

60421 TRABAJO FIN MASTER

**ANÁLISIS DE SEVERIDAD Y SEGUIMIENTO DE LA
REGENERACIÓN DE TRES INCENDIOS EN GALICIA EN EL
2013.**

Autor: Eduardo Daniel García Martínez

Profesor: Fernando Pérez Cabello

**Máster Universitario en
Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

20 de noviembre de 2014



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

En el año 2013 en Galicia se contabilizaron un total de 3623 incendios forestales, afectando a 19388 ha (MAGRAMA). El estudio de los espacios quemados y su seguimiento permite obtener una información valiosa para una adecuada gestión y ordenación de los espacios forestales de cara a reducir el número y la intensidad de los siniestros.

En este Trabajo de Fin de Máster se han analizado tres de los incendios forestales que afectaron a Galicia en el 2013, dos de ellos, los de mayor extensión y el tercero localizado en un espacio de la montaña oriental de Lugo.

En el estudio de los incendios se han empleado imágenes de satélite de diversas plataformas y sensores (Landsat 8 OLI y Terra MODIS), para generar distintos productos que permiten obtener una lectura de la severidad de los incendios así como el grado de recuperación de los espacios ardidos.

En este TFM se han propuesto tres objetivos. El primero, determinar el grado de severidad de los incendios y comprobar qué variables son las que la condicionan. El segundo, analizar el papel de la severidad en la recuperación de los espacios afectados por el fuego.

Para conseguir estos dos objetivos se han empleado técnicas estadísticas (ANOVA) para confirmar o rebatir las hipótesis de partida.

En el tercer objetivo, se ha pretendido medir el grado de regeneración de los incendios, mediante el uso de vectores multitemporales y el uso de otras fuentes de información, como son los datos de LAI y fAPAR generados por el sensor MODIS.

Para facilitar la comprensión de los resultados y de la cartografía generada, se ha implementado un espacio web de descarga de la información y de acceso a una aplicación web map para la visualización dinámica de la cartografía.

Abstract

In 2013 a total of 3.623 forest fires were registered in Galicia, affecting 19.388 ha (MAGRAMA). Burned areas monitoring provides valuable information for proper planning and management of forest areas in order to reduce the number and severity of fire disruptions.

This master degree classwork analyzes three wildfires that occurred in 2013, two of them were the most extensive in Galicia.

Satellite images from different platforms and sensors (Landsat 8 OLI and Terra MODIS) have been used in this study, to generate several products for better understanding of fire severity and the degree of recovery of burned areas.

This master degree classwork has three objectives. (1) To determine the severity of fires, and find out which variables control the spatial patterns. (2) To analyze the influence of fire severity on post-fire vegetation process. To achieve these two goals, statistical techniques (ANOVA) have been used to confirm or refute the hypothesis. (3) We have tried to measure the degree of regeneration of the burned areas, using multitemporal vectors and other sources of information, such as LAI and fAPAR products base one MODIS data.

To facilitate understanding of the results, a website was implemented to visualize vegetation dynamic mapping and to download information.

Índice

1. Introducción	5
2. Área de estudio	8
2.1. Incendio de Navia.....	9
2.2. Incendio de Oia.	12
2.3. Incendio de O Pindo.....	15
3. Material y métodos.	19
3.1. Fuentes de Información ráster.	19
3.1.1. Landsat 8 OLI.....	19
3.1.1.1. Características de LANDSAT 8 OLI	19
3.1.1.2. Productos ofrecidos por el USGS	22
3.1.1.3. Escenas y fechas descargadas.	22
3.1.1.4. Corrección radiométrica.	23
3.1.1.4.1. Radiancia	24
3.1.1.4.2. Reflectividad.	24
3.1.1.4.3. Reflectividad TOA.....	25
3.1.1.4.3.1. ERDAS.....	27
3.1.1.4.3.2. QGIS – Geosud TOA reflectance	27
3.1.1.5. La influencia de la atmósfera	30
3.1.1.6. Corrección atmosférica	31
3.1.1.6.1. Corrección atmosférica – Modelos de transferencia radiativa (ATCOR)	32
3.1.1.6.2. Corrección atmosférica – Dark Object Substraction (DOS).....	33
3.1.2. MODIS	39
3.1.3. LiDAR.....	44
3.2. Fuentes de información vectorial	49
3.2.1. IV Inventario Forestal Nacional (IV IFN)	49
3.2.2. Puntos de análisis estadístico.....	50
3.2.3. Fotos de salidas de campo	50
3.2.4. Cartografía específica para el Visualizador Web Map	52
3.2.4.1. Comunidad.....	52
3.2.4.2. Provincias.....	52
3.2.4.3. Límites internacionales	53
3.2.4.4. Batimetría.....	53
3.3. Neocanales	55
3.3.1. Δ NBR	55
3.3.2. $R\Delta$ NBR.....	59

3.3.3.	RBR.....	60
3.3.4.	NDVI.....	61
3.3.5.	NDII	62
3.3.6.	Cartografía de área quemada	63
3.4.	Variables topográficas.....	65
3.4.1.	Elevación.....	65
3.4.2.	Superficie normalizada.....	66
3.4.3.	Pendiente	67
3.4.4.	Orientación.....	67
3.4.5.	Rugosidad	68
3.4.6.	Iluminación	69
3.5.	Detección de cambios	70
3.5.1.	Procedimiento	70
3.6.	Extracción de la información.	74
4.	Análisis estadístico de los datos.....	75
4.1.	Navia	77
4.1.1.	El papel de factores estructurales en la distribución espacial de la severidad	77
4.1.2.	El papel de la severidad en la distribución espacial de la regeneración postincendio	78
4.1.3.	Detección de cambios en Navia.....	79
4.1.4.	Datos MODIS - Navia.....	80
4.2.	Oia.....	82
4.2.1.	El papel de factores estructurales en la distribución espacial de la severidad	82
4.2.2.	El papel de la severidad en la distribución espacial de la regeneración postincendio	82
4.2.3.	Detección de cambios en Oia.	83
4.2.4.	Datos MODIS - Oia.	84
4.3.	O Pindo	86
4.3.1.	El papel de factores estructurales en la distribución espacial de la severidad	86
4.3.2.	El papel de la severidad en la distribución espacial de la regeneración postincendio	86
4.3.3.	Detección de cambios en O Pindo.....	87
4.3.4.	Datos MODIS – O Pindo.....	88
4.4.	Análisis test y análisis de igual número de muestras por categorías de severidad.....	90
5.	Discusión.....	91

5.1.	Vía 1.....	91
5.2.	Vía 2.....	96
5.2.1.	Incendio de Navia	96
5.2.2.	Incendio de Oia	98
5.2.3.	Incendio de O Pindo.....	101
6.	Implementación de un visualizador web map.....	106
6.1.	Arquitectura del sistema.....	106
6.1.1.	Librería empleada	109
6.1.2.	Servicios OGC definidos.....	109
6.2.	Configuración de las aplicaciones.....	111
6.3.	Visualizador swipe.....	113
6.3.1.	Aplicación de la solución Esri.....	114
6.3.1.1.	Procedimiento para implementar el visualizador swipe	114
7.	Conclusiones	115
	Bibliografía.....	118
	Anexo de tablas y figuras	120
	TABLAS	120
	FIGURAS	128

1. Introducción

En Galicia en el período 2003 – 2012, se produjeron un total de 74255 incendios (datos de partes de incendios del MAGRAMA) que afectaron a un total de 285281.01 ha. Estas cifras dan una idea del verdadero problema que suponen los incendios en este territorio.

Los incendios que recurrentemente afectan a Galicia son de una dimensión reducida, llegando a alcanzar en pocas ocasiones las dimensiones de Gran Incendio (> 500 ha). Sin embargo, en el año 2013, se registraron varios incendios de esta categoría. Uno de ellos, situado en Oia (sur de la provincia de Pontevedra) y el de mayor dimensión del año, en O Pindo (localizado en las proximidades de Fisterra, en la provincia de A Coruña). Además de estos dos incendios, también se produjeron otros muchos de menor extensión, de los cuales, suscita especial interés el localizado en la montaña oriental de Lugo, en el concello de Navia de Suarna que, al producirse en un espacio natural de montaña, tiene una relevancia particular para el estudio de las consecuencias y el seguimiento de la regeneración vegetal en un espacio de estas características.

Un aspecto relevante del estudio y del seguimiento de los incendios es determinar el grado de afección que el incendio ha producido sobre la vegetación (el nivel de severidad) y por otro, realizar un estudio multitemporal en el que evaluar y medir con la mayor precisión posible el grado de regeneración de la vegetación, si es que se ha producido.

El estudio de los efectos generados por un incendio puede realizarse en base a diversas técnicas de trabajo, mediante muestras de campo, mediante el análisis de los partes de incendio, o también mediante el uso de información procedente de observaciones remotas.

Este enfoque es el que más se ajusta al marco del Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección impartido en la Universidad de Zaragoza.

El uso de información registrada desde plataformas remotas permite obtener una visión homogénea de amplios espacios. La capacidad que los sensores remotos tienen de registrar información en las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, permite observar los fenómenos ambientales desde diversas perspectivas y no reducirse a la simple interpretación del rango visible.

Gracias a esta capacidad de observación de la energía en diversas longitudes de onda, es posible estudiar los efectos de los incendios sobre la vegetación, ya que se pueden obtener datos sobre la actividad vegetal mediante el empleo de técnicas que relacionan los datos de las diversas bandas del espectro. En este sentido, la generación de neocanales de severidad, será una de las técnicas empleadas para el estudio de los tres incendios propuestos en este Trabajo de Fin de Máster (TFM).

Para obtener la información sobre el comportamiento espectral de los ámbitos afectados por los incendios, se ha propuesto el uso del sensor OLI de Landsat 8, que supone una modificación sustancial respecto a la forma de operar que hasta el momento se realizaba con los sensores precedentes de la serie Landsat.

En el nuevo sensor se ha cambiado la radiometría, siendo mucho más sensible. Además se ha modificado la resolución espectral, con un reajuste del ancho y de la longitud de onda que observan. Con esto se pretende una mayor eliminación de la interferencia atmosférica.

La información que se obtiene del sensor OLI se presenta con las mínimas correcciones, lo que obliga a realizar una serie de procesos de transformación de los datos brutos a valores de reflectividad. Además de las técnicas propuestas por el USGS (United States Geological Survey) para la corrección de las imágenes, también se plantea la utilización de aplicaciones comerciales, para la corrección de la influencia de la atmósfera con el objetivo de conseguir un producto lo más correcto posible.

Estas modificaciones suponen un esfuerzo añadido en la realización de este TFM, habida cuenta de que de momento no se han facilitado los parámetros de transmisividad para la corrección del efecto de la topografía (normalización topográfica) y que algunas aplicaciones comerciales y libres, no han incorporado en este momento herramientas que permitan su corrección, más que a reflectividad a techo de atmósfera en el mejor de los casos.

Como medida complementaria a la utilización de la información de este sensor, se propone el uso de información biofísica del LAI (Índice de Área Foliar) y de fAPAR (fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa) generada a partir de la información registrada por el sensor MODIS. Esta información ofrece datos de la actividad vegetal, lo que permite realizar un seguimiento de las superficies quemadas.

En este TFM, también se plantea el estudio de las relaciones de diversas variables (morfológicas, estructurales, ambientales...) para determinar por un lado, si existe alguna relación entre estas variables y el nivel de severidad de los incendios, así como

comprobar la influencia de la severidad en el grado de recuperación de los espacios incendiados.

El desarrollo de estas dos vías de estudio, se ha planteado mediante la utilización de técnicas estadísticas de medias de clases ANOVA, que permite determinar qué variables presentan una significación estadística y por lo tanto, su relación con el nivel de severidad en la perspectiva de resultado y en la de condicionante de la regeneración.

También se ha considerado la vía de estudio de la medición de la regeneración de la vegetación, como un análisis que complementa al del estudio de la severidad. Conocer y medir con precisión la dirección del cambio y la intensidad del mismo, permite incrementar la eficiencia a la hora de realizar intervenciones sobre los espacios aridos, lo que redundará en un incremento de la efectividad, en una regeneración más rápida y en una optimización de los recursos disponibles.

Toda esta información tiene como destinatario a los agentes territoriales que intervienen en el medio forestal. Se trata de personal con una formación que no tiene por qué abarcar el uso de herramientas complejas, como las empleadas para la generación de información y el tratamiento de los datos, que se han utilizado en este TFM. Para facilitar el acceso y la lectura de la información se plantea el uso y puesta en funcionamiento de aplicaciones web map, que permiten la visualización y consulta de los datos de forma dinámica mediante una interfaz sencilla y funcional.

2. Área de estudio

Como ya se ha indicado en la introducción de este TFM, se analizan los incendios más relevantes del verano de 2013 en Galicia, ya sea por su extensión o por el ámbito afectado y las características del mismo.

Los incendios analizados serán los de Navia, Oia y O Pindo. Cada uno de ellos presenta una serie de particularidades que los hace singulares respecto a la multitud de incendios que se produjeron en Galicia el año 2013.



Figura 1: Localización de los incendios analizados.

2.1. Incendio de Navia.

El incendio de Navia se localiza en el ámbito montañoso del oriente de la provincia de Lugo, en Os Ancares.

La particularidad del incendio se encuentra en el ámbito en el que se produce. Se trata de un sector de montaña con marcados contrastes topográficos entre los valles (266 m Río Navia) y los sectores de cumbre (967 m en la zona de mayor altitud del ámbito)¹. Además el incendio afectó a espacios recogidos bajo diversas figuras de protección del medio natural, como LIC, ZEPVN y Reserva de la Biosfera.

Las pendientes medias se sitúan en un 47 %, lo que indica la rugosidad del relieve (Figura 2).



Figura 2: Topografía del ámbito del incendio de Navia.

La estructura litológica (Figura 59) de este sector de Galicia se caracteriza por tratarse de materiales metamórficos mayoritariamente, si bien también se pueden encontrar materiales calcáreos. En el ámbito de Navia, los materiales son metamórficos con una clara estructura laminar, asociado a material de pizarras negras, de la unidad de Berducedo (IGME).

Las coberturas presentes previas al incendio (IV IFN) muestran un mosaico de estructuras vegetales diversas. En el sector central se localizaba un bosque de plantación de pino silvestre. Alrededor de éste, se desarrollaba de forma natural una franja de matorral formada, según indican los restos, por retama (*Cytisus scoparius*) y tojo (*Ulex europaeus*) como especies más representativas (Figura 58).

En las zonas más húmedas (vaguadas y al norte del ámbito) se desarrollaban formaciones de frondosas (no identificadas).

¹ Ver escenario 3D web: <http://webmapmobileedgm.bl.ee/vrml/navia/navia.wrl>

Este sector de la montaña oriental de Lugo ha sufrido en el período 1991-2011 un total de 228 incendios (partes de incendio de la Consellería de Medio Rural). Concretamente en el año 2003 se produjeron diversos incendios en el ámbito de este estudio. En el 2005 y 2010 se declararon puntos de ignición en las proximidades del perímetro del de 2013. Se trata, por lo tanto, de un sector en el que, de forma recurrente, se producen incendios.

Un análisis de las características climáticas sin duda es relevante para entender el desarrollo y la severidad del incendio, pero en este TFM sólo se realizará una breve reseña de las características climáticas previas para poner en contexto la situación previa al episodio (Figura 3).

Las condiciones térmicas de los días previos al incendio registraron valores por debajo de los 30 °C con una tendencia hacia el incremento de los valores en los 7 días previos. Los datos de humedad, eran elevados, por encima del 70 % en la práctica totalidad de la semana previa. El dato de velocidad de viento, muestra valores por encima de los 30 km/h antes y durante el episodio. La extinción parece coincidir con la llegada de una perturbación que propició un cambio de las condiciones atmosféricas, acompañado de precipitación (11.9 l/m²).

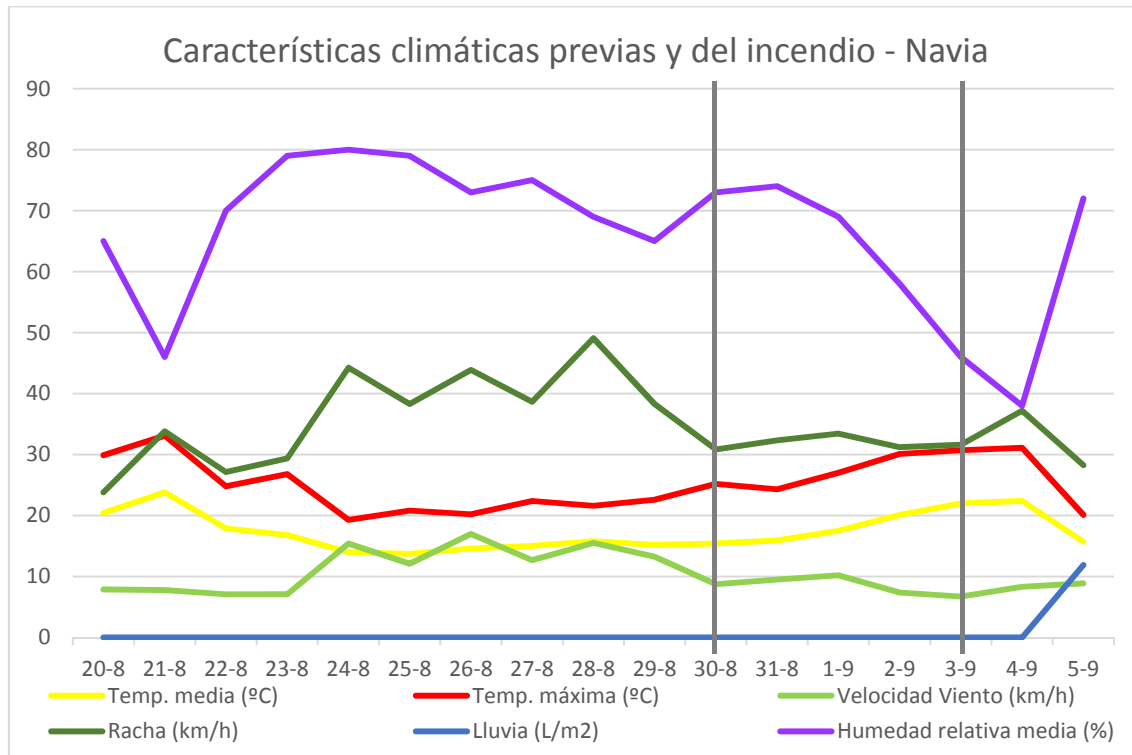


Figura 3: Parámetros climáticos previos a la fecha del incendio.

Otro dato que refleja las características climáticas de la estación es el índice de precipitación y evapotranspiración normalizado (SPEI). Este índice considera tanto la precipitación como la evapotranspiración potencial. Además de la ausencia de precipitación, este índice incluye el dato de temperatura que permite discriminar mejor un período de sequía.

El dato referente a la cuadrícula en la que se encuentra el ámbito muestra los valores indicados en la Figura 4. En la cuadrícula en la que se localiza Navia, el valor de sequía en base al índice SPEI, indica un agravamiento del estío, con un mínimo en agosto, mes en el que se inicia el incendio.

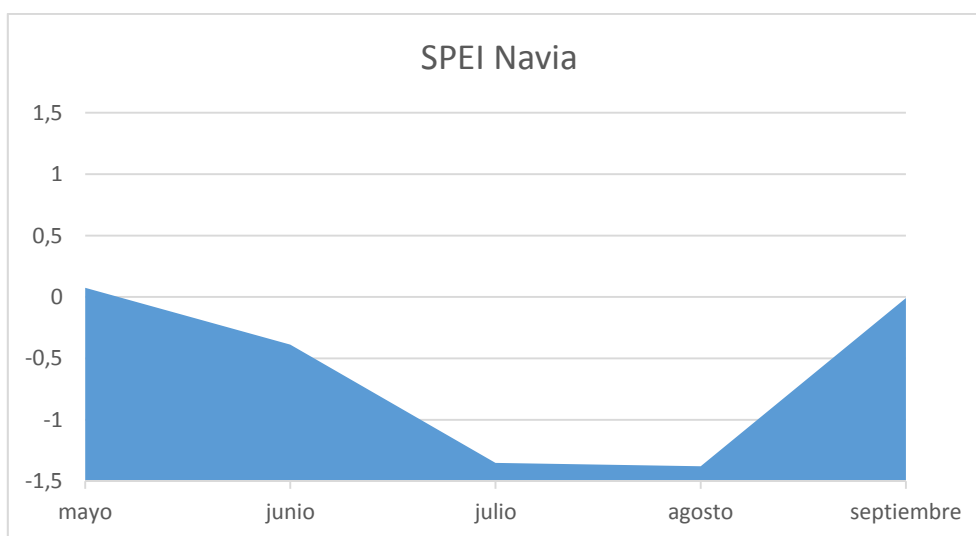


Figura 4: Distribución del valor de SPEI en el periodo previo al incendio.

La superficie afectada por el incendio² fue de 270 ha, lo que no lo califica como Gran Incendio.

Debido a la topografía y a que se trata de un espacio protegido, resulta de interés realizar un seguimiento de los efectos producidos por el incendio y determinar el tiempo necesario para que dicho espacio recupere las condiciones pre-incendio.

² Diario El Progreso, 1 sep. 2013 (EFE)

2.2. Incendio de Oia.

El incendio de Oia se localiza en la sierra litoral del sur de la Provincia de Pontevedra. Se trata de un sector de marcados contrastes topográficos, similares al espacio de Navia³. Lo rangos de altitudes en los que se encuentra la superficie afectada van de los 21 m a los 513 m. La pendiente media es de 28.55 %, lo que indica lo escarpado del terreno (Figura 5).



Figura 5: Topografía del ámbito del incendio de Oia.

La estructura litológica (Figura 60) de este sector de Galicia se desarrolla sobre contactos entre materiales graníticos en la zona occidental y materiales metamórficos en la oriental. En el sector central y asociados al curso del Río Carballo (que atraviesa de norte a sur la zona incendiada), se encuentran materiales aluviales y coluviales (IGME).

Las coberturas presentes previas al incendio (IV IFN) muestran un mosaico de formaciones vegetales diversas. La distribución de las formaciones no atiende a una ordenación sino a cuestiones de ocupación y disponibilidad de suelos para el desarrollo de actividades humanas.

En los fondos de valle se asientan las coberturas de tipo agrícola (espacio central del ámbito), en las márgenes se localizan indistintamente coberturas de arbolado y de matorral.

Las formaciones forestales arboladas se componen en el caso de las plantaciones de plantaciones monoespecíficas de *Eucalyptus globulus*, de *Pinus sylvestris*, de *Pinus pinaster* y de diversas especies de *Quercus*. En este ámbito la presencia de teselas mixtas es habitual, como lo atestigua el IV IFN, que indica la existencia de diversas teselas con especies de producción en mezcla, o frondosas alóctonas con autóctonas

³ Ver escenario 3D web: <http://webmapmobileedgm.bl.ee/vrml/oia/oia.wrl>

(habitualmente *Quercus* con *Eucalyptus*) y de coníferas con frondosas (*P. pinaster* y *Quercus*).

Esta variedad de formaciones y de mezclas en el monte es un indicativo de la falta de ordenación en el espacio forestal, así como un indicativo de la ausencia de gestión (Figura 61).

Este sector del sur de la provincia de Pontevedra, ha sufrido en el período 1991-2011 un total de 489 incendios (partes de incendio de la Consellería de Medio Rural). Concretamente en los años 1995, 1998, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 se produjeron diversos incendios en el ámbito de este estudio, la mayoría por causas desconocidas o intencionadas. En la mayoría de casos se trató de pequeños incendios, de extensión inferior a la hectárea, salvo el caso del año 1995 donde la extensión ardiada fue de 450 ha de superficie arbolada y de 147 ha de superficie arbustiva.

Un análisis de las características climáticas del ámbito en las jornadas previas al incendio permite entender el desarrollo y la severidad del incendio (Figura 6).

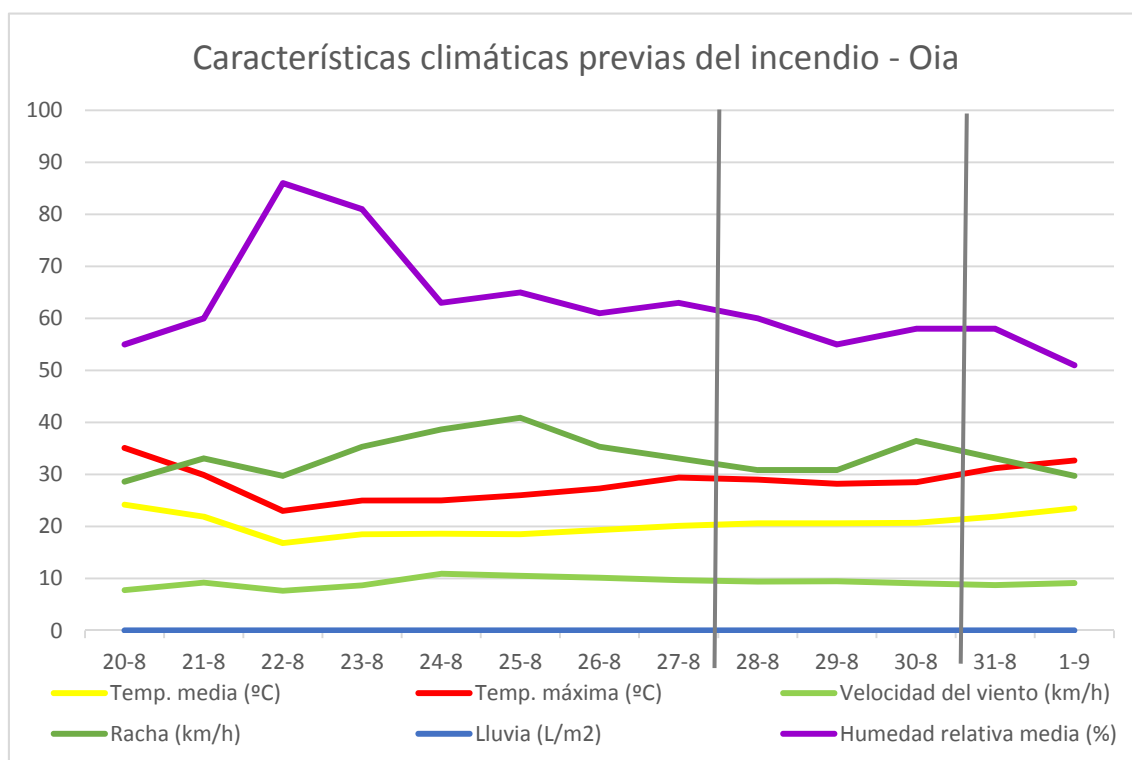


Figura 6: Parámetros climáticos previos a la fecha del incendio.

En las proximidades del ámbito se localiza la estación automática de Monte Aloia, perteneciente a la red de estaciones de Meteogalicia. Los datos extraídos para las

jornadas previas y las del incendio muestran en el dato de temperaturas medias, valores en torno a los 20 ° C.

Los valores de temperatura máxima fueron incrementando a medida que se aproximaba el día del inicio del incendio, hacia el valor de 30 ° C, desarrollándose el episodio en torno a este valor de temperatura máxima. Los valores de humedad, disminuyeron de forma continua, si bien su valor nunca bajó del 50 %. El dato de velocidad de viento, muestra valores de racha de viento por encima de los 30 km/h antes y durante el episodio.

El análisis del índice SPEI_01, muestra la existencia de un período seco coincidente con todo el verano y que sólo se rompe en el mes de septiembre (Figura 7). Dado que el incendio se produce en pleno estío (final de agosto y principios de septiembre), coincide con la fecha del incendio con el mínimo del valor de SPEI.

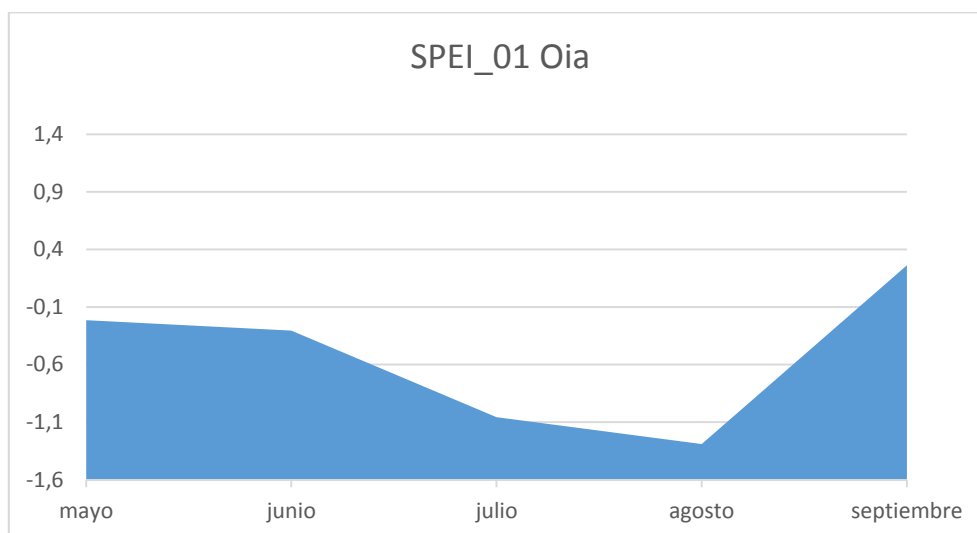


Figura 7: Distribución del valor de SPEI en el periodo previo al incendio.

En lo que respecta a la superficie afectada por el incendio, el dato ofrecido por los medios de comunicación fue de 1850 ha (El Economista⁴ - EFE), lo que lo califica como Gran Incendio.

⁴ <http://ecodiario.eleconomista.es/interstitial/volver/aciertoj/desastres-naturales/noticias/5099731/08/13/El-incendio-de-Oia-Pontevedra-quemo-1850-hectareas-segun-nuevos-datos-de-la-Xunta.html#.Kku8WgolEVGQsgO>

2.3. Incendio de O Pindo.

El incendio del Monte Pindo, se localiza en el sector costero entre Muros y Fisterra (oeste de la provincia de A Coruña).

El Monte Pindo es un macizo granítico de 627 m de altura. La cima de este monte, A Moa, es un dorso de ballena (estructura granítica caracterizada por una planicie lisa en granito). La particularidad de este ámbito radica en las estructuras geológicas que se encuentran en él, así como las caprichosas formas que genera la erosión (Figura 62).

En este espacio se localiza el único río de Europa (Xallas) que desemboca en una cascada sobre el océano (Figura 8).



Figura 8: Desembocadura del Xallas. Fervenza do Xallas.

Además de tratarse de un espacio singular desde el punto de vista geológico, en este monte es posible encontrar especies singulares como el *Quercus lusitanica*. Esta especie de *Quercus* sólo está presente en Galicia en este sector, por lo que la protección del mismo es de gran importancia.

La particularidad del incendio radica en lo simbólico del lugar que tiene para la cultura gallega, además de ser el incendio de más superficie afectada en el año 2013.

Debido a las singularidades, tanto geológicas como naturales, este espacio de la costa de Galicia está auspiciado por diversas figuras de protección del medio natural, como ZEPVN y LIC.

Las pendientes medias para el ámbito son del 32 %. Se pueden diferenciar de forma clara dos sectores. El sector costero más abrupto, y el oriental, menos escarpado, coincidente con la superficie de erosión de la Comarca do Xallas⁵.

El sector costero es donde se localizan los mayores desarrollos verticales, sobre todo en las inmediaciones del río Xallas (al NW del ámbito), donde la erosión fluvial, ha escavado un valle muy encajado (Figura 9) debido a la dureza de los materiales.



Figura 9: Panorámica del Monte Pindo.

La estructura litológica de este sector de Galicia se caracteriza por tratarse de materiales graníticos en su totalidad. Los matices que se pueden encontrar radican en la composición mineralógica del granito y en el grosor del grano (fino, medio o grueso). 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).

Las coberturas presentes previas al incendio (IV IFN) son composiciones en su mayoría de matorral-pastizal (Figura 44). En los espacios periféricos se localizan formaciones de matorral y también de bosque (principalmente de pino y eucalipto). En los espacios de menor pendiente (los más próximos a la costa) se desarrollan actividades agrícolas o espacios de pastos.

En lo que respecta a las formaciones arbóreas y arbustivas presentes en el Monte Pindo, se puede hablar de la mezcla de especies y de formaciones. La información disponible en el IV IFN para este espacio indica la presencia de especies de frondosas marcescentes, coníferas, alóctonas y de masas mixtas (coníferas y frondosas, frondosas alóctonas con autóctonas,...) (Figura 63).

Esta mezcla de formaciones es una constante en el litoral Atlántico de Galicia.

Este sector de la costa de la Provincia de A Coruña, ha sufrido en el período 1991-2011 un total de 482 incendios (partes de incendio de la Consellería de Medio Rural).

⁵ Ver escenario 3D web: <http://webmapmobileedgm.bl.ee/vrml/pindo/pindo.wrl>

En concreto dentro del ámbito del incendio producido en el 2013, en fechas previas se produjeron otros 31 incendios (en los años 1999 – 2007 y 2009 – 2010). De los 31 incendios ocurridos, al menos en una ocasión la superficie afectada se catalogó como Gran Incendio (1200 ha).

Al igual que en las descripciones de los ámbitos de Navia y Oia, se realiza una breve descripción de una serie de parámetros meteorológicos para determinar la influencia o no de las características atmosféricas en la creación de las condiciones apropiadas para un incendio de tal dimensión. Los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica de Lira (distante del perímetro del incendio 5.3 km), perteneciente a la red de estaciones de Meteogalicia (Figura 10).

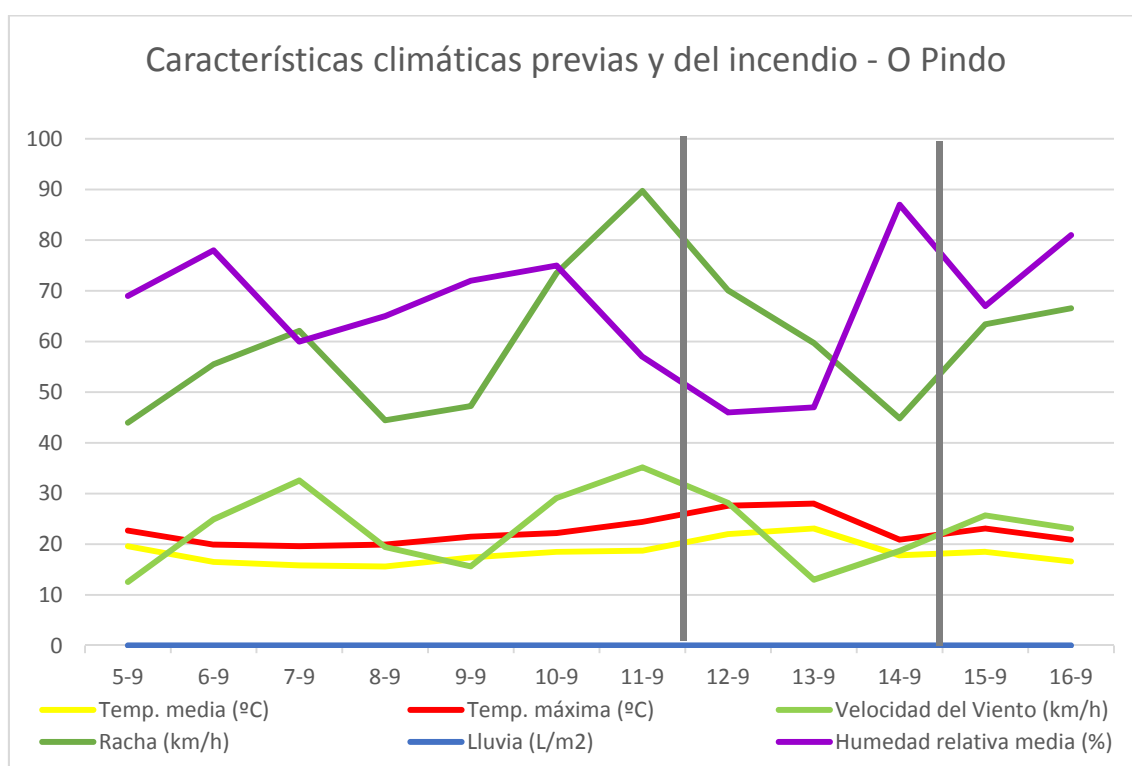


Figura 10: Parámetros climáticos previos a la fecha del incendio.

Las condiciones térmicas de los días previos al incendio registran valores de temperatura media y máxima por debajo en un rango de 18-28 °C con una tendencia hacia el incremento de los valores a medida que se aproxima la fecha del incendio. Los datos de humedad fueron oscilantes, pero con una tendencia al descenso, hasta alcanzar durante el episodio, valores por debajo del 50 % al inicio del episodio y por encima del 80 % al final del mismo.

Por lo que respecta a la velocidad de viento, hay variaciones en la intensidad, produciéndose en los días previos situaciones de fuerte viento con rachas que llegaron

a los 90 km/h. Durante el episodio la intensidad disminuyó, aunque las rachas de viento siguieron con valores elevados.

Otro dato que refleja las características climáticas previas al episodio es el índice de precipitación y evapotranspiración normalizado (SPEI).

El dato referente a la cuadrícula en la que se encuentra el ámbito (Figura 11) es significativo en cuanto a que son los meses centrales del verano en los que se produce un episodio de sequía. Dado que los datos de la estación meteorológica indican que no se produjo ningún episodio de lluvia en los días previos, es factible suponer que el período seco tuvo su prolongación al menos hasta el episodio del incendio.

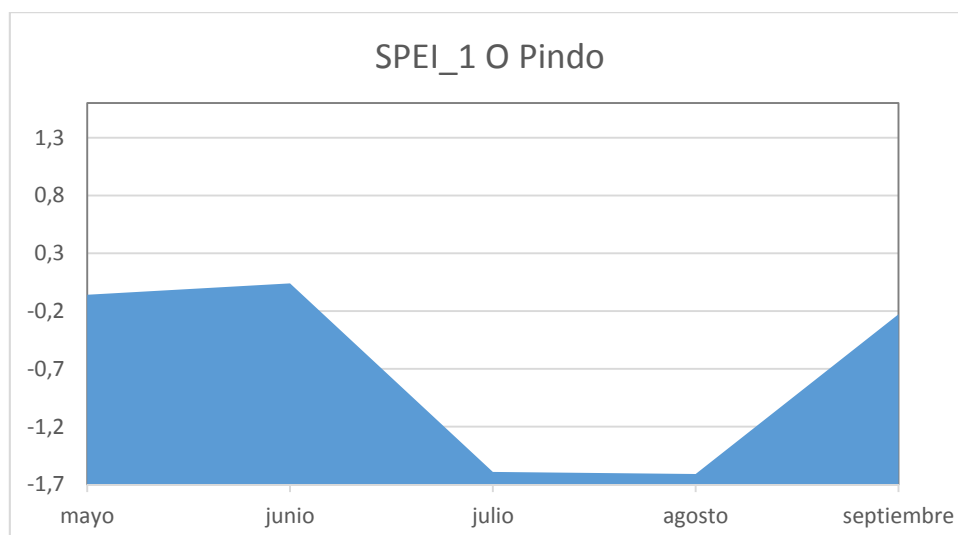


Figura 11: Distribución del valor de SPEI en el periodo previo al incendio.

La superficie afectada por este incendio fue el mayor del año en Galicia con 2166.48 ha (MAGRAMA⁶) y el segundo en extensión de España para el 2013.

⁶ http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/Avance_def_tcm7-291846.pdf (pp. 25)

3. Material y métodos.

En el siguiente apartado se realizará una descripción pormenorizada de los materiales utilizados y de las técnicas desarrolladas para su manipulación con el objetivo de generar o corregir información que será analizada posteriormente en este TFM.

3.1. Fuentes de Información ráster.

3.1.1. Landsat 8 OLI

La primera de las fuentes de información empleadas para la generación de la clasificación de la severidad en los incendios son las escenas de Landsat 8 OLI.

El sensor en cuestión presenta una renovación tecnológica respecto a sus predecesores.

3.1.1.1. Características de LANDSAT 8 OLI

Las características del sensor OLI del satélite Landsat 8 son diferentes a los del sensor ETM+ o al TM de la serie 7 y 5 respectivamente (Tabla 1). Las novedades radican en el número de bandas espectrales, así como en la resolución radiométrica y espectral.

El sensor OLI agrega dos nuevas bandas respecto a Landsat 7. Incorpora una banda en el azul visible (banda 1), que se denomina Coastal y que está diseñada para investigación en temas hídricos y costeros. La otra banda que incorpora se encuentra en el infrarrojo (banda 9) y está enfocada a la detección de nubes. Se denomina Cirrus. También se incorpora una banda de calidad, que permite identificar elementos como nubes, agua y nieve.

El satélite Landsat 8 incorpora otro sensor (TIRS), enfocado a la radiación térmica. Dado que el presente trabajo de fin de máster, no requiere de la obtención de información de este sensor, no es necesario realizar una descripción pormenorizada.

Por lo que respecta a la resolución espectral y ubicación de las bandas en el espectro electromagnético, el nuevo sensor ha realizado modificaciones respecto a los sensores previos. En todos los casos la resolución espectral es distinta, la disposición de las bandas y su ancho se han modificado.

Tabla 1: Relación entre bandas de los sensores OLI y ETM+ de Landsat 8 y 7.

Landsat 8 OLI			Landsat 7 ETM+		
Nº banda	μm	Resolución	Nº banda	μm	Resolución
1	0.433–0.453	30 m			
2	0.450–0.515	30 m	1	0.45-0.52	30 m
3	0.525–0.600	30 m	2	0.52-0.60	30 m
4	0.630–0.680	30 m	3	0.63-0.69	30 m
5	0.845–0.885	30 m	4	0.77-0.90	30 m
6	1.560–1.660	30 m	5	1.55-1.75	30 m
7	2.100–2.300	30 m	7	2.09-2.35	30 m
8	0.500–0.680	15 m	8	0.52-0.90	15 m
9	1.360–1.390	30 m			

Con el nuevo sensor OLI se ha realizado un ajuste en el ancho de cada banda para evitar los problemas derivados de la interferencia atmosférica en la energía emitida o reflejada por los objetos de la superficie de la tierra o por la propia atmósfera.

La nueva distribución de bandas y su resolución espectral están pensadas para operar en los sectores del espectro electromagnético con menor absorción de energía por parte de la atmósfera. En la Figura 12, se puede comprobar cómo la banda 5 de OLI ha sido redefinida para centrarse en la observación de un sector del espectro electromagnético, en el que la influencia de la atmósfera es sensiblemente menor respecto a la banda homóloga en ETM+. Esto mismo pasa con la banda 6 (SWIR) que ha visto reducido el espectro de observación y por lo tanto minimiza la influencia atmosférica, que en el caso de la banda 5 ETM+ presentaba una serie de picos de absorción de la atmósfera.

La otra gran novedad en el sensor OLI respecto a la trayectoria del programa Landsat, es la resolución radiométrica. En este sentido el sensor OLI tiene una arquitectura diferente a los sensores previos, si bien se trata de un sistema de empuje (push broom) que dispone algo más de 7000 detectores para cada banda, que se encuentran alineados en su plano focal en su respectivo ancho de banda. El sistema de empuje mejora el funcionamiento del sistema al tener menos partes móviles.

La radiometría de OLI se basa en una sensibilidad de medición de la variación de la energía mucho mayor que su predecesor. Se pasa de una resolución radiométrica de 8bits (0-255) a una de 16bit⁷⁸ (0-65535).

⁷ USGS. <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>

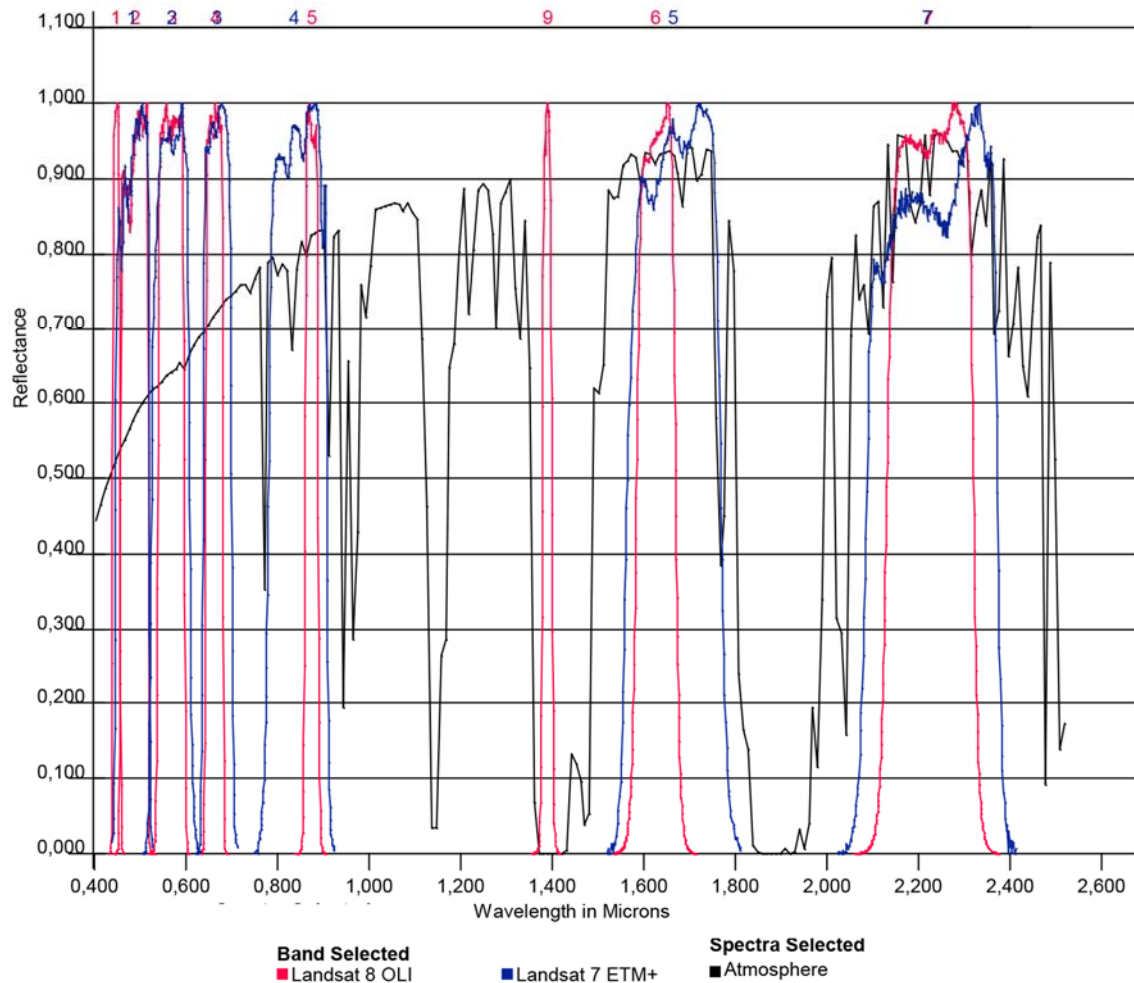


Figura 12: Distribución de las bandas de OLI en relación con la absorción atmosférica. Fuente: USGS Spectral Characteristics Viewer.

Al margen de este debate, con esta nueva resolución, es posible afinar más en las mediciones energéticas.

Esta nueva profundidad del píxel junto con una redefinición de las ventanas espectrales de observación y las nuevas bandas, generan un producto con una mayor precisión y sensibilidad respecto a los sensores previos.

⁸ Respecto al dato de la resolución radiométrica, parece no haber un acuerdo, ya que en Vanhellemont 2014 se indica que la radiometría es de 12bits. “-mainly because of longer integration times on the push broom scanner – and a better quantization (12 instead of 8 bits for radiometric digitization). Pp107.”

3.1.1.2. Productos ofrecidos por el USGS

Al igual que en los satélites previos, el servicio geológico de los Estados Unidos facilita al usuario las escenas con tres tipos de tratamiento distinto⁹.

- **Nivel 1T:** Genera un producto corregido geoméricamente mediante el uso de puntos de control en tierra y el empleo de un MDE (ortorrectificado). La calidad de la corrección está determinada por el conjunto de los puntos de control (su exactitud) y los MDE utilizados.
- **Nivel 1GT:** En el caso de este producto se facilita la escena corregida geoméricamente mediante el uso de un MDE.
- **Nivel 1G:** Este producto corrige geoméricamente las imágenes mediante los datos facilitados por el sensor y naves espaciales. La precisión de la corrección debe ser al menos de 250m para las zonas de poco relieve o al nivel del mar.

En este estudio el nivel de corrección al que se accedió fue el 1T en todos los casos.

3.1.1.3. Escenas y fechas descargadas.

Las escenas empleadas para el análisis de severidad así como para la generación de Índices de vegetación, fueron descargadas vía web de la página del USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

El procedimiento seguido para la realización de las descargas, se basó en la definición de los criterios espaciales (coordenadas máximas y mínimas de cada uno de los ámbitos), de las fechas inmediatamente anterior e inmediatamente posterior al episodio de incendio.

Debido a la recurrente presencia de nubes en el noroeste de la Península Ibérica, la posibilidad de elección de imágenes se vio restringida a periodos limitados del año, exclusivamente en el verano.

Las fechas seleccionadas y las escenas se especifican en la Tabla 2.

⁹ http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php

Tabla 2: Relación de fechas seleccionadas para la descarga de imágenes Landsat 8 OLI para cada incendio.

	Escena	Imagen pre	Imagen post	Recuperación
Navia	204-30	22-08-2013	07-09-2013	09-07-2014
Oia	204-31	22-08-2013	07-09-2013	09-07-2014
O Pindo	205-30	26-06-2013	14-09-2013	14-06-2014

En el visualizador web¹⁰ creado para la consulta on-line de la información generada, es posible comprobar la extensión de las escenas descargadas y la fecha de las mismas.

3.1.1.4. Corrección radiométrica.

Debido a las modificaciones en la radiometría del nuevo sensor, también se redefine el procedimiento a seguir para realizar la corrección de las imágenes y convertir los niveles digitales (ND) a radiancia (L) o reflectividad (ρ).

En el caso de la corrección de imágenes de Landsat 7, el procedimiento requería de la conversión de ND a L y posteriormente a ρ .

$$L\lambda = G * ND + B$$

Donde:

$L\lambda$ es la Radiancia espectral

G es el factor de ganancia

B es la constante

Una vez obtenida la radiancia (L), se procedía a la obtención de la reflectividad a techo de atmósfera (ρ_{TOA})

$$\rho_{TOA} = \frac{L\lambda * d^2 * \pi}{E_{0\lambda} * \cos(\theta_{sol})}$$

Donde:

ρ_{TOA} es la reflectividad a techo de atmósfera

$L\lambda$ es la Radiancia espectral

¹⁰<http://webmapmobileedgm.bl.ee/swipe/>

d^2 es la distancia tierra sol al cuadrado

$E_{0\lambda}$ es la irradiancia solar a techo de atmósfera para cada banda

$\cos(\theta_{sol})$ es el coseno del ángulo de incidencia solar en la fecha de captura de la escena.

Con el sensor OLI el paso de ND a ρ puede realizarse de forma directa o seguir el procedimiento clásico. En el caso del paso directo, sólo hay que operar con la información almacenada en el archivo de metadatos integrado en el archivo comprimido de la escena, donde se incluyen los datos de factor multiplicativo y de constante para cada una de las bandas.

A continuación se comentan las operaciones que hay que realizar para el paso de ND a L, de ND a ρ y de L a ρ .

