

Análisis de la regeneración vegetal mediante imágenes Landsat-8 y el producto MCD15A2 de MODIS: el caso del incendio de O Pindo (Galicia)¹

E. García Martínez¹, F. Pérez-Cabello²

1 Grupo de Investigación TIGAT-Tecnologías de la Información Geográfica y Análisis Territorial. Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. C/ Colegios, 2 28801 Alcalá de Henares.

2 Grupo de investigación Geoforest-Procesos GEOambientales en Espacios FORESTales. IUCA-Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.

eduardodaniel.garcia@uah.es, fcabello@unizar.es

RESUMEN: Los incendios forestales son una de las perturbaciones ambientales con mayor incidencia en el ámbito forestal de Galicia. El análisis de estos eventos mediante datos de teledetección sigue siendo una práctica habitual gracias a las prestaciones que ofrecen, desde el punto de vista radiométrico, espectral y espacial, la cada vez más abundante lista de imágenes procedentes de sensores satelitales. Recientemente la puesta en marcha del satélite Landsat 8 (OLI) y la información de productos ya consolidados como MCD15A2 (fAPAR -*fraction of Photosynthetically Active Radiation*-; LAI -*Leaf Area Index*-), del sensor MODIS, permiten nuevas posibilidades en la monitorización de los efectos del fuego gracias a las mejoras evidentes desde el punto de vista radiométrico y espectral en el caso de Landsat 8 y la información eco-fisiológica ofrecida por el producto LAI de MODIS.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar la distribución espacial de los niveles de regeneración vegetal utilizando este tipo de sensores, en un incendio forestal de grandes dimensiones (>2000 ha) que tuvo lugar en 2013 en la costa oeste de la provincia de A Coruña (Galicia). Desde el punto de vista metodológico, se aplican técnicas de análisis de cambios (vectores multitemporales) utilizando escenas en diferentes momentos (pre-incendio, post-incendio y pasados 10 meses) con el fin de realizar un análisis diacrónico de la regeneración en términos de verdor y LAI.

Los resultados preliminares apuntan a que la regeneración vegetal en términos de recuperación del verdor y el LAI ha sido muy generalizada en el área quemada, siendo especialmente intensa en las zonas ocupadas por formaciones arbustivas de *Ulex europaeus*, debido a su resiliencia y estrategia reproductiva.

Palabras-clave: Incendio forestal, OLI, MODIS, Severidad, Vectores multitemporales, Galicia.

1. INTRODUCCIÓN

En el período 2003 – 2012 se produjeron un total de 74.255 incendios forestales en Galicia afectando a una superficie de 285.281,01 has (MAGRAMA²). La mayoría de los incendios fueron de dimensiones reducidas, superando en pocas ocasiones las 500 ha (Gran Incendio Forestal -GIF-). Sin embargo, en el año 2013, se registraron varios incendios incluidos en esta categoría. Uno de ellos, situado en O Pindo (Figura 1), tuvo especial repercusión debido a su proximidad a diversos núcleos de población, a su gran extensión (2.166 has), a la especial significación de este espacio en la cultura gallega y a la singularidad geomorfológica y biogeográfica de la zona (única población de *Quercus lusitanica* en Galicia). De hecho, este espacio de la costa gallega se encuentra amparado por diversas figuras de protección del medio natural (ZEPVN y LIC Carnota - Monte Pindo). Una de las repercusiones más significativas del fuego fue la

¹ Investigación derivada del Trabajo de Fin de Máster “Análisis de severidad y seguimiento de la regeneración de tres incendios en Galicia en el 2013”, del “Máster Universitario en Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: Sistemas de información geográfica y teledetección”, del departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza.

² Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente.

afección a la cosecha de bivalvos en campañas posteriores al incendio debido al arrastre de cenizas en episodios de lluvias intensas³.

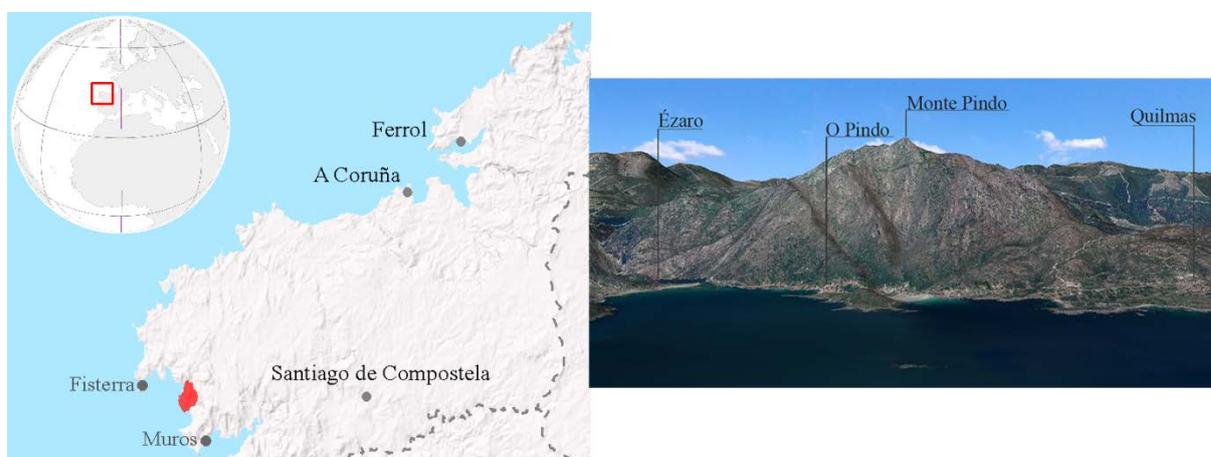


Figura 1. Localización del área de estudio.

