

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LAS ACTUACIONES DE RESTAURACION VEGETAL POSTINCENDIO MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT EN EL INCENDIO DE RIGLOS (2001)

Lapuente Salas, José Manuel

Montorio Lloveria, Raquel

Máster Universitario en

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

Noviembre de 2013



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Una de las principales problemáticas ante las que se encuentra el hombre después de que se haya producido un incendio es la de decidir si debe actuar o no después del mismo. En este trabajo se van a comparar zonas en las que el hombre ha actuado y zonas en las que la regeneración ha sido natural. EL objeto de estudio se centra en el incendio de Riglos del año 2001. Para ello se han utilizado imágenes de satélite Landsat 5 TM a partir de las cuales se han obtenido una serie de variables como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), nivel de severidad, así como otro conjunto de variables extraídas de otras fuentes de datos. Una vez determinadas las zonas de actuación humana y las zonas de control, se procede a la comparación mediante análisis estadísticos descriptivos. El objetivo que se pretende alcanzar con este trabajo es ver las diferencias que existen entre las zonas en las que ha actuado el hombre tras un incendio y las que no. Se concluye que a corto plazo la actuación por parte del hombre en determinadas áreas tras un incendio corta el proceso de regeneración vegetal tomando como referencia valores de NDVI.

Palabras Clave: *incendio forestal, regeneración vegetal, actuaciones antropicas, imágenes de satélite, análisis estadístico,*

Abstract

One of the main problems from the man, after a fire, is to decide whether to act or not after this fire. This paper will compare areas where man has acted, and areas whose regeneration has been natural. The object of study focuses on the fire that happened in Riglos in 2001. For doing this paper, we have used satellite images Landsat 5 TM which have been very useful, because they have allowed us to obtain a set of variables such as NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), severity level, and another set of variables extracted from other data sources. Once we have determined the areas of human performance and control areas, we proceed to the comparison using descriptive statistical analysis. The objective that we want achieve with this work, is to see the differences between the areas affected by the man's actions after a fire and the areas which haven't been affected for human's actions. We can conclude that short-term action by man in certain areas after a fire, breaks the revegetation by reference NDVI values.

Key Words: *wildfire, vegetal regeneration, human actions, satellite images, statistical analysis.*

Índice

1.	Introducción.....	2
2.	Objetivos.	3
3.	Área de estudio.	4
4.	Metodología.....	6
4.1.	Delimitación de zonas de actuación humana.....	7
4.2.	Delimitación de zonas de control.....	8
4.3.	Generación de NDVI y dNBR.....	10
4.4.	Generación de una tabla a partir de las variables obtenidas en los apartados anteriores.....	12
4.5.	Comparación de zonas de actuación con zonas de control mediante análisis estadístico.	14
5.	Resultados.	15
6.	Conclusiones.	26
7.	Bibliografía.....	26

Índice de figuras

Figura 1	Mapa de localización del incendio de Riglos.	4
Figura 2	Composición de falso color 743 en el incendio de Riglos.	5
Figura 3	Análisis multitemporal pre/post-fuego del NDVI en el incendio de Riglos.	6
Figura 4	Esquema de metodología seguida en el presente proyecto.	6
Figura 5	Cartografía de las zonas de actuación en la Fase 1 en el incendio de Riglos.....	7
Figura 6	Ejemplo de delimitación de las zonas de control.....	9
Figura 7	Modelo del cálculo de NDVI.	11
Figura 8	Modelo del cálculo de NBR y dNBR.....	12
Figura 9	Mapa de puntos de las zonas de actuación y las zonas de control.....	13
Figura 10	Gráfico de barras de error para cada tipo de punto con valores de NDVI previos (2001). 15	
Figura 11	NDVI Pre-Incendio (2001).	16
Figura 12	NDVI Post-Incendio (2002).....	16
Figura 13	NDVI antes del comienzo de la fase de restauración (2004).....	17
Figura 14	NDVI un año después del comienzo de la fase de restauración (2006).	18
Figura 15	NDVI final de la fase de restauración (2007).	18
Figura 16	NDVI Pre-Incendio (2001) por comunidades vegetales.....	19
Figura 17	NDVI Post-Incendio (2002) por comunidades vegetales.	20
Figura 18	NDVI antes del comienzo de la fase de restauración (2004) por comunidades vegetales. 20	
Figura 19	NDVI un año después del comienzo de la fase de restauración (2006) por comunidades vegetales. 21	
Figura 20	NDVI final de la fase de restauración (2007) por comunidades vegetales.....	22

Índice de tablas

Tabla 1	Definición de la variable Tipos de Rodal.	8
Tabla 2	Fechas de las imágenes Landsat 5 TM utilizadas para el cálculo de variables.	10
Tabla 3	Niveles de severidad en escala 10^3	11
Tabla 4	Tipo de punto.....	14
Tabla 5	Comunidades vegetales.	14
Tabla 6	ANOVA de NDVI 2006 para la muestra de <i>Pinus sylvestris</i>	23
Tabla 7	ANOVA de NDVI 2007 para la muestra de <i>Pinus sylvestris</i>	23

1. INTRODUCCIÓN.

En primer lugar, y para una mejor comprensión del presente proyecto, comenzaremos con una breve explicación del término de incendio forestal. La Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes establece en su artículo 6.k) que por “*incendio forestal se entiende el fuego que se extiende sin control sobre combustibles forestales situados en el monte*”. Consideramos importante hacer un breve análisis de dicha definición, con el objetivo de explicar el concepto de incendio forestal. Si atendemos a la anterior definición, vemos que se compone de cuatro partes: a) Sobre combustibles forestales situados en el monte, para diferenciar el incendio forestal de cualquier otro tipo de incendio (agrícola, urbano, industrial, etc.). b) Sin control. Para separar claramente entre quema controlada e incendio. c) Que se extiende. El requisito de la propagación es absolutamente necesario. Por tanto, habrá unas causas que propicien, mantengan y alimenten la propagación. d) El fuego. Evidentemente también es un requisito necesario, y en consecuencia, habrá unas causas, conocidas como causas de ignición, que originen la chispa que genera el fuego, y unas condiciones para que prenda.

Los incendios forestales representan una de las perturbaciones más importantes que experimentan los ecosistemas naturales (Naveh, 1975; Vélez, 1982), especialmente en las regiones mediterráneas donde su frecuencia es alta (Moreno et al., 1998; Pausas, 2004). En este tipo de comunidades el fuego actúa como un elemento modelador del paisaje, ya que afecta a la estructura y composición de la vegetación, y estas características, a su vez, influyen en el régimen de incendios (White, 1979; Trabaud, 1998).

El concepto de régimen de perturbaciones hace referencia a la caracterización de las perturbaciones que afectan a un espacio determinado a lo largo del tiempo. Los parámetros más importantes son: a) la *intensidad*, que mide la magnitud física de la perturbación; b) la *severidad*, que mide el grado de afectación de la perturbación en los organismos o en las propiedades del sistema; c) la *extensión*, que hace referencia a la superficie afectada; d) la *frecuencia*, medida como número de perturbaciones que se producen en un área concreta a lo largo de un período de tiempo determinado; e) el período de *recurrencia*, medido como el tiempo necesario para que un área vuelva a ser afectada por la misma perturbación; y f) la *estacionalidad* o época del año en que se producen las perturbaciones.

De todas las posibles perturbaciones que son consecuencia de un incendio, quizás la más relevante de todas ellas sea la liberación de recursos. Dentro de todas ellas, la más significativa es la liberación del espacio físico. Como consecuencia de un incendio se establecen nuevas relaciones entre los organismos que sobreviven o que acceden al área perturbada. A continuación de la perturbación se genera un proceso de recuperación del ecosistema, el cual se mide en términos de resiliencia. La resiliencia es la capacidad del ecosistema de recuperar su composición florística y volver al estado previo a la perturbación (Keeley, 1986; Berkes, 2007).

Los fuegos forestales desajustan las relaciones entre los diferentes componentes de los sistemas donde irrumpen. A partir de la perturbación se precipitan una serie de mecanismos naturales compensatorios y de reajuste, de carácter natural, que tienden a proporcionar un nuevo nivel de equilibrio al sistema afectado en un intervalo de tiempo que varía según los casos (Pérez-Cabello, 2001). La idiosincrasia de estos reajustes, principalmente geomorfológicos y biológicos, es decir, la respuesta del medio, depende de la interacción en la zona afectada de dos tipos fundamentales de factores: estructurales y coyunturales. Los primeros hacen referencia a ciertas características consubstanciales al medio, pertenecientes al complejo topografía-litología-clima-vegetación-suelo: pendiente, temperaturas y precipitaciones medias, composición y estructura de la vegetación, etc. Los segundos se identifican con factores cuya participación se restringe a un momento muy concreto en el tiempo: actuaciones antrópicas posteriores al fuego, registros termo-pluviométricos próximos al momento del fuego, etc.

La recuperación posterior viene determinada por las distintas características del fuego, las cuales han sido explicadas con anterioridad. Muchos son los efectos que tienen lugar como consecuencia de un incendio, de todos ellos, el efecto más inmediato y de mayor envergadura es el calcinamiento de la vegetación, consistente tanto en la quema directa como en la deshidratación de los tejidos vegetales debido a las elevadas temperaturas del fuego (Rodríguez, 1996).

Además, no podemos obviar la presencia de otros factores socioeconómicos que tienen una incidencia directa en la recuperación, por ejemplo, la gestión forestal llevada a cabo antes y después de un incendio, también pueden influir en el modo en que se regeneran las comunidades vegetales (Pérez y Moreno, 1998).

A lo largo del tiempo, tanto los incendios, como los efectos de los mismos han sido objeto de estudio. Las técnicas han mejorado desde la aparición de los primeros satélites. Los productos de teledetección espacial proporcionan una perspectiva muy adecuada para valorar los efectos del fuego sobre el paisaje a escala regional (Chuvieco, 1999). Uno de estos productos es el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Este neocanal presenta un alto grado de correlación con algunas propiedades bióticas, biomasa vegetal, fracción de cobertura vegetal, índice de superficie foliar (Leaf Area Index), (Elmore et al., 2000) independientemente de las especies vegetales que integren la comunidad (Gamon et al., 1995; Gilabert et al., 1997) por lo que ha sido tradicionalmente utilizado en el estudio de la cubierta vegetal.

2. OBJETIVO.

El objeto del presente estudio es realizar un análisis sobre los cambios producidos en la regeneración vegetal en el incendio de Riglos (Huesca) de 2001, comparando zonas en las que la regeneración se ha visto influida por la actuación del hombre y zonas en las que la regeneración se ha producido de forma natural, es decir, sin intervención antrópica alguna.

Es por ello que el objetivo pretendido con este trabajo es analizar las posibles diferencias que pueden surgir en la regeneración post-incendio, atendiendo a si se ha producido o no tal intervención por parte del hombre. Se busca, por tanto, analizar si las actuaciones del hombre después de un incendio tienen una incidencia positiva en la posterior regeneración, o por el contrario afectan de manera negativa a la misma.

De esta forma los objetivos principales perseguidos en la elaboración de este trabajo son: (1) Elaboración de una cartografía de las zonas de actuación humanas; (2) Comparación de la regeneración vegetal post-incendio entre las zonas de actuaciones humanas y zonas de regeneración natural.

Para conseguir los objetivos antecitados, las tareas a realizar consisten en: (1) averiguación tendiente a determinar aquellas zonas que se han visto afectadas por la intervención del hombre, para lo cual ha sido necesario acudir a diversas fuentes de información, (2) posterior digitalización de las zonas regeneradas diferenciando entre aquellas que han sido objeto de intervención antrópica y aquellas que no lo han sido; (3) cálculo de una serie de variables para, una vez obtenidas estas, poder realizar un análisis estadístico y (4) finalmente, y tras la obtención de unos resultados, elaborar la pertinente conclusión.

Para la elaboración del trabajo se ha partido de la hipótesis inicial de que la regeneración vegetal presenta diferencias en función del grado de actuación por parte del hombre. La regeneración vegetal de las áreas quemadas se encuentra influida por factores coyunturales como son las actuaciones antrópicas post-fuego, por tanto, se quiere cuantificar en qué medida estas actuaciones afectan a la regeneración vegetal comparando zonas del mismo incendio en las que el hombre no ha actuado con zonas en las que se ha producido tal actuación.

3. ÁREA DE ESTUDIO.

El estudio se centra en un incendio de la comunidad autónoma de Aragón. El incendio se produjo en el año 2001 en los municipios de Las Peñas de Riglos (Huesca), Loarre (Huesca) y Murillo de Gállego (Zaragoza).

