

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA VEGETACIÓN AFECTADA POR LOS INCENDIOS FORESTALES DE ARNEDILLO Y GALBÁRRULI (LA RIOJA) MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y SIG

Autor: Miguel Erdozáin de Blas

***Directores:
Raúl Hoffrén Mansoa
Raúl Postigo Vidal***

**Máster Universitario en
Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Te-
rritorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección**

Septiembre de 2025



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Los incendios forestales constituyen una de las perturbaciones más graves que afectan a los paisajes mediterráneos. Si bien el fuego ha sido históricamente un factor modelador de estos ecosistemas, su creciente magnitud y recurrencia en las últimas décadas lo han convertido en una amenaza cada vez más preocupante. Por ello, resulta fundamental comprender sus efectos sobre los espacios forestales, especialmente en lo que respecta a la recuperación de la vegetación a largo plazo. En este contexto, el presente trabajo analiza la evolución de la vegetación en dos áreas afectadas por incendios forestales en la comunidad autónoma de La Rioja: una ubicada en el norte, en el término municipal de Galbárruli, y otra en el sur, en el municipio de Arnedillo. Para llevar a cabo este análisis, se emplearon datos obtenidos en distintos momentos temporales mediante imágenes satelitales del programa Landsat (teledetección pasiva) y datos LiDAR (teledetección activa). La información fue procesada y analizada en entorno de programación geoespacial y SIG, lo que permitió caracterizar la evolución de la vegetación en ambas zonas afectadas a lo largo del tiempo (25 años en Galbárruli y 15 años en Arnedillo). Además, se evaluó la influencia de determinados factores ambientales, como la severidad del incendio y variables topográficas, sobre la recuperación post-fuego del vigor vegetal a largo plazo. Los resultados principales muestran que la recuperación del vigor vegetal fue notablemente alta y uniforme en Galbárruli, en contraste con Arnedillo, donde la recuperación fue menor y más irregular. Asimismo, la evolución de la estructura forestal en Galbárruli mostró un desarrollo más uniforme y consolidado en comparación con Arnedillo. La severidad del incendio se identificó como la variable más determinante en la recuperación post-fuego en ambos casos. En términos generales, se observó que la recuperación del incendio de Galbárruli fue más eficiente y homogénea que el de Arnedillo, donde la regeneración más desigual.

Palabras clave: Vigor vegetal, Estructura forestal, Índices de Vegetación, Incendios forestales, Ambientes mediterráneos.

Abstract

Wildfires are one of the most severe disturbances affecting Mediterranean landscapes. While fire has historically played a shaping role in these ecosystems, its increasing magnitude and frequency in recent decades have made it an increasingly concerning threat. Therefore, it is essential to understand its effects on forested areas, particularly with regard to long-term vegetation recovery. In this context, the present study analyzes the evolution of vegetation in two areas affected by wildfires in the autonomous community of La Rioja: one located in the north, in the municipality of Galbárruli, and another in the south, in the municipality of Arnedillo. To carry out this analysis, data collected at different points in time were used, including satellite imagery from the Landsat program (passive remote sensing) and LiDAR data (active remote sensing). The information was processed and analyzed within a geospatial programming and GIS environment, which allowed for the characterization of vegetation evolution in both affected areas over time (25 years in Galbárruli and 15 years in Arnedillo). In addition, the influence of certain environmental factors, such as fire severity and topographic variables, on the long-term post-fire recovery of vegetation vigor was evaluated. The main findings show that vegetation vigor recovery was significantly higher and more uniform in Galbárruli, in contrast to Arnedillo, where recovery was lower and more irregular. Similarly, the evolution of forest structure in Galbárruli shows a more consistent and consolidated development compared to Arnedillo. Fire severity was identified as the most determining variable in both cases. In general terms, it was observed that the recovery from the Galbárruli fire was more efficient and homogeneous than that of Arnedillo, where regeneration was more uneven.

Key Words: Vegetation vigor, Forest structure, Vegetation indices, Wildfires, Mediterranean environments.

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Contexto y justificación del estudio	5
1.2. Factores condicionantes de la dinámica de la regeneración post-incendio	5
1.3. Importancia del uso de Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) en el análisis post-incendio.....	6
2. OBJETIVOS	7
3. ÁREA DE ESTUDIO	8
3.1. Localización geográfica de Arnedillo y Galbárruli	8
3.2. Características ambientales y ecológicas.....	8
3.3. Delimitación de zonas afectadas y de control.....	9
4. MATERIALES Y MÉTODOS	10
4.1. Fuentes de información.....	10
4.1.1. Imágenes Landsat	10
4.1.2. Datos LiDAR del PNOA	12
4.1.3. Mapa Forestal de España (MFE)	12
4.2. Procesamiento de datos.....	13
4.2.1. Cálculo de índices multispectrales (NDVI y NBR).....	13
4.2.2. Cálculo del índice de severidad (dNBR)	14
4.2.3. Procesamiento de datos LiDAR y obtención de métricas	16
4.2.4. Obtención de variables topográficas.....	17
4.2.5. Clasificación de especies según su ocupación forestal.....	18
5. RESULTADOS	18
5.1. Severidad de los incendios.....	18
5.2. Porcentaje de ocupación de las especies forestales en 1990 y 2014	20
5.3. Variables topográficas generadas en 2016	22
5.4. Análisis del vigor vegetal y de la estructura forestal.....	30
5.4.1. Vigor vegetal	30
5.4.2. Estructura forestal en el año 2010 y 2016	38
5.5. Evolución post-fuego del vigor vegetal.....	46
5.6. Evolución post-fuego de la estructura forestal	52
5.7. Análisis de los factores condicionantes de la regeneración post-fuego	56
6. DISCUSIÓN.....	63
6.1. Utilidad de NDVI y dNBR.....	63
6.2. Comparativa de la recuperación del vigor vegetal post-fuego	64
6.3. Recuperación de la estructura de la vegetación post-fuego.....	66
6.4. Influencia de los factores topográficos y la severidad.....	68
7. CONCLUSIONES.....	71
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

Índice de figuras

Figura 1. Localización de los incendios de Arnedillo y Galbárruli.....	8
Figura 2. Localización y perímetro del incendio de Arnedillo.....	9
Figura 3. Localización y perímetro del incendio de Galbárruli.	10
Figura 4. Cálculo de índices multiespectrales (NDVI y NBR)	14
Figura 5. Código en R para la igualación de resolución y extensión de las imágenes.....	15
Figura 6. Código en R para el cálculo del dNBR.....	15
Figura 7. Código en R para la creación del MDE	16
Figura 8. Procesamiento de datos LiDAR y obtención de métricas.....	17
Figura 9. Código de Rstudio para generar pendiente y exposición.....	17
Figura 10. Severidad del incendio de Arnedillo (2001)	19
Figura 11. Severidad del incendio de Galbárruli (1991)	20
Figura 12. Exposición del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Arnedillo	22
Figura 13. Elevación del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Arnedillo	23
Figura 14. Pendiente del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Arnedillo	24
Figura 15. Radiación solar del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Arnedillo	25
Figura 16. Exposición del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Galbárruli	26
Figura 16. Elevación del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Galbárruli	27
Figura 17. Pendiente del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Galbárruli	28
Figura 18. Radiación solar del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Galbárruli	29
Figura 19. Vigor vegetal prefuego (25/07/2001) en Arnedillo	30
Figura 20. Vigor vegetal postfuego (29/10/2001) en Arnedillo.....	31
Figura 21. Vigor vegetal de 2010 en Arnedillo.....	32
Figura 22. Vigor vegetal de 2016 en Arnedillo.....	33
Figura 23. Vigor vegetal prefuego (19/06/1991) en Galbárruli	34
Figura 24. Vigor vegetal postfuego (09/10/1991) en Galbárruli.....	35
Figura 25. Vigor vegetal de 2010 en Galbárruli.....	36
Figura 26. Vigor vegetal de 2016 en Galbárruli.....	37
Figura 27. Altura máxima de Arnedillo en 2010.....	38
Figura 28. Altura máxima de Arnedillo en 2016.....	39
Figura 29. Densidad arbórea de Arnedillo en 2010.....	40
Figura 30. Densidad arbórea de Arnedillo en 2016.....	41
Figura 31. Altura máxima de Galbárruli en 2010	42
Figura 32. Altura máxima de Galbárruli en 2016	43
Figura 33. Densidad arbórea de Galbárruli en 2010	44
Figura 34. Densidad arbórea de Galbárruli en 2016	45
Figura 35. Impacto inmediato del fuego en el vigor vegetal en el incendio de Arnedillo (2001).....	46
Figura 36. Evolución a largo plazo del vigor vegetal previo al incendio de Arnedillo.....	47
Figura 37. Evolución a largo plazo del vigor vegetal en la zona del incendio de Arnedillo.....	48
Figura 38. Impacto inmediato del fuego en el vigor vegetal en el incendio de Galbárruli (1991)	49
Figura 39. Evolución a largo plazo del vigor vegetal previo al incendio de Galbárruli	50
Figura 40. Evolución a largo plazo del vigor vegetal en la zona del incendio de Galbárruli	51
Figura 41. Evolución de la altura máxima a medio plazo en Arnedillo	52
Figura 42. Evolución de la densidad arbórea a medio plazo en Arnedillo.....	53
Figura 43. Evolución de la altura máxima a medio plazo en Galbárruli.....	54
Figura 44. Evolución de la densidad arbórea a medio plazo en Galbárruli.....	55

Figura 45. Correlaciones entre el vigor vegetal a largo plazo y variables topográficas y severidad en el incendio de Arnedillo.	56
Figura 46. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y radiación solar en el incendio de Arnedillo.....	57
Figura 47. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y pendiente en el incendio de Arnedillo.....	57
Figura 48. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y exposición en el incendio de Arnedillo.....	58
Figura 49. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y severidad en el incendio de Arnedillo.....	58
Figura 50. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y elevación en el incendio de Arnedillo.....	59
Figura 51. Correlaciones entre el vigor vegetal a largo plazo y variables topográficas y severidad en el incendio de Galbárruli	60
Figura 52. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y pendiente en el incendio de Galbárruli.....	61
Figura 53. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y severidad en el incendio de Galbárruli.....	61
Figura 54. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y exposición en el incendio de Galbárruli.....	62
Figura 55. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y radiación solar en el incendio de Galbárruli.....	62
Figura 56. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y elevación en el incendio de Galbárruli.....	63

Índice de tablas

Tabla 1. Bandas Landsat 5 TM	11
Tabla 2. Bandas Landsat 8 OLI.....	11
Tabla 3. Rangos de valores dNBR propuestos por Key y Benson (2006), clasificados según su severidad.	15
Tabla 4. Porcentaje de ocupación de cada especie en la zona del incendio de Arnedillo en 1990 y 2014.....	20
Tabla 5. Porcentaje de ocupación de cada especie en la zona del incendio de Galbárruli en 1990 y 2014.....	21

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y justificación del estudio

Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas para los ecosistemas mediterráneos, incluyendo la comunidad autónoma de La Rioja, situada en España, donde la combinación de factores climáticos, edáficos y de uso del suelo propicia la propagación y recurrencia del fuego. Estudios realizados sobre la dinámica del fuego en La Rioja demuestran que la región presenta una elevada vulnerabilidad debido a la alta proporción de masas forestales de coníferas y matorrales, junto con una marcada estacionalidad en las precipitaciones que favorece la sequía estival y el riesgo de ignición (Fernández-Pascual et al., 2013). Además, en las últimas décadas, se ha registrado un aumento en la frecuencia e intensidad de incendios, asociada también al abandono rural y cambios en el uso del suelo, lo que incrementa la carga combustible y el riesgo de incendios extensos (González et al., 2015). Este contexto sitúa a La Rioja como un área propensa para el estudio y gestión de incendios forestales, dada la importancia de conservar su biodiversidad y la función ecosistémica de sus bosques (Alonso et al., 2019).

La regeneración de los ecosistemas post-incendio es un proceso complejo influenciado por múltiples factores, como la severidad del fuego, las características del suelo, las especies presentes y las condiciones climáticas. Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), entre las que se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección, ha emergido como una herramienta esencial para evaluar y monitorizar estos procesos de regeneración. (Marcos Rodrigues et al., 2024) Por ejemplo, los índices de vegetación derivados de imágenes multiespectrales satelitales permiten cuantificar la actividad fotosintética y la cobertura vegetal, facilitando la identificación de áreas afectadas y la evaluación de su recuperación (Riaño et al., 2003). Asimismo, la teledetección activa, entre las que figura la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) permite captar la estructura tridimensional de la vegetación, por lo que resulta ideal para monitorizar la regeneración de ecosistemas tras un incendio de forma detallada y estructurada (Gordon et al., 2017). Además, a través de la tecnología LiDAR se pueden obtener estadísticas estructurales como la altura del dosel, la densidad arbórea, los estratos vegetales y la heterogeneidad estructural (Szpakowski & Jensen, 2019).

En este contexto, el presente estudio se centra en los incendios forestales ocurridos en Arnedillo y Galbárruli (La Rioja), con el objetivo de caracterizar el estado actual de la vegetación y analizar los factores que condicionan su recuperación. A través de la integración de imágenes multiespectrales de Landsat, datos multitemporales LiDAR del PNOA, variables topográficas e información del Mapa Forestal de España, se pretende obtener una visión detallada de la recuperación post-incendio de la vegetación en distintas etapas temporales, así como la influencia del terreno en dicha recuperación, desde el momento posterior al incendio hasta fechas recientes

La aplicación de las TIG en este ámbito no solo permite una evaluación precisa de los impactos de los incendios, sino que también ofrece herramientas para la planificación de estrategias de restauración y gestión forestal. La información obtenida puede ser utilizada para identificar áreas prioritarias para la regeneración, evaluar la efectividad de las intervenciones realizadas y mejorar la toma de decisiones en la gestión de incendios forestales (Fernández-Manso et al., 2016).

1.2. Factores condicionantes de la dinámica de la regeneración post-incendio

La regeneración post-incendio es un proceso ecológico fundamental que determina la recuperación y resiliencia de los ecosistemas forestales tras la perturbación provocada por el fuego (Keeley, 2009). Este proceso implica la sucesión de cambios en la composición, estructura y función del ecosistema, y está condicionado por múltiples factores tanto bióticos como abióticos (Bond & Keeley, 2005).

Después de un incendio, la vegetación puede regenerarse mediante dos mecanismos principales: la regeneración por rebrote (vegetativo) y la regeneración por germinación (sexual) (Keeley, 2009). La regeneración por rebrote ocurre cuando las plantas sobreviven al fuego mediante estructuras

subterráneas o protegidas, como raíces, rizomas o cepas, que permiten la emisión de nuevos brotes rápidamente tras la perturbación (Keeley, 2009). En contraste, la regeneración por germinación se basa en la producción y activación de semillas que pueden haber permanecido en el banco de semillas del suelo o dispersarse desde áreas no afectadas (Bond & Keeley, 2005).

El éxito de estos mecanismos depende de la severidad del incendio, el tipo de vegetación y las condiciones ambientales posteriores (Pausas & Keeley, 2014). Por ejemplo, fuegos de alta severidad que destruyen la biomasa superficial y afectan profundamente el suelo pueden dificultar la regeneración por rebrote, favoreciendo especies germinadoras que dependen del banco de semillas (Pausas & Keeley, 2014). En este contexto, la severidad del incendio puede influir en la capacidad de rebrote y en la viabilidad de las semillas presentes en el banco del suelo, siendo los incendios de alta severidad más perjudiciales para las especies rebrotadoras (Turner et al., 1998). Por otro lado, la disponibilidad de agua, la temperatura y la topografía pueden también influir en la rapidez y calidad de la recuperación vegetal (Certini, 2005). La disponibilidad de agua en el periodo post-incendio es crucial para el establecimiento de plántulas y el rebrote de especies, especialmente en ecosistemas mediterráneos con veranos secos prolongados (Lloret et al., 2005). Proyectos como '*Contrasting Effects of Fire Severity on the Regeneration of Pinus halepensis and Resprouter Speci*' (García-Jiménez et al., 2017), confirman que los fuegos de alta severidad redujeron significativamente la capacidad de rebrote, mientras que la regeneración por semilla (germinadoras) adoptó un papel más destacado, alineándose con lo descrito por Pausas & Keeley (2014). Además, se presentan evidencias empíricas de cómo una mayor severidad (con daño profundo al suelo y biomasa superficial) dificulta el rebrote y favorece las estrategias de regeneración basadas en semillas.

Los estudios sobre la dinámica post-incendio han mostrado que la estructura inicial del bosque y su heterogeneidad espacial pueden favorecer una regeneración más rápida y diversa, ya que facilitan refugios para fauna, microclimas favorables y fuentes de semillas (Turner et al., 2016). En ecosistemas mediterráneos como los de La Rioja, la regeneración post-incendio está particularmente condicionada por el régimen climático mediterráneo, caracterizado por veranos secos que pueden limitar el crecimiento inicial, y por la adaptación evolutiva de muchas especies a la recurrencia de incendios (Keeley et al., 2011). La topografía también desempeña un papel importante, ya que zonas con orientación norte o en vaguadas suelen retener más humedad y favorecer una regeneración más rápida (Moody & Ebel, 2012). Por su parte, las características del suelo, como su textura, contenido en materia orgánica y capacidad de retención de agua, condicionan la velocidad y éxito del proceso regenerativo (Neary et al., 1999).

Finalmente, la estructura y composición previa de la vegetación pueden determinar en gran medida el tipo de regeneración posterior, ya que algunas especies poseen adaptaciones específicas que les permiten sobrevivir y regenerarse tras el fuego (Keeley et al., 2011). La disponibilidad de fuentes de semillas cercanas y la presencia de fauna dispersora son igualmente determinantes para la recolonización de las áreas quemadas (Nathan & Muller-Landau, 2000).

1.3. Importancia del uso de Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) en el análisis post-incendio

Las TIG engloban un conjunto de herramientas y métodos que permiten la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos espaciales. Su aplicación en el estudio y gestión de incendios forestales ha crecido significativamente en las últimas décadas debido a la necesidad de manejar grandes volúmenes de información georreferenciada para comprender la dinámica del fuego y sus impactos en el territorio (Goodchild, 2007).

La teledetección, como parte fundamental de las TIG, consiste en la adquisición de datos a distancia mediante sensores instalados en plataformas satelitales, aéreas (aviones, drones) o terrestres. Esta tecnología facilita la observación continua y a gran escala de los ecosistemas, permitiendo detectar cambios en la vegetación, el suelo y otros elementos ambientales antes, durante y después de un incendio (Wulder et al., 2012). Los sensores multiespectrales e hiperespectrales capturan información sobre la reflectancia

de la superficie terrestre en diferentes bandas del espectro electromagnético, lo que es fundamental para identificar áreas quemadas, evaluar la severidad del fuego y monitorear la recuperación vegetal a lo largo del tiempo (Chuvienco et al., 2012).

Por otra parte, la tecnología LiDAR complementa la teledetección pasiva proporcionando datos tridimensionales de alta resolución sobre la estructura del terreno y de los objetos que la conforman, como la vegetación. Los sensores LiDAR utilizan pulsos láser para medir distancias y generar nubes de puntos georreferenciadas en el espacio tridimensional que permiten representar con precisión la altura, densidad y distribución de la estructura forestal. Los sensores activos, como el LiDAR, permiten penetrar en el dosel forestal detectando huecos entre el follaje, lo que genera múltiples retornos que van desde la copa hasta el suelo (Lefsky et al., 2002). Esta característica permite mapear con precisión los perfiles verticales de la vegetación incluso en bosques densos, facilitando un análisis detallado de la estructura forestal (Means et al., 1999). A diferencia de los sensores pasivos, que solo capturan información superficial, LiDAR puede alcanzar el suelo bajo un dosel cerrado, con tasas de penetración que varían según la densidad y estructura arbórea, alcanzando entre un 10 % y un 30 % en ecosistemas complejos como la selva tropical (Asner et al., 2012). En el contexto del análisis post-incendio, el LiDAR permite evaluar las pérdidas estructurales ocasionadas por el fuego y monitorear la regeneración de la cubierta forestal con una precisión difícil de lograr con otros métodos (Lefsky et al., 2002; Hudak et al., 2007).

Los SIG actúan como plataformas integradoras que permiten combinar y analizar datos provenientes de diversas fuentes, incluyendo teledetección satelital, datos LiDAR, mapas temáticos y bases de datos ambientales. Mediante los SIG es posible realizar análisis espaciales complejos, modelar escenarios, elaborar mapas temáticos y apoyar la toma de decisiones en la gestión forestal y la planificación territorial (Longley et al., 2015). En el análisis post-incendio, los SIG facilitan la evaluación de variables condicionantes como la topografía, el tipo de vegetación, el uso del suelo y la accesibilidad, aspectos clave para diseñar estrategias de restauración y prevención (Keane et al., 2001).

La combinación de estas tecnologías permite no solo caracterizar el estado actual de la vegetación y la estructura forestal tras un incendio, sino también entender los procesos de recuperación y los factores que influyen en ellos. Esto es crucial para desarrollar planes de manejo forestal que favorezcan la resiliencia de los ecosistemas y reduzcan el riesgo de incendios futuros (Turner et al., 2003).

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la evolución de la vegetación en las áreas afectadas por los incendios forestales de Arnedillo y Galbarruli (La Rioja), así como identificar los factores que condicionan dicha recuperación mediante el uso de las TIG. De este modo, se pretende comprender la dinámica post-incendio acaecida en estos dos casos de estudio y contribuir a una mejor planificación y gestión forestal en zonas vulnerables a incendios forestales. A partir de este objetivo, se desprenden una serie de objetivos específicos que se enumeran a continuación:

- Delimitar y caracterizar el perímetro de los incendios a partir de datos oficiales y análisis espacial.
- Obtener y procesar imágenes multiespectrales satelitales correspondientes a diferentes momentos temporales: pre-incendio, post-incendio inmediato y seguimiento a medio y largo plazo.
- Calcular índices espectrales relevantes, como el NDVI y el dNBR, para evaluar la evolución del vigor vegetal y la severidad del incendio, respectivamente.
- Analizar la dinámica de la estructura forestal mediante datos ALS-LiDAR en dos momentos temporales, para detectar cambios en la biomasa y la regeneración de la vegetación.
- Integrar variables topográficas derivadas de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), como la propia elevación, la pendiente, la exposición y la radiación solar potencial, para estudiar su grado de influencia en la recuperación post-incendio.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Localización geográfica de Arnedillo y Galbárruli

Arnedillo y Galbárruli son dos localidades situadas en la comunidad autónoma de La Rioja, al norte de España (Figura 1). Ambas se encuentran en una zona caracterizada por la diversidad de ecosistemas forestales y la presencia de terrenos montañosos y valles.

Arnedillo se localiza en la parte sureste de La Rioja, en la comarca de Arnedo, dentro del valle del río Cidacos. Está situado aproximadamente a 850 metros sobre el nivel del mar. Esta ubicación la sitúa en una transición climática entre zonas mediterráneas y continentales, lo que influye en la composición y dinámica de su vegetación.

Galbárruli se encuentra al noroeste de La Rioja, en la comarca de Ezcaray, dentro del valle del río Oja, a una altitud de alrededor de 1,100 metros sobre el nivel del mar. Esta zona está más próxima a áreas montañosas de la Sierra de la Demanda, con un clima más atlántico que condiciona sus ecosistemas y la dinámica forestal local.

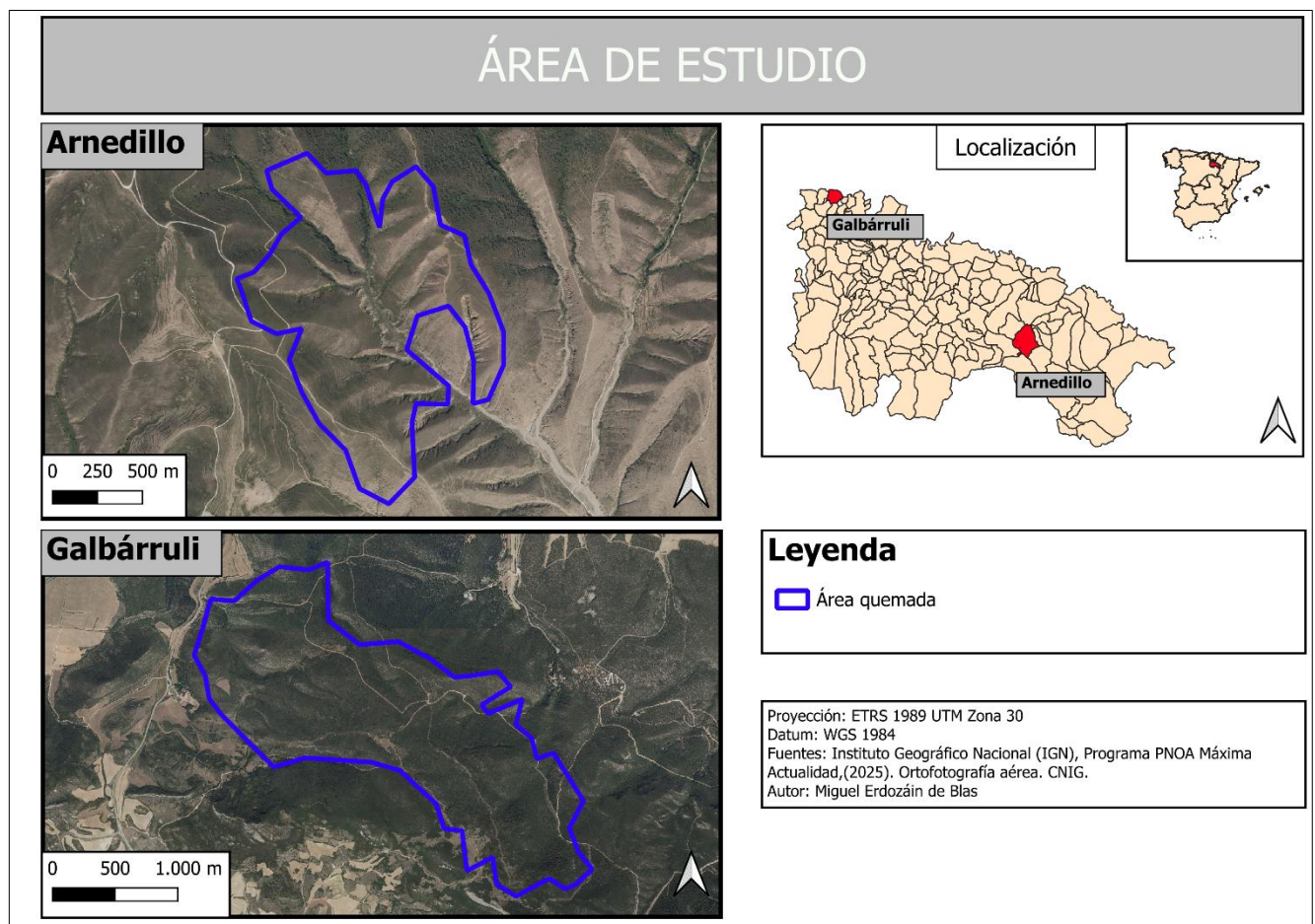


Figura 1. Localización de los incendios de Arnedillo y Galbárruli

3.2. Características ambientales y ecológicas

La zona de Arnedillo se caracteriza por un clima de transición entre mediterráneo continental y mediterráneo seco, con veranos calurosos y secos e inviernos fríos (AEMET, 2022). Esta combinación climática influye en la diversidad de ecosistemas presentes, donde predominan formaciones forestales de pino carrasco, pino silvestre y matorrales adaptados a la sequía (Moreno & Oechel, 2015). Los suelos son mayoritariamente calcáreos y presentan pendientes moderadas a fuertes, que condicionan la

retención de agua y el desarrollo vegetal (INE, 2020). La biodiversidad incluye especies vegetales y fauna adaptadas a las condiciones mediterráneas, con una alta sensibilidad a incendios forestales frecuentes (Pausas & Keeley, 2014).

La región de Galbárruli posee un clima más atlántico, con mayor influencia de la humedad y temperaturas más suaves, derivado de su proximidad a la Sierra de la Demanda (García-Ruiz et al., 2017). Los bosques en esta zona están compuestos principalmente por pinares de pino silvestre, además de formaciones mixtas con especies caducifolias como robles y hayas (Sánchez-Pinillos et al., 2019). Los suelos son en su mayoría silíceos, con alta capacidad de retención hídrica y presencia de humedad constante, favoreciendo una vegetación más densa y diversa (Neary et al., 1999). Esta área destaca por su relevancia ecológica debido a la riqueza de hábitats y su papel como refugio para diversas especies en la región (López-López et al., 2018).

3.3. Delimitación de zonas afectadas y de control

Los incendios forestales ocurridos en las zonas de Arnedillo y Galbárruli provocaron alteraciones significativas en los ecosistemas locales, afectando extensiones variables (Baroja., 2018). Para llevar a cabo el reconocimiento de las zonas afectadas de los incendios se utilizaron las imágenes más próximas al momento posterior al incendio, esto se realizó combinando las bandas correspondientes para la visualización de zonas quemadas, permitiendo así delimitar las zonas afectadas

El incendio de Arnedillo ocurrió exactamente en la sierra de hez el 8 de septiembre de 2001. La superficie afectada fue de 274,31 hectáreas (Figura 2). Por otra parte, el incendio ocurrido en Galbarruli de 1991 tuvo lugar el 30 de agosto de ese mismo año afectando a la sierra de la Demanda, en la parte de los montes de Galbarruli y Villaseca. Su área de acción fue de 666,38 hectáreas (Figura 3).

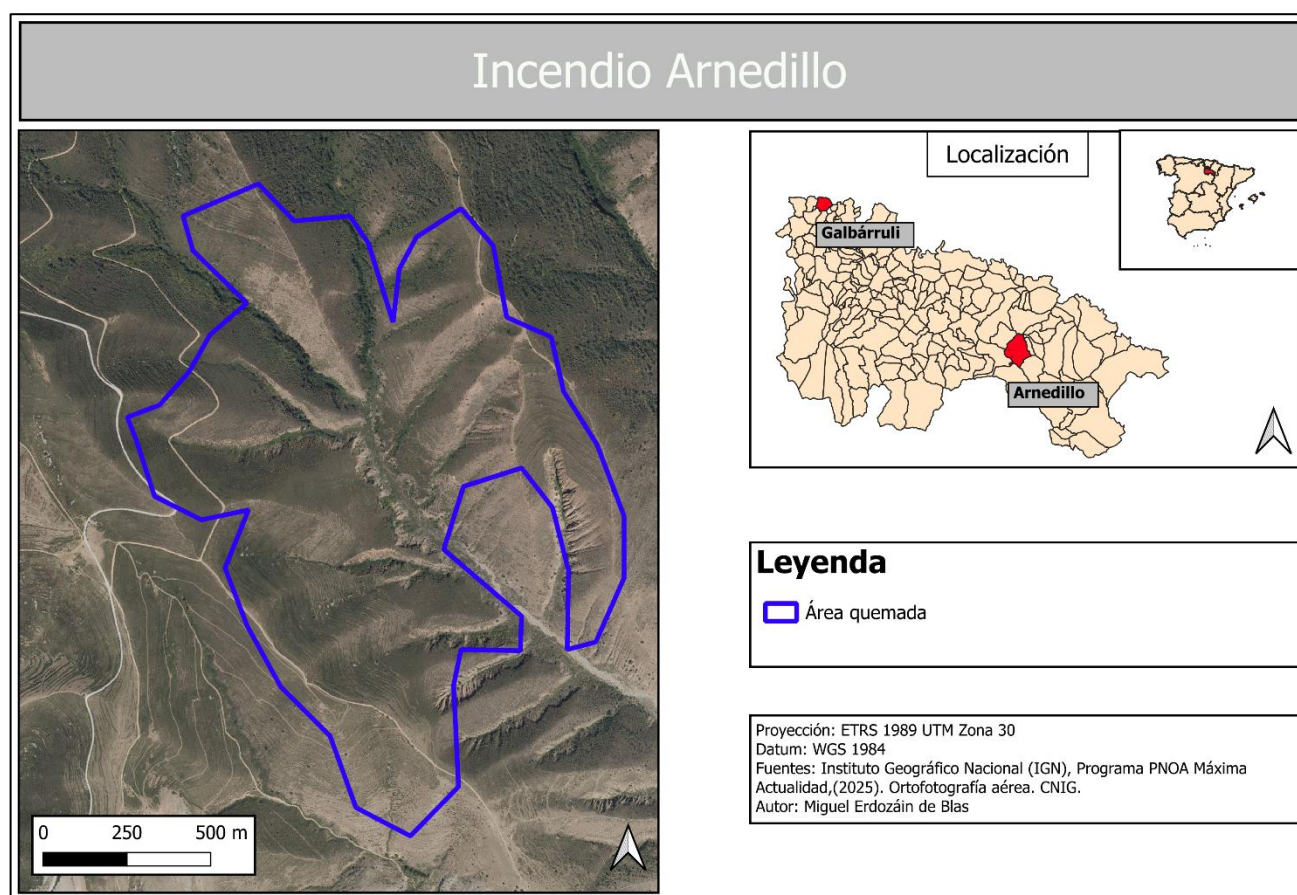


Figura 2. Localización y perímetro del incendio de Arnedillo.

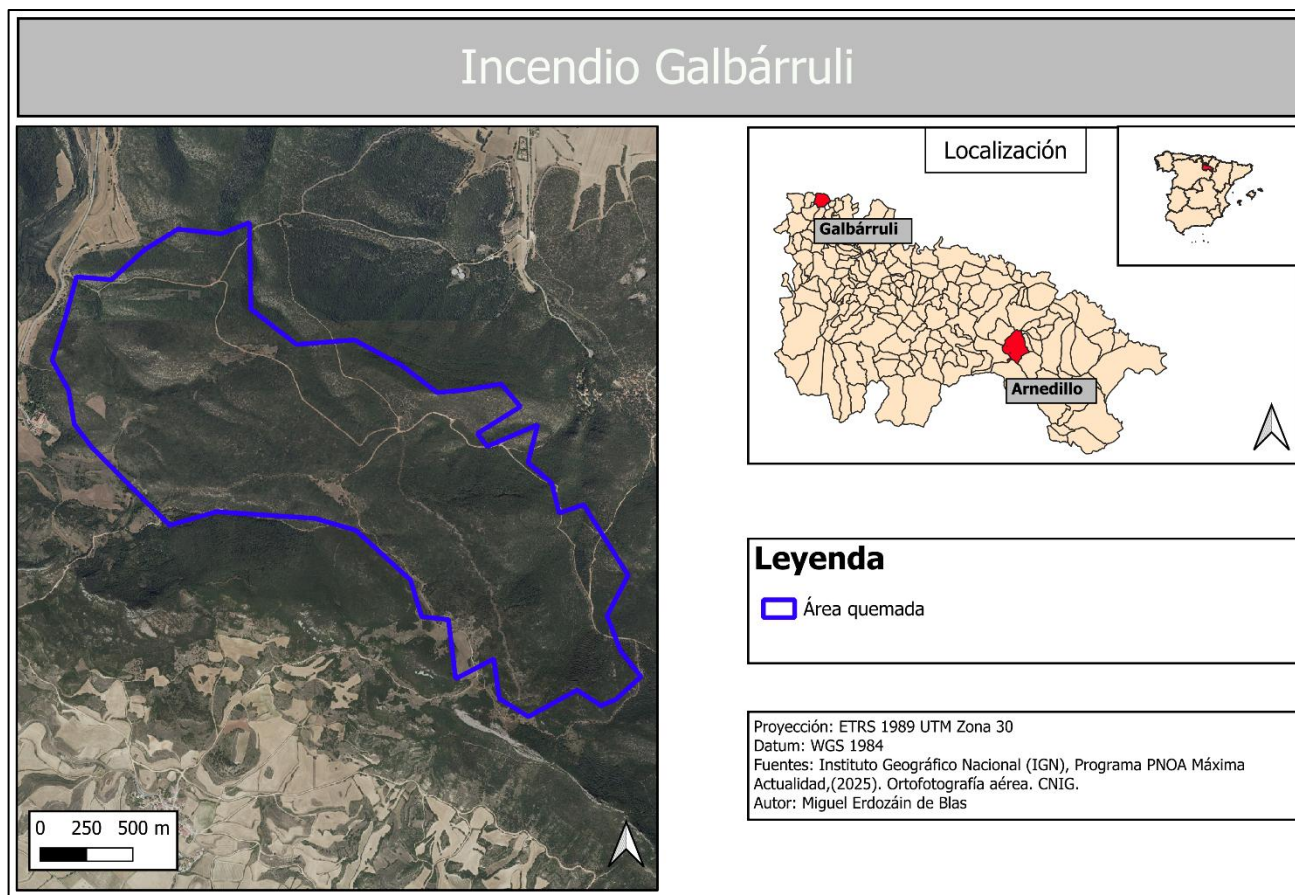


Figura 3. Localización y perímetro del incendio de Galbárruli.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Fuentes de información

4.1.1. Imágenes Landsat

Para el análisis multitemporal de la vegetación y la evaluación de los efectos de los incendios forestales en las zonas de Arnedillo y Galbárruli, se utilizaron imágenes satelitales del programa Landsat, obtenidas a través del portal USGS Earth Explorer. Este portal proporciona acceso libre a imágenes multispectrales con alta resolución espacial, adecuadas para el monitoreo ambiental y estudios de cambio en la cobertura vegetal.

