

Trabajo Fin de Grado

Análisis de la severidad y la regeneración vegetal mediante imágenes de satélite en el incendio de Sierra de Luna (2015)

Autor:

Igor Skrypnychuk Untilov

Director:

Fernando Pérez Cabello

Grado en Geografía y Ordenación del Territorio

Facultad de Filosofía y Letras

Universidad de Zaragoza

Curso 2015-2016

Resumen: Los incendios forestales constituyen uno de los principales problemas ambientales en cuanto a su incidencia en la vegetación forestal se refiere. Cada año la comunidad autónoma de Aragón sufre numerosos siniestros, en este contexto el incendio de la Sierra de Luna (2015) fue uno de los más acusados de los últimos años arrasando con 13.889 hectáreas y afectando a siete municipios (Asín, Ores, Uncastillo, Ejea de los Caballeros, Luna, Luesia y Biota). En este trabajo se va a realizar la delimitación y cartografía del área afectada por el incendio mediante imágenes Landsat y el estudio de la regeneración vegetal y su evolución temporal mediante el análisis de los valores de NDVI. En términos generales el incendio de Luna presentó unos niveles de severidad moderada/alta, con importantes diferencias a nivel espacial controladas por el tipo de vegetación previa.

Abstract: Forest fires are one of the most important environmental problems in terms of their impact on forest vegetation. Every year, the Region of Aragon suffers numerous fires. In this context, the Sierra de Luna (2015) fire was one of the most serious of recent years, devastating 13,889 hectares and affecting seven municipalities (Asin Ores, Uncastillo, Eje de los Caballeros, Luna, Luesia and Biota). In this work the delimitation and mapping of the area affected by the fire will be carried out by Landsat images and the study of regeneration of vegetation and its temporal evolution through NDVI analysis. General speaking, moderate/high severity levels, with important spatial differences because of vegetation types, were mapped in the Sierra de Luna Fire,

Índice

1. Introducción	1
1.1 Teledetección e incendios forestales	1
1.2 Imagen de satélite.	2
1.3 Ley de Montes y Competencias en Aragón.	6
1.4 glosario de términos clave en el desarrollo del TFG	6
2. Objetivos	7
3. Área de Estudio	8
3.1 Localización	8
3.2. Condiciones climáticas	9
3.3 Vegetación	11
3.4 Geología y geomorfología	13
4. Materiales y metodología	13
4.1 Descarga y tratamiento de las imágenes de satélite.	13
4.2 Delimitación de la zona quemada	15
4.3 Análisis de la Severidad (dNBR)	16
4.4. Análisis multitemporal del Índice NDVI.	17
4.5 Fuentes de información cartográfica y programas informáticos utilizados	18
4.6. Realización de un muestreo para la extracción de la información.	18
5. Resultados y Discusión	19
5.1 Análisis espacial de la severidad del fuego mediante el dNBR (Objetivo A).	20
5.2 Seguimiento multitemporal de las zonas quemadas (Objetivo B)	25
5.3 Evolución temporal por comunidades vegetales	31
5.4. Factores explicativos de regeneración vegetal del incendio: el papel de la pendiente topográfica y las actuaciones de carácter antrópico.	34
6. Conclusiones	38
7. Fuentes bibliográficas y páginas web consultadas.	39
8. Anexos	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Landsat 7. Fuente: Google Imágenes.....	3
Figura 2: Landsat 8. Fuente Google Imágenes.....	4
Figura 3: Bandas espectrales de Landsat 7 y 8.....	5
Figura 4: Localización del Área de Estudio.....	9
Figura 5: Climograma Luna.....	10
Figura 6: Mapa de Vegetación.....	12
Figura 7: Distribución temporal de la serie de imágenes de satélite utilizada.....	14
Figura 8: Identificación de la zona incendio.....	16
Figura 9: Malla de puntos del muestreo aleatorio.....	19
Figura 10: Distribución de los valores de severidad del incendio por categorías dNBR: Unburned, 1; low severity 2; medium low severity, 3; medium high severity, 4; high severity, 5.....	20
Figura 11: Mapa NBR previo y posterior y mapa de severidad (dNBR).....	21
Figura 12: Porcentaje de la severidad por cada comunidad vegetal.....	23
Figura 13: Representación simultánea de NDVI previo, Severidad y comunidades vegetales.....	25
Figura 14: Evolución de la media de los valores de NDVI.....	26
Figura 15: Evolución de la media de los índices NDVI sin imágenes Sentinel 2-A.....	28
Figura 16: Distribución de los valores de NDVI antes del fuego a partir dela imagen OLI (30-Junio-2015).....	29
Figura 17: Distribución de los valores de NDVI justo después del fuego (9-Julio-2015).....	29
Figura 18: Distribución de los valores de NDVI después del fuego (18-Septiembre-2015).....	29
Figura 19: Distribución de los valores de NDVI después del fuego (30-Noviembre-2015).....	30
Figura 20: Distribución de los valores de NDVI después del fuego (4-Febrero-2016).....	30
Figura 21: Distribución de los valores de NDVI después del fuego (29-Abril-2016).....	30

Figura 22: Evolución de los valores NDVI por comunidades vegetales.....	33
Figura 23: Mapa de pendiente topográfica.....	35
Figura 24: Relación NDVI previo al fuego respecto a la pendiente.....	35
Figura 25: Relación NDVI posterior al incendio respecto a la pendiente.....	36
Figura 26: Relación imagen 29-Abril-2016 respecto a la pendiente.....	36
Figura 27: Distribución espacial de las actuaciones antrópicas postincendio realizadas por el Departamento de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón.....	38

ÍNDICE TABLAS.

Tabla 1: Cubrimiento de Bandas Landsat 7 y 8.....	4
Tabla 2: Características de las bandas Sentinel 2-A.....	5
Tabla3: Serie temporal de imágenes utilizadas.....	14
Tabla 4: Combinación falso color Landsat 8.....	15
Tabla 5: Combinaciones de falso color en Landsat 8 utilizadas.....	15
Tabla 6: Índices Firemon.....	17
Tabla 7: Listado de las 27 variables utilizadas en la extracción de la información para el mejor conocimiento de la zona.....	19
Tabla 8: Datos severidad en el incendio.....	21
Tabla 9: Relación en porcentaje de cada comunidad vegetal respecto a las categorías de severidad.....	22
Tabla 10: Diferencias estadísticas entre Landsat 8 y Sentinel 2-A.....	27

1. Introducción

En este Trabajo de Fin de Grado se analizan las consecuencias, en términos de severidad y regenerado de la vegetación, derivadas de un incendio forestal (Luna) que tuvo lugar en julio de 2015 en la Comarca de la Altas Cinco Villas. El análisis se basa en el empleo de herramientas de SIG y datos de provenientes de imágenes de satélite.

1.1 Teledetección e incendios forestales

La teledetección espacial ha sido profusamente utilizada en la cartografía de áreas quemadas gracias al carácter sistemático de las observación de la superficie terrestre y la sensibilidad de las bandas del espectro sensible a la discriminación de las zonas quemadas (Chuvieco, 2002).

La información se obtiene gracias a los sensores remotos instalados en los satélites y por ello podemos realizar un seguimiento exhaustivo de los diferentes procesos ambientales localizados en nuestro planeta, en este caso los incendios forestales. Los datos se registran y se transmiten en formato digital lo que permite procesarlos con ayuda de equipos informáticos, garantizando un tratamiento automático, rápido y razonablemente objetivo. En función de las características de las orbitas de los satélites estos tienen capacidad para pasar por el mismo punto de la superficie terrestre con una frecuencia temporal determinada lo cual permite realizar un seguimiento multitemporal de los procesos dinámicos como ocurre en el caso de los incendios forestales (Chuvieco, 2010).

La teledetección como herramienta de análisis es clave para facilitarnos información en diferentes partes de un incendio, es decir, en su fase previa, durante y posterior. En primer lugar, nos aporta la información previa necesaria para conocer el tipo de combustible localizado en una determinada zona y por otro lado facilita el conocimiento sobre el nivel de riesgo de que se produzca un posible incendio. En segundo lugar de manera simultánea al fuego, nos facilita información sobre la exacta localización de los focos activos. Por último, como información post-incendio nos aporta una gran cantidad de información para la evaluación de superficies quemadas y su seguimiento de regeneración vegetal.

La teledetección para estudiar superficies quemadas suele apoyarse en la construcción de índices espectrales a partir de la combinación de dos o más bandas. Su resultado nos permite conocer diferentes estados y características de la superficie afectada. En relación con superficies quemadas e incendios hay que destacar principalmente dos índices; *Normalized Difference Vegetation index* (NDVI) y *Normalized Burn Ratio* (NBR).

En este contexto, en el presente proyecto se van a utilizar dichos índices con el objetivo de caracterizar las consecuencias del fuego en términos de severidad y analizar la evolución temporal del incendio durante los siguientes diez meses del incendio (hasta abril de 2016). Se pretende además identificar las relaciones entre severidad y la capacidad de regeneración con diferentes factores.

Otras características y ventajas que presenta la Teledetección son las que vamos a presentar a continuación, en primer lugar *podemos destacar su capacidad de visión global del fenómeno-problema ya que nos permite conocer y acceder a regiones no visibles del espectro, lo cual anteriormente no era posible con el sistema tradicional pero gracias a su cobertura total del terreno y a su continuidad esto ya es posible* (Chuvieco, 2009).

Otra característica-ventaja se encuentra en la frecuencia y en la homogeneidad de adquisición. En función de las características de las orbitas de los satélites estos tienen capacidad para pasar por el mismo punto de la superficie terrestre con una frecuencia temporal determinada lo cual permite realizar un seguimiento multitemporal de los procesos dinámicos como ocurre en el caso de los incendios forestales. (Chuvieco, 2010).

La cartografía obtenida en el tratamiento facilita información suficiente para un adecuado análisis acerca del grado de actividad de cada una de las variables que en el intervienen, como son la pendiente, vegetación, topografía, exposición.

En los últimos años han ido cobrando interés nuevos métodos que nos permiten la discriminación de aquellas superficies forestales quemadas, las cuales están caracterizadas por el empleo de índices espectrales como es el NDVI, el cual estará presente en este trabajo de fin de grado ya que lo he considerado como la herramienta más apta para el análisis de la evolución de la vegetación en el área incendiada.

Usando esta potente herramienta se determinara cómo ha sido la evolución temporal de los índices de vegetación en los siguientes diez meses del incendio (Hasta fecha de 29 de abril de 2016, última imagen LandSat utilizada). Aparte de esta evolución temporal, se determinara también el índice de severidad que tuvo dicho incendio. Con todo ello y relacionando con factores como el paisaje, su estructura, la dinámica de la vegetación y demás factores geográficos determinaremos los factores explicativos de la propagación del incendio para así poder entender el actual proyecto de repoblación aprobado para la zona y con todo ello determinar si las imágenes LandSat son una adecuada herramienta para estudiar la evolución de los niveles de afección del fuego y de la dinámica de la vegetación en los meses siguientes de los incendios forestales.

1.2 Imagen de satélite.

Una imagen de satélite es una representación visual de los datos reflejados por la superficie terrestre que captura un sensor montado en un satélite artificial, este sensor capta la radiación electromagnética que es emitida o reflejada por la superficie terrestre. Los datos son enviados a una estación terrena en donde son procesados y convertidos en imágenes.

Existen diferentes tipos de imágenes satelitales, dependiendo de la finalidad y del tipo de sensor utilizado en su construcción, como finalidades podemos destacar:

- Monitoreo de incendios e inundaciones
- Evoluciones multiespectrales de la vegetación

- Monitoreo del cambio climático
- Seguimiento de huracanes y tifones
- Espionaje militar

De los ejemplos expuestos con anterioridad, en este presente trabajo destaca el seguimiento de incendios forestales y la regeneración de la vegetación, por lo cual los satélites más adecuados por el grado de detalle que ofrecen son los de resolución espacial media: SPOT-HVR, IRS-WIFS/A WIFS y los satélites del programa Landsat sensores *Thematic Mapper*, *ETM+ Thematic Mapper Plus* y *OLI-TIRS Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor*.

Las imágenes empleadas en este trabajo de análisis son las provenientes de la familia del satélite Landsat, y de manera puntual, imágenes del satélite Sentinel 2-A.

- Landsat 7 (Figura 1) fue lanzado el 15 de Abril de 1999 y su principal objetivo consistía en actualizar la base de datos de imágenes de todo el planeta Tierra sin nubes. Tiene la capacidad de recolectar y transmitir hasta 532 imágenes por día. Se encuentra en una órbita heliosincrónica, es decir, pasa siempre a la misma hora por un determinado lugar. Además posee visión de toda la superficie terrestre en un tiempo de 15 días, realizando 232 orbitas y como ya hemos citado su sensor es el ETM+.

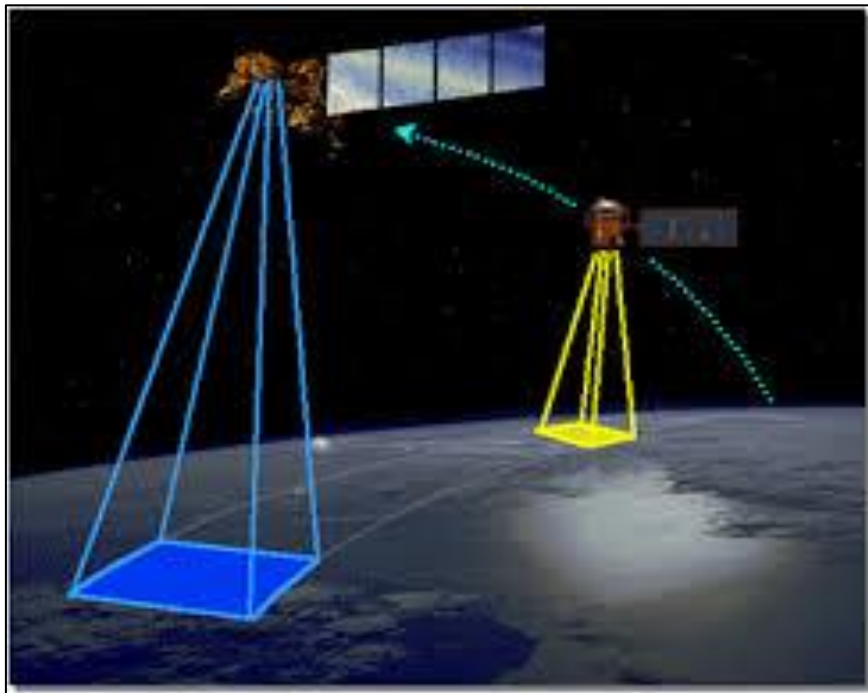


Figura 1: Landsat 7. Fuente: Google Imágenes.

- Landsat 8 (Figura 2) fue lanzado el 11 de febrero de 2013, este satélite consigue recolectar y transmitir alrededor de 650 imágenes diariamente. Se encuentra en una órbita heliosincrónica. Realiza 233 orbitas en 16 días y como hemos citado ya anteriormente.



Figura 2: Landsat 8. Fuente Google Imágenes.

A continuación, la Tabla 1 que reúne las bandas correspondientes a ambos satélites así como la Figura 3 que reúne sus bandas espectrales:

Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

Tabla 1. Cubrimiento de Bandas Landsat 7 y 8. Fuente: <http://georem.blogspot.com.es/2013/08/imagenes-landsat-8-de-panama.html>

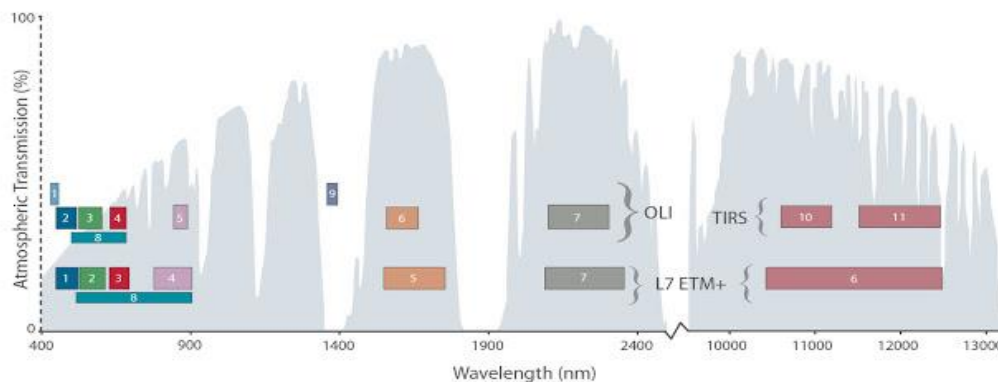


Figura 3: Bandas espectrales de Landsat 7 y 8. Fuente: <http://georem.blogspot.com.es/2013/08/imagenes-landsat-8-de-panama.html>

El reciente satélite Sentinel 2-A lanzado el pasado 23 de Junio de 2015 pertenece a una nueva flota de satélites del programa Copernicus de la Comisión Europea, estos satélites tienen como finalidad abastecer de información las bases de datos del programa Copernicus mediante imágenes multispectrales de alta resolución para el monitoreo de las áreas continentales.