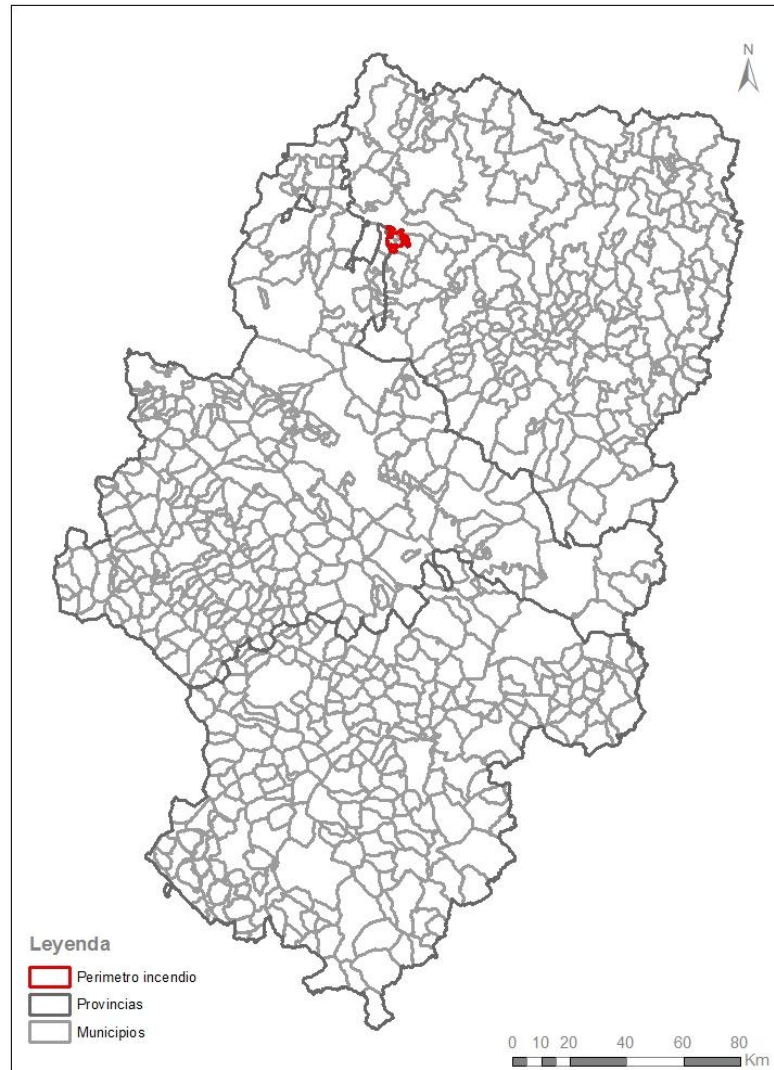


Figura 1 Mapa de localización del incendio de Riglos.

Fuente: Elaboración propia.

El día 1 de agosto de 2001 se produjo un incendio forestal que se mantuvo activo durante varios días y afectó a una superficie total de 3.278 hectáreas en los términos anteriormente referenciados.

La superficie de montes gestionados por la D.G.A. que se vieron afectados es de 2.212 hectáreas (montes del C.U.P. 165, 294, 295 y 3191) siendo las 1.066 hectáreas restantes de particulares.

Este incendio arrasa gran parte de la vegetación de estos montes, compuesta en su mayor parte por repoblaciones de pino carrasco y laricio y formaciones vegetales naturales de pino silvestre, quejigo y encina.

Los perímetros de las áreas quemadas se encuentran disponibles en formato vectorial tras su digitalización a partir de técnicas de análisis visual y digital de las imágenes del satélite Landsat:

- Composiciones de falso color 743, en las que se visualizan las dos bandas que responden de manera más acusada a los efectos del fuego: banda 7, del infrarrojo medio y sensible al contenido de humedad; y banda 4, del infrarrojo cercano y sensible al estado de vegetación. Como se aprecia en la figura mostrada a continuación esta composición de color destacada sobremanera las áreas quemadas que aparecen en colores rojo/morados indicando la ausencia de humedad y de vegetación.

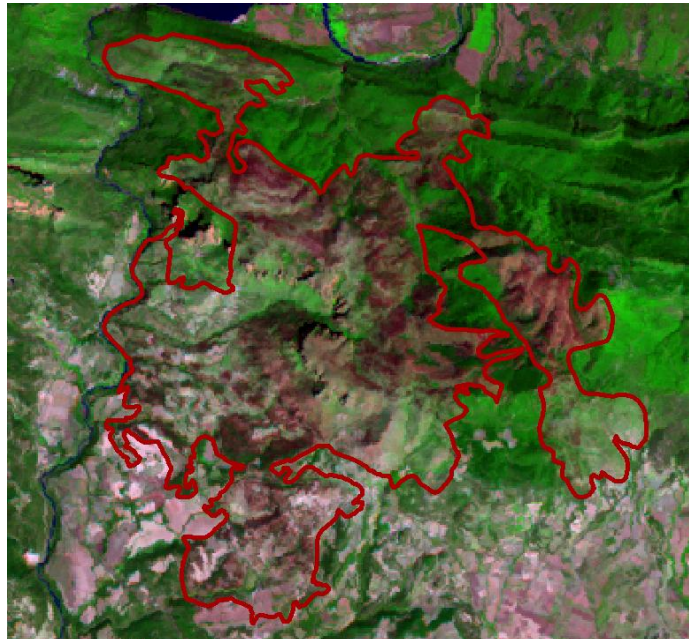
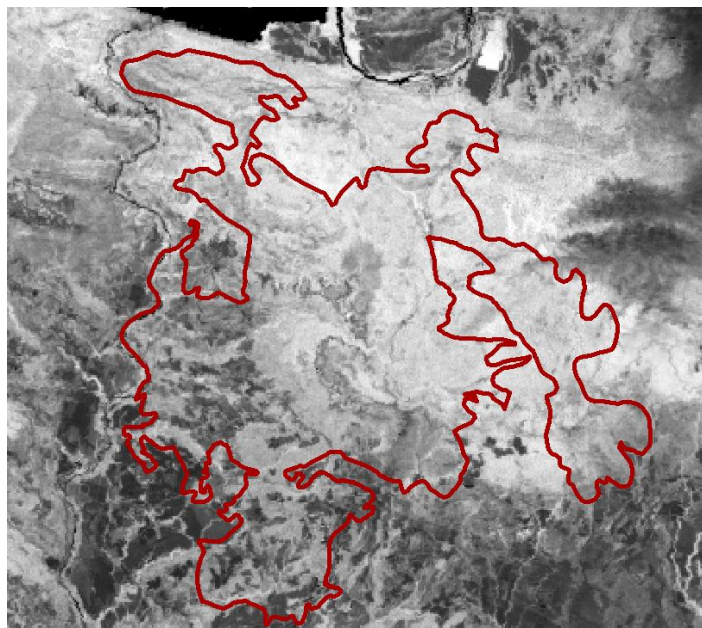


Figura 2 Composición de falso color 743 en el incendio de Riglos.

Fuente: GEOFOREST.

- Análisis multitemporal pre/post-fuego del índice de vegetación NDVI con el que, tal como se muestra en la siguiente imagen, y en combinación con la anterior técnica de análisis visual, se identifican claramente los píxeles que han experimentado cambio en el valor del índice y que, por tanto, han sufrido los efectos del fuego.



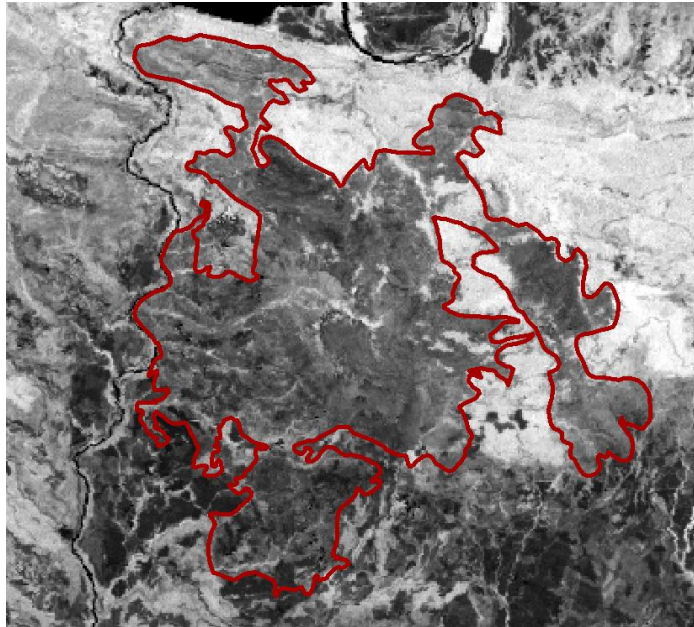


Figura 3 Análisis multitemporal pre/post-fuego del NDVI en el incendio de Riglos.

Fuente: GEOFOREST. Elaboración propia.

4. METODOLOGIA.

La metodología se articula en una serie de fases principales: (4.1) delimitación de las zonas de actuación humana; (4.2) Delimitación de zonas de control; (4.3) calculo de NDVI y dNBR; y (4.4) Generación de tabla con las variables.

El proceso metodológico se puede seguir mediante la figura 4, que será explicado a continuación.

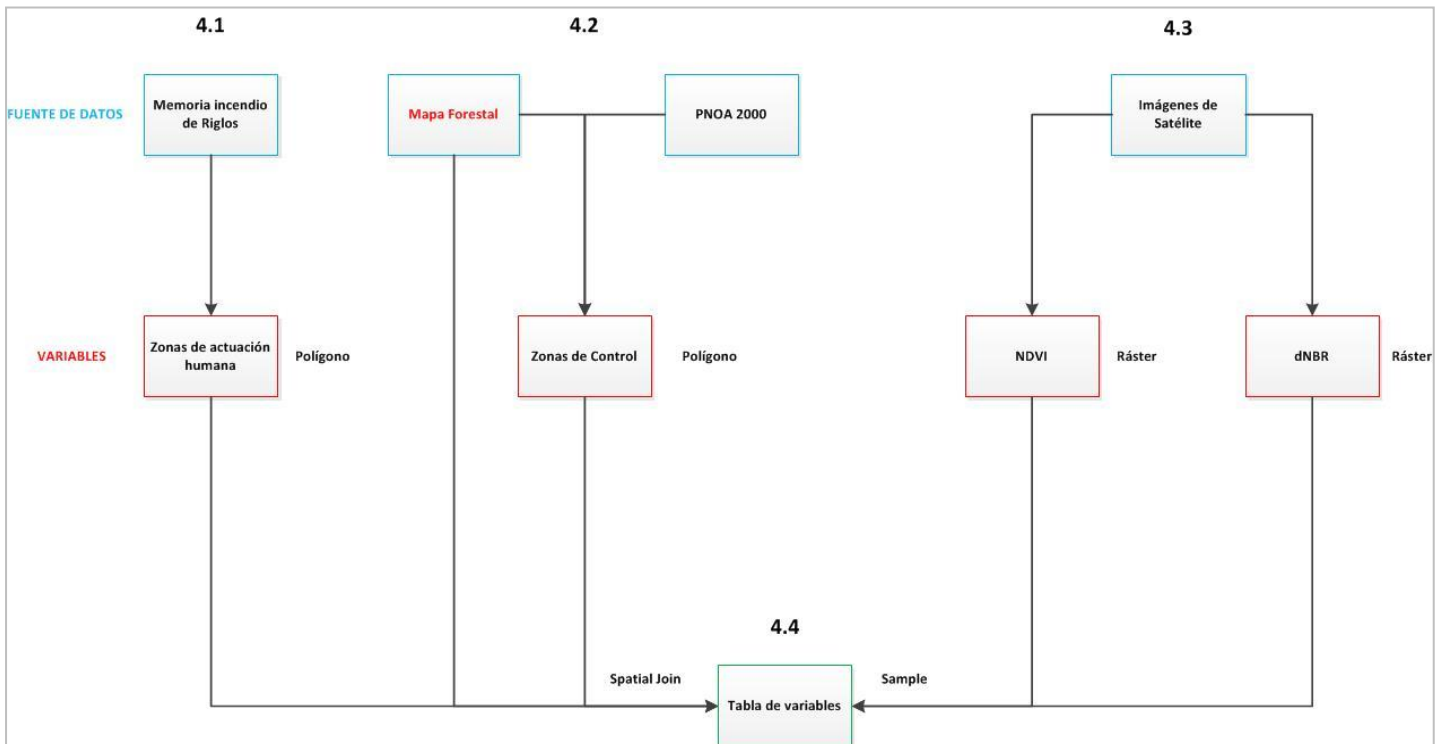


Figura 4 Esquema de metodología seguida en el presente proyecto.

4.1. Delimitación de las zonas de actuación humana.

Si se estudian los incendios ocurridos en los últimos años, se puede apreciar la carencia de información en cuanto a la actuación llevada a cabo por el hombre, así, en determinados incendios, se desconocen las zonas que fueron objeto de intervención por parte del hombre, también se desconoce cuáles son las tareas que se llevaron a cabo para la regeneración vegetal, el modo de llevarlas a cabo, los resultados obtenidos, etcétera. En los últimos años, concretamente en la Comunidad Autónoma de Aragón, esta falta de información se ha visto superada, y las actuaciones llevadas a cabo para la regeneración vegetal han sido recogidas en Memorias de Planes de Restauración, las cuales contienen las fases seguidas a cabo por los especialistas, las zonas en las que se ha actuado, una pequeña cartografía de las mismas, los resultados obtenidos, los objetivos alcanzados, etcétera.

Para delimitar las zonas de actuación en Riglos, se ha utilizado la memoria titulada *1ª fase de la restauración de la cubierta vegetal afectada por el incendio forestal de agosto de 2001, en los t. m. de Loarre, Las peñas de Riglos y Murillo de Gállego*, elaborada por Servicio provincial de medio ambiente de Huesca, en la que se encontró una pequeña cartografía de las zonas de actuación de la fase de restauración, como se ve en la figura 4. Esta cartografía ha sido georreferenciada para así poder realizar su posterior digitalización.