Para el área de Arnedillo se descargaron imágenes del satélite Landsat 5 TM (Thematic Mapper) correspondientes a los años 2001, tanto justo antes como justo después del incendio, y del año 2010. Para el año 2016 se adquirieron imágenes del satélite Landsat 8 OLI (Operational Land Imager)

En el caso de Galbárruli, se emplearon imágenes Landsat 5 TM para el año 1991, antes y después del incendio, así como de 2010, complementadas con imágenes Landsat 8 OLI para 2016. Se descargaron todas las bandas espectrales disponibles en cada fecha para poder realizar la combinación adecuada entre las distintas bandas espectrales y el cálculo de índices multispectrales de vegetación como el NDVI, NBR y dNBR. La selección de estas fechas permitió capturar el estado de la cubierta vegetal antes del fuego, las alteraciones inmediatas posteriores y la evolución a medio y largo plazo.

El sistema Landsat 5 TM (Tabla 1) ha sido ampliamente utilizado en estudios de análisis de incendios forestales, demostrando su fiabilidad y utilidad (Viedma & Chuvieco, 2014; Chuvieco, 2016). Proporciona imágenes digitales en siete bandas espectrales (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio y térmico), con resolución espacial de 30×30 metros en todas las bandas excepto la

térmica (USGS, 2023). Su resolución temporal de 16 días permite realizar un seguimiento regular de las zonas afectadas, lo que lo hace idóneo para cartografiar perímetros de incendios y evaluar la severidad del daño vegetal (Viedma & Chuvieco, 2014).

Tabla 1. Bandas Landsat 5 TM

LANDAST 5 TM		
	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 - Visible Blue	0,45 - 0,52	30
Banda 2 - Visible Green	0,52 - 0,6	30
Banda 3 - Visible Red	0,63 - 0,69	30
Banda 4 - Near Infrared	0,76 - 0,9	30
Banda 5 - Near Infrared	1,55 – 1,75	30
Banda 6 - Thermal	10,40 – 12,50	120
Banda 7 - MidInfrared	2,08 – 2,35	30

Por otra parte, Landast 8 OLI se utilizó para observar la zona de los incendios a largo plazo exactamente en el año 2016. Este sensor ofrece imágenes multispectrales en ocho bandas con resolución de 30×30 metros, más una banda pancromática de 15 metros (USGS, 2023) (Tabla 2). Su alta calidad radiométrica y corrección atmosférica integrada facilita comparaciones precisas con datos históricos, permitiendo evaluar la recuperación de la vegetación tras los incendios (Viedma & Chuvieco, 2014).

Tabla 2. Bandas Landas 8 OLI

LANDAST 8 OLI		
	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 - Coastal Aerosol	0,435 - 0,451	30
Banda 2 - Blue	0,452 - 0,512	30
Banda 3 - Green	0,533 - 0,590	30
Banda 4 - Red	0,636 - 0,673	30
Banda 5 - Near Infrared (NIR)	0,851 - 0,879	30
Banda 6 - Short wave Infrared (SWIR) 1	1,566 - 1,661	30
Banda 7 - Short wave Infrared (SWIR) 2	2,107 - 2,294	30
Banda 8 - Panchromatic	0,503 - 0,676	15
Banda 9 - Cirrus	1,363 - 1,384	30
Banda 10 - TIR 1	10,6 - 11,19	100
Banda 11- TIR 2	11,50 - 12,51	100

En este estudio, se obtuvieron las imágenes más cercanas al incendio tanto previas al incendio como posteriores, para minimizar diferencias fenológicas de la vegetación, además de poder realizar el análisis de ambos incendios mediante las imágenes post-fuego.

Las imágenes obtenidas fueron seleccionadas cuidadosamente teniendo en cuenta la nubosidad, para evitar que estuviesen encima de los incendios, para ello se utilizó un filtrado en el que se obtuviesen imágenes con una nubosidad del 10 % o inferior. Además, las imágenes satelitales utilizadas fueron previamente procesadas para convertir los valores de nivel digital (Digital Number, DN) a valores de reflectividad en superficie. Esta transformación es esencial para que los datos capturados por los sensores sean comparables entre distintas escenas y fechas, independientemente de las condiciones atmosféricas o la geometría de adquisición. En el caso de las imágenes Landsat, esta conversión se realizó

aplicando el factor de ganancia multiplicativa y el sesgo aditivo proporcionados en los metadatos de la escena. La fórmula general utilizada fue:

$$Reflectividad = DN \times 0.0000275 - 0.2$$

4.1.2. Datos LiDAR del PNOA

Para el análisis de la estructura forestal y la regeneración post-incendio, se utilizaron datos LiDAR proporcionados por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). El PNOA se creó en 2004 con el objetivo de obtener ortofotografías aéreas digitales de todo el territorio español con un periodo de actualización periódico, actualmente de tres años (IGN-CNIG, 2024). Este proyecto cooperativo entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas está diseñado en consonancia con el espíritu de la Directiva INSPIRE, que busca capturar una sola vez la máxima información geográfica posible y compartirla abiertamente entre los agentes que la necesitan (IGN-CNIG, 2024).

Sin embargo, el PNOA consta de unas fases que se denominan coberturas que constituyen una parte fundamental, cuyo objetivo principal es proporcionar información geoespacial de alta resolución y precisión sobre el territorio español (IGN-CNIG, 2025). En el caso concreto de La Rioja, la primera cobertura del proyecto PNOA-LiDAR se realizó entre los años 2009 y 2011, obteniéndose datos con una densidad homogénea de 0,5 puntos por metro cuadrado. Posteriormente, la segunda cobertura se llevó a cabo en 2017, esta vez con una densidad mayor, alcanzando 2 puntos por metro cuadrado, lo que supuso una mejora significativa en la resolución espacial del terreno escaneado (IGN-CNIG, 2025). En cuanto al estado actual del proyecto, la tercera cobertura está en curso y se inició en 2021 en algunas comunidades autónomas, extendiéndose al resto en 2023, con previsión de finalización en 2025. Esta nueva campaña utiliza sensores más avanzados y se caracteriza por una densidad homogénea de 5 puntos por metro cuadrado, lo que permite representar con mayor detalle tanto la estructura del terreno como la vegetación (IGN-CNIG, 2025). Sin embargo, en el caso concreto de La Rioja, los datos correspondientes a esta tercera cobertura aún no han sido publicados oficialmente. Según el Instituto Geográfico Nacional (IGN), la previsión de disponibilidad para esta comunidad se sitúa en el primer semestre de 2025 (IGN-CNIG, 2025). No obstante, al momento de redacción de este trabajo, no se puede acceder ni descargar la nube de puntos ni los productos derivados de esta tercera cobertura para el territorio riojano.

Mediante el PNOA se descargó desde el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) las dos coberturas disponibles (primera y segunda cobertura LiDAR) para las zonas afectadas por los incendios de Arnedillo y Galbárruli. La información se obtuvo en formato de nube de puntos .laz, que es un formato comprimido y eficiente para almacenar datos LiDAR (Isenburg, 2014).

4.1.3. Mapa Forestal de España (MFE)

Para el análisis forestal en las áreas de estudio, se utilizaron los datos del Mapa Forestal de España (MFE) en dos escalas: 1:200.000 y 1:25.000. En el caso del incendio Arnedillo, se descargaron los datos correspondientes a La Rioja en las escalas 1:200.000 y 1:25.000, lo que permitió disponer de una cartografía detallada de la cobertura vegetal y uso del suelo para esta zona. Para Galbárruli, dada su ubicación limítrofe entre La Rioja y Castilla y León, se adquirieron los datos del MFE en escala 1:25.000 tanto de La Rioja como de Castilla y León para asegurar una completa cobertura del incendio y clasificación de las especies y coberturas vegetales.

Para ambos incendios, Arnedillo y Galbárruli, se descargó el MFE a escala 1:200.000 correspondiente a la Zona 6.3, que incluye La Rioja, parte de Castilla y León y también una fracción de Álava. Esto permitió no tener que realizar otra descarga correspondiente a la zona de Castilla y León, ya que se abarcaba por completo la zona del incendio de Galbárruli, sin la necesidad de realizar otra descarga.

El uso combinado de estas escalas se debe al año en el cual se realizó el MFE correspondiente pudiendo observar las especies forestales antes de los incendios (escala 1:200.000) y después de los incendios (escala 1:25.000).

4.1.4. Herramienta R

R es un entorno de software libre y un lenguaje de programación ampliamente utilizado en análisis estadístico y procesamiento de datos científicos (R Core Team, 2024). Para facilitar el desarrollo y la gestión de proyectos en R, se suele emplear RStudio, un entorno de desarrollo integrado (IDE) que mejora la experiencia del usuario mediante una interfaz gráfica amigable y herramientas adicionales para depuración, visualización y manejo de paquetes (RStudio Team, 2023). Gracias a su flexibilidad y amplia comunidad, R y RStudio cuentan con numerosos paquetes especializados para el análisis geoespacial, procesamiento de imágenes satelitales y datos LiDAR.

En el procesamiento de imágenes Landsat, R permite realizar desde la calibración radiométrica y corrección atmosférica hasta el cálculo de índices de vegetación, como el NDVI, y la clasificación supervisada o no supervisada (Gorelick et al., 2017). Paquetes como raster, terra y rgdal facilitan la carga, manipulación y análisis de imágenes multibanda, permitiendo extraer información valiosa para diferentes estudios.

Por otro lado, R es una herramienta esencial para el análisis de datos LiDAR, utilizando paquetes como lidR para la gestión, visualización y cálculo de métricas derivadas de las nubes de puntos LiDAR (Roussel et al., 2020). Estas métricas incluyen variables estructurales de la vegetación, como altura máxima, densidad de puntos, volumen de biomasa, y variables topográficas derivadas del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del Modelo Digital de Superficie (MDS).

El uso conjunto de R y RStudio para procesar imágenes Landsat y datos LiDAR permite integrar información espectral y estructural, facilitando análisis más completos en estudios de regeneración de ecosistemas, evaluación de riesgos de incendios y modelado ambiental (Féret et al., 2019).

4.2. Procesamiento de datos

4.2.1. Cálculo de índices multiespectrales (NDVI y NBR)

El procedimiento para obtener estos índices se realizó mediante el uso de R, donde se cargaron y combinaron las bandas espectrales descargadas anteriormente, necesarias para cada índice. Este proceso permitió generar mapas temáticos que reflejan la vegetación y la severidad del incendio en los distintos momentos temporales analizados (Figura 4).

Debido a las diferencias en la nomenclatura y posición de las bandas entre ambos satélites, se realizó una asignación específica para cada sensor.

En **Landsat 5** (años 1991, 2001 y 2010) las bandas empleadas son:

- **Banda 3 (RED – rojo):** radiación reflejada en el rango del rojo visible.
- **Banda 4 (NIR – Infrarrojo cercano):** radiación reflejada en el infrarrojo cercano.
- **Banda 7 (SWIR2 – Infrarrojo de onda corta 2):** radiación reflejada en el infrarrojo de onda corta.

En **Landsat 8** (año 2016) las bandas equivalentes son:

- **Banda 4 (RED):** rango rojo visible.
- **Banda 5 (NIR):** infrarrojo cercano.
- **Banda 7 (SWIR2):** infrarrojo de onda corta.

Una vez asignadas la nomenclatura y posición de las bandas de los dos sistemas Landsat, se realizó el cálculo de ambos índices.

- **Índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)**

El NDVI se calculó para todas las imágenes obtenidas: pre-fuego, post-fuego inmediato, post-fuego a medio plazo (2010) y post-fuego a largo plazo (2016). Se utilizó la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Este índice refleja la salud y densidad de la vegetación, donde valores altos indican vegetación vigorosa.

▪ Índice NBR (*Normalized Burn Ratio*)

El NBR se calculó para las imágenes pre-fuego y post-fuego inmediato a partir de la siguiente fórmula:

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

El NBR es útil para identificar áreas quemadas y evaluar la severidad del incendio, con valores bajos indicando zonas afectadas.

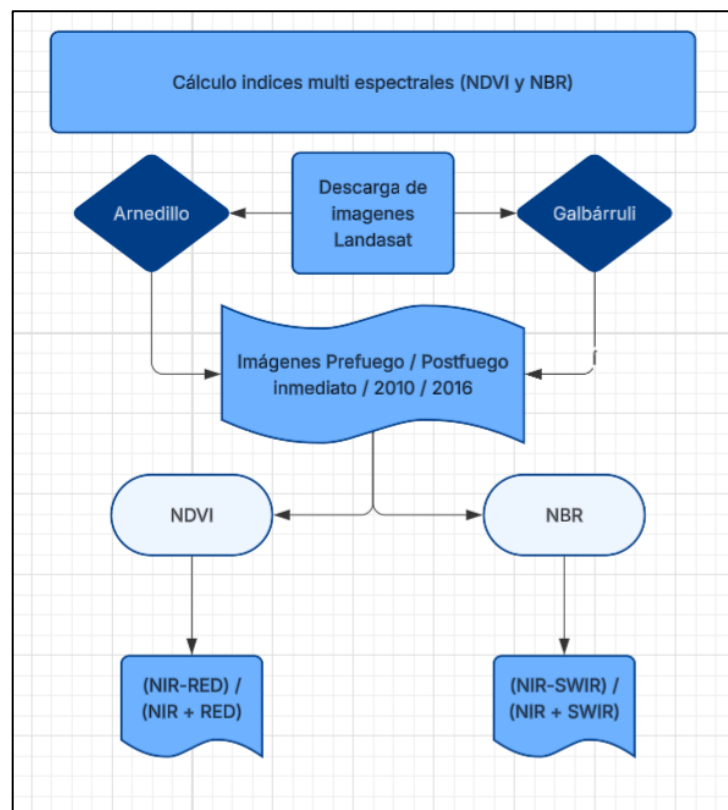


Figura 4. Cálculo de índices multispectrales (NDVI y NBR)

4.2.2. Cálculo del índice de severidad (dNBR)

Para evaluar la severidad de ambos incendios se ha calculado el índice diferencial de severidad (dNBR), que cuantifica el cambio en el índice de quemado normalizado (NBR) entre el periodo preincendio y postincendio. Este índice es ampliamente utilizado para medir el impacto del fuego sobre la vegetación y el suelo, ya que refleja la pérdida de biomasa y daños en la cubierta vegetal (Key & Benson, 2006).

El cálculo se ha realizado como en el paso anterior, mediante R, utilizando las imágenes Landsat correspondientes a los periodos preincendio y postincendio inmediato de cada área de estudio. Primero, se ha realizado una igualación espacial para asegurar que las imágenes de NBR postincendio inmediato y preincendio tengan la misma resolución espacial y extensión, ya que las diferencias en estos parámetros pueden provocar errores en la comparación directa. Para ello, se ha empleado la función `resample`

con el método de interpolación bilineal para ajustar la imagen postincendio a la resolución y extensión de la imagen preincendio (Figura 5).

```
# Igualar resolución y extensión de la imagen postfuego a la prefuego
nbr_post_aligned <- resample(nbr_post, nbr_pre, method = "bilinear")
```

Figura 5. Código en R para la igualación de resolución y extensión de las imágenes

Una vez alineadas, el índice dNBR se ha obtenido restando pixel a pixel la imagen post-incendio (NBR post) de la imagen pre-incendio (NBR pre) (Figura 6).

```
# Calcular dNBR
dnbr <- nbr_pre - nbr_post_aligned
```

Figura 6. Código en R para el cálculo del dNBR

Esta diferencia resalta las áreas con mayor pérdida de vegetación y daño provocado por el fuego, donde valores altos de dNBR indican una mayor severidad del incendio.

El proceso se ha aplicado exclusivamente a las imágenes pre y post incendio, ya que el interés principal es analizar el impacto directo del fuego y no la evolución posterior, que trataría de la evolución de la vegetación.

Para clasificar los valores de dNBR en distintas categorías de severidad, se han seguido los umbrales propuestos por Key y Benson (2006) en el marco del protocolo Landscape Assessment desarrollado por el Servicio Forestal de Estados Unidos (USDA Forest Service). Estos umbrales han sido adoptados y estandarizados por programas como el MTBS (Monitoring Trends in Burn Severity), y permiten interpretar la respuesta del ecosistema post-incendio en función del cambio espectral detectado por sensores remotos.

Los rangos empleados en este trabajo se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Rangos de valores dNBR propuestos por Key y Benson (2006), clasificados según su severidad.

Rango de dNBR	Clasificación de severidad
< -0.10	Ganancia de vegetación
-0.10 a 0.095	Sin cambio aparente
0.095 a 0.29	Baja severidad
0.29 a 0.485	Severidad moderada-baja
0.485 a 0.68	Severidad moderada-alta
0.68 a 0.875	Alta severidad
0.875 a 1.07	Muy alta severidad

Esta clasificación permite distinguir espacialmente las distintas intensidades del fuego y su impacto sobre la cubierta vegetal, para los dos incendios de interés.

4.2.3. Procesamiento de datos LiDAR y obtención de métricas

Para el tratamiento de los datos LiDAR de las zonas afectadas por los incendios en Arnedillo y Galbárruli, se ha seguido el procedimiento sistemático típico de los datos LiDAR:

- **Creación de LAS Datasets:** En ArcGIS PRO se generaron dos conjuntos de datos LAS, uno para cada cobertura. Se verificaron las propiedades y se calcularon las estadísticas básicas (densidad de puntos y clases) para caracterizar los datos.
- **Clasificación y filtrado:** Aunque las nubes de puntos ya estaban clasificadas, se utilizó la herramienta ‘LasTools’ para separar los ecos del suelo del resto de los retornos, creando archivos con el sufijo “_clasificado”. Este proceso de clasificación se realizó gracias a la utilización del algoritmo de clasificación “lasground”.
- **Visualización:** Se visualizaron los LAS Datasets en ArcGIS PRO para comprobar la clasificación.
- **Normalización:** Se normalizaron las alturas de los puntos LiDAR para limitar la altura a un rango entre 0 y 40 metros, facilitando el análisis comparativo y la generación de modelos digitales normalizados. Este proceso se realizó mediante la herramienta LasTools, usando específicamente el algoritmo de clasificación “lasheight”.
- **Generación del MDE:** Para la obtención del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de las zonas de estudio, se utilizó la nube de puntos LiDAR clasificada de ambas áreas (Arnedillo y Galbárruli) para las dos coberturas disponibles. El MDE se generó a partir de estas nubes de puntos mediante un script en R que permitió transformar la información de elevación en un raster con una resolución espacial de 2 metros.

El proceso se llevó a cabo mediante el paquete ‘terra’ utilizando la función ‘rasterize_terrain()’ con el algoritmo de interpolación ‘knnidw()’ para asegurar una estimación precisa del terreno. Este procedimiento permitió obtener un modelo continuo y detallado de la superficie terrestre, fundamental para el análisis topográfico y la integración con otros datos espaciales.

El script empleado se presenta en la Figura 7.

```
# Crear un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con resolución de 2 metros  
mde <- rasterize_terrain(las, res = 2, algorithm = knnidw())
```

Figura 7. Código en R para la creación del MDE

Además, cabe destacar que el MDE también podría haberse descargado directamente desde el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), donde están disponibles modelos digitales de elevación ya elaborados para cada una de las coberturas LiDAR y para ambas zonas de incendio. Esta opción habría facilitado la obtención rápida del MDE sin necesidad de procesamiento adicional, aunque la generación propia del modelo permite mayor control sobre la resolución y el método de interpolación empleado.

A continuación, lo último que se realizó fue el cálculo de las métricas LiDAR. Estas, fueron generadas en el entorno de R. A partir de los archivos de la nube de puntos clasificadas y normalizadas correspondientes a la primera y segunda cobertura LiDAR del área de estudio, se procedió a su lectura, comprobación y fusión en un único archivo para facilitar el análisis. Posteriormente, mediante el paquete ‘lidR’ (Roussel, et al., 2020), se calcularon diversas métricas sobre una cuadrícula de 5 metros de resolución, entre ellas la altura media, máxima y mínima de la vegetación, diferentes percentiles de altura y el porcentaje de puntos por encima de 4 metros, como indicador de la densidad arbórea. Este proceso permitió extraer información estructural del terreno y la vegetación (Figura 8).

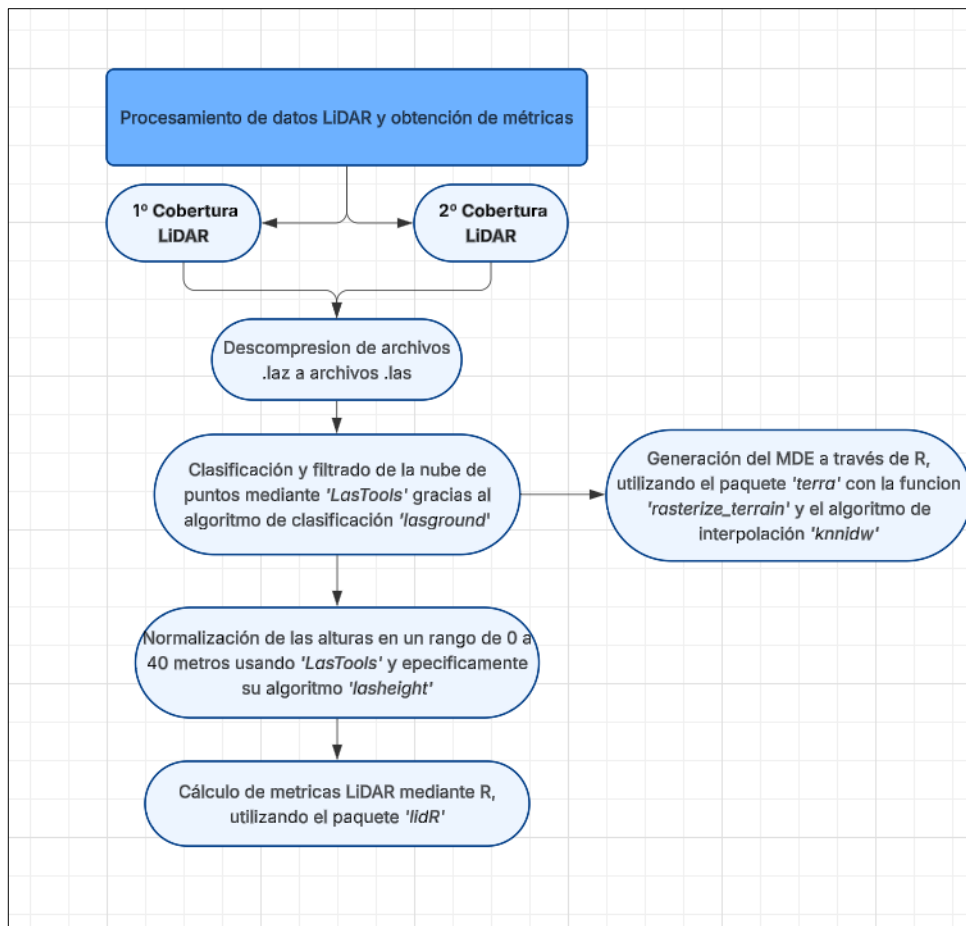


Figura 8. Procesamiento de datos LiDAR y obtención de métricas

4.2.4. Obtención de variables topográficas

A través del MDE (Modelo Digital de Elevaciones), se pudieron crear las diferentes variables topográficas de interés mediante el uso de R.

Para ello se utilizó el paquete ‘terra’ (Hijmans, 2025), que permite derivar a partir del MDE diferentes atributos para el análisis del terreno. En este caso calculamos la pendiente y la exposición:

- **Pendiente (*slope*):** Expresada en grados, indica la inclinación del terreno en cada píxel.
- **Exposición (*aspect*):** Expresada en grados, representa la orientación o dirección a la que mira la pendiente
- **Radiación solar:** Expresada en energía recibida por unidad de superficie, es decir Wh/m², además indica la energía solar total.

El código aplicado en R fue el que se observa en la Figura 9. para obtener la pendiente y la exposición

```

# Derivar variables topográficas con terra
pendiente <- terrain(mde, v = "slope", unit = "degrees")
exposicion <- terrain(mde, v = "aspect", unit = "degrees")
# Pendiente en grados
# Orientación

```

Figura 9. Código de Rstudio para generar pendiente y exposición

Sin embargo, para el cálculo de la radiación solar se utilizó ArgisPRO, mediante la herramienta de ‘Area Solar Radiation’. Para realizar este proceso se calculó la radiación para las fechas de interés del año del incendio, para ello en el incendio de Arnedillo usamos las fechas comprendidas entre el 1 de julio al 30 de septiembre y para Galbárruli del 1 de junio al 31 de agosto, cada uno de ellos se calculó

utilizando un promedio de 14 días. Los parámetros calculados son esenciales, ya que influyen en la severidad del incendio y en la regeneración de la vegetación.

4.2.5. Clasificación de especies según su ocupación forestal

Para este paso se han utilizado los Mapas Forestales de España (MFE) a escalas 1:200.000 (1990) y 1:25.000 (2014) para las zonas de los incendios de Arnedillo y Galbarruli. A partir de estos MFE se cargaron los datos en RStudio, donde se generaron mapas temáticos que permitieron visualizar la distribución espacial de las especies presentes en cada área.

Posteriormente, se llevó a cabo la clasificación de las especies. Esta clasificación se realizó mediante los diccionarios de rótulos para el MFE de 1990 y el diccionario de especies para el MFE de 2014, los cuales contienen la identificación y nomenclatura de las especies forestales presentes. Con esta clasificación permite determinar qué zonas ocupan cada especie en cada uno de los MFE y para cada incendio.

5. RESULTADOS

5.1. Severidad de los incendios

Incendio de Arnedillo

El análisis espacial del índice dNBR correspondiente al incendio de Arnedillo revela una marcada diferenciación entre dos zonas del área afectada, lo que evidencia una respuesta heterogénea del ecosistema al paso del fuego (Figura 10).

En la zona sur, los valores de dNBR son predominantemente negativos o cercanos a cero, lo que indica principalmente dos tipos de respuesta: por un lado, una ganancia de vegetación tras el incendio (valores $dNBR < -0.10$), y por otro, ausencia de cambio significativo en la cobertura vegetal.

En contraste, la zona norte presenta valores positivos de dNBR, aunque mayoritariamente dentro de rangos bajos de severidad. Se identifican zonas clasificadas como severidad muy baja, baja y moderada-baja, con apariciones muy puntuales de severidad moderada-alta.

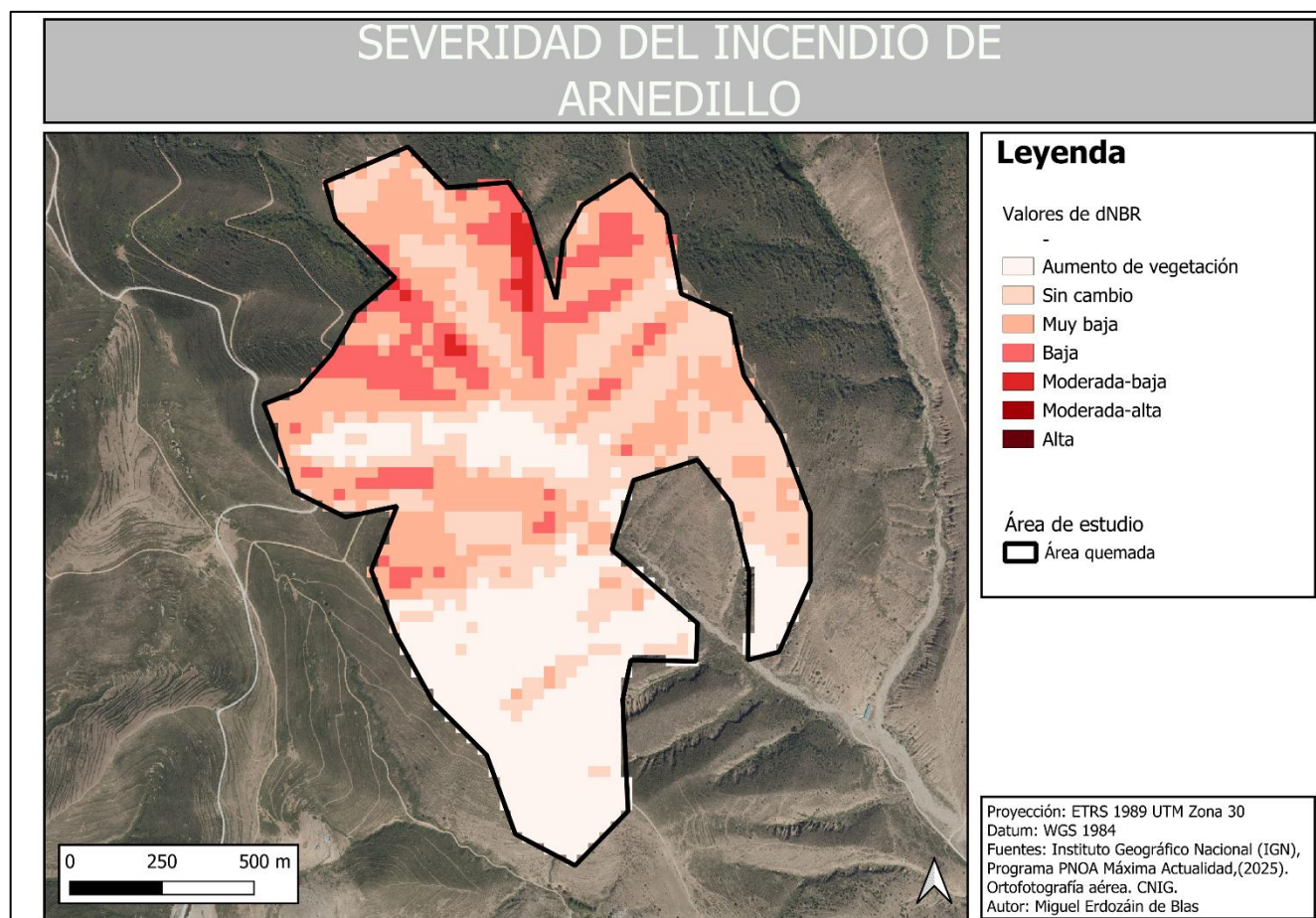


Figura 10. Severidad del incendio de Arnedillo (2001)

Incendio de Galbárruli

El análisis del incendio ocurrido en Galbárruli muestra una distribución bastante uniforme de la severidad, con una predominancia clara de valores de severidad moderada-alta según el índice dNBR (Figura 11). Esta categoría abarca la mayor parte de la superficie afectada, lo que indica que el fuego tuvo un impacto considerable sobre la vegetación en amplias zonas del perímetro analizado.

Además, se observan numerosas áreas con valores correspondientes a alta severidad, distribuidas de forma relativamente recurrente a lo largo del área quemada. Estas zonas indican una pérdida intensa de vegetación y sugieren un comportamiento del fuego de mayor intensidad en esos sectores.

En la zona sur del incendio, se aprecia una leve diferenciación, donde emergen áreas aisladas clasificadas como de severidad baja o muy baja. No obstante, estas porciones son de extensión reducida y tienen un impacto visual y espacial limitado dentro del conjunto del incendio, sin representar un patrón significativo a gran escala.

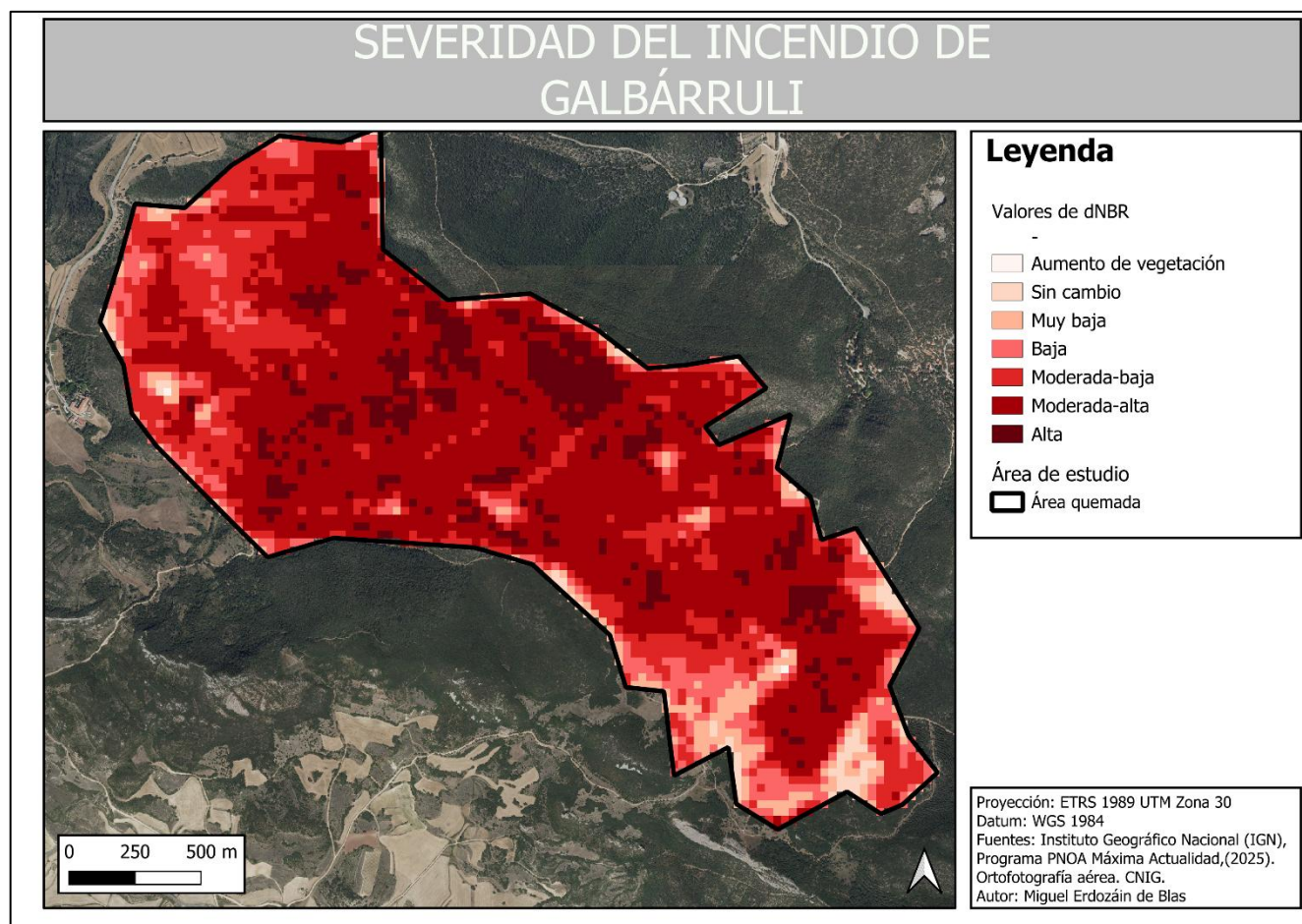


Figura 11. Severidad del incendio de Galbárruli (1991)

5.2. Porcentaje de ocupación de las especies forestales en 1990 y 2014

En la Tabla 4 se aprecia que en Arnedillo se ha producido un cambio completo de la ocupación de las especies que había en el año 1990 con respecto a las de 2014. Por su parte, en Galbárruli (Tabla 5) se observa que especies como el *Quercus ilex* ha aumentado su ocupación comparando 1990 con 2024, aunque ya era la especie dominante, ha seguido aumentando la colonización de la gran mayoría de la zona. No obstante, otras especies como los pinos siguen presentes aunque en menor cantidad.

