalmente para obtener una buena coherencia temporal de las cuatro imágenes se realizó un procedimiento de homogeneización de la reflectancia de las mismas utilizando la metodología de “empirical line”, a partir de espectros de zonas invariante tomados en la campaña de campo de 2008. El método “empirical line” hace un ajuste lineal utilizando firmas espectrales de superficies “brillantes” y “oscuras” dentro de la zona de estudio. Es importante utilizar superficies invariantes (al menos durante el periodo de estudio 2005-2008) para poder aplicar los ajustes obtenidos en la imágenes de 2008 a las campañas de los años anteriores. Finalmente se formaron los mosaicos de cada año con las siete pasadas totalmente corregidas.

Imágenes MODIS

Las imágenes MODIS se han descargado gratuitamente del “NASA Distributed Active Archive Center” (DAAC) en un formato HDF-EOS (Hierarchical Data Format – Earth Observation System), desarrollado en 1987. El primer paso del pre-procesamiento de las imágenes corresponde a la reproyección de las imágenes MODIS, utilizado el software “Modis Reprojection Tool” (MRT) desarrollado por el equipo de MODIS. Las imágenes han sido reproyectadas al sistema de coordenadas UTM uso 30N datum WGS-84. Como último paso, se calculó el índice de vegetación normalizado NDVI de cada una de las fechas construyendo de esta forma las series temporales. En total se han descargado y procesado un

total de 361 imágenes. Para la **delimitación del perímetro** y la estimación de la superficie afectada se realizó un análisis de Matched Filtering sobre la imagen hiperespectral de 2005, para discriminar la zona quemada. Este método asigna a cada píxel un valor de probabilidad de pertenecer a una clase. Dicha clase se ha definido con un conjunto de píxeles de entrenamiento o *endmembers*, que se definieron mediante la selección de 100 píxeles de la imagen que presentaban un grado de quemado considerable. A continuación se clasificó la imagen de forma no supervisada utilizando el algoritmo ISO-DATA, modificándose los umbrales inferiores del histograma hasta alcanzar la máxima precisión posible. Este método ha sido seleccionado por los buenos resultados obtenidos en trabajos anteriores (Merino-de-Miguel *et al.*, 2005).

La **severidad del incendio** ha sido estimada mediante la utilización del índice Normalized Burn Ratio (NBR), calculado a partir de la imagen hiperespectral de 2005. Dicho índice está basado en la combinación de las bandas del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio utilizando la siguiente expresión (ecuación 1):

$$NBR = (\rho_{irc} - \rho_{im}) / (\rho_{irc} + \rho_{im}) \quad (1)$$

Donde ρ_{irc} y ρ_{im} son las reflectancias del infrarrojo cercano (0,6 μm) e infrarrojo medio (1-2,5 μm) respectivamente. La banda del infrarrojo cercano es sensible a la actividad fotosintética de la vegetación mientras que la del infrarrojo medio proporciona información del contenido de agua, esto hace que el índice NBR sea especialmente sensible a la detección de cambios en la vegetación viva y el contenido de humedad, así como de algunos cambios producidos en el suelo como consecuencia del fuego (Key y Benson, 2005). El índice NBR tiene valores entre -1 y +1. Valores bajos del índice indican severidad alta, mientras que valores altos indican severidad baja o inexistente.

El **estudio de la regeneración** se ha realizado mediante el empleo del índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI (Rouse *et al.*, 1973), utilizando tanto las 4 imágenes hiperespectrales como la serie temporal MODIS. Dicho índice se basa en la combinación de las bandas roja e infrarroja cercana del espectro electromagnético. El NDVI detecta la actividad fotosintética o grado de verdor existente en un píxel, permitiendo así el estudio del estado de la vegetación. NDVI varía entre -1 y 1, cuanto más elevado sea el índice, mayor será

la actividad fotosintética registrada en el píxel y de forma contraria cuanto más bajos sean los valores de NDVI mayor será la presencia de suelo desnudo o menos activa se encuentra la vegetación.

El NDVI está formulado de la siguiente forma (ecuación 2):

$$NDVI = (\rho_{irc} - \rho_r) / (\rho_{irc} + \rho_r) \quad (2)$$

Donde ρ_{irc} y ρ_r representan las reflectancias del infrarrojo cercano y rojo respectivamente. Dichas bandas están centradas en las longitudes de onda de 0,8 μm la del infrarrojo cercano y a 0,6 μm la del rojo. Para hacer un análisis más exhaustivo del grado de cobertura vegetal en el área de estudio, se ha llevado a cabo un *spectral unmixing*, sobre las 4 imágenes hiperespectrales, tomando como *endmembers* espectros puros de suelo desnudo y vegetación.

El *Spectral Unmixing* es un método ampliamente utilizado para estimar en qué proporción cada cubierta o componente básico (*endmember*) forma parte de un píxel. Antes de descomponer espectralmente los datos originales, es necesario definir las firmas espectrales de los componentes básicos. Para poder visualizar los píxeles más puros y obtener dichos componentes básicos, se aplicó el método *Pixel-Purity-Index* (PPI), sobre la transformada *Minimum Noise Fraction* (MNF) de la imagen original. La transformación MNF permite eliminar el ruido de la imagen, determinando así la dimensión real de la misma. Por su parte, PPI es un método para localizar los píxeles más puros en imágenes multispectrales o hiperespectrales. Tras identificar estos píxeles más puros, se aplicó la transformada inversa MNF a dichos píxeles y se verificó visualmente su respuesta espectral. Estos píxeles más puros correspondieron a los componentes básicos de la imagen, de ellos se han seleccionado los que corresponden claramente a cobertura de vegetación máxima y a suelo desnudo.