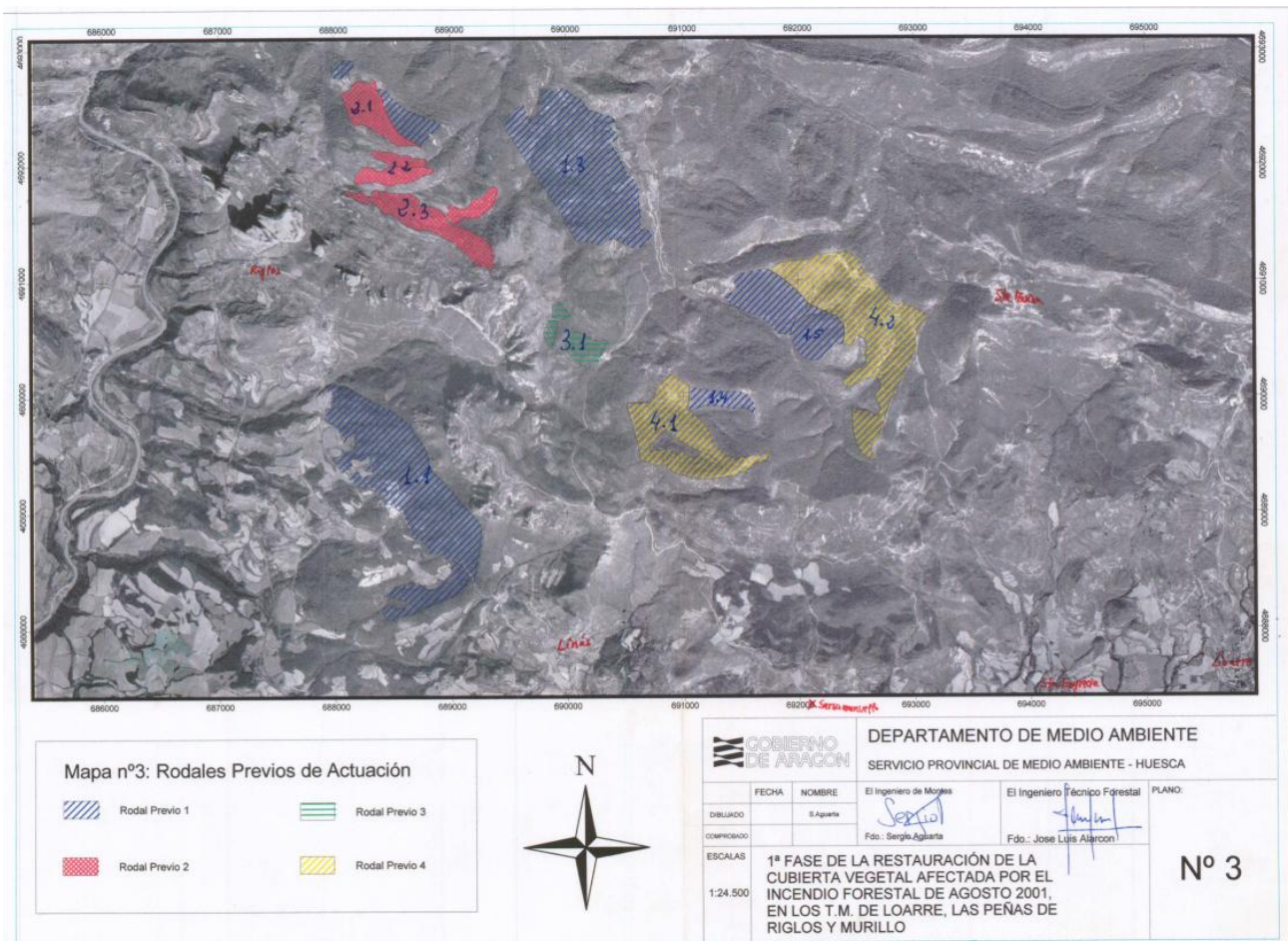


Figura 5 Cartografía de las zonas de actuación en la Fase 1 en el incendio de Riglos.

Fuente: Servicio provincial de Medio Ambiente de Huesca. Gobierno de Aragón.

Una vez digitalizadas las zonas de actuación se han clasificado atendiendo a dos variables: **Fase de actuación y Tipo de Rodal**.

La variable Fase de actuación, corresponde a que el proyecto de restauración del incendio de Riglos se realizó en dos fases: 1º Fase en el año 2005 y 2º Fase en el año 2006. Por tanto las clasificamos según **Fase 1 o Fase 2**.

La variable **Tipo de Rodal** se ha tenido en cuenta debido a que las zonas de actuación posteriores al incendio no han sido tratadas de igual modo antes del año del comienzo del proyecto: 2005. Es decir, hay zonas en las que se ha realizado todos los procesos necesarios para solo tener que replantar, y hay zonas en las que no se ha realizado nada. La clasificación de esta variable se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Definición de la variable Tipos de Rodal.

Tipos de Rodales	Definición
1	Zonas con arbolado quemado aún en pie en los que no se ha realizado ninguna actuación de eliminación de residuos. Previo a la preparación del terreno es necesario el apeo, desrame y troceado de todos los pies quemados y saca de las trozas a cargadero, así como la recogida, apilado y posterior eliminación de los residuos que quedarán.
2	Zonas donde se ha realizado el apeo, desrame y troceado de todos los pies quemados y saca de las trozas a cargadero, quedando en el monte los restos de material vegetal sin apilar. Previo a la preparación del terreno es necesaria la recogida, apilado de estos residuos y su posterior eliminación.
3	Zonas donde se ha realizado el apeo, desrame y troceado de todos los pies quemados y saca de las trozas a cargadero, quedando en el monte los restos de material vegetal apilado en cordones. Previo a la preparación del terreno es necesaria su eliminación.
4	Zonas donde se ha realizado la limpieza completa de los restos quemados en el incendio. No son necesarios trabajos previos a la preparación del terreno para plantación.

Como se ve en la tabla 1, los rodales del tipo 2 y 3 apenas presentan diferencias, la única de ellas es que los restos de material vegetal en el rodal 3 están apilados y en el rodal 2 no. Por tanto se van a unir quedando como tipo de rodal 23. Una vez explicadas las distintas fases de actuación tomadas de la memoria de restauración del incendio de Riglos. Como no se apreciaban diferencias significativas en los resultados por tipos de rodal, se decidió por no distinguir entre tipos de rodal y por unir todas las zonas como si se tratara de una sola variable, obteniendo así la variable “**zonas de actuación humana**”.

4.2. Delimitación de las zonas de control.

Para poder alcanzar el objetivo del trabajo, que consiste en comparar la regeneración vegetal post-incendio entre áreas con actuaciones humanas y áreas de regeneración vegetal que carecen de tal actuación, hay que digitalizar otro tipo áreas que se llamarán **áreas de control**. Estas áreas se caracterizan por ser aquéllas en las que el hombre no ha actuado.

Para poder digitalizar estas áreas se han intentado buscar zonas próximas a las áreas anteriormente digitalizadas, esto es, a las áreas de actuación, con el objetivo de encontrar zonas que presenten comportamiento similar tanto en lo que se refiere a la incidencia del incendio como a su posterior regeneración, y también se han clasificado con respecto a las dos variables anteriores: **tipo de rodal y fase de actuación**.

Para ello se han utilizado herramientas como la fotografía aérea del vuelo del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del año 2000, la cual se ha utilizado para ver una posible similitud entre las dos zonas, la zona de actuación humana y la zona de control, con el objetivo de verificar que ambas pertenecen a la misma comunidad vegetal. A su vez se ha utilizado el mapa forestal de la zona para ir asegurando la comprobación que acabamos de explicar. En la figura 6, se muestra un ejemplo de cómo se ha ido realizando este proceso, en el que las zonas de control, de color azul, se han digitalizado al lado de las zonas de actuación, de color naranja, siempre dentro de los límites del polígono del incendio y la misma comunidad vegetal, en este caso *Pinus halepensis*.

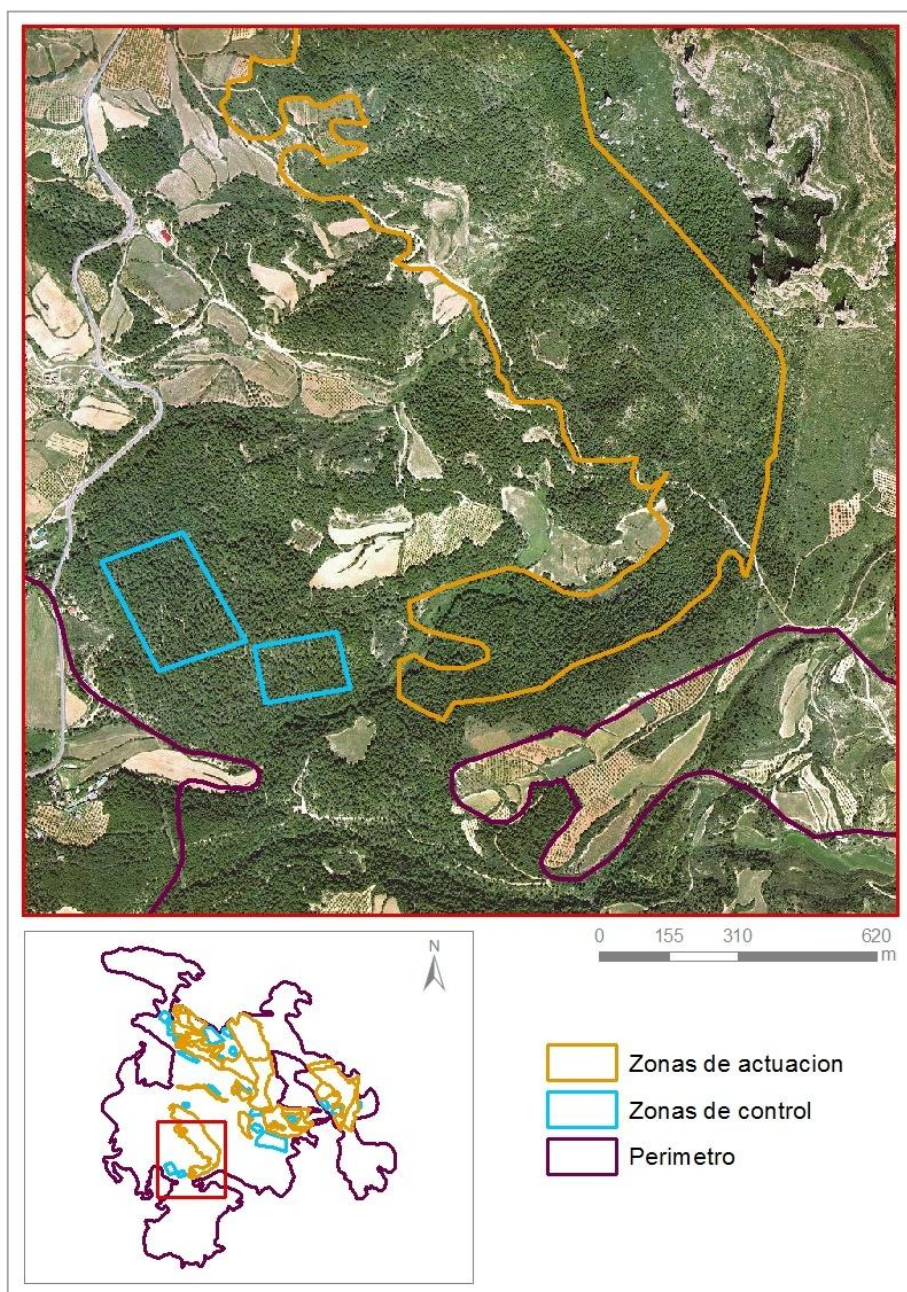


Figura 6 Ejemplo de delimitación de las zonas de control.

Elaboración propia.

4.3. Cálculo de NDVI y dNBR.

Para la obtención de estas variables se ha utilizado una serie temporal de imágenes de satélite, concretamente del satélite Landsat 5 TM, que han sido facilitadas por grupo de investigación GEOFOREST (Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón –IUCA-) en el marco del Convenio de colaboración entre el Gobierno de Aragón y la Obra Social “La Caixa” para el desarrollo del programa de investigación y conservación de los espacios naturales gestionados por el Gobierno de Aragón.

Como se puede apreciar en la tabla 2, se ha seleccionado una imagen previa al fuego, obtenida concretamente, una semana antes del mismo, una imagen que recoge la zona quemada un año después y las demás imágenes corresponden a años sucesivos, coincidiendo a su vez con el principio del proyecto de restauración iniciado en el año 2005 y con el final del mismo en el año 2007. Todas las imágenes han sido tomadas en verano, ya que en esta estación se minimizan las sombras topográficas, típicas de otoño e invierno, y también disminuyen los problemas relativos a los rasgos geométricos de la iluminación y la variabilidad fenológica de las imágenes de primavera y otoño (Melia et al., 1997).

Para llevar a cabo el estudio, todas estas imágenes han sido recortadas para la zona de estudio, corrigiéndose además tanto la dispersión atmosférica como la dispersión geométrica. Para la realización de los pretratamientos a los que acabamos de hacer referencia y para la extracción de las variables de cada imagen se ha utilizado ERDAS 10 como software.

Tabla 2 Fechas de las imágenes Landsat 5 TM utilizadas para el cálculo de variables.

26/07/2001
30/08/2002
25/08/2003
27/08/2004
14/08/2005
01/08/2006
04/08/2007

El **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index) es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Se calcula mediante el cociente normalizado entre bandas y permite discriminar dos cubiertas con diferente comportamiento como suelo y vegetación (Chuvieco, E. 2000). Para diferenciar masas vegetales a partir de estos índices, se utiliza la característica de la signatura espectral de la vegetación sana al mostrar un claro contraste entre las banda visible del rojo (0.6 a 0.7 μm) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 μm)

Este índice de vegetación NDVI se obtiene a partir de las bandas 4 y 3 del sensor Landsat TM mediante la siguiente expresión:

$$\text{NDVI}_i = \frac{\rho_{i,\text{IRC}} - \rho_{i,\text{R}}}{\rho_{i,\text{IRC}} + \rho_{i,\text{R}}}$$

Donde: $\rho_{i,\text{IRC}}$ corresponde al valor de reflectividad del píxel de la banda 4 TM y $\rho_{i,\text{R}}$ el valor de reflectividad del píxel de la banda 3 TM

En la figura 4 se muestra el modelo aplicado en ERDAS para el cálculo automático del NDVI en la serie temporal de imágenes de satélite.