Tabla 4. Porcentaje de ocupación de cada especie en la zona del incendio de Arnedillo en 1990 y 2014

Especie	1990	2024
<i>Cistus laurifolius</i>	54,4 %	0 %
Lasto-timo-aliagar	45,6 %	0 %
Sin datos	0 %	97,62 %
<i>Quercus pyrenaica</i>	0 %	2.38 %

Tabla 5. Porcentaje de ocupación de cada especie en la zona del incendio de Galbárruli en 1990 y 2014

Especie	1990	2024
Mezcla de <i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus ilex rotundifolia</i>	87,4 %	0 %
Mezcla de varias especies del género <i>Pinus</i>	11,3 %	0 %
<i>Quercus coccifera</i>	1,33 %	0 %
<i>Quercus ilex</i>	0 %	96,3 %
<i>Quercus faginea</i>	0 %	1,61 %
<i>Pinus nigra</i>	0 %	1,05 %
Sin datos	0 %	0,668 %
<i>Juniperus oxycedrus</i>	0 %	0,368 %
<i>Pinus pinaster</i>	0 %	0,145 %

5.3. Variables topográficas generadas en 2016

Incendio de Arnedillo

La exposición en Arnedillo (Figura 12) muestra que, en la parte este del área, predominan las orientaciones comprendidas entre 180° y 0° , es decir, laderas que van del sur hacia el norte pasando por el este. En la parte oeste, los valores se sitúan entre 180° y 360° , correspondientes a laderas orientadas del sur hacia el norte pasando por el oeste.

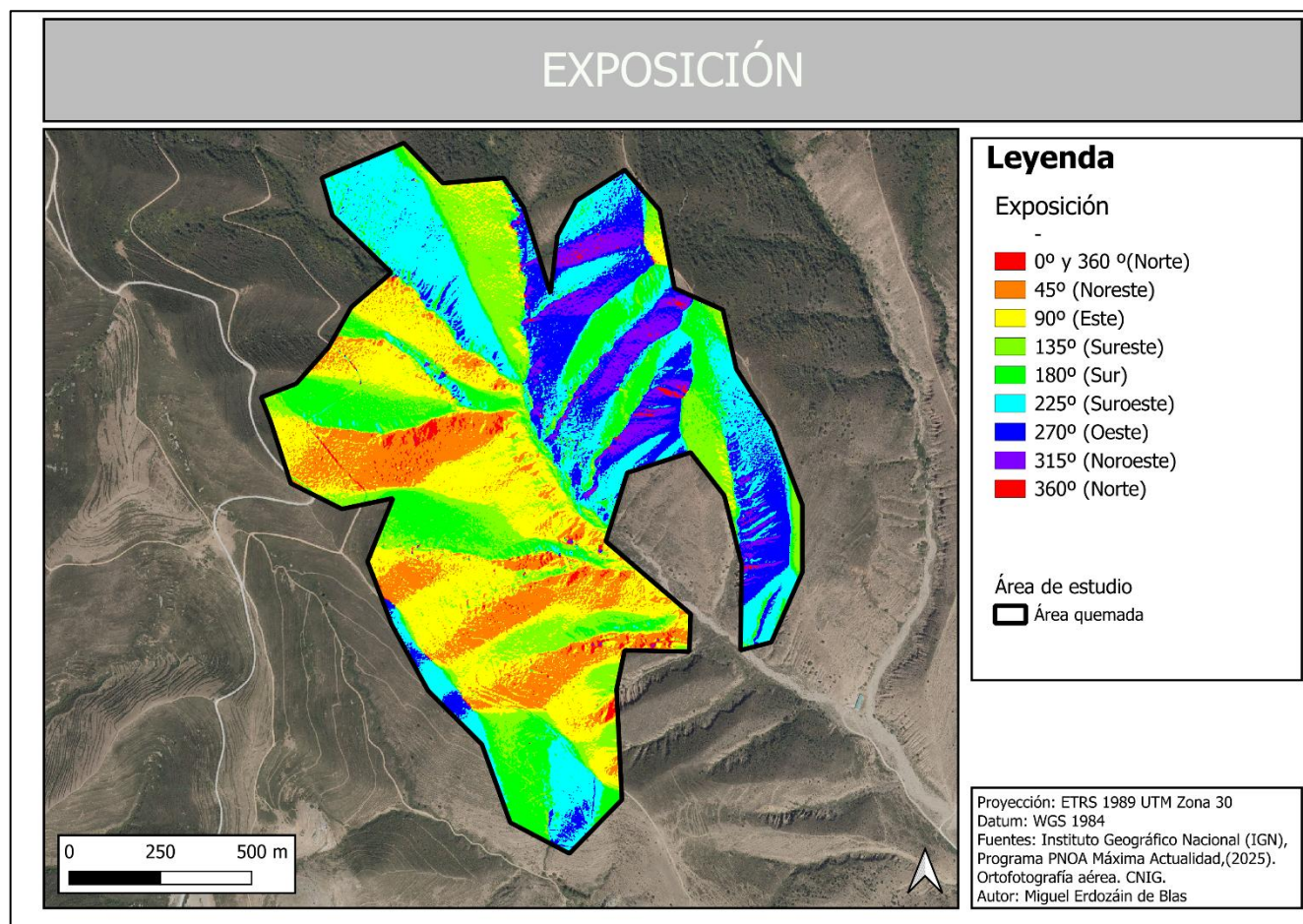


Figura 12. Exposición del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Arnedillo.

La elevación en Arnedillo (Figura 13) se caracteriza principalmente por valores superiores a los 990 metros sobre el nivel del mar, lo que indica un terreno predominantemente alto. Sin embargo, se identifica una pequeña zona en el sector central con altitudes comprendidas entre los 850 y 950 metros, lo que representa un ligero descenso en la topografía en esa área.

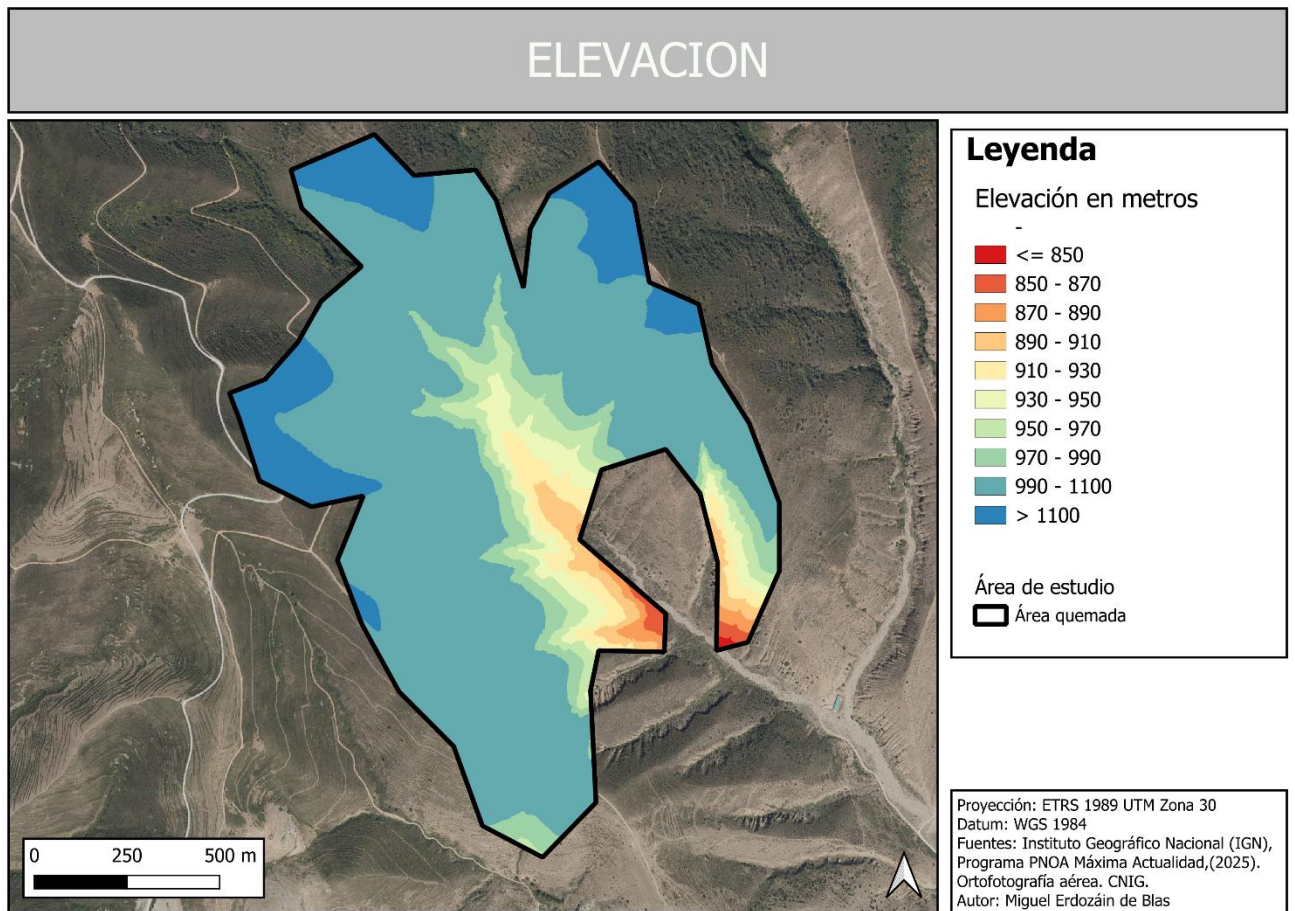


Figura 13. Elevación del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Arnedillo.

La pendiente en Arnedillo (Figura 14) presenta una zona central con ramificaciones, a modo de laderas, que muestran valores inferiores a 7° , indicando un terreno más suave en esa área. En contraste, los alrededores de esta zona central presentan pendientes muy elevadas, con valores que oscilan entre los 63° y 70° , lo que sugiere la presencia de fuertes desniveles. A medida que se aleja del centro y de sus ramificaciones, los valores de pendiente disminuyen progresivamente, formando un patrón de degradado.

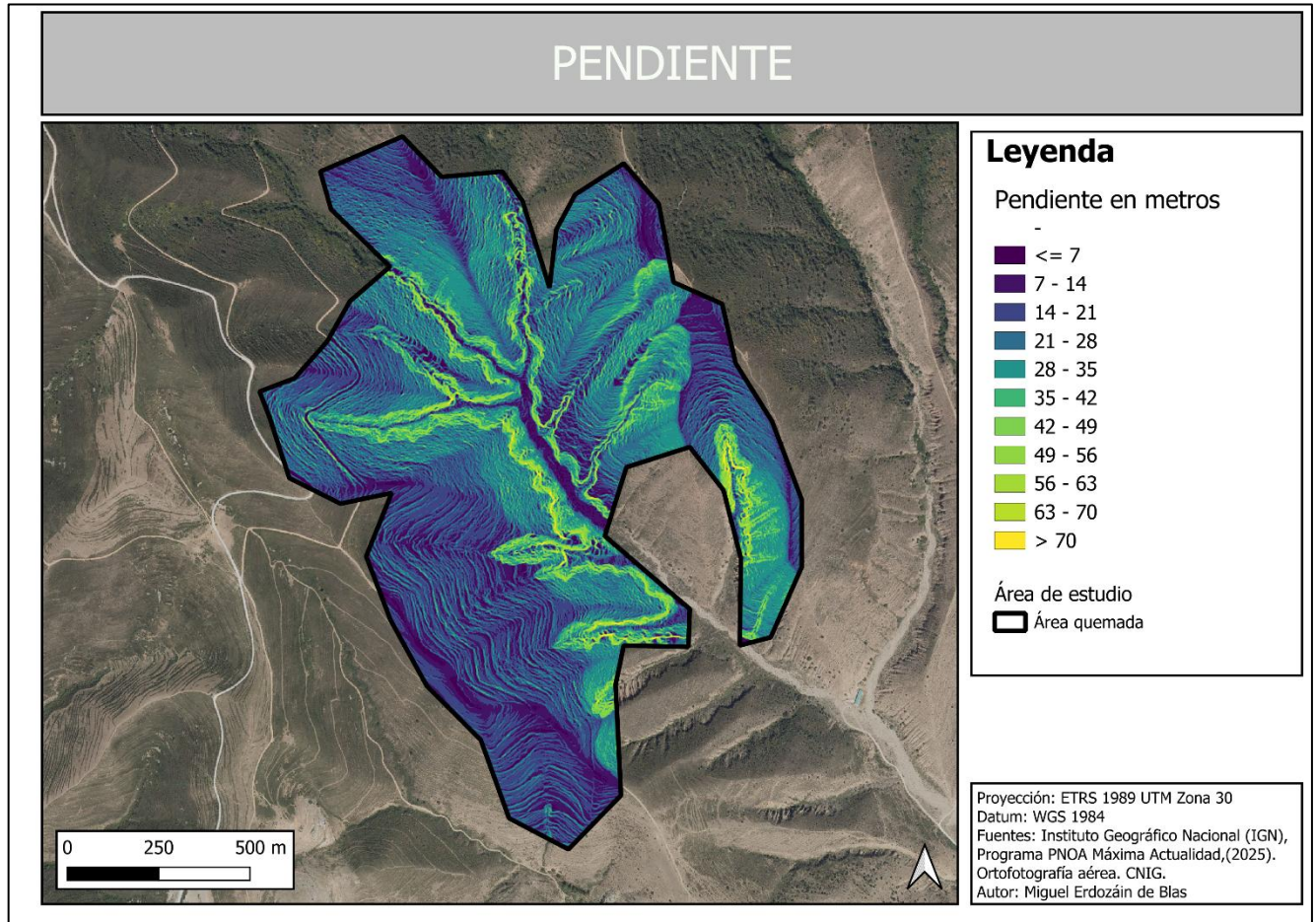


Figura 14. Pendiente del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Arnedillo

La radiación solar en Arnedillo (Figura 15) muestra valores muy elevados en las zonas más alejadas del centro, indicando una mayor exposición al sol en esas áreas. A medida que se avanza hacia el centro, los valores de radiación disminuyen notablemente, observándose ramificaciones con valores muy bajos, lo que sugiere que esta zona central y sus prolongaciones reciben menos radiación debido probablemente al relieve y la orientación del terreno.

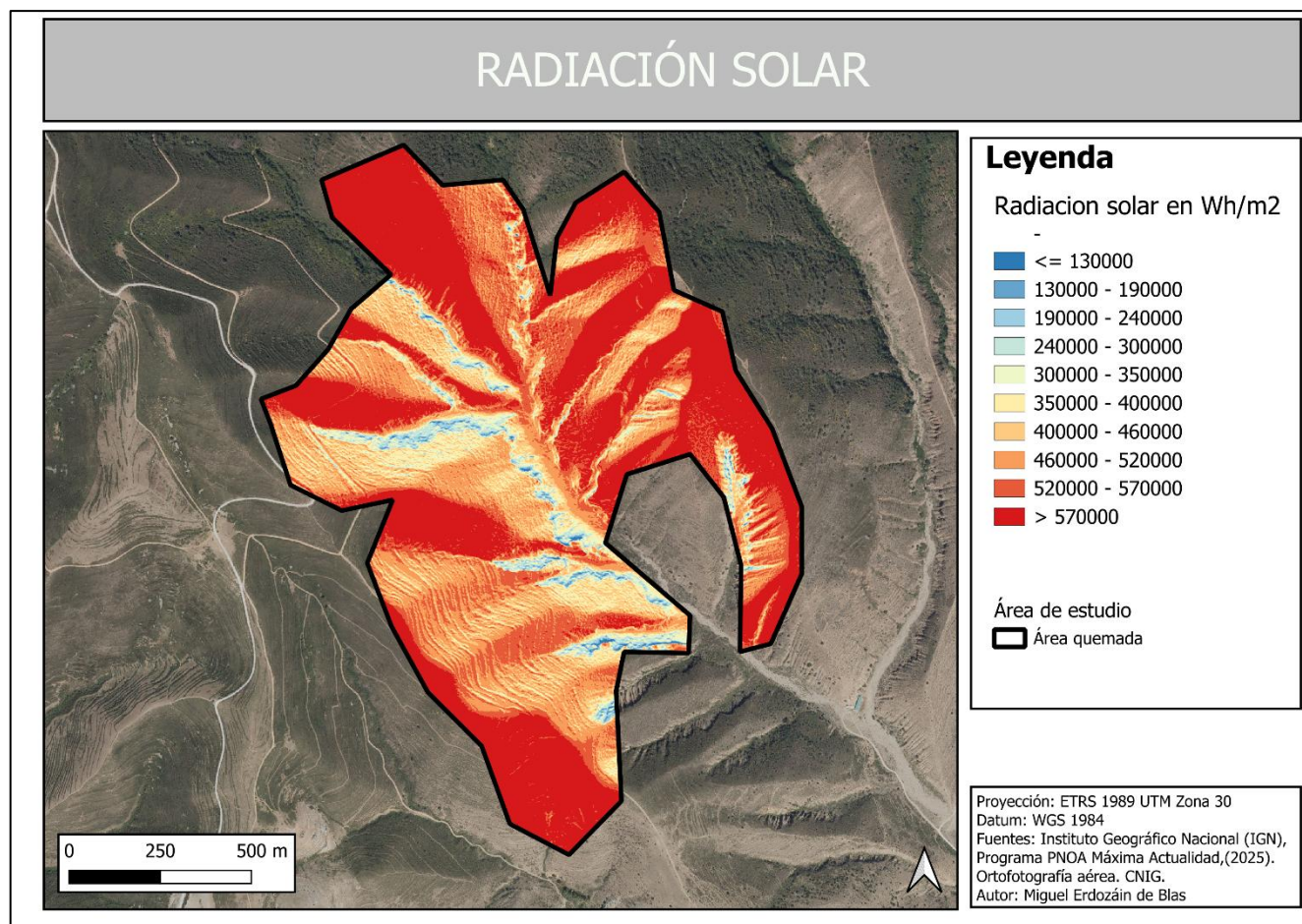


Figura 15. Radiación solar del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Arnedillo

Incendio de Galbárruli

Respecto a la exposición en Galbárruli (Figura 16), la parte oeste muestra orientaciones comprendidas entre 180° y 0° , es decir, laderas que van del sur hacia el norte pasando por el este. Por otro lado, la parte este presenta valores entre 180° y 360° , correspondientes a laderas orientadas del sur hacia el norte pasando por el oeste.

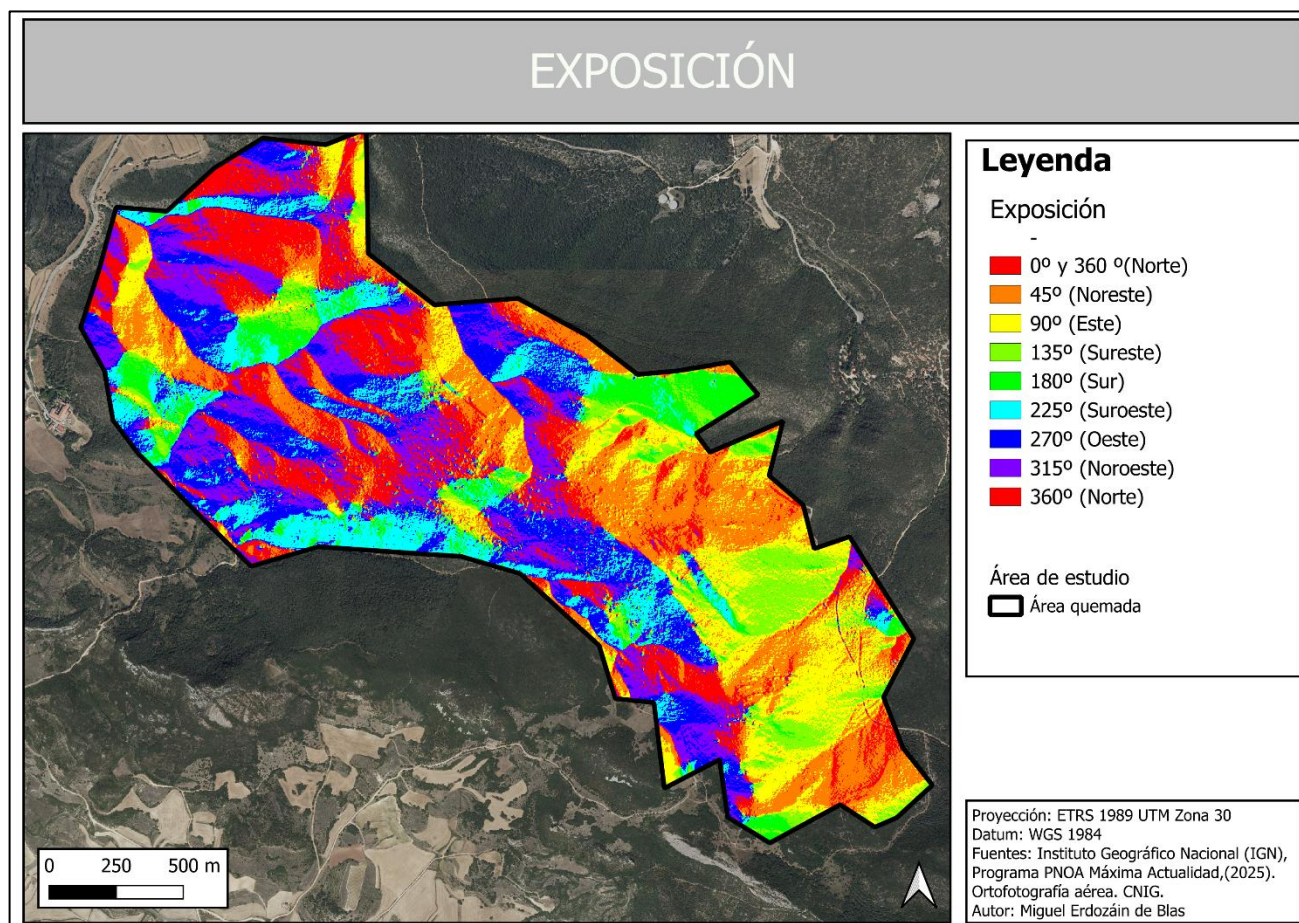


Figura 16. Exposición del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Galbárruli

La elevación en Galbárruli (Figura 16) se organiza en dos zonas diferenciadas: al sur se encuentran las áreas con mayores altitudes, superando los 900 metros, donde la elevación va disminuyendo poco a poco. Y por otro lado la parte oeste en la parte central donde las elevaciones oscilan entre los 700 a 580 metros.

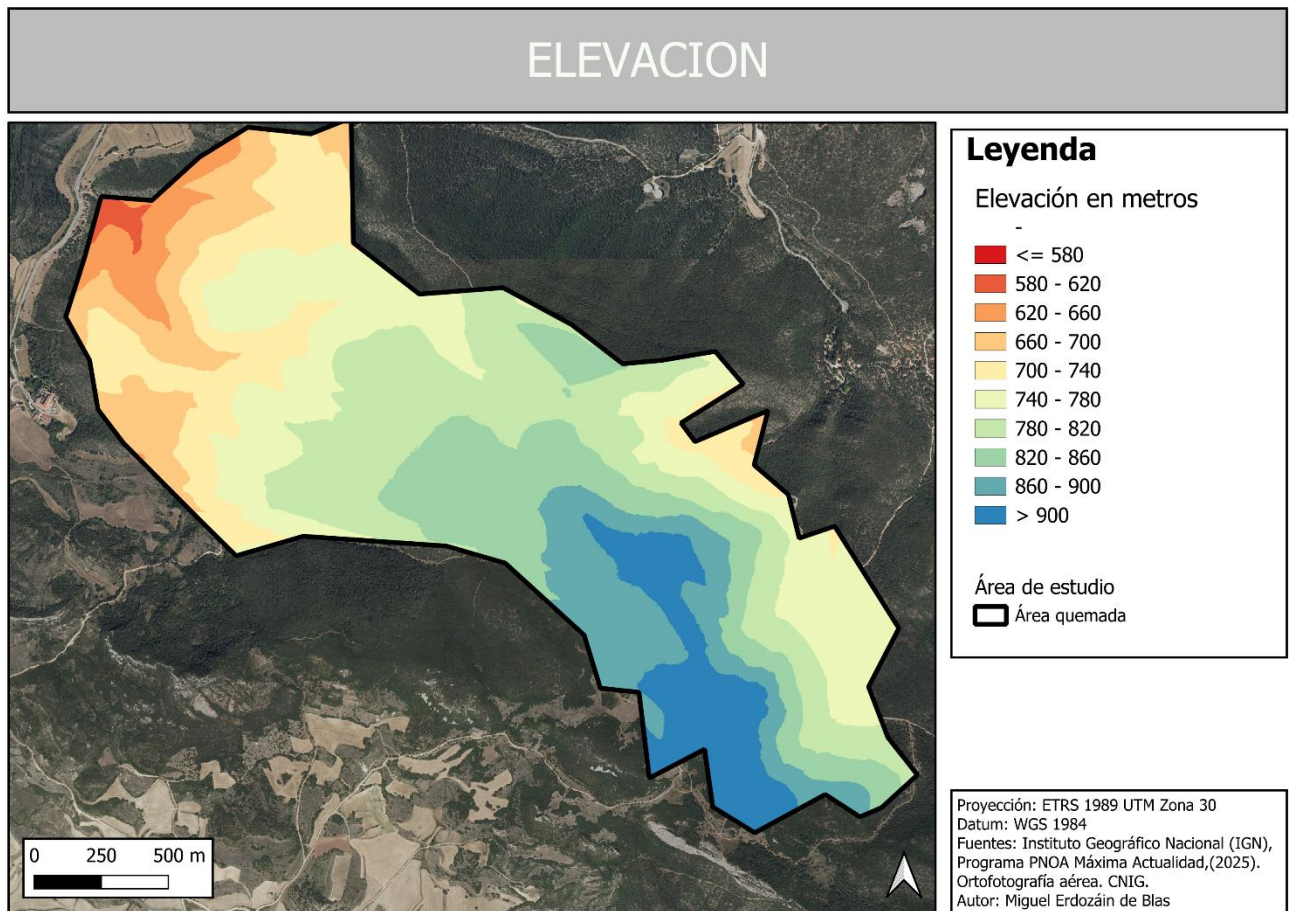


Figura 16. Elevación del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Galbárruli

Como se observa en la Figura 17, las pendientes más elevadas en Galbárruli se localizan principalmente en las zonas este y sur del mapa, mientras que en la parte central predominan las pendientes más suaves o llanas. En el norte también se observan áreas con pendientes pronunciadas, reflejando un relieve accidentado en esa región

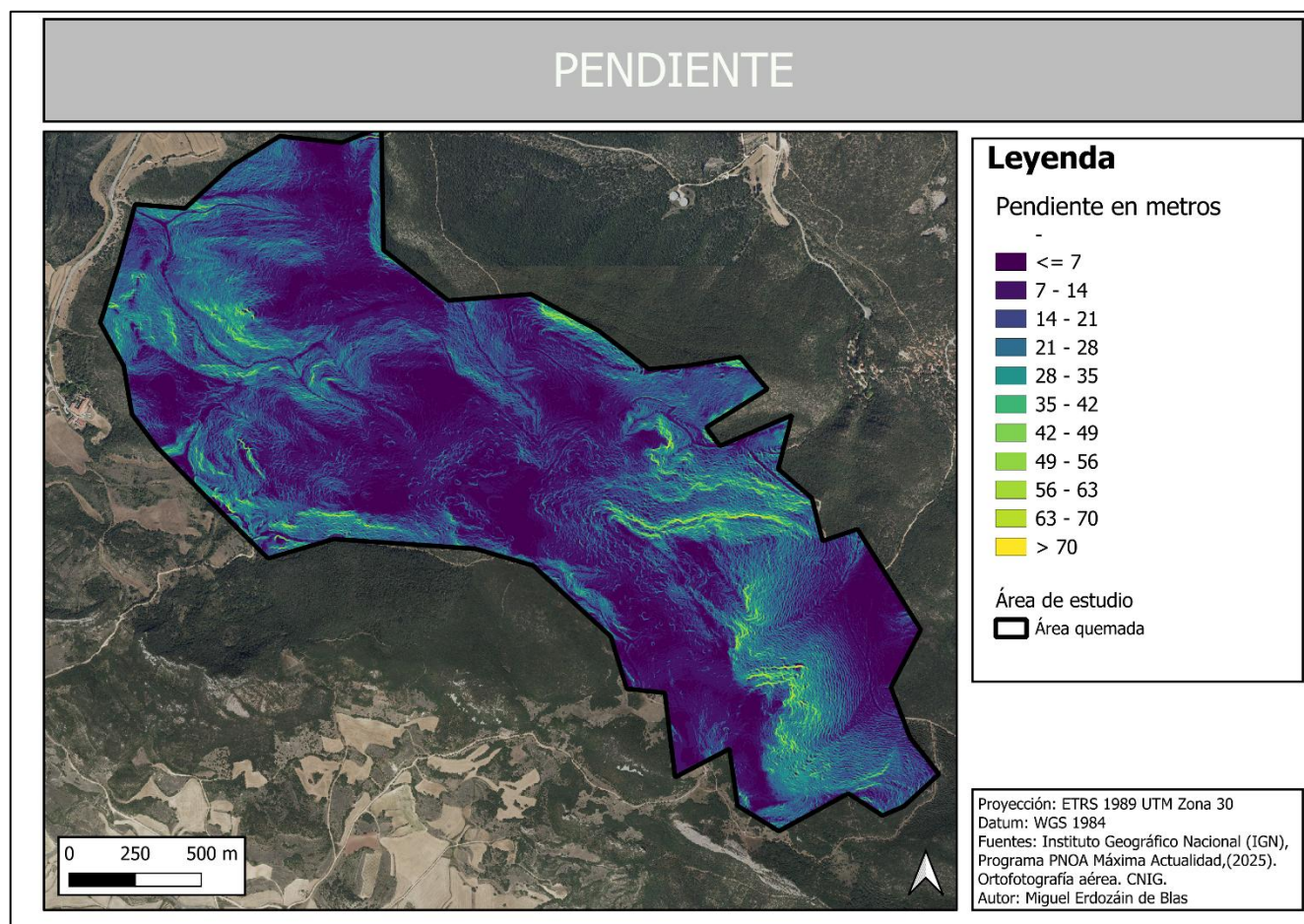


Figura 17. Pendiente del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Galbárruli

Los valores de radiación solar en Galbárruli (Figura 18) son en general altos y medios distribuidos de manera mezclada a lo largo de todo el mapa. Sin embargo, en la parte este se observan franjas donde los valores de radiación son bastante bajos, y en menor medida, también se presentan zonas con baja radiación en el sector sur.

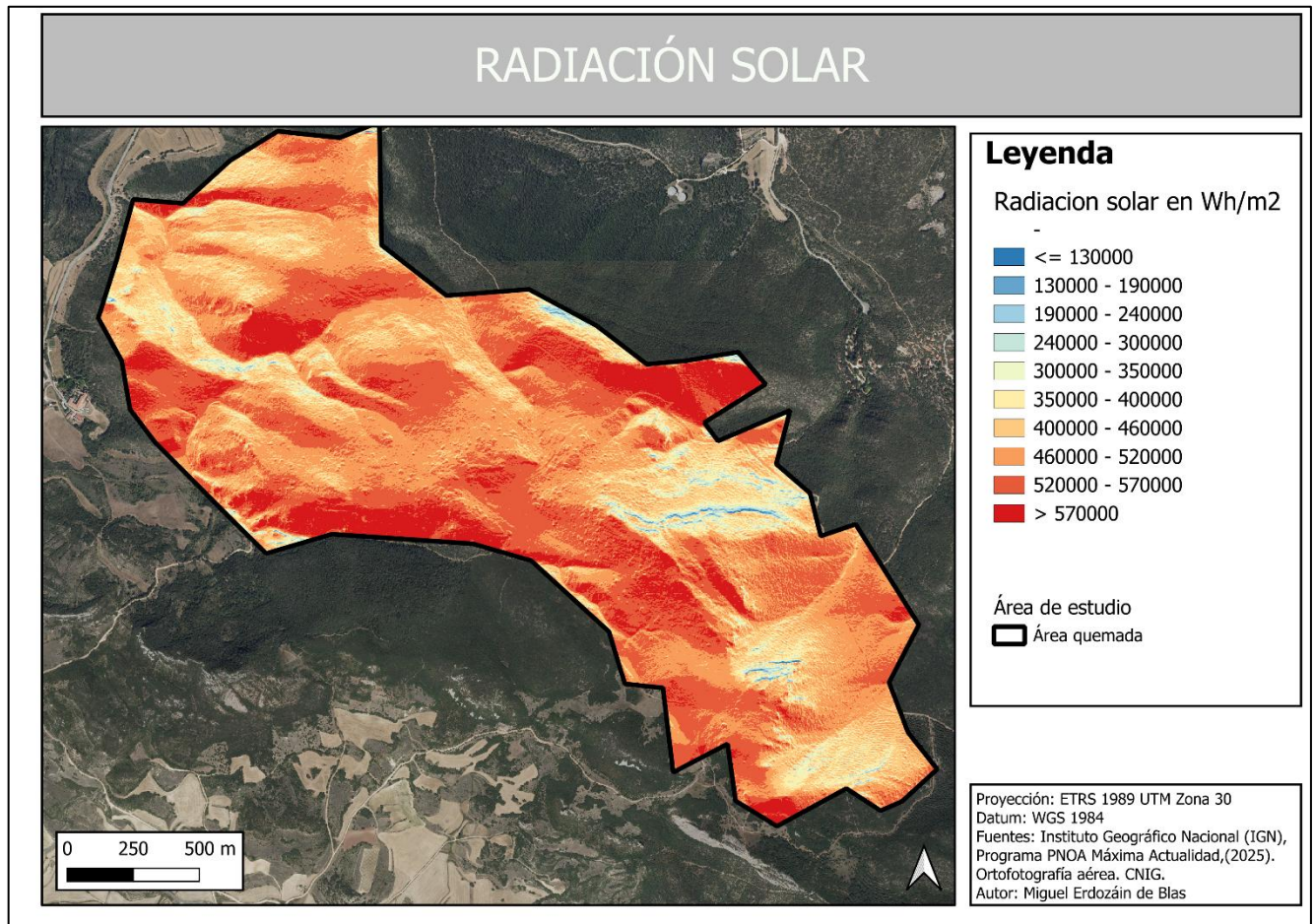


Figura 18. Radiación solar del año 2016 de la zona afectada por el incendio de Galbárruli

5.4. Análisis del vigor vegetal y de la estructura forestal

5.4.1. Vigor vegetal

Incendio de Arnedillo

El vigor vegetal en el prefuego muestra principalmente valores moderados distribuidos a lo largo de todo el incendio (Figura 19). Sin embargo, en la zona norte se destacan áreas con valores elevados, presentándose en forma de franjas y manchas, lo que indica una mayor densidad o salud de la vegetación en esos sectores específicos.