3.1.1.4.1. Radiancia

El método para el paso de ND a radiancia es el mismo que en las versiones previas de Landsat. La fórmula empleada se basa en un factor multiplicativo y uno aditivo sobre el ND (Figura 67).

$$L\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L$$

Donde:

$L\lambda$ es la Radiancia espectral

M_L es el factor de ganancia

A_L es la constante

3.1.1.4.2. Reflectividad.

Para realizar el paso a reflectividad (ρ), existe una doble posibilidad. Por un lado seguir las directrices marcadas por el USGS o también desarrollar la fórmula aplicada a Landsat 7 (y previos) donde se emplea la radiancia (L) para derivar la reflectividad (ρ).

En el primero de los casos la fórmula propuesta por el USGS es:

$$\rho\lambda' = M\rho * Q_{Cal} + A\rho$$

Donde

$\rho\lambda'$ es la reflectividad planetaria sin corrección TOA

$M\rho$ es el factor multiplicativo de escalado específico para cada banda

$QCal$ es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN).

$A\rho$ es el factor aditivo de escalado específico por banda

El ajuste de los detectores y su diseño se ha hecho para que $M\rho$ sea el mismo para todas las bandas (Figura 13), e igual sucede con $A\rho$.

REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.100000
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.100000
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.100000
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.100000
REFLECTANCE_MULT_BAND_6 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.100000
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.100000
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05	REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000

Figura 13: Detalle de los valores $M\rho$ y $A\rho$ para transformación a reflectividad.

3.1.1.4.3. Reflectividad TOA

El siguiente paso propuesto por el USGS en la corrección de las imágenes Landsat 8 para OLI, es el de la corrección de reflectividad a techo de atmosfera (TOA).

La fórmula propuesta en la documentación ofrecida por el USGS¹¹, es la siguiente:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{sz})}$$

Donde:

$\rho\lambda$ es la reflectividad TOA

$\rho\lambda'$ es la reflectividad planetaria sin corrección TOA

$\cos(\theta_{sz})$ es el coseno del ángulo cenital solar (Figura 68).

¹¹ http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php

También existe la posibilidad de utilizar el método aplicado para TM y ETM+ (Vanhellemont et al 2014):

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi \cdot L_{TOA} \cdot d^2}{F\theta \cdot \text{Cos}(\theta_{sz})}$$

Donde la reflectividad es el resultado de la división entre el producto de:

π 3.14159

L_{TOA} es la radiancia a techo de atmósfera, derivada de la conversión de ND a L, aplicando la corrección del coseno del ángulo cenital solar $\text{Cos}(\theta_{sz})$ (Figura 69).

d es la distancia existente entre la tierra y el sol, que es variable en función del día del año, derivado de la órbita elíptica que describe la tierra alrededor del sol.

En el denominador se emplean dos parámetros, la tabla de irradiancia solar exoatmosférica ($F0$) y el coseno del ángulo cenital solar ($\text{Cos}(\theta_{sz})$).

Los valores de $F0$ no son valores oficiales facilitados por el USGS o desde la página web de Landsat 8, sino que son productos de cálculos ofrecidos en diversas investigaciones en base a cálculos realizados. De hecho es posible encontrar diversos valores para $F0$ en función de la investigación (Vanhellemont, 2014 y GIS Ag MAPS¹²) (Tabla 3).

Tabla 3: Valores de irradiancia solar exoatmosférica

	Vanhellemont	GIS Ag MAPS
B1	1895.6	
B2	2004.6	2067
B3	1820.7	1893
B4	1549.4	1603
B5	951.2	972.6
B6	247.6	245.0
B7	85.5	79.72

En este TFM se ha optado por emplear los valores de Vanhellemont (2014), dado que ofrece el valor para la B1.

¹² <http://www.gisagmaps.com>

Tampoco existen valores oficiales (USGS) de transmisividad del flujo reflejado para cada una de las bandas. Estos parámetros eran necesarios para llegar a reflectividad aparente superficial, para los sensores TM y ETM+.

A continuación se exponen dos procedimientos aplicables para la corrección de las imágenes Landsat 8 OLI a reflectividad TOA (ρ_{TOA}).

3.1.1.4.3.1. ERDAS

En el caso de ERDAS, se desarrolló un modelo (Figura 14) que introdujo las operaciones descritas anteriormente, para realizar el paso de ND a ρ_{TOA} .

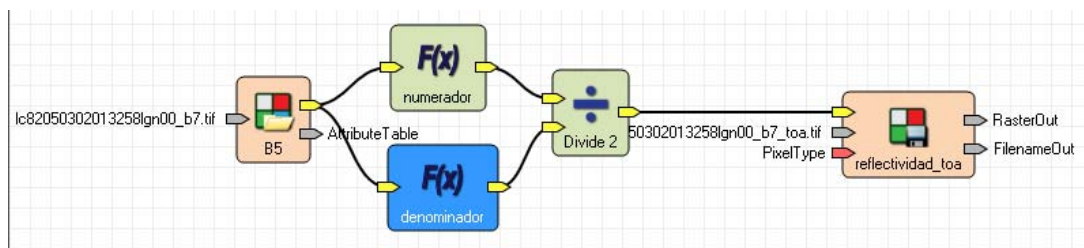


Figura 14: Modelo de transformación de ND a ρ_{TOA}

La clave del modelo se encuentra en el denominador de la operación, donde la distribución de los paréntesis fue clave para la obtención de resultados coherentes.

3.1.1.4.3.2. QGIS – Geosud TOA reflectance

El otro programa empleado para la corrección radiométrica fue QGIS, un software libre de tipo SIG de escritorio, con una amplia funcionalidad. Esta aplicación cuenta con un repositorio de complementos que pueden ser integrados sobre la instalación base. Para tratamiento de imágenes de satélite Landsat existen al menos dos complementos que permiten realizar correcciones radiométricas, uno de ellos con Landsat 7 ETM+ y el otro con Landsat 8 OLI. El utilizado en esta corrección fue el de Landsat 8, denominado Geosud TOA reflectance.

Este complemento está desarrollado en lenguaje Python y se compone de tres scripts encargados de la apertura de un formulario para ingresar diversos parámetros (archivos de bandas de la escena, archivo de metadatos, directorio de salida de resultados). El segundo de los scripts se encarga de la lectura de los valores del

archivo de metadatos, y el tercero de ellos se encarga de aplicar la fórmula de la corrección radiométrica de las bandas de la escena (Figura 71 y Figura 72).

La aplicación de ambos procedimientos permite realizar un test de contraste de los datos de reflectividad obtenidos. Ambos procedimientos arrojan resultados idénticos de reflectividad TOA en las tres primeras posiciones decimales, con una variación en el cuarto decimal derivado del procesamiento diferente que se realiza con los decimales de los diversos parámetros con los que se opera.

El archivo de pirámides y el auxiliar generado por Erdas, introducen un error en la lectura de los valores de reflectividad. Dichos archivos han de ser eliminados para obtener una lectura correcta. En pruebas realizadas con este sistema en QGIS los valores obtenidos, son similares. En la Figura 73 se muestra el cuadro de diálogo de QGIS donde se muestran los valores obtenidos para el mismo píxel de la banda 5, corregida con el módulo de Erdas y con el complemento Geosud TOA de QGIS.

Dado que la diferencia se establece a partir del cuarto decimal, estamos hablando de 1/1000 de diferencia entre los valores de ambos sistemas, por lo que se concluye que los resultados son válidos empleando ambos métodos.

Como ya se describió en apartados anteriores, es posible aplicar el método de transformación a ρ_{TOA} mediante el uso de la L_{TOA} .

Los valores de reflectividad obtenidos según este método presentan diferencias respecto al dato obtenido mediante el uso de Geosud TOA. De hecho según se puede ver en la Figura 15 y Figura 16 sólo son coincidentes los valores para las bandas 2 y 4. La mayor diferencia se da en la B3 (verde) lo que ofrecería una lectura errónea sobre el píxel, al enmascarar el estado fenológico de la formación vegetal.

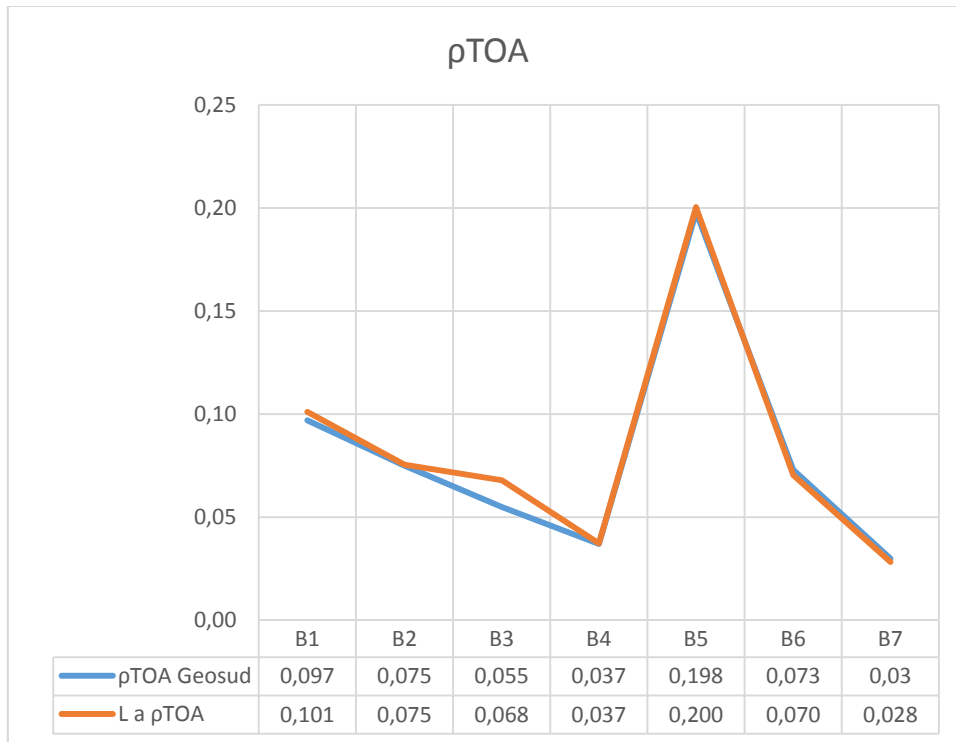


Figura 15: Firma espectral de un píxel pre incendio de plantación de *Pinus sylvestris* (IV IFN)



Figura 16: Detalle de la cobertura del píxel analizado (Ortofoto PNOA 2010).

El método que se empleará en el proceso de corrección será el de Vanhellemont (2014), debido a que permite un mayor control de los parámetros que operan en la ecuación de la reflectividad, incluyendo los diferentes valores de la radiancia solar exoatmosférica.

3.1.1.5. La influencia de la atmósfera

La energía que es reflejada o emitida desde los objetos de la superficie de la tierra ha de atravesar la capa gaseosa que envuelve al planeta. En su recorrido hasta ser captada por el sensor satelital sufre una serie de interacciones con la atmósfera. Se habla de que la atmósfera absorbe, dispersa y emite radiación, lo que dificulta la extracción de parámetros biofísicos, como es el objetivo de este TFM.

La absorción de energía por parte de la atmósfera se produce en determinados sectores del espectro electromagnético. La interacción que produce la atmósfera con la absorción de energía se basa en el tipo de moléculas presentes en la atmósfera y en el tamaño. Cada tipo de molécula y, por lo tanto su tamaño, es responsable de la absorción de un determinado tipo de radiación.

En el diseño de OLI, en lo que a la resolución espectral se refiere, se ha realizado un ajuste de las bandas de observación para reducir al máximo la posible interferencia de la atmósfera. Lo que se busca es la mayor transmisividad posible de la atmósfera redefiniendo el ancho de cada banda.

Dado que el objeto de observación por parte de Landsat 8 es la superficie terrestre y no la atmósfera, la distribución de las bandas debe realizarse conforme a los espacios de mayor transmisividad de la atmósfera y en aquellos sectores del espectro donde exista un interés.

El otro tipo de interacción que se produce con la atmósfera es la emisión. Como cualquier cuerpo con temperatura superior a 0 ° (absolutos), emite energía y por lo tanto esta, puede ser captada. El tipo de sensor que la capte dependerá de la cantidad de energía emitida (de la temperatura del objeto)

La última de las interacciones de la atmósfera con la energía, es la dispersión. Está causada por la interacción entre la energía y las partículas en suspensión presentes en la atmósfera. Dado que se produce una reflexión energética, parte de ésta se refleja en dirección al observador y por lo tanto se produce un incremento en la energía (radiancia) procedente del objeto observado.

Los principales agentes de esta dispersión energética son los aerosoles (polvo en suspensión, gases de combustión) y el vapor de agua. Debido a la diversidad de tamaños de los causantes de la dispersión, se producen distintos tipos de dispersión, basados principalmente en el diámetro de las partículas que lo producen. Se habla de dispersión de Rayleigh, causada por partículas de diámetro inferior a la longitud de

onda. (λ) La dispersión de Mie se produce cuando el diámetro de la partícula es igual al de la longitud de onda (λ). Por último, la dispersión no selectiva, que afecta por igual a todas las longitudes de onda (λ).

3.1.1.6. Corrección atmosférica

Las tareas descritas hasta ahora se refieren a la corrección radiométrica de la imagen sin considerar la influencia que la atmósfera ejerce sobre la energía que reflejan los objetos. Debido a esto, los valores de reflectividad obtenidos no se ajustan a la realidad, dado que la presencia de la atmósfera “causa una modificación de la radiancia original proveniente de la superficie terrestre” (Chuvienco, 2010). La interacción de la atmósfera con la señal captada por el sensor, se traduce en un incremento de la señal, lo que podría inducir a conclusiones erróneas en el análisis de los datos, como análisis de parámetros biofísicos, estudios multitemporales, etc. Debido a esta interacción se hace necesario la realización de una corrección que anule la adición generada y permita obtener datos comparables con otras imágenes y sensores. En este sentido, existen diversas técnicas de corrección.

Las técnicas más precisas emplean medidas in situ de la columna de la atmósfera, mediante radiosondeos, o midiendo la energía solar incidente, o la reflectividad en la superficie. A partir de la medición in situ es posible corregir la señal captada por el sensor.

Otro sistema de corrección se basa en el empleo de imágenes procedentes de otros sensores que ofrecen información sobre el espesor de la atmósfera. Conocido este parámetro, es posible determinar la influencia de la atmósfera en el valor de radiancia original procedente de la superficie terrestre (Chuvienco 2010).

Otro método de corrección de la influencia de la atmósfera se basa en modelos físicos de transferencia radiativa. Este sistema se caracteriza por modelar una serie de situaciones atmosféricas estándar, es decir se modela la columna atmosférica para un comportamiento tipo, y la imagen se ha de corregir en base al estado que mejor se ajuste a los disponibles en la aplicación. Los modelos más difundidos para este tipo de corrección son Modtran y 6S.

3.1.1.6.1. Corrección atmosférica – Modelos de transferencia radiativa (ATCOR)

En el presente TFM se utiliza la aplicación ATCOR para Erdas que se basa en la inversión de los resultados obtenidos por Modtran. Además es directamente aplicable sobre la imagen y el resultado obtenido es la reflectividad aparente superficial. La versión de ATCOR empleada, fue la 2014, correspondiente con la versión de Erdas.

Esta versión trae incorporado el sensor OLI, si bien los archivos de calibración que se encuentran en la instalación de la aplicación ofrecen unos valores que no se corresponden con los que encontramos en los metadatos de las imágenes OLI (Figura 66).

Los ficheros se estructuran de forma que se indica el número de bandas que compone la imagen, así como los valores de GAIN (valor multiplicativo que se corresponde con la columna c1) y BIAS (valor aditivo que se corresponde con la columna c0). Los valores de Gain y Offset son los referidos a Radiancia (L), y lo que realiza ATCOR es una transformación a reflectividad (ρ).

Un aspecto relevante son las unidades de los parámetros de Gain y Offset. En los manuales es frecuente encontrarse con que la radiancia se expresa en $W/m^2 \text{ sr } \mu\text{m}$, sin embargo ATCOR trabaja en $mW/cm^2 \text{ sr } \mu\text{m}$. Este hecho obliga a modificar el dato de Gain y Offset aplicando un factor de conversión que en las fuentes consultadas¹³ se determina que es 0.1.

Una vez convertidos los valores multiplicativo y aditivo, son los que se deberían integrar en el fichero de calibración de forma que para las imágenes de trabajo, el fichero quedaría como se muestra en la Figura 65.

La aplicación de este procedimiento de fichero de calibración genera unos resultados que no se ajustan a los resultados esperados, donde los valores de reflectividad son incoherentes con la banda a la que pertenecen y donde las firmas espectrales de los objetos comparadas con las obtenidas de bibliotecas espectrales, no se asemejan (Figura 70).

De hecho, durante el proceso de corrección mediante ATCOR, es posible recalibrar el fichero por comparación con una firma espectral de la biblioteca de la que dispone este módulo. Sin embargo, realizar este ajuste genera una corrección errónea y por lo

¹³ <http://www.atcor.de/faqs/index.html>

tanto el resultado no sirve para cualquier análisis posterior. El error se refiere a la agregación de valores multiplicativos y aditivos que no se corresponden con los de los metadatos, por lo que no se está realizando un proceso correcto.

Los valores obtenidos tras la corrección atmosférica sobre la escena 205-30 del 27-06-2013, se mueven en el rango de 0 - 5401, lo que no se ajusta a lo esperado para valores de reflectividad (rango 0 - 1 o 0 - 100 %), por lo que se puede determinar que la forma de operar de ATCOR, todavía no está adaptada a la nueva radiometría del sensor OLI.

Por esto, este sistema de corrección debe desecharse en este estudio y sólo podrá ser aplicado en el momento en el que el desarrollo del software considere la nueva forma de operar del sensor OLI (http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php), donde ya no es necesario la transformación del ND a L para conseguir ρ , o cuando el algoritmo actual considere la nueva radiometría del sensor.

3.1.1.6.2. Corrección atmosférica – Dark Object Subtraction (DOS)

Este método se basa en la substracción del valor del ND del pixel identificado como objeto oscuro. Se entiende por objeto oscuro aquel pixel que, por sus características de alta absortividad, debería presentar una radiancia espectral próxima a 0.

En los histogramas de las bandas de las escenas, como en el caso de la 205-30 (Figura 17), se aprecia la disminución de los efectos de la dispersión atmosférica a medida que incrementa la longitud de onda.

Esta disminución de la dispersión está documentada (Campbel, 1996). En el caso de la dispersión de las longitudes de onda más cortas (Rayleigh), la incidencia de la influencia de la atmósfera es más evidente (histograma de las bandas 1 y 2), que por ejemplo en la banda 3 (Mie) y sobre todo a partir de la banda 5 (dispersión no selectiva).

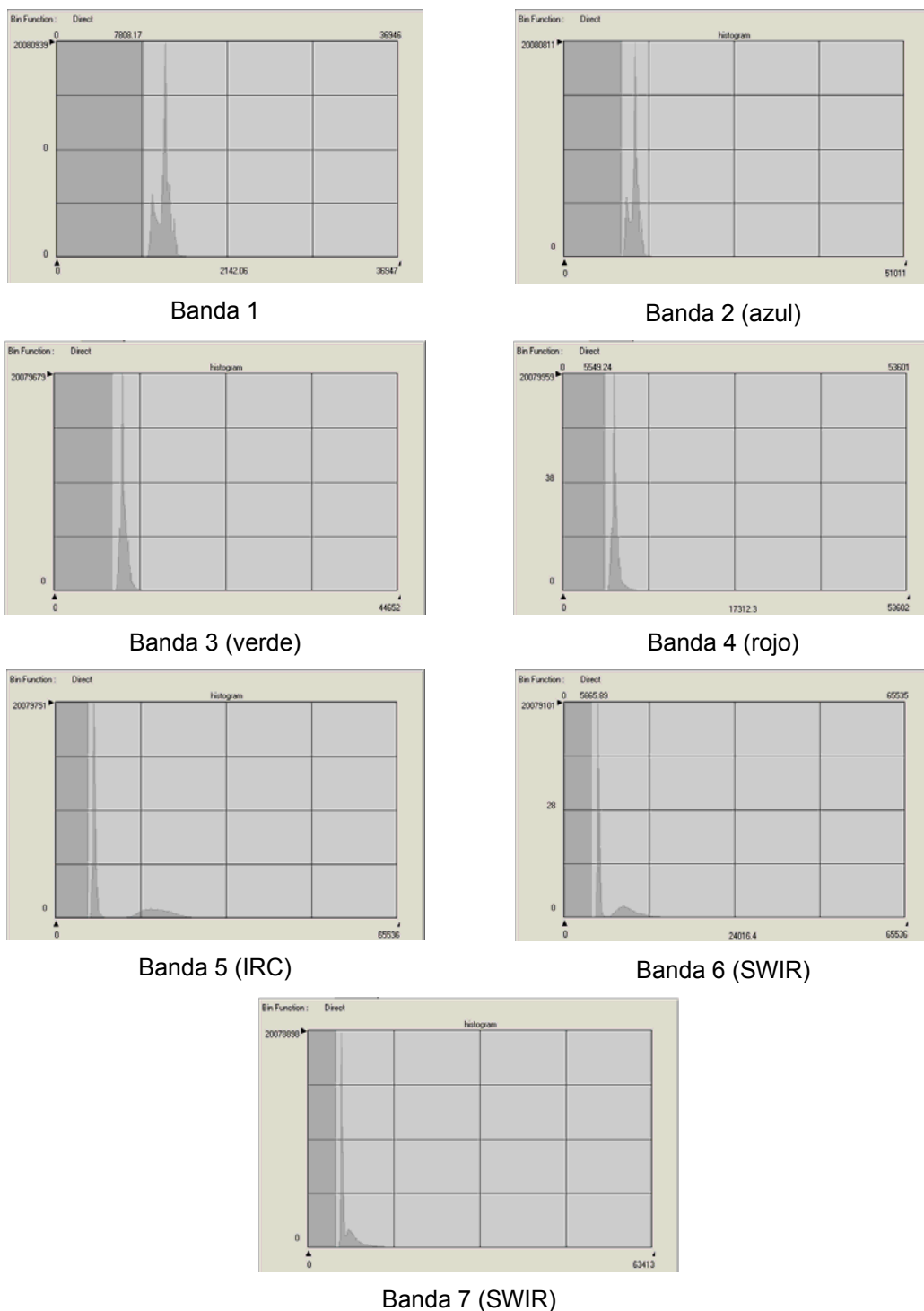


Figura 17: Vista de los histogramas de las bandas de la escena 205-30 pre-incendio

El valor mínimo del histograma es el dato que ha de obtenerse para restarlo al conjunto de la escena y, de ese modo, eliminar el efecto de dispersión atmosférica de la imagen.

La firma espectral de un píxel de agua sobre la escena 205-30 post sin corrección atmosférica denota una sobreestimación de los valores de radiancia en las bandas del visible (Figura 18 izda.).

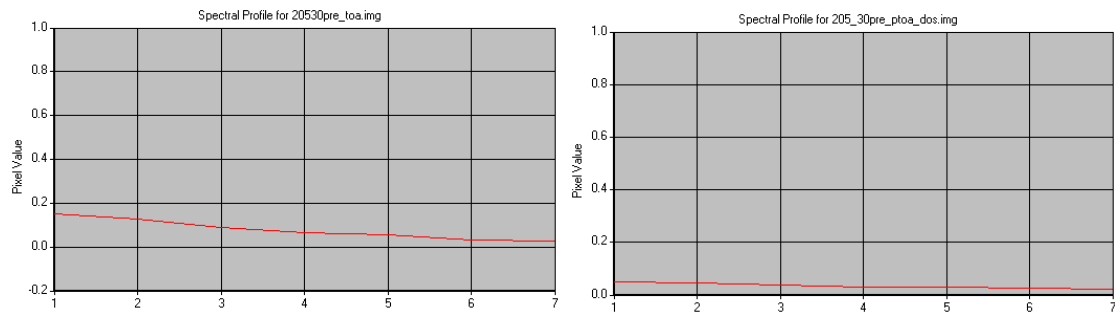


Figura 18: Perfil espectral del océano en la escena 205-30 pre sin corrección atmosférica y con corrección atmosférica DOS

Para los sensores TM y ETM+ existen numerosas experiencias en las que la aplicación de esta metodología ofrece resultados muy aceptables (Song et al 2001). En el caso de OLI, la bibliografía consultada sobre el tema está en una fase incipiente.

En la revisión documental realizada, se ha optado por seguir las directrices expuestas en el portal web GIS Ag MAPS (<http://www.gisagmaps.com>) para la detección del valor mínimo del histograma.

En este portal se indica que para aplicar la corrección DOS, en el caso de Landsat 8 OLI, el procedimiento pasa por realizar la transformación de ND a ρ , tal y como se ha explicado en la parte inicial de este capítulo. A continuación se debe buscar el valor del pixel en el punto del histograma en el que se produzca una continuidad de valores distintos de 0.

Es decir, los valores deben ser mayores que 0 y ha de haber una continuidad en al menos 100 registros en la parte inicial de la cola del histograma.

Una forma de detectar este valor es indexando el campo de número de píxeles de cada nivel digital y detectar el salto mayor entre un nivel digital y el siguiente. Como el procedimiento requiere generar las estadísticas para cada banda de la escena, se genera un archivo dbf que puede ser abierto desde cualquier gestor de bases de datos o incluso desde una hoja de cálculo.

Para realizar esta tarea se desarrolló un script sobre Python en el que se leen las imágenes de un directorio y para cada una de ellas se genera el fichero dbf correspondiente (Figura 74).

Sin embargo, los argumentos configurables desde Python no devuelven los mismos resultados que si se hace manualmente. En el caso del script se realizan agrupaciones de píxeles, lo que no sirve para el propósito de esta tarea.

Para generar las tablas de forma correcta se desarrolló otro procedimiento más manual, que consistió en la generación de las estadísticas de cada banda (mediante un procedimiento por lotes) desde Erdas (Pyramid & Statistics) (Figura 75). En este proceso se generan los archivos auxiliares que ayudarán a la correcta generación de los archivos dbf asociados a cada imagen.

El parámetro clave para una correcta generación del archivo auxiliar se localiza en el factor de agrupación (skip factor) que debe ser 1, para poder localizar correctamente el valor mínimo del histograma (DOS). Al indicar que el valor de agrupación sea 1, no realizará estadísticas por grupos, sino que lo hará individualmente, es decir píxel por píxel.

Una vez generado el proceso, se puede obtener el archivo dbf desde el menú contextual de la imagen en la leyenda de ArcMap (Figura 76). Posteriormente se abre con Excel y se realizan los siguientes pasos. En primer lugar se realiza una indexación de los valores de recuento de número de píxeles por cada nivel digital, de forma que todos los que tenían valor 0 se encontraban en las primeras posiciones del archivo (Figura 77). A continuación se introduce la fórmula de comparación para cada celda en la que buscaba el salto entre los datos que detectaría la cola inicial y la final, de forma que se halla el valor del nivel digital correspondiente al valor mínimo del histograma y que se corresponde con el valor de dispersión atmosférica para esta capa.

$$=SI(A3-A2>=100;"posible";" ")$$

La fórmula introducida se basa en el uso del condicional **SI** que permite analizar los valores de dos o más celdas. De esta forma si la diferencia entre ambas es mayor que 100 (el valor mínimo del histograma presenta una diferencia que es siempre mayor que esta cifra propuesta), se escribirá en la celda el texto consignado, y si no cumple la condición no se escribirá nada. El valor de 100 en el salto entre valores está especificado como el umbral que se debe buscar para determinar el mínimo del histograma¹⁴. Finalmente se aplica un filtro a la nueva columna calculada para detectar la celda con el texto “posible” indicado en la expresión condicional “SI” de la fórmula.

El primero de los registros del filtro se corresponderá con la cola del mínimo del histograma. De forma que se toma el valor del campo Value +1, que en este caso es 7459 y este es el valor mínimo del histograma (Figura 78).

¹⁴ <http://www.gisagmaps.com/lowest-valid-value>

Una vez detectado el valor mínimo se realiza una selección del píxel desde ArcMap para identificarlo y analizar con criterio experto, si esta ubicación se corresponde realmente con un píxel que si podría ser el valor mínimo, es decir, masas de agua, zonas de sombra, espacios de vegetación densa.

Para el caso del ejemplo comentado, en la banda 2 de la escena 204-30 preincendio se localiza en una ladera norte en zona de vegetación arbustiva que a la hora de la pasada del satélite se encuentra todavía en sombra (Figura 79).

Para poder realizar un control de la coherencia de los puntos determinados como objeto oscuro, se realizó una exportación de los píxeles DOS a formato shape (implantación puntual) (Figura 80).

Una vez identificados los puntos de cada banda y de cada escena, se procedió a la fusión de todos los píxeles (transformados en puntos) y a la unión de las capas generadas (Figura 81).

En el proceso de unión se diseñó un script que agregó en cada capa (una por banda de cada escena), un campo con el nombre de la capa (igual que el de la escena + nº de banda). Además se agregó el geoproceto de unión de todas las capas generadas, conservando la estructura tabular de las capas (valor del píxel DOS, capa, banda) (Figura 82).

Esta capa final, cuyo contenido son todos los puntos identificados como objeto oscuro, puede consultarse en el visualizador web¹⁵ creado en el marco de este TFM (Figura 82).

Una vez completados los valores de DOS para cada escena se procede a su transformación de ND a L y L_{DOS} , de forma que se puede realizar el paso a ρTOA con corrección DOS

La fórmula que permite realizar esta transformación es la formulación clásica empleada en TM y ETM+:

$$\rho TOA = \frac{\pi \cdot (L - L_{dos}) \cdot d^2}{F0 \cdot \cos(\theta_i)}$$

Donde

π es 3.14159

¹⁵ <http://webmapmobileedgm.bl.ee/swipe/> (acceso al visualizador)

L es la radiancia del píxel

Ldos es el valor de radiancia del pixel detectado como objeto oscuro para cada banda.

d es la distancia tierra – sol, diferente en cada día del año.

F0 es el valor de la de irradiancia solar exoatmosférica (ESUN)

$\cos(\theta_i)$ es el valor de coseno del ángulo cenital solar.

A la hora de restar a los valores de radiancia de la imagen la correspondiente al objeto oscuro se anula o mitiga el efecto producido por el espesor atmosférico de los aerosoles para cada banda, de forma que obtendríamos un valor próximo al que se daría sin la intervención de este componente de la atmósfera. Sin embargo, mediante este método de corrección no se consideran factores tales como el relieve, la energía reflejada por los píxeles vecinos o las transmisividades de los flujos incidente y reflejado.

Para realizar la corrección de las imágenes a este nivel, el máximo alcanzable en este momento (a falta de que se publiquen datos de transmisividad del flujo reflejado para cada banda del sensor OLI), se desarrolló un modelo en ERDAS con el que se realizó esta tarea (Figura 19).

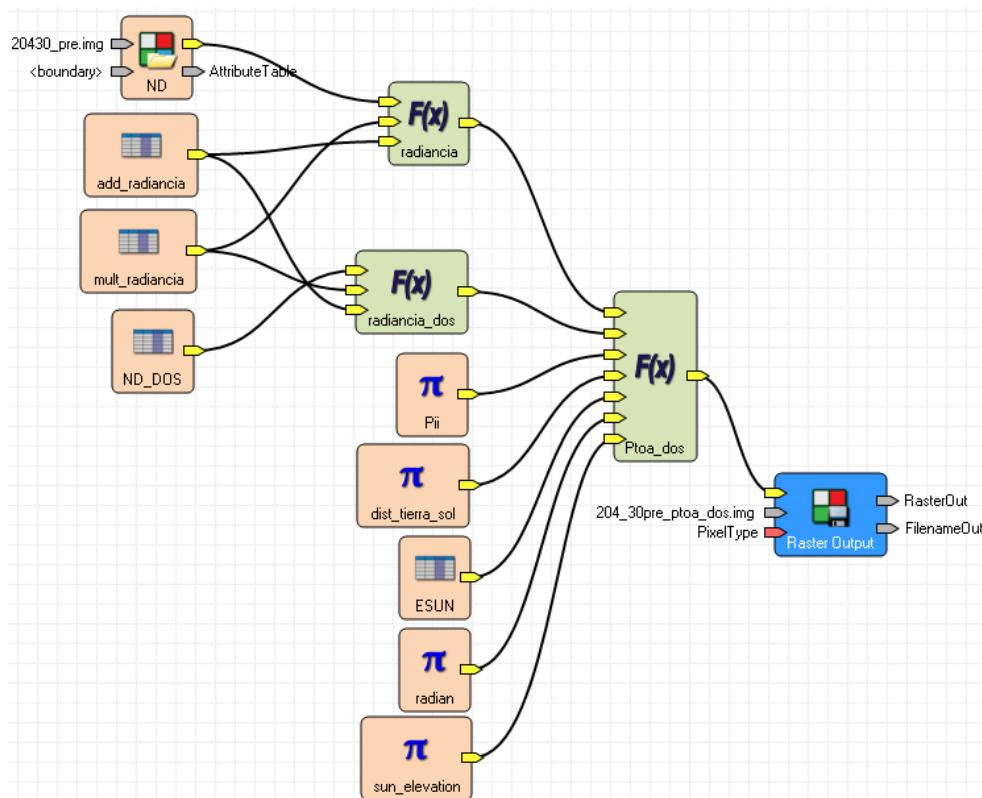


Figura 19: Modelo desarrollado para la corrección de las imágenes OLI

Las expresiones empleadas son las indicadas anteriormente para el paso de ND a L (Figura 84).

Así como la fórmula empleada para la corrección de la dispersión atmosférica basada en el objeto oscuro (Figura 85).

$$\left((\$L - \$L_DOS) * \$Pii * (\$dist * \$dist) \right) / (\$ESUN * \text{Cos}(\$radian * (90 - \$Sun_elevation)))$$

En este punto se llega al máximo de corrección de las imágenes Landsat 8 Oli, debido a la falta de parámetros (Transmisividad del flujo ascendente para cada banda T_1).

3.1.2. MODIS

Dos de los parámetros biofísicos más importantes en el análisis de las relaciones atmosfera-suelo-planta y de la productividad de los ecosistemas vegetales son el fAPAR (fraction of Photosynthetically Active Radiation) y el LAI (Leaf Area Index). La componente eco-fisiológica de estas variables puede proporcionar al análisis de la regeneración vegetal postincendio una dimensión eco-fisiológica complementaria al diagnóstico de regeneración en términos exclusivamente de cubrimiento vegetal.

La complejidad que entraña la extracción de estos parámetros mediante métodos directos hace que cada vez los métodos indirectos sean más utilizados, siendo la teledetección espacial una de las principales fuentes de información. El sensor MODIS abordo de los satélites AGUA y TERRA proporcionan productos referidos a estas dos variables. Concretamente los productos MOD-MYD-MCD15A2 contienen estimaciones de LAI y fAPAR.

Además de MODIS, otros de los sensores incorporados en AQUA y TERRA son: AIRS, AMSU-A, HSB, AMSR-E, CERES.

El sensor AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), está enfocado al estudio y seguimiento de la temperatura de la atmósfera. Por su parte el sensor AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit), realiza el seguimiento de los valores de temperatura en la alta atmósfera. El sensor HSB (Humidity Sounder for Brazil), es un sensor activo (microondas) diseñado para la obtención de perfiles de humedad. El AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS), es un sensor pasivo destinado a la medición de radiación de microondas de la superficie terrestre. CERES

(Cloud's and the Earth's Radiant Energy System), es el sensor destinado a la medición de la radiación térmica terrestre.

El sensor con el que se trabajará en este TFM es MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Este sensor es usado para derivar información de vegetación, cobertura de la superficie terrestre, fluorescencia de la clorofila oceánica, y propiedades de los aerosoles.

La información relativa a este sensor se obtuvo de la web de MODIS¹⁶, vinculada con la web de la NASA. Las características de este sensor son las siguientes:

- Franja de visión: 2330 km
- Resolución temporal: 1-2 días
- N° de bandas: 36
- Rango espectral: 0.405 – 14385 μm .
- Resolución espacial: 250 m, 500 m y 1 km

Los productos generados por este sensor se pueden consultar en la web de MODIS¹⁷. Como se señaló más arriba, la estimación de los valores de fAPAR y LAI se realizó a partir del producto MCD15A2. fAPAR. Esta información es generada cada 8 días para un tamaño de píxel de 1 km. El valor de LAI es la relación existente entre la presencia de hojas por unidad de superficie. Por su parte el fAPAR, mide la proporción de radiación disponible en las longitudes de onda fotosintéticamente activas que son absorbidas por la vegetación verde.

El acceso a esta información puede realizarse a través de diversas opciones, como la web de EarthExplorer, Glovis, Reverb, Global Data Explorer, etc.

Una de las características de la distribución de los productos MODIS, son los sistemas de coordenadas de sus productos. En el caso de la información de resolución menor 0.05 °, ésta se facilita con sistema de coordenadas EPSG 4326, el resto de información está proyectada en el sistema de coordenadas Sinusoidal¹⁸ o Lambert Azimuthal Equal-Area.

Las imágenes utilizadas en este TFM están en el sistema de coordenadas Sinusoidal, y las aplicaciones SIG Desktop disponibles en la actualidad no son capaces de

¹⁶ <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/>

¹⁷ https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table

¹⁸ <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/GCTP.html>

identificar su sistema de coordenadas. Este problema dispone de una solución aportada por la propia distribuidora de las imágenes.

MODIS ofrece una herramienta¹⁹ web para transformar el SRC original a diversos sistemas de coordenadas y datums utilizados comúnmente. Dado que el SRC empleado en este TFM es el UTM 29N datum WGS84 en la aplicación de reproyección de MODIS fue posible transformar el sistema de coordenadas Sinusoidal a EPSG 32629.

Este recurso web permite seleccionar las imágenes mediante la introducción de parámetros como la coordenada y el rango de fechas. Una vez seleccionadas las imágenes se ofrece la funcionalidad de reproyectarlas a diferentes sistemas de coordenadas y datums. Además también se ofrece la posibilidad de realizar un recorte en la imagen en base a unas coordenadas máximas y mínimas, reduciendo en gran medida el tamaño del fichero.

Para la realización del análisis del valor de LAI y fAPAR en este TFM se descargaron las imágenes de las fechas indicadas en la Tabla 4.

Tabla 4: Relación de fechas seleccionadas para la descarga de imágenes MODIS.

	Escena	Fecha		
		Pre	Post	2014
MCD15A2	H17 V04	20-8-2013	21-9-2013	25-6-2014

La fecha seleccionada previa, común a todos los incendios, es el 20 de agosto 2013 (correspondiente con el archivo MODIS MCD15A2.MRTWEB.A2013233.005). La fecha posterior a todos los incendios es el 21 de septiembre de 2013 (correspondiente con el archivo MODIS MCD15A2.MRTWEB.A2013265.005) y la fecha seleccionada para el año 2014 es 25 de junio (MYD15A2.MRTWEB.A2014177.005).

La extracción de la información de las imágenes analizadas se desarrolló desde ArcGIS 10.2.2. El primer paso, fue recortar cada una de las escenas (tiles) en base a la extensión de cada uno de los ámbitos, manteniendo la geometría de los píxeles (1x1 km) e incorporando más extensión que la referida al propio ámbito del incendio. Dado que son tres ámbitos, tres escenas y dos productos (LAI y fAPAR) se realizaron 18 recortes.

El siguiente paso consistió en la conversión de cada ráster a formato vectorial incorporando en la conversión el valor de LAI y fAPAR. Una vez realizada la

¹⁹ <https://mrtweb.cr.usgs.gov/>

transformación hubo que recortar los polígonos ya que los píxeles contiguos con el mismo valor fueron vectorizados en un único polígono. En estos casos se procedió a su recorte empleando las direcciones de recorte, 0 °, 90 °, 180 ° y 270 °.

Una vez corregidos los problemas de la vectorización, se realizó el recorte de la capa con información procedente de cada ráster respecto del límite de cada ámbito. El resultado fue el sector de cada píxel que se solapa con el ámbito. Esta información resulta fundamental para determinar el porcentaje de ocupación de cada píxel en cada incendio y por lo tanto, permite determinar el porcentaje de participación del píxel en el incendio.

Un criterio que se ha definido para evaluar el valor de LAI y de fAPAR es el porcentaje del píxel que se encuentra dentro del ámbito. Aquellos píxeles con un valor inferior al 80 % fueron descartados.

También se realizó un análisis con aquellos píxeles con un valor de ocupación en el ámbito del 100 % ya que serán los píxeles que tiene información íntegra de la zona incendiada (píxeles puros) y no son mezcla de espacios no incendiados con los incendiados (píxeles mixtos).

Una vez realizado el recorte y generado el valor del porcentaje del píxel dentro del incendio, se realizó la tarea de extracción de información mediante la generación del centroide de cada polígono. A continuación se realizaron intersecciones espaciales entre la capa de centroides de cada ámbito con las distintas capas de polígonos generados en el proceso anterior. El resultado es una capa de puntos, pero con la información de las capas con la información de las escenas MODIS, es decir, el valor de LAI y fAPAR.

Finalmente se realizó un Spatial Join entre esta capa y la del porcentaje de ocupación de cada píxel dentro del ámbito.

El resultado es una capa vectorial de puntos en la que se dispone de información de LAI o de fAPAR con la información de los tres momentos y el porcentaje de ocupación para cada píxel dentro de la escena (Figura 20).

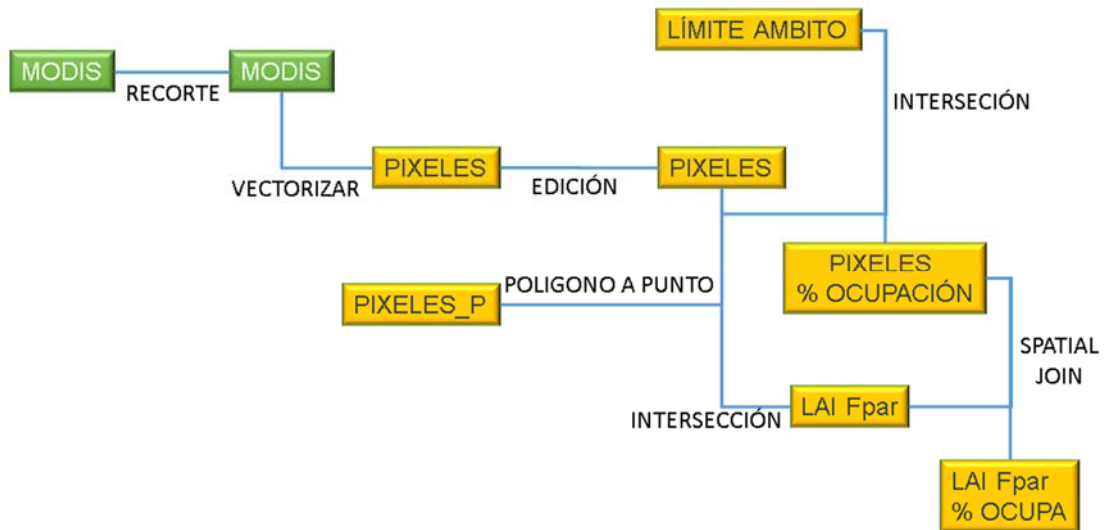


Figura 20: Modelo desarrollado para extracción de información de imágenes MODIS

La información obtenida fue exportada a formato xlsx, que permitió la realización de análisis estadísticos de la información. Dichos resultados son expuestos en apartados posteriores.

Un problema detectado con la información generada por MODIS es el de la modificación de la posición de los píxeles (Figura 21). Otra forma de exponer el problema es el desplazamiento en el eje X e Y de la posición de los píxeles. El problema detectado se dio entre las imágenes preincendio respecto de las postincendio y las del 2014. El desplazamiento detectado fue de 458m (271m en la X y 357 en la Y).

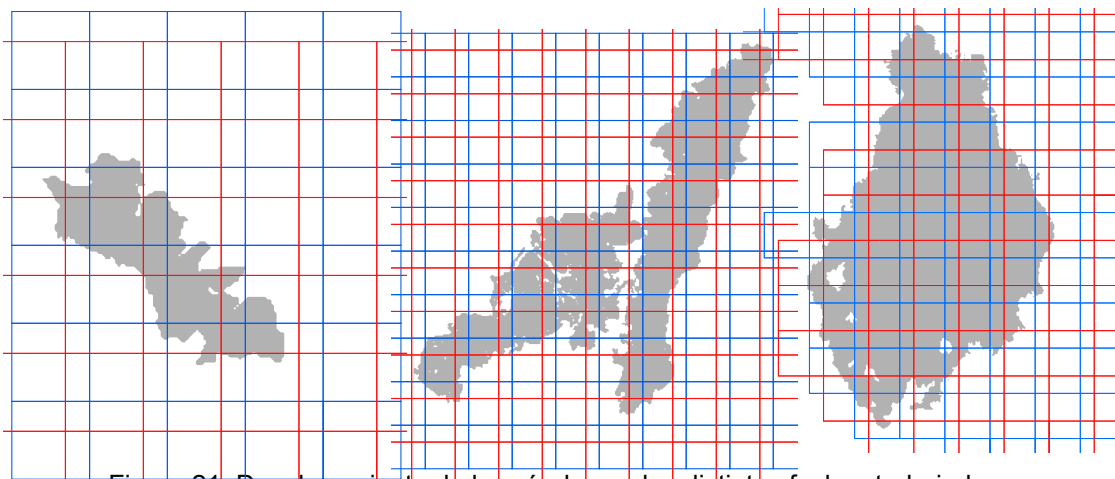


Figura 21: Desplazamiento de los píxeles en las distintas fechas trabajadas

En este TFM no se busca una solución a este problema. Se ha tomado la decisión de utilizar la información de los píxeles sin realizar ningún tipo de operación estadística o geométrica y asociar el valor de LAI y fAPAR al centroide de los píxeles de la imagen postincendio.

Por lo tanto, los resultados obtenidos del análisis multitemporal entre las escenas preincendio y las posteriores deberán considerarse como tendencias y nunca como referencias absolutas. Evidentemente los resultados obtenidos entre escenas postincendio y las de 2014 son datos perfectamente válidos al no estar comprometidas por el problema del desplazamiento.

3.1.3. LiDAR

En este TFM también se ha utilizado la información procedente de LiDAR. Se trata de un sensor que se puede alojar en diversos tipos de plataformas (satélite, avión, terrestre). En el caso de este TFM la plataforma empleada ha sido el avión.

La fuente de información empleada fue el vuelo LiDAR, generado simultáneamente con el vuelo del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). En las zonas de trabajo los datos disponibles son de fechas distintas (Tabla 5).

Tabla 5: Años de vuelo del LiDAR para cada incendio.

	Año de vuelo
Navia	2009
Oia	2011
O Pindo	2009

Las características de la información generada por este tipo de sensor laser se pueden consultar en la web del IGN (Figura 86).

Según el IGN, la información generada tiene una resolución espacial de un punto cada 2 m² y una resolución en la altura de ± 20 cm. Con estas características es posible discriminar y clasificar las edificaciones, vehículos y determinadas formaciones vegetales, entre otros (Figura 87).

El acceso a la información se ha realizado a través del portar de descargas de información geográfica desarrollado por la Xunta de Galicia (CDIX²⁰).

Para los ámbitos se procedió a la descarga de los ficheros correspondientes mediante los enlaces disponibles en la malla (cuadrícula de delimitación de cada fichero) (Figura 88).

²⁰ <http://visorgis.cmati.xunta.es/cdix/mapa.html>

Para automatizar el proceso de gestión de LiDAR, se realizaron una serie de ficheros batch para la automatización de tareas repetitivas (Figura 89).

En el proceso de descarga, se generó una malla de 2x2 km y se incluyó el nombre del fichero mediante la identificación de la secuencia de nombrado de la malla disponible en el servidor del CDIX.

Una vez identificada la secuencia se asignó a la malla generada la misma secuencia de nombrado de las cuadrículas. Finalmente se incluyó el enlace del servidor del CDIX. Esta operación se realizó mediante concatenaciones y realización de cálculos de campos con ArcMap. El resultado es una malla para toda Galicia en la que se dispone para cada cuadrícula de la URL del fichero de extensión .las alojado en el servidor del CDIX y al que se puede acceder directamente para su descarga desde ArcMap.

Para agilizar el proceso de descarga se desarrolló un sistema de gestión mediante el cual se automatiza la adquisición de los ficheros .las.

El sistema se basa en una aplicación de gestión de descargas (wget) y la creación de ficheros .bat, en los que se introducía la sintaxis que ejecuta el programa wget.

El procedimiento consistió en la selección de las cuadrículas correspondientes a cada ámbito. Los registros de la selección fueron exportados a formato txt, de forma que desde un editor de texto sólo hubo que modificar el comienzo de cada línea de descarga y agregar la llamada al gestor.

Los archivos accesibles desde este portal son los que no contienen clasificación de objetos, por lo que debe realizarse la tarea de clasificación de los retornos.

Para realizar esta tarea se ha empleado la aplicación LasTools, que puede ser manejada desde diversos entornos, consola de comandos, QGIS y ArcMap.

En este TFM se ha optado por la consola de comandos, dado que no requiere de una interfaz gráfica y por lo tanto consume menos recursos de hardware, lo que acelera el proceso de clasificación de la nube de puntos.

Al igual que en el caso de la descarga de ficheros mediante archivos de lotes, en el caso de LasTools, también es posible generar este tipo de ficheros *bat*, que pueden realizar el mismo proceso para múltiples ficheros.

La secuencia de comandos empleada para filtrar la nube de puntos fue la siguiente:

1 ° Ejecución del comando LASGROUND

Esta aplicación es la encargada de discriminar dentro de la nube de puntos aquellos que son suelo de los que no lo son. El proceso de clasificación utiliza un filtro basado en superficie (adaptative TIN filter), es decir, que se genera una superficie por interpolación que se refina con las iteraciones. Los objetos por encima del umbral especificado para la superficie son clasificados como objetos (Ibañez 2008).

La sintaxis empleada se compone de la llamada a la aplicación LASGROUND y la especificación de los argumentos requeridos (ruta del fichero de entrada, ruta del fichero de salida).

Como novedad se ha decidido aplicar un argumento más, que se encarga de afinar el algoritmo de clasificación, de forma que se eliminan los picos entre los umbrales de 25 cm y 2.5 m tal y como se indica al final de la línea –spike 0,25.

```
lasground -i RUTA_DEL_FICHERO.las -o RUTA_DEL_FICHERO_LASGROUND  
GENERADO.las -spike 0,25
```

Este comando fue repetido para cada uno de los ficheros pertenecientes a cada ámbito y encapsulados en un fichero por lotes, de forma que sólo hubo que ejecutar una única vez el archivo para realizar la clasificación de todos los archivos.

2 ° Ejecución del comando LASHEIGHT

Con la ejecución de esta aplicación se consigue obtener el valor de altura de la nube de puntos que no es clasificada como suelo. Por lo tanto este paso requiere de la clasificación previa de la nube de puntos, diferenciando el suelo de lo que no lo es.

Al aplicar la función LASHEIGHT, se filtran aquellos puntos que se consideran que son ruido, es decir, son puntos perdidos cuya altura desvirtuaría el modelo al estar muy por encima o por debajo de la superficie.

Los argumentos admitidos, son el fichero de entrada, el fichero refinado y los umbrales de altura a partir de los cuales debe clasificar los puntos como ruido. En este filtrado se indica que aquellos puntos por debajo del suelo (a 0 m) y por encima de 30 m, sean clasificados como ruido.

```
lasheight -i ruta\fichero_lasground.las -o  
ruta\fichero_eliminarpuntos.las -drop_below 0.0 -drop_above 30.0
```

3 ° Ejecución del comando LAS2LAS

En esta fase del proceso se seleccionan los puntos pertenecientes al suelo y a la superficie. Por lo tanto, será necesario repetir el proceso de selección pero modificando el argumento de la clase que se va a aislar.

```
las2las -i ruta\fichero_filtrado.las -o ruta\suelo.las -  
keep_class 2
```

```
las2las -i ruta\fichero_filtrado.las -o ruta\superficie.las -  
keep_class 1
```

4 ° Interpolación IDW en ArcGIS

Los productos obtenidos de esta secuencia de tareas son una serie de ficheros .las, sobre los que falta por realizar el proceso de transformación a formato ráster.