RESULTADOS

Área quemada

Utilizando la metodología anteriormente expuesta para la delimitación del área afectada por el incendio se obtuvo una estimación de 12.983,50 ha (figura 2), cifra muy próxima a la proporcionada por el ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (12.887,37 ha)

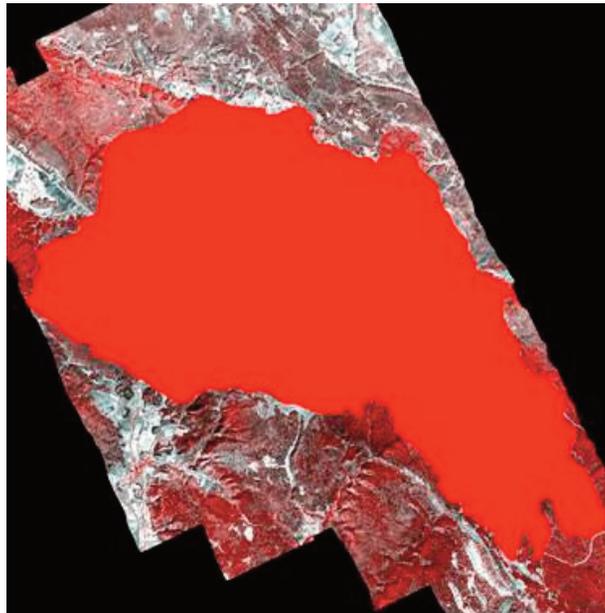


Figura 2. Mosaico de las 7 pasadas de las imágenes AHS tomadas el 6 de octubre de 2005, y superficie clasificada como superficie afectada por el incendio en rojo

Severidad

La estimación de los grados de severidad se ha realizado a partir del índice NBR (ecuación 1), explicado anteriormente. Como consecuencia de la alta resolución espectral de las imágenes AHS, antes del cálculo de dicho índice se realizó un análisis estadístico para la determinación de qué bandas representaban mejor las zonas del espectro infrarrojo cercano e infrarrojo medio que intervienen en este índice. El criterio elegido para dicha selección de bandas, está basado en aquéllas que presenten un menor ruido y una máxima variabilidad. Los resultados obtenidos muestran que la banda que mejor representa la zona del espectro del infrarrojo cercano es la banda 13 centrada en una longitud de onda de $0,8 \mu\text{m}$, y para el infrarrojo medio las bandas 31, 38 y 41 centradas en unas longitudes de onda de $2,13$, $2,22$ y $2,25 \mu\text{m}$ respectivamente. De esta forma se calcularon tres índices de severidad denominados NBR1, NBR2 y NBR3. Se realizaron tres clasificaciones de grados de severidad distintas correspondientes a estos tres índices de severidad calculados. Utilizando el trabajo de campo como validación de la cartografía obtenida se comprobó que la clasificación más precisa se alcanzaba con el índice de severidad NBR1 calculado a partir de la banda 31 del infrarrojo medio centrada en $2,13 \mu\text{m}$., obteniéndose una fiabilidad del 70%.

En la Figura 3 se puede observar la distribución espacial de la severidad del incendio del Rodenal de Guadalajara. La severidad se ha definido como el impacto del fuego sobre la vegetación distinguiéndose tres grados de severidad. Severidad baja representada por los colores blancos, severidad media con tonos amarillos y finalmente los tonos anaranjados representan las zonas de severidad alta. La severidad predominante es la clasificada como severidad media representada por $7.286,08\text{ha}$ (56,12%) seguida por las zonas de severidad alta con $3.152,57\text{ha}$ (24,28%), siendo la superficie clasificada como severidad baja la que comprende una menor superficie con $2.544,85\text{ha}$ (19,60%).

Analizaremos ahora la severidad a nivel monte (figura 4) por ser ésta la unidad de gestión utilizada por los técnicos forestales. Para ello se han llevado a cabo dos tipos de análisis, por un lado se ha determinado el tanto por ciento de superficie afectada, a nivel monte, por tipo de severidad, utilizando los grados de severidad previamente definidos. Este análisis nos permite tener una idea del nivel de daño ocasionado por el fuego en el monte. Por otro lado se ha realizado un análisis cuantitativo de la severidad mediante la estimación del valor medio del índice NBR a nivel monte (figura 5), para ello se han utilizado análisis estadísticos de regiones de interés (ROIs) definidas a partir de la cartografía proporcionada por la Junta de Castilla La-Mancha.

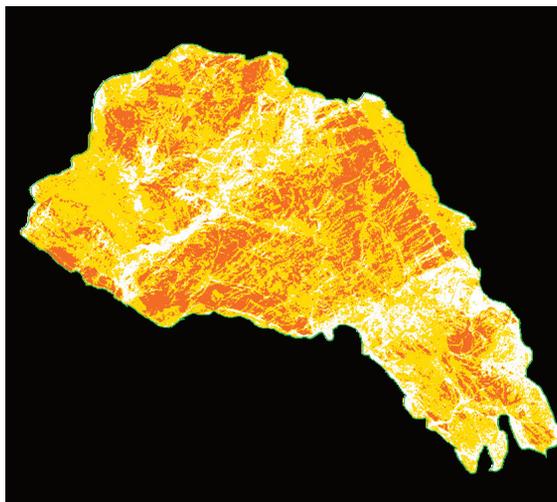


Figura 3. Grados de severidad. Naranja: severidad alta, amarillo: severidad media, blanco: severidad baja