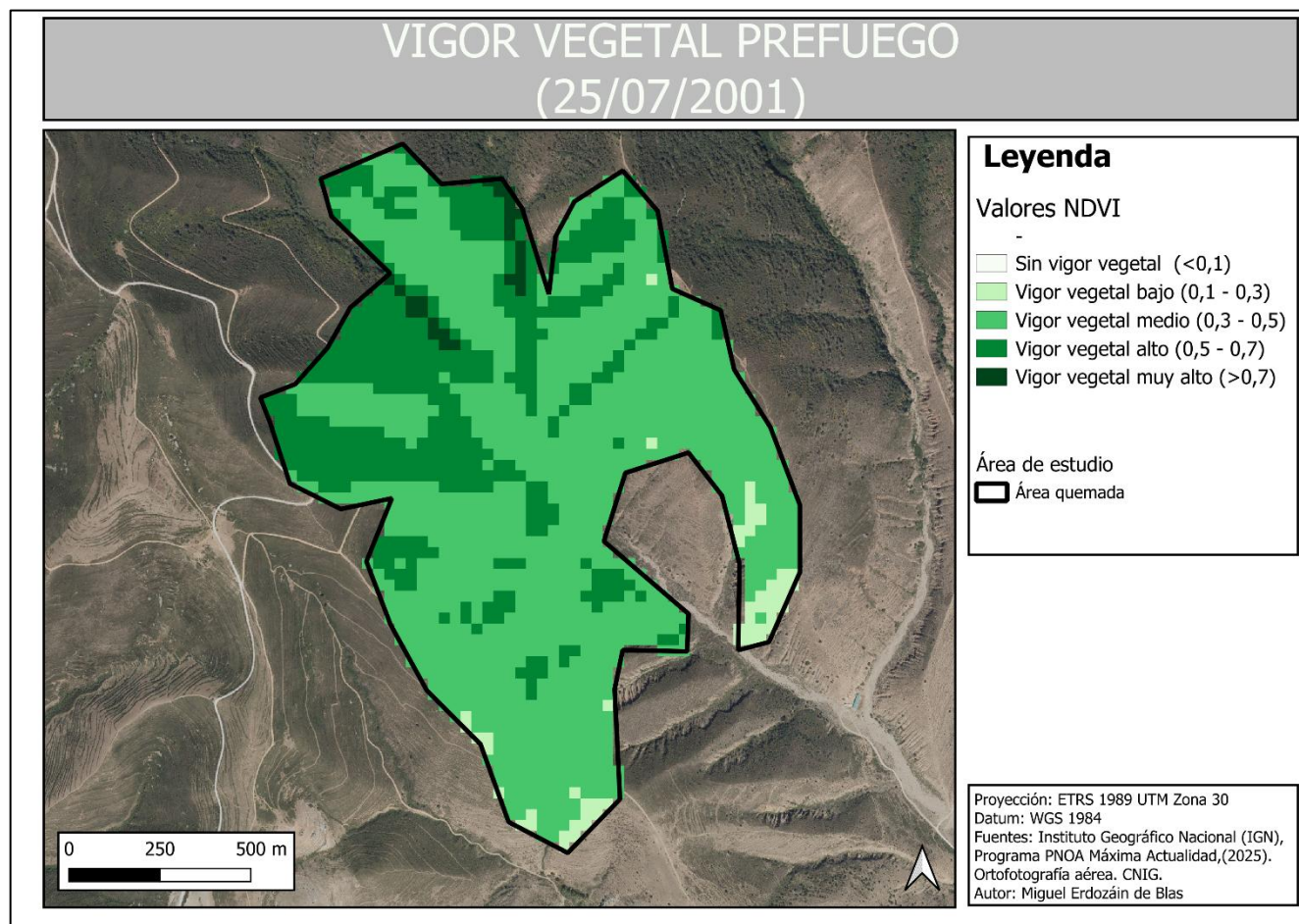


Figura 19. Vigor vegetal prefuego (25/07/2001) en Arnedillo

Después del incendio, tal y como se observa en la Figura 20, el vigor vegetal observado en el postfuego inmediato presenta valores bajos en la zona norte, incluyendo áreas donde prácticamente no se registra vigor alguno. Por el contrario, en la parte sur se identifican valores altos de vigor, junto con una amplia extensión de zonas con niveles medios.

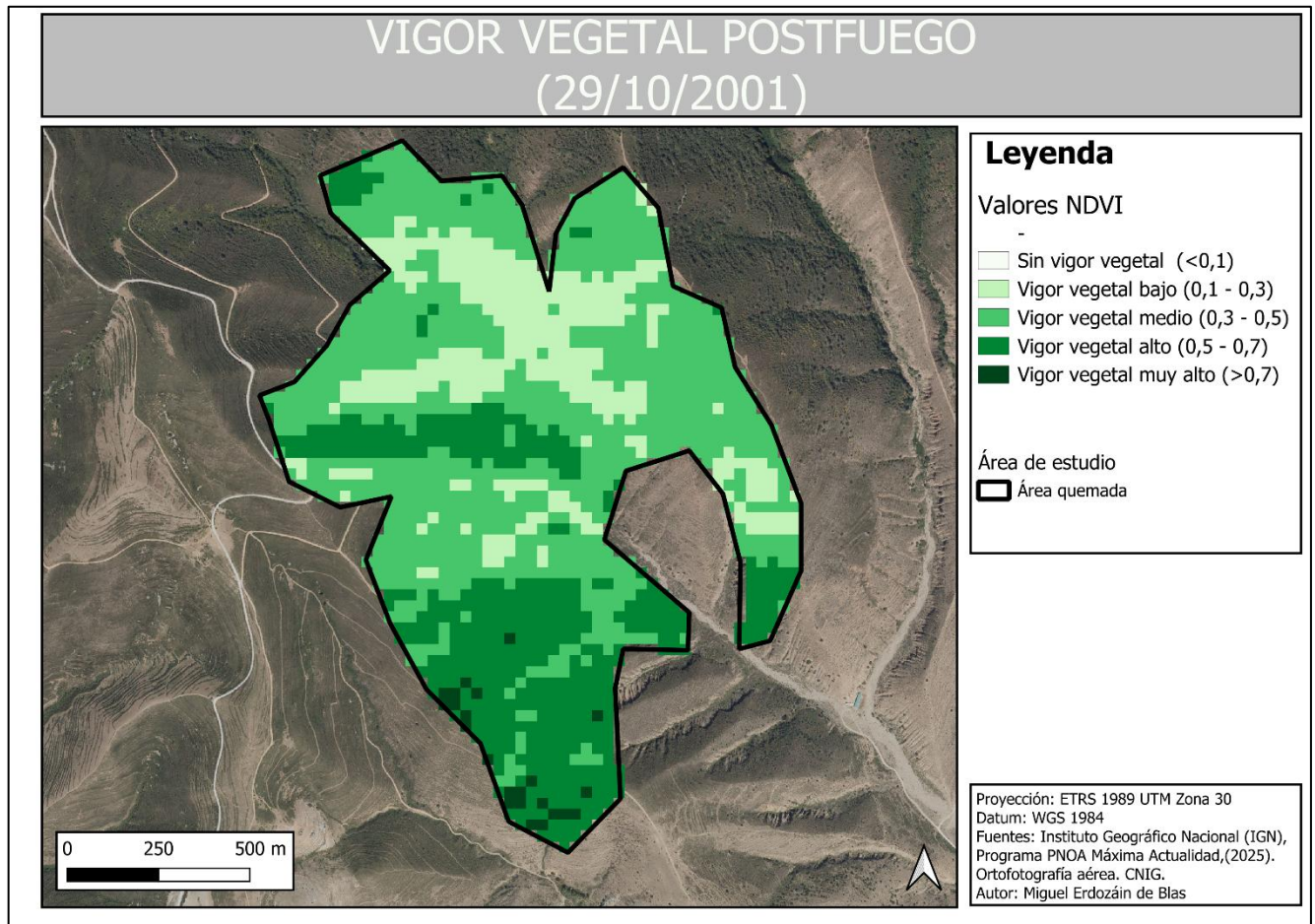


Figura 20. Vigor vegetal postfuego (29/10/2001) en Arnedillo

En 2010, el vigor vegetal alto se distribuye de manera extensa a lo largo de toda la zona afectada por el incendio (Figura 21). Incluso se pueden identificar sectores con un vigor vegetal muy elevado. No obstante, también existen áreas dentro del territorio de estudio donde el vigor se mantiene en niveles medios, reflejando cierta heterogeneidad en la respuesta del ecosistema.

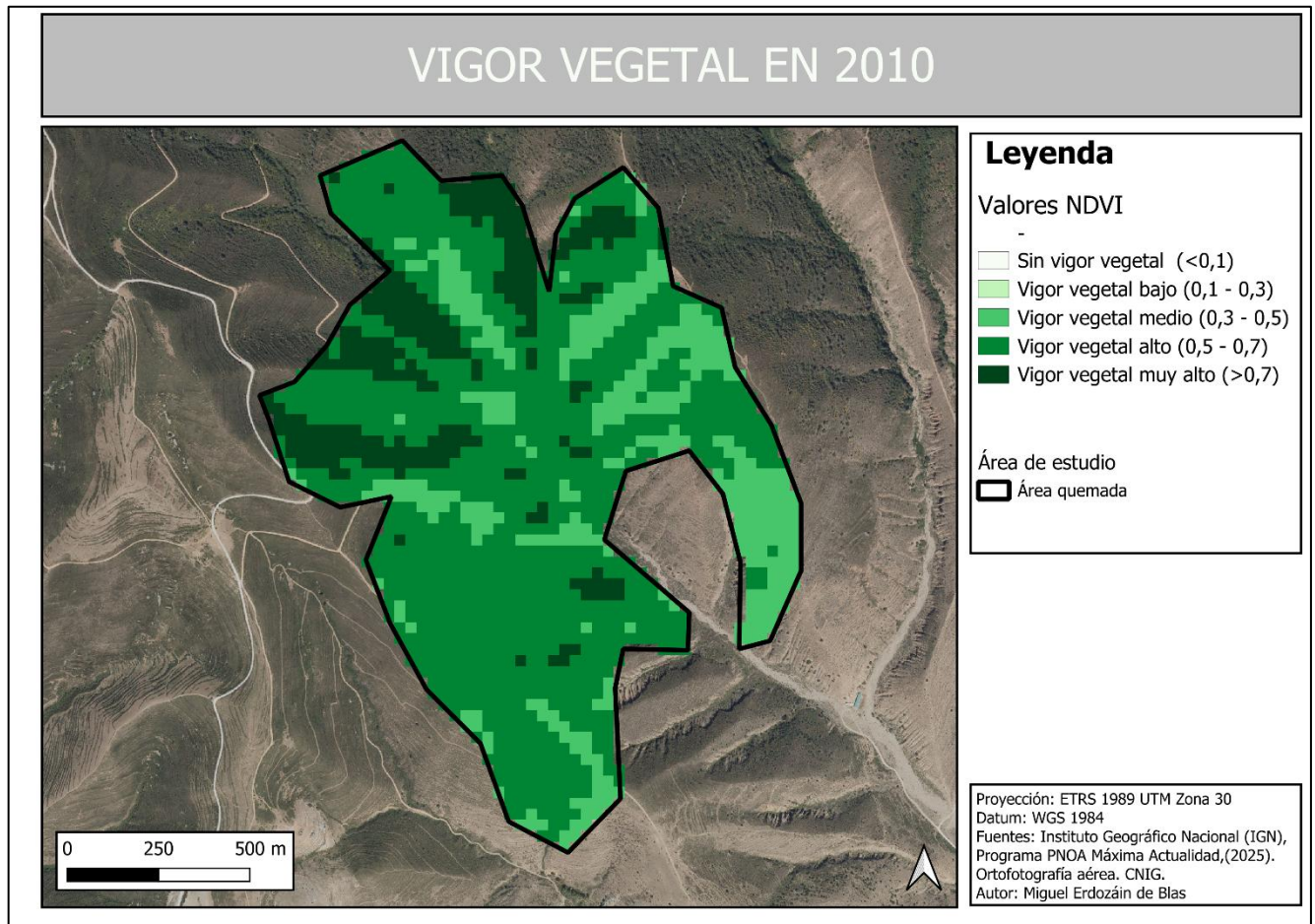


Figura 21. Vigor vegetal de 2010 en Arnedillo

En la Figura 22 se puede observar que prácticamente toda la zona exhibe niveles de vigor vegetal muy elevados ya en 2016, destacándose además la presencia de franjas donde estos valores se mantienen consistentemente altos, lo que refleja una vegetación densa y saludable en gran parte del área estudiada.

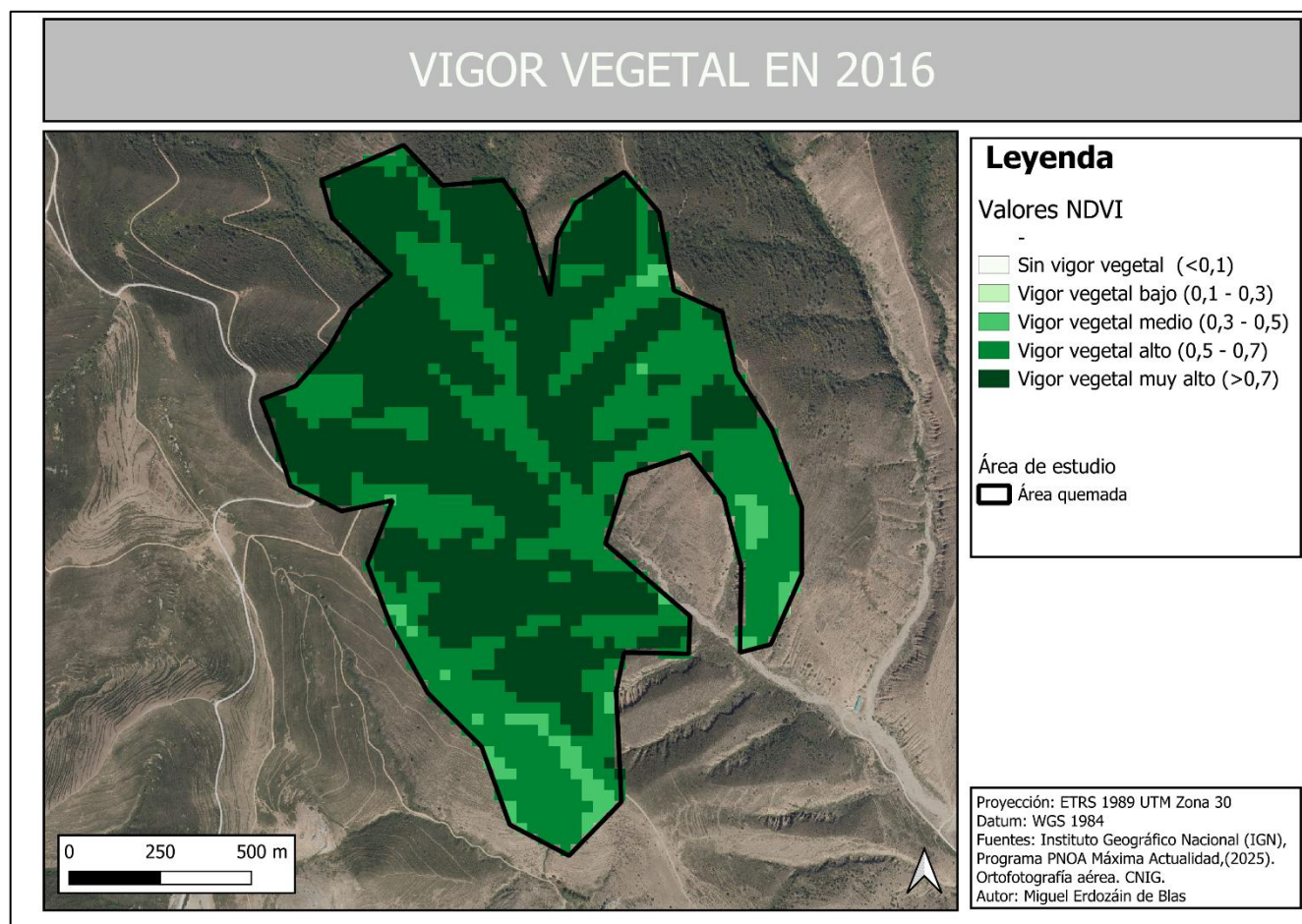


Figura 22. Vigor vegetal de 2016 en Arnedillo

Incendio de Galbárruli

En Galbárruli, el vigor vegetal prefuego se presenta elevado en la mayor parte del área (Figura 23), con valores muy altos concentrados especialmente en la parte este, donde se forman dos grandes acumulaciones que evidencian una densa y saludable vigorosidad vegetal antes del evento.

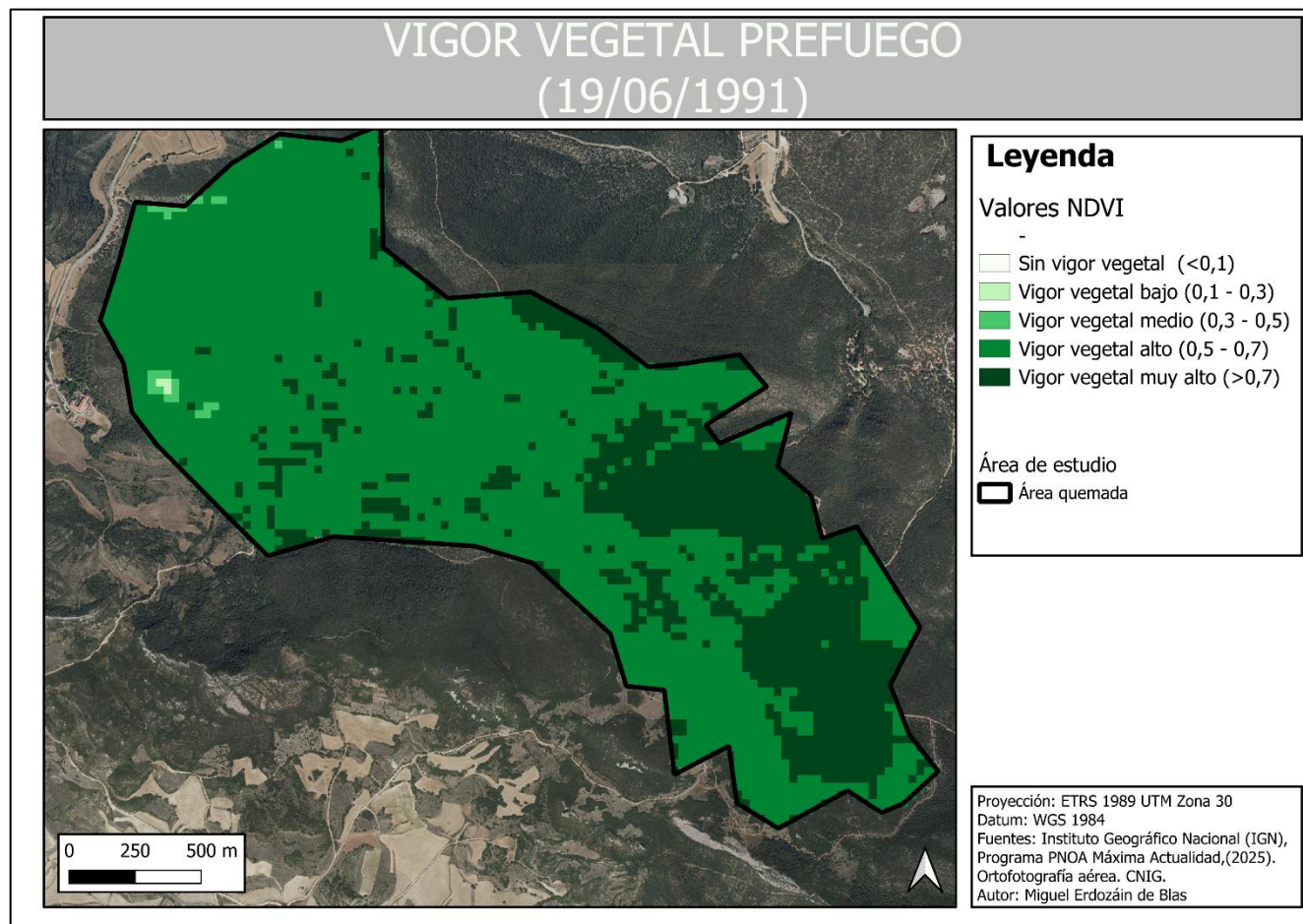


Figura 23. Vigor vegetal prefuego (19/06/1991) en Galbárruli

En el mapa del postfuego inmediato (Figura 24), la mayoría del área muestra valores bajos de vigor vegetal, reflejando el impacto reciente del incendio. Sin embargo, se identifican algunas zonas aisladas donde los valores alcanzan niveles medios, indicando áreas con menor afectación.

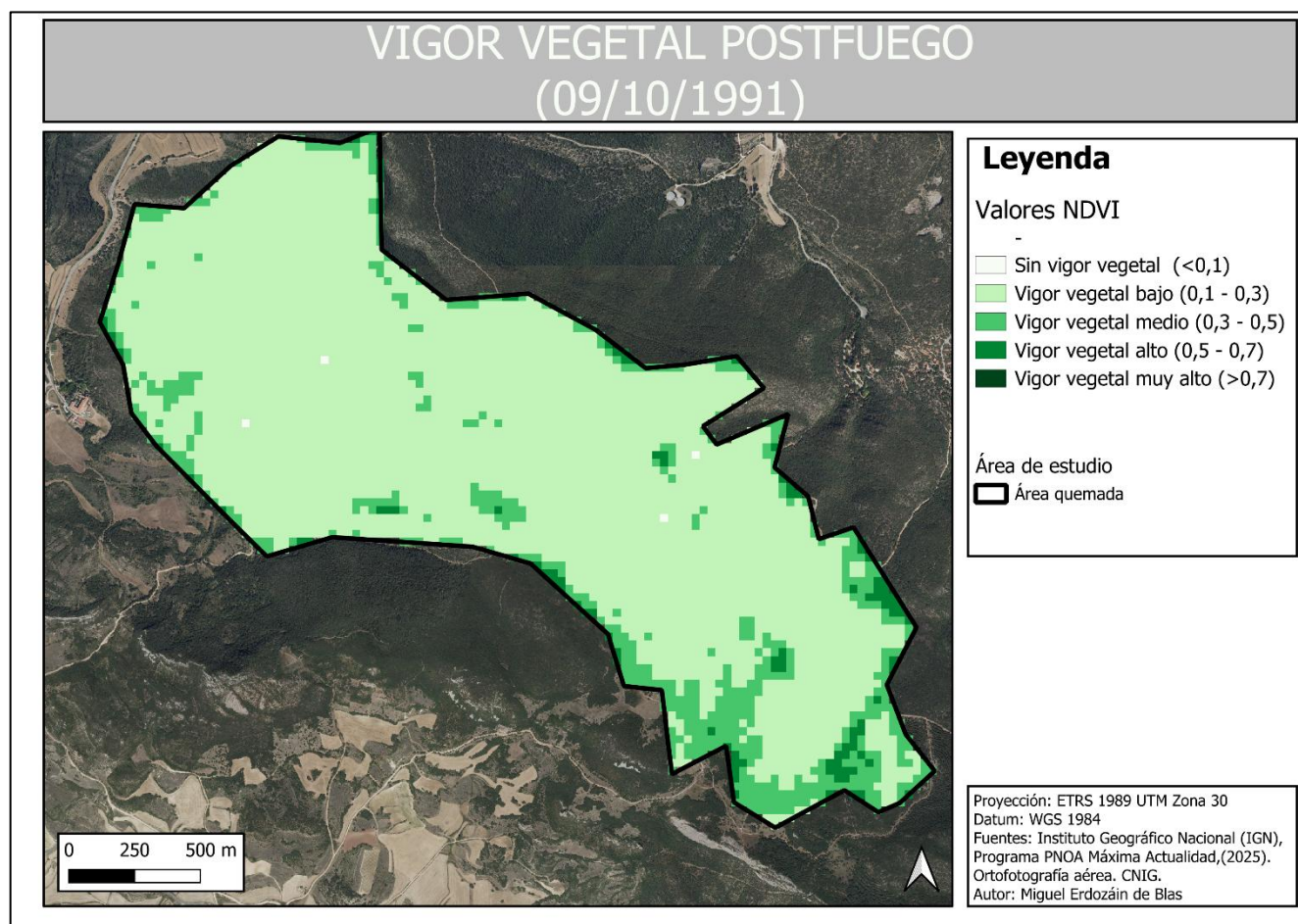


Figura 24. Vigor vegetal postfuego (09/10/1991) en Galbárruli

En 2010, el vigor vegetal muestra valores altos a lo largo de casi todo el incendio (Figura 25). No obstante, en el centro del área afectada se observan valores medios.

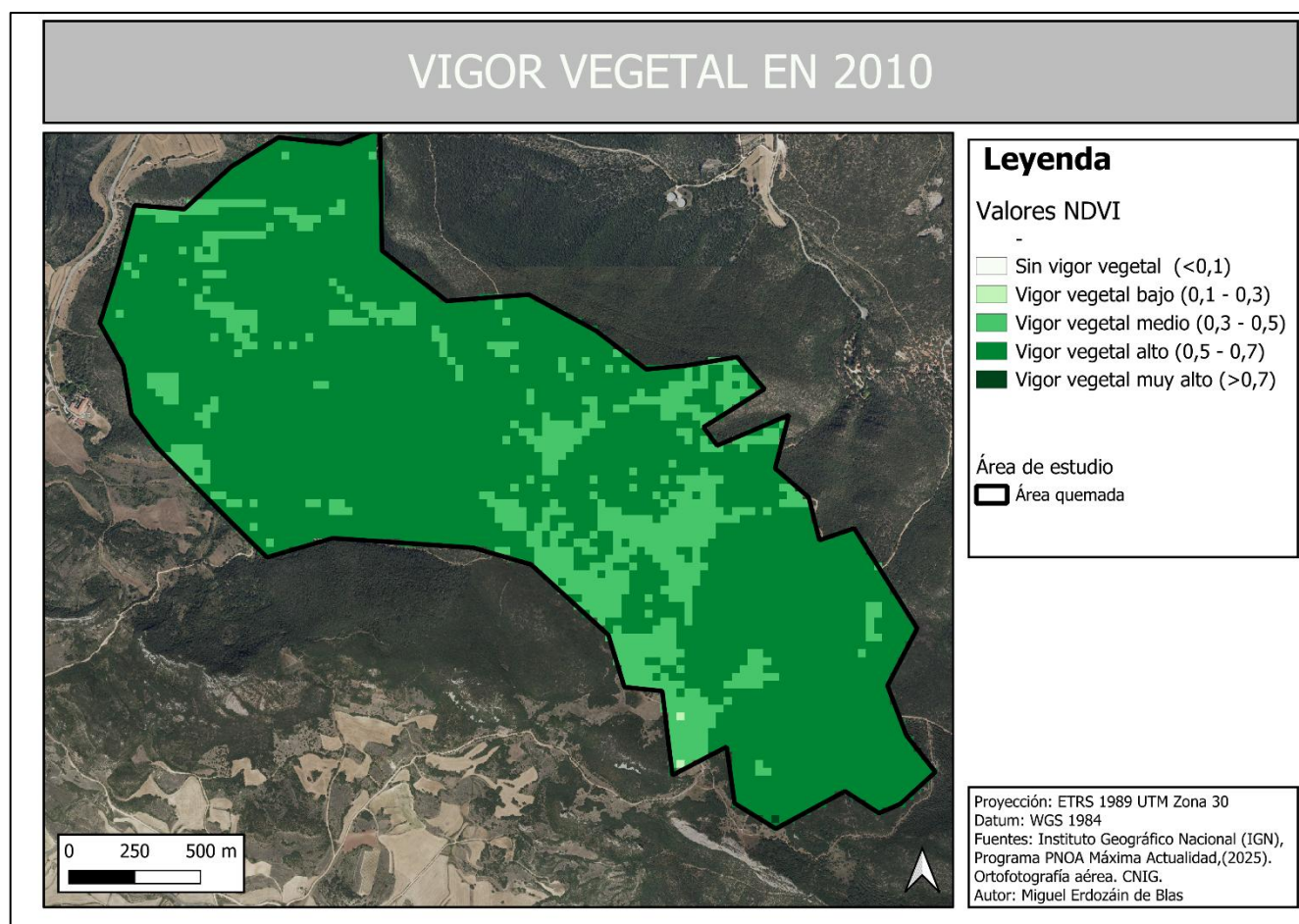


Figura 25. Vigor vegetal de 2010 en Galbárruli

En el año 2016, el vigor vegetal se caracteriza por presentar valores muy altos en prácticamente toda la extensión del incendio (Figura 26), lo que un estado saludable y vigoroso de la vegetación en la zona estudiada.

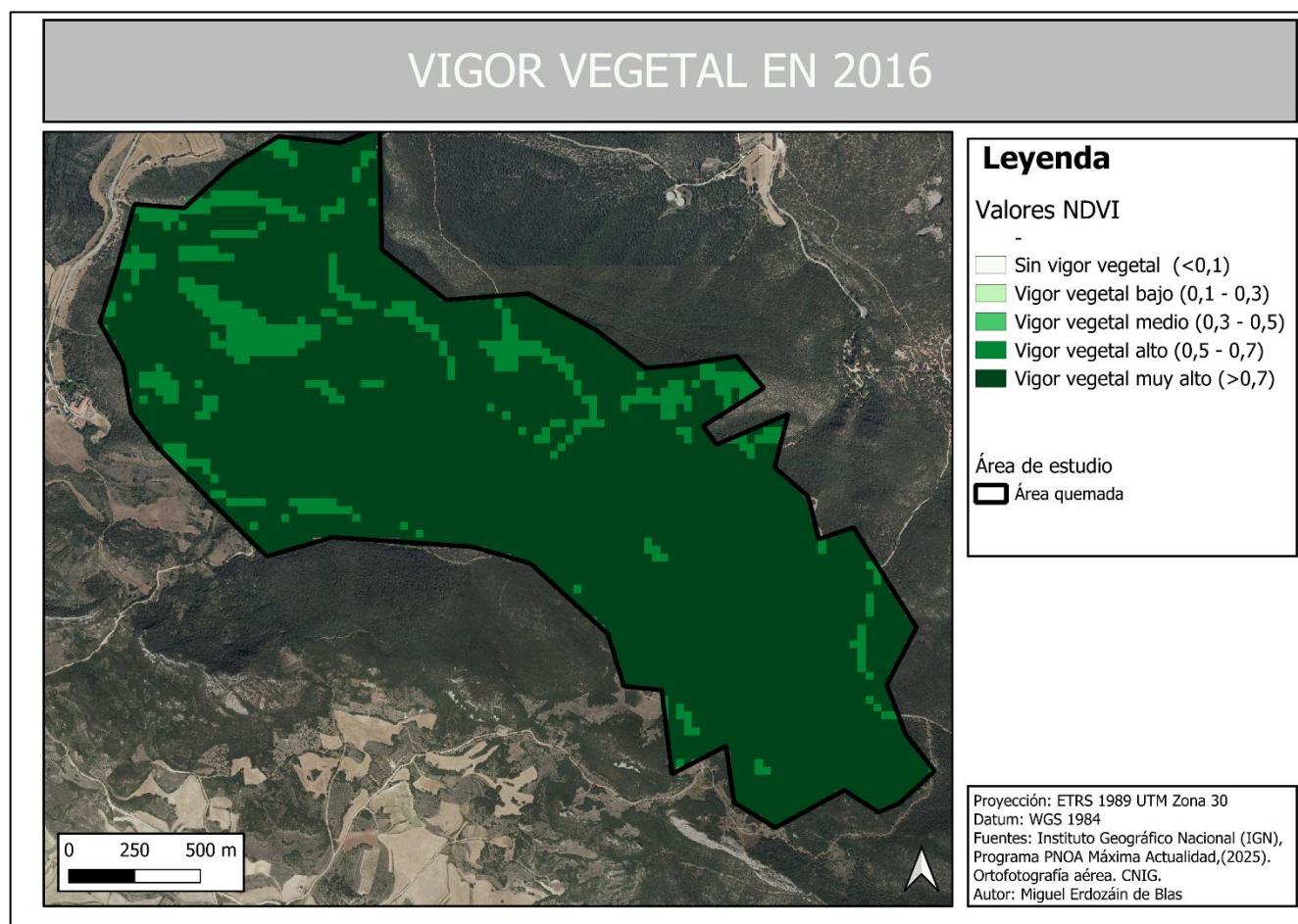


Figura 26. Vigor vegetal de 2016 en Galbárruli

5.4.2. Estructura forestal en el año 2010 y 2016

Incendio de Arnedillo

Se observa en la Figura 27 que en el año 2010 hay sectores donde la altura máxima alcanza entre 5 y 10 metros, e incluso supera los 10 metros en algunos puntos. Estas alturas elevadas se distribuyen en forma de franjas localizadas principalmente en la zona central del incendio. No obstante, los valores más frecuentes corresponden a alturas que oscilan entre 0 y 1 metro.

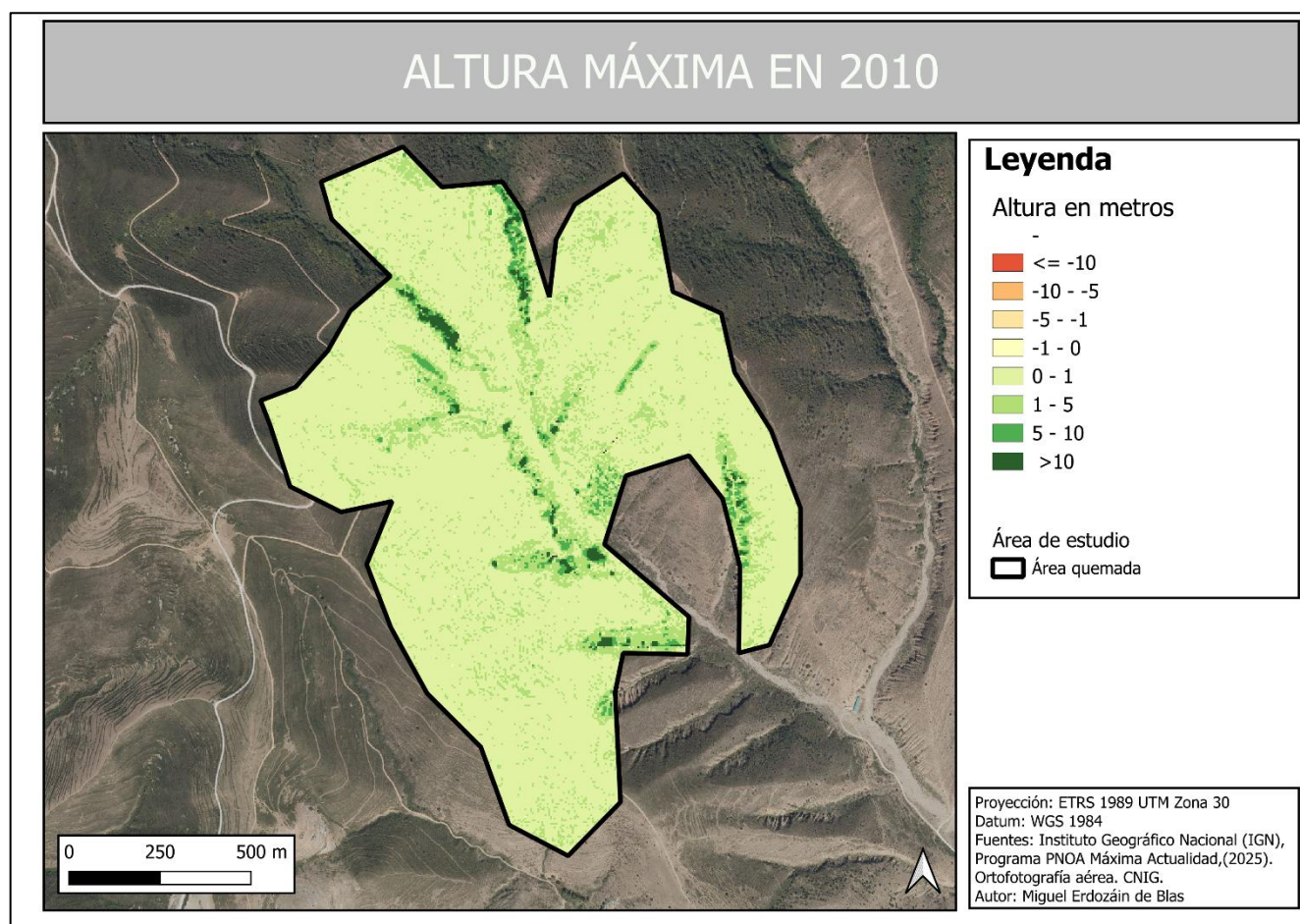


Figura 27. Altura máxima de Arnedillo en 2010

En la Figura 28 se aprecia que la mayor parte del área presenta alturas comprendidas entre 1 y 5 metros, aunque también predominan los valores más bajos, entre 0 y 1 metro. Además, se identifican franjas puntuales donde las alturas superan los 10 metros, aunque estas zonas son menos frecuentes. En general, el mapa está dominado por una distribución heterogénea, pero con clara concentración de alturas bajas a medias.