Para generar el MDE, MDS y el MDSn, es preciso realizar la tarea de interpolación entre los puntos de la nube.

Para realizar este paso, se ha desarrollado una herramienta que permite generar el ráster interpolado mediante el uso de la función IDW (interpolador local) (Figura 90 y Figura 91).

Los parámetros predefinidos para el módulo de interpolación son: la lectura del valor de altura de la propia geometría de la capa de puntos generada y la resolución espacial de la nube de puntos (1 m).

En lo referente a la resolución espacial del ráster generado, hay que recordar que la distancia entre puntos LiDAR es de 1 punto cada 2 m². Esto daría una resolución del pixel de 2 m².

En diversas pruebas realizadas, este valor de resolución, ofrece una visión del relieve, muy suavizada y oculta o anula detalles de importancia en determinados objetos. Podría ser el caso de pinos de poco desarrollo o también la identificación del eucalipto (debido a la disposición de la hoja, que hace que el pulso no retorne en el área foliar, o que el retorno se disperse en otras direcciones). Por lo tanto, se ha considerado como una resolución adecuada para extraer información derivada del LiDAR, una resolución de 1 m x 1 m.

El proceso de interpolación se realizó para los archivos de suelo y también para los de superficie. Una vez obtenidos los ráster de ambos productos se realizó la resta entre

ambos para obtener el MDSn. Este ráster devuelve la altura real de los objetos de forma que es posible obtener el parámetro de altura de la cubierta forestal. Con esta información de altura del dosel vegetal se puede realizar una discriminación de la severidad de los incendios, asociándolo a los tipos de cubierta y al porte de la vegetación, lo que permite obtener una visión de más detalle del incendio (Figura 39, Figura 40 y Figura 41).

Esta información será integrada posteriormente en los análisis estadísticos para determinar si la información de la altura del dosel vegetal tuvo influencia o no en el nivel de severidad detectado en cada píxel de la imagen de satélite.

Durante el proceso de generación de este producto se produjeron problemas con la información del ámbito de O Pindo (interpolación del MDE y del MDS). La estructura litológica de O Pindo (granitos) así como el tipo de formaciones derivadas de la erosión que quedan en resalte (bolos, castillos) dificultan el proceso de filtrado y clasificación de la nube de puntos.

A pesar de los argumentos utilizados en las funciones de clasificación mediante Lastools, no fue posible asignar estas formaciones rocosas a la categoría suelo.

Para solucionar este problema se optó por realizar una clasificación supervisada de los píxeles de la ortofoto del PNOA 2010 del ámbito, aislando los píxeles de la categoría suelo y de la categoría vegetación. Las pruebas de clasificación supervisada se realizaron con el software Erdas 2014 y el módulo Supervised Classification. Los resultados no fueron satisfactorios dado que la máscara creada no ofreció un resultado de acierto superior al 80 %.

Uno de los problemas encontrados para la clasificación supervisada, fue el hecho de no contar más que con información del visible. En el caso de disponer de información del IRC de la misma fecha y resolución espacial, es posible que los resultados hubiesen mejorado, al contar con una componente espectral determinante para discriminar la vegetación de otros elementos.

Por lo tanto, el MDSn del incendio de O Pindo, debe ser empleado con cautela a la hora de realizar análisis y en el que se considere la altura del dosel vegetal como factor de análisis de la severidad del incendio.

3.2. Fuentes de información vectorial

En esta sección se realizará una descripción detallada de la información vectorial empleada y generada, así como los procedimientos empleados para su generación.

3.2.1. IV Inventario Forestal Nacional (IV IFN)

Una de las capas empleadas en este TFM fue el IFN por su información relativa a la composición y características del espacio forestal. En Galicia ya está disponible el IV IFN. Respecto de las versiones anteriores, se diferencia en una mayor resolución de la cartografía del MFE²¹. El acceso a esta información se realizó mediante la adquisición al MAGRAMA de los DVD de cada provincia de Galicia.

Los DVD contienen la cartografía del MFE y los datos del IV IFN, así como documentación explicativa de la estructura y contenidos de la base de datos. En este TFM se utilizó el vectorial del MFE para extraer la información referida a los modelos de combustibilidad y del tipo de formación forestal para cada una de las teselas.

Dado que sólo es necesario trabajar con los espacios de los perímetros de los incendios y sus proximidades, se realizó un recorte (CLIP en ArcGIS) del vectorial del MFE.

La capa del MFE, ha recibido una modificación en su estructura tabular para mejorar la lectura de la información referida al tipo de estrato.

Esta modificación se realizó mediante la incorporación de la información del fichero xls de Diccionario de datos con modelo de datos, facilitado desde la web del MAGRAMA²².

Mediante la preparación de los datos para dejar una estructura lo más limpia posible (atributos y nombres de campos), se realizó una exportación de la información referente a los tipos estructurales. Este nuevo fichero de Excel fue incorporado a ArcMap desde donde se realizó un JOIN con la capa del MFE 25000. Posteriormente se agregó un campo en el que se volcó la descripción de los tipos estructurales, para identificar de forma más rápida cada uno de los tipos (Figura 42, Figura 43 y Figura 44).

²¹ Mapa Forestal de España 1:25000.

²² http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe25_informacion_disp.aspx

3.2.2. Puntos de análisis estadístico

Esta capa fue empleada en la extracción de los valores de los píxeles para la posterior integración de la información en los análisis estadísticos expuestos en este TFM.

La malla de puntos se generó a partir del centroide de cada píxel, tomando como referencia las imágenes Landsat 8 OLI. Además, se generó un buffer de 200 m alrededor de cada perímetro con el objeto de disponer de información multiespectral de zonas control no afectadas por el fuego. Bajo el auspicio del principio de autocorrelación espacial, las zonas externas a los perímetros pueden recoger muchas de las características de las formaciones afectadas por los incendios forestales analizados.

El conjunto de las operaciones fueron realizadas desde ArcMap, debido a la agilidad y rapidez en los procesos.

Una vez generados los puntos de los centroides de cada píxel, se procedió a la extracción de información de las imágenes utilizadas (Landsat 8 OLI corregidas, MDE²³, MDS²⁴, MDS normalizado, Orientaciones, Pendientes, Rugosidad, Iluminación, Δ NBR²⁵, R Δ NBR²⁶, RBR²⁷, etc.) y las capas vectoriales (IV IFN).

Una vez extraída esta información (Extract Multivalues to Points) se procedió al análisis ANOVA, cuyos resultados serán comentados en apartados posteriores.

3.2.3. Fotos de salidas de campo

Para realizar una primera aproximación al estado de los ámbitos se realizó una salida de campo en el que se obtuvieron fotografías del estado de recuperación de la vegetación, comprobándose in situ la dimensión real del regenerado y los niveles de severidad del incendio.

El material empleado para esta tarea fue un Smartphone modelo Samsung S3 mini, cuyo hardware se compone de un GPS y una cámara de fotos integrada.

²³ Modelo Digital de Elevaciones

²⁴ Modelo Digital de Superficies

²⁵ Delta Normalized Burn Ratio

²⁶ Reduced Delta Normalized Burn Ratio

²⁷ Reduced Burn Ratio

El receptor GPS de tipo aGPS / GLONASS se basa en la utilización de la constelación GPS y en aquellos espacios en los que la constelación no es suficiente para determinar la posición del receptor, emplea la red de antenas de telefonía para mejorar la precisión. En lo que se refiere a la dualidad de constelaciones, GPS y GLONASS, este Smartphone, debido al receptor de posicionamiento, puede utilizar ambas redes para su posicionamiento.

En lo que se refiere a la precisión de la señal, y debido a que no dispone de la opción de corrección diferencial, la calidad del posicionamiento se mueve en torno a los 5m (Figura 94) en pruebas realizadas en espacios llanos sin obstáculos.

Por lo que respecta a la cámara del dispositivo, sus características fundamentales son el sensor de 5Mp con autofocus. Esta resolución del sensor es suficiente para realizar el trabajo de campo, debido a que las imágenes sólo tienen el objetivo de ilustrar el estado de las zonas incendiadas, no se requiere ninguna característica espectral específica.

Además, el propio dispositivo tiene la posibilidad de combinar la señal del receptor GPS con la información de metadatos de la imagen mediante el etiquetado GPS.

La opción comentada de incluir la etiqueta GPS en los metadatos de la imagen (Figura 95), supone agregar el dato de GPS en la información de la imagen. Desde ArcGIS (10.0) se incluye la herramienta de generar una capa de puntos a partir de las coordenadas incluidas en los metadatos de cada fotografía (GeoTagged Photos To Points).

Con la aplicación de esta herramienta es posible generar la capa de puntos de las posiciones de captura de las fotografías lo que agiliza enormemente las tareas de trabajo de campo y el operador sólo se debe preocupar de comprobar que la señal de posicionamiento sea estable para que se puedan escribir correctamente las coordenadas.

El resultado del trabajo de campo en los 3 ámbitos es una capa de tipo punto en la que se incluyen las posiciones de las fotos de los tres espacios y cuyo principal atributo es un hipervínculo (Figura 96) a la fotografía para poder visualizarla desde la aplicación web map²⁸.

²⁸ <http://webmapmobileedgm.bl.ee/swipe/> (acceso al visualizador).

3.2.4. Cartografía específica para el Visualizador Web Map

Los límites administrativos se han empleado como capa base en el visualizador web map. La información fue descargada desde la web del CNIG. El recurso se denomina Líneas Límites Municipales²⁹.

Se trata de cartografía vectorial distribuida en formato shp, en geometría punto, línea y polígono para los límites autonómicos, provinciales y municipales con dos sistemas de coordenadas, EPSG 4258 (datum ETRS89) y EPSG 4230 (datum ED50).

3.2.4.1. Comunidad

Para aislar la información referente a Galicia se hizo una selección manual del límite de Galicia. Esta selección fue guardada como nueva capa (shp) y posteriormente reproyectada al sistema de coordenadas utilizado para todo el repositorio cartográfico generado en este TFM (EPSG 32629).

Dado que se trata del datum WGS84 y como la información se encuentra proyectada en datum ETRS89, las diferencias son centimétricas, por no decir que es prácticamente lo mismo.

El parámetro de transformación que hay que aplicar para reproyectar de ETRS89 a WGS84 y viceversa, desde ArcGIS, es el denominado ETRS_1989_To_WGS_1984, cuyos valores de desplazamiento, rotación, unidades, etc. son en todos los casos 0 (Figura 97).

El resultado de la reproyección se transformó de nuevo en una capa con el límite de la comunidad, que fue el integrado finalmente, en el visualizador web.

3.2.4.2. Provincias

Al igual que en el caso de la comunidad, los límites provinciales utilizados, proceden del CNIG y poseen las mismas características. Para aislar las provincias limítrofes con Galicia, se realizó una consulta espacial de las provincias que tocan el límite de Galicia. El resultado se aisló a una nueva capa que fue incorporada al repositorio

²⁹

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/equipamiento.do?method=descargarEquipamiento&codEquip=3>

cartográfico del visualizador. Su uso se limita a una cuestión estética, de forma que se le da continuidad espacial a Galicia.

3.2.4.3. Límites internacionales

El límite con Portugal se obtuvo del servicio WFS ofrecido por el Instituto Geográfico de Portugal³⁰. Este servicio WFS permite la descarga del límite administrativo, que fue incorporado al repositorio en el sistema de coordenadas definido para este TFM.

Dependiendo de la aplicación utilizada para conectarse al servicio (QGIS, ArcGIS, Geomedia, etc.) la opción de acceso, o el formato de descarga es diverso (GML, shp, Almacén mdb, etc). En este caso, al emplear ArcGIS, la opción escogida generó una conexión a través de las Data Interoperability que gestiona a través de un fichero fdl.

Esta conexión puede salvarse posteriormente al formato vectorial que interese. En este caso el formato escogido fue el shape.

La capa de Portugal, fue recortada por la zona norte, para incorporarlo al repositorio cartográfico. En este caso no hubo que realizar tareas de reproyección ya que el datum al ser ETRS89, es compatible con el sistema de coordenadas 32629 (datum WGS84).

Dado que en el servidor cartográfico empleado (Mapserver) están incorporadas las librerías Proj4, no es necesario realizar tareas de reproyección al disponer la librería Proj4, de los parámetros necesarios para reproyectar al vuelo desde ETRS89 a WGS84.

Aunque esta librería no estuviese disponible, como ya se indicó anteriormente, las diferencias entre los dos datums son mínimas, a nivel de centímetro, por lo que para este visualizador no sería indispensable realizar la reproyección.

3.2.4.4. Batimetría

La capa de curvas batimétricas procede de un repositorio distribuido por el SITGA Sistema de Información Territorial de Galicia), información que a su vez fue cedido por el IGN.

³⁰ <http://mapas.igeo.pt/ows/caop/continente>

De esta capa se desconocen los metadatos, por lo que no es posible aportar más información sobre su generación, actualización, etc. Se trata en origen de una capa de líneas, que mediante un tratamiento es transformada a una capa de polígonos.

La primera fase de esta conversión se basa en una revisión pormenorizada de la información en la que se realizan tareas de corrección de las geometrías, revisión de superposiciones y conexión de segmentos inconexos.

Para ello se emplean diversas herramientas de ArcGIS, como Repair Geometry, que realiza operaciones como la eliminación de registros con geometrías nulas, eliminación de segmentos de tamaño reducido, corrección de la orientación de los segmentos, etc.

Para la revisión de superposiciones hubo que realizar análisis topológicos con la herramienta específica de ArcGIS para esta tarea. Las reglas empleadas fueron las de superposición y la de conectividad entre líneas, de forma que se detectan segmentos superpuestos y finales de línea inconexos.

Una vez arreglada la capa, se realizó la tarea de transformación de líneas a polígonos, de forma que se obtuvieron los polígonos de la batimetría de la costa de Galicia.

Esta capa es utilizada como capa de inicio, junto con el sombreado del MDE25 y los límites de las provincias en el visualizador web montado para consulta de la información empleada en este TFM.

3.3. Neocanales

La elaboración de neocanales supone un recurso frecuentemente utilizado para el análisis de la información espectral de las imágenes de los sensores remotos. Este tipo de cálculos, se basan en la comparación de la información radiométrica de las bandas de la imagen con el objetivo de aprovechar toda la información contenida en las bandas (García 2010, Chuvieco, 1996; de la Riva, 1997; Lillesand y Kiefer, 2000). Estos recursos técnicos permiten aislar o generar información de interés para el estudio de parámetros biofísicos (estado de la vegetación, contenido de humedad, etc.), o también para estudios multitemporales.

Dado que el presente TFM tiene como objetivo el estudio de la severidad y recuperación de los espacios afectados por los incendios de Navia, Oia y O Pindo, la utilización de neocanales será imprescindible para extraer información sobre estos aspectos.

Los neocanales que se proponen para realizar este estudio son los referidos al cálculo de la severidad del incendio (Δ NBR, $R\Delta$ NBR y RBR) y, por otra parte, aquellos que nos indican el estado de la vegetación después del incendio mediante el análisis de la salud de la vegetación (NDVI) y mediante el análisis de la humedad en la vegetación (NDII). En los siguientes apartados se realizará una descripción de los procedimientos y los resultados obtenidos para cada uno de los neocanales elaborados.

3.3.1. Δ NBR

Este neocanal se basa en la comparación de series multitemporales (previas y posteriores al incendio), y en la comparación de las bandas del IRC (sensible al estado fenológico de la vegetación) y del SWIR (sensible al contenido de humedad presente en el píxel).

La comparación del estado fenológico, o también la cantidad y tipo de vegetación presente en el píxel, frente al dato de humedad, aporta un valor que permite discriminar si en un píxel se ha producido un incendio y cuál fue la severidad (contenido de humedad) en dicho espacio.

El grupo FIREMON³¹, dependiente del programa FRAMES (fundado y patrocinado por la Universidad de Idaho, Universidad de Montana, USGS,...), desarrolla su trabajo en el análisis, entre otros, de la severidad de los incendios forestales. En concreto, Key and Benson, 2006 propusieron el NBR, que se trata de un índice similar en construcción al NDVI, si bien la diferencia se localiza en las bandas utilizadas. El NBR se basa en la comparación del IRC (B5) y del SWIR lejano (B7).

La fórmula propuesta por FIREMON y que se ha seguido en este TFM es la siguiente:

$$NBR = \frac{IRC - SWIR}{IRC + SWIR}$$

La información con la que se ha realizado este cálculo son las escenas de reflectividad corregida a techo de atmósfera, que también contaban con la corrección de la dispersión atmosférica (ρ TOA DOS).

Según se indica en la documentación³² de FIREMON, la respuesta en un espacio afectado por un incendio se caracteriza por una disminución de la respuesta de la vegetación (IRC) y un aumento en la respuesta del SWIR, debido al descenso de humedad (esta parte del espectro electromagnético es especialmente sensible al contenido de humedad de los objetos).

Por lo tanto en una situación pre-incendio, en la que hay una alta respuesta en el IRC y baja en el SWIR (contenido de humedad de la vegetación que absorbe la radiación), se pasa a una respuesta en la imagen post-incendio en la que se produce una reducción en el IRC y un incremento en el SWIR.

Al comparar dos bandas de una misma escena se produce la anulación de los efectos topográficos, lo que arroja un valor consistente a efectos de comparación de los píxeles del espacio ardidado, a pesar de las diferencias topográficas y por ende, de la iluminación de cada píxel.

Esta anulación de la topografía y la iluminación, permite aislar las diferencias reales entre las reflectividades de las bandas, lo que permite realizar la comparación espacial y multitemporal de los valores derivados del NBR.

Para aislar los espacios ardidados, se aplica la ecuación de Δ NBR:

$$\Delta NBR = (NBR_{pre} - NBR_{post}) * 1000$$

³¹ <http://www.frames.gov/firemon>

³² FIREMON landscape Assessment (pdf).

http://www.frames.gov/documents/projects/firemon/FIREMON_LandscapeAssessment.pdf

Al realizar la sustracción a los valores pre-incendio de los post-incendio, se obtienen valores próximos a 0 en aquellos espacios en los que no ha variado el verdor, y valores positivos en los que se ha reducido la respuesta de la vegetación respecto al momento pre-incendio y valores negativos en los que se ha producido una recuperación en el momento post-incendio.

Respecto a la fórmula propuesta por FIREMON, existen variaciones que inciden en la anulación de los efectos que puede generar la influencia de las variaciones fenológicas o de la precipitación entre imágenes pre y post-incendio, e incluso entre períodos entre incendios.

En este TFM se ha optado por aplicar la variación del ΔNBR (Parks, 2014).

$$\Delta NBR = \left((NBR_{pre} - NBR_{post}) * 1000 \right) - \Delta NBR_{offset}$$

Los resultados expuestos en este TFM serán por lo tanto, los conseguidos mediante la utilización de la variante de FIREMON del ΔNBR .

El dato de ΔNBR_{offset} , se extrae del valor medio de los píxeles de un sector homogéneo en el que no se hayan producido cambios entre los períodos pre y post-incendio y que se encuentre en las proximidades del ámbito analizado.

Para extraer el valor de ΔNBR_{offset} se desarrolló un procedimiento específico consistente en la generación de una máscara sobre el espacio ajeno al incendio de características homogéneas (cobertura de suelo desnudo o similar), y una extensión lo suficientemente amplia como para obtener un dato representativo.

Sobre la imagen de este espacio se realiza el cálculo del valor medio de los píxeles de ΔNBR , dato que posteriormente se sustraerá al total de la imagen ΔNBR , obteniéndose un ΔNBR con la eliminación de la influencia fenológica y de la precipitación (Figura 92).

Para generar este neocanal se realizó un modelo para Erdas en el que se integraron las imágenes de reflectividad (Figura 22).

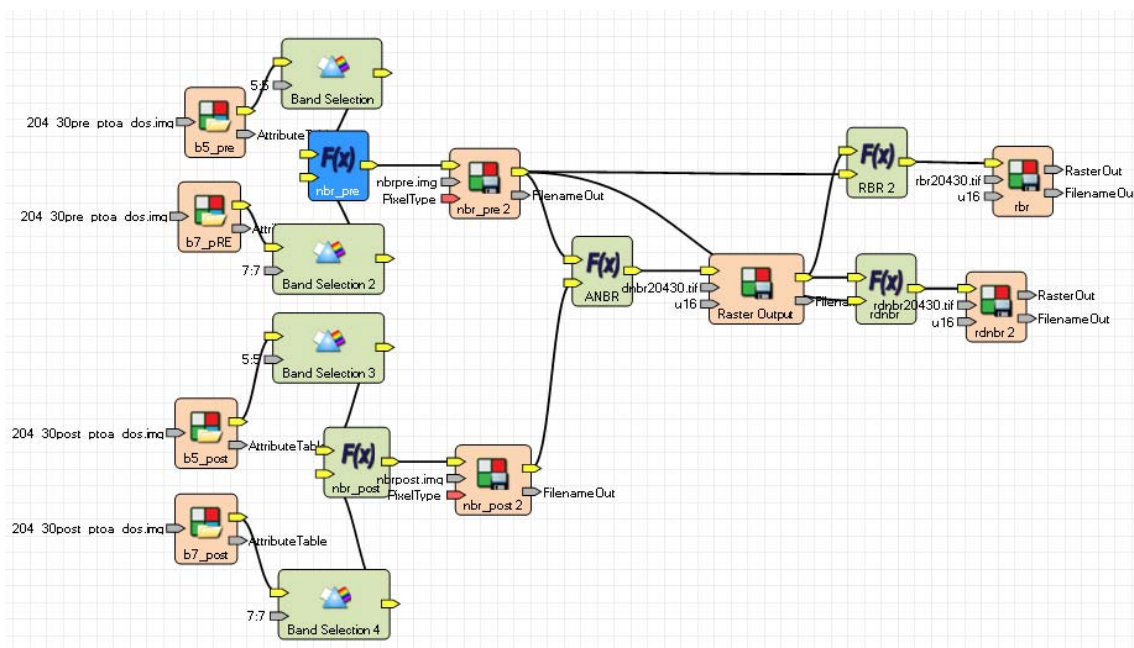


Figura 22: Modelo de generación de Δ NBR en Erdas.

El ráster resultante almacena valores que se encuentran en el rango de -500 a 1300. Según la clasificación que aporta FIREMON la lectura de los resultados es la expuesta en la Tabla 6.

En determinados casos, es posible que los valores superen los umbrales máximos y mínimos, en cuyo caso se trata de anomalías derivadas de la presencia de nubosidad en una de las imágenes o de otros problemas asociados a artefactos.

Tabla 6: Rangos de valores de Δ NBR

Nivel de severidad	Intervalo Δ NBR
Regeneración alta	-500 a -251
Regeneración baja	-250 a -101
No ardido	-100 a 99
Severidad baja	100 a 269
Severidad media - baja	270 a 439
Severidad media - alta	440 a 659
Severidad alta	660 a 1300

Los resultados obtenidos (Figura 45) pueden ser consultados en la aplicación web creada para la consulta del tribunal del TFM³³.

³³ <http://webmapmobileedgm.bl.ee/swipe/> (acceso al visualizador)

3.3.2. R Δ NBR

El R Δ NBR (Parks 2014) es un neocanal similar al anterior, en el sentido de que analizar la severidad de un incendio, relaciona las bandas del IRC y del SWIR y realiza una comparación entre una situación previa y una posterior a un incendio.

La fórmula sería la siguiente:

$$R\Delta NBR = \frac{\Delta NBR}{(NBR_{prefire})^{0.5}}$$

En el caso del R Δ NBR, se emplea el parámetro del NBR previo al incendio, lo que relativiza el valor del Δ NBR, es decir, si en la situación previa hay una cubierta vegetal reducida y por lo tanto un NBR bajo, esto condiciona el valor de Δ NBR, que será por norma bajo.

Sin embargo, al introducir el valor del NBR previo, lo que hace es eliminar la correlación entre la situación previa y el valor obtenido de Δ NBR. Por lo tanto, los valores obtenidos de Δ NBR son más sensibles a espacios en los que la cubierta vegetal pre-incendio es baja.

Según indica Parks (2014), el índice relativo R Δ NBR es, teóricamente, más adecuado para detectar cambios en la vegetación en una escala consistente.

El problema que presenta este índice se encuentra en el denominador. La transformación de la raíz cuadrada hace que valores bajos de NBR pre-incendio produzcan valores extremadamente altos o bajos de R Δ NBR. Esto se confirma en los tres ámbitos si se consulta el visualizador web, o en la Figura 46.

Parks (2014) también comenta la difícil interpretación de estas anomalías, asociados a estos bajos valores del denominador, en comparación con la cantidad de cambios generados por el fuego.

Además, al realizar la raíz cuadrada en el denominador se está convirtiendo en valor positivo cualquiera que tuviese un valor negativo. Este hecho añade un factor de ambigüedad al resultado del R Δ NBR.

Como ya se indicó, este índice tiene una buena adaptación a espacios con poca vegetación en el momento pre-incendio, lo cual es coincidente con las condiciones existentes en el ámbito de O Pindo, un espacio con gran presencia de roca desnuda y

vegetación mayoritariamente arbustiva, pero por otro lado, introduce más anomalías que el ΔNBR .

La métrica de este índice es igual que la comentada en el caso del ΔNBR (Tabla 6).

Por su parte, los resultados obtenidos con este índice, incrementan el valor de severidad en los tres ámbitos y aumentan el número de píxeles con valores superiores al umbral máximo, tal y como comenta Parks (2014).

3.3.3. RBR

Este índice, Relativized Burn Ratio (Parks 2014), es una alternativa métrica a los otros dos índices de severidad de superficie quemada. Se caracteriza por ser sensible a aquellos espacios con baja cubierta vegetal en el momento pre-incendio y por evitar los problemas de saturación asociados a la métrica del $R\Delta\text{NBR}$.

Las características de este índice se centran en el denominador de la ecuación, en el que al igual que en el caso del $R\Delta\text{NBR}$, se introduce el valor de NBR del momento previo al incendio, pero al que se le suma el valor 1.001. Este valor impide que el denominador sea 0, y por lo tanto la expresión arrojará un resultado distinto de indeterminación (si el valor fuese 0).

La división del ΔNBR por el valor de NBR previo al incendio, como ya se comentó en el caso anterior, sirve para relativizar el valor de ΔNBR , en el caso de hallarse en espacios con poca vegetación.

$$RBR = \left(\frac{\Delta\text{NBR}}{(NBR_{pre\text{fire}} + 1.001)} \right)$$

Para generar las imágenes basadas en este índice se diseñó un modelo descrito en la Figura 23.

Los resultados obtenidos (Figura 47), muestran cómo los valores de anomalías obtenidos del índice $R\Delta\text{NBR}$, se anulan, pero por el contrario, la variabilidad observada con el ΔNBR se amortigua y los datos muestran una menor afección o severidad de los incendios que con las otras dos métricas.

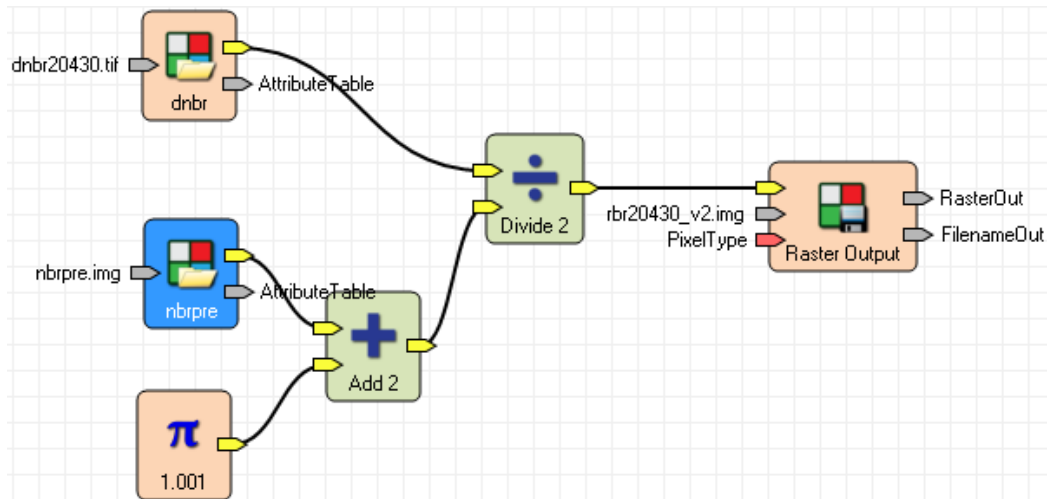


Figura 23: Modelo de Erdas para generar el neocanal NBR.

3.3.4. NDVI

El neocanal de referencia para el análisis de la vegetación, es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Como cualquier índice de vegetación, el NDVI se calcula a partir de los datos de reflectividad a distintas longitudes de onda para extraer información relacionada con la vegetación (Gilbert et al., 1997).

La utilidad de estos índices radica en que permite obtener información sobre la dinámica fenológica, el contenido de clorofila de la vegetación, contenido de agua, estimación de LAI (índice de área foliar), etc. (Figura 48).

En el caso del NDVI, la fórmula empleada fue la siguiente:

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

La diferencia normalizada entre el rojo (baja reflectividad relacionada con el contenido de clorofila que absorbe la radiación de las longitudes de onda del azul y principalmente del rojo), y el infrarrojo (alta reflectividad relacionada con la estructura de la hoja en un estado fenológico óptimo), permite obtener información sobre la vegetación. Además el índice de vegetación, al normalizar los datos permite realizar comparaciones entre píxeles con el mismo tipo de cubierta pero con ubicaciones o ambientes distintos (solana y umbría) cuyos valores de reflectividad son muy diferentes.

La relación entre la banda roja y la infrarroja, pone de relieve el comportamiento de la vegetación.

Los valores obtenidos por este índice de vegetación se mueven en el rango de -1 a 1. Su interpretación se indica en la Tabla 7 (Rouse 1974).

Tabla 7: Interpretación de los valores de NDVI

Descripción	Rango
Ausencia de vegetación	NDVI < 0
Suelo desnudo o vegetación muerta	0 < NDVI < 0,2
Vegetación dispersa o poco vigorosa	0,2 < NDVI < 0,4
Vegetación abundante y vigorosa	0,4 < NDVI < 0,6
Vegetación muy densa y vigorosa	NDVI > 0,6

3.3.5. NDII

El índice normalizado de diferencia de infrarrojo, permite obtener información sobre el contenido de agua presente en cada píxel y, por lo tanto, obtener una medida del estrés hídrico o de la sequía de un espacio (Chuvieco, 2010).

Este tipo de índices son más adecuados que el NDVI para estimar el contenido de agua de la vegetación (Ceccato et al., 2001; Cibula et al., 1992; Cohen, 1991).

Al estar presente la longitud de onda del infrarrojo medio, sensible al contenido de agua en la cubierta, es más eficaz para determinar parámetros como los indicados anteriormente, estrés vegetal y sequía, o como en el caso de este TFM, para determinar el estado de la vegetación (su contenido de humedad) en un ámbito incendiado.

$$NDII = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}}$$

La formulación pone en relación las longitudes de onda del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio.

La inclusión en el denominador de las dos bandas, realiza la normalización de los valores, lo que permite hacer comparaciones entre ámbitos distintos, tal y como se comentó en apartados anteriores.

Si se compara la formulación con la del NBR, es exactamente lo mismo, por lo tanto se concluye que ambos utilizan el dato de presencia o ausencia de humedad en el píxel para determinar, en el caso del NBR, el estado de la vegetación.

A la vista de los datos obtenidos (Figura 49), parece existir una correspondencia entre la cantidad de humedad y los espacios ardiados, de forma que se podría emplear dicho neocanal para la delimitación del espacio incendiado.

3.3.6. Cartografía de área quemada

Uno de los productos que se pueden extraer a partir de los valores de severidad (Δ NBR, $R\Delta$ NBR o RBR) es la delimitación de la superficie afectada por el incendio, ya que existe un gran contraste en los valores de los neocanales de severidad entre la zona incendiada y el resto.

Para generar esta delimitación del perímetro del incendio se puede recurrir a diversas técnicas y fuentes de información. En este caso se ha decidido utilizar la herramienta de Erdas, Image Difference. Esta utilidad genera dos productos: un ráster de diferencias y un ráster de resalte del cambio (Figura 24).

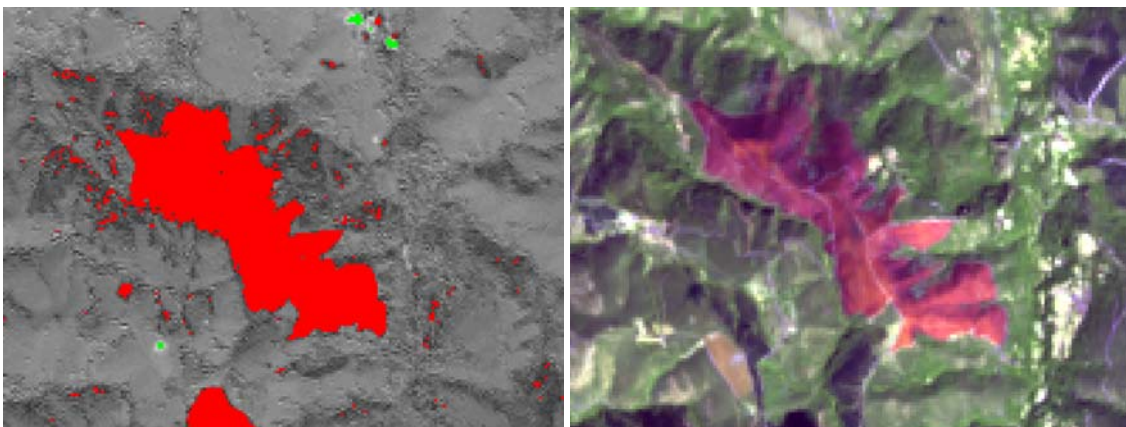


Figura 24: Imagen de resalte de cambios obtenida con la B5 (IRC). Dcha. Composición 764 OLI.

En el ráster de diferencias, a cada píxel se le asigna un valor en función de la diferencia entre el momento previo y el posterior. Dicho valor será empleado en la segunda de las imágenes para realizar una clasificación temática, por la cual, los valores por encima y por debajo de un umbral de cambio serán asignados a las dos categorías representadas como pérdida y ganancia de reflectividad (ráster de resalte).

Para exacerbar las diferencias y que el perímetro de las zonas incendiadas abarque la superficie íntegra, se decide emplear la B5 (IRC) de la imagen pre y post de reflectividad ρ TOA con corrección DOS. La banda de IRC es la que devuelve las

mayores diferencias en el caso de los incendios, dado que mide con mayor precisión el vigor vegetal.

Los resultados obtenidos con las bandas 7(SWIR) y 3 (verde) son completamente distintos (Figura 93) a los obtenidos con la participación de la banda del IRC.

A la vista de los resultados obtenidos, sólo la participación de la B5 es la adecuada para perimetrar los ámbitos de los incendios.

El siguiente paso a la identificación de los píxeles que pertenecen al incendio es generar la capa vectorial.

Desde el propio Erdas, es posible convertir un archivo ráster a formato vectorial, desde el módulo VECTOR, utilizando la aplicación RASTER TO SHAPEFILE. Esta herramienta genera una capa vectorial basada en el análisis de los valores de los vecinos (4 u 8). Entre los límites propuestos por una vecindad y la otra, existen diferencias sutiles, que en el caso del límite de Navia se limitan a la unión entre polígonos (Figura 25).

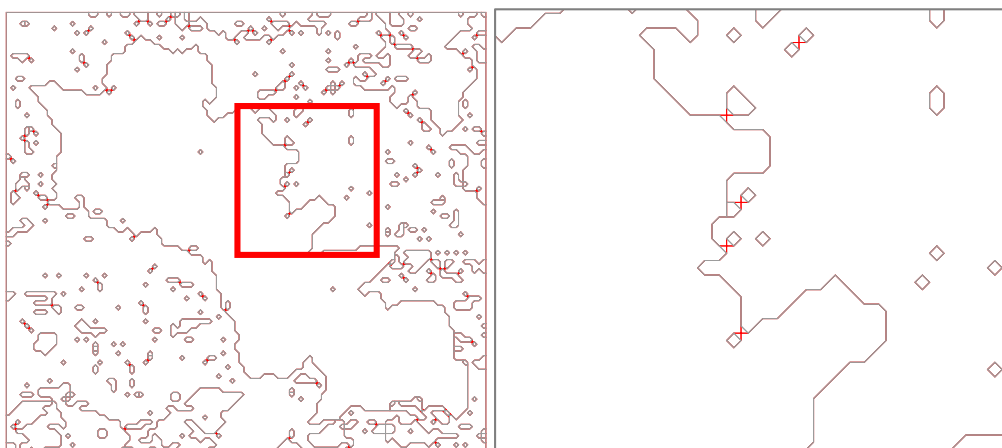


Figura 25: Diferencias entre vecindad de 4 y 8 píxeles

En función de los resultados obtenidos, el método empleado para generar los límites fue el de 4 vecinos, ya que aísla mejor los ámbitos y no genera lazos (cruces en los polígonos) lo que facilita la tarea de edición posterior.

El siguiente paso del proceso requirió de la tarea de eliminación de vectores no pertenecientes al espacio incendiado que se aplicó a los 3 ámbitos.

Una vez terminado este paso se procedió a la unión de los tres límites en una sola capa para una mejor gestión de la información.

3.4. Variables topográficas

Se considera que la información relativa a la topografía, puede ser un factor que explique la severidad y condicione los niveles de regeneración vegetal de los espacios quemados. En el caso de la pendiente es conocido el efecto de propagación que tiene en los incendios; la orientación por su parte, suele jugar un importante papel en la presencia de humedad, en la temperatura de las vertientes o en la intensidad y dirección del viento. Además la altitud juega un papel importante en la cantidad de humedad atmosférica, como ya es sabido (a mayor altura menor humedad)

En este punto, se abordarán los trabajos realizados para la generación de extracción de información topográfica a partir de las fuentes de información utilizadas.

3.4.1. Elevación

La información de altitud se ha incluido en este TFM como una variable que puede ser explicativa del nivel de severidad de los incendios. Será un condicionante de la cantidad de humedad del aire, así como del tipo de vegetación que se encuentra en cada espacio. La vegetación en zonas bajas (O Pindo y Oia), tiene una mayor capacidad de desarrollo de especies arbóreas, frente al predominio de las arbustivas de los espacios más altos (Navia).

Según lo define Felicísimo (1999), un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del territorio.

Según este mismo autor, se deduce que los MDE están codificados en cifras, su construcción está en consonancia con una estructura interna (estructura organizativa de la información), también representa la distribución espacial de la variable altura, y en el formato ráster se trata de una variable cuantitativa y de distribución continua.

El tipo de dato con el que se trabaja esta información de alturas puede encontrarse en los dos modelos de datos (vectorial y ráster). En ambos existen diversos formatos que representan esta información. Desde una red de triángulos irregulares (TIN), las coordenadas XYZ de un levantamiento topográfico, la nube de puntos de los sensores LiDAR, o los datos interferométricos de los sensores radar.

En este TFM se ha optado por la información de libre acceso más precisa disponible para los ámbitos. Dicho producto es el MDE de pixel de 25m de resolución, que es

elaborado por el IGN y que procede del remuestreo de la nube de puntos del LiDAR del PNOA.

Esta información es la más adecuada para la extracción de datos cuando se trabaja con imágenes Landsat que tienen una resolución espacial similar. Si bien lo ideal es que todas las fuentes de información empleadas tuviesen la misma resolución espacial, para que la consistencia del procedimiento fuese plena, se asume que una resolución espacial similar es lo suficientemente consistente para la extracción de variables topográficas como apoyo al análisis de severidad de incendios.

El acceso a esta información se realizó a través del portal web del CNIG, donde es posible realizar la descarga de las hojas 50.000 correspondientes (O Pindo hoja 93, Navia hoja 99, Oia hojas 261, 298 y 299).

Los archivos del MDE, se encuentran en formato texto (ASCII), pero su conversión a formato ráster no supone ningún problema tanto desde ArcGIS, como desde cualquier software libre actual (Qgis 2.4).

3.4.2. Superficie normalizada

El ráster de superficies se deriva de la información de alturas de la superficie y de la información de las elevaciones del terreno.

Este ráster se entiende como una descripción geométrica de la superficie topográfica y de los objetos (naturales o artificiales) localizados sobre ella.

También hay que comentar que este MDS normalizado, es un modelo obtenido a partir de la eliminación del dato de elevaciones sobre los objetos, es decir, no se considera la altura local sobre el nivel del mar, sino que se mide la altura relativa entre el objeto y el suelo sobre el que se asienta.

La fórmula aplicada para extraer este dato es:

$$MDS_n = MDS - MDE$$

MDS es el modelo digital de superficie

MDE es el modelo digital de elevaciones.

La información utilizada para la realización del MDSn es el vuelo LiDAR realizado por el PNOA. El procedimiento de filtrado de la nube de puntos y de la interpolación de los archivos filtrados ya ha sido comentado en el apartado 3.1.3.

El proceso de cálculo del MDSn siguiendo la fórmula expuesta anteriormente, se realizó empleando la calculadora ráster de ArcGIS en donde se introdujeron como argumentos de la resta el MDE y el MDS derivados ambos de los archivos LiDAR del PNOA.

Los resultados obtenidos son los mostrados en Figura 39, Figura 40 y Figura 41.

3.4.3. Pendiente

El uso de la pendiente como variable que determina la intensidad o severidad en un incendio, se entiende por el hecho de que a mayor pendiente, mayor es la velocidad de propagación del incendio³⁴. Además la variable pendiente, combinada con la orientación es un factor relevante para agravar el impacto del incendio.

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical. Su estimación es sencilla a partir del MDE y se basa en el cálculo de la pendiente de un plano de ajuste en cada punto o celda del modelo (Felicísimo, 1999).

La información empleada para la generación del ráster de pendientes fue el MDE 25 m descargado del CNIG y descrito en el apartado correspondiente. Para su elaboración se utilizó la herramienta de ArcGIS SLOPE. Los argumentos específicos de la herramienta fueron las unidades de medida de la pendiente, que se definió en porcentajes (%).

3.4.4. Orientación

Como ya se comentó en el apartado anterior, la orientación determina el nivel de humedad de un espacio que, combinada con la pendiente, exacerba la situación de riesgo y de severidad del espacio quemado.

34

<http://www.proteccioncivil.org/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm010.htm#1009f>

Esta variable se define como, “*el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto. Como en el caso de la pendiente, el valor de orientación se estima directamente a partir del MDE*” (Felicísimo, 1999).

La información de partida fue el MDE 25 m, y la herramienta empleada para su generación fue ASPECT de ArcGIS.

3.4.5. Rugosidad

Una pregunta que se puede hacer es en qué medida afecta la variación relativa de la topografía a la severidad de un incendio o a los procesos de regeneración postincendio. Se podría decir que la rugosidad incide en la velocidad de propagación y, por lo tanto, en la incidencia del fuego sobre la cubierta vegetal.

La rugosidad o curvatura se define como la tasa de cambio en la pendiente y depende, por tanto, de las derivadas de segundo grado de la altitud, es decir, de los cambios de pendiente en el entorno del punto. La curvatura tiene especial interés como variable influyente en fenómenos como la escorrentía superficial, canalización de aludes, erosión y flujos en general (Felicísimo, 1999).

El procedimiento seguido para la generación del ráster de rugosidad de cada ámbito fue el descrito en GIS 4 Geomorphology³⁵, donde se exponen un total de 12 procedimientos para la generación del ráster de rugosidad.

El método seguido, fue el RTP (Relative Topographic Position) o TPI (Topographic Position Index) debido a su sencillez de cálculo. Este índice es usado para identificar patrones del paisaje, límites litológicos, geomorfológicos, de procesos, etc.

El procedimiento de elaboración del índice requiere del desarrollo de cuatro pasos:

1. Ráster de elevaciones mínimas minDEM
2. Ráster de elevaciones máximas maxDEM
3. Suavizado del MDE DEMs
4. Aplicación de la siguiente fórmula:

$$RTP = (DEM_s - minDEM) / (maxDEM - minDEM)$$

³⁵ <http://gis4geomorphology.com/roughness-topographic-position/>

La fuente de información empleada para desarrollar todo el procedimiento de elaboración fue el MDE 25 m del CNIG, descrito en el apartado correspondiente.

El resultado obtenido de aplicar este proceso, es un ráster con valores comprendidos en un rango 0 - 1. La interpretación de estos valores es que a mayor valor, mayor es la rugosidad del pixel.

De hecho, se propone una simbolización específica para representar el valor de rugosidad (Figura 50).

3.4.6. Iluminación

El dato de iluminación ofrece información sobre la cantidad de energía solar que se refleja desde la superficie de la tierra, considerando únicamente la topografía, no la cubierta existente.

Este dato permite conocer otra variable más relativa a la topografía y, en este caso, la información aportada da idea del potencial de radiación solar incidente en un punto, este dato se puede relacionar con la temperatura potencial del pixel y con el nivel de sequedad de la vegetación.

Para la elaboración de esta imagen se ha recurrido al módulo de Erdas Shaded Relief. Los argumentos empleados fueron el MDE 25 m de cada ámbito (descargado del CNIG) y los parámetros de elevación y azimut solar. Estos dos últimos argumentos permiten posicionar con precisión la fuente de iluminación para generar los valores correspondientes de iluminación de la imagen pre-incendio y post-incendio.

Se seleccionan estos dos momentos, dado que el valor de reflectividad también pertenece a una fecha y hora concreta, lo que requiere, en la medida de lo posible, que el resto de datos se ajusten de la manera más precisa posible al momento temporal de las escenas Landsat 8 OLI.

Los valores posibles para cada pixel oscilan entre el -1 y 1. Los valores negativos son convertidos a valor 0 dado que no es posible tener iluminación menor que 0, que es la ausencia de luz. Por el contrario, el valor 1 indicaría el máximo valor de iluminación para el valor de azimut y elevación solar respecto de la normal del territorio (Figura 51 y Figura 52).

3.5. Detección de cambios.

La detección de cambios engloba una serie de técnicas enfocadas a la realización de análisis diacrónicos o multitemporales. En concreto, los vectores multitemporales aportan información sobre la magnitud y la dirección de los cambios.

Una vez definida la severidad de los incendios y analizados los niveles de regeneración vegetal mediante los valores de NDII-NDVI, se realiza un análisis multitemporal con el objetivo de determinar la magnitud y el sentido de los cambios producidos entre los dos momentos (antes y después del fuego o inmediatamente después del fuego y de 14 de junio y 9 de julio de 2014).

Este tipo de medición se realiza a través de la comparación de los valores correspondientes a las bandas del rojo y el infrarrojo cercano (similar al NDVI), para un momento T1 y un momento posterior T2. La diferencia de la posición de los valores del píxel en un espacio biespectral, determina en qué dirección es el cambio (regeneración, degradación) y la intensidad del mismo.

Los materiales empleados para la medición del cambio en las superficies afectadas por el incendio, son las imágenes de reflectividad TOA con corrección DOS. Se han utilizado las imágenes inmediatamente posteriores al incendio y las de 2014.

3.5.1. Procedimiento

El proceso de identificación del cambio en cada píxel se desarrolló siguiendo la metodología expuesta en González y Bosque (2008) y en Pérez-Cabello (2011). En este último trabajo se expone la técnica empleada para identificar los cambios producidos en una serie multitemporal de imágenes de satélite. La identificación del cambio se basa en la comparación de las coordenadas biespectrales de los píxeles en un momento T1 y en un momento T2. Los cambios en el tiempo se manifiestan en la posición que ocupan en este espacio biespectral y, por su parte, la magnitud del cambio se determina por la longitud del vector que separa la posición T1 de la T2 (Figura 26).

La información empleada para determinar la coordenada X e Y ha sido la banda del IRC (B5 Oli) y la banda del rojo (B4 Oli). La selección de estas dos bandas está justificada por la sensibilidad que posee el IRC debido a que en este rango de longitudes de onda la vegetación experimenta una alta dispersión de la radiación

incidente al atravesar las membranas celulares. Por su parte la banda del rojo muestra un comportamiento inverso, ya que muestra una baja reflectividad, consecuencia de la absorción de la clorofila para esta longitud de onda. Por lo tanto, el contraste entre el rojo y el IRC es muy marcado en situación de vigor vegetal.

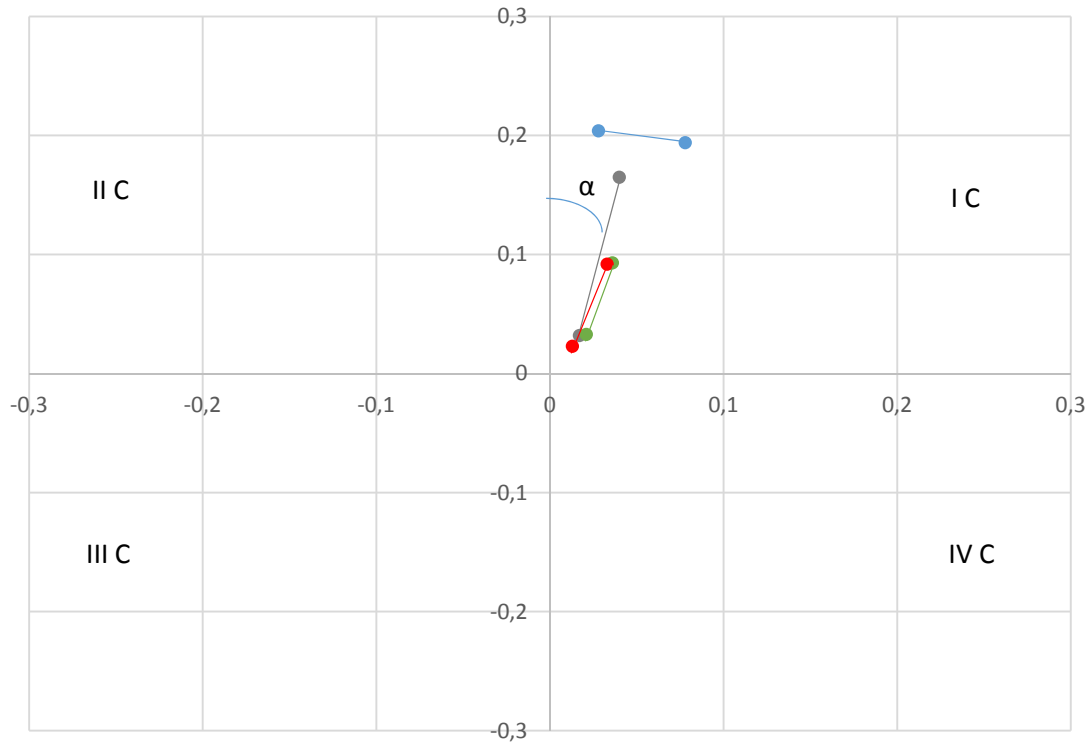


Figura 26: Vectores multitemporales en cuatro píxeles de Navia

La forma de operar con las bandas de cada escena ha sido mediante la aplicación de la fórmula de comparación de los dos momentos.

$$X = (T2_{rojo} - T1_{rojo})$$

$$Y = (T2_{irc} - T1_{irc})$$

Para determinar la magnitud del vector (I) se suman las diferencias entre T2 y T1 considerando X e Y. Como los cambios pueden ser negativos los valores de cada coordenada se elevan al cuadrado para desprenderse del signo, tal y cómo se recoge en la ecuación que aparece bajo estas líneas.

$$I = \sqrt{(X^2) + (Y^2)}$$

Una vez obtenido el vector de intensidad hay que determinar el sentido de dicho cambio (α), utilizando la siguiente ecuación matemática:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{y}\right)$$

Tabla 8: Identificación del cuadrante de cambio

	Argumento	Categoría
Cuadrante I	X >0 e Y >0	1
Cuadrante II	X >0 e Y <0	2
Cuadrante III	X <0 e Y <0	3
Cuadrante IV	X <0 e Y >0	4

Dependiendo del signo de X e Y, se obtendrá un ángulo diferente localizándose en un cuadrante determinado. En la Tabla 8, se indica los valores de los signos de las imágenes y el cuadrante al que corresponden. En base a esta clasificación, se entiende que si X e Y tienen signo positivo se ubicarán en el primer cuadrante y por lo tanto se estaría identificando un píxel con un cambio positivo. El caso opuesto sería el 3er cuadrante donde el signo de X y de Y es negativo, en cuyo caso se estaría ante un píxel con regresión vegetal.