Normalized Difference Vegetation Index

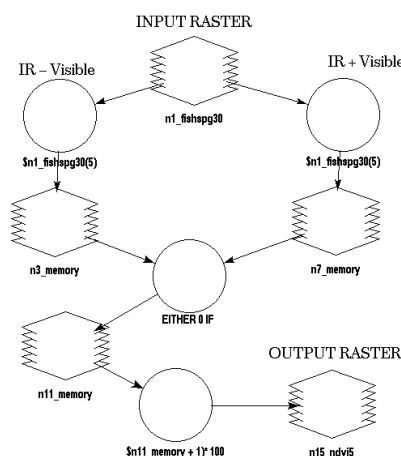


Figura 7 Modelo del cálculo de NDVI.

Fuente: ERDAS.

Por tanto se calcula el valor NDVI de cada una de las imágenes de satélite, obteniendo una serie de valores NDVI 2001-2007.

El **NBR** (Normalized Burn Ratio) discrimina áreas quemadas tanto en imágenes Landsat y/o MODIS (Chuvienco et al. 2008a). Este análisis se basa en el contraste entre el infrarrojo cercano ($\rho_{i,IRC}$, 0.78–0.90 μm) que es sensible al contenido de agua en el suelo y la vegetación y el infrarrojo de onda corta ($\rho_{i,SWIR}$, 2.09–2.35 μm), que es sensible a la detección de vegetación muerta o no fotosintética.

Este índice se obtiene a partir de las bandas 4 y 7 del sensor Landsat TM mediante la siguiente expresión:

$$NBR_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,SWIR}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,SWIR}}$$

Donde: $\rho_{i,IRC}$ corresponde al valor de reflectividad del píxel de la banda 4 TM y $\rho_{i,SWIR}$ el valor de reflectividad del píxel de la banda 7 TM.

Este índice se calcula para una imagen previa al incendio y para una imagen inmediatamente posterior al fuego.

Una vez calculados se procede a calcular el **dNBR**, que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$dNBR = NBR_{\text{prefire}} - NBR_{\text{postfire}}$$

El resultado de esta diferencia se interpreta de forma ordinal de manera aproximada mediante la tabla 3.

Tabla 3 Niveles de severidad en escala 10^3 .

dNBR	Nivel de Severidad
-500 - +100	Enhanced Regrowth - Unburned
+101 - +269	Low-severity burn
+270 - +439	Moderate-low Severity
+440 - +659	Moderate-high Severity
+660 - +1300	High-severity burn

En la figura 5 se muestra el modelo aplicado en ERDAS para el cálculo automático del NBR en las imágenes de satélite previa y posterior al incendio.

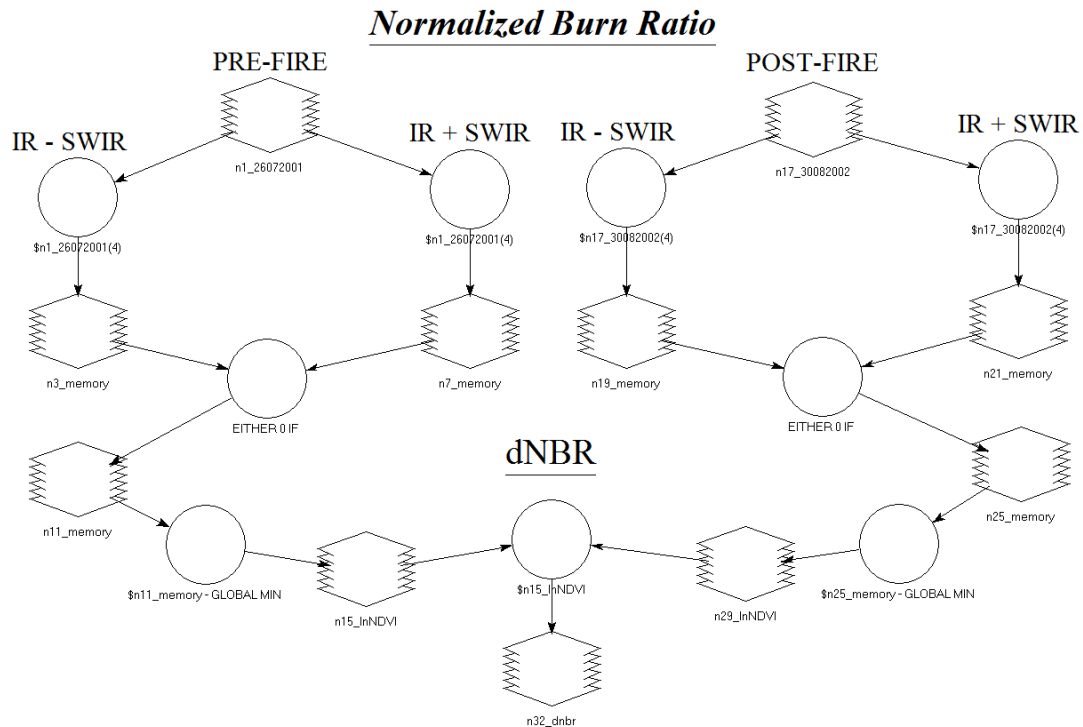


Figura 8 Modelo del cálculo de NBR y dNBR.

Fuente: Elaboración propia.

En nuestro caso se utilizará la imagen del 26 de Julio de 2001 como imagen previa al fuego y la imagen del 30 de agosto de 2002 para la imagen post-fuego. El resultado será una sola imagen con los valores de dNBR. Una vez calculados estos valores, hay que reclasificarlos de manera ordinal, para una mejor interpretación, mediante los valores de la tabla 3.

4.4. Generación de una tabla a partir de las variables obtenidas en los apartados anteriores.

Para poder realizar la comparación entre los dos tipos de zonas explicados anteriormente, se ha de elaborar una tabla que contenga todas las variables explicadas con anterioridad, como son el índice de vegetación **NVDI**, el índice de severidad **dNBR**, **Fase y Tipo de Rodal** y por último la **vegetación** dominante en cada una de las zonas.

Una vez definidas y calculadas las variables, para poder trabajar con ellas se va a crear una tabla que reúna a todas. Para poder trabajar con el mayor numero de datos posibles se va a crear una red de puntos utilizando la malla raster de cualquiera de las imágenes de satélite. Para ello se utilizara la función *Raster to Point* situada dentro de las herramientas de conversión en Arcgis.

Una vez obtenida la malla de puntos se realiza un Clip tanto con las zonas de actuación como las zonas de control, como se aprecia en la figura 8. Una vez delimitados, para cada uno de ellos hay que extraer la información de cada una de las variables.

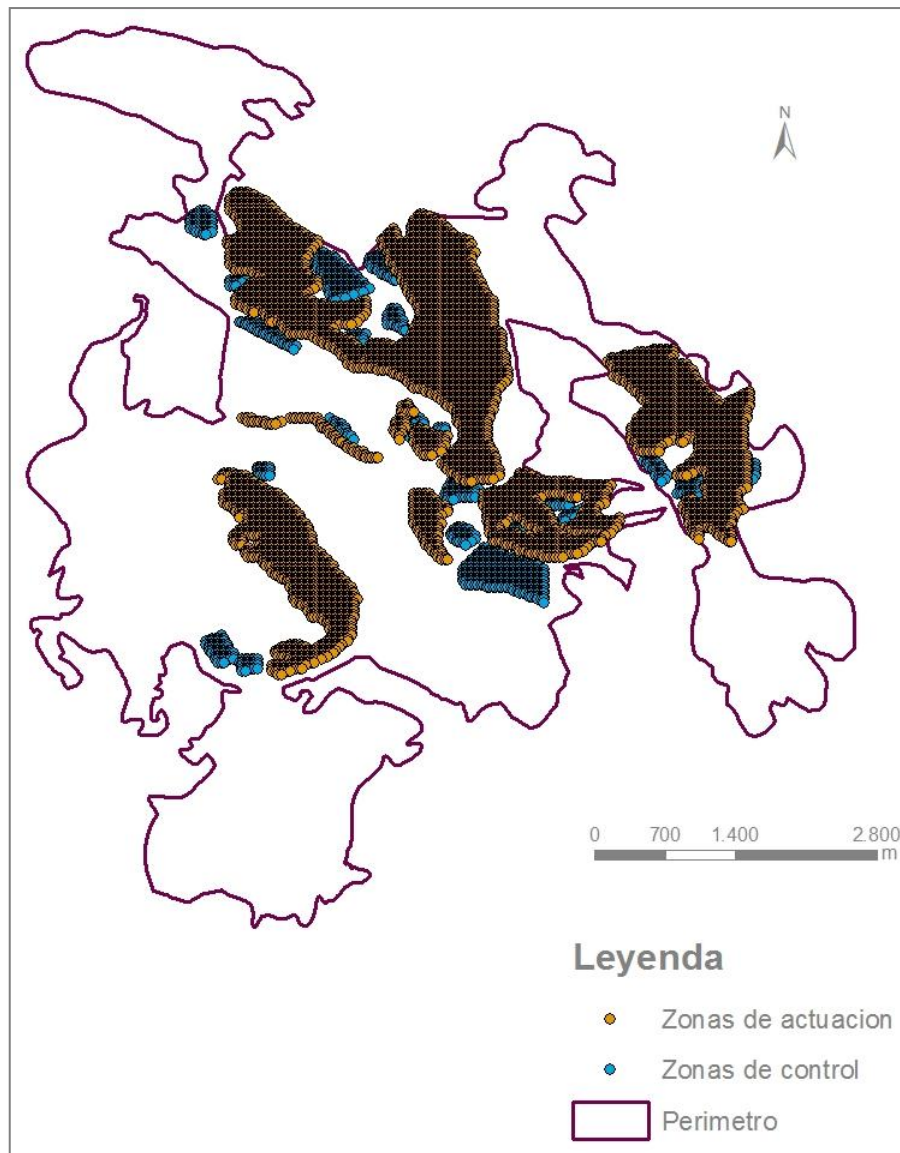


Figura 9 Mapa de puntos de las zonas de actuación y las zonas de control.

Elaboración propia.

Con la función *Sample* dentro del modulo de herramientas de análisis espacial, se obtendrá una tabla en la cual cada punto de manera automática recibe sus coordenadas correspondientes y además se añadirá la información de todos los raster que se quiera, en nuestro caso toda la serie de imágenes de NDVI mas la correspondiente con los valores de dNBR.

Para lograr que cada punto extraiga la información correspondiente a los distintos polígonos, tanto de las zonas de actuación como de las zonas de control así como de la vegetación, se utiliza la función *Spatial Join* que se encuentra dentro del modulo de herramientas de análisis. A diferencia de la función *Sample*, anteriormente utilizada, el resultado que se obtiene del empleo de esta función, es otra capa de puntos, los cuales ya reúnen la información y por tanto, hay que exportar la tabla de atributos. Este proceso se tiene que repetir para cada una de las variables, ya que no se puede realizar de una sola vez.

Una vez unidas todas las tablas en una sola, lo que se hace en primer lugar es diferenciar entre lo que son zonas de actuación y lo que son las zonas de control, mediante la codificación de la tabla 4.

Tabla 4 Tipo de punto.

Código	Tipo de Zona
1	Zonas de actuación humana
2	Zonas de control.

En cuanto a la vegetación, para un mejor análisis de las variables, se va a realizar una agrupación de comunidades vegetales semejantes para así tener la información más concentrada. Las comunidades vegetales objeto de análisis son las que aparecen en la tabla 5.

Tabla 5 Comunidades vegetales.

Comunidad vegetal
Garriga densa
Pinus halepensis
Pinus sylvestris
Quejigal
Quercus ilex rotundifolia
Quercus ilex y Pinus sylvestris

Después de tener todas las variables en una sola tabla, se puede apreciar en la figura 9, como las zonas de actuación humana contienen muchos más puntos que las zonas de control. En concreto tenemos casi 7000 puntos con información, en las zonas de actuación y alrededor de 1000 puntos en las zonas de control. Para poder realizar un análisis correcto se ha decidido realizar tomar el 50% de la muestra de zonas de actuación, elegidos aleatoriamente, frente al 100% de la muestra de las zonas de actuación.

4.5. Comparación de zonas de actuación con zonas de control mediante análisis estadístico.

Una vez generada la tabla con todas las variables calculadas anteriormente, se va a proceder a su comparación mediante análisis estadísticos. Partiendo de la hipótesis de que las actuaciones humanas condicionan la regeneración vegetal, se usaran análisis estadísticos descriptivos para así poder comparar las zonas de actuación humana con las zonas de control.

Los análisis descriptivos permiten recopilar, presentar y caracterizar un conjunto de datos con el objeto de describir en forma apropiada las diversas características de dicho conjunto.

Para ello se han elaborado una serie de gráficos, concretamente de líneas verticales, puesto que permiten combinar una determinada cantidad de variables en un solo gráfico. En nuestro caso se ha seleccionado los valores de NDVI, agrupados por el índice de severidad y por tipo de punto. En un segundo tipo de gráficos se han tomado las mismas variables anteriores pero se ha segmentado por el tipo de vegetación.

