

TRABAJO FIN DE MÁSTER

APLICABILIDAD DE LAS IMÁGENES MODIS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ZONAS AFECTADAS POR INCENDIOS FORESTALES EN ARAGÓN

Autor: Adrián Jiménez Ruano

Director: Fernando Pérez Cabello

Máster Universitario en

Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección

Noviembre de 2013



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo destacar las capacidades y potencialidades que presenta el sensor MODIS para la caracterización de zonas incendiadas mayores de 500 has de la comunidad de Aragón en el periodo 2000-2010. En particular, se centra en la monitorización de la dinámica de la vegetación tras el evento y la evaluación de la severidad con la que el fuego ha calcinado el espacio. La metodología empleada se ha basado en la descarga, pre-tratamiento básico y extracción de datos de las imágenes de diversos productos derivados. Por un lado, se estudió la evolución temporal de los índices de vegetación NDVI y EVI a distintas resoluciones espaciales, la temperatura superficial o LST y los índices de área foliar y fracción de radiación activa fotosintética (LAI y FPAR). Estas dos últimas variables incluyeron en el análisis un conjunto de incendios antiguos (1975-2000). Por otro lado, se elaboró un modelo de cálculo de NBR y dNBR, para generar la cartografía de severidad. Las principales conclusiones obtenidas son: a) la gran aplicabilidad de los productos de índices de vegetación sobre todo a 250 m de resolución para grandes incendios regionales (> 500 has), b) las limitaciones que presentan los datos de LST en cuanto a omisión y mezclado de información, c) buenos resultados en la cartografía de la severidad de la quema para los incendios regionales y, d) estimación básica y aproximada del quinquenio de ocurrencia de un incendio en base a unos valores medios de FPAR y LAI determinados.

Palabras Clave: MODIS, incendios forestales, NDVI, EVI, temperatura superficial, severidad de quema, LAI, fPAR Aragón.

Abstract

This paper aims to highlight the capabilities and potentialities which exhibits the MODIS sensor in order to show the characteristics of burned areas over 500 hectares on the community of Aragon between 2000-2010. In particular, it focuses on the monitorization of the vegetation dynamics after the event and the evaluation of severity with which the fire has burned the area. The methodology is based on the discharge, basic pretreatment and extraction of data from images of various products. On one hand, we studied the temporal evolution of vegetation indices NDVI and EVI at different spatial resolutions, or LST surface temperature and leaf area index and fraction of photosynthetically active radiation (LAI and FPAR). These last two variables included a set of ancient fires in the analysis (1975-2000). On the other hand, a model of NBR and DNBR calculation was developed to generate the severity mapping. The main findings are: a) the wide applicability of the products of vegetation indices mostly 250 m resolution for large regional fires (> 500 ha.), b) the limitations of LTS data as a result of mixing and omission of information, c) good results in burn severity mapping for regional fires and, d) Basic and approximate estimation of occurrence in 15-years time of a fire based on certain FPAR and LAI average values.

Key Words: MODIS, forest fires, NDVI, EVI, surface temperature, burn severity, LAI, fPAR Aragón.

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introducción y contenidos..... | 3 |
| 2. Objetivos | 3 |
| 3. Área de estudio..... | 4 |
| 4. El sensor MODIS | 5 |
| 4.1. Los índices de vegetación (productos MOD13A2 y MOD13Q1) | 10 |
| 4.2. La temperatura superficial (producto MOD11A2) | 13 |
| 4.3. El índice de área foliar y la fracción de radiación activa fotosintética (producto MCD15A2) | 14 |
| 5. Metodología | 17 |
| 5.1. Selección de incendios forestales | 18 |
| 5.2. Descarga y tratamiento de productos MODIS..... | 20 |
| 5.3. Estimación y cartografía de la severidad del incendio | 21 |
| 5.4. Seguimiento de la dinámica postfuego | 24 |
| 5.5. Obtención del LAI - FPAR | 25 |
| 6. Análisis de resultados | 27 |
| 6.1. Análisis de la severidad | 27 |
| 6.2. Análisis de la evolución de la vegetación en el postfuego | 29 |
| 6.2.1. Los índices de vegetación | 29 |
| 6.2.2. La temperatura superficial | 33 |
| 6.4. Análisis del LAI y FPAR | 35 |
| 7. Conclusiones | 43 |
| 8. Glosario | 44 |
| 9. Referencias bibliográficas | 45 |
| 10. Agradecimientos..... | 47 |
| ANEXO I | 48 |
| ANEXO II | 51 |

1. INTRODUCCIÓN Y CONTENIDOS

Los incendios forestales se han convertido en las últimas décadas en uno de los problemas con mayor impacto medioambiental y socioeconómico sobre los ecosistemas mediterráneos. Según el Ministerio de Medio Ambiente (2010) que recoge estadística de incendios desde 1961, entre los años 60 y 1974 el número de incendios anual en España era inferior a 5.000 y en muchos casos no pasaba de los 2.000. Sin embargo, sobre todo a partir de 1989 hasta 2005, el número de incendios anual ha sido siempre superior a 12.000, llegando hasta los 25.000 incendios en el año 1995 (Bisquert, 2011). En los últimos años (2005-2010), se ha producido una tendencia hacia la estabilización con cifras inferiores a las de las décadas precedentes.

Debido a la mayor frecuencia y virulencia de los incendios, se hace necesario establecer métodos de monitorio de su severidad y pronosticar la evolución de las zonas quemadas. Para conseguir este propósito, la teledetección desde satélite constituye una de las técnicas más utilizadas, gracias a que proporciona una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada, con información espectral sensible para separar áreas quemadas de otro tipo de coberturas. (Chuvieco et al., 2001)

En el caso concreto de Aragón y según datos de la Estadística General de Incendios Forestales (EGIF), el número de incendios forestales sigue una tendencia notablemente creciente, sobre todo desde el año 1968, cuando comenzaron a documentarse de manera sistemática.

Hasta la fecha los diversos estudios sobre incendios han recurrido en mayor medida al uso de imágenes Landsat ya que dentro del gran número de satélites disponibles el proyecto Landsat ha sido y sigue siendo el más empleado en este contexto. Sin embargo, en el uso de MODIS no se han desarrollado tantos trabajos, al menos en el caso Aragón.

Por ello, el presente trabajo pretende centrarse en el estudio multitemporal de diversos productos derivados y combinados del sensor MODIS para caracterizar la severidad de la quema en las zonas incendiadas de más de 100 hectáreas de Aragón, durante el periodo de 2000 a 2010. Asimismo, se estudiará la evolución de la vegetación tras el suceso mediante el uso de índices de vegetación (NDVI y EVI), temperatura superficial (LST) y los índices de fPAR y LAI, proporcionados ya directamente por el sensor.

2. OBJETIVOS

Como ya se ha indicado, el objetivo principal de este proyecto es caracterizar las zonas afectadas por incendios forestales en el sector occidental de la Comunidad Autónoma y en las provincias de Huesca y Zaragoza, a partir de las imágenes del sensor MODIS, concretamente con diversos productos derivados: índice de vegetación, temperatura superficial, entre otros, para el periodo temporal comprendido entre el año 2000 y 2010.

Entre los objetivos secundarios se encuentran los siguientes:

- Extracción y tratamiento de los datos MODIS disponibles para las zonas ya identificadas.
- Estimación y cartografía de la severidad del incendio.
- Seguimiento de la dinámica postfuego de la vegetación, incluyendo su análisis multitemporal y de cambios.
- Evaluación de la aplicabilidad y operatividad de los productos derivados de MODIS para la consecución de los objetivos planteados.

Este proyecto se inserta en las líneas de trabajo del grupo de investigación GEOFOREST de la Universidad de Zaragoza (Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio e Instituto Universitario de investigación en Ciencias Ambientales), por lo que se valdrá de los resultados de proyectos anteriores realizados por miembros del equipo.

3. ÁREA DE ESTUDIO

Se va a realizar el análisis sobre la Comunidad Autónoma de Aragón, la cual constituye una región diversa desde el punto de vista paisajístico y biogeográfico. En este último aspecto Aragón destaca por la coexistencia de dos regiones biogeográficas: la Eurosiberiana y la Mediterránea. Ambas poseen ambientes contrastados y especies propias, siendo una de las características generales la riqueza y diversidad de paisajes y especies. A ello se une la variedad de situaciones topográficas y altitudinales que favorecen la presencia de la totalidad de los pisos bioclimáticos de las dos regiones biogeográficas (Longares Aladrén, 2004)



Figura 1. Mapa de localización de Aragón.

Asimismo, el reparto de estos dos ambientes en el territorio de interés es desigual, ya que el porcentaje de superficie que ocupa la región mediterránea es claramente superior a la eurosiberiana. Esta última queda recluida en las estribaciones montañosas pirenaicas. La región eurosiberiana en Aragón se caracteriza por presentar formaciones boscosas intercaladas con pastizales y herbazales de alta montaña. Se puede apreciar claramente una distribución en pisos de vegetación (nival, alpino y subalpino) mientras que el montano contacta de forma más difusa con los pisos superiores mediterráneos.

El piso nival y alpino se caracteriza por vegetación especializada al escaso suelo (líquenes y musgos), herbáceas y rastreras donde destacan especies relicticas como *Dryas octopetala*. Por su parte el piso subalpino, se configura como un conjunto heterogéneo de pastizales, matorrales y bosques. Destacando los pinares de *Pinus uncinata* con matorrales de *Rhododendron ferrugineum* y *Vaccinium myrtillus*. Asimismo, en los sectores más húmedos encontramos abedules, álamos temblones, serbales y sauces; y en las partes más bajas aparecen el abeto, el tejo y el fresno. Por otra parte, en las solanas abundan los enebros (*Juniperus communis subsp alpina*) y sabinas rastreras (*Juniperus sabina*) junto con el *Pinus sylvestris*, el erizón, el piorno, el boj (*Buxus sempervirens*). Los pastizales de *Festuca eskia* y *F. paniculata* abundan como consecuencia de la desaparición natural o antrópica del bosque.

En el piso montano, los protagonistas son el haya, el abeto, el hayedo-abetal, pinares y quejigales, junto a pastos antrópicos. Asimismo, existen comunidades planifolios-caducifolios ocupando pequeños enclaves microclimáticos en fondos de arroyos y barrancos.

El resto del territorio está dominado por la región mediterránea y ya que en el trabajo nos ceñiremos a las provincias de Huesca y Zaragoza, nos centraremos únicamente en la Depresión del Ebro, Somontanos pirenaico e ibérico y en valles de los ríos de la margen derecha del Ebro. En este sector predomina el matorral medio y bajo, predominando lo romerales junto a enebrales y a matorrales adaptados a suelos yesosos, nitrófilos y halófilos. Las principales formaciones

boscosas están representadas por quercíneas así como con pinar xérico (*Pinus halepensis* y *P. nigra*) y sabinares. Lo más característico de este ambiente es el carrascal, acompañado a veces con el quejigo, así como la combinación del pino carrasco con la coscoja en los ambientes más xéricos y por debajo de los 500 m.

Desde el punto de vista climático, uno de los rasgos más característicos de la región es la aridez. Esto provoca que los datos pluviométricos medios no superen normalmente los 400 mm en el sector central, aunque se produce un aumento moderado de los totales a medida que nos aproximamos a los bordes montañosos. Además, otra constante habitual es la irregularidad de las precipitaciones, lo cual da lugar a años muy secos, alternando con otros lluviosos.

En lo que respecta a las temperaturas, destaca su diversidad como consecuencia de los contrastes altitudinales. Ello provoca altos contrastes entre las tierras bajas, más cálidas, y las vertientes montañosas, con valores más bajos. Otra principal característica está protagonizada por las fuertes oscilaciones entre el invierno y el verano, provocando que las estaciones intermedias apenas sean perceptibles.

Por último, hay que destacar la importante presencia climática que adquiere en extensas áreas de Aragón el viento, en particular el cierzo.

4. EL SENSOR MODIS

El sensor MODIS, según sus siglas en inglés, es un espectro-radiómetro de imágenes de media resolución que por sus características espaciales y espectrales es uno de los más importantes para el monitoreo de procesos de cambio terrestres. Fue creado por un equipo científico interdisciplinario con una vasta experiencia en sensores remotos y una de sus principales ventajas es que sus datos son distribuidos gratuitamente en diferentes portales de internet. MODIS está transportado en dos plataformas: Terra o EOS-AM y Aqua o EOS-PM. La primera fue lanzada en diciembre de 1999 y la segunda, en mayo de 2002. La órbita de ambas plataformas es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de 98,2° y 98° y una altitud media de 708 y 705 km respectivamente. Terra está programada para pasar de norte a sur cruzando el ecuador sobre las 10:30 h de la mañana, por su parte Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador a la 13:30 h de la tarde.

MODIS cuenta con una sensibilidad radiométrica alta (12 bits) y su mecanismo de barrido se compone de un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria de la plataforma con un ángulo de aproximadamente 55 ° que permite explorar una franja de terreno con un ancho de unos 2.330 km. Su principal objetivo es medir los procesos biológicos y físicos a nivel global en intervalos temporales de 1 a 2 días. Proporciona imágenes en 36 bandas discretas (véase tabla 1) que van desde los 0,405 a 14,5 μm , con tres resoluciones espaciales diferentes: de 250 m para 2 bandas, 500 m para 5 bandas o 1 km para las 29 restantes.

Las bandas de la 1 a la 7 están especializadas en aplicaciones terrestres, las bandas de la 8 a la 16 se centran en las observaciones oceánicas y las bandas de la 17 a la 19 para mediciones de la atmósfera. Por otra parte, las bandas comprendidas entre la 20 y la 36, son las diseñadas para captar la fracción del infrarrojo térmico del espectro.

Según García- Mora y Mas, la aplicación de los datos MODIS varían desde la detección y el monitorio de incendios, estado actual y cambios de la cobertura terrestre, albedo, monitoreo del clima, hasta prevención de desastre naturales y epidemiología. Para ello las plataformas Terra y Aqua disponen de diferentes sensores, que obtienen diversos tipos de información con las mismas condiciones atmosféricas, ángulos de iluminación y observación y permitiendo asimismo la intercalibración entre sensores.

Tabla 1. Características de las bandas espectrales del sensor MODIS (Fuente: MODIS WebSite, 2013).

| Uso principal | Banda ¹ | Longitud de onda ¹ | Radiancia espectral |
|--|--------------------|-------------------------------|---------------------|
| Superficie/Nubes/Límites Aero- soles | 1 | 620 - 670 | 21.8 |
| | 2 | 841 - 876 | 24.7 |
| Superficie/Nubes/Propiedades Aerosoles | 3 | 459 - 479 | 35.3 |
| | 4 | 545 - 565 | 29.0 |
| | 5 | 1230 - 1250 | 5.4 |
| | 6 | 1628 - 1652 | 7.3 |
| | 7 | 2105 - 2155 | 1.0 |
| Color del Océano Fitoplancton Biogeoquímica | 8 | 405 - 420 | 44.9 |
| | 9 | 438 - 448 | 41.9 |
| | 10 | 483 - 493 | 32.1 |
| | 11 | 526 - 536 | 27.9 |
| | 12 | 546 - 556 | 21.0 |
| | 13 | 662 - 672 | 9.5 |
| | 14 | 673 - 683 | 8.7 |
| | 15 | 743 - 753 | 10.2 |
| | 16 | 862 - 877 | 6.2 |
| Vapor de agua atmosférico | 17 | 890 - 920 | 10.0 |
| | 18 | 931 - 941 | 3.6 |
| | 19 | 915 - 965 | 15.0 |

| Uso principal | Banda ¹ | Longitud de onda ¹ | Radiancia espectral |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------|
| Superficie/Temperatura nubes | 20 | 3.660 - 3.840 | 0.45(300K) |
| | 21 | 3.929 - 3.989 | 2.38(335K) |
| | 22 | 3.929 - 3.989 | 0.67(300K) |
| | 23 | 4.020 - 4.080 | 0.79(300K) |
| Temperatura atmosférica | 24 | 4.433 - 4.498 | 0.17(250K) |
| | 25 | 4.482 - 4.549 | 0.59(275K) |
| Nubes cirros | 26 | 1.360 - 1.390 | 6.00 |
| Vapor de agua | 27 | 6.535 - 6.895 | 1.16(240K) |
| | 28 | 7.175 - 7.475 | 2.18(250K) |
| Propiedades nubes | 29 | 8.400 - 8.700 | 9.58(300K) |
| Ozono | 30 | 9.580 - 9.880 | 3.69(250K) |
| Superficie/Temperatura nubes | 31 | 10.780 - 11.280 | 9.55(300K) |
| | 32 | 11.770 - 12.270 | 8.94(300K) |
| Altitud tope nubes¹ | 33 | 13.185 - 13.485 | 4.52(260K) |
| | 34 | 13.485 - 13.785 | 3.76(250K) |
| | 35 | 13.785 - 14.085 | 3.11(240K) |
| | 36 | 14.085 - 14.385 | 2.08(220K) |

¹ Bandas entre la 1 y la 19 están en nm, bandas entre la 20 y la 36 están en μm .

¹ Los valores de Radiancia espectral están expresados en ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$).

Una de las principales ventajas de los productos MODIS es que representan un enorme avance en el nivel de procesamiento al que se les ha sometido (existen un total de 4 niveles generales y 8 subniveles) gracias al uso de algoritmos muy específicos que generan productos de alta calidad debido a que ya incluyen las correcciones del efecto atmosférico, radiométricas y geométricas. Concretamente, en este trabajo se emplearán productos de los dos niveles de mayor procesamiento: L3 y L4.

- En el nivel 3, se incluyen productos de valor añadido que derivan de variables geofísicas cartografiadas. Incluso en ocasiones, se remuestrea a una menor resolución espacial y se elaboran compuestos de intervalos de tiempo (como 8 y 16 días). En nuestro caso los productos que se ha utilizado de este nivel han sido los índices de vegetación, la temperatura de superficie y los índices fPAR y LAI.
- El nivel 4 aglutina productos generados a partir de la utilización de modelos que incorporan datos MODIS para estimar variables geofísicas. Además se recurre a productos del nivel L2 y datos auxiliares. El índice de área foliar y la fracción de radiación activa fotosintética ha sido uno de los productos que se ha usado de este nivel.

Otro de los aspectos más característicos de los productos MODIS es la inclusión de información sobre la calidad de los mismos. Por lo general, un archivo HDF MODIS contiene varios conjuntos de datos científicos (Science Data Sets, SDS), una o más capas de control de calidad, y los metadatos. Concretamente se trata de metadatos conformados por índices sobre la calidad (Quality Assessment, QA) del producto o archivo en su conjunto y para cada uno de los píxeles de la imagen. Esta información adicional consiste en una síntesis estadística de ciertos atributos, así como una declaración sobre el control de calidad del producto.

El control de calidad constituye un proceso bastante complejo y laborioso que incluye la evaluación y documentación de la calidad científica de todos los productos MODIS. Aportan información sobre el grado de fiabilidad en la estimación del dato, acierto en las correcciones, presencia de nubes, aerosoles, vapor de agua, ozono, etc. No obstante, algunas de las fuentes más comunes de error en la calidad de los datos provienen de la aparición de bandeo en los datos de reflectividad superficial, errores de geolocalización atribuidas a las maniobras de los instrumentos, problemas derivados de la máscara de nubes, entre otros. Por ello, es recomendable consultar esta información de calidad antes de utilizar los datos.

Dado el gran número de productos de MODIS, las dependencias existentes entre ellos y los diferentes procedimientos de calidad que se aplican en ellos, es difícil proporcionar una descripción genérica y un enfoque aplicable a todos. De forma general, el control de calidad se genera durante la producción o en el post-control de calidad y la codificación de esta banda de calidad de los productos viene cifrada en palabras sueltas y códigos numéricos. La mayoría de estos controles son automáticos y existen dos fuentes de información de control de calidad que se pueden y deben consultarse:

- **Metadatos a nivel de archivo.** Estos resumen la calidad del conjunto de los datos de ese archivo. Incluyen metadatos adicionales de atributos (un porcentaje general de calidad y una evaluación específica para diversas variables), control de calidad a nivel de gránulo o imagen (incluyen las estadísticas QA y los indicadores QA o “Flags QA”, además de recoger porcentajes en evaluaciones basadas en la cobertura nubosa, datos perdidos, interpolaciones y datos extremos). Otros metadatos que se aportan son los de cabecera del archivo HDF y el archivo XML externo.

- **Metadatos a nivel de pixel.** Son los más valiosos y se distinguen dos tipos de implementaciones en función del tipo de pixel. El primero incluye una SDS de control de calidad que contiene varias fuentes de información realizadas a través de una codificación binaria. El segundo consiste en un SDS con una sola fuente de información, como por ejemplo, el grado de fiabilidad de píxeles en los índices de vegetación. Todos los productos MODIS contienen uno más SDS, fundamentales para comprender, analizar e interpretar la calidad del píxel. La nomenclatura usada en las bandas de calidad suele ser QA, Band Quality o QC, dependiendo del tipo de producto. Existen dos métodos para aportar parámetros científicos de la calidad a nivel de píxel:
 - Una representación binaria de combinaciones de bits que caracterizan a los atributos de calidad particulares.
 - Una palabra de control de calidad que representa una fuente información resumida sobre la calidad general de una variable.

Existen dos tipos de metadatos de control de calidad a nivel de pixel que varían según el producto.

- **Control de calidad global (MODLAND).** Aporta 1 ó 2 bits genéricos de control de calidad para cada pixel. Su propósito es proporcionar una interpretación uniforme de calidad de todos los productos de MODIS. A partir de la colección 5, algunos productos MODLAND se redujeron a un solo bit genérico, que refleja la evolución del algoritmo. No obstante, los productos seleccionados en este trabajo: como la temperatura superficial terrestre (LST), la reflectividad superficial o los índices de vegetación conservaron los 2 bits de QA, ya que siguen siendo relevantes en estos productos. Ello es debido a que el segundo bit describe la condición en la cual un pixel no se produjo debido a la presencia de nubes u otros efectos. Véase tabla 2.