El procedimiento de identificación de la magnitud y del cuadrante de cambio se desarrolló íntegramente en el módulo Spatial Modeller (Figura 27) de Erdas 2014. El modelo aplica el método explicado en los párrafos anteriores, de forma que se obtienen las imágenes de la posición X, la Y, el ráster de magnitud de cambio, el de la identificación del cuadrante y el del valor del ángulo de cambio.

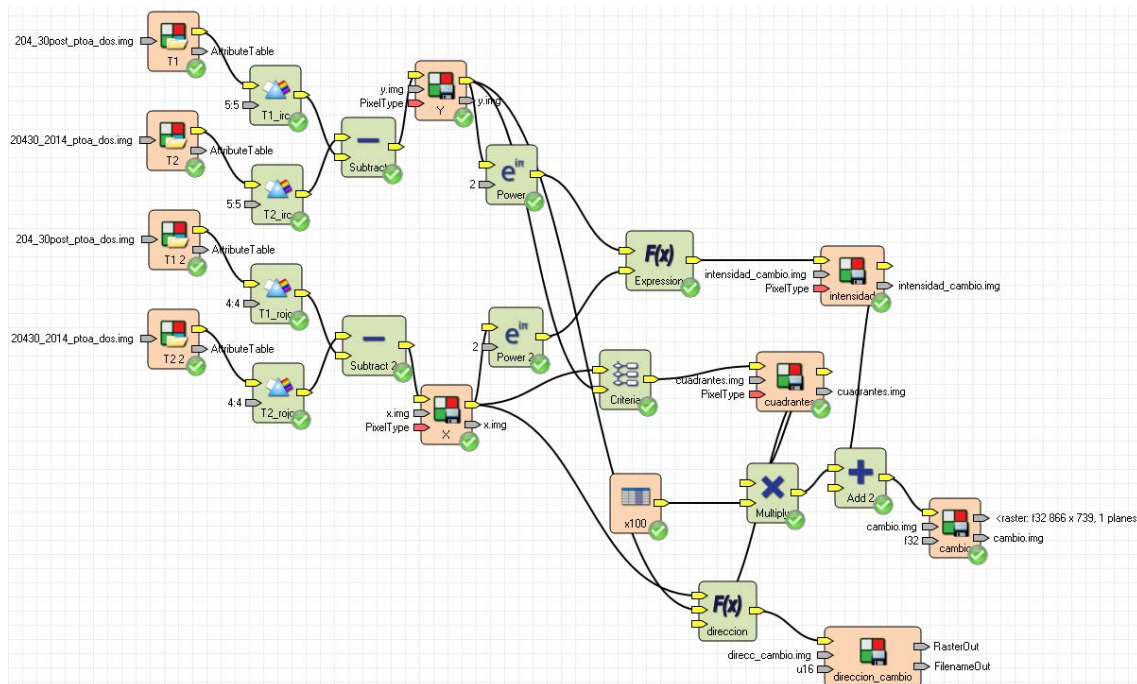


Figura 27: Esquema del modelo de detección de cambios.

Para realizar el mapeo del cambio se ha empleado la fusión de los valores de los ráster de magnitud de cambio y del cuadrante (Figura 53). Para la extracción de la información y su tratamiento estadístico se han empleado los ráster de magnitud de cambio y de valor de ángulo de cambio que fueron agregados a la capa de centroides de los píxeles de las escenas de los tres ámbitos.

3.6. Extracción de la información.

Una vez generada toda la información relativa a las variables de análisis que se quieren estudiar, para determinar cuales tiene un papel destacado en la explicación o no de la severidad de los incendios ocurridos el año 2013, hay que realizar la extracción de la información para su posterior tratamiento estadístico.

El procedimiento de extracción de la información, se ha desarrollado mediante la herramienta de asignación de información de dato ráster a dato vectorial que implementa la aplicación ArcGIS (Extract multi values to points).

Esta funcionalidad permite extraer de forma simultánea la información de varias imágenes y asignarlo a una capa de puntos.

Cada uno de los elementos de la capa de puntos, recibirá la información del pixel sobre el que se encuentran.

El problema de esta herramienta está asociado a su programación, dado que requiere de la lectura completa de los píxeles de la imagen que posteriormente procesa para realizar la intersección.

En el caso de realizar una transformación al vuelo de una imagen respecto a la capa vectorial, y con un tamaño de imagen relativamente grande, el tiempo de procesado puede prolongarse, por lo que se debe reproyectar la imagen y ajustar de forma precisa el tamaño para que su extensión sea similar al de la capa de puntos.

Una vez aplicadas estas directrices, se realizó el volcado de la información generada.

Dado que el análisis estadístico requiere separar una muestra para la comprobación del error obtenido, se realizó una selección de los datos de análisis (75 % de los puntos de cada ámbito), respecto de los de test de validación de resultados (25 %).

Este procedimiento se realizó con la herramienta de Subset Features (ArcGIS).

4. Análisis estadístico de los datos.

La información generada a partir de las variables morfológicas del terreno, de las escenas Landsat y de otras fuentes cartográficas empleadas (Tabla 9), se ha utilizado con el objetivo de tener una visión lo más amplia posible de los incendios objeto de estudio y de sus consecuencias a escala de píxel. Con esta información se ha procedido a realizar los análisis para determinar, en términos estadísticos (1) qué variables son las que influyen en los patrones espaciales de distribución de la severidad y (2) si la regeneración vegetal postincendio presenta algún patrón espacial regido por la severidad del fuego. Por tanto, la cartografía de la severidad adquiere especial relevancia en este trabajo. En este sentido, en apartados anteriores se recogen los procesos de generación de la cartografía de severidad utilizando diferentes métricas publicadas en la literatura científica.

Tabla 9: Listado de variables analizadas

NOMBRE	FUENTE
MDE25	CNIG
Orientación	Derivado del MDE
Pendiente	Derivado del MDE
Rugosidad	Derivado del MDE
MDSn ³⁶	LiDAR PNOA
Iluminación preincendio	Derivado del MDE
Iluminación postincendio	Derivado del MDE
NDVI preincendio	Derivado de Landsat 8
NDII preincendio	Derivado de Landsat 8
NDVI postincendio	Derivado de Landsat 8
NDII postincendio	Derivado de Landsat 8
NDVI 2014	Derivado de Landsat 8
NDII 2014	Derivado de Landsat 8
Δ NBR	Derivado de Landsat 8

La comparación entre éstas no es el objetivo planteado. Sin embargo, para abordar este TFM es necesario seleccionar una única métrica de severidad. Dicho proceso se ha realizado en función de dos criterios. El primero se basa en las características visuales de los resultados obtenidos descartándose la métrica Δ NBR debido a los

³⁶ Modelo Digital de Superficie normalizada.

problemas de saturación que presenta y el elevado número de píxeles que son clasificados como anomalías. En lo que respecta al RBR, se considera que suaviza los resultados, de forma que la categoría más alta en algunos casos desaparece. Por su parte, ΔNBR se sitúa en un punto intermedio entre las anteriores, lo que permite obtener unos análisis más acordes con la realidad.

En segundo lugar, se realizaron análisis de regresión combinando las tres métricas como variables dependientes y explicativas. En el caso de Navia, el ΔNBR es el que obtuvo una mejor correlación con un R^2 de 0.971, frente al R^2 0.519 del $R\Delta\text{NBR}$ y al R^2 0.968 del RBR. En el caso del incendio de Oia, el ΔNBR es el que obtiene la correlación más alta de los tres con un R^2 de 0.921. Por último, en O Pindo también es el ΔNBR el que obtiene el valor más elevado de R^2 (0.913).

Por lo tanto, será el ΔNBR el neocanal empleado en el análisis de la distribución espacial de la severidad, así como en la medición de la severidad en relación con la distribución espacial de la regeneración.

Desde el punto de vista estadístico, se realizan análisis de la varianza con un factor (ANOVA), para conocer el comportamiento de variables de carácter métrico, en cada una de las subpoblaciones establecidas por un factor, en este caso la severidad del incendio. Se trata en definitiva de establecer si la media de las variables continuas difiere significativamente en función de la categoría de severidad. Para ello se utiliza el estadístico F, que compara la variabilidad debida a las diferencias entre subpoblaciones con la debida a las diferencias dentro de éstas. De tal modo que cuanto mayor es el valor de F, mayor es la probabilidad de que haya diferencias significativas entre subpoblaciones, siempre y cuando se respeten unos niveles de significación estadística que, en este caso, se han propuesto en un 95 % ($p\text{-value} < 0.05$). El factor ordinal (severidad) operará como variable dependiente al relacionarlo con variables métricas explicativas de su distribución espacial y cómo variable independiente al intentar identificar su influencia en la regeneración vegetal.

Además, para determinar qué categorías del factor severidad difieren entre sí, se aplicarán métodos para comparaciones múltiples (Post-Hoc), utilizando el test de Bonferroni cuando se asuman varianzas homogéneas y Tamhane en el caso contrario. En este sentido, dada la importancia del requisito de homogeneidad de la varianza en los test de ANOVA, dicho condicionante se analizará mediante la prueba de Levene.

En los siguientes apartados se comentarán diversos aspectos sobre los análisis realizados, así como los resultados obtenidos para cada uno de los incendios.

4.1. Navia

Como ya se anticipó en los párrafos anteriores, el análisis de cada incendio se enfoca en base a dos vertientes de análisis, una primera en la que la severidad es la variable dependiente y una segunda en la que se emplea como variable explicativa para determinar su influencia en la recuperación del espacio incendiado.

4.1.1. El papel de factores estructurales en la distribución espacial de la severidad³⁷

Para las variables analizadas se han obtenido los estadísticos descriptivos mostrados en la Tabla 25. La información contenida en esta tabla es el valor medio (\bar{X}) de cada clase y su desviación estándar (σ). Se observa la relación existente entre el nivel de severidad y las diversas variables independientes. Con algunas variables la relación es positiva (MDE25, Rugosidad, Iluminación preincendio) y en otras es inversa (MDSn). Además de las anteriores, hay que comentar que existen variables categóricas que no pueden ser empleadas para este análisis (Tipo de estrato, Modelo de combustibilidad). En estos casos tan sólo se ha explorado la frecuencia de las categorías de severidad en estas variables.

La Tabla 26 recoge los valores de F y el grado de significación estadística para cada variable. La mayor probabilidad de encontrar diferencias significativas entre clases de severidad las encontramos con la altitud (MDE25), la rugosidad del terreno y los índices de vegetación (NDVI) y humedad (NDII) previos al fuego ($F > 190$).

Al comparar las medias para cada par de subpoblaciones de severidad mediante el análisis post-hoc de Tamhane (mediante la prueba de Levene se observa que no se cumple el requisito de homogeneidad de las variancias), se identifica que, en el caso de las variables orientación, NDVI y NDII pre-incendio, no se producen diferencias significativas (p -value: > 0.05) en cualquiera de los pares (Tabla 27). Por tanto, desde el punto de vista de la significación estadística, aunque se advierten ciertas relaciones generales, la distribución espacial de la severidad no se rige por ninguna de las variables seleccionadas.

³⁷ Disponible la información completa en: <http://webmapmobileedgm.bl.ee/swipe/>

4.1.2. El papel de la severidad en la distribución espacial de la regeneración postincendio³⁸

La otra vía de análisis de los incendios trata la relación existente entre la severidad del incendio y la regeneración que se ha producido en el ámbito, consideradas mediante las variables NDVI_post, NDVI_2014, NDII_post y NDII_2014 (Figura 28). Por tanto, estas variables serán consideradas como variables dependientes, indicando el nivel de regeneración vegetal postincendio. Por un lado, se recoge un descenso continuado en los valores de vegetación y de humedad a medida que se incrementa el grado de severidad (Tabla 28). Por otro lado, la revisión del índice de vegetación postincendio respecto al de julio de 2014, muestra una recuperación en todos los niveles de severidad, siendo más significativa la de las categorías de severidad más extremas.

En lo que se refiere al índice de humedad, también se ha producido un incremento en todas las categorías. Al igual que en el caso del NDVI, el valor de humedad se ha incrementado en mayor grado en las categorías de mayor severidad. La Figura 1 muestra gráficamente los resultados de la distribución de los valores de NDVI y NDII por categorías de severidad.

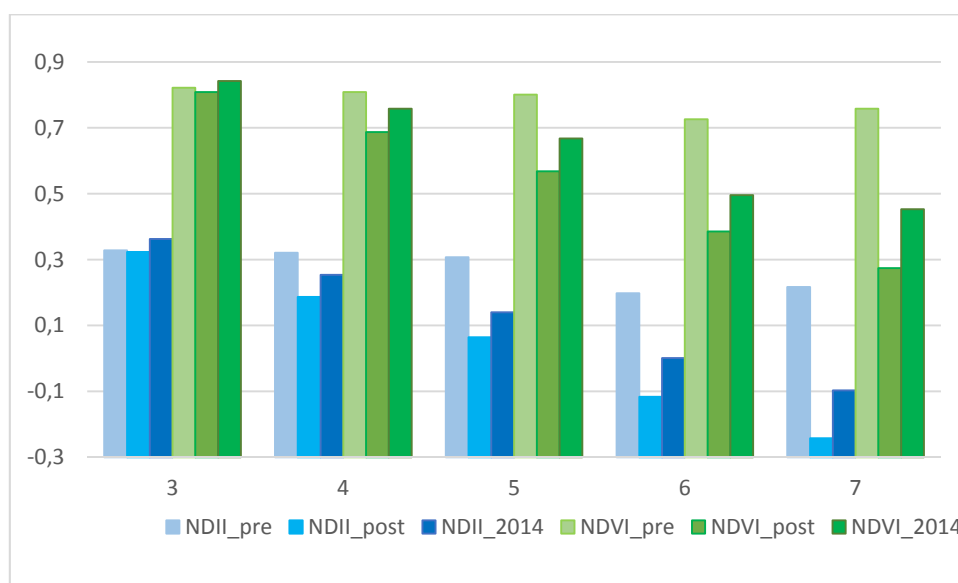


Figura 28: Valores de NDVI y NDII preincendio, postincendio y julio 2014.

En este análisis al no cumplirse el precepto de la homogeneidad de la varianza se realizó un análisis post-hoc (T2 de Tamhane), para un nivel de significación del 0.05 (95 %).

³⁸ Disponible la información completa en: <http://webmapmobileedgm.bl.ee/swipe/>

En lo que se refiere al análisis post-hoc (T2 de Tamhane), los resultados obtenidos dan un valor de 0 en el parámetro Sig. Por lo tanto, todas las categorías de severidad comparadas con todas las variables analizadas indican que existen diferencias desde el punto de vista significativo.

4.1.3. Detección de cambios en Navia.

Los estadísticos descriptivos generales para el ámbito de Navia (Tabla 10) indican un valor mínimo de intensidad de cambio de 0.002 y un máximo de 0.36. La media se sitúa en el 0.08. Por lo que respecta a la dirección del cambio, se localizan valores en todos los cuadrantes, siendo el valor medio de 100.19 °.

Tabla 10: Estadísticos generales de los módulos de dirección e intensidad de cambio en Navia.

	Dirección	Intensidad
\bar{X}	100.19	0.08
Máximo	359.99	0.36
Mínimo	19.70	0.002
σ	79.88	0.04

En el ámbito de Navia el 90 % de los píxeles presentan una dirección de cambio localizada en el 1er cuadrante. Los datos descriptivos de estos píxeles (Tabla 11) muestran un valor medio de 75 ° y una intensidad media de cambio de 0.079, muy similar al global del ámbito.

Tabla 11: Estadísticos generales de los módulos de dirección e intensidad de cambio en los píxeles del 1^{er} Cuadrante en Navia.

	Dirección	Intensidad
\bar{X}	75.21	0.079
Máximo	89.98	0.33
Mínimo	19.7	0.002
σ	7.60	0.03

Los datos medios de algunas de las variables morfológicas y espectrales, desagregados por rangos de regeneración se exponen en la Tabla 12, donde también se muestran las diferencias entre los dos niveles de regeneración.

Tabla 12: Valor medio de variables morfológicas y neocanales por agrupaciones en los espacios de regeneración del 1^{er} Cuadrante en Navia.

	General 1 ^{er} C	<0.1	>0.1
Pendiente (%)	47.04	46.9	47.29
Rugosidad	0.56	0,57	0.54
Altura dosel (m)	0.91	0.86 m	1.18
NDVI preincendio	0.75	0.74	0.79
NDII preincendio	0.21	0.2	0.28
Severidad	6	7	7
Dirección	75.21	73.66	83.25
Intensidad	0.079	0.06	0.14

4.1.4. Datos MODIS - Navia.

Una fuente de información complementaria a los datos extraídos de Landsat 8 OLI, es la que se puede obtener del sensor MODIS. Los productos analizados, LAI y fAPAR, dan información del índice de aria foliar y de la fracción de radiación absorbida fotosintéticamente activa.

La disponibilidad de información de LAI (Leaf Area Index) para los distintos ámbitos es variada. Como ya se indicó, la órbita de los satélites que generan este producto, se degrada, produciéndose un desplazamiento del centro del píxel, que repercute en la no disponibilidad de información (píxeles con un grado de recubrimiento >80 % dentro del ámbito). En el caso de Navia, no se ha dispuesto de información, debido a que la resolución de 1x1km del píxel MODIS para este producto, supera a la dimensión del ámbito y a que no existe ningún píxel que esté englobado al menos en un 80 % por la superficie afectada por el incendio. A pesar de haber disponible un píxel en la imagen preincendio, la variación en la órbita ha modificado la posición de los píxeles. Este hecho repercute en la premisa de ocupación del 80% (Tabla 13).

Tabla 13: Estadísticos generales de LAI de Navia.

	Preincendio	Postincendio	2014	% Pre - post	% Pre - 2014	Diferencia
Navia	mín	5,4	0	0	--	--
	máx	5,4	0	0	--	--
	\bar{X}	54	0	0	--	--
	σ	0,00	0,00	0,00	--	--
	mín (mínimo)	máx (máximo)	\bar{X} (media)	σ (desviación estándar)		

En cuanto a los datos de fAPAR, no se podrá realizar ningún aporte para este ámbito (Tabla 14).

Tabla 14: Estadísticos generales de fAPAR de Navia.

	Preincendio	Postincendio	2014	% Pre - post	% Pre - 2014	Diferencia
Navia	mín	0,93	0	0	--	--
	máx	0,93	0	0	--	--
	\bar{X}	0,93	0	0	--	--
	σ	0,00	0,00	0,00	--	--
	mín (mínimo)	máx (máximo)	\bar{X} (media)	σ (desviación estándar)		

4.2. Oia

4.2.1. El papel de factores estructurales en la distribución espacial de la severidad

El igual que en el caso de Navia, también se han obtenido estadísticos descriptivos (Tabla 30) para las variables analizadas (\bar{X} y σ) siguiendo el mismo procedimiento descrito en el apartado de Navia.

La información obtenida de los descriptivos muestra las posibles relaciones positivas (MDE25 y Rugosidad) e inversas (MDSn) entre los factores explicativos y la variable dependiente.

En el caso de Oia también se han aplicado métodos para comparaciones múltiples (Post-Hoc), utilizando el test de Bonferroni cuando se asuman varianzas homogéneas y Tamhane en el caso contrario. Igualmente se evalúa el requisito de la homogeneidad de la varianza del test ANOVA (Tabla 31) con la prueba de Levene.

En la Tabla 31 se recogen los valores de F y el grado de significación estadística para cada variable. La mayor probabilidad de encontrar diferencias significativas entre clases de severidad las encontramos en la Orientación, Pendiente, el MDSn y el NDII previo al fuego que, como en el caso del incendio de Navia, recoge valores de F superiores a 190. Sin embargo, al comparar las medias para cada par de subpoblaciones de severidad, se observa que no se producen diferencias significativas (*p-value*: >0.05) en algunos pares con variables tales como el MDE, la rugosidad, la iluminación preincendio y los niveles previos al fuego de NDVI y NDII.

4.2.2. El papel de la severidad en la distribución espacial de la regeneración postincendio

La otra vía de análisis de los incendios arroja resultados preliminares en los que se aprecia un descenso continuado en los valores de vegetación y de humedad a medida que se incrementa el grado de severidad (Figura 29). Por otro lado, la revisión del índice de vegetación postincendio respecto al de julio de 2014 muestra una recuperación en todos los niveles de severidad, siendo más significativa la de las categorías de severidad más extremas (Tabla 33).

En lo que se refiere al índice de humedad, también se ha producido un incremento en todas las categorías. Al igual que en el caso del NDVI, el valor de humedad se ha

incrementado en mayor grado en las categorías de mayor severidad (Figura 2). Estos dos parámetros se comportan de forma similar que en el caso de Navia.

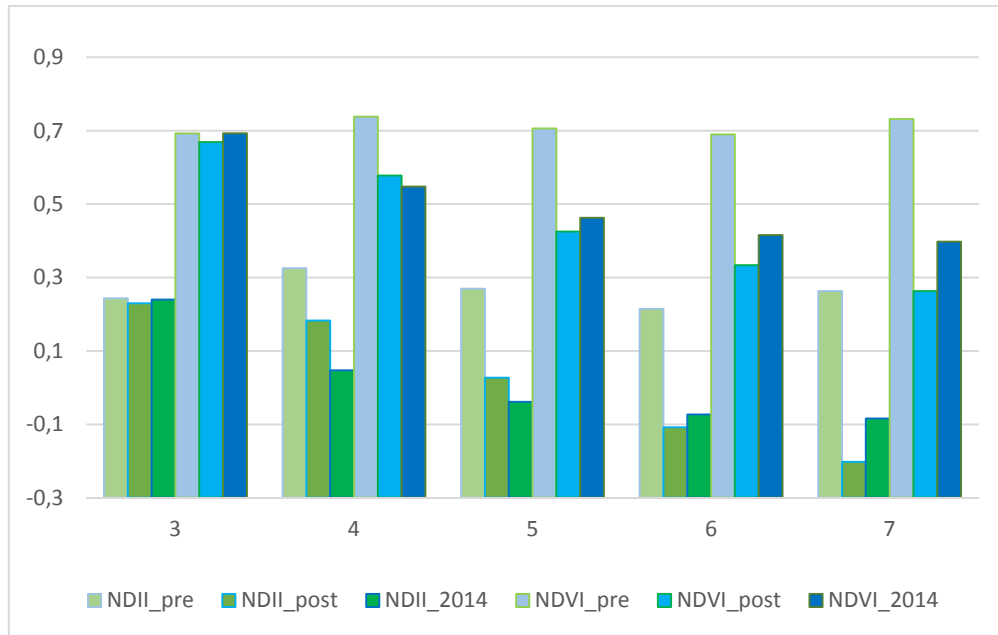


Figura 29: Valores de NDVI y NDII postincendio y julio 2014.

También se ha recurrido a un análisis post-hoc con los mismos argumentos que en el caso de Navia (T2 de Tamhane), al no cumplirse el precepto de la homogeneidad de la varianza.

En lo que se refiere al análisis post-hoc (T2 de Tamhane), en todos los casos la significación estadística es superior a 0.05 lo que es indicativo de que no existen diferencias significativas entre las categorías de severidad.

4.2.3. Detección de cambios en Oia.

Los estadísticos descriptivos generales para el ámbito de Oia (Tabla 15) indican un valor mínimo de intensidad de cambio de 0.003 y un máximo de 0.38. La media se sitúa en el 0.12. Por lo que respecta a la dirección del cambio, se localizan valores en todos los cuadrantes, siendo el valor medio de 81.75 ° situado en el 1er cuadrante.

Tabla 15: Estadísticos generales de los módulos de dirección e intensidad de cambio en Oia.

	Dirección	Intensidad
\bar{X}	81.75	0.12
Máximo	359.99	0.38
Mínimo	3.05	0.003
σ	58.23	0.04

En el ámbito de Oia el 95.71 % de los píxeles presentan una dirección de cambio localizada en el 1er cuadrante. Los datos descriptivos de estos píxeles (Tabla 16) muestran un valor medio de 69.67 ° y una intensidad media de cambio de 0.12.

Tabla 16: Estadísticos generales de los módulos de dirección e intensidad de cambio en los píxeles del 1^{er} Cuadrante en Oia.

	Dirección	Intensidad
\bar{X}	69.67	0.12
Máximo	89.99	0.38
Mínimo	3.05	0.006
σ	9.71	0.03

Las características de los espacios de menor y mayor regeneración se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17: Valor medio de variables morfológicas y neocanales por agrupaciones en los espacios de regeneración del 1^{er} Cuadrante en Oia.

	General 1 ^{er} C	<0.1	>0.1
Pendiente (%)	28.69	29,86	28.3
Rugosidad	0.51	0,51	0.52
Altura dosel (m)	2.90	4.24 m	2.45 m
NDVI preincendio	0.70	0.74	0.69
NDII preincendio	0.25	0.32	0.23
Severidad	5	4	5-6-7
Dirección	69.67	69.18	69.83
Intensidad	0.12	0.07	0.14

4.2.4. Datos MODIS - Oia.

Del ámbito de Oia ha sido posible disponer de 10 píxeles sobre los que realizar el seguimiento.

Los estadísticos generales para el ámbito de Oia sobre LAI se muestran en la Tabla 18. Estos datos indican una pérdida considerable en el momento posterior al incendio. El dato de junio de 2014 muestra una recuperación clara.

Tabla 18: Estadísticos generales de LAI para Oia.

	Preincendio	Postincendio	2014	% Pre - post	% Pre - 2014	Diferencia	
Oia	mín	1,7	0,4	0,8	-76,47	-52,94	23,53
	máx	6,1	1,3	3,2	-78,69	-47,54	31,15
	\bar{X}	2,94	0,82	1,36	-72,11	-53,74	18,37
	σ	1,53	0,25	0,57	-83,66	-62,75	20,92
	mín (mínimo)	máx (máximo)	\bar{X} (media)	σ (desviación estándar)			

En la Tabla 19 se muestra la información general sobre el dato de fAPAR para Oia. En este caso la energía absorbida por la actividad fotosintética se comporta de igual modo que el LAI, con un descenso acusado y una recuperación en el 2014.

Tabla 19: Estadísticos generales de fAPAR para Oia.

	Preincendio	Postincendio	2014	% Pre - post	% Pre - 2014	Diferencia	
Oia	mín	0,6	0,21	0,32	-85,71	-28,57	57,14
	máx	0,89	0,51	0,72	-73,53	-52,94	20,59
	\bar{X}	0,70	0,39	0,46	-81,62	-30,34	51,27
	σ	0,101	0,09	0,09	-72,69	-52,55	20,14
	mín (mínimo)	máx (máximo)	\bar{X} (media)	σ (desviación estándar)			

4.3. O Pindo

4.3.1. El papel de factores estructurales en la distribución espacial de la severidad

Del mismo modo que se ha hecho con Navia y Oia, se han obtenido estadísticos descriptivos (Tabla 35), siguiendo el mismo procedimiento que en los casos anteriores. Se observa la relación existente entre el nivel de severidad y las diversas variables independientes. Con algunas variables la relación es positiva (Rugosidad, NDVI y NDII preincendio, Iluminación preincendio), en otras es inversa (MDSn) y, finalmente, están los casos en los que no se aprecia ninguna relación (Orientación, MDE25).

En la Tabla 36 se recogen los valores de F y el grado de significación estadística para cada variable. La mayor probabilidad de encontrar diferencias significativas entre clases de severidad se encuentra, de manera muy destacada, con los índices de vegetación (NDVI) y humedad (NDII) previos al fuego; en un segundo nivel encontramos variables como la altitud (MDE25), la pendiente y la iluminación.

Al comparar las medias para cada par de subpoblaciones de severidad mediante el análisis post-hoc de Tamhane, no se detectan diferencias significativas (p -value: >0.05) en algunos de los pares en variables tales como MDE, orientaciones, rugosidad e iluminación_pre. Por tanto, desde el punto de vista de la significación estadística, a pesar de estos solapes, se puede afirmar que, la distribución espacial de la severidad está condicionada por variables relacionadas con la vegetación previa (NDV, NDII y MDSn) y variables topo-morfológicas (MDE, pendiente, la iluminación).

4.3.2. El papel de la severidad en la distribución espacial de la regeneración postincendio

Repitiendo el esquema desarrollado en los otros dos ámbitos, se han analizado las variables NDVI_post, NDVI_2014, NDII_post y NDII_2014 con la severidad del incendio.

Los datos expuestos en la Tabla 38 indican, por un lado, un descenso continuado en los valores de vegetación y de humedad a medida que se incrementa el grado de severidad; Por otro lado, la revisión del índice de vegetación postincendio respecto al de julio de 2014, muestra una recuperación en todos los niveles de severidad, siendo más significativa la de las categorías de severidad más extremas (Figura 30).

En lo que se refiere al índice de humedad, también se ha producido un incremento en todas las categorías. Al igual que en el caso del NDVI, el valor de humedad se ha incrementado en mayor grado en las categorías de mayor severidad.

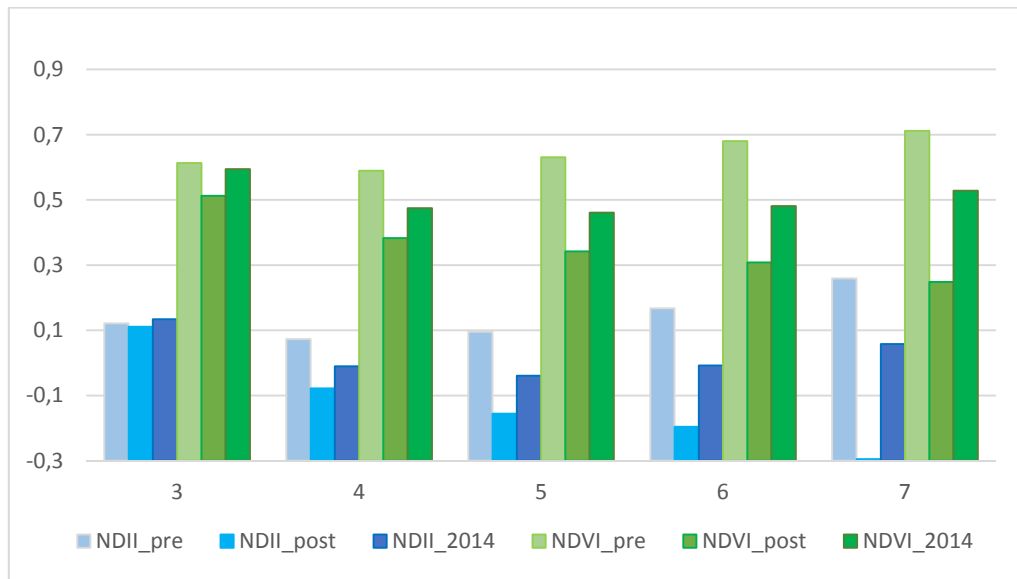


Figura 30: Valores de NDVI y NDII preincendio, postincendio y julio 2014 (O Pindo).

En este análisis al no cumplirse el precepto de la homogeneidad de la varianza (como en los dos casos anteriores) se realizó un análisis post-hoc (T2 de Tamhane), para un nivel de significación del 0.05 (95 %).

Los resultados obtenidos en el análisis ANOVA (Tabla 39), indican que en las cuatro variables explicativas el valor Sig es 0 (diferencias significativas desde el punto de vista estadístico) y el valor de F es muy alto, (mayor probabilidad de hallar diferencias significativas entre los grupos).

En lo que se refiere al análisis post-hoc (T2 de Tamhane), los resultados obtenidos (Tabla 40) indican que no existen diferencias desde el punto de vista significativo.

4.3.3. Detección de cambios en O Pindo.

Los estadísticos descriptivos generales para el ámbito de O Pindo (Tabla 20) indican un valor mínimo de intensidad de cambio de 0.001 y un máximo de 0.47. La media se sitúa en el 0.13. Por lo que respecta a la dirección del cambio, se localizan valores en todos los cuadrantes, siendo el valor medio de 101.14 ° situado en el 2º cuadrante.

Tabla 20: Estadísticos generales de los módulos de dirección e intensidad de cambio en O Pindo.

	Dirección	Intensidad
\bar{X}	101.14	0.13
Máximo	359.99	0.47
Mínimo	0.59	0.001
σ	79.48	0.06

En el ámbito de O Pindo el 90.02 % de los píxeles presentan una dirección de cambio localizada en el 1er cuadrante. Los datos descriptivos de estos píxeles (Tabla 21) muestran un valor medio de dirección de 75.31 ° y una intensidad media de 0.13.

Tabla 21: Estadísticos generales de los módulos de dirección e intensidad de cambio en los píxeles del 1^{er} Cuadrante en O Pindo.

	Dirección	Intensidad
\bar{X}	75.31	0.13
Máximo	89.99	0.47
Mínimo	0.59	0.004
σ	8.34	0.06

Las características de los espacios de menor y mayor regeneración se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22: Valor medio de variables morfológicas y neocanales por agrupaciones en los espacios de regeneración del 1^{er} Cuadrante en O Pindo.

	General 1 ^{er} C	<0.1	>0.1
Pendiente (%)	32.60	45.12	27.52
Rugosidad	0.47	0.48	0.46
Altura dosel (m)	1.01	1.78	0.69
NDVI preincendio	0.65	0.58	0.68
NDII preincendio	0.13	0.01	0.18
Severidad	5-6	4-5	6-7
Dirección	75.31	72.8	76.32
Intensidad	0.13	0.07	0.16

4.3.4. Datos MODIS – O Pindo.

En el caso del ámbito de O Pindo se dispone de 22 píxeles en los que se produce el mismo comportamiento que en los dos casos anteriores, una pérdida de LAI en el postincendio, con una recuperación en el dato de 2014 (Tabla 23).

Tabla 23: Estadísticos generales de LAI en O Pindo.

	Preincendio	Postincendio	2014	% Pre - post	% Pre - 2014	Diferencia	
O Pindo	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
	mín (mínimo)	máx (máximo)	\bar{X} (media)	σ (desviación estándar)			

En lo que respecta al dato de fAPAR, la actividad vegetal sufre una disminución, que se ve amortiguada con el dato de 2014 (Tabla 24).

Tabla 24: Estadísticos generales de fAPAR en O Pindo.

	Preincendio	Postincendio	2014	% Pre - post	% Pre - 2014	Diferencia	
O Pindo	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
	mín (mínimo)	máx (máximo)	\bar{X} (media)	σ (desviación estándar)			

4.4. Análisis test y análisis de igual número de muestras por categorías de severidad

Para despejar las dudas sobre los resultados obtenidos en el análisis de los datos de entrenamiento, se ha realizado una selección aleatoria de puntos (el 25 % del total del ámbito) a modo de verificación.

La muestra del 25 % de los datos de los tres ámbitos, confirma los resultados obtenidos con la muestra principal. Todas las variables analizadas devuelven un valor de significatividad inferior a 0.05, pero el valor de F se reduce en todos los casos respecto a la muestra principal.

El análisis con la muestra del mismo número de valores (100 casos) por nivel de severidad, confirma, de nuevo, los resultados obtenidos con el análisis del 75 % de los casos. Al igual que con la muestra del 25 %, se mantiene el nivel de significatividad en todas las variables analizadas, excepto la orientación en Navia y O Pindo, o la iluminación previa en Oia.

También y al mismo tiempo se reduce el valor F de forma acusada en todas ellas.

5. Discusión

En esta sección se analizan y discuten para cada incendio, los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas y fuentes de información utilizadas, en atención a las dos vías de análisis que articulan el TFM: (1) qué variables afectan la distribución espacial de la severidad (ANOVA); (2) la influencia de la severidad en la regeneración postincendio (ANOVAS, Vector Multitemporal, Datos MODIS)

5.1. Vía 1.

Los datos obtenidos para Navia muestran la existencia de determinadas variables con una posible influencia sobre la distribución espacial de la severidad. Este comportamiento es notorio en el caso de la altitud, donde a mayor altitud se producen los mayores niveles de severidad. Esta relación podría estar condicionada también por la cobertura. En las zonas de vaguada y espacios más bajos se desarrolla un tipo de vegetación con una menor componente arbustiva, mientras que en los espacios más elevados el predominio de las formaciones arbustivas es total. En este sentido la variable MDSn (que aporta información sobre la altura del dosel) indica que la severidad incrementa, sobre todo, con la menor altura del dosel, es decir que el fuego manifiesta una mayor severidad en aquellos espacios en los que la presencia de formaciones arbóreas es inexistente o muy reducida. Otra variable morfológica que presenta una relación directa es la rugosidad, a mayor valor, mayor es la severidad. La iluminación también reproduce un comportamiento similar. Por lo tanto, las variables topo-morfológicas, según los estadísticos descriptivos, muestran una relación directa entre sus valores y el nivel de severidad.

El resultado del análisis ANOVA, apunta al MDE y a la rugosidad como variables con valores de F más destacados, lo que indica que existe una mayor diferenciación entre clases. Esta idea queda refrendada en los análisis post-hoc, asumiendo que las varianzas no son iguales (Tamhane).

Los resultados obtenidos en este análisis muestran cierto nivel de confusión entre categorías, tal y como evidencian los datos de la Tabla 27. En todas las variables analizadas se produce una menor diferenciación entre categorías de severidad más bajas (3, 4, 5). Por el contrario, en las categorías de severidad alta (6 y 7) encontramos diferencias estadísticamente significativas entre clases.

Se evidencia en lo mostrado en la Figura 31 cómo existe una separabilidad entre clases para las variables MDE, rugosidad, MDSn respecto a las categorías de mayor severidad, por lo que se puede anticipar una relación entre las categorías de mayor severidad y estas variables.

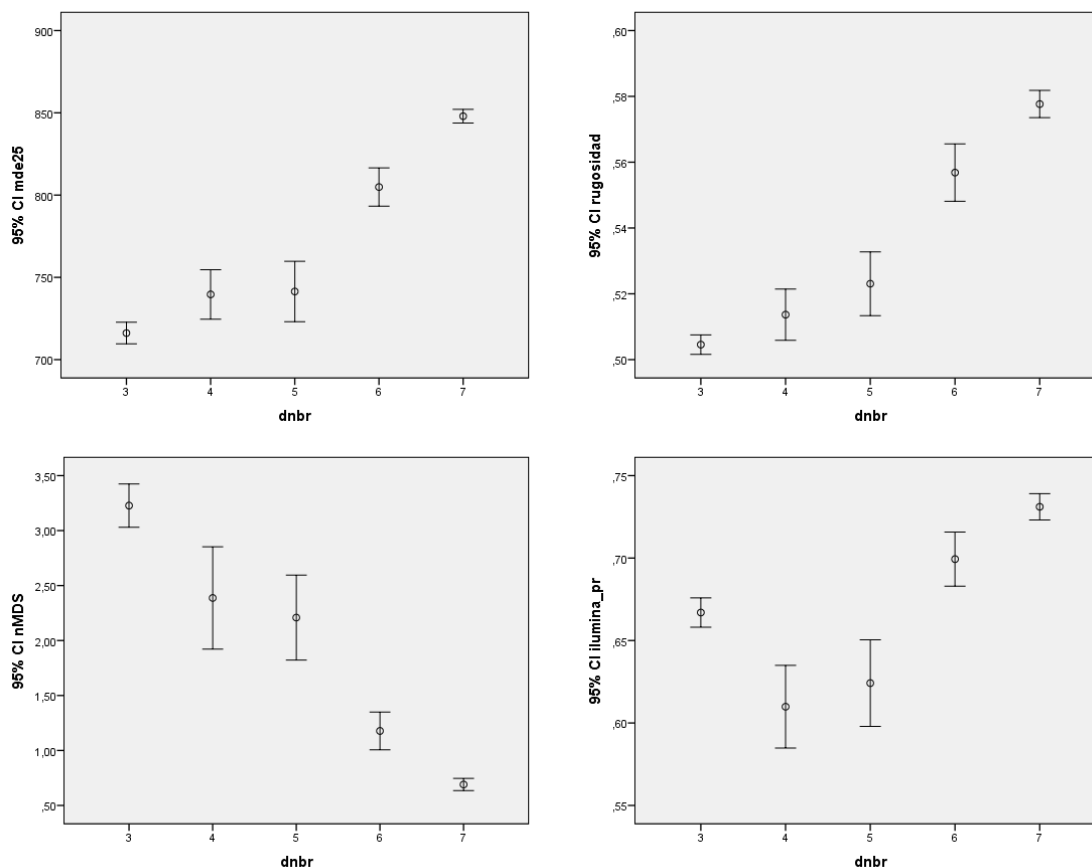


Figura 31: Barras de error (intervalos de confianza para la media 95 %) entre la severidad y las variables analizadas en el incendio de Navia.

El papel de los factores estructurales sobre la severidad del incendio de Oia muestra un comportamiento similar al detectado en el incendio de Navia. Se aprecia la existencia de determinadas variables que parecen tener una correlación directa con el valor de severidad, de tal modo que todas las variables analizadas, especialmente la de carácter morfológico, incrementan su valor con la severidad. La única variable cuya influencia sobre la distribución de la severidad es inversa es MDSn.

El resultado del análisis ANOVA, apunta a la pendiente y a la altura del dosel vegetal (MDSn) como las variables con valores de F más destacados, lo que indica que existe una mayor probabilidad de diferenciación entre clases. Se erigen, por tanto, en las variables con mayor influencia en la distribución espacial de la severidad del incendio.

Los resultados obtenidos en este análisis muestran cierto nivel de confusión o solapamiento entre algunas categorías en el MDE (pares 3 y 5; 6 y 7) (Tabla 32). Además, la categoría 3 parece desvincularse del patrón general de la relaciones en algunas variables (altitud, rugosidad y MDSn). (Figura 32).

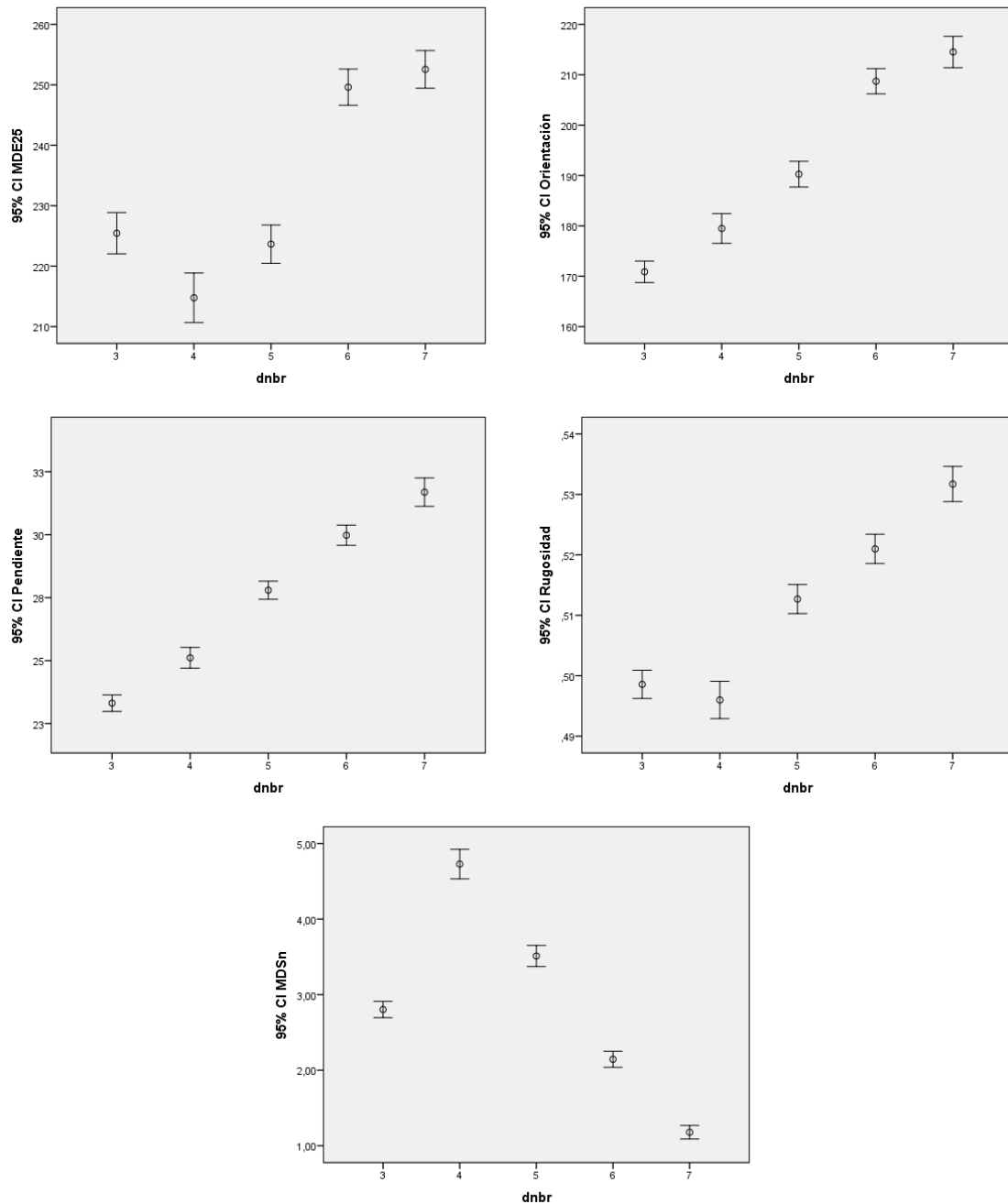


Figura 32: Barras de error (intervalos de confianza para la media 95 %) entre la severidad y las variables analizadas en el incendio de Oia.

Por su parte en el incendio de O Pindo se recogen algunas singularidades en relación con el papel desempeñado por las variables consideradas. En el caso de la rugosidad

y la altura del dosel se observa una correlación directa con las categorías de severidad. En cambio, la altitud y la pendiente presentan relaciones contrapuestas. Es decir, mientras que para las categorías de severidad elevada (5, 6 y 7) la relación es inversa y completamente diferente a lo que ocurre en los otros dos ámbitos, en el caso de las categorías de baja severidad (3 y 4) la influencia es positiva. Esta mayor complejidad del papel de la altitud y la pendiente sobre la distribución espacial de la severidad, responde al diferente perfil lito-morfológico que presenta el incendio de O Pindo y, con toda seguridad, a la consecuencia de su localización costera.

El resultado del análisis ANOVA (Tabla 36), apunta a la altitud (MDE25), a la pendiente y a la iluminación, como las variables topo-morfológicas con valores de F más destacados (> 380), lo que indica que existe una mayor diferenciación entre clases. Los valores más destacados en el F de ANOVA, lo obtiene el NDVI y el NDII previos al incendio (1013 y 1038 respectivamente). Por lo tanto en el incendio de O Pindo, la vegetación previa es el factor que mayor probabilidad muestra para explicar la distribución espacial de la severidad.

En los análisis *post-hoc* (Tamhane), se observa cómo en la mayor parte de variables y categorías no existe solape. Esta separación además está refrendada por el valor de significación estadística ($p\text{-value} \leq 0.05$) que se cumple en la mayoría de categorías, a excepción de determinados casos (Tabla 37 y Figura 33).

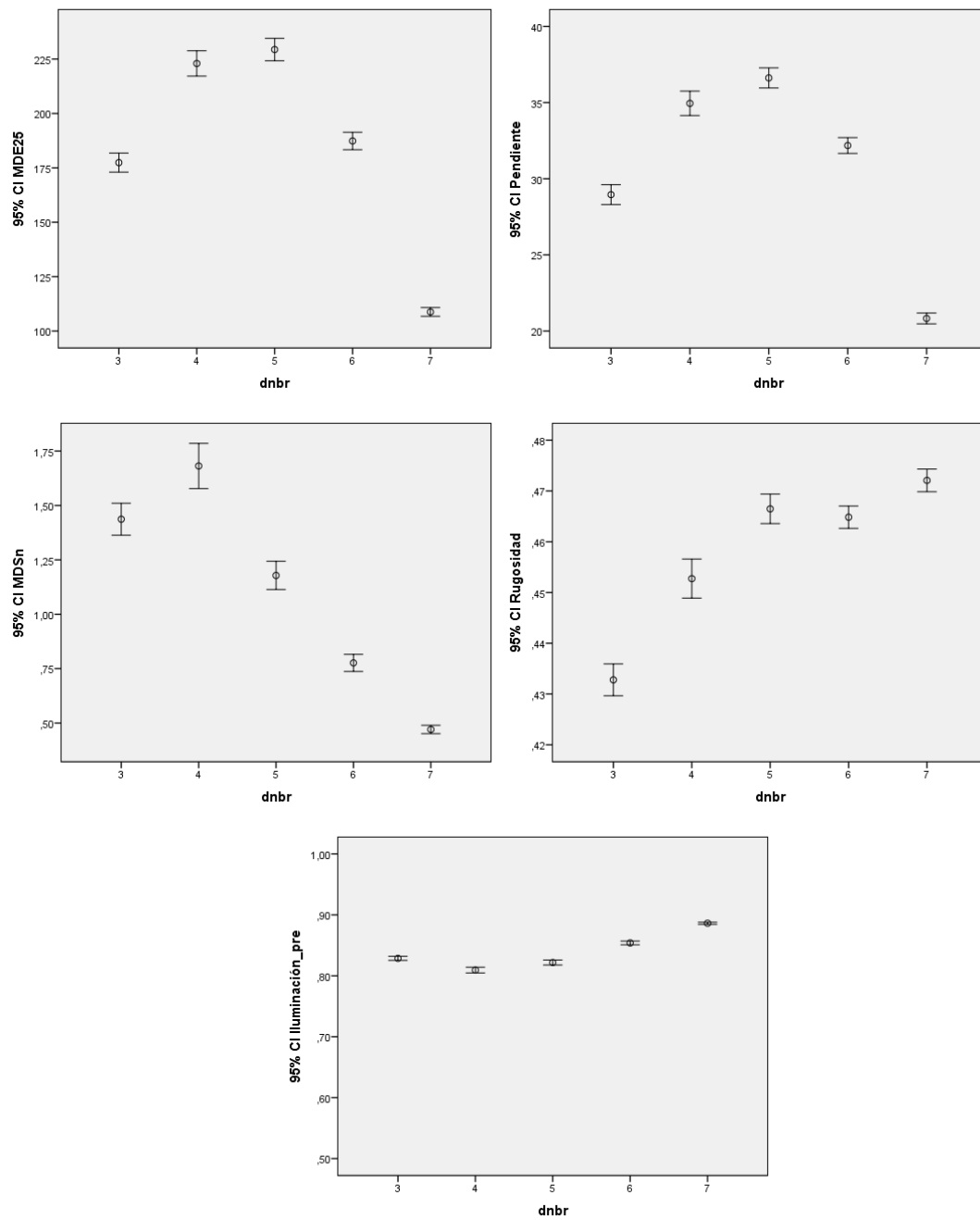


Figura 33: Barras de error (intervalos de confianza para la media 95 %) entre la severidad y las variables analizadas en el incendio de O Pindo.

5.2. Vía 2.

En esta segunda vía de discusión se comentan los resultados derivados de los análisis realizados y de las técnicas aplicadas (vectores Multitemporales), así como también de otras fuentes de información (MODIS), en relación con el papel de la severidad en la recuperación de las zonas incendiadas.

5.2.1. Incendio de Navia

Los datos (Tabla 29) muestran en el parámetro F del estadístico ANOVA, unos valores muy superiores a los obtenidos en la vía de análisis previa. En este caso los datos indican una clara separabilidad de las categorías de severidad y también una clara relación entre el nivel de severidad y el nivel de recuperación.