Por último se realizara un análisis ANOVA para comprobar que desde un punto de vista estadístico, las muestras son diferentes. El procedimiento ANOVA de un factor genera un análisis de varianza de un factor para una variable dependiente cuantitativa respecto a una única variable de factor (la variable independiente). El análisis de varianza se utiliza para contrastar la hipótesis de que varias medias son iguales. Esta técnica es una extensión de la prueba t para dos muestras.

5. RESULTADOS.

En los resultados del presente trabajo se van a mostrar y a comentar todos los gráficos que han sido elaborados para alcanzar el objetivo principal de este trabajo, que es obtener una conclusión a través de la comparación entre las zonas de actuación humana y las zonas de control Asimismo, en este apartado también se mostrarán una serie de mapas que indican cuales son las zonas de actuación del incendio puesto que es el segundo objetivo del proyecto.

En primer lugar en la figura 10, se muestra la comparación entre todos los valores de NDVI pre-incendio, ya que gran parte de la regeneración post-incendio, depende en un alto porcentaje de los valores previos. Si se comparan los datos medios, se ve como estos son prácticamente iguales. Lo que se quiere recalcar con este grafico es que los datos de tipo de punto 2, recordemos la tabla 5, presentan una mayor variabilidad, es decir, un mayor rango de valores, para el 95% de los casos. Esto es debido a que la muestra contiene alrededor de 1000 puntos.

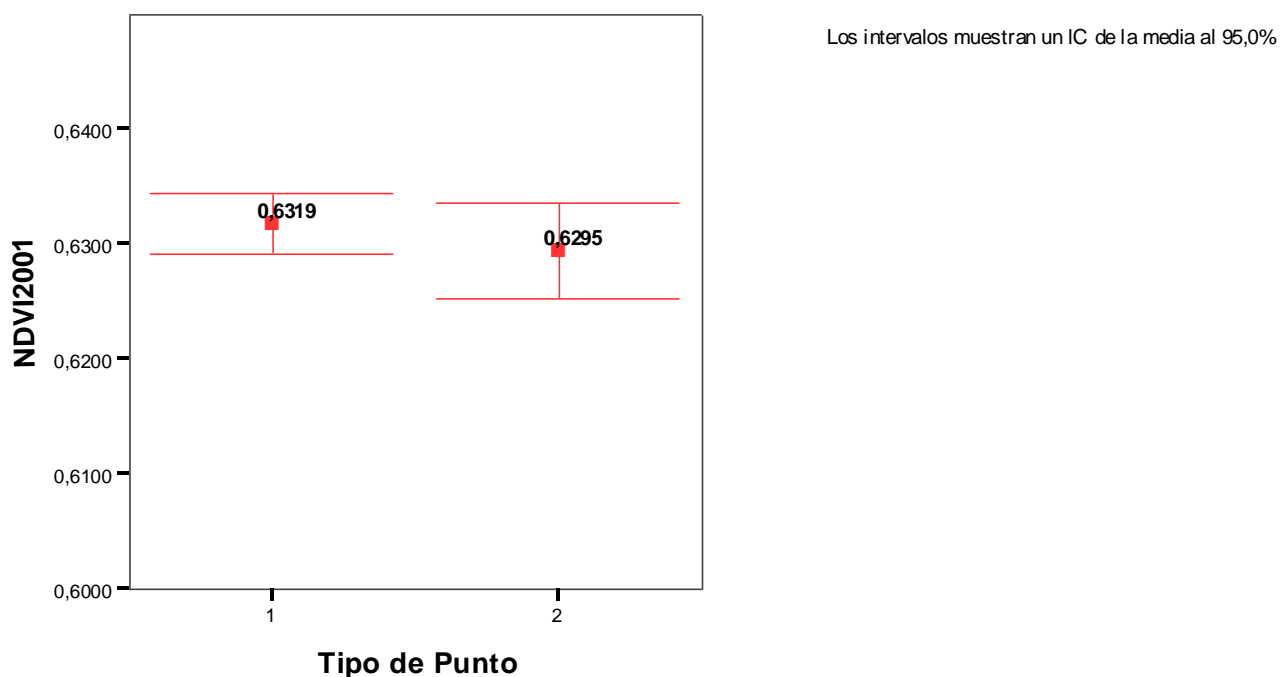


Figura 10 Gráfico de barras de error para cada tipo de punto con valores de NDVI previos (2001).

A continuación se muestran una serie de gráficos en los cuales se sitúan los valores de NDVI en la vertical, agrupada por los niveles de severidad en la horizontal, y a su vez subdividido por cada tipo de punto. Las fechas seleccionadas son NDVI previo al incendio (2001), NDVI un año después del incendio (2002), NDVI un año antes de la fase de restauración (2004), NDVI un año después del comienzo de la fase de restauración (2006) y NDVI final de la fase de restauración (2007).

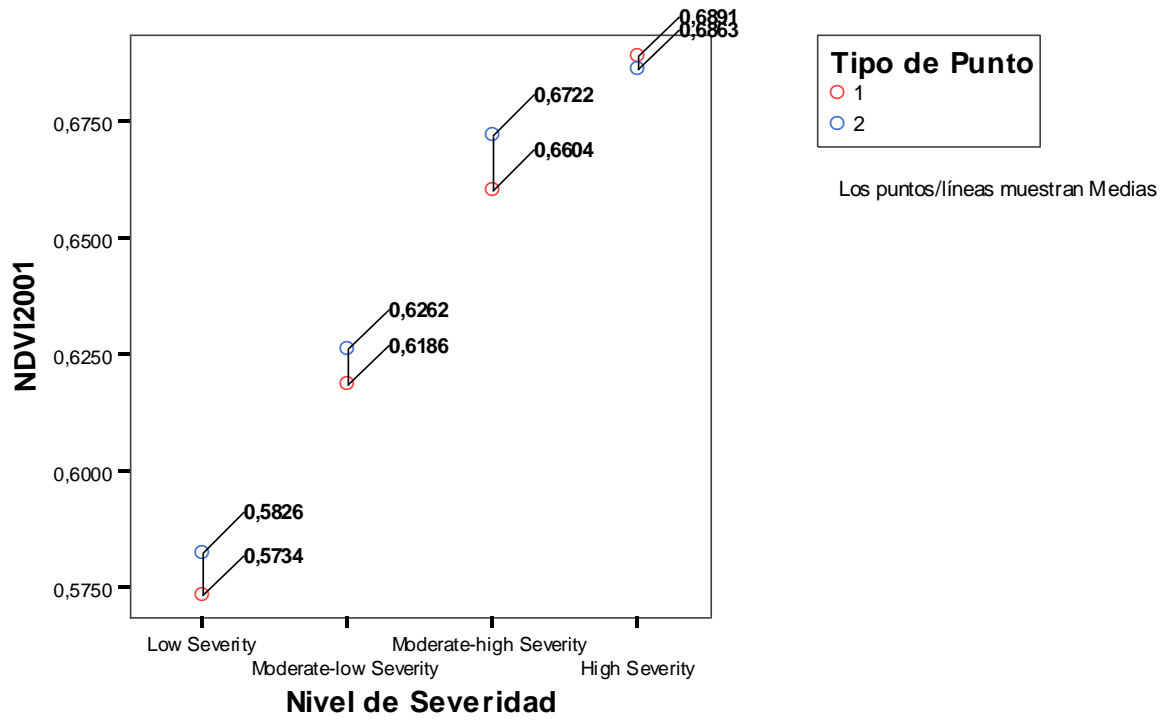


Figura 11 NDVI Pre-Incendio (2001).

En la figura 11, un año antes del fuego se puede apreciar como las severidades más altas, son las que tenían un mayor valor de NDVI previo, lo cual es lógico. También se aprecia cómo, si se comparan las severidades entre los valores de NDVI de las distintas zonas apenas hay una diferencia de 1 decima, salvo en la severidad muy alta, en la cual son prácticamente parejos los valores.

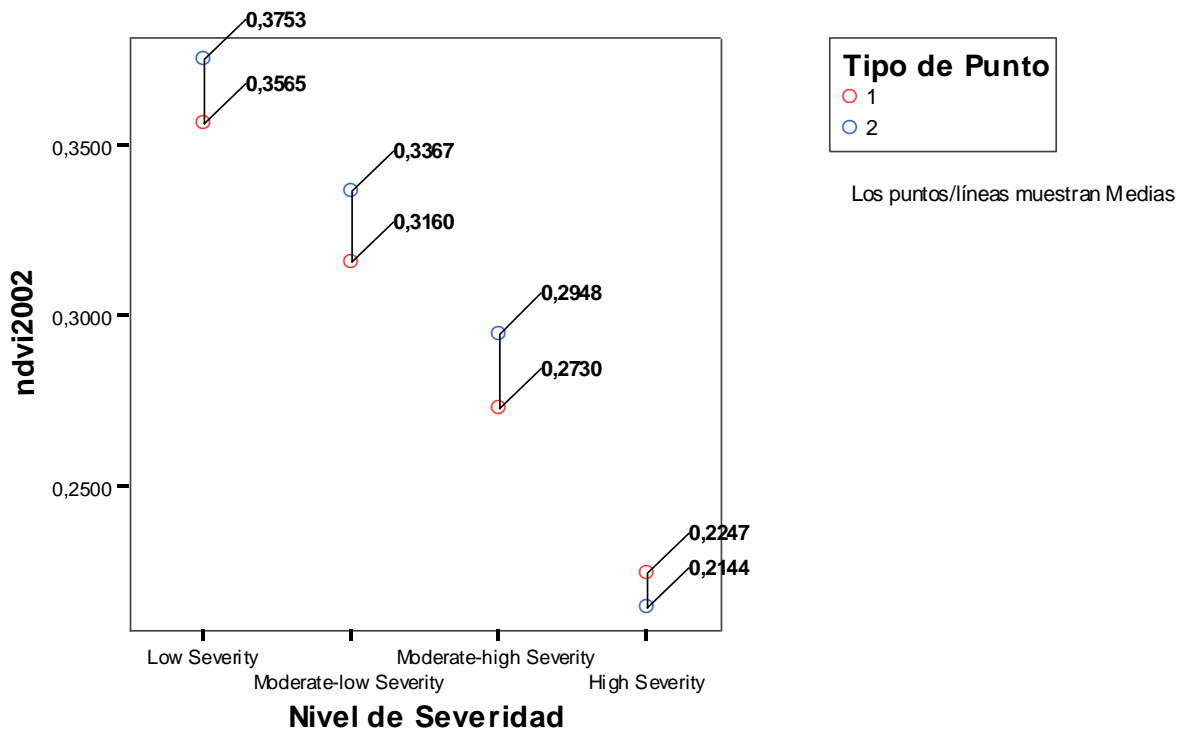


Figura 12 NDVI Post-Incendio (2002).

En la figura 12, se puede apreciar cómo un año después del fuego las severidades más altas son las que presentan unos valores más bajos de NDVI. Las diferencias de valores medios entre los dos tipos de control siguen parejas, esto es debido a la diferencia que había en el NDVI previo y ello se debe a que tenemos más número de puntos en las zonas de actuación que en zonas de control.

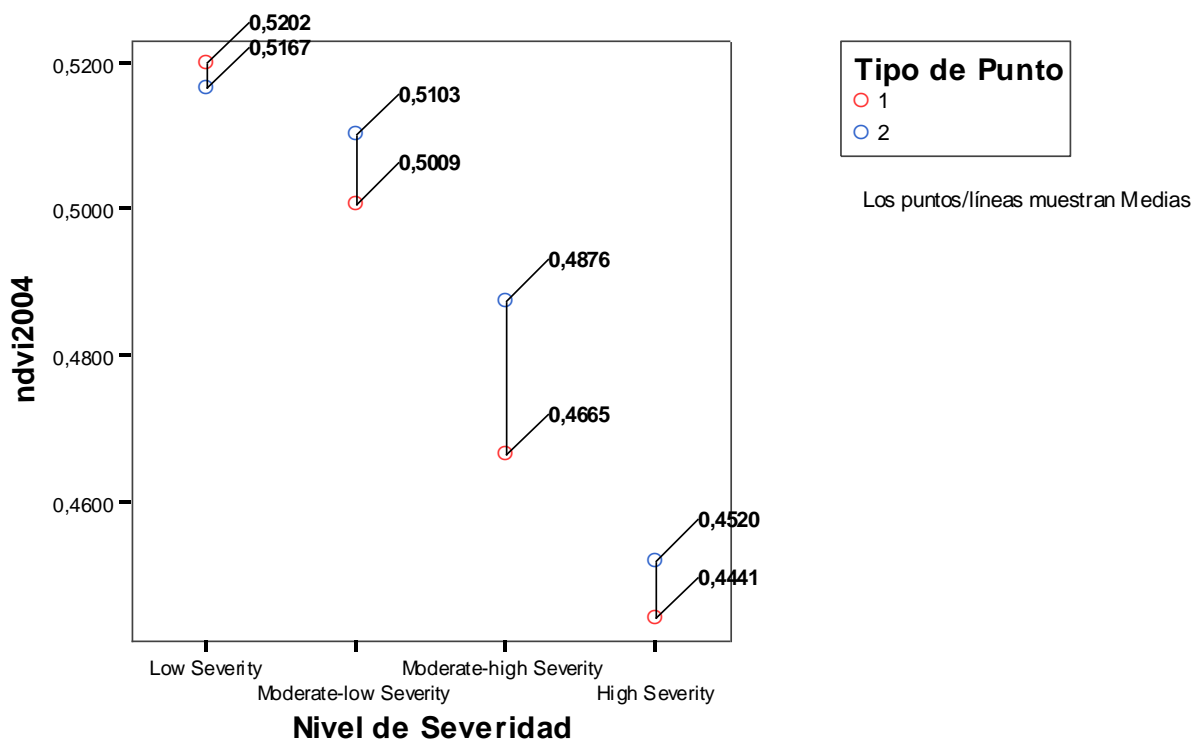


Figura 13 NDVI antes del comienzo de la fase de restauración (2004).