Tabla 2. Control de calidad a nivel de pixel de todos los productos MODIS de la colección 4.

| Código por pixel | Interpretación |
|------------------|---|
| 00 | Pixel con buena calidad, no es necesario examinar más detalles. |
| 01 | Pixel con dudosa o incuantificable calidad, se recomienda examinar detalladamente la calidad. |
| 10 | Píxel no producido debido a efectos de la nubosidad |
| 11 | Píxel no producido por otras razones |

- **Control de calidad específico.** Este segundo tipo de metadatos aborda una variedad de atributos y condiciones característicos que constituyen elementos del producto. Por ejemplo, aquellos productos con un error significativo en las estimaciones (incertidumbres en la estimación de píxeles y/o rangos: es el caso de estimaciones del error en la estimación de la temperatura superficial). Por lo tanto, para cada producto se almacena información referente a la influencia que los factores externos tienen sobre la calidad y consistencia del producto final.

Estos datos incluyen las condiciones atmosféricas (como la cobertura de nubes), el tipo de superficie (costa, océano, humedales, aguas continentales, etc.), exploración, solar y la geometría de visualización. Además, se añade si los datos auxiliares dinámicos o estimaciones de copia de seguridad se han utilizado como entrada, por ejemplo, el uso de

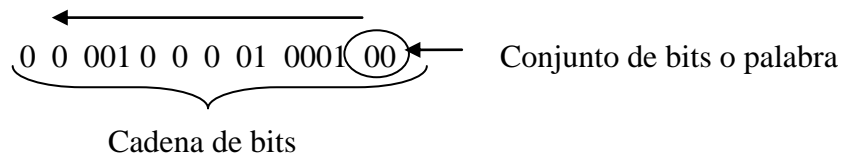
los aerosoles para estimaciones climatológicas utilizadas para reemplazar observaciones sin dato.

Para interpretar el mapa de bits con código binario basta con comprender la notación binaria (de base 2) que se utiliza para representar los valores. Un solo bit representa dos valores (0 ó 1), mientras que dos bits representan cuatro valores y tres bits representan ocho valores, etc.

Por otro lado, la información de calidad específica para cada producto MODIS se puede encontrar vía web en los enlaces existentes en MODIS Website. Generalmente, se descompone en cuatro columnas: la primera se identifica con el número de bits, la segunda columna recoge el nombre del parámetro, la tercera el valor bit que puede adquirir cada parámetro y la cuarta la descripción del campo bit. Asimismo, el usuario debe realizar una conversión desde los valores decimales de QA a código binario para analizarlos correctamente.

Hay que tener en cuenta que siempre se deberán añadir uno o varios ceros para completar la cadena de bits necesarios, que estará en función del número de valores digitales que tenga el valor del píxel.

Ejemplo aplicado a un caso del trabajo: Nos centramos en un píxel ubicado dentro del perímetro de un incendio estudiado que posee un valor decimal de “2116” en la banda QA del producto MOD13Q1 (Índices de vegetación) a 250 m. Con un conversor web de decimales a binario, obtenemos el código de 0000100001000100, después de añadirle 4 ceros a la izquierda para conseguir las 16 cifras. Esta cadena de bits deber ser analizada de izquierda a derecha y los conjuntos de bits o “palabras” dentro de él, de derecha a izquierda. A continuación, teniendo como referencia la tabla de especificaciones de calidad del producto en cuestión, se divide la cadena de 16 cifras en 9 subconjuntos o “palabras” leyéndolas de derecha a izquierda.



Por tanto, se obtiene la siguiente información:

00 = Significa que el píxel ha sido producido con una buena calidad y sin problemas.

0001 = Significa que el píxel es de alta calidad (2º categoría por debajo de la calidad suprema).

01 = Cantidad de aerosoles baja.

0 = Ausencia de nubes.

0 = Sin corrección atmosférica BRDF (Exclusivo de la colección 5 de MODIS).

0 = Sin nubes mixtas.

001 = Indica que es un píxel de tierra.

0 = No es un nieve o hielo.

0 = No es una sombra.

Por tanto, este píxel cumple todos los requisitos de calidad y sería idóneo para su uso en estudios científicos y aplicados.

Por otro lado, todos los productos de este sensor están sometidos a un proceso de validación, es decir, se comparan con datos tomados en campo en sitios de prueba, con otros datos de otros sensores (ASTER, AVHRR, Ikonos, TM/ETM+ y MISR) y con otros obtenidos de manera independiente. El proceso de validación consta de cuatro fases:

- Fase 1. Estimación de la fiabilidad utilizando datos independientes recabados en un pequeño número de lugares y periodos temporales.
- Fase 2. La evaluación de la calidad se realizó en base a un amplio conjunto de ubicaciones y fechas, además de contar con numerosos datos de campo. Es la fase de verificación de los productos seleccionados en este trabajo.
- Fase 3. Para la validación de la fiabilidad se recurrió a medidas independientes realizadas sistemáticamente y con una robustez estadística notable que incluye estimaciones sobre la incertidumbre. Aun pudiendo mejorarse, se consideran idóneos para su inclusión en publicaciones científicas.
- Fase 4. Los resultados de la validación de la fase 3 se actualizan cuando se desarrolla una nueva versión del producto.

Por último, una vez que los productos se generan se van reprocesando. Actualmente, la mayoría de los datos MODIS se encuentran en la versión 5. La cual ha incluido la mejora de las máscaras de nubes y sombra de los píxeles adyacentes a las nubes, las capas de calidad y el refinamiento de la corrección atmosférica, entre otras (García-Mora y Mas, 2011).

4.1. Los índices de vegetación (productos MOD13A2 y MOD13Q1)

Entre los numerosos indicadores que se podrían estudiar para caracterizar la severidad de las zonas incendiadas y pronosticar la evolución de la vegetación tras el incendio, lo más relacionados son el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (conocido como NDVI, por sus siglas en inglés) y la temperatura superficial (*Land Surface Temperature* – LST). El NDVI es quizás el índice de vegetación más empleado por numerosos estudios de teledetección y especialmente en el análisis multitemporal de áreas afectadas por incendios (Opazo y Chuvieco, 2007).

En este trabajo se han seleccionado los productos de índices de vegetación de MOD13A2 y MOD13Q1, pertenecientes al bloque de productos MODLAND. Ambos son resultado de la composición cada 16 días de los mejores píxeles y disponen de las mismas capas de información (véase tabla 3), si bien a diferente resolución espacial (el MOD13A2 a 1 km y el MOD13Q1 a 250 m). Sin embargo, a la hora de relacionar los datos con otras variables como la temperatura de superficie, solo es posible hacerlo con el MOD13A2, ya que sólo se proporcionan datos de LTS con una resolución espacial de 1 km.

De entre las 12 bandas que contienen estos productos, nos hemos centrado en: NDVI y EVI, así como en las bandas de Infrarrojo Cercano (NIR) y el Infrarrojo Medio (MIR) para la estimación de la severidad. El NDVI, fue propuesto por Rouse et al. (1974), consiste en una transformación normalizada de la relación entre la banda del infrarrojo cercano (IRC) y la reflectividad

en la banda del rojo. Su rango varía entre -1 y +1 y se expresa normalmente con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{IRC - Rojo}{IRC + Rojo}$$

Una de las ventajas del NDVI es que minimiza el ruido de correlación positiva entre ciertos tipos de banda, así como las influencias relacionadas con las variaciones en la radiación directa/difusa, las nubes y sus sombras, los ángulos solares y de visión, y la reducción del efecto atmosférico. Por otro lado, tienen el inconveniente de que las relaciones tienden a no ser lineales, manifestando comportamientos asintóticos, que conducen a la falta de sensibilidad a las variaciones de la vegetación en determinadas condiciones de terreno (mayor participación del suelo, roquedo, etc.). Asimismo, también se añade la dependencia espectral de la adicción atmosférica, las interacciones con la sombra y las reflexiones anisotrópicas del dosel.

Tabla 3. Especificaciones de los productos MOD13A2 y MOD13Q1 (Fuente: MODIS WebSite, 2013).

| Clave Producto | MOD13A2 | MOD13Q1 |
|-------------------------|---------|---------|
| Plataforma | Terra | Terra |
| Resolución temporal | 16 días | 16 días |
| Resolución espacial | 1 km | 250 m |
| Nivel de procesamiento* | L3 | L3 |
| Fase de Validación * | 2 | 2 |
| Número de capas | 12 | 12 |

**Nivel de procesamiento = L3.* Son productos de valor agregado derivados de variables geofísicas cartografiadas. En algunos casos, se realiza un remuestreo a una menor resolución espacial y se elaboran compuestos de intervalos de tiempo establecidos (16 días en el caso de este producto).

**Fase 2.* La evaluación se hizo basándose en un amplio conjunto de localizaciones y fechas además de contar con numerosos datos de campo.

Tabla 4. Contenido de las bandas de los productos MOD13A2 y MOD13Q.

| Banda | Dato |
|-------|--|
| 1 | NDVI |
| 2 | EVI |
| 3 | Información de calidad (VI Quality) |
| 4 | Reflectividad en el rojo (R) |
| 5 | Reflectividad en el Infrarrojo cercano (NIR) |
| 6 | Reflectividad en el azul |
| 7 | Reflectividad en el Infrarrojo medio (MIR) |
| 8 | Ángulo cenital de visión |
| 9 | Ángulo cenital solar |
| 10 | Ángulo acimutal relativo |
| 11 | Fecha de toma de píxeles del compuesto |
| 12 | Fiabilidad del píxel |

La aportación del EVI (*Índice de Vegetación Mejorado*) aparece para solucionar parte de los inconvenientes del NDVI, ya que minimiza el efecto atmosférico estimando su nivel de influencia. Su base se centra en la dependencia de las longitudes de onda donde se detecta la dispersión por los aerosoles. Como norma general, la dispersión de la banda azul es mayor que la de la banda roja. Por eso, cuando la concentración de aerosoles aumenta, la diferencia entre las dos bandas es mayor. Esta información es la que se utiliza para estabilizar el valor del índice y controlar las variaciones en los niveles de concentración de aerosoles. Además, el EVI incorpora el Índice de Resistencia Atmosférica (ARVI) junto con la eliminación de las variaciones provocadas por la reflectividad del suelo (semejante al SAVI) en la señal de la vegetación.

$$EVI = G \cdot \frac{IRC - Rojo}{IRC + C1 \cdot Rojo - C2 \cdot Azul + L}$$

Donde L es el ajuste del fondo del dosel para corregir las relaciones no lineales (diferencia entre el IRC y la reflectividad del rojo), C_1 y C_2 son los coeficientes de resistencia de aerosoles (que utiliza la banda del azul para corregir la influencia del aerosol en la banda del rojo) y G es la ganancia o factor escalar.

Por tanto, la principal ventaja del EVI es que es mejor a la hora de discriminar las zonas de alta densidad de vegetación, situación en las que el NDVI tiende a saturarse. Además, el NDVI es más sensible a la clorofila, mientras que el EVI lo es a las variaciones estructurales del dosel vegetal.

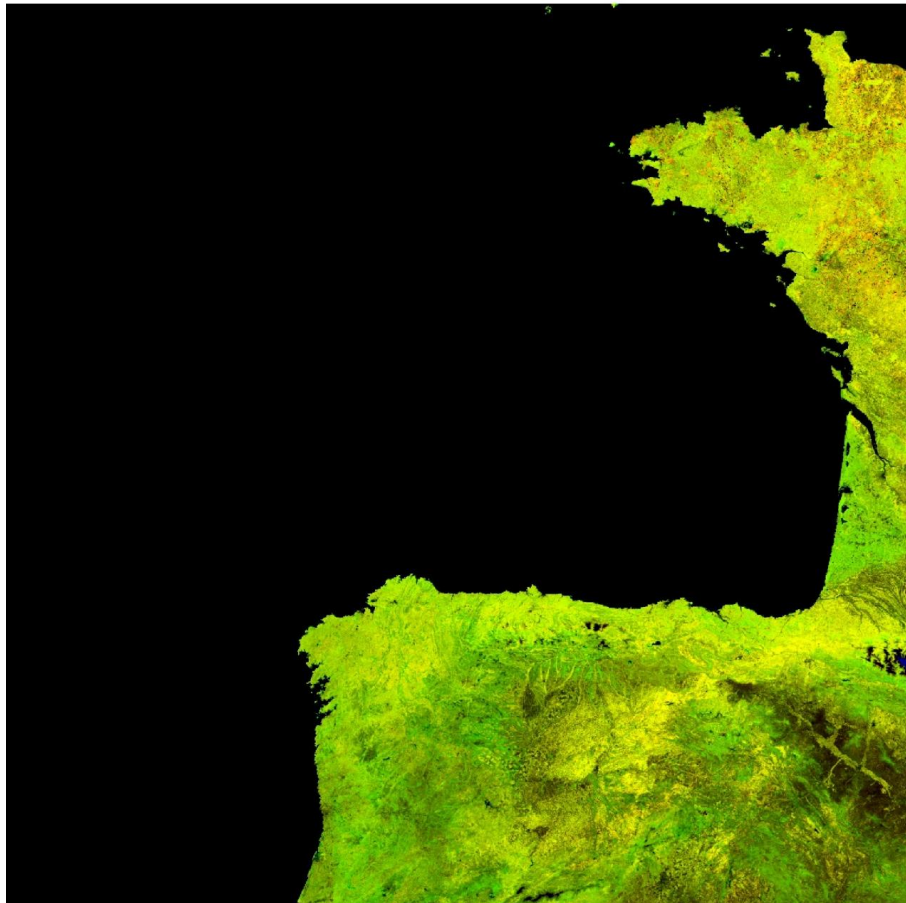


Figura 2. Imagen del producto MOD13A2 correspondiente al periodo del 1 al 9 de mayo de 2000, con una composición de falso color (NDVI=Verde, EVI=Rojo y Banda de Información de Calidad = Azul) perteneciente al tile 17h y 4v.

4.2. La temperatura superficial (producto MOD11A2)

Por su parte, la temperatura superficial del terreno (LST) es un parámetro clave para comprender la evolución de los ecosistemas afectados por el fuego debido a la influencia sobre los procesos hidro-geomorfológicos, la actividad microbiana, etc. El producto que finalmente se ha seleccionado es el MOD11A2, el cual se basa en una composición cada 8 días con el promedio de los mejores píxeles recopilados entre 2 y 8 días de otro producto, el MOD11A1. La resolución espacial de este último producto es exactamente de 0,928 km, aunque para simplificar los cálculos se redondeó a 1 km.

Para el estudio de la variable temperatura superficial solo nos quedaremos con la primera de sus 12 bandas (véase tabla 5), la de temperatura superficial diurna. El algoritmo empleado para calcular la temperatura utiliza las 7 bandas del infrarrojo medio y térmico (20, 22, 23, 29 y 31-33) y en base a la diferencia de brillo entre las bandas 31 y 32.

Tabla 5. Especificaciones del producto MOD11A2 (Fuente: MODIS WebSite, 2013).

| Clave Producto | MOD11A2 |
|------------------------|---------|
| Plataforma | Terra |
| Resolución temporal | 8 días |
| Resolución espacial | 1 km |
| Nivel de procesamiento | L3 |
| Fase de Validación | 2 |
| Número de capas | 12 |

Tabla 6. Contenido de las bandas del producto MOD11A2 (Fuente: *MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide*, 2007).

| Banda | Dato |
|-------|----------------------------------|
| 1 | LTS Diaria Diurna 1 km |
| 2 | Control de calidad diurno (QC) |
| 3 | Hora del día de observación |
| 4 | Ángulo de observación del día |
| 5 | LTS Diaria Nocturna |
| 6 | Control de calidad nocturno (QC) |
| 7 | Hora nocturna de observación |
| 8 | Ángulo de observación nocturno |
| 9 | Banda 31 de emisividad |
| 10 | Banda 32 de emisividad |
| 11 | Días de cielo despejado |
| 12 | Noches de cielo despejado |

4.3. El índice de área foliar y la fracción de radiación activa fotosintética (producto MCD15A2)

A fin de recabar variables complementarias a los índices de vegetación y temperatura superficial, se ha decidido elegir también el producto de Índice de Superficie Foliar y Fracción de Radiación Activa Fotosintética (LAI-fPAR). La razón de la selección de estas variables radica en que aportan información útil para la caracterización del tipo de regeneración que experimenta la vegetación tras el fuego y para detectar si presentan alguna dinámica o patrón temporal post-incendio.

Ambas variables se relacionan con la estructura y las propiedades ópticas del dosel por lo que influyen directamente en el intercambio de flujos de masa y energía entre el sistema atmósfera-biosfera y, en consecuencia, en la productividad de la cubierta vegetal. El índice de área foliar o LAI (*Leaf Area Index*), es una propiedad estructural importante del dosel que hace referencia a la cantidad de vegetación distribuida en la vertical, definiéndose como la superficie foliar fotosintéticamente activa (contabilizada por una sola cara) por unidad de suelo. Por su parte, la Fracción de Radiación Activa Fotosintética o fPAR (*fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) mide la fracción de la radiación incidente sobre una bóveda foliar (entre los 400 y 700 nanómetros) que es absorbida por las hojas para transformarla en energía química durante la fotosíntesis.

Esta clase de producto pertenece ya al nivel 4 de procesamiento, y al igual que la temperatura superficial, es un compuesto de 8 días a una resolución de 1 km. Dispone de un total de 6 bandas de información (véase tabla 8), de las cuales se han seleccionado las dos primeras.

Tabla 7. Especificaciones del producto MCD15A2 (Fuente: MODIS WebSite, 2013).

| Clave Producto | MCD15A2 |
|-------------------------|--------------------------|
| Plataforma | Terra y Aqua (Combinado) |
| Resolución temporal | 8 días |
| Resolución espacial | 1 km |
| Nivel de procesamiento* | L4 |
| Fase de Validación | 2 |
| Número de capas | 6 |

**Nivel de procesamiento = L4.* Son productos generados por la incorporación de los datos MODIS en modelos de estimación de variables geofísicas. Se generan usando productos del nivel L2 y datos auxiliares. (Janik García-Mora, T. y Mas J.F. 2011)

Tabla 8. Contenido de las bandas del producto MCD15A2 (Fuente: MODIS WebSite, 2013).

| Banda | Dato |
|-------|---------------------------------------|
| 1 | FPAR |
| 2 | LAI |
| 3 | Información de calidad FPAR-LAI |
| 4 | Información extra de calidad FPAR-LAI |
| 5 | Desviación Estándar FPAR |
| 6 | Desviación Estándar LAI |

El algoritmo de estos dos parámetros consiste en un procedimiento de explotación de la información espectral de un máximo de hasta 7 bandas del sensor MODIS, las centralizadas en los 648 nm, 858 nm, 470 nm, 555 nm, 1240 nm y 2130 nm. En el caso de que el algoritmo principal falle, se activa un algoritmo de copia de seguridad o auxiliar (*back-up*) utilizando índices de vegetación. El proceso requiere una clasificación de las cubiertas terrestres que es compatible con el modelo de transferencia radiativa utilizado en su obtención. Por tanto, el algoritmo tiene interfaces con las reflectividades superficiales de dos productos diferentes: MOD09 y MOD12, así como de datos auxiliares (ver tabla 9).

El primer producto (MOD09) se sintetiza tras una fase de procesamiento de datos, donde se combinan dos bandas de reflectividad (1 y 2 del sensor) y los ángulos solares, obteniendo un producto derivado con el código MODAGAGG, que ya recoge el paso de reflectividades a 250 o 500 metros de resolución, a la normalizada y corregida de 1 km. El segundo, MOD12Q1 utiliza 6 biomasa o ecosistemas modelos: pastos y cultivos cerealísticos, arbustos, cultivos de hoja ancha, sabana, bosques de hoja ancha y bosques de coníferas.

Tabla 9. Relación de entradas, variables y productos necesarios para el cálculo del algoritmo de LAI-fPAR.

| Entrada | Código | Variables utilizadas |
|---|-------------------|---|
| Reflectividad superficial agregada a 1 km | MODAGAGG | Reflectividad superficial. Reflectancias de las bandas 1 y 2 (3, 4, 5, 6, 7) Nota: las bandas en negrita son las usadas, y las bandas entre paréntesis, pueden ser utilizadas pero aún no forman parte de la producción. Ángulos: Sensor solar y azimut y ángulos cenitales (grados) para cada banda. |
| Definición global de cobertura de suelo trimestral a 1 km | MOD12Q1 | Land_Cover_Type_3, cobertura de suelo de 6 biomas o ecosistemas (recolección 4) |
| Datos auxiliares | MOD15_ANC_RIx.hdf | Coefficientes de transferencia radiativa, tablas de búsqueda de algoritmo y propiedades de variables de salida. |

En tercer lugar, se encuentran el conjunto de datos auxiliares, los cuales aglutinan información muy útil referida al modelo de transferencia radiativa, los patrones de clasificación de las cubiertas, las propiedades ópticas de la hoja y las soluciones a un conjunto de problemas relacionados con la incertidumbre y las soluciones aceptables de los cálculos.

En este sentido, el problema más común viene dado por la recuperación de los datos de LAI y fPAR tras haber aplicado la corrección atmosférica (BRDF o *Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional*). Ya que el algoritmo compara lo observado en el terreno con un conjunto de estructuras de dosel y patrones de suelo representativos de condiciones naturales esperadas. Es común que los patrones de dosel-suelo existentes y la corrección BRDF observada difieran de forma igual o menor que la incertidumbre, aunque son considerados soluciones aceptables. Por tanto, son los valores medios de LAI y fPAR los que se utilizan como solución y su dispersión como el grado de incertidumbre en la recuperación.