Atendiendo a los valores iniciales de NDVI y de NDII, en los cuales se aprecia una cierta uniformidad para todas las categorías de severidad, resulta evidente, tanto en el caso del NDVI como en NDII que la severidad es un claro condicionante de los valores postincendio, pasados unos meses (Figura 34).

La respuesta de ambos neocanales en relación a la severidad es similar debido a la alta correlación entre NDVI y NDII.

Los niveles de severidad más altos se corresponden con los menores valores de NDVI y de NDII. Esta relación es indicativa de que la severidad ha condicionado el nivel de recuperación postincendio. Por tanto, en los espacios donde la afección del fuego ha sido mayor, es donde a la vegetación le está costando más regenerarse.

La información referente a los vectores multitemporales, indican que se ha producido una regeneración (dirección) de la vegetación en el 90 % del espacio, y con intensidad (magnitud) de 0.079 (Tabla 11).

Las características morfológicas de estos espacios (Tabla 12), como la pendiente, la rugosidad y la propia composición de la vegetación (MDSn), describen un espacio (sectores cuya dirección de cambio se localiza en el 1^{er} cuadrante) de fuertes pendientes y valores elevados de rugosidad, donde la altura del dosel revela el predominio de formaciones arbustivas (*Ulex europaeus*, *Cytisus scoparia*, etc.) avalado por valores elevados de NDVI preincendio (Figura 28).

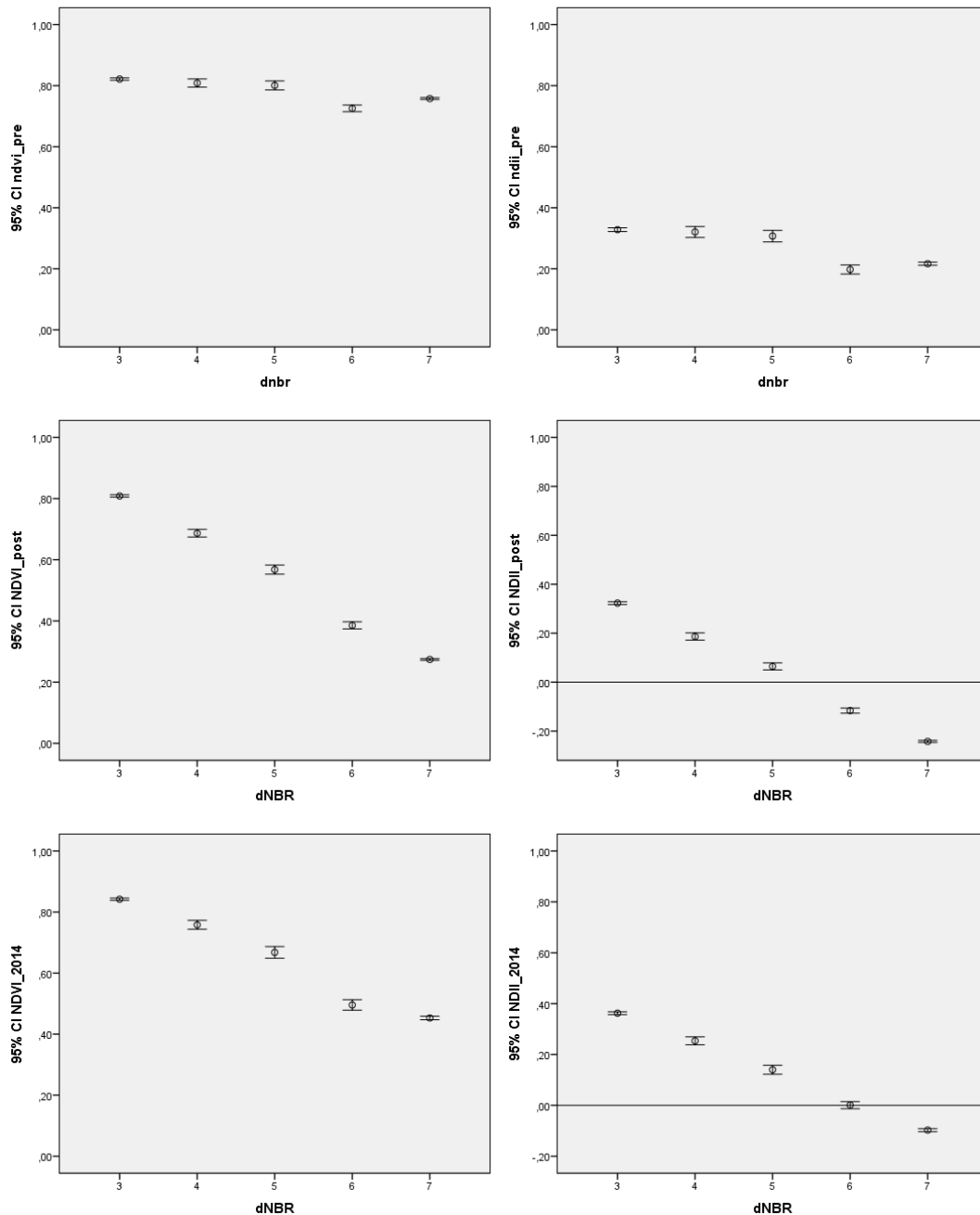


Figura 34: Barras de error (intervalos de confianza para la media 95 %) entre los valores de NDVI y NDII y la severidad en Navia.

La distribución espacial de la regeneración es global en todo el ámbito, pero se localizan sectores de mayor regeneración (> 0.1) principalmente en vaguadas orientadas hacia el norte y el este. En dichos espacios los valores medios previos registrados de NDVI fueron de 0.79 (Tabla 12), y por lo tanto asociados a un alto recubrimiento de vegetación que además tuvieron un vigor vegetal muy alto. La menor regeneración se localiza en los espacios de mayor presencia arbustiva (NDVI preincendio 0.74), situados en las laderas sur y oeste del ámbito, y también asociado a los terrenos de elevada rugosidad.

La evolución de la regeneración también fue analizada a través del estudio de la información proporcionada por el sensor MODIS, en particular de dos de sus productos, LAI y fAPAR. La información obtenida de este sensor, viene a confirmar la información manejada y elaborada a partir del sensor OLI (NDVI, NDII, Vectores multitemporales).

Dado que en Navia no existe ningún píxel con un porcentaje de recubrimiento ≥ 80 % dentro del ámbito, no es posible realizar una verificación sobre los datos de Landsat, pero en los otros dos ámbitos se dispone de varios píxeles sobre los que se hizo un seguimiento.

Igualmente el dato de fAPAR, (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) confirma las tendencias apuntadas en los datos de LAI para los ámbitos.

La información obtenida para el incendio de Navia presenta el mismo problema que el dato de LAI. El tamaño de píxel de 1x1 km no tiene un recubrimiento igual o superior al 80 % en ninguno de los píxeles que se superponen con el ámbito. Por este motivo no se ha extraído información sobre este parámetro.

5.2.2. Incendio de Oia

Los datos obtenidos del análisis estadístico ANOVA muestran en el parámetro F unos valores muy superiores a los obtenidos para el análisis de los condicionantes de la severidad. Tanto en el NDVI como en el NDII postincendio y en el del 2014 los valores superan las 4500 unidades (Tabla 34). Este valor muestra una clara separabilidad de las categorías de severidad y también una clara relación entre el nivel de severidad y el nivel de recuperación.

Atendiendo a los valores iniciales de NDVI y de NDII (Figura 35), en los cuales se aprecia, al igual que en el caso de Navia, una cierta uniformidad para todas las categorías de severidad. Resulta evidente, tanto en el caso del NDVI como en NDII, que la severidad es un claro condicionante de los valores postincendio.

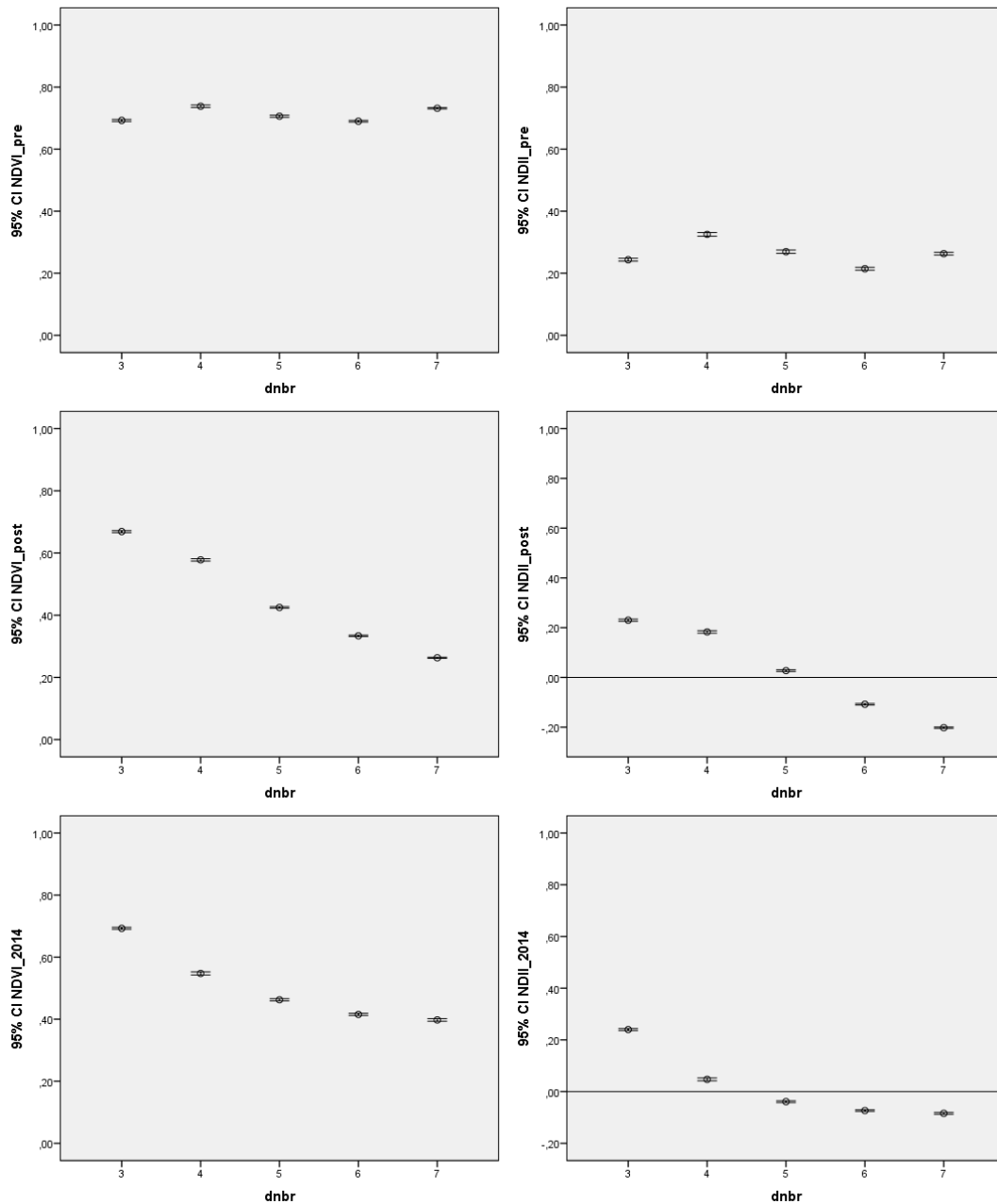


Figura 35: Barras de error (intervalos de confianza para la media 95 %) entre los valores de NDVI y NDII y la severidad en Oia

La respuesta de ambos neocanales es similar en comportamiento y la respuesta de la vegetación y de la humedad decrece con la severidad.

También se aprecia cómo el mayor valor de severidad registra valores de NDVI y de NDII sensiblemente superiores a los de las categorías de severidad intermedias, en el momento previo al incendio, lo que podría ser indicativo de un espacio con una mayor actividad vegetal.

Los datos del 2014 de NDVI y de NDII muestran valores similares en las categorías 6 y 7 de severidad, posiblemente debido a esta mayor actividad vegetal previa al incendio.

La lectura general de la severidad en este ámbito indica, que como en Navia, los mayores valores de severidad se relacionan con los menores valores de NDVI y de NDII, y por lo tanto con la menor regeneración vegetal.

La información obtenida de los vectores multitemporales, indican que en este incendio se produce una mayor intensidad en la regeneración respecto del dato de Navia, tal y como refleja el valor medio para todo el sector (0.12).

La dirección del cambio situada en el 1^{er} cuadrante se registra en el 95 % de la superficie del ámbito con una intensidad media, también de 0.12. Las características morfológicas medias de estos sectores (Tabla 17) muestran unos valores de pendiente media de 28.6 %, junto con un valor de rugosidad de 0.51. Las formaciones vegetales de estos sectores presentan una altura media de 2.9 m, asociado a un porte arborescente (Figura 61). La actividad vegetal generó un valor de NDVI preincendio de 0.7, un valor que indica un alto grado de recubrimiento del suelo así como un importante vigor vegetal.

En la cartografía realizada (Figura 54 y Figura 55) es posible identificar determinados espacios en donde se produce la mayor regeneración del ámbito (> 0.1). Dichos sectores se localizan en las laderas con exposición SE del sector occidental. Estos espacios se asocian a valores de NDVI preincendio de 0.69 (lo que muestra un alto recubrimiento vegetal y una importante actividad fenológica), el tipo de formación vegetal tiene una altura media de 2.45 m, indicativo de formaciones arbustivas / arborescentes, y asociado a un nivel de severidad alta.

Al igual que en el incendio de Navia, en este caso, también se recurrió a la información procedente del sensor MODIS y se sus productos derivados, LAI y fAPAR.

En el incendio de Oia, ha sido posible disponer de 10 píxeles de los que extraer información, ya que cumplen el requisito del 80 %. Los datos obtenidos (Tabla 18) indican una pérdida media de LAI del 72 %, debida al incendio. El valor del 2014 supone una pérdida media del 53.84 % respecto a la situación previa al incendio. Por lo tanto se produce una recuperación en este período. Este dato viene a confirmar la información obtenida mediante la técnica de detección de cambios, que indica un cambio asociado al primer cuadrante así como un valor de intensidad positivo.

El valor medio de la regeneración desde el incendio hasta el 2014 (3 de junio), es del 18 %. Según MODIS, en todo el ámbito la regeneración ha sido principalmente elevada en el sur del ámbito (Figura 56).

El dato de fAPAR (Tabla 19) indica que de media, el valor de pérdida es del 44.69 % en el período inmediatamente posterior al incendio. El dato de junio de 2014 muestra un valor medio de pérdida del 34.72 % respecto al momento preincendio, lo que supone una recuperación de la actividad vegetal del 9.97 %.

Este comportamiento confirma la pauta observada mediante la técnica de detección de cambios y los neocanales generados.

La distribución espacial de la regeneración (Figura 57), es generalizada, si bien los valores más elevados se localizan en espacios aislados del sector sur y del central. Los sectores de regeneración intermedia, a groso modo, se localizan principalmente en el sector oriental. Esta distribución es coincidente con la información de detección de cambios generada a partir de Landsat 8 OLI.

5.2.3. Incendio de O Pindo

Los análisis realizados para el incendio de O Pindo (Tabla 39), muestran unos valores de F (ANOVA) muy superiores (2654 y 4843 para NDVI y NDII postincendio, respectivamente) a los obtenidos para el análisis de los condicionantes de la severidad (MDE, Rugosidad, MDSn, etc.). Por su parte los valores de NDVI y NDII de 2014 (471.06 y 641.91 respectivamente) se ven fuertemente atenuados. Se produce, por lo tanto, un comportamiento diferente del período postincendio respecto al del 2014.

En los datos postincendio se observa una relación inversa respecto del valor de NDVI y NDII previo al incendio, sin embargo este comportamiento se recupera en cierto modo en los valores del 2014. En los valores más elevados de severidad es donde se aprecia una recuperación en los valores de actividad vegetal y de humedad (categorías 6 y 7 de severidad).

Parece evidenciarse un cierto nivel de recuperación ya que los valores de NDVI se sitúan por encima de 0.4 en todas las categorías (Tabla 38). En las más severas los rangos se sitúan entre 0.48 y 0.53. Este mismo comportamiento se aprecia en el valor de humedad.

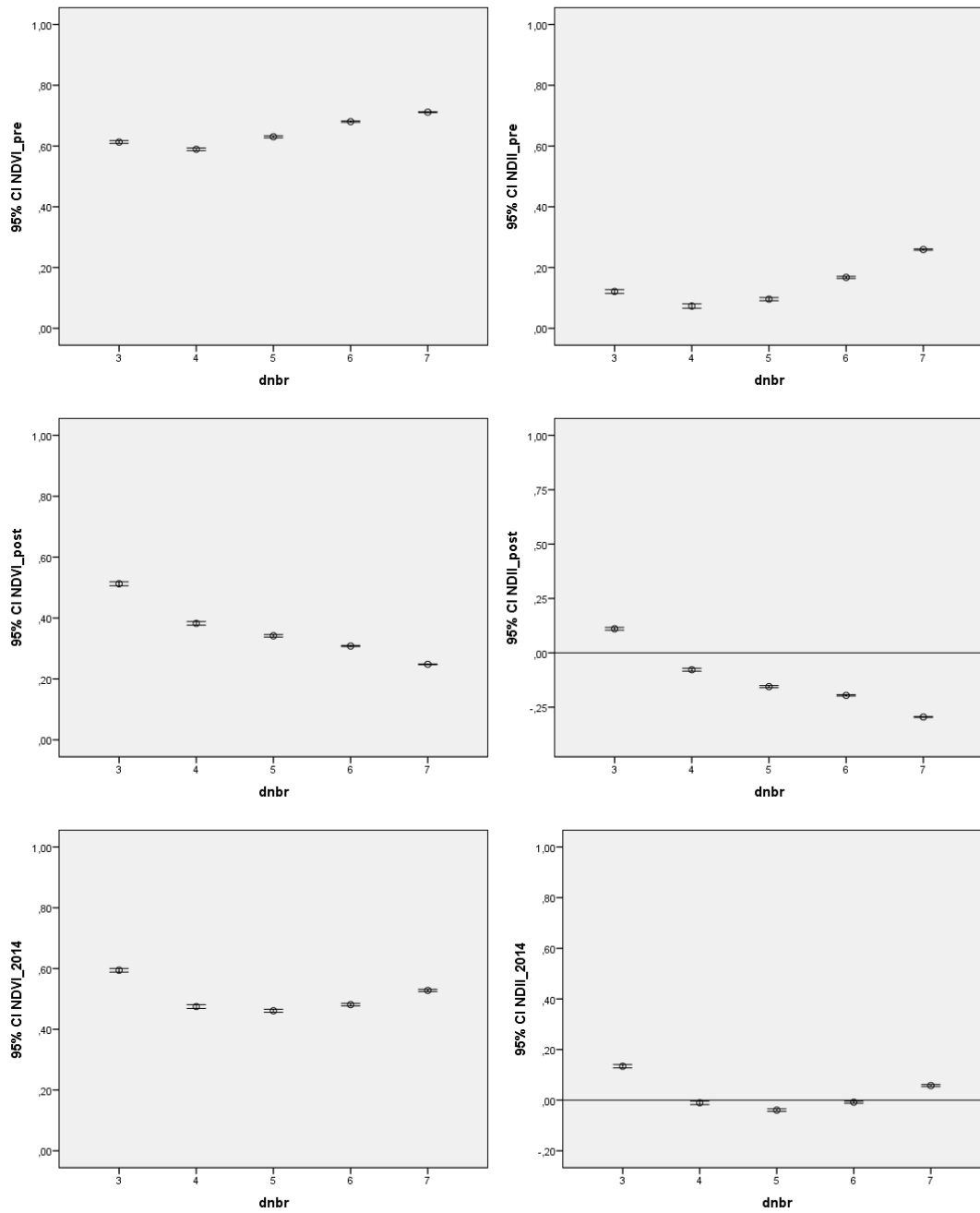


Figura 36: Valores de NDVI y NDII en relación con la severidad en O Pindo

Como ocurría en el caso de Oia, en la categoría de mayor de severidad en el momento previo al incendio, los valores de NDVI y de NDII eran sensiblemente superiores a los de las categorías de severidad intermedias, indicativo de un espacio con una mayor actividad vegetal. Esta mayor actividad vegetal, los valores de NDVII y de NDII en las categorías 6 y 7 de severidad, se comporta con la misma tendencia que los valores previos al incendio (Figura 36).

En el incendio de O Pindo la severidad no parece condicionar el nivel de recuperación de 2014, sino que podría ser debido a las formaciones vegetales previas y a su adaptación a los espacios ardidos.

La información obtenida de los vectores multitemporales (Tabla 20), indican una intensidad media de cambio de 0.13, con un valor medio de dirección de 101.14 °. Los datos específicos asociados al primer cuadrante, mantienen el valor medio de intensidad de cambio (0.13) y un valor medio de dirección de 75.31 °.

Las características morfológicas para estos sectores (1^{er} cuadrante), muestran valores medios (Tabla 22) de pendiente de 32.6 %, rugosidad de 0.47 y finalmente un valor medio de altura de la cubierta vegetal de 1.01m. Estas características se asocian a sectores costeros donde la vegetación tiene un porte arborescente o arbustivo en su mayoría (Figura 64), con un nivel de recubrimiento inferior a los otros dos ámbitos, de hecho los valores previos de NDVI (0.65) apuntan hacia esta hipótesis.

La distribución espacial de los cambios es diversa (Figura 54 y Figura 55). Los máximos valores de regeneración se localizan en una franja pegada a la costa. Valores algo más bajos se encuentran en el sector centro-sur del ámbito. En ambos casos el nivel de intensidad se situaría por encima de 0.1 (Tabla 21). En estos sectores el porte de la vegetación es arbustivo o arborescente (0.69 m), en donde predomina la formaciones de *Ulex europaeus*. Una característica de estas comunidades vegetales es 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 preincendio (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 (Ézaro). Este valor podría estar relacionado con el porte reducido, de la vegetación del sector (Tabla 22), que además es el espacio con valores de severidad bajo y medio-bajo. Los valores obtenidos de NDVI en este espacio confirman la menor actividad y menor presencia de vegetación.

La información obtenida del sensor MODIS, (Tabla 23) muestra que, se ha producido una pérdida media de actividad vegetal del 81.62 % (postincendio). Los valores de LAI de junio de 2014 respecto a los de preincendio, indican que la actividad es inferior en

un 30.34 %. Se habría producido, por lo tanto, una considerable reactivación de la actividad vegetal (51.27 %) entre el periodo postincendio y junio de 2014.

Al igual que en el caso de Oia, de nuevo se ratifican los resultados obtenidos a partir de imágenes Landsat y mediante el uso de vectores multitemporales. Los valores de NDVI, NDII, control de cambios y los de LAI, muestran una regeneración de la actividad vegetal en el momento T2 (junio 2014).

Respecto a la distribución espacial de esta regeneración, la cartografía muestra cómo es el sector centro-occidental el que concentra esta recuperación. Esta distribución de la regeneración de la vegetación (y por ende del LAI) coincide de forma general con lo indicado en la detección de cambios (derivada de información Landsat 8 OLI), salvo por el hecho de que los píxeles de costa, al tener un porcentaje en el mar, desvirtúan la información de LAI, asignando valores inferiores a los obtenidos con Landsat.

El dato de fAPAR, muestra un comportamiento similar al LAI y a los vectores multitemporales, en lo que se refiere al registro de valores de recuperación en la escena de junio de 2014 respecto a los valores postincendio. En este último caso (Tabla 24) el valor medio de los píxeles analizados es de 0,51. Este valor medio se redujo en un 73.1 % en el momento postincendio.

En la escena de junio de 2014, la pérdida media respecto a la situación preincendio supuso el 25.07 %. Por lo tanto se ha producido una regeneración del 48 % respecto al momento postincendio. También en este caso la información de fAPAR, corrobora los resultados obtenidos con Landsat.

La distribución de la recuperación se puede asociar a determinados espacios. El sector occidental es el que reúne las mayores recuperaciones en el valor de fAPAR frente al sector oriental, algo más modesto en los valores registrados. También parece existir una diferencia entre el sector sur (de mayor recuperación) frente al norte.

Este comportamiento coincide con los datos obtenidos de los vectores multitemporales, en donde se ha observado una mayor regeneración de la vegetación en el sector sur del ámbito y en los espacios más próximos a la costa (sector occidental y sur).

En los tres incendios se constata una regeneración en los espacios de mayor severidad, avalado por los valores de NDVI, NDII, LAI, fAPAR y Vectores Multitemporales.

No todos los incendios se comportan de la misma forma, ya que el porte de la vegetación asociado al máximo nivel de severidad, es diferente en los tres ámbitos. En los casos de Navia y O Pindo, son las formaciones arbustivas las que se asocian con la mayor severidad, en cambio en Oia es el porte arborescente.

Los niveles de severidad condicionan la regeneración en los ámbitos de Navia y Oia de forma clara, si bien en O Pindo, esto no sucede. Se apunta a factores como la litología, altitud, clima, formaciones vegetales, como los factores distintivos en estos dos comportamientos. En el caso de Navia y Oia la mayor presencia de formaciones arborescentes o arbóreas, o incluso la capacidad de regeneración de las formaciones, o también la profundidad del suelo, podrían condicionar los niveles de regeneración y por lo tanto limitar esta recuperación.

Sin embargo en O Pindo, las formaciones vegetales de *Ulex europaeus*, y su capacidad regenerativa, muestran un comportamiento diferente, con mayores valores de regeneración en los espacios de más severidad.

6. Implementación de un visualizador web map.

El proceso de estudio de cualquier fenómeno / evento sobre el territorio debe culminar en la difusión de los resultados, de forma que los métodos y la información generada esté disponible para la sociedad, tanto investigadores afines al tema de estudio, como al público en general.

En esta investigación, enfocada a la gestión y seguimiento de los espacios afectados por incendios forestales, una herramienta de gran utilidad son las interfaces web que distribuyen cartografía dinámica.

Este tipo de aplicativos poseen una amplia implantación, como herramientas de gestión para organismos públicos y también como soluciones empresariales (Google Maps). Ejemplos de implantaciones empresariales que dan servicio a la administración provincial son los casos de la EIEL de la Diputación de Pontevedra (<http://ide.depo.es/visor.html>), o el visualizador web del Instituto de Estudios do Territorio a nivel autonómico (<http://visorgis.cmati.xunta.es/cdix/mapa.html>), o el caso de visualizadores web de los distintos ministerios de la administración estatal (<http://sig.magrama.es/bdn/>).

Este tipo de experiencias, acercan la información al ciudadano de forma que le permite realizar una valoración y gestión de aquellas cuestiones territoriales a las que se tiene que enfrentar en el desarrollo de sus actividades.

6.1. Arquitectura del sistema

La implantación de un visualizador web de cartografía requiere de una arquitectura específica basada en un hardware y software concreto, valorando sobre todo, el número de usuarios potenciales que accederán al recurso web generado.

Se puede partir de una arquitectura diseñada para un acceso de un número reducido de clientes de forma simultánea, lo que no requeriría de un hardware y software potente, hasta una solución empresarial basada en un sistema de servidores con sistemas operativos específicos de servidor, con gestión de accesos simultáneos, claramente un producto mucho más complicado de mantener y también mucho más caro.

Además de valorar el acceso concurrente al sistema, también hay que realizar un estudio pormenorizado de los costes de implantación y mantenimiento. En este sentido se disponen de dos tipos de soluciones, aplicaciones propietarias basadas en software de pago y soluciones gratuitas, basadas en software libre.

Las soluciones empresariales de pago como ArcGIS Online (existe una versión gratuita con funcionalidad limitada) o Geomedia WebMap, se apoyan en arquitecturas que configuran el acceso a la información, basándose en los estándares OGC.

La solución de Esri, ArcGIS Online, permite al usuario disponer de una cuota de almacenamiento para entidades vectoriales que puede configurar para generar una cartografía web map, disponible para cualquier usuario (<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgisonline>). Además de este producto básico, también dispone de soluciones más complejas, con opciones de edición vía web y soporte para formato ráster.

En lo que respecta a Geomedia, el producto web map es una aplicación que gestiona el acceso a los repositorios cartográficos y configura los servicios web a los que da soporte.

Dado el contexto económico actual y pensando en el control de gastos por parte de la administración y las empresas, la solución de arquitectura más eficiente sería la basada en software libre. Desde el punto de vista del sistema operativo, el sistema Linux es el más recurrente, además este sistema operativo dispone de software para implementar toda la arquitectura web map.

La solución adoptada en este trabajo es mixta, por un lado un sistema operativo propietario, basado en Windows server (facilitado por el departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza). Por otro lado, software libre encargado de levantar el servicio, atender a las peticiones de los clientes y disponer de una interfaz web amigable.

En lo que respecta a la aplicación responsable de gestión del repositorio cartográfico y de generar los servicios web, me decanto por el uso de MapServer, si bien la alternativa a este software (Geoserver) dispone de una interfaz web lo que facilita la gestión, resultando un producto más atractivo.

La librería que permite visualizar la cartografía es Pmapper. Esta librería, al estar basada en MapServer y no en Geoserver, condiciona la elección del servidor web de mapas.

Para poder entender mejor el funcionamiento del sistema en la Figura 37 se muestra un esquema de la interacción del hardware y el software.



Figura 37: Esquema de la arquitectura del sistema web de mapas.

El sistema funciona en base a tres parámetros o elementos fundamentales. El primero de ellos, el servidor cartográfico, es el que sustenta el funcionamiento del conjunto y es el que define los servicios OGC que se van a ofrecer y también el que atiende a las peticiones de los clientes.

Además de esto, es el soporte para la comunicación con el repositorio y la librería web de mapas. Esto se hace a través de un servidor web, que en el caso de MapServer es Apache Tomcat, que se encuentra embebido en la propia instalación.

El segundo de los parámetros básicos de este sistema es el repositorio cartográfico. En este punto, podría haberse optado por un sistema más robusto de gestión de cartografía y bases de datos espaciales, pero al ser un número reducido de capas, así como una cantidad limitada en número y en extensión de imágenes, el repositorio es la opción más cómoda y que ofrece un rendimiento similar.

El tercero de los elementos en este sistema es la aplicación o librería web de mapas. En el momento actual, la oferta de librerías web map es múltiple, tanto en soluciones

comerciales, como en software libre. Los ejemplos de soluciones libres más habituales son Openlayers, Pmapper, Leaflet, Geoext, QuickMaps, etc.

6.1.1. Librería empleada

En el caso de la estructura creada, la utilización de Pmapper supone una ventaja añadida respecto a otras librerías web map, ya que el aprendizaje de la librería es sumamente rápido y no requiere de conocimientos previos de programación, ya que es una librería muy completa con multitud de herramientas y funcionalidades ya desarrolladas, que sólo requiere de su agregación a la estructura del fichero de configuración (Figura 99).

Esta librería genera una interfaz muy intuitiva que además permite obtener información sobre la cartografía, tanto vectorial como ráster. Además, es posible realizar análisis de atributos sobre las capas vectoriales, algo muy interesante dado que en la actualidad son pocas las aplicaciones libres que disponen de este tipo de funcionalidad (Geoext) o, en todo caso, el desarrollo de herramientas de análisis es complejo.

Estos tres elementos se integran sobre un sistema operativo que como ya se ha dejado entrever puede ser propietario (Windows) o libre (Linux).

Este sistema de software se integra, claro está, en un hardware, que debe caracterizarse por una rápida respuesta para las peticiones de los clientes, por lo que la velocidad de procesamiento y de acceso a la información es clave; en este sentido, las nuevas generaciones de procesadores así como discos duros sólidos (SSD) y RAM son claves para superar con éxito las demandas de los clientes.

Finalmente, el sistema se integra en internet, por lo que es necesario una conexión paritaria, que permita altas velocidades de subida de datos, ya que es la clave de una rápida respuesta para el cliente. El servidor, recibe peticiones de teselas de determinados sectores que debe gestionar y enviar a través de la red al cliente.

6.1.2. Servicios OGC definidos.

Como ya se comentó en el apartado anterior, MapServer es una aplicación que gestiona servicios web de mapas y conecta los servicios con la cartografía existente

en el repositorio. Una vez definido el servicio y la forma en la que se verá la información (la simbología de cada capa y los rangos de zoom), esto es lo que se distribuye cuando se atiende una petición de un cliente.

Los servicios definidos (Figura 98) para esta estructura son dos: un servicio web de mapas (WMS) y un servicio web de entidades (WFS). No se consideró necesario la implementación de un servicio web de entidades de tipo transaccional (WFS-T) dado que el objetivo de este sistema no es el de permitir la modificación de la cartografía vectorial sino la de permitir su descarga.

Tampoco se consideró necesario la integración de un servicio web de coberturas (WCS) dado que la idea es utilizar la interfaz web, para acceder a los datos, si bien desde un SIG desktop se puede acceder a ambos servicios.

Las características de cada uno de estos servicios son las siguientes:

WMS

- Nombre del servicio → “wms_name”
- Versión del servicio → “wms_server_version”
- Formato de imagen → “wms_format”
- Sistema de coordenadas → “wms_srs”
- Acceso al servicio WMS → “wms_onlineresource”
- Acceso a los atributos de la capa → “wms_getfeatureinfo”
- Acceso a las peticiones sobre la capa → “wms_enable_request”

WFS

- Nombre del servicio → “wfs_name”
- Versión del servicio → “wfs_server_version”
- Formato de imagen → “wfs_format”
- Sistema de coordenadas → “wfs_srs”
- Acceso al servicio WFS → “wfs_onlineresource”

Los parámetros especificados, permitirán el acceso a la información de forma que la interacción entre el cliente y el servidor se gestionará correctamente, es decir, el cliente dispondrá en todo momento de la información acerca de cada una de las capas, los metadatos. De esta forma, el cliente dispone de la información necesaria

(sistema de coordenadas de la capa) para utilizarla de forma correcta (definición de los parámetros de transformación adecuados en el caso de que sea preciso).

Las especificaciones dispuestas en el portal de OGC para el servicio WMS en la versión 1.3.0 indican que se han de definir las capacidades del servicio. Deben devolver información sobre las características del servicio (GetCapabilities), sobre los atributos de las capas (GetFeatureInfo) y devolver una imagen del área solicitada (GetMap).

Tanto el servicio de solicitud del mapa (GetMap) como el de acceso a los atributos de las capas (GetFeatureInfo), está gestionado por la librería web map. El acceso a las características del servicio (metadatos del servicio, sistemas de coordenadas empleados, capas servidas, etc.), es posible a través de la URL del propio servicio WMS introducido en un navegador web (Figura 104).

6.2. Configuración de las aplicaciones

Las configuraciones realizadas sobre el servidor web de mapas, a parte de la propia instalación y de la creación de los servicios de inicio del servidor web Apache, se centran en dos aspectos. Por un lado, la configuración de una tarea en el sistema operativo que ejecute el archivo .bat que permite eliminar los temporales generados por el cliente y, por otro lado, la modificación del archivo htdocs en donde se configuran los parámetros precisos para que se acceda al servicio WMS desde una aplicación cliente de tipo pesado (Figura 105).

En lo que se refiere al archivo .map, almacena las características de la extensión espacial del servicio, la versión de los servicios WMS y WFS, así como todos los aspectos de referidos a las capas (Figura 101).

En la Figura 38 se puede ver la configuración empleada en la conexión al servicio WMS del PNOA, del que se agrega la ortofotografía.


```

LAYER
  NAME "PNOA"
  TYPE RASTER
  STATUS OFF
  TRANSPARENCY 100
#   MAXSCALE 25000
  CONNECTIONTYPE WMS
  CONNECTION "http://www.ign.es/wms-inspire/pnoa-ma?"
  METADATA
    "wms_name" "OI.OrthoimageCoverage"
    "wms_title" "Ortofotos PNOA máxima actualidad"
    "wms_server_version" "1.1.1"
    "wms_srs" "EPSG:32629 EPSG:4326"
    "wms_format" "image/png"
    "wms_style" ""
  END

  TEMPLATE void
  PROJECTION
    "proj=utm"
    "zone=30"
    "ellps=intl"
    "units=m"
    "no_defs"
  END
END

```

Figura 38: Estructura de una capa de tipo WMS, ejemplo del PNOA.

En la Figura 100 se puede ver el detalle del acceso a un ráster (.tif) del repositorio, en el cual se definen las características del servicio WMS así como los parámetros empleados para la obtención de información (GetFeatureInfo) del píxel sobre el que se solicita dicho dato.

Respecto del archivo de configuración de Pmapper, los parámetros más significativos que se incluyeron, fueron los referidos a los plugins que se cargan. En este sentido, los plugins llamados fueron el de medición de distancias y áreas (measure), el de obtención de coordenadas de un punto (coordinates), o el de posicionamiento en unas coordenadas dadas (locate xy).

Además de los complementos, también se configuró la funcionalidad de búsqueda (search), de forma que al seleccionar uno de los incendios de la lista desplegable, se haga zoom sobre el incendio en cuestión (Figura 102).

Como resultado de la combinación de las aplicaciones descritas y de las configuraciones mencionadas, se obtiene una herramienta que pone en disposición del gestor o del público en general, información sobre las características del incendio.

Además, dispone de la funcionalidad de impresión de mapas (Figura 103) con la información que se muestre en la vista de Pmapper, lo que permite realizar salidas gráficas para agregar a informes o para trabajo de campo en tareas de gestión de la recuperación de los espacios forestales.

Esta aplicación dispone además de información relativa a cada capa en forma de metadatos (ISO 19135) (Figura 106) lo que hace más eficiente, ya que permite conocer todos los detalles de la información que se está manejando.

En definitiva, la integración de toda la información generada en este trabajo de fin de máster, sobre los incendios más relevantes de Galicia en el año 2013 cumple una serie de propósitos:

- Accesibilidad a la información.
- Contrastar la información ofrecida por los organismos oficiales.
- Comprobar la evolución de la recuperación de los espacios incendiados.
- Cotejar la validez de los procedimientos aplicados.
- Informar a la sociedad de los espacios incendiados y concienciar sobre el periodo transcurrido hasta la recuperación de un espacio incendiado.

A la vista del potencial de esta herramienta y de la importancia de la difusión de la información a través de internet, es necesario y prácticamente obligatorio la implantación de estos sistemas para la difusión de las investigaciones cuyo resultado sea, como en este caso, una cartografía.

6.3. Visualizador swipe

Otro de los aportes de este TFM es el uso de un visualizador web map con la característica de poner en comparación cartografías multitemporales o realizadas con procedimientos distintos (Figura 107).

En este TFM se pone en comparación los resultados obtenidos de Δ NBR, $R\Delta$ NBR y RBR para los tres ámbitos.

Para implementar esta tecnología es posible realizarlo con software propietario (Esri)

<http://www.esri.com/services/disaster-response/hurricanes/hurricane-sandy-the-aftermap>, o software libre (Openlayers) <http://ol3js.org/en/master/examples/layer-swipe.html> .

En este TFM se ha optado por aplicar el producto dependiente de la empresa ESRI, que con las funcionalidades requeridas es un producto con coste 0 € y que permite la incorporación de un ráster de fondo reciente y de buena resolución espacial.

6.3.1. Aplicación de la solución Esri

En el caso de software propietario, Esri dispone de librerías que pueden añadirse a cualquier página web e incorporar la interfaz y los controles para visualizar la información cartográfica deseada.

Los requisitos para esta solución, pasan por:

- a) Disponer de una cuenta de usuario en ArcGis.com
- b) Realizar dos mapas con capas vectoriales o ráster del mismo espacio y en momentos o elaborado con procedimientos distintos.
- c) Integrar en la página web personal las librerías modificadas (agregando el id de cada mapa)

Con estos requisitos es posible montar un visualizador web map como el que se ha desarrollado para este TFM.

6.3.1.1. Procedimiento para implementar el visualizador swipe

Como ya se comentó anteriormente, el primer paso que hay que cumplir, es disponer de una cuenta en Arcgis.com del tipo Public Account (gratuita con un tamaño de almacenamiento limitado a 2Gb y con restricción en el tipo de información que se puede agregar, capas vectoriales y archivos de texto).

Este tipo de cuenta de usuario permite crear mapas en los cuales se puede alojar información vectorial, si bien el número de registros por capa no puede superar las 2000 entidades en formato shp. Este valor se reduce en otros formatos.

Una opción para saltarse esta restricción es la de utilizar un servicio WMS como capa de forma que se sirve una imagen que puede estar mostrando un número muy superior de entidades.

En el momento de la realización de este TFM y con el tipo de conexión a internet disponible (IP dinámica), no fue posible utilizar esta solución.

7. Conclusiones

El uso de la información espectral derivada del sensor OLI (*Operational Land Imager*) se ha constatado como una fuente de información apropiada en la diagnosis del estado de las formaciones forestales y, por extensión, del nivel de severidad de los incendios y del nivel de recuperación de la vegetación tras el fuego. Aunque en el momento de la realización de la corrección de las imágenes (junio 2014) no se había facilitado la información suficiente por parte del USGS, para realizar la corrección completa de las imágenes (reflectividad superficial con corrección atmosférica y normalización topográfica) los niveles de corrección empleados (TOA-DOS) han permitido establecer comparaciones precisas entre distintos territorios y fechas.

Las distintas métricas de severidad que se han considerado, se han mostrado útiles para el seguimiento de las áreas quemadas. En este sentido, se ha comprobado cómo el ΔNBR es la métrica que proporciona mejores resultados en los incendios analizados. También se ha constatado que el $R\Delta\text{NBR}$ satura los resultados, generando anomalías y, en el caso del RBR, se produce el efecto contrario, una suavización en los niveles de severidad.

Se ha constatado la idoneidad de emplear información sobre parámetros biofísicos para el análisis de la regeneración forestal, fAPAR y LAI. En este sentido, el uso de los productos derivados del sensor MODIS, resulta útil para este fin, aunque con puntualizaciones. El estudio de series multitemporales de imágenes, se ve comprometido, por los problemas en la variación de la posición de los píxeles en momentos distintos, lo que genera un problema de concordancia espacial y que, por lo tanto, obliga a cuestionarse la comparabilidad de los datos obtenidos.

Por otro lado, la información aportada por el LiDAR PNOA, ha permitido discriminar la cubierta forestal y su desarrollo vertical, si bien, en determinados sectores como en O Pindo, es conveniente utilizar información espectral de similar resolución espacial para discriminar entre formaciones rocosas y vegetación.

En lo que respecta a las cuestiones temáticas abordadas en este estudio, el análisis de la influencia de los factores estructurales sobre la distribución de la severidad ofrece resultados diferentes entre los ámbitos considerados. En el sector de Navia, la altitud y la rugosidad, han sido los factores que explican la distribución espacial de la severidad, en el sentido de que a mayor altitud y rugosidad, mayor es el nivel de severidad. Por su parte, en el incendio de Oia, los análisis realizados muestran que las variables que más influyen en la severidad son la pendiente, junto con la altura del

dosel (a mayor pendiente y menor altura del dosel, mayor es el nivel de severidad). En el incendio de O Pindo, las variables que influyen en la distribución de la severidad son la pendiente topográfica, la altitud, la iluminación y fundamentalmente los niveles de NDVI y NDII previos

La segunda vía de análisis de la severidad como condicionante de la regeneración, indica que a mayor nivel de severidad, menor valor de NDVI tanto en el momento postincendio como pasados unos meses (junio 2014). Este comportamiento se aprecia en los incendios de Navia y Oia, no así en O Pindo, donde las formaciones vegetales condicionan el nivel de severidad. En este caso los espacios con mayores valores de severidad experimentan una mayor recuperación, condicionados por una topografía menos agresiva y la eficacia de las estrategias reproductivas de las formaciones vegetales del incendio (*Ulex europaeus*).

La medición de la regeneración producida hasta junio de 2014 mediante vectores multitemporales, ha sido otro de los objetivos propuestos en este TFM. Los resultados obtenidos, muestran un comportamiento general de tipo positivo. En todos los ámbitos se ha constatado un cambio localizado en el primer cuadrante. La intensidad del cambio es variable en función de las condiciones topo-morfológicas, si bien en la mayor parte del ámbito de Navia (83 %) no supera 0.1, sin embargo en los otros dos espacios, la intensidad ≥ 0.1 es la mayoritaria (espacios costeros o muy próximos a la costa, en los que las condiciones atmosféricas son mucho menos severas). En Oia el valor es del 74 % y en O Pindo del 71 %.

La información generada por el sensor MODIS ha servido para contrastar la información obtenida a partir de los datos de Landsat. La información de parámetros biofísicos como LAI y fAPAR, ha servido para confirmar la información de los neocanales (NDVI, NDII) obtenidos del sensor OLI. Los datos de LAI confirman la regeneración de los ámbitos, del mismo modo que el dato de fAPAR. En todos los casos en los que se dispone de píxeles analizables se ha mantenido la tendencia regresiva en los dos parámetros en el momento postincendio. Además en estos mismos casos, en el momento 2014 se ha producido una regeneración que concuerda con la información aportada por OLI.

El ámbito con la mayor regeneración ha sido O Pindo, donde se ha registrado un incremento del 51% de LAI entre el momento postincendio y el 2014. Este dato confirma el valor medio de regeneración aportado por los vectores multitemporales, que para este ámbito ofrecen un valor medio de cambio de 0.13, el mayor valor

registrado en los tres incendios, frente al 0.12 o al 0.079 de Oia y Navia respectivamente.

Toda la información generada debe estar disponible de forma inmediata, además hay que facilitar medios o canales por los que se permita el acceso a dicha información. Las plataformas web son un recurso de difusión global donde es posible mostrar los resultados de cualquier investigación y máxime en las de cariz espacial. En este sentido las aplicaciones web map son herramientas imprescindibles para la gestión territorial con una clara utilidad para los responsables de la toma de decisiones cuyos perfiles profesionales no tienen por qué incluir competencias en el manejo de complejas aplicaciones de escritorio.

Los servicios web de mapas (WMS) permiten la interacción con la información de forma remota, a través de internet permitiendo la gestión de los espacios afectados por incendios in situ y en tiempo real.

Siguiendo con la filosofía propuesta desde los organismos gestores y creadores de información cartográfica (normativa INSPIRE de la UE), toda la información geográfica generada va acompañada de los metadatos en base a la ISO 19115, que pueden ser consultados desde la plataforma web.

Bibliografía

Ceccato, P.; Flasse, S.; Tarantola, S.; Jacquemoud, S.; Grégoire, J.M. (2001): Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77: 22-23

Chuvieco, E. (1996): "Fundamentos de teledetección espacial". Rialp, Madrid, 568 pp.

Chuvieco, E. (2002): "Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio". Ariel, Barcelona, 586 pp.

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.

De la Riva, J. (1997): "Los montes de la Jacetania. Caracterización física y explotación forestal". Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, 358 pp.

Felicísimo A.M. (1999): "La utilización de los MDT en los estudios del medio físico." Universidad de Oviedo. http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/ITGE_150a.pdf

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. y Bosque, J. (2008): "Generación de un mapa de vientos en un SIG". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, nº 47, pp. 51-77.

Gracia, A. (2010): "Evaluación del potencial energético de los bosques de Teruel mediante teledetección y SIG". Consejo Económico y Social de Aragón. Zaragoza.

Ibáñez, E. (2008). "Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado; aplicación a la marisma del Parque Nacional de Doñana". Tesis doctoral. Director: Gili, J. A. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería del terreno, Cartográfica y Geofísica.

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, 724 pp.

Parks, S.; Dillon, G.; Miller, C. (2014): A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio. *Remote Sensing*. 2014, 6, 1827-1844.

Pérez Cabello, F. (2011): Actividad vegetal de las cuencas de los ríos Cidacos y del Alijama (La Rioja): Análisis diacrónico mediante imágenes Landsat. *Zubia*, nº23, pp 79-102.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. y Harlan, J.C. (1974): Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Type III, Final Report, NASA/GSFC, Greenbelt, 371 pp.

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 a 98, Jaca.

Enlaces web

Apache Tomcat. Recurso On-line: <http://tomcat.apache.org/>

Especificación OGC servicio WMS: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=30912

Mapserver. Recurso On-line: <http://mapserver.org/>

Pmapper. Recurso On-line: <http://www.pmapper.net>

Anexo de tablas y figuras

TABLAS

Tablas de Navia.

Tabla 25: Estadísticos descriptivos de Navia (1)

		Nivel de severidad					
		3	4	5	6	7	Total
	N	1998	236	208	418	1473	4333
MDE25	\bar{X}	716,141	739,636	741,411	804,891	847,959	772,007
	σ	149,543	117,298	134,353	121,136	82,057	138,658
Orientación	\bar{X}	138,389	153,432	139,816	155,552	159,259	148,027
	σ	118,490	125,928	119,392	106,287	111,995	116,013
Pendiente	\bar{X}	53,127	53,284	57,150	52,418	43,457	49,973
	σ	19,262	19,972	18,935	24,290	18,350	20,092
Rugosidad	\bar{X}	0,505	0,514	0,523	0,557	0,578	0,536
	σ	0,067	0,061	0,071	0,091	0,081	0,082
MDSn	\bar{X}	3,227	2,387	2,208	1,178	0,690	2,072
	σ	4,488	3,631	2,829	1,789	1,086	3,527
Iluminación_pre	\bar{X}	0,667	0,610	0,624	0,699	0,731	0,687
	σ	0,202	0,196	0,192	0,170	0,156	0,188
NDVI_pre	\bar{X}	0,822	0,809	0,801	0,726	0,758	0,789
	σ	0,085	0,104	0,107	0,112	0,059	0,090
NDII_pre	\bar{X}	0,328	0,321	0,307	0,198	0,217	0,276
	σ	0,137	0,139	0,138	0,155	0,100	0,140

Tabla 26: ANOVA de Navia (1)

ANOVA		
	F	Sig.
MDE25	249,902	0,000
Orientación	7,776	0,000
Pendiente	64,391	0,000
Rugosidad	218,961	0,000
MDSn	131,530	0,000
Iluminación_pre	44,018	0,000
NDVI_pre	196,400	0,000
NDII_pre	211,617	0,000

Tabla 27: Resumen de resultados del análisis de Tamhane para Navia (1). Muestra de los pares que no cumplen la significatividad estadística.

Comparaciones múltiples					
Tamhane					
Variable dependiente	I	J	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
MDE25	3	4	-23,49466*	8,336	0,050
MDE25	3	5	-25,270	9,898	0,107
MDE25	4	5	-1,775	12,045	1,000
Orientación	3	4	-15,043	8,615	0,574
Orientación	3	5	-1,427	8,692	1,000
Orientación	4	5	13,616	11,650	0,938
Orientación	4	6	-2,120	9,707	1,000
Orientación	4	7	-5,826	8,701	0,999
Orientación	5	6	-15,736	9,775	0,682
Orientación	5	7	-19,443	8,778	0,244
Orientación	6	7	-3,706	5,962	1,000
Pendiente	3	4	-0,157	1,370	1,000
Pendiente	3	6	0,709	1,264	1,000
Pendiente	4	5	-3,866	1,848	0,314
Pendiente	4	6	0,865	1,761	1,000
Pendiente	5	6	4,731	1,771	0,075
Rugosidad	3	4	-0,009	0,004	0,278
Rugosidad	4	5	-0,009	0,006	0,771
MDSn	4	5	0,179	0,307	1,000
Iluminación_pre	4	5	-0,014	0,018	0,997
NDVI_pre	3	4	0,013	0,007	0,507
NDVI_pre	3	5	0,021	0,008	0,067
NDVI_pre	4	5	0,008	0,010	0,996
NDVI_pre	5	4	-0,008	0,010	0,996
NDII_pre	3	4	0,007	0,010	0,997
NDII_pre	3	5	0,021	0,010	0,322
NDII_pre	4	5	0,013	0,013	0,974
NDII_pre	6	7	-0,019	0,008	0,173

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Tabla 28: Estadísticos descriptivos de Navia (2)

		Nivel de severidad					Total
		3	4	5	6	7	
	N	1998	236	208	418	1473	4333
NDVI_post	\bar{X}	0,809	0,687	0,568	0,386	0,274	0,568
	σ	0,085	0,099	0,109	0,121	0,057	0,259
NDVI_2014	\bar{X}	0,842	0,758	0,668	0,496	0,453	0,663
	σ	0,081	0,113	0,139	0,178	0,114	0,212
NDII_post	\bar{X}	0,323	0,186	0,064	-0,116	-0,242	0,069
	σ	0,132	0,115	0,104	0,108	0,078	0,281
NDII_2014	\bar{X}	0,362	0,254	0,140	0,001	-0,097	0,155
	σ	0,128	0,121	0,130	0,145	0,118	0,245

Tabla 29: ANOVA de Navia (2)

ANOVA		
	F	Sig.
NDVI_post	9332,970	0,000
NDVI_2014	2940,920	0,000
NDII_post	5799,444	0,000
NDII_2014	3009,773	0,000

Tablas de Oia.