Las imágenes proporcionadas por Sentinel 2-A (Tabla 2) están compuestas por 13 bandas las cuales poseen diferentes resoluciones: 60 metros, 20 metros y 10 metros y poseen una resolución de 10 días la cual, posteriormente se reducirá a 5 días cuando se produzca el lanzamiento de Sentinel 2B. A continuación se muestra la Tabla 2 que recoge las 13 bandas:

Banda	Resolución	Long de Onda central	Descripción
Banda 1;	60 m	443 nm	Ultravioleta
Banda 2	10 m	490 nm	Azul
Banda 3	10 m	560 nm	Verde
Banda 4	10 m	665 nm	Rojo
Banda 5	20 m	705 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 6	20 m	740 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 7	20 m	783 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 8	10 m	842 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 8a	20 m	865 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 9	60 m	940 nm	Infrarrojo de onda corta
Banda 10	60 m	1375 nm	Infrarrojo de onda corta
Banda 11	20 m	1610 nm	Infrarrojo de onda corta
Banda 12	20 m	2190 nm	Infrarrojo de onda corta

Tabla 2. Características de las bandas Sentinel 2-A. Fuente: <http://www.esa.int/>

1.3 Ley de Montes y Competencias en Aragón.

La Ley 15/2006, de 28 de diciembre, de Montes de Aragón, modificada por la Ley 3/2014, de 29 de mayo, determina, en su Título VI, las competencias en materia de prevención y extinción de incendios forestales, sus medidas preventivas y las referentes a la restauración de zonas incendiadas. Además, consolida un modelo organizativo para su extinción basado en las competencias forestales autonómicas, que incluyen la dirección de extinción sobre un operativo que englobe medios pertenecientes a otras Administraciones, siempre y cuando los incendios afecten exclusivamente a bienes de naturaleza forestal.

Por su carácter básico, debe mencionarse también la estatal Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes (art. 43 a 50), modificada por la Ley 10/2006, de 28 de abril, y el Reglamento dictado en aplicación de la derogada Ley de Incendios de 1968, Decreto 3769/1972, que se mantiene vigente en todo lo que no se oponga a aquella.

A nivel autonómico existe un marco legal específico que regula la actuación coordinada de los medios de las diferentes instituciones ante una emergencia por incendio forestal, que se recoge en el Decreto 118/2011, de 31 de mayo, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Plan Especial de Protección Civil de Emergencias por Incendios Forestales (Procinfo). Sus puntos más destacados son:

- Clasifica los incendios según su gravedad.
- Establece una estructura de personas y grupos que ponen en funcionamiento el Plan
- Establece instrumentos de coordinación y colaboración entre estos grupos para que su actuación sea eficaz.

En el aspecto propiamente preventivo, anualmente el Departamento aprueba la Orden de prevención y lucha contra incendios, en la que se detallan aspectos concretos de aplicación para toda la Comunidad Autónoma de Aragón.

1.4 glosario de términos clave en el desarrollo del TFG

Para la adecuada comprensión de este trabajo se exponen a continuación la terminología o palabras claves relacionadas con la cartografía de incendios y teledetección: *Incendio forestal*, *imagen Landsat*, *NBR*, *NDVI*, *Severidad*, *Técnicas de restauración hidrológico-forestal*, *repoblación forestal o reforestación*.

- **Incendio forestal:** Fuego que se extiende sin control en terreno forestal o silvestre, afectando a combustibles vegetales, flora y fauna. El incendio forestal se distingue de otros tipos de incendio por su amplia extensión, la velocidad con la que se puede extender desde su lugar de origen, su potencial para cambiar de dirección inesperadamente y su capacidad de superar obstáculos como carreteras, ros y/o cortafuegos.
- **Imagen Landsat:** La constelación de satélites Landsat fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. Lo forman 8 satélites de los cuales solo se encuentran activos el 5 y el 8, su mantenimiento y

operación está a cargo de la NASA y su producción y comercialización depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estas imágenes Landsat están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120 metros.

- **NBR:** *Normalized Burn Ratio*, uno de los índice espectral más utilizado ya que mejora los resultados obtenidos, usándolo para la distinción entre áreas quemadas y no quemadas este índice combina las dos bandas espectrales que responden al fuego de manera más acusada y contrastada, que son el infrarrojo cercano y el SWIR.
- **NDVI:** *Normalized Difference Vegetation Index*, este índice contrasta el comportamiento espectral de las regiones del rojo e infrarrojo cercano. Su principal uso está ligado a la delimitación de áreas quemadas y evaluación de su severidad obteniendo grandes resultados.
- **Severidad:** Factor crítico en la dinámica de las áreas quemadas. Por su relación directa con la cantidad de biomasa consumida está muy ligada a la recuperación vegetal y la dinámica hidrogeomorfológica post-incendio. De forma general la alta severidad está vinculada a tasas de recuperación bajas y tasas de erosión más elevadas que las áreas de baja severidad.
- **Técnicas de restauración hidrológico-forestal:** Comprende el conjunto de actuaciones necesarias para la conservación, defensa y recuperación de la estabilidad y fertilidad de los suelos, la regulación de escorrentías, consolidación de cauces y laderas, la contención de sedimentos y, en general, la defensa del suelo contra la erosión
- **Repoblación forestal o reforestación:** Operación en el ámbito de la silvicultura destinada a repoblar zonas que en el pasado histórico reciente estaban cubiertas de bosques que han sido eliminados por diversos motivos, como puede ser: Explotación de madera; ampliaciones agrícolas, ganaderas y/o urbanas e incendios forestales

2. Objetivos

El objetivo general de la investigación se concreta en el análisis de las consecuencias del incendio forestal de Luna (2015) y de las características de la regeneración vegetal en las primeras fases tras el fuego. Todo ello mediante la utilización de datos de satélite en el contexto de un Sistema de Información Geográfica generado al efecto. Para ello se han planteado una serie de objetivos específicos:

Estimar niveles de daño (severidad del fuego) correspondiente al incendio de Luna de 2015 mediante imágenes Landsat (ETM+ y OLI) y analizar las relaciones entre severidad y los diferentes tipos de comunidades forestales afectadas. Las hipótesis de partida son las siguientes:

- a) Existen relaciones entre la severidad del fuego y el tipo de vegetación/combustible afectado.

- b) EL tipo de vegetación determina el proceso de regeneración vegetal postincendio.
- c) La pendiente topográfica y las actuaciones antrópicas influyen en el proceso de regeneración vegetal postincendio.

3.Área de Estudio.

3.1 Localización

Como hemos comentado al principio, este incendio comenzó en el término municipal de Luna (Figura 4) el cuatro de Julio de 2015 y se extendió por varios municipios contiguos, a los cuales afectó de modo diferente. Este grupo de municipios lo forman Orés, Asín, Uncastillo, Eje de los Caballero y Biota. La extensión de dicho incendio afectó a un total de 13.889 hectáreas, de las cuales 7.143,30 corresponden a uso forestal (51%) y 6.745,73 a uso no forestal (49%).

Todos estos municipios están integrados en la comarca de las Cinco Villas, que se ubican al norte de la provincia de Zaragoza y al noroeste de Aragón. Linda al norte con la Comarca de la Jacetania y el río Aragón, al este con el Río Gállego, la Comarca de la Hoya de Huesca y la de Comarca de Zaragoza, al sur con Navarra, la Comarca de la Ribera Alta del Ebro y Comarca del Campo de Borja, y al oeste con Navarra. Las altitudes que nos podemos encontrar en la comarca de las Cinco Villas van desde los 240 m. de Tauste hasta los 1517 m. de la Sierra de Santo Domingo.

La Comarca de las Cinco Villas tiene una superficie de 3.062,50 km² y cuenta con una población aproximada de 32.661 habitantes, distribuidos en 31 municipios. Su capital es Ejea de los Caballeros.

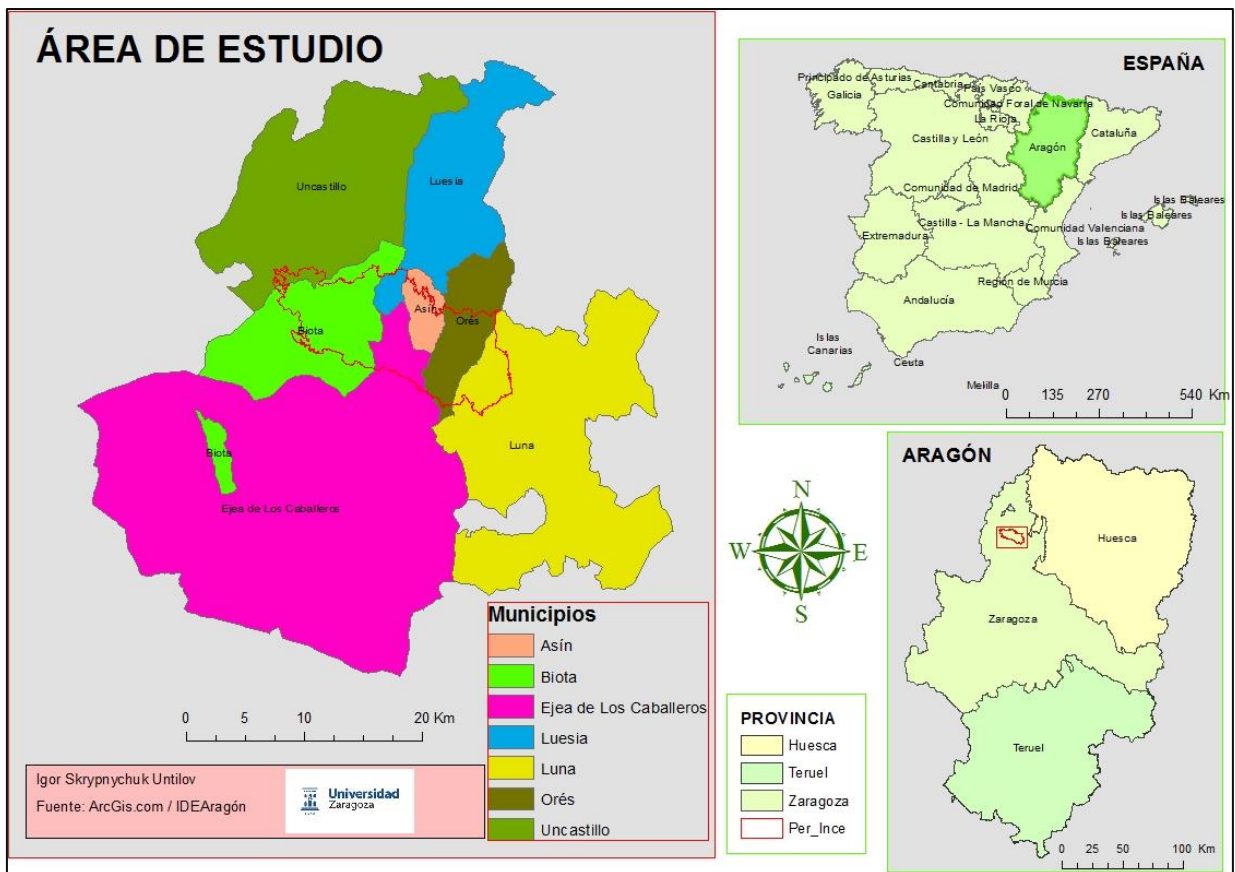


Figura 4. Localización del Área de Estudio. Fuente: Ideaaragon

3.2. Condiciones climáticas

La zona presenta una gran variedad climática debido a la diferente altitud de los municipios que la conforman. De este modo, el norte de la comarca se caracteriza por tener un clima húmedo con abundantes precipitaciones que rondan los 990 mm anuales; esta media anual va descendiendo progresivamente conforme nos desplazamos hacia el Valle del Ebro, llegando a apenas 340 mm anuales. Ocurre lo mismo con la temperatura anual del territorio, que oscila entre los 8°C y los 14°C, es decir, conforme nos acercamos al valle del Ebro va aumentando progresivamente la temperatura media anual.

Por lo cual nos podemos encontrar con dos tipos de clima:

- **Clima de transición de los somontanos:** mediterráneo continental del mismo orden que el centro de la depresión del Ebro, los somontanos pirenaico e ibérico están condicionados por la altitud, que les proporciona mayor humedad, les aleja gradualmente del calor estival, de las inversiones térmicas y de las fuertes ráfagas del cierzo y, por tanto, les hace menos áridos, pero mantienen la irregularidad pluviométrica y elevadas amplitudes térmicas.
- **Clima del sector central de la Depresión del Ebro:** el clima del centro de la Depresión del Ebro responde perfectamente al de una cuenca mediterránea con marcado carácter de continental. La presencia de un cuadro montañoso continuo que le cierra por el norte y por el sur contribuye a exagerar los contrastes térmicos entre

el verano y el invierno, a obstaculizar la entrada de las borrascas portadoras de lluvia, lo que motiva su tendencia a la aridez, y refuerza por su disposición topográfica la acción del viento dominante, el cierzo, muy frío en invierno, fresco en verano y, por subsidencia, siempre desecante.

Para un análisis más exhaustivo del clima del lugar se ha decidido analizar el clima en el municipio de Luna, este clima está clasificado como cálido y templado además presenta precipitaciones a lo largo de todo el año. Hasta el mes más seco aún tiene lluvia. La localización es clasificada como Cfb por Köppen-Geiger. Cfb viene a significar clima oceánico de verano este se localiza en latitudes medias y presenta las siguientes características: la temperatura media del mes más cálido no llega a los 22°C pero se superan los 10°C durante cuatro o más meses al año. Es llamado también como clima oceánico o atlántico.

La temperatura media anual en Luna ronda los 12.3°C. Las precipitaciones rondan los 535 mm al año como podemos apreciar en el climograma (Figura 7) que se muestra a continuación el mes más seco es julio, con 26 mm. El mes de mayo es el que más precipitaciones presenta. En cuanto a la temperatura podemos observar claramente que los meses más calurosos son los de verano llegando a los 20.8°C en el mes de Julio, por el contrario el mes más frío es el de enero en el cual la temperatura cae hasta los 4.3°C. Para su visualización se aporta el climograma de Luna (Figura 5)

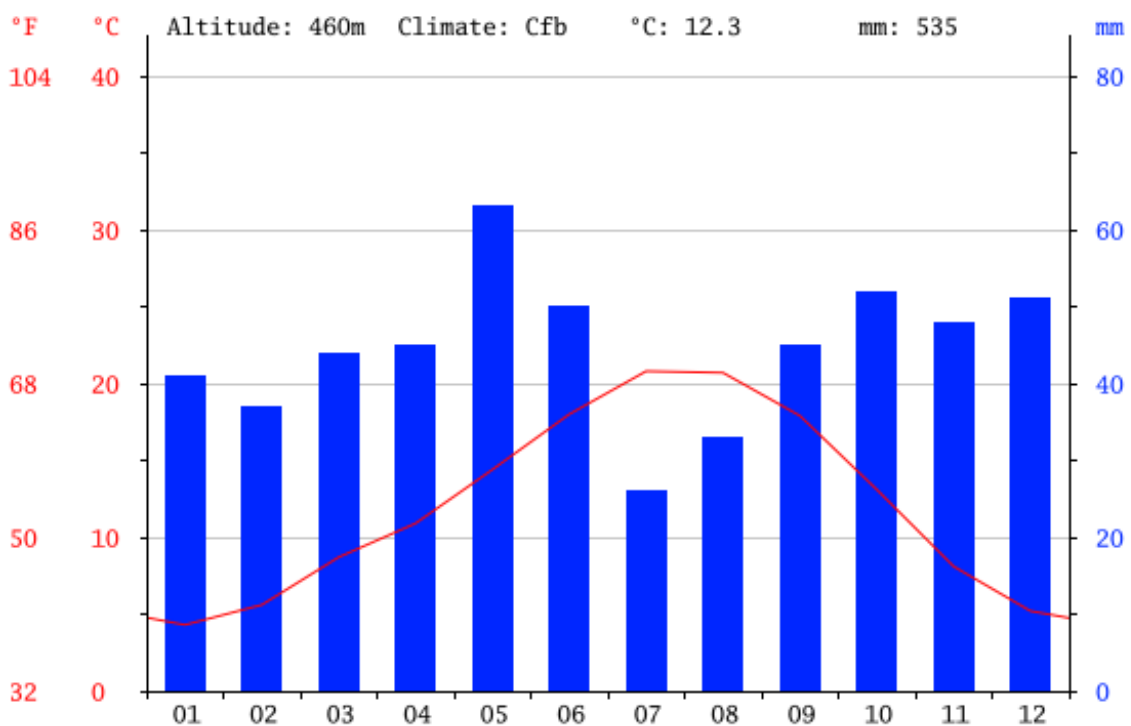


Figura 5. Climograma Luna. Fuente: <http://es.climate-data.org/location/285366/>

3.3 Vegetación

Para la descripción de la vegetación de la zona me he decantado por realizar una descripción general de la vegetación localizada en la comarca de las Cinco Villas y posteriormente analizar la vegetación realizada para la localización del perímetro incendiado (Figura 6).