Si el problema antes planteado tiene una solución única para un conjunto dado de reflectividad, significa que LAI o fPAR coincide con esta solución y su dispersión es igual a cero. Si se permiten múltiples soluciones, el algoritmo proporcionará una media ponderada de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia de un valor dado.

A la hora de separar la contribución del suelo a la reflectividad observada del dosel y dividir la transferencia tridimensional de la radiación en cubiertas vegetales complejas se detectan dos sub-problemas.

- El campo de radiación en el follaje calculada para una superficie de color negro.
- El campo de radiación en el mismo medio (con superficie de color negro), pero generada por fuentes anisotrópicas ubicadas en la parte inferior del dosel vegetal.

Estos sub-problemas se resuelven siguiendo los términos de los tres componentes básicos de la ley de conservación energética: transmitancia, reflectancia y absorción del dosel vegetal. Estos tres elementos vienen recogidos en las tablas de consulta y el algoritmo interactúa solo con ellos siguiendo un modelo tridimensional.

El modelo tridimensional se sustenta en cuatro principios: (a) un algoritmo de recuperación, ya que usa cualquier modelo de radiación del dosel probado en el terreno, (b) la convergencia del algoritmo, donde cuanto más precisa sea la información disponible, más fiable será el algoritmo, (c) simpleza del algoritmo usando el modelo particular de radiación del dosel y, (d) uso sinérgico de la información espectral y angular.

Este producto tiene la particularidad de que posee una especie de máscara o conjunto de píxeles donde ya se ha hecho una primera clasificación de la cobertura existente, asignándoles un código específico en función del tipo de ocupación detectada. 254 para saladares o aguas interiores, 253 para suelos con escasa vegetación (roca, desierto, etc.), 252 para nieves perpetuas y hielo, 251 para humedales permanentes y marismas, 250 para suelo urbano o edificado y 249 para los no clasificados.

5. METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se exponen los diferentes pasos y tareas desarrollados en el proyecto, desde la obtención de la base de datos y perímetros de referencia, selección de los perímetros de interés, pasando por la descarga e importación de los diversos productos del sensor, el proceso de extracción de la información sobre las variables de interés, no sin antes haber sometido a las imágenes de MODIS a un procesamiento o preparación básicos. Asimismo, se comentarán los diferentes análisis considerados y tratamiento de los datos obtenidos, así como los inconvenientes que presentan.



Figura 3. Esquema sintético del proceso metodológico realizado en el presente trabajo.

5.1. Selección de incendios forestales

El primer paso consistió en seleccionar los incendios objeto de estudio a partir de la base de datos y cartografía de incendios forestales de la comunidad de Aragón para el periodo 2000-2010. Esta fuente fue desarrollada por miembros del grupo de GEOFOREST proyecto (Caixa-DGA, GA-LC-042/2011)

Los criterios de selección de los perímetros fueron por un lado, centrarse de todo el conjunto de incendios digitalizados, en aquellos cuya superficie calcinada fuera superior a las 100 hectáreas y pertenecieran al *tile* 17h y 4v. Por tanto, se seleccionaron un total de 24 perímetros calcinados repartidos entre las provincias de Zaragoza y Huesca, (véase tabla 9 y figura 3), por lo que aquellos restantes que no llegaron a ese límite fueron desestimados.

Tabla 9. Relación de incendios forestales de Aragón entre 2000 y 2010 (> 100 has.).

| Fecha | Municipio/os afectado /os | Nº de hectáreas |
|------------|---|-----------------|
| 25/08/2000 | Luesia | 139 |
| 26/08/2000 | Las Peñas de Riglos - Longás | 289 |
| 26/08/2000 | Sabiáñigo | 455 |
| 26/06/2001 | Ariza | 111 |
| 07/07/2001 | Santa Cruz de Grío - Tobed | 226 |
| 01/08/2001 | Loarre - Las Peñas de Riglos – Murillo de Gállego | 3278 |
| 01/08/2001 | Jaca | 225 |
| 30/06/2003 | Ayerbe - Biscarrués | 183 |
| 29/07/2003 | Encinacorba | 278 |
| 25/08/2003 | Lopornazo | 269 |
| 08/08/2004 | Abanto | 111 |
| 01/09/2004 | Zaragoza | 696 |
| 16/07/2005 | Nuévalos | 300 |
| 14/08/2005 | Luna | 543 |
| 14/06/2006 | Uncastillo - Castiliscar | 239 |
| 17/06/2006 | Ibieca | 279 |
| 2006 | Sos del Rey Católico | 412 |
| 16/06/2007 | Huesca | 138 |
| 05/08/2008 | Zuera | 2514 |
| 22/07/2009 | Morés | 560 |
| 29/07/2009 | Jaulín | 1706 |
| 01/08/2009 | Terrer | 679 |
| 18/08/2009 | Zaragoza | 6978 |

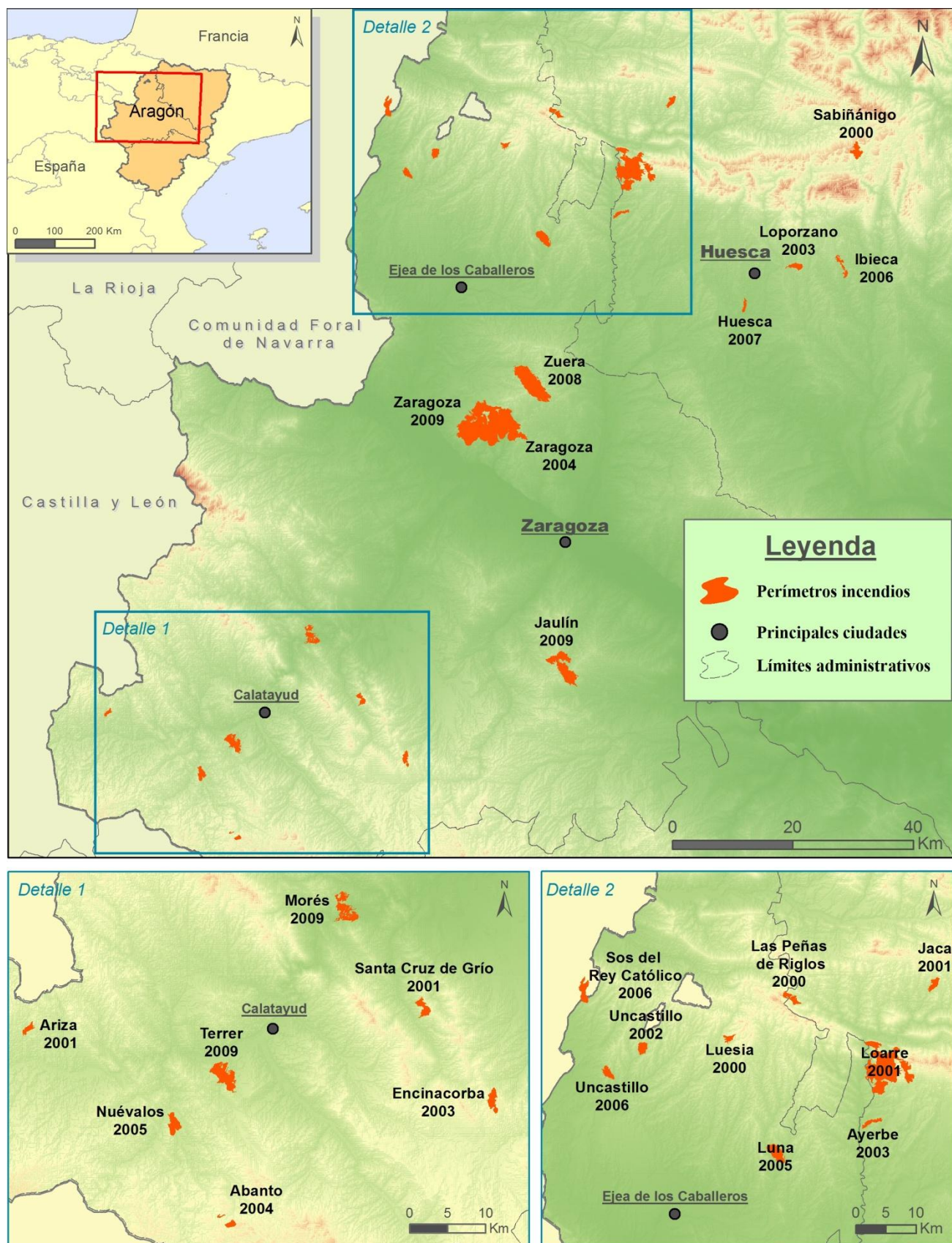


Figura 3. Mapa de localización de los incendios forestales del decenio 2000-2010, con sus respectivas fechas.

Elaboración propia.

Fuentes cartográficas: IGN y SITAR (bases cartográficas), GEOFOREST (perímetros de incendios).

5.2. Descarga y tratamiento de productos MODIS

Una vez recabados todos los perímetros de los incendios de interés se procedió a la descarga de los datos MODIS comentados en los apartados anteriores. El servidor utilizado fue el *Earth Explorer* del USGS: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Al descargar los datos se seleccionó el *tile* o imagen de 17h y 4v de la rejilla de la proyección sinusoidal de MODIS (véase figura 4) y las imágenes referidas a la primera semana de mayo (día 9) y la primera quincena de septiembre (día 14). Se seleccionaron estas fechas porque se consideran claves para visualizar el contraste entre la actividad fotosintética de la vegetación a finales de primavera y el descenso de la misma al final del verano, coincidiendo con el final del periodo con mayor número de incendios forestales. En total se descargaron unas 76 imágenes: 20 por cada uno de los productos, excepto para el caso del MCD15A2, que fueron 16.

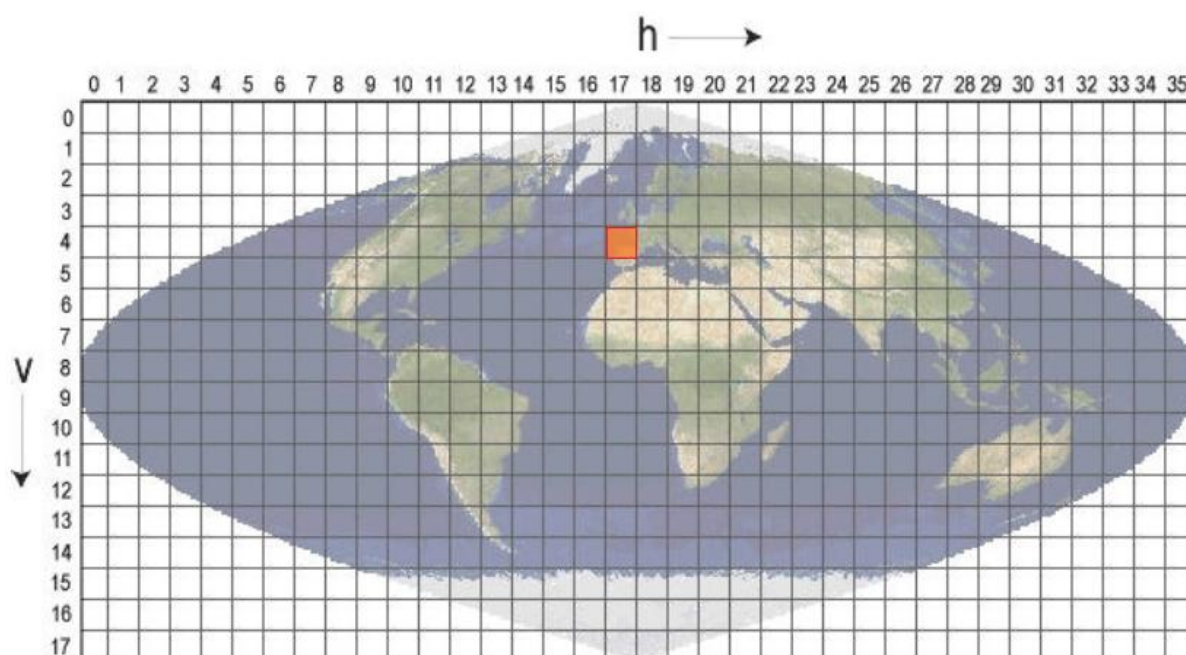


Figura 4. Sistema de proyección sinusoidal de los “tiles” MODIS.

Todos los productos MODIS se encuentran codificados en el formato HDF (*Hierarchical Data Format*) y la nomenclatura utilizada para identificarlos está ya estandarizada por la NASA. Lo que permite conocer a qué plataforma pertenece, el nombre del producto, fecha de adquisición (año y día juliano), versión y fecha de procesamiento (véase figura 5).

$$\underbrace{\text{MOD13A2}}_1 \underbrace{\text{.A2005129}}_2 \underbrace{\text{.h17v04}}_3 \underbrace{\text{.005}}_4 \underbrace{\text{.2008032151259}}_5 \underbrace{\text{.2008032151259}}_6$$

Figura 5. Nomenclatura utilizada para identificar a los productos MODIS de niveles de procesamiento superiores.

1. Las tres primeras siglas indican el nombre corto de la plataforma (MOD = Terra, MYD = Aqua y MCD para datos combinados de ambas).
2. Este número se refiere al tipo de producto.

3. Fecha de adquisición de la imagen. (año y día juliano: día juliano 129 equivale al 9 de mayo).
4. Coordenadas del *tile* o imagen en la rejilla sinusoidal de MODIS. (en este ejemplo, 17 horizontal y 4 vertical).
5. Estas tres cifras hacen referencia a la versión de procesamiento o colección, en este caso a la 5.
6. En último lugar, aparece la fecha de procesamiento (año, día juliano, hora, minuto y segundo). En este caso año 2008, día juliano 032 (2 de febrero), 15 hrs., 12 min y 59 seg.

Por ello, debido a que el nombre completo de los archivos de los productos descargados posee una longitud considerable, y para poder visualizarlos correctamente en programas como ERDAS Image 10, fue necesario importarlos en su mismo formato y renombrarlos con códigos o nombres más cortos. Seguidamente, se procedió a reproyectar las imágenes a WGS 1984 UTM Zona 30, debido a que en origen poseen por defecto la proyección WGS 84 Sinusoidal, muy poco utilizada. Este proceso también se realizó en el software ERDAS.

Otro de los procedimientos necesarios para interpretar los datos de los distintos productos, fue su conversión a las unidades de medida usuales. Debido a que los datos brutos extraídos de las imágenes están codificados en otros rangos. Para su conversión fue necesario multiplicarlos por unos factores escalares proporcionados por las guías de usuario específicas para cada producto MODIS (véase tabla 10).

Tabla 10. Ejemplo de conversión de los datos de los distintos productos de MODIS y sus factores escalares. (Elaboración propia)

| Producto | Resolución Espacial | Variable | Factor Escalar | Valor Bruto | Conversión | Unidad |
|----------|---------------------|----------|----------------|-------------|------------|---------------|
| MOD13A2 | 1 km | NDVI | 0.0001 | 2319 | 0.23 | |
| | | EVI | 0.0001 | 900 | 0.09 | |
| MOD13Q1 | 250 m | NDVI | 0.0001 | 3138 | 0.31 | |
| | | EVI | 0.0001 | 1399 | 0.14 | |
| | | NIR | 0.0001 | 4104 | 0.41 | |
| | | MIR | 0.0001 | 945 | 0.09 | |
| MOD11A2 | 1 km | LST | 0.02 | 15169 | 303.38 | Grados Kelvin |
| MCD15A2 | 1 km | FPAR | 0.01 | 46 | 0.46 | |
| | | LAI | 0.1 | 13 | 1.3 | |

*Los datos del ejemplo están referidos al 14 de septiembre de 2001 dentro del perímetro del incendio de Las Peñas de Riglos. Excepto en el caso del producto MCD15A2 (LAI-fPAR), cuya fecha es del 9 mayo de 2003.

5.3. Estimación y cartografía de la severidad del incendio

El concepto de severidad del incendio se define como la cuantificación de los efectos del fuego a corto plazo en la situación post-fuego inmediata al suceso (Veraverbeke et al., 2011). Para ello es necesario contar con una imagen anterior y otra posterior y reciente al incendio, para poder estimar el NBR (*Normalized Burn Ratio* o Índice Normalizado de Quema). El cuál se ha convertido en el índice espectral estándar más aceptado para evaluar la gravedad del fuego (Ve-

raverbeke et al., 2012). Concretamente el NBR se centra en relacionar dos variables, por un lado la actividad fotosintética de la vegetación, la cual se puede detectar muy claramente en la banda del infrarrojo cercano (NIR) y por otro lado, el contenido de humedad de la vegetación proporcionado por el infrarrojo medio (MIR). A través de la combinación de ambas bandas se consigue calcular la diferencia de reflectividad entre el pre-incendio y el post-incendio o dNBR, que permite obtener el valor de la variable en cuestión. El cual dependerá del tipo de combustible quemado, el tiempo de exposición y la temperatura que han alcanzado las llamas. El cálculo del NBR y la diferencia entre la situación prefuego y postfuego vienen dada por las expresiones de la figura 6.

En este trabajo se recurrió a la información de las bandas 5 y 7 del producto MOD13Q1, estas bandas contienen la reflectividad en el infrarrojo cercano e infrarrojo medio, respectivamente. Y corresponden a las bandas 2 y 7 del sensor MODIS centradas en los 858 nm y los 2.130 nm. Con estas dos bandas se ha elaborado una imagen combinada mediante un *layer stack*, poniendo como 1ª banda el NIR y como 2ª el MIR.

$$NBR = \frac{NIR (Banda 2) - MIR (Banda 7)}{NIR (Banda 2) + MIR (Banda 7)}$$

$$dNBR = NBR \text{ Anterior al incendio} - NBR \text{ Posterior al incendio} = \text{SEVERIDAD}$$

Figura 6. Fórmulas del NBR y dNBR para el cálculo de la severidad.

Para ejecutar el índice anterior sobre las imágenes combinadas, se recurrió al módulo de *Model Maker* del ERDAS. Donde se diseñó un modelo (véase figura 7) en el cuál se incluyeron las imágenes de la situación prefuego (mayo) y el postfuego (septiembre) de todos los grandes incendios del decenio estudiado.

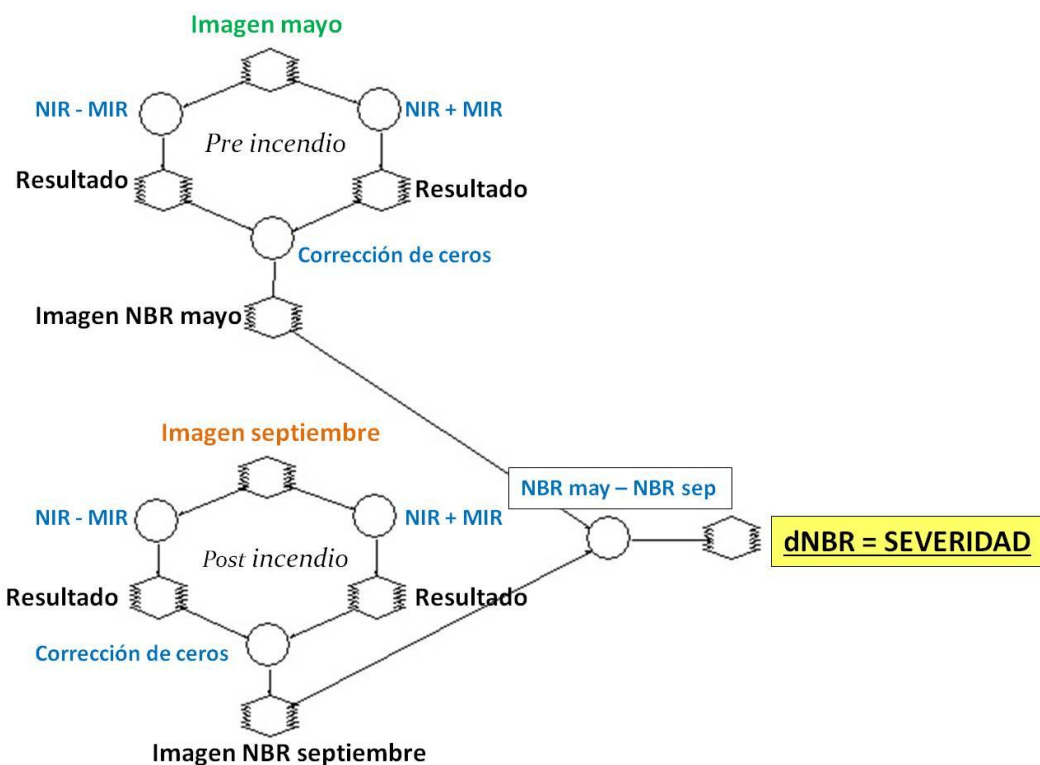


Figura 7. Modelo base de NBR y dNBR elaborado en el *Model Maker* de ERDAS Imagine 10.

Se realizaron las restas y sumas por separado de las bandas del NIR y MIR para posteriormente emplear una función que ignorara los valores 0 en el resultado de las operaciones. Una vez hecho esto ya se disponía de la imagen de NBR del preincendio y postincendio. El último paso era restar ambas imágenes y multiplicar el resultado por 1.000, para así obtener la imagen con los valores propios de dNBR o severidad del incendio. Según Carl y Nathan (2006) los resultados comunes de dNBR oscilan entre los 100 y los 1.300 (véase tabla 11) en función del grado de intensidad con la que ha incidido el fuego y sus umbrales han sido definidos tras su validación y calibración en campo de zonas quemadas.






Tabla 11. Niveles de severidad ordinales y ejemplo de rangos de dNBR (a escala de 10^3).