Tabla 30: Estadísticos descriptivos de Oia (1)

		Nivel de severidad					Total
		3	4	5	6	7	
	N	6267	3257	4533	4374	2578	21009
MDE25	\bar{X}	225,454	214,767	223,646	249,612	252,554	231,762
	σ	138,093	119,200	108,876	101,255	80,430	116,470
Orientación	\bar{X}	170,878	179,488	190,263	208,715	214,524	189,629
	σ	86,191	86,174	87,863	84,388	80,534	87,080
Pendiente	\bar{X}	23,313	25,113	27,796	29,980	31,690	26,975
	σ	13,258	11,980	12,376	13,526	14,607	13,463
Rugosidad	\bar{X}	0,499	0,496	0,513	0,521	0,532	0,510
	σ	0,094	0,090	0,083	0,082	0,075	0,087
MDSn	\bar{X}	2,803	4,728	3,512	2,145	1,179	2,918
	σ	4,339	5,687	4,780	3,606	2,310	4,472
Iluminación_pre	\bar{X}	0,818	0,820	0,805	0,785	0,780	0,804
	σ	0,104	0,101	0,115	0,117	0,123	0,112
Iluminación_post	\bar{X}	0,772	0,776	0,761	0,743	0,739	0,760
	σ	0,109	0,110	0,125	0,127	0,133	0,121
NDVI_pre	\bar{X}	0,693	0,738	0,706	0,690	0,732	0,707
	σ	0,131	0,120	0,122	0,094	0,057	0,115
NDII_pre	\bar{X}	0,243	0,325	0,269	0,214	0,263	0,258
	σ	0,181	0,171	0,185	0,154	0,112	0,171

Tabla 31: ANOVA de Oia (1)

	F	Sig.
MDE25	74,694	0,000
Orientación	195,973	0,000
Pendiente	283,745	0,000
Rugosidad	108,237	0,000
MDSn	300,803	0,000
Iluminación_pre	103,591	0,000
NDVI_pre	143,686	0,000
NDII_pre	223,409	0,000

Tabla 32: Resumen de resultados del análisis de Tamhane para Oia (1). Muestra de los pares que no cumplen la significatividad estadística.

Tamhane					
Variable dependiente	I	J	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
MDE25	3,000	5,000	1,808	2,379	0,997
MDE25	6,000	7,000	-2,942	2,203	0,865
Rugosidad	3,000	4,000	0,003	0,002	0,881
Iluminación_pre	3,000	4,000	-0,002	0,002	0,985
Iluminación_pre	6,000	7,000	0,005	0,003	0,582
NDVI_pre	3,000	6,000	0,003	0,002	0,921
NDVI_pre	4,000	7,000	0,006	0,002	0,065
NDII_pre	5,000	7,000	0,006	0,004	0,534

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Tabla 33: Estadísticos descriptivos de Oia (2)

		Nivel de severidad					Total
		3	4	5	6	7	
	N	1998	236	208	418	1473	4333
NDII_post	\bar{X}	0,3229	0,1865	0,0643	-0,1164	-0,2422	0,0686
	σ	0,1321	0,1148	0,1041	0,1078	0,0779	0,2814
NDII_2014	\bar{X}	0,3624	0,2538	0,1400	0,0010	-0,0973	0,1547
	σ	0,1282	0,1210	0,1302	0,1455	0,1178	0,2455
NDVI_post	\bar{X}	0,8086	0,6868	0,5679	0,3855	0,2741	0,5679
	σ	0,0853	0,0986	0,1091	0,1212	0,0568	0,2589
NDII_2014	\bar{X}	0,8421	0,7582	0,6678	0,4957	0,4530	0,6635
	σ	0,0810	0,1135	0,1387	0,1779	0,1144	0,2124

Tabla 34: ANOVA de Oia (2)

ANOVA		
	F	Sig.
NDVI_post	12319,484	0,000
NDVI_2014	4662,033	0,000
NDII_post	7123,610	0,000
NDII_2014	5337,568	0,000

Tablas de O Pindo.

Tabla 35: Estadísticos descriptivos de O Pindo (1)

		Nivel de severidad					Total
		3	4	5	6	7	
	N	4993	3456	3965	5020	6628	24062
MDE25	\bar{X}	177,418	222,971	229,383	187,369	108,767	175,689
	σ	158,131	174,623	165,247	144,613	82,837	149,588
Orientación	\bar{X}	221,294	220,515	208,177	193,333	198,157	206,814
	σ	80,681	89,156	93,861	90,628	81,360	87,230
Pendiente	\bar{X}	28,954	34,950	36,619	32,183	20,828	29,513
	σ	23,544	24,005	21,261	18,760	14,637	20,965
Rugosidad	\bar{X}	0,433	0,453	0,466	0,465	0,472	0,459
	σ	0,113	0,115	0,093	0,080	0,092	0,099
MDSn	\bar{X}	1,437	1,682	1,178	0,776	0,471	1,025
	σ	2,643	3,111	2,086	1,418	0,797	2,085
Iluminación_pre	\bar{X}	0,829	0,809	0,822	0,854	0,886	0,846
	σ	0,118	0,140	0,133	0,111	0,070	0,116
NDVI_pre	\bar{X}	0,613	0,589	0,631	0,680	0,712	0,654
	σ	0,165	0,134	0,110	0,079	0,057	0,120
NDII_pre	\bar{X}	0,121	0,073	0,096	0,168	0,259	0,158
	σ	0,228	0,214	0,166	0,128	0,093	0,180

Tabla 36: ANOVA de O Pindo (1)

ANOVA		
	F	Sig
MDE25	609,487	0,000
Orientación	103,995	0,000
Pendiente	518,714	0,000
Rugosidad	131,485	0,000
MDSn	287,731	0,000
Iluminación_pre	388,367	0,000
NDVI_pre	1013,485	0,000
NDII_pre	1038,550	0,000

Tabla 37: Resumen de resultados del análisis de Tamhane para O Pindo (1). Muestra de los pares que no cumplen la significatividad estadística.

Comparaciones múltiples					
Tamhane					
Variable dependiente	I	J	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
MDE25	4	5	-6,412	3,964	0,673
Orientación	3	4	0,779	1,898	1,000
Rugosidad	5	6	0,002	0,002	0,991
Iluminación_pre	5	3	-0,007	0,003	0,099

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Tabla 38: Estadísticos descriptivos de O Pindo (2)

		Nivel de severidad					Total
		3	4	5	6	7	
	N	4993	3456	3965	5020	6628	24062
NDVI_post	\bar{X}	0,512	0,383	0,342	0,308	0,248	0,350
	σ	0,231	0,174	0,128	0,077	0,051	0,170
NDVI_2014	\bar{X}	0,594	0,475	0,461	0,481	0,528	0,513
	σ	0,213	0,192	0,162	0,147	0,146	0,178
NDII_post	\bar{X}	0,111	-0,078	-0,155	-0,196	-0,295	-0,136
	σ	0,238	0,202	0,148	0,114	0,086	0,216
NDII_2014	\bar{X}	0,134	-0,010	-0,039	-0,008	0,058	0,034
	σ	0,235	0,210	0,168	0,155	0,168	0,197

Tabla 39: ANOVA de O Pindo (2)

ANOVA		
	F	Sig.
NDVI_post	2654,458	0,000
NDVI_2014	471,064	0,000
NDII_post	4843,070	0,000
NDII_2014	641,913	0,000

Tabla 40: Resumen de resultados del análisis de Tamhane para O Pindo (2).

Comparaciones múltiples					
Tamhane					
Variable dependiente	I	J	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
NDVI_2014	4	6	-0,006	0,004	0,646
NDVI_2014	6	4	0,006	0,004	0,646
NDII_2014	4	6	-0,003	0,004	1,000
NDII_2014	6	4	0,003	0,004	1,000

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

FIGURAS

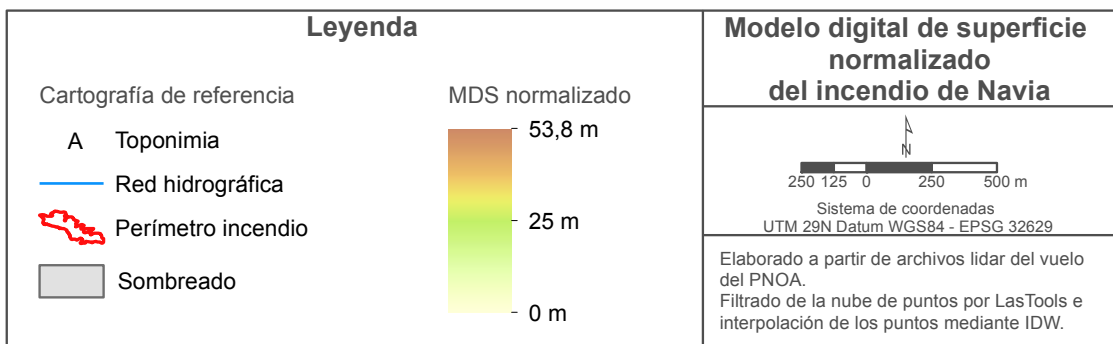
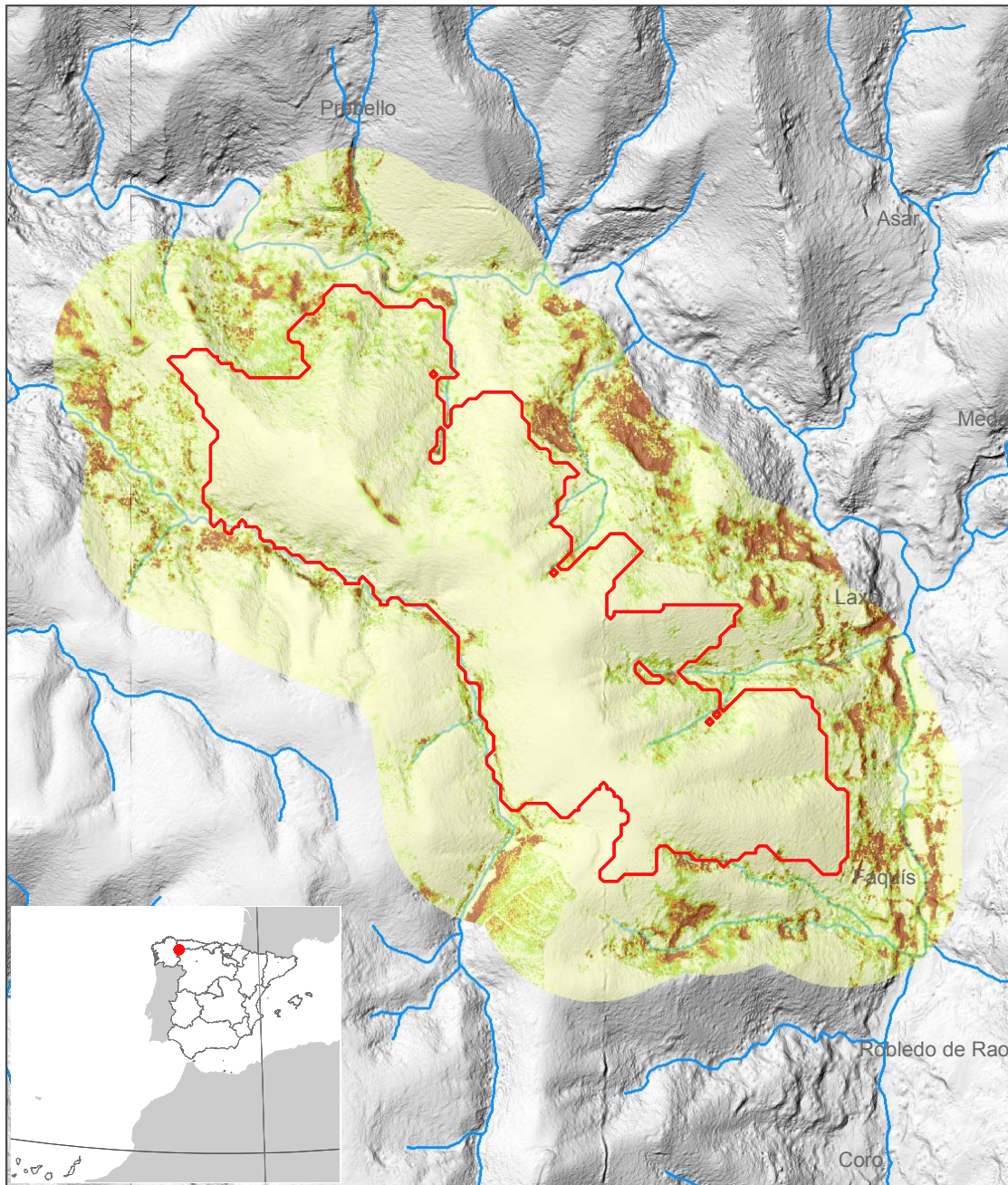


Figura 39: MDSn de Navia.

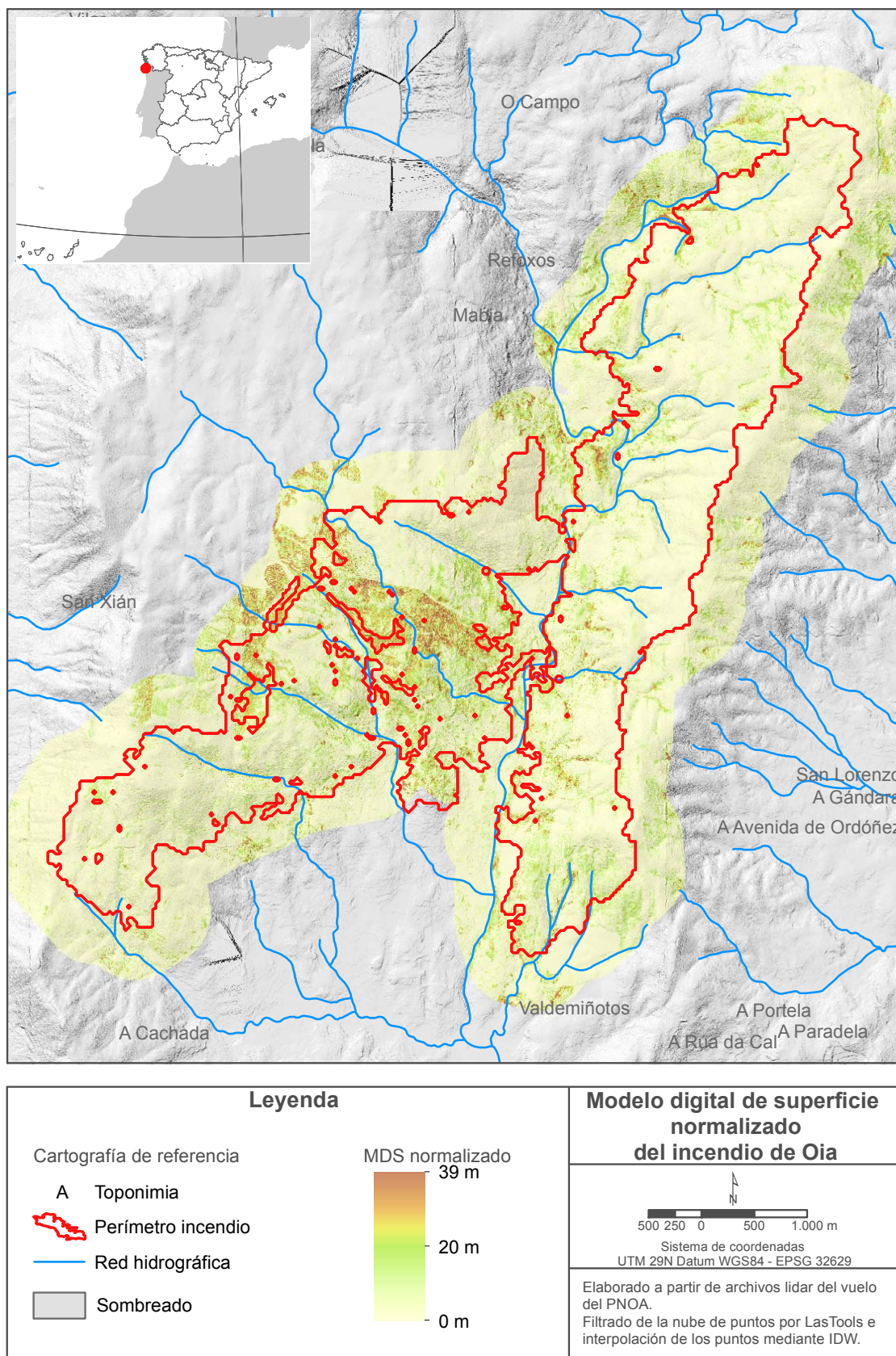


Figura 40: MDSn de Oia

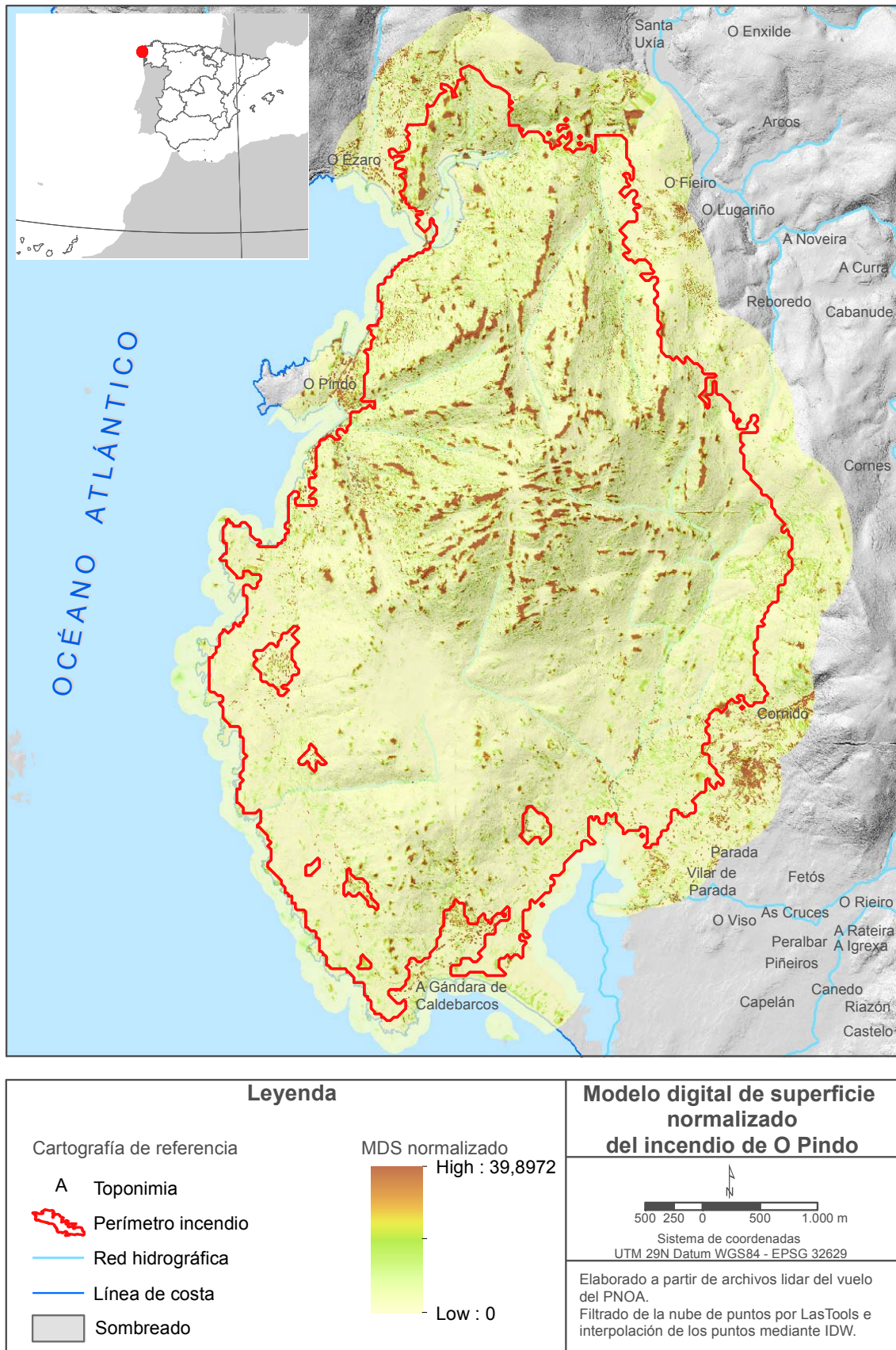


Figura 41: MDSn de O Pindo

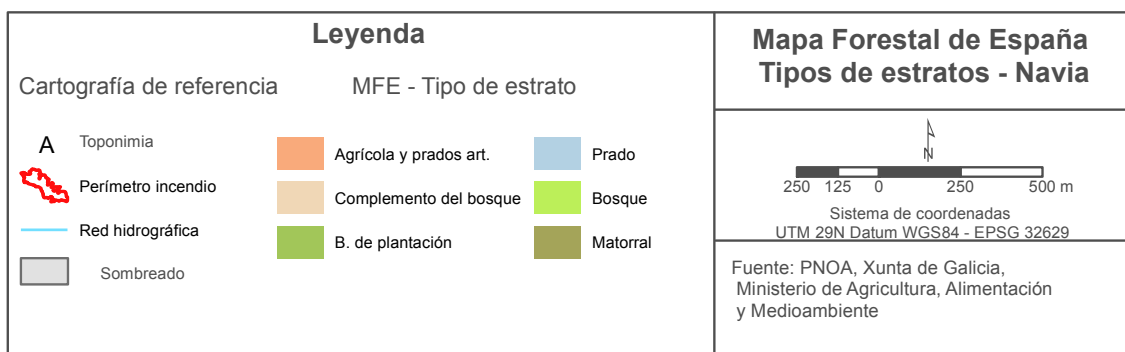
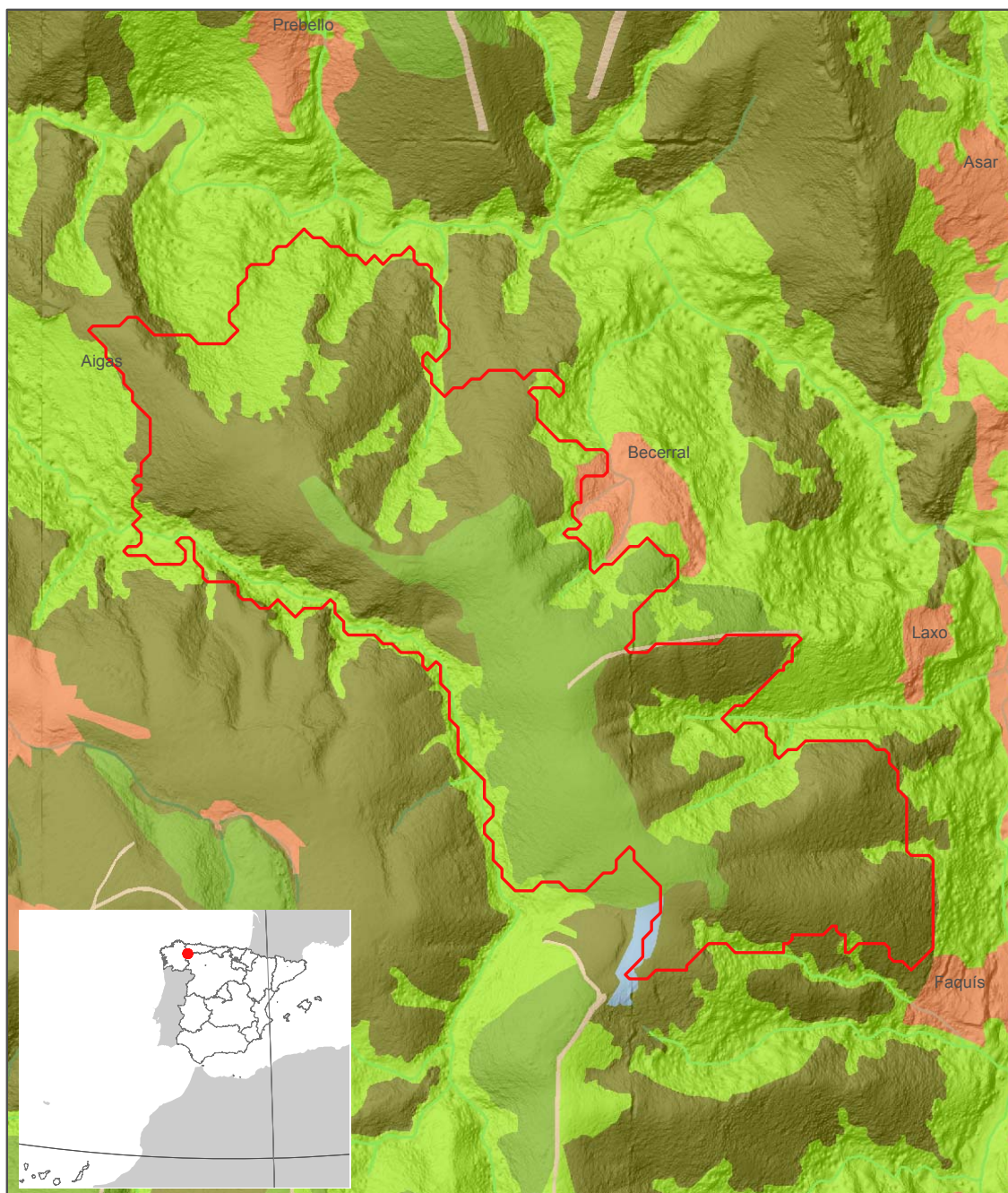


Figura 42: Mapa forestal del ámbito de Navia – Simbolización por tipo de estrato forestal

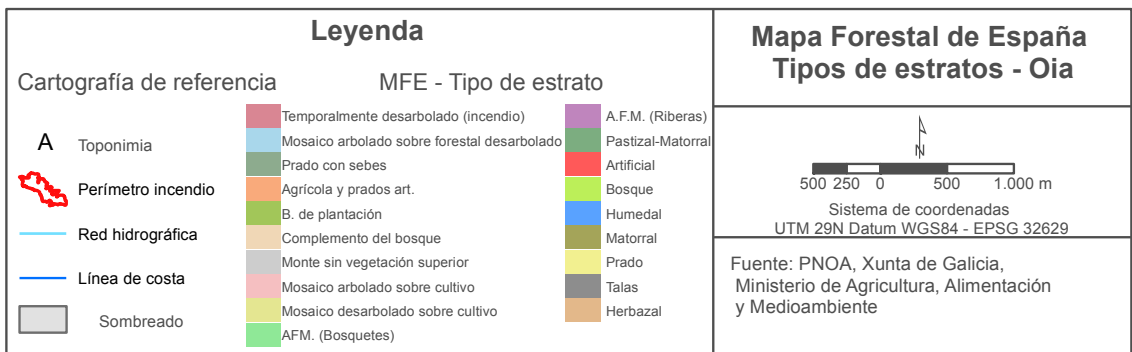
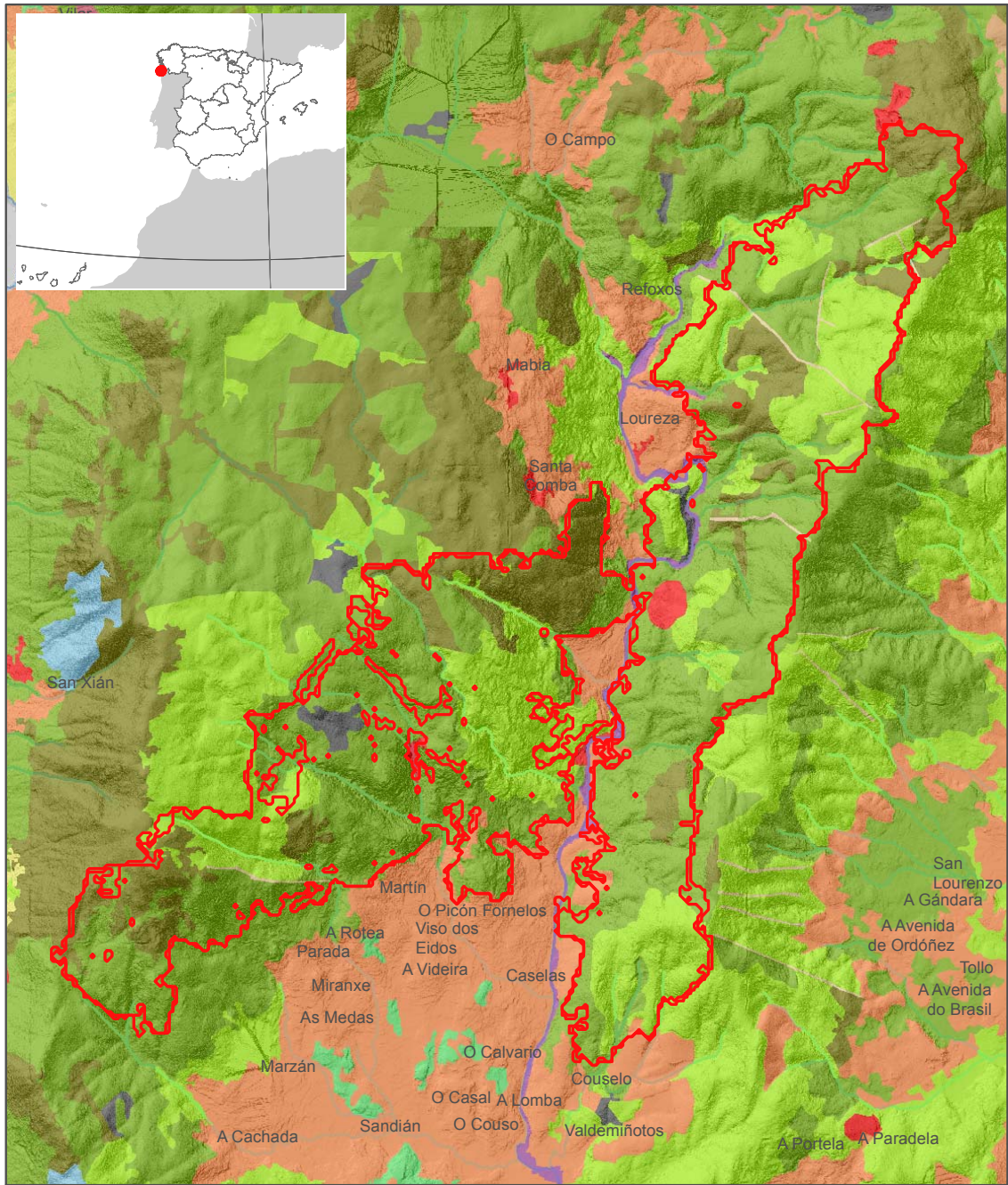


Figura 43: Mapa forestal del ámbito de Oia – Simbolización por tipo de estrato forestal

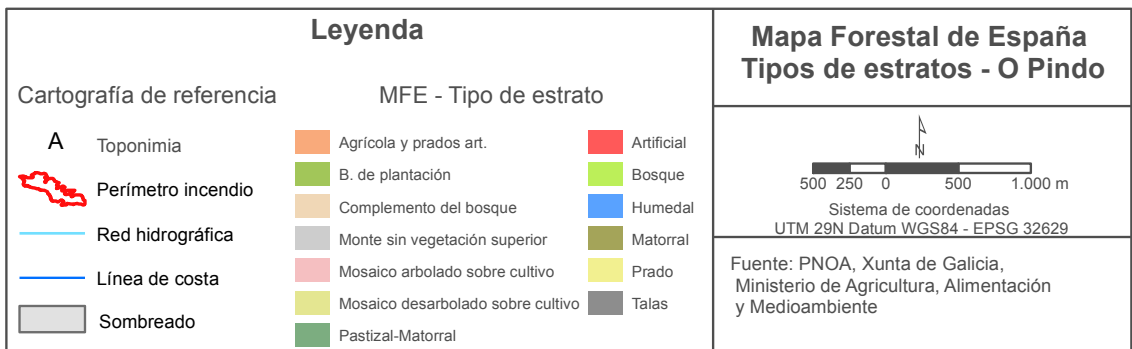
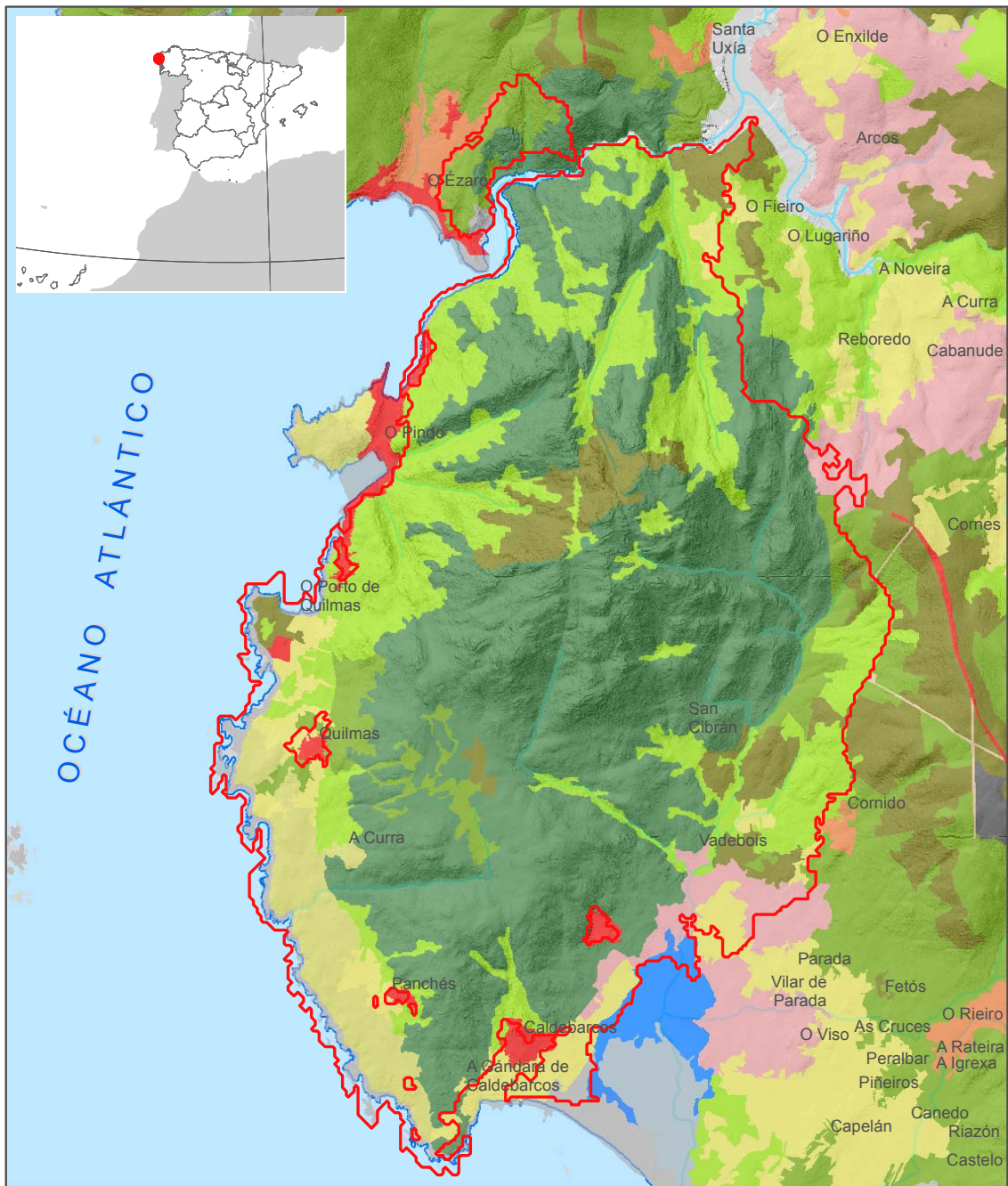


Figura 44: Mapa forestal del ámbito de O Pindo – Simbolización por tipo de estrato forestal

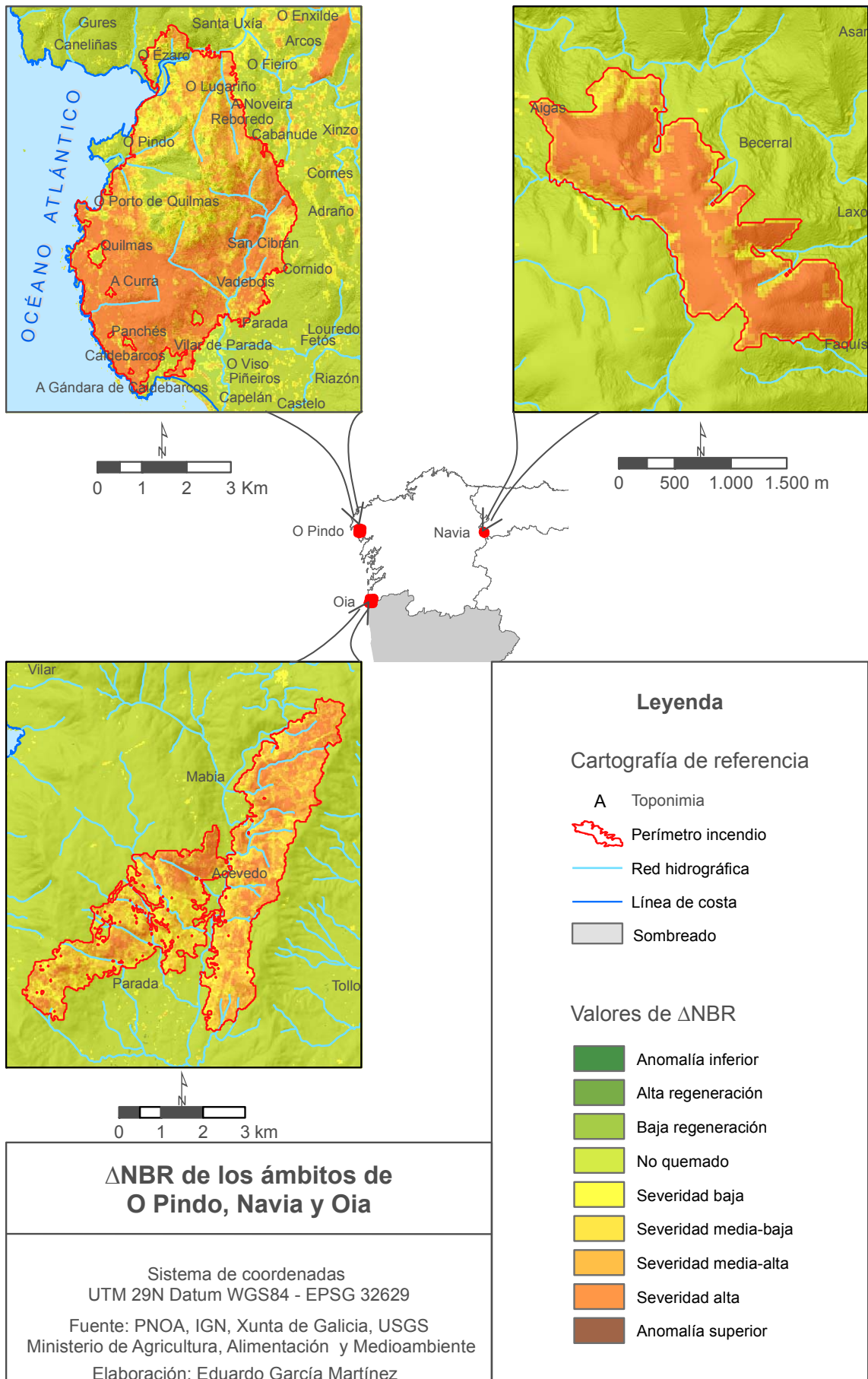


Figura 45: ΔNBR de los ámbitos.

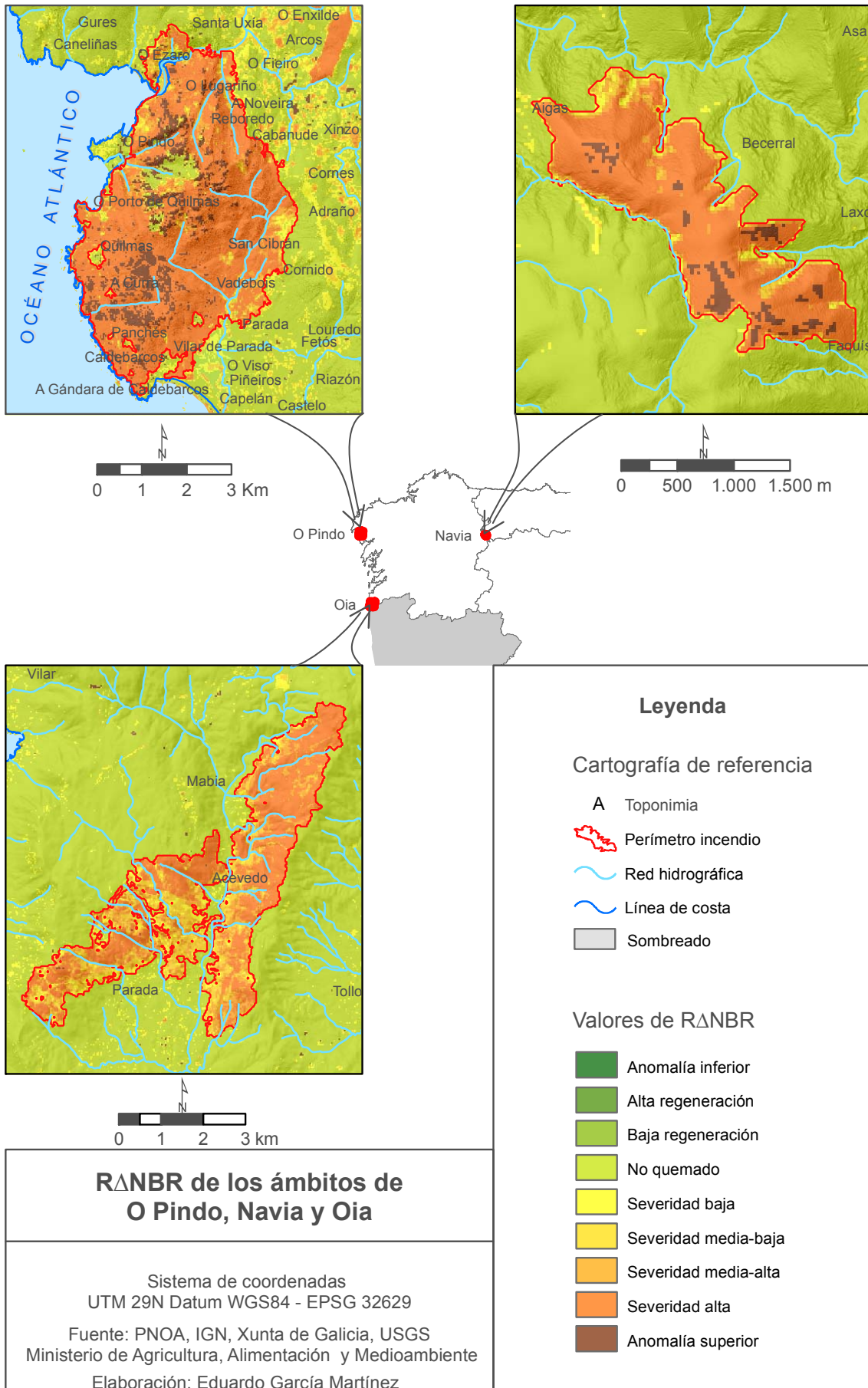


Figura 46: RANBR de los ámbitos.

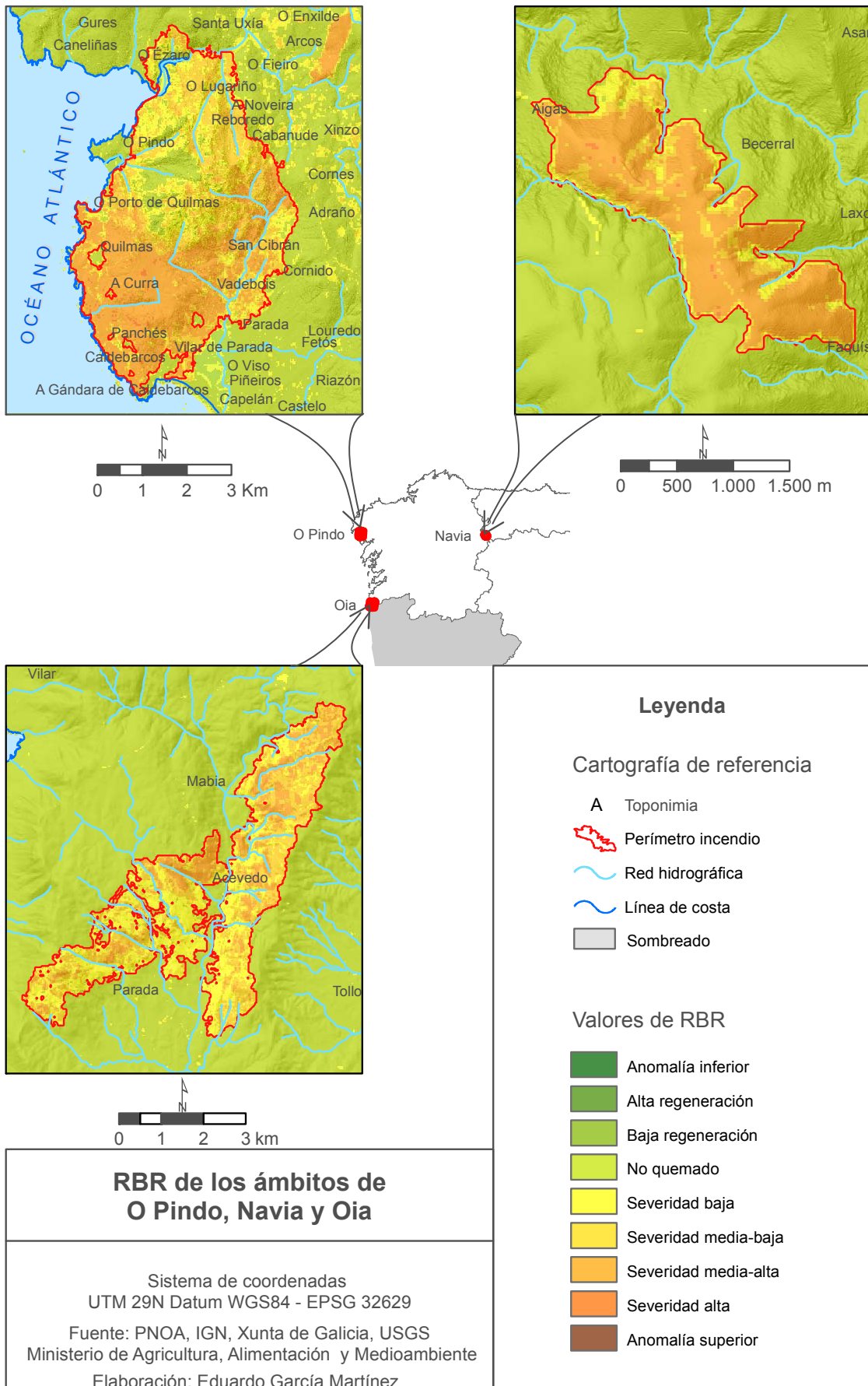


Figura 47: RBR de los ámbitos.

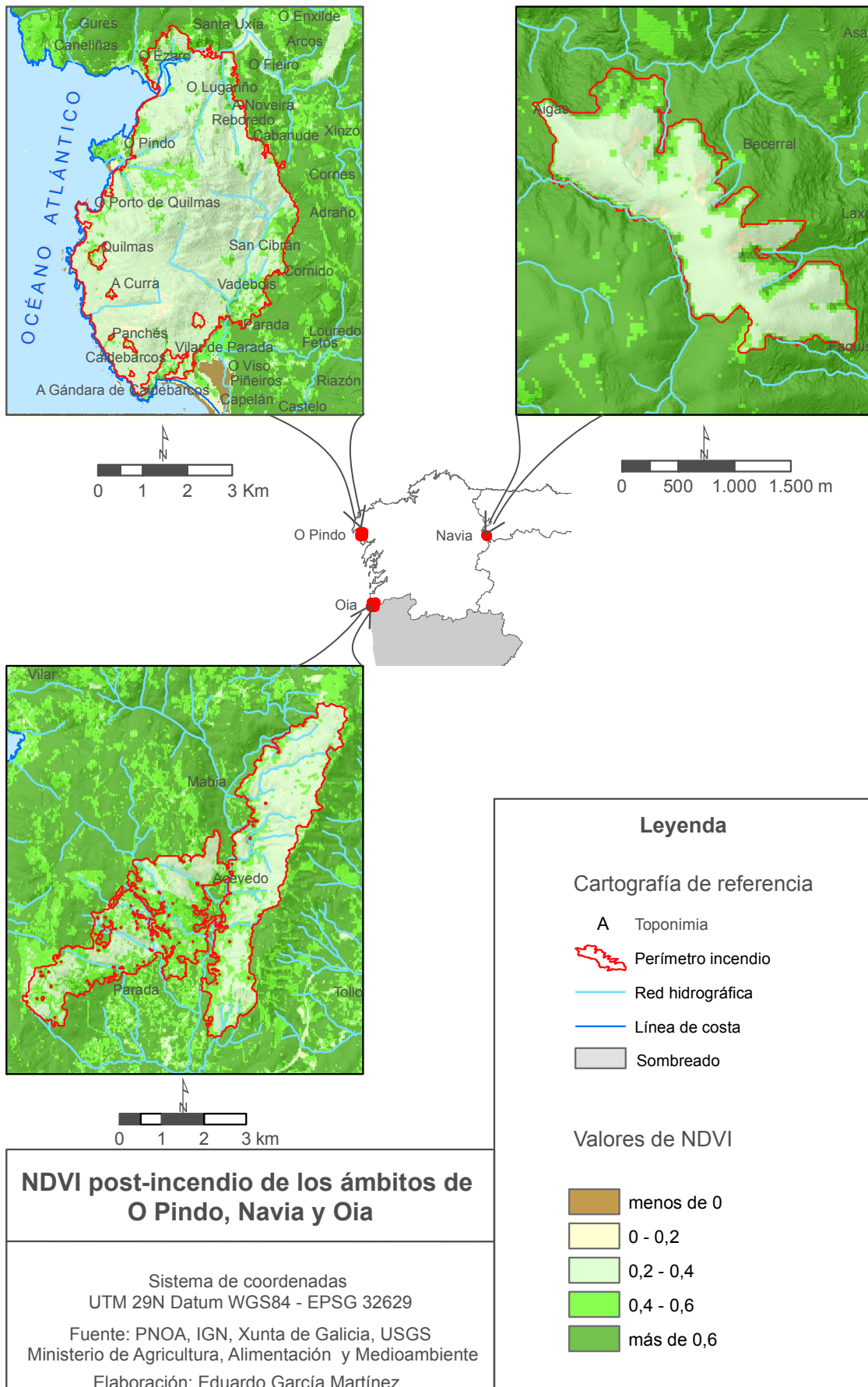


Figura 48: Valores de NDVI post incendio.

