



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Facultad de Filosofía y Letras
Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio

TRABAJO FIN DE MASTER

**LAS POSIBILIDADES DE LA TELEDETECCIÓN PARA LA
GESTIÓN DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN
CANTABRIA: RECUPERACIÓN VEGETAL POSTFUEGO A
PARTIR DE MODIS.**

Applying remote sensing data for fire management in the region of
Cantabria: assessing post-fire vegetation recovery using MODIS
imagery.

Laura de la Puente García

Directores:

Virginia Carracedo Martín
Jose Manuel Álvarez Martínez

Santander, septiembre de 2017

CONTENIDOS

Resumen y palabras clave	3
Abstract and key words	4
1. Introducción.....	5
2. Objetivos, metodología y fuentes	11
2.1. Metodología	11
2.1.1. Procesamiento de las imágenes.....	12
2.1.2. Información de Cantabria: incendios y otras capas	13
2.1.3. Secuencia de trabajo del análisis	14
2.2. Cartografía de incendios de Cantabria.....	15
2.3. Imágenes del sensor MODIS	15
2.4. Modelo Digital del Terreno (MDT)	17
2.5. Cartografía de la Ocupación del Suelo de España	18
3. Análisis de los datos	19
4. Resultados	22
4.1. Generación de las bases de datos.....	22
4.2. Diferencias entre zonas quemadas y no quemadas	23
4.3. Análisis de la recuperación de la vegetación postfuego.....	27
5. Discusión.....	32
6. Conclusiones.....	34
Agradecimientos.....	35
Índice de figuras y tablas.....	36
Referencias	37
Anexos	42
1. Scripts	42
1.1. Descarga imágenes.....	42
1.2. ANOVA (ejemplo 2009)	43
2. Tabla completa de Significancias	45

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Cantabria es una de las regiones españolas y europeas más afectadas por los incendios forestales, tanto en número de incendios como en superficie quemada, una situación que ha llevado a la Administración regional a poner en marcha un Plan Estratégico de Prevención y Lucha contra Incendios Forestales (PEPLIF).

En el presente trabajo de fin de Máster se realiza un análisis de la capacidad de las imágenes del sensor MODIS y el producto NDVI para detectar zonas quemadas y evaluar también su capacidad de percibir la recuperación vegetal después de incendios en Cantabria, analizando todo ello en función de gradientes geográficos y ecológicos. Los resultados muestran que MODIS sí que es capaz de detectar diferencias no solo entre áreas quemadas y no quemadas sino también en la división por gradientes (estratos ambientales y usos del suelo o cubiertas vegetales). Y en cuanto a la recuperación vegetal, muestra una recuperación rápida en los cuatro meses posteriores, pero que, a escala anual, evidencia que no se trata de una recuperación total.

De esta forma se intenta aportar la base para la aplicación de estos métodos en la gestión del PEPLIF y así dotar a la Comunidad Autónoma de un sistema protocolizado de restauración de las áreas afectadas por incendios forestales.

Palabras clave: Incendios forestales, Recuperación vegetal, Imágenes MODIS, Cantabria, Gestión (...)

ABSTRACT AND KEY WORDS

Cantabria is one of the Spanish and European regions most affected by fires, both at the level of number and area affected. This has driven the local administration to start a Strategic Plan for Fires (PEPLIF).

On this paper, an analysis of the capacity of the images of the MODIS sensor and the NDVI product is carried out to detect burned areas and also evaluate its capacity to perceive the vegetal recovery after fires in Cantabria, analyzing all this in function geographic and ecological gradients. The results show that MODIS is able to detect differences not only between burned and unburned areas but also in the division by gradients (environmental strata and land uses or vegetation cover). And in terms of plant recovery, it shows a rapid recovery in the next four months, but which, on an annual scale, shows that it is not a complete recovery.

In this way, it is tried to provide the basis for the application of these methods in the management of PEPLIF and thus provide Cantabria with a protocolize system of restoration of the areas affected by forest fires.

Key Words: wildfires, Vegetation (canopy) recovery, MODIS images, Cantabria,

1. INTRODUCCIÓN

Según el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) del Gobierno de España, en España se registra una media anual de 14.476 incendios que afectan a más de 100.000 ha de superficie, también de media, según los datos del decenio 2005-2014. La magnitud, número y superficie afectada por estas perturbaciones representa un verdadero problema en nuestro país tanto para la sociedad como para la administración. Hay que tener en cuenta que los incendios son un problema a distintos niveles, tanto económica como ambientalmente, afectando a la población y a los ecosistemas. (Hernández, 2016).

Según el Informe anual de la Comisión Europea sobre incendios forestales en Europa, Medio Oriente y Norte de África de 2015, en los cinco países que forman los Estados del Sur (Portugal, España, Francia, Italia y Grecia, se quemaron 227.410 ha, de las cuales 103.200 ha fueron en España (San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2016). Pero no solo a nivel europeo, a escala regional Cantabria es una de las regiones tanto españolas como europeas más afectadas por los incendios forestales. Además, lejos de disminuir el número de incendios, éstos están aumentando tanto en número como en superficie afectada. Hay que tener en cuenta, por otro lado, que los espacios forestales en la CCAA ocupan el 68 % de la superficie total y la previsión es que esta superficie, y su conectividad, aumenten en el futuro. (Carracedo, 2015).

El régimen de incendios forestales en Cantabria es similar al de otras regiones del norte peninsular, pero difiere bastante del de los incendios de las regiones mediterráneas, más conocidos y mediáticos. Hay dos aspectos fundamentales que son distintos en estos dos ámbitos. Los incendios en Cantabria son muchos y de pequeño tamaño, ocurren sobre coberturas forestales no arboladas, principalmente matorral, no alcanzan grandes temperaturas, y, por último, se dan a finales de invierno y principios de primavera (Carracedo, 2015).

En diciembre de 2015, ocurrieron muchos incendios que hicieron que el problema trascendiera al conjunto de la sociedad, y además una mayor afectación de los mismos a Espacios Naturales Protegidos (ENP) llevó a la Administración de la Comunidad Autónoma a retomar con fuerza un plan en el que se llevaba años trabajando: el Plan Estratégico de Prevención y Lucha contra los Incendios (PEPLIF) con el fin de gestionar este problema (DGMN, 2017). Éste ha sido redactado por la

Consejería de Medio Rural, Pesca y Alimentación del Gobierno de Cantabria, con la participación de los diferentes sectores sociales a través de la denominada Mesa del Fuego (Mesa Sectorial Forestal y del Medio Natural), en la que han colaborado la Administración forestal, local y de Desarrollo Rural, ganaderos, personal de prevención y extinción de incendios, asociaciones conservacionistas y sindicatos. Éste ha sido redactado con la finalidad de atajar la problemática que suponen los incendios de la región tanto a nivel ambiental como social y económico.

Se plantea con una vigencia indefinida, pero teniendo en cuenta los posibles cambios que se pueden dar en la gestión, sobre todo derivados de los cambios de usos del suelo y cambio climático, por lo que se le da flexibilidad de forma que se pueda adaptar a futuras realidades.

Se estructura en torno a 6 objetivos generales, 27 objetivos específicos y 77 acciones a ejecutar. De todos estos objetivos, este trabajo aporta conocimiento para llevar a cabo el quinto objetivo general: Dotar a la Comunidad Autónoma de un sistema protocolizado de restauración de las áreas afectadas por incendios forestales; mediante el estudio de la recuperación.

La visión del PEPLIF es de una región consciente del elevado valor de su patrimonio natural y de los bienes que genera, de forma que mediante la concienciación se logre minimizar los incendios forestales. Su misión es la de tener un operativo que actúe en base al conocimiento, la transparencia, las alianzas, el pacto social, la mejora continua y plenamente integrado en una sociedad responsable y concienciada. Y entre sus valores se encuentra la participación ciudadana y el tener el mejor conocimiento posible.

Paradójicamente, y a pesar de su incidencia, en Cantabria no existen estudios específicos sobre los impactos de los incendios forestales en la cubierta vegetal, algo que puede conllevar múltiples efectos sobre la diversidad biológica y su recuperación, alterando en último término la funcionalidad de los ecosistemas. Si bien hay estudios que estudian la relación entre el clima (Carracedo, 2009).

En este trabajo, para el estudio de la recuperación de la vegetación se ha utilizado como herramienta la teledetección. La teledetección es la ciencia de medir o inferir las propiedades físicas de un objeto o medio, utilizando un sensor que está a cierta distancia del mismo objeto o medio (Woodhouse, I. H. 2016). Actualmente es una

técnica muy utilizada para el estudio de distintos aspectos desde observar la deforestación de los bosques tropicales hasta medir las variaciones de la humedad del suelo, pasando por la medición de la velocidad y dirección del viento sobre los océanos, las variaciones del espesor y de la superficie del hielo marino (Woodhouse, I. H. 2016) y en nuestro caso para la recuperación de la vegetación tras un impacto conocido.

El uso de la teledetección para el análisis de los incendios y de la recuperación vegetal no es novedoso, sino que ha sido utilizado previamente. Hay muchos artículos que tratan de la aplicación de la teledetección para estudiar el fuego y sus consecuencias, algunos de ellos más genéricos como es el de Robinson (1991) en el que se evalúan los incendios utilizando teledetección en el espectro infrarrojo. Y otros que se aplican en lugares específicos como White *et al.* (1996) en el que se estudia la severidad de los fuegos y la recuperación vegetal mediante la teledetección en el Parque Nacional de los Glaciares entre Argentina y Chile. Y hay en otros en los que se utilizan las imágenes de un satélite específicamente, como pueden ser las imágenes Landsat en Pérez-Cabello *et al.* (2007) en donde se utiliza para evaluar el impacto de los incendios forestales en comunidades vegetales sub-mediterráneas; en Viedma *et al.* (1997) se trata la recuperación de los ecosistemas tras incendios; o en French *et al.* (2008) que se utilizan para evaluar los incendios y la severidad de los mismos en la región de bosques boreales de América del Norte. Y otros en los que lo que se hace es comparar unas imágenes y otras para determinar cuál de ellas es mejor para detectar, en este caso, los incendios o la recuperación vegetal post-fuego, como pasa en Chuvieco *et al.* (2002) donde se compara el rendimiento de las imágenes AVHRR/3 y Terra/MODIS con la finalidad de cartografiar las áreas quemadas en GIF en espacios mediterráneos.

En la actualidad, son numerosos los satélites utilizados para el estudio de la vegetación y el paisaje, entre los que podemos destacar las plataformas Landsat, Aqua/Terra, SPOT y Sentinel. Teniendo en cuenta las características tanto de cada uno de ellos como de sus imágenes, se ha escogido las imágenes del sensor MODIS porque su resolución temporal (2000-actualidad) se adecúa a los datos de los incendios de los que se dispone (2009-2016). Los satélites MODIS son propiedad de la NASA, las imágenes son de acceso gratuito, su descarga es sencilla y ha sido utilizado en otros trabajos de forma satisfactoria para resolver problemáticas similares (Di Mauro, B. *et al.* 2014; Frazier, A.E. *et al.* 2013; Romo Leon, J.R., *et al.* 2012; Van

Leeuwen, W.J.D. 2008; Eckert, S. *et al.* 2015; Chéret, V. y Denuz, J.-P. 2013) aunque nunca en Cantabria.