En la figura 13, se aprecia, tres años después del incendio y un año antes del comienzo de la 1ª fase de restauración un aumento considerable del NDVI si se compara con los resultados obtenidos en el año 2002, de tal manera que se observa que se produce un incremento de más del doble su valor medio y se ve como en alta severidad, la media de los valores de NDVI de las zonas de control es mayor que en las zonas de actuación, cosa que no sucedía un año después del incendio. En bajas severidades los valores medios prácticamente son los mismos. Supuestamente en esta fecha se tendrían que ver diferencias, ya que según la memoria de la fase de restauración hay zonas de actuación en las que se realizaron labores antes de 2005 pero desconocemos el momento exacto en que dichas actuaciones se llevaron a cabo

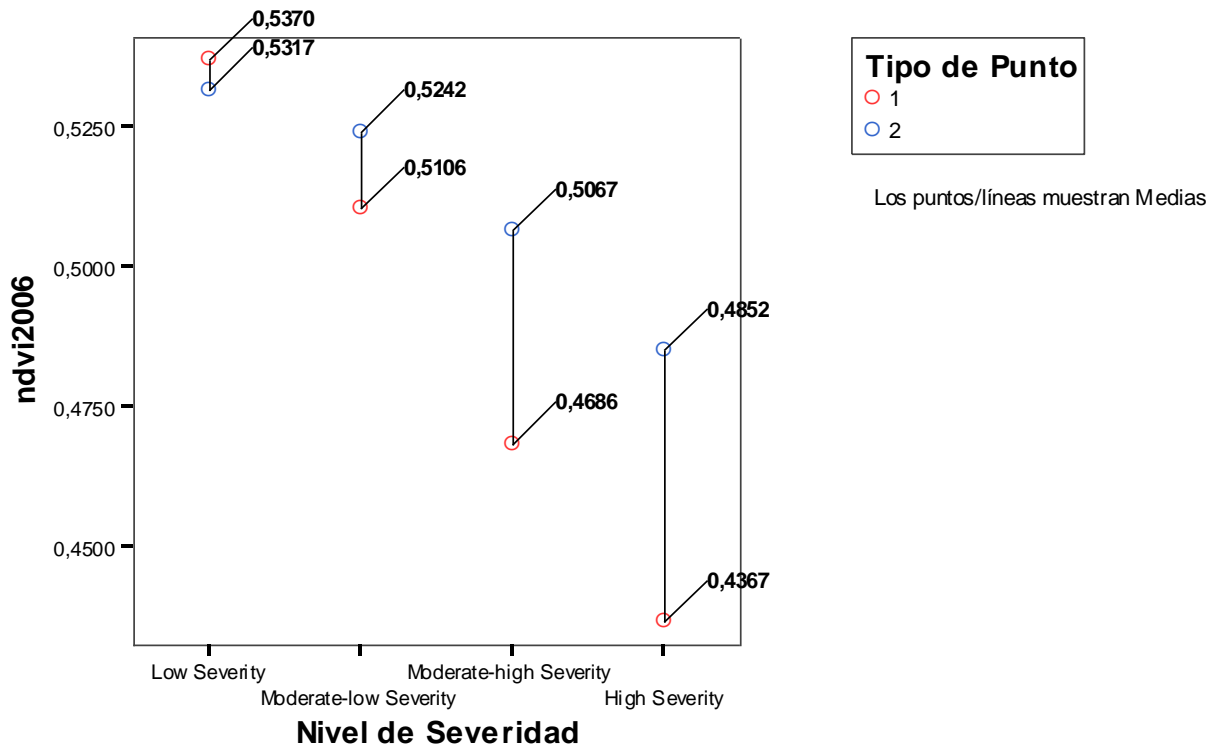


Figura 14 NDVI un año después del comienzo de la fase de restauración (2006).

En la figura 14, un año después de la primera fase de restauración, se aprecian ya diferencias muy significativas. Para la alta severidad, en solo un año, incrementado la diferencia en 5 decimas. Para la severidad moderada alta, se ha duplicado el valor. En las otras categorías se ha mantenido constante la diferencia.

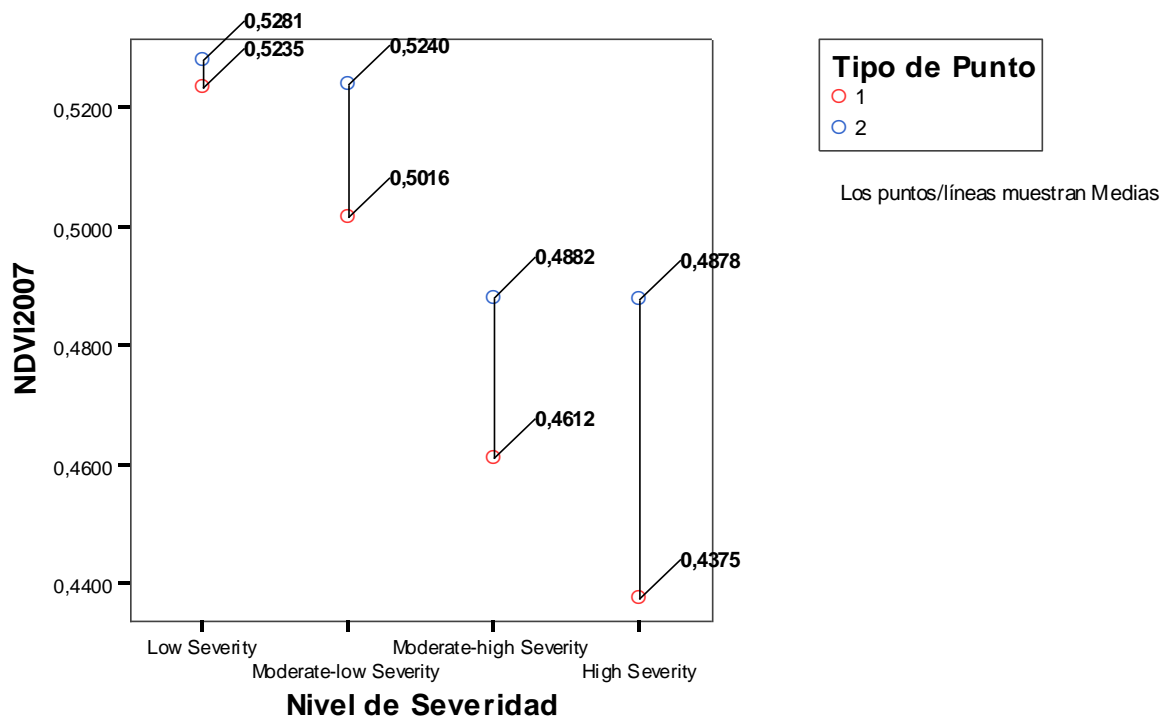


Figura 15 NDVI final de la fase de restauración (2007).

La figura 15 recoge los datos del año 2007, siendo éste, el último año en el cual tenemos imagen de satélite. Además coincide con la 2 fase del proyecto de restauración, que es además la fase final. Se puede observar como en lo que a las severidades más altas se refiere, los valores se han mantenido en torno a unas 5 decimas de diferencia. En cambio llama la atención como en la severidad moderada alta, la diferencia en un año se ha reducido a la mitad.

Atendiendo al tipo de vegetación, si se analiza previamente la tabla con todas las muestras de puntos, la especie de *Pinus sylvestris* constituye prácticamente las dos terceras partes de la vegetación, con casi 3000 puntos, por lo que centraremos el análisis en esta especie. En las otras especies, lo que sucede es que la variabilidad es amplia en muchos casos debido a la poca información de puntos que tenemos. Por ejemplo el caso de los quejigales se están comparando 23 puntos de zonas de control frente a casi 100 puntos situados en zonas de actuación humana. También sucede que al intentar clasificar por niveles de severidad por especies, apenas se tiene información relativa a todas las categorías, sobre todo en lo referente a la categoría de severidad muy alta, y puédelo que implica que no se pueda comparar esa categoría en ese tipo de vegetación. Si se analiza la figura 16, ya existen diferencias significativas entre valores de NDVI de las dos zonas, como se puede apreciar en el caso del quejigal, por lo tanto la existencia previa de diferencias con anterioridad al incendio, condiciona la regeneración vegetal.

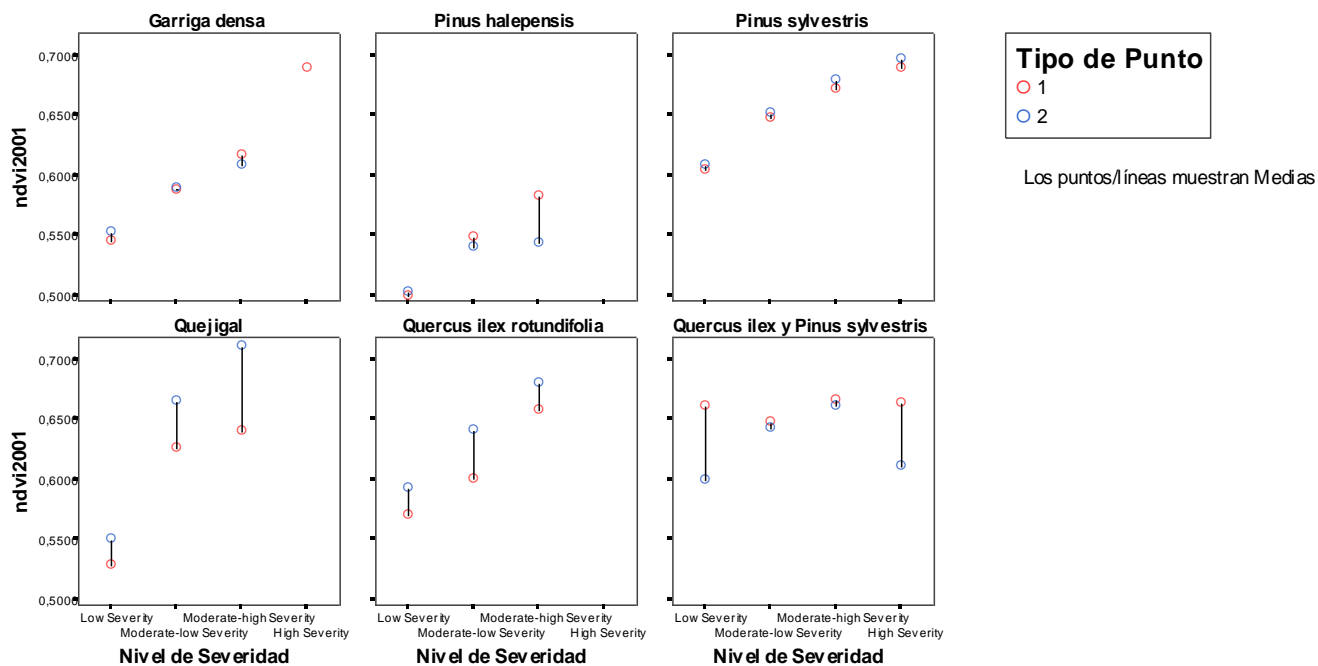


Figura 16 NDVI Pre-Incendio (2001) por comunidades vegetales.

En la figura 16, concretamente si observamos la imagen previa al incendio, claramente se puede apreciar como en la especie de *Pinus sylvestris*, los valores medios de NDVI son más altos cuanto mayor ha sido la severidad, y a su vez, para cada categoría, los valores medios son prácticamente parejos, al igual que sucede en la comunidad vegetal de la garriga densa, salvo para valores de severidad muy alta. En las demás especies vegetales, la diferencia en algunas de las categorías es muy notable, como se puede ver en la encina o en el quejigo.