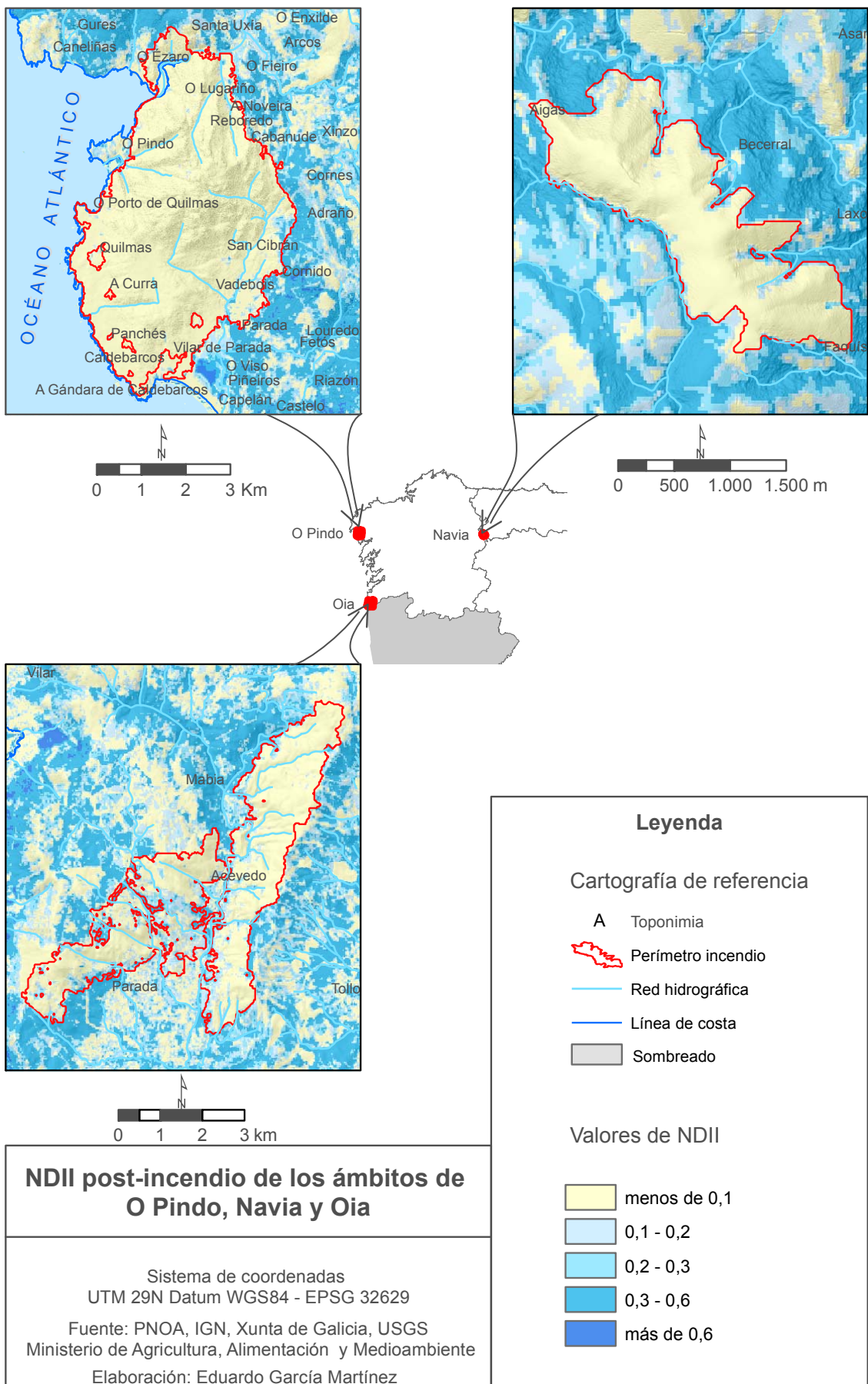


Figura 49: Valores de NDII post incendio.

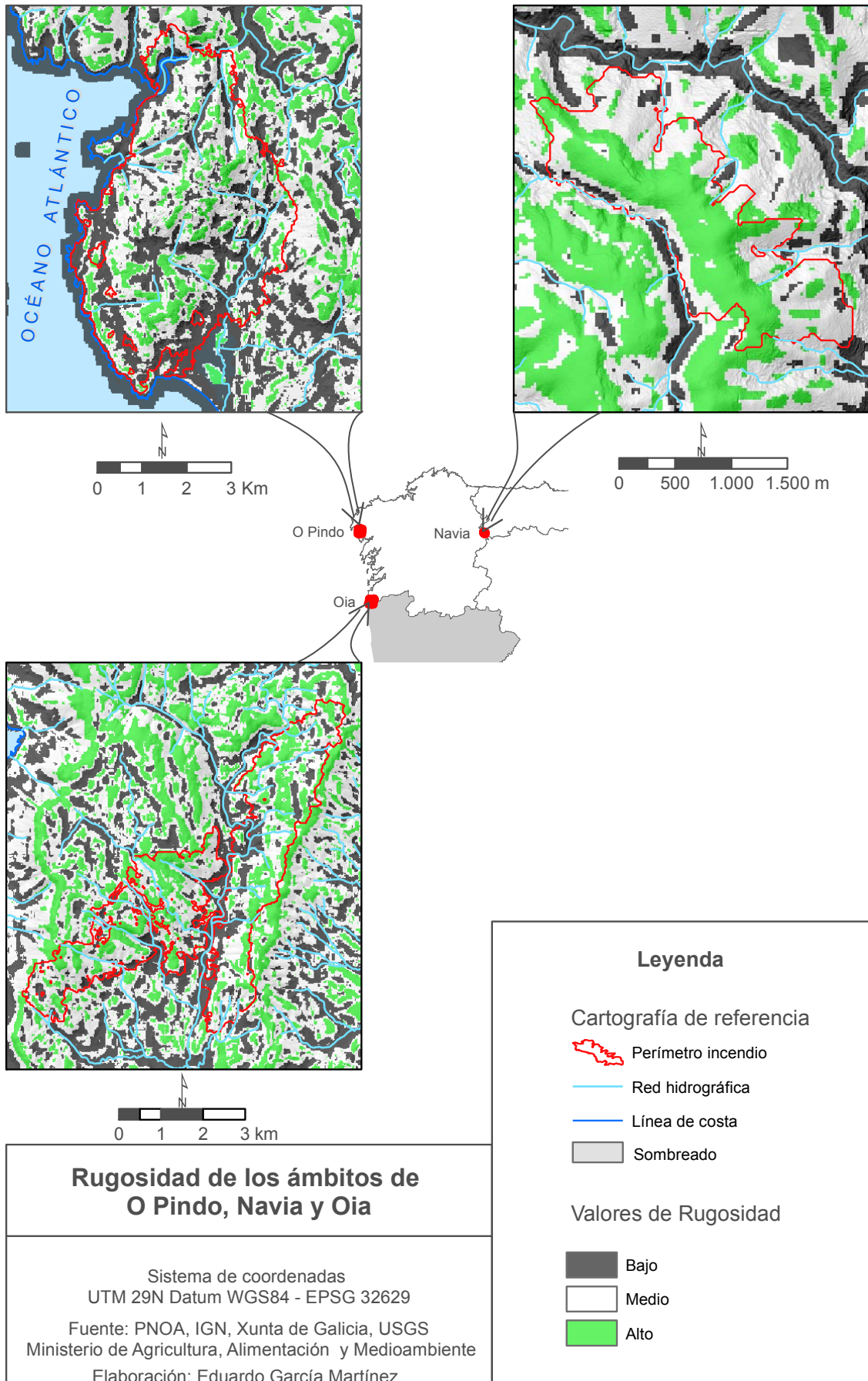


Figura 50: Clasificación de la rugosidad de los ámbitos.

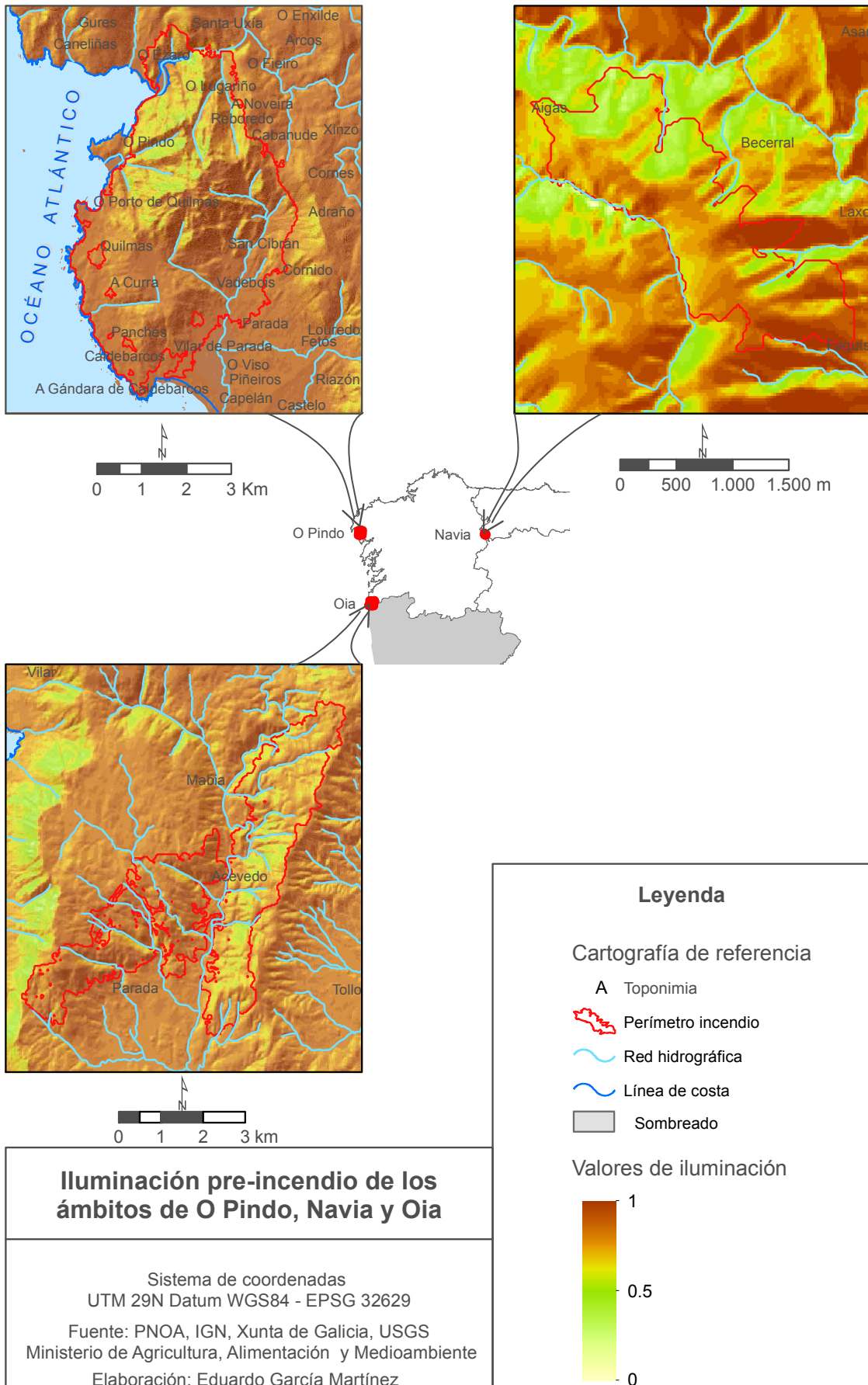


Figura 51: Ráster de iluminación pre-incendio de los ámbitos

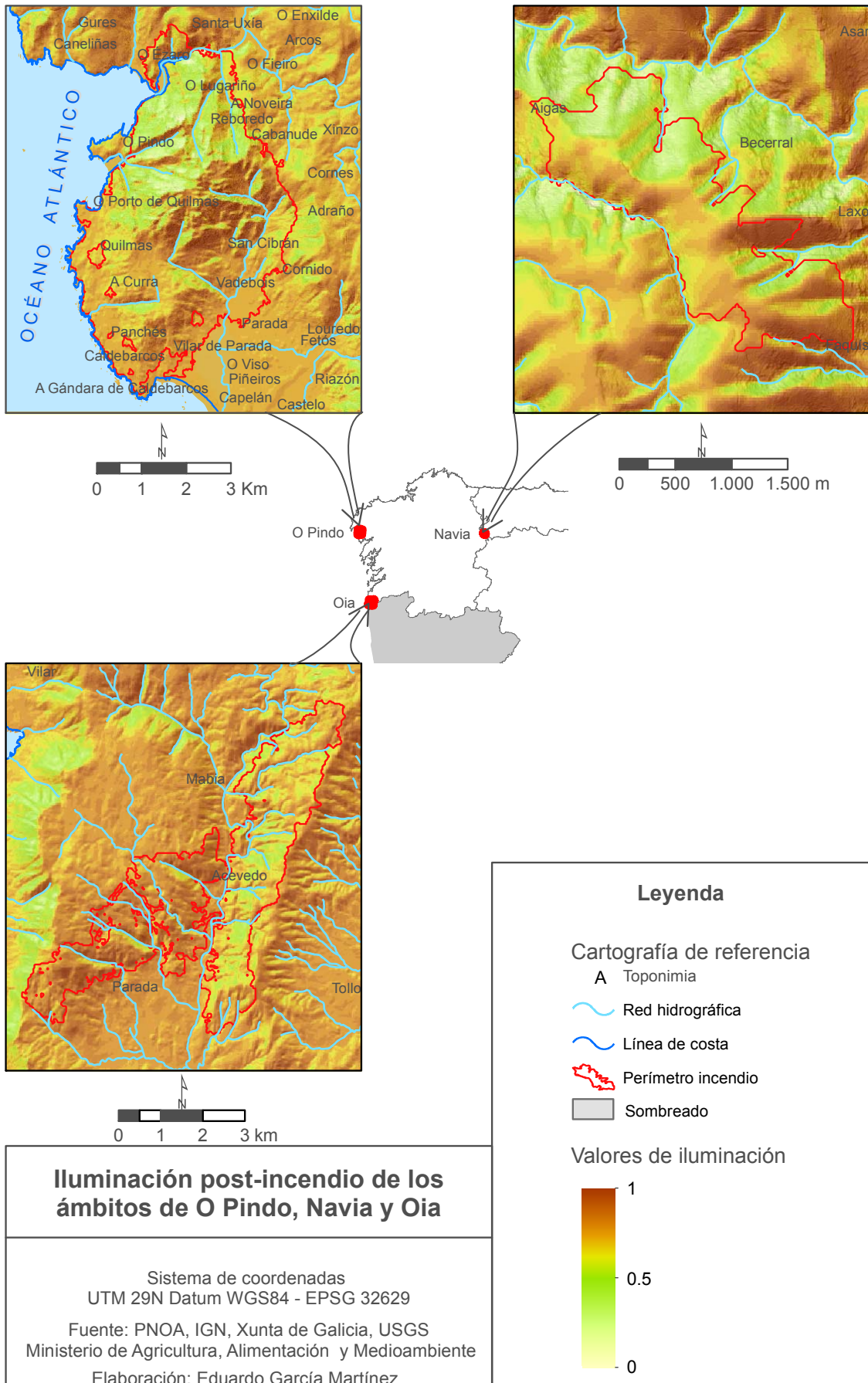


Figura 52: Ráster de iluminación post-incendio de los ámbitos

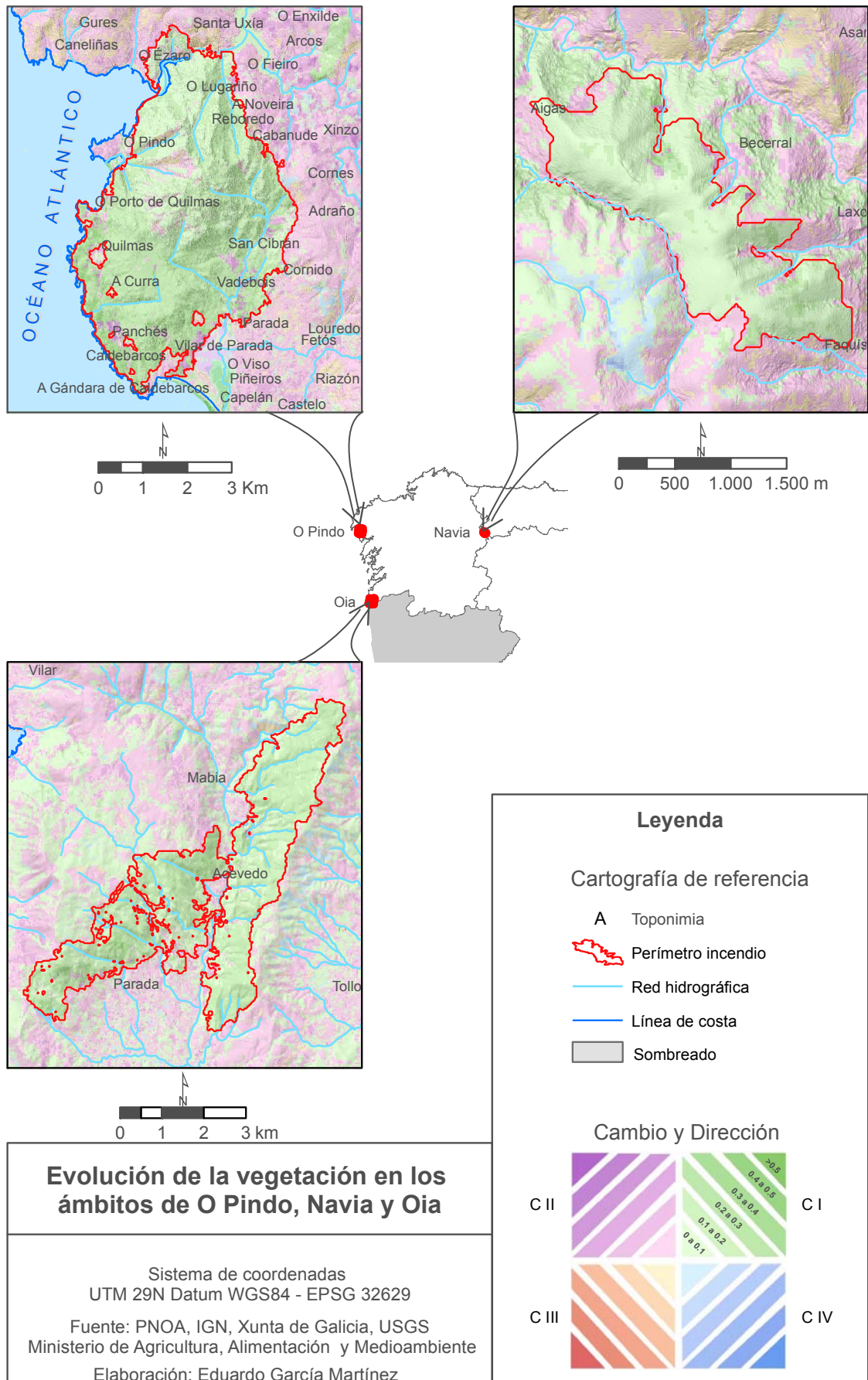


Figura 53: Evolución de la vegetación.

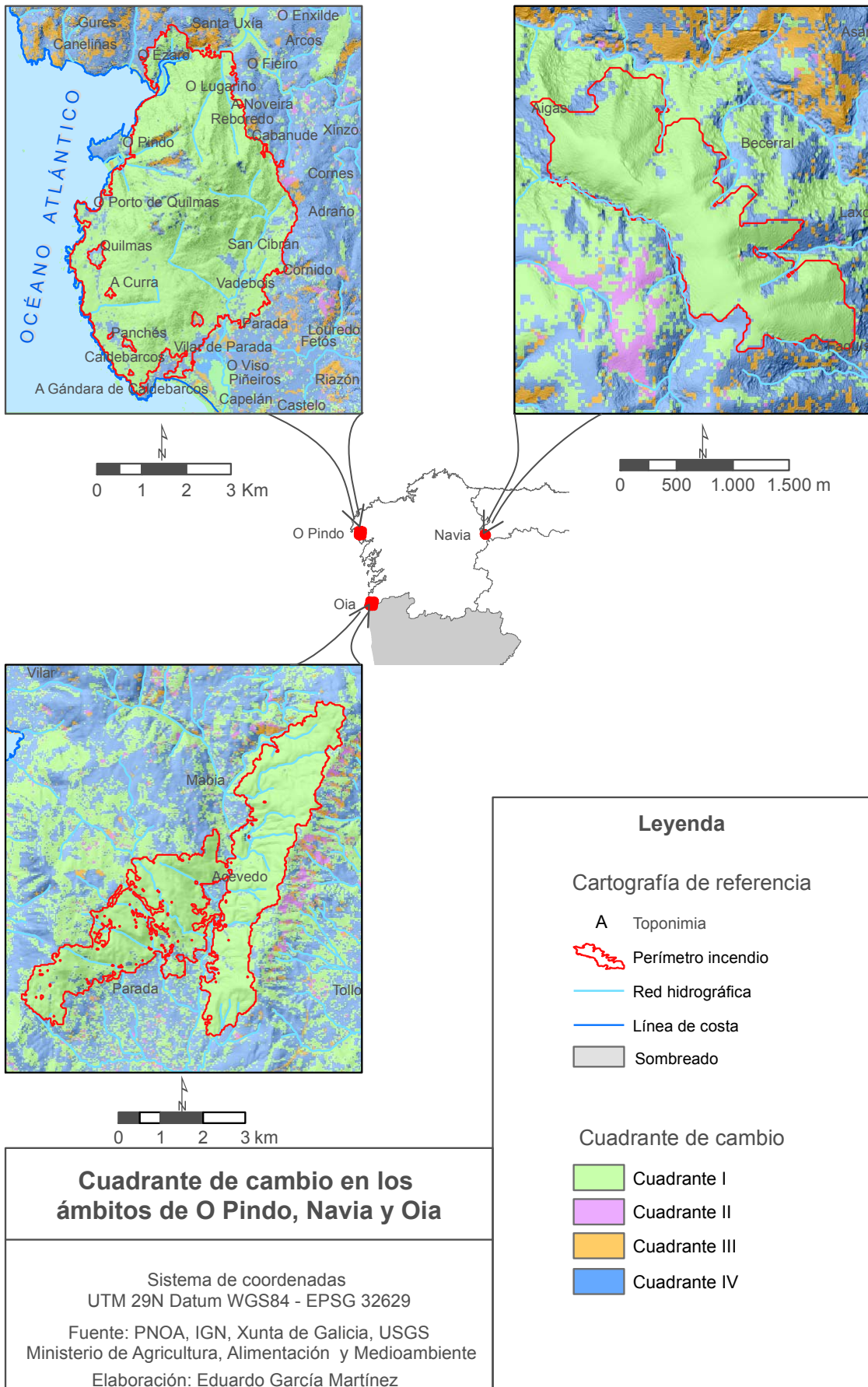


Figura 54: Dirección del cambio agrupado por cuadrantes.

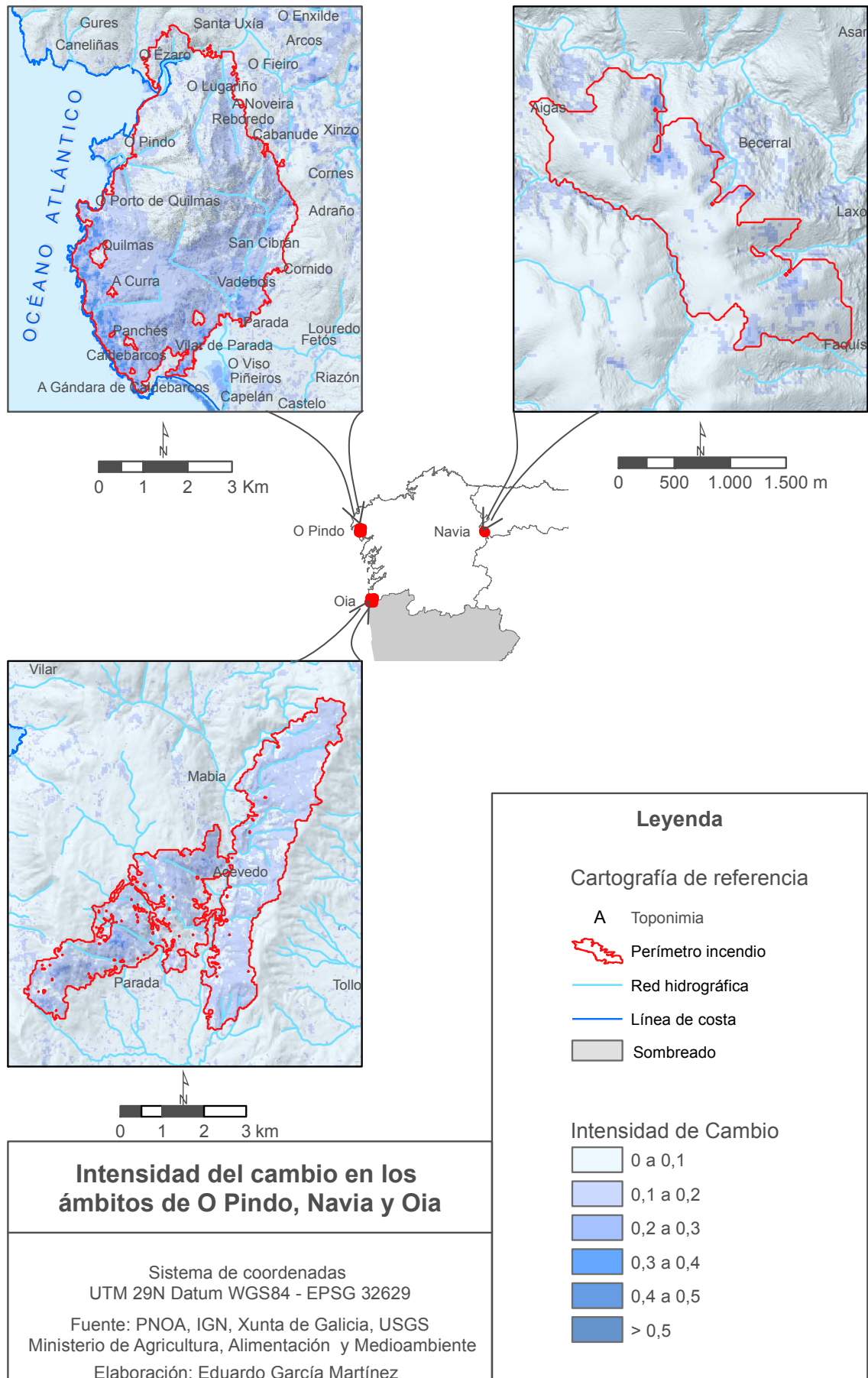


Figura 55: Magnitud del cambio.

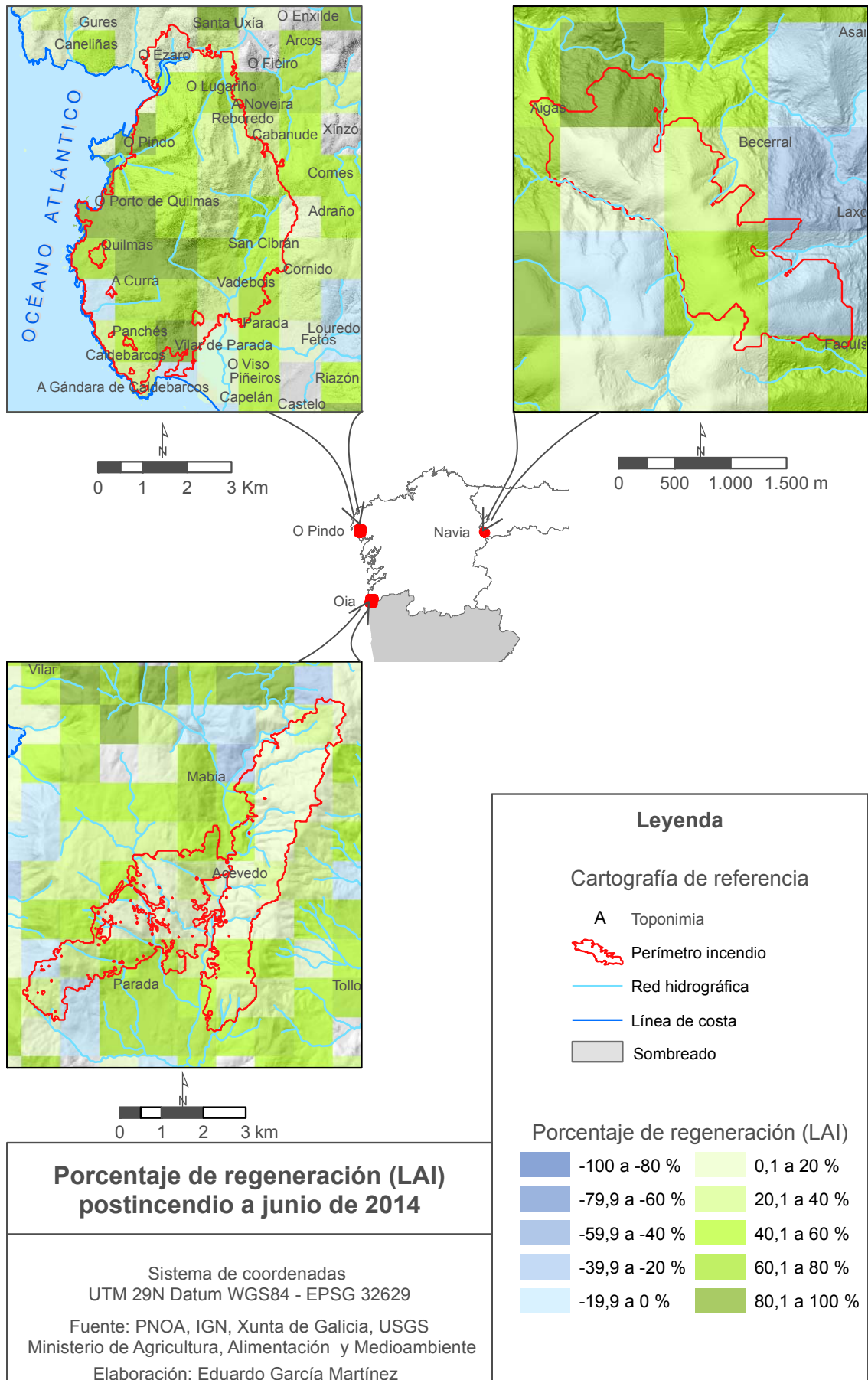


Figura 56: Representación del porcentaje de regeneración de LAI en los ámbitos.

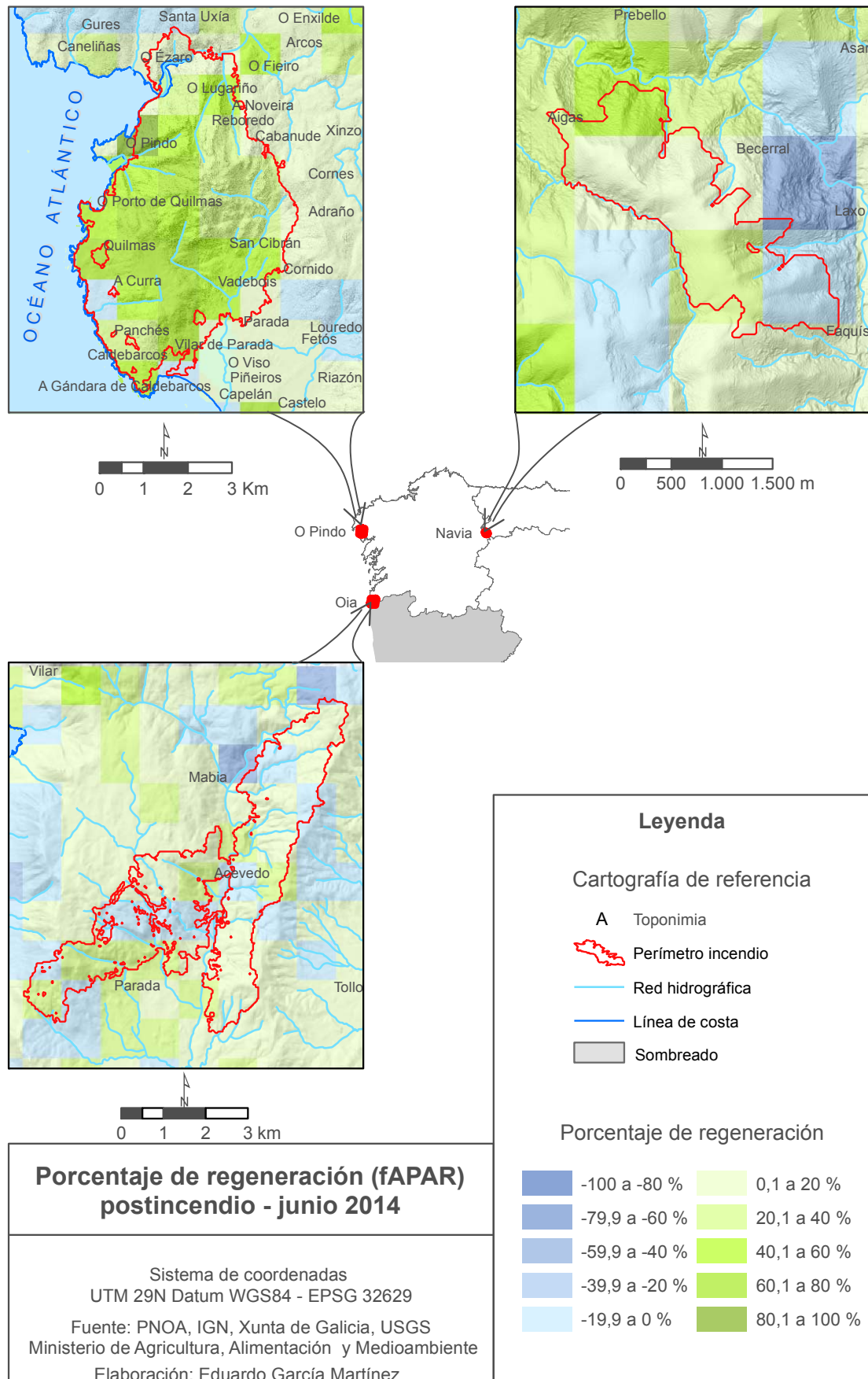


Figura 57: Porcentaje de variación de fAPAR postincendio y junio de 2014.



Figura 58: Restos de la cubierta arbustiva.



Figura 59: Detalle de la estructura litológica y de los suelos en Navia.



Figura 60: Detalle de la estructura litológica y de los suelos en Oia.



Figura 61: Formaciones forestales mixtas y detalle de sotobosque de invasoras en los entornos del ámbito.



Figura 62: Erosión sobre granito en o Pindo (O Guerreiro).



Figura 63: zona de tala delimitado por forestal de conífera y de eucalipto.



Figura 64: Estructura de la vegetación en los sectores costeros del ámbito de O Pindo.

7	c0	c1	[mW/cm2 sr micron]
1	-6.139293	-0.0012281	
2	-6.286711	-0.0012576	
3	-5.793151	-0.0011589	
4	-4.885111	-0.00097722	
5	-2.989444	-0.00059801	
6	-0.743448	-0.00014872	
7	-0.250582	-0.0000050126	

Figura 65: Valores del fichero de calibración Landsat 8 para las imágenes utilizadas.

7	c0	c1	[mW/cm2 sr micron]	7	c0	c1	[mW/cm2 sr micron]
1	-6.377575	0.001276		1	0.000000	0.0033333	
2	-6.503448	0.001301		2	0.000000	0.0033333	
3	-5.954964	0.001191		3	0.000000	0.0033333	
4	-5.043490	0.001009		4	0.000000	0.0033333	
5	-3.060446	0.000612		5	0.000000	0.0033333	
6	-0.771080	0.000154		6	0.000000	0.0016667	
7	-0.250831	0.000050		7	0.000000	0.0008333	

Figura 66: Valores del fichero de calibración landsat8_oli_example.cal y landsat8_oli_template.cal

RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2281E-02	RADIANCE_ADD_BAND_1 = -61.40521
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2576E-02	RADIANCE_ADD_BAND_2 = -62.87969
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1589E-02	RADIANCE_ADD_BAND_3 = -57.94310
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.7722E-03	RADIANCE_ADD_BAND_4 = -48.86088
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 5.9801E-03	RADIANCE_ADD_BAND_5 = -29.90042
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.4872E-03	RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.43596
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.0126E-04	RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.50632
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1059E-02	RADIANCE_ADD_BAND_8 = -55.29707
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3372E-03	RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.68576
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04	RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04	RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000

Figura 67: Detalle de los valores ML y AL para transformación a radiancia

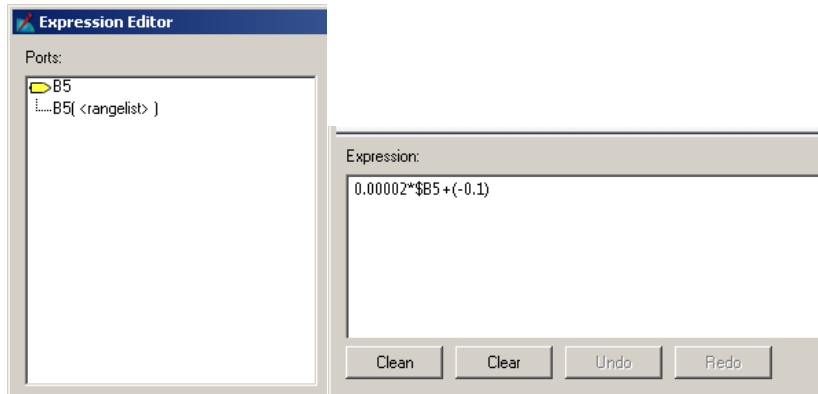


Figura 68: Detalle de los parámetros introducidos en el numerador.

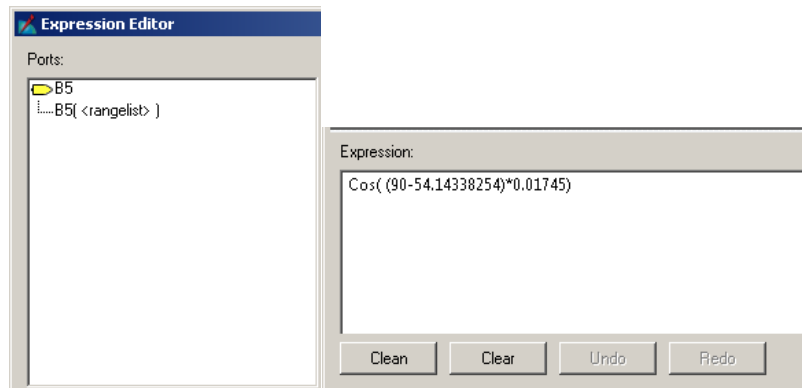


Figura 69: Detalle del denominador del modelo

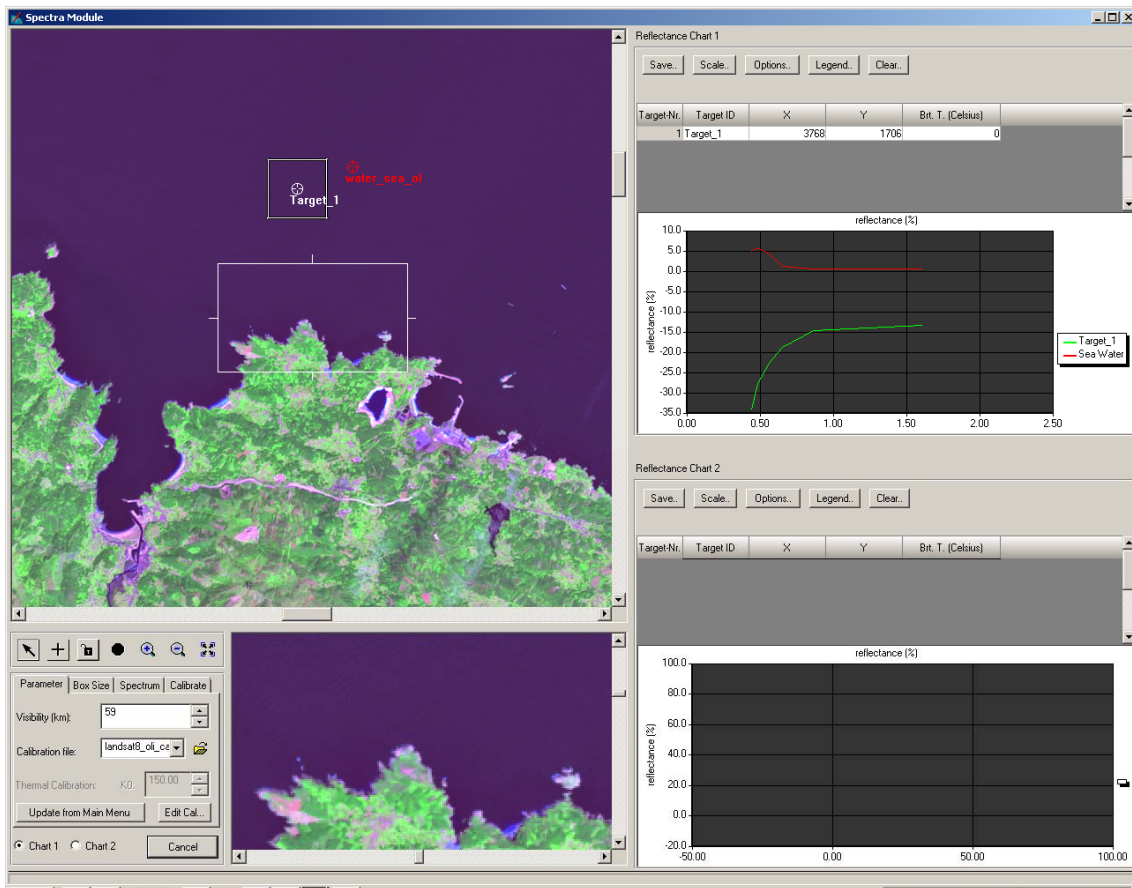


Figura 70: Detalle de la firma espectral del agua comparada con la firma de la biblioteca espectral de ATCOR.

```

"""
TOA Reflectance
Equation for Landsat 8:
r = (M*CN+A)/cos(thZ)
with r for TOA reflectance
      M for band-specific multiplicative rescaling factor
      CN for pixel value (digital number)
      A for Band-specific additive rescaling factor
      thZ for Solar Zenithal angle
"""

```

Figura 71: Comentario en el script de Python donde se indica el algoritmo implantado.


```

# TOA Reflectance with correction for sun angle
toa = (maxi*(self.gain[band]*data + self.add[band])/
      (numpy.cos(numpy.radians(self.solarZAngle))))).astype(nptype)
# saturated pixels (> 1 or > 1000)
mask = numpy.less_equal(toa, maxi)
toa = numpy.choose(mask, (maxi, toa))
outBand.WriteArray(toa,j,i)
outBand.FlushCache()
stats = outBand.GetStatistics(0, 1)
outBand = None
canal = None

```

Figura 72: Código implantado en el script para realizar la corrección pTOA.

ID	Atributo	Valor
1	Banda 1	0.345225214958...
2	Banda 1	0.345195772233...

Figura 73: Detalle de los valores de pTOA de las imágenes corregidas con Erdas y con QGIS.

```
1 import arcpy
2 from arcpy import env
3 #indicamos la variable de entorno. La ruta sobre la que trabaja.
4 env.workspace = out_folder_path = arcpy.GetParameterAsText(0)
5
6 #en el caso de existir la capa que se sobrescriba
7 arcpy.env.overwriteOutput = True
8
9 #se genera una lista de imágenes cuya extensión sea tif
10 tableras = arcpy.ListRasters("*.tif")
11
12 #defino un bucle sobre el que realizará las estadísticas y
13 # la creación de tablas para cada imagen
14 for tr in tableras:
15     arcpy.CalculateStatistics_management(tr)
16     arcpy.BuildRasterAttributeTable_management(tr, "Overwrite")
17
```

Figura 74: Código empleado en el script de creación de tablas para los archivos TIF.

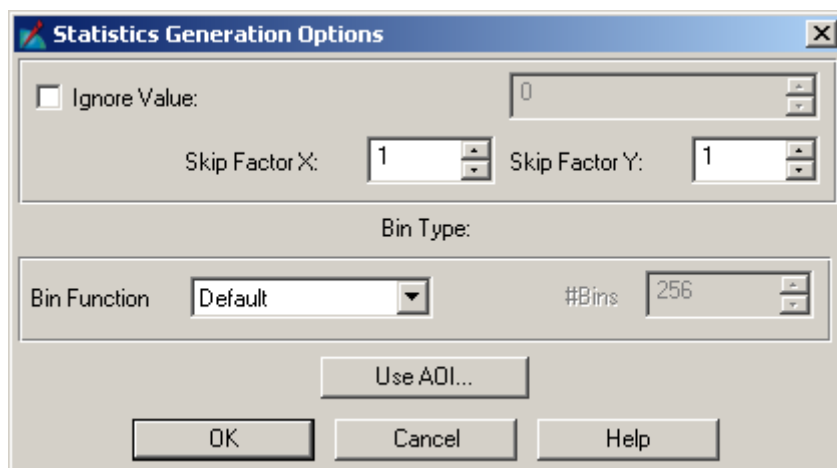


Figura 75: Detalle del parámetro de agrupación en las estadísticas de la imagen. ERDAS.

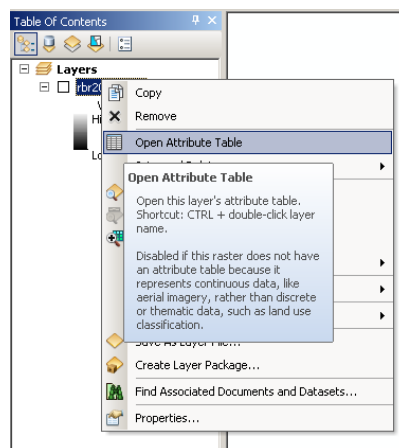


Figura 76: Opción de creación de tabla de imagen desde ArcMap.

	A	B	C	D
1	Value	Count		
2	0	#####		
3	1	0,000000000000		
4	2	0,000000000000		
5	3	0,000000000000		
6	4	0,000000000000		
7	5	0,000000000000		
8	6	0,000000000000		
9	7	0,000000000000		

Figura 77: Resultado del proceso de indexación de los valores.

	A	B	C	D
1	Value	Count	detectar	
7408	7436	0,000000000000		
7409	7447	0,000000000000		
7410	7457	0,000000000000		
7411	7458	0,000000000000		
7412	17169	0,000000000000	posible	
7413	17788	0,000000000000		
7414	17919	0,000000000000		
7415	17939	0,000000000000		
7416	17956	0,000000000000		

Figura 78: Selección del valor mínimo del histograma.

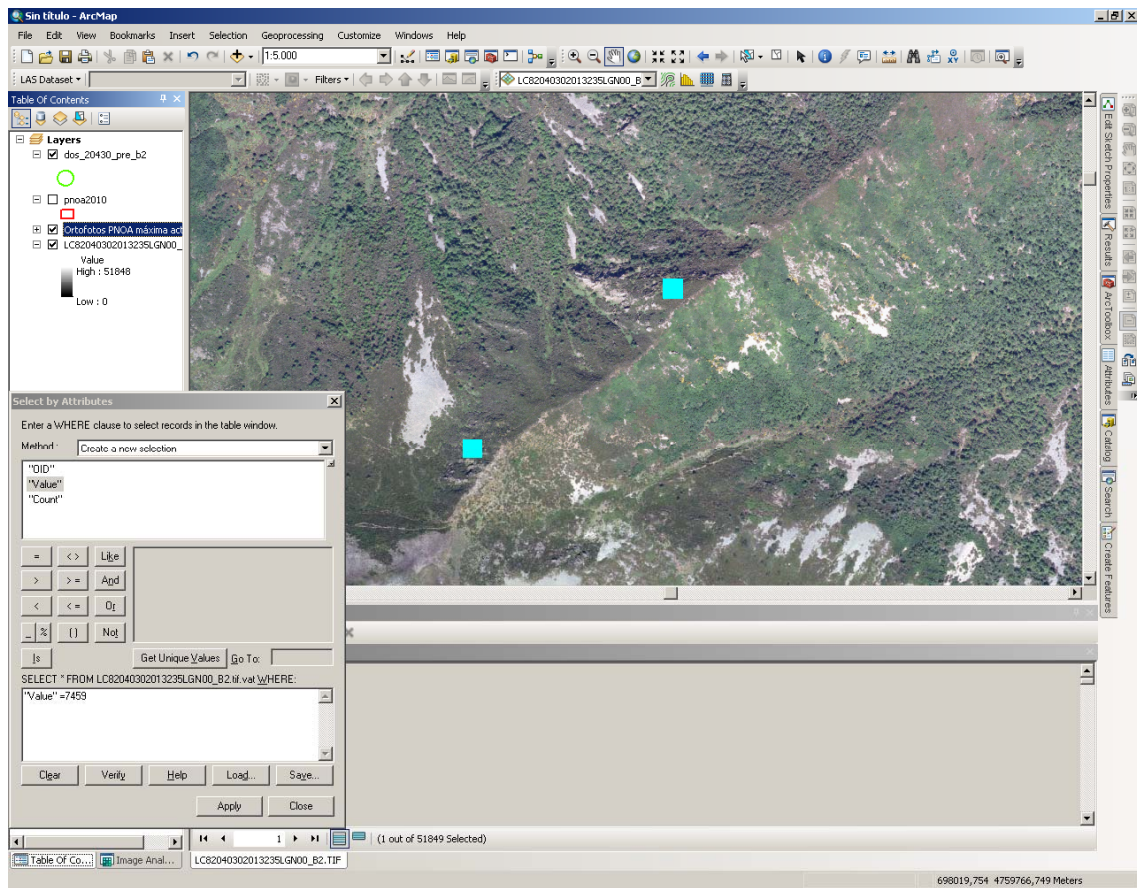


Figura 79: Ubicación del píxel DOS para la banda2 de la escena 20430 pre.