Específicamente, MODIS ha probado su valía para identificar zonas quemadas, pero sobre todo en zonas que se caracterizan por tener grandes superficies de un mismo tipo de entidad vegetal como ocurre en la Región Alpina en el artículo de Di Mauro *et al.* (2014) o en Huesca *et al.* (2008) en el caso de Canarias, y multitud de ellos en los paisajes mediterráneos (Gómez Nieto, 2009). Pero hasta la fecha no se ha evaluado de forma específica la capacidad resolutoria de las imágenes MODIS para el estudio de procesos ligados al fuego en Cantabria con todas las peculiaridades que se han descrito anteriormente que se dan en esta Comunidad Autónoma y añadiendo la gran fragmentación en cuanto a coberturas vegetales.

En este trabajo se utiliza el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés: *Normalized Difference Vegetation Index*). El NDVI es un índice que se usa para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja, está ligado con muchos factores, pero uno de los más importantes es la biomasa (Martorell, 2017), por lo que es muy utilizado en ecología ya que aporta una respuesta funcional de la cantidad de vegetación. Por tanto, el NDVI es una expresión relacionada con la cantidad de actividad fotosintética de la vegetación expuesta al sensor dentro de cada píxel. En el caso de los incendios, si se elimina la biomasa al ser quemada, el valor de NDVI decrece porque la actividad fotosintética se ve reducida o eliminada.

El NDVI es uno de los índices más ampliamente usados para detectar cambios espacio-temporales de la vegetación y evaluar el comportamiento del fuego (Martínez-Murillo *et al.*, 2016). En otros trabajos se utiliza este índice con distintos fines, como por ejemplo en Eckert *et al.* (2015), en donde se utiliza para identificar áreas que sufren degradación y regeneración en Mongolia; en Escuin (2008) que se utiliza para estudiar la intensidad de un incendio por las diferencias en los valores de NDVI que se observan tras tres incendios en el sur de España; o en Carvacho Bart *et al.* (2010) en Chile, en la región del Libertador Bernardo O'Higgins.

En la mayor parte de los trabajos relacionados con los incendios se hace además referencia a una serie de factores importantes de los procesos ecológicos objeto de

estudio. El más ampliamente citado es el clima y el tipo de cobertura vegetal, dada su gran influencia no solo en la evolución de los incendios sino también en la recuperación vegetal posterior. Como escribe Martínez-Murillo: “A escala humana y regional, los efectos del fuego y la recuperación de la cubierta vegetal post-incendio pueden ser heterogéneos, con una alta variabilidad espacial y temporal (Naveh, 1990), debido a tres factores locales: abióticos, como la topografía, geología, clima y condiciones meteorológicas, tipos de suelo, o uso del suelo previo y posterior al fuego (Neary *et al.*, 1999; Kutiel, 2006; Tessler *et al.*, 2015); bióticos como el tipo de especie vegetal y la estructura de las plantas y sus estrategias post-incendio, etc.; y con mayor incidencia, la severidad del fuego (Keely, 2009)”.

El clima de una región está determinado por un conjunto de factores como son la altitud, latitud y elevación, o la presencia de cuerpos de agua. Y se caracteriza por la variación de la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, el viento y la precipitación de esa misma región en periodos largos de tiempo. Además, hay que tener en cuenta que el clima, englobando temperatura y la precipitación, juega un importantísimo papel en el desarrollo de la vegetación. A su vez, hay que tener en cuenta que con el cambio climático que se está produciendo en la actualidad, las variaciones de temperatura y precipitación están variando mucho, suponiendo así en el futuro próximo una situación de reajuste de las coberturas vegetales. Esto no ocurre solo de forma directa como se acaba de explicar, sino que también ocurre de forma indirecta, por ejemplo, a través de los suelos ya que el desarrollo de los suelos y la descomposición de la materia orgánica de los mismos varía también en función de las condiciones climáticas.

El segundo factor que influye en la severidad y evolución de los incendios, así como de la recuperación vegetal posterior es el tipo de cobertura vegetal a la que afectan. No es lo mismo, ni tiene las mismas consecuencias, que arda un bosque a que ardan unos pastos. En este trabajo se tratan fundamentalmente tres tipos de coberturas vegetales: bosques, matorrales y pastos; y su diferenciación es importante ya que los incendios en cada una de estas unidades tienen características distintas.

En el caso del bosque, se pueden dar principalmente dos tipos de incendios. El primero es aquel que quema completamente el bosque, es decir, el que quema todos los estratos, desde las gramíneas hasta los árboles más grandes. En esta situación, la recuperación va a ser más lenta si es que se llega a recuperar completamente,

debido a que los árboles son vegetación madura con tiempos de crecimiento elevados. Por lo tanto, la cicatriz se va a percibir en las imágenes de satélite va a ser duradera en el tiempo. El segundo tipo de incendio de bosque sería aquel que quema el sotobosque pero que no alcanza a quemar las copas de los árboles, por lo que puede que no se aprecie ningún cambio importante en las imágenes de satélite. La recuperación de este tipo de incendio es más rápida si bien se complica la detección del fuego y sus efectos mediante técnicas de teledetección.

En el caso del matorral, unidad con más superficie quemada en Cantabria, los incendios suelen ser de rápida propagación. Muchas de las especies que se encuentran en este tipo de unidad cuentan con diversas estrategias para sobrevivir y rebrotar después de verse afectadas por el incendio. Recuperan rápidamente el terreno perdido e incluso, a medio plazo, pueden verse favorecidos en su competición con otras plantas peor adaptadas al fuego (Carracedo, V., 2015).

En relación a los pastizales, cuando se queman también se trata de incendios de rápida propagación, aunque no suelen profundizar mucho en el suelo por lo que también se recuperan rápidamente. Estos dos últimos casos son de fácil identificación mediante la teledetección si los efectos del fuego alcanzan cierta severidad, afectan a superficie con suficiente biomasa vegetal previa al incendio y tienen unas dimensiones mínimas.

Por último, hay que tener en cuenta la importancia de las características topográficas de la región afectada. Cantabria es una región que se caracteriza por su elevada energía del relieve, y este es un dato para tener en cuenta ya que, por ejemplo, en pendientes altas y bajo unas condiciones climáticas favorables de humedad, temperatura y viento la propagación es muy veloz. Además, el clima es oceánico, caracterizado por ser un clima suave de temperaturas templadas y precipitaciones abundantes, pero en los últimos años se ha venido acusando un ligero cambio de estas características con un volumen de precipitaciones menores y temperaturas ligeramente más elevadas.

2. OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y FUENTES

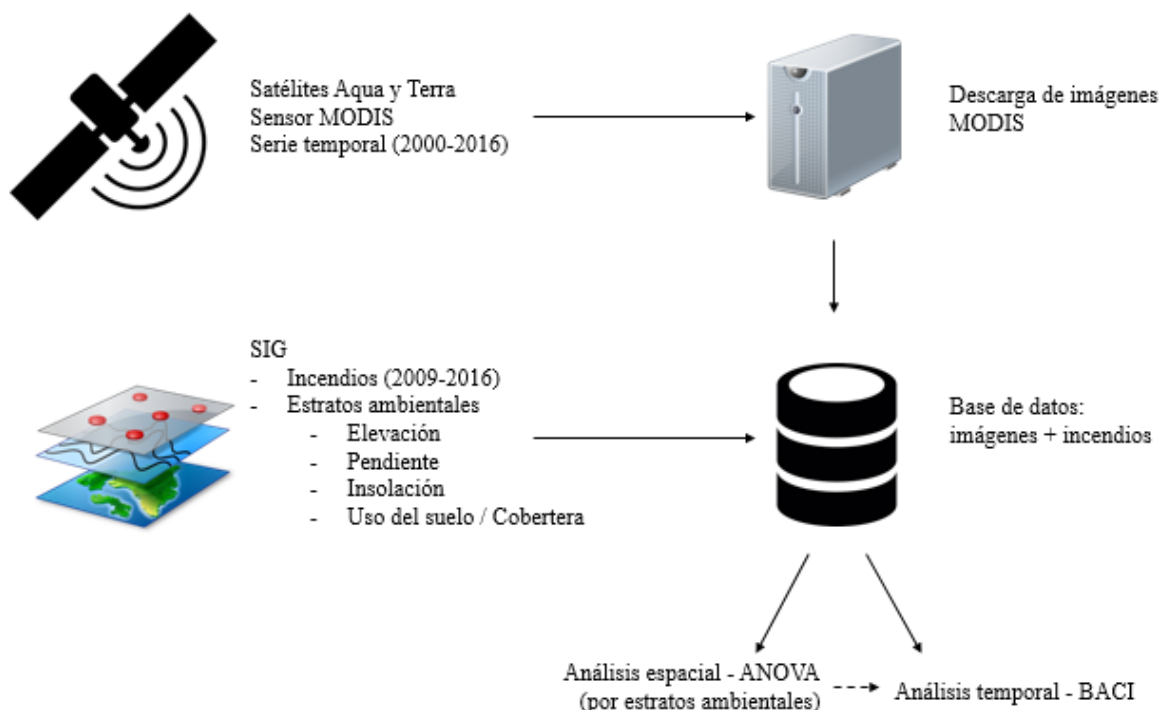
En este trabajo se pretende analizar la capacidad de las imágenes del sensor MODIS para detectar zonas quemadas y monitorear la respuesta de la vegetación tras incendios en la comunidad autónoma de Cantabria.

Más específicamente, como primer objetivo se busca analizar si las imágenes de este sensor y el producto NDVI son capaces de apreciar diferencias entre zonas quemadas y no quemadas. En segundo lugar, se evaluará, si la respuesta al primer objetivo es afirmativa, si estas imágenes son capaces de percibir también la recuperación vegetal posterior a los incendios en diferentes gradientes geográficos y ecológicos; y cuál es la capacidad de la vegetación de recuperarse.

2.1. Metodología

En el desarrollo de este trabajo se ha seguido un flujo metodológico como muestra la Figura 1, que ha permitido analizar las diferencias espaciales y temporales causadas por la recurrencia de los incendios en el territorio de Cantabria.