Empezando en el norte de la comarca, en las sierras exteriores del Pre pirineo, encontramos bosques (*Pinus Sylvestris*) y *Pinus nigra*, este último principalmente proveniente de las repoblaciones. En el estrato arbustivo de estas áreas destaca el boj (*Buxus sempervirens*), el enebro (*Juniperus communis*) o la griñolera (*Cotoneaster*). Ocupando la franja inferior se desarrolla el quejigo (*Quercus faginea*) que crece junto al arce de Montpellier (*Acer monspessulanum*), la betalina o la madreSelva. Cabe resaltar la presencia en la sierra de Santo Domingo y el macizo de Puygmoné de hayedos (*Fagus sylvatica*), y en la mencionada sierra y en los municipios de Bagüés, Longás, Lobera y los Pintanos la presencia de roble (*Quercus robur*).

La encina (*Quercus ilex*) o carrasca es un árbol de bajo porte que crece de forma importante, y junto a él lo hacen arbustos como la sabina (*Juniperus thurifera*) el enebro (*Juniperus communis*) o la oliveta (*Ligustrum ovalifolium*). En el valle del Ebro, y siendo la especie más extendida en las Cinco Villas, se encuentra el pino carrasco (*Pinus halepensis*), que se desarrolla por los montes de Tauste, Castejón de Valdejasa, las Bardenas y las sierras orientales de Luna, El Frago y Orés. En las zonas donde estos pinos se encuentran más o menos dispersos surge el matorral alto dominado por la coscoja (*Quercus coccifera*), acompañada de arbustos como la sabina (*Juniperus thurifera*), el enebro (*Juniperus communis*), el escambrón (*Rhamus lyciodes*), la carrasquilla (*Rhamus myrtifolius Willk*) o el lentisco (*Pistacia lentiscus*). En las zonas más áridas se encuentran las comunidades de flora esteparia, saladares o halonitrófilas como la sosa, el salado, el asnallo, la albada, los ontinares o espartales, junto con tomillares, romerales y aliagares. Destaca la vegetación de ribera de los cauces con vegetación donde predominan los sauces (*Salix babylonica*), fresnos (*Fraxinus*), chopos (*Populus*), álamos (*Populus alba*) y en la partes más bajas de los cursos, tamarizales.

Como se ha resaltado en la descripción general y conociendo la localización del perímetro de nuestro área de estudio se puede observar claramente en el mapa adjuntado que la vegetación dominante de la zona es el Pino carrasco (*Pinus Halepensis*) localizado principalmente en las sierras orientales de Luna. En el mapa, aparte del predominio del pino carrasco se observa claras formaciones de Encinares (*Quercus Ilex*), Enebrales (*Juniperus communis*) así como de coníferas (*Pinophyta*) autóctonas y mezcla de coníferas y frondosas así como amplias llanuras sin formaciones arboleas las cuales están asociadas también a campos de cultivo de la zona.

La zona también posee una gran importancia agrícola, la agricultura es de tipo cerealista pero también encontramos amplias zonas de pastizales que suponen el sustento de la ganadería extensiva de la zona. Con los avances en el sistema de riego se logró una agricultura más amplia, en la cual se incluyen cultivos forrajeros y de productos hortícolas.

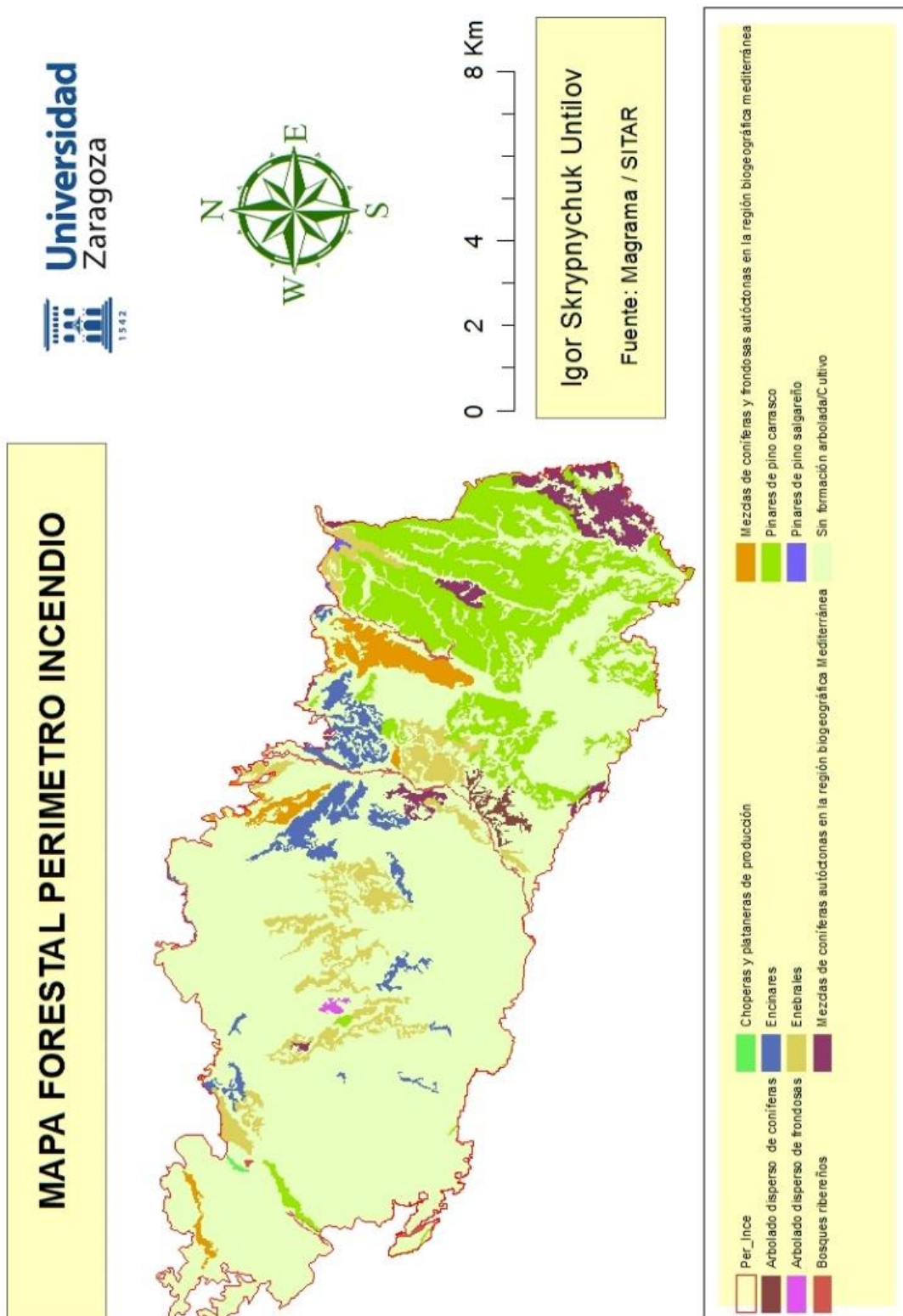


Figura 6. Mapa de Vegetación. Fuente: MAGRAMA/SITAR.

3.4 Geología y geomorfología

Las Cinco Villas forman parte, casi en su totalidad, de la margen izquierda de la Depresión del Ebro, ubicándose al norte las Sierras Exteriores del Pre-pirineo. La sierra de Santo Domingo forma parte de la unidad geológica de los Pirineos y sus formaciones carbonatadas mesozoicas son los elementos geológicos más antiguos de la comarca. En estas zonas los procesos erosivos han intervenido de forma importante; así, en las zonas altas con aguas torrenciales, se depositaron los materiales más gruesos (conglomerados). Estas formaciones marcan el borde de la depresión, siendo las más significativas las de Lezas y Bernano en Biel, el macizo de Puymoné, en Luesia y las sierras de Uncastillo y Sos. A continuación se depositaron margas y arcillas, alternando con estratos de arenisca. Esta zona se ubica entre el somontano de la sierra y el llano. En la parte baja los ríos forman la Depresión Presomontana de Cinco Villas, cubierta por extensas acumulaciones de materiales en terrazas y glacis. En esta llanura existen pequeña cubetas endorreicas que acumulaban las sales que al evaporarse han dado enclaves salinos o “salobrales”. El río Arba entre Ejea y Tauste atraviesa zonas con yesos cuya fácil disolución da lugar a fenómenos de karstificación conformando microlapiaces y dolinas. Por último, en otras zonas por encima de estos yesos, se sedimentaron estratos de calizas cuya dureza ha originado plataformas o estructuras de calizas denominadas muelas o planas, que constituyen los relieves dominantes de la depresión.

4. Materiales y metodología

4.1 Descarga y tratamiento de las imágenes de satélite.

La fuente empleada para la descarga de datos ha sido el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)¹. A través de ella hemos llevado a cabo la descarga de las imágenes de satélite.

El incendio comenzó el día 4 de Julio de 2015, para el análisis se ha considerado oportuno comenzar la serie temporal con una imagen previa al incendio para así tener constancia del estado de la zona antes de que fuera devastada por las llamas, la serie temporal acaba con la imagen del día 29 de Abril de 2016. A continuación (Tabla 3) se recogen todas las fechas así como la información del satélite del que provienen.

¹ El USGS es una agencia científica del gobierno federal de los Estados Unidos. Las bases de datos de la USGS contiene una gran cantidad y variabilidad de productos, los cuales podemos clasificar en seis grupos: Datos y herramientas, Mapas, Publicaciones, Software, Galería multimedia y Librería. Esta base de datos te garantiza una gran fiabilidad y facilidad en los productos que ofrece pero para poder adquirir cualquier tipo de producto de los grupos anteriores tienes que registrarte en la USGS.

FECHA	SATELITE	FECHA	SATELITE	FECHA	SATELITE	FECHA	SATELITE
30/06/2015	Landsat 8	27/09/2015	Landsat 8	04/02/2016	Sentinel 2	04/02/2016	Sentinel 2
09/07/2015	Landsat 8	21/10/2015	Landsat 7	17/02/2016	Landsat 7	17/02/2016	Landsat 7
25/07/2015	Landsat 8	29/10/2015	Landsat 8	12/03/2016	Landsat 8	12/03/2016	Landsat 8
10/08/2015	Landsat 8	06/11/2015	Landsat 7	12/03/2016	Sentinel 2	13/03/2016	Sentinel 2
26/08/2015	Landsat 8	30/11/2015	Landsat 8	06/04/2016	Landsat 8	06/04/2016	Landsat 8
18/09/2015	Landsat 8	24/01/2016	Landsat 8	29/04/2016	Landsat 8	29/04/2016	Landsat 8

Tabla 3. Serie temporal de imágenes utilizadas.

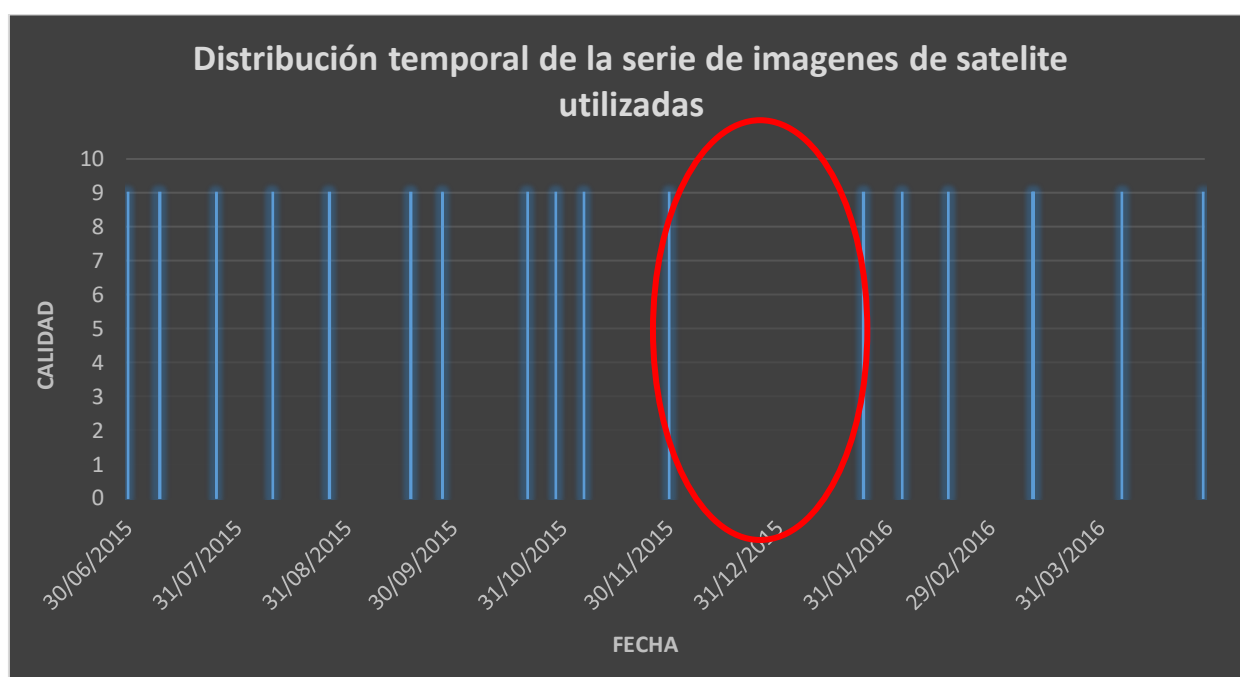


Figura 7. Distribución temporal de la serie de imágenes de satélite utilizada.

La Figura 7 representa gráficamente la distribución de imágenes del periodo de estudio. El número y la distribución temporal garantizan una buena y adecuada cantidad de información. Tan solo reseñar que, existe alguna laguna temporal (círculo rojo) que nos indica que hay una falta alta de datos en el mes de diciembre, ya que no se localizó ninguna imagen apta para su tratamiento.

Las imágenes provenientes de la USGS están almacenadas en ficheros diferentes para cada banda. Para obtener la imagen final y después poder realizar los diferentes tratamientos se han de juntar todas las bandas mediante una composición de bandas y a partir de ahí se pueden realizar los diferentes tratamientos como será la delimitación de las áreas quemadas, cálculo de los índices de severidad y NBR.

También mencionar en este apartado que las imágenes provenientes del satélite Landsat 7 presenta algunos errores debido a que el sistema de recepción del sensor no

está calibrado y aunque puedas obtener las imágenes, estas presentan bordes borrosos y superpuestos. Para solucionar esto ya que se requería de estas imágenes para tener una serie temporal más completa se decidió realizar las correcciones de estas mediante diferentes Softwares como son ArcGis y Erdas.

4.2 Delimitación de la zona quemada

Con el software ArcGis 10.3 y mediante la composición de bandas se ha realizado la delimitación de la zona de estudio mediante utilizando dos imágenes, una previa al incendio y una posterior al incendio. Para poder identificar correctamente el perímetro de la superficie quemada se han realizado numerosas composiciones en falso color (Tabla 5) para realzar la zona quemada y facilitar su digitalización en pantalla. En Tabla 4 se recogen las combinaciones más utilizadas con Landsat 8 ya que la imagen previa y posterior al incendio proviene de este satélite.

Color natural	4 3 2
Falso color (urbano)	7 6 4
Color infrarrojo (vegetación)	5 4 3
Agricultura	6 5 2
Penetración atmosférica	7 6 5
Vegetación saludable	5 6 2
Tierra/agua	5 6 4
Natural con remoción atmosférica	7 5 3
Infrarrojo de onda corta	7 5 4
Análisis de vegetación	6 5 4

Tabla 4. Combinación falso color Landsat 8. Fuente: <http://acolita.com/>

Las utilizadas para la delimitación del área quemada han sido las siguientes (Tabla 5), la causa de utilizar tantas combinaciones ha sido la de buscar el máximo detalle:

Color natural	4 3 2
Color infrarrojo (vegetación)	5 4 3
Agricultura	6 5 2
Vegetación saludable	5 6 2
Infrarrojo de onda corta	7 5 4
Análisis de vegetación	6 5 4

Tabla 5. Combinaciones de falso color en Landsat 8 utilizadas.

La cartografía final se ha realizado utilizando el Infrarrojo de onda corta (7 5 4) debido a que es la que mejor representa la vegetación y los incendios. La banda 7 es muy sensible al contenido de la humedad y la banda 5 es sensible al estado de la vegetación.

