

Trabajo Fin de Grado

Análisis de la regeneración vegetal (LAI-NDVI)
post-incendio en diferentes contextos bioclimáticos
mediante imágenes Sentinel

Analysis of post-fire plant regeneration (LAI-
NDVI) in different bioclimatic contexts using
Sentinel images

Autor: Alejandro Moraleja Segura

Director: Fernando Pérez Cabello

Facultad de Filosofía y Letras 2020



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a todas las personas que han estado a mi lado mientras realizaba este trabajo ya que son las que han hecho posible que pudiera terminarlo. En un primer lugar, a mis compañeros de clase, los cuales han sido esenciales en todo momento tanto por su apoyo como disponibilidad. En especial a Sergio Romero Cabezudo y Sergio Sanmartín Mancho los cuales me han dado una gran cantidad de consejos e ideas para el trabajo.

En segundo lugar, a mi Familia, los cuales a lo largo de todo este tiempo han mostrado su apoyo incondicional. También nombrar a mi grupo de amigos fuera de la carrera los cuales me han animado en los momentos más duros y estresantes de este camino y me han mantenido cuerdo a lo largo de todo este proceso. Mención especial a Álvaro, Alfredo, Jorge, Juan, Lucía, Luis, Roberto y Ubaldo.

Finalmente, a mi director Fernando Pérez Cabello por la gran cantidad de dudas resueltas, el material aportado, la paciencia infinita, la gran disponibilidad de tutorías y la gran confianza depositada en mí a pesar de haber discurrido todo este proceso en una época complicada, marcada por una crisis sanitaria a nivel mundial y una cuarentena superior a 2 meses con una gran cantidad de restricciones, haciendo imposible las tutorías presenciales.

Resumen

Los incendios forestales se han convertido en los últimos años en un gran problema a nivel nacional. Su estudio y análisis es uno de los puntos claves de la teledetección ambiental. El objetivo de este trabajo es analizar la regeneración vegetal mediante la utilización del NDVI y el LAI obtenidos a partir de imágenes Sentinel. Para ello se seleccionan 3 incendios forestales (Acebo, Quintana del Castillo y Luna), localizados en diferentes contextos bioclimáticos dentro de la Península Ibérica para analizar los niveles de regeneración 4 años tras el fuego (2015-2019) y la influencia de varios factores: Contextos bioclimático, tipo de vegetación y variables morfo-topográficas. Los resultados principales apuntan a que el contexto bioclimático y el tipo de vegetación afectada, son las variables con mayor peso a la hora de explicar los niveles de regeneración vegetal. En concreto los matorrales sub-atlánticos de la montaña leonesa, son los que presentan mayor nivel de regeneración (NDVI \approx 0,37; LAI \approx 0,85).

Palabras Clave: *Teledetección, LAI, NDVI, SIG, regeneración, incendio forestal, características morfo-topográficas*

Abstract

Forest fires have become a major problem nationwide in recent years. Its study and analysis is one of the key points of environmental remote sensing. The objective of this work is to analyze plant regeneration using the NDVI and LAI obtained from Sentinel images. For this, 3 forest fires (Acebo, Quintana del Castillo and Luna), located in different bioclimatic contexts within the Iberian Peninsula, are selected to analyze regeneration levels 4 years after the fire (2015-2019) and the influence of various factors: Bioclimatic contexts, vegetation type and morpho-topographic variables. The main results point to the fact that the bioclimatic context and the type of vegetation affected are the variables with the greatest weight when explaining the levels of plant regeneration. Specifically, the sub-Atlantic scrubs of the León mountain range show the highest level of regeneration (NDVI = \sim 0.37; LAI = \sim 0.85).

Keywords: Remote Sending, LAI, NDVI, GIS, regeneration, forest fire, morpho-topographic characteristics.

Índice de contenidos

1. Introducción y contenidos.....	6
1.1 Importancia de los incendios forestales en el ámbito peninsular	7
1.2 La importancia de los SIG y la teledetección para los análisis post-incendio y antecedentes	8
2. Objetivos e hipótesis.....	9
3. Material y fuentes.....	10
3.1 Áreas de estudio y selección de incendios forestales.	10
3.2 Fuentes de información	16
3.2.1. Imágenes de satélite.....	16
3.2.2. Mapa forestal de España y Corine Land Cover	17
3.2.3 Modelo Digital de Elevaciones	17
4. Métodos	18
4.1 Procesado de las imágenes satélite	18
4.2 Tratamiento de la información morfo-topográfica y la relacionada con las formaciones vegetales	18
4.3 Obtención de la base de datos y tratamientos estadísticos aplicados	19
5. Resultados y discusión	21
5.1 Caracterización de las variables predictoras de la distribución espacial de la regeneración.....	21
5.2 Distribución de los valores LAI-NDVI tras el incendio	24
5.2.1 Distribución de los valores LAI	24
5.2.2 Distribución de los valores NDVI	32
5.3. Relaciones LAI-NDVI.....	40
5.4 Interacciones entre incendio y comunidad vegetal.....	40
5.5 Relaciones entre regeneración y características morfo-topográficas	43
6. Conclusiones.....	47
7. Bibliografía	48
7.1 Recursos digitales	48
7.2 Recursos bibliográficos.....	48
8. Glosario	50
9. Anexos.....	51

Índice de figuras

Figura 1. *Evolución del número de siniestros y superficies afectadas, 1961-2010*

Figura 2: *Localización de los incendios forestales.*

Figura 3: *Localización del incendio de luna en la provincia de Zaragoza y mapa de pendientes.*

Figura 4: *Climograma de luna.*

Figura 5: *Localización del incendio dentro de la provincia de Cáceres y mapa de pendientes.*

Figura 5: *Climograma de Acebo*

Figura 7: *Localización del incendio dentro de la provincia de León y mapa de pendientes*

Figura 8. *Climograma de Quintana del Castillo*

Figura 9. *Distribución de las formaciones vegetales en el incendio de Acebo*

Figuras 10. *Distribución de las pendientes en el incendio de Acebo*

Figura 11. *Distribución de la altura en el incendio de Acebo*

Figura 12. *Distribución de las formaciones vegetales en el incendio de Quintana del Castillo*

Figuras 13. *Distribución de las pendientes en el incendio de Quintana del Castillo*

Figura 14. *Distribución de la altura en el incendio de Quintana del Castillo*

Figura 15. *Distribución de las formaciones vegetales en el incendio de Luna*

Figuras 16. *Distribución de las pendientes en el incendio de Luna*

Figura 17. *Distribución de la altura en el incendio de Luna*

Figura 18. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Acebo (Cáceres) en 2015.*

Figura 19. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Acebo (Cáceres) en 2019.*

Figura 20. *Mapa de LAI de Acebo (Cáceres) en 2015 y 2019*

Figura 21. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Quintana del Castillo (León) en 2015.*

Figura 22. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Quintana del Castillo (León) en 2019.*

Figura 23. *Mapa de LAI de Quintana del Castillo (León) en 2015 y 2019*

Figura 24. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Luna (Zaragoza) en 2015.*

Figura 25. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Luna (Zaragoza) en 2019.*

Figura 26. *Mapa de LAI de Luna (Zaragoza) en 2015 y 2019*

Figura 27. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Acebo (Cáceres) en 2015.*

Figura 28. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Acebo (Cáceres) en 2019.*

Figura 29. *Mapa de NDVI de Acebo (Cáceres) en 2015 y 2019*

Figura 30. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Quintana del Castillo (León) en 2015.*

Figura 31. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Quintana del Castillo (León) en 2019*

Figura 32. *Mapa de NDVI de Quintana del Castillo (León) en 2015 y 2019*

Figura 33. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Luna (Zaragoza) en 2015.*

Figura 34. *Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Luna (Zaragoza) en 2019.*

Figura 35. *Mapa de NDVI de Luna (Zaragoza) en 2015 y 2019*

Figura 36. *Gráfico de dispersión del LAI y NDVI de los incendios forestales seleccionados.*

Figura 37. *Regenerado absoluto por incendio*

Figura 38. *Regenerado absoluto por comunidad vegetal*

Figura 39. *Regenerado relativo por ciudad y formación*

Figura 40. *Regenerado absoluto por ciudad y formación*

Índice de tablas

Tabla 1 y 2. *Distribución de los valores LAI por formación arbórea en Acebo (Cáceres)*

Tabla 3 y 4. *Distribución de los valores LAI por formación arbórea en Quintana del Castillo (León)*

Tablas 5 y 6. *Distribución de los valores LAI por formación arbórea en Luna (Zaragoza)*

Tablas 7 y 8. *Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en Acebo*

Tablas 9 y 10. *Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en Quintana del Castillo*

Tablas 11 y 12. *Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en Luna*

Tabla 13. *Diferencias entre regeneración absoluta en las diferentes formaciones*

Tabla 14. *Relaciones entre regenerado y variables morfo-topográficas en Acebo (Cáceres)*

Tabla 15. *Relaciones entre regenerado y variables morfo-topográficas en Quintana del Castillo (León)*

Tabla 16. *Relaciones entre regenerado y variables morfo-topográficas en Luna (Zaragoza)*

1. Introducción y contenidos

1.1 Importancia de los incendios forestales en el ámbito peninsular

Los incendios forestales se han convertido en los pasados años en un problema con unas consecuencias e impactos tanto medioambientales como socioeconómicos de gran envergadura. El fuego es parte de la naturaleza y la sociedad mediterránea. En España el número de superficie quemada se ha disparado en los últimos 50 años fruto del abandono del medio rural. (FUEGORED, 2010)

Los incendios forestales constituyen actualmente uno de los factores de degradación más graves del patrimonio forestal y una amenaza para bienes materiales e incluso vidas humanas. A pesar de su presencia histórica en nuestro territorio, en los últimos años la repercusión mediática de los mismos los ha convertido en una realidad mucho más presente en la sociedad, que también está más sensibilizada. (Magrama 2015)

España posee una notable variedad climática y una elevada variabilidad interanual, especialmente en el caso de la pluviometría, lo que conlleva la aparición de años muy contrastados (con dispersiones de precipitación entre el 20% y 40% según territorios). Si a esto se añade el déficit hídrico particularmente elevado del periodo estival, dadas las altas temperaturas y la prolongada insolación, se hace habitual pero variable que la vegetación esté predispuesta a arder en buena parte del territorio. (Magrama 2015)

La tendencia del número de siniestros en el periodo comprendido entre 1968 y 2015 es variable (**figura 1**). En buena parte de la serie los valores reflejan una evolución creciente, con cierta estabilización a partir de los años noventa y evidentes signos de decrecimiento en la última década. Los valores mínimos de ocurrencia se producen en 1971 (1.665 siniestros), produciéndose un incremento progresivo hasta alcanzarse el máximo en 1996, con 25.557 siniestros, cifra similar a la alcanzada en 2005, con 25.492 siniestros. A partir de este año se aprecia un descenso acusado, con una reducción en los valores máximos que llega al 36%, hasta situarse en 11.810 siniestros en el último año de la serie; este valor no se alcanzaba desde inicios de los años 80. (Magrama 2015)

En la evolución del número de siniestros el clima es un factor determinante, pero especialmente las circunstancias políticas, sociales, económicas o culturales que favorecen o reducen la intencionalidad, accidentalidad o negligencia, causas principales en la generación de incendios; entre estas circunstancias se encuentran los condicionantes legales, la gestión del medio forestal, los resultados en las acciones de prevención o la conciliación de intereses, entre otras. (Magrama 2015).

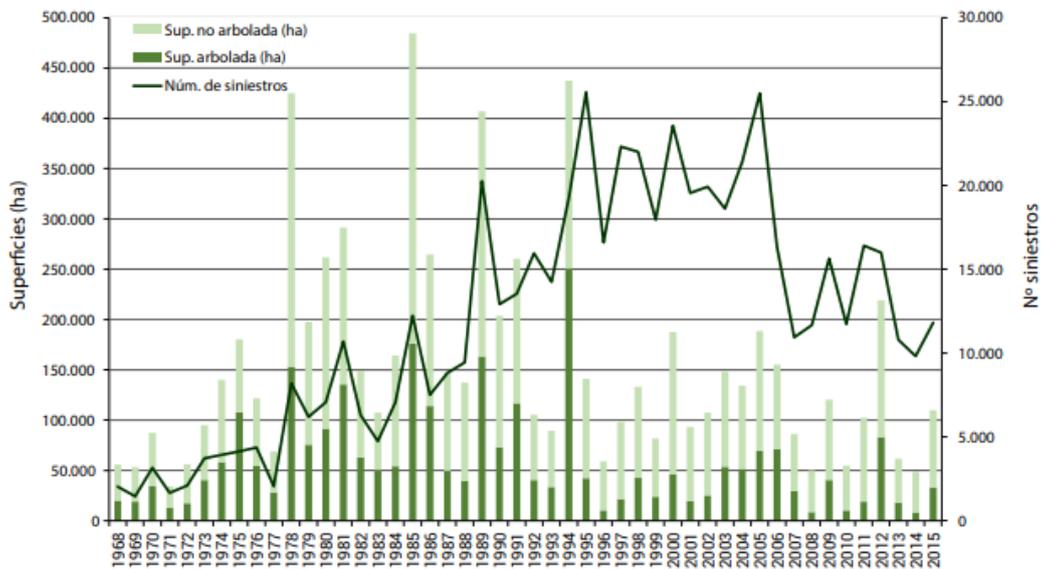


Figura 1. Evolución del número de siniestros y superficies afectadas, 1968-2015.

Fuente: Magrama 2015

1.2 La importancia de los SIG y la teledetección para los análisis post-incendio y antecedentes

Debido a la mayor frecuencia y virulencia de los incendios, se hace necesario establecer métodos de monitorio de su severidad y pronosticar la evolución de las zonas quemadas. Para conseguir este propósito, la teledetección desde satélite constituye una de las técnicas más utilizadas, gracias a que proporciona una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada, con información espectral sensible para separar áreas quemadas de otro tipo de coberturas. (Chuvieco et al., 2001). Para ello, se generan estadísticos y una serie de cartografías de evolución de la vegetación o de ocupación del suelo, una de las principales aplicaciones de la teledetección (Chuvieco, 2010). En conclusión, la teledetección permite monitorizar sus consecuencias y los procesos de recuperación post-incendio mediante índices espectrales.

A pesar de ello, las consecuencias del fuego y su posterior regeneración son diferentes en función de la zona ya que las diferentes comunidades vegetales y contextos bioclimáticos, unidos a la altura, y a las características morfo-topográficas constituyen factores decisivos. En nuestro caso se analizarán 3 incendios diferentes, localizados en contextos bioclimáticos diferentes dentro del territorio peninsular, para analizar cómo los distintos factores afectan a la recuperación de la vegetación.

Para medir la regeneración los índices empleados serán el LAI y el NDVI. El índice de área foliar (LAI) es la superficie total de hojas respecto a la superficie del suelo (Pardo, et al. 2000). Es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación, por lo que es un parámetro realmente importante para cuantificar la productividad de los ecosistemas tras un incendio. El NDVI, propuesto por Rouse et al. (1974), es el índice de vegetación más ampliamente usado a lo largo de la historia de la teledetección. Este índice está basado entre la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo. Tiene un cálculo sencillo y al disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1) permite de manera muy

sencilla la comparación de imágenes y la posibilidad de establecer umbrales. A pesar de ello tiene aunque tiene problemas de saturación en porcentajes de vegetación superiores al 60% y tiene una fuerte influencia del suelo.

Hasta la fecha el índice más utilizado para monitorizar estos cambios, consecuencias y evolución ha sido el NDVI. En nuestro caso el índice mayoritariamente empleado será el LAI. La razón de la selección de esta variable radica en que aportan información útil para la caracterización del tipo de regeneración que experimenta la vegetación tras el fuego y para detectar si presentan alguna dinámica o patrón temporal post-incendio (Jiménez, 2013). La variable se relaciona con la estructura y las propiedades ópticas del dosel influyendo directamente en el intercambio de flujos de energía y masa entre el sistema atmósfera-biosfera y, en consecuencia, en la productividad de la cubierta vegetal (Knyazikhin et al, 1999)

Hay una amplia literatura científica que aborda el uso de la teledetección ambiental y el análisis de los incendios forestales mediante el uso y las técnicas de los SIG y la teledetección como serían *“Teledetección ambiental”* (Chuvieco, 2010) y *“Seguimiento de la regeneración vegetal post-incendio mediante el empleo del NDVI”* (Díaz-Delgado y Pons, 1999)

El trabajo más directamente relacionado con nuestro tema de estudio es el de Jiménez et al., (2013) ya que, de manera innovadora al igual que en este se utiliza el índice LAI como indicador del grado de regeneración vegetal tras el fuego. En relación con una de las zonas incendiadas que han sido analizadas, destacar el trabajo de Colson et al., (2018) que utilizan técnicas de teledetección para analizar la distribución espacial de la severidad en el incendio de Acebo (Cáceres).

2. Objetivos e hipótesis

A la hora de abordar este trabajo de fin de grado es esencial la fijación tanto de unos objetivos como de una hipótesis inicial a partir de la cual desarrollar una propuesta metodológica.

En este sentido, nuestra hipótesis inicial es la siguiente: La regeneración vegetal es diferente en función de las características bioclimáticas de las zonas en la que se produce el fuego.

El objetivo principal se concreta en el análisis de la regeneración de la vegetación mediante el índice LAI obtenido a partir de imágenes Sentinel en zonas quemadas ubicadas en diferentes tipos bioclimáticos dentro de la Península Ibérica. El objetivo principal incluye una serie de objetivos secundarios:

-Analizar la respuesta de la vegetación mediante el LAI en términos absolutos y relativos.

-Analizar la afección del fuego a partir de los valores de LAI/NDVI y sus relaciones.

- Analizar la respuesta en función de las formaciones vegetales.
- Analizar las interacciones entre dominio bioclimático y comunidades vegetales.

3. Material y fuentes

3.1 Áreas de estudio y selección de incendios forestales.

La selección de los diferentes incendios forestales a estudiar es algo clave. Al ser nuestro objetivo principal del trabajo el análisis de la regeneración de la vegetación con el índice LAI en zonas quemadas situadas en diferentes bioclimas peninsulares es necesario que aparte de que estén desarrollados en diferentes bioclimas, sucedieran en fechas similares para tener la misma perspectiva temporal. En la decisión el tamaño del incendio también ha tenido importancia por lo que todos los seleccionados tienen una gran cantidad de superficie forestal afectada.

Nuestros incendios seleccionados han sido el de Luna, Zaragoza de julio del 2015, el de Acebo, Cáceres de agosto del 2015 y el de Quintana del Castillo, León de julio del 2015.

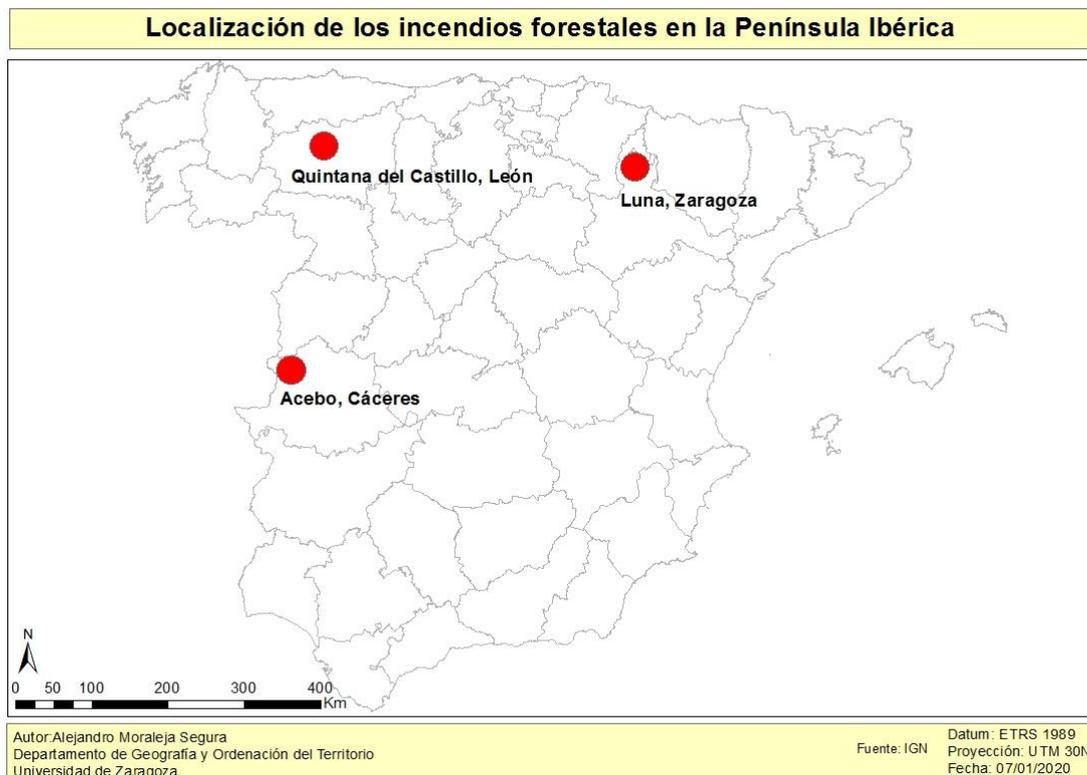


Figura 2: Localización de los incendios forestales.

El primer incendio (Luna, Zaragoza), se originó el 4 de Julio de 2015 en el término municipal de Luna. Posteriormente se extendió por los municipios de Orés, Asín, Uncastillo, Ejea de los Caballeros y Biota, afectando a un total de 13.889 ha de las cuales 7200 fueron de

masa forestal, en su mayoría forestal arbolada. La causa fue una chispa provocada por una cosechadora.



Figura 3: Localización del incendio de Luna en la provincia de Zaragoza y mapa de pendientes.

Respecto al clima, está situado entre un Cfb (Océánico templado) y un Cfa (subtropical húmedo) que, según la clasificación climática de Köppen se corresponden con climas templados, variando en ellos si presentan veranos calurosos o templados. Según los datos de la estación meteorológica más cercana tiene una precipitación media anual la cual no llega a los 450 mm y una temperatura media anual de unos 14°C.

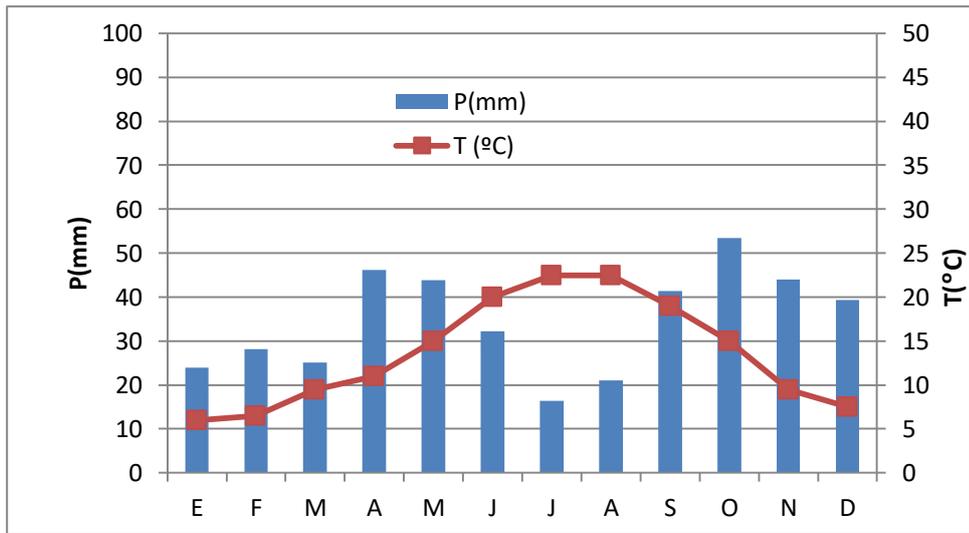


Figura 4: Climograma de Luna (Aragón). Fuente: Climate-Data-org

En la figura 4 cabe destacar la irregular distribución de las precipitaciones encontrándonos con meses como los de julio y agosto en los cuales las precipitaciones no llegan ni a los 20mm mientras que en abril, octubre, noviembre y diciembre sobrepasan los 50mm. Respecto a la temperatura cabe destacar la gran amplitud térmica que hay entre algunos meses, llegando a ser de hasta 18 grados.

Según el índice Gausson, por el cual si se cumple que la precipitación es inferior al doble de la temperatura hay aridez se puede observar que junio, julio y agosto presentan aridez.

La zona se corresponde con la serie de vegetación 22b la cual es la serie mesomediterránea manchega y aragonesa basófila de la encina (*Quercus rotundifolia*). *Bupleuro rigidi-Querceto rotundifoliae sigmetum*. La serie mesomediterránea castellano-aragonesa basófila de la carrasca (22b) es la serie de mayor extensión superficial de España. Está bien representada en La Rioja, Navarra, Aragón, Cataluña, Valencia, Castilla-La Mancha, Andalucía oriental y Murcia. (Rivas Martínez, 1987).

El segundo incendio, el de Acebo, se localiza en la provincia de Cáceres; se originó el 6 de agosto de 2015 en las inmediaciones del término municipal de Acebo. Afectó a un total de 7831 ha de las cuales 6830 fueron de superficie forestal. El incendio fue intencionado.

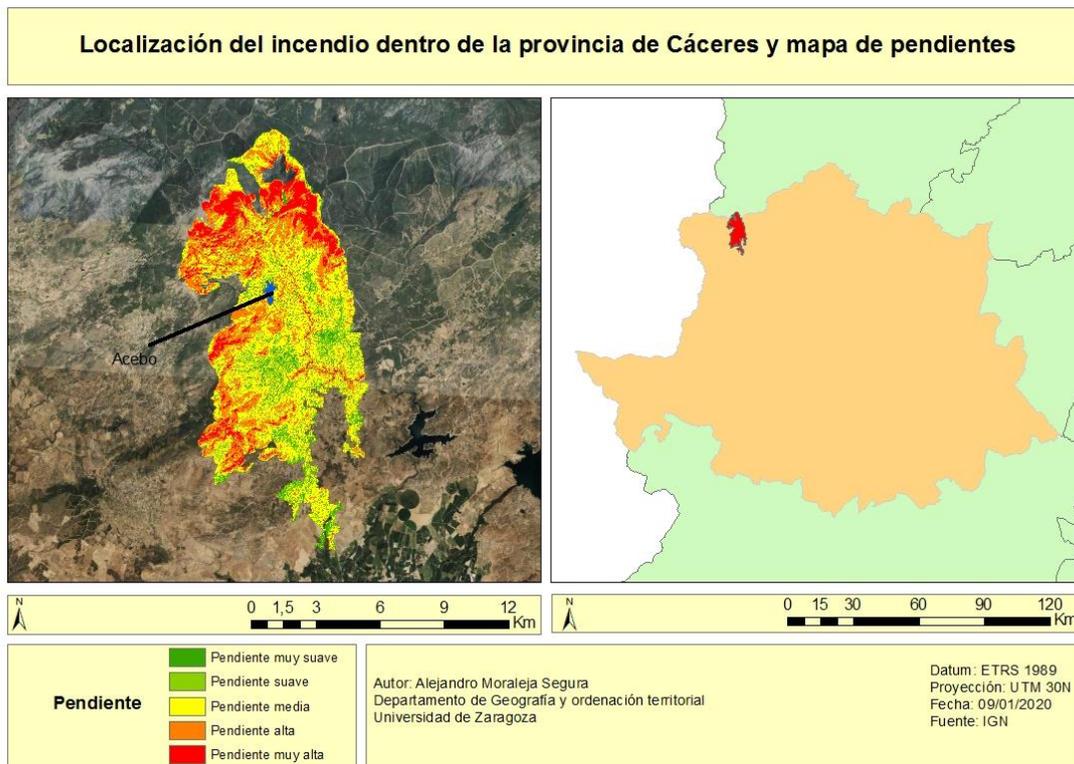


Figura 5: Localización del incendio dentro de la provincia de Cáceres y mapa de pendientes.

Respecto al clima, según la clasificación de Köppen se corresponde con un Csa es decir, mediterráneo típico con unos veranos secos y calurosos e inviernos húmedos y lluviosos. Según los datos meteorológicos obtenidos la temperatura media anual es de 14,3 °C y las precipitaciones anuales rondan los 700 mm. En la **Figura 6** se representa el climograma típico correspondiente a la zona en la que tuvo lugar este incendio, en donde se aprecia la magnitud de las precipitaciones durante el invierno y déficit hídrico centrado en los meses de verano, especialmente en julio y agosto. Según el índice de Gausson, junio, julio, agosto y septiembre presentan aridez.

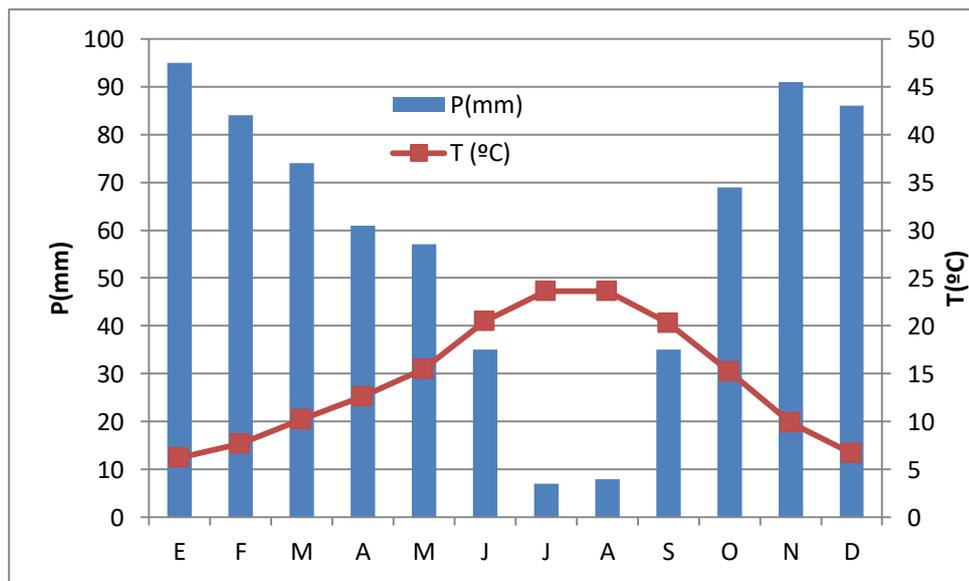


Figura 6: Climograma de Acebo. Fuente: NOAA

Cabe destacar la irregular distribución de las precipitaciones ya que en los meses de julio y agosto las precipitaciones no llegan ni a los 10 mm mientras que en los meses más fríos llegan a sobrepasar los 80 mm. Respecto a la temperatura cabe destacar la gran amplitud térmica que hay entre algunos meses, llegando a ser de hasta 17 grados.

Desde el punto de vista biogeográfico, la zona afectada por el fuego se corresponde con la serie de vegetación mesomediterránea luso-extremadurensis húmeda del roble melojo (*Quercus pyrenaica*) "Arbuto-*Querceto pyrenaicae sigmetum*" (18h).

Finalmente, el tercer y último incendio, el de Quintanilla del Castillo, en León. Este incendio se originó el 15 de julio de 2015. Afectó a un total de 2200 hectáreas las cuales todas fueron superficie forestal. Este incendio fue una reproducción del incendio que sucedió justo 2 días antes, el 13 de julio, el cual fue causado por negligencia en apicultura.

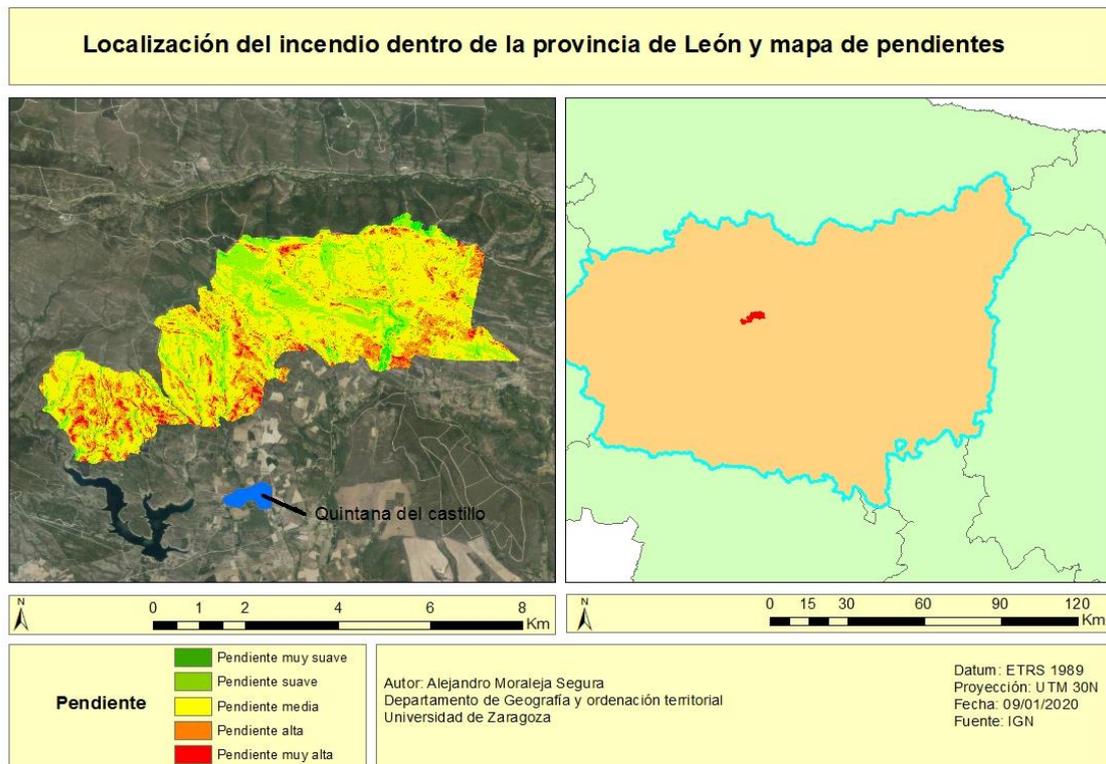


Figura 7: Localización del incendio dentro de la provincia de León y mapa de pendientes.

Respecto al clima, según la clasificación de Köppen se corresponde con un Csb es decir, mediterráneo oceánico de verano suave. En muchas ocasiones es transición entre el Csa (*mediterráneo*) y el Cfb (*oceánico*). Presenta un verano más suave que el mediterráneo pero a diferencia del oceánico cuenta con una estación seca la cual se corresponde con los meses más calurosos. Según los datos meteorológicos obtenidos la temperatura media anual es de 10 °C y las precipitaciones anuales rondan los 700mm.

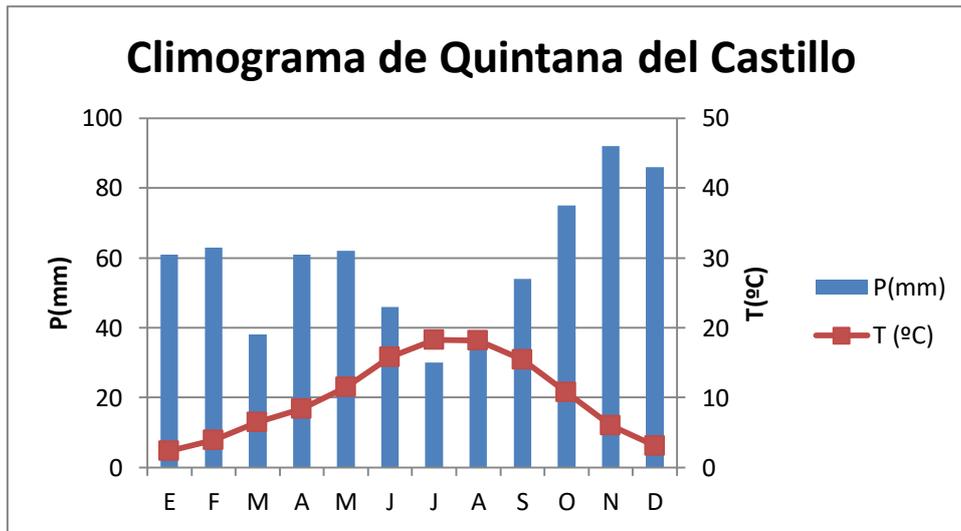


Figura 8. Climograma de Quintana del Castillo .Fuente: Climate-data.org

A diferencia de las anteriores zonas las precipitaciones son mucho menos irregulares, están más distribuidas a lo largo de todo el año, situando el mes más bajo con 30mm, algo bastante superior respecto a los anteriores casos. Respecto a la temperatura cabe destacar una amplitud térmica menor a los 16 grados.

Según el índice de Gausson solo presenta 2 meses de aridez, julio y agosto, los cuales están mucho más cerca del límite que en los otros casos.

Esta zona se corresponde con la serie de vegetación 18bb la cual es Serie supra-mesomediterránea carpetana occidental, orensano-sanabriense y leonesa húmedo-hiperhúmeda silícicola de *Quercus pyrenaica* o roble melojo (*Holco mollis-Querceto pyrenaicae sigmetum*).

3.2 Fuentes de información

Para la realización de este estudio se han necesitado una gran cantidad de fuentes de información relacionadas con las características de las formaciones vegetales y morfo-topográficas y variables espectrales. Las fuentes empleadas han sido las siguientes:

3.2.1. Imágenes de satélite

Con el objetivo de realizar el análisis de la regeneración vegetal entre el año 2015 y 2019 a través de distintos índices han sido utilizadas imágenes del satélite Sentinel-2A.

Este satélite está incluido en el programa COPERNICUS, dirigido por la ESA (European Space Agency). Está equipado con un sensor multiespectral el cual proporciona imágenes en 13 bandas espectrales en un rango entre los 443 nm y los 2190 nm (VNIR y SWIR), a diferente resolución espectral.

Esta cámara espectral está inspirada en las misiones francesas SPOT y las misiones estadounidenses LANDSAT. Posee dos planos focales, uno en las bandas del visible (VIS) y el infrarrojo próximo (NIR) y, otro en el infrarrojo medio (SWIR). La toma de imágenes es realizada mediante un sistema de barrido.

Las imágenes son descargables mediante la página de acceso abierto de Sentinel Data Hub, disponible en: (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

3.2.2. Mapa forestal de España y Corine Land Cover

El Mapa Forestal de España utilizado es el a escala 1:50.000 (MFE50). Es fruto de un proyecto continuo de actualización periódica y uso multidisciplinar. El desarrollo de este mapa fue realizado entre 1998 y 2007 por el Banco de Datos de la Naturaleza del Ministerio de Medio Ambiente, siguiendo un modelo conceptual de usos del suelo jerarquizados, desarrollados en las clases forestales, especialmente en las que están arboladas.

La base de datos se compone de una serie de campos descriptores de la ecología y estructura de las masas. Dentro del uso forestal arbolado se contemplan hasta tres especies diferentes, cada una con su estado de desarrollo (repoblado, monte bravo, latizal y fustal), ocupación (porcentaje que la especie ocupa en el total de los árboles) y la fracción de cabida cubierta para el total del arbolado (porcentaje de suelo cubierto por la proyección horizontal de las copas de los árboles). (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico)

El utilizado ha sido este y no el de escala 1:25:000 (MFE25) ya que este no se encuentra todavía finalizado a nivel nacional ya que no todas comunidades autónomas lo tienen elaborado.

El MFE50 se encuentra disponible en:
(https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50_descargas_ccaa.aspx)

El Corine Land Cover es una base de datos la cual agrupa los datos sobre la cobertura y el uso del territorio en la totalidad de la Unión Europea. Está dirigido por la Agencia Europea de Medio Ambiente y su objetivo principal es la creación de una base de datos a escala 1:100.000 sobre la cobertura y uso del territorio con la interpretación de imágenes satélite tanto LanSat como Spot.

Está disponible en: <https://datos.gob.es/es/catalogo/e00125901-spainclc2018>

3.2.3 Modelo Digital de Elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones muestra información altimétrica la cual representa el relieve del territorio a nivel nacional. El utilizado ha sido el MDT05.

Este modelo digital es de primera cobertura con paso de malla de 5 metros con un formato ASCII y, con un sistema geodésico de referencia ETRS1989 en la Península, Islas

Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias, disponible en: (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>)

4. Métodos

4.1 Procesado de las imágenes satélite

En cuanto a la obtención de imágenes satélite Sentinel 2, fueron descargadas como se nombró con anterioridad utilizando la plataforma “*Copernicus Open Acces Hub*”. Para ello, una vez se tenían ya seleccionados los incendios fueron buscadas sus respectivas localizaciones para la descarga de las imágenes y se fijaron los periodos que se necesitaban. En nuestro caso fue el siguiente mes al incendio y 4 años después (verano de 2019). En todos los incendios las fechas fueron muy similares ya que ocurrieron todos en el plazo de un mes.

Una vez ya fijados los periodos se buscaron tanto para 2015 como para 2019 días en los que la nubosidad no interfiriera en el área del incendio ya que esto puede llegar a tener una grave repercusión en el estudio.

Con las imágenes satélite ya obtenidas el siguiente paso fue el cálculo de los índices de vegetación, en nuestro caso el índice LAI y del Índice NDVI.

Estos índices fueron calculados de varias maneras. En un primer lugar fue necesaria la unión de todas bandas satélite anteriormente descargadas mediante la herramienta “composite bands” de ARCGIS para el más fácil manejo de la información. El índice NDVI fue calculado con el software ARCGIS de dos maneras, una primera con la herramienta “image analysis” de Arcgis y otra con la herramienta “raster calculator” aplicando la fórmula de cálculo del índice NDVI la cual es: $(B8 - B4) / (B8 + B4)$. El índice NDVI también fue calculado mediante el software SNAP con la función “Vegetation Radiometric Indices”.

Posteriormente se calculó el índice LAI mediante SNAP ya que los resultados del índice NDVI fueron los mismos con las diferentes herramientas y funciones pero mediante este último programa los cálculos se desarrollaron de una manera mucho más sencilla y mecánica. Para ello usamos la función “Biophysical Processor” de SNAP.

Una vez ya calculados estos 2 índices lo siguiente a realizar fue la delimitación de las zonas quemadas mediante el índice NDVI justo posterior al incendio es decir, el de 2015. Para ello se digitalizó manualmente el área de incendio siguiendo un umbral de vegetación de 0,15. Esto puede ser observado en el **anexo 1**.

4.2 Tratamiento de la información morfo-topográfica y la relacionada con las formaciones vegetales

A parte de las imágenes satélite fue necesaria también la descarga de un gran número de *shapefiles* con información adicional que íbamos a necesitar para el estudio. En nuestro caso descargamos el modelo digital del terreno (MDT) de cada una de nuestras zonas de

estudio, el Corine Land Cover (CLC) de España la cual es una base de datos sobre la cobertura y uso del territorio y, el mapa forestal de las provincias involucradas, en nuestro caso Zaragoza, León y Cáceres.

Para la descripción de las diferentes áreas de estudio también fue necesario el uso de ciertos manuales tales como *“Memoria del Mapa de Series de vegetación de España”* de Salvador Rivas Martínez (1987) para las series de vegetación de las diferentes áreas o el *“Atlas Climático Ibérico”* elaborado por la Agencia Estatal de Meteorología de España y el Instituto de Meteorología de Portugal para establecer los diferentes climas y la clasificación climática en cada una de nuestras zonas.

En el caso de Aragón sirvió de gran ayuda el *“Informe técnico del incendio de Luna”* publicado por el Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad del Gobierno de Aragón el cual hace un resumen detallado de la fauna afectada.

Para la caracterización de precipitaciones y temperatura de cada área fueron empleadas tanto los datos abiertos de las diferentes estaciones meteorológicas como ciertas bases de datos climáticos como climate-data.org.

Con nuestras áreas de estudio ya definidas se hizo un recorte del mapa forestal mediante la herramienta “clip” y se eliminaron las áreas de cultivo ya que pueden interferir de manera negativa en los resultados del LAI y del NDVI. Con las áreas ya totalmente definidas y con la ayuda del MDT se elaboraron 2 mapas de cada zona, un mapa de pendientes mediante la herramienta “slope” y un mapa de orientaciones con la herramienta “aspect”.

Estos 2 mapas fueron elaborados tanto para la caracterización de nuestra zona como para el cálculo del índice SEI, el cual se calcula mediante la fórmula: $\text{Pendiente (\%)} * \text{Coseno} (\pi ((\text{orientación}-180)/180))$ (Balice *et al.* 2000). En el **anexo 2** puede observarse la estructuración de la fórmula en el “raster calculator”.

Con los 3 índices ya calculados el siguiente paso era saber los valores de cada uno de ellos para cada polígono del mapa forestal por lo que realizamos estadísticas zonales para cada polígono del forestal del NDVI, LAI, SEI, mapa de pendientes y el MDT mediante la herramienta “zonal statistics as table”. Las estadísticas obtenidas son la media, el mínimo, el máximo y el rango, observables en el **anexo 3**. Luego estas estadísticas fueron exportadas a Excel para su más fácil manejo, creando una base de datos en la que se incluían todos apartados de manera ordenada. Es observable en el **anexo4**.

4.3 Obtención de la base de datos y tratamientos estadísticos aplicados

Una vez todos los datos fueron obtenidos en Arcgis y exportados a Excel fue desarrollada una base de datos conjunta en la que de cada área del incendio se pueden saber los valores medios de LAI, NDVI, SEI, altura y pendiente.

Esto fue un trabajo muy tedioso y delicado ya que hubo que ser muy cuidadoso en cada paso para mantener el orden y la buena agrupación de los datos a la vez que se mantenía

la relación con cada zona. Para facilitar esto se creó una columna para indicar cada área de estudio y se concatenó con el nombre de la formación arbórea de cada uno de los polígonos. De esta manera conseguimos una columna adicional la cual indicaba simultáneamente el área de estudio y formación arbórea. Esto nos permite la realización de una comparación entre la regeneración de una misma formación arbórea en dos áreas distintas pudiendo ver si algunos factores externos al incendio como los climáticos han afectado.

La generación de esta base de datos también permite estudiar la correlación entre todos factores como LAI-NDVI o LAI-SEI.

De cara a analizar y comparar los niveles de regeneración de los tres incendios y entre las diferentes formaciones arbóreas se han utilizado los siguientes test o análisis estadísticos: generación de estadísticos descriptivos básicos, análisis de varianza (ANOVA, Kruskal Wallis) y, análisis de correlación. Gracias a la adquisición del complemento XL Stat de excel pudieron ser calculados de una manera más sencilla y mecánica.

Con todos los datos ya incorporados en la tabla para poder trabajarlos y establecer ciertos patrones a la vez que correlación entre variables era necesaria la aplicación del test de varianza, conocido como ANOVA. Para realizar este test los datos tienen que cumplir dos requisitos los cuales son que los datos tengan una distribución normal y que las varianzas por categoría sean homogéneas.

Ya que no se dio la normalidad de los datos en ningún momento y las pruebas de normalizarlos no lo consiguieron todas pruebas relacionadas con la correlación y regresión fueron elaboradas mediante el test no paramétrico de Kruskal-Wallis.

Para el estudio de la regeneración los datos fueron tratados tanto de manera absoluta como relativa. Esto es debido a que algunas formaciones se vieron más afectadas que otras por lo que partían con un índice LAI inferior, provocando que un crecimiento en el mismo entre ambos periodos de estudio sea mayor porcentualmente hablando. También los valores LAI normales de cada tipo de formación son distintos así que el regenerado absoluto no es el más adecuado para comparar regenerado entre distintas formaciones ni para ver el grado de regeneración de las mismas. El regenerado absoluto muestra el regenerado total mientras que el relativo tiene en cuenta el punto de partida y las propias características de cada una de las formaciones e, indirectamente, los niveles de severidad del incendio.

También se realizó un estudio de los datos descriptivos básicos de las distintas áreas de estudio para de esta manera caracterizarlas con una mayor precisión. Estos descriptivos básicos fueron obtenidos mediante los datos pixel a pixel de cada uno de nuestros incendios.

5. Resultados y discusión

5.1 Caracterización de las variables predictoras de la distribución espacial de la regeneración

En las siguientes secciones se presentan los resultados correspondientes a la caracterización de los diferentes incendios analizados en función de su composición vegetal (previa al fuego) y de sus características morfo-topográficas.

En primer lugar, en el incendio de Acebo predominaban 3 formaciones vegetales: matorrales, melojares (*Quercus pyrenaica*) y pinares de pino pinaster (*Pinus pinaster*), las cuales ocupan más del 90% de la superficie afectada. En menor medida también encontramos alcornoques (*Quercus suber*), formaciones de dehesas, encinares (*Quercus ilex*) y eucaliptales (*Eucalyptus sp.*)

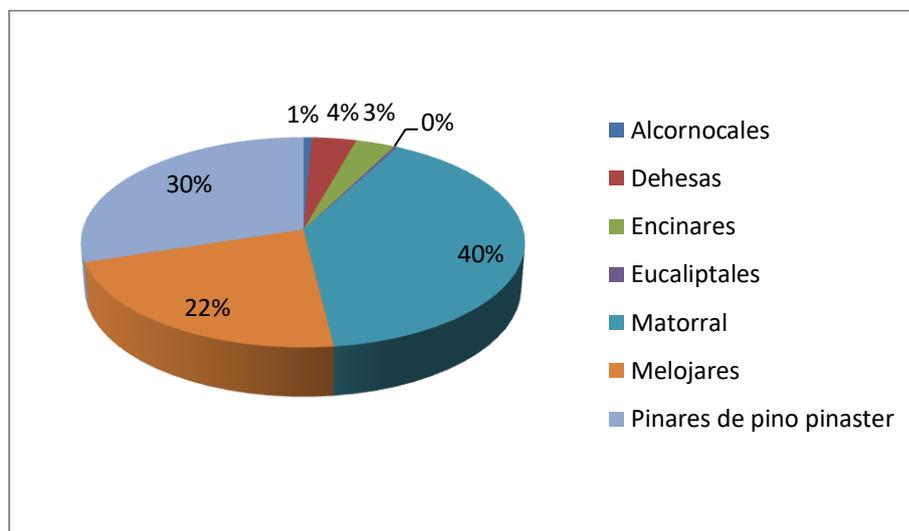
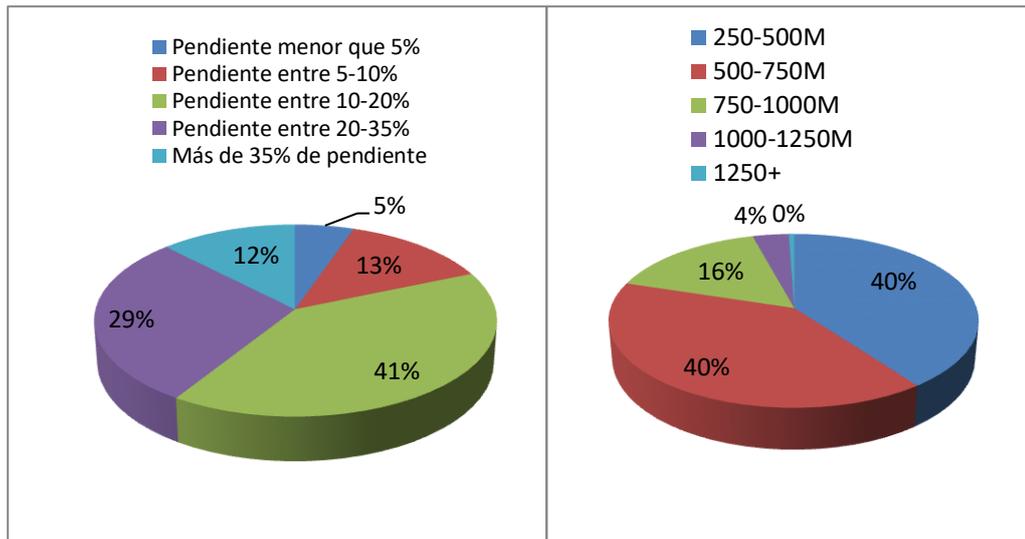


Figura 9. Distribución de las formaciones vegetales en el incendio de Acebo. Fuente: Corine Land Cover

Respecto a la distribución de las variables morfo-topográficas, la mayor parte de la zona de este incendio presenta una pendiente entre 10-35%, y una altura que va desde los 272 m sobre el nivel del mar hasta los 1447, aunque mayoritariamente se extiende entre los 250 y los 750 m. Es una zona con un importante gradiente hipsométrico que, en parte, es responsable de un relieve complejo y variado que incluye zonas relativamente llanas y sectores con una elevada pendiente topográfica.



Figuras 10 y 11. Distribución de las pendientes y altura en el incendio de Acebo Fuente: MDT

En segundo lugar, en el incendio de Quintana del Castillo (León), hay un predominio de los melojares (*Quercus pyrenaica*), aunque también encontramos una alta presencia de pinares de pino albar (*Pinus Sylvestris*) y matorrales. En menor medida encontramos pinares de pino salgareño (*Pinus nigra*).

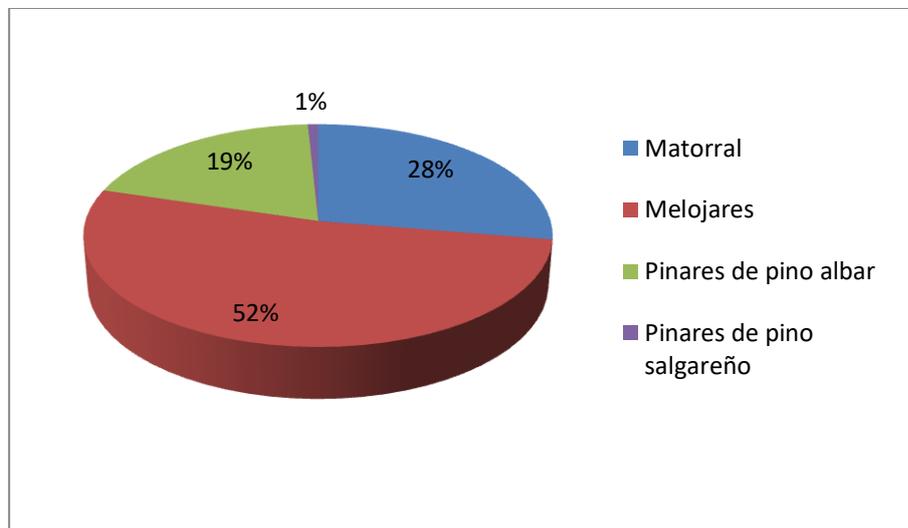
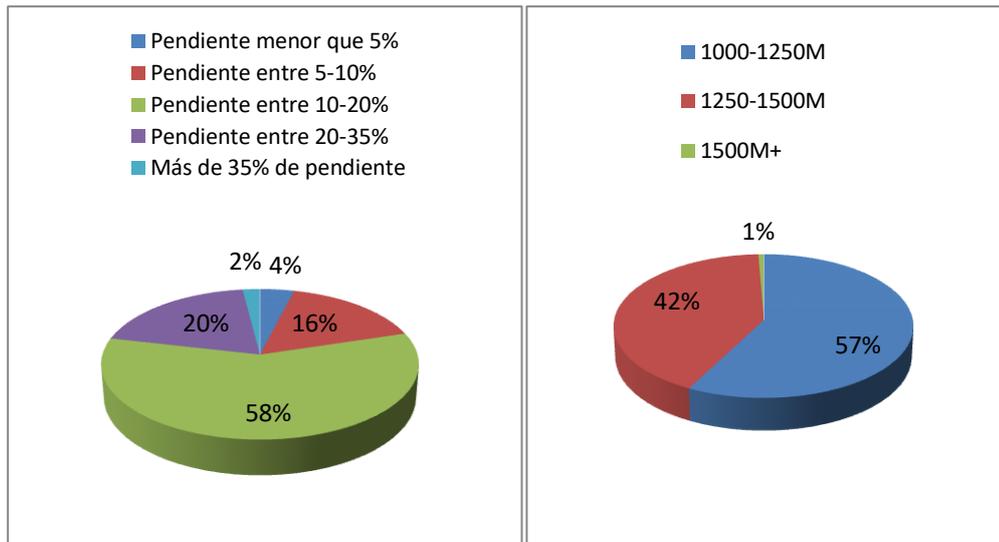


Figura 12. Distribución de las formaciones vegetales en el incendio de Quintana del Castillo. Fuente: Corine Land Cover

Respecto a la distribución de las variables morfo-topográficas, a diferencia del anterior caso la zona es mucho más lisa. La mayor parte de las pendientes se sitúan entre el 10 y 20% y la altura en su mayoría va entre los 1000 y los 1500 metros, siendo el punto más bajo 1021 metros y el más alto 1531.



Figuras 13 y 14. Distribución de las pendientes y altura en el incendio de Quintana del Castillo. Fuente: MDT

En último lugar, en el incendio de Luna (Zaragoza), hay un gran predominio de pinares de pino carrasco (*Pinus halepensis*) y matorral. En un menor lugar encontramos mezclas de coníferas y frondosas y, en una proporción muy pequeña encinares (*Quercus ilex*) y bosques de ribera.

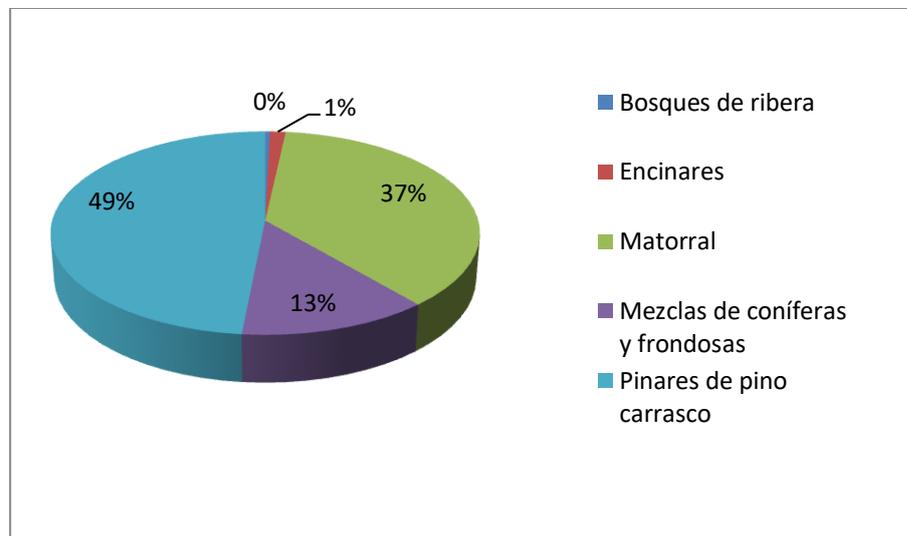
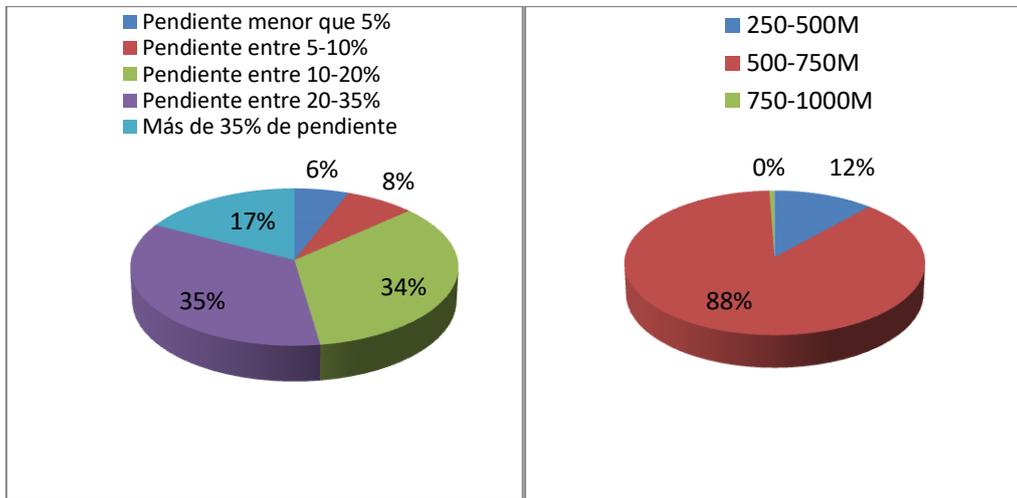


Figura 15. Distribución de las formaciones vegetales en el incendio de Luna. Fuente: Corine Land Cover

Respecto a la distribución de las variables morfo-topográficas, en el caso de Luna las zonas con pendientes menor a 10% son muy pocas. Esto es debido a que la gran mayor parte del incendio forestal está situado en una zona de vales de fondo plano cultivadas. En general, a pesar de ser el incendio con mayor área no hay mucha variación de altura, siendo el punto más

bajo 424m y el más alto 823. La mayor parte del incendio ocurre en zonas situadas entre los 500 y 750m de altura.



Figuras 16 y 17. Distribución de las pendientes y altura en el incendio de Luna. Fuente: MDT

5.2 Distribución de los valores LAI-NDVI tras el incendio

La distribución de los valores LAI-NDVI tanto en el mes posterior al fuego como 4 años después, y las diferencias entre ambas van a ser los indicadores empleados para la medición del nivel de regeneración vegetal tras el fuego a corto y medio plazo. Saber su evolución permitirá analizar qué factores han sido determinantes para una mejor o peor regeneración y qué formaciones se vieron más o menos afectadas.

5.2.1 Distribución de los valores LAI

El índice de área foliar (LAI) es la superficie total de hojas respecto a la superficie del suelo (Pardo, *et al.* 2000). Es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación, por lo que es un parámetro realmente importante para cuantificar la productividad de los ecosistemas tras un incendio.

En relación con el incendio de Acebo (Cáceres), las **tablas 1 y 2** y las **figuras 18 y 19** recogen los descriptivos básicos referentes a la distribución de los valores de LAI para cada formación arbórea. Tras el fuego (2015), todas las formaciones presentan valores de LAI bajos (promedio <0.5), especialmente en el caso de los matorrales y eucaliptales. En el lado opuesto, los melojares presentan los promedios más elevados pero también muestran una gran dispersión junto con los alcornoques ($D_s \sim 0.36$). Cuatro años tras el fuego los valores de LAI muestran un claro incremento aunque diferente en función de la formación vegetal. En este sentido, los pinares de pinaster fueron los que más aumentaron su valor

LAI 2015 Acebo	Alcornocales	Dehesas	Encinares	Eucaliptales	Matorrales	Melojares	Pinares de pinaster
Mínimo	0,000	0,099	0,128	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	1,248	0,387	0,985	0,270	0,907	1,302	1,075
Mediana	0,152	0,283	0,318	0,238	0,138	0,421	0,107
Media	0,316	0,274	0,382	0,186	0,167	0,471	0,178
Desviación típica	0,443	0,100	0,280	0,127	0,169	0,318	0,196
LAI 2019 Acebo	Alcornocales	Dehesas	Encinares	Eucaliptales	Matorrales	Melojares	Pinares de pinaster
Mínimo	0,000	0,306	0,481	0,000	0,000	0,535	0,000
Máximo	1,162	0,481	1,337	0,736	1,212	1,747	1,463
Mediana	0,711	0,391	0,940	0,498	0,599	0,937	0,690
Media	0,732	0,383	0,864	0,433	0,600	1,037	0,703
Desviación típica	0,375	0,071	0,336	0,349	0,205	0,316	0,209

Tabla 1 y 2. Distribución de los valores LAI por formación arbórea en Acebo (Cáceres)

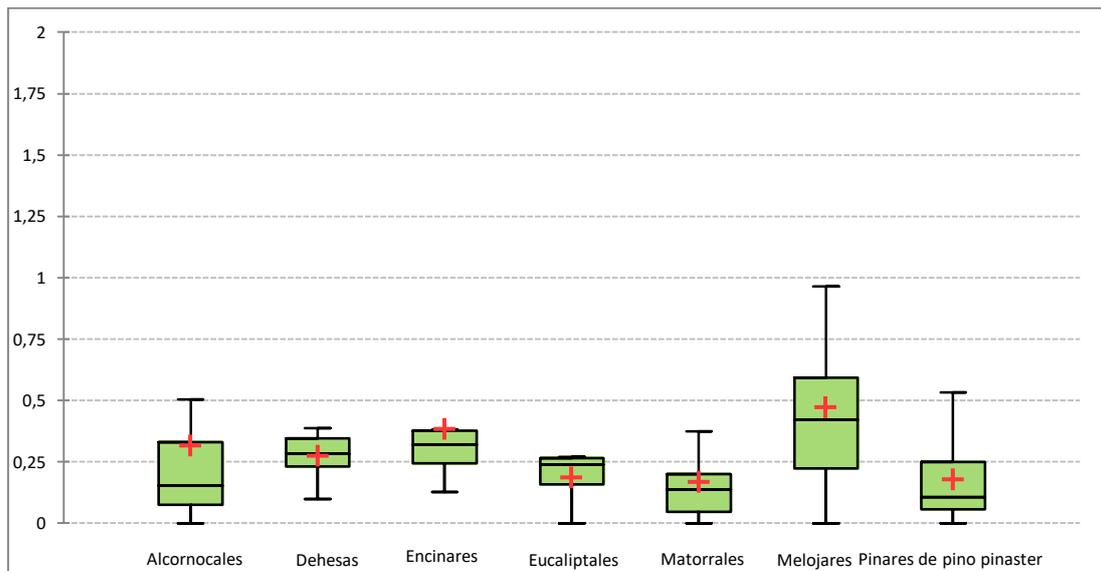


Figura 18. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Acebo (Cáceres) en 2015.

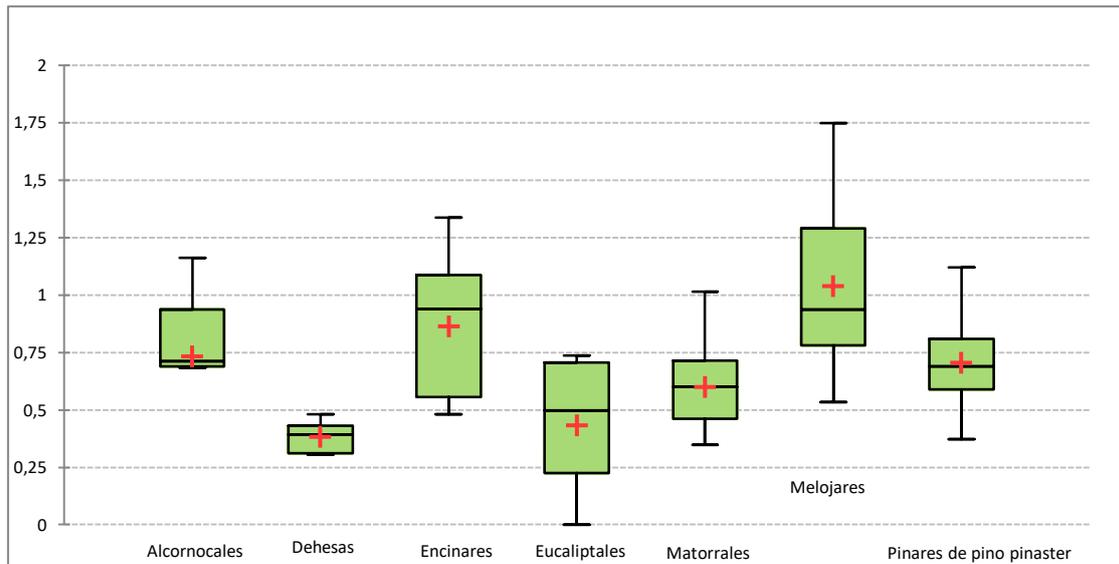


Figura 19. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Acebo (Cáceres) en 2019.

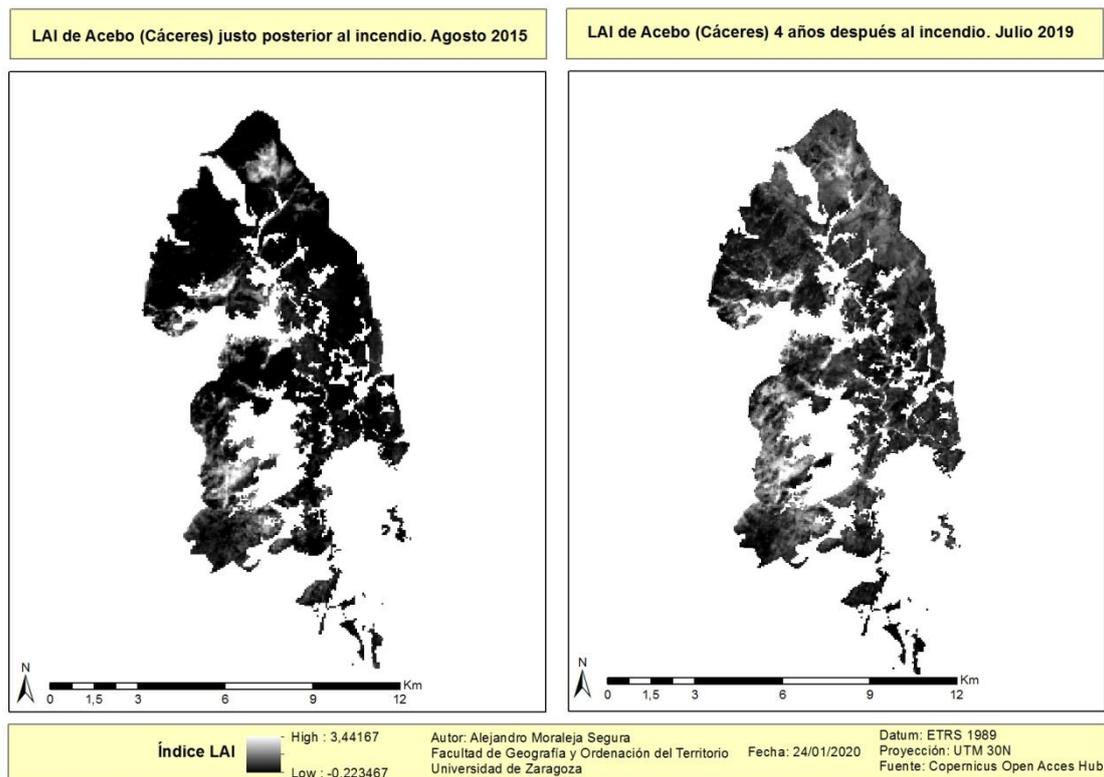


Figura 20. Mapa de LAI de Acebo (Cáceres) en 2015 y 2019

En la **figura 20**, se presenta la distribución espacial de los valores de LAI. Se percibe la heterogeneidad de la zona afectada, con una gran cantidad de sectores en donde el fuego fue de baja severidad debido a la presencia de zonas de cultivo que fueron eliminadas del análisis.

Se aprecia con relativa facilidad, las tonalidades más oscuras que representan los valores más bajos de LAI en 2015.

Para el incendio de Quintana del Castillo (León) los estadísticos descriptivos correspondientes al LAI en cada formación arbórea se recogen en las **tablas 3 y 4** y en las **figuras 21 y 22**. Tras el fuego, como en el caso del incendio de Acebo, todas las formaciones presentan valores de LAI bajos (promedio <0.3), especialmente en el caso de los matorrales y los pinares de albar, estos últimos no superan el 0,1. En el lado opuesto los melojares, del mismo modo que en el caso del incendio de Acebo, presentan los promedios más elevados aunque también muestran los mayores valores de dispersión ($D_s > 0.4$). Cuatro años tras el fuego los valores de LAI muestran un incremento mucho mayor que en Acebo aunque diferente en función de la formación vegetal.

En este sentido, en números absolutos los melojares fueron los que experimentaron un mayor incremento (>1) aunque en términos relativos los matorrales multiplicaron su LAI más de 10 veces. La **figura 23** muestra la distribución espacial de los valores de LAI y la gran regeneración protagonizada por la mayoría de las formaciones. Adviértase como los tonos más claros, correspondientes a las zonas con mayor regeneración, dominan ampliamente la zona de estudio. Se reconoce también un patrón de regeneración que parece estar controlado por la morfología topográfica de la zona en el sentido de que los fondos de los pequeños barrancos que aparecen difuminados recogen los tonos más claros y de mayor regeneración

LAI 2015 Quintana del Castillo	Matorral	Melojares	Pinares de albar	Pinares de salgareño
Mínimo	0,060	0,000	0,000	0,087
Máximo	0,694	1,190	0,244	0,446
Mediana	0,026	0,268	0,093	0,192
Media	0,087	0,409	0,096	0,240
Desviación típica (n-1)	0,177	0,421	0,084	0,160
LAI 2019 Quintana del Castillo	Matorral	Melojares	Pinares de albar	Pinares de salgareño
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,615
Máximo	1,528	2,123	1,063	1,143
Mediana	1,000	1,694	0,723	0,719
Media	0,922	1,483	0,662	0,776
Desviación típica (n-1)	0,425	0,547	0,387	0,215

Tabla 3 y 4. Distribución de los valores LAI por formación arbórea en Quintana del Castillo (León)

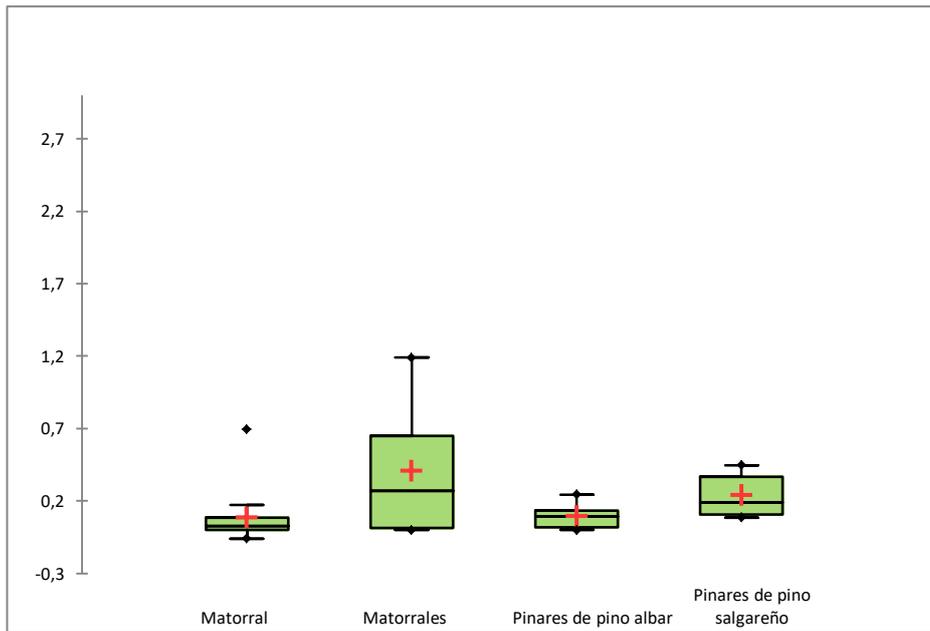


Figura 21. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Quintana del Castillo (León) en 2015.

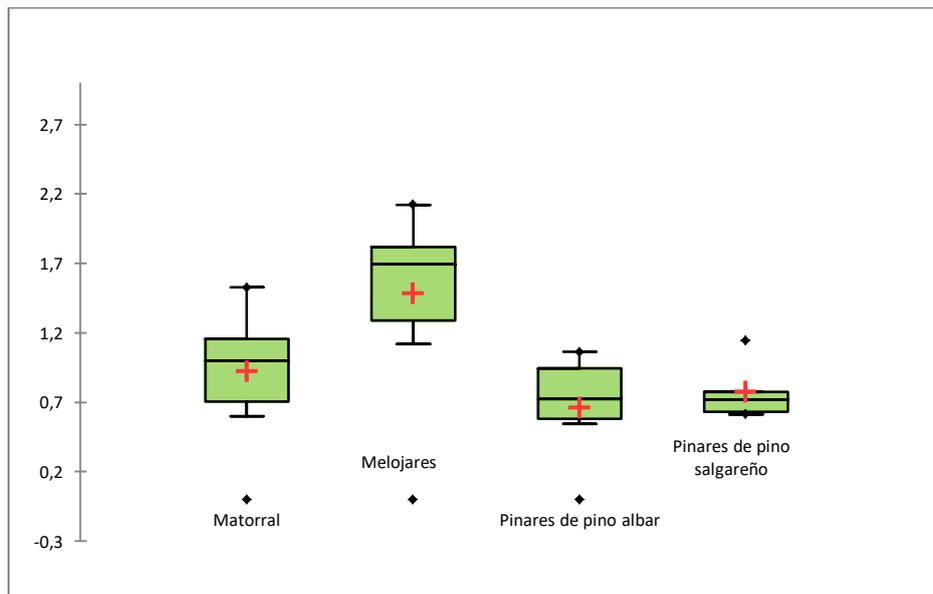


Figura 22. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Quintana del Castillo (León) en 2019.

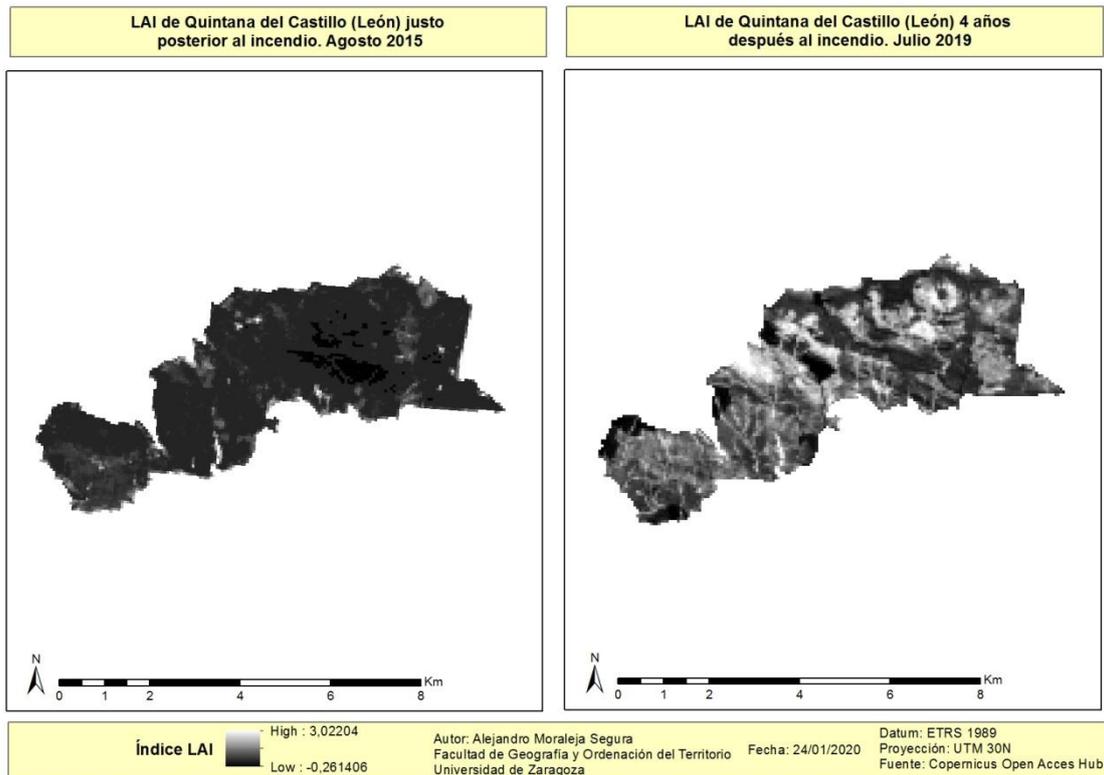


Figura 23. Mapa de LAI de Quintana del Castillo (León) en 2015 y 2019

Finalmente, en el las **tablas 5 y 6** y las **figuras 24 y 25** recogen los descriptivos básicos referentes a la distribución de los valores de LAI para cada formación arbórea correspondiente al incendio de Luna (Zaragoza). Tras el fuego, todas las formaciones presentan valores de LAI bajos (promedio <0.3), a excepción de los bosques de ribera ya que fueron afectados a una escala mucho menor. Especialmente cabe destacar el caso de los pinares de carrasco en los cuales el LAI medio es bastante bajo en comparación de los otros ($<0,2$). Todas las formaciones muestran una dispersión baja y similar.

Cuatro años tras el fuego los valores de LAI muestran un incremento mucho menor que en Quintana del Castillo y un poco inferiores a los de Acebo y bastante similares entre todas formaciones, a excepción de los bosques de ribera.

En la **figura 26** es destacable que de los 3 casos es el que menor evolución presenta visualmente hablando predominando mayoritariamente las tonalidades oscuras también 4 años después del incendio. También es la zona con más presencia de zonas con cultivo ya que como es observable en toda el área de estudio hay una gran cantidad de surcos blancos los cuales se corresponden con los valores más bajos de LAI y con los vales de fondo plano los cuales han sido cultivados o barrancos con grandes pendientes y escasa vegetación.

LAI 2015 Luna	Bosques de ribera	Encinares	Matorrales	Mezclas coníferas frondosas y	Pinares de carrasco
Mínimo	0,361	0,151	0,000	0,055	0,000
Máximo	0,612	0,361	0,696	0,387	0,462
Mediana	0,470	0,243	0,268	0,217	0,177
Media	0,498	0,244	0,270	0,224	0,189
Desviación típica	0,098	0,060	0,103	0,101	0,101
LAI 2019 Luna	Bosques de ribera	Encinares	Matorrales	Mezclas coníferas frondosas y	Pinares de carrasco
Mínimo	0,448	0,394	0,000	0,357	0,000
Máximo	0,840	0,792	0,618	0,535	0,740
Mediana	0,589	0,457	0,416	0,444	0,429
Media	0,608	0,479	0,404	0,440	0,442
Desviación típica	0,154	0,097	0,114	0,047	0,097

Tablas 5 y 6. Distribución de los valores LAI por formación arbórea en Luna (Zaragoza)

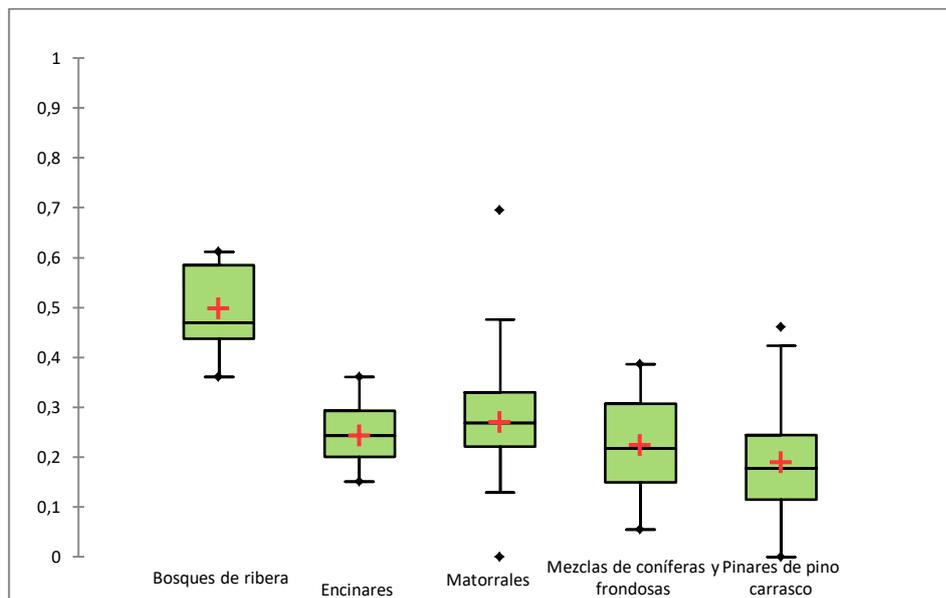


Figura 24. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Luna (Zaragoza) en 2015.

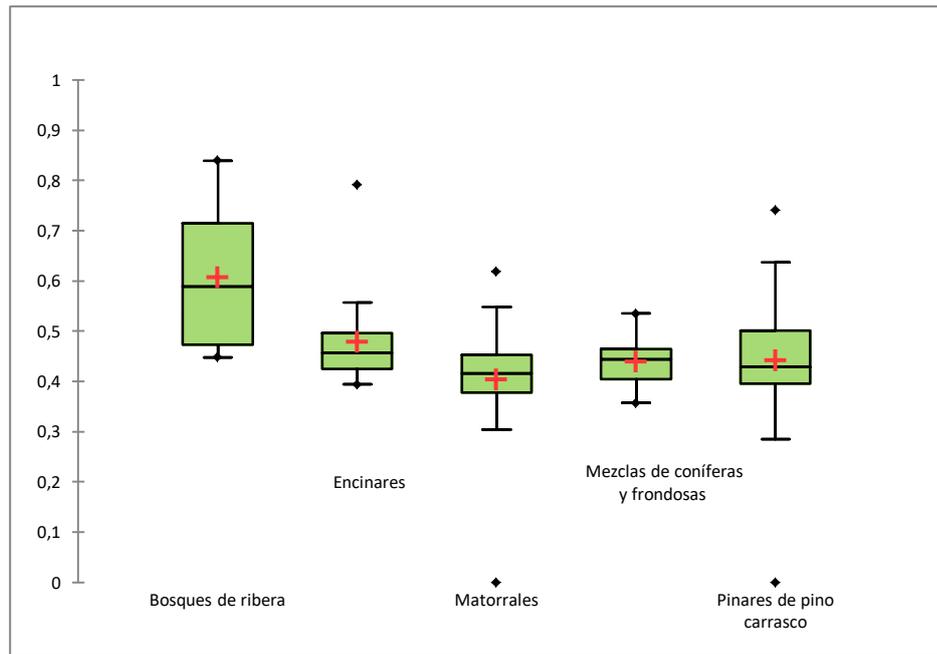


Figura 25. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores LAI por formación arbórea en el incendio de Luna (Zaragoza) en 2019.

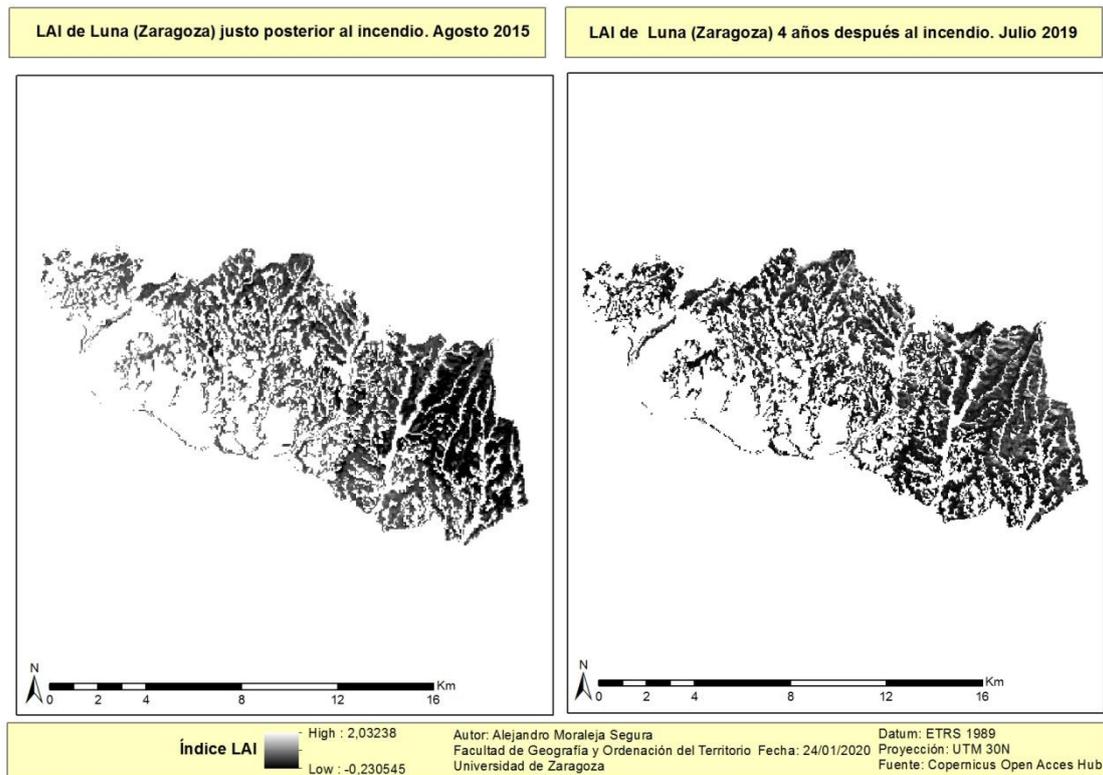


Figura 26. Mapa de LAI de Luna (Zaragoza) en 2015 y 2019

5.2.2 Distribución de los valores NDVI

Como se explicará más adelante los valores LAI y NDVI están altamente relacionados por lo que los valores NDVI seguirán la misma tendencia que los tratados anteriormente por lo que se hará de manera más resumida y concisa.

El NDVI fue propuesto por Rouse *et al.* (1974), es el índice de vegetación más ampliamente usado a lo largo de la historia de la teledetección. Este índice está basado entre la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo. Tiene un cálculo sencillo y al disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1) permite de manera muy sencilla la comparación de imágenes y la posibilidad de establecer umbrales. A pesar de ello tiene aunque tiene problemas de saturación en porcentajes de vegetación superiores al 60% y tiene una fuerte influencia del suelo.

Las **tablas 7 y 8** y las figuras **27 y 28** recogen los descriptivos básicos referentes a la distribución de los valores de NDVI para cada formación arbórea correspondiente al incendio de Acebo (Cáceres). Tras el fuego, todas las formaciones presentan valores de NDVI bajos (promedio ~0.2), especialmente en el caso de los eucaliptos y matorrales los cuales no llegan al 0,15. Por el lado contrario destaca la gran dispersión que presentan los alcornocales (>0,15).

Cuatro años tras el fuego los valores de NDVI muestran un claro incremento aunque diferente en función de la formación vegetal. En este sentido, los alcornocales fueron los que más aumentaron su valor, tanto de manera relativa como absoluta. A nivel general la dispersión sigue la misma tendencia en 2019 a excepción de los eucaliptales.

NDVI Acebo 2015	Alcornocales	Dehesas	Encinares	Eucaliptales	Matorrales	Melojares	Pinares de pinaster
Mínimo	0,000	0,117	0,112	0,000	0,000	0,032	0,007
Máximo	0,496	0,275	0,436	0,201	0,453	0,543	0,461
Mediana	0,124	0,190	0,209	0,147	0,125	0,286	0,102
Media	0,187	0,194	0,219	0,124	0,136	0,287	0,124
Desviación típica	0,164	0,054	0,108	0,088	0,084	0,112	0,085
NDVI Acebo 2019	Alcornocales	Dehesas	Encinares	Eucaliptales	Matorrales	Melojares	Pinares de pinaster
Mínimo	0,000	0,227	0,331	0,000	0,000	0,388	0,000
Máximo	0,570	0,380	0,618	0,423	0,606	0,704	0,639
Mediana	0,452	0,283	0,493	0,315	0,386	0,541	0,414
Media	0,418	0,297	0,475	0,263	0,368	0,551	0,410
Desviación típica	0,191	0,059	0,105	0,200	0,097	0,088	0,097

Tablas 7 y 8. Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en Acebo

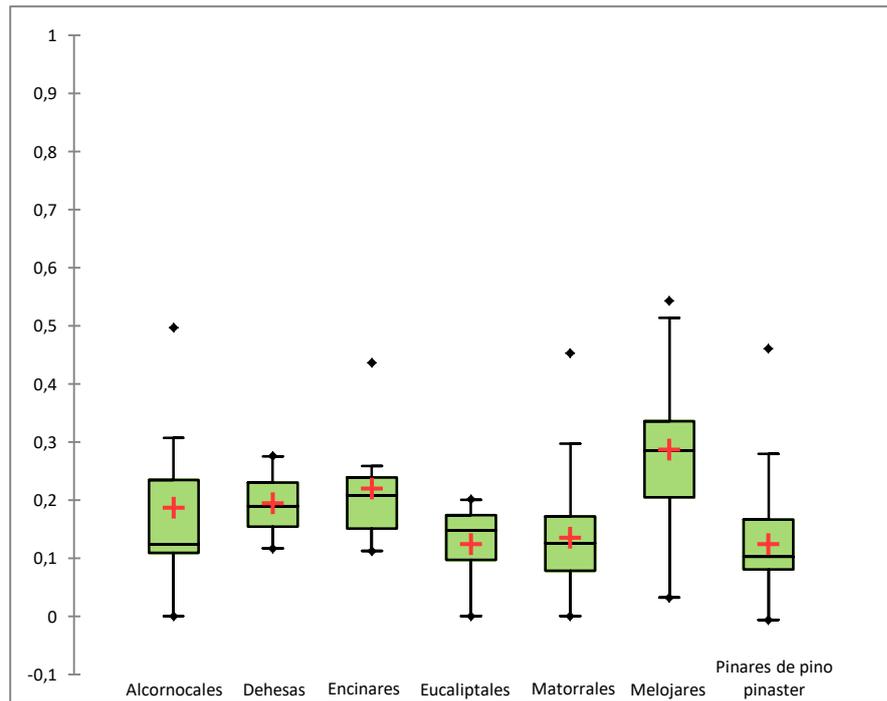


Figura 27. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Acebo (Cáceres) en 2015.

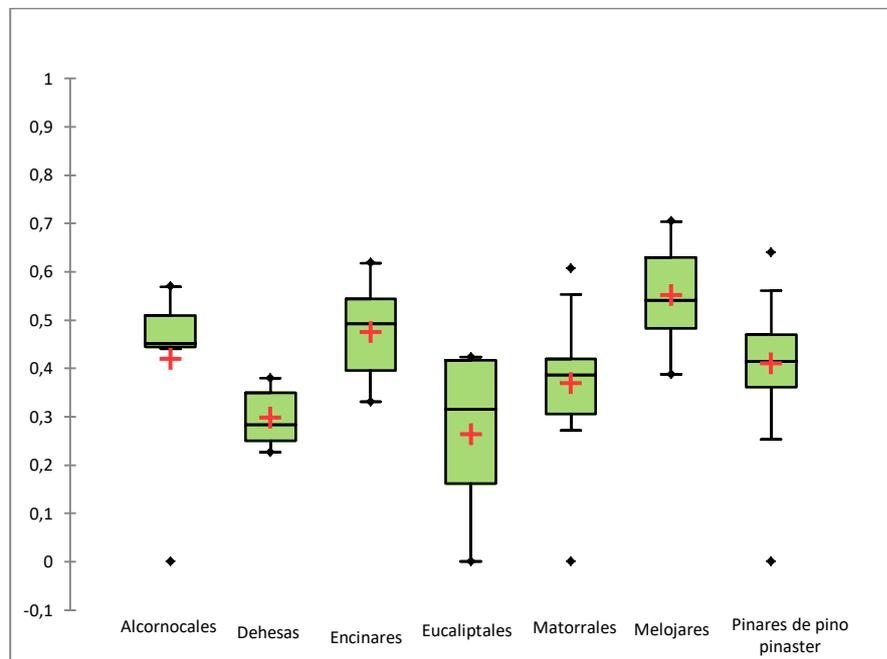


Figura 28. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Acebo (Cáceres) en 2019.

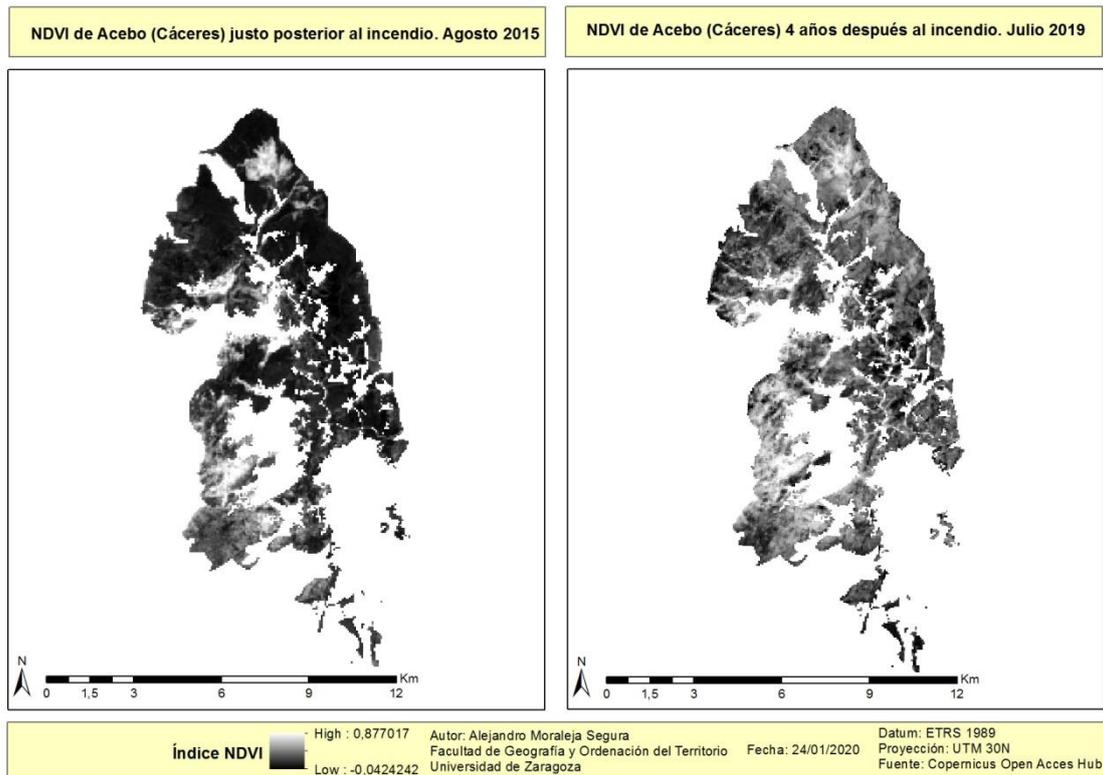


Figura 29. Mapa de NDVI de Acebo (Cáceres) en 2015 y 2019

Para el incendio de Quintana del Castillo (León) las **tablas 9 y 10** y las figuras **30 y 31** recogen los descriptivos básicos referentes a la distribución de los valores de NDVI para cada formación arbórea. Tras el fuego, todas las formaciones presentan valores de NDVI bajos, por debajo de 0,2, a excepción de los melojares. Respecto a la dispersión por lo general es bastante igual entre las diferentes formaciones (~0,1) contrastando con los pinares de albar, los cuales cuentan con una dispersión muy cercana a 0,2.

Cuatro años tras el fuego los valores de NDVI muestran un claro incremento aunque diferente en función de la formación vegetal. Destaca el gran incremento de los matorrales y los pinares de albar. Respecto a la dispersión a nivel general es mucho mayor que en 2015 y todos los valores son muy similares (~0,2), a excepción de los pinares de salgareño, los cuales son los únicos que la han reducido.

NDVI Quintana del Castillo 2015	Matorral	Melojares	Pinares de pino albar	Pinares de salgareño
Mínimo	0,019	0,000	0,000	0,053
Máximo	0,373	0,770	0,300	0,376
Mediana	0,072	0,196	0,081	0,123
Media	0,117	0,235	0,122	0,165
Desviación típica	0,108	0,198	0,099	0,127
NDVI Quintana del Castillo 2019	Matorral	Melojares	Pinares de pino albar	Pinares de salgareño
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,343
Máximo	0,705	0,802	0,562	0,595
Mediana	0,538	0,717	0,455	0,405
Media	0,481	0,644	0,387	0,439
Desviación típica	0,202	0,212	0,212	0,102

Tablas 9 y 10. Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en Quintana del Castillo

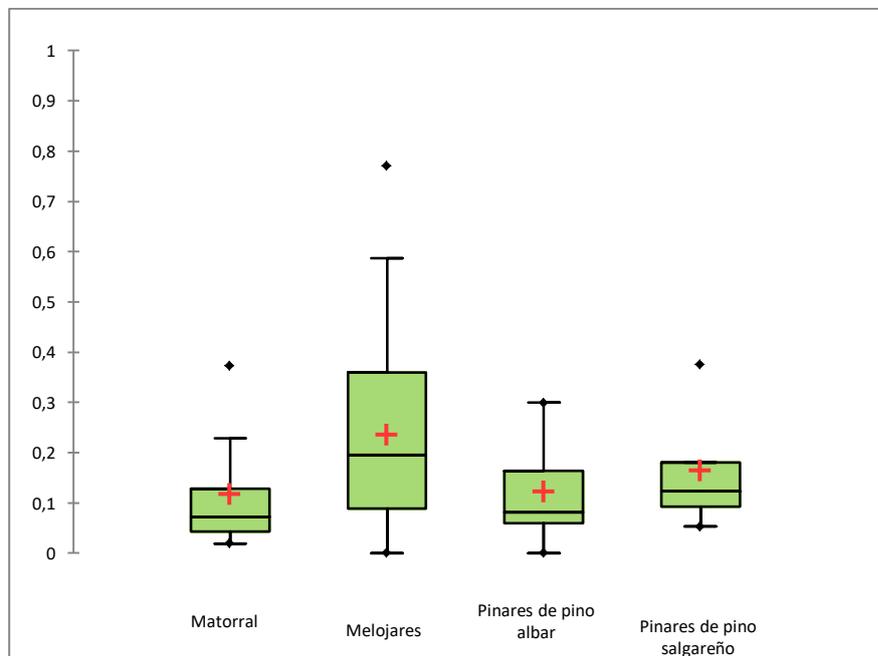


Figura 30. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Quintana del Castillo (León) en 2015.

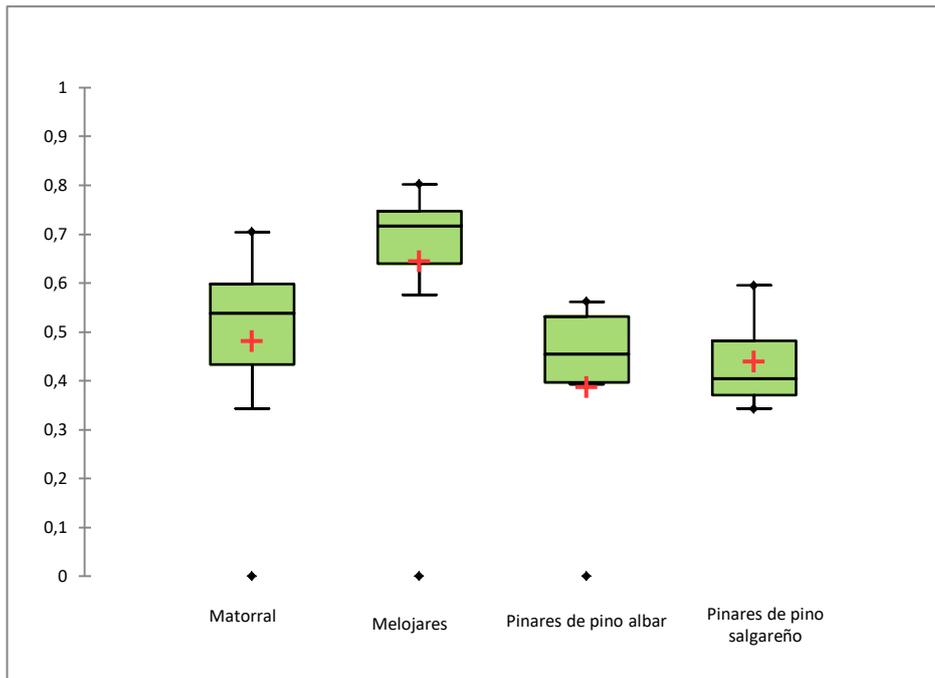


Figura 31. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Quintana del Castillo (León) en 2015.

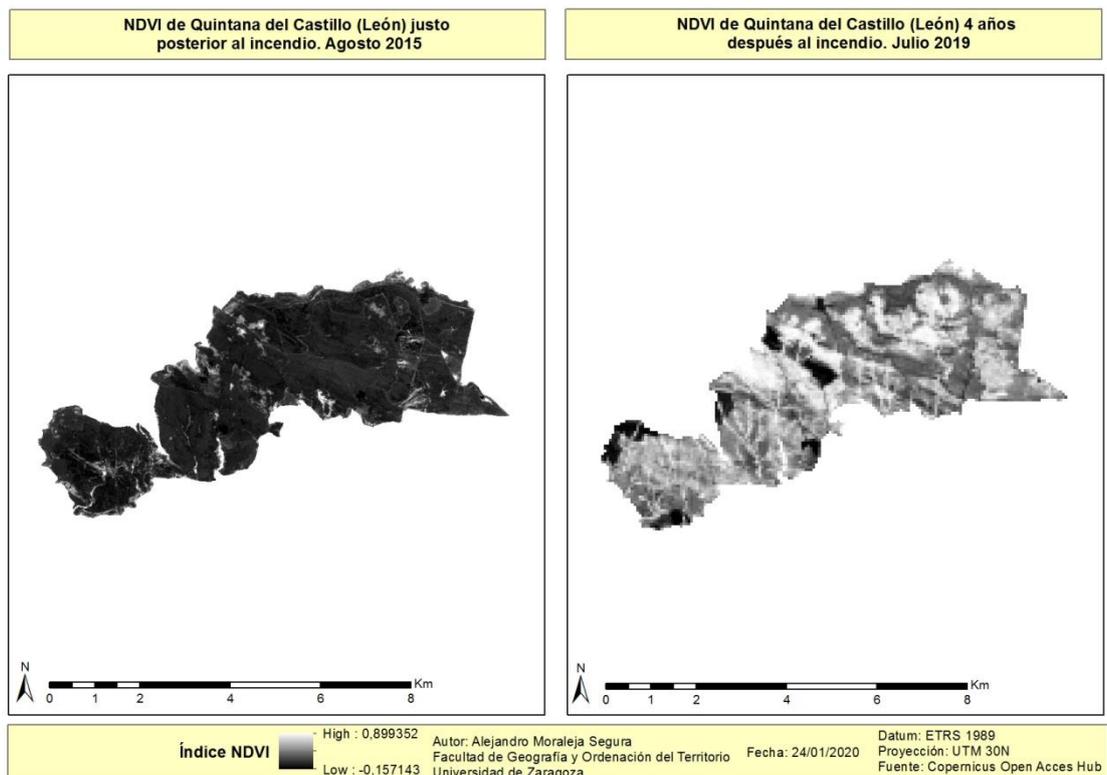


Figura 32. Mapa de NDVI de Quintana del Castillo (León) en 2015 y 2019

Finalmente, las **tablas 11 y 12** y las figuras **33 y 34** recogen los descriptivos básicos referentes a la distribución de los valores de NDVI para cada formación arbórea correspondiente al incendio de Luna (Zaragoza). Tras el fuego, todas las formaciones presentan valores de NDVI bajos, rondando el 0,2, a excepción de los bosques de ribera, como en el caso del LAI. Respecto a la dispersión por lo general es bastante igual entre las diferentes formaciones (~0,1)

Cuatro años tras el fuego los valores de NDVI muestran un claro incremento aunque diferente en función de la formación vegetal. Destaca el gran incremento de los pinares de carrasco. Cabe destacar la reducción de la dispersión de las mezclas de coníferas y frondosas.

NDVI Luna 2015	Bosques de ribera	Encinares	Matorrales	Mezclas de coníferas y frondosas	Pinares de carrasco
Mínimo	0,361	0,151	0,000	0,055	0,000
Máximo	0,612	0,361	0,696	0,387	0,462
Mediana	0,470	0,243	0,268	0,217	0,177
Media	0,498	0,244	0,270	0,224	0,189
Desviación típica	0,098	0,060	0,103	0,101	0,101
NDVI Luna 2019	Bosques de ribera	Encinares	Matorrales	Mezclas de coníferas y frondosas	Pinares de carrasco
Mínimo	0,448	0,394	0,000	0,357	0,000
Máximo	0,840	0,792	0,618	0,535	0,740
Mediana	0,589	0,457	0,416	0,444	0,429
Media	0,608	0,479	0,404	0,440	0,442
Desviación típica	0,154	0,097	0,114	0,047	0,097

Tablas 11 y 12. Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en Luna

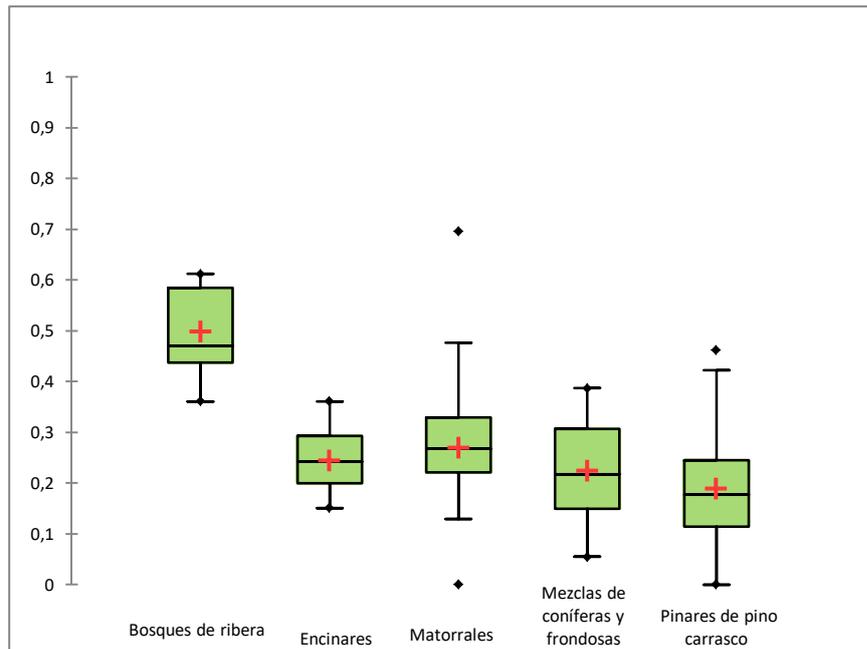


Figura 33. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Luna (Zaragoza) en 2015.

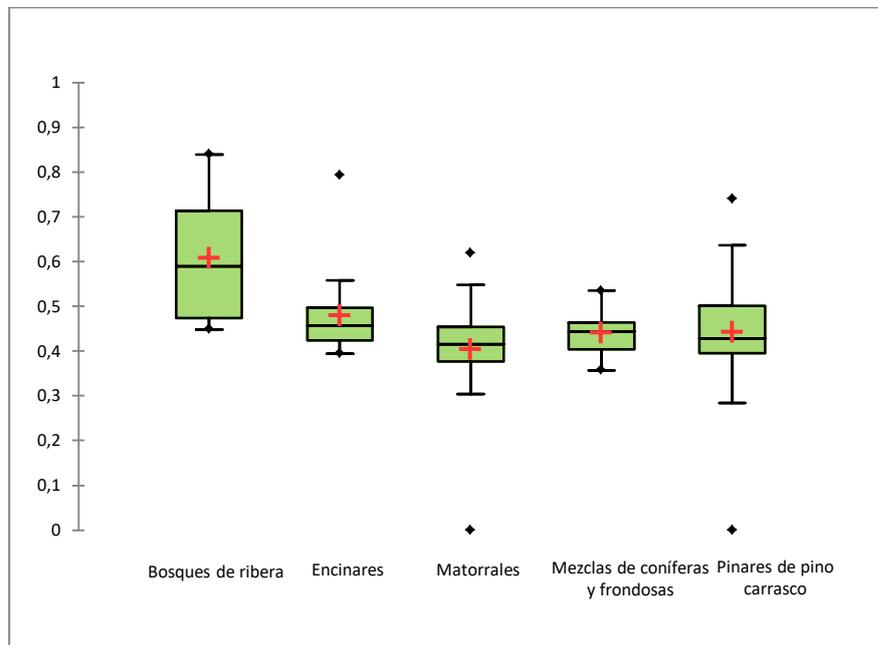


Figura 34. Gráfico de cajas y bigotes correspondiente a la Distribución de los valores NDVI por formación arbórea en el incendio de Luna (Zaragoza) en 2015.

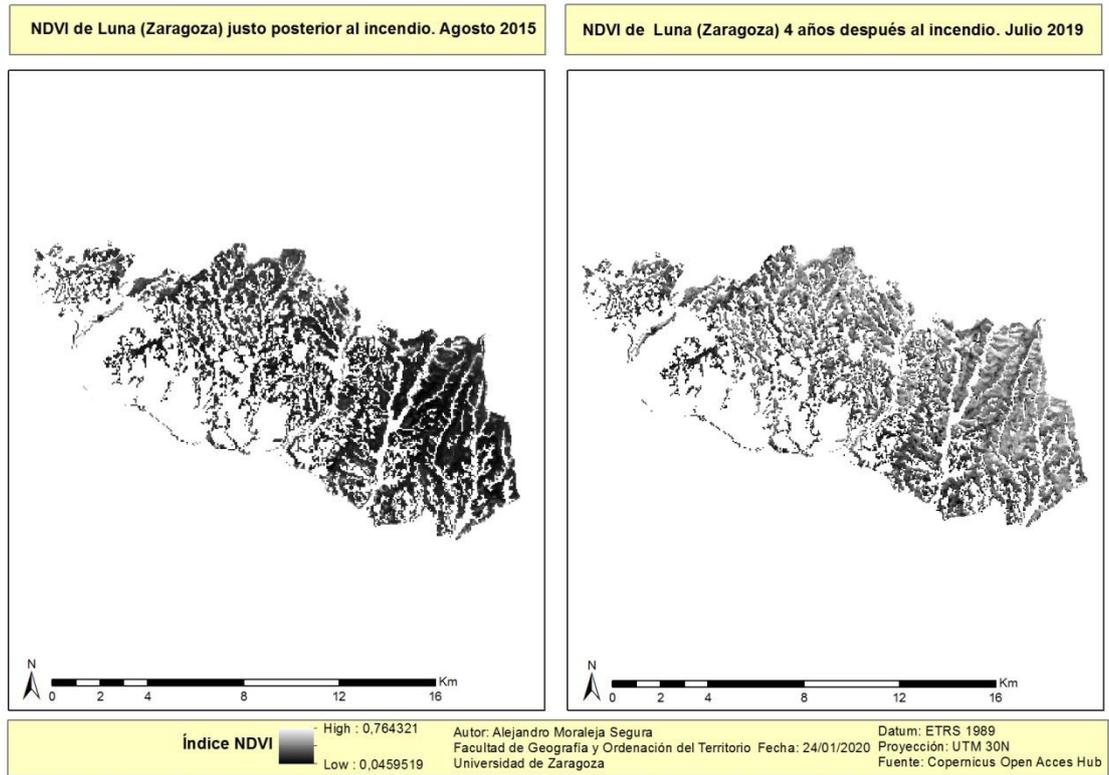


Figura 35. Mapa de NDVI de Luna (Zaragoza) en 2015 y 2019

5.3. Relaciones LAI-NDVI

Tanto el LAI como el NDVI son índices los cuales están relacionados entre sí pero no sabemos hasta qué grado en nuestro caso.

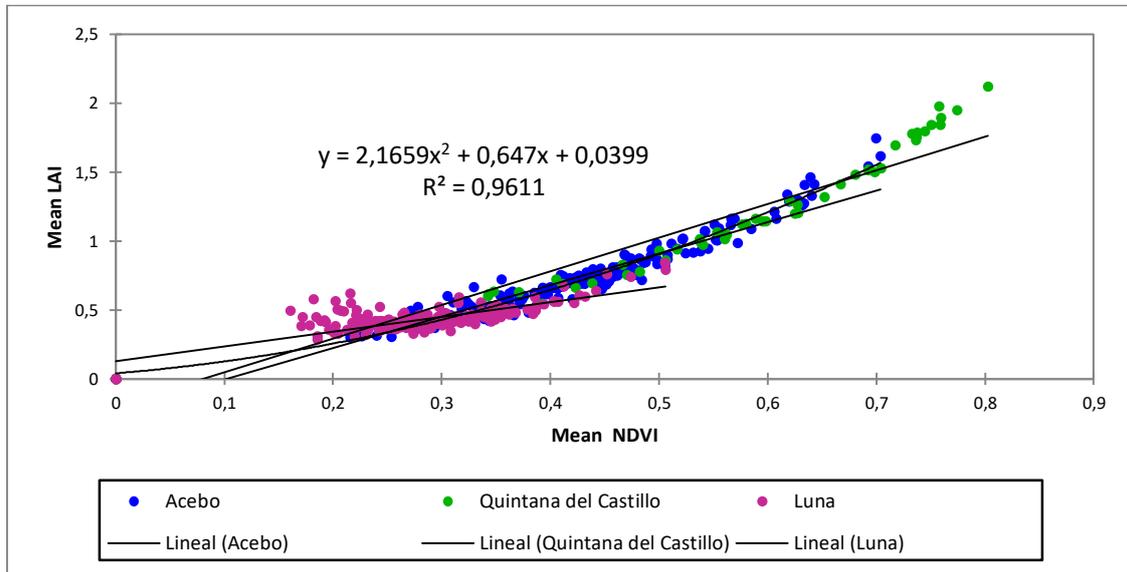


Figura 36. Gráfico de dispersión del LAI y NDVI de los incendios forestales seleccionados.

En nuestro caso R^2 es de 0,9611. Esto quiere decir que los valores de NDVI están explicados en un 96% por los del LAI. Hay un alto grado de asociación con una relación exponencial y con una organización de valores según el incendio.

Por esto mismo para medir la regeneración se empleará únicamente el índice LAI.

5.4 Interacciones entre incendio y comunidad vegetal

Tal y como se ha comentado en la metodología, mediante test de ANOVA y Kruskal Wallis se analizan las diferencias e interacciones entre diferentes variables categóricas (Incendio y comunidad vegetal) y la variable continua, regenerado absoluto o relativo. Para ilustrar dichos análisis se utilizarán gráficas de valores medios que servirán de apoyo a los comentarios en cada caso. En este caso señalar que ha sido necesario agrupar ciertas categorías con gran similitud dentro de las coníferas y quercíneas.

En la **figura 37** se muestra que la regeneración en términos absolutos no ha sido igual en los 3 incendios. Dichas diferencias entre incendios presentan valores con un carácter significativo ($F=71,073$; $Pr>F= 0,0001$). Se puede observar en el **anexo 5**. Cabe destacar el gran regenerado del incendio de Quintana del Castillo, seguido por del de Acebo y, finalmente el de Luna. Tampoco es algo que nos sorprenda ya que también fue el lugar en el cual más variación de LAI y NDVI entre 2015 y 2019.

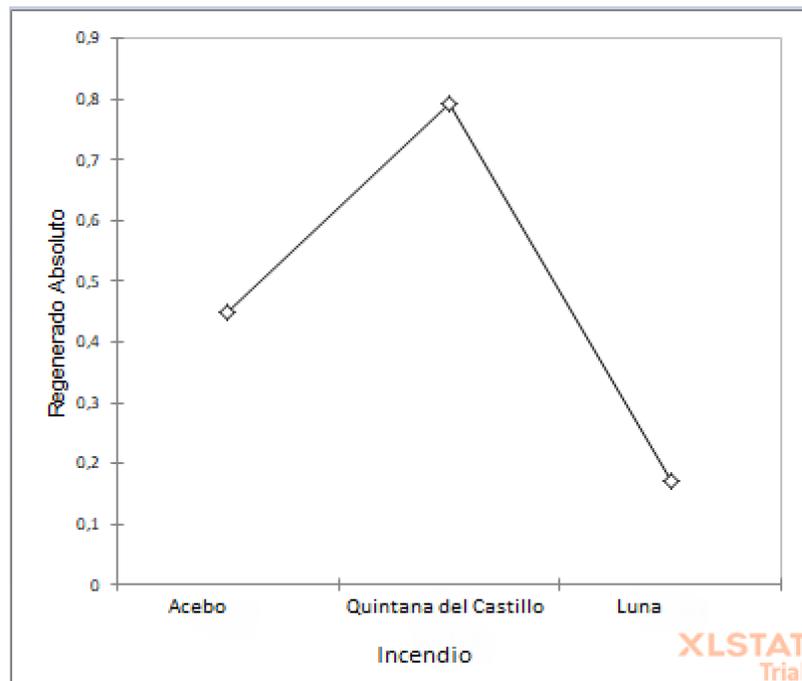


Figura 37. Regenerado absoluto por incendio

En relación con las formaciones vegetales la regeneración en términos absolutos también muestra diferencias entre algunas comunidades (**figura 38**). Estas diferencias, como está representado en el **anexo 6** y la **tabla 13** son de carácter significativo ($F=18,513$; $Pr>F=0,0001$). En este sentido destaca la regeneración de los melojares y de la mezcla de coníferas y frondosas respecto al resto de formaciones.

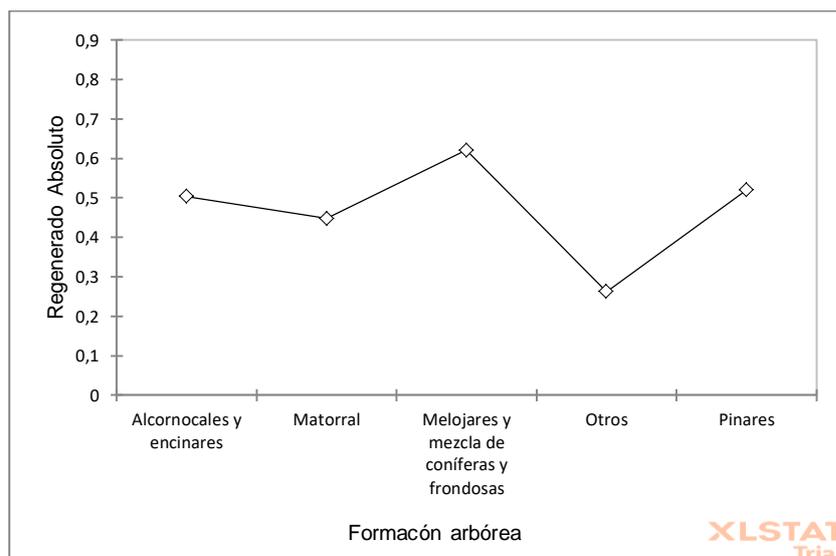


Figura 38. Regenerado absoluto por comunidad vegetal

	Otros	Alcornocales y encinares	Matorral	Melojares y mezcla de coníferas y frondosas	Pinares
Otros	1	0,030	0,140	< 0.0001	< 0.0001
Alcornocales y encinares	0,030	1	0,492	0,011	0,252
Matorral	0,140	0,492	1	< 0.0001	< 0.0001
Melojares y mezcla de coníferas y frondosas	< 0.0001	0,011	< 0.0001	1	0,039
Pinares	< 0.0001	0,252	< 0.0001	0,039	1

Tabla 13. Diferencias entre regeneración absoluta en las diferentes formaciones

En la **figura 39** y **figura 40** se muestran las interacciones entre incendio y tipo de comunidad tanto de manera relativa como absoluta. Las figuras nos permiten comparar la diferente magnitud de la regeneración para las mismas formaciones en diferentes incendios o contextos bioclimáticos

En términos relativos las interacciones entre incendio y tipo de comunidad (**figura 39**) muestran un patrón muy similar al registrado en términos absolutos. Sin embargo se pueden destacar una serie de aspectos: (1) Independientemente del tipo de incendio los melojares y la mezcla de coníferas y frondosas muestra valores bastante similares. Además los niveles de regeneración son mucho más bajos al compararlos con la **figura 40**, que se muestran en términos absolutos. (2) Los matorrales y pinares reproducen los mismos resultados que en términos absolutos, es decir que los niveles más altos de regeneración se producen en el incendio de Quintana del Castillo seguido del de Acebo.

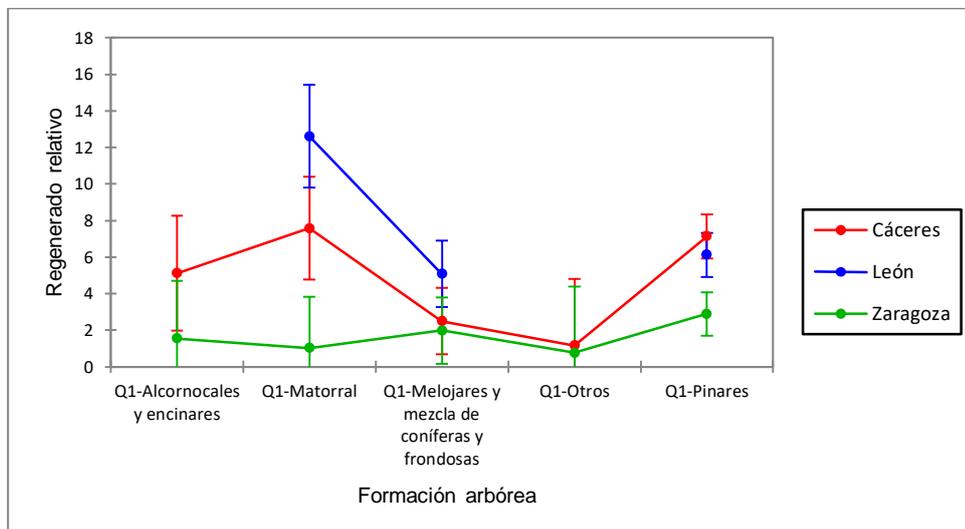


Figura 39. Regenerado relativo por ciudad y formación

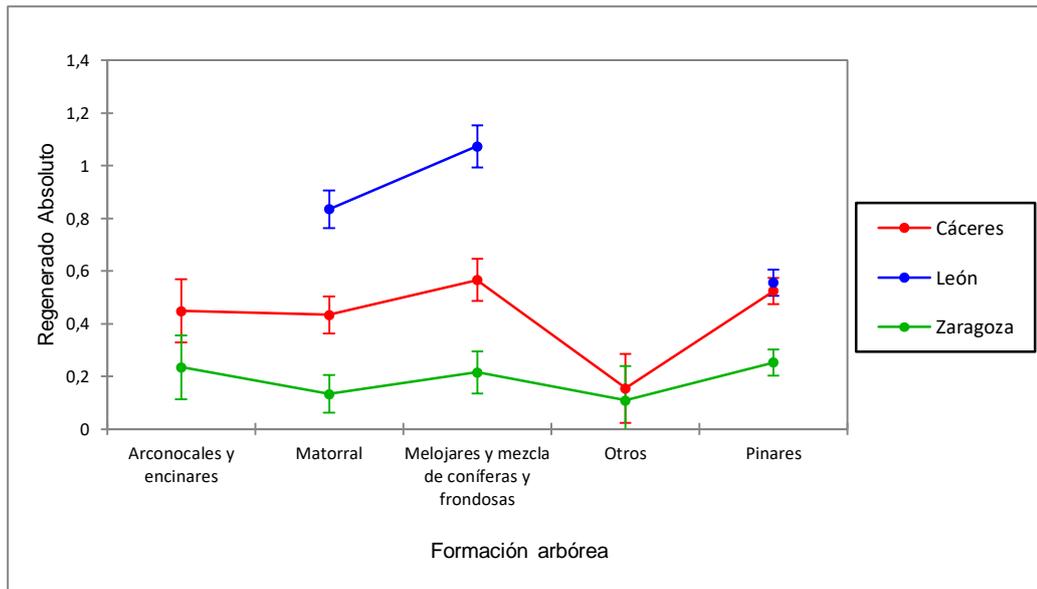


Figura 40. *Regenerado absoluto por ciudad y formación*

La **figura 40** muestra las interacciones entre tipos de formaciones vegetales e incendios en relación con el regenerado en términos absolutos. Como se aprecia claramente la regeneración de los matorrales y melojares es mucho más destacada en el caso del incendio de Quintana del Castillo. Mientras que en el caso de los pinares los niveles de regeneración para Acebo y Quintana del Castillo son similares y siempre superiores a los recogidos en Luna. En relación con la categoría otros, que incluye una gran variedad de formaciones (dehesas, eucaliptales y bosques de ribera) llama la atención que a pesar de la gran heterogeneidad y diferente representación espacial en los incendios muestran valores muy bajos y similares en los incendios de Luna y Acebo. En principio este aspecto podría relacionarse con el hecho de que son formaciones poco afectadas por el fuego.

5.5 Relaciones entre regeneración y características morfo-topográficas

Como hemos podido comprobar la regeneración ha sido distinta entre las diferentes zonas de estudio y el impacto de las variables morfo-topográficas en la regeneración forestal es uno de los puntos clave de este estudio por lo que a continuación analizaremos la relación entre ambos. Las variables morfo-topográficas empleadas van a ser pendiente, altura e índice SEI, que agrupa tanto pendiente como orientación.

En primer lugar, en el caso de Cáceres el regenerado absoluto está mínimamente explicado por la altura y por la pendiente pero no por el SEI. Aunque sean relaciones de muy poca intensidad hablando estadísticamente son significativas. Esto puede ser comprobado en la segunda parte de la **tabla 14** en la cual si el valor es menor que 0,05 tiene cierta relación estadística. El regenerado relativo no guarda vínculo con ninguna variable morfo-topográfica empleada. El regenerado absoluto y el relativo están ciertamente relacionados entre sí. Estas relaciones tan bajas en un lugar que tuvo una gran regeneración nos hace sospechar que el

regenerado no se ve mayoritariamente guiado por estas variables si no más que nada por el contexto bioclimático en el que se encuentran.

Correlation matrix (Spearman) / Group Ciudad-Caceres:					
Variabes	Altura	Pendiente	Índice SEI	Regenerado Absoluto	Regenerado Relativo
Altura	1	0,135	0,142	0,318	0,077
Pendiente	0,135	1	0,189	0,169	-0,002
Índice SEI	0,142	0,189	1	-0,019	0,113
Regenerado Absoluto	0,318	0,169	-0,019	1	0,765
Regenerado Relativo	0,077	-0,002	0,113	0,765	1
<i>Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05</i>					
p-values / Group Ciudad-Caceres:					
Variabes	Altura	Pendiente	Índice SEI	Regenerado Absoluto	Regenerado Relativo
Altura	0	0,078	0,063	0,000	0,316
Pendiente	0,078	0	0,013	0,027	0,977
Índice SEI	0,063	0,013	0	0,801	0,139
Regenerado Absoluto	< 0.0001	0,027	0,801	0	< 0.0001
Regenerado Relativo	0,316	0,977	0,139	< 0.0001	0
<i>Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05</i>					

Tabla 14. Relaciones entre regenerado y variables morfo-topográficas en Acebo (Cáceres). En negrita se resaltan aquellas correlaciones más elevadas

En el caso de Quintana del Castillo (León) no hay relación ninguna entre las variables de regeneración y las características morfo-topográficas a excepción del índice SEI con el regenerado relativo. También hay relación entre ambos regenerados pero esto es normal ya que no dejan de medir lo mismo aunque sea estadísticamente se obtengan de diferente manera.

El hecho de que en este incendio no encontremos a penas relación entre las variables y la regeneración es muy llamativo. Fue el que más regeneración de los tres presentó en todos campos y las correlaciones son prácticamente nulas. Esto refuerza las sospechas nombradas con anterioridad a cerca del clima ya que en este caso las precipitaciones están mucho más distribuidas a lo largo del año y tiene influencias de carácter oceánico.

Correlation matrix (Spearman) / Group Ciudad-Leon:					
Variabes	Altura	Pendiente	Índice SEI	Regenerado Absoluto	Regenerado Relativo
Altura	1	0,362	0,015	0,030	-0,073
Pendiente	0,362	1	-0,256	0,103	-0,232
Índice SEI	0,015	-0,256	1	0,006	0,319
Regenerado Absoluto	0,030	0,103	0,006	1	0,442
Regenerado Relativo	-0,073	-0,232	0,319	0,442	1
<i>Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05</i>					
p-values / Group Ciudad-Leon:					
Variabes	Altura	Pendiente	Índice SEI	Regenerado Absoluto	Regenerado Relativo
Altura	0	0,011	0,917	0,838	0,616
Pendiente	0,011	0	0,076	0,480	0,109
Índice SEI	0,917	0,076	0	0,965	0,026
Regenerado Absoluto	0,838	0,480	0,965	0	0,002
Regenerado Relativo	0,616	0,109	0,026	0,002	0
<i>Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05</i>					

Tabla 15. Relaciones entre regenerado y variables morfo-topográficas en Quintana del Castillo (León). En negrita se resaltan aquellas correlaciones más elevadas

En último lugar, en el caso de Luna (Zaragoza) hay una muy buena relación entre regenerado absoluto y relativo y hay cierto grado de relación entre pendiente y altura tanto con el regenerado relativo como absoluto y como en los anteriores casos aunque estadísticamente presenten un carácter significativo las relaciones son de poca intensidad. Se podría decir que es el único caso en el que encontramos esto pero a pesar de ello no deja de ser un caso aislado y de los 3 casos fue el que menos regeneración presentó tanto en valores absolutos como relativos.

Correlation matrix (Spearman) / Group Ciudad-Zaragoza:					
Variables	Altura	Pendiente	Índice SEI	Regenerado Absoluto	Regenerado Relativo
Altura	1	0,561	0,136	0,549	0,514
Pendiente	0,561	1	0,013	0,519	0,544
Índice SEI	0,136	0,013	1	-0,068	-0,032
Regenerado Absoluto	0,549	0,519	-0,068	1	0,971
Regenerado Relativo	0,514	0,544	-0,032	0,971	1
<i>Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05</i>					
p-values / Group Ciudad-Zaragoza:					
Variables	Altura	Pendiente	Índice SEI	Regenerado Absoluto	Regenerado Relativo
Altura	0	0,000	0,059	0,000	0,000
Pendiente	< 0.0001	0	0,856	< 0.0001	< 0.0001
Índice SEI	0,059	0,856	0	0,346	0,663
Regenerado Absoluto	< 0.0001	< 0.0001	0,346	0	< 0.0001
Regenerado Relativo	< 0.0001	< 0.0001	0,663	< 0.0001	0
<i>Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05</i>					

Tabla 16. Relaciones entre regenerado y variables morfo-topográficas en Luna (Zaragoza). En negrita se resaltan aquellas correlaciones más elevadas

El análisis de la relación entre regenerado y las variables morfo-topográficas nos hace llegar continuamente a la misma idea: No existe una relación destacable ni una lógica clara entre estas variables. La topografía a niveles generales no controla la regeneración. La regeneración esta mayormente condicionada por las características climáticas de la zona. Encontramos mayor regeneración en las zonas con una mayor cantidad de precipitación, como es el caso de Acebo (Cáceres) y Quintana del Castillo (León) respecto a Luna (Zaragoza). Esta regeneración también puede estar ciertamente influenciada por la distribución de las precipitaciones y la temperatura. En Quintana del Castillo (León), donde encontramos un mayor regenerado las precipitaciones están bastante distribuidas a lo largo del año y tanto la temperatura media mensual como la diferencia de temperatura entre meses es menor que en los otros casos en su gran parte causado por la influencia oceánica de esta zona de estudio.

A modo de resumen general se podría decir que los 3 incendios han seguido la misma tendencia, las formaciones que mejor han regenerado son las mismas en todos los incendios pero estas siendo superiores en Quintana del Castillo (León) seguido de Acebo (Cáceres). Destaca en un cómputo global la regeneración los matorrales encontrándose siempre en los valores más altos de regeneración seguido por los pinares. También cabe nombrar los melojares y la mezcla de coníferas y frondosas que en términos absolutos presentan los valores más altos pero en relativos decaen de manera muy notable. Los matorrales sub-atlánticos de los montes leoneses teniendo en cuenta tanto el regenerado relativo como el regenerado absoluto es la formación que más regenerado presenta.

Una vez analizados los resultados podemos confirmar nuestra hipótesis es decir, la regeneración vegetal es diferente en función de las características bioclimáticas de las zonas en la que se produce el fuego. Siendo estas mismas no solo un factor más, si no uno clave para la regeneración forestal post-incendio.

6. Conclusiones

Tras la realización de este trabajo se pueden obtener las siguientes conclusiones:

En un primer lugar llegamos a la conclusión que tanto los SIG para el análisis como la teledetección para la obtención de información son esenciales en la actualidad en temas relacionados con la vegetación. Tanto para el análisis de la misma como para la propia prevención de riesgos. Puede llegar a ser muy útiles para la toma de decisiones y protocolos de actuación.

También hemos llegado a la conclusión que la regeneración forestal no está guiada por la topografía si no que está fuertemente influenciada por la precipitación y la temperatura es decir, por factores más climáticos. El incendio que mejor regeneró fue el de Quintana del Castillo (León) seguido del de Acebo (Cáceres) y el que obtuvo un menor regenerado fue el de Luna (Zaragoza).

Entre ellos hay diferencias climáticas bastante notables. En un primer lugar nos encontramos con Luna y Acebo los cuales se corresponden con climas mediterráneos típicos y presentan unos veranos muy calurosos con temperaturas medias mensuales superiores a los 20°C y muy cercanas a los 25°C con unas precipitaciones prácticamente nulas en estos meses generando una gran aridez. Por otro lado, Quintana del Castillo, que presenta gran influencia del clima oceánico donde las temperaturas medias mensuales nunca llegan a sobrepasar los 20°C y los dos únicos meses que presentan aridez es muy leve. Las precipitaciones también están bastante mejor repartidas a lo largo de los meses del año.

Que la regeneración este afectada por la distribución de las precipitaciones a lo largo del año y no tanto por el volumen es muy visible en el caso de Acebo respecto al de Quintana del Castillo en el que las precipitaciones anuales son parecidas (≈ 700 mm) pero en el caso de Acebo presenta entre los meses de junio y septiembre una gran aridez mientras en Quintana del Castillo no. La temperatura media anual también puede llegar a ser un factor decisivo ya que tanto en el caso de Luna como en el de Acebo la temperatura media anual es $\approx 14^{\circ}\text{C}$ y en Quintana del Castillo apenas llega a los 10°C . La amplitud térmica anual no parece ser un factor a considerar ya que en todos casos ronda los 16°C .

Todo esto hace llegar a la idea de que en la Península Ibérica las zonas con influencia oceánica van a tender a tener una mayor regeneración forestal en caso de incendio tanto por la distribución anual de las precipitaciones con escasos meses áridos como por la temperatura media mensual. La regeneración mayoritariamente se guía por las características bioclimáticas y el tipo de comunidad vegetal y no por las de carácter morfo-topográfico.

7. Bibliografía

7.1 Recursos digitales

Agencia estatal de meteorología disponible en: http://www.aemet.es/es/datos_abiertos

Climate-data.org disponible en: <https://es.climate-data.org/>

Corine Land Cover disponible en: <https://datos.gob.es/es/catalogo/e00125901-spaignclc2018>

Imágenes satélites Landsat 2 disponibles en: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Mapa forestal de España MFE50 disponible en:

https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50_descargas_ccaa.aspx

Modelo digital de elevaciones disponible en:

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) disponible en:

<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access>

7.2 Recursos bibliográficos

Balice, Randy G; Miller, Jay D; Oswald, Brian P; Edminster, Carl; Yool, Stephen R. (2000). *Forest surveys and wildfire assessment in the Los Alamos Region; 1998–1999*. Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory.

Chuvieco Salinero, E. (2010). *Teledetección ambiental*. Madrid: Ariel.

Chuvieco Salinero, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Rialp.

Daniel Colson, George P. Petropoulos, Konstantinos P. Ferentinos. (2018). Exploring the Potential of Sentinels-1 & 2 of the Copernicus Mission in Support of Rapid and Cost-effective Wildfire Assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 262-276.

Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad del Gobierno de Aragón (2015) Informe técnico del incendio de Luna. Disponible en:

https://www.aragon.es/documents/20127/674325/INFORME_INCENDIO_LUNA-2015.pdf/d2a4f6ca-d012-6fec-bc77-f6b3d04eb1d8

Díaz-Delgado y Pons, (1999). Seguimiento de la regeneración vegetal post-incendio mediante el empleo del NDVI. Castaño S, Quintanilla A, *Teledetección, Avances y Aplicaciones*. Albacete, pp. 263-266.

Jiménez Ruano,A. (2013). *Aplicabilidad de las imágenes modis para la caracterización de zonas afectadas por incendios forestales en Aragón*. Universidad de Zaragoza, Zaragoza.

Knyazikhin, Y.; Glassy, J.; Privette, J.L.; Tian, Y.; Lotsch, A.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Morisette, J.T.; Votava, P.; Myneni, R.B.; Nemani, R.R.; Running, S.W. (1999): MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis. Disponible en:
https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf

M.A. Gilabert, J. González-Piqueras, J. García-Haro (1997) Acerca de los índices de vegetación. *Revista de la asociación Española de la teledetección*, 8-1997. Disponible en:
http://www.aet.org.es/revistas/revista8/AET8_4.pdf

Magrama (2015). Decenio 2006-2015. Los incendios forestales en España. Disponible en:
https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendios-decenio-2006-2015_tcm30-511095.pdf

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1987). Memoria del mapa de series de vegetación de España. Disponible en:
https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/memoria_mapa_series_veg.aspx

Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino conjuntamente con Aemet e Instituto de Meteorología de Portugal. Atlas climático ibérico. Disponible en:
<https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf>

Red Temática Nacional Efectos de los Incendios Forestales sobre los Suelos (2010). BOLETÍN DE FUEGORED. Red Temática Nacional Efectos de los incendios Forestales sobre los Suelos. Vol 1, 0. Disponible en: <https://sites.google.com/site/flammafgr/texto/volumen-1/volumen-1-numero-0-1-10>

Vicente córdoba, C y Legaz González, M.E. (1984). *Fitofísica ambiental*. Ed. Pirámide. Madrid.

8. Glosario

Índices de Vegetación (IV); parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilabert et al., 1997)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI); Propuesto por Rouse et al. (1974), es el índice de vegetación más ampliamente usado a lo largo de la historia de la teledetección. Este índice está basado entre la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo. Tiene un cálculo sencillo y al disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1) permite de manera muy sencilla la comparación de imágenes y la posibilidad de establecer umbrales. A pesar de ello tiene aunque tiene problemas de saturación en porcentajes de vegetación superiores al 60% y tiene una fuerte influencia del suelo.

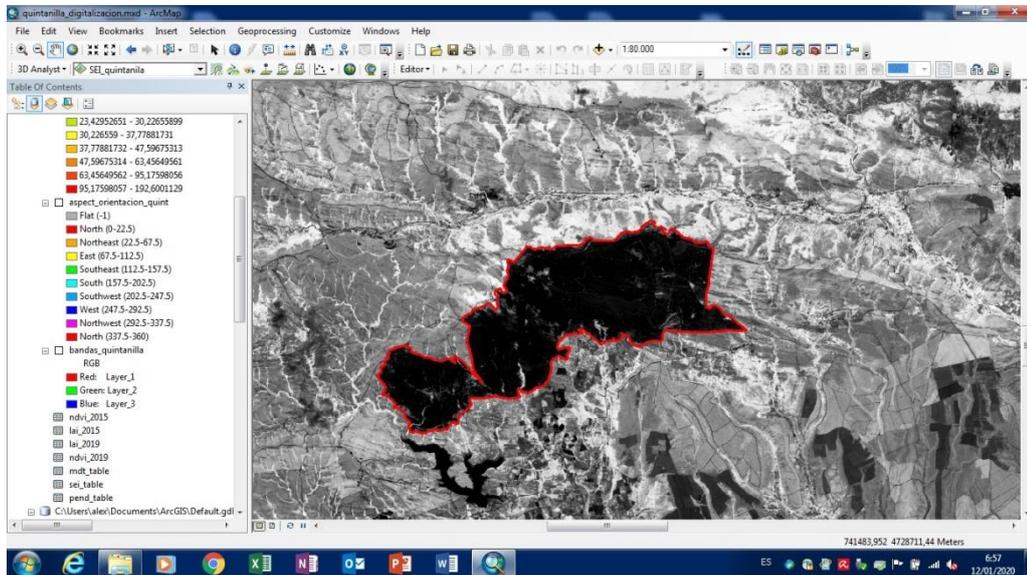
Índice de área foliar (LAI); El índice de área foliar (LAI) representa la proyección sobre el plano del suelo del área foliar, el área del conjunto de las hojas por unidad de suelo (Vicente y Legaz 1984). Es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación, por lo que es un parámetro realmente importante para cuantificar la productividad de los ecosistemas tras un incendio.

Índice de exposición solar (SEI); El SEI fue calculado utilizando los conjuntos de datos de ráster de pendiente y aspecto. El SEI reescala el aspecto a un eje norte/ sur y lo pondera por la inclinación de la pendiente. La fórmula es: $SEI = \text{Pendiente} * \text{Coseno} (\pi * (\text{Orientación} - 180) / 180)$ (Balice et al. 2000)

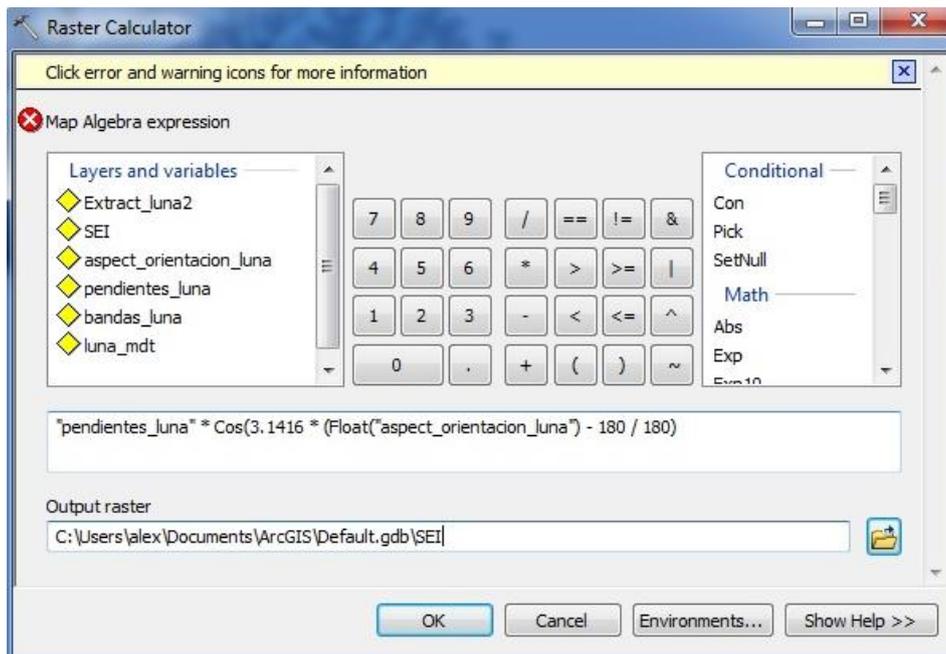
Sentinel 2; Es una misión de observación terrestre llevada a cabo por la Agencia Especial Europea dentro del programa Copérnico para desarrollar observaciones de la Tierra. Esto permite dar servicios como el seguimiento de la evolución de los bosques o los cambios en la corteza terrestre. Sigue una política de datos libre y en abierto y proporciona una imagen multiespectral con datos en 13 bandas como pueden ser el espectro visible o el infrarrojo cercano.

Índice de Gaussen; Índice empleado para determinar en un climograma la aridez. Un mes se considera árido cuando las precipitaciones en mm son menores que el doble de la temperatura en °C.

9. Anexos



Anexo 1. Ejemplo de delimitación mediante el NDVI.



Anexo 2. Ejemplo de fórmula aplicada en Raster Calculator.

TFG-Alejandro Moraleja Segura: Análisis de la regeneración vegetal post-incendio en diferentes contextos bioclimáticos mediante imágenes Sentinel

OBJETO	OBJETO_ID	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	1	17	61200	0.109816	0.169522	0.050006	0.126812	0.014836	2.155809
2	1	1	3600	0.306816	0.306816	0	0.306816	0	0.306816
3	4	14400	0.121917	0.305578	0.183661	0.222736	0.070979	0.905222	
4	4	115	414000	0.089766	0.429156	0.33939	0.154923	0.053196	15.518147
5	5	129	469800	0.081694	0.488873	0.406979	0.129226	0.050987	16.542969
6	6	127	457200	0.079452	0.122257	0.232055	0.117524	0.039661	14.862611
7	7	294	1058400	0.065283	0.21675	0.148467	0.104887	0.022537	30.778957
8	6	56	201600	0.082707	0.173154	0.090448	0.107389	0.016729	6.01381
9	10	36000	0.081211	0.218955	0.137384	0.132765	0.041463	0.378495	
10	10	40	144000	0.102186	0.143979	0.041793	0.117836	0.009517	4.70545
11	11	93	334800	0.091019	0.357213	0.266193	0.161609	0.053726	15.029613
12	12	59	212400	0.095847	0.194228	0.108381	0.125287	0.012419	7.430997
13	13	51	183600	0.105402	0.18709	0.081688	0.127825	0.01627	6.508866
14	14	68	244800	0.097561	0.148851	0.05129	0.119831	0.010643	7.930999
15	19	109	362400	0.104929	0.217243	0.112314	0.138077	0.022361	15.075421
16	16	30	108000	0.107445	0.433319	0.325873	0.167861	0.071383	5.035842
17	17	246	885600	0.095418	0.339664	0.243846	0.138987	0.038425	34.161254
18	10	91	32400	0.161594	0.171790	0.010196	0.255243	0.011194	2.027185
19	19	38	136800	0.092518	0.304036	0.211518	0.141397	0.041176	5.373093
20	20	30	108000	0.1032	0.12695	0.02285	0.114262	0.009524	3.427956
21	21	333	1198800	0.081997	0.274428	0.192431	0.115199	0.022208	39.424466
22	22	30	108000	0.127517	0.371385	0.243868	0.178255	0.054383	5.347658
23	23	127	457200	0.090794	0.193717	0.102923	0.1209	0.019012	15.354251
24	24	26	93600	0.112911	0.209413	0.177502	0.161978	0.049204	4.189541
25	25	123	442800	0.099498	0.28886	0.189363	0.135575	0.034391	16.675673
26	26	18	84000	0.105413	0.362013	0.2566	0.191176	0.079923	3.44117
27	27	21	7200	0.324748	0.491154	0.166406	0.399951	0.042003	0.733992
28	28	49	176400	0.107695	0.208778	0.101173	0.127078	0.015106	6.22879
29	29	241	867600	0.096537	0.285024	0.208987	0.095246	0.022877	22.954181
30	30	337	1213200	0.074453	0.254112	0.179659	0.145095	0.009245	49.965292
31	32	145	522000	0.061815	0.379017	0.317203	0.136126	0.061918	19.738341
32	33	31	111600	0.087214	0.155993	0.068779	0.125286	0.011288	3.490162
33	11	46800	0.096813	0.145099	0.048396	0.114316	0.013688	0.486193	
34	35	183	586800	0.082723	0.337555	0.254833	0.121726	0.032824	19.641316
35	36	536	1929600	0.098214	0.324961	0.226747	0.140513	0.030059	75.047008
36	17	14	50400	0.092468	0.182455	0.090787	0.116959	0.0302	1.624967
37	38	5	18000	0.107427	0.137165	0.029738	0.118253	0.011317	0.591287
38	39	24	84000	0.104741	0.209564	0.104823	0.141447	0.039389	3.284733
39	40	60	216000	0.108734	0.348993	0.240259	0.176455	0.012096	10.687282
40	41	12	43200	0.097895	0.281759	0.183894	0.189317	0.069934	2.031809
41	42	72	27000	0.093771	0.307357	0.213586	0.137659	0.053342	3.027487
42	43	15	54000	0.098046	0.126226	0.02818	0.110336	0.00095	6.65034
43	44	1	3600	0.234085	0.234085	0	0.234085	0	0.234085
44	44	8	28800	0.094541	0.280234	0.185693	0.144157	0.056945	1.53256
45	44	12	43200	0.099451	0.383802	0.284351	0.181335	0.08529	2.178923

Anexo 3. Ejemplo de tabla creada con estadísticas zonales.

OBJETO	OBJETO_ID	JOIN	PROV/CCAA	PROV/CCAA	NOM FORAB	Concretar_ciudad formacion	MEAN_1a_2015	MEAN_1a_2019	MEAN_mdvi_2015	MEAN_mdvi_2019	MEAN ALTURA	MEAN PEND	MEAN SEI	Q1	Q2	Q3	Regen	
1	1	296890	10	43	Melijoares	MelijoaresCaceres	0.96547370996	1.41129991030	0.45395692075	0.64304824899	536.39449324700	21.6313895640	-0.30034927425	Caceres				
2	2	296894	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.2269546993	0.60953861875	0.2463924802	0.39414415008	630.55712562900	33.3488842980	17.19797848850	Caceres				
3	3	296895	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.1546053379	0.60389083827	0.17803722647	0.37378420136	590.7264932800	34.7803719490	20.6126789000	Caceres				
4	4	296896	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.5737999612	0.44046129982	0.22856724627	0.30022583438	513.57445736000	20.1713735530	7.08417715583	Caceres				
5	5	296899	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.10014584810	0.46224156320	0.10797890499	0.30804658979	487.87029226800	14.8903603580	-6.13673272720	Caceres				
6	6	296901	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.04672374982	0.38953762562	0.09666726746	0.48779945129	363.30761398000	42.45183507130	-55.02565474700	Caceres				
7	7	296903	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.13048318907	0.48419378907	0.1157707008	0.30783002317				Caceres				
8	8	296908	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.04763423930	0.69549788834	0.08800513137	0.44055021554	472.59723134000	14.7737627120	-9.66339262498	Caceres				
9	9	296911	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.06504098126	1.0353117910	0.10384441399	0.5606817384	465.03287523200	12.2473343730	-8.00181722872	Caceres				
10	10	296913	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.0592990020	1.06475130759	0.0999551844	0.55305851159	497.3485684700	18.1722556730	11.7943846490	Caceres				
11	11	296915	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.13048318907	0.48419378907	0.1157707008	0.30783002317				Caceres				
12	12	296920	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.1366008168	0.9182374749	0.1550019482	0.5313570993	477.8710430500	13.369622030	-10.1762131010	Caceres				
13	13	296922	10	43	Alcornocales	AlcornocalesCaceres	1.24884591644	1.16200214578	0.49639442108	0.58951146509	497.0556493800	15.6204188720	-8.9729684651	Caceres				
14	14	297191	10	43	Melijoares	MelijoaresCaceres	0.1366737614	0.38137172638	0.260978678	0.57001138662	814.0623882000	18.6033549000	-3.196729594	Caceres				
15	15	297222	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.1932156512	0.5883597033	0.20921995156	0.4069947636	603.49478991600	17.484220070	27.7881533870	Caceres				
16	16	297234	10	43	Melijoares	MelijoaresCaceres	0.09171170237	0.86764203943	0.17484157073	0.5077896641	806.0054156600	24.3008523300	3.0000000000	Caceres				
17	17	297235	10	43	Melijoares	MelijoaresCaceres	0.41347412011	0.84053910217	0.2895299934	0.4857293164	645.62306279300	16.4992060090	8.9460138763	Caceres				
18	18	297372	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.205894809	0.4615895998	0.14915811771	0.2821188062	285.347306290	16.7047933050	1.991030602	Caceres				
19	19	298126	10	43	Melijoares	MelijoaresCaceres	0.49723525526	0.94318931304	0.31803721131	0.54482887372	678.99572316900	40.9452204090	33.74911044190	Caceres				
20	20	298405	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.0009896214	0.97981364429	0.04358464774	0.49786949191	662.21450818700	19.86878444130	32.2894688900	Caceres				
21	21	298408	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.0035488599	0.78192728489	0.0188389827	0.4361461718	556.4462646400	11.5044878180	16.6820379380	Caceres				
22	22	298405	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.00133810883	0.94949184564	0.10403011990	0.4095745399	577.6244069700	24.6881866250	6.4886839900	Caceres				
23	23	299652	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.09354203008	0.72218091921	0.09140823317	0.42377809503				Caceres				
24	24	299669	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.0956483849	0.66289489801	0.12207748040	0.3989342670	431.56917961200	13.0746664080	1.65776161609	Caceres				
25	25	300081	10	43	Pinar de pino pinaster	Pinar de pino pinaster Caceres	0.1572827366	0.5079913339	0.0768841851	0.341891364	454.2741219400	16.5485176480	2.6850870460	Caceres				
26	26	300369	10	43	Dehesas	DehesasCaceres	0.2585473806	0.3059249172	0.15782284737	0.25922209194	305.1231345000	6.9157520764	2.0879586171	Caceres				
27	27	300273	10	43	Matorral	MatorralCaceres	0.14663924853	0.34623881629	0.14315216571	0.27463358776	324.30916849300	11.9631077560	17.1988047889	Caceres				
28	28	300272	10	43	Dehesas	DehesasCaceres	0.2801634772	0.30788787861	0.14621281624	0.22617492757	286.44455078100	7.9995263377	5.61018179118	Caceres				
29	29	300274	10	43	Dehesas	DehesasCaceres	0.0866762293	0.3117825271	0.1170245012	0.26038537456	299.9130088100	11.4748898590	-0.3837183830	Caceres				
30	30	300275	10	43	Dehesas	DehesasCaceres	0.3368868623	0.3870173885	0.22151355445	0.2932857247	318.8458870500	11.9667852500	8.56968800211	Caceres				
31	31	300286	10	43	Dehesas	DehesasCaceres	0.2854878169	0.4145310088	0.1903885503	0.27357718410	296.3577184100	10.4997995100	-0.44091799705	Caceres				
32	32	300301	10	43	Eucaliptales	EucaliptalesCaceres	0.2704017913	0.2999998212	0.2008082899	0.2195183189	303.49155777200	9.48917447900	7.4117906009	Caceres				
33	33	300302	10															

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	6	24,581	4,097	71,073	< 0,0001
Error	431	24,844	0,058		
Corrected Total	437	49,425			
<i>Computed against model Y=Mean(Y)</i>					

Anexo 5. Resultado de los análisis anova

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	4	7,218	1,805	18,513	< 0.0001
Error	433	42,207	0,097		
Corrected Total	437	49,425			
<i>Computed against model Y=Mean(Y)</i>					

Anexo 6. Resultado de los análisis anova.