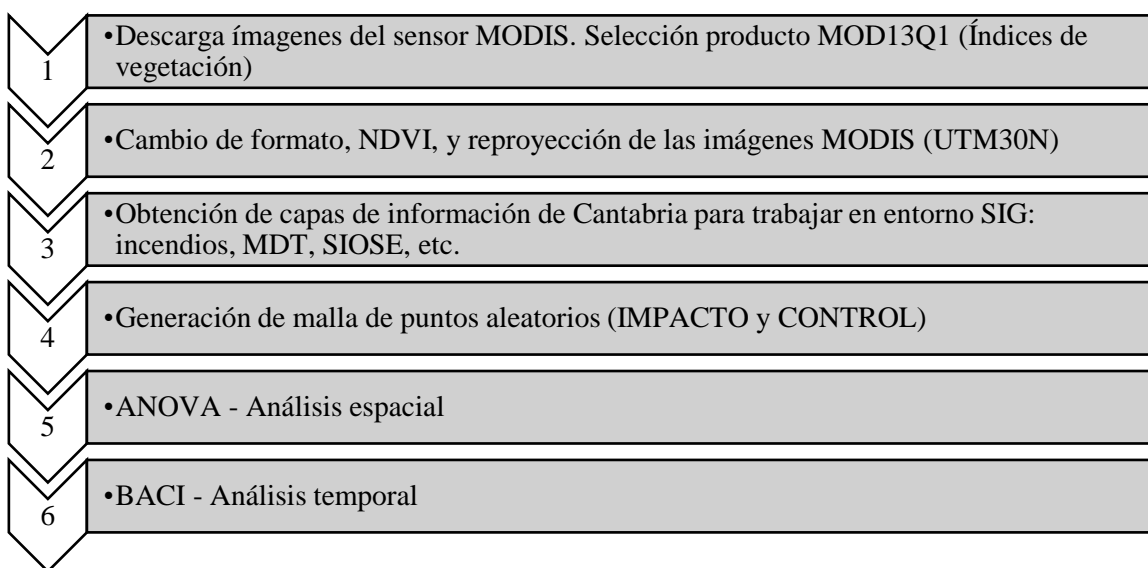
Figura 1. Esquema simplificado del proceso seguido de monitoreo de la ocurrencia de incendios y la posterior recuperación vegetal postfuego.



Elaboración propia

En primer lugar, se han descargado las imágenes del sensor MODIS para toda la serie temporal disponible (2000-actualidad) correspondientes a la comunidad autónoma de Cantabria. Paralelamente, se ha obtenido información espacialmente explícita relativa a la ocurrencia de incendios y se han desarrollado análisis estadísticos y espaciales de cara a responder a los objetivos planteados. La Figura 2 muestra una relación detallada de los pasos seguidos en el trabajo que se explican a continuación.

Figura 2. Resumen de los pasos seguidos en la metodología



Elaboración propia

2.1.1. Procesamiento de las imágenes

Las imágenes del sensor MODIS han sido descargadas desde el servicio *Earthdata* de la NASA usando un procedimiento semiautomático llamado 'MODIS Download' (<http://r-gis.net/?q=ModisDownload>), programado en lenguaje R (R Development Core Team, 2017). El algoritmo permite la descarga de todas las imágenes MODIS de forma ágil y eficiente. De los productos disponibles se descarga el que tiene el código MOD13Q1 que es el de índices de vegetación (*Vegetation Indices*), entre los que se encuentra el NDVI.

Este producto se descarga en formato '.hdf', que se convierte a '.tif' usando el programa *MODIS Reprojection Tool* (MRT) que además da la posibilidad de escoger otros parámetros como la proyección de salida, en este caso se utiliza la ETRS89 UTM 30N.

2.1.2. Información de Cantabria: incendios y otras capas

Se han recopilado diversas capas de información temática con el objeto de evaluar el efecto de los gradientes topográficos y de los usos del suelo en la ocurrencia de incendios y la posterior recuperación vegetal. En la Tabla 1, se especifican las características de éstas. Además, y como elemento indispensable, se dispone de la capa con la ubicación de los incendios ocurridos entre 2009 y 2016 en la Comunidad Autónoma.

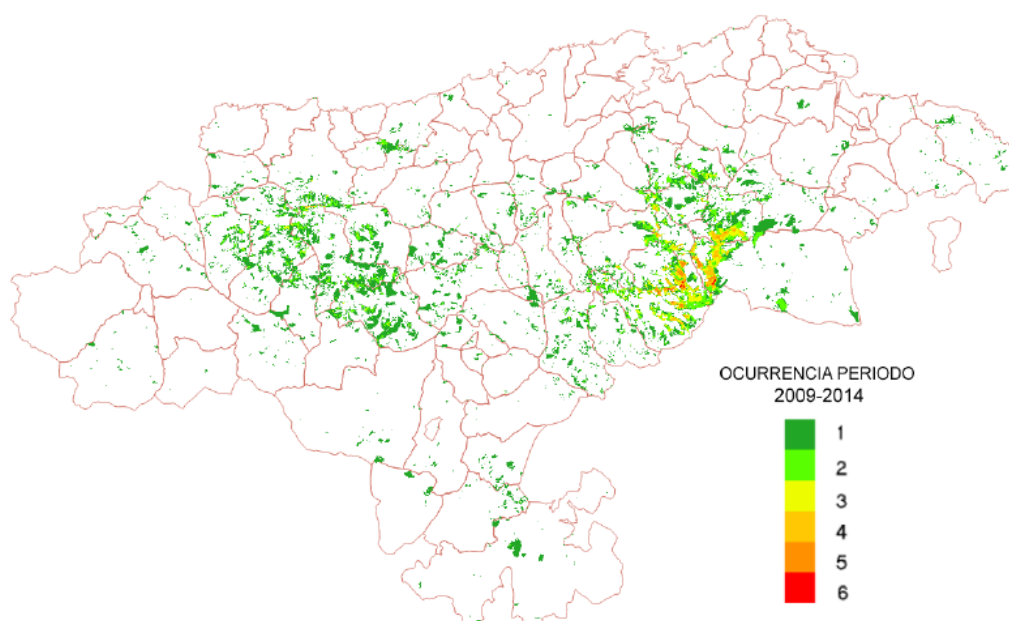
Tabla 1. Fuentes cartográficas del proyecto

Fuente	Organismo	Año	Capas	Modelo de representación
MDT	CNIG	2015	1	Ráster
SIOSE	CNIG	2011	1	Vectorial
Incendios	DGMN – Gobierno de Cantabria	2017	1	Vectorial
MODIS - NDVI	NASA	2017	411	Ráster

Elaboración propia

El análisis espacial de las superficies quemadas permite afirmar que, pese a que ocurren incendios en todo el territorio de Cantabria, hay una gran recurrencia de éstos en los valles interiores. En la Figura 3 se muestra la recurrencia de incendios en el periodo 2009-2014. Los efectos de esta recurrencia se ven sobre todo en la vegetación, ya que hay lugares que prácticamente se ven afectados todos los años (PEPLIF, 2017) y no le da tiempo a recuperarse y volver a su estado inicial, lo que da lugar a formaciones vegetales menos evolucionadas y resilientes. Además, se puede ver afectado el suelo por la erosión y degradarse, afectando de forma directa también a la vegetación.

Figura 3. Recurrencia de incendios en Cantabria en el periodo 2009-2014.



Fuente: PEPLIF, 2017

2.1.3. Secuencia de trabajo del análisis

El análisis de las relaciones espaciales entre la ocurrencia de incendios y las variables ambientales que definen los gradientes de interés (topográficos y de usos del suelo), se han llevado a cabo mediante análisis estadísticos espaciales. Para ello, lo primero que se ha hecho ha sido generar una malla de puntos aleatorios dentro de los incendios con el software ArcGIS 10.3, para obtener datos y establecer relaciones con los valores de NDVI y con los gradientes ambientales. Como condicionante en este proceso se establece una distancia mínima entre puntos de 500 m (para evitar la autocorrelación espacial).

El segundo paso ha consistido en la repetición del mismo proceso anterior, pero para las áreas no afectadas por incendio, estableciendo las mismas reglas espaciales. Para establecer las áreas de control, se ha creado un polígono excluyente de las áreas más próximas a los incendios (separación de 500 m) y que esté como muy lejos a 10 km del incendio más cercano. Esto se hace con el objetivo de afrontar más adelante el análisis de impacto-control espacial y temporal.

Con ambas nubes de puntos, el tercer paso ha consistido en la extracción de la información del resto de capas a dichos puntos de forma que para cada punto se

tienen los datos de elevación, pendiente, uso del suelo, y valores de NDVI. A continuación, con las variables ambientales se anotan los máximos y mínimos y se calcula la media, para establecer dos intervalos por variable y así obtener, por ejemplo, en el caso de la elevación, elevaciones altas y bajas.

Posteriormente se ha realizado un análisis ANOVA, o diferencias de medias, lo que nos permite determinar si existen diferencias significativas entre el valor de NDVI de las zonas quemadas y no quemadas. Es decir, señala si las medias entre dos o más grupos son similares o diferentes. El resultado de este análisis se da en un número entre 0 y 1, si es menor de 0,05 es que las dos variables son independientes y por tanto hay diferencias significativas entre los grupos a ese nivel de significancia, mientras que cuanto más se acerque el valor a 1, más relacionadas están las variables (Cárdenas, J. 2015).

Con los resultados de este ANOVA y una selección de los incendios de estudio, se realiza un BACI (*Before-After-Control-Impact*), que consiste en un análisis temporal (antes y después) entre zonas que han sufrido algún tipo de impacto y zonas con características similares, de control, en las que no haya habido ese impacto con afán de estudiar la evolución tras el impacto (Smith, 2002). Con los resultados de este análisis y su interpretación se concluye el trabajo.

Para el desarrollo de los análisis se ha contado con distintas fuentes de información. Se ha utilizado la cartografía de incendios en Cantabria e imágenes recogidas por el sensor MODIS, así como el Modelo Digital del Terreno (MDT) y la cartografía de Ocupación del Suelo de España.

2.2. Cartografía de incendios de Cantabria

Cartografía de incendios en Cantabria para el periodo 2009-2016 elaborado y cedido por la Dirección General del Medio Natural que depende de la Consejería de Medio Rural, Pesca y Alimentación del Gobierno de Cantabria

2.3. Imágenes del sensor MODIS

El sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) se encuentra en los satélites Aqua (EOS-PM 1) y Terra (EOS-AM 1), que pertenecen a la NASA (por

sus siglas en inglés, *National Aeronautics and Space Administration*) y cartografían todo el planeta en plazos de uno a dos días.

La resolución espacial de los productos disponibles varía, puede ser 250m, 500m, 1000m o 5600m. La resolución temporal oscila de diaria a mensual, aunque los productos suelen incluir composiciones de máximo valor que reducen anomalías puntuales, variando entre 16 días y un mes.