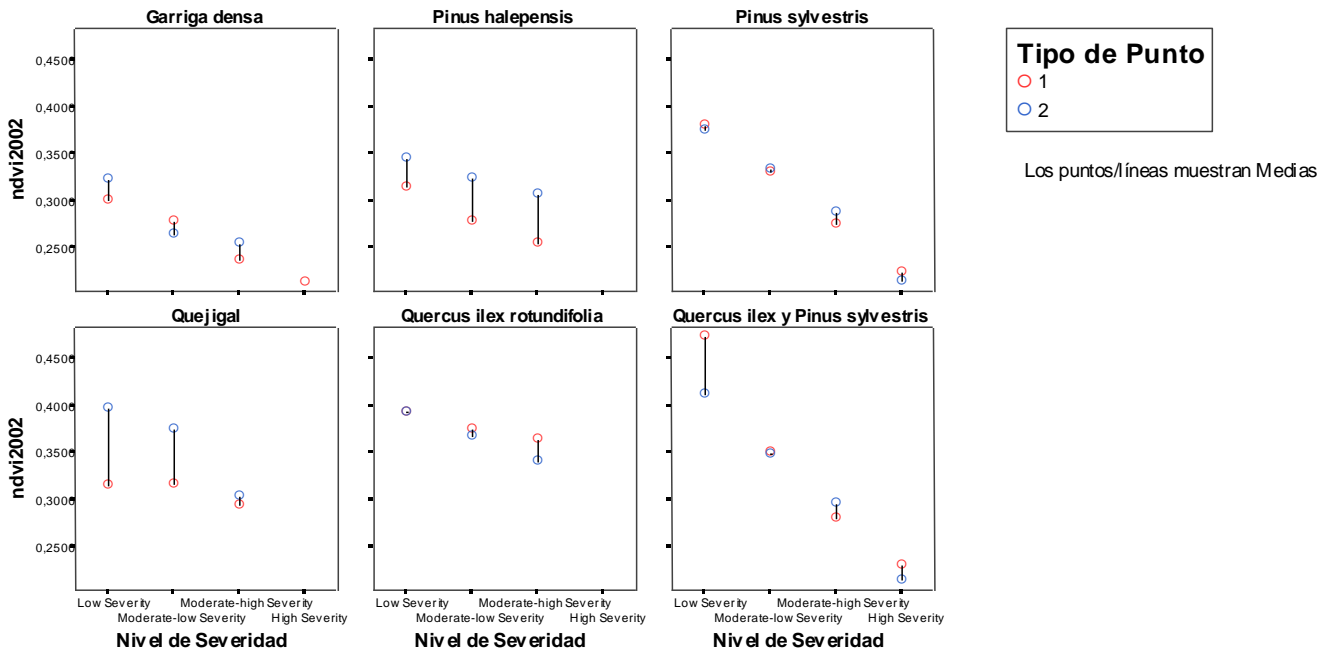


Figura 17 NDVI Post-Incendio (2002) por comunidades vegetales.

En la figura 17, un año después del incendio, se puede observar la relación inversa entre los valores NDVI del pino silvestre y la severidad, ya que puede verse claramente que descende la tendencia de valores NDVI en dicha especie, conforme aumenta la severidad. Por su parte, los valores medios entre las dos zonas siguen siendo prácticamente parejos.

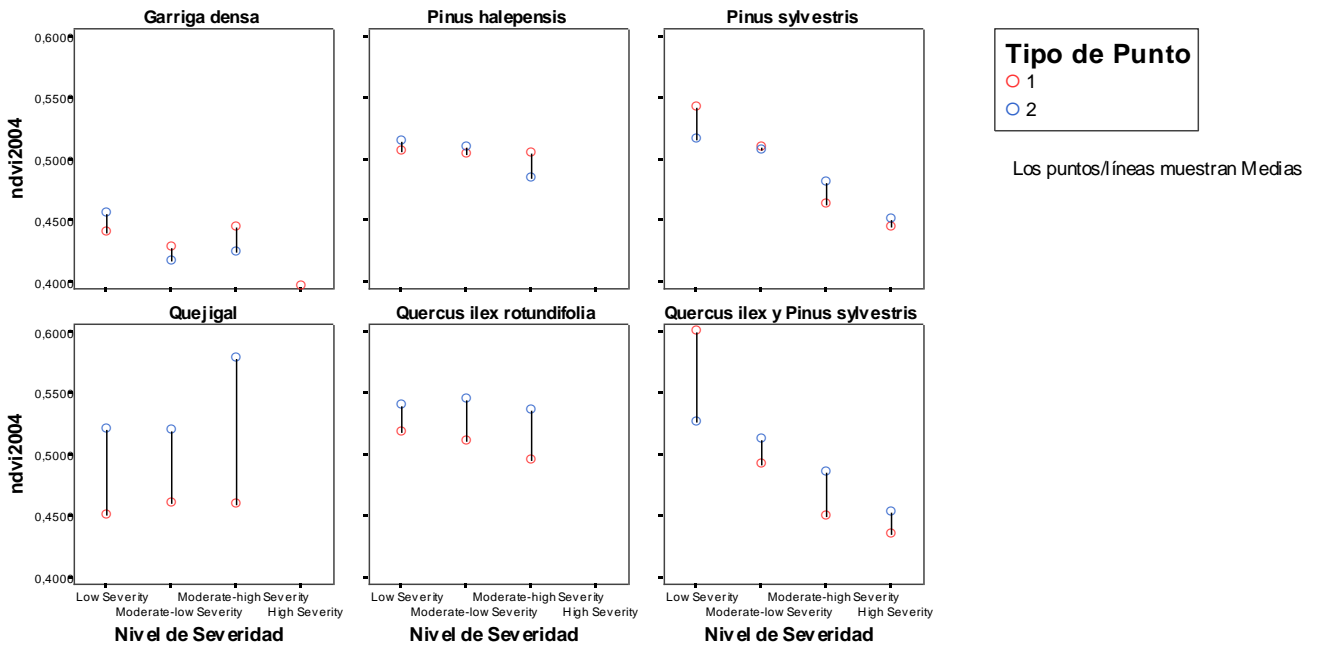


Figura 18 NDVI antes del comienzo de la fase de restauración (2004) por comunidades vegetales.

En la figura 18, tres años después del incendio empieza a aparecer alguna pequeña diferencia entre los dos tipos de zonas. Para severidades altas se observa una mejor regeneración en las zonas de control que en las zonas de actuación, lo que permite deducir (y que es conocido), es que en ese año ya se empezaron a realizar actuaciones.

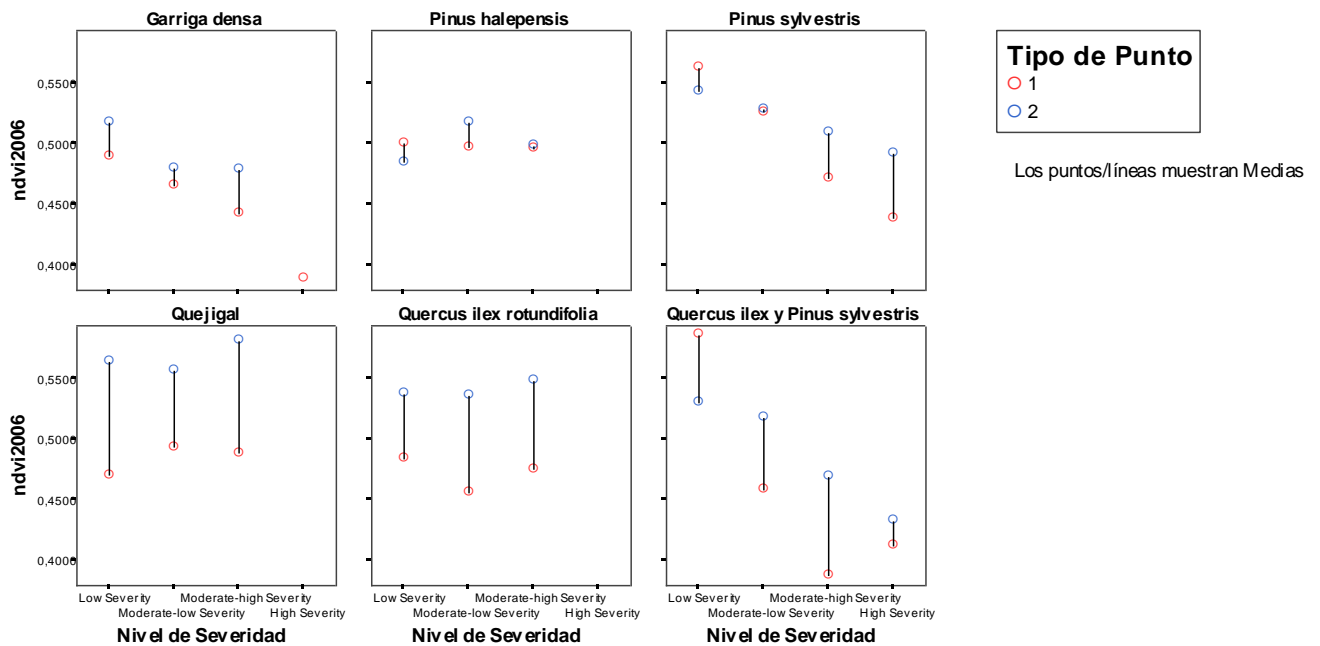


Figura 19 NDVI un año después del comienzo de la fase de restauración (2006) por comunidades vegetales.

Un año después de la fase de restauración se puede ver ya la diferencia entre los valores medios para severidades altas. Dichas diferencias entre valores de NDVI se sitúan en torno a unas 5 decimas, lo cual es un valor considerable. En la severidad media baja, se aprecia como los valores siguen siendo prácticamente idénticos, pero suponemos que ello es debido a que no se ha actuado en las zonas con ese nivel de severidad, ya que en la figura 20, se aprecian diferencias en torno a 3-4 decimas. Para el resto de comunidades vegetales, se observa claramente como las zonas de control regeneran mucho mejor que las zonas de actuación por parte del hombre, es necesario poner de relieve ya existían diferencias entre los valores medios antes de que tuviera lugar el incendio, lo que tiene una incidencia directa en los resultados de años posteriores.

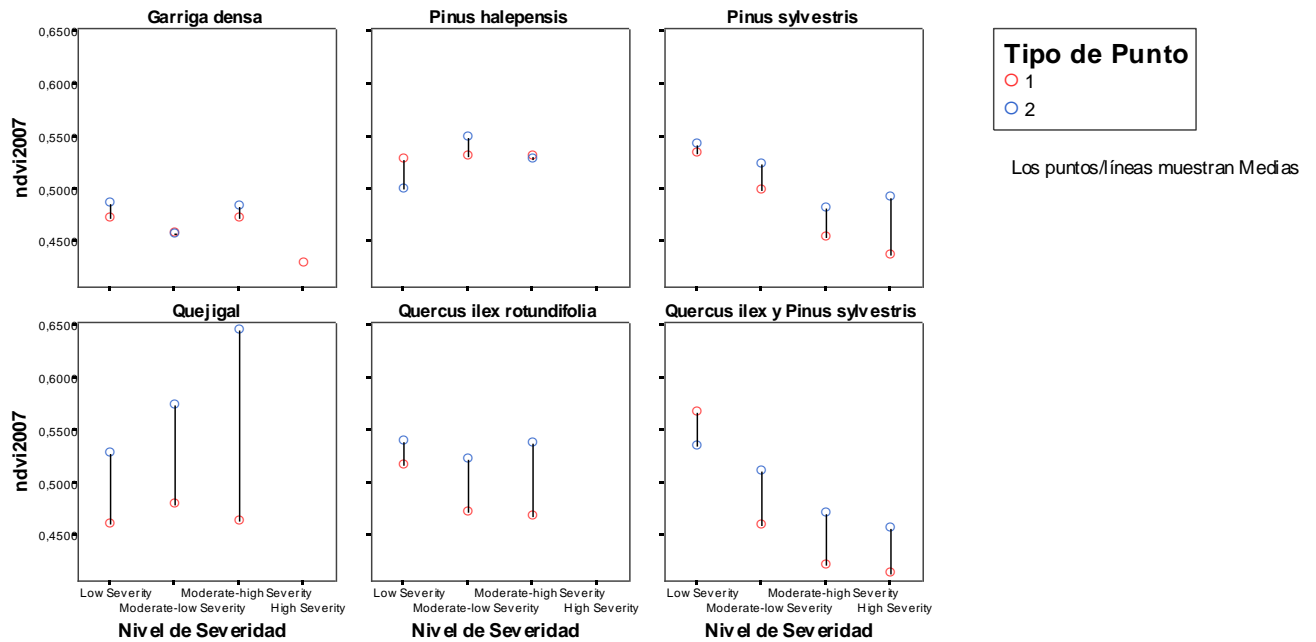


Figura 20 NDVI final de la fase de restauración (2007) por comunidades vegetales.

Si analizamos los resultados del último año se observa claramente, como en el pino silvestre la regeneración ha sido peor en las zonas de actuación para severidades altas y muy altas. Por tanto podemos concluir que la actuación del hombre influye negativamente en la regeneración post-incendio, ya que la misma es peor en las zonas afectadas por la actuación del hombre que en las zonas en las que no se ha actuado y la regeneración se ha producido de manera natural.

Como se ha visto a lo largo de la explicación referente a los gráficos, la muestra de vegetación de la comunidad vegetal del pino silvestre es la mejor para explicar el objetivo de este proyecto. Por tanto se va a realizar un análisis estadístico Anova sobre el pino silvestre para cada nivel de severidad diferenciando entre zonas de control y zonas de actuación, para comprobar las conclusiones obtenidas tras el análisis de los gráficos, esto es, que las muestras son estadísticamente diferentes. Es por ello que a continuación se procede a realizar dos análisis Anova, referente a los valores de NDVI de los años 2006 y 2007.

Tabla 6 ANOVA de NDVI 2006 para la muestra de *Pinus sylvestris*

Prueba de homogeneidad de varianzas

NDVI2006

Nivel de Severidad	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
High Severity	3,682	1	241	,056
Low Severity	4,150	1	355	,042
Moderate-high Severity	23,223	1	1226	,000
Moderate-low Severity	14,736	1	808	,000

ANOVA

NDVI2006

Nivel de Severidad		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
High Severity	Inter-grupos	,038	1	,038	6,531	,011
	Intra-grupos	1,419	241	,006		
	Total	1,457	242			
Low Severity	Inter-grupos	,020	1	,020	2,147	,144
	Intra-grupos	3,357	355	,009		
	Total	3,377	356			
Moderate-high Severity	Inter-grupos	,283	1	,283	41,984	,000
	Intra-grupos	8,264	1226	,007		
	Total	8,547	1227			
Moderate-low Severity	Inter-grupos	,001	1	,001	,117	,733
	Intra-grupos	5,255	808	,007		
	Total	5,256	809			

Como se aprecia en la tabla 6, la categoría de High Severity es la única en la que las varianzas son homogéneas, y la muestra no es significativa, es decir, son muestras estadísticamente diferentes.