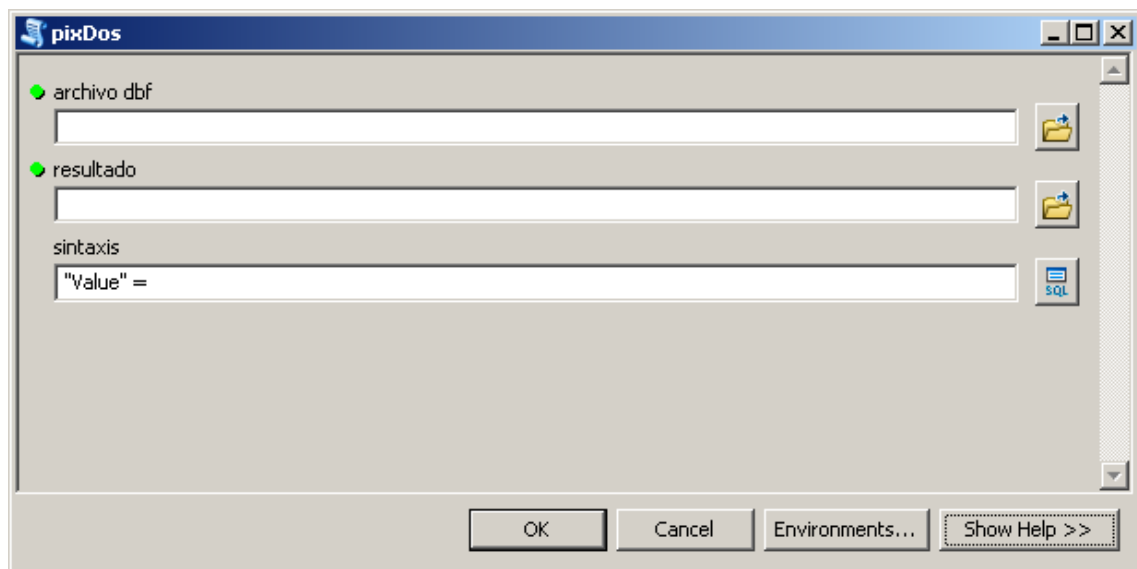


Figura 80: Interfaz de la herramienta de exportación de los píxeles DOS

```

1 import arcpy
2 from arcpy import env
3
4 #selecciono el archivo dbf de la tabla
5 dato = out_file_path = arcpy.GetParameterAsText(0)
6
7 #realizo la consulta sobre el archivo
8 resultado = out_file_path = arcpy.GetParameterAsText(1)
9 sintaxis = out_file_path = arcpy.GetParameterAsText(2)
10 arcpy.TableSelect_analysis(dato,resultado,sintaxis)
11

```

Figura 81: Script de exportación de los píxeles DOS

```

1 import arcpy
2 from arcpy import env
3 salida="DOS.shp"
4
5 #en el caso de existir la capa que se sobrescriba
6 arcpy.env.overwriteOutput = True
7
8 #indicamos la variable de entorno. La ruta sobre la que trabaja.
9 env.workspace = r'G:\PARA_BORRAR\kk'
10 #carpeta = out_file_path = arcpy.GetParameterAsText(0)
11
12
13 #defino la variable que me genera un listado de capas de la carpeta.
14 fcs = arcpy.ListFeatureClasses()
15
16 #defino un bucle sobre el que realizará la operación de agregación de campos
17 for fc in fcs:
18     arcpy.AddField_management(fc,'CAPA','text')
19     arcpy.CalculateField_management(fc,'CAPA',''+fc+' ','PYTHON')
20 arcpy.Merge_management(fcs, salida)

```

Figura 82: Fusión de capas DOS

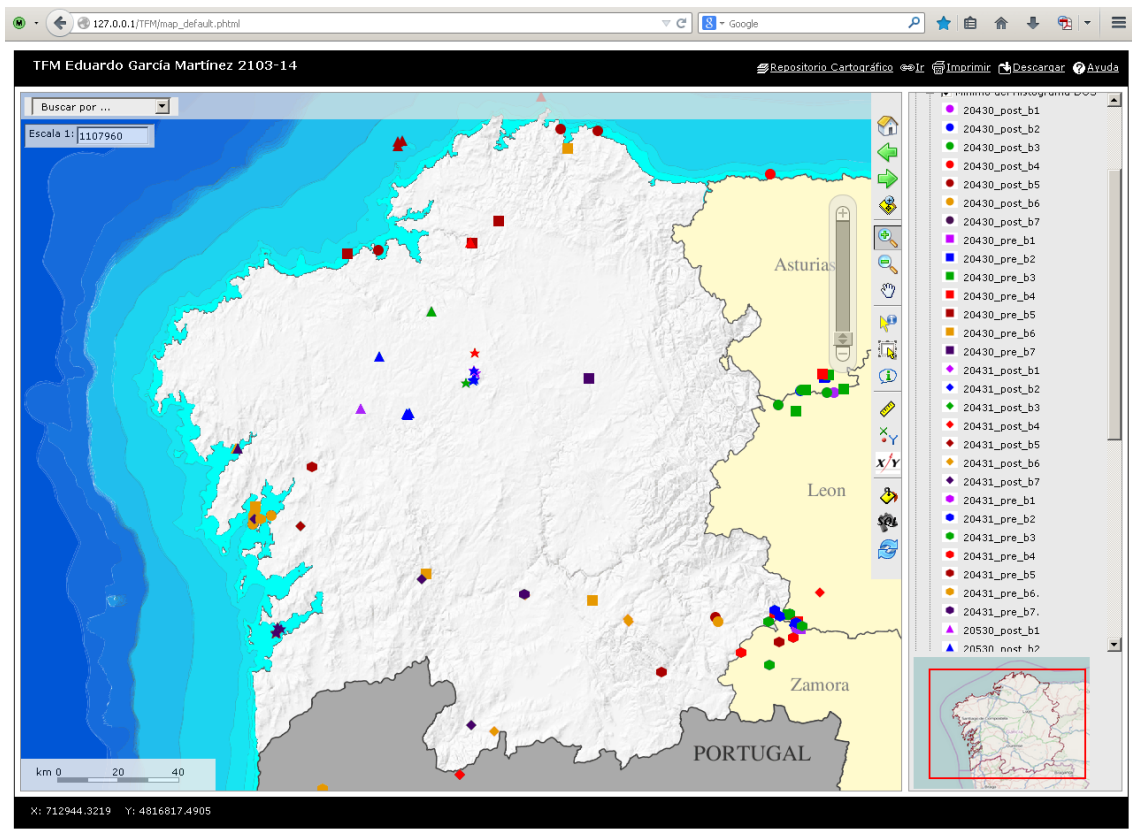


Figura 83: Distribución de los valores de DOS en las escenas utilizadas de Landsat 8 OLI.

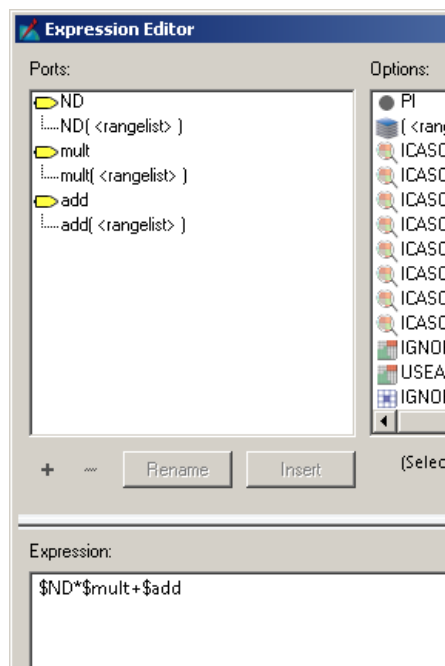


Figura 84: Paso de ND a L según la especificación del USGS.

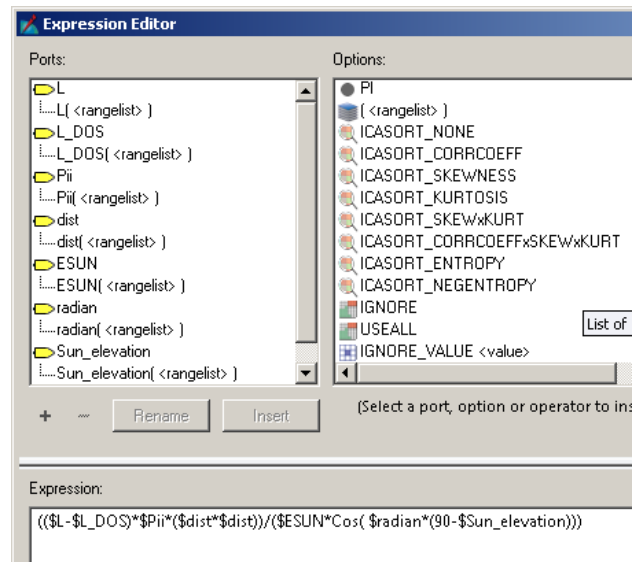


Figura 85: Expresión aplicada para la transformación de L a P, con la corrección de la dispersión atmosférica (método DOS)

	Densidad Nominal (p/m2)	Distancia nominal entre puntos (m)	Exactitud altimétrica de la nube de puntos	Exactitud altimétrica del Modelo Digital del Terreno	Paso de malla
LiDAR	0,5	1,4	RMSE z ≤ 0,20 m	RMSE z ≤ 0,50 m	5m x 5m

Figura 86: Características del vuelo LiDAR. (IGN.es)

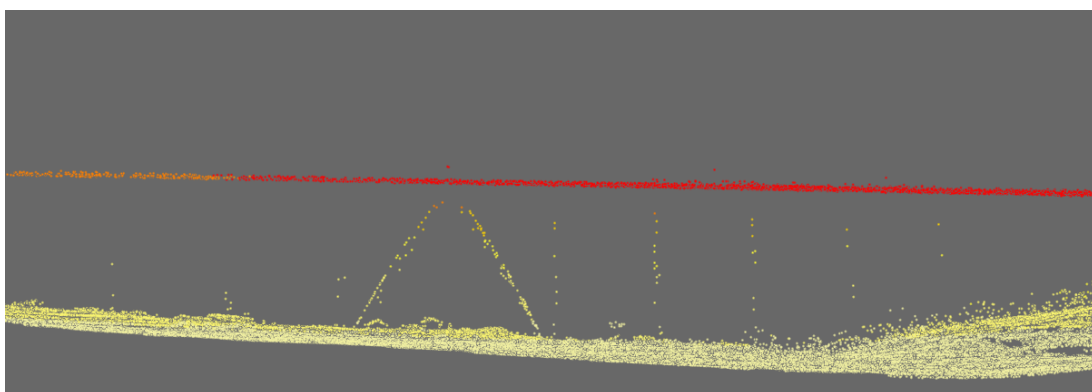


Figura 87: Puente del AVE en el lugar de O Eixo (Santiago de Compostela).

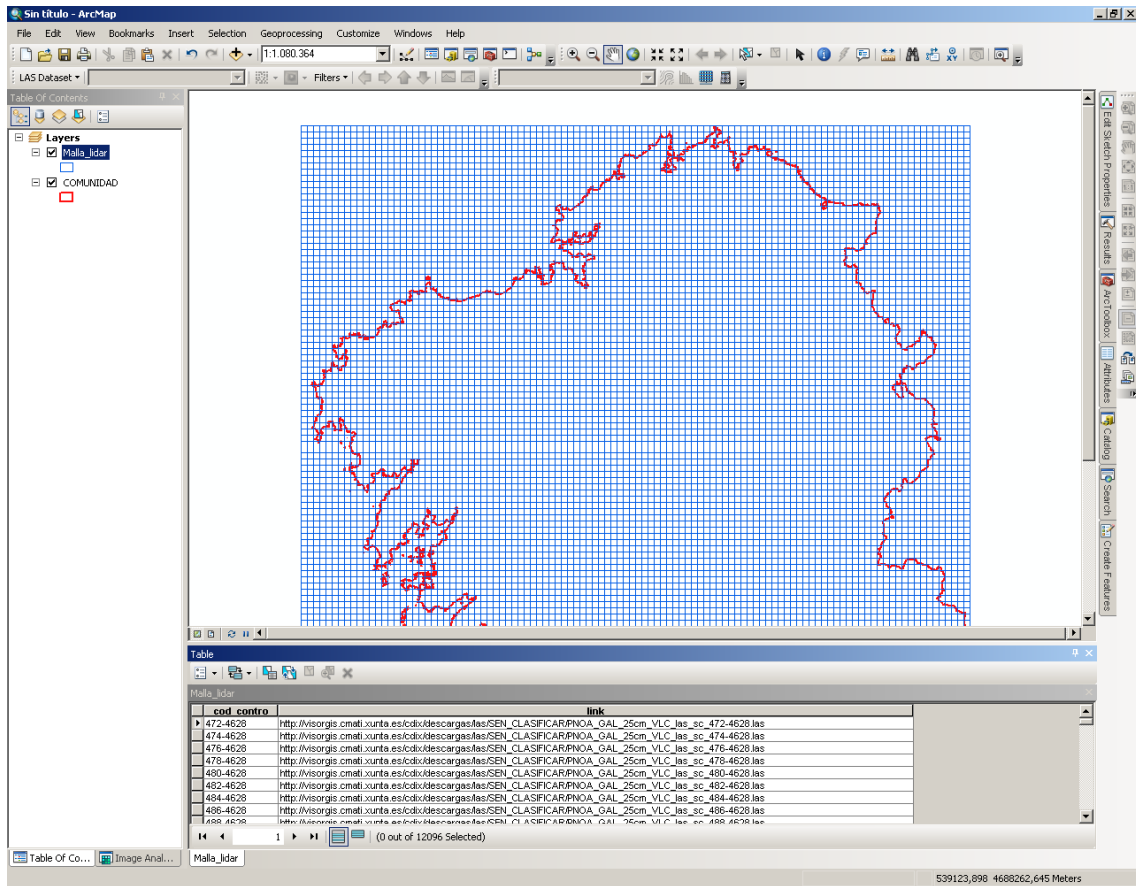


Figura 88: detalle de la malla de descarga de LiDAR y del atributo de la URL de acceso al servidor CDIX

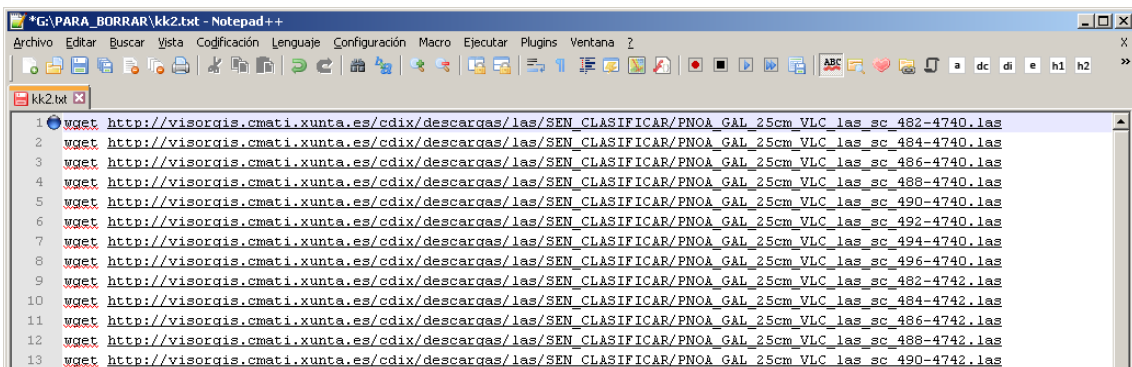


Figura 89: Detalle de los comandos empleados para la descarga por lotes de los archivos .las del CDIX

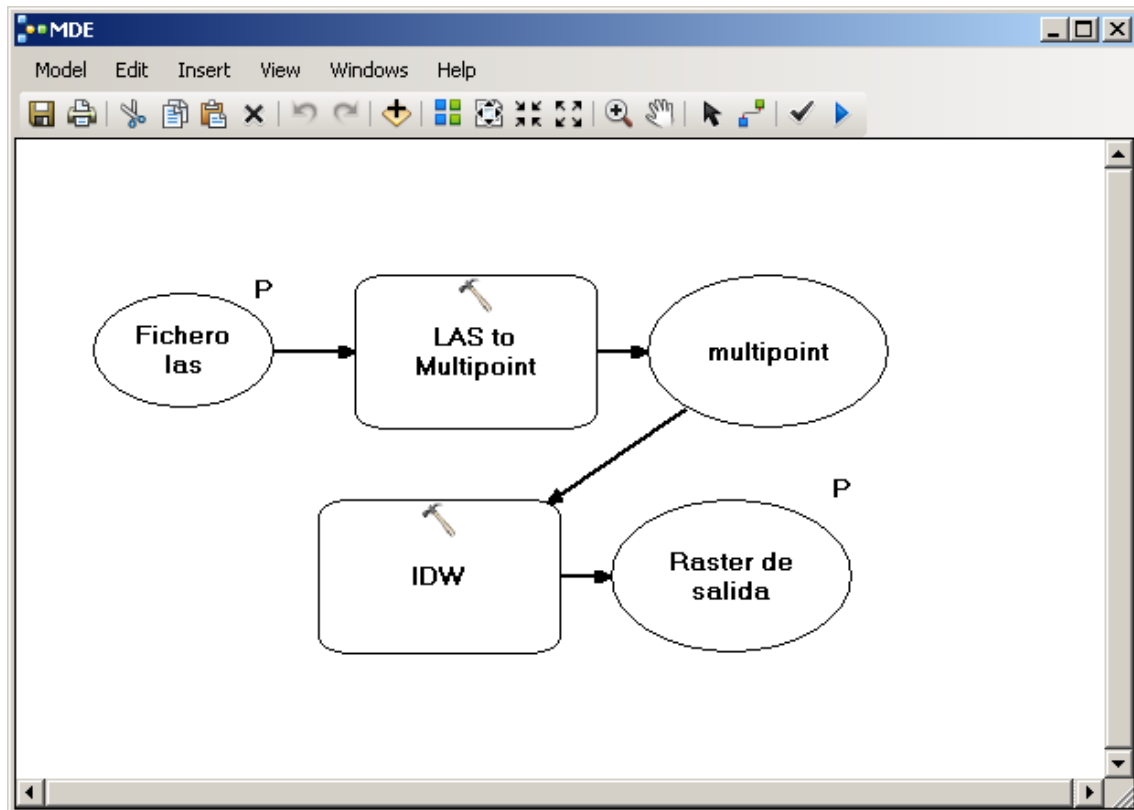


Figura 90: Esquema de la herramienta de interpolación de los archivos .las

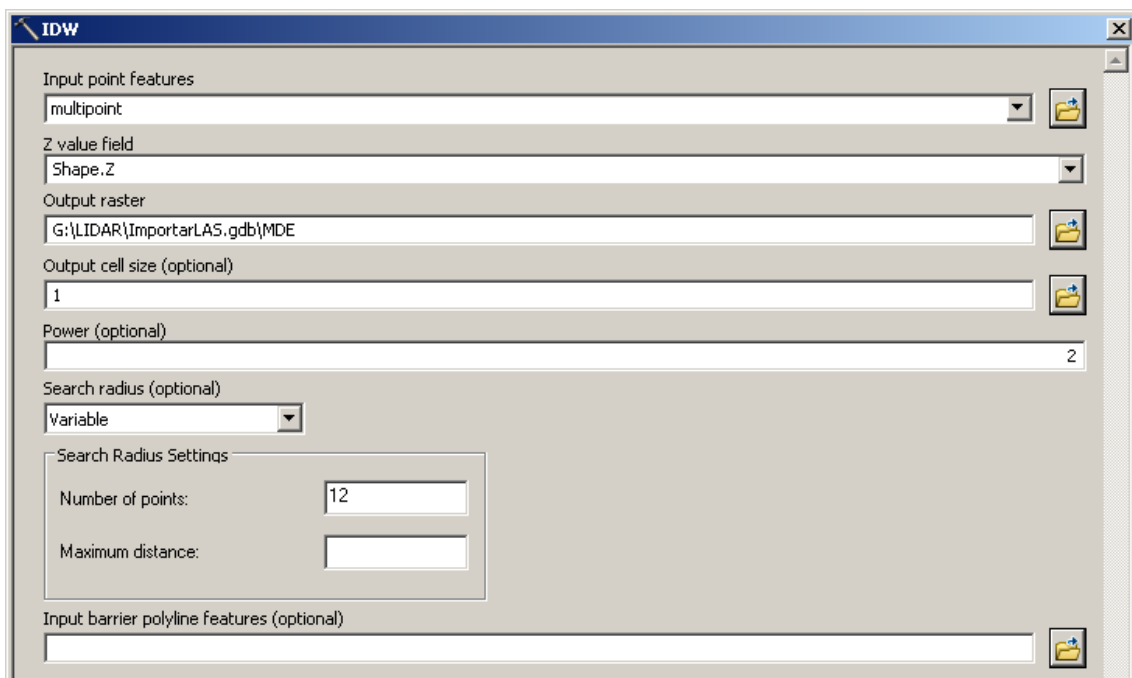


Figura 91: Detalle de los parámetros empleados en el IDW

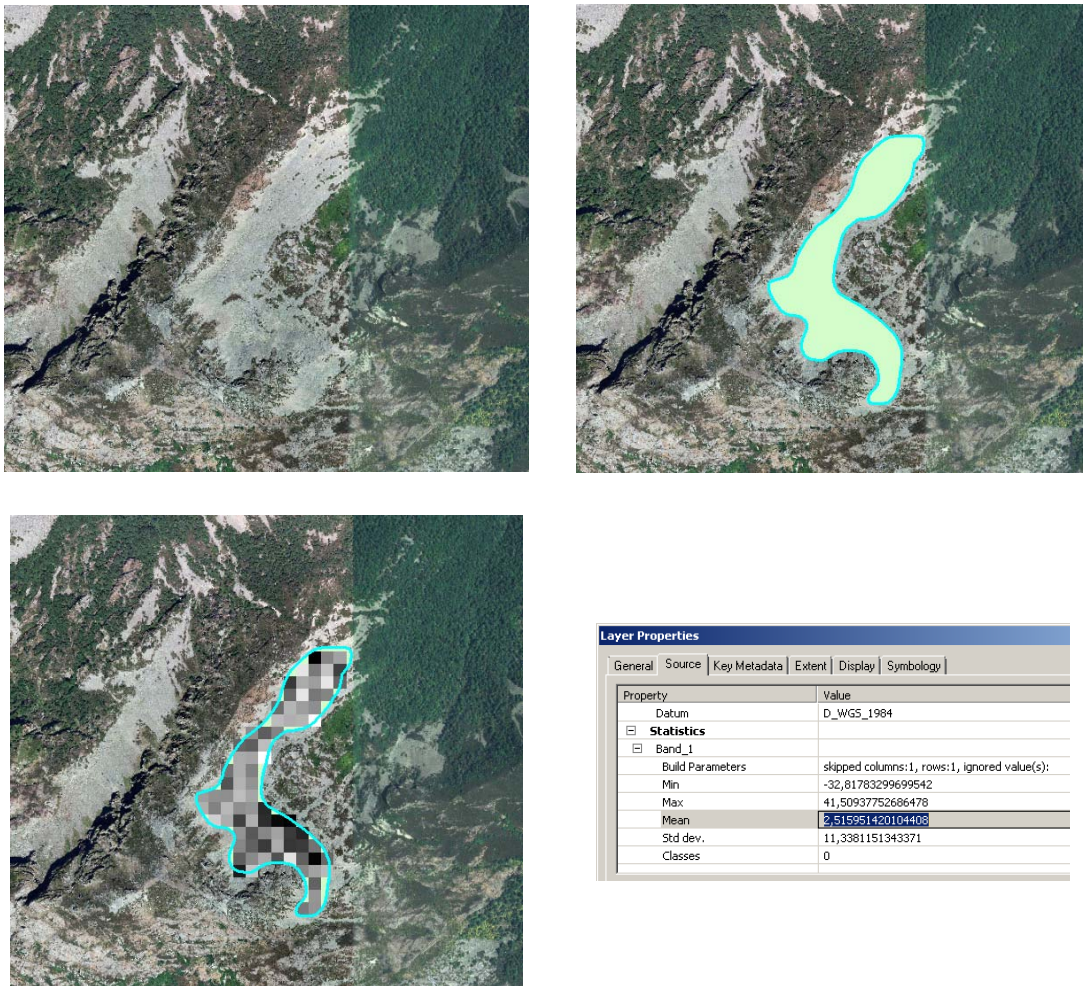


Figura 92: Proceso de extracción del valor de ΔNBR_{offset}

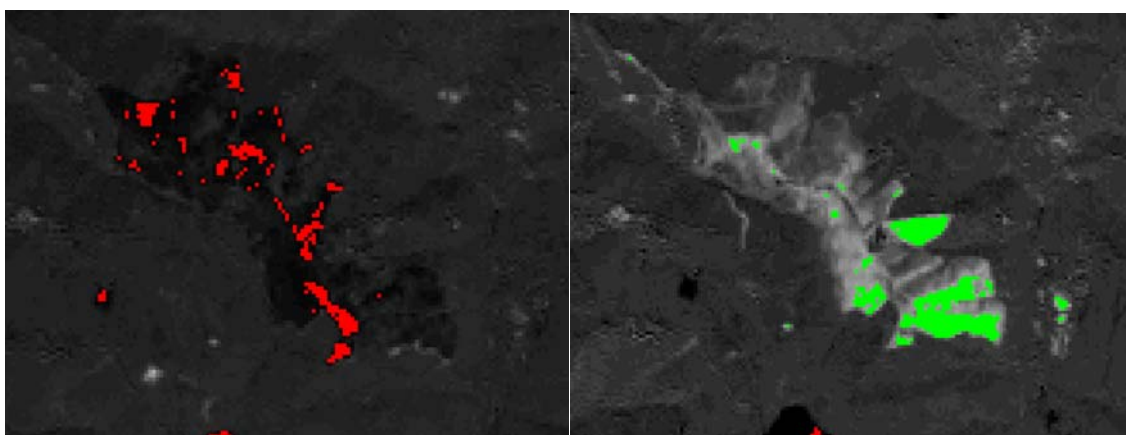


Figura 93: Resultados de diferencias con la banda 3 y la 7

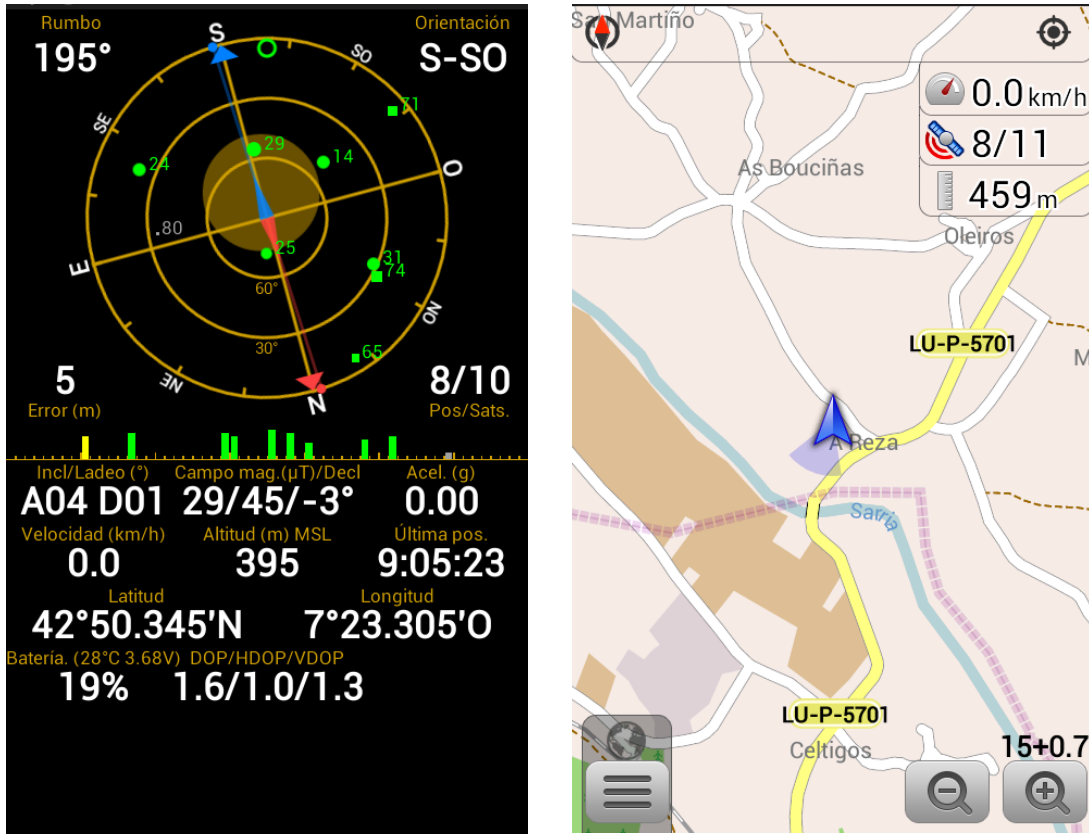


Figura 94: Datos a-GPS / GLONASS del smartphone Samsung S3 Mini.



Figura 95: Metadatos de etiqueta GPS de una fotografía del Samsung S3 Mini analizados con Photoshop.

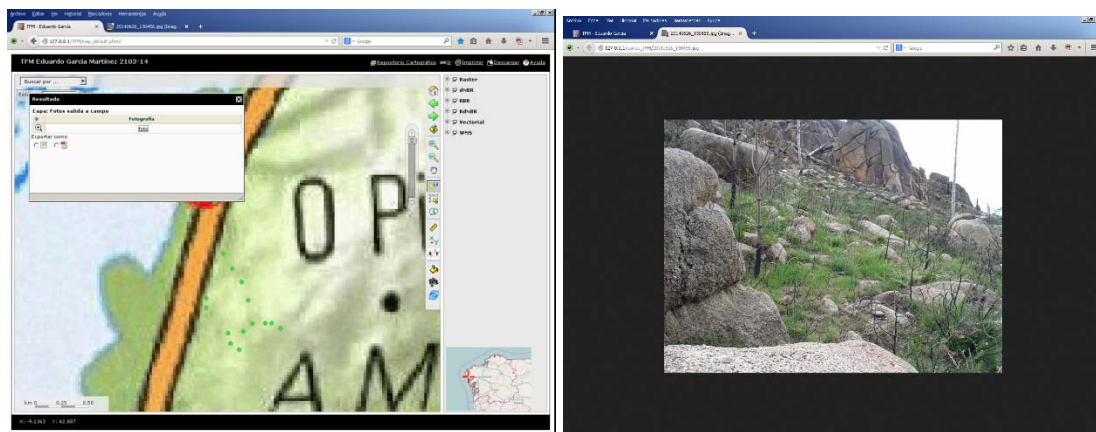


Figura 96: Hipervínculo a la imagen en la capa de fotos de campo.

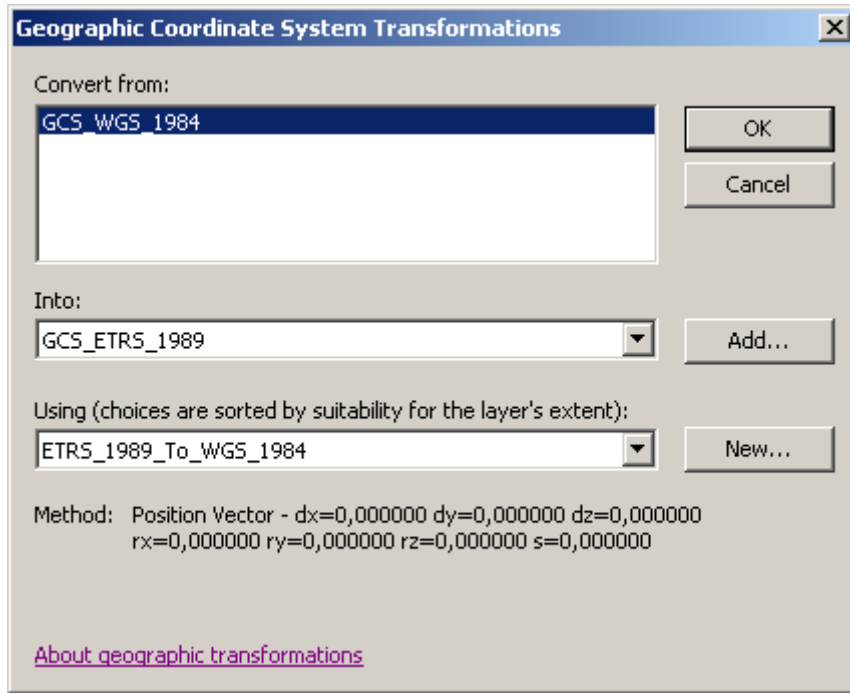


Figura 97: Detalle del parámetro de transformación ETRS89 a WGS84 y valores de traslación y rotación.

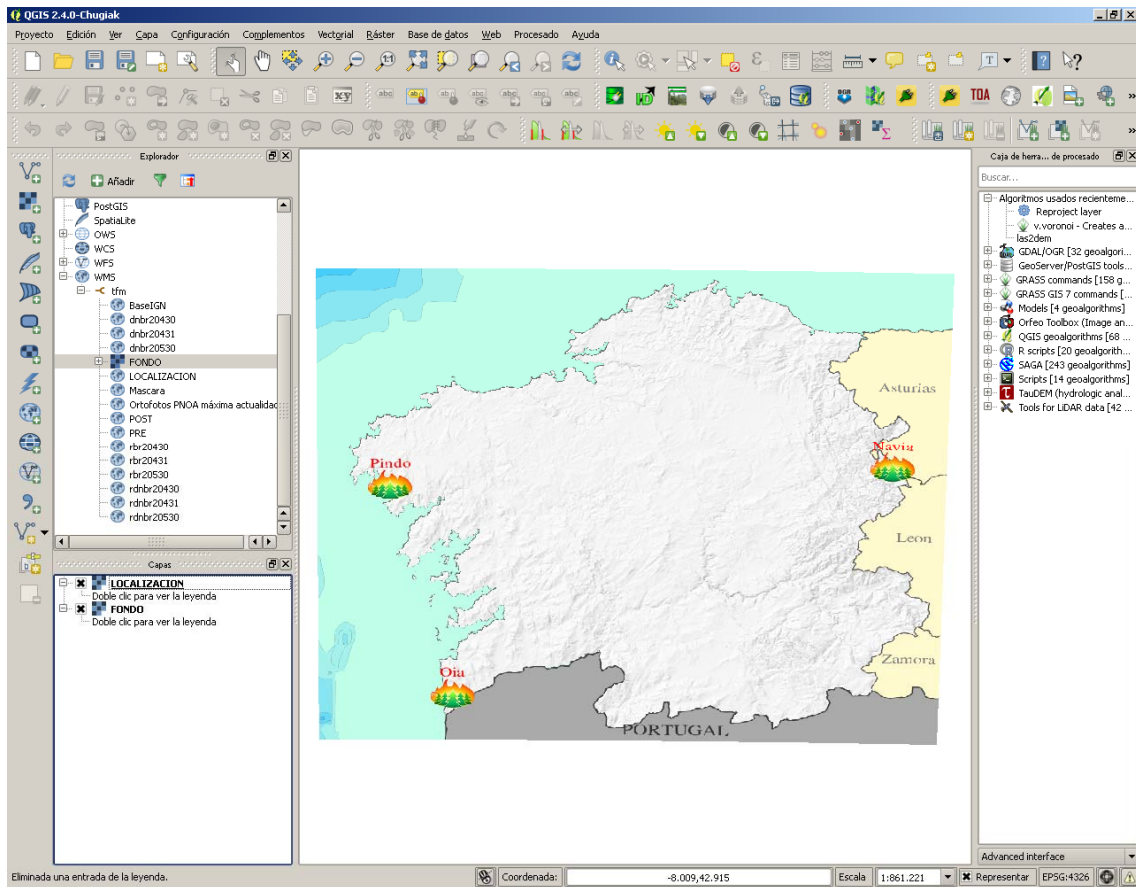


Figura 98: Acceso al servicio WMS a través de QGIS

```

<pmapper>
  <ini>
    <pmapper>
      <pmTitle>TFM - Eduardo Garcia</pmTitle>
      <debugLevel>3</debugLevel>
      <plugins>export</plugins>
      <plugins>scalebar</plugins>
      <plugins>transparency</plugins>
      <plugins>coordinates</plugins>
      <plugins>export</plugins>
      <plugins>layerinfo</plugins>
      <plugins>measure2</plugins>
      <plugins>proj4js</plugins>
      <plugins>locateXY</plugins>
    </pmapper>
  </ini>
</pmapper>

```

Figura 99: Plugins cargados en el visualizador Pmapper.

```

#####DNBR20431
LAYER
  NAME "dnbr20430"
  TYPE RASTER
  DUMP true
  TEMPLATE void
  DATA "dnbr20430.tif"
  STATUS OFF
  TRANSPARENCY 100
  PROCESSING "BANDS=1"
  TOLERANCEUNITS pixels
  TOLERANCE 0
  PROJECTION
    "init=epsg:32629"
  END
  METADATA
    "wms_name" "dnbr20430"
    "wms_server_version" "1.1.1"
    "wms_srs" "EPSG:32629 EPSG:4326"
    "wms_format" "image/png"
    "wms_style" ""
    "wms_enable_request" "*"
    "wms_include_items" "all"
    "wms_title" "dnbr20430"
    "DESCRIPTION" "dnbr20430"
    "RESULT_HEADERS" "xcoord,ycoord,dnbr"
    "RESULT_FIELDS" "x,y,value_0"
    "ows_title" "dnbr20430"
    "ows_enable_request" "*"
  END
  CLASS
    NAME "Anomalía inferior"
    EXPRESSION ([pixel] < -500)
    STYLE
      COLOR 255 0 0
    END
  END
  CLASS
    NAME "Alta regeneración"
    EXPRESSION ([pixel] >= -500 and [pixel] <= -251)
    STYLE

```

Figura 100: Estructura de una capa de tipo ráster

```
METADATA
"wms_abstract" "Servidor de Mapas del Trabajo de Fin de Master de Eduardo García Martínez"
"wms_title" "WMS Servidor de Mapas de Incendios de Galicia"
"wms_keywordlist" "TFM, Landsat, Galicia, 2013"
"wms_contactperson" "Eduardo García Martínez"
"wms_formatlist" "image/png, image/tiff, image/gif, image/jpeg"
"wms_enable_request" "GetMap GetFeatureInfo"
"MAPFILE_ENCODING" "ISO-8859-1"
"ows_title" "TFM Eduardo Garcia Martinez"
"ows_onlineresource" "http://127.0.0.1/cgi-bin/TFM_EGM.exe?"
"ows_srs" "EPSG:32629 EPSG:4326"
"ows_enable_request" "*"

#####WFS METADATA
"wfs_abstract" "Servidor de Mapas del Trabajo de Fin de Master de Eduardo García Martínez"
"wfs_title" "WFS Servidor de Mapas de Incendios de Galicia"
"wfs_keywordlist" "TFM, Landsat, Galicia, 2013"
"wfs_onlineresource" "http://127.0.0.1/cgi-bin/TFM_EGM.exe?"
"wfs_srs" "EPSG:32629 EPSG:4326"
"wfs_encoding" "ISO-8859-1"
"wfs_enable_request" "*"
"wfs_geometry_element_name" "Shape"
END # Metadata
END # Web
```

Figura 101: Característica de los metadatos generales del servicio.

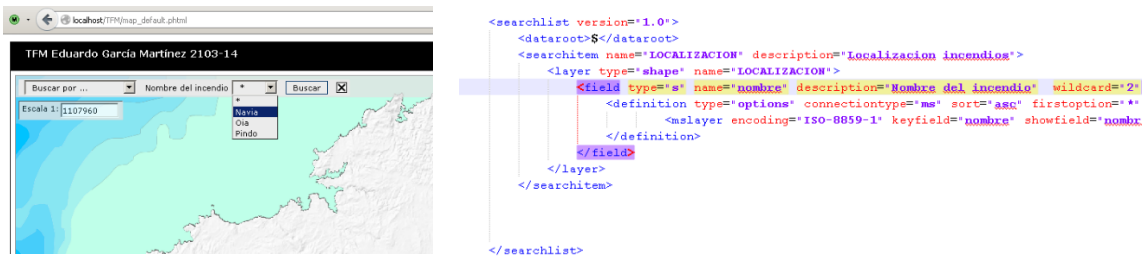


Figura 102: Función de búsqueda de Pmapper

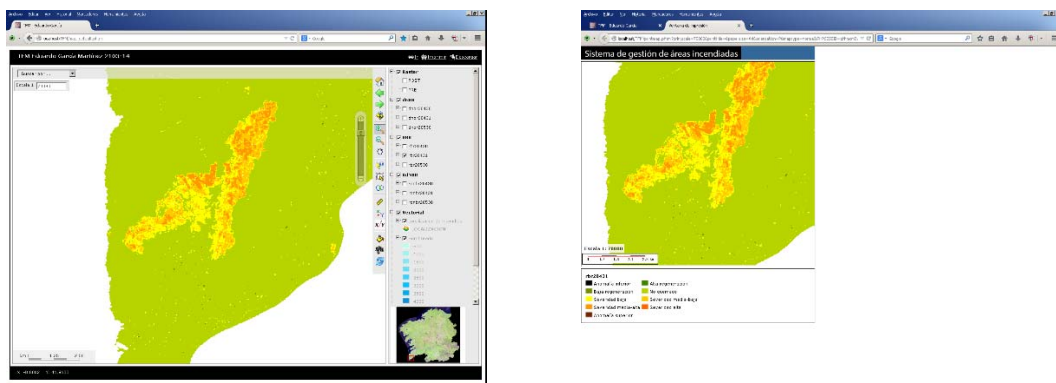


Figura 103: Vista de mapa y salida impresa.

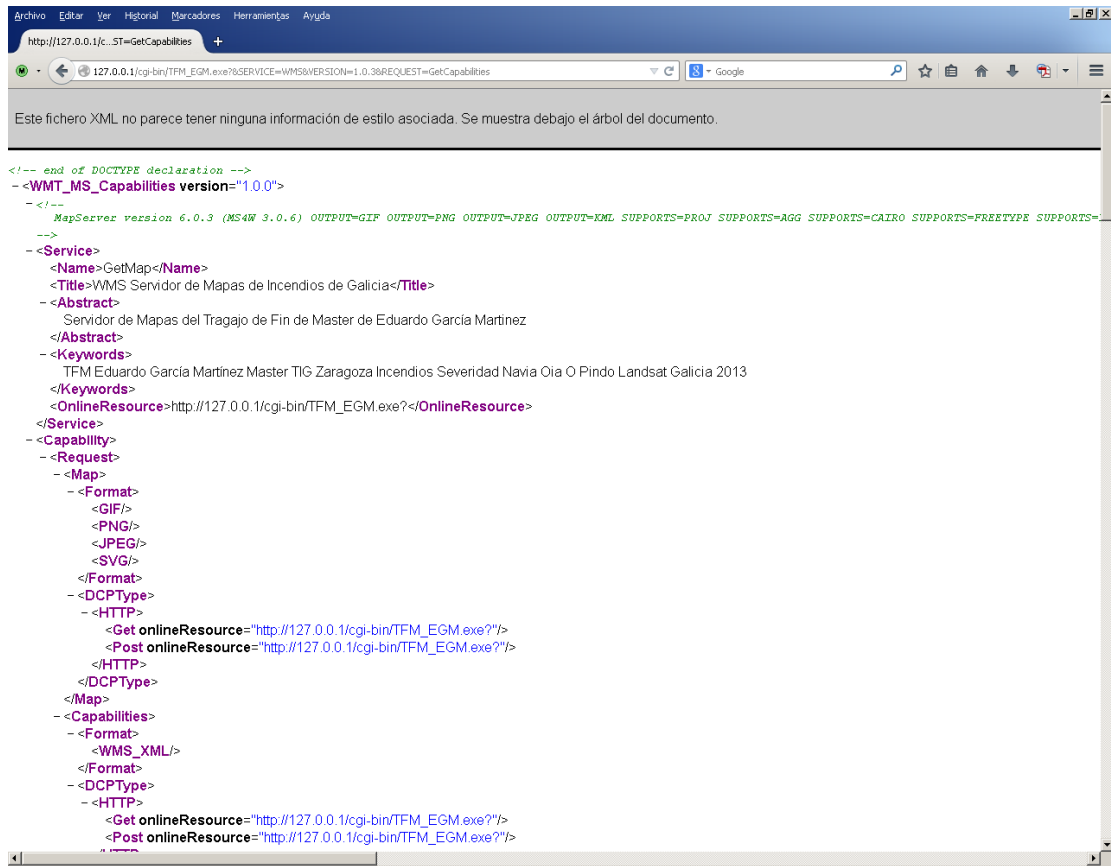
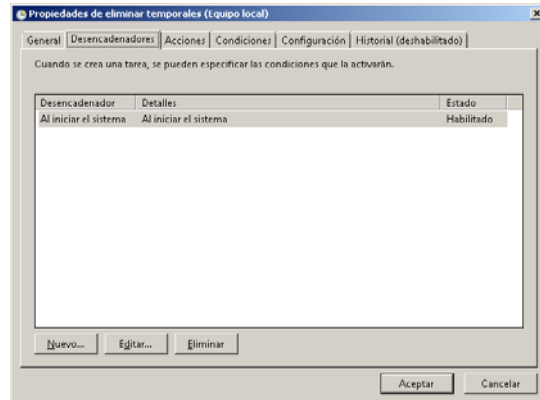
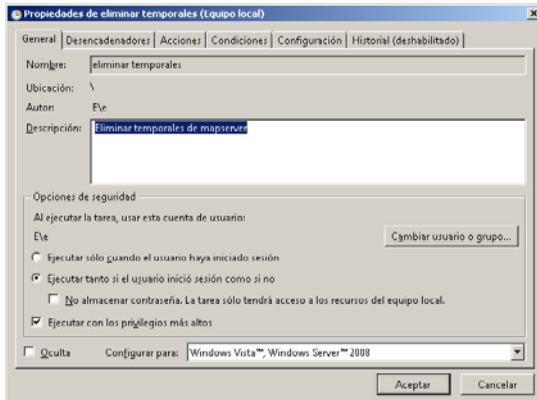


Figura 104: GetCapabilities del servicio WMS.



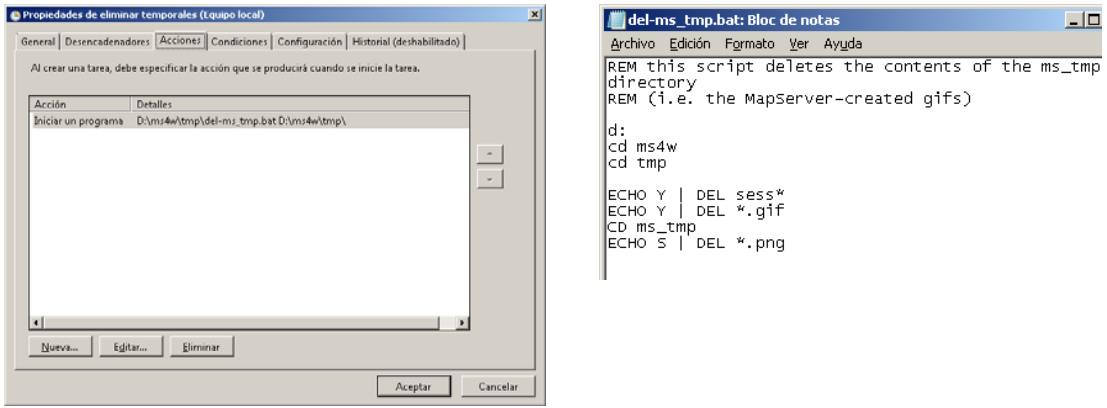


Figura 105: Configuración de la eliminación de temporales en Windows 7

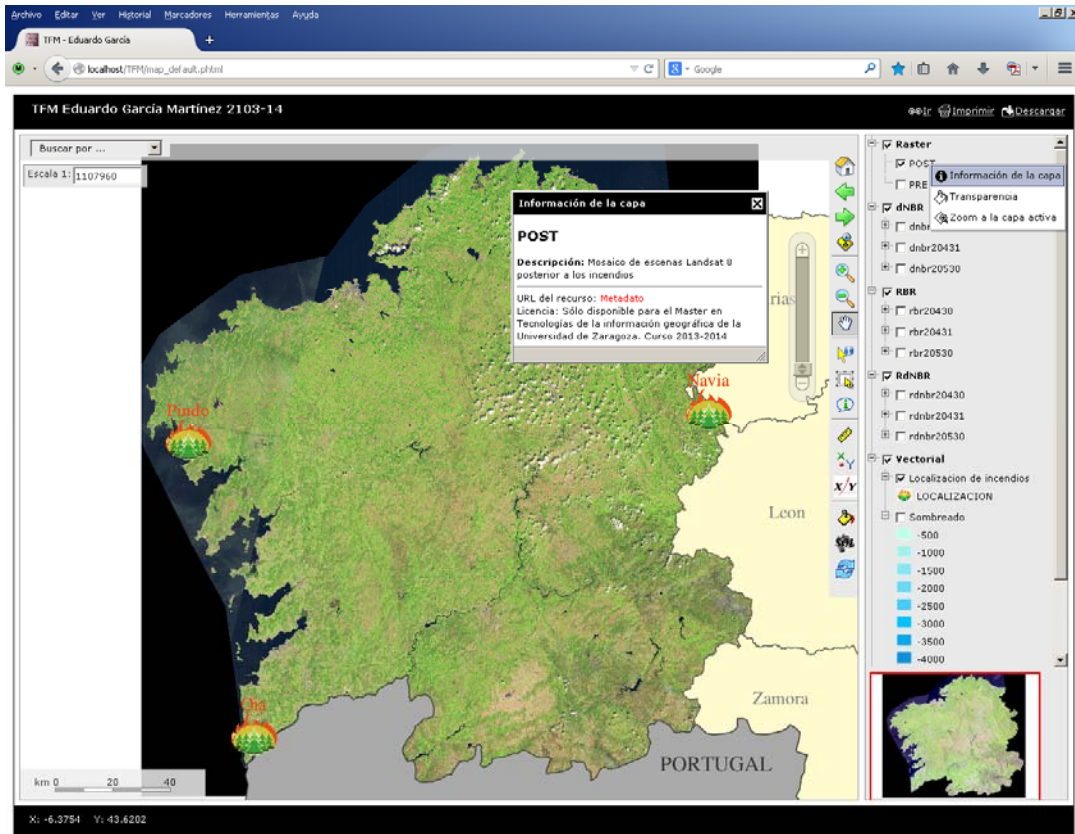


Figura 106: Acceso a los metadatos de cada capa.

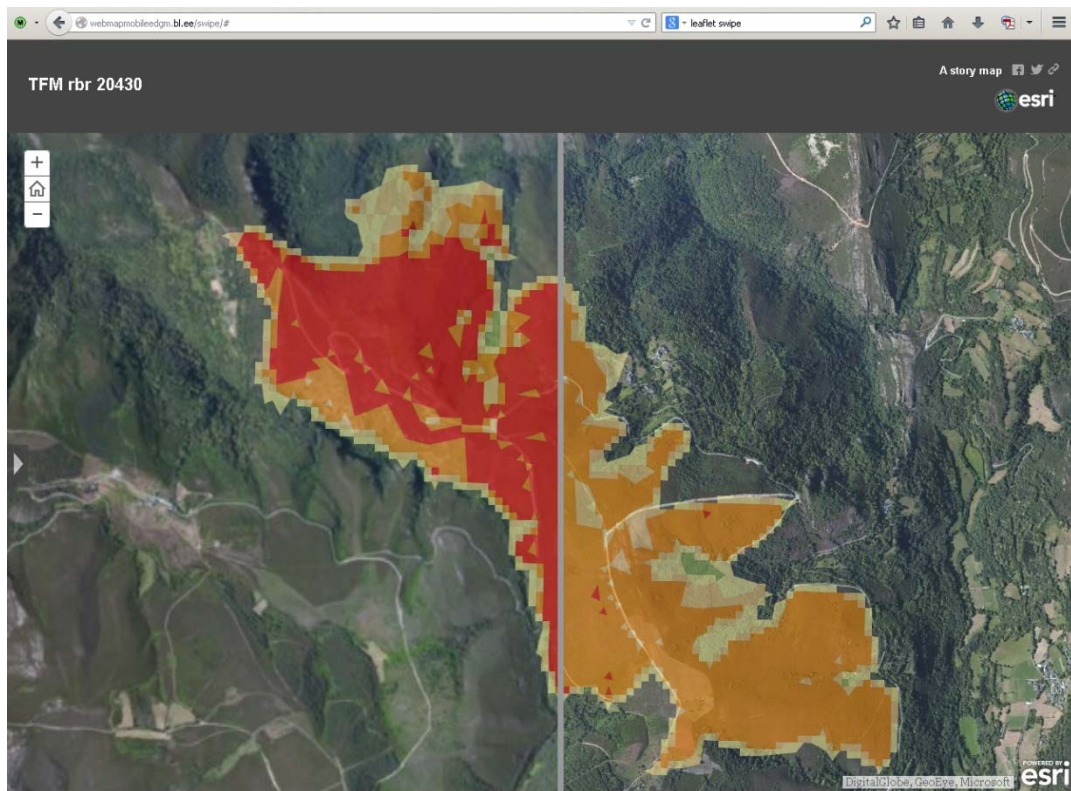


Figura 107: Detalle de visualizador swipe de los resultados entre Δ NBR y RBR del incendio de Navia