La variabilidad de productos que se ofrecen con este sensor es grande dada esta versatilidad de resolución espacial y temporal. Además de las imágenes con datos brutos, también hay imágenes que son el resultado del cálculo de índices, como es el caso del NDVI que se utiliza en este trabajo u otros como el Índice de área foliar (*Leaf Area Index – LAI*) o el Índice de vegetación mejorado (*Enhanced Vegetation Index - EVI*). Dentro del grupo de índices de vegetación hay seis productos con distintas características como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los índices de vegetación del sensor MODIS

PRODUCTO	SATÉLITE	R. ESPACIAL	R. TEMPORAL
MOD13A1	Terra	500	Compuesto (periodo de 16 días)
MYD13A1	Aqua		
MOD13A2	Terra	1000	Compuesto (periodo de 16 días)
MYD13A2	Aqua		
MOD13A3	Terra	1000	Mensual
MYD13A3	Aqua		
MOD13C1	Terra	5600	Compuesto (periodo de 16 días)
MYD13C1	Aqua		
MOD13C2	Terra	5600	Mensual
MYD13C2	Aqua		
MOD13Q1	Terra	250	Compuesto (periodo de 16 días)
MYD13Q1	Aqua		

Los 12 productos varían en sus resoluciones disponibles, y usaremos uno u otro en función de nuestras necesidades. Por ejemplo: “El producto MOD13A1 versión 6 proporciona un valor de índice de vegetación en una base por píxel. Hay dos capas de vegetación primaria. El algoritmo para este producto elige el mejor valor de píxel disponible de todas las adquisiciones del período de 16 días. Los criterios utilizados son nubes bajas, ángulo de visión bajo y el valor NDVI / EVI más alto. El primero es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual se conoce como el índice de continuidad del NDVI derivado de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, NOAA-AVHRR). La segunda capa de vegetación es el *Enhanced Vegetation Index* (EVI), que ha mejorado la sensibilidad en las regiones de alta biomasa. Proporcionados junto con las capas de Vegetación se proporcionan también las dos capas de Calidad (QA) y las bandas de Reflectancia 1 (Rojo), 2 (Near-Infrared), 3 (Azul) y 7 (Mid-Infrared), así como cuatro capas de observación. La validación en la etapa 3 se ha logrado para todos los productos MODIS MOD / MYD13 vegetación.” (Didan, K., 2015).

2.4. Modelo Digital del Terreno (MDT)

Los Modelos Digitales del Terreno se han definido (Doyle, 1978:1481) como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio. En este caso, la característica del territorio que se ha utilizado ha sido la elevación, es decir, se ha utilizado un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), que representa la superficie de suelo desnudo y sin ningún objeto, como la vegetación o los edificios.

El MDE utilizado proviene del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) de España que es un Organismo Autónomo de carácter comercial asignado al Ministerio de Fomento a través del Instituto Geográfico Nacional cuya principal misión es difundir y comercializar los productos del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

De este MDT se han obtenido además de las elevaciones, las pendientes y la insolación mediante el uso de algunas de las herramientas de las que dispone el Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizado: ArcGIS.

2.5. Cartografía de la Ocupación del Suelo de España

La Cartografía de Ocupación del Suelo de España se ha obtenido del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT) cuyo objetivo es generar una base de datos de Ocupación del Suelo para toda España a escala de referencia 1:25.000. Este proyecto está dirigido por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y se lleva a cabo de forma descentralizada y coordinada entre las distintas administraciones en cada comunidad autónoma.

Esta cartografía divide el territorio en polígonos en unidades de ocupación del suelo homogénea en cuanto a coberturas. Cada polígono contiene en su interior una cobertura del suelo que pueda ser considerada como homogénea o una combinación de varias coberturas del suelo homogéneas, haciendo a este claramente distinguible de las unidades que lo rodeen. En cualquier caso, habrá que recoger las coberturas que presenten al menos un 5% de la superficie del polígono (SIOSE, 2015). Es por eso que la descripción de cada cobertura se hace mediante porcentajes.

El primer SIOSE es de 2005, pero posteriormente se ha actualizado en 2009, 2011 y 2014. Para este trabajo se ha utilizado el SIOSE de 2011 y se ha extraído la ocupación del suelo dominante, es decir, la de mayor porcentaje, y reclasificado en ocho tipos para que su uso sea más fácil y rápido. Estos ocho tipos son: urbano (UHD), agrícola (AGR), pastizal (PAS), bosque caducifolio (BLF), bosque de coníferas (CNF), plantación (PLT), matorral (SSH) y agua (WAE).

3. ANÁLISIS DE LOS DATOS

El análisis de los datos aborda dar solución a los objetivos planteados mediante la utilización de las fuentes descritas. En primer lugar, se lleva a cabo el análisis ANOVA y con posterioridad el BACI. Estos análisis parten de una base de datos amplia formada por los puntos de incendio y de control en la que cada uno de ellos tiene la información asociada de elevación, pendiente, insolación, uso del suelo y valores de NDVI así como esas mismas variables divididas en intervalos, como ya se ha mencionado.

Previo al análisis ANOVA, se han seleccionado los valores de NDVI de cada punto para que se muestre la cifra correspondiente a la imagen posterior al incendio, con los valores del índice correspondientes al tipo de vegetación existente antes de la perturbación. La base de datos resultante tiene 7 columnas (identificador del punto, si corresponde con incendio (1) o con control (0), la elevación y la pendiente por intervalos (1=baja, 2=alta) el tipo de vegetación y el valor de NDVI inmediatamente posterior al incendio) y tantas filas como la suma de incendios y controles.

El siguiente paso consiste en realizar análisis ANOVA o diferencias de medias, lo que nos permite determinar si existen diferencias significativas entre el valor de NDVI de las zonas quemadas y no quemadas. Para llevar a cabo el ANOVA se programan una serie de algoritmos en lenguaje R. El *script* utilizado es el que se muestra en el Anexo 1.2. La forma de proceder en el análisis ha sido de grupos de información más grandes a más pequeños y por fases como se muestra en la Tabla 3. En un principio se procedió al análisis enfrentando todos los incendios contra todos los controles sin ningún tipo de estratificación ambiental. A continuación, lo mismo, pero por años, seguido de la estratificación por factores, y se acabó con la anidación de algunos de estos factores para poder observar si también así se percibían diferencias.

Tabla 3. Fases del análisis ANOVA seguidas en este trabajo.

Primera fase del análisis ANOVA	
Valor NDVI incendio	Valor NDVI control
Elevaciones bajas	Elevaciones altas
Pendientes bajas	Pendientes altas
...	

Segunda fase del análisis ANOVA			
Valor NDVI incendio	Elevaciones bajas	Elevaciones bajas	Valor NDVI control
Valor NDVI incendio	Elevaciones altas	Elevaciones altas	Valor NDVI control
Valor NDVI incendio	Pendientes bajas	Pendientes bajas	Valor NDVI control
Valor NDVI incendio	Pendientes altas	Pendientes altas	Valor NDVI control
...			

Tercera fase del análisis ANOVA					
Valor NDVI incendio	Elevaciones bajas	Pendientes bajas	Pendientes bajas	Elevaciones bajas	Valor NDVI control
Valor NDVI incendio	Elevaciones bajas	Pendientes altas	Pendientes altas	Elevaciones bajas	Valor NDVI control
Valor NDVI incendio	Elevaciones altas	Pendientes bajas	Pendientes bajas	Elevaciones altas	Valor NDVI control
Valor NDVI incendio	Elevaciones altas	Pendientes altas	Pendientes altas	Elevaciones altas	Valor NDVI control
...					

Elaboración propia

Una vez realizado el análisis espacial se escogen las variables que han mostrado las diferencias más significativas para incluirlas en el análisis temporal BACI. Para este se escogen dos escalas temporales, una mensual y otra anual. Con la primera se pretende evaluar la recuperación de la vegetación del incendio a corto plazo, observando si la vegetación vuelve a los valores normales del tipo de cobertura previa al incendio en los meses posteriores a la quema, lo que significaría una recuperación muy rápida de la vegetación. Con el análisis interanual se analiza el impacto a medio plazo del incendio, ya que se compara el valor de NDVI previo al incendio con los años anteriores y el valor posterior con los años siguientes.

De cara a obtener resultados más claros, se ha escogido para el análisis BACI el año 2011, que es un año central de la serie temporal de incendios de la que se dispone (2009-2016). Se trata, además, de un año muy cálido y seco, y es el año con más diferencias significativas entre zonas quemadas y no quemadas en todos los estratos.

Una vez escogido el año para el análisis temporal más detallado, se hace una selección de los incendios que solo se han quemado ese año, excluyendo así que no se haya quemado en los años previos y posteriores para poder evaluar la recuperación post-fuego de la vegetación sin otras señales de quema que las correspondientes al evento de interés. Se ordenan por tamaño y se hace un análisis visual del más grande al más pequeño. En este análisis visual se observa que no todos los incendios ocupan un pixel entero de las MODIS por lo que se descartan aquellos de menor tamaño y formas alargadas, afectados por un mayor efecto de borde y por lo tanto, mayor incertidumbre espectral (Murcia, C. 1995; Skole, D. L. y C. Tucker 1994). Además, también se observa que los incendios son mixtos y que la cobertura vegetal varía dentro de un mismo incendio. Cuando uno de los puntos no se corresponda con un pixel completamente quemado, se mueve a otro dentro del mismo incendio que sí lo esté y se vuelve a relacionar con los valores de las variables, de forma que se obtenga una tabla resumen que caracterice cada incendio. A partir de la información de esta tabla se seleccionan los más adecuados para realizar el análisis final, y se procede a hacer el BACI.

4. RESULTADOS

4.1. Generación de las bases de datos

Tras la descarga de toda la información MODIS de los servidores de la NASA, se ha generado una base de datos con 388 imágenes que se distribuyen en 23 por año (ya que hay una imagen NDVI cada 16 días) exceptuando en el año 2000 en el que solo hay 20 dado que la serie comienza a finales de febrero.

En relación con los incendios, la Tabla 4 muestra el número de incendios y puntos aleatorios generados dentro de cada uno de ellos. Como se puede observar, el número de puntos aleatorios es mayor ya que los incendios de grandes dimensiones pueden tener más de un punto. A parte de los incendios, como preparación para el análisis impacto-control, se han generado puntos de control (en zonas no quemadas) comunes para los ocho años de incendios. Se trata de un total de 2.150 puntos. De esta forma se pueden comparar superficies quemadas con no quemadas, teniendo entre ellos características similares en cuanto a los estratos propuestos

Tabla 4. Número de incendios y puntos aleatorios en Cantabria (2009-2016).

Año de incendio	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Número de incendios	802	753	775	808	449	806	773	240
Número de puntos aleatorios	811	758	797	737	455	817	810	244
Número total puntos (incendio/control)	2.961	2.908	2.947	2.887	2.605	2.967	2.960	2.394

Fuente: Dirección General del Medio Natural (Gobierno de Cantabria. Elaboración propia.

Con las nubes de puntos, y una vez realizada la extracción de valores NDVI y de elevación, pendiente, insolación y uso, se generan un total de 9 bases de datos (una por año) con 393 campos cada una y con un número variable de filas en función del número de puntos aleatorios correspondientes a los incendios cartografiados cada año, además de la de los puntos de control.