El estudio de los efectos generados por un incendio puede realizarse mediante trabajo de campo y/o mediante el uso de información procedente de observaciones remotas. Esta última técnica y fuente de información permite cubrir en su totalidad y, en diferentes momentos, la superficie afectada por el fuego forestal. Además, los sensores remotos tienen la capacidad de registrar información en las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, permitiendo el análisis de diferentes fenómenos relacionados con el fuego, tal es el caso de la severidad y la regeneración vegetal a partir de las variaciones en las propiedades ópticas de la vegetación.

En este marco, el objetivo de esta investigación es el de identificar espacialmente el grado de afección del fuego y los procesos de regeneración vegetal mediante imágenes de satélite. Los resultados cartográficos obtenidos pueden apoyar la toma de decisiones en el ámbito de la gestión forestal post-incendio.

Para obtener la información sobre la severidad y la regeneración se han utilizado imágenes del sensor OLI (Operational Land Imager) a bordo del satélite Landsat 8 y el producto MCD15A2 del sensor MODIS, que recoge información sobre propiedades biofísicas de la vegetación: el índice de área foliar (LAI -*Leaf Area Index*-) y la fracción absorbida de la Radiación Fotosintéticamente Activa (fAPAR -*fraction of Photosynthetically Active Radiation*-).

La información obtenida ha sido analizada para evaluar la regeneración vegetal post-incendio y si ésta se encuentra controlada espacialmente por la severidad. Además, mediante vectores multitemporales se han generado productos cartográficos sintéticos capaces de evaluar la intensidad y el sentido de la regeneración valorando conjuntamente dos índices espectrales (NDVI y NDII).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El incendio objeto de estudio se localiza en el sector costero situado entre las villas marineras de Muros y Fisterra (oeste de la provincia de A Coruña) y se circunscribe al Monte Pindo. Dentro del ámbito se distinguen dos subsectores: el situado al norte del núcleo costero de Quilmas, donde se localiza la mayor complejidad orográfica de la zona, y al sur de Quilmas, zona menos escarpada al coincidir con las estribaciones del monte Pindo y con la llanura litoral de la zona de Carnota.

³ http://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/carballo/2013/10/24/cenizas-arrastradas-monte-pindo-cubren-parte-playa-ezaro/0003_201310C24C3992.htm

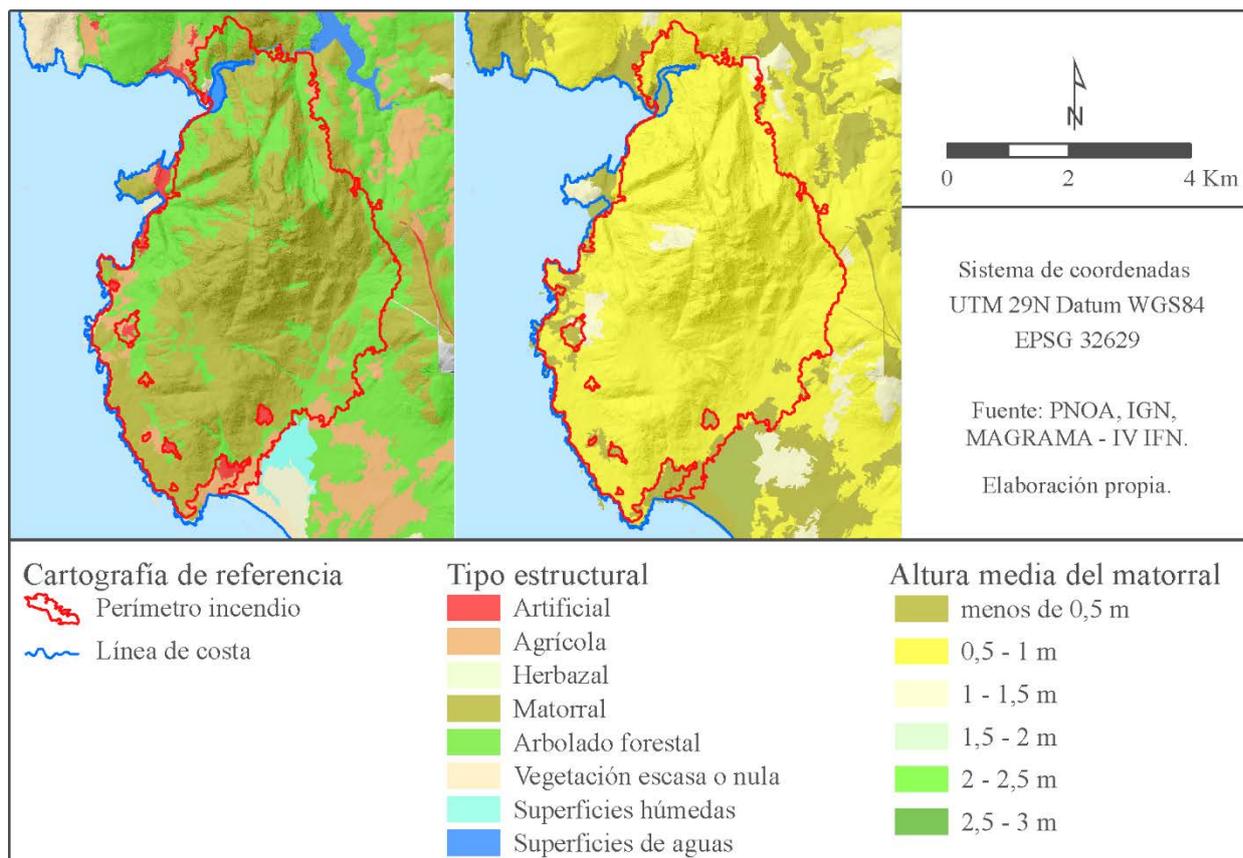


Figura 2. Estructura de la vegetación y altura media del matorral.