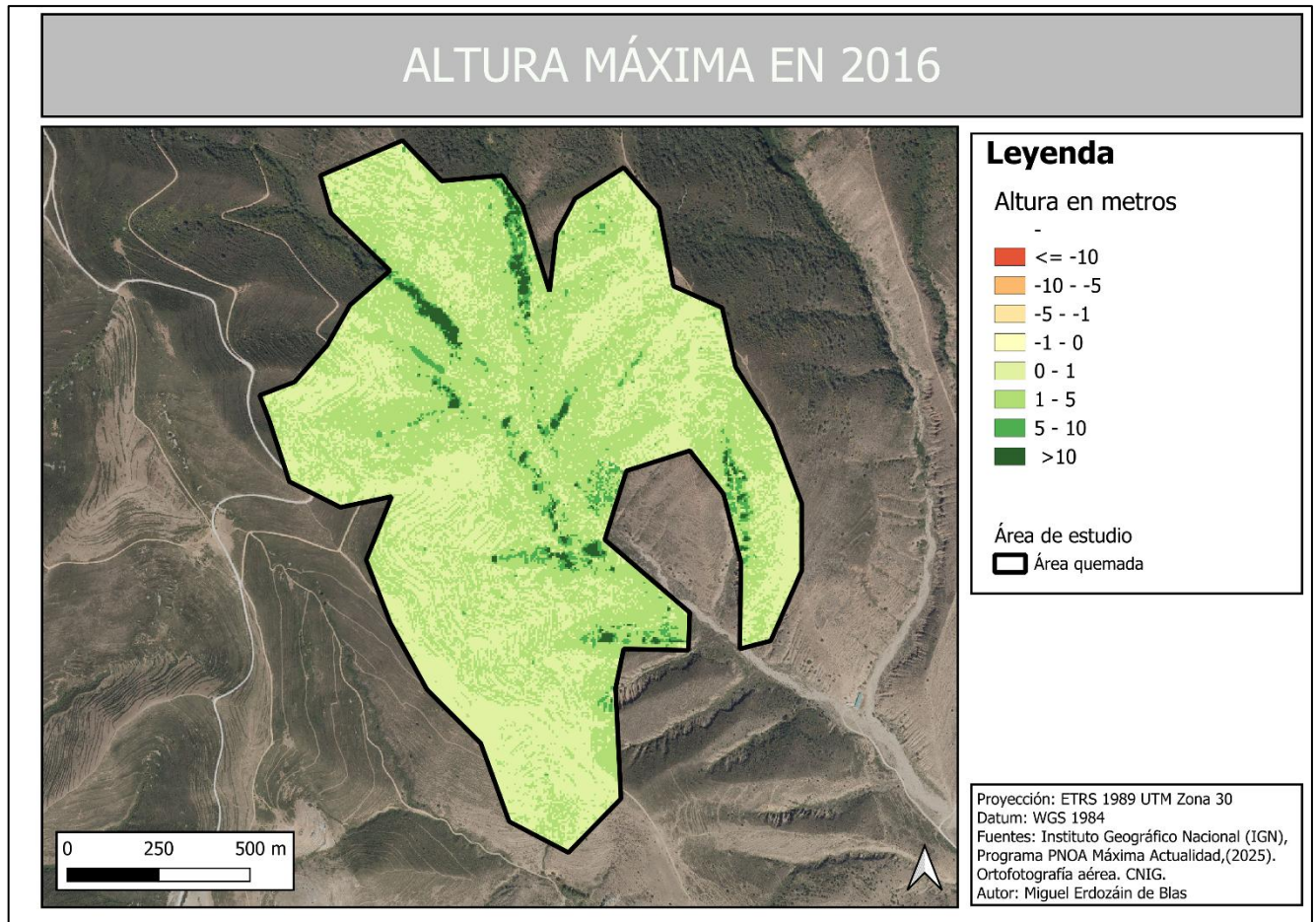


Figura 28. Altura máxima de Arnedillo en 2016

En la Figura 29 se puede apreciar que la mayor parte del incendio predominan los tonos blancos, lo que indica ausencia o muy baja densidad arbórea por encima de 4 metros en esas zonas. No obstante, se distinguen franjas puntuales de color azul oscuro que reflejan una alta densidad arbórea. Estas franjas se ubican principalmente en el centro del área delimitada.

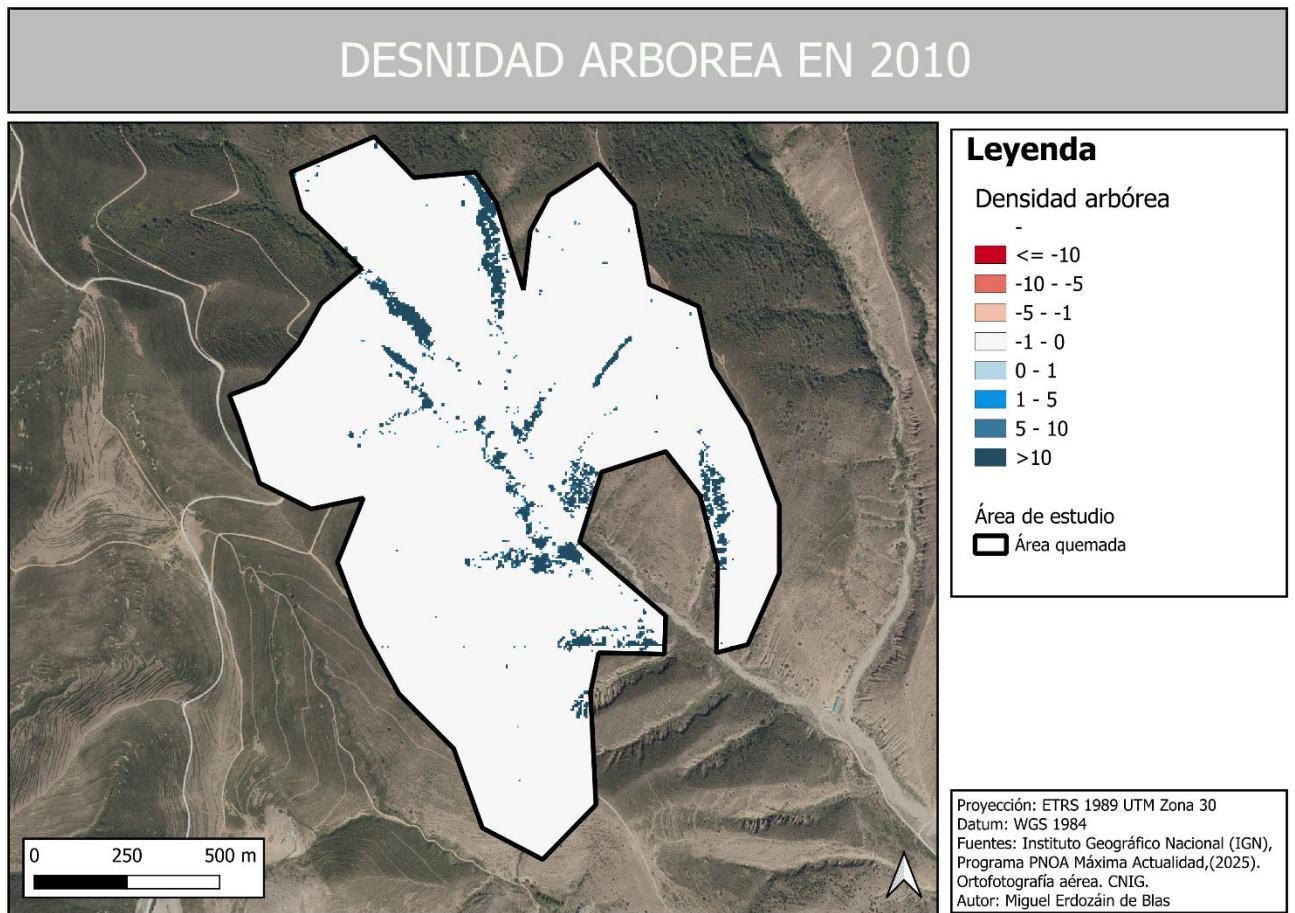


Figura 29. Densidad arbórea de Arnedillo en 2010

La Figura 30 muestra el predominio de los tonos blancos, lo que indica una ausencia o muy baja densidad arbórea por encima de los 4 metros en la mayor parte del área. Sin embargo, se destacan franjas de color azul oscuro que representan zonas de alta densidad arbórea. Estas franjas se ubican en el centro del área delimitada y ocupan una porción significativa de la zona central, lo que sugiere una concentración importante en esa región específica.

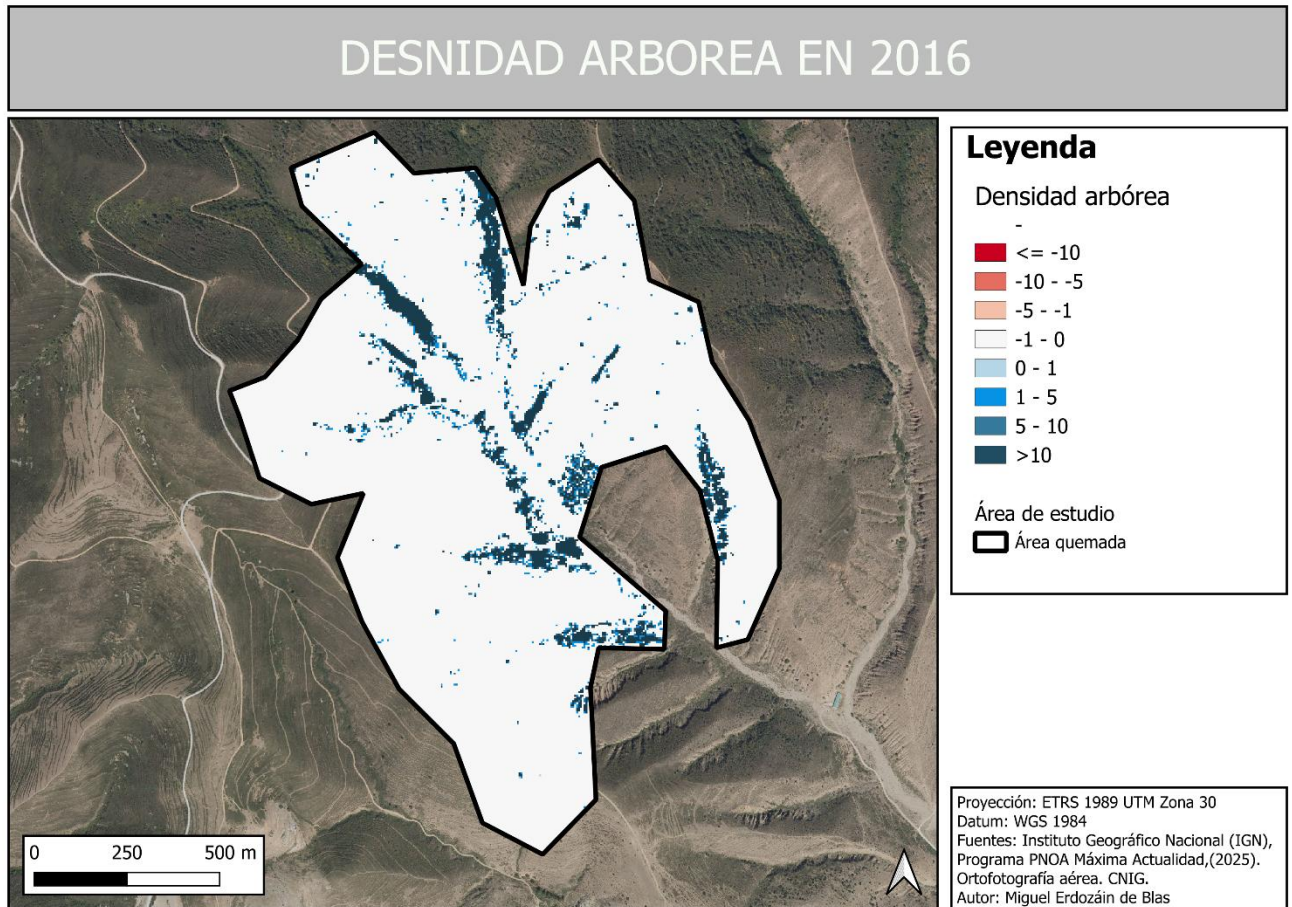


Figura 30. Densidad arbórea de Arnedillo en 2016

Incendio de Galbárruli

Se observa en la Figura 31 una altura máxima relativamente homogénea en la mayor parte del incendio, con valores que oscilan entre 1 y 5 metros. No obstante, en el sector sureste se identifica una acumulación notable donde la altura máxima alcanza valores entre 5 y 10 metros, lo que indica una variación localizada en esa zona específica.

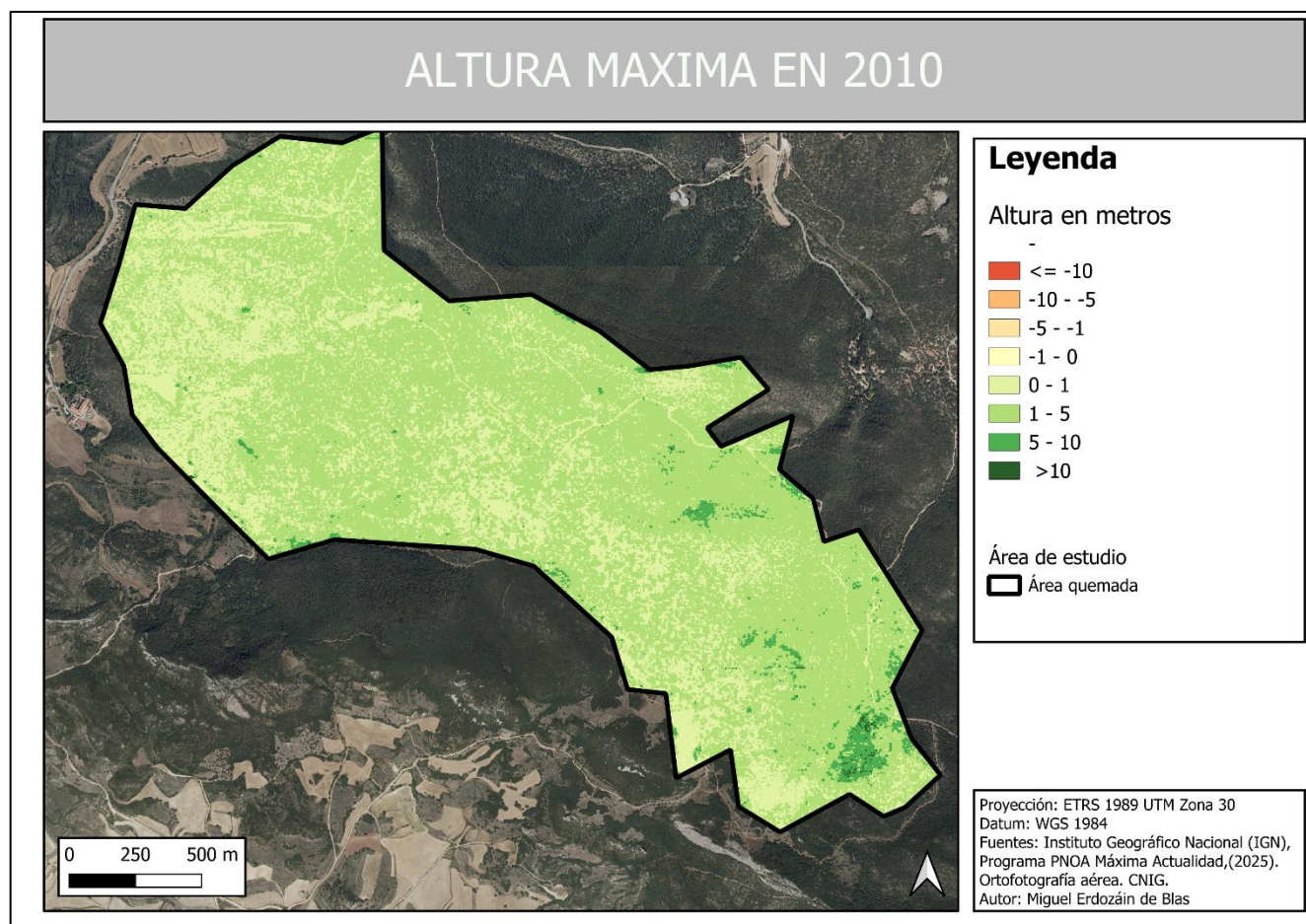


Figura 31. Altura máxima de Galbárruli en 2010

En 2016 toda la zona presenta valores elevados de altura máxima, superiores a los 10 metros (Figura 32). Sin embargo, también se identifican líneas continuas donde los valores descienden hasta 0, lo que indica la presencia de áreas sin elevación dentro de un entorno predominantemente alto.

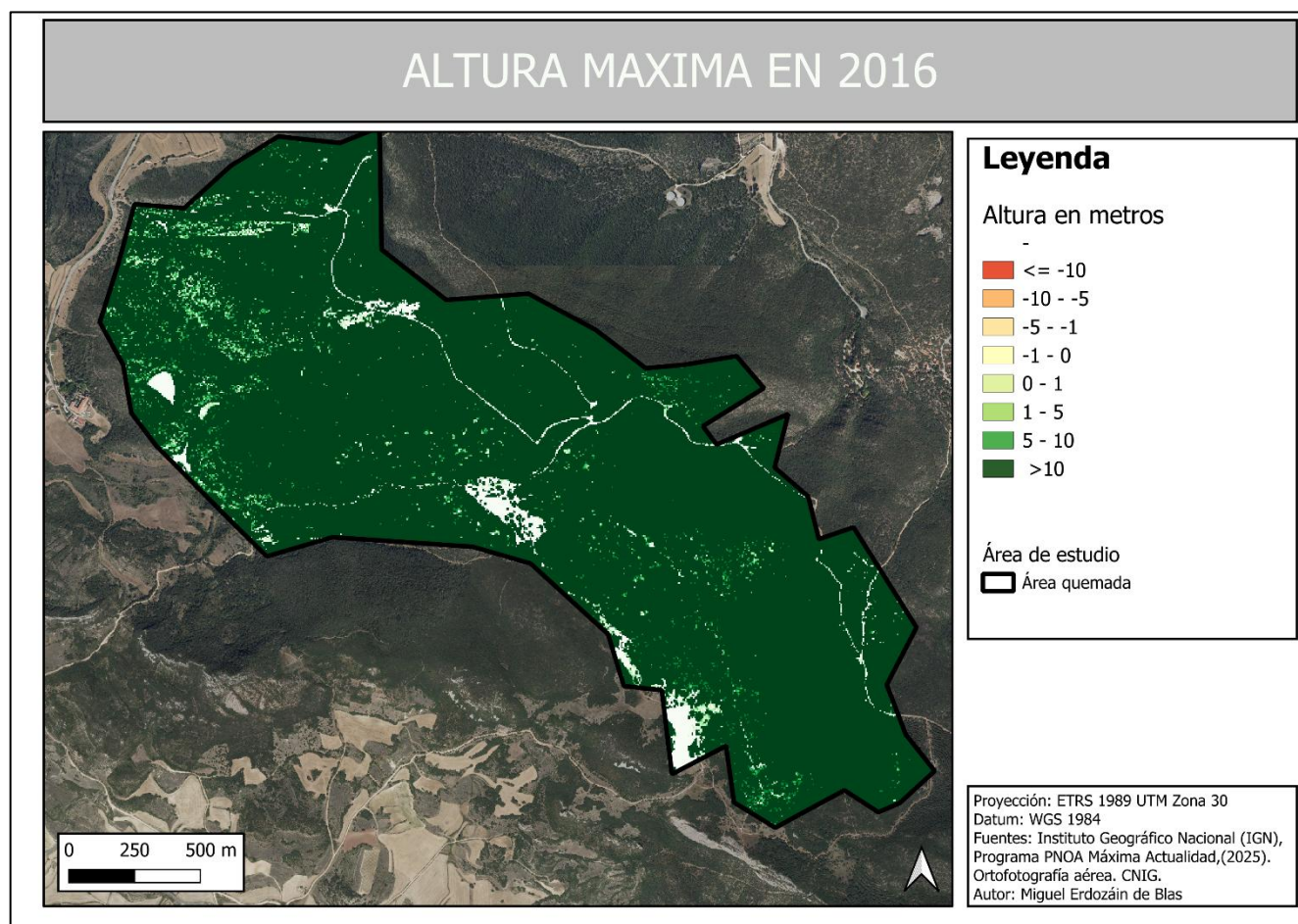


Figura 32. Altura máxima de Galbárruli en 2016

La densidad arbórea por encima de 4 metros en la zona muestra predominantemente valores cercanos a 0, lo que indica áreas con escasa o nula presencia de elementos (Figura 33). No obstante, en el sector sureste se observan acumulaciones con alta densidad arbórea, representadas por tonalidades de azul oscuro, que destacan claramente frente al resto del mapa.

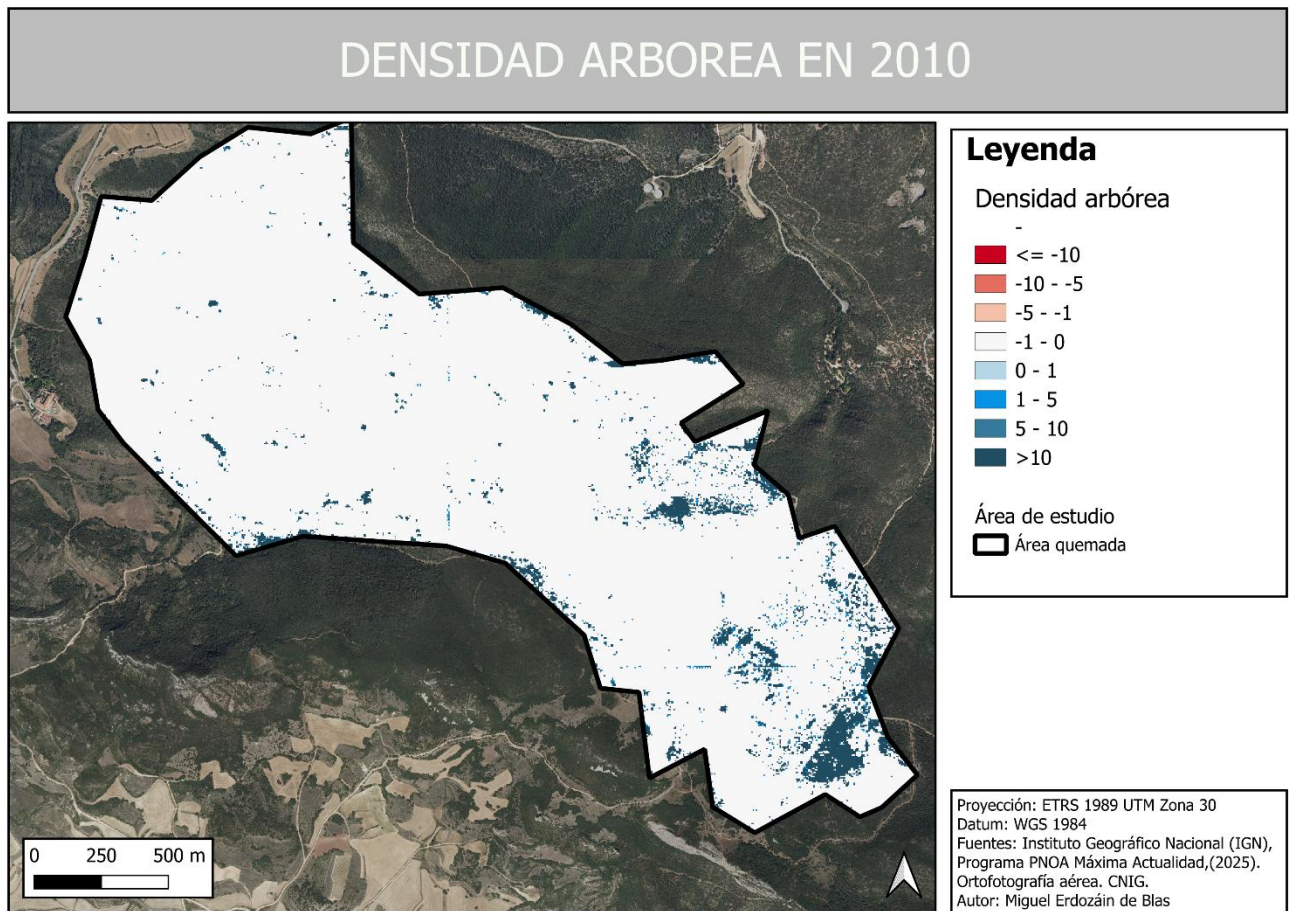


Figura 33. Densidad arbórea de Galbárruli en 2010

La densidad arbórea por encima de 4 metros en la zona se caracteriza en su mayoría por valores igual a 0, lo que indica ausencia de densidad arbórea en amplias áreas del incendio (Figura 34). Sin embargo, se distribuyen numerosos puntos con alta densidad arbórea, representados en azul oscuro, que aparecen de forma dispersa a lo largo del área. Destacan especialmente dos grandes acumulaciones ubicadas en la parte sur, hacia el centro de la zona analizada.

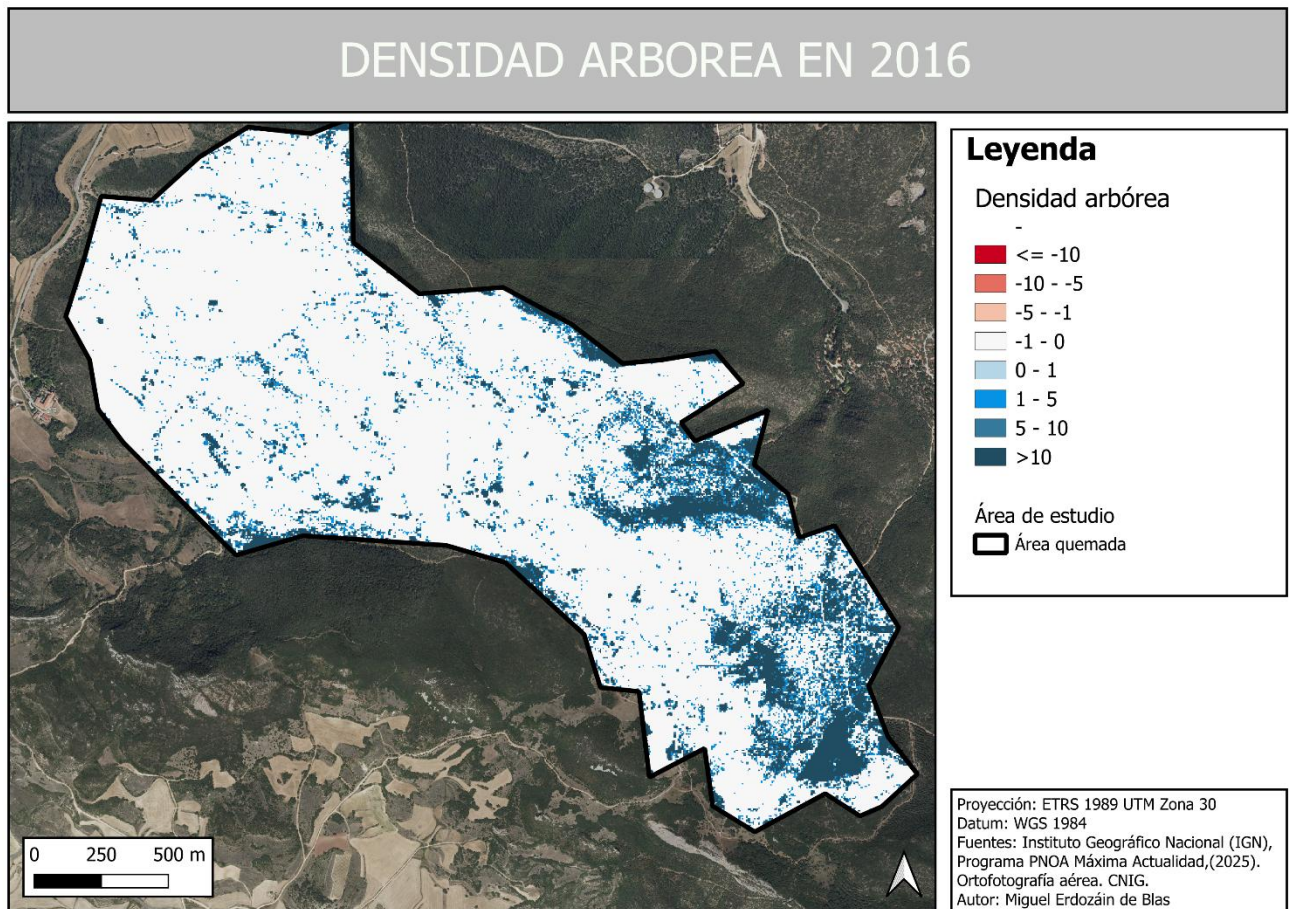


Figura 34. Densidad arbórea de Galbárruli en 2016

5.5. Evolución post-fuego del vigor vegetal

Incendio de Arnedillo

La comparativa del NDVI entre la situación prefuego y el postfuego inmediato en la zona de Arnedillo muestra valores máximos de 0,8 y mínimos de - 0,8 (Figura 35). Espacialmente, los valores más altos de NDVI se localizan principalmente en la parte sur del incendio, indicando áreas donde la vegetación se mantuvo más densa o fue afectada en menor medida por el incendio, se pueden apreciar valores de entre 0.05 a 0.4. Por otro lado, se identifican sectores con valores bajos al norte del área afectada, lo que refleja una mayor severidad del incendio o pérdida de cobertura vegetal, variando de valores de - 0,05 a - 0,6.

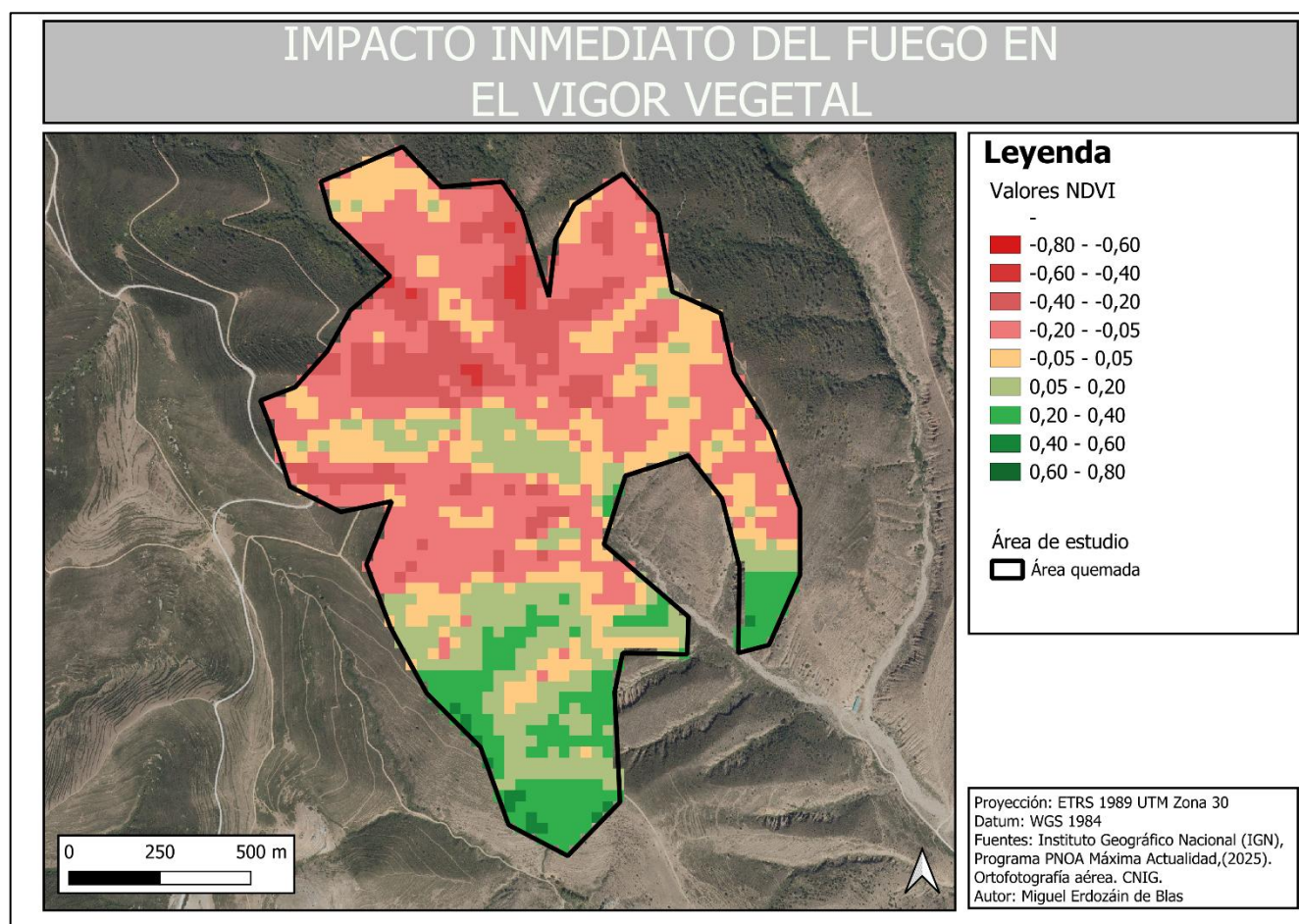


Figura 35. Impacto inmediato del fuego en el vigor vegetal en el incendio de Arnedillo (2001)

El análisis de la evolución a largo plazo (año 2016) del vigor vegetal con respecto a la situación prefuego muestra un patrón espacial homogéneo en la zona afectada por el incendio de Arnedillo (Figura 36). Los valores máximos de NDVI registrados varían entre 0,8 a -0,8. Se puede observar que los valores de NDVI se encuentran en el mismo rango en toda la zona y van de 0,2 a 0,4. No obstante se aprecian zonas esparcidas que comprenden valores de entre 0,05 a 0,2.