Como se puede observar el área incendiada (Figura 8) sale representada perfectamente en tonos rojos en la imagen del post incendio (imagen de la derecha). Una vez delimitada el área de estudio se puede realizar el cálculo de todos los índices

necesarios para un adecuado estudio así como la realización de diferentes mapas y la extracción de datos.

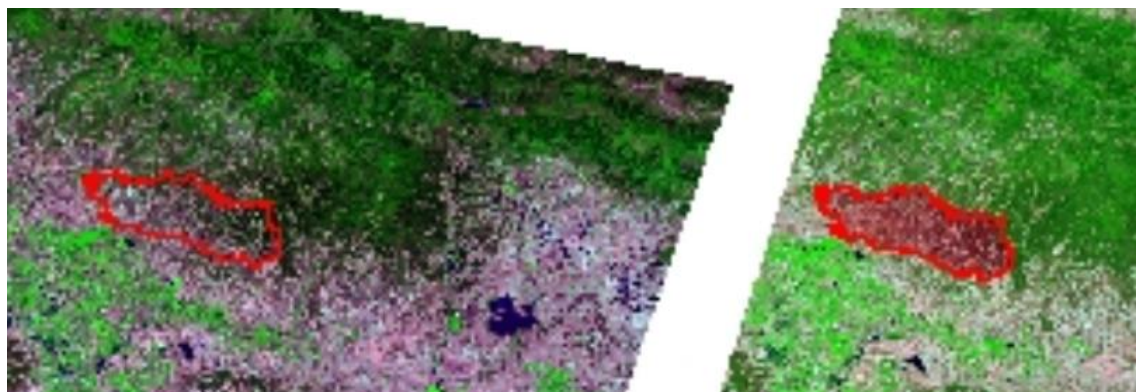
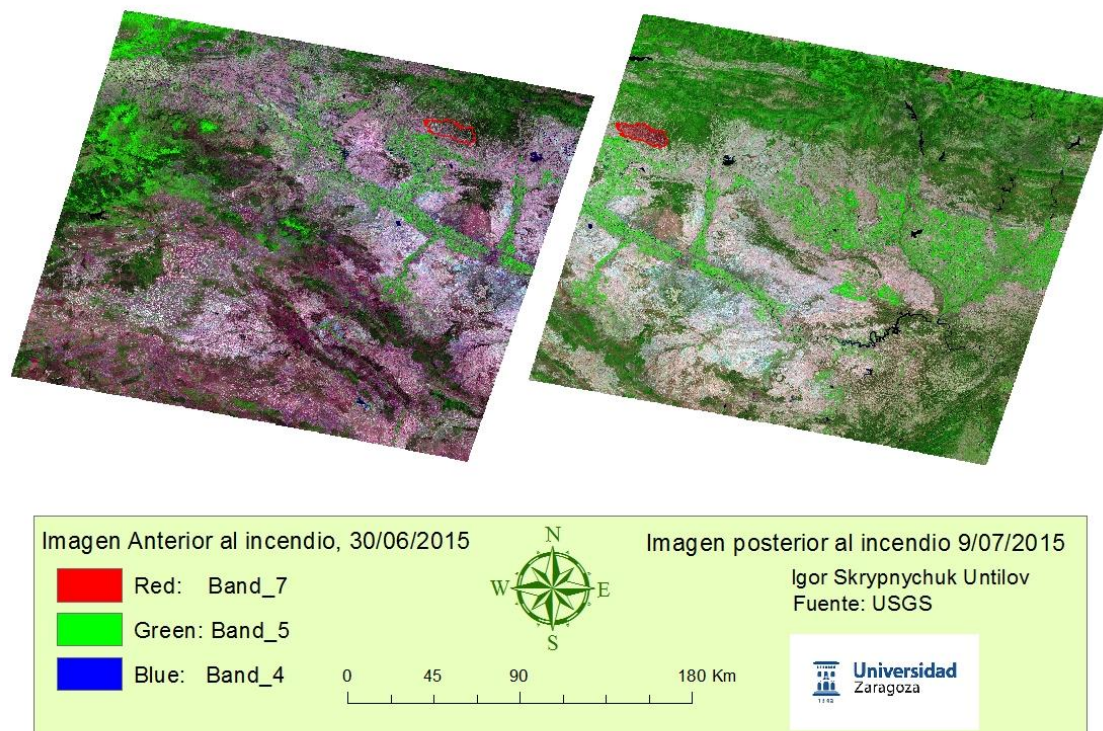


Figura 8. Identificación de la zona incendio.

4.3 Análisis de la Severidad (dNBR)

El siguiente paso ha sido la realización del análisis de la severidad para el cual se ha necesitado conocer el NBR anterior al incendio y el NBR posterior al fuego para luego poder obtener la severidad (dNBR). Este índice nos va a facilitar el conocimiento de la afección y su distribución espacial. El cálculo de este índice se realiza a partir de las dos bandas que mejor reflejan los efectos de zonas incendiadas que son el infrarrojo próximo y el infrarrojo medio. Su ecuación es la siguiente:

$$\text{NBR} = (\text{IFP} - \text{IFM}) / (\text{IFP} + \text{IFM})$$

Donde:

- IFP = infrarrojo próximo
- IFM = infrarrojo medio

Para obtener el NBR diferencial (dNBR) se realiza con la siguiente operación:

$$\text{dNBR} = (\text{NBR}_{\text{pre}} - \text{NBR}_{\text{post}})$$

El infrarrojo próximo representa el vigor vegetal y la estructura foliar y el infrarrojo medio indica la cantidad de agua presente en la vegetación, por lo cual, a mayor vigor vegetal mayor es la respuesta de la banda 5 y menor la de la banda 7 y viceversa. Al estar correlacionadas estas bandas cabe mencionar que el dNBR será negativo en aquellas superficies con una actividad fotosintética alta ya que las áreas quemadas se caracterizan por la escasez de vigor vegetal que da respuesta la banda 5 y por contraste será positivo en las zonas que presentan una superficie con actividad fotosintética apenas inexistente o nula.

Para finalizar y dar categoría al incendio según el grado de severidad se han adoptado los umbrales oficiales de Carl H.Key y Nathan C.Benson (2006) expuesto en la siguiente Tabla 6.

Severity Level	dNBR Range
Enhanced Regrowth, High	-500 to -251
Enhanced Regrowth, Lo	-250 to -101
Unburned	-100 to +99
Low Severity	+100 to +269
Moderate-low Severity	+270 to 439
Moderate-high Severity	+440 to +659
High Severity	+660 to +1300

Tabla 6. Índices Firemon Fuente: FIREMON

4.4. Análisis multitemporal del Índice NDVI.

Los neocanales pueden definirse como el resultado de transformaciones realizadas sobre las bandas espectrales de una imagen de satélite con el objetivo de conseguir nuevas dimensiones de la información espectral (Chuvienco, 1996). El índice de vegetación de diferencia normalizada como cualquier otro índice de vegetación se calcula a partir de los datos de reflectividad a distintas longitudes de onda para extraer información relacionada con la vegetación (Gilbert, 1997). El índice NDVI en Arcgis 10.3 se calcula a partir de la combinación de dos bandas y se realiza mediante la siguiente función:

$$\text{NDVI} = (\text{IFC} - \text{R}) / (\text{IFC} + \text{R})$$

- En Landsat 7:
 - IFC= Banda 4 de la imagen
 - R = Banda 3 de la imagen
- En Landsat 8:
 - IFC = Banda 5 de la imagen
 - R = Banda 4 de la imagen
- En Sentinel 2:
 - IFC = Banda 8a de la imagen
 - R = Banda 4 de la imagen

Los niveles NDVI presentan un rango real desde el punto de vista matemático que va desde -1 a +1. Sin embargo, por debajo de 0.1 se consideran zonas con escasa vegetación. Este procedimiento ha sido realizado en cada una de las imágenes de la serie temporal para así poder conocer la evolución del estado de la vegetación en el área estudiada y así poder corroborar si está siendo regenerada o no con el transcurso del tiempo.

4.5 Fuentes de información cartográfica y programas informáticos utilizados.

Para el conocimiento del área de estudio y de los diferentes factores que han podido influir en el incendio se han descargado y realizado diversas cartografías, de las cuales posteriormente también se han extraído datos para relacionarlos tanto con los valores NDVI como con los del dNBR para así poder contestar a los objetivos planteados y poder sacar diversas conclusiones. Los mapas realizados se enumeran a continuación:

1. Mapa de localización → Para una primera aproximación a la zona de estudio.
2. Mapa forestal → Para la descripción de la vegetación del área de estudio. También es relevante este mapa para relacionar NDVI y vegetación así como dNBR y vegetación.
3. Mapa de pre – post incendio → Para el conocimiento de la superficie quemada.
4. Mapa de pendiente → Para el estudio de los niveles de NDVI respecto a esta variable.
5. Como es lógico, se han realizado las cartografías correspondientes a los índices NDVI de cada uno de las imágenes de la serie temporal, además se ha realizado la cartografía correspondiente a los índices dNBR.
6. Mapas de iluminación, exposición y modelo digital terrestre → Para un mejor conocimiento de la zona de estudio, estos se muestran en Anexos.

4.6. Realización de un muestreo para la extracción de la información.

Para la extracción de los datos para su posterior análisis se ha realizado un muestreo de 1500 puntos repartidos de manera aleatoria dentro del perímetro del incendio. Cada punto o “*RandPoint*” contiene la información de todas las variables que se han ido mencionando a lo largo de este apartado obteniendo así un total de 40.500 (1500 puntos * 27 variables) datos de información. Tras diferentes análisis de los datos se localizaron 35 puntos erróneos, que fueron eliminados quedando un total de 39555 datos. A continuación en la Tabla 5 se presenta el listado de las 27 variables: 9 cartográficas y 18 a partir del índice de vegetación NDVI correspondientes a la serie temporal.

Todo el análisis de estos datos se ha realizado mediante el software IBM SPSS Statistics 19, con el cual se han realizado diversos tipos de análisis para poder dar contestación a los objetivos expuestos en este trabajo.

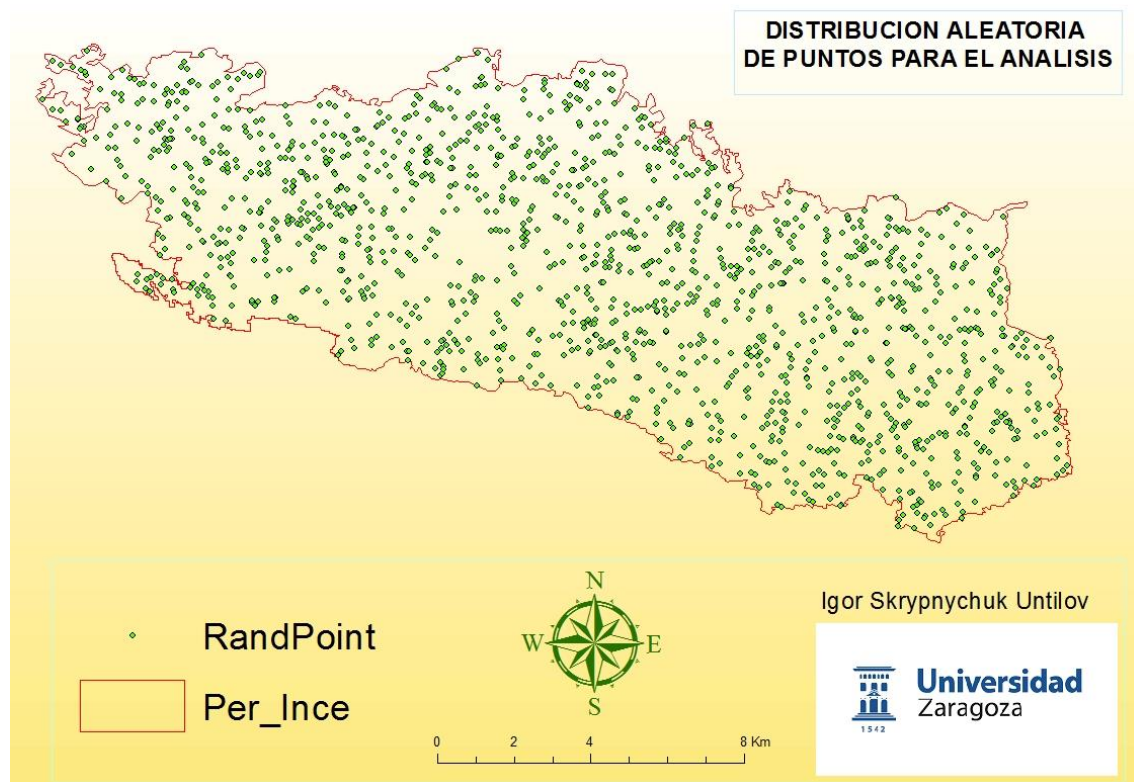


Figura 9. Malla de puntos del muestreo aleatorio.

M.Illuminacion	M.exposicion	M.Pendiente	M.MDT	M.Forestal	NBRPRE	NBRPOST	dNBR	Recass_dNE
Imagen 1	imagen 2	imagen 3	imagen 4	imagen 5	imagen 6	imagen 7	imagen 8	imagen 9
imagen 10	imagen 11	imagen 12	imagen 13	imagen 14	imagen 15	imagen 16	imagen 17	imagen 18

Tabla 7. Listado de las 27 variables utilizadas en la extracción de la información para el mejor conocimiento de la zona.

5. Resultados y Discusión

En este apartado se exponen y discuten los principales resultados obtenidos (gráficos, tablas y cartografías) en relación con los objetivos propuestos.

En primer lugar, se realiza un diagnóstico sobre la distribución espacial de los niveles de severidad dentro del perímetro afectado por el fuego, con el que se dará respuesta al objetivo (A). A continuación se presenta la serie multitemporal de los valores NDVI para conocer cómo ha evolucionado en el periodo de estudio y desde el punto del vigor y recubrimiento vegetal de la zona quemada; se presentará la cartografía de los valores NDVI con el propósito de acercarnos al objetivo (B). Posteriormente, se identifica el papel de dos factores ambientales en relación con la regeneración vegetal, la pendiente topográfica y las actuaciones antrópicas llevadas a cabo por el

Departamento de Agricultura y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón para potenciar la regeneración de la zona afectada (D).

5.1 Existen relaciones entre la severidad del fuego y el tipo de vegetación/combustible afectado.

Con el objetivo de analizar la severidad del fuego se ha extraído el dNBR que utiliza simultáneamente la información del infrarrojo cercano (IFC) e infrarrojo próximo (IP) o SWIR, para toda la zona incendiada con ayuda de las imágenes Landsat. Teniendo en cuenta los umbrales establecidos para cada una de las clases de severidad (*Unburned*, *low severity*, *medium low severity*, *medium high severity*, *high severity*) en la Figura 10 y la Tabla 8 se muestra la superficie del incendio afectada por categorías de severidad.

El incendio de Luna puede clasificarse como un incendio de severidad moderada ya que la categoría *medium low severity* es la más representativa desde el punto de vista espacial apareciendo en más de un 38% de la superficie del incendio de Luna. La segunda categoría en extensión, *medium high severity* (25.07%), pone de manifiesto que el nivel de severidad tiene un sesgo hacia niveles más altos que bajos. Además, observamos que solamente un 5% del total no se vio afectado por las llamas, mientras que un 15% de la superficie presenta niveles altos de severidad (*High Severity*).

Sin embargo, un análisis más detallado revela circunstancias de especial interés de cara a la identificación de los daños del fuego y sus consecuencias en términos de regeneración vegetal. Desde el punto de vista espacial en la cartografía que se recogen en la Figura 15, se reconocen dos tipos de superficie: zonas de alta severidad, localizadas mayoritariamente en la parte noroeste, y (2) zonas de severidad predominantemente baja o modera/baja ocupando la parte central y occidental de la zona incendiada. Este patrón espacial nos hace sospechar sobre el papel desempeñado por el tipo de ocupación en una y otra zona ya que, como se ha visto con anterioridad en el mapa de comunidades vegetales (Figura 6), existe una enorme extensión dedicada al cultivo cerealista; en especial en la zona en donde se registran niveles bajos de severidad.