Tabla 7 ANOVA de NDVI 2007 para la muestra de *Pinus sylvestris*

Prueba de homogeneidad de varianzas

NDVI2007

Nivel de Severidad	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
High Severity	12,684	1	241	,000
Low Severity	7,471	1	355	,007
Moderate-high Severity	,629	1	1226	,428
Moderate-low Severity	22,498	1	808	,000

ANOVA

NDVI2007

Nivel de Severidad		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
High Severity	Inter-grupos	,038	1	,038	10,116	,002
	Intra-grupos	,912	241	,004		
	Total	,951	242			
Low Severity	Inter-grupos	,003	1	,003	,252	,616
	Intra-grupos	4,194	355	,012		
	Total	4,197	356			
Moderate-high Severity	Inter-grupos	,151	1	,151	26,239	,000
	Intra-grupos	7,040	1226	,006		
	Total	7,191	1227			
Moderate-low Severity	Inter-grupos	,086	1	,086	10,672	,001
	Intra-grupos	6,492	808	,008		
	Total	6,578	809			

En el año 2007, la única categoría en la que las varianzas son homogéneas es en la categoría de Moderate-high Severity, y el valor significativo de Anova, menor que 0,05, confirma que las muestras presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí.

Para terminar se muestran en la figura 21 y figura 22 uno de los objetivos principales que era una cartografía de las zonas de actuación humanas.

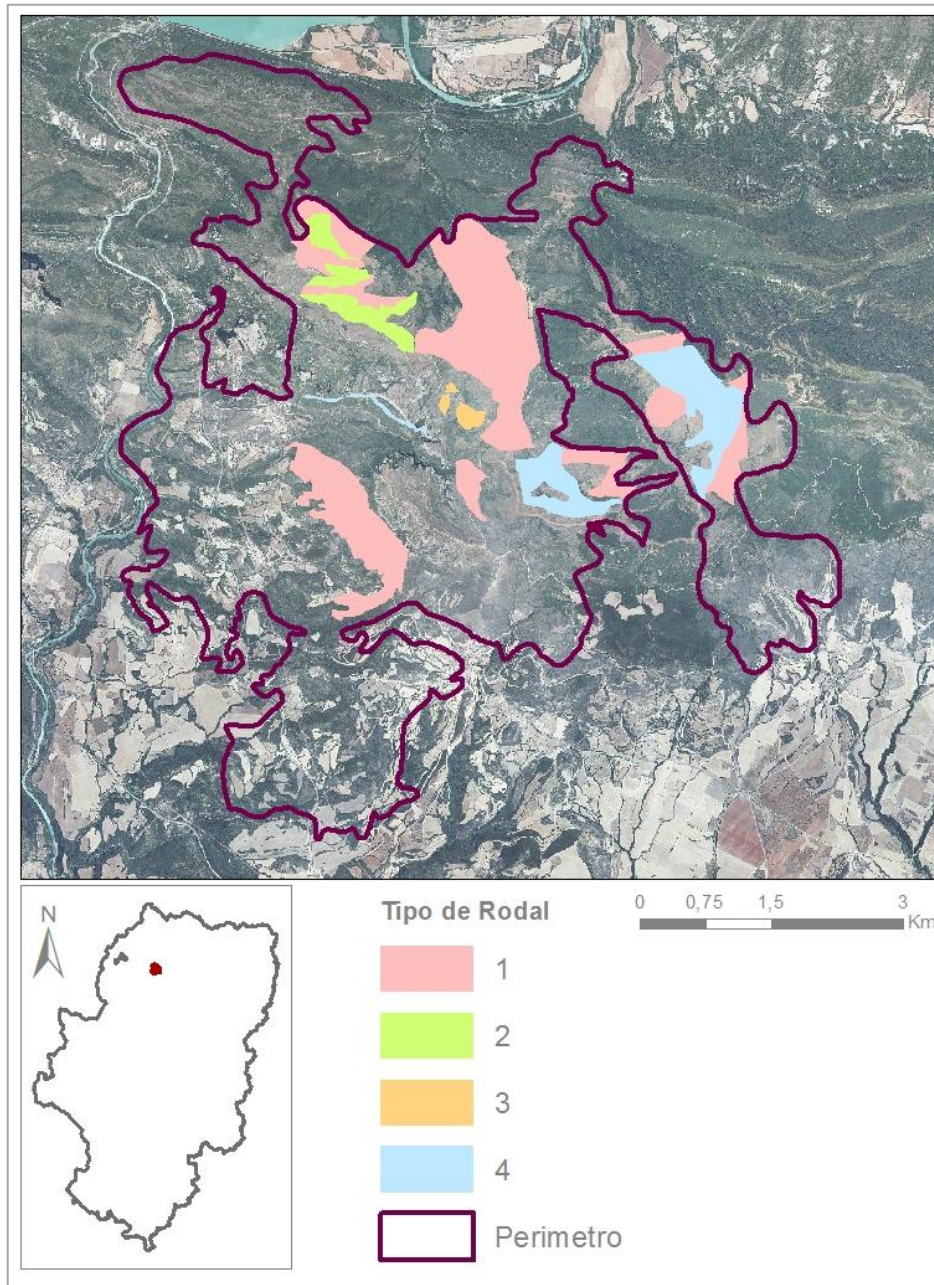


Figura 21 Zonas de actuación humana por tipo de rodal.

Elaboración propia.

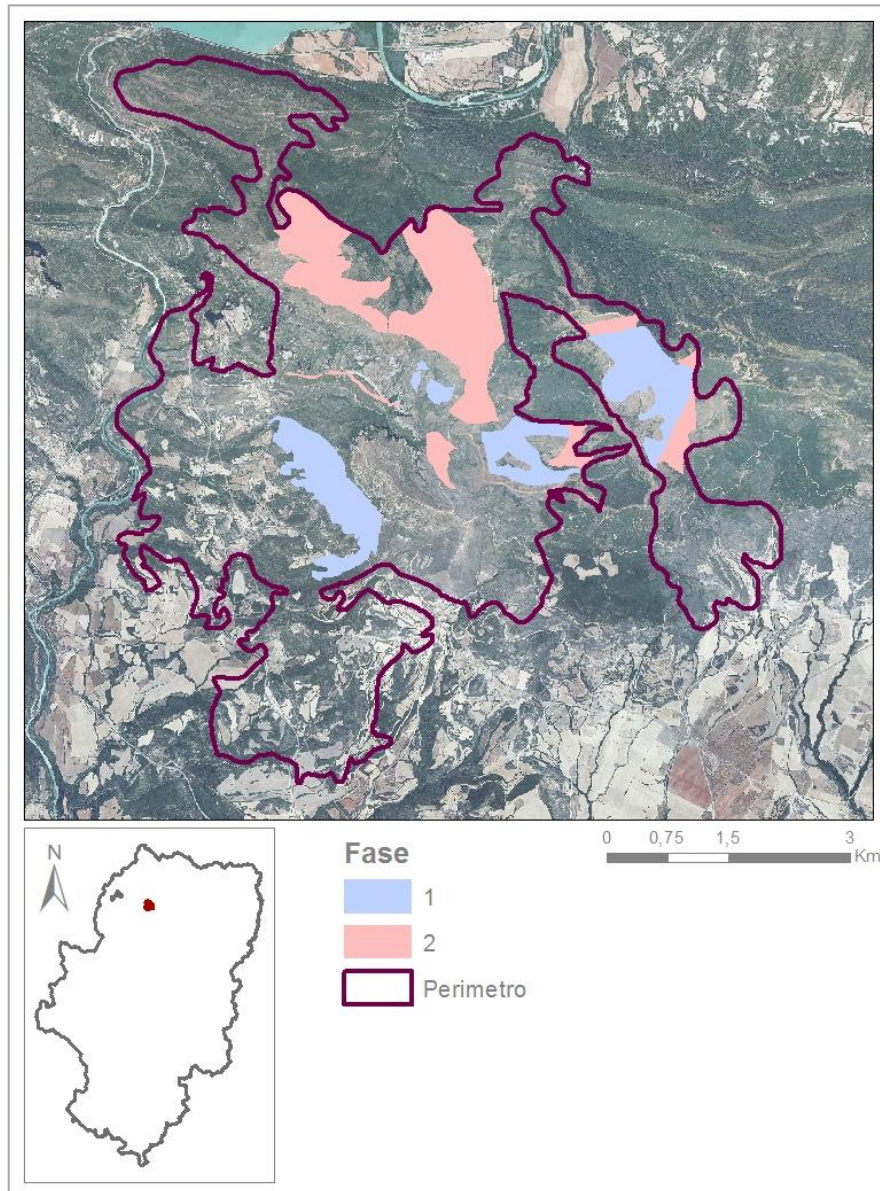


Figura 22 Zonas de actuación humana por fase.

Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES.

La regeneración vegetal tras un incendio depende, en gran medida, de la vegetación previa al incendio. Se ha visto claramente que las comunidades vegetales con mayor vigor vegetal, es decir, con valores más altos de NDVI, son aquellas que se ven más afectadas por la severidad con mayor grado. Como se ha podido ver en los resultados, la regeneración vegetal después del incendio y antes de actuar, ha sido pareja para los dos tipos de zonas. Las diferencias se pueden apreciar en cuanto se ha empezado a actuar, ya que los valores se han distanciado considerablemente, obteniendo los valores más altos de NDVI en las zonas que no han sido objeto de actuación por parte del hombre.

También se puede observar que las mayores diferencias de NDVI se encuentran en las zonas que han sufrido severidades más altas, por tanto podemos concluir que la severidad influye a la hora de la regeneración post-incendio.

Se puede decir que la hipótesis de partida del proyecto se ha confirmado puesto que en aquellas zonas en las que actúa el hombre, se aprecia su incidencia en la tendencia de regeneración, cortando el proceso de regeneración vegetal, siempre a corto plazo, ya que también cabe destacar que el periodo de tiempo de estudio no es el más idóneo y por tanto, tal vez hoy en día si se realizara el mismo estudio, disponiendo para ello de imágenes de satélite actuales, los valores de las zonas de actuación serían iguales o incluso superarían a las zonas de control.

Con la elaboración de memorias de las fases de restauración en incendios de Aragón, se puede obtener información sobre las zonas en las que se va o se ha actuado, para así poder realizar una cartografía y un estudio como el presente proyecto. Anteriormente no se tenía esta información debido a que no se realizaban este tipo de memorias.

Las imágenes de satélite son una herramienta muy eficaz para poder realizar este tipo de estudios ya que permiten la posibilidad de calcular índices como son el NDVI o el grado de severidad de una manera sencilla.

7. BIBLIOGRAFIA Y FUENTES.

- Berkes, F. 2007. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking. *Nat Hazards*, 41: 283-295.
- Chuvieco, E. (1999). *Measuring changes in landscape pattern from Satellite images: short-term effects of FIRE on spatial diversity. International Journal of Remote Sensing* 20 (12): 2331-2346.
- Elmore, A., Mustard, J., Manning, S. y Lobell, D. (2000). *Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. Remote Sensing of Environment* 73: 87-102.
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Peñuelas, J. y Valentín, R. (1995). *Relationships between NDVI, canopy, structure and photosynthesis in three Californian vegetation types. Ecological Applications* 5: 28-41.
- Gilabert, M.A., González-piqueras, J. y García-haro, J. (1997). *Acerca de los índices de vegetación. Revista de Teledetección* 8: 35-46.
- Keeley, J.E. 1986. *Resilience of Mediterranean shrub communities to fires*. En: *Resilience in Mediterranean-type Ecosystems*, Dell, B., Hopkins, A.J.M. y Lamont, B.B. (Eds.), pp. 95-112. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht, Netherlands.

- Moreno, J.M., Vazquez, A., y Velez, R. (1998). *Recent history of forest fires in Spain*. En: *Large Forest Fires*, Moreno, J.M. (Ed.), pp. 159-186. Backhuys, Lieden.
- Naveh, Z. (1975). *The evolutionary significance of fire in the mediterranean region*. *Plant Ecology*, 29(3): 199-208.
- Pausas, J.G. (2004). *La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo*. En: *Avances en el estudio de la gestión del monte Mediterráneo*, Vallejo, V.R. y Alloza, J.A. (Eds.), pp. 47- 64. Fundación CEAM.
- Pérez, B. y Moreno, J.M. (1998). Fire-type and forestry management effects on the early postfire vegetation dynamics of a *Pinus pinaster* woodland. *Plant Ecology*, 134(1): 27-41.
- Rodriguez, D.A. (1996). *Incendios forestales*. Mundi-prensa, Méjico.
- Trabaud, L. (1998). *Recuperación y regeneración de ecosistemas mediterráneos incendiados*. *Serie Geográfica*, 7: 37-47.
- Pérez-Cabello F. (2002). *Paisajes forestales y fuego en el prepirineo occidental oscense. Un modelo regional de reconstrucción ambiental*. *Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón*, Serie investigación 33, Zaragoza, 365pp.
- Vélez, R. (1982). *Fire effects and fuel management in Mediterranean ecosystems in Spain*. En: *Dynamics and Management of the Mediterranean-type Ecosystems*, Conrad, C.E. y Oechel, W.C. (Eds.), pp. 458-463. US Dep. Agric. For. Serv. Gen. Tech. Rep., PSW-58. Symposium, 22-26 junio de 1981, San Diego, CA, USA.
- White, P.S. (1979). *Pattern, process, and natural disturbance in vegetation*. *Bot. Rev.*, 45: 229-299.