Los materiales predominantes en la zona son granitos y en determinados sectores próximos a la línea de costa se localizan depósitos asociados a la llanura costera (depósitos de rasa), así como depósitos marinos (playas). Por lo que respecta a las coberturas vegetales previas al incendio (IV Inventario Forestal Nacional, Figura 2), en el ámbito se identificaron formaciones de matorral-pastizal y formaciones arbóreas mixtas (*Eucaliptus globulus* y *Pinus pinaster*) localizadas en estrechas franjas al este y noroeste de la zona quemada.

La historia reciente de este sector de Galicia (1991-2011), registra un total de 482 incendios⁴. En concreto, dentro del ámbito del incendio estudiado, anteriormente se han producido otros 31 incendios entre 1999 y 2010 y, al menos en una ocasión, la superficie afectada se catalogó como Gran Incendio (1.200 has).

2.2. Imágenes Landsat e índices espectrales

En el análisis espacial de la severidad y la regeneración vegetal se han utilizado tres escenas Landsat 8-OLI que recogen la zona afectada antes e inmediatamente después del fuego y 10 meses tras el incendio (Tabla 1). Las imágenes presentan una resolución espacial de 30 m y recogen información multiespectral en el rango comprendido entre las 0,430 μ y las 2,290 μ .

Tabla 1. Fechas de las imágenes Landsat empleadas.

Escena	Imagen pre-incendio	Días pre-incendio	Imagen post-incendio	Días post-incendio	Recuperación	Días Recuperación
205-30	26-06-2013	80	15-09-2013	1	14-06-2014	273

Para garantizar la consistencia radiométrica de las imágenes en el análisis multitemporal, los niveles digitales originales han sido transformados a valores de reflectividad siguiendo el protocolo del USGS (http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php). Además, para la eliminación de los efectos

⁴ Partes de incendio de la Consellería de Medio Rural. Xunta de Galicia.

atmosféricos en las tres imágenes, se ha aplicado el método de corrección del mínimo del histograma –DOS– (Dark Object Substraction) (Chavez, 1988). Una vez corregidas las tres escenas, se han generado tres índices espectrales: el Δ NBR (Figura 3), índice espectral de severidad propuesto por Key & Benson (2006) en el contexto del proyecto FIREMON Project - Fire Effects Monitoring and Inventory- (<http://fire.org/firemon/>); el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), y el NDII (Normalized Difference Infrared Index) (Hunt y Rock 1989).

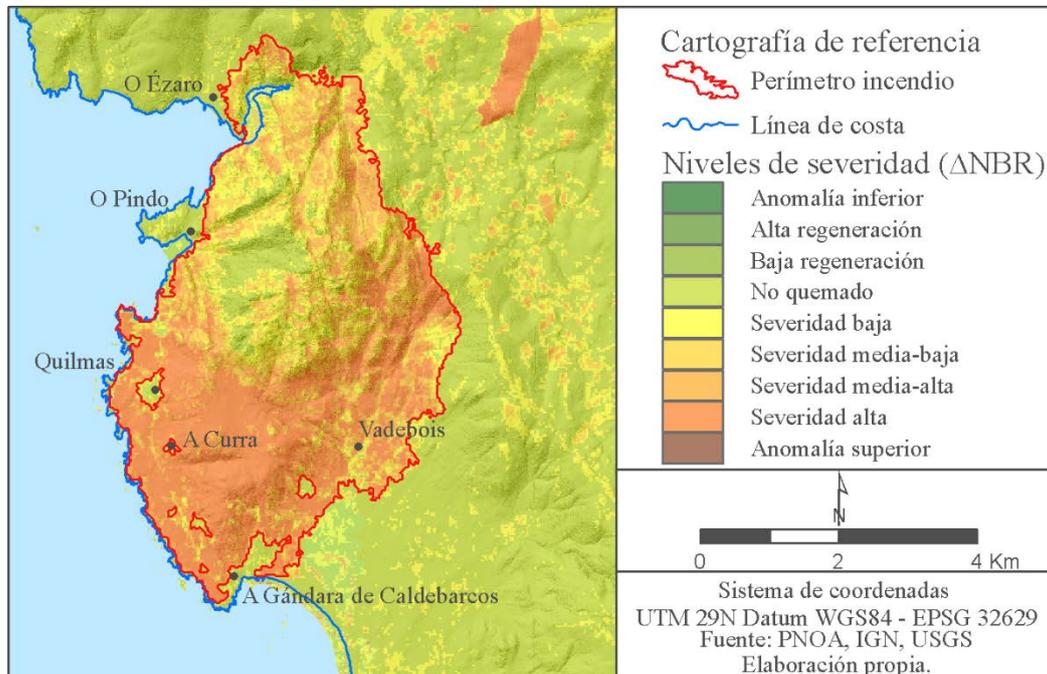


Figura 3. Distribución espacial de las categorías de severidad (Δ NBR) en el incendio de O Pindo.