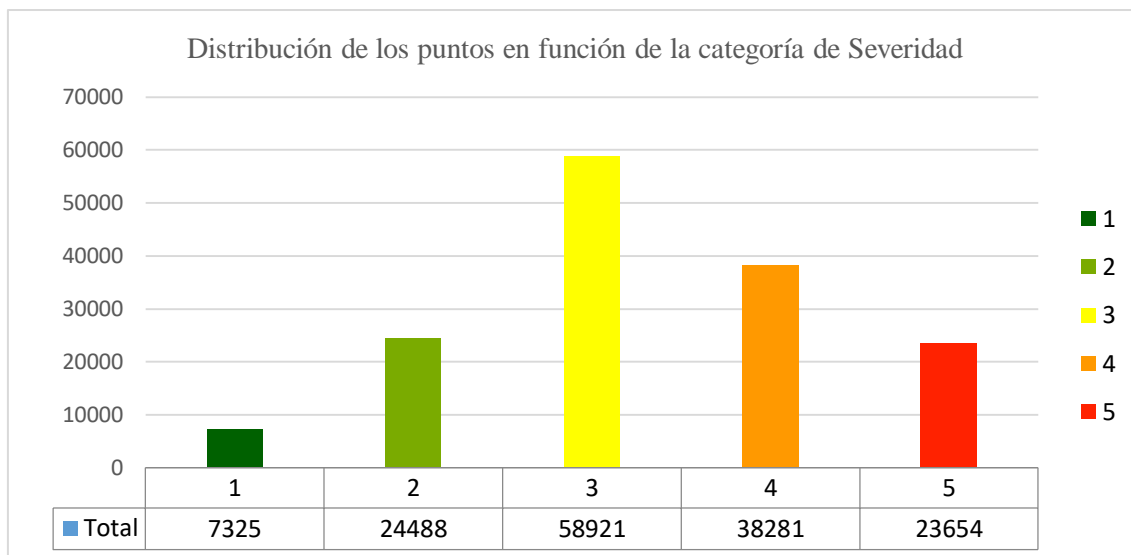


Figura 10. Distribución de los valores de severidad del incendio por categorías dNBR: Unburned, 1; low severity 2; medium low severity, 3; medium high severity, 4; high severity, 5.

<i>unburned</i>	1	7325	4.79%
<i>low severity</i>	2	24488	16.03%
<i>medium low severity</i>	3	58921	38.59%
<i>medium high severity</i>	4	38281	25.07%
<i>high severity</i>	5	23654	15.49%
Total		152669	100%

Tabla 8. Datos severidad en el incendio.

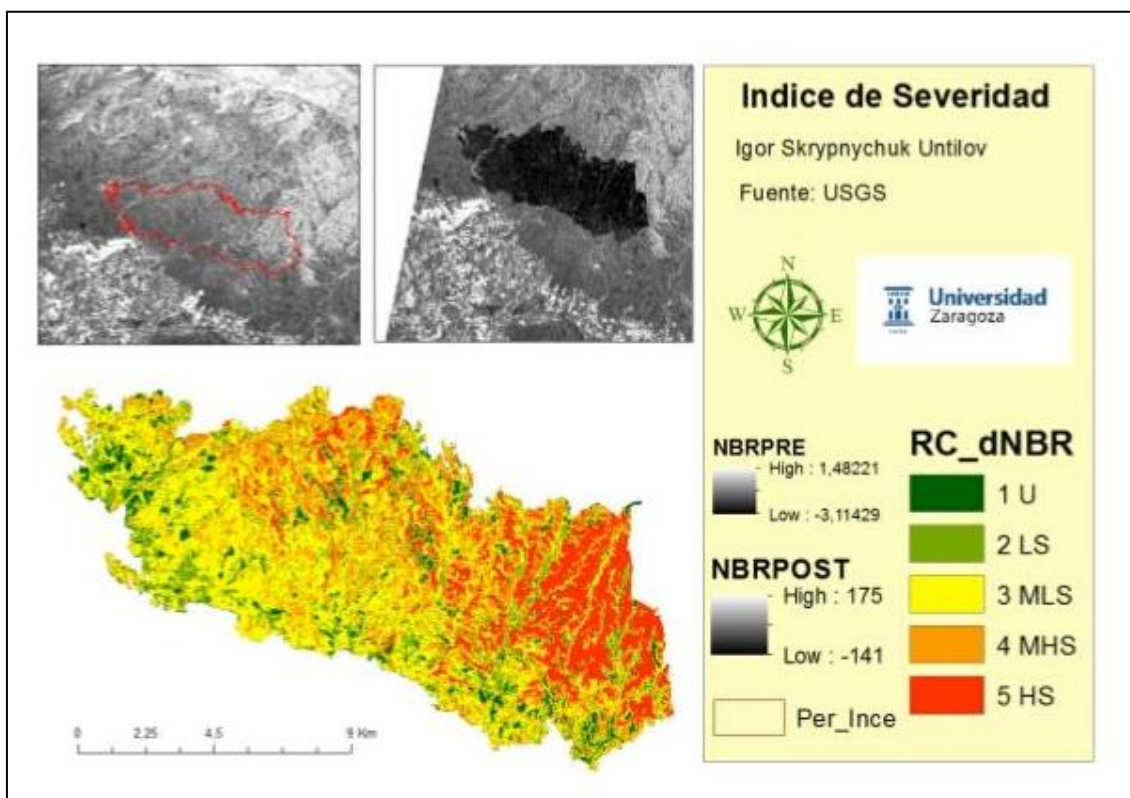


Figura 11. Mapa NBR previo y posterior y mapa de severidad (dNBR).

Para profundizar en el estudio de la severidad del incendio de Luna se ha realizado un análisis de su incidencia por comunidades vegetales con el objeto de conocer cuáles han sido los niveles de severidad que más han afectado a cada una de las existentes. Esto nos permitirá identificar posibles patrones espaciales de distribución de la severidad y comprobar la hipótesis que formulábamos en el apartado de objetivos.

En la Figura 12 y la tabla 9 se representan gráficamente y recogen tabuladas, respectivamente las diez comunidades vegetales y los porcentajes de cada categoría de severidad. En función del grado de afección del fuego, las diferentes formaciones vegetales pueden agruparse en tres grupos diferentes:

	<i>Unburned</i>	<i>low severity</i>	<i>medium low s</i>	<i>medium high</i>	<i>high severity</i>
	1	2	3	4	5
Pino carrasco	4,68	20,37	49,27	21,83	3,85
M.Coníferas auto. R.Bio.Med.	0,78	7,36	15,89	24,81	51,16
Pino salgareño	0,00	15,52	27,59	36,21	20,69
Encinares	9,68	6,45	54,84	19,35	9,68
Enebrales	0,00	6,82	34,09	38,64	20,45
Disperso de Coníferas	1,75	10,53	22,81	36,84	28,07
Bosques ribereños	25,00	25,00	25,00	25,00	0,00
M.Coníferas y Frondosas. Auto. Bio.Me	0,00	28,57	28,57	28,57	14,29
Arbolado disperso de frondosas	0,00	4,76	21,43	35,71	38,10
Choperas y plataneros de produccion	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
	4,19	12,54	27,95	36,70	18,63

Tabla 9. Relación en porcentaje de cada comunidad vegetal respecto a las categorías de severidad.

Las comunidades vegetales que están rodeadas en círculos azules se encuentran muy poco representadas en la zona quemada, apareciendo en menos de 10 puntos. Se trata de bosques ribereños y la mezcla de coníferas y frondosas, caracterizadas con niveles de severidad muy dispares.

Las comunidades vegetales rodeadas con círculos verdes (enebrales, pinos salgareños, arbolado disperso) se caracterizan mayoritariamente por haber sido afectadas por una severidad de tipo alto (*medium high severity* y *high severity*). Las comunidades vegetales rodeadas con círculos rojos presentan una categoría de severidad mayoritaria: *medium low severity*, en el caso de los pinares de carrasco y encinares y, *high severity* en el caso de la mezcla de coníferas autóctonas de la región biogeográfica mediterránea. El diferente grado de afección de las comunidades vegetales se relaciona, evidentemente con el reparto espacial de la intensidad del fuego, pero también con otros parámetros de la vegetación como es su densidad. Por tanto, las relaciones entre NDVI previo al fuego y severidad nos permitirá determinar cómo influye este parámetro en el reparto espacial del grado de afección del fuego.

En la Figura 13 se recogen los tres componentes: severidad, NDVIprevio y vegetación para describir la relación, pudiendo delimitar diferentes zonas en el incendio, zonas que se comportan de manera similar pero se diferencian entre ellas notablemente.

La zona 1 (círculo de color rojo) representa la zona más afectada del incendio. Esta superficie muestra altos niveles de NDVI previos al incendio. El tipo de cubierta vegetal que se localiza en esta zona corresponde a masas densas dominadas por el pino carrasco, mezcla de coníferas (*Q. ilex*). Como ya se ha hecho alusión anteriormente, el índice NDVI contribuye a la identificación espacial de las zonas de mayor densidad y vigor vegetal, por tanto la correspondencia entre zonas de gran densidad vegetal y comunidades vegetales de carácter arbóreo, explican la severidad del fuego en este sector como consecuencia de la gran cantidad de combustible disponible.

La zona 2 (círculo azul) representa una zona con predominio de niveles de severidad medios. Sin embargo conviven sectores con niveles de severidad media/baja en zonas donde la masa forestal presenta niveles bajos de recubrimiento (NDVI 0.35-0.45), junto a sectores, con niveles de severidad media/alta, que configurando manchas de escaso tamaño sin continuidad espacial pero que presentan niveles elevados de NDVI (0.50-0.70).

La zona 3 (círculo verde) representa una zona con bajos índices NDVI previos lo cual viene a significar que la zona carecía de masa forestal densa previamente al incendio y por lo cual podemos afirmar que esta zona carecía de combustible para fomentar la propagación del fuego en comparativa con las zonas anteriores. Por todo ello es por lo que nos encontramos con una zona de severidad baja y media baja.

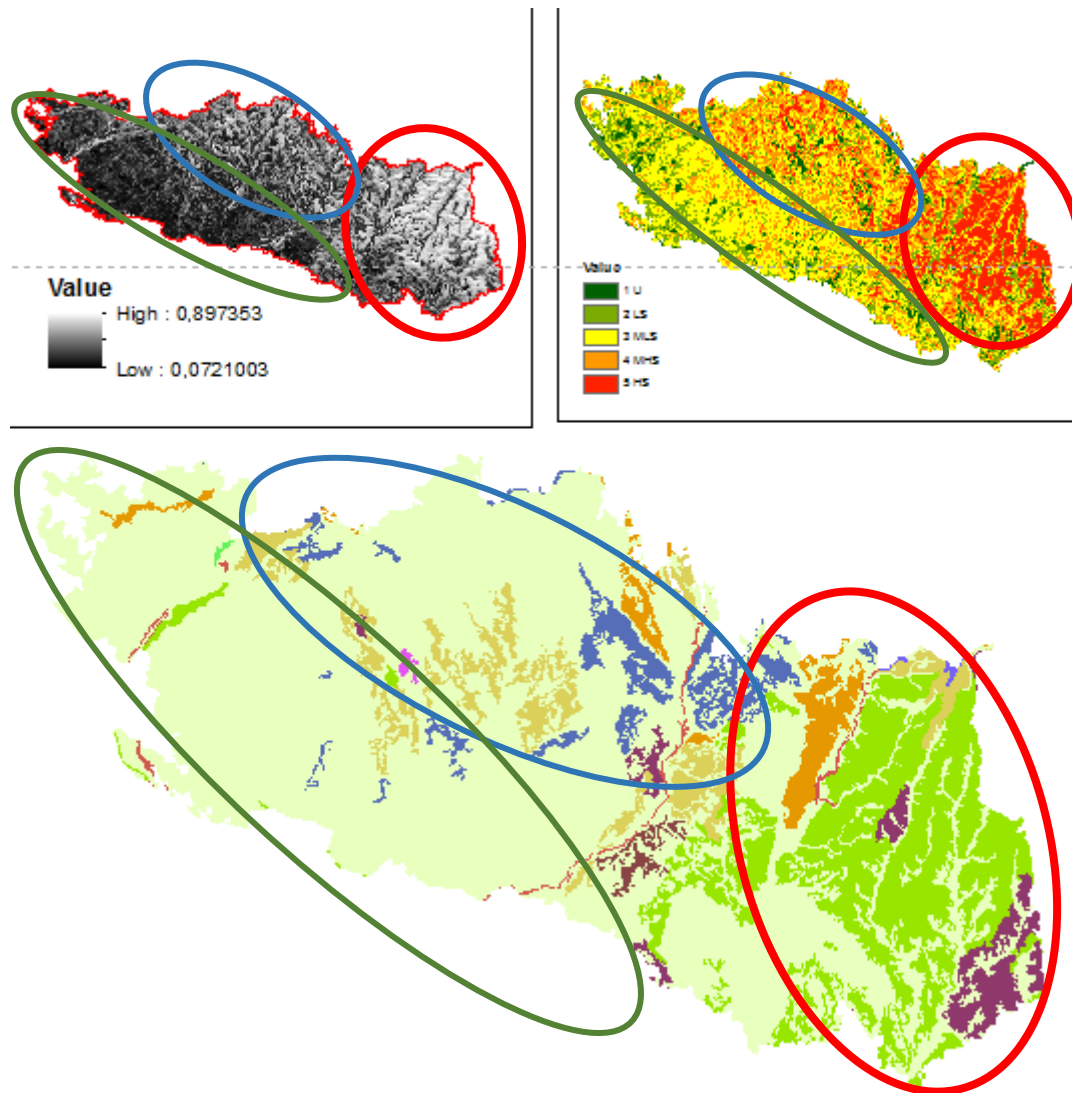


Figura 13. Representación simultánea de NDVI previo, Severidad y comunidades vegetales.

Ante la pregunta de si existen patrones espaciales que explique la distribución de la severidad, podemos afirmar que sí ya que, como se ha comprobado anteriormente, las zonas de alta severidad coinciden con altos índices de NDVI. Por lo cual, el índice NDVI previo al incendio es un factor que explica la distribución de la severidad, en general y en el contexto de cada comunidad vegetal. La densidad de vegetación analizada mediante el NDVI nos informa de la cantidad de combustible disponible durante el proceso de combustión, de ahí que, mientras las masas forestales densas de tipo arbóreo registran altos niveles de severidad, las zonas de cultivos y las comunidades poco densas (bajos niveles de NDVI) presentan niveles de severidad *medium low severity*.

5.2 El tipo de vegetación determina el proceso de regeneración vegetal postincendio.

Una vez extraído los valores de NDVI de la serie temporal utilizada mediante la metodología ya citada anteriormente y aplicado el muestreo aleatorio mediante la generación de una malla de puntos, se acomete el análisis de la evolución temporal en el incendio de Luna Figura 14. Desde el punto de vista espacial, las Figuras 16, 17, 18, 19,

20,21 representan los resultados cartográficos del NDVI en seis fechas distribuidas en la serie temporal.

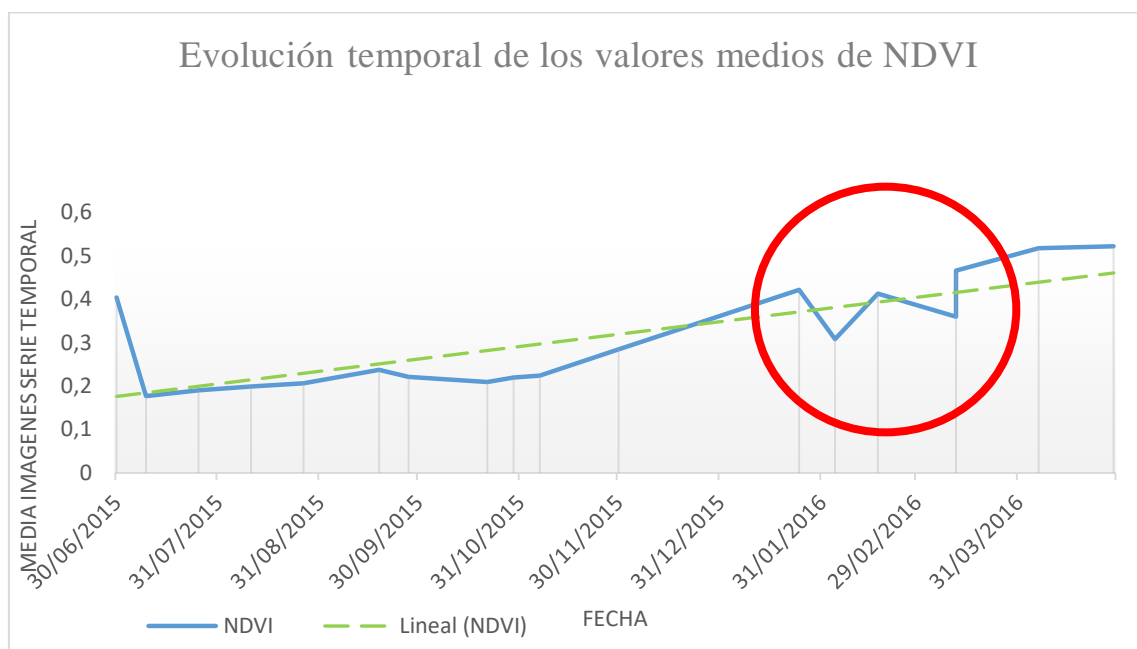


Figura 14. Evolución de la media de los valores de NDVI.