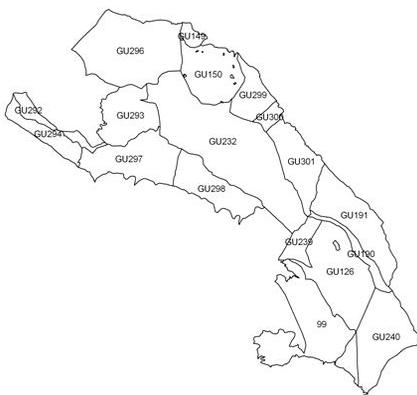


Figura 4. Montes de utilidad pública afectados por el incendio de Guadalajara de 2005, y montes GU240 y 99 no afectados por el incendio pero utilizados como montes de referencia

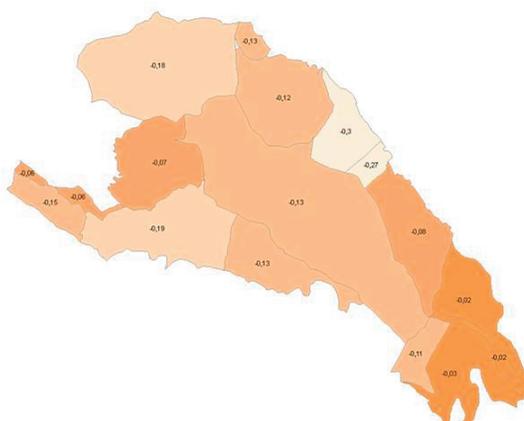


Figura 5. Severidad media a nivel monte estimada a partir del índice NBR. La graduación de color representa desde los valores de severidad más altos en tonalidades claras a los más bajos en tonalidades más oscuras

A continuación se muestra una tabla resumen (tablas 1 y 2) con los resultados obtenidos en el análisis de severidad a nivel monte. Es importante destacar en el análisis del tanto por ciento de superficie afectada,

a nivel monte, por tipo de severidad, que el tanto por ciento de superficie calculado es respecto a la superficie de monte que se ha clasificado como quemada no respecto a la superficie total del monte.

ID	Severidad Alta(%)	Severidad Media (%)	Severidad Baja (%)
GU190	9.23	53.5	37.27
GU191	13.48	36.42	50.1
GU126	14.92	53.69	31.39
GU292	17.34	53.23	29.43
GU293	16.53	54.06	29.41
GU301	26.89	38.49	34.62
GU239	19.61	64.06	16.33
GU150	18.32	54.82	26.86
GU149	17.19	70.45	12.36
GU232	23.07	59.33	17.6
GU298	29.52	50.71	19.77
GU294	27.44	63.62	8.95
GU296	33	55.97	11.03
GU297	42.36	45.29	12.36
GU300	56.15	41.54	2.31
GU299	63.38	35.55	1.08

Tabla 1. Relación del tanto por ciento de superficie afectada a nivel monte de cada grado de severidad, obtenidos de las imágenes AHS

ID	NOMBRE	TÉRMINO MUNIC	CUP	NBR
GU240	Navavilla y Solana de Pelancosa	Cobeta	240	0
GU190	Entredicho	Selas	190	-0.02
GU191	El Pinar	Selas	191	-0.02
GU126	Dehesa Común	Cobeta	126	-0.03
GU292	Sierra del Gallubar y Vigorra, Los Milagros, Vallejo del Cabrero y las Ocejillas	Anguita	292	-0.06
GU293	El Bosque del Buen Desvío	Anguita	293	-0.07
GU301	Dehesa de la Mata	Anquela del Ducado	301	-0.08
GU239	Los Casares	Cobeta	239	-0.11
GU150	Pinar	Ciruelos del Pinar	150	-0.12
GU149	Dehesa	Ciruelos del Pinar	149	-0.13
GU232	Dehesa Común de Solanillos	Mazarete	232	-0.13
GU298	Ceño Negrillo y la Virgen	Ablanque	298	-0.13
GU294	El Pinar	Anguita	294	-0.15
GU296	Pinar	Luzón	296	-0.18
GU297	La Tasuguera	Riba de Saelices	297	-0.19
GU300	El Pinarejo	Anquela del Ducado	300	-0.27
GU299	El Pinar	Mazarete	299	-0.3

Tabla 2. Relación de los valores medios de NBR a nivel monte obtenidos de las imágenes AHS

Se ha tomado como referencia los montes monte GU-240 y 99, montes que no sufrieron los efectos del incendio por lo que el valor del NBR es igual a cero. Cuanto más negativo sea el valor del índice NBR mayor grado de severidad muestra el monte. Se puede observar que los montes que presentan una mayor severidad son los GU-299, GU-300 situados en la zona este del área quemada. Evaluando los datos de la Tabla 1 se puede ver que en dichos montes, más de la mitad del área de los mismos está clasificada como severidad alta.

Los montes GU-190, GU-191 y GU-126 son los que presentan valores de NBR más bajos y están situados en la zona sur del área afectada por el incendio, próximos al monte GU-240 no quemado. En estos montes el tanto por ciento de superficie clasificada como severidad alta es bastante bajo, estando la mayor parte de la superficie clasificada como severidad media o baja. Estudiar la severidad de cada uno de los montes nos ayudará a entender mejor los patrones de regeneración seguidos en los mismos, resultados que serán presentados en los siguientes epígrafes.

Regeneración. Seguimiento de la regeneración con imágenes AHS

La Figura 6 muestra la regeneración desde 2005 a 2008 representada por el valor de NDVI medio a nivel monte multiplicado por 100, y da una idea del grado de regeneración en cada uno de los montes desde el año del incendio hasta el otoño del año 2008. La Tabla 3 muestra un resumen del grado de regeneración medio en cada uno de los montes afectados, estimado a partir del índice NDVI multipli-

cado por 100, en cada uno de los años desde el 2005 al 2008.