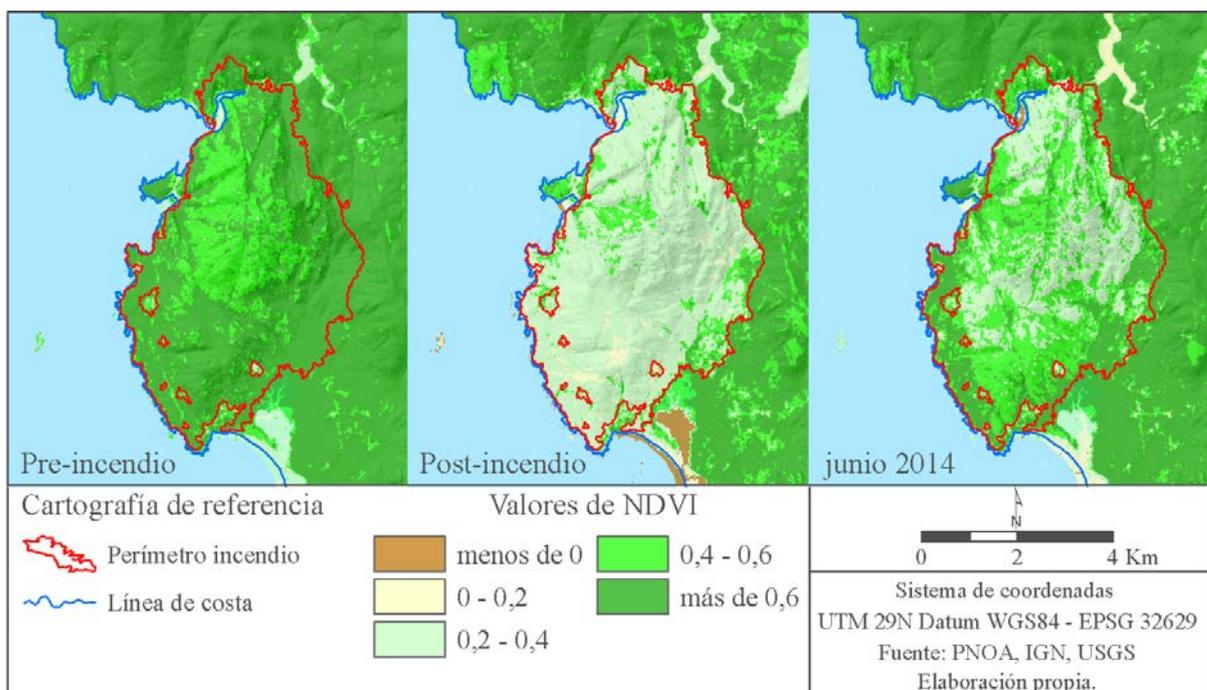


Figura 4. Distribución espacial de los valores NDVI en los tres momentos analizados.

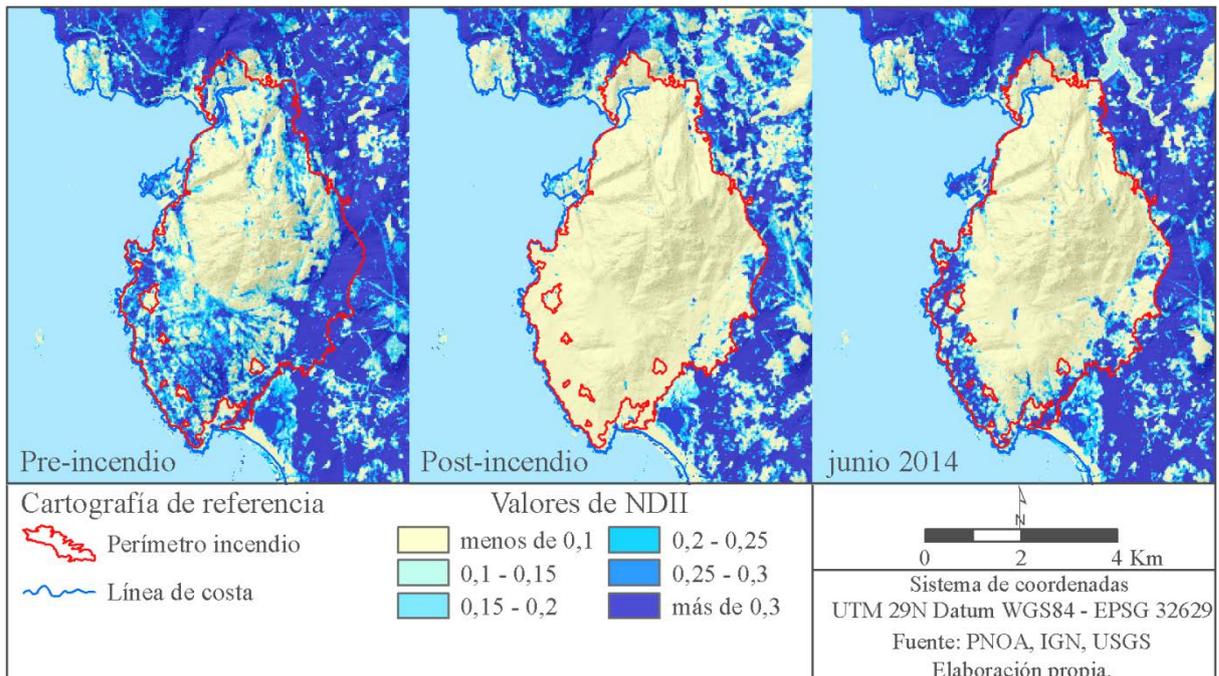


Figura 5. Distribución espacial de los valores de NDII en los tres momentos analizados.