La Figura 14 refleja con claridad las implicaciones inmediatas del fuego en la pérdida de NDVI (se recoge una acusada caída de los valores NDVI (0.20), y la recuperación que se produce durante los 10 meses posteriores al fuego. Se observa como los valores de NDVI comienzan a recuperarse progresivamente hasta situarse en un 0.5, lo que nos permite, en cierto modo, cuantificar la magnitud de la regeneración natural de la zona estudiada. Desde el punto de vista metodológico, conviene también llamar la atención sobre la alta variabilidad que se registra en febrero y marzo como consecuencia de la utilización de diferentes satélites en la reconstrucción multitemporal del índice; en este caso los NDVI del satélite Sentinel 2-A presenta valores más bajos que la tendencia observada con el satélite Landsat 8. La eliminación de estos datos, tal y como se recoge en la Figura 17 muestra una tendencia mucho más previsible y real.

Como consecuencia de la integración de dos tipos diferentes de satélite en la configuración de la serie temporal y de la aparente disfunción en el modo en el que registran los valores de NDVI, se ha considerado oportuno realizar una comparación entre dos imágenes muy próximas temporalmente (12/03/2016 y 13/03/2016) pero de satélites diferentes: Sentinel y Landsat. En este análisis se pone en relación los valores del índice NDVI respecto a las categorías de severidad. Este proceso se ha realizado mediante IBM SPSS Statistics 19, el resultado se recoge en la Tabla 10.

Se observan claras diferencias en los valores mínimos y máximos del índice NDVI entre las dos imágenes tomadas en el mismo día. En primer lugar, hablando de los valores mínimos hay que resaltar que la media total de las categorías en el Landsat 8 duplica a la de la imagen Sentinel ya que pasa de valores de 0.07 a 0.15, es decir, una diferencia de 0.08. En segundo lugar, respecto a los valores máximos, la media total

también difiere enormemente, en este caso en un 0.09 pasando de un valor de 0.83 en Sentinel 2 hasta un valor de 0.92 en Landsat 8.

Estas claras diferencias las asociamos a que las imágenes llamadas Sentinel 2 no han sido tratadas para su corrección y esto afecta a las bandas visibles y de ahí que los NDVI sean más bajos y por este motivo se ha considerado omitirlos en el estudio.

Satélite	Severidad	N	Media	Mínimo	Máximo
Sentinel 2 A	1	52	0.4748	0.16	0.80
	2	240	0.4063	0.11	0.82
	3	588	0.4409	0.11	0.83
	4	360	0.2886	0.12	0.82
	5	226	0.1783	0.07	0.50
	Total	1466	0.3585	0.07	0.83
Landsat 8	1	52	0.5605	0.22	0.88
	2	240	0.5066	0.16	0.90
	3	588	0.5311	0.15	0.92
	4	360	0.4008	0.17	0.90
	5	226	0.3274	0.18	0.76
	Total	1466	0.4647	0.15	0.92

Tabla 10. Diferencias estadísticas entre Landsat 8 y Sentinel 2-A.

La imagen anterior al incendio (Figura 16) nos ayuda a conocer la distribución espacial de la densidad de la vegetación; los colores más claros representan las zonas de mayor densidad que, predominantemente, ocupan la zona oeste y el sector centro-norte, presentándose en esta última localización de modo más discontinuo desde el punto de vista espacial. El predominio de las zonas agrícolas en la sector este-meridional de del perímetro y la menor densidad de la vegetación se pone de manifiesto en el dominios de tonos más oscuros en estas zonas.

La imagen posterior al incendio (Figura 17) muestra claramente que el vigor y la densidad vegetal de masas forestales existentes ha desaparecido, apenas se localización zonas destacables en cuanto a altos índices de vegetación y hay un claro predominio de muy bajos índices de severidad (~ 0.15).

Conforme observamos el transcurso tiempo en las cartografía de NDVI, se aprecia cómo gradualmente va incrementándose la aparición de tonos claros (mayor vigor vegetal) prueba irrefutable de la regeneración de la vegetación. El mayor incremento de la vegetación se corresponde con las zonas que poseían una severidad baja, de categoría 1, 2 y 3, las cuales coinciden con campos de cultivo, en su gran mayoría cerealista.

Estas zonas de cultivo presentaban una escasa cubierta vegetal antes del fuego (tonos oscuros, es decir valores de NDVI bajos) ya que la mayoría ya habían sido cosechadas, de ahí también la escasa severidad registrada en estos sectores. Sin embargo, posteriormente han sido cultivadas de nuevo y, en consecuencia, lo que se aprecia en la serie multitemporal es la propia variación fenológica del cereal. Por tanto

se trata de una regeneración orientada relacionada con las prácticas agrícolas posteriores al fuego. Si echamos un vistazo al NDVI correspondiente al 29 de Abril de 2016 se comprueba que este gran incremento de los índices NDVI está ligado estrechamente a un suelo cultivado con vegetación en maduración.

En el lado contrario, las zonas que han registrado los niveles de severidad más elevados (categoría 4 y 5), correspondientes a las masas de pino carrasco del sector occidental del incendio, presentan los niveles de regeneración en términos de NDVI más bajos, encontrándose muy lejos de su estado anterior al incendio. Este último extremo es especialmente llamativo ya que se trata de comunidades de vegetación con una gran capacidad de regeneración debido a que, tanto *Pinus halepensis* como *Quercus ilex*, son especies resilientes dotadas de mecanismos de respuesta al fuego muy eficaces. Por tanto, o bien habrá que explicar la escasez de la regeneración como consecuencia de los efectos de la gran intensidad del fuego en este sector, o encontrar otros factores que expliquen estos valores. Entre estos situamos intervenciones de carácter antrópico, tales como talas, preparación del terreno para repoblaciones, etc.

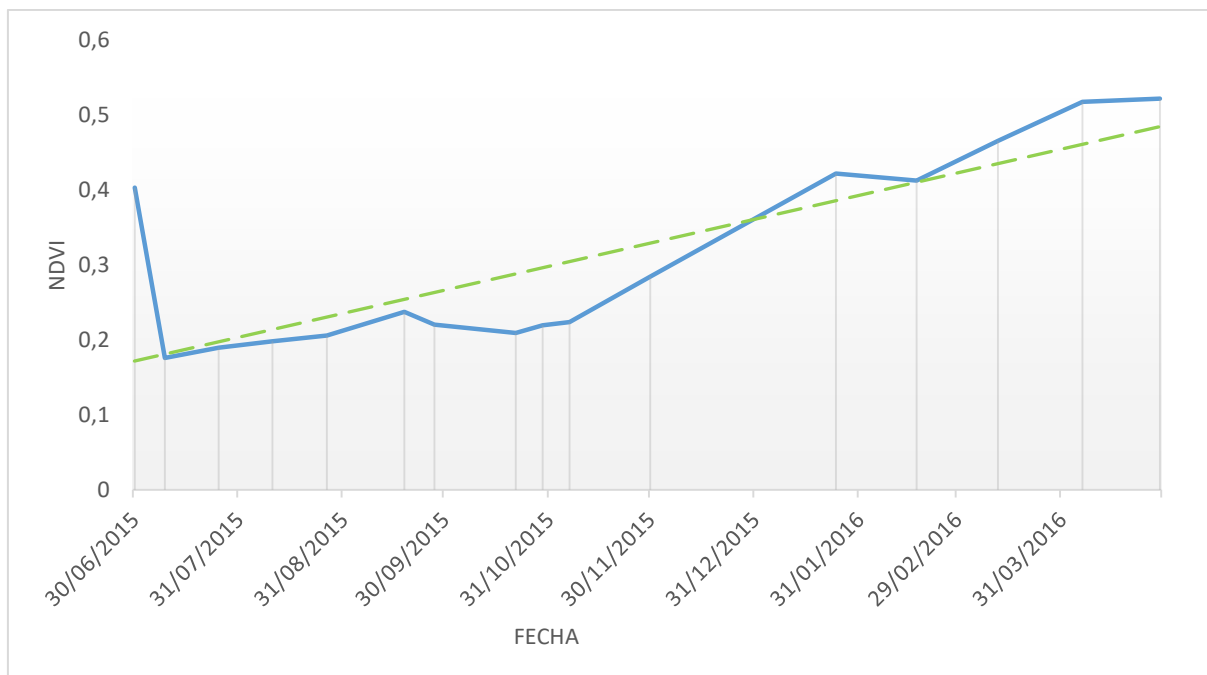


Figura 15. Evolución de la media de los índices NDVI sin imágenes Sentinel 2-A



Figura 16. Distribución de los valores de NDVI antes del fuego a partir dela imagen OLI (30-Junio-2015).

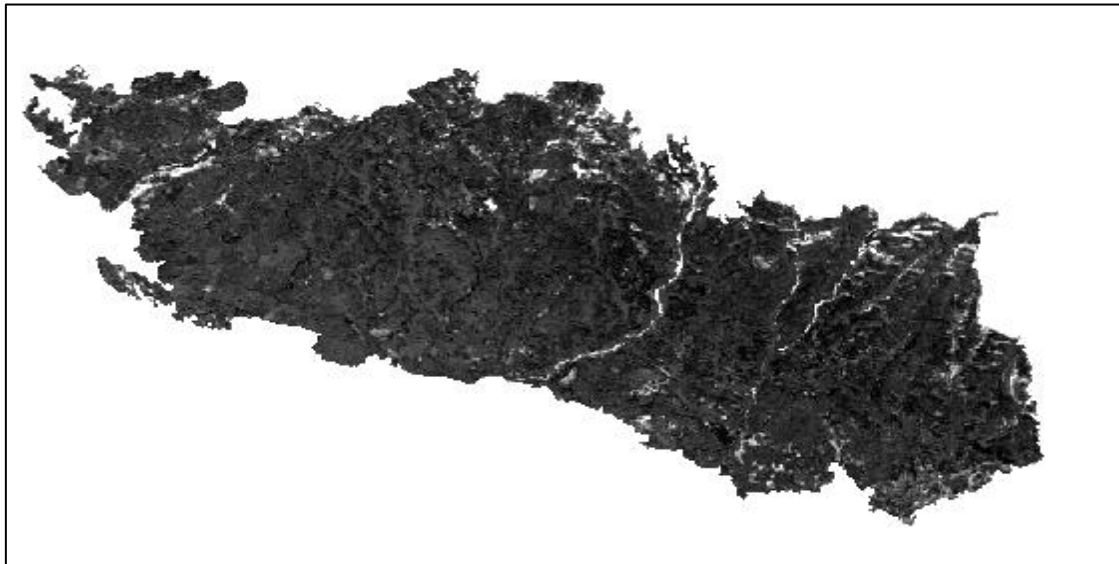


Figura 17. Distribución de los valores de NDVI justo después del fuego (9-Julio-2015).

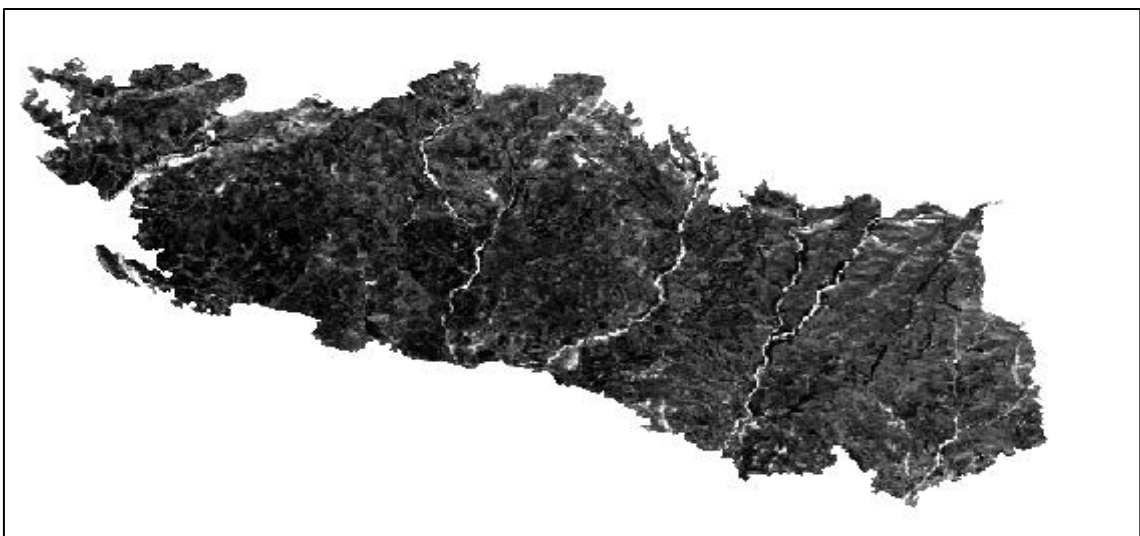


Figura 18. Distribución de los valores de NDVI después del fuego (18-Septiembre-2015).

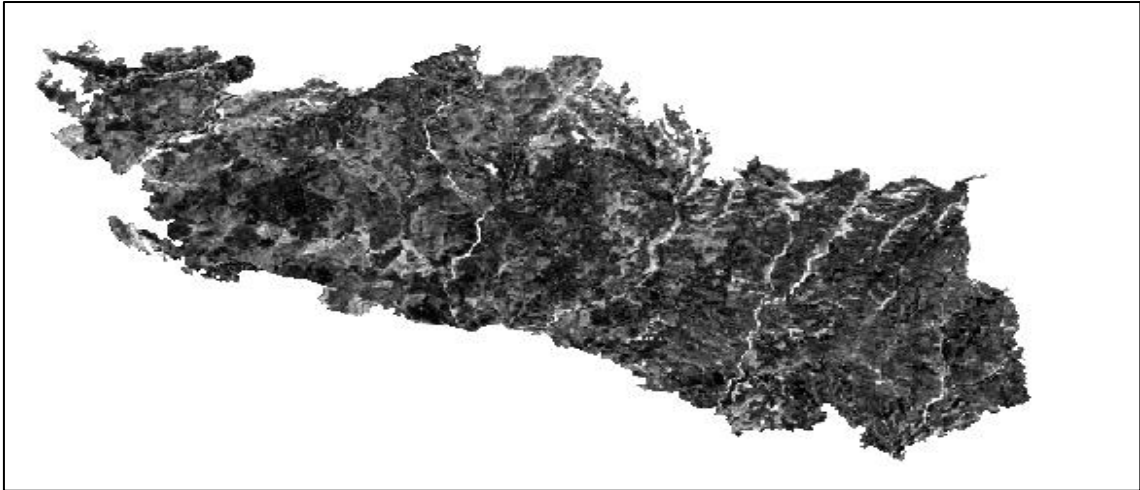


Figura 19. Distribución de los valores de NDVI después del fuego (30-Noviembre-2015).

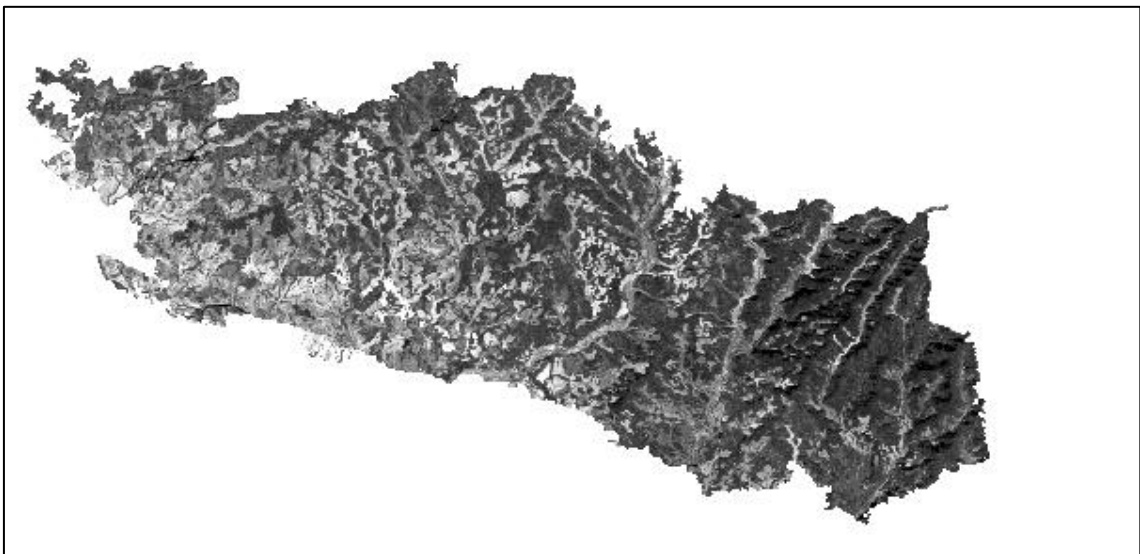


Figura 20. Distribución de los valores de NDVI después del fuego (4-Febrero-2016).