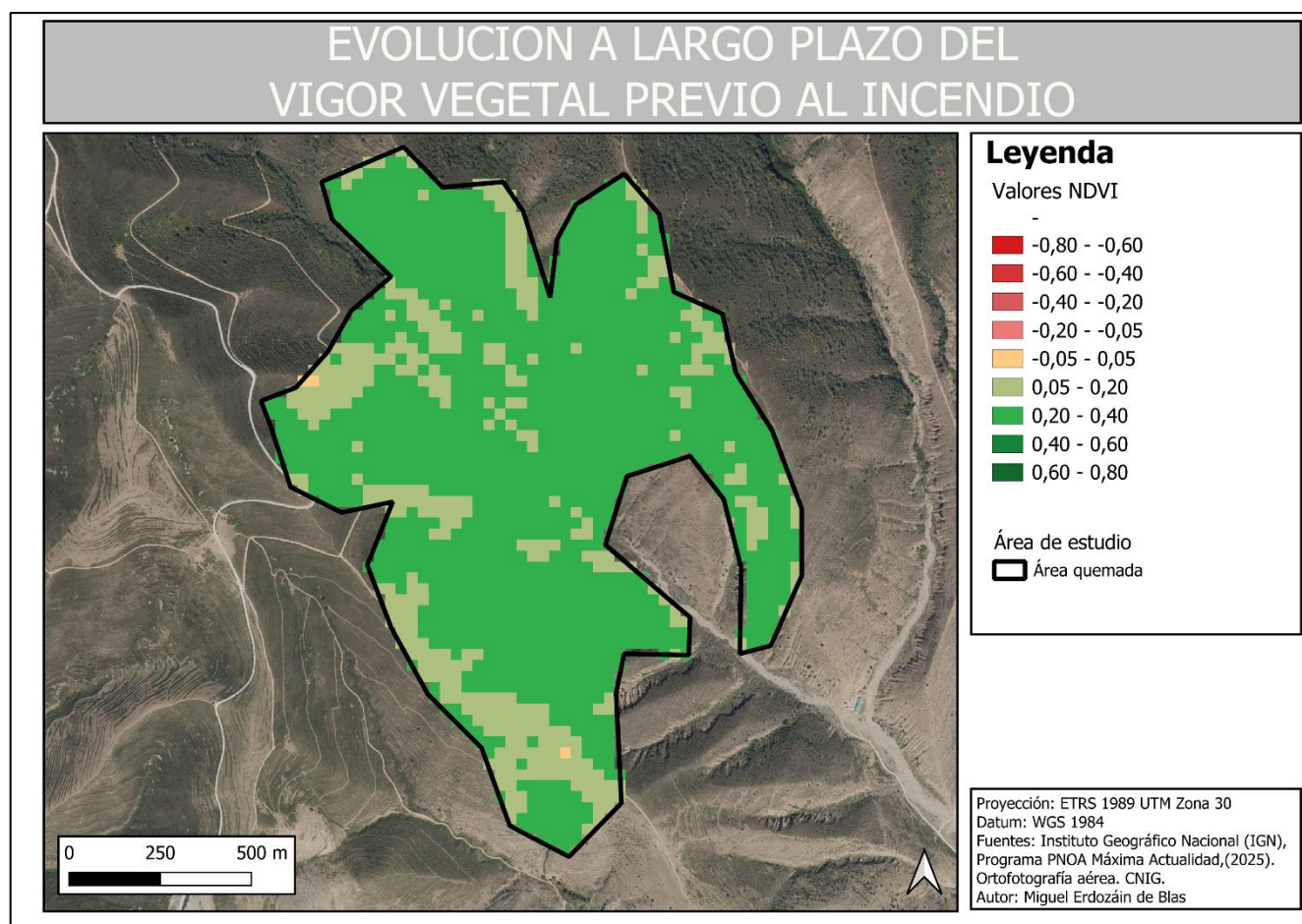


Figura 36. Evolución a largo plazo del vigor vegetal previo al incendio de Arnedillo (2016 - Prefuego)

La comparación entre el NDVI de 2016 y el NDVI postfuego inmediato (2001) en Arnedillo presenta valores máximos de 0,8 y mínimos de - 0,8 (Figura 37). Los valores más altos y positivos se concentran en la parte norte del incendio, distribuidos de manera homogénea, lo que refleja un incremento significativo de la cobertura vegetal respecto a los momentos inmediatamente posteriores al fuego. En contraste, en la parte sur del incendio predominan valores bajos y negativos, lo que evidencia un proceso de recuperación más lento o limitado en esa zona, e incluso pérdidas. Podríamos estimar que los valores oscilan de -0,2 en la parte sur a 0,8 en la parte norte

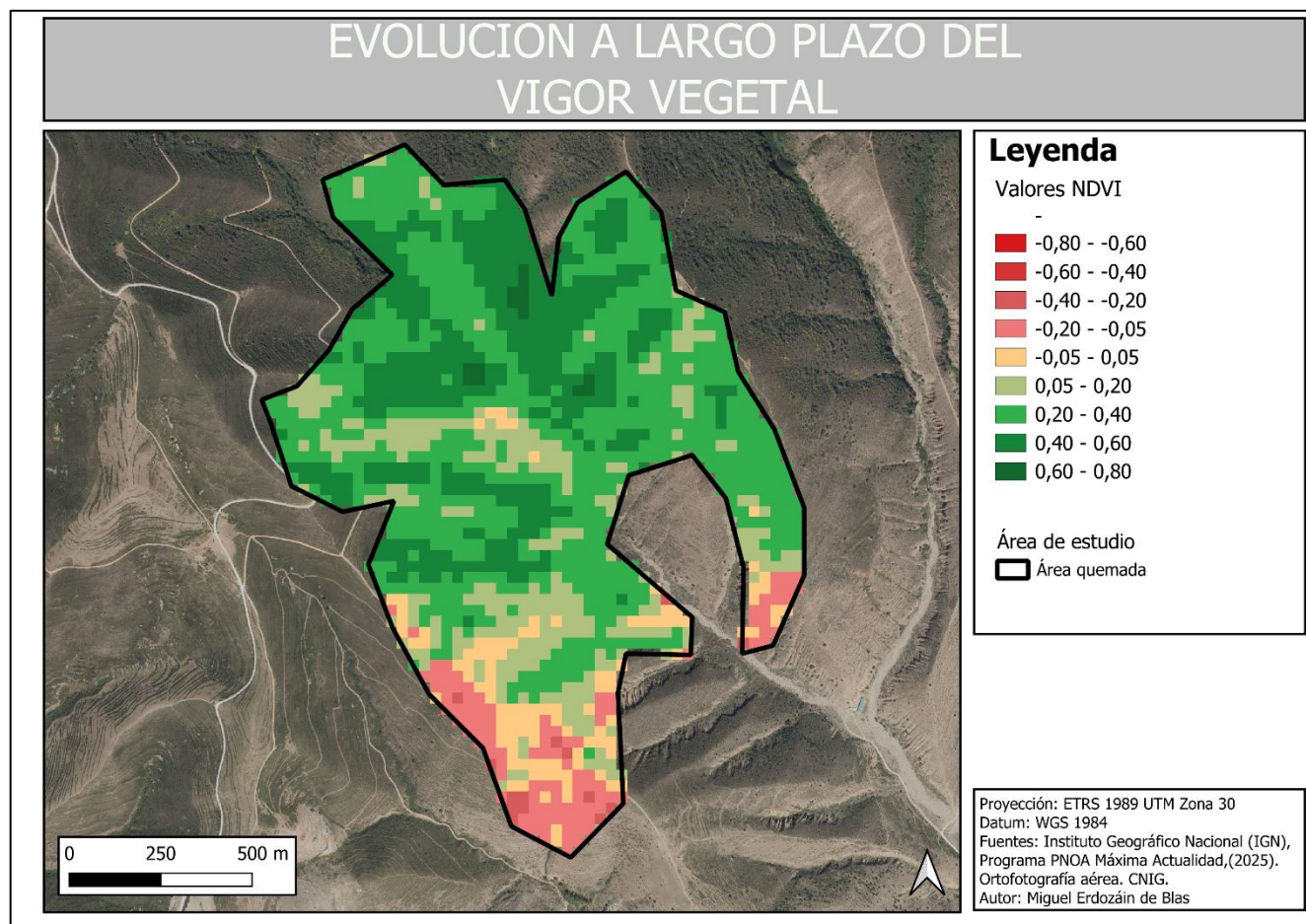


Figura 37. Evolución a largo plazo del vigor vegetal en la zona del incendio de Arnedillo (2016 - Postfuego)

Incendio de Galbárruli

La comparativa del NDVI entre la situación prefuego y el postfuego inmediato en la zona de Galbárruli muestra valores máximos de 0.8 y mínimos de -0,8 (Figura 38). Los valores más altos de NDVI se concentran en una única región al oeste del incendio, formando una mancha homogénea muy pequeña que indica una vegetación que parece que no ha sido afectada de gran manera por el fuego, ya que se aprecian valores comprendidos entre -0,05 y 0,2.

En contraste, el resto de la zona presenta los valores mucho más bajos y muy negativos lo que indica una pérdida de vegetación significativa o un daño severo provocado por el incendio. Esta distribución espacial sugiere una muy insignificante recuperación desigual en esa zona puntual a lo largo del área afectada. Por lo que se podría afirmar que se aprecian pérdidas homogéneas en toda la zona, comprendiendo valores de -0,2 hasta -0,8.

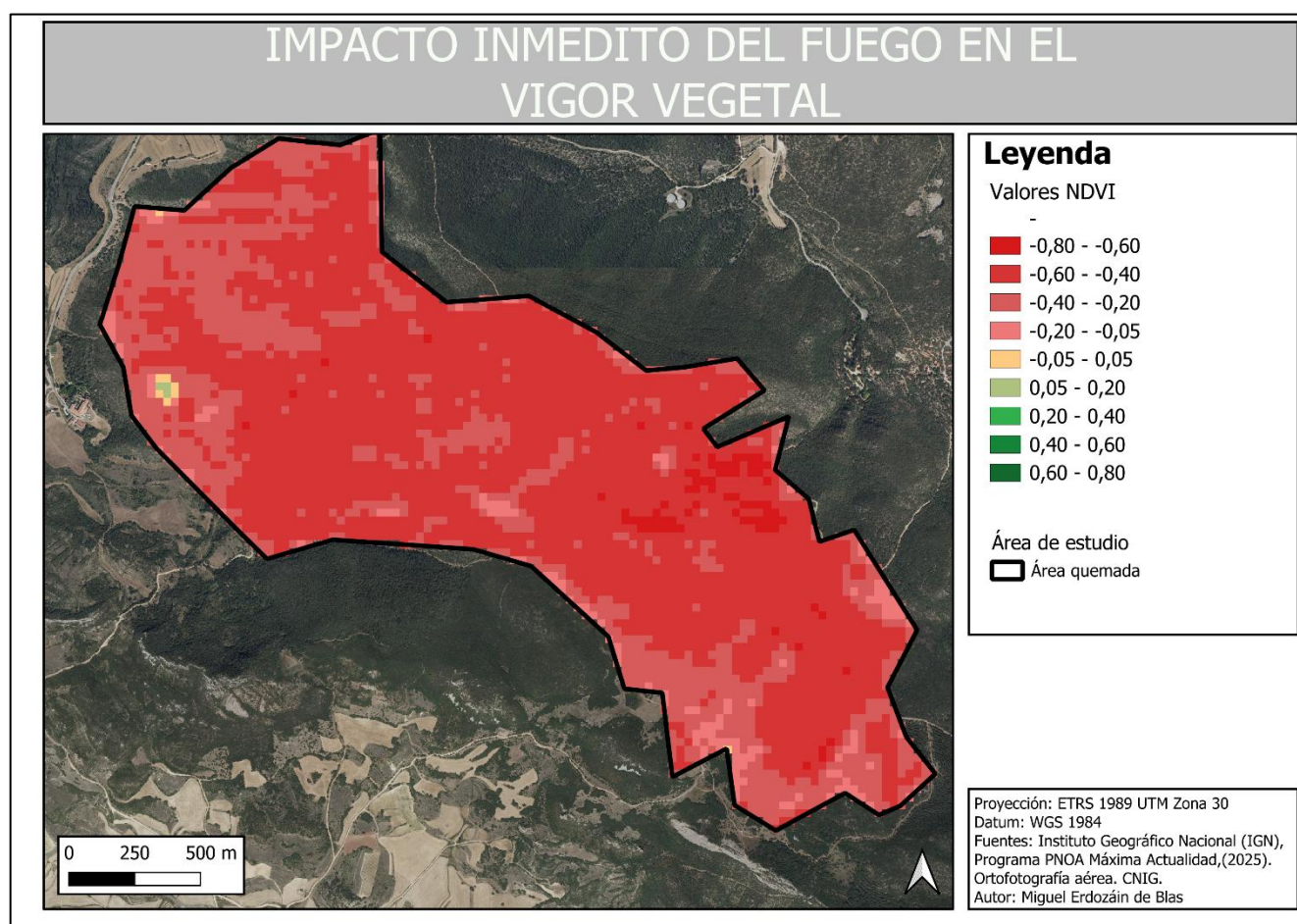


Figura 38. Impacto inmediato del fuego en el vigor vegetal en el incendio de Galbárruli (1991)

La comparativa del NDVI entre la situación prefuego y el año 2016 en la zona de Galbárruli muestra valores máximos de 0,8 y mínimos de -0,8 (Figura 39). Como se puede apreciar en el mapa se presentan valores comprendidos entre 0,05 y 0,2 en todo el mapa observándose una homogeneidad. Sin embargo, se puede identificar alguna aislada al este del área de incendio con valores relativamente altos, pudiendo llegar a valores de 0,6 lo que indica la presencia de vegetación con buena recuperación o áreas menos afectadas por el fuego. En contraste, se observan varias franjas continuas de valores bajos que se extienden desde el norte hasta el sureste de la zona afectada, con valores de -0.05 a 0.05. Estas franjas de bajo NDVI podrían corresponder a áreas con severa afectación del incendio, pérdida de vegetación o incluso estructuras lineales del terreno como caminos o cortafuegos.

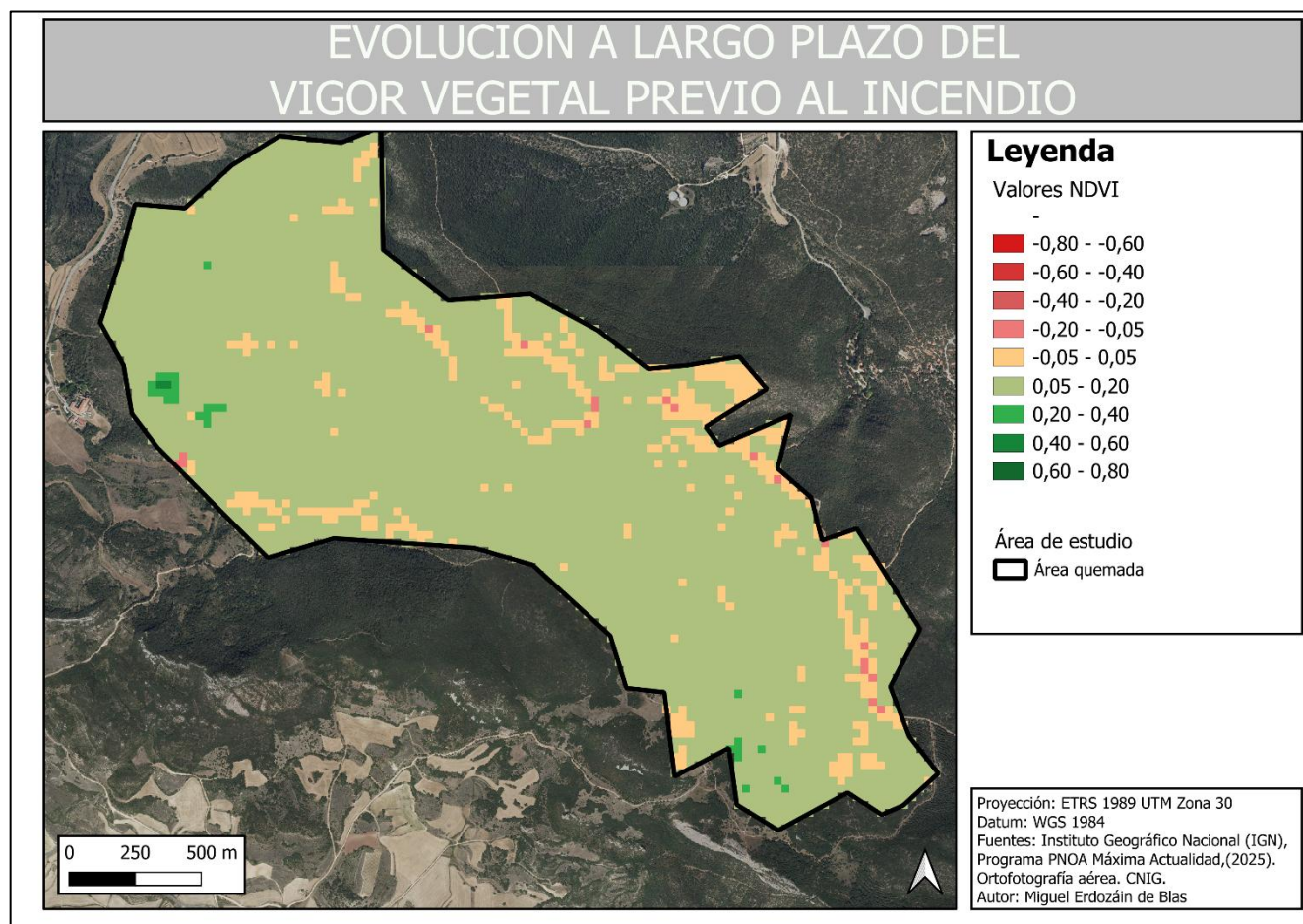


Figura 39. Evolución a largo plazo del vigor vegetal previo al incendio de Galbárruli (2016 - Prefuego)

La comparación entre el NDVI de 2016 y el NDVI postfuego (1991) en Galbárruli muestra valores máximos de 0,8 y mínimos de - 0,8 (Figura 40). En general, prácticamente toda la superficie del incendio presenta valores positivos, que oscilan entre 0,2 y 0,8, indicando una mejora consistente de la cobertura vegetal. Los valores más bajos (aunque siempre positivos) aparecen de manera dispersa y puntual en algunas zonas, sin conformar un patrón espacial definido ni concentrarse en un área concreta del incendio.

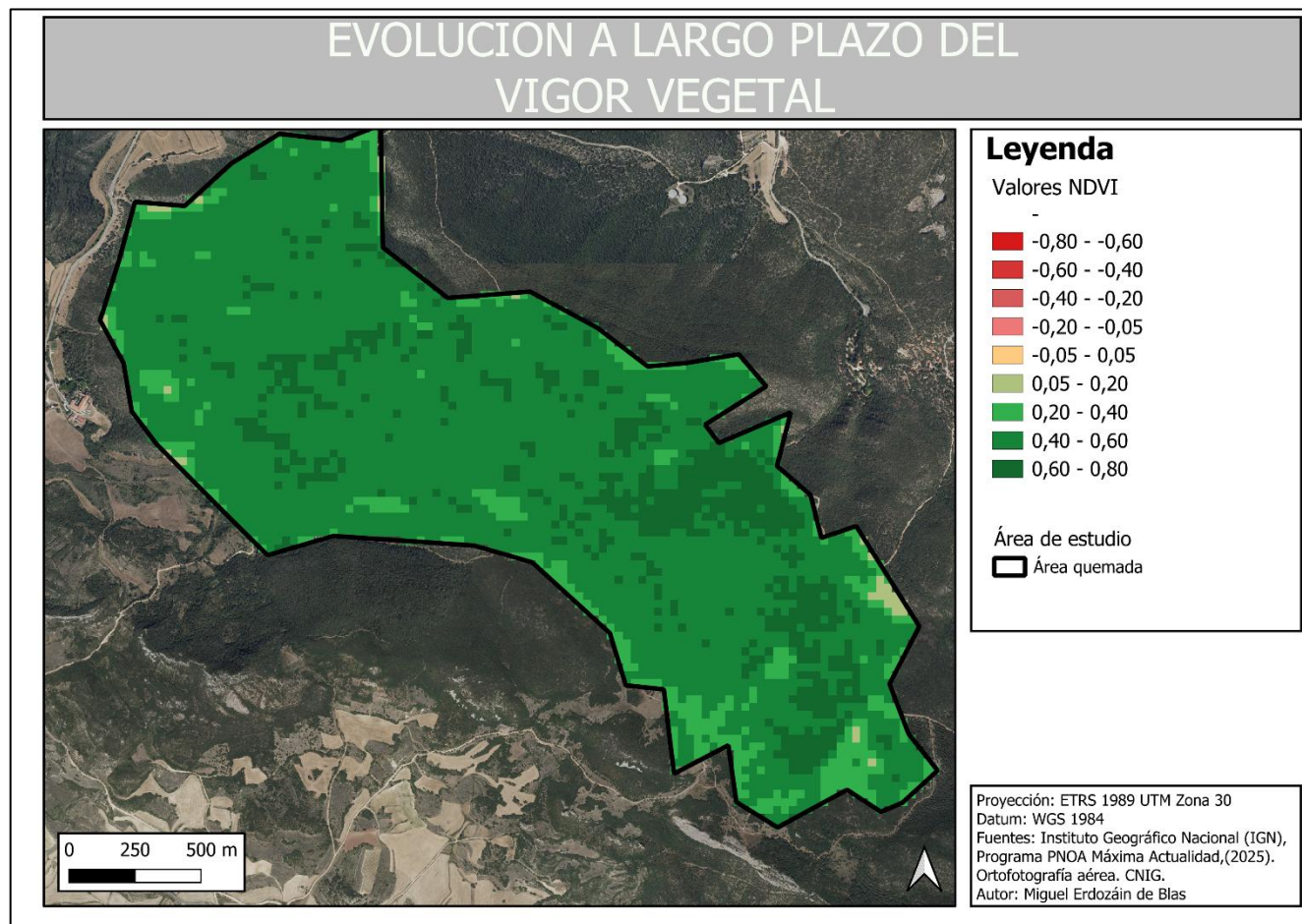


Figura 40. Evolución a largo plazo del vigor vegetal en la zona del incendio de Galbárruli (2016 - Postfuego)

5.6. Evolución post-fuego de la estructura forestal

Incendio de Arnedillo

El análisis del percentil 95 de altura (P95) entre los años 2010 y 2016 muestra valores máximos de 10 y mínimos de -10 (Figura 41). La representación cartográfica, en una escala cromática de verde a rojo pasando por el amarillo blanquecino, refleja un predominio de tonos verdes claros verde un poco más oscuros en la mayor parte de la superficie del incendio. Este patrón sugiere que, en general, los valores tienden a situarse en torno a 1 y 5 por lo que se aprecia un ligero crecimiento en todo el incendio. No obstante, se observan zonas puntuales con acumulaciones de tonalidades verdes más oscuras, que indicarían cambios más notables en el P95, en sentido positivo, describiendo un gran crecimiento en la altura máxima en ciertas zonas.

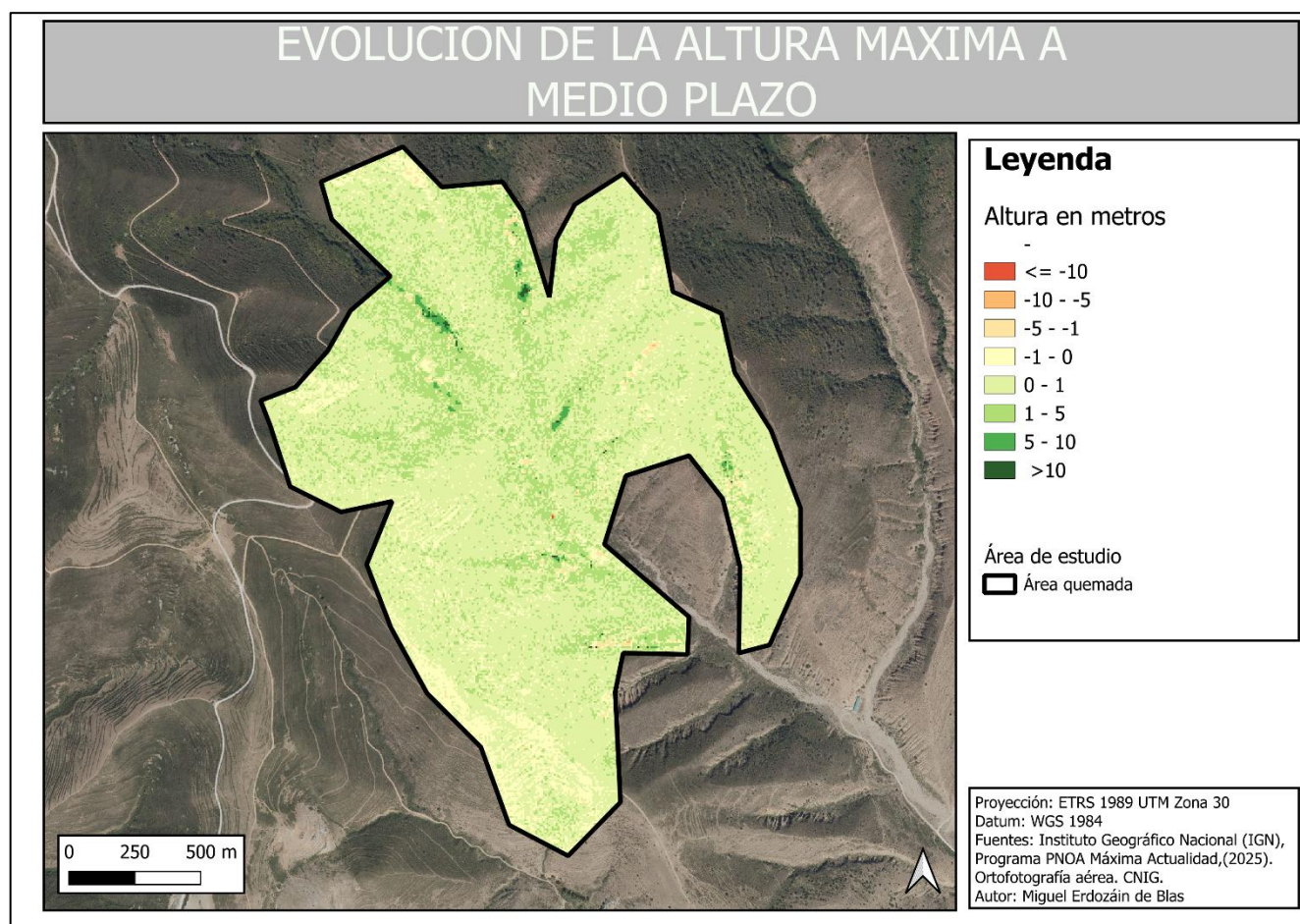


Figura 41. Evolución de la altura máxima a medio plazo en Arnedillo

La diferencia en la densidad arbórea de vegetación por encima de 4 metros entre 2010 y 2016 muestra valores máximos de 10 y mínimos de -10 (Figura 42). El mapa, representado con una escala cromática que va del azul (valores positivos) al rojo (valores negativos), refleja en su mayor parte un predominio de tonos blancos, lo que indica ausencia de cambios significativos en la densidad arbórea en gran parte del área de estudio.

Sin embargo, se observa un número notable de franjas azules oscuras y rojas, estas franjas se observan dispersas en la mayor parte de la zona de estudio excepto en la parte más al sur, lo que indica un aumento y disminución en la densidad arbórea de vegetación en esos sectores, no obstante, son los colores oscuros los que predominan entre los colores rojos y azules oscuros, superando en numerosas zonas el umbral de 10 metros de altura máxima.

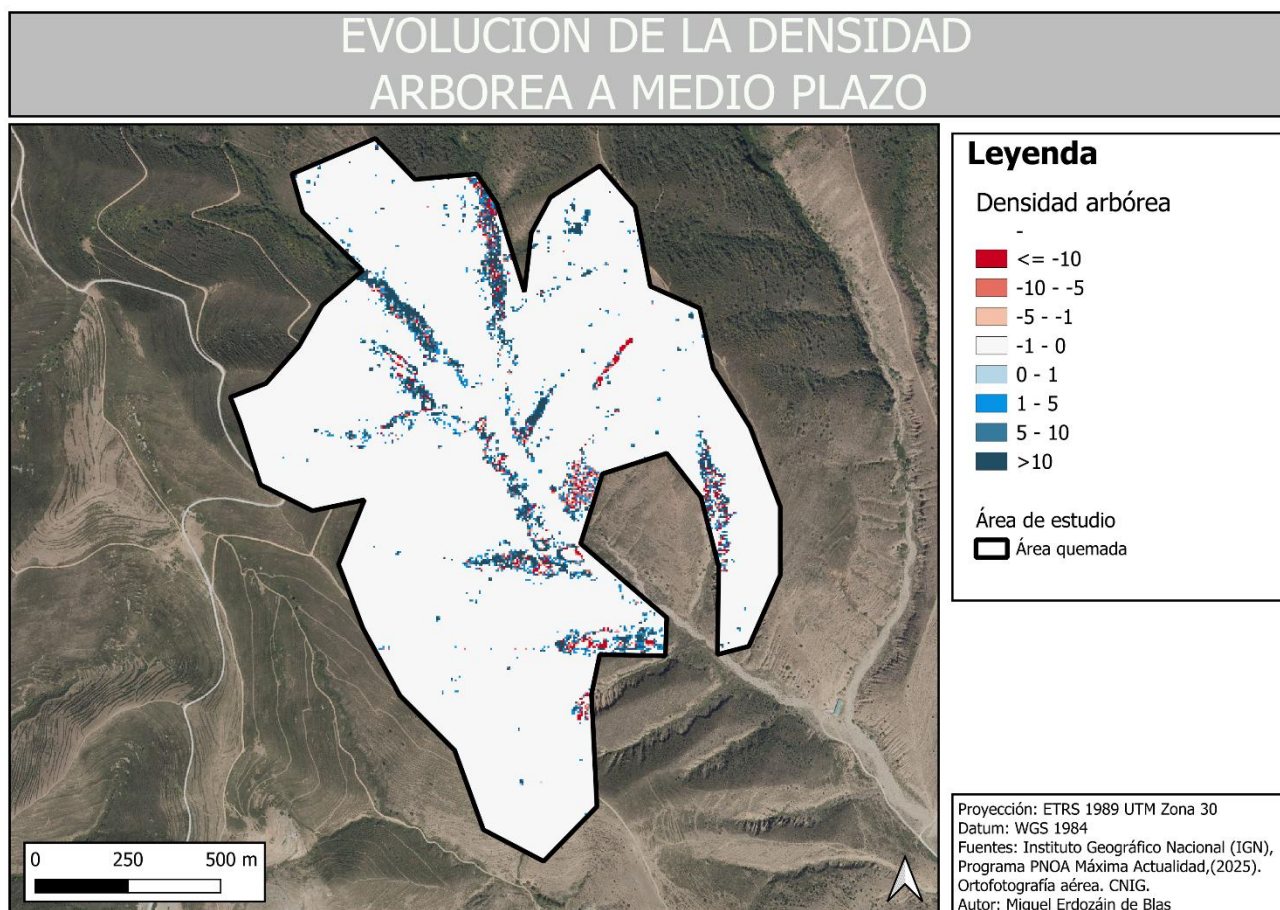


Figura 42. Evolución de la densidad arbórea a medio plazo en Arnedillo

Incendio de Galbárruli

El análisis del percentil 95 de altura (P95) entre 2010 y 2016 muestra valores máximos de 10 y mínimos de -10 (Figura 43). En la representación cartográfica, basada en una escala cromática de verde a rojo pasando por el amarillo blanquecino, predomina de forma clara el color verde muy clarito, lo que sugiere que la mayor parte de la superficie presenta pequeños cambios significativos en altura. Además, se aprecian un gran predominio de un verde más oscuro, que corresponderían a valores positivos y, por tanto, a mayores incrementos en la altura máxima de la vegetación.

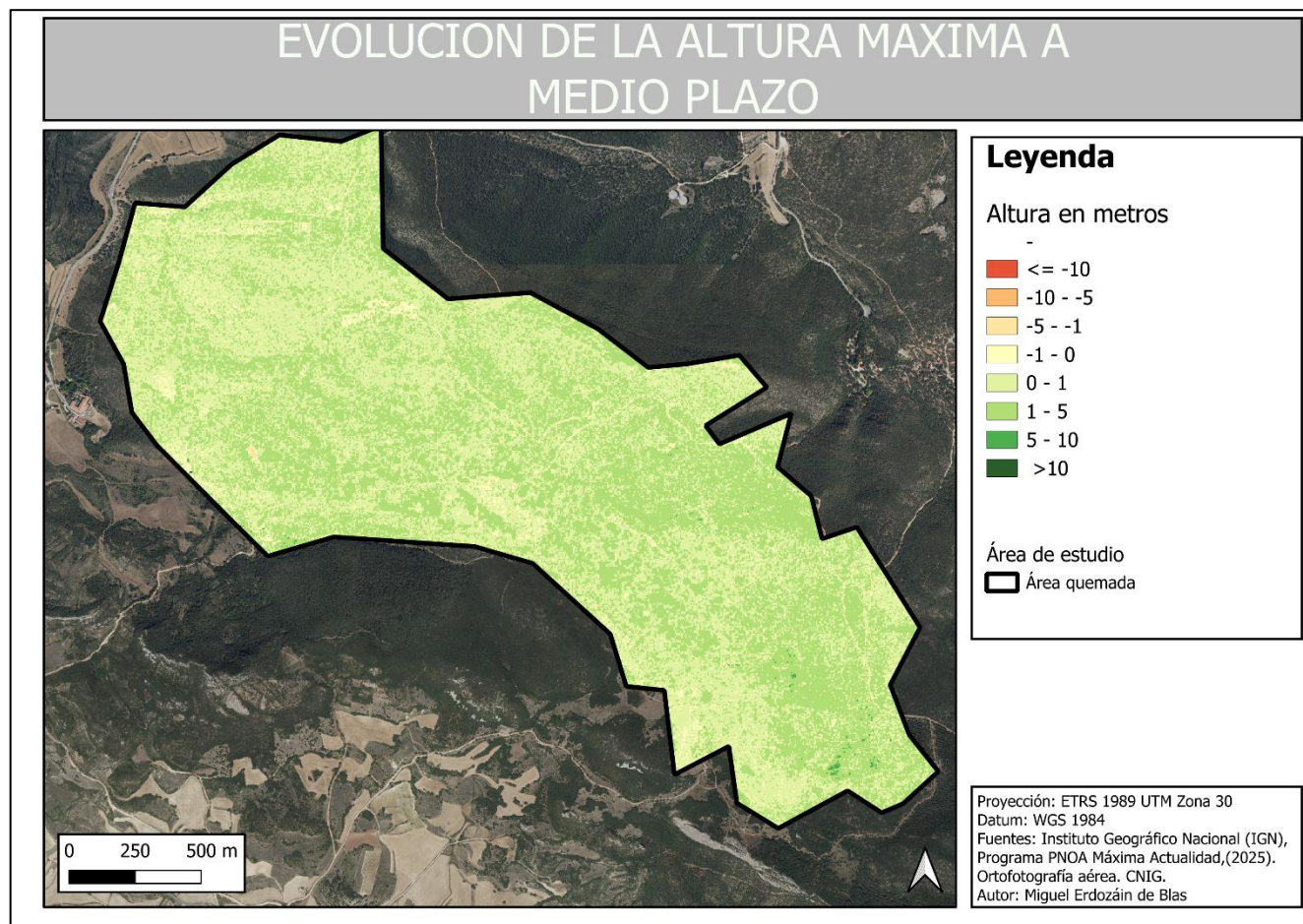


Figura 43. Evolución de la altura máxima a medio plazo en Galbárruli

La diferencia en la densidad arbórea de vegetación por encima de 4 metros entre 2010 y 2016 muestra valores máximos de 10 y mínimos de -10 (Figura 44). La escala de representación va del azul oscuro (aumento de densidad) al rojo intenso (pérdida de densidad), con el blanco como indicador de estabilidad.

En la mayoría del mapa predomina un color blanco, lo que sugiere ausencia de cambios significativos en la estructura arbórea en la mayor parte del área incendiada. No obstante, se observa una gran aglomeración notable de colores azules más oscuros en la parte este del incendio, que comprende valores superiores a 10 metros cuadrados, lo que indica un incremento en la densidad arbórea en esa zona. Asimismo, aparecen manchas también azuladas dispersas en la parte oeste, aunque de forma muy dispersas.

En cuanto a las zonas con colores rojizos, son escasas, pero tienden a agruparse en pequeñas manchas localizadas, lo que refleja una ligera pérdida de densidad arbórea en sectores puntuales.

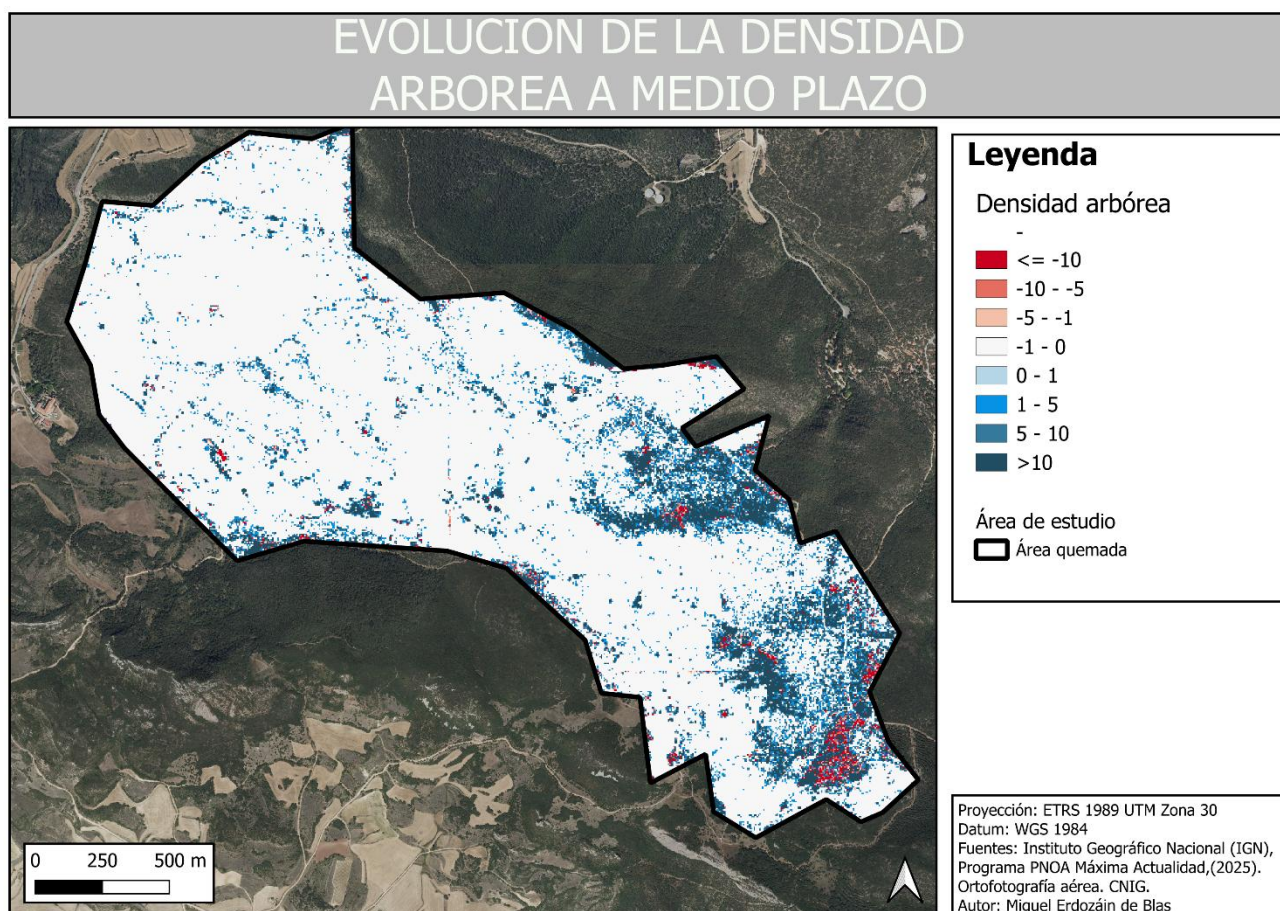


Figura 44. Evolución de la densidad arbórea a medio plazo en Galbárruli

5.7. Análisis de los factores condicionantes de la regeneración post-fuego

5.7.1. Incendio de Arnedillo

La Figura 45 muestra las relaciones generales entre la evolución de NDVI a largo plazo (postfuego año 2016 – postfuego inmediato) y las diferentes variables de interés que pueden haber tenido influencia en la recuperación de la vegetación en el incendio de Arnedillo.

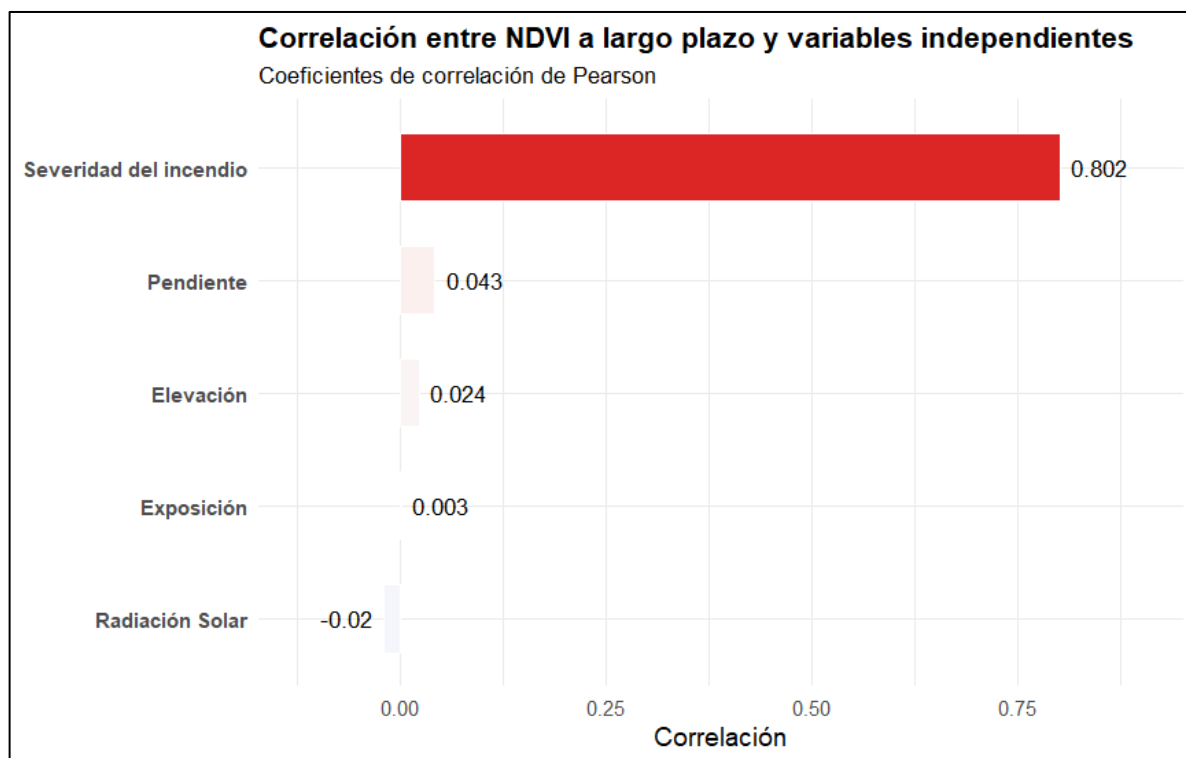


Figura 45. Correlaciones entre el vigor vegetal a largo plazo y variables topográficas y severidad en el incendio de Arnedillo.

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la radiacion solar

En la Figura 46 se observa que en la zona de Arnedillo, la correlación entre dNDVI (2016 - Postfuego) y la radiación solar es muy baja (valor de correlación: - 0.0196), lo que indica que no existe una relación lineal significativa entre ambas variables. El mapa de radiación muestra un patrón con valores altos (cerca de 600 Wh/m²) alrededor del centro del área, mientras que en el centro los valores disminuyen hasta aproximadamente 100 Wh/m².

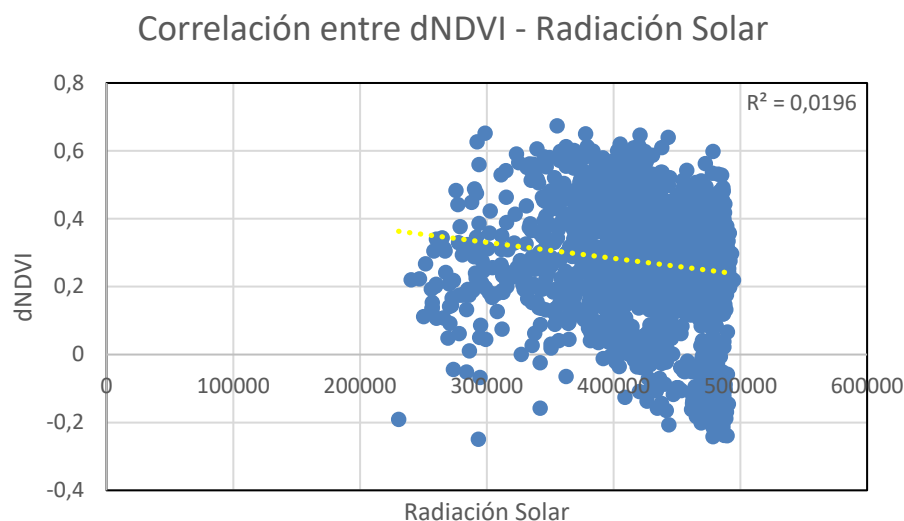


Figura 46. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y radiación solar en el incendio de Arnedillo

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la pendiente

En la Figura 47 se observa que en la zona de Arnedillo, la correlación entre dNDVI (2016 - Postfuego) y la pendiente del terreno es muy baja (valor de correlación: 0.0431), lo que indica que no existe una relación lineal significativa entre ambas variables. La pendiente presenta un degradado progresivo desde el centro del área hacia el exterior, con valores más altos de pendiente concentrados en el centro del mapa y una disminución gradual hacia las zonas periféricas.

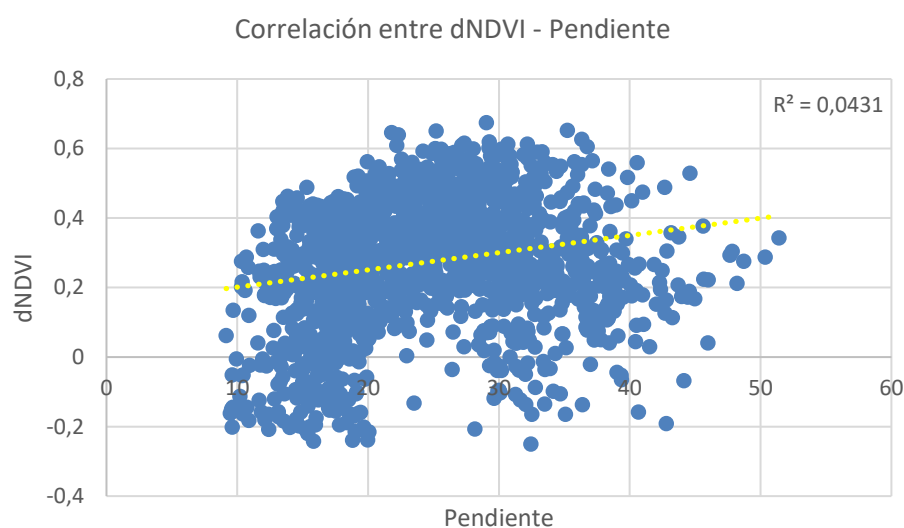


Figura 47. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y pendiente en el incendio de Arnedillo

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la exposición

En la Figura 48 se observa que en la zona de Arnedillo, la correlación entre dNDVI (2016 - Postfuego) y la exposición del terreno es prácticamente nula (valor de correlación: 0.0027), lo que indica que no existe una relación lineal entre la orientación de las laderas y la recuperación de la vegetación después del incendio. El mapa de exposición muestra una distribución muy variable en todo el territorio: en la zona derecha predominan orientaciones de 270°, 135° y 225°, mientras que en la parte izquierda se observan valores de 90°, 45° y también algunos de 135°, sin una organización clara o dominante.

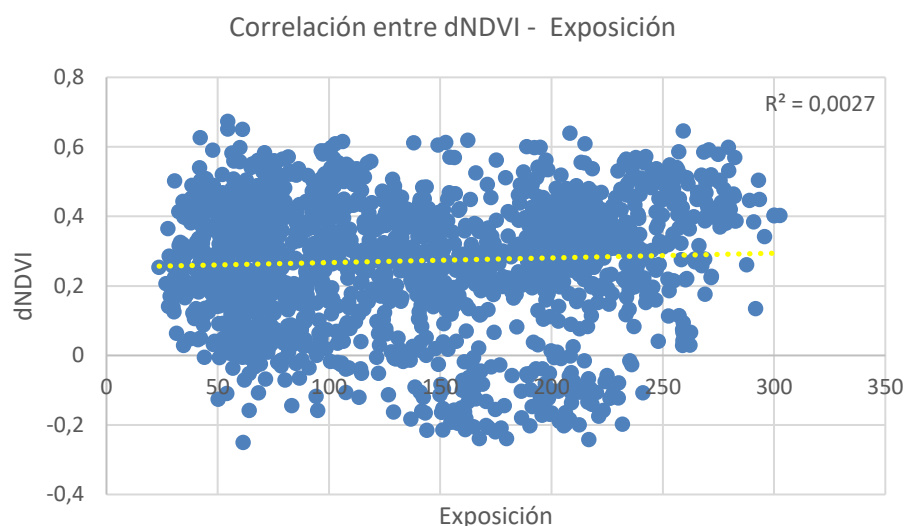


Figura 48. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y exposición en el incendio de Arnedillo.

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la severidad del incendio

En la Figura 49 se observa en la zona de Arnedillo una correlación muy alta entre el índice dNDVI (2016 - Postfuego) y la severidad del incendio medida por dNBR (valor de correlación: 0.8016). El mapa de severidad indica que la parte norte presenta valores de severidad alta y media-alta, mientras que en la parte sur predominan zonas sin cambios o incluso con aumento de vegetación.

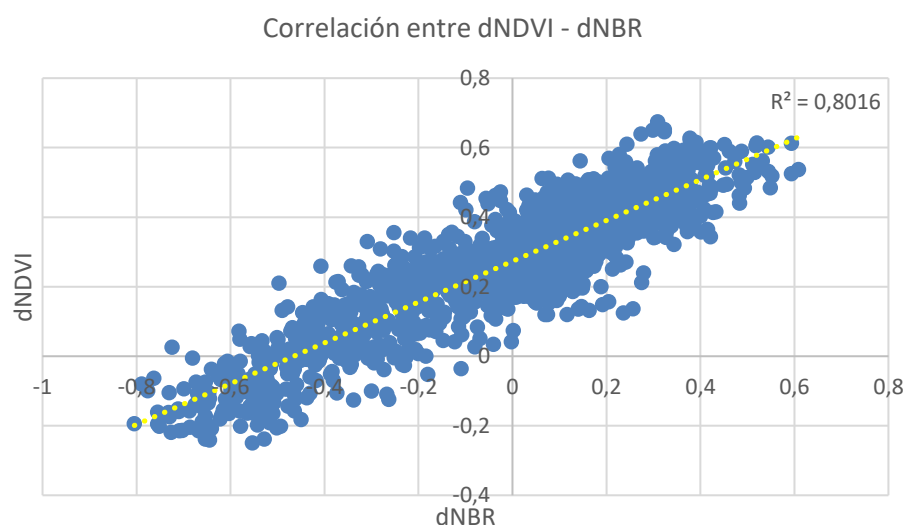


Figura 49. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y severidad en el incendio de Arnedillo

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la elevación

En la Figura 50 se observa el análisis entre la relación entre el vigor vegetal a largo plazo, representado mediante el índice NDVI, y la elevación del terreno, obtenida a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). La correlación de Pearson obtenida entre ambas variables fue de $r = 0.0224$, lo que indica una correlación positiva extremadamente débil, prácticamente nula. Este valor sugiere que no existe una relación lineal significativa entre la elevación del terreno y el vigor de la vegetación en el área de estudio. En otras palabras, los cambios en la altitud no parecen estar asociados con variaciones en el NDVI a largo plazo.

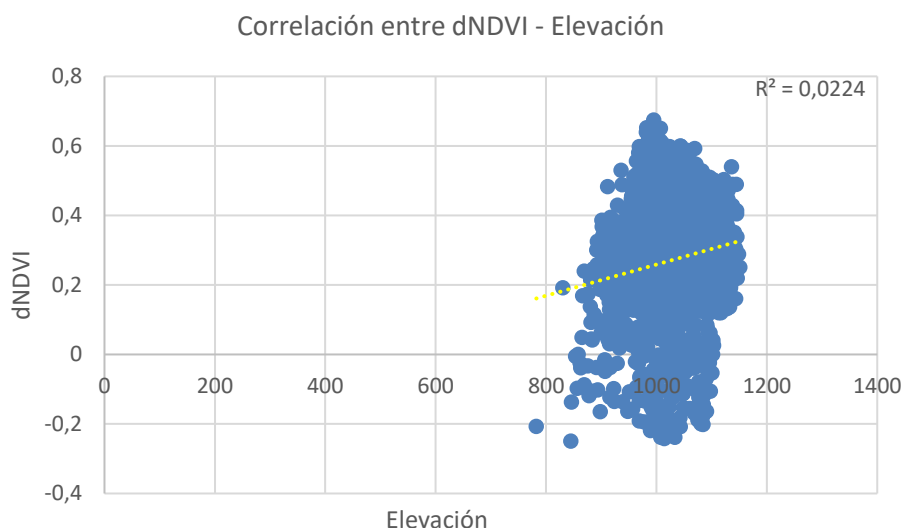


Figura 50. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y elevación en el incendio de Arnedillo

5.7.2. Incendio de Galbárruli

La Figura 51 muestra las relaciones generales entre la evolución de NDVI a largo plazo (postfuego año 2016 – postfuego inmediato) y las diferentes variables de interés que pueden haber tenido influencia en la recuperación de la vegetación en el incendio de Galbárruli.

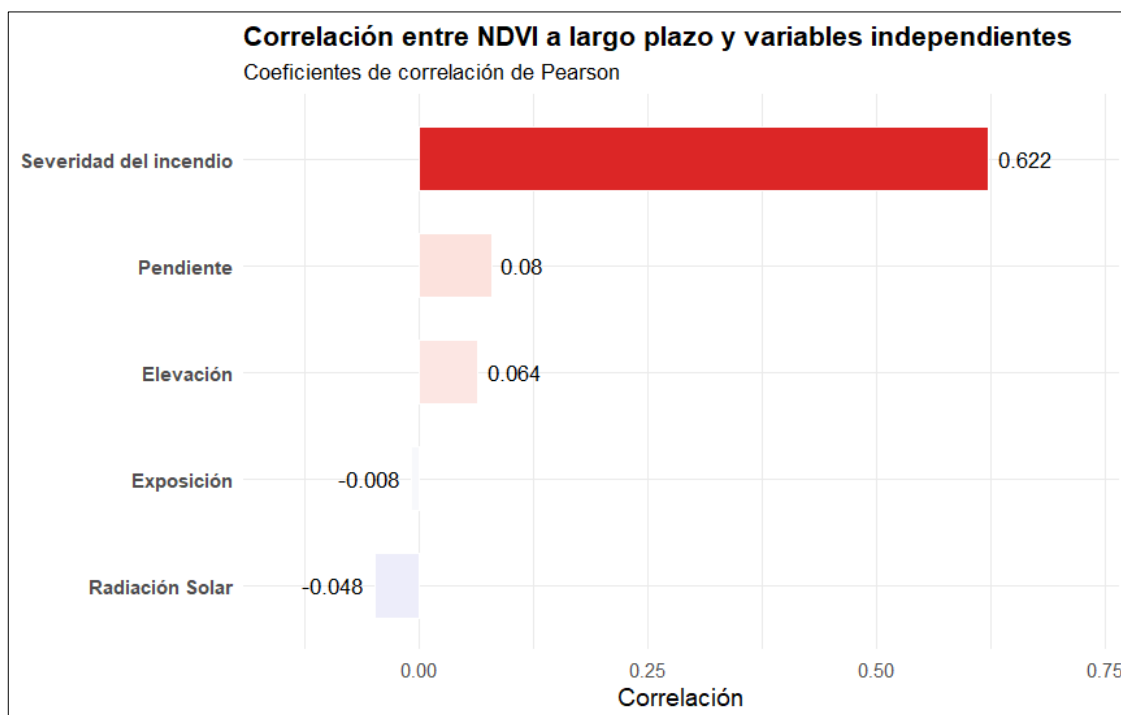


Figura 51. Correlaciones entre el vigor vegetal a largo plazo y variables topográficas y severidad en el incendio de Galbárruli

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la pendiente

En Galbárruli se observa una correlación extremadamente baja entre el índice dNDVI (2016 - Postfuego) y la pendiente del terreno, con un valor de 0.008 (Figura 52). Este resultado indica la ausencia de una relación lineal entre la inclinación del relieve y los niveles de vegetación detectados en 2016 tras el incendio.

Los valores de dNDVI postfuego son mayoritariamente altos en toda la zona, situándose entre 0.4 y 0.8, lo que sugiere una buena recuperación o persistencia de la vegetación en el año 2016. Solo se detectan pequeñas áreas puntuales con valores entre 0.2 y 0.4.

La pendiente varía a lo largo del territorio, con valores más elevados en la zona este del mapa y pendientes más suaves distribuidas por el resto de la superficie.

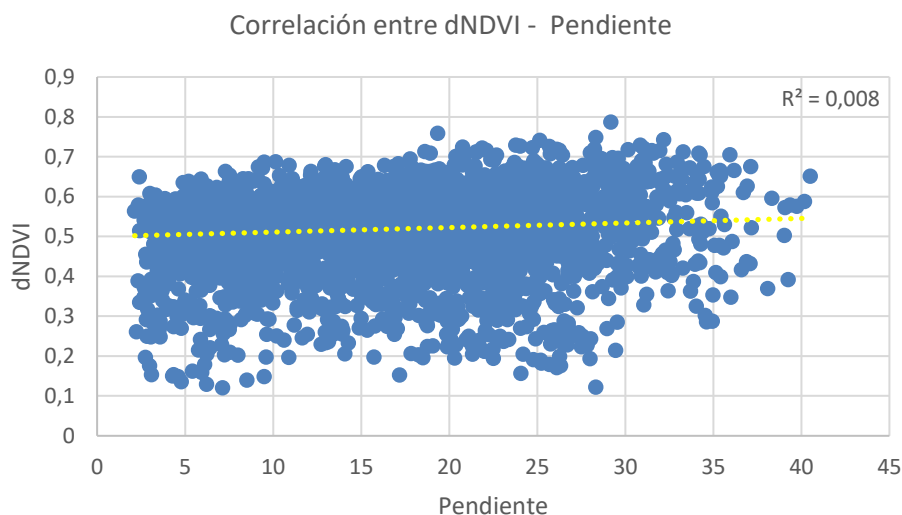


Figura 52. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y pendiente en el incendio de Galbárruli

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la severidad del incendio

En Galbárruli se observa una correlación positiva moderada-alta entre dNDVI (2016 - Postfuego) y dNBR, con un valor de 0.6223 (Figura 53). Esto indica una relación significativa entre la severidad del incendio y la recuperación o condición de la vegetación después del fuego.

Los valores de dNDVI en toda la zona oscilan mayormente entre 0.4 y 0.8, mostrando un buen estado o recuperación de la vegetación en 2016. Solo en áreas muy puntuales se observan valores más bajos, entre 0.2 y 0.4.

El dNBR presenta valores de severidad alta y moderada-alta, con algunas zonas de severidad moderada baja distribuidas por todo el territorio afectado por el incendio.

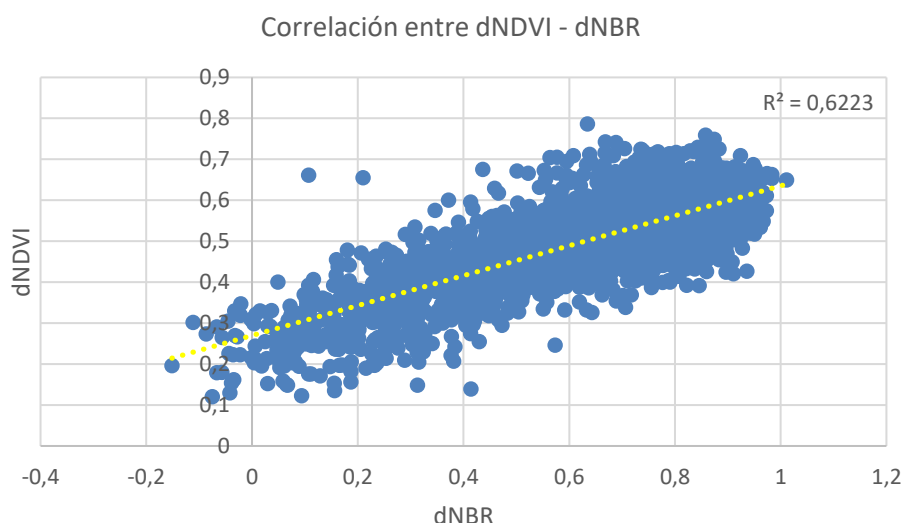


Figura 53. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y severidad en el incendio de Galbárruli

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la exposición

En Galbárruli, la correlación entre dNDVI postfuego y la exposición es muy baja, con un valor de 0.0081 (Figura 54), indicando prácticamente ausencia de relación entre ambas variables. Los valores de dNDVI en la zona varían principalmente entre 0.4 y 0.8, con algunos valores puntuales más bajos entre 0.2 y 0.4. Los valores de exposición se distribuyen de manera dispersa por todo el mapa, sin patrones claros.

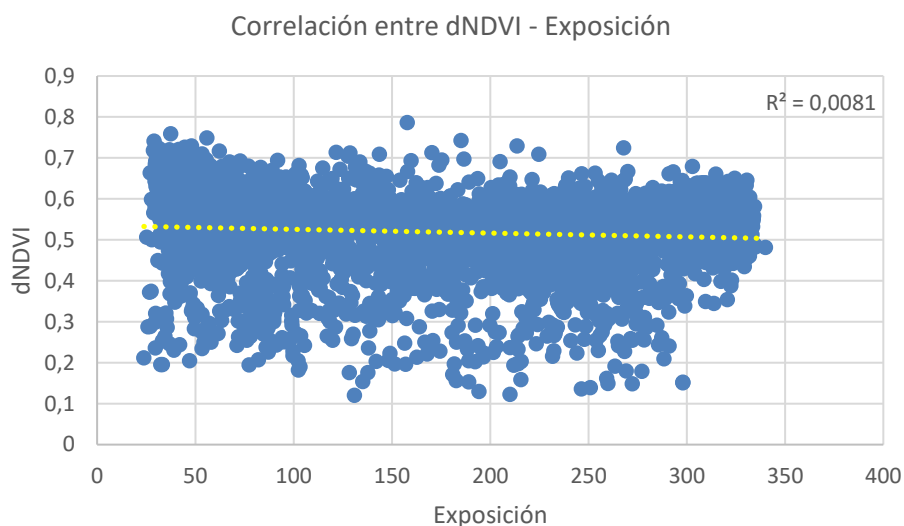


Figura 54. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y exposición en el incendio de Galbárruli

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la radiación solar

En Galbárruli, la correlación entre dNDVI postfuego y radiación solar es muy baja y negativa, con un valor de -0.0477 (Figura 55), indicando una relación prácticamente inexistente y débilmente inversa entre ambas variables. Los valores de dNDVI en la zona oscilan principalmente entre 0.4 y 0.8, con algunas áreas puntuales con valores entre 0.2 y 0.4. La radiación solar presenta valores dispersos alrededor de 550 Wh/m² en toda la zona afectada por el incendio, con ligeras variaciones.

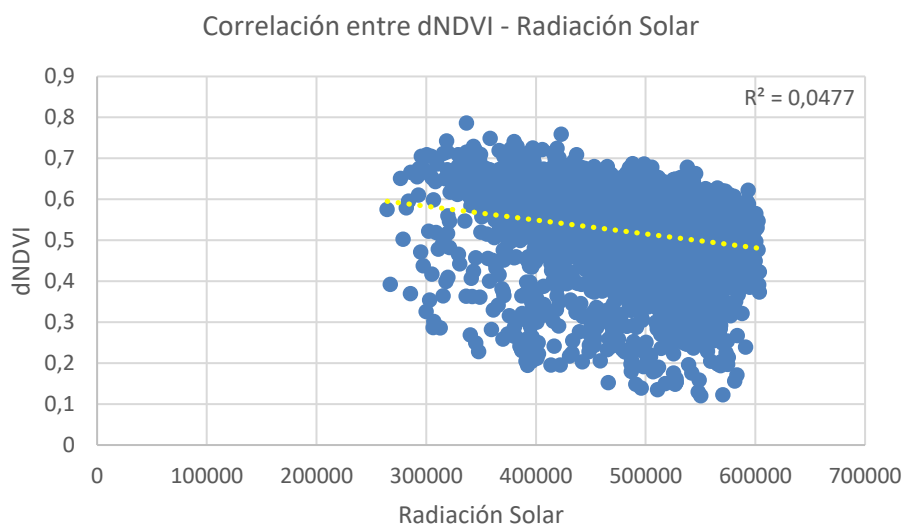


Figura 55. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y radiación solar en el incendio de Galbárruli

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la elevación

La Figura 56 muestra la relación entre el vigor vegetal a largo plazo, medido mediante el índice dNDVI (2016-postfuego), y la elevación del terreno, obtenida del Modelo Digital de Elevación (MDE). La correlación de Pearson calculada fue de $r = 0.0064$, lo que representa una correlación positiva extremadamente débil y estadísticamente insignificante. Este resultado indica que no existe ninguna relación lineal aparente entre ambas variables dentro del área de estudio. Los valores de NDVI no muestran tendencia alguna a aumentar o disminuir en función de la altitud.

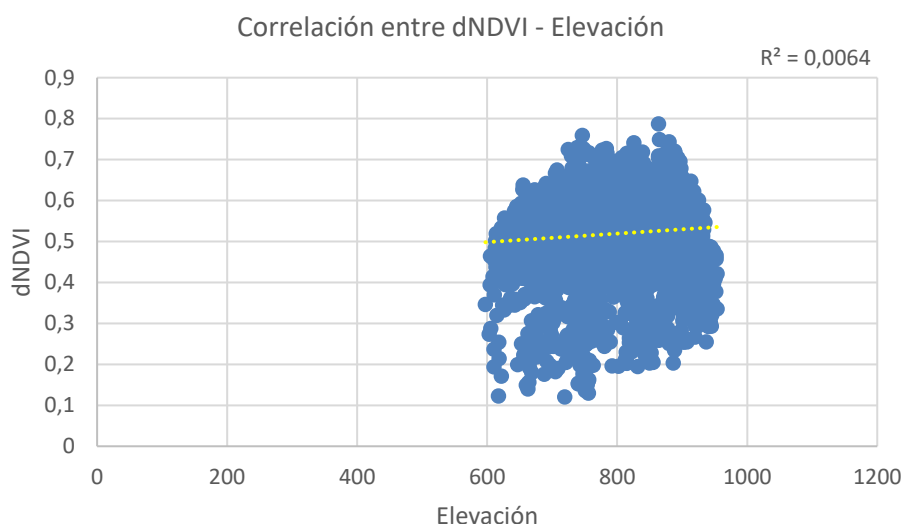


Figura 56. Correlación entre el vigor vegetal a largo plazo y elevación en el incendio de Galbárruli

6. DISCUSIÓN

6.1. Utilidad de NDVI y dNBR

El uso combinado de los índices NDVI y dNBR ha sido especialmente útil en el análisis y comprensión de la recuperación post-incendio en los casos estudiados. Estos índices han permitido cuantificar tanto el impacto inicial del fuego como la dinámica de regeneración del vigor vegetal a lo largo del tiempo, ofreciendo una base objetiva y espacialmente continua para el estudio de los ecosistemas afectados.

En primer lugar, el NDVI ha demostrado ser una herramienta eficaz para evaluar el vigor de la vegetación a lo largo del tiempo, ya que responde directamente a la cantidad y estado de la vegetación verde. En este trabajo, su uso ha permitido detectar de forma clara las áreas con mayor capacidad de rebrote y evaluar diferencias temporales entre la situación pre y post-incendio. Su sensibilidad a la cobertura vegetal lo convierte en un indicador ideal para evaluar la evolución de la vegetación tras eventos perturbadores como son los incendios forestales (Tucker, 1979; Pettorelli et al., 2005).

Por otro lado, el dNBR ha sido clave para cuantificar la severidad del incendio. Al representar la diferencia entre el NBR pre y post-fuego, este índice permite identificar las zonas más intensamente afectadas por el fuego y, por tanto, anticipar posibles dificultades en la regeneración vegetal. Diversos estudios han demostrado que el dNBR es un indicador robusto para la estimación de severidad del fuego en diversos ecosistemas, incluidos los mediterráneos (Key & Benson, 2006; Epting et al., 2005).

La alta correlación observada entre los valores de dNBR y los cambios en el NDVI (dNDVI) en este trabajo reafirma la estrecha relación entre la severidad del fuego y la capacidad de recuperación del ecosistema. En concreto, se ha podido comprobar que las áreas con mayor severidad (valores altos de dNBR) tienden a mostrar una recuperación vegetal más lenta o limitada, mientras que las zonas con

menor afectación inicial presentan una respuesta más rápida en términos de vigor vegetal. Este hallazgo coincide con investigaciones previas que han demostrado cómo el dNBR puede ser un buen predictor del comportamiento post-fuego del NDVI (Lentile et al., 2006; Veraverbeke et al., 2012).

Además, la combinación de ambos índices permite un enfoque más integral, ya que mientras el dNBR ofrece una fotografía precisa del impacto inmediato del fuego, el NDVI permite realizar un seguimiento de la recuperación a medio y largo plazo. Este enfoque dual proporciona una visión más completa de los procesos ecológicos post-incendio y facilita la toma de decisiones en materia de restauración y gestión forestal adaptativa (Chuvieco et al., 2006).

Por ello, el uso conjunto de NDVI y dNBR no solo ha sido metodológicamente acertado, sino que ha resultado esencial para entender las relaciones causa-efecto entre severidad del fuego y regeneración vegetal. La alta correlación entre ambos respalda la validez y la coherencia interna del análisis, y alinea los resultados con los hallazgos de la literatura científica existente, reforzando la solidez de este estudio.

6.2. Comparativa de la recuperación del vigor vegetal post-fuego

Incendio Arnedillo

Impacto inmediato del fuego en el vigor vegetal de Arnedillo

El patrón espacial observado indica que la recuperación de la vegetación tras el incendio no es homogénea y puede estar condicionada por la topografía u otros factores como la severidad. Las laderas con mayor exposición solar podrían favorecer un rebrote más rápido en ciertas especies, mientras que otras zonas con menor radiación o pendientes más pronunciadas podrían mostrar un NDVI más bajo.

Los valores máximos de NDVI en ciertas zonas del sur sugieren que estas áreas podrían corresponder a especies que no han sido afectados por el fuego. Por el contrario, los valores mínimos cercanos a $-0,6$ al norte reflejan sectores con mayor daño o pérdida de cobertura vegetal, posiblemente asociados a mayor intensidad del incendio.

Este análisis resalta la importancia de considerar factores ambientales y topográficos al interpretar la dinámica de recuperación post-incendio, y proporciona información valiosa para futuras intervenciones de restauración o manejo forestal.

Evolución a largo plazo del vigor vegetal previo al incendio de Arnedillo

La distribución espacial del NDVI refleja la homogeneidad de la recuperación vegetal en toda la zona comprendida entre la situación prefuego y el año 2016. Toda la zona presenta una serie de valores positivos, no obstante, estos son más altos o más bajos dependiendo de algunos sectores en específico. Estos cambios en los valores de NDVI se pueden deber a diferentes factores, como la mejor o peor recuperación o áreas más o menos afectadas por el fuego (Chuvieco et al., 2010). Además, factores como la composición de especies y la topografía del terreno pueden influir en esta recuperación (Keeley, 2009; Dobrowski et al., 2015).

Evolución a largo plazo del vigor vegetal de Arnedillo

Este resultado indica que, con el paso de los años, la regeneración vegetal en Arnedillo ha mostrado una clara heterogeneidad espacial. La mejora notable del NDVI en el norte apunta a que las condiciones ambientales como la disponibilidad de humedad, la exposición a menor radiación solar u otras características han favorecido el restablecimiento de la vegetación (Turner et al., 2003; Chuvieco et al., 2010). Por el contrario, la persistencia de valores bajos en el sur sugiere limitaciones en la recuperación, que podrían estar asociadas a una mayor severidad del fuego en esa área, a suelos más degradados o a factores topográficos que dificultan el rebrote o el establecimiento de nuevas plántulas (Keeley, 2009; Johnstone et al., 2016).

La comparación con el escenario inmediatamente posterior al incendio es clave, ya que pone de manifiesto el progreso alcanzado en casi dos décadas: aunque la recuperación es evidente en amplias zonas, persisten áreas con déficit de vegetación. Estos contrastes son esenciales para orientar estrategias de gestión forestal adaptadas a la realidad de cada sector del incendio, priorizando intervenciones de restauración activa en las zonas con menor regeneración natural (Lindemer et al., 2014; Pérez-García et al., 2018).