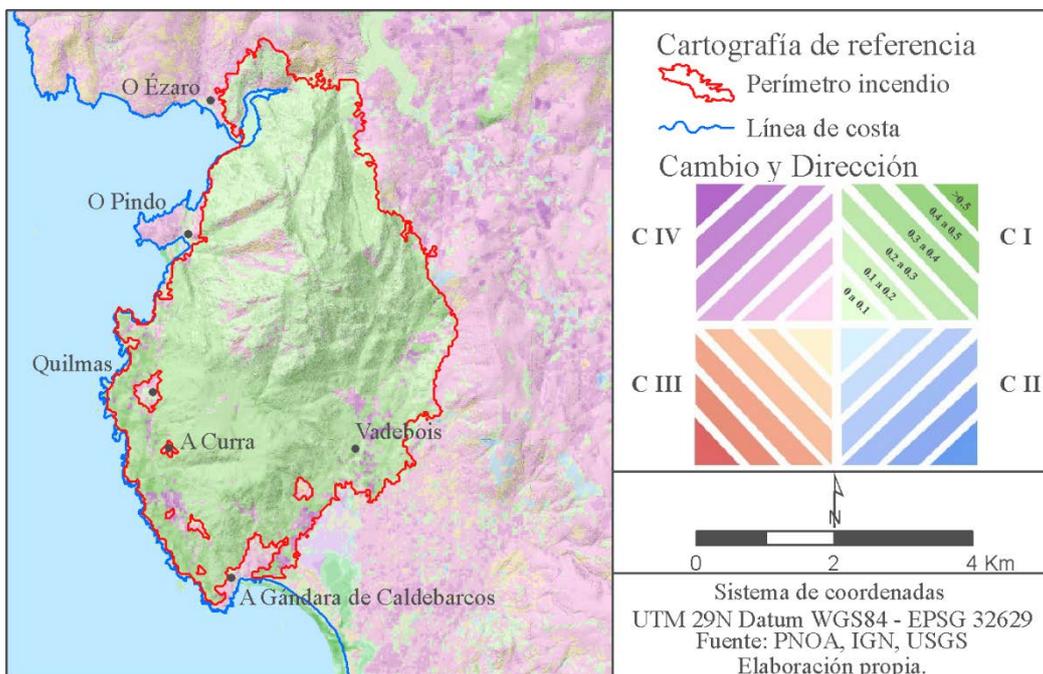


Figura 6. Distribución espacial del sentido (matiz) e intensidad de la regeneración (saturación) mediante técnicas de cambio (Vectores Multitemporales –VM) a partir de valores de NDVI y NDII.

A partir de los índices de verdor (NDVI) y humedad (NDII) (Figura 4 y Figura 5), correspondientes a las escenas post-incendio y junio de 2014 (regeneración), se han obtenido los vectores multitemporales (VM) siguiendo a González y Bosque (2008) y Pérez-Cabello (2011), para conocer, de manera sintética, la variabilidad espacial de la intensidad y sentido de la regeneración vegetal (Figura 6). En relación con este último, cuando la regeneración se produce en un píxel tanto en términos de humedad como de verdor, analizados de manera indirecta mediante los índices NDII y NDVI, respectivamente, éste se sitúa en el 1^{er}

Cuadrante (C) (0-90°). Mientras, en el caso contrario, nula recuperación de los valores de humedad y verdor, el píxel si situaría en el 3er Cuadrante (180-270°).

2.3. Imágenes MODIS

En lo que respecta a la información obtenida del sensor MODIS (abordo de los satélites AQUA y TERRA), se ha utilizado el producto MCD15A2 que contiene estimaciones de LAI, relación existente entre la presencia de hojas por unidad de superficie, y el fAPAR, que mide la proporción de radiación disponible en las longitudes de onda fotosintéticamente activas que son absorbidas por la vegetación verde, en compuestos de 8 días. Estos dos parámetros biofísicos permiten el análisis de las relaciones atmósfera-suelo-planta y de la productividad de los ecosistemas vegetales. La componente eco-fisiológica de estas variables, puede proporcionar al análisis de la regeneración vegetal post-incendio una dimensión complementaria al diagnóstico de regeneración en términos exclusivamente de cubrimiento vegetal, debido a su gran dependencia de la arquitectura de la cubierta vegetal y de las propiedades de las hojas. Se operó con tres imágenes para cada uno de los momentos analizados, tal y como se ha hecho en el caso de las escenas Landsat.

Tabla 2. Fechas de las imágenes MODIS empleadas.

Escena	Imagen pre-incendio	Días pre-incendio	Imagen post-incendio	Días post-incendio	Recuperación	Días Recuperación
H17 V04	20-8-2013	25	21-09-2013	7	25-06-2014	283

Dada la resolución espacial de este producto (1km de lado de píxel), ha sido necesario definir un criterio de presencia dentro del incendio para admitir en el análisis los píxeles de las imágenes de LAI y de fAPAR. Aquellos píxeles con una presencia en el incendio < 80 % fueron descartados. Por lo tanto sólo se operó con píxeles puros (presencia del 100 % dentro del ámbito) y con píxeles mixtos (presencia ≥ 80 % dentro del ámbito). Una vez definidos los criterios de selección de los píxeles de LAI y fAPAR se procedió al análisis comparativo de las escenas de los distintos momentos (Figura 7), del cual se extraería la información con la que se realizó el análisis estadístico.