4.2. Diferencias entre zonas quemadas y no quemadas

De cara a señalar si MODIS percibe las cicatrices que muestran las superficies quemadas, éstas han de compararse con superficies no afectadas por incendios para ver si se aprecian diferencias en los valores de NDVI.

El análisis de las diferencias entre el valor de NDVI de áreas quemadas y no quemadas, estratificado por gradientes ambientales de elevación, pendiente, vegetación e insolación arrojó resultados muy significativos en casi todos los casos, es decir, MODIS sí que puede apreciar las variaciones en los valores de NDVI al comparar zonas quemadas y no quemadas.

Los intervalos calculados para realizar este análisis para los parámetros de elevación, pendiente e insolación se muestran en la Tabla 5. El área de estudio es muy abrupta en la parte alta con una pendiente media en estas zonas de 22°. En cuanto a los usos del suelo, en las zonas bajas predomina el uso agrícola, mientras que, en las altas, lo que abundan son pastos y matorrales.

Tabla 5. Intervalos de los parámetros para el ANOVA.

	Primer intervalo (1)	Segundo intervalo (2)
Elevación (m.s.n.m.)	0 – 566,5	566,5 - 1800
Pendiente	0 – 22,24	22,24 – 61,2
Insolación	0 – 1121580'5	1121580'5 - 1518910
Usos del suelo	AGR = AGRÍCOLA	
	BLF = Bosques	
	CNF = Coníferas	
	DEN = Roquedo	
	PAS = Pastizales – Pastos	
	PLT = Plantaciones	
	SSH = Matorral	

Elaboración propia

En la Tabla 6 se muestra un ejemplo de la base de datos resultante con la que se realiza el ANOVA, en ella se observa que se especifica la naturaleza del punto determinada por si ha sufrido incendio o no, la elevación, la pendiente, la insolación, el uso del suelo y el valor de NDVI, utilizando los intervalos explicados en la Tabla 5.

Tabla 6. Ejemplo de tabla para el ANOVA del 2012.

ID	INC-NOINC	MDT	PTE	INSOL	SIOSE	NDVI
0	1	1	2	2	SSH	5937,0
1	1	2	2	2	BLF	5285,5
2	1	1	1	1	PAS	5732,0
3	1	1	2	2	SSH	6185,5
4	1	1	1	2	SSH	3921,5
5	1	2	2	2	SSH	2267,0

Elaboración propia

Con la información generada, y con el objetivo de descubrir esos contrastes entre valores de NDVI, se realizó en primer lugar el análisis de diferencias espaciales entre zonas quemadas y no quemadas utilizando el *script* ANOVA de R que se muestra en el Anexo 1.2. Este *script* permite realizar la comparativa espacial de medias entre los impactos y los controles a través de los gradientes ambientales descritos. La información generada, muy amplia, se muestra en el Anexo como una Tabla de significancias (Anexo 2), es decir, una tabla que describe si las diferencias entre incendio y control son significativas o no, para cada caso. Debido a la comparativa de múltiples casos y la posibilidad de error estadístico de Tipo I, se corrigieron las predicciones con Boferroni. No obstante, las altísimas significancias de la mayor parte de los análisis garantizaron la veracidad de los resultados.

En la primera parte del análisis ANOVA, como se muestra en la Tabla 7, el resultado ha mostrado diferencias significativas en prácticamente todos los casos estudiados, lo que significa que existen grandes diferencias entre los valores de NDVI de los píxeles quemados y no quemados en conjunto y de forma individual para los años analizados, a excepción del caso de la insolación, es decir, este parámetro no es concluyente de una variación de NDVI entre zonas con insolaciones opuestas.

Tabla 7. Primer análisis ANOVA: significancias entre intervalos de la misma variable.

	INC	MDT	PTE	INSOL	USO
2009	0,000	0,000	0,000	0,100	0,000
2010	0,000	0,000	0,000	0,595	0,000
2011	0,000	0,000	0,000	0,380	0,000
2012	0,000	0,000	0,000	0,221	0,000
2013	0,049	0,000	0,000	0,201	0,000
2014	0,000	0,000	0,000	0,998	0,000

Elaboración propia

En la segunda parte del análisis, que hace referencia al ANOVA estratificado por variables ambientales, enfrenta zonas de impacto y de control para cada intervalo o uso. En la Tabla 8 se muestra un resumen de resultados de este análisis. En ésta se sitúan los años en las columnas y las variables en las filas. Además de las significancias, también se muestra el número de puntos que se tienen para elaborar el ANOVA, y como consecuencia, algunas celdas se encuentran vacías por no disponer de suficientes puntos para realizar el análisis. En los resultados se aprecia que el año en el que más diferencias se han encontrado es 2011, mientras que 2013 es en el que menos hay. Esto quiere decir que en 2011 hay más contraste entre las zonas quemadas y no quemadas en relación con los estratos estudiados, mientras que en 2013 el contraste es menor, lo que podría señalar diferencias en el régimen climático de cada año.

Si se observan los estratos separados, la elevación y la pendiente muestran diferencias significativas con la excepción del año 2013 y el 2010 en pendientes altas. En el caso de las pendientes altas, es una situación de difícil estudio debido a que la teledetección recoge las superficies en pendientes altas como más pequeñas de lo que son, por la visión cenital, y con la resolución espacial de 250 m de MODIS puede no ser concluyente y el área ocupa menos de lo que es un pixel.

En cuanto a la vegetación, en uso agrícola, bosque, coníferas y plantación, no se encuentran diferencias, mientras que en pastos y matorral sí que las hay. La primera situación se explica por la tipología de los incendios, en donde si se quema algún estrato de la cubierta vegetal pero no todos ellos, puede que no se aprecie ningún cambio en las imágenes de satélite. Mientras que en el segundo caso, los incendios son de rápida propagación y queman toda la vegetación que se encuentra en la

superficie, por lo que la respuesta fotosintética se ve reducida y se captan esas diferencias.

Todo esto pone de relieve que la herramienta MODIS es capaz de percibir los impactos estudiados, los incendios.

Tabla 8. Segundo análisis ANOVA: significancias entre impacto-control en los intervalos de las variables.

	2009		2010		2011		2012		2013		2014	
	n	p	n	p	n	p	n	p	n	p	n	p
MDT=1	1323	0,000	1370	0,000	1375	0,000	1385	0,000	1252	0,000	1448	0,000
MDT=2	1290	0,000	1334	0,000	1364	0,000	1389	0,000	1150	0,349	1313	0,000
PTE=1	1776	0,000	1804	0,000	1854	0,000	1866	0,000	1668	0,732	1863	0,000
PTE=2	837	0,000	900	0,991	885	0,000	908	0,000	734	0,298	898	0,000
INSOL=1	1124	0,000	1199	0,000	1212	0,000	1224	0,000	1031	0,953	1947	0,000
INSOL=2	1489	0,000	1505	0,000	1527	0,000	1550	0,000	1371	0,150	814	0,000
USO=AGR	44	1,000	44	1,000	45	0,099	44	1,000	43	-	44	1,000
USO=BLF	543	0,000	533	0,993	527	0,001	557	0,029	507	1,000	553	0,000
USO=CNF	2	0,999	1	-	2	0,000	1	-	1	-	2	1,000
USO=DEN	-	-	161	0,000	143	0,053	161	0,004	135	0,001	146	0,000
USO=PAS	868	0,000	841	0,000	871	0,000	867	0,000	796	0,961	865	0,000
USO=PLT	236	0,980	235	0,393	231	0,999	226	1,000	231	0,903	245	0,268
USO=SSH	920	0,220	889	0,997	920	0,000	918	0,003	689	0,070	906	0,000

Elaboración propia.

Por último, se ha hecho otro ANOVA en el que se han anidado clases tomando como base la elevación y relacionándolo con la pendiente y el uso (Tabla 9). Por ejemplo, se analizan los incendios en zonas bajas con pendientes bajas frente a los controles, por un lado, y por el otro se estudia el caso de elevaciones bajas con pendientes altas. Eso se hace para cada intervalo de pendientes y para cada uso descrito. En cuanto a las pendientes se observa que es un factor determinante en altitudes bajas pero que en zonas altas tiene menos importancia, sobre todo cuando las pendientes también son altas. Por otra parte, cuando se presta atención esta relación de la altitud con los

usos del terreno se puede observar que en general las diferencias no son significativas en usos agrícolas, coníferas y roquedo. En zonas bajas tampoco se ven diferencias en las plantaciones ni en los bosques de las zonas altas. Lo que no quiere decir que no hayan de gestionarse, si no que quizás MODIS no sea la herramienta adecuada para su estudio.

Tabla 9. Tercer análisis ANOVA: anidación de las variables con la elevación como base.

		2009		2010		2011		2012		2013		2014	
		n	p	n	p	n	p	n	p	n	p	n	p
MDT=1	PTE=1	962	0,000	1012	0,000	1020	0,000	1028	0,000	964	0,000	1090	0,000
	PTE=2	361	0,000	358	0,000	355	0,000	357	0,000	288	0,000	358	0,000
MDT=2	PTE=1	814	0,000	792	0,000	834	0,000	383	0,000	704	0,993	773	0,000
	PTE=2	476	0,999	542	1,000	530	0,143	551	0,990	446	0,000	540	0,000
MDT=1	USO=AGR	25	1,000	25	1,000	24	-	25	1,000	24	-	25	1,000
	USO=BLF	213	0,000	213	0,064	199	0,000	213	0,087	192	0,624	221	0,000
	USO=CNF	2	1,000	1	-	2	0,000	1	-	1	-	2	1,000
	USO=DEN	-	-	69	1,000	56	1,000	61	1,000	55	1,000	61	1,000
	USO=PAS	538	0,000	538	0,000	547	0,000	544	0,000	510	0,003	558	0,000
	USO=PLT	199	0,970	196	0,602	191	1,000	190	1,000	194	1,000	204	0,094
	USO=SSH	343	0,000	32	0,000	356	0,000	351	0,000	276	0,007	377	0,000
MDT=2	USO=AGR	-	-	19	-	21	0,468	19	-	19	-	19	-
	USO=BLF	327	0,996	320	1,000	328	1,000	344	1,000	315	0,999	332	0,000
	USO=CNF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	USO=DEN	-	-	92	0,000	87	0,005	100	0,004	80	0,215	85	0,053
	USO=PAS	330	0,029	303	0,201	324	0,000	323	0,001	286	1,000	307	0,007
	USO=PLT	37	1,000	39	1,000	40	1,000	36	-	37	1,000	41	1,000
	USO=SSH	577	0,580	561	1,000	564	0,116	567	1,000	413	0,000	529	0,000

Elaboración propia.