La figura 7 muestra la evolución espacial y temporal del índice de vegetación NDVI durante los años 2005 – 2008. Las imágenes están representadas en escala de grises utilizando una homogenización de los histogramas para poder comparar los resultados de los cuatro años. Las zonas más claras representan mayor actividad vegetativa mientras que las más oscuras representan zonas con una baja actividad vegetativa o gran proporción de suelo desnudo.

Analizando las Figuras 5 y 6 así como la Tabla 3, se puede observar como los montes mejor regenerados se encuentran en el cuadrante noreste de la zona afectada (GU-149, GU-293 y GU-296). En dichos montes la regeneración está siendo principalmente de quercíneas. Mientras que los montes que presentan una menor regeneración se encuentran situados en la zona sureste (GU-191, GU-190, GU-126). El trabajo de campo realizado muestra que en estos montes se presenta una aceptable pero incipiente regeneración de pino. Sin embargo, al estar este regenerado incipiente muy mezclado con el suelo desnudo, los valores de NDVI son muy bajos.

La Figura 8 muestra el resultado del *spectral unmixing* en las imágenes del 2005 al 2008 donde se puede evaluar de una forma más precisa la evolución de la vegetación desde el incendio hasta el otoño de 2008. Las imágenes están representadas en escala de grises utilizando una homogenización de los histogramas para poder comparar los resultados. Las zonas más claras representan una mayor cobertura de vegetación, mientras que las más oscuras representan zonas con una alta proporción de suelo desnudo.

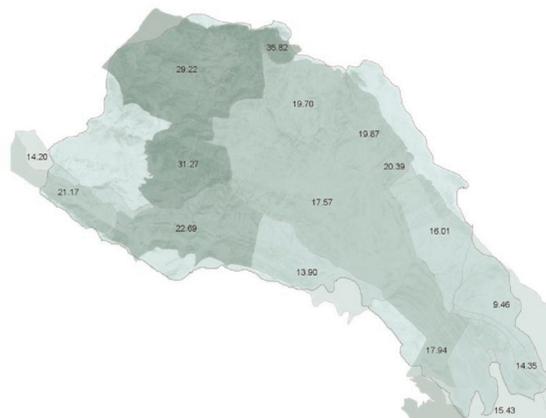


Figura 6. Regeneración a nivel monte. La graduación de color representa desde los valores de regeneración más bajos en tonalidades claras a los más altos en tonalidades más oscuras

ID	NOMBRE	TÉRMINO	NDVI 2005	NDVI 2006	NDVI 2007	NDVI 2008
		MUNICIPAL				
GU191	El Pinar	Selas	20.25	24.15	24.57	42.61
GU190	Entredicho	Selas	19.27	26.46	31.71	46.38
GU126	Dehesa Común	Cobeta	19.37	33.85	35.89	47.36
GU301	Dehesa de la Mata	Anquela del Ducado	16.74	25.48	29.97	45.87
GU292	Sierra del Gallubar y Vigorra. Los Milagros. Vallejo del Cabrero y las Ocecillas	Anguita	14.22	15.30	26.15	43.86
GU298	Ceño Negrillo y la Virgen	Ablanque	14.44	24.67	26.63	44.88
GU239	Los Casares	Cobeta	16.71	30.69	33.47	50.24
GU294	El Pinar	Anguita	11.27	19.94	31.29	45.11
GU232	Dehesa Común de Solanillos	Mazarete	15.61	32.11	34.34	50.84
GU150	Pinar	Ciruelos del Pinar	15.57	34.14	39.39	51.43
GU300	El Pinarejo	Anquela del Ducado	7.04	20.52	27.31	43.90
GU297	La Tasuguera	Riba de Saelices	10.02	20.64	32.22	47.53
GU299	El Pinar	Mazarete	8.05	27.78	28.81	45.81
GU296	Pinar	Luzón	12.46	33.32	41.31	55.54
GU293	El Bosque del Buen Desvío	Anguita	19.73	43.27	50.19	63.21
GU149	Dehesa	Ciruelos del Pinar	18.65	54.31	55.70	70.79

Tabla 3. Relación de los valores medios de NDVI a nivel monte obtenidos de las imágenes AHS. Los valores de NDVI están escalados entre 0 (suelo desnudo) y 100 (vegetación completa)

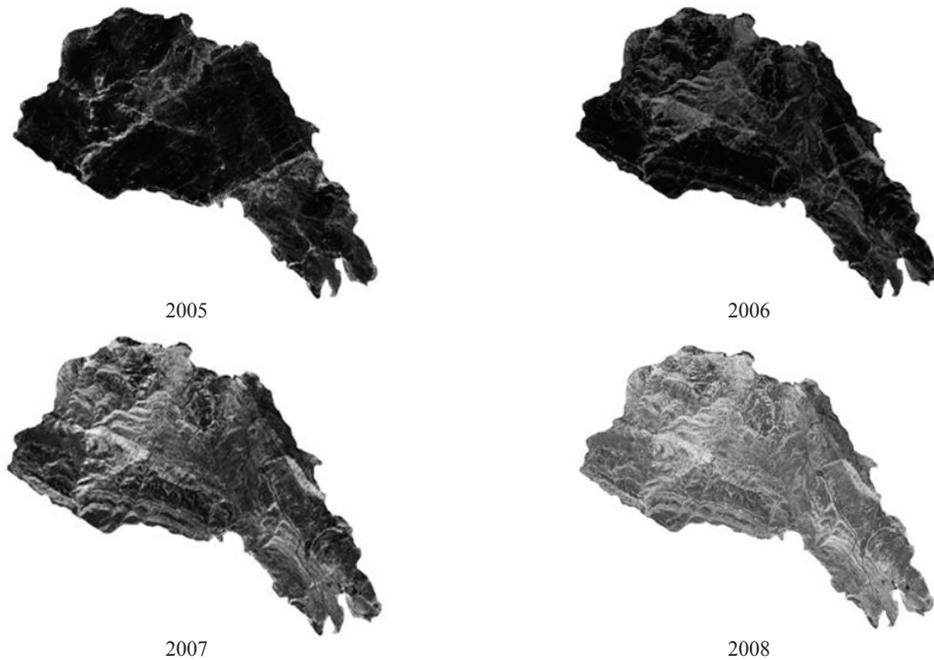


Figura 7. Evolución temporal de la regeneración estimada a partir del NDVI de las imágenes AHS en el periodo 2005-2008, representado en escala de grises desde el negro que representa valores de NDVI bajos al blanco que representa valores altos de NDVI