Fuente: Carl H. y Nathan C., 2006

| Nivel de Severidad | Rango dNBR |
|---------------------------|--------------|
| Rebrote vegetal alto | -500 a -251 |
| Rebrote vegetal bajo | -250 a -101 |
| No quemado | -100 a +99 |
| Severidad baja | +100 a +269 |
| Severidad moderada - baja | +270 a +439 |
| Severidad moderada - alta | +440 a +659 |
| Severidad alta | +660 a +1300 |

A continuación, se cortaron las imágenes de dNBR usando el perímetro de cada incendio, teniendo en cuenta que los píxeles que quedaron dentro fueron los que tenían su centroide dentro del polígono. Seguidamente, utilizando los rangos de clasificación anteriores de niveles de severidad, se procedió a reclasificar los valores de dNDR de todos los incendios recientes en el entorno de ArcMap 10.1. Para ello se les asignó una codificación del 1 al 5, en función de la categoría de intensidad de la quema, así como un color intuitivo para su rápida y clara interpretación (ver tabla 12).

Tabla 12. Reclasificación de los valores de dNBR.

| Nivel de Severidad | Rango dNBR | Valor asignado | Color Asignado |
|---------------------------|--------------|----------------|---|
| No quemado | -100 a +99 | 1 |  |
| Severidad baja | +100 a +269 | 2 |  |
| Severidad moderada - baja | +270 a +439 | 3 |  |
| Severidad moderada - alta | +440 a +659 | 4 |  |
| Severidad alta | +660 a +1300 | 5 |  |

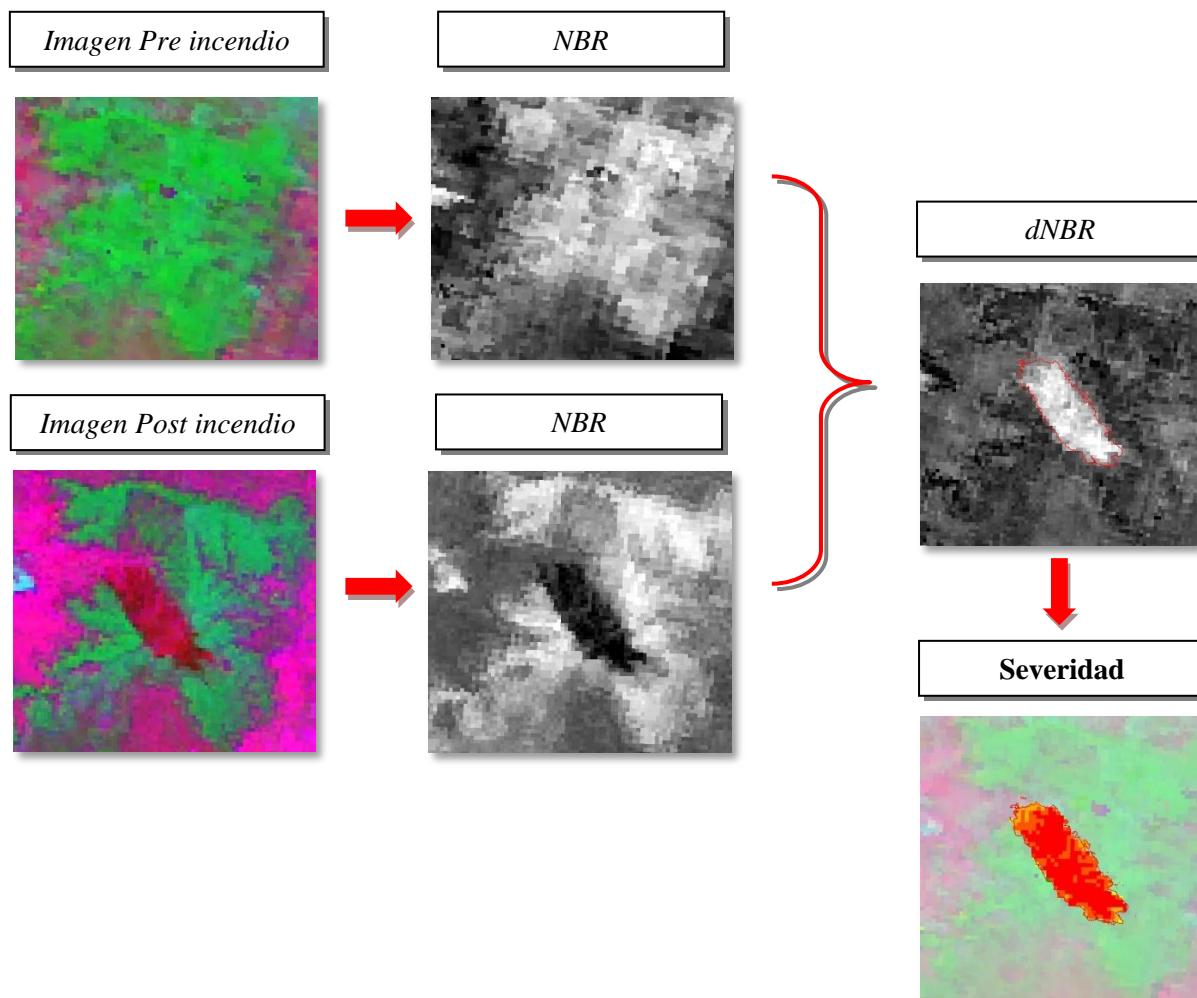


Figura 8. Esquema del proceso de cálculo del NBR, dNBR y la reclasificación de los niveles de severidad. (Ejemplo: Incendio de Zuera 2008). Elaboración propia.

5.4. Seguimiento de la dinámica postfuego

Como se ya se ha comentado en apartados anteriores, los índices de vegetación (NDVI y EVI) y la temperatura de superficie (LST) fueron los parámetros que se extrajeron de las imágenes para estudiar la evolución de la vegetación tras el incendio. Para ello se realizaron imágenes combinadas de cada mes de mayo y septiembre por año de productos diferentes (MOD13A2 y MOD11A2, ambos a 1 km), mediante un *layer stack* en el entorno de ERDAS Imagen. De modo que se añadieron en primer lugar como capas 1 y 2 el NDVI y EVI, respectivamente; y en la 3ª capa la LST. Ello facilitaba posteriormente la sustracción de los datos de interés a través de puntos por cada píxel con la función de *Sample* en el entorno ya de ArcMap 10.1. Una vez, obtenida las tablas correspondientes para cada incendio, se exportaba a Excel, donde se editaba y se calculan las medias aritméticas para cada variable y mes.

Por otro lado, el procedimiento se repitió exactamente igual al descrito arriba, en este caso para el producto MOD13Q1 de 250 metros de resolución. Sólo que en este caso las imágenes combinadas tuvieron cuatro bandas. Las dos primeras con los índices de vegetación y las dos últimas, con las reflectividades del NIR y MIR. Asimismo, también fue necesario el recorte de estas imágenes ciñéndolas al sector estudiado de Aragón, para agilizar el proceso de extracción de los datos.

5.5. Obtención del LAI - FPAR

El proceso de obtención de los datos de LAI-fPAR del producto MCD15A2 se desarrolló de igual manera que en el caso de las otras variables anteriormente comentadas. También se generaron imágenes compuestas sólo con las dos primeras bandas, y se confeccionó la base de datos en este caso sólo de los grandes incendios (mayores de 500 hectáreas) del decenio 2000-2010. Además se incluyeron los incendios antiguos desde 1975 cuya localización coincidiera con el *tile* 17h y 4v (véase tabla 13). Hay que añadir, que fue necesaria la eliminación de un incendio acontecido en Murillo del Gállego en el año 1986, debido a que presentaba valores anormalmente elevados, lo que podría desvirtuar los análisis.

Tabla 13. Relación de grandes incendios forestales del periodo 1975-1995 del sector occidental de Aragón.

| Fecha | Municipio /s afectado /s | Nº Hectáreas |
|------------|---|--------------|
| 31/07/1975 | Las Peñas de Riglos - Longás - Bailo | 1.279 |
| 05/08/1975 | Las Peñas de Riglos | 639 |
| 13/09/1977 | Nueno | 809 |
| 25/07/1978 | Luna | 1.809 |
| 30/08/1978 | Loporzano | 1.109 |
| 08/07/1979 | Zuera | 759 |
| 07/08/1980 | Nueno | 523 |
| 13/07/1981 | Luna - Agüero - Murillo de Gállego | 2.248 |
| 24/04/1981 | Sabiñánigo | 762 |
| 15/07/1982 | Ateca - Bubierca - Moros | 649 |
| 30/07/1983 | Asín - Biota - Uncastillo | 2.536 |
| 23/07/1984 | Calatayud - El Frasno - Paracuellos | 1.120 |
| 05/08/1985 | Las Peñas de Riglos | 735 |
| 28/08/1985 | Anzánigo - Caldearenas | 694 |
| 28/08/1985 | Caldearenas | 692 |
| 31/07/1986 | Nueno - Sabiñánigo | 1.706 |
| 06/08/1986 | Nueno - Arguis | 508 |
| 13/09/1987 | Fuentes de Jiloca - Montón | 653 |
| 27/08/1991 | Ambel - Talamantes - Añón de Moncayo | 1.847 |
| 12/09/1993 | Calcena - Purujosa - Talamantes | 3.695 |
| 04/07/1994 | Ayerbe - Biscarrués | 537 |
| 16/07/1994 | Sos del Rey Católico - Uncastillo - Castiliscar | 8.078 |
| 16/07/1994 | Uncastillo - Sos del Rey Católico | 2.424 |
| 21/08/1994 | Bailo - Jaca - Las Peñas de Riglos | 1.814 |
| 23/06/1995 | Zuera -Castejón de Valde | 2.491 |

Los valores que adquieren estos dos parámetros y, según la estandarización que sigue la NASA, oscilan entre el 0 y el 8 para el caso del LAI y entre 0 y 1 para fPAR

A través de la recopilación de antiguos incendios, se perseguía el propósito de calcular posteriormente y mediante parámetros estadísticos la sensibilidad de estos productos para identificar zonas quemadas en el pasado, basándose en el porcentaje de área foliar y producción fotosintética. Para el cálculo de esa estimación se confeccionó una base de datos (véase tabla 14) que reunía de forma continua todos los incendios forestales con los campos de año de ocurrencia, código ID (para identificar cada suceso), las variables de fPAR y LAI para los meses de mayo y septiembre y el año de adquisición de la imagen MODIS.

Tabla 14. Ejemplo parcial de la base de datos de fPAR y LAI de incendios forestales antiguos.
(Incendio del ejemplo: Las Peñas de Riglos – Longás 1975).

| | ID | fPAR May | LAI May | fPAR Sep | LAI Sep | Año Imagen MODIS |
|------|----|----------|---------|----------|---------|---------------------|
| 1975 | 5 | 0.60 | 1.70 | 0.60 | 1.30 | 2003 |
| 1975 | 5 | 0.47 | 1.00 | 0.39 | 0.70 | 2003 |
| 1975 | 5 | 0.53 | 1.40 | 0.66 | 1.70 | 2004 |
| 1975 | 5 | 0.37 | 0.70 | 0.43 | 0.80 | 2004 |
| 1975 | 5 | 0.64 | 1.70 | 0.58 | 1.30 | 2005 |
| 1975 | 5 | 0.32 | 0.60 | 0.37 | 0.60 | 2005 |
| 1975 | 5 | 0.67 | 2.20 | 0.64 | 1.60 | 2006 |
| 1975 | 5 | 0.45 | 1.00 | 0.41 | 0.70 | 2006 |
| 1975 | 5 | 0.61 | 1.80 | 0.63 | 1.50 | 2007 |
| 1975 | 5 | 0.46 | 1.00 | 0.38 | 0.60 | 2007 |
| 1975 | 5 | 0.55 | 1.40 | 0.65 | 1.60 | 2008 |
| 1975 | 5 | 0.45 | 1.00 | 0.45 | 0.80 | 2008 |
| 1975 | 5 | 0.59 | 1.60 | 0.60 | 1.40 | 2009 |
| 1975 | 5 | 0.45 | 1.00 | 0.35 | 0.60 | 2009 |
| 1975 | 5 | 0.60 | 1.60 | 0.65 | 1.60 | 2010 |
| 1975 | 5 | 0.37 | 0.80 | 0.40 | 0.70 | 2010 |
| 1975 | 6 | 0.61 | 2.10 | 0.56 | 1.50 | 2003 |
| 1975 | 6 | 0.62 | 1.80 | 0.57 | 1.40 | 2003 |
| 1975 | 6 | 0.60 | 1.70 | 0.59 | 1.40 | 2003 |
| . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . |

Previamente, ha sido necesario eliminar del conjunto de todos los incendios aquellos píxeles que no cayeran íntegramente dentro de los límites del perímetro del incendio. Este paso fue primordial para poder asegurar una mejor consistencia de los análisis al ceñirse solo a los píxeles puros, sin contar con aquellos “contaminados” y ubicados generalmente en los límites del perímetro de la zona incendiada. Asimismo, se han excluido de los cálculos un total de cuatro píxeles que aún estando completamente dentro de la zona incendiada, poseían valores anormalmente elevados de las variables consideradas con el propósito de que no desvirtuaran excesivamente los resultados.

A continuación, se ha procedido a su exportación al software SPSS Statistics 21. Donde primeramente se agruparon los incendios por quinquenios (asociándole un código numérico a cada uno: 1 para 1975-1980, 2 para 1981-1985, 3 para 1986-1990, 4 para 1991-1995, 5 para 2001-2005 y 6 para 2006-2010). Hay que aclarar que el quinquenio 1996-2000 fue desestimado, ante la escasa ocurrencia de incendios importantes.

Posteriormente, se realizaron los diferentes análisis: correlación entre variables (gráficos de dispersión de ambas variables conjuntamente y por quinquenios), ANOVA de un factor del fPAR y LAI de mayo y septiembre relacionándolo con el año de la imagen y barras de error donde se relacionaron el fPAR o LAI de un mes en concreto (mayo o septiembre) con los quinquenios, el ID del incendio, el año de la imagen MODIS, el año del incendio y los incendios recientes. Una vez obtenidos y analizados todas las variantes de gráficos se eligieron aquellos más representativos.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se presentan los distintos resultados obtenidos en la extracción de los datos MODIS de las variables seleccionadas para caracterizar las zonas incendiadas. Se diferencian tres apartados acorde con los distintos objetivos del trabajo.

El primer análisis se centra en evaluar el grado de severidad de los grandes incendios forestales e identificar y cartografiar aquellos en los cuales los valores sean elevados y homogéneos espacialmente, ya que manifestarán ser los más gravemente castigados por las llamas.

El segundo se dividirá en dos sub-apartados; por un lado, se tratará la evolución temporal de los índices de vegetación NDVI y EVI (comparando las diferencias entre las resoluciones de 1 km y 250 m), así como de la temperatura de superficie (LST).

Por último, se añadirá un apartado complementario de análisis estadístico de los datos de LAI y fPAR, tanto para los grandes incendios (superiores a 500 has) recientes como para los acaecidos desde 1975. Con el objetivo de poder conocer hasta que umbral temporal permiten estos productos inferir la fecha de ocurrencia de un determinado suceso.

6.1. Análisis de la severidad

El análisis del grado de severidad con el que el incendio afecta a la zona forestal es uno de los parámetros más trascendentes y clarificadores de la gravedad del evento. Gracias al uso del modelo de NBR y al cálculo posterior de la diferencia entre las imágenes de la situación anterior y posterior al incendio se consiguió obtener la cartografía de cada uno de los 24 incendios estudiados del decenio 2000-2010, ya que evidentemente, no podemos disponer de la información de incendios anteriores a la primera imagen disponible de MODIS.

Hay que añadir que la distribución de los valores de severidad no son homogéneos en el interior del perímetro del incendio sino que presentan variaciones espaciales, tal y como afirman Carl, H. y Nathan C. (2006), por lo que los resultados obtenidos muestran la heterogeneidad espacial de los incendios y como el fuego interacciona con la vegetación, la topografía, el régimen de vientos locales, las condiciones atmosféricas, etc. En el gráfico 1 se muestran a nivel individual la reclasificación de los

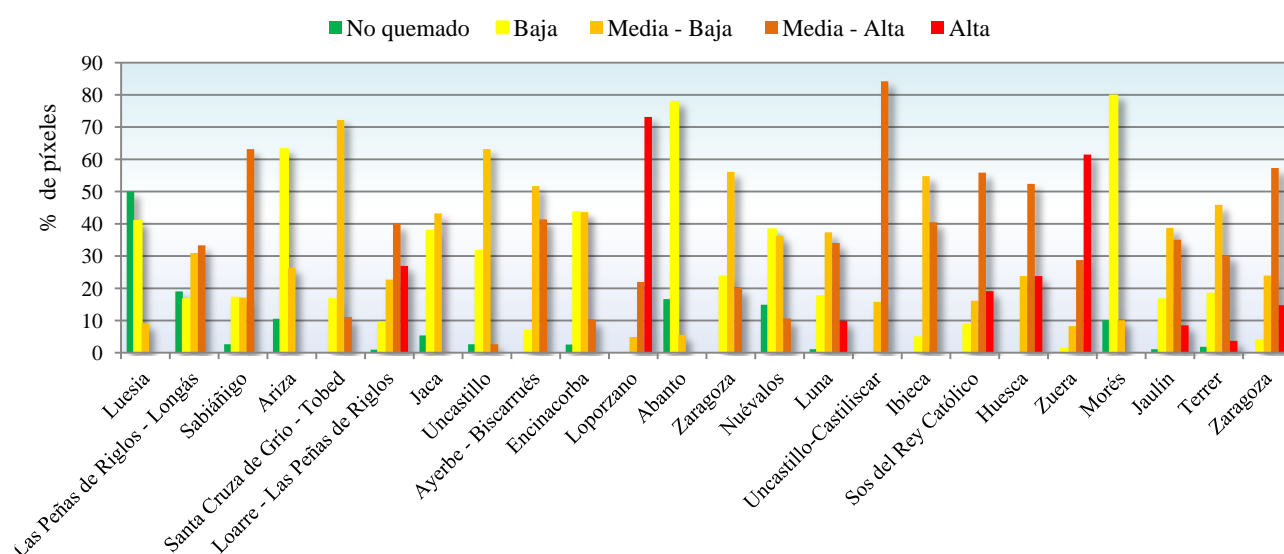


Gráfico 1. Porcentaje de píxeles a 250 m según su grado de severidad para cada incendio de la década 2000-2010. Elaboración propia.

píxeles para cada incendio en función de la intensidad de la quema con las imágenes de 250 m de resolución. A grandes rasgos, se puede observar como el porcentaje de píxeles no quemados se concentra principalmente en los incendios del primer lustro de la década, lo que tiende a demostrar la menor virulencia de los mismos. Por el contrario, los píxeles de alta severidad son más numerosos a medida que avanzan los años, lo que demuestra un aumento de la gravedad de los sucesos.

Por lo que respecta a los incendios más graves del periodo estudiado, se observa que el de Zuera 2008, se lleva el primer puesto en cuanto al número y porcentaje de píxeles detectados con una alta severidad. El segundo incendio más grave sería el de Loarre 2001, por su mayor extensión (3.278 hectáreas y 140 píxeles de alta severidad) si se compara con el caso de Loporzano, el cual presenta un número importante de píxeles de alta severidad, si bien sus dimensiones son mucho menores (269 hectáreas y 30 píxeles de intensidad alta). El resto de incendios se reparten en mayor o menor medida entre la moderada-alta y moderada-baja severidad.

Asimismo, en cuanto a la variedad de grados de severidad, puede apreciarse que predomina la heterogeneidad espacial en el interior de la superficie calcinada, detectándose varios grados de intensidad de la quema para numerosos incendios. No obstante, existen algunos casos donde se da una homogeneidad en la gravedad de superficie calcinada, como es el caso de Uncastillo 2006, Morés 2009 y Abanto 2004.

En definitiva y desde un punto de vista general, se puede concluir que la mayoría del conjunto de píxeles estudiados han sido clasificados con una alta y moderada-alta severidad, lo que representa un porcentaje importante de más de la mitad de los píxeles estudiados (59,37 %).

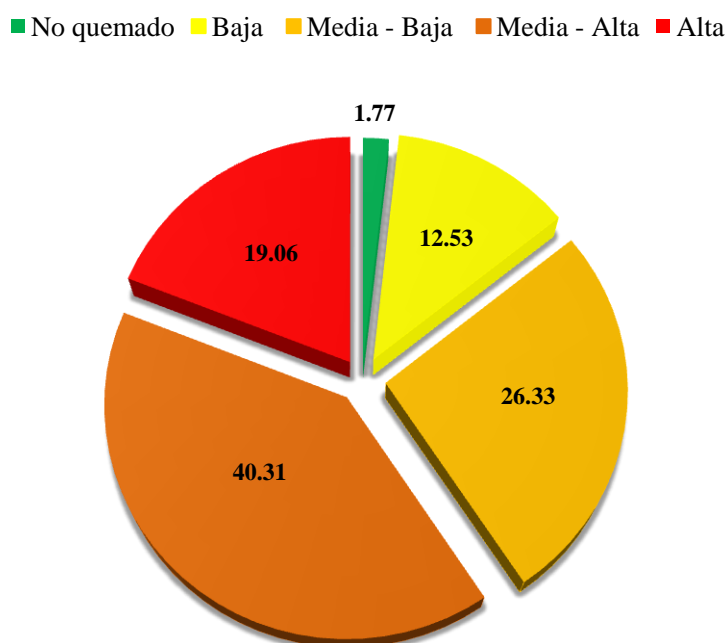


Gráfico 2. Porcentaje total de píxeles por categoría de severidad del conjunto de incendios del periodo 2000-2010. Elaboración propia.