4.3. Análisis de la recuperación de la vegetación postfuego

Una vez se ha visto que MODIS es capaz de identificar las variaciones en los valores de NDVI entre zonas ‘sanas’ y zonas quemadas, es hora de abordar el segundo objetivo: si estas imágenes son capaces de percibir también la recuperación vegetal posterior a los incendios en diferentes gradientes geográficos y ecológicos; y cuál es la capacidad de la vegetación de recuperarse.

La selección de un año concreto para vertebrar el análisis temporal estuvo controlada, entre otros factores, por las diferencias interanuales a nivel climatológico de la serie disponible, dada la importancia que el clima tiene en la vegetación. Para ello se han tenido en cuenta los resúmenes climatológicos anuales que elabora la Agencia Estatal de Meteorología, cuya información se resume en la Tabla 10. La Agencia Estatal de Meteorología se basa en datos históricos tomando como referencia el valor medio normal del periodo 1971-2000 (tal y como se explica en cada resumen climatológico). El periodo 2009-2016, se caracteriza por temperaturas elevadas respecto de esa media y precipitaciones escasas, aunque hay algún año que se encuentra dentro de la media.

Tabla 10. Caracterización climática de España (2009-2016)

	Temperatura (T_{media})	Precipitación (P_{media})
2009	Cálido	Normal
2010	Cálido	Muy húmedo
2011	Muy cálido	Seco
2012	Cálido	Seco
2013	Cálido	Poco húmedo
2014	Muy cálido	Poco húmedo
2015	Extremadamente cálido	Muy seco
2016	Muy cálido	Húmedo

Fuente: Resúmenes climatológicos de AEMet. Elaboración propia

De forma adicional, la selección está condicionada por los estadísticos calculados anteriormente y las diferencias observadas entre zonas quemadas y no quemadas dentro de cada año concreto. El tercer factor utilizado para la selección del año a estudiar se corresponde con la cantidad de información disponible, o número de incendios ocurridos durante cada año. Teniendo en cuenta estos aspectos, se ha seleccionado el año 2011. Se trata del año en el que más diferencias se aprecian en todos los niveles y se corresponde, además, con un periodo cálido y seco en el que la vegetación, sujeta a mayor estrés y cambio fenológico, debería maximizar las

diferencias tras perturbación. Por último, la cantidad de incendios es grande, con un total de 755 polígonos.

Como se explica en la metodología, se escogen los incendios ocurridos en zonas que no se han quemado los años previos y posteriores para poder evaluar su recuperación en el caso de que no ocurran más impactos. Además, también se seleccionan los más grandes para asegurar que la señal recogida sea realmente de una superficie quemada y se eliminan aquellos que son demasiado pequeños y no ocupan un pixel entero del MODIS. Llevando a cabo este cribado se llega a la elección de 7 incendios en los que se va a estudiar la recuperación vegetal postfuego y que se muestran en la Tabla 11. En esta tabla se añaden algunos datos como la fecha de ocurrencia, el área quemada, la comarca a la que pertenece y el municipio en el que ocurrió. Como se puede observar, la selección ha resultado estar bien distribuida en el territorio de la Comunidad Autónoma y todos ellos quemaron más de 17 ha de superficie, siendo el mayor el ocurrido en el municipio de Los Tojos.

Tabla 11. Incendios seleccionados para el análisis temporal BACI (2011)

Número de identificación	Fecha	Área (ha)	Comarca	Municipio
175	24 marzo	17,95	Los Valles Pasiegos	Luenta
223	24 marzo	73,23	Besaya	San Felices de Buelna
240	9 marzo	40,23	Besaya	Molledo
372	6 abril	79,37	Saja-Nansa	Rionansa
544-545	9 abril	113,96	Saja-Nansa	Los Tojos
681	23 octubre	26,98	Campoo-Los Valles	Hermandad de Campoo de Suso
682	26 octubre	22,33	Las Valles Pasiegos	Villacarriedo

Elaboración propia.

Una vez realizada la selección de los incendios y la extracción de la información de los mismos, se lleva a cabo un último proceso de obtención de valores de NDVI de los meses previos y posteriores al impacto, y otra con los valores de los años anteriores

y los siguientes. Esto se hace para observar cómo se recupera la vegetación en el corto y medio plazo, como se ha explicado anteriormente.

Es con estos datos con los que se lleva a cabo el BACI. Los resultados del BACI se muestran en la Tabla 12 y la explicación de la misma es que sí se aprecian diferencias significativas en el análisis mensual pero no en el anual. Es decir, interpretando este resultado se obtendría que la vegetación en los meses posteriores al incendio si muestra diferencias con los puntos de control pero que en un periodo de cinco años ya ha vuelto a su estado inicial.

Tabla 12. Resultados del análisis BACI

BACI	Pr(>f)
Intra-anual	2.83e-06 ***
Inter-anual	0.168
Signif. Codes: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1	

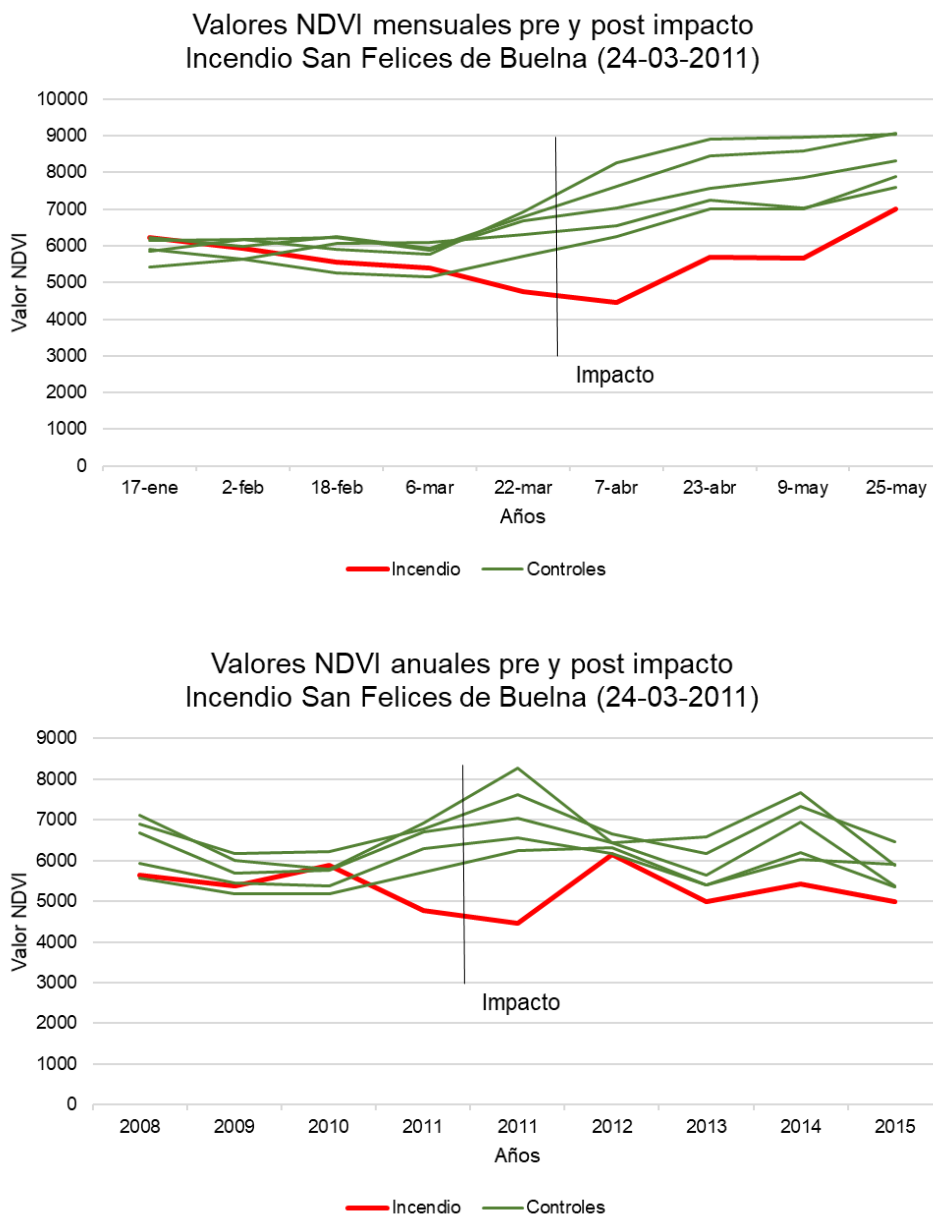
Elaboración propia

De forma complementaria se elaboran los gráficos que muestran esta evolución de los valores de NDVI y por tanto de la vegetación, para el incendio de San Felices de Buelna (Figura 4). En la gráfica mensual se observa ese impacto mencionado, distanciándose de los valores de los puntos de control, lo que reafirma el resultado del BACI, y con una evolución rápida hacia los mismos mostrando una rápida recuperación. Esto podría significar que el tipo de cobertura vegetal quemada tiene una rápida recuperación y puede que de cara a la gestión solo hubiera que facilitar esa evolución natural.

Por otra parte, en el último análisis, el BACI interanual, estudios similares en ambientes mediterráneos o submediterráneos señalan que se tendría que observar una 'depresión' en el momento del impacto, pero una vuelta rápida y completa al valor previo a la perturbación durante los años posteriores (Bodi, M.B. et al. 2012). Esto es debido al carácter resiliente de la vegetación adaptada al fuego, cuyas características estructurales y funcionales, adoptadas al fuego, se recuperan rápidamente tras el mismo (Lloret, F. & Zedler, P. H., 2009; Pérez Cabello, F. et al. 2006). No es exactamente esto lo que ocurre, sino que el gráfico de la evolución inter-anual muestra grandes diferencias en el año de ocurrencia, aunque el análisis BACI no encuentre

diferencias significativas, y una evolución similar a la de los puntos de control, pero con valores de NDVI inferiores a los de estas zonas, lo que indicaría una pérdida de actividad fotosintética de la vegetación a medio plazo. Esto quiere decir que aunque la vegetación se recupera, al menos durante los siguientes cinco años no se recupera totalmente hasta el nivel anterior al incendio, pierde productividad.

Figura 4. Ejemplo de valores mensuales y anuales de NDVI del incendio de San Felices de Buelna (24-03-2011)



Elaboración propia

5. DISCUSIÓN

Los análisis espaciales y estadísticos realizados en este trabajo han dado respuesta a los objetivos planteados, relacionados con el monitoreo espacial y temporal de la respuesta de la vegetación tras incendio, estudiado a partir de criterios geográficos y ecológicos.

Como ya se ha comentado, el uso de imágenes del sensor MODIS para el estudio de la vegetación y su recuperación tras un incendio, se ha desarrollado con anterioridad a este trabajo en otras zonas. Es por esto por lo que en este trabajo se pretendía estudiar si éstas también servían con el mismo fin en el norte de la Península Ibérica, dada la falta de estudios en ese ámbito y dados los rasgos específicos de esta zona y de los incendios.