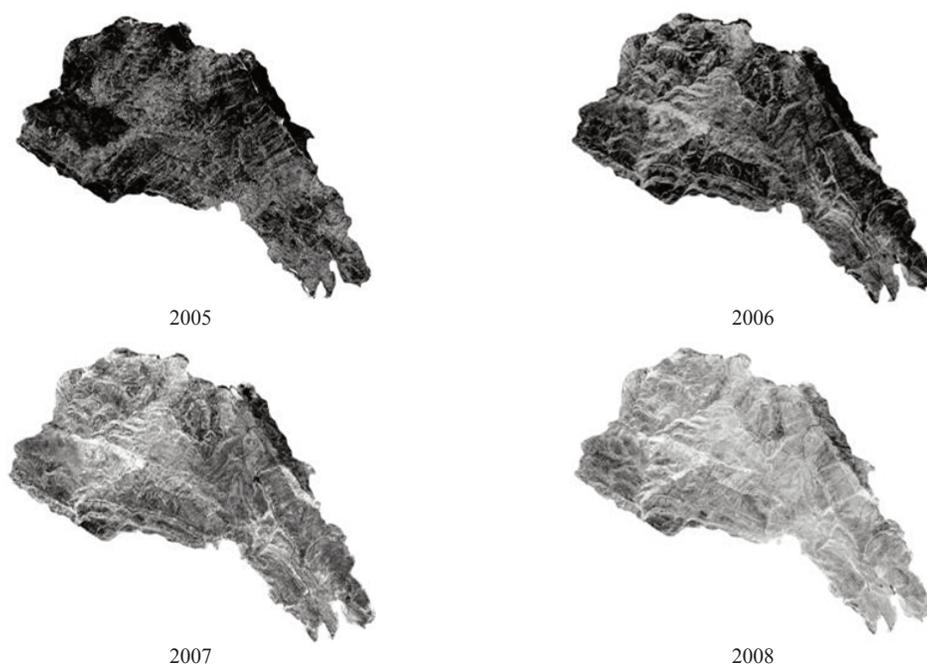


Figura 8. Cobertura vegetal, resultados del spectral unmixing de las imágenes AHS, desde el 2005 al 2008, representado en escala de grises. El negro representa suelo desnudo y el blanco cobertura vegetal completa

Se puede observar que los resultados obtenidos al realizar el análisis de *spectral unmixing* son muy parecidos a los encontrados con el índice de vegetación. Las zonas con un grado de regeneración mayor se sitúan en la parte noreste del área afectada mientras que las menos regeneradas se presentan en la zona sureste. Los montes Dehesa (GU149), El Bosque del Buen Desvío (GU293) y Pinar (GU296) situados en el cuadrante noreste de la zona afectada son los que presentan una mayor regeneración debido principalmente al regenerado de quercíneas predominante en esta zona. Los montes peor regenerados se encuentran en la zona este (GU126) y en la zona sur del área afectada (GU191, GU-190), en el caso de estos últimos montes, los resultados de campo muestran un regenerado de pino medio-alto, la baja cobertura de la vegetación obtenida en el estudio es debida a la alta proporción de suelo desnudo que acompaña al regenerado de pino en el estado ac-

tual de desarrollo, dificultando en gran medida su discriminación a partir de un análisis de *spectral unmixing*. El trabajo de campo realizado por la Junta de Castilla La Mancha así como la opinión de los expertos ha permitido confirmar el grado de precisión obtenido en la cartografía de regenerado anteriormente presentada.

Seguimiento de la regeneración con imágenes MODIS

Para entender mejor los patrones de regeneración seguidos por la vegetación, se ha realizado un análisis de la evolución temporal de la masa vegetal, a través del índice NDVI deducido de las imágenes MODIS, desde febrero del año 2000 hasta diciembre del año 2007 en cada uno de los montes afectados por el incendio. La figura 9 muestra la situación de cada uno de los montes quemados.

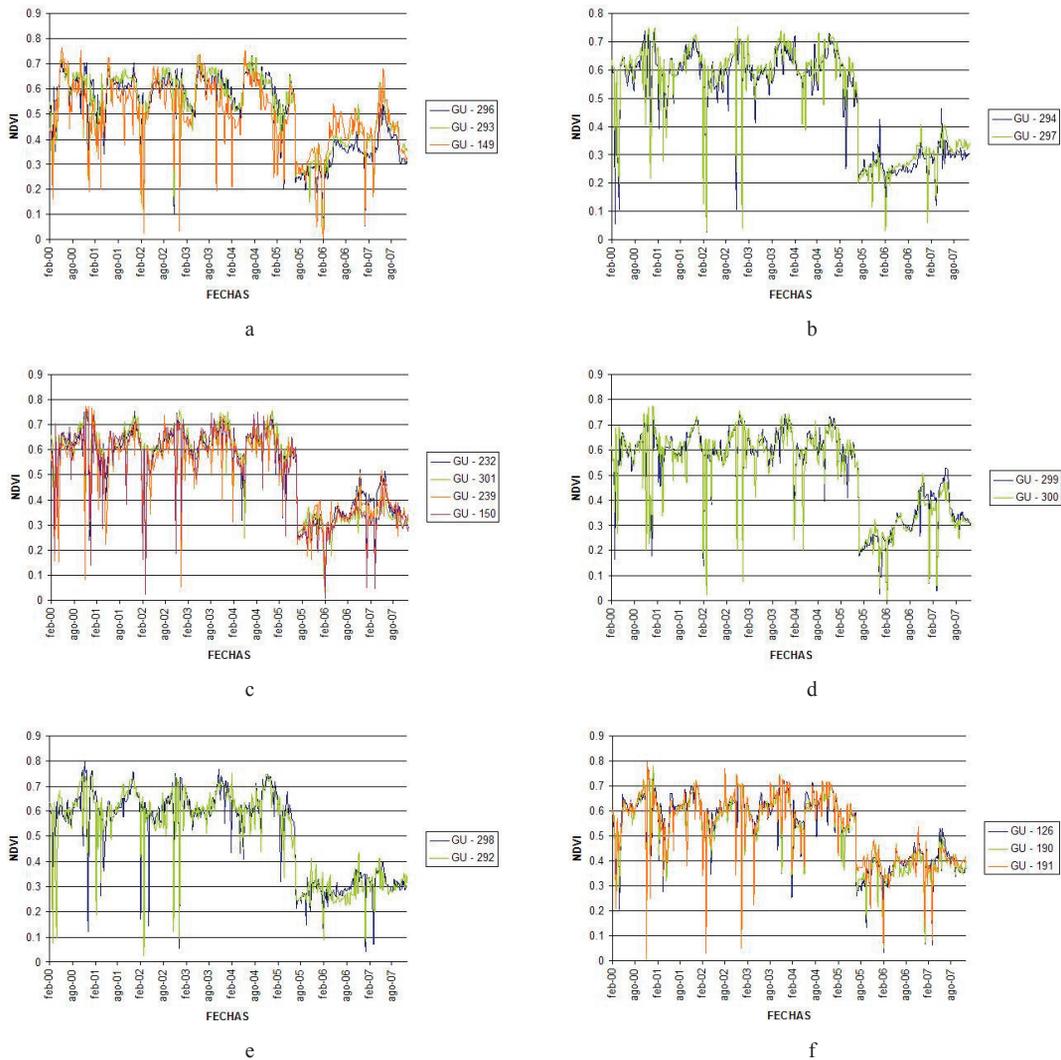


Figura 9. Evolución temporal seguida por el NDVI de las imágenes MODIS en los montes GU-296, GU-293 y GU-149 (a), GU-294 y GU-297(b), GU-232, GU-301, GU-239 y GU-150 (c), GU-299 y GU-300 (d), GU-296 y GU-292(e) y GU-126, GU 190 y GU-191(f) durante el periodo 2000-2007

En los montes GU-296, GU-293 y GU-149 se observa, en el periodo pre-incendio, una subida brusca del índice al comienzo de la primavera coincidiendo con la salida de la hoja de la vegetación caducifolia. Desde mediados del periodo seco se puede apreciar una disminución paulatina del índice probablemente debida en un principio a la pérdida de humedad y posteriormente a la caída paulatina de las hojas. En el resto de los montes ocurre lo contrario, se puede apreciar un incremento suave del índice en primavera debido a la mezcla de herbáceas, matorral y vegetación perenne, y un descenso brusco durante el periodo seco coincidiendo con el rápido proceso

de secado de la vegetación herbácea.

En la fecha del incendio se puede apreciar una caída brusca de NDVI debido a la reducción drástica de la vegetación como consecuencia del incendio. Una vez analizado el patrón seguido por la vegetación antes del incendio evaluaremos la evolución temporal de la cobertura vegetal de cada uno de los montes los años posteriores (tabla 4). El patrón seguido por la vegetación, en los montes GU-296, GU-293 y GU-149, el año posterior al incendio presenta un doble ciclo (figura 9a). Se aprecia un incremento del verdor en primavera como consecuencia de una mayor actividad fotosintética, se

guido de un descenso paulatino durante el verano debido a la pérdida de humedad de la vegetación. En otoño se observa otro incremento de verdor coincidiendo con la aparición de la vegetación herbácea durante el periodo de lluvias seguido de otro descenso durante los meses de invierno. Sin embargo a lo largo del año 2007 se puede apreciar como el patrón va evolucionando de bimodal a unimodal, presentando un único ciclo cuyo máximo coincide con la primavera y el mínimo con el otoño-invierno. Comparando este patrón unimodal post-incendio con el seguido por la vegetación en el periodo pre-incendio se puede apreciar la gran similitud entre ambos. Los valores de NDVI después del incendio son todavía bastante inferiores a los encontrados antes del mismo, pero la gran similitud entre ambos patrones nos lleva a pensar que no sería necesaria una actuación forestal en estos montes.

Al evaluar la serie temporal definida por el NDVI, en los montes GU-294 y GU-297, en las fechas posteriores al incendio se puede apreciar un patrón bastante irregular (Figura 9b). El NDVI presenta un cierto incremento desde julio del 2005 a diciembre de 2007, pero por la irregularidad del comportamiento temporal seguido cabe pensar que estos montes estén dominados por diversas especies de matorral o herbáceas, siendo la regeneración de pinos o quercíneas muy baja o prácticamente inexistente, pudiendo por ello ser estos montes seleccionados para la intervención más inmediata.

El patrón descrito por el NDVI en los montes GU-232, GU-301, GU-239 y GU-150 el primer año después del incendio (Figura 9c) es muy parecido al presentado en la Figura 9a donde se puede apreciar ese doble ciclo, estando en este caso bastante más marcado debido posiblemente a la influencia del sotobosque o la vegetación herbácea. En los montes GU-299 y GU-300 se observa un incremento claro del NDVI los años posteriores al incendio llegando

a alcanzar valores superiores a 0,5 (Figura 9d). Esto llevaría a pensar en el buen proceso de regenerado de la vegetación. Pero si se analiza el patrón seguido por la serie temporal de NDVI se aprecia el doble ciclo explicado anteriormente, bastante más marcado que en los casos anteriores y a diferencia del resto este doble ciclo se sigue manifestando durante el año 2007. Como ya se ha comentado este doble ciclo puede ser debido a la dominancia de la vegetación herbácea.

Observando el patrón descrito por la serie temporal del NDVI en los montes GU-298 y GU-292, en el periodo post-incendio se puede apreciar un patrón totalmente irregular durante el primer año y la existencia de un doble ciclo durante el segundo (Figura 9e), esto nos indica la escasa presencia de especies arbóreas o la dominancia de matorral y/o de especies herbáceas. Además se puede ver como el incremento del verdor desde la fecha del incendio hasta finales del 2007 es bastante bajo lo que puede confirmar la falta de regenerado en estos dos montes que podrían requerir de intervención inmediata.

Si evaluamos los incrementos de NDVI en los montes GU-126, GU-190 y GU-191 durante el periodo post-incendio (Figura 9f) se puede observar como el índice de verdor no ha aumentado mucho, sin embargo si analizamos su evolución temporal se puede observar como la caída brusca de verdor en la fecha del incendio no fue tan severa como en los montes antes citados. De esta forma aún siendo el incremento de NDVI menor que en otros casos, estos montes presentan valores máximos de verdor próximos a 0,5 por lo que se podría decir que la cobertura vegetal está recuperándose poco a poco.

A continuación se muestra una tabla resumen de los valores medios de NDVI en el periodo anterior al incendio, comprendido desde febrero del 2000 hasta la fecha del incendio, y los valores medio de NDVI durante los años 2006 y 2007.

	GU-296. GU-293. GU-149	GU-294. GU-297	GU-232. GU-301. GU-239. GU-150	GU-299. GU-300	GU-298. GU-292	GU-126. GU-190. GU-191
NDVI pre-incendio	0.569	0.598	0.606	0.603	0.609	0.592
NDVI 2006	0.365	0.261	0.323	0.298	0.282	0.375
NDVI 2007	0.409	0.305	0.348	0.356	0.308	0.386

Tabla 4. NDVI medio, obtenido de la serie temporal MODIS, durante el periodo pre-incendio y los años 2006 y 2007. Los valores de NDVI están escalados entre 0 (suelo desnudo) y 1 (vegetación completa)

Se puede apreciar como los valores de NDVI antes del incendio eran muy parecidos en todos los montes variando de 0,57 a 0,6. Como consecuencia del incendio el NDVI medio descendió en torno a 0,3 en todos los montes menos en GU-126, GU-190 y GU-191, donde el NDVI presentó una caída de 0,2. Durante el año 2007 se puede observar una diferencia máxima del NDVI medio de 0,1 entre los distintos montes aunque estos valores no pueden ser interpretados sin tener en cuenta la evolución temporal del índice de vegetación en cada uno de los montes, ya explicada con anterioridad.

DISCUSIÓN

Se puede observar como la superficie estimada con las imágenes AHS se acerca con gran precisión a las cifras proporcionadas por el Ministerio de Medio Ambiente, quedando así justificada la utilización de los datos hiperespectrales para la estimación del perímetro así como del área afectada tras un incendio forestal de gran magnitud.

Analizando la cartografía de severidad se puede apreciar que la zona más afectada por dicho incendio se sitúa en una franja central del área afectada con una orientación suroeste – noreste. Analizando el modelo digital del terreno se puede observar la gran dependencia entre grado de severidad y relieve. Las zonas de mayores pendientes por lo general muestran un grado de severidad mayor que las zonas más llanas. La información obtenida de la cartografía presentada, puede ayudar en gran medida al gestor en los trabajos de restauración de la zona afectada, así como en la planificación de futuros planes de prevención de incendios.

Analizando la cartografía de regeneración, se observa que la mayor parte de la zona afectada se está regenerando poco a poco después de cuatro años de ocurrido el incendio. Comparando los resultados con el trabajo de campo se aprecia como el porcentaje máximo de cobertura corresponde a aquellas zonas donde predominan las quercíneas o el matorral denso. La cobertura de pino se discrimina con bastante dificultad, de momento, por la alta proporción de suelo desnudo que le acompaña.

Combinando la información de la cartografía de nivel de regeneración, obtenida a partir de las imágenes hiperespectrales, con el análisis de la evolución temporal de dicho regenerado se podría concluir que los montes que podrían requerir una intervención prioritaria serían GU-298, GU-292, GU-301, GU-190 y GU-191.

CONCLUSIONES

Tras producirse un incendio de las características del incendio de Guadalajara surge la necesidad de conocer la extensión de terreno afectado y el grado de severidad. Es asimismo prioritario en los años siguientes, analizar cómo avanza la regeneración, con el fin de realizar la gestión forestal de la forma más adecuada. Para todas estas cuestiones que se les plantean a los gestores forestales en las zonas afectadas por incendios, el presente estudio muestra que la teledetección hiperespectral supone una herramienta potente y versátil, que suministra información muy valiosa, ya que puede facilitar enormemente la toma de decisiones para la gestión forestal post-incendio.