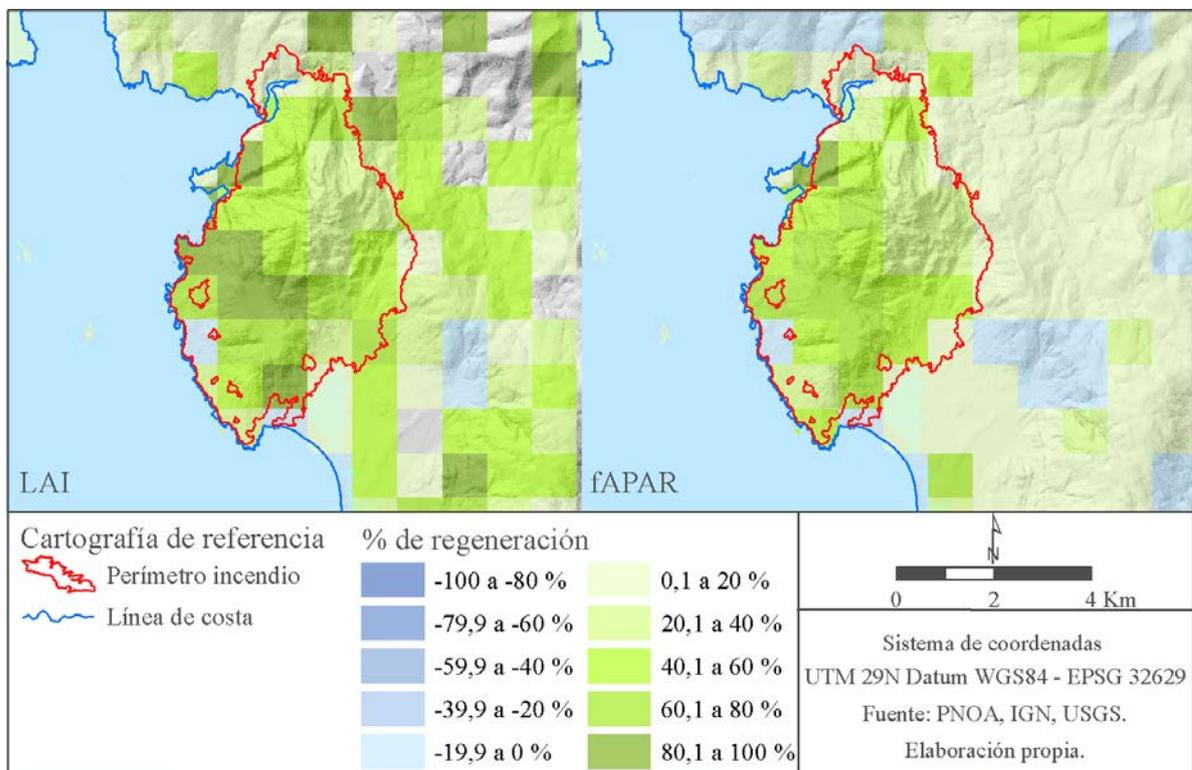


Figura 7. Porcentaje de regeneración de LAI y fAPAR post-incendio a junio de 2014.

2.4. Análisis estadístico

Una vez recopilada la información acerca del valor de severidad del incendio, del estado de la vegetación (NDVI y NDII) y de los vectores multitemporales (VM), se realiza un análisis para determinar si la regeneración vegetal post-incendio presenta algún patrón espacial regido por la severidad del fuego. Para ello se ha aplicado un método en el que se relaciona las categorías de severidad para cada pixel del ámbito, con los datos de NDVI-post, NDVI-2014, NDII-post y NDII-2014, mediante el análisis de la varianza con un factor (ANOVA). Respecto a los datos de LAI y fAPAR, se han realizado comparaciones de los datos de los tres momentos analizados, poniendo como dato de referencia el valor previo al incendio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis espacial de la regeneración mediante datos VM (NDVI/NDII) y LAI/fAPAR.

En términos generales, en relación con las condiciones previas, los valores de LAI post-incendio muestran una pérdida relativa del 81% que, diez meses después, se reduce al 30% (Tabla 3). Por su parte, los datos de fAPAR (Tabla 4) reproducen proporciones similares al compuesto de LAI, disminuyendo tras el fuego y mostrando niveles de recuperación moderados en junio de 2014.

En la distribución espacial de la recuperación de los valores de LAI y fAPAR (Figura 7), se observa cómo el sector noroccidental de la zona quemada presenta los niveles de recuperación más reducidos, mientras que en algunos píxeles ubicados en la zona centro-occidental se recoge la recuperación más significativa de LAI y fAPAR.

Tabla 3. Estadísticos generales de LAI. mín. (mínimo), máx. (máximo), \bar{X} (media), σ (desviación estándar).

	<i>Pre-incendio</i>	<i>Post-incendio</i>	<i>2014</i>	<i>% Pre - Post</i>	<i>% Pre - 2014</i>	<i>Diferencia</i>
mín.	0,7	0,1	0,5	-85,71	-28,57	57,14
máx.	3,4	0,9	1,6	-73,53	-52,94	20,59
\bar{X}	1,41	0,26	0,98	-81,56	-30,50	51,06
σ	0,64	0,17	0,3	-73,44	-53,13	20,31

Tabla 4. Estadísticos generales de fAPAR. mín. (mínimo), máx. (máximo), \bar{X} (media), σ (desviación estándar).

	<i>Pre-incendio</i>	<i>Post-incendio</i>	<i>2014</i>	<i>% Pre - Post</i>	<i>% Pre - 2014</i>	<i>Diferencia</i>
mín.	0,38	0,06	0,23	-84,21	-39,47	44,74
máx.	0,78	0,38	0,51	-51,28	-34,62	16,67
\bar{X}	0,52	0,14	0,39	-73,08	-25,00	48,08
σ	0,11	0,07	0,08	-36,36	-27,27	9,09

Por su parte, la Figura 4 y Figura 5 representan la distribución espacial de los valores de NDVI e NDII en los tres momentos considerados. Se observa el carácter centrípeto del avance que protagonizan los valores de NDVI y NDII recogido en la imagen de junio de 2014, lo que permite identificar las líneas de regeneración vegetal más activas que ascienden desde los sectores costeros-meridionales de la zona quemada.

De manera sintética, la Figura 6 representa espacialmente los resultados cartográficos de los vectores multitemporales. El dominio de las tonalidades verdes nos indica que el 90% de la zona afectada por el fuego ha experimentado un incremento simultáneo en los valores de NDVI y NDII (la dirección del cambio se sitúa en 75°). Sin embargo, el escaso periodo de tiempo transcurrido desde el fuego (10 meses), refleja una intensidad de cambio todavía reducida (0,13).

La distribución espacial de los cambios reproduce un modelo similar al descrito en las cartografías de LAI/fAPAR y NDVI/NDII. Los máximos valores de regeneración se localizan en una estrecha franja de costa desde la playa de Quilmas (próxima a O Pindo), hasta la playa de Caldebarcos, en pequeños reductos aislados. Valores algo más bajos se detectan en torno a estos reductos costeros, que conforman un sector

delimitado al norte, por el borde meridional del Monte Pindo y que se extiende hasta el borde sur del límite del incendio. En ambos casos el nivel de intensidad de la regeneración se situaría por encima de 0,1.

En estos sectores predominan la formaciones de *Ulex europaeus*, caracterizadas por su rápida recuperación y la capacidad de adaptación a espacios incendiados (Vera, 1994). También en los momentos iniciales posteriores a un incendio se produce una elevada densidad de plántulas que tapiza el suelo y que por lo tanto permite obtener estos valores de regeneración. Otro factor que afianza esta hipótesis, es el valor de NDVI pre-incendio (0,68) que indica un nivel de recubrimiento alto con importante vigor vegetal (Rouse, 1974).

Finalmente, los menores valores de intensidad de cambio ($< 0,1$), se encuentran en el sector del macizo granítico (centro y norte del ámbito), en donde hay que señalar que se han identificado valores de severidad bajos (categorías *Low Severity* y *Moderate-Low Severity*).

3.2. Relaciones espacio-temporales entre regeneración y severidad

La distribución espacial de la severidad a partir del índice ΔNBR (Figura 3) (recoge la disminución de la reflectividad en el infrarrojo cercano y el incremento en el infrarrojo medio que experimentan las zonas afectadas por el fuego), muestra dónde predominan las categorías más elevadas de severidad, que se localizan en la zona sur del incendio, coincidiendo con la concentración de extensas masas de vegetación arbustiva dominadas por *Ulex europaeus* y *Cytisus scoparius*. En la zona central (adscrita al Monte Pindo), se aprecia una acusada variabilidad espacial en términos de severidad, debido a la estructura del paisaje caracterizada por la mezcla de sectores de roca, pastizales y vegetación arbustiva.

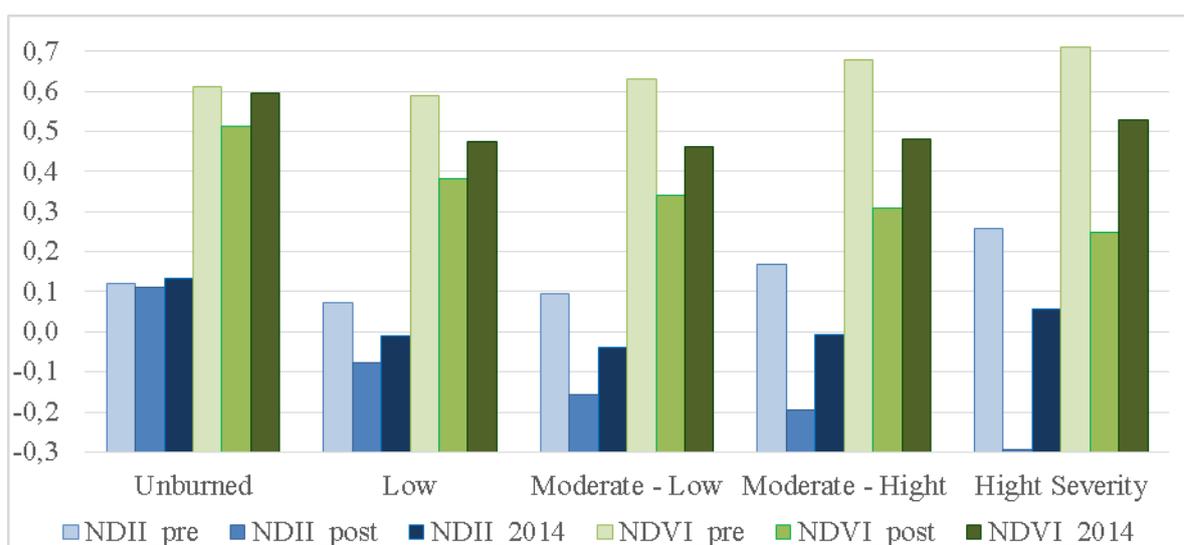


Figura 8. Distribución de los valores de NDVI y NDII pre-incendio, post-incendio y julio 2014, por categorías de severidad (ΔNBR).

La Figura 8 muestra la distribución, en función de las categorías de severidad, de los valores de NDII y NDVI en los tres momentos analizados. Los valores más bajos de NDVI y NDII post-incendio se recogen en las categorías de severidad más acusadas, lo que pone de manifiesto la estrecha relación existente entre ΔNBR y los índices de vegetación y humedad (Chafer, 2008). Sin embargo, esta relación no es tan evidente unos meses después del fuego (julio de 2014); en este caso los valores más elevados se registran en las categorías de severidad más elevadas (*Moderate-High Severity* y *High Severity*). De hecho, se han identificado diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-value} > 0,05$) (Figura 9), entre las categorías de severidad en relación con los datos de NDVI y NDII. Por tanto, la severidad, en el contexto de comunidades vegetales con estrategias de adaptación al fuego, no constituye un factor fundamental que controle la distribución espacial de la regeneración. Todo lo contrario, las zonas que registran los niveles más elevados de ΔNBR muestran los niveles de recuperación más elevados. Quizás, debido a la también mayor cantidad de recursos (biomasa previa) que presentan estas zonas de matorral.

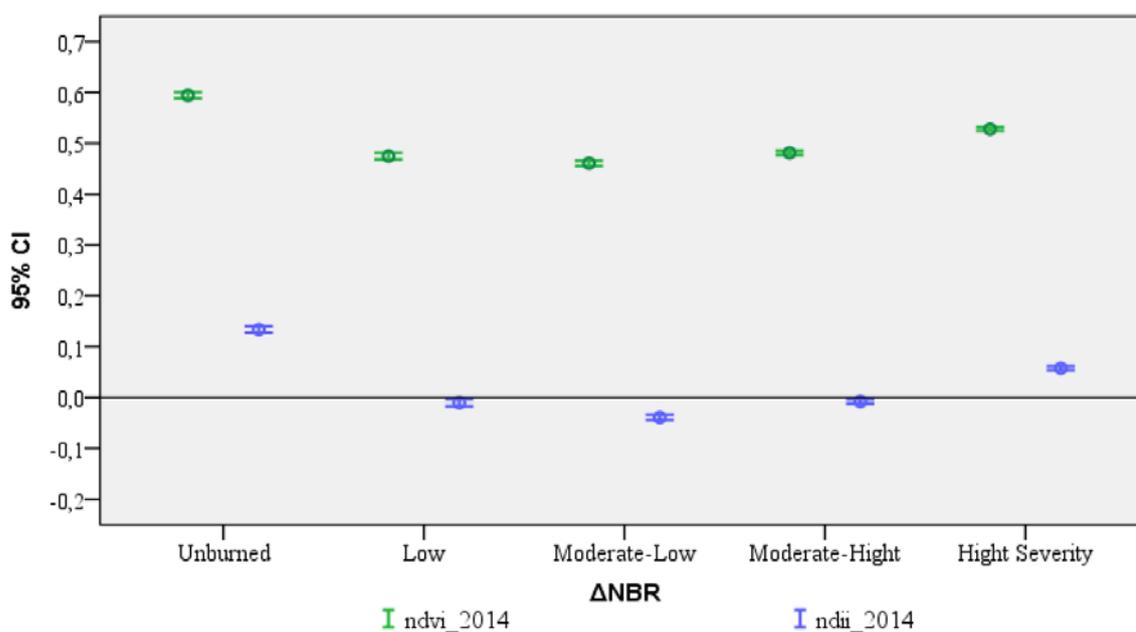


Figura 9. Medias e intervalos de confianza al 95% de los valores de NDVI y NDII medios 10 meses tras el fuego (junio de 2014) por categorías de severidad (Δ NBR).

4. CONCLUSIONES

La utilización conjunta de datos procedentes del sensor OLI y del producto MCD15A2 de MODIS, nos ha permitido conocer la distribución espacial de la regeneración vegetal post-incendio en relación con un mayor número de propiedades biofísicas, debido a la incorporación de la lectura eco-fisiológica a través de los valores de LAI, fAPAR. Además, los valores de humedad y recubrimiento vegetal, a través de los índices espectrales NDII y NDVI, se han analizado de manera sintética en el marco de los vectores multitemporales, técnica de detección de cambios que proporciona información sobre el sentido y la intensidad del proceso de regeneración vegetal.

Por otro lado, el análisis de la severidad del fuego mediante el uso del Δ NBR ha posibilitado la identificación de las zonas del incendio en las que la pérdida de vegetación ha sido más elevada, siendo estas zonas los sectores en los que se ha producido una mayor regeneración vegetal. En este sentido, la eficacia de las estrategias reproductivas de las formaciones vegetales dominantes en estos sectores (*Ulex europaeus*), y/o la mayor cantidad de recursos (biomasa previa) que presentan estas zonas de matorral, podrían explicar esta disfunción entre regeneración vegetal y severidad del incendio.

El análisis de otros factores explicativos relacionados con la regeneración (variables morfo-topográficas...) y la valoración de las nuevas situaciones de riesgo que se generan en relación con las particularidades del proceso de regeneración vegetal del incendio de O Pindo, podrían constituir nuevas líneas de investigación en el contexto de la gestión forestal postincendio.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Grégorie, J.M. (2001): "Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain". *Remote Sensing of Environment*, 77, 22-23.
- Chavez, P. S. (1988). "An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data". *Remote sensing of environment*, 24(3), 459-479.
- Chuvieco, E. (2010): *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Ariel, Barcelona.
- Cibula, W. G., Zetka, E.F. y Rickman, D.L. (1992): "Response of Thematic Mapper bands to plant water stress". *International Journal of Remote Sensing*, 13, 1869-80.
- Cohen, W. B. (1991): "Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress". *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, 57, 195-202.

- IV Inventario Forestal Nacional 2008-2018 [Recurso electrónico]: Galicia. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- De la Riva, J. (1997): Los montes de la Jacetania. Caracterización física y explotación forestal. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza.
- González, F., Merino, S., Cuevas, J.M. (2007): “Un nuevo algoritmo para la cartografía de áreas quemadas a partir de información NIR, SWIR y TIR”. *Revista de Teledetección*, 28, 97-105.
- González-Ferreiro, D., Bosque, J. (2008): “Generación de un mapa de vientos en un SIG”. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 47, 51-77.
- Hunt, E. R., JR, and Rock, B. N., (1989): “Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances”. *Remote Sensing of Environment*, 30, 43-54.
- Key, C.H., Benson, N.C. (2006): “Landscape Assessment (LA)”. En: Lutes, D.C., Keane, R.E., Carati, J.F., Key, C.H. Benson, N.C., Gangi, L.J. (eds.): FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service, Rocky Mountains Research Station General Technical Report RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, USA. Pp. 1-55.
- Lillesand T.M. y Kiefer, R.W. (2000): Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Pérez-Cabello, F. (2011): “Actividad vegetal de las cuencas de los ríos Cidacos y del Alhama (La Rioja): Análisis diacrónico mediante imágenes Landsat”. *Zubia*, 23, 79-102.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C. (1974): “Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation”. Type III, Final Report, NASA/GSFC, Greenbelt.
- Vanhelmont Q., Ruddick, K. (2014): “Turbid wakes associated with offshore wind turbine observed with Landsat 8”. *Remote Sensing of Environment*, 145, 105-115.
- Vera de la Fuente, M.L. (1994): “Regeneración de un Aulagar con *Ulex europaeus* después de un incendio en el Norte de España”. *Pirineos*, 143-144, 87-98.