En este trabajo se ha visto que efectivamente las imágenes del sensor MODIS han sido capaces de detectar señales de pérdida vegetal, pero no a simple vista, si no que para ello antes se ha llevado a cabo una selección muy fina de los incendios que se iba a estudiar teniendo en cuenta los gradientes entre los que se apreciaban mejor las diferencias de NDVI entre impactos y puntos de control, y cribando los incendios en función de la cobertura vegetal y por tamaños.

De los gradientes escogidos para el análisis, la insolación ha mostrado que no juega un papel crucial en el valor de NDVI, mientras que la elevación y la pendiente sí. Con esto se puede decir que la respuesta fotosintética de la vegetación en Cantabria no depende directamente de su situación en una zona de solana o de umbría, por lo que no habría que hacer diferencias a la hora de gestionar los espacios forestales. Por otro lado, la altitud y la pendiente si que tienen una relación directa con el NDVI.

El uso de MODIS ha sido clave dada su resolución temporal, disponible desde el año 2000 y hasta la actualidad. Dada esta característica, se puede utilizar en estudios posteriores tomando otros años para el análisis BACI o el estudio a largo plazo de la recuperación vegetal. Una mayor resolución espacial o espectral, no acompañada por la gran disponibilidad temporal de imágenes MODIS durante las últimas décadas, no sería útil para objetivos de seguimiento tras perturbación como los planteados en este trabajo. Los resultados obtenidos, conjuntamente con la certificación estadística de su veracidad, son herramientas de gran utilidad para el análisis geográfico regional y las

aplicaciones de estas técnicas GIS y de percepción remota en la planificación y ordenación del territorio como el PEPLIF de la comunidad autónoma de Cantabria.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo, si bien, no puede dar una respuesta clara a la evolución de la vegetación tras un incendio, pretende establecer una base de conocimiento en cuanto a las imágenes MODIS y su uso en el caso específico aplicado a Cantabria. Se pone de manifiesto que las imágenes del sensor MODIS perciben esas diferencias en la vegetación y pueden ser utilizadas para el monitoreo de la recuperación de la vegetación.

En relación a la respuesta de la vegetación a los incendios, el análisis temporal BACI ha permitido ver una recuperación rápida en los cuatro meses posteriores, pero que, a escala anual, evidencia que no se trata de una recuperación total, sino que muestra un descenso en la capacidad fotosintética de las comunidades y por lo tanto, una pérdida de resiliencia y capacidad de regeneración con recurrencias altas o eventos posteriores más severos.

Dadas las dimensiones de la comunidad autónoma de Cantabria y la gran disponibilidad de datos, se hacen necesarios estudios de mayor envergadura para poder dar respuesta a cuestiones como el tiempo que tarda en recuperarse cada tipo de vegetación y cuáles son las cubiertas o las zonas que presentan una menor recuperación post-fuego.

Considero que estas dos cuestiones son de gran importancia para el desarrollo del PEPLIF, sentando las bases de conocimiento en cuanto al tiempo de recuperación de cada unidad vegetal y su resiliencia, teniendo en cuenta a la vez las características físicas del entorno y las capacidades predictivas de los sensores remotos disponibles.

Podría ser un punto de partida o de apoyo en la toma de decisiones sobre la gestión de los montes en Cantabria, pudiendo realizar cartografía de tiempo de recuperación en caso de incendio, de forma que se puedan tomar medidas para reducir los efectos post-incendio con datos objetivos. En base a ello, se podría tratar de concienciar a la población mediante la difusión de esta cartografía, poniendo en valor el interés que supone cada tipo de espacio

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la ayuda prestada a mis directores, Virginia Carracedo Martín y Jose Manuel Álvarez Martínez, en las cuestiones técnicas y teóricas necesarias para la consecución de los objetivos planteados en este trabajo. Ha sido notable la preocupación, paciencia, constancia e inestimable ayuda de ambos.

Agradezco también la oportunidad que se brindó por parte de la Universidad de Cantabria y del Instituto de Hidráulica, al permitir que hiciera las prácticas en empresa en sus instalaciones del IHCantabria.

Y, por último, agradezco a la Dirección General del Medio Natural del Gobierno de Cantabria la cesión de la cartografía de incendios de Cantabria del periodo 2009-2016.

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

<u>Figura 1.</u> Esquema simplificado del proceso seguido de monitoreo de la ocurrencia de incendios y la posterior recuperación vegetal postfuego.....	11
<u>Figura 2.</u> Resumen de los pasos seguidos en la metodología	12
<u>Figura 3.</u> Recurrencia de incendios en Cantabria en el periodo 2009-2014.....	14
<u>Figura 4.</u> Ejemplo de valores mensuales y anuales de NDVI del incendio de San Felices de Buelna (24-03-2011)	31
<u>Tabla 1.</u> Fuentes cartográficas del proyecto	13
<u>Tabla 2.</u> Características de los índices de vegetación del sensor MODIS	16
<u>Tabla 3.</u> Fases del análisis ANOVA seguidas en este trabajo.....	20
<u>Tabla 4.</u> Número de incendios y puntos aleatorios en Cantabria (2009-2016).....	22
<u>Tabla 5.</u> Intervalos de los parámetros para el ANOVA.....	23
<u>Tabla 6.</u> Ejemplo de tabla para el ANOVA del 2012.....	24
<u>Tabla 7.</u> Primer análisis ANOVA: significancias entre intervalos de la misma variable.	25
<u>Tabla 8.</u> Segundo análisis ANOVA: significancias entre impacto-control en los intervalos de las variables.	26
<u>Tabla 9.</u> Tercer análisis ANOVA: anidación de las variables con la elevación como base.	27
<u>Tabla 10.</u> Caracterización climática de España (2009-2016)	28
<u>Tabla 11.</u> Incendios seleccionados para el análisis temporal BACI (2011)	29
<u>Tabla 12.</u> Resultados del análisis BACI	30

REFERENCIAS

Agencia Estatal de Meteorología (AEMet). Resúmenes climatológicos anuales. España. Consultado el 10 de marzo de 2017. Disponible en:

http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes?w=0&datos=2

Beamonte San Agustín, M.A. (2013) Análisis de la evolución post-fuego del NDVI de especies forestales mediante imágenes LandSat. Universidad de Zaragoza: Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Área de Análisis Geográfico Regional. Trabajo de Fin de Master, Director: Pérez Cabello, F. Master en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. TAZ-TFM-2013-1061

Bodi, M.B.; Cerdá, A.; Mataix-Solera, J.; Doerr, S.H. (2012) Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: Revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, nº 58, 2012, pp. 33-55.

Carbellés, J.M.; Oria de Rueda, J.A.; Martín-Pinto, P.; Martínez-Ruiz, C. (2009) Efecto del fuego en la regeneración a corto plazo de la vegetación en comunidades de pastizal, matorral y arbolado en una zona incendiada de Zamora. 5º Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer. ISBN: 978-84-936854-6-1

Cárdenas, J. (2015) Qué es ANOVA de un factor y cómo analizarla. Blog: networkianos.com. Enlace: <http://networkianos.com/anova-de-un-factor-que-es-como-analizar/>. Publicado 06/11/2015. Consultado el 15/06/2017.

Carracedo Martín, V.; Diego Liaño, C.; García Codrón, J.C.; y Rasilla Álvarez, D.F. (2009) Clima e incendios forestales en Cantabria: evolución y tendencias recientes. *Pirineos*, 164, pp. 33-48. ISSN 0373-2568. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/pirineos.2009.v164.28>

Carracedo Martín, V. (2015) Incendios forestales y gestión del fuego en Cantabria. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio. Santander, 2015.

- Casterad, M. A. (2009) Introducción a la teledetección. Gobierno de Aragón, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA). Octubre 2009
- Chéret, V.; Denux, J.-P. (2011) Analysis of MODIS NDVI Time Series to Calculate Indicators of Mediterranean Forest Fire Susceptibility. *GIScience & Remote Sensing*, volumen 48(2), pp. 171-194.
- Chuvienco, E.; Martín, M. P.; Ventura, G. (2002). Evaluación de imágenes NOAA-AVHRR y TERRA-MODIS para cartografía regional de áreas quemadas. En *X Simposio Internacional de la Sociedad de Expertos Latinoamericanos en Percepción Remota* (SELPER).
- Didan, K. (2015). MOD13A1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/modis/mod13a1.006>
- Di Mauro, B.; Fava, F.; Busetto, L.; Crosta, G.F. & Colombo, R., 2014. Post-fire resilience in the Alpine region estimated from MODIS satellite multispectral data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32: 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.010>
- DGMN (2017) Plan Estratégico de Prevención y Lucha contra los Incendios Forestales (2017-2020). Gobierno de Cantabria, Consejería de Medio Rural, Pesca y Alimentación, Dirección General del Medio Natural. Febrero 2017.
- Downes, B.J.; Barmuta, L.A.; Fairweather, P.G.; Faith, D.P.; Keough, M.J.; Lake, P.S.; Mapstone, B.D.; Quinn, G.P. (2002) *Monitoring Ecological Impacts. Concepts and practice in flowing waters*. Cambridge University Press, Cambridge, 2002. ISBN: 0-521-77157-9.
- Eckert, S.; Hüsler, F.; Liniger, H.; Hodel, E. (2015) Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia, *Journal of Arid Environments*, Volume 113, 2015, pp. 16-28.
- Ezquerro Boticario, J.; Rey van den Bercken, E. (2011) *La evolución del paisaje vegetal y el uso del fuego en la Cordillera Cantábrica*. Junta de Castilla y León. Fundación Patrimonio Natural de Castilla y León, Valladolid. 388 pp.

- Frazier, A.E.; Renschler, C.S. & Miles, S.B. (2013) Evaluating postdisaster ecosystem resilience using MODIS GPP data. *International Journal of Applied Earth Observation*, 21: 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.019>
- French, N.H.F.; Kasischke, E.S.; Hall, R.J.; Murphy, K.A.; Verbyla, D.L.; Hoy, E.E.; Allen, J.L. (2008) Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results. *International Journal of Wildland Fire* 17, 443-462.
- Hernández, L. (2016) *WWF Informe 2016*. Dónde arden nuestros bosques. Análisis y soluciones de WWF. WWF/Adena. Madrid, España. Julio 2016.
- Lloret, F. & Zedler, P. H. (2009) The effect of forest fire on vegetation. En: Cerdà, A., Robichaud, P. R. (coords.), *Fire effects on Soils and Restoration Strategies*. Edit. Science Publishers, pp. 257-295, Enfield. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439843338-c9>
- Martinez-Murillo, J.F.; Remond, R.; Hueso-Gonzalez, P.; Ruiz-Sinoga, J. (2016) Resiliencia de la cubierta vegetal en un área de montaña mediterránea afectada por el fuego: el caso del incendio de Río Verde (provincia de Málaga, sur de España). *Pirineos*, [S.l.], v. 171, dec. 2016. ISSN 1988-4281.
- Martorell, A. (2017) El NDVI o Índice de vegetación de diferencia normalizada. *Geoinnova*, mayo 2017. Disponible en: <https://geoinnova.org/blog-territorio/ndvi-indice-vegetacion/>. Consultado el 16/05/2017.
- Montorio Llovería, R.; Pérez-Cabello, F.; García-Martín, A.; de la Riva Fernández, J. (2007) Estudio de los procesos de regeneración vegetal postincendio en parcelas experimentales mediante radiometría de campo. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, nº33, 2007. pp. 59-84. ISSN 0211-6820.
- Murcia, C. (1995). Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 10(2), pp. 52- 62.
- Pérez Cabello, F.; Echeverría Arnedo, M.T.; Ibarra Benlloch, P.; de la Riva Fernández, J. (2006) Erosión y regeneración vegetal post-fuego en ambientes submediterráneos prepirenaicos. *Geomorfología y territorio: actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología: Santiago de Compostela, 13-15 de septiembre de 2006*. Pp. 235-246.

- R Development Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.
- Rodriguez Montellano, A. (2012). Cartografía multitemporal de quemas e incendios forestales en Bolivia: Detección y validación post-incendio. *Ecología en Bolivia*, 47(1), 53-71. Consultado en septiembre de 2017, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282012000100004&lng=es&tlng=es
- Romo Leon, J.R.; van Leeuwen, W.J.D.; Casady, G.M. (2012) Using MODIS-NDVI for the Modeling of Post-Wildfire Vegetation Response as a Function of Environmental Conditions and Pre-Fire Restoration Treatments. *Remote Sensing*, volumen 4(3), 2012, pp. 598-621. doi:10.3390/rs4030598
- San-Miguel-Ayanz, J.; Durrant, T.; Boca, R.; Libertà, G.; Boccacci, F.; Di Leo, M.; López Pérez, J.; Schulte, E. (2016) *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2015*. JRC Technical Reports. European Commission, Joint Research Centre. European Union. EUR 28158 EN; doi:10.2788/914
- SIOSE (2015) *Documento técnico SIOSE 2011*. Versión 1.1. Editor: Equipo Técnico Nacional SIOSE. Marzo 2015.
- Skole, D. L.; C. Tucker (1994). Tropical deforestation and habitat loss fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978-1988. *Science* 260 (5116): 1905-1910
- Smith, E.P. (2002) BACI design. *Encyclopedia of Environmetrics*, 1 (2002), pp. 141–148 <https://doi.org/10.1002/9780470057339.vab001.pub2>
- Thiault, L.; Kernaléguen, L.; Osenberg, C.W.; Claudet, J. (2017) Progressive-Change BACIPS: a flexible approach for environmental impact assessment. *Methods in Ecology and Evolution*. 2017, 8, 288-296.
- Van Leeuwen, W.J.D. (2008) Monitoring the Effects of Forest Restoration Treatments on Post-Fire Vegetation Recovery with MODIS Multitemporal Data. *Sensors*, volumen 8(3), 2008, pp.2017-2042.
- Verzino, G.; Joseau, J.; Dorado, M.; Gellert, E.; Rodríguez Reartes, S.; Nóbile, R. (2005) Impacto de los incendios sobre la diversidad vegetal, Sierras de Córdoba, Argentina. *Ecología Aplicada*, 4(1,2), 2005. Pp. 25-34. ISSN 1726-2216

- Viedma, O., Meliá, J., Segarra, D., García-Haro, J. (1997) Modeling rates of ecosystem recovery after fires by using landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 61, 3, pp. 383-398. Septiembre 1997.
- White, J.D., Ryan, K.C., Key, C.C., Running, S.W. (1996) Remote Sensing of Forest Fire Severity and Vegetation Recovery. *International Journal of Wildland Fire* **6**, 125-136.
- Weier, J.; Herring, D. (2000) Measuring Vegetation (NDVI & EVI). *Earth Observatory*, 30 ago 2000. Disponible en: <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/> Consultado el 20/05/2017.
- Woodhouse, I. H. (2016) *Thirteen short chapters on Remote Sensing*. University of Edinburgh

ANEXOS

1. Scripts

1.1. *Descarga imágenes*

```
### Packages
```

```
library(rts)
```

```
library(raster)
```

```
library(RCurl)
```

```
library(bitops)
```

```
# set the authentication info (solo la primera vez)
```

```
setNASAauth(username='****',password='****')
```

```
# Establecer el System Environment, ya que de lo contrario no funciona#
```

```
Sys.setenv(MRT_DATA_DIR = "C:/MRT/data")
```

```
# Producto modis
```

```
x="MOD13Q1"
```

```
# Empieza a descargar y procesar.
```

```
ModisDownload(
```

```
x=x,
```

```
h=17,v=4,
```

```
version='006',
```

```
dates=c('2000.01.01','2016.12.31'),
```

```
MRTpath='C:/LdelaP/MODIS',
```

```
mosaic=F,
```

```
proj=T,
```

```
del=T,
```

```
proj_type='UTM',
```

```
datum='WGS84',
```

```
pixel_size=250)
```

1.2. ANOVA (ejemplo 2009)

```
### Paquetes
install.packages("MuMIn")
install.packages("lmtest")
install.packages("car")
install.packages("coin")
install.packages("multcomp")
install.packages("MASS")
install.packages("pgirmess")
install.packages("agricolae")
install.packages("ggplot2")
install.packages("psych")
```

```
# Librerias
library(MuMIn)
library(lmtest)
library(car)
library(MASS)
library(HH)
library(coin)
library(multcomp)
library(pgirmess)
library(agricolae)
library(ggplot2)
library(psych)
```

```
### Cargar datos
ls()
rm(list=c(ls()))
ls()
```

```
#Directorio de trabajo
setwd("C:/z")
```

```
getwd()
```

```
### Importar datos
```

```
if2009 <- read.table("INC2009.txt", header=T, sep="\t", dec=".")
```

```
head(if2009)
```

```
str(if2009)
```

```
### Cambio de factor a integer
```

```
if2009$INC <- as.factor(if2009$INC)
```

```
if2009$MDT <- as.factor(if2009$MDT)
```

```
if2009$INSOLACION <- as.factor(if2009$INSOLACION)
```

```
if2009$PENDIENTE <- as.factor(if2009$PENDIENTE)
```

```
str(if2009)
```

```
dim(if2009)
```

```
campos <- colnames(if2009)
```

```
campos
```

```
### Estadística descriptiva
```

```
summary(if2009)
```

```
### ANOVA
```

```
a1 <- aov(NDVI2009 ~ INC*MDT*PENDIENTE + INC*INSOLACION  
+INC*MDT*USO, data=if2009)
```

```
summary(a1)
```

2. Tabla completa de Significancias

		2009		2010		2011		2012		2013		2014	
		n	p	n	p	n	p	n	p	n	p	n	p
MDT=1		1323	● 0,000	1370	● 0,000	1375	● 0,000	1385	● 0,000	1252	● 0,000	1448	● 0,000
	MDT=2	1290	● 0,000	1334	● 0,000	1364	● 0,000	1389	● 0,000	1150	● 0,349	1313	● 0,000
	PTE=1	1776	● 0,000	1804	● 0,000	1854	● 0,000	1866	● 0,000	1668	● 0,732	1863	● 0,000
	PTE=2	837	● 0,000	900	● 0,991	885	● 0,000	908	● 0,000	734	● 0,298	898	● 0,000
	INSOL=1	1124	● 0,000	1199	● 0,000	1212	● 0,000	1224	● 0,000	1031	● 0,953	1947	● 0,000
	INSOL=2	1489	● 0,000	1505	● 0,000	1527	● 0,000	1550	● 0,000	1371	● 0,150	814	● 0,000
	USO=AGR	44	● 1,000	44	● 1,000	45	● 0,099	44	● 1,000	43	-	44	● 1,000
	USO=BLF	543	● 0,000	533	● 0,993	527	● 0,001	557	● 0,029	507	● 1,000	553	● 0,000
	USO=CNF	2	● 0,999	1	-	2	● 0,000	1	-	1	-	2	● 1,000
	USO=DEN	-	-	161	● 0,000	143	● 0,053	161	● 0,004	135	● 0,001	146	● 0,000
	USO=PAS	868	● 0,000	841	● 0,000	871	● 0,000	867	● 0,000	796	● 0,961	865	● 0,000
	USO=PLT	236	● 0,980	235	● 0,393	231	● 0,999	226	● 1,000	231	● 0,903	245	● 0,268
	USO=SSH	920	● 0,220	889	● 0,997	920	● 0,000	918	● 0,003	689	● 0,070	906	● 0,000
MDT=1	PTE=1	962	● 0,000	1012	● 0,000	1020	● 0,000	1028	● 0,000	964	● 0,000	1090	● 0,000
	PTE=2	361	● 0,000	358	● 0,000	355	● 0,000	357	● 0,000	288	● 0,000	358	● 0,000
MDT=2	PTE=1	814	● 0,000	792	● 0,000	834	● 0,000	383	● 0,000	704	● 0,993	773	● 0,000
	PTE=2	476	● 0,999	542	● 1,000	530	● 0,143	551	● 0,990	446	● 0,000	540	● 0,000
MDT=1	USO=AGR	25	● 1,000	25	● 1,000	24	-	25	● 1,000	24	-	25	● 1,000
	USO=BLF	213	● 0,000	213	● 0,064	199	● 0,000	213	● 0,087	192	● 0,624	221	● 0,000
	USO=CNF	2	● 1,000	1	-	2	● 0,000	1	-	1	-	2	● 1,000
	USO=DEN	-	-	69	● 1,000	56	● 1,000	61	● 1,000	55	● 1,000	61	● 1,000
	USO=PAS	538	● 0,000	538	● 0,000	547	● 0,000	544	● 0,000	510	● 0,003	558	● 0,000
	USO=PLT	199	● 0,970	196	● 0,602	191	● 1,000	190	● 1,000	194	● 1,000	204	● 0,094
	USO=SSH	343	● 0,000	32	● 0,000	356	● 0,000	351	● 0,000	276	● 0,007	377	● 0,000
MDT=2	USO=AGR	-	-	19	-	21	● 0,468	19	-	19	-	19	-
	USO=BLF	327	● 0,996	320	● 1,000	328	● 1,000	344	● 1,000	315	● 0,999	332	● 0,000
	USO=CNF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	USO=DEN	-	-	92	● 0,000	87	● 0,005	100	● 0,004	80	● 0,215	85	● 0,053
	USO=PAS	330	● 0,029	303	● 0,201	324	● 0,000	323	● 0,001	286	● 1,000	307	● 0,007
	USO=PLT	37	● 1,000	39	● 1,000	40	● 1,000	36	-	37	● 1,000	41	● 1,000
	USO=SSH	577	● 0,580	561	● 1,000	564	● 0,116	567	● 1,000	413	● 0,000	529	● 0,000