Respecto a la capacidad de las imágenes hiperespectrales AHS para discriminar la superficie afectada por el incendio de Guadalajara podemos señalar la gran precisión de los resultados obtenidos con gran similitud con los datos oficiales del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (12.983,50 ha, utilizando AHS y 12.887,37 ha según las estadísticas del Ministerio), lo que confirma nuestra hipótesis de partida de la utilidad de este tipo de imágenes para la obtención de cartografías de áreas quemadas.

Los resultados obtenidos en el estudio de la severidad, nos lleva de igual forma a confirmar la capacidad de este sensor para discriminar entre diversos grados de severidad provocados por un incendio forestal. La clasificación de una escena posterior al incendio, utilizando el índice de severidad NBR1, ofrece unos resultados bastante fiables demostrando la utilidad de la Teledetección para la obtención de este tipo de cartografías aportando una herramienta de apoyo al gestor de una forma fiable, rápida y económica comparada con los métodos tradicionales de trabajo de campo y foteointerpretación.

El presente trabajo también muestra la gran utilidad de las imágenes AHS para la estimación de los grados de regeneración de la vegetación. Con la cartografía obtenida se pueden seleccionar los montes donde se podría requerir una intervención prioritaria, información que facilitaría en gran medida la gestión post-incendio del área afectada.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado en el marco del convenio de colaboración entre el INIA y la Junta

de Comunidades de Castilla – La Mancha CC0621. Los autores quieren agradecer al Servicio Forestal de Guadalajara por su apoyo en las visitas realizadas al área de estudio y por el trabajo de campo proporcionado.

REFERENCIAS

- BARBOSA, P.M.; GREGOIRE, J.L. & PEREIRA, J.M. 1999. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. *Remote Sensing of Environment*. 69: 253-263.
- CHUVIECO, E. & MARTÍN, M.P. 2004. “Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales”. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Economía y Geografía. 190 pags.
- DE SANTIS, A. & CHUVIECO, E. 2007. Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*. 108: 422-435.
- DÍAZ-DELGADO, R.; SALVADOR, R. & PONS, X. 1998. Monitoring of plant community regeneration after fire by remote sensing. In: L. Trabaud (Ed.), *Fire management and landscape ecology*. Fairfield, WA: International Association of Wildland Fire. 315-324.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F.; MERINO-DE-MIGUEL, S.; ROLDÁN-ZAMARRÓN, A.; GARCÍA-GIGORRO, S. & CUEVAS, J. M. 2007. MERIS Full Resolution data for mapping level-of-damage by forest fires: the Valencia de Alcántara event in August 2003. *International Journal of Remote Sensing*. 28: 797-809.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F.; MERINO-DE-MIGUEL, S.; ROLDÁN-ZAMARRÓN, A.; GARCÍA-GIGORRO, S. Y CUEVAS, J.M. 2005. Algoritmos de estimación de superficies quemadas a partir de compuestos MODIS. *XI Congreso Nacional de Teledetección*. Puerto de la Cruz. Tenerife. 21-23.
- HUESCA, M., GONZÁLEZ-ALONSO, F., CUEVAS, J.M. Y MERINO-DE-MIGUEL, S. 2008. Estimación de la superficie quemada en los incendios forestales de canarias en julio de 2007 utilizando sinérgicamente imágenes MODIS y anomalías térmicas. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. 17: 308-316.
- KEY, C.H. & BENSON, N.C. 2005: Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In: D. C. Lutes et al., Editors, FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system, General Technical Report, RMRS-GTR-164-CD:LA1-LA51, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT.
- LEVINE, J. S. 1991. Introduction In *Global Biomasa Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications*. Edited by J. S. Levine (Cambridge, USA: MIT press). xxv – xxx.
- MARTÍN, M.P.; DÍAZ DELGADO, R.; CHUVIECO, E. & VENTURA, G. 2002. Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety* (Viegas, Ed). Millpress, Rotterdam.
- MERINO-DE-MIGUEL, S.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; GARCÍA-GIGORRO, A.; ROLDÁN-ZAMARRÓN, A. & CUEVAS, J.M. 2005. Is it possible to timely and accurately estimate wildfire burnt areas using remote sensing techniques? En: *New Strategies for European Remote Sensing* (Oluic, Ed). Millpress, Rotterdam.
- 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.
- MORENO, J.M. 2007. Cambio global e incendios forestales: Una visión desde España. 4ª Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales, Sevilla, 22 pags.
- PARRA UZCÁTEGUI, A. 2005. Estimación de niveles de severidad del fuego a partir de datos hiperespectrales EO-1 Hyperion. Tesis doctoral, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España.
- PRADO ORTEGA, E. 2007. Mejoras en la evaluación y corrección de errores de corrección en imágenes hiperespectrales AHS para estudios multitemporales. Trabajo de investigación tutelada, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España.
- RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; USTIN, S.; ZOMER, R.; DENNISON, P.; ROBERTS, D. & SALAS, J. 2002. Assessment of vegetation regeneration after fire through multitempo-

- ral analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains. *Remote Sensing of Environment*. 79: 60-71.
- ROLDÁN-ZAMARRÓN, A.; MERINO-DE-MIGUEL, S.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; GARCÍA-GIGORRO, S. & CUEVAS, J.M. 2006. Minas de Riotinto (South Spain) forest fire: burned area assessment and severity mapping using Landsat 5 - TM, Envisat - MERIS and Terra - MODIS post-fire images. *Journal of Geophysical Research*. 111, G04S11.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. & DEERING, D. W. 1973. 'Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS', *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I: 309-317.
- SUNAR, F. & ÖZKAN, C. 2001. Forest fire analysis with remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*. 12, 2265-2277.
- WHITE, J.D.; RYAN, K. C.; KEY, C. C. & RUNNING, S.W. 1996. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6: 125-136