Incendio de Galbárruli

Impacto inmediato del fuego en el vigor vegetal de Galbárruli

En comparación con Arnedillo, donde el impacto del fuego mostró una clara heterogeneidad espacial (con sectores más o menos afectados según las diferentes variables que inciden en la zona), el incendio de Galbárruli evidenció una pérdida de vigor vegetal más homogénea en toda la superficie afectada. Esta homogeneidad podría estar relacionada con una intensidad de fuego más uniforme, una menor variabilidad topográfica o una composición vegetal menos diversa (Keeley, 2009; Chuvieco et al., 2010). A diferencia de Arnedillo, donde ciertas zonas del sur conservaron valores altos de NDVI, en Galbárruli estos valores positivos se concentraron únicamente en una pequeña área al este, indicando una escasa variabilidad en la resistencia al fuego dentro del ecosistema. Esta diferencia es clave, ya que mientras en Arnedillo se requiere una planificación de restauración diferenciada por sectores, en Galbárruli la uniformidad permite abordar el proceso de restauración con un enfoque más global y menos condicionado por variaciones espaciales significativas.

Evolución a largo plazo del vigor vegetal previo al incendio de Galbárruli

Al igual que en Arnedillo, la evolución del NDVI entre la situación prefuego y los años posteriores al incendio en Galbárruli muestra una tendencia general de recuperación, aunque con diferencias importantes. Mientras que en Arnedillo se observa una notable heterogeneidad espacial en la evolución del vigor vegetal (con sectores que muestran una recuperación más lenta o incompleta debido a diferentes factores), en Galbárruli predomina una recuperación más uniforme. Sin embargo, en ambos casos, se aprecian pequeñas zonas con valores de NDVI relativamente más altos o bajos, lo que sugiere que factores locales como el tipo de vegetación, la humedad del suelo o la acción humana han influido, aunque de forma más marcada en Arnedillo (Turner et al., 2003; Chuvieco et al., 2010; Keeley, 2009). Esta comparativa resalta cómo la estructura del paisaje y la diversidad ecológica influyen directamente en la dinámica de recuperación post-incendio (Johnstone et al., 2016; Lindemer et al., 2014).

Evolución a largo plazo del vigor vegetal de Galbárruli

Casi tres décadas después del incendio, Galbárruli muestra una recuperación notablemente más homogénea y estable en comparación con Arnedillo. La ausencia de valores negativos y la generalización de NDVI altos indican una regeneración vegetal sólida y bien establecida, que contrasta con la recuperación más fragmentada observada en Arnedillo (Turner et al., 2003; Chuvieco et al., 2010). En Arnedillo, persisten zonas con bajo vigor vegetal, especialmente en el sur, posiblemente debido a una mayor severidad del fuego o condiciones ambientales más limitantes (Keeley, 2009; Johnstone et al., 2016). Por el contrario, Galbárruli ha logrado una resiliencia destacable, con escasas áreas problemáticas cuya recuperación ha estado menos condicionada por posibles factores (Lindemer et al., 2014). Esta diferencia en la evolución a largo plazo refleja la importancia de las condiciones iniciales del ecosistema y la distribución espacial del impacto del fuego, siendo Galbárruli un caso de recuperación más uniforme y eficiente en comparación con el mosaico heterogéneo de Arnedillo (Pérez-García et al., 2018).

6.3. Recuperación de la estructura de la vegetación post-fuego

Evolución de la altura máxima a medio plazo en Arnedillo

El análisis espacial del percentil 95 de altura (P95) entre los años 2010 y 2016 revela una dinámica general de crecimiento estructural moderado en la vegetación post-incendio. La distribución de valores, que oscila entre máximos de +10 y mínimos de -10, se traduce cartográficamente en un predominio de tonalidades verdes claras a verdes intermedias en la mayor parte del área afectada, lo que sugiere un aumento leve pero generalizado en la altura de la vegetación.

Los valores más frecuentes, situados entre 1 y 5 metros, refuerzan la idea de una recuperación estructural progresiva, probablemente impulsada por especies arbustivas o arbóreas con capacidad de rebrote. Este patrón coincide con lo observado en otros contextos mediterráneos, donde los procesos de regeneración natural suelen ser lentos en términos de estructura vertical, especialmente durante la primera década tras el incendio.

Asimismo, la presencia de zonas localizadas con tonalidades verdes más oscuras indica sectores donde el incremento en altura ha sido más significativo. Estas áreas pueden corresponder a microambientes con condiciones ecológicas particularmente favorables, como mayor disponibilidad de humedad, exposición adecuada o una menor severidad del incendio inicial, lo que habría permitido una recuperación más acelerada del estrato arbóreo.

En conjunto, los resultados reflejan una recuperación estructural positiva y espacialmente heterogénea, en la que coexisten zonas de crecimiento moderado con otras de desarrollo más destacado (Turner et al., 2003; Lindemer et al., 2014). Esta información es fundamental para planificar estrategias de gestión forestal, ya que permite identificar sectores con mayor potencial de regeneración natural y, al mismo tiempo, priorizar áreas con menor crecimiento para posibles acciones de restauración activa (Pérez-García et al., 2018; Chuvieco et al., 2010).

Evolución de la densidad a medio plazo en Arnedillo

El análisis de la densidad de vegetación por encima de 4 metros en Arnedillo entre 2010 y 2016 muestra una recuperación parcial y espacialmente desigual en la estructura arbórea del ecosistema. El predominio de tonos blancos en la representación cartográfica indica que, en la mayor parte del área de estudio, no se han producido cambios significativos en la densidad de árboles altos durante este periodo, lo cual sugiere una relativa estabilidad estructural.

No obstante, se identifican zonas específicas con cambios marcados, reflejadas por franjas en tonos azules y rojos. Las áreas con tonalidades azules indican un incremento en la densidad arbórea, mientras que las zonas rojizas evidencian pérdidas locales. Estas franjas aparecen dispersas en casi todo el incendio, pero son más notorias en la parte norte, donde predomina el azul oscuro. Esta distribución podría

estar asociada a condiciones más favorables para la regeneración, como menor severidad del fuego, mejor retención hídrica, o la presencia de especies con mayor capacidad de rebrote.

Por el contrario, las áreas en rojo apuntan a una pérdida puntual de cobertura, posiblemente vinculada a fenómenos como mortalidad diferida, competencia intraespecífica, o incluso a perturbaciones secundarias como labores de gestión forestal, pisoteo o herbivoría (Turner et al., 2003; Johnstone et al., 2016; Morrison & Swanson, 1990).

Por ello, aunque la mayoría del área muestra estabilidad, los sectores donde se evidencian cambios, tanto positivos como negativos, reflejan una regeneración desigual, condicionada por factores ambientales y posiblemente por las características propias del incendio (Turner et al., 2003; Johnstone et al., 2016). Estos resultados destacan la heterogeneidad en los procesos de recuperación post-incendio en Arnedillo, que contrastan con patrones más uniformes observados en otros contextos (Keeley, 2009; Chuvieco et al., 2010).

Incendio de Galbárruli

Evolución de la altura máxima a medio plazo en Galbárruli

El análisis del percentil 95 de altura (P95) entre 2010 y 2016 evidencia diferencias claras en la dinámica de recuperación estructural entre los incendios de Galbárruli y Arnedillo, tanto en la intensidad del crecimiento como en la homogeneidad espacial del mismo.

En Galbárruli, el predominio de tonalidades verde muy claro y verde medio en la representación cartográfica sugiere una recuperación estructural más generalizada, con valores positivos en la mayoría del área afectada. La presencia extendida de colores asociados a crecimientos moderados y algunos sectores con verdes más oscuros (indicativos de incrementos más notables en la altura máxima) refuerza la idea de una resiliencia estructural más fuerte y menos condicionada por factores topográficos o severidad del incendio. Este patrón apunta a un ecosistema con mejores condiciones ecológicas para la regeneración, o posiblemente una menor heterogeneidad en la severidad del fuego.

En contraste, Arnedillo presenta un patrón de recuperación más heterogénea, con zonas donde la altura se ha mantenido estable o ha crecido levemente (verdes claros), pero también con sectores puntuales que reflejan disminuciones (amarillos blanquecinos e incluso tonos rojizos) o, por el contrario, aumentos significativos (verdes oscuros). Esta variabilidad espacial sugiere que, a diferencia de Galbárruli, la dinámica de recuperación en Arnedillo ha estado más influenciada por factores locales como la pendiente, la exposición o la severidad del incendio, lo que ha generado un paisaje estructural más fragmentado.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que, aunque ambos incendios muestran una evolución positiva del P95 entre 2010 y 2016, Galbárruli se caracteriza por una recuperación más uniforme y generalizada, mientras que Arnedillo refleja una respuesta estructural más dispar, posiblemente influida por condiciones más variables o impactos iniciales más severos en determinadas zonas (Keeley, 2009; Turner et al., 2003). Esta comparación subraya la importancia de considerar tanto el contexto ecológico como la intensidad del disturbio a la hora de interpretar los procesos de regeneración post-incendio (Johnstone et al., 2016; Pérez-García et al., 2018).

Evolución de la densidad a medio plazo en Galbárruli

La evolución de la densidad arbórea post-incendio entre los años 2010 y 2016 presenta diferencias notables entre los incendios de Galbárruli y Arnedillo, tanto en el grado de cambio como en la distribución espacial de dichos cambios.

En Galbárruli, el predominio general de tonos blancos en el mapa indica, al igual que en Arnedillo, una estabilidad estructural en la mayor parte de la superficie afectada. Sin embargo, destaca la presencia de una aglomeración significativa de tonos azules oscuros en el sector este del incendio, lo que sugiere

un incremento notable en la densidad de vegetación por encima de 4 metros. Este patrón concentrado puede estar vinculado a condiciones ambientales más favorables en ese sector (como mayor disponibilidad hídrica, menor severidad del fuego o especies rebrotadoras más eficientes), que han facilitado un proceso de regeneración más activo.

En cambio, en Arnedillo, los cambios en densidad se distribuyen de forma más dispersa y fragmentada a lo largo del territorio, sin una concentración clara como en Galbárruli. Aunque también predominan los tonos blancos (indicando estabilidad), se identifican franjas tanto azules como rojas repartidas por casi toda el área (excepto en el sur), lo que denota una recuperación más heterogénea. Esta dispersión podría responder a una mayor variabilidad en la severidad del incendio o a diferencias topográficas más marcadas, lo que habría generado respuestas ecológicas desiguales a nivel local.

Con respecto a las zonas con tonalidades rojizas en Galbárruli, se afirma que son áreas con amplias pérdidas de densidad; estas manchas se encuentran situadas en zonas concretas al sur, probablemente vinculadas a actividades humanas debido a la homogeneidad de la pérdida (Turner et al., 2003; Chuvieco et al., 2010). Por otra parte, Arnedillo presenta también zonas rojas donde se aprecian pérdidas; estas pérdidas muestran, al igual que en Galbárruli, patrones espaciales estructurados, siendo la hipótesis más plausible la influencia de la acción humana sobre estas áreas específicas, que se limitan a manchas localizadas y puntuales en ambos incendios (Johnstone et al., 2016; Keeley, 2009).

En conjunto, ambos incendios muestran una tendencia general a la estabilidad estructural en términos de densidad, pero mientras que Galbárruli destaca por una regeneración más concentrada y menos fragmentada, Arnedillo presenta un patrón más disperso y heterogéneo, lo que podría reflejar condiciones ecológicas más variables o un impacto inicial del incendio más complejo (Lindemer et al., 2014; Pérez-García et al., 2018).

6.4. Influencia de los factores topográficos y la severidad

Incendio de Arnedillo

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la radiación solar

A pesar de que la radiación solar es un factor clave en los procesos de fotosíntesis y regeneración vegetal, la muy baja correlación encontrada con el índice dNDVI (2016 - Postfuego) indica que, en este caso, la cantidad de energía solar incidente no ha condicionado de forma clara la recuperación de la vegetación tras el incendio en Arnedillo. (Sims & Gamon, 2002; Franklin & Whiteman, 2005).

El contraste espacial en los valores del dNDVI (con una recuperación marcada en el norte y valores muy bajos o negativos en el sur) no se alinea con el patrón de radiación solar, que presenta una zona exterior con altos valores de radiación y un núcleo central de baja radiación.

En particular, la presencia de valores altos de dNDVI en el norte corresponde a zonas menos afectadas por el fuego o con mejores condiciones ecológicas para la regeneración, mientras que el sur, con valores muy bajos o negativos, podría haber sufrido daños más severos o enfrentar limitaciones ambientales más importantes. (Keeley, 2009; Johnstone et al., 2016).

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la severidad del incendio

La fuerte correlación entre la severidad del incendio (dNBR) y la recuperación de la vegetación medida por el dNDVI (2016 - Postfuego) evidencia que la intensidad del fuego es un factor determinante en la dinámica post-incendio en Arnedillo.

En las zonas con severidad alta y media-alta (norte), a pesar del daño considerable sufrido durante el incendio, se observa una recuperación sustancial de la vegetación hasta 2016, posiblemente

debido a la capacidad regenerativa del ecosistema o a condiciones ambientales favorables que facilitan la recolonización. Esta recuperación puede estar asociada a procesos de regeneración natural o a intervenciones posteriores al fuego.

Por otro lado, las áreas con valores de severidad bajos o sin cambios (sur) presentan valores bajos o negativos en el índice dNDVI, lo que sugiere que en estas zonas la vegetación no experimentó una pérdida significativa o que la dinámica de cambio es más estable, posiblemente con incremento de vegetación no afectada o regeneración previa al período considerado.

Estos resultados son consistentes con la literatura que destaca al dNBR como un indicador fiable para evaluar la severidad del fuego y predecir la respuesta de la vegetación en el tiempo (Key & Benson, 2006; Keeley, 2009). La relación positiva refleja la importancia del impacto inicial del incendio como condicionante clave para el proceso de recuperación en ecosistemas mediterráneos similares (Chuvieco et al., 2010; Fernández-Manso et al., 2016).

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la pendiente

A pesar de que la pendiente puede influir en aspectos clave de la regeneración post-incendio (como la escorrentía, la retención de agua, la estabilidad del suelo y el acceso a nutrientes), los resultados obtenidos muestran que en Arnedillo no se identifica una relación clara entre la inclinación del terreno y los niveles de recuperación vegetal medidos a través del dNDVI (2016 - Postfuego) (Bumae et al., 2015; Roccaforte et al., 2012). La correlación muy baja sugiere que la pendiente, en este caso, no ha sido un factor determinante en la dinámica de regeneración tras el incendio.

El patrón espacial observado en el dNDVI, con una recuperación notoria en el norte y una regeneración limitada en el sur, no sigue el mismo gradiente que el mapa de pendientes. Dado que las pendientes más pronunciadas se sitúan en el centro, y las zonas de mayor recuperación se ubican en el norte (posiblemente en pendientes medias o bajas)

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la exposición

La falta de correlación significativa entre la exposición y el índice dNDVI (2016 - Postfuego) indica que la orientación del terreno no ha sido un factor clave en la recuperación vegetal tras el incendio en Arnedillo (Franklin & Whiteman et al., 2005). Aunque en entornos mediterráneos la exposición puede influir en la disponibilidad de radiación solar, la temperatura del suelo y la evaporación (Chuvieco et al., 2010; Turner et al., 2003), en este caso no se observan patrones claros que vinculen dichas condiciones con la dinámica de regeneración (Keeley et al., 2009).

La heterogeneidad en las orientaciones del terreno (sin una dominancia espacial clara) dificulta la aparición de relaciones consistentes con la recuperación de la vegetación. Además, la recuperación evidente en la zona norte, que no se asocia a una orientación específica, y la escasa regeneración en el sur, tampoco parecen corresponder con las zonas de exposición más o menos favorables.

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la elevación

El valor de correlación tan bajo implica que la elevación no es un factor determinante del vigor vegetal en esta zona concreta. A diferencia de otros entornos donde la altitud puede afectar la vegetación debido a gradientes de temperatura, humedad o exposición (Körner et al., 2007), en este caso la respuesta del NDVI parece ser independiente de la altitud.

Relación entre evolución a largo plazo del vigor vegetal y la pendiente

Tanto en Galbárruli como en Arnedillo, la pendiente no ha mostrado una influencia significativa sobre la recuperación de la vegetación medida a través del dNDVI. En ambos casos, la baja correlación entre estos factores indica que, a pesar de que la inclinación del terreno puede afectar la escorrentía, la retención hídrica o la estabilidad del suelo, no se ha detectado un patrón espacial claro que vincule pendientes más suaves o más pronunciadas con un mayor o menor vigor vegetal post-incendio. (Roccaforte et al., 2012).

No obstante, mientras que en Arnedillo las pendientes más fuertes se concentran en el centro y no coinciden con las zonas de mayor recuperación (ubicadas en el norte), en Galbárruli no se observa una distribución definida de pendientes que permita identificar alguna influencia topográfica destacable. Esto refuerza la idea de que, en ambos incendios, la pendiente no ha sido un factor determinante, aunque en Galbárruli el patrón de recuperación es incluso más uniforme y menos condicionado por las variaciones del relieve. Las zonas con vegetación bien conservada o regenerada no se asocian de forma sistemática con áreas más llanas o más inclinadas, lo que sugiere que otros factores han tenido un mayor peso en la dinámica de recuperación (Chuvieco et al., 2010)..

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la severidad del incendio

En ambos incendios, la severidad del fuego medida por el índice dNBR se relaciona positivamente con la variación del vigor vegetal a largo plazo (dNDVI), aunque con matices distintos. En Arnedillo, la correlación es especialmente fuerte, mostrando que la severidad del incendio ha sido un factor clave en la dinámica de regeneración: las zonas altamente afectadas, como el norte, han mostrado una notable recuperación, mientras que áreas con menor severidad no presentan una mejora significativa, e incluso conservan valores bajos.

En Galbárruli, aunque también se observa una correlación positiva, esta parece reflejar una respuesta ecológica menos contrastada: las zonas con mayor severidad muestran cambios más evidentes, pero dentro de un contexto general de recuperación homogénea. En otras palabras, mientras que en Arnedillo la severidad marca diferencias claras en la regeneración según el grado de daño inicial, en Galbárruli la relación existe, pero no produce un patrón espacial tan dispar. Esto podría deberse a diferencias en la resiliencia del ecosistema, la composición vegetal o la gestión post-incendio (Pausas et al., 2004)..

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la exposición

En ambos casos, la exposición del terreno no ha demostrado ser un factor relevante para explicar las diferencias en la recuperación de la vegetación. Las correlaciones encontradas son muy bajas o casi nulas, lo que indica que la orientación del terreno (norte, sur, este, oeste) no ha condicionado significativamente el comportamiento del NDVI tras los incendios.

En Arnedillo, la recuperación más notable en el norte no coincide con una exposición dominante favorable, y en Galbárruli la distribución espacial de la exposición es igualmente heterogénea, sin vinculación clara con los cambios observados en el vigor vegetal. A pesar de que en entornos mediterráneos la exposición puede influir en procesos ecológicos importantes, como la radiación incidente o la evapotranspiración, en ambos incendios este factor no parece haber jugado un papel determinante (Gómez-González et al., 2011).

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la radiación solar

Tanto en Arnedillo como en Galbárruli, la radiación solar no ha mostrado una correlación significativa con los valores del dNDVI post-incendio. En Arnedillo, aunque se podría esperar una relación directa debido al papel de la radiación en la fotosíntesis (Field et al., 1998) el patrón espacial de recuperación no se alinea con el gradiente de radiación. Del mismo modo, en Galbárruli, la correlación negativa y cercana a cero indica que este factor tampoco ha condicionado la recuperación vegetal.

Esto sugiere que, en ambos casos, la cantidad de energía solar recibida por el terreno no ha sido un elemento clave para explicar la variación espacial de la regeneración post-fuego.

Relacion entre evolucion a largo plazo del vigor vegetal y la elevación

La elevación tampoco ha resultado ser un factor determinante en ninguno de los dos incendios. Las correlaciones extremadamente bajas indican que los gradientes altitudinales no han influido de forma significativa en los niveles de recuperación del NDVI. En contextos montañosos más marcados, la altitud puede afectar variables ecológicas como la temperatura, la humedad o el tipo de vegetación dominante (Geiger et al., 2009), pero en Arnedillo y Galbárruli la respuesta de la vegetación post-incendio parece ser independiente de la altitud.

Esto refuerza la idea de que, en estos paisajes, factores como la severidad del incendio han tenido un papel mucho más relevante que la altitud para explicar las diferencias en la recuperación.

7. CONCLUSIONES

La delimitación y caracterización de los incendios de Arnedillo y Galbárruli a partir de datos oficiales y análisis espacial se logró de manera efectiva, sin dificultades técnicas relevantes. El análisis permitió identificar diferencias notables entre ambos eventos, especialmente en cuanto a su forma y extensión. Mientras que el incendio de Arnedillo presentó una morfología más irregular, Galbárruli se caracterizó por una mayor superficie afectada y una forma más regular, lo que podría haber influido en los patrones espaciales de recuperación posteriores.

La obtención y procesamiento de imágenes multispectrales satelitales a distintos momentos temporales (preincendio, post-incendio inmediato y seguimiento a medio y largo plazo) se realizó satisfactoriamente mediante el uso de datos de la misión Landsat. En el caso del incendio de Arnedillo, se trabajó con un rango temporal entre el año 2001 y 2016, mientras que para Galbárruli el análisis cubrió un período más amplio, desde 1991 hasta 2016. Este enfoque multitemporal permitió observar con claridad la evolución del paisaje afectado. Los resultados muestran que, aunque ambos incendios presentan signos de regeneración, Galbárruli ha evidenciado una recuperación vegetal más sólida y homogénea. Esta diferencia podría atribuirse a la mayor severidad en general del incendio y al mayor tiempo transcurrido desde el incendio, lo cual ha permitido una regeneración más completa del ecosistema afectado. Esta comparación subraya la importancia del factor temporal en los procesos de recuperación post-incendio.

El análisis conjunto de los índices espectrales dNBR y NDVI permitió identificar patrones claros en la dinámica post-incendio de ambos casos de estudio. Se confirmó que el incendio de Galbárruli presentó una severidad más alta en general, sin embargo, mostró una recuperación más eficiente y homogénea de la vegetación a largo plazo. En contraste, en Arnedillo, la severidad fue variable, con una zona sur donde prácticamente no hubo afectación severa, mientras que las áreas más críticas se localizaron en la parte norte del incendio. Estos resultados reflejan que, a pesar de la mayor severidad en Galbárruli, el ecosistema pudo regenerarse mejor, posiblemente gracias a mejores condiciones ambientales o a la mayor antigüedad del incendio. En Arnedillo, la heterogeneidad espacial en la severidad se traduce en una recuperación desigual.

El análisis de la estructura forestal mediante datos ALS-LiDAR evidenció una recuperación diferencial entre los dos incendios estudiados. En Galbárruli, la recuperación fue más generalizada y homogénea, especialmente destacando un crecimiento significativo en la densidad y altura máxima de la vegetación, sobre todo en la parte este del incendio, con estancamientos puntuales dispersos en otras áreas. Por otro lado, en Arnedillo, la recuperación mostró una mayor heterogeneidad espacial: mientras que en la zona norte se observó un crecimiento notable en altura y densidad, en el sur la recuperación estuvo más estancada. Además, se detectaron pérdidas puntuales de densidad arbórea en ambos incendios, probablemente vinculadas a acciones humanas (por ejemplo, gestión forestal o perturbaciones adicionales). El crecimiento en Arnedillo se concentró en áreas elevadas, ubicadas en las partes superiores de colinas, lo que sugiere una relación con factores topográficos que podrían favorecer la regeneración en esas zonas específicas. Estos patrones apoyan la idea de que la dinámica post-incendio está mediada por una combinación de factores naturales y antrópicos que influyen en la regeneración estructural del bosque.

El análisis de la influencia de variables topográficas en la dinámica de recuperación de la vegetación post-incendio reveló correlaciones muy bajas y poco significativas tanto en Arnedillo como en Galbárruli. Esto indica que, en estos casos de estudio, dichas variables no ejercieron un papel determinante ni claro en la evolución del vigor vegetal o en la regeneración estructural a medio y largo plazo. Aunque la topografía suele influir en factores ecológicos clave como la retención de humedad, estabilidad del suelo o la exposición a radiación, en los incendios analizados no se observaron patrones espaciales consistentes que vinculen estas variables con la recuperación de la vegetación. Solo en zonas muy específicas y de manera muy leve se detectaron relaciones puntuales, pero sin que estas fueran estadísticamente relevantes a escala general.

Los incendios estudiados, tanto el de Arnedillo como el de Galbárruli, presentan una extensión relativamente reducida en comparación con otros grandes incendios registrados. Esta característica, facilitó una delimitación precisa y sin complicaciones para el análisis espacial y temporal de la dinámica post-incendio. La menor extensión y la clara definición del perímetro permitieron una mayor resolución en la evaluación de los cambios en la vegetación y una adecuada comparación entre ambos incendios, aportando robustez y precisión a los resultados obtenidos.

Se puede valorar en algún momento si existe alguna limitación en el estudio. Asimismo se pueden valorar futuros desarrollos o innovaciones en la línea de investigación

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, M., García, D., & Serrano, A. (2019). Impacto de incendios forestales en la biodiversidad de los bosques mediterráneos en La Rioja. *Ecosistemas*, 28(3), 45-54. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1806>
- Asner, G. P., Keller, M., Pereira, R., & Zweede, J. C. (2012). Remote sensing of selective logging in Amazonia: Assessing limitations and implications for forest management. *Ecological Applications*, 12(2), 616–629. <https://doi.org/10.2307/3099923>
- Baroja, C. (2018). Los incendios forestales en La Rioja – 1983-2015. Cartografía y determinación de su severidad mediante imágenes Landsat. Trabajo Fin de Grado. Recuperado de <https://zaguan.unizar.es/record/78639/files/TAZ-TFG-2018-2763.pdf>
- Bond, W. J., & Keeley, J. E. (2005). Fire as a global ‘herbivore’: The ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(7), 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>
- Buma, B. (2015). Disturbance interactions: characterization, prediction, and the potential for cascading effects. *Ecosphere*, 6(4), 1-15. <https://doi.org/10.1890/ES14-00575.1>
- Buma, B., Wessman, C., & Higuera, P. (2015). Fire severity and ecological resilience. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46, 369–388. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054430>
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*, 143(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Chuvieco, E., Aguado, I., & Yebra, M. (2010). Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean basin. Springer.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martínez, J., ... & Luna, B. (2012). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information systems. *Ecological Modelling*, 241, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.04.005>
- Chuvieco, E., Martín, M. P., & Palacios-Orueta, A. (2006). Remote sensing of fire severity: Assessment of the dNBR and RdNBR indices. In *Proceedings of the 5th International Wildland Fire Conference*.
- Chuvieco, E., Ventura, G., Martín, M. P., & Gómez, I. (2006). Assessment of different spectral indices in the red–near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 2381-2396.
- Clarke, P. J., Lawes, M. J., Midgley, J. J., Lamont, B. B., Ojeda, F., Burrows, G. E., Enright, N. J., & Knox, K. J. E. (2013). Resprouting as a key functional trait: How buds, protection and resources drive persistence after fire. *New Phytologist*, 197(1), 19-35. <https://doi.org/10.1111/nph.12001>
- Dobrowski, S. Z., Abatzoglou, J. T., Greenberg, J. A., & Mynsberge, A. R. (2015). Forest structure and species composition influence postfire vegetation recovery. *Ecological Applications*, 25(7), 1901–1913. <https://doi.org/10.1890/14-1739.1>
- Epting, J. J., Sorenson, C. B., & Peterson, D. L. (2005). Comparison of dNBR and RdNBR to field measures of fire severity in western Oregon and Washington. *Fire Ecology*.
- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., & Quintano, C. (2016). Burned area mapping and severity assessment using Landsat imagery and NDVI differencing. *Remote Sensing*, 8(9), 741. <https://doi.org/10.3390/rs8090741>
- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., & Quintano, C. (2016). Monitoring post-fire vegetation regeneration in Mediterranean ecosystems using NDVI and vegetation indices from Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 8(4), 345. <https://doi.org/10.3390/rs8040345>
- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., & Quintano, C. (2016). Using NDVI to assess fire severity in Mediterranean shrublands. *Remote Sensing of Environment*, 173, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.002>

- Fernández-Pascual, M., Martín, M. P., & Vega, J. A. (2013). Análisis espacial y temporal de incendios forestales en La Rioja (España). *Revista de Teledetección*, 40, 11-22. <https://doi.org/10.4995/rt2013.1179>
- Field, C. B., Randerson, J. T., & Malmstrom, C. M. (1998). Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1), 74–88. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(95\)00119-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(95)00119-9)
- Franklin, S. E., & Whiteman, D. N. (2005). Remote sensing techniques for monitoring the effects of fire on vegetation. *Progress in Physical Geography*, 29(2), 229–247. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp441ra>
- Franklin, J., & Whiteman, C. (2005). Topographic controls on vegetation patterns. In *Mountain Weather and Climate* (pp. 123-144). Cambridge University Press.
- García, L., Martínez, J., & López, A. (2018). Impacto de los incendios forestales en los ecosistemas mediterráneos: estudio de caso en La Rioja. *Revista de Ecología y Medio Ambiente*, 12(3), 45-60.
- García Jiménez, R., Palmero Iniesta, M., & Espelta, J. M. (2017). Contrasting effects of fire severity on the regeneration of *Pinus halepensis* Mill. and resprouter species in recently thinned thickets. *For-ests*, 8(3), 55. <https://doi.org/10.3390/f8030055>
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (2009). *The climate near the ground* (7th ed.). Rowman & Littlefield.
- Gómez-González, S., Penas, A., & García, D. (2011). The influence of slope aspect on post-fire regeneration in Mediterranean forests. *Forest Ecology and Management*, 262(4), 678–685. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.033>
- González, J. E., Martínez, J. A., & Pérez, F. (2015). Incendios forestales en La Rioja: características, evolución y medidas de gestión. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 40(1), 55-67.
- Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221. <https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y>
- Gordon, C. E., Price, O. F., & Tasker, E. M. (2017). Mapping and exploring variation in post fire vegetation recovery following mixed severity wildfire using airborne LiDAR. *Ecological Applications*.
- Hijmans, R. (2025). terra: Spatial Data Analysis. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.terra>
- Hudak, A. T., Crookston, N. L., Evans, J. S., Hall, D. E., Falkowski, M. J., & Ritchie, M. W. (2007). Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2232-2245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.013>
- Instituto Geográfico Nacional – CNIG. (2025). Estado actual del proyecto PNOA LiDAR – Tercera cobertura. Recuperado de <https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/tercera-cobertura>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2022). Incendios forestales en España: datos históricos y estadísticas regionales. Recuperado de <https://www.ine.es>
- Isenburg, M. (2014). LAZ: Efficient compression of lidar data. In *Proceedings of the ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3, 79-82.
- Johnstone, J. F., Allen, C. D., Franklin, J. F., Frelich, L. E., Harvey, B. J., Higuera, P. E., ... & Turner, M. G. (2016). Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(7), 369–378. <https://doi.org/10.1002/fee.1311>
- Johnstone, J. F., Chapin III, F. S., & Hollingsworth, T. N. (2016). A synthesis of the role of fire in the boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(7), 1–13
- Keane, R. E., Burgan, R. E., & van Wagtendonk, J. W. (2001). Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire*, 10(4), 301-319. <https://doi.org/10.1071/WF01031>
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>

- Keeley, J. E., & Fotheringham, C. J. (2000). Role of fire in regeneration from seed. In M. Fenner (Ed.), *Seeds: The ecology of regeneration in plant communities* (pp. 311-330). CABI Publishing.
- Keeley, J. E., Pausas, J. G., Rundel, P. W., Bond, W. J., & Bradstock, R. A. (2011). Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. *Trends in Plant Science*, 16(8), 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.04.002>
- Keeley, J. E., Pausas, J. G., Rundel, P. W., Bond, W. J., & Bradstock, R. A. (2011). Fire as an evolutionary and ecological force. *Trends in Ecology & Evolution*, 26(6), 405-412. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.04.002>
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In D. C. Lutes et al. (Eds.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System* (pp. LA1–LA51). USDA Forest Service.
- Körner, C. (2007). The use of ‘altitude’ in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 569-574. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.09.006>
- Körner, C., Paulsen, J., & Spehn, E. M. (2007). A definition of mountains and their bioclimatic belts for global comparisons of biodiversity data. *Alpine Botany*, 121(1), 73–78. <https://doi.org/10.1007/s00035-007-0094-4>
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A., & Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir Western Hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70(3), 339-361. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00048-4)
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, 52(1), 19-30. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0019:LRS-FES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRS-FES]2.0.CO;2)
- Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., ... & Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 319–345.
- Lindemer, E. R., Higuera, P. E., Chignell, S. M., Abatzoglou, J. T., & Williams, J. W. (2014). Vegetation change and resilience following 19th-century fire in ponderosa pine forests of the Colorado Front Range. *Ecosphere*, 5(10), 1–22. <https://doi.org/10.1890/ES14-00055.1>
- Lindemer, J. R., Kerns, B. K., & Keane, R. E. (2014). Spatial heterogeneity in forest regeneration after wildfire in the northern Rocky Mountains. *Forest Ecology and Management*, 331, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.014>
- Lloret, F., Pausas, J. G., & Vilà, M. (2005). Responses of Mediterranean plant species to different fire frequencies in Garraf Natural Park (Catalonia, Spain): Field observations and simulation modeling. *Plant Ecology*, 179(1), 9–19. <https://doi.org/10.1007/s11258-004-5803-4>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographical Information Systems and Science* (4th ed.). Wiley.
- Means, J. E., Acker, S. A., Harding, D. J., Blair, J. B., & Lefsky, M. A. (1999). Use of lidar data to estimate forest stand characteristics in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 67(3), 298-308. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00063-4)
- Moody, J. A., & Ebel, B. A. (2012). Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire. *Catena*, 93, 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.01.006>
- Moreno, J. M., Vázquez, A., & Fernández, J. (2014). Incendios forestales en La Rioja: análisis de su evolución y efectos sobre el territorio. *Boletín de Ciencias Forestales*, 30(2), 120
- Morrison, M. L., & Swanson, F. J. (1990). Fire history and landscape pattern in the southern Cascade Range, Oregon. *Ecological Monographs*, 60(2), 353–374. <https://doi.org/10.2307/1943047>
- Pausas, J. G., Bradstock, R. A., Keith, D. A., & Keeley, J. E. (2018). *Fire ecology and management in the Mediterranean Basin*.

- Pausas, J. G., Keeley, J. E., & Schwilk, D. W. (2004). Fire ecology and vegetation dynamics in Mediterranean ecosystems. *Plant Ecology*, 175(1), 1–10. <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000036950.06936.d3>
- Pérez-García, E. A., Chuvieco, E., & Riaño, D. (2018). Post-fire vegetation recovery patterns in Mediterranean ecosystems: Modelling and remote sensing analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68, 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.004>
- Pérez-García, E. A., González-Cabán, A., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2018). Post-fire forest restoration strategies: A review and future perspectives. *Forest Ecology and Management*, 424, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.005>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510.
- Roccaforte, J. P., Fulé, P. Z., Huffman, D. W., & Crouse, J. E. (2012). Influences of fire severity and topography on ponderosa pine forest structure and regeneration. *Forest Ecology and Management*, 267, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.024>
- Roussel, J. R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Sánchez Meador, A., Bourdon, J. F., De Boissieu, F., & Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Szpakowski, D. M., & Jensen, J. L. R. (2019). A review of the applications of remote sensing in fire ecology. *Remote Sensing*, 11(22), 2638. <https://doi.org/10.3390/rs11222638>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*.
- Turner, M. G., Hargrove, W. W., Gardner, R. H., & Romme, W. H. (2003). Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming. *Ecological Monographs*.
- Turner, M. G., Romme, W. H., & Gardner, R. H. (1994). Landscape disturbance dynamics and ecological effects of large fires. *BioScience*, 44(7), 491–498. <https://doi.org/10.2307/1312363>
- United States Geological Survey (USGS). (2019). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook (Version 5.0). Department of the Interior. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>
- Veraverbeke, S., Hook, S. J., & Goetz, S. J. (2012). Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of dNBR and RdNBR in the Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- Yellowscan. (s.f.). Surprising LiDAR penetration capabilities through different surfaces. Recuperado de https://www.yellowscan.com/knowledge/surprising-lidar-penetration-capabilities-through-different-surfaces/?utm_source=chatgpt.com