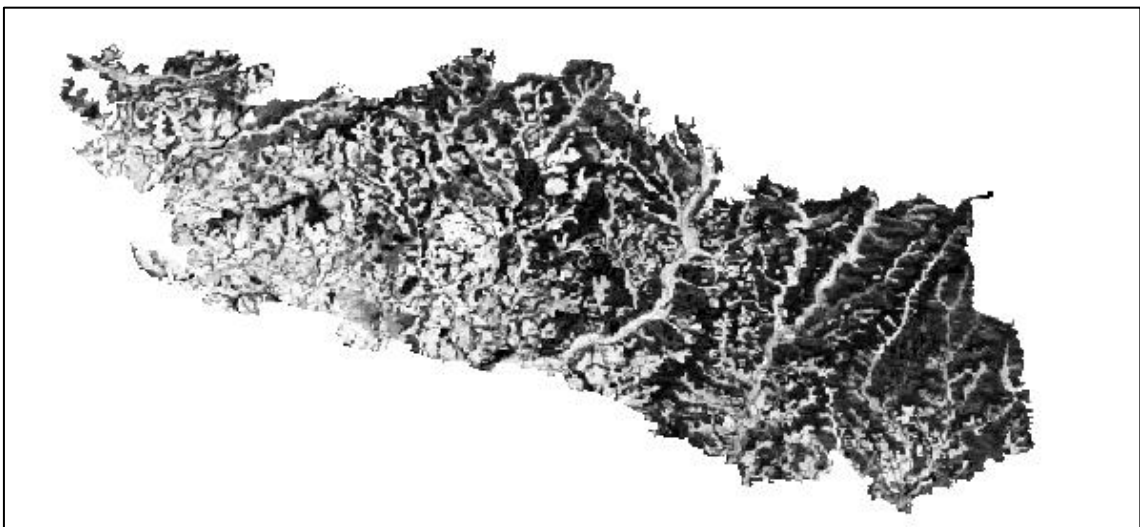


Figura 21. Distribución de los valores de NDVI después del fuego (29-Abril-2016).

5.3 La pendiente topográfica y las actuaciones antrópicas influyen en el proceso de regeneración vegetal postincendio.

Como se ha podido observar toda la zona ha experimentado grandes incrementos en los valores de NDVI. Sin embargo, de cara a la aplicación específica de estrategias de gestión, es importante conocer el modo en el que han evolucionado cada comunidad vegetal. En la Figura 22 podemos diferenciar en términos generales cuatro periodos en el proceso de regeneración comunes a todas las comunidades aunque con algunas particularidades en algunas de ellas.

El primero, de corta duración, se corresponde con la caída en picado de los índices NDVI como consecuencia del impacto directo del fuego.

En segundo lugar, hay un pequeño periodo de tiempo en el que los índices ascienden ligeramente, alcanzando valores entre 0.22-0.26.

El tercer periodo comienza con un leve descenso, que hace que se retorne a los valores iniciales del segundo periodo, para volver de nuevo a recuperarse en un periodo que finaliza cuatro meses después, alcanzando valores entre 0.31-0.45. En este periodo sí que podemos hablar ya de un incremento de índices NDVI notable ya que en algunos casos, como en el caso de las comunidades de pino carrasco, el incremento si sitúa ~0.2 puntos (esta comunidad vegetal es la que mayor ascenso ha tenido en este periodo).

El cuarto y último periodo comienza como el anterior, con un ligero descenso en los valores aunque poco significativo y sólo en algunas comunidades, para alcanzar los niveles más elevados que, en el caso de las comunidades de pino carrasco alcanzan valores ~0.7.

Todas las comunidades vegetales han aumentado sus índices de NDVI desde el incendio, en algunos casos estos han recuperado sus valores iniciales e incluso los han superado, esto podría estar relacionado con los efectos de la intervención del ser humano en la zona para conseguir una restauración forestal y medioambiental más rápida, la cual la veremos más adelante.

En la Figura 22 se aprecia con claridad el singular comportamiento de los pinares de *Pinus halepensis*. Esta comunidad, al mismo tiempo que es una de las más afectadas por en términos de severidad, representa la tendencia positiva más acusada de todas las comunidades vegetales. En este sentido, mientras que en los meses siguientes al fuego registra los valores promedio más bajos de todas, a partir de noviembre de 2015 (4 meses tras el fuego) protagoniza el incremento más acusado y constante. En cambio, la mezcla de coníferas y frondosas, la otra categoría que también muestra valores de NDVI muy altos al final de la serie, describe una evolución diferente, dado que en todo momento, incluso inmediatamente después del fuego, presenta valores elevados de NDVI.

En el caso de los bosques ribereños, la menor incidencia del fuego debido a las condiciones de humedad, y la mayor variabilidad fenológica de estas comunidades, también se ve reflejada en la tendencia que describe a lo largo de la serie. Se trata de

valores que varían en función de la época del año, pero que presentan guarismos elevados en la última imagen disponible (primavera de 2016).

Los enebrales, arbolado disperso de coníferas y mezclas de coníferas se sitúan en un nivel medio, reproduciendo las características de los periodos generales descritos más arriba y mostrando un valores de NDVI medios (~ 0.45) en la primavera de 2016.

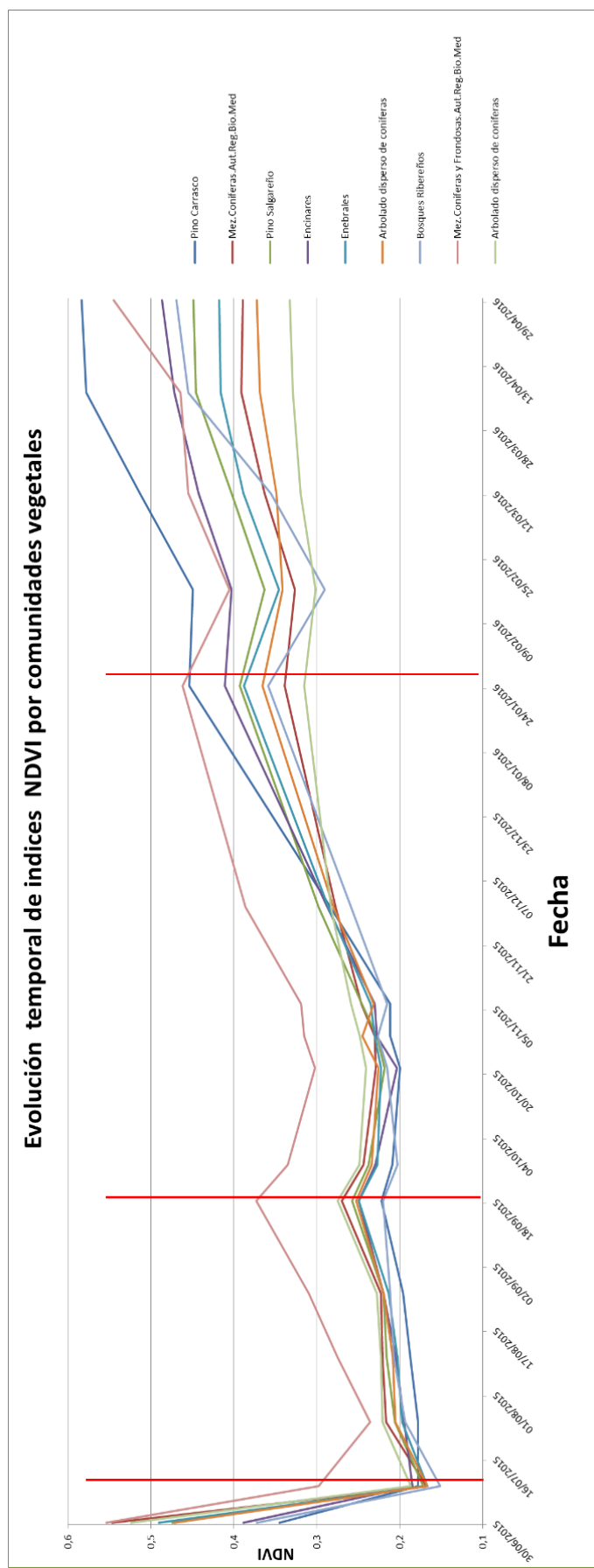


Figura 22. Evolución de los valores NDVI por comunidades vegetales.

5.4. Factores explicativos de regeneración vegetal del incendio: el papel de la pendiente topográfica y las actuaciones de carácter antrópico.

Junto a las características de la vegetación, otro conjunto de factores que pueden explicar la distribución espacial de los niveles de regeneración vegetal son las relacionadas con la morfología topográfica y, entre estas, destaca sobremanera la pendiente topográfica Figura 23 por sus implicaciones a nivel hidro-geomorfológico. Por otro lado, las actuaciones antrópicas de existir, evidentemente también reajustan los patrones de distribución espacial de la regeneración vegetal al potenciar el regenerado mediante repoblaciones o extraer la madera quemada. En este apartado se presentan los resultados exploratorios de la cuantificación del papel de la pendiente topográfica y la actuaciones postincendio en caminadas a la regeneración, en la regeneración de los valores de NDVI y, en el caso de la pendiente topográfica, en la distribución de los niveles de severidad.

En primer lugar, mediante gráficos de dispersión y el coeficiente de determinación (r^2), se ha analizado las relaciones entre las imágenes pre-, post- y la última de la serie temporal y los valores de la pendiente topográfica.

En la zona quemada la pendiente topográfica presenta zonas bien diferenciadas. En la parte noreste en la cual los índices de severidad fueron más altos, se localizan las mayores pendientes. Mientras, las zonas con superficie de cultivo están ligadas principalmente a zonas de baja pendiente. Sin embargo, esta relación parece estar más controlada por la distinta cantidad de combustible que presenta las zonas de cultivos respecto a las forestales. En la Figura 24 observamos una tendencia positiva entre pendiente y valores de NDVI antes del fuego. Es decir a mayor pendiente mayor es el valor de NDVI. Sin embargo, el valor de r^2 no es muy significativo ($r^2 = 0.339$) lo que viene a representar una relación débil entre ambas variables. Es decir que la varianza explicada por la pendiente es muy baja.

En la Figura 25 que relaciona la pendiente con el NDVI post-incendio se observa claramente como en este caso no existe ningún tipo de tendencia, debido a la homogeneización de los valores de NDVI por el paso del fuego. Como ejemplo, los niveles de NDVI que con las pendientes mayores de 10° han caído debido a que las llamas arrasaron con la vegetación existente. En este caso la correlación aun es más baja que en el primer caso ya que la r^2 en este caso es de 0.002.

En la Figura 26 observamos el gráfico de dispersión entre los valores de NDVI correspondiente a la última imagen disponible de la serie y los valores de pendiente. En este caso se representa una tendencia negativa entre pendiente y NDVI, es decir que la mayor regeneración acontece en las zonas de menor pendiente, esto es, en las zonas de cultivos tal y como se ha comprobado mediante el análisis espacial de los valores de NDVI. Observamos, la gran concentración de puntos con pendientes $< 10^\circ$ con valores de NDVI que oscilan entre 0.20 y 0.90. También podemos observar una gran cantidad de puntos que, con pendiente altas ($\sim 30^\circ$), presentan valores de NDVI bajos (~ 0.40). Esto nos dice que la recuperación de los índices NDVI en las laderas altas no ha avanzado tanto como en partes bajas. En esta última relación de variables tampoco

existe ningún tipo de correlación significativa, ya que como se puede apreciar r^2 es de 0.250 por lo cual es una correlación muy débil.

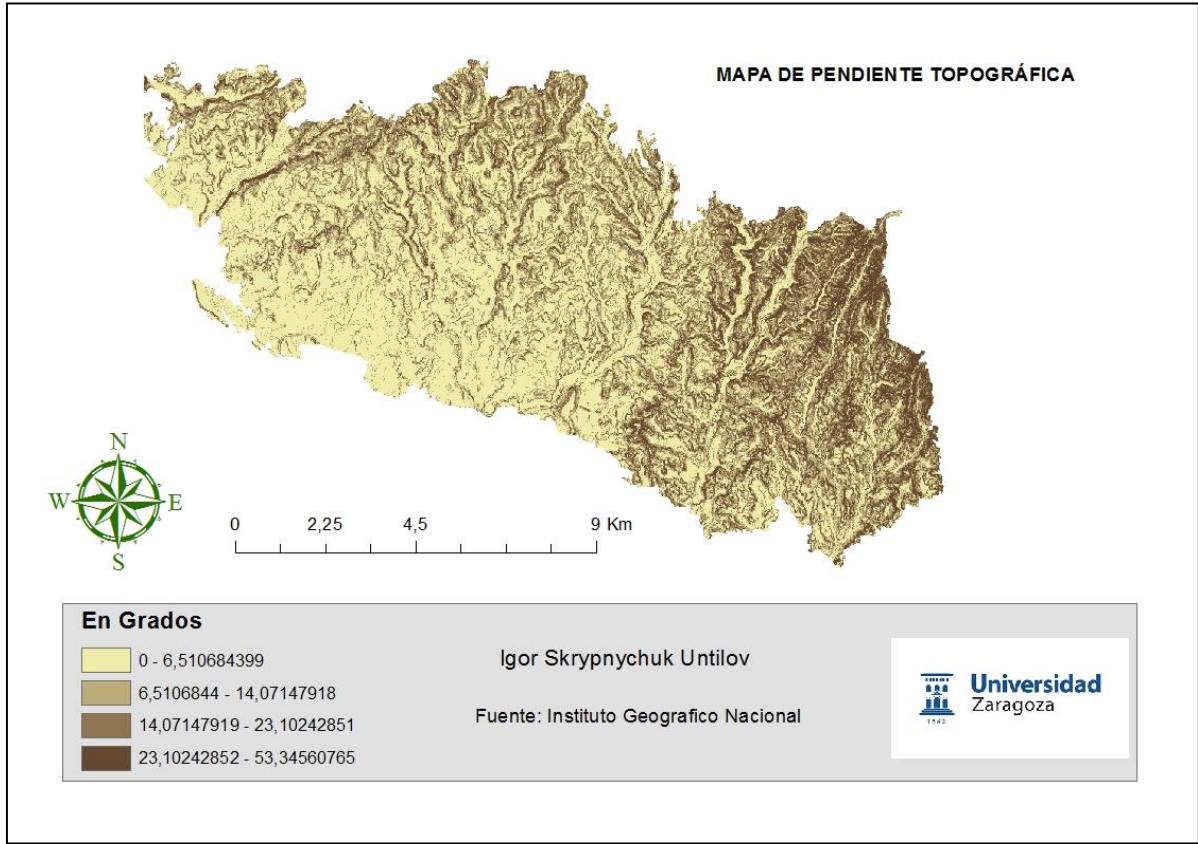


Figura 23. Mapa pendiente topográfica.

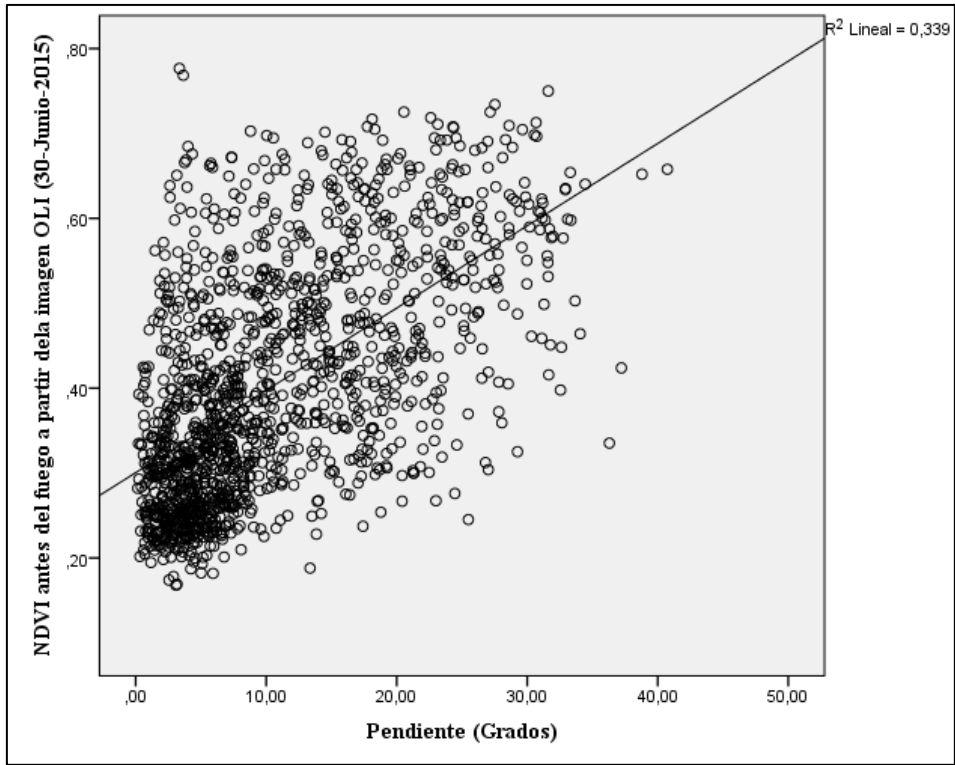


Figura 24. Relación NDVI previo al fuego respecto a la pendiente.