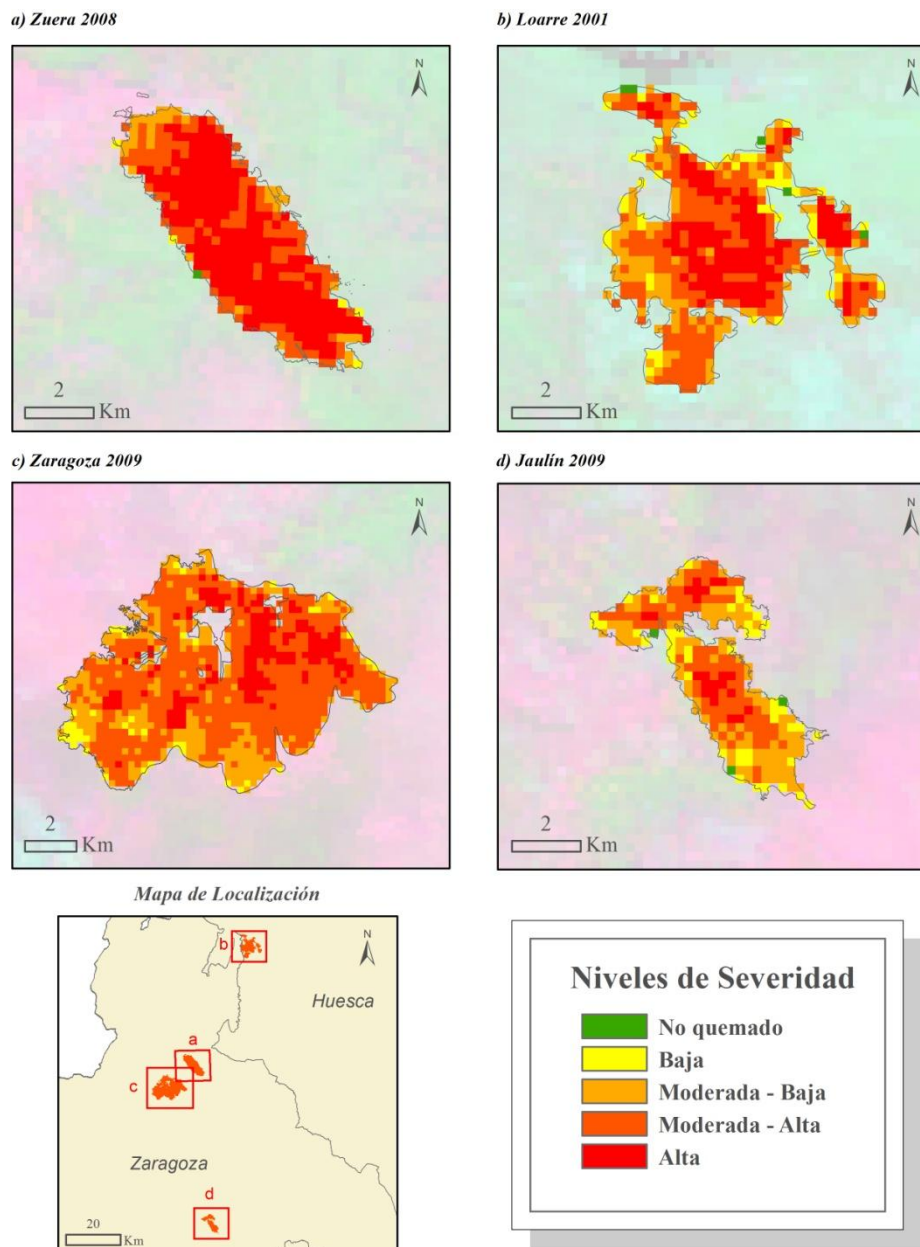


Figura 9. Cartografía de la severidad del incendio para los cuatro incendios más extensos de la zona de estudio (Zuera 2008, Loarre 2001, Zaragoza 2009 y Jaulín 2009). Elaboración propia.

6.2. Análisis de la evolución de la vegetación en el postfuego

6.2.1. Los índices de vegetación

Otro de los aspectos fundamentales a estudiar era la evolución de la dinámica de la vegetación tras el incendio. Como ya se ha mencionado los índices de vegetación (NDVI y EVI) fueron los principales parámetros en los que se centró el estudio y, según el conjunto de los datos analizados, se confirma la utilidad que poseen estos sencillos índices para el seguimiento o monitoreo de la recuperación de la vegetación.

De las resoluciones espaciales consideradas, lógicamente la de 250 m aporta mucho mayor detalle y precisión en el seguimiento, ya que los píxeles no tienen tanta mezcla de otros elementos y coberturas, y por lo tanto cuentan con información más pura que los de las imágenes a 1

km. Asimismo, también aportan indirectamente una primera aproximación general al grado de severidad del incendio. En la tabla 15 se pueden apreciar las pequeñas mejoras que introduce el aumento de la resolución espacial a la hora de apreciar mejor los descensos en los índices coincidiendo con el evento del incendio.

Tabla 15. Clasificación de los incendios del decenio 2000-2010 en función de su capacidad de distinción de cambio en los índices de vegetación según las diferentes resoluciones espaciales (1km y 250 m).

| Fecha | Municipio/os Afectado/os | Nº hectáreas | 1 km | 250 m |
|--------------|------------------------------|--------------|-----------|-----------|
| 25/08/2000 | Luesia | 139 | | |
| 26/08/2000 | Las Peñas de Riglos - Longás | 289 | | |
| 26/08/2000 | Sabiánigo | 455 | | |
| 26/06/2001 | Ariza | 111 | | |
| 07/07/2001 | Santa Cruz de Grío - Tobed | 226 | | |
| 01/08/2001 | Loarre - Las Peñas de Riglos | 3.278 | | |
| 01/08/2001 | Jaca | 225 | | |
| 24/07/2002 | Uncastillo | 251 | | |
| 30/06/2003 | Ayerbe - Biscarrués | 183 | | |
| 29/07/2003 | Encinacorba | 278 | | |
| 25/08/2003 | Loporzano | 269 | | |
| 08/08/2004 | Abanto | 111 | | |
| 01/09/2004 | Zaragoza | 696 | | |
| 16/07/2005 | Nuévalos | 300 | | |
| 14/08/2005 | Luna | 543 | | |
| 14/06/2006 | Uncastillo-Castiliscar | 239 | | |
| 17/06/2006 | Ibieca | 279 | | |
| 2006 | Sos del Rey Católico | 412 | | |
| 16/06/2007 | Huesca | 138 | | |
| 05/08/2008 | Zuera | 2.514 | | |
| 22/07/2009 | Morés | 560 | | |
| 29/07/2009 | Jaulín | 1.706 | | |
| 01/08/2009 | Terrer | 679 | | |
| 18/08/2009 | Zaragoza | 6.978 | | |
| Total | | | 12 | 15 |

- Los incendios en color verde indica que son fácilmente distinguibles a esa resolución los contrastes en las variables NDVI y EVI. Los incendios en naranja indican que apenas se distingue la incidencia del incendio en la dinámica de la vegetación a esa determinada resolución espacial.

De modo que en el caso de las imágenes MODIS del producto MOD13A2 a 1 km pueden ser apreciables los efectos del incendio sobre la vegetación en un total de 12 de los 24 casos estudiados (un 50 %), mientras que si nos centramos en las imágenes del producto MOD13Q1 de 250 m, la capacidad de distinción aumenta hasta el 62,5 %.

Las causas que provocan que exista un porcentaje importante de incendios en los que no se pueda apreciar estos contrastes o efectos del incendio son varias. Una de ellas es la extensión del incendio, por lo que es común que en aquellos de menos de 500 hectáreas no sean perceptibles

los efectos en la vegetación, debido a los efectos de borde derivados de la resolución espacial de las imágenes.

Otra causa importante que influye es la escasa sensibilidad de los índices de vegetación a niveles bajos de severidad, con lo cual se tiende a infravalorar los resultados obtenidos.

El último factor y no menos importante que influye igualmente, es el ambiente bioclimático donde se ha desencadenado el suceso y el tipo de vegetación que se ha calcinado. Generalmente, se aprecian diferencias notables en la velocidad de recuperación de los matorrales frente a las masas boscosas. Asimismo, en la mayoría de los incendios estudiados las principales comunidades vegetales afectadas suelen ser matorrales del ambiente mesomediterráneo, en el cual se produce una homogenización cada vez mayor del paisaje vegetal, además de participar en mayor medida la señal del suelo en el dato final que aporta el pixel.

Por otro lado, también es importante analizar la capacidad de regeneración vegetal y observar cuanto tiempo le cuesta a las comunidades alcanzar los niveles de actividad previos al incendio. En ese sentido, se ha podido apreciar cómo tras el incendio la mayoría de las zonas calcinadas tienden a una recuperación progresiva de sus condiciones anteriores y niveles de NDVI y EVI, al menos en aquellos acontecidos en el primer lustro del decenio (véase gráfico 3)² y de los cuales se han contado con mayor número de imágenes posteriores, que permiten esta afirmación.

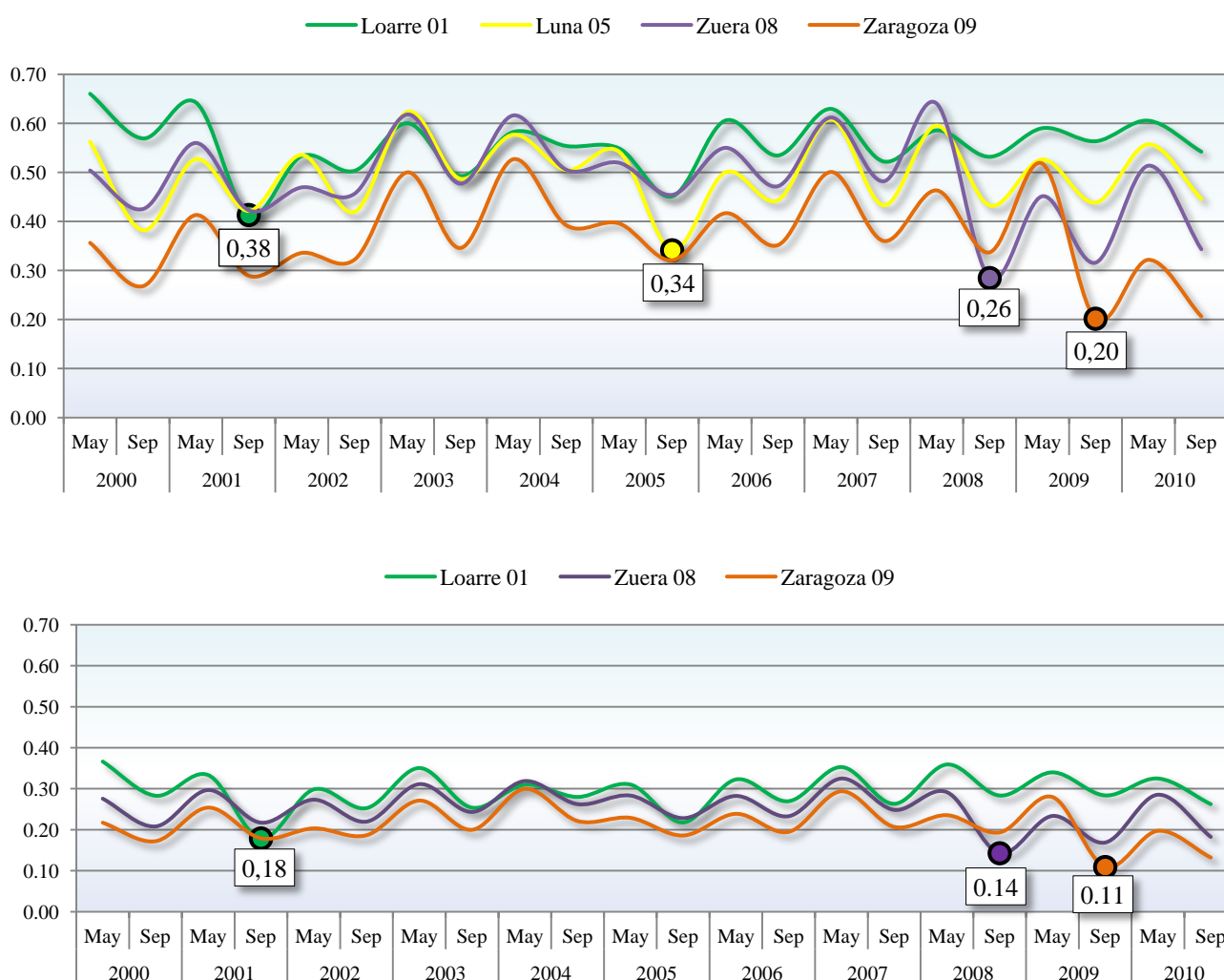


Gráfico 3. Evolución temporal del promedio de NDVI (arriba) y EVI (abajo) a 1 km, para los municipios de Loarre 2001, Luna 2005, Zuera 2008 y Zaragoza 2009. Elaboración propia.

² Los puntos de los gráficos de NDVI y EVI, representan el valor de la variable en el mes posterior a la ocurrencia del incendio.

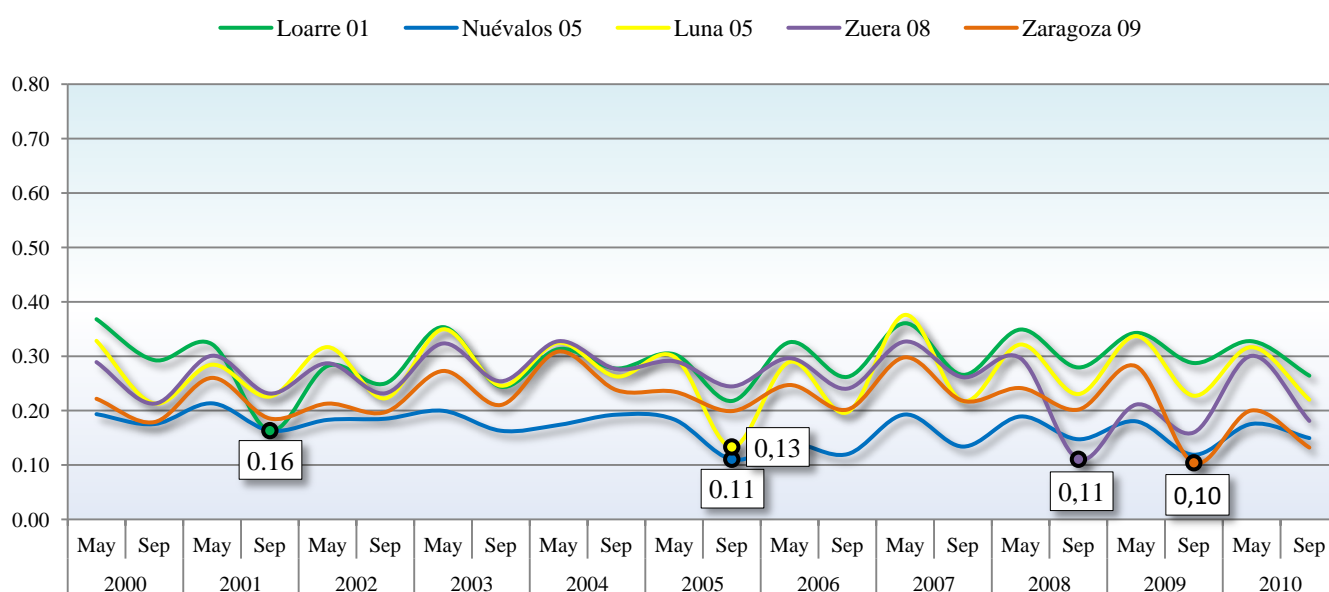
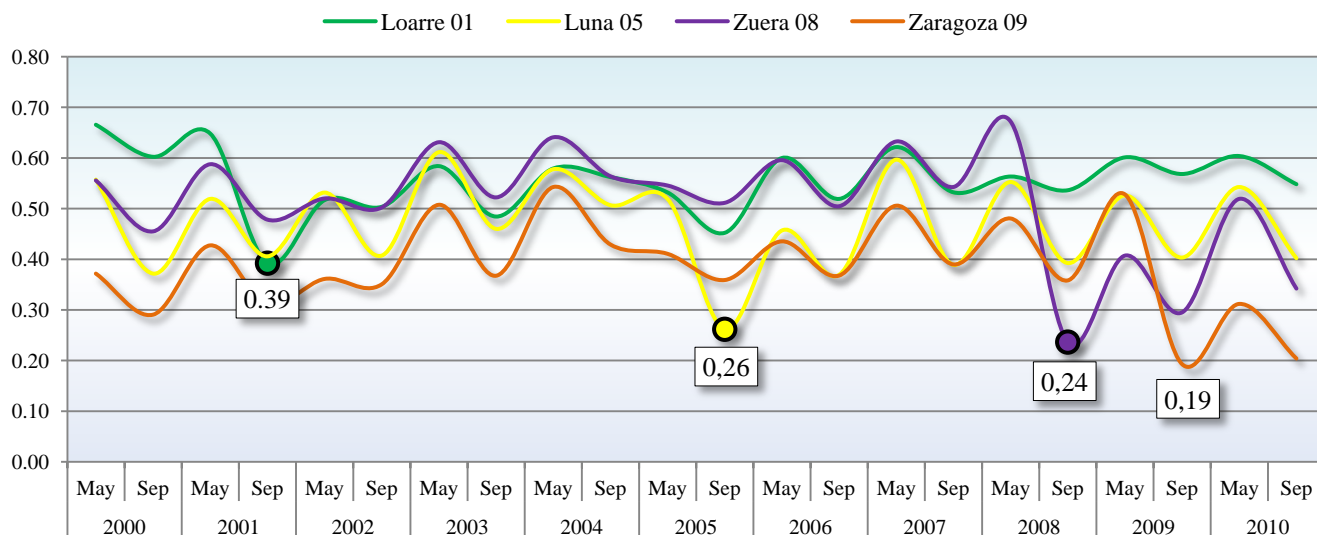


Gráfico 4. Evolución temporal del promedio de NDVI (arriba) y EVI (abajo) ,a 250 m, para los incendios de los municipios de Loarre 2001, Luna 2005, Nuévalos 2005, Zuera 2008 y Zaragoza 2009. Elaboración propia.

El primer efecto que se aprecia en el conjunto de los perfiles de la evolución son los ascensos y descensos cíclicos y estacionales naturales de la vegetación, entre la diferente actividad fotosintética de la vegetación en mayo y en plena primavera, y el descenso de la actividad vegetal que se produce tras el final del verano (septiembre).

Al comparar los datos de las dos resoluciones espaciales, se puede apreciar como aumenta ligeramente el detalle en el perfil de las gráficas de los incendios a 250 m, resaltándose más precisamente los valores más bajos de NDVI y EVI, que en los de menor resolución. Incluso se puede detectar el efecto del fuego en incendios que con la resolución de 1 km no eran apreciables, uno de ellos es el de Nuévalos 2005. Asimismo, la información que aporta el EVI permite visualizar mejor que zonas tienen un tipo de vegetación más o menos vigorosa, como la diferencia entre matorrales y pinares. Caso de Nuévalos 2005, con respecto a los otros grandes incendios.

6.2.2. La temperatura superficial

Al centrar el análisis en la variable temperatura superficial (LST ó TS) se puede apreciar desde el primer momento una serie de limitaciones que presentaban los datos del producto de MOD11A2. El primero de ellos es la incapacidad de detectar la influencia del incendio y, por ende, el aumento de la temperatura en el momento posterior al incendio. Ello es provocado por la resolución espacial de 1 km y la contaminación de los píxeles por el efecto de borde, lo que provoca la mezcla de información.

Asimismo, hay que añadir que la variable temperatura superficial es un parámetro muy complejo de medir, ya que en su resultado final influyen innumerables factores ambientales (cambios en los vientos, contrastes entre sombrías y solanas, distintas orientaciones, etc.) Eso unido, a que la información es un compuesto de 8 días con los mejores píxeles, hace más evidente las limitaciones tan importantes que presenta a la hora de realizar el seguimiento del aumento y posterior descenso de la temperatura fruto de la destrucción de la vegetación y su posterior regeneración.

Por ello, al realizar el estudio individualizado de cada uno de los 24 incendios del decenio, se observó que sólo tres de ellos (Luesia 2000, Sabinánigo 2000, Riglos 2000), mostraban claramente el aumento de la temperatura coincidiendo con la fecha de ocurrencia del incendio (véase gráfico 5). No obstante, en los tres casos la temperatura máxima alcanzada es casi la misma, lo que induce a pensar que se trata de un final de verano especialmente caluroso. En el resto de los incendios los aumentos térmicos eran prácticamente irrelevantes, confundiéndose con la dinámica térmica natural entre los dos meses.

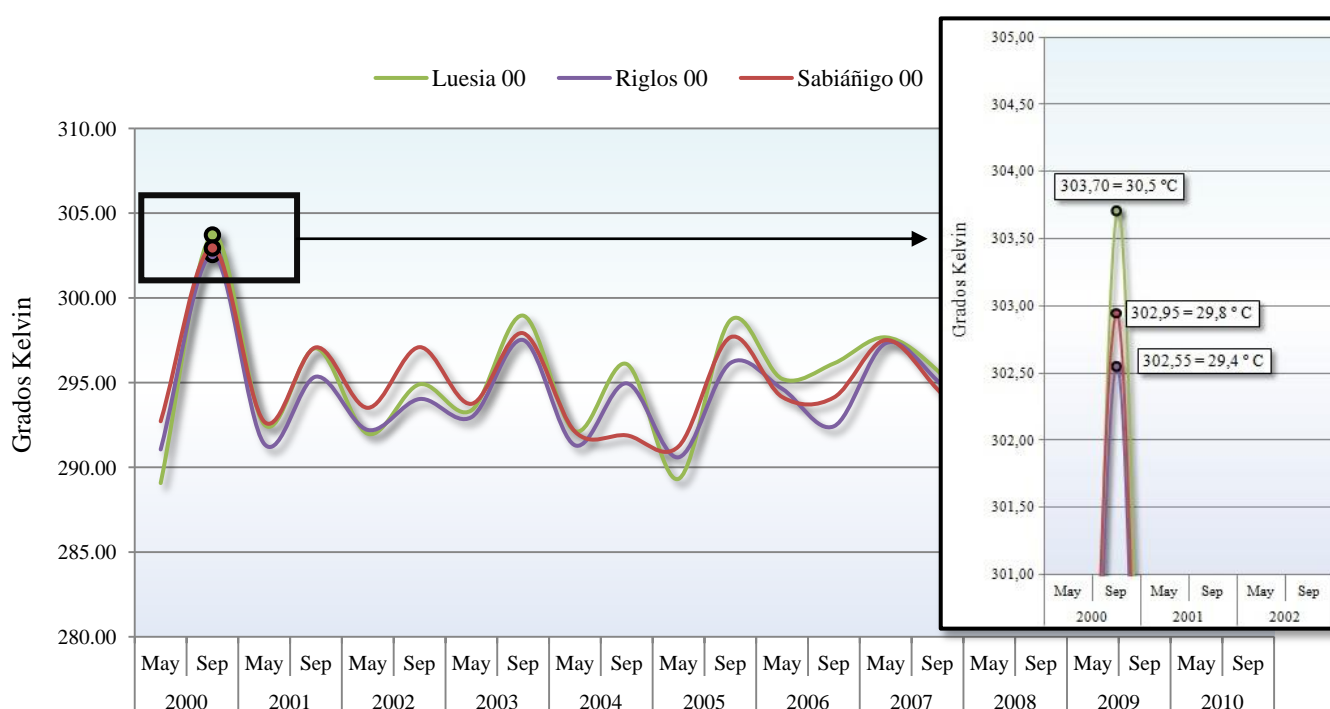


Gráfico 5. Evolución temporal del promedio de LTS (a 1 km) para los incendios de los municipios de Luesia 2000, Las Peñas de Riglos 2000 y Sabinánigo 2000. Elaboración propia.

El otro de los inconvenientes y quizás el que más ha perjudicado al cálculo correcto de la variable, ha sido la omisión o ausencia del dato de TS en varios píxeles de las imágenes (dato = 0). Esto se ha detectado principalmente en las imágenes de los meses de mayo de 2005 y mayo de 2008 en un total de 9 incendios. Además también faltaban datos puntuales en los perímetros de los incendios de Zaragoza de 2009, en el mes de mayo de 2010, y en el de Zuera de 2008, en

el mes de septiembre de 2002 (véase tabla 16). Lógicamente, esto hecho ha repercutido negativamente en el cálculo posterior de la media aritmética para cada mes, al contar con muchos menos píxeles con dato válido en esos meses concretos.

Tabla 16. Incendios forestales afectados por omisión de datos de LTS del producto MOD11A2.

Elaboración propia.

| Fecha | Municipio /os afectado /os | Nº Has. | Nº de píxeles sin dato | | | |
|------------|----------------------------|---------|------------------------|----------|---------|---------|
| | | | sep-02 | may-05 | may-08 | may-10 |
| 26/06/2001 | Ariza | 111 | 0 | 0 | 1 de 22 | 0 |
| 30/06/2003 | Ayerbe - Biscarrués | 183 | 0 | 1 de 6 | 0 | 0 |
| 01/09/2004 | Zaragoza | 696 | 0 | 8 de 16 | 0 | 0 |
| 16/07/2005 | Nuévalos | 300 | 0 | 0 | 7 de 7 | 0 |
| 05/08/2008 | Zuera | 2.514 | 1 de 42 | 6 de 42 | 0 | 0 |
| 22/07/2009 | Morés | 560 | 0 | 4 de 14 | 0 | 0 |
| 29/07/2009 | Jaulín | 1.706 | 0 | 2 de 34 | 0 | 1 de 34 |
| 01/08/2009 | Terrer | 679 | 0 | 0 | 1 de 14 | 0 |
| 18/08/2009 | Zaragoza | 6.978 | 0 | 27 de 93 | 0 | 7 de 93 |

No obstante, a pesar de todos los inconvenientes y limitaciones que presenta este parámetro proporcionado por MODIS, hay que advertir que en algunos incendios sí se puede obtener la evolución de la temperatura superficial pormenorizada, pero a nivel individual de píxel entre año anterior, el año del suceso y el posterior al incendio, como es el caso de los incendios de Luna de 2005 (ver gráfico 6)³ y Zaragoza 2009 (gráfico 7).

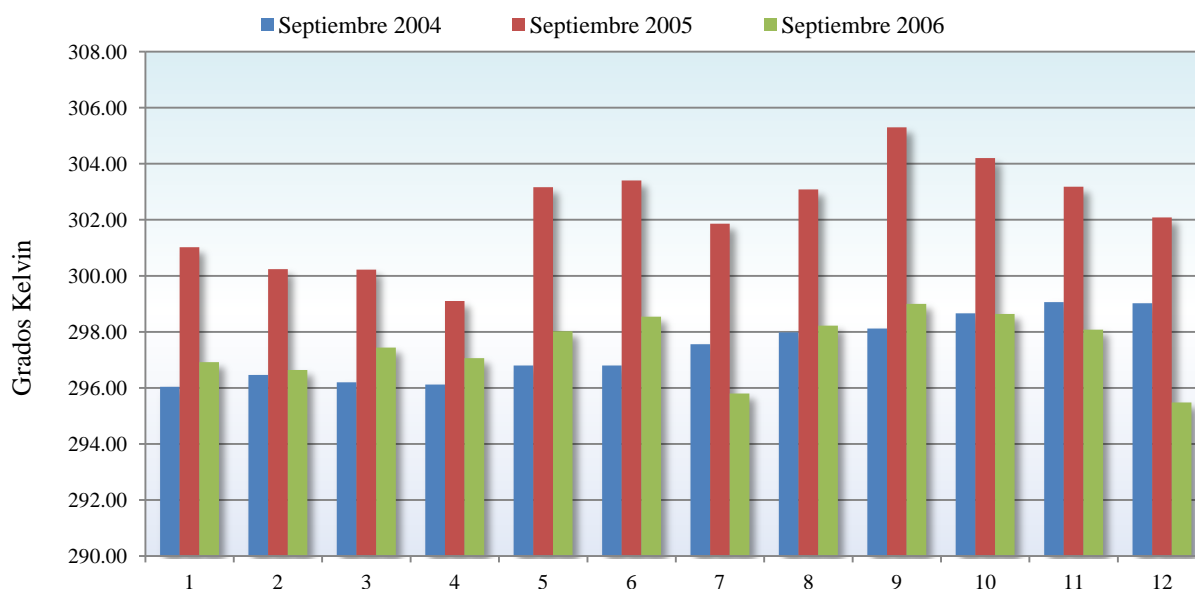


Gráfico 6. Datos de LST en grados Kelvin a nivel de píxel para el mes de septiembre en el año anterior, año de ocurrencia y año posterior al incendio de Luna 2005. Elaboración propia.

³ El eje de abscisas de estos gráficos representa el código asignado a cada píxel dentro del perímetro del incendio.

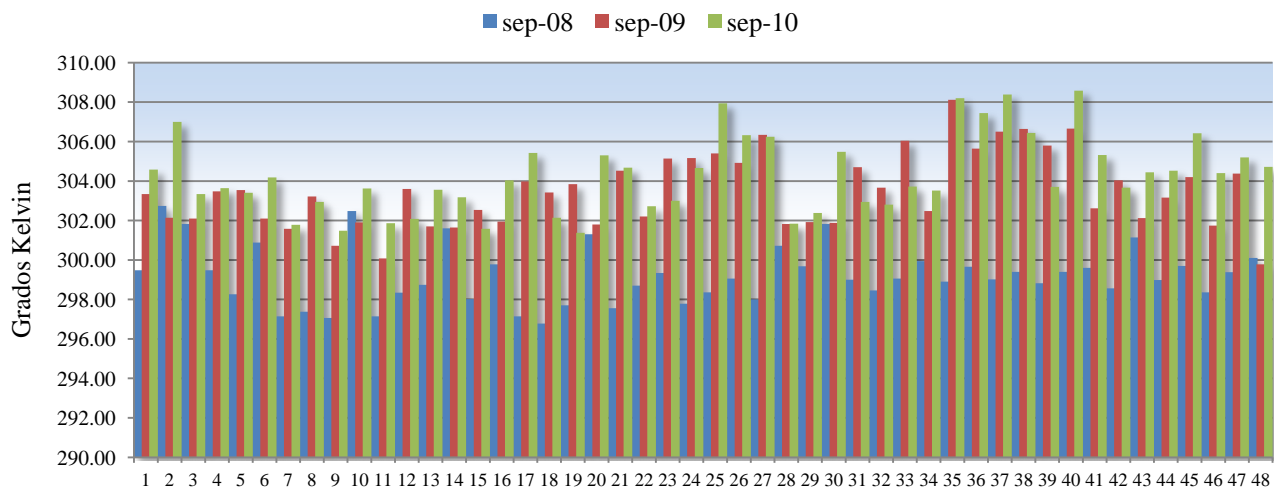


Gráfico 7. Datos de LST en grados Kelvin a nivel de píxel (selección 48 de 83) para el mes de septiembre en el año anterior, año de ocurrencia y año posterior al incendio de Zaragoza 2009. Elaboración propia.

Del conjunto de todos los incendios analizados, en torno a la mitad (un 47 %) de ellos se manifiesta el aumento de temperatura a nivel de píxel en el momento inmediato al incendio. Por lo que en el 52,17 % restante no se da esta situación, incluso en algunos incendios la temperatura del mes posterior al incendio llega a ser inferior que la de los años anteriores o posteriores. Hay que destacar la heterogeneidad de valores térmicos antes del incendio que está en función de la vegetación existente.

Por tanto, se suelen dar dos situaciones con posterioridad al fuego. La primera es que los valores térmicos descendan notablemente al año del suceso (caso del incendio de Luna 2005). Y la segunda situación que se suele producir es que la temperatura siga siendo igual de elevada o incluso superior a la registrada inmediatamente tras el incendio en el año posterior, así como una mayor homogeneización de los valores, es el caso del incendio de Zaragoza 2009 (ver gráfico 7). La causa que explica esta dicotomía es que tras un incendio, se produce una modificación de los patrones térmicos superficiales, creándose una cierta homogeneidad de la temperatura en todos los píxeles. Posteriormente, esta situación se va diversificando, en función del grado de severidad con la que haya incidido el fuego en cada píxel.

6.4. Análisis del LAI y FPAR

Uno de los mayores problemas al que deben hacer frente los análisis multitemporales con datos de satélite sobre áreas quemadas es la necesidad de encontrar indicadores adecuados que describan de manera precisa la evolución de la vegetación tras el fuego. Sin duda el NDVI ha sido hasta la fecha el índice más empleado a pesar de su visión sesgada del proceso de regeneración vegetal y de los propios problemas de concepción que acompañan a su formulación. Los productos derivados de los datos MODIS proporcionan fuentes de información relativas al proceso de regeneración vegetal. En concreto LAI y fPAR son dos variables que de manera complementaria aportan nuevas claves en la comprensión del proceso de regeneración vegetal en zonas quemadas.

Dado el carácter experimental de la investigación y tal como se expuso en el apartado metodológico, se realizaron diversos análisis utilizando indistintamente los datos de LAI y fPAR. Asimismo los resultados de los diferentes exploratorios que se han realizado se sintetizan en una serie de interrogantes que van a ser utilizados como hilo conductor de este apartado.

¿Cuál es el tipo de relación existente entre LAI de mayo y septiembre, FPAR de mayo y septiembre y entre fPAR-LAI?

Para comprobar el tipo de relación existente entre estas dos variables se recurrió al análisis de dispersión. Los resultados gráficos obtenidos se segmentaron en dos grupos: incendios antiguos (1975 hasta 2000) y los incendios recientes (2000 a 2010).

El análisis de regresión entre los compuestos de LAI y fPAR, en cualquiera de las fechas - mayo y septiembre-, ofrece un r^2 superiores a 0.82, siendo ligeramente superiores cuando el análisis opera exclusivamente con los incendios nuevos (2), ocurridos en la década de los 2000 (ver gráfico 8). Estos resultados ponen de manifiesto que, aunque fPAR y LAI conceptualmente se refieren a parámetros distintos del dosel vegetal, los valores proporcionados por MODIS presentan una gran proporcionalidad. Sin embargo, recordemos que, de hecho, la transformación de valores fPAR a LAI es posible siempre y cuando se disponga de información relativa a la capacidad de absorción de la fracción foliar y al extinción de la radiación del dosel vegetal. De tal modo que LAI es un parámetro más complejo de las características del dosel vegetal que lo vinculan directamente a la capacidad fotosintética y a la producción final de las formaciones vegetales.

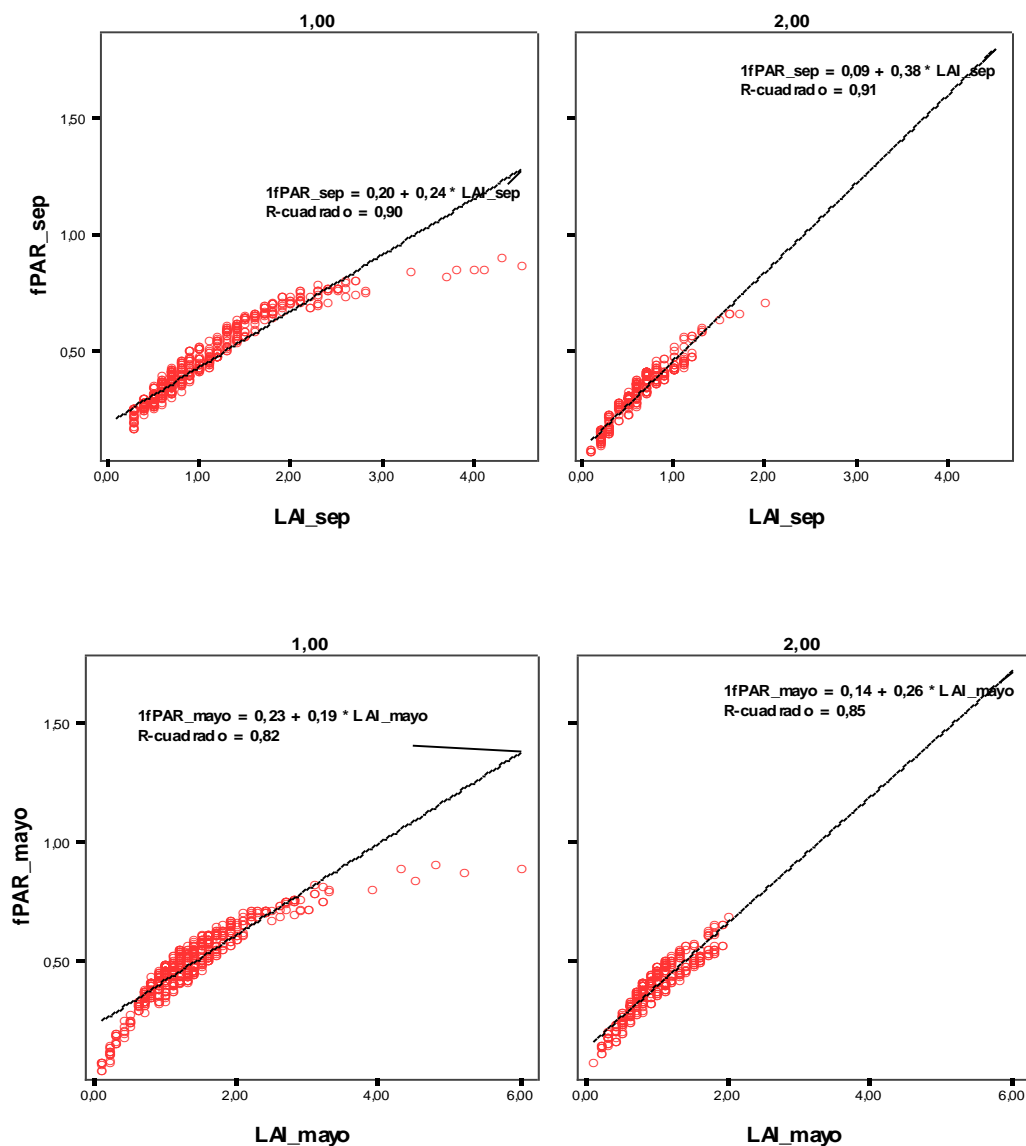


Gráfico 8. Correlación entre el fPAR y LAI de septiembre, y de mayo para los incendios antiguos (1.00) y los recientes (2.00).

Por el contrario, el análisis de regresión entre diferentes fechas utilizando el mismo parámetro (LAI ó fPAR) indica que no existe una función de proporcionalidad directa entre los valores de los dos momentos del año, especialmente al considerar datos de fPAR y considerando todas las imágenes disponibles. En todos los casos las rectas de regresión de los diagramas de dispersión muestran relaciones positivas; sin embargo destaca la gran cantidad de datos que presenta valores de LAI ó fPAR muy bajos y homogéneos en septiembre, siendo mucho más altos y, sobre todo, variables en mayo (ver gráfico 9). Además existe una gran cantidad de *outliers* en donde no existe una correspondencia entre los valores en las dos fechas propuestas, ocurriendo todo lo contrario: la existencia de píxeles con fPAR bajo en mayo y elevados en septiembre. Esta variabilidad estacional de los datos de mayo podría relacionarse con las características de la evolución fenológica de la vegetación submediterránea, que es la que participa en la mayoría de los incendios forestales considerados pero, especialmente, con el impacto inmediato del fuego.

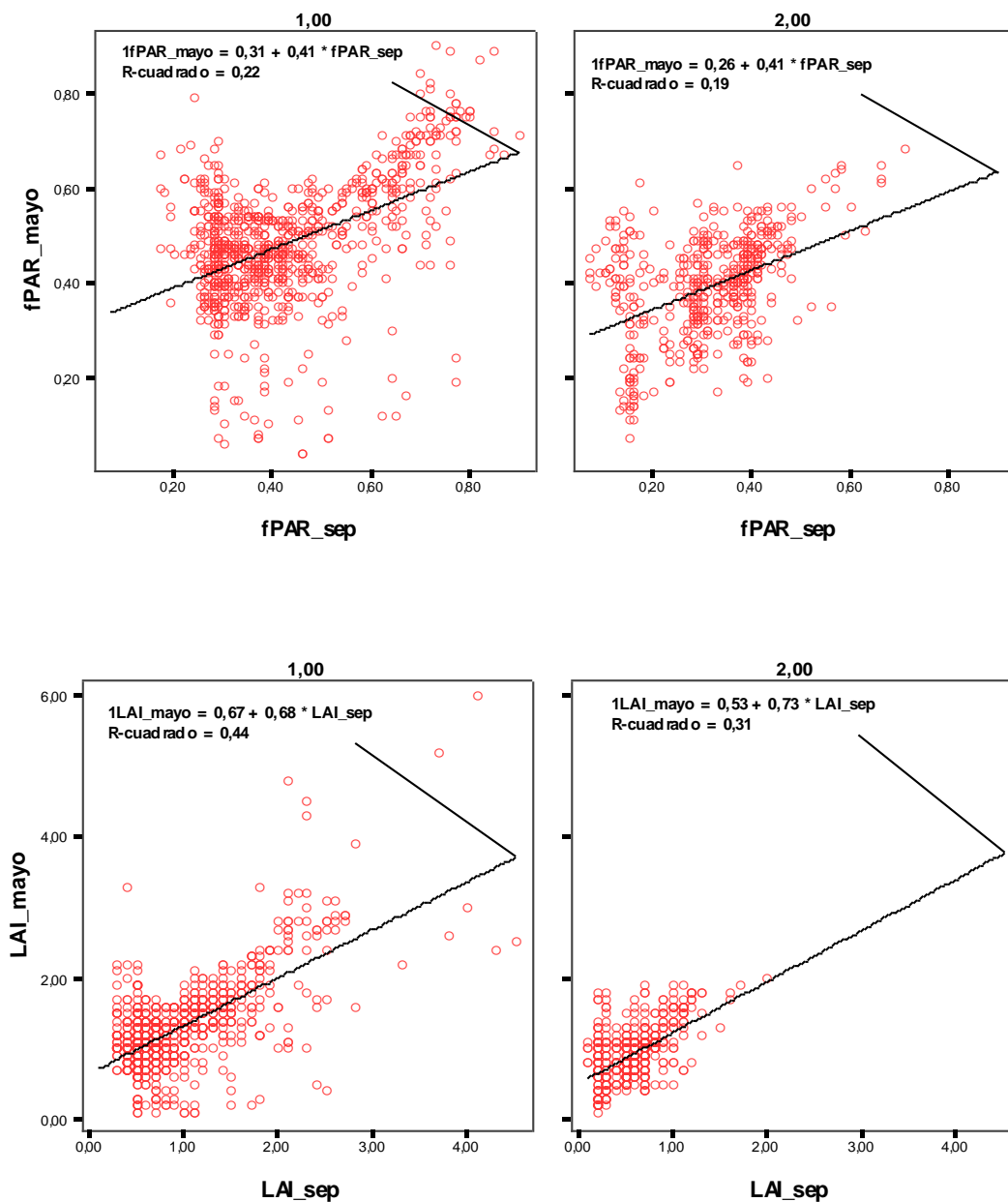


Gráfico 9. Correlación entre el fPAR de mayo y septiembre y LAI de mayo y septiembre para los incendios antiguos (1.00) y recientes (2.00).

Un análisis considerando dos fechas concretas 2003 y 2009, nos permite comprobar la existencia de una mayor proporcionalidad entre los valores de mayo y septiembre, siendo más fuerte en el caso de la imagen de 2003, dado que el impacto del fuego en los incendios anteriores a esta fecha es muy leve. De este modo se puede observar como existe una organización temporal de la nube de puntos en función de la antigüedad del fuego. Mientras, en el caso de la nube de puntos relativa a la imagen de 2009, los efectos del fuego en los valores del fPAR son mucho más pronunciados anulando la correspondencia especialmente en los incendios más cercanos en el tiempo (véase gráfico 10).

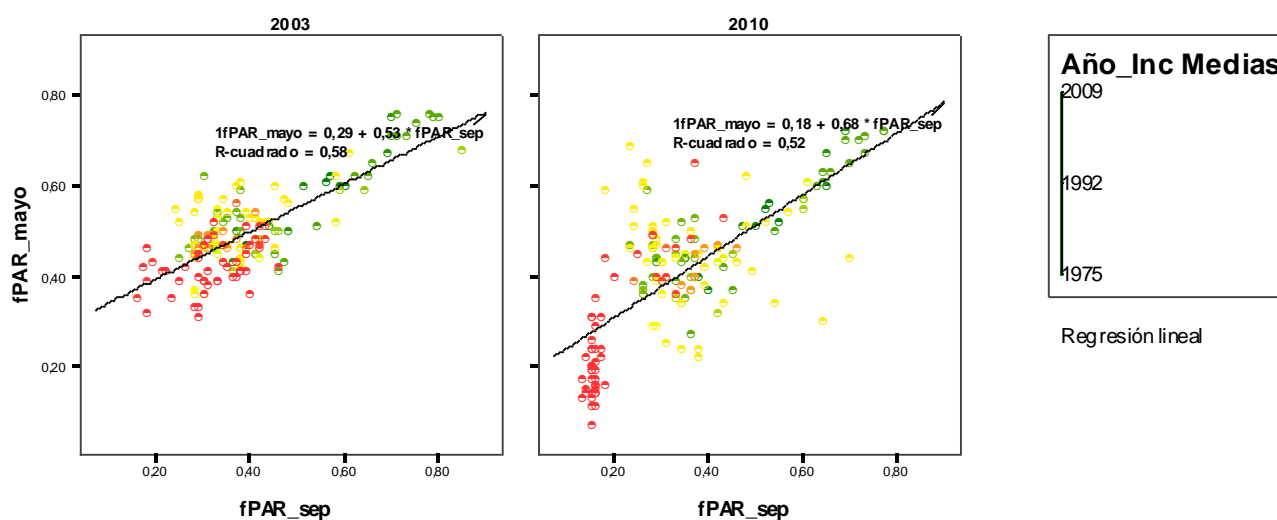


Gráfico 10. Comparación de la correlación del fPAR de mayo y septiembre para la primera imagen disponible de MODIS (2003) y 2010.

¿Cómo es la evolución en la última década del LAI y fPAR en las zonas quemadas?

El análisis multitemporal de los datos de LAI y fPAR se ha realizado a escala de incendio, es decir, por su ID de la base de datos (ver tabla 17). Desde un primer momento se pudo apreciar que los incendios antiguos presentaban valores medios de fPAR y LAI más elevados, con menor variabilidad multitemporal y, con una ligera tendencia ascendente, si se los compara con los incendios recientes. Este último extremo pone de manifiesto que, en los incendios antiguos, las comunidades vegetales afectadas por el fuego han tenido más tiempo para recomponerse. Por tanto, las pequeñas variaciones que se producen se relacionan más con la propia dinámica fenológica de la vegetación. No obstante, este comportamiento se puede apreciar más claramente con fPAR que con LAI (ver gráfico 11 y Anexo 1).

Por el contrario, los incendios recientes se caracterizan por manifestar una serie de fluctuaciones muy marcadas. Las variables de LAI y fPAR son muy sensibles a la presencia de dos factores principales: los eventos de sequía, como la acontecida en 2005 y la ocurrencia más cercana de los propios incendios. Concretamente, los incendios de la última década (2000-2010), poseen un valor de fPAR menor antes de la ocurrencia del incendio, que si los comparamos con los antiguos. Es por ejemplo el caso del incendio de Zaragoza en 2009 o el de Zuera en 2004.

Tabla 17. Relación de códigos ID por incendio, municipio afectado, año y nº de hectáreas, seleccionados para los análisis de fPAR y LAI.⁴

| ID | Municipio/os afectado/os | Año | Nº has. |
|-----------|---------------------------------|------------|----------------|
| 5 | Riglos - Longás | 1975 | 1.279 |
| 6 | Riglos | 1975 | 639 |
| 7 | Nueno | 1977 | 809 |
| 9 | Luna | 1978 | 1.809 |
| 10 | Zuera | 1979 | 759 |
| 11 | Nueno | 1980 | 523 |
| 12 | Luna | 1981 | 2.248 |
| 13 | Sabiánigo | 1981 | 762 |
| 14 | Ateca | 1982 | 649 |
| 15 | Asín | 1983 | 2.536 |
| 16 | Calatayud | 1984 | 1.120 |
| 17 | Anzánigo | 1985 | 694 |
| 19 | Riglos | 1985 | 735 |
| 22 | Nueno | 1986 | 1.706 |
| 23 | Fuentes de Jiloca | 1987 | 653 |
| 24 | Ambel | 1991 | 1.847 |
| 25 | Calcena | 1993 | 3.695 |
| 26 | Sos del Rey Católico | 1994 | 8.078 |
| 29 | Uncastillo | 1994 | 2.424 |
| 31 | Loarre | 2001 | 3.278 |
| 32 | Zaragoza | 2004 | 696 |
| 33 | Luna | 2005 | 543 |
| 34 | Zuera | 2008 | 2.514 |
| 36 | Jualín | 2009 | 1.706 |
| 37 | Terrer | 2009 | 679 |
| 38 | Zaragoza | 2009 | 6.978 |

⁴ Del conjunto de incendios recopilados, se han desestimado varios incendios por diversas causas, principalmente por la ausencia de píxeles puros o la detección de valores muy extremos, entre otros.

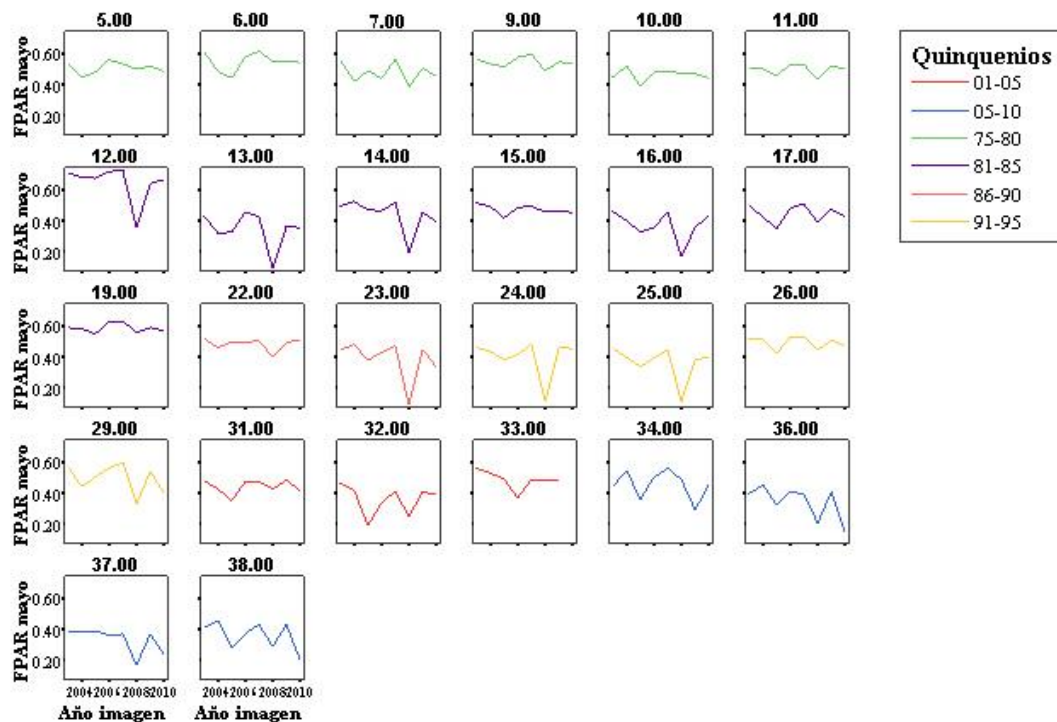


Gráfico 11.A. Evolución de la media del fPAR de mayo entre las imágenes MODIS disponibles (2003-2010) de los incendios antiguos y recientes, clasificados por quinquenios.

¿Existen diferencias estadísticas entre los datos de LAI y fPAR analizados por quinquenios?

Para comprobarlo se recurrió al análisis ANOVA de un factor, en este caso tomando como base el quinquenio en el que se produce el fuego, considerando sólo los valores de fPAR y LAI correspondientes a la primera fecha disponible (2003), de tal modo que no se consideran los incendios que se producen durante la década de los 2000.

En la comparación de medias de los cuatro primeros quinquenios, se observó que la tendencia de los valores era claramente descendente, debido a que cuanto mayor es la antigüedad del incendio, mayores son los índices de fPAR y LAI, ya que la vegetación ha tenido más tiempo para recuperarse. Sin embargo, tan sólo se registran diferencias estadísticamente significativas en las comparaciones que incluyen los valores del último de los quinquenios (4°), aquel en el que los efectos del fuego son más notorios por concitar a superficies quemadas en fechas próximas a la imagen de referencia, en este caso la de 2003.

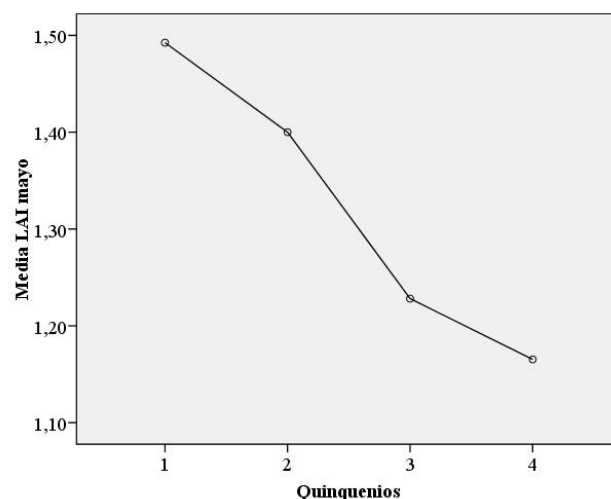


Gráfico 12. Evolución temporal de la media de LAI de mayo para los cuatro primeros quinquenios.

Asimismo, los resultados del gráfico 13, que muestran las barras de error por quinquenios, reflejan la existencia de diferencias entre los cuatro quinquenios estudiados, así como el hecho antes comentando que tan sólo son significativas al compararlas con el quinquenio 4° con valores mucho más bajos que el resto de lustros.

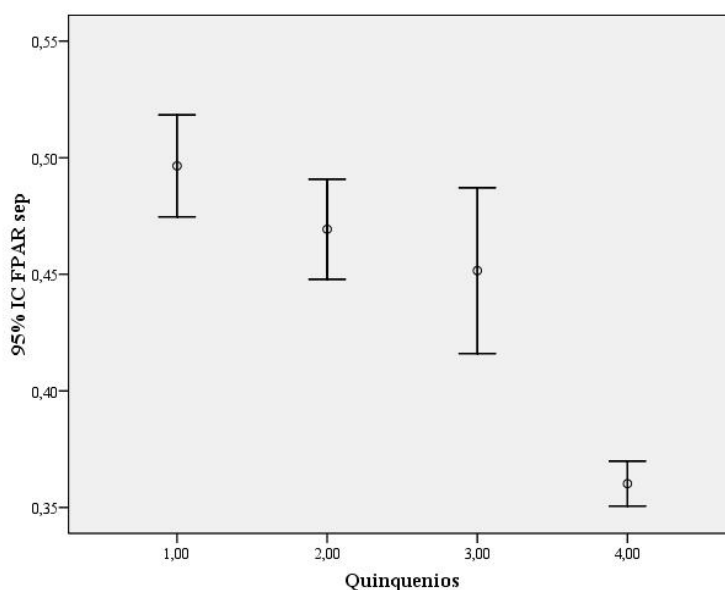


Gráfico 13. Barras de error para los valores medios de fPAR de septiembre de los incendios de los primeros cuatro quinquenios (1975 – 2000).

Tabla 18. Descriptivos estadísticos de los fPAR y LAI.

| | | N | Media | Desviación típica | Error típico | Intervalo de confianza para la media al 95% | | Mínimo | Máximo |
|-----------|-------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Límite inferior | Límite superior | Límite inferior | Límite superior | Límite inferior | Límite superior | Límite inferior | Límite superior |
| fPAR mayo | 1,00 | 120 | 0,5227 | 0,09345 | 0,00853 | 0,5058 | 0,5396 | 0,32 | 0,84 |
| | 2,00 | 280 | 0,5075 | 0,14747 | 0,00881 | 0,4902 | 0,5248 | 0,07 | 0,90 |
| | 3,00 | 32 | 0,4353 | 0,11486 | 0,02031 | 0,3939 | 0,4767 | 0,07 | 0,59 |
| | 4,00 | 424 | 0,4558 | 0,11681 | 0,00567 | 0,4446 | 0,4669 | 0,04 | 0,79 |
| | Total | 856 | 0,4813 | 0,12809 | 0,00438 | 0,4727 | 0,4899 | 0,04 | 0,90 |
| LAI mayo | 1,00 | 120 | 1,4925 | 0,58427 | 0,05334 | 1,3869 | 1,5981 | 0,60 | 4,50 |
| | 2,00 | 280 | 1,4000 | 0,70619 | 0,04220 | 1,3169 | 1,4831 | 0,10 | 4,80 |
| | 3,00 | 32 | 1,2281 | 0,33043 | 0,05841 | 1,1090 | 1,3473 | 0,20 | 1,60 |
| | 4,00 | 424 | 1,1653 | 0,42248 | 0,02052 | 1,1250 | 1,2057 | 0,10 | 3,30 |
| | Total | 856 | 1,2903 | 0,56576 | 0,01934 | 1,2523 | 1,3283 | 0,10 | 4,80 |
| fPAR sep | 1,00 | 120 | 0,4965 | 0,12111 | 0,01106 | ,4746 | ,5184 | 0,29 | 0,76 |
| | 2,00 | 280 | 0,4693 | 0,18236 | 0,01090 | ,4479 | ,4908 | 0,23 | 0,90 |
| | 3,00 | 32 | 0,4516 | 0,09861 | 0,01743 | ,4160 | ,4871 | 0,33 | 0,66 |
| | 4,00 | 424 | 0,3602 | 0,10108 | 0,00491 | ,3505 | ,3698 | 0,17 | 0,72 |
| | Total | 856 | 0,4184 | 0,14740 | 0,00504 | ,4085 | ,4283 | 0,17 | 0,90 |
| LAI sep | 1,00 | 120 | 1,1742 | 0,51718 | 0,04721 | 1,0807 | 1,2677 | 0,50 | 2,80 |
| | 2,00 | 280 | 1,1011 | 0,70378 | 0,04206 | 1,0183 | 1,1839 | 0,30 | 4,30 |
| | 3,00 | 32 | 1,0375 | 0,24593 | 0,04348 | 0,9488 | 1,1262 | 0,70 | 1,60 |
| | 4,00 | 424 | 0,7083 | 0,31862 | 0,01547 | 0,6778 | 0,7387 | 0,30 | 2,10 |
| | Total | 856 | 0,9144 | 0,54203 | 0,01853 | 0,8780 | 0,9507 | 0,30 | 4,30 |

Uno de los resultados indirectos que puede derivarse de este análisis es el de identificar la fecha (quinquenio) en el que se han producido diferentes incendios en función de los valores de LAI y fPAR, evidentemente, siempre en el contexto de las mismas comunidades vegetales y en zonas en las que no se han aplicado tratamientos o medidas de restauración forestal postincendio. En este sentido, en la tabla 19 se detalla una estimación de los valores para cada quinquenio, siendo el compuesto de fPAR el que presenta una mayor fiabilidad (ver tabla 20, Anexo II).

Tabla 19. Estimación de los quinquenios probables de ocurrencia de un incendio teniendo como base sus datos medios de fPAR y LAI.

| | Valor medio | Quinquenio más probable |
|-----------------|---------------------|-----------------------------------|
| fPAR mayo | Mayor de 0,52 | 1975 - 1980 |
| | 0,50 – 0,51 | 1981 - 1985 |
| | <i>0,49 – 0,43*</i> | <i>1986 – 1990 ó 1991 – 1995*</i> |
| fPAR septiembre | Mayor de 0,49 | 1975 - 1980 |
| | 0,48 – 0,46 | 1981 - 1985 |
| | 0,45 – 0,37 | 1986 - 1990 |
| | Menor de 0,36 | 1991 - 1995 |
| LAI mayo | Mayor de 1,49 | 1975 - 1980 |
| | 1,48 – 1,40 | 1981 - 1985 |
| | 1,39 – 1,22 | 1986 - 1990 |
| | 1,21 - 1,16 | 1991 - 1995 |
| LAI septiembre | Mayor de 1,17 | 1975 - 1980 |
| | 1,16 – 1,10 | 1981 - 1985 |
| | 1,09 – 1,03 | 1986 – 1990 |
| | 1,02 – 0,70 | 1991 - 1995 |

* Los datos en cursiva corresponden con la previsión con un mayor nivel de incertidumbre debido a la diferente tendencia de los valores medios del 4º quinquenio analizado, concretamente en el mes de mayo.

7. CONCLUSIONES

El grado de aplicabilidad que posee el sensor MODIS para la caracterización de las zonas incendiadas se ha demostrado como elevado. Tres son las ventajas que le confieren tal importancia.

- En primer lugar, el acceso gratuito a través de Internet a todo el conjunto de sus productos derivados.
- En segundo lugar, su elevada frecuencia temporal que permite obtener datos con un rango mínimo de uno a dos días, lo que facilita enormemente las posibilidades de realizar estudios multitemporales.
- Por último, el grado de corrección geométrica y radiométrica de todos los datos, así como su validación posterior son una garantía elevada de calidad de los mismos. Además de facilitar y agilizar el estudio, al suponer un ahorro de pasos previos de los tratamientos clásicos de las imágenes de satélite.

En lo referido a la potencialidad que poseen los productos MODIS a la hora de analizar las variables de interés seleccionadas en este trabajo, estas se pueden concluir que son considerables, si bien como toda tecnología posee algunas limitaciones.

Por lo que respecta a las variables de los índices de vegetación (NDVI y EVI) para el seguimiento de la dinámica de la vegetación después del incendio, se puede resumir que es viable en aquellos incendios de gran extensión (generalmente de más de 500 has., salvo algunas excepciones de incendios menores con alta severidad) y con productos de mayor resolución espacial (250 m), ya que permite detectar de forma más precisa los efectos del fuego y el proceso de recuperación hasta la situación previa.

La principal limitación del sensor MODIS se ha detectado a la hora de realizar el análisis de la temperatura superficial, ya que al ser un parámetro complejo y al obtenerse con una resolución espacial muy grosera (1 km), posee el inconveniente de la mezcla de información dentro de un mismo píxel. Eso unido, a que es el único producto donde se ha detectado un importante volumen de omisión de datos en numerosos píxeles. No obstante, se puede obtener una comparativa de la variación térmica a nivel de píxel, si bien sólo en casos muy concretos.

Uno de los parámetros que más información han aportado al estudio ha sido el estudio de la severidad del incendio, apoyada en una mayor resolución (250 m) y en la información de reflectividad del infrarrojo cercano y medio. Permitieron obtener una radiografía aceptablemente precisa de la gravedad de cada uno de los incendios, aún así se sigue reafirmando la obtención de mejores resultados en los grandes incendios.

Por otro lado, los resultados estadísticos basados en el análisis temporal de los datos de fPAR y LAI, tienen la ventaja de poder aportar una primera y básica estimación de la ocurrencia de un incendio a escala de quinquenio. Sin embargo, el grado de error de esta inferencia es elevado, debido a que entran en juego numerosos factores, como las distintas condiciones biogeográficas o tipos de vegetación.

En resumen, el sensor MODIS y sus respectivos productos derivados son muy útiles y ayudan al análisis, la caracterización y la valoración de la intensidad, sobre todo, de los grandes incendios regionales, así como obtener una visión general de la regeneración vegetal tras el suceso. Lo que permite orientar y pronosticar mejor las estrategias de ordenación de políticas forestales y tratamiento de las grandes zonas quemadas a escala regional.

8. GLOSARIO

- **EVI;** es un NDVI modificado con un factor de corrección del suelo y dos coeficientes que intentan corregir efectos de dispersión atmosférica. Se emplea para aplicaciones globales. (Huete and Justice, 1999)
- **fPAR;** es un parámetro utilizado en teledetección y la modelización de ecosistemas que significa la parte de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) utilizada por las plantas. Este indicador es importante en la medición de la producción de biomasa, ya que el desarrollo vegetativo está relacionado con la velocidad con la que la energía radiante es absorbida por la vegetación, (Kanaga Creutzburg, M.)
- **Índices de Vegetación;** parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilabert et al., 1997)
- **LAI;** el Índice de Área Foliar representar la proyección sobre el plano del suelo del área del conjunto de las hojas por unidad de suelo (Vicente y Legaz, 1984). Por lo que es un parámetro importante para cuantificar la productividad de los ecosistemas tras el incendio.
- **LST;** *Land Surface Temperature*. Es un parámetro que define la temperatura en la superficie de la tierra que se desprende en forma de radiación. Su cálculo se basa en la estimación de la emisividad de la superficie que consiste en la transferencia de calor debida a la emisión de ondas electromagnéticas entre dos superficies por una diferencia térmica. (EUMETSAT, 2013).
- **Mezclado espectral del píxel;** es un fenómeno intrínseco e inevitable propio de las imágenes de satélite, en el cual la señal espectral de distintas cubiertas de la superficie terrestre participan en distinta proporción de la información contenida en un mismo píxel mixto. El efecto será más acuciante cuanto menor sea la resolución espacial.
- **MODIS;** *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. Espectro-radiómetro de imágenes de media resolución.
- **NBR;** es la diferencia temporal entre los datos de la situación pre-fuego y post-fuego para determinar la extensión y el grado de cambio detectado por el incendio (Carl H.K. y Nathan C.B., 2011)
- **NDVI;** es el índice de vegetación más usado en la bibliografía científica y se basa en la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo. Su cálculo es sencillo, aunque tiene problemas de saturación en porcentajes de vegetación mayores de 60% y un fuerte influencia del suelo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bisquert Perles, M^a. (2011): *Una metodología para la estimación del riesgo de incendio empleando imágenes del sensor MODIS/TERRA*. Universitat de València.
- Carl H.K. y Nathan C.B. (2006): *Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods*. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep.
- Chuvieco, E.; Martín, M^a P y Ventura, G. (2011): *Evaluación de imágenes NOAA-AVHRR y TERRA-MODIS para cartografía regional de áreas quemadas*. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá.
- Cuadrat Prats, J.M. *El clima en Aragón, Atlas de Geografía de Aragón en Internet*. Disponible en: <http://unizar.es/geoatlas/textosok/index.htm>
- González-Alonso, F.; Huesca, M.; Cuevas-Gozalo, J.M.; Martínez, S.; Gómez, J.A. y De Miguel, E. (2009): “Seguimiento de la regeneración del incendio del rodenal de Guadalajara utilizando imágenes hiperespectrales AHS-INTA”, *V Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer*. 21-25 de septiembre, 2009, Ávila.
- Pérez Cabello, F. (2002): *Paisajes forestales y fuego en el Prepirineo occidental oscense. Un modelo regional de reconstrucción ambiental*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Zaragoza.
- Knyazikhin, Y.; Glassy, J.; Privette, J.L.; Tian, Y.; Lotsch, A.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Morisette, J.T.; Votava, P.; Myneni, R.B.; Nemani, R.R.; Running, S.W. (1999): MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis. Disponible en: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mcd15a2.
- Longares Aladrén, L.A. (2004): “*Variedad biogeográfica del territorio aragonés*” en Peña, J.L.; Longares, L.A. y Sánchez M. (eds.): *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*. Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, Zaragoza, cap. 3, pp. 27- 30.
- Los Incendios Forestales en España, Decenio 2001-2010*. [Madrid] Área de Defensa contra Incendios Forestales (ADCIF). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012. 138 p.
- Mas, J.-F. (Ed.) (2011): *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. México. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales.
- Myneni, R.; Knyazikhin, Y.; Glassy, J.; Votava, P. y Shabanov, N. (2003): *FPAR, LAI (ESDT: MOD15A2) 8-day Composite NASA MODIS Land Algorithm, User's Guide*. MODIS website. Disponible en: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mcd15a2.
- Solano, R.; Didan, K.; Jacobson, A. y Huete, A. (2010): *MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)*. The University of Arizona. Disponible en: http://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_01_2012.pdf.

- Veraverbeke, S.; Lhermitte, S.; Verstraeten, W.W. y Goosens, R. (2011): "A time-integrated MODIS burn severity assessment using the multi-temporal differenced normalized burn ratio (dNBRMT)". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.13, pp. 52-58.
- Veraverbeke, S.; Hook, S. y Hulley, G. (2012): "An alternative spectral index for rapid fire severity assessments". *Remote Sensing of Environment*. Vol. 123, pp. 72-80.
- Wan, Z. (2007): *MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide*. ICESS. University of California, Santa Bárbara. Disponible en: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/myd11a2.

10. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor Fernando Pérez Cabello por su disposición y atenciones prestadas, por su cercana y continua dirección, así como por su elevado interés y pasión por la temática, la cual me contagió. A Juan de la Riva y al grupo de investigación GEOFOREST por ofrecerme este proyecto desde un primer momento y haber apostado por él y por mí para su realización.

Gracias a todos mis compañeros del máster, en especial a Ana, Manuel y Magín por haberme acompañado en este proceso de aprendizaje y por sus buenos consejos.

También a mi familia y amigos, especialmente a Araceli, Mauricio, Lucía, Julia, Borja, Irene, Javier, Unai, Alberto y Daniel que de un modo u otro, no han dejado de apoyarme en ningún momento, alentándome a hacerlo lo mejor posible.

Gracias a todos

ANEXO I

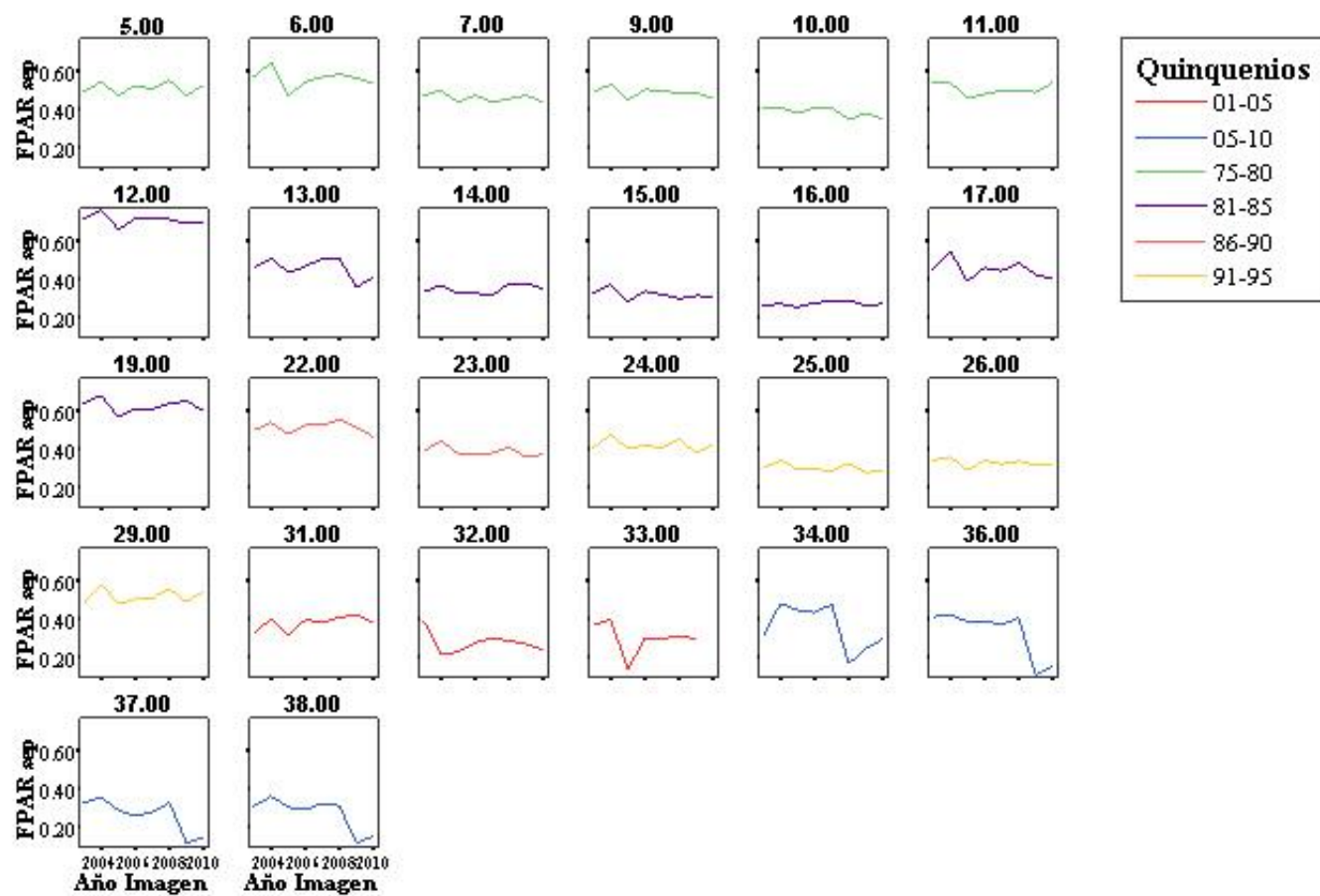


Gráfico 11.B. Evolución de la media del fPAR de septiembre entre las imágenes MODIS disponibles (2003-2010) de los incendios antiguos y recientes, clasificados por quinquenios.

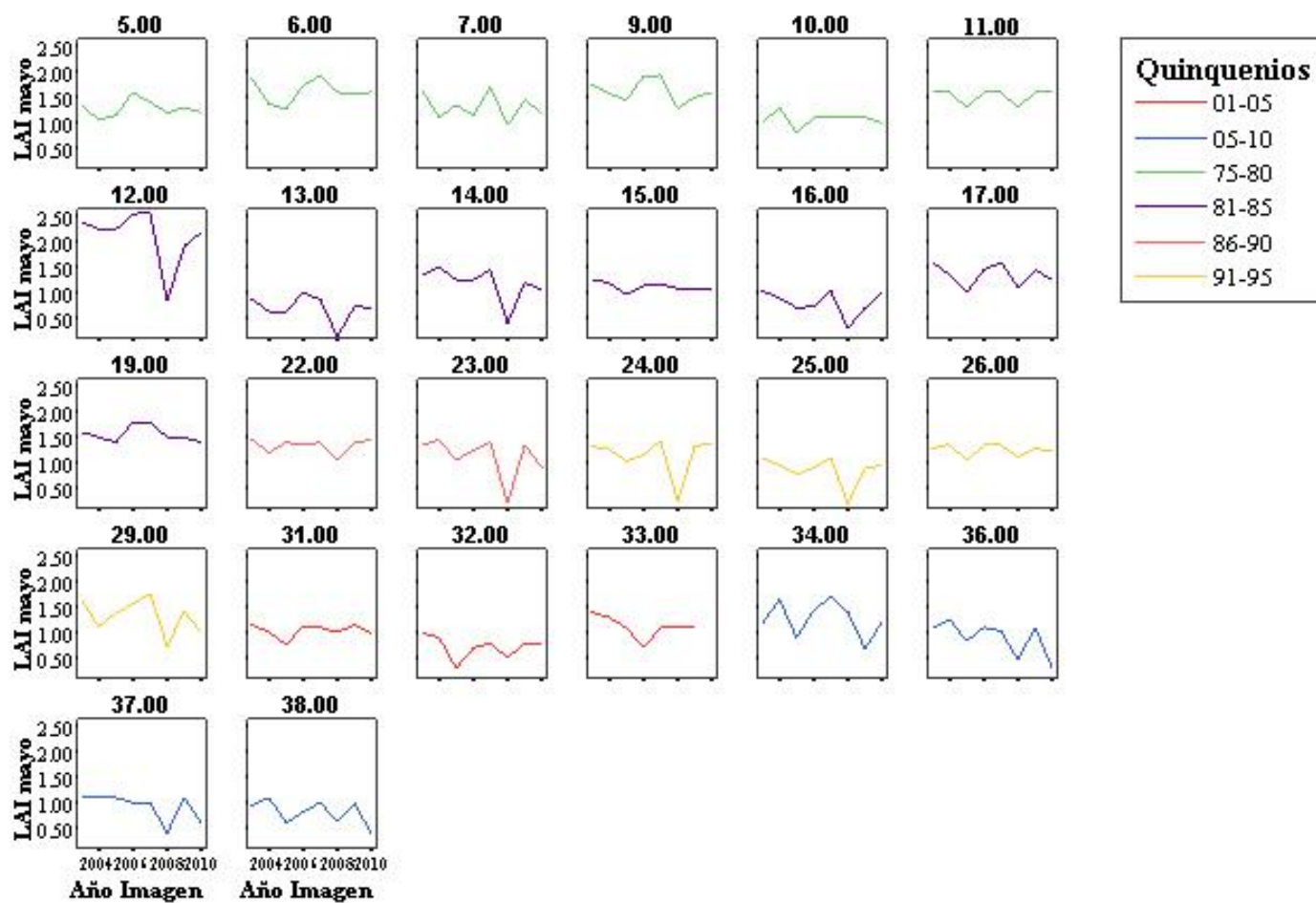


Gráfico 11.C. Evolución de la media del LAI de mayo entre las imágenes MODIS disponibles (2003-2010) de los incendios antiguos y recientes, clasificados por quinquenios.

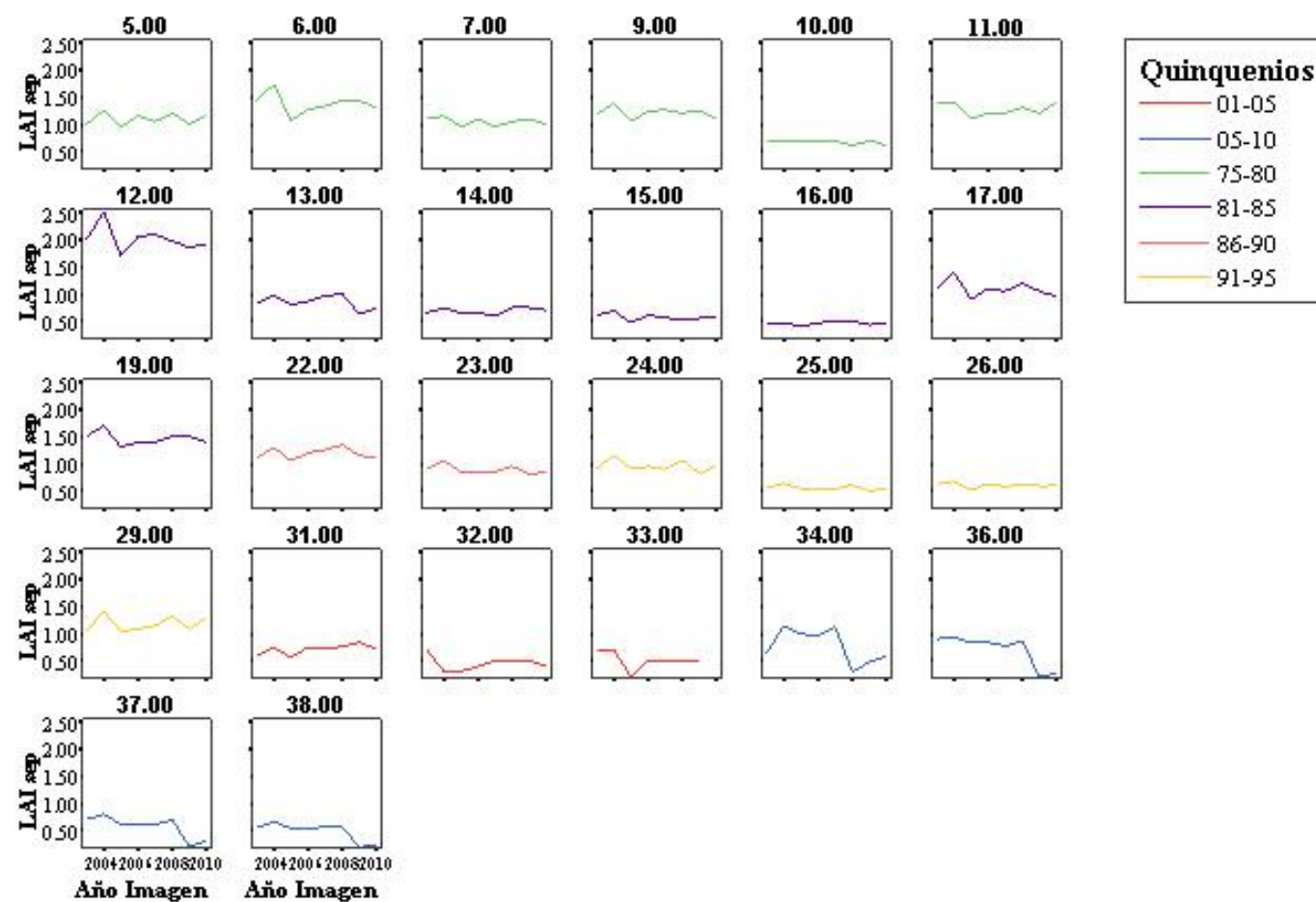


Gráfico 11.D. Evolución de la media del LAI de septiembre entre las imágenes MODIS disponibles (2003-2010) de los incendios antiguos y recientes, clasificados por quinquenios.

ANEXO II

Tabla 20. Comparaciones múltiples entre las medias de fPAR y LAI de los cuatro primeros quinquenios usando la prueba “Post hoc” y Bonferroni.

| Variable dependiente | (I) Quinquenios | (J) Quinquenios | Diferencia de medias (I-J) | Error típico | Sig. | Intervalo de confianza al 95% | |
|----------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|-------|-------------------------------|-----------------|
| | | | Límite inferior | Límite superior | | Límite superior | Límite inferior |
| fPAR mayo | 1,00 | 2,00 | 0,01517 | 0,01363 | 1,000 | -,0209 | 0,0512 |
| | | 3,00 | 0,08735(*) | 0,02485 | 0,003 | 0,0217 | 0,1531 |
| | | 4,00 | 0,06691(*) | 0,01291 | 0,000 | 0,0328 | 0,1011 |
| | 2,00 | 1,00 | -0,01517 | 0,01363 | 1,000 | -0,0512 | 0,0209 |
| | | 3,00 | 0,07219(*) | 0,02330 | 0,012 | 0,0106 | 0,1338 |
| | | 4,00 | 0,05175(*) | 0,00962 | 0,000 | 0,0263 | 0,0772 |
| | 3,00 | 1,00 | -0,08735(*) | 0,02485 | 0,003 | -0,1531 | -0,0217 |
| | | 2,00 | -0,07219(*) | 0,02330 | 0,012 | -0,1338 | -0,0106 |
| | | 4,00 | -0,02044 | 0,02289 | 1,000 | -0,0810 | 0,0401 |
| | 4,00 | 1,00 | -0,06691(*) | 0,01291 | 0,000 | -0,1011 | -0,0328 |
| | | 2,00 | -0,05175(*) | 0,00962 | 0,000 | -0,0772 | -0,0263 |
| | | 3,00 | 0,02044 | 0,02289 | 1,000 | -0,0401 | 0,0810 |
| LAI mayo | 1,00 | 2,00 | 0,09250 | 0,06012 | 0,746 | -0,0665 | 0,2515 |
| | | 3,00 | 0,26438 | 0,10962 | 0,097 | -0,0255 | 0,5543 |
| | | 4,00 | 0,32717(*) | 0,05697 | 0,000 | 0,1765 | 0,4778 |
| | 2,00 | 1,00 | -0,09250 | 0,06012 | 0,746 | -0,2515 | 0,0665 |
| | | 3,00 | 0,17188 | 0,10282 | 0,570 | -0,1000 | 0,4438 |
| | | 4,00 | 0,23467(*) | 0,04243 | 0,000 | 0,1225 | 0,3469 |
| | 3,00 | 1,00 | -0,26438 | 0,10962 | 0,097 | -0,5543 | 0,0255 |
| | | 2,00 | -0,17188 | 0,10282 | 0,570 | -0,4438 | 0,1000 |
| | | 4,00 | 0,06279 | 0,10101 | 1,000 | -0,2043 | 0,3299 |
| | 4,00 | 1,00 | -0,32717(*) | 0,05697 | 0,000 | -0,4778 | -0,1765 |
| | | 2,00 | -0,23467(*) | 0,04243 | 0,000 | -0,3469 | -0,1225 |
| | | 3,00 | -0,06279 | 0,10101 | 1,000 | -0,3299 | 0,2043 |
| fPAR septiembre | 1,00 | 2,00 | 0,02718 | 0,01479 | 0,398 | -0,0119 | 0,0663 |

| | | | | | | | |
|----------------|------|------|-------------|---------|-------|---------|---------|
| LAI septiembre | 2,00 | 3,00 | 0,04494 | 0,02696 | 0,576 | -0,0264 | 0,1162 |
| | | 4,00 | 0,13631(*) | 0,01401 | 0,000 | 0,0993 | 0,1734 |
| | | 1,00 | -0,02718 | 0,01479 | 0,398 | -0,0663 | 0,0119 |
| | | 3,00 | 0,01776 | 0,02529 | 1,000 | -0,0491 | 0,0846 |
| | | 4,00 | 0,10913(*) | 0,01044 | 0,000 | 0,0815 | 0,1367 |
| | 3,00 | 1,00 | -0,04494 | 0,02696 | 0,576 | -0,1162 | 0,0264 |
| | | 2,00 | -0,01776 | 0,02529 | 1,000 | -0,0846 | 0,0491 |
| | | 4,00 | 0,09137(*) | 0,02484 | 0,001 | 0,0257 | 0,1571 |
| | 4,00 | 1,00 | -0,13631(*) | 0,01401 | 0,000 | -0,1734 | -0,0993 |
| | | 2,00 | -0,10913(*) | 0,01044 | 0,000 | -0,1367 | -0,0815 |
| | | 3,00 | -0,09137(*) | 0,02484 | 0,001 | -0,1571 | -0,0257 |
| | 1,00 | 2,00 | 0,07310 | 0,05479 | 1,000 | -0,0718 | 0,2180 |
| | | 3,00 | 0,13667 | 0,09991 | 1,000 | -0,1275 | 0,4009 |
| | | 4,00 | 0,46591(*) | 0,05192 | 0,000 | 0,3286 | 0,6032 |
| | 2,00 | 1,00 | -0,07310 | 0,05479 | 1,000 | -0,2180 | 0,0718 |
| | | 3,00 | 0,06357 | 0,09370 | 1,000 | -0,1842 | 0,3114 |
| | | 4,00 | 0,39282(*) | 0,03867 | 0,000 | 0,2906 | 0,4951 |
| | 3,00 | 1,00 | -0,13667 | 0,09991 | 1,000 | -0,4009 | 0,1275 |
| | | 2,00 | -0,06357 | 0,09370 | 1,000 | -0,3114 | 0,1842 |
| | | 4,00 | 0,32925(*) | 0,09206 | 0,002 | 0,0858 | 0,5727 |
| | 4,00 | 1,00 | -0,46591(*) | 0,05192 | 0,000 | -0,6032 | -0,3286 |
| | | 2,00 | -0,39282(*) | 0,03867 | 0,000 | -0,4951 | -0,2906 |
| | | 3,00 | -0,32925(*) | 0,09206 | 0,002 | -0,5727 | -0,0858 |

* La diferencia de medias es significativa cuando se sitúa por debajo del nivel 0,05.