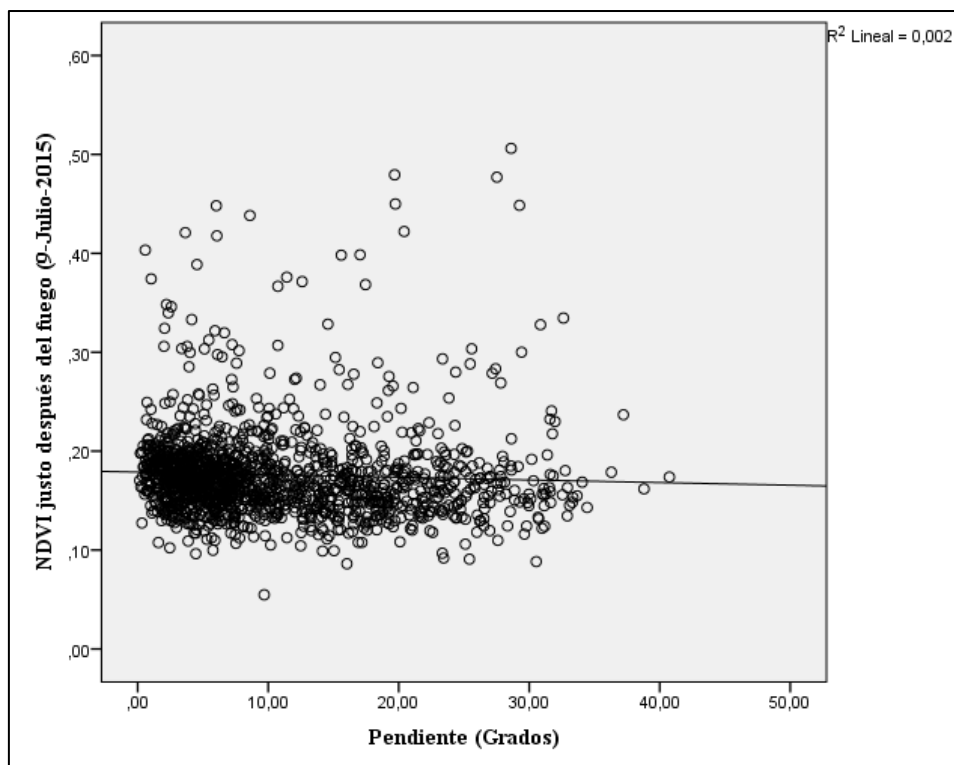


Figura 25. Relación NDVI posterior al incendio respecto a la pendiente.

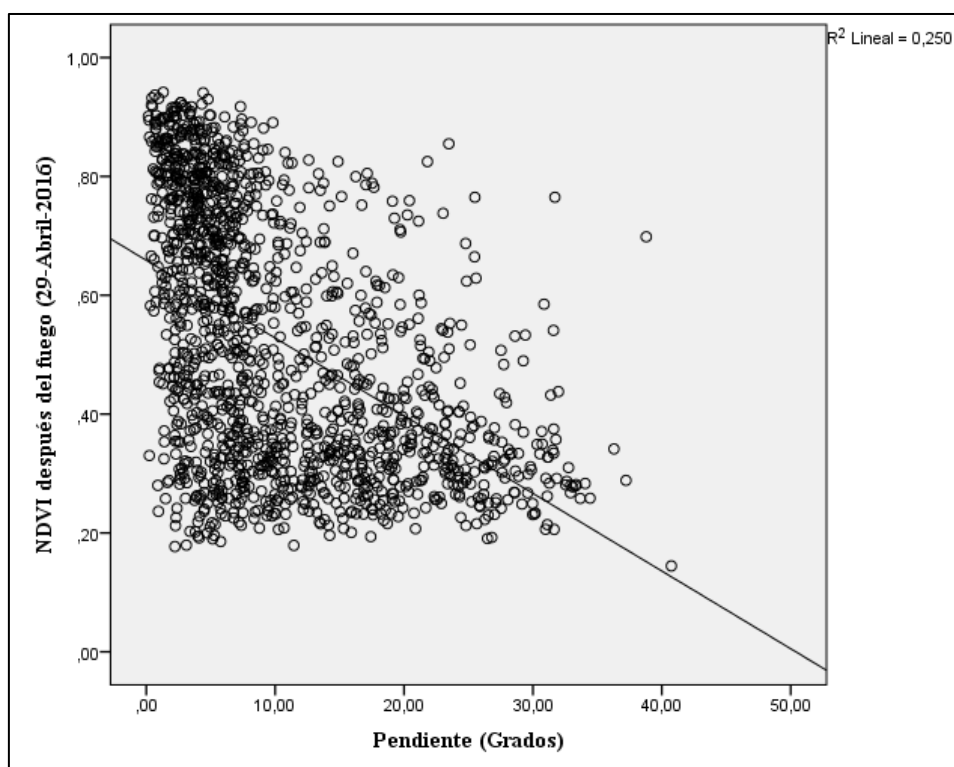


Figura 26. Relación imagen 29-Abril-2016 respecto a la pendiente.

En cuanto a la influencia de las actuaciones postincendio, una vez controlado el incendio, el Departamento de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón aprobó un proyecto de actuaciones de emergencia para la

restauración forestal y medioambiental de la zona afectada por las llamas. Las actuaciones han consistido en tres grandes bloques:

1. Restauración de cubierta vegetal.
 - Actuaciones en quercíneas y pinares.
2. Actuaciones de corrección hidrológica forestal.
 - Fajinas
 - Repoblación forestal
3. Infraestructuras.
 - Apertura de pistas y mejora de las existentes
 - Construcción de obras de fábrica
 - Construcción de un depósito de agua y arreglo de uno existente.

La localización de estas actuaciones se representa en la Figura 27 en donde se muestran la distribución espacial de todas, en función de la categorización en bloques presentada más arriba.

De manera más específica, los *Aprovechamientos* corresponden con superficies adjudicadas a maderistas en diferentes municipios. Las *Fajinas* hacen referencia a la construcción de fajinas en curva de nivel para la retención de sedimentos. El *Ahoyado* hace alusión a los ahoyados para reforestación que se han plantado durante el invierno. Los tratamientos selvícolas (*Trata selv 04*) se corresponden con el apeo y desramado de pinar y dejado *in situ*. El *Tajo2 TOTAL* alude al tratamiento selvícola de roza de encinar. Destaca claramente en la cartografía (Figura 27) que las zonas de actuación están localizadas en la zona en las que se registraron los mayores índices de severidad y poseían en general valores altos de NDVI previos al fuego.

El régimen de tenencia y la severidad del fuego han sido los criterios utilizados para seleccionar estos sectores. Sin embargo, la serie temporal disponible todavía no permite recoger el impacto que dichas actuaciones han tenido en los niveles de regeneración vegetal.

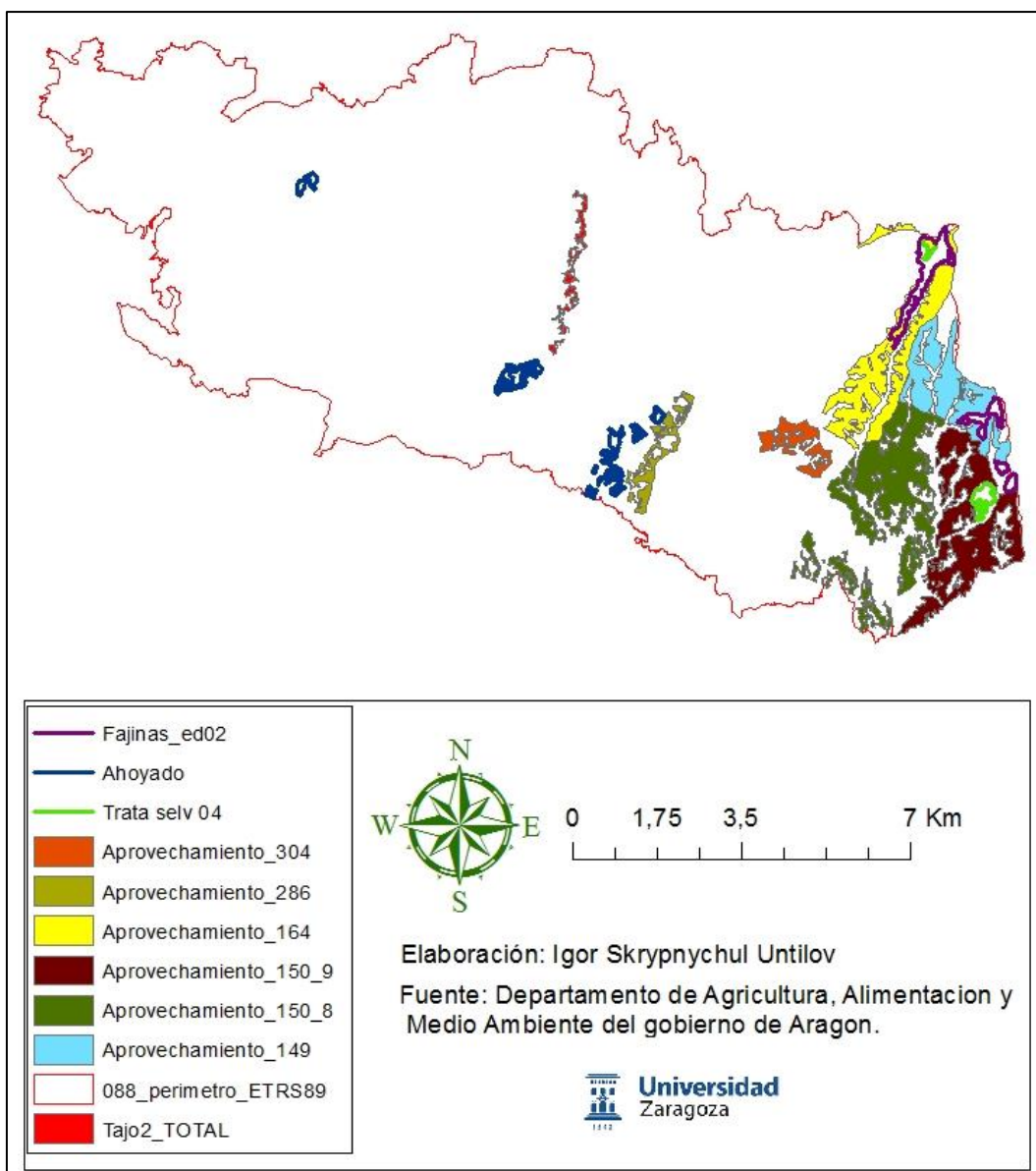


Figura 27. Distribución espacial de las actuaciones antrópicas postincendio realizadas por el Departamento de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón.

6. Conclusiones

La teledetección espacial y, en concreto la imágenes procedentes del Satélite Landsat 8, constituyen una fuente de datos muy útil en el análisis y control de los efectos originados por los fuegos forestales. Del mismo modo, la utilización en este contexto de índices espectrales (dNBR y NDVI), ha permitido el análisis espacial de la severidad del fuego y la cuantificación del proceso de regeneración vegetal.

En relación con los objetivos del TFG se puede concluir que el incendio de la Sierra de Luna de julio de 2015 fue de severidad moderada/alta, mostrando claras diferencias a nivel espacial. En este sentido, la vegetación (tipo y densidad) se muestra como el factor

que controla el patrón de distribución de los valores de dNBR, índice espectral utilizado para analizar la severidad del fuego.

En cuanto a la evolución en el tiempo de los valores de NDVI, la fuerte caída tras el fuego, dio paso a un incremento sostenido a partir del segundo mes tras el fuego, que pone de manifiesto la capacidad de regeneración de la zona afectada. Sin embargo, existen importantes diferencias a nivel espacial que se explican por el tipo de vegetación afectada.

La pendiente topográfica no explica porcentajes de la varianza significativos en relación con la regeneración vegetal o la distribución espacial de la severidad. Por otro lado, la coincidencia temporal entre el periodo que cubre la serie multitemporal de imágenes disponibles y la fecha de aplicación de las actuaciones de urgencia postincendio, no permite todavía caracterizar la influencia de las diferentes actuaciones y tratamientos, así como sus interacciones con otras variables como la propia severidad, la pendiente topográfica o el tipo de vegetación, en la regeneración vegetal de las comunidades afectadas o repobladas.

Desde el punto de vista de las estrategias de gestión de la zona quemada, señalar que mientras las zonas forestales de los términos municipales de Asín, Orés y Luna, requieren una mayor atención debido a la alta severidad y escasa regeneración que registran, las zonas de cultivo de los términos de Biota y Ejea de los Caballeros no demandan actuación alguna.

Respecto a la integración de la imagen Sentinel 2A y Landsat (etm+, OLI) en la serie multitemporal de datos de NDVI, señalar que existen claras diferencias entre ellas y, por tanto, desaconsejar la utilización de las Sentinel 2A, a no ser que se apliquen algoritmos de corrección atmosférica.

7. Fuentes bibliográficas y páginas web consultadas.

Chuvieco, E. (2009). “Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección”. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat (1)*, pp 173-181.

Gilabert, M.A., González-piqueras, J. y García-haro, J. (1997). “Acerca de los índices de vegetación”. *Revista de Teledetección (8)*. Pp 35-46.

Chuvieco, E., Martín, M.P (2004). “Nuevas Tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales” *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, pp 190.

Chuvieco, E. (1996). “Fundamentos de teledetección espacial”. *Rialp, Madrid*, pp 568.

Díaz-Delgado, R. (1999). “Seguimiento de la regeneración vegetal post-incendio mediante el empleo del NDVI”. *Revista de Teledetección*, pp 1-4.

Bastarrika Izagirre, A. y Chuvieco Salinero, E. (2006). “Cartografía del área quemada mediante crecimiento de regiones; aplicación en entornos mediterráneos con imágenes tm y etm+”, *GeoFocus (Artículos) n°6*, p.182-204.

Montorio Lloveria, R. y Pérez Cabello, F. (2013). “Cartografía de la severidad del fuego mediante teledetección”. *Red Temática Nacional Efectos de los Incendios Forestales sobre los Suelos (FUEGORED)*. Ficha técnica FGR 2013/12.

Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; (2006). “Landscape Assessment”. *Departament of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station*. pp. LA-1-55.

García-Haro, F.J; Gilbert, M.A y Meliá, J. (2001). “Monitoring fire-affected areas using Thematic Mapper data”. *Int. J. Remote sensing*, 2001, Vol.22, nº 4, pp. 533-549.

Heredia Laclaustra, A., Martinez Sanchez, S., Quinter, E, Piñeros, W y Chuvieco, E. (2003). “Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+”. *GeoFocus (Artículos)* nº3, pp. 216-234.

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio ambiente [En línea]. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/>

Gobierno de Aragón [En línea]. Disponible en: http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Departamentos/DesarrolloRuralSostenibilidad/AreasTematicas/MA_MedioForestal/IncendiosForestales?channelSelected=302890292fb3a210VgnVCM100000450a15acRCRD

Gobierno de Aragón [En línea]. Disponible en: <http://www.boa.aragon.es/EBOA/codigoleyes.htm>

Gobierno de Aragón [En línea]. Disponible en: http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Departamentos/DesarrolloRuralSostenibilidad/AreasTematicas/MA_MedioForestal/IncendiosForestales/ci.NORMATIVA_INCENDIOS.detalleDepartamento?channelSelected=302890292fb3a210VgnVCM100000450a15acRCRD

United States Geological Survey [En línea]. Disponible en: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Turismo de Zaragoza [En línea]. Disponible en: <http://www.turismodezaragoza.es/provincia/comarcas/comarca-cinco-villas.html>

Bufete de Ingenieria en Telecomunicaciones y sistemas, S.A de C.V [En línea]. Disponible en: http://www.gpo-bits.com.mx/imagenes_satelite.html

Teledet [En línea]. Disponible en: <http://www.teledet.com.uy/>

Landsat Science [En línea]. Disponible en: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Aeroterra S.A [En línea]. Disponible en: <http://www.aeroterra.com/>

Georem [En línea]. Disponible en: <http://georem.blogspot.com.es/2013/08/imagenes-landsat-8-de-panama.html>

Space for europe [En línea]. Disponible en: <http://www.esa.int/>

MundoCartoGEO [En línea]. Disponible en: <http://mundocartogeo.blogspot.com.es/>

8. Anexos

En este apartado se incluyen los tres mapas que han servido de apoyo para el conocimiento de la zona:

