



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS DE ZONAS DE ESCASA VEGETACIÓN SUSCEPTIBLES A LA EROSIÓN EN INCENDIOS DE ARAGÓN (1967-2020) MEDIANTE IMÁGENES GEOSAT-2

ANALYSIS OF THE SENSITIVE TO EROSION OF THE LACKING OF
VEGETATION ZONES IN WILDFIRES OF ARAGÓN (SPAIN) (1967-
2020) USING GEOSAT-2 IMAGES

Autor

Juan Badules Iglesias

Director

Prof. Dr. Fernando Pérez Cabello

Facultad de Filosofía y Letras

Año 2021 - 2022

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	4
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 PRESENTACIÓN.....	7
1.2 LOS INCENDIOS FORESTALES EN ARAGÓN Y MEDIDAS POST- INCENDIO .	8
1.2.1 APLICACIÓN DE MEDIDAS EN LA PLANIFICACIÓN DE EMERGENCIA.....	10
1.2.2 MEDIDAS GENERALES DE LA PLANIFICACIÓN A MEDIO-LARGO PLAZO	11
1.2.3 IMPACTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES.....	11
1.2.4 IMPACTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN EL SUELO.....	12
1.3 ÁREA DE ESTUDIO.....	13
1.3.1 MARCO GEOLÓGICO.....	13
1.3.2 MARCO GEOMORFOLÓGICO.....	15
1.3.3 CLIMATOLOGÍA	16
1.3.4 MARCO BIOGEOGRÁFICO.....	17
1.4 TELEDETECCIÓN E INCENDIOS FORESTALES.....	18
2. OBJETIVOS	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1 MATERIALES	20
3.1.1 CARTOGRAFÍA DE INCENDIOS FORESTALES.....	20
3.1.2 ORTOFOTOGRAFÍAS AÉREAS.....	21
3.1.3 CARTOGRAFÍA TEMÁTICA.....	21
3.1.4 MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT).....	22
3.1.5. IMÁGENES SATELITALES GEOSAT	22
3.1.6 SOFTWARE	24
3.2 MÉTODOS	24
3.2.1 PARÁMETROS RELACIONADOS CON MÉTRICAS DE ECOLOGÍA DEL PAISAJE	29
3.2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO APLICADO.....	29

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ZEV-SE EN ZONAS AFECTADAS POR INCENDIOS FORESTALES EN ARAGÓN	31
4.2	RESULTADOS CARTOGRÁFICOS.....	36
4.2.1	INCENDIO DE SAN JUAN DE LA PEÑA (BAILO (1994)).....	37
4.2.2	INCENDIO DE LUNA (ORÉS, ASÍN, EJEA DE LOS CABALLEROS, BIOTA) (2015).....	39
4.2.3	INCENDIOS DE ZUERA (1979-2009).....	42
4.2.4	INCENDIO DE VILLARLUENGO (1994).....	44
4.2.5	INTERPRETACIÓN ECOLOGIA DEL PAISAJE	45
4.2.6	DIRECTRICES DE ACTUACIÓN EN ZONAS PRIORIZADAS	46
5.	CONCLUSIONES	47
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	49

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Fernando Pérez Cabello, director de este TFM, su incansable ayuda y dedicación constante a la supervisión de este trabajo, así como las largas jornadas empleadas en la obtención de datos y seguimiento de los procesos necesarios a lo largo de todo este tiempo.

Resumen:

Los incendios forestales son una de las causas principales de desertificación y aumento de erosión en Aragón. Actualmente es un tema de interés, con un aumento de la preocupación por el incremento de incendios forestales que, año tras año, arrasan nuestros bosques.

En el presente documento se ha realizado una investigación sobre los incendios sucedidos en la Comunidad Autónoma de Aragón desde 1967 a 2020 mediante el uso de la teledetección, y más concretamente, a través de las imágenes satelitales Geosat-2. El objetivo principal del presente estudio se centra en localizar las Zonas de Escasa Vegetación susceptibles a la erosión (ZEV-SE), y, por consiguiente, proponer directrices de gestión forestal en zonas quemadas.

Los resultados permiten estimar de manera cuantitativa mediante el uso de técnicas de clasificación digital supervisada sobre imágenes de alta resolución espacial en VIS-NIR: (1) que porcentaje de la superficie quemada hay en incendios superiores a 100 ha, (2) que porcentaje se sitúa en zonas de acumulación y en zonas de exportación de sedimentos, (3) cuales son los factores explicativos de la mayor o menor presencia de superficies erosionables, (4) conocer el patrón espacial de distribución de estas zonas a partir de métricas derivadas de la ecología del paisaje, (5) el establecimiento de una priorización de zonas de actuación.

Palabras clave: incendio forestal, erosión, desertificación, imágenes, Zonas de Escasa Vegetación.

Abstract:

Wildfires are one of the main causes of desertification and erosion raises in zones affected by wildfires in Aragón (Spain). Nowadays, this is a popular issue; the population is concerned about the obvious raise of wildfires that, year by year, cause several damages in our forests.

In this document, it has been carried out an investigation about the wildfires which took place in Aragón from 1967 to 2020 using remote sensing, and, in particular, using Geosat-2 satellite images. The main objective of this study is, after the representation of a detailed cartography, locate the sensitive to erosion lacking in vegetation zones and, therefore, propose several land planning methods which correspond with the results.

The results allow to estimate in a quantitative way and using digital supervised techniques over high spatial resolution in VIS-NIR: (1) the percentage of burned areas in wildfires over 100ha, (2) the percentage located in accumulation or exportation of sediments zones, (3) which are the explicative factors of the presence of erosional surfaces, (4) the spatial pattern of the distribution of this zones by the metrics produced from the landscape ecology, (5) the establishment of a priority among actuation zones.

Key words: wildfire, erosion, desertification, images, lacking of vegetation zones.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN

El fuego ha sido un elemento clave en la conservación y transformación del paisaje y de los ecosistemas naturales actuales y, así mismo, es una parte esencial en los sistemas de vida humanos. Como regulador de procesos cumplen una función ecológica, siendo esenciales para la historia evolutiva de la Tierra, particularmente si su origen es consecuencia de procesos ligados a la naturaleza (Castillo, Pedernera, y Peña, 2003)

Los ecosistemas mediterráneos son susceptibles a los incendios forestales y han evolucionado con la recurrencia de este factor ecológico natural desde el Plioceno (Zavala, De Celis, y Jordán, 2014). La frecuencia de los incendios ha ido aumentando desde que el ser humano tiene mayor control del fuego y lo utiliza para gestionar el entorno. Desde que el abandono de las tierras se ha acentuado, también lo ha hecho la masa forestal, y, en consecuencia, la intensidad de los incendios (Bodí *et al.* 2012).

La Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de montes, define un incendio forestal como *«aquel fuego que se extiende sin control sobre combustibles forestales situados en el monte»*. Así, en el artículo 5 de la citada ley se expone que, *«se entiende por monte todo terreno en el que vegetan especies forestales arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, sea espontáneamente o procedan de siembre o plantación, que cumplan o puedan cumplir funciones ambientales, protectoras, productivas, culturales, paisajísticas o recreativas»*.

Las consecuencias de los incendios forestales son adversas en términos generales, y especialmente puede verse afectada la vegetación. La pérdida de la capa vegetal a causa de un incendio puede derivar en una situación donde se favorezcan los procesos de erosión del terreno. Estos procesos ligados a la recurrencia de incendios varían según su frecuencia y su severidad, pero, en definitiva, derivan en una pérdida de la calidad del suelo y en la pérdida de cubierta vegetal, lo cual favorece la erosión, a este proceso se le denomina desertificación (Martínez de Azagra Paredes, 2010).

En este estudio se van a delimitar Zonas de Escasa Vegetación ZEV-SE y a caracterizarlas dentro del área total que abarcan los incendios ocurridos en la comunidad

de Aragón con una superficie superior a 100 hectáreas, ocurridos desde agosto de 1967 hasta enero de 2020.

Este TFM se ha desarrollado en el contexto de unas prácticas extracurriculares realizadas en el Instituto Universitario en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), y se enmarca dentro de las líneas de trabajo incluidas en el proyecto de I+D+i Retos Investigación: PID2020-118886RB-I00 “Análisis dinámico de la Resiliencia de los Paisajes Forestales afectados por el fuego (PaF) mediante indicadores espectrales multisensor”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación (10.13039/501100011033), así como en las Líneas Estratégicas del Grupo de Investigación reconocidos del Gobierno de Aragón GEOFOREST-IUCA (Procesos GEOambientales en espacios FORESTales) (S51_20R).

1.2 LOS INCENDIOS FORESTALES EN ARAGÓN Y MEDIDAS POST-INCENDIO

Para conocer y describir la problemática asociada a los incendios forestales en Aragón es imprescindible disponer de una base de datos amplia y homogénea, que permita efectuar el análisis estadístico de los mismos, no solo en cuanto a número y superficie afectada, sino también en lo que respecta a la distribución espacial y temporal, así como su causalidad (Gobierno de Aragón, departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente).

Según el artículo 67 del Decreto Legislativo 1/2017, de 20 de junio, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Montes de Aragón, se considera información y estadística forestal:

«La llevanza de los registros públicos que la ley establece, así como aquella información forestal complementaria que no forme parte de su contenido, la información cartográfica y la totalidad de las estadísticas forestales, le corresponden al departamento competente en materia de medio ambiente del Gobierno de Aragón, debiendo mantener actualizados tales registros y el resto de la información y de la estadística forestal a los efectos previstos en la presente ley y en la ley básica estatal.»

Los incendios forestales en Aragón han sufrido un importante incremento en los últimos dos decenios, tanto en el número como en la superficie total afectada por los mismos.

En el manejo de las zonas incendiadas, los objetivos pueden no incluir una restauración completa, especialmente si se desea cambiar el tipo de ecosistema que se quemó (De las Heras Ibáñez, 2015). La rehabilitación difiere de la restauración en que hace hincapié en la reparación de procesos ecosistémicos, productividad y servicios, pero no necesariamente en términos de composición específica o de estructura de la comunidad (Aronson *et al.* 1993).

En este sentido, es necesario diferenciar entre restauración pasiva, asistida y activa:

- La restauración pasiva se fundamenta en la protección del área ante nuevas perturbaciones y en dejar a la naturaleza actuar (Lamb y Guilmour, 2003).
- La restauración asistida, que incluye podas, clareos, rozas, etc. Los ecosistemas mediterráneos son altamente resilientes ante los incendios forestales cuando están dominados por especies arbóreas y arbustivas, de manera que sus adaptaciones pueden ser utilizadas en la restauración post-incendio, especialmente en técnicas de ayuda a la regeneración natural, lo cual derivará en reducción de costes y un mayor éxito en los objetivos marcados (Moreira y Vallejo, 2009).
- La restauración activa, basada en la siembra y plantación de las zonas incendiadas. Por diversas razones (incendio de alta severidad, condiciones ecológicas tras el incendio de la vegetación afectada, condiciones climáticas, dominancia de estadios inmaduros de las comunidades vegetales), la regeneración natural puede no estar asegurada, especialmente para el caso de pinares quemados (Moreira *et al.* 2012).

Todas estas medidas post-incendio tienen como objetivo principal la limitación de la erosión, disminución de la escorrentía superficial y la conservación de la ceniza. (Gómez-Sánchez *et al.* 2018). Las fajinas o barreras vegetales son una actuación post-incendio ampliamente extendida en el mundo forestal, como medida para el control de los procesos erosivos: escorrentía y del arrastre de sedimentos aguas abajo (Robichaud, Lewis, y Ashmun, 2008).

1.2.1 APLICACIÓN DE MEDIDAS EN LA PLANIFICACIÓN DE EMERGENCIA

La totalidad de los incendios estudiados se reparten a lo largo de toda la Comunidad Autónoma de Aragón, dado su diversidad en cuanto a localización, índice de afección del incendio y características geomorfológicas singulares no pueden proponerse medidas concretas para todos ellos.

A continuación, se documentan las medidas de emergencia generales que se aplican en el ámbito de la planificación (Napper, 2006):

- Tratamientos sobre el terreno. Toman como objetivo estabilizar áreas quemadas mediante la prevención o la reducción de efectos adversos de los incendios. Fomentan así la recuperación, proporcionando cobertura del suelo; la reducción de la erosión, atrapando los sedimentos y reduciendo la sedimentación; y la repelencia del agua y la mejora de la infiltración. A su vez, mantienen la integridad de los ecosistemas mediante la prevención de la expansión de especies no deseadas. Dentro de este tipo de tratamientos se incluyen:
 - Estabilización de zonas de valor social o económico especial.
 - Estabilización de materiales peligrosos.
 - Estabilización de hábitats críticos.
 - Control manual o mecánico de especies invasivas.
 - Dispersión de residuos de corta.
 - Escarificación del suelo para aumentar la infiltración.
 - Barreras de erosión para reducir la longitud de la pendiente.
 - *Mulching* con material vegetal y aplicación terrestre o aérea.
- Tratamiento sobre canales. Reducen o mitigan el efecto del incendio sobre la calidad del agua, pérdida de control del agua, disminución de la velocidad del agua, las trampas de sedimentos, y mantenimiento de las características del canal. En este grupo de medidas cabe destacar:
 - Reforzamiento y recrecimiento de canales.
 - Limpieza de canales existentes.
 - Microcuencas de sedimentos.
 - Presas.
 - Estabilizadores del canal.

- Tratamientos sobre sendas, caminos y vías. Mitigan los efectos del incendio en el transporte y acceso al área afectada y reducen los efectos de la erosión
- Tratamientos de protección y seguridad. Incluyen la señalización de posibles peligros, alertas frente a riesgos de avenidas, corrimiento de tierras, limitaciones de acceso al público, etc.

1.2.2 MEDIDAS GENERALES DE LA PLANIFICACIÓN A MEDIO-LARGO PLAZO

Una vez que se han llevado a cabo las actuaciones de emergencia necesarias, es necesario elaborar un plan preciso de actuación en la zona incendiada a un plazo más largo. Es en esta planificación donde se debe decidir sobre aspectos relacionados con la facilitación de la regeneración natural, conversión a otros tipos forestales, reforestación, plantación y manejo del paisaje para promover cubiertas vegetales específicas. Para ello, es necesario monitorizar y evaluar la zona incendiada, evaluando en cada momento si los objetivos se cumplen (Corona, Koehl, y Marchetti, 2003).

1.2.3 IMPACTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES

Los impactos de los incendios van a depender de la intensidad, recurrencia y duración del incendio forestal (Badía y Úbeda, 2013). El ciclo hidrológico puede verse afectado también, puesto que existe una pérdida de vegetación, disminución de materia orgánica y aumento de escorrentía superficial por suelos hidrófobos (Varela y Benito, 2013).

Una de las primeras tareas a realizar tras un incendio consiste en la evaluación de los daños, determinando su perímetro, la superficie exacta afectada y la severidad del mismo.

El concepto de severidad es fundamental para explicar los efectos del fuego. A pesar de sus múltiples definiciones encontradas en la literatura, la severidad puede definirse como una medida de la cantidad de materia orgánica perdida por el incendio, la desaparición de la cubierta vegetal y la volatilización o transformación de los componentes del suelo en formas minerales solubles. Por otra parte, el concepto

intensidad hace referencia al estado del fuego durante la combustión y se mide en términos de temperatura, altura de la llama, cantidad total y tamaño del combustible consumido y transferencia de calor a los estratos superiores (Miller y Yool, 2002).

Tras un incendio, lo peor que puede pasar desde el punto de vista edáfico es que haya precipitaciones de gran intensidad que erosionen los horizontes superficiales del suelo, que son los que mayor cantidad de semillas tienen para la regeneración del terreno. Lo más adecuado para su autoregeneración sería que hubiera lluvias con poca intensidad que refuercen los niveles de humedad y que el propio ecosistema se vaya recomponiendo. Por el contrario, que existan periodos de lluvias de alta intensidad podría derivar en la pérdida absoluta del suelo (Pérez Cabello *et al.* 2011).

1.2.4 IMPACTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN EL SUELO

Los incendios forestales provocan una degradación del suelo, la cual va a depender de una serie de factores como son: la topografía del lugar, tasa de regeneración de la cubierta vegetal post-incendio, intensidad del proceso de erosión, y la intensidad, recurrencia y duración del fuego (Caon *et al.* 2014).

Las consecuencias de estos impactos se traducen en: aparición de erosión, disminución de nutrientes, pérdida de materia orgánica y alteración en la vegetación (Mataix-Solera *et al.* 2011).

Tras un incendio se produce así un daño ecológico grave al provocar una pérdida de suelo a causa de la erosión, que se traduce en una disminución significativa de los nutrientes que necesita la fauna y flora. Todo ello se debe a la exposición con la que se queda el suelo frente al viento y agua, generando una pérdida del material, así como problemas de infiltración del agua, aumento del flujo superficial del agua e hidrofobicidad (Shakesby, 2011).

En los primeros centímetros de la superficie del suelo aumenta el contenido de nutrientes tras el incendio, producido por el depósito de cenizas, mineralización de nutrientes y formación de estructuras estables. Tras el paso del tiempo, esta proporción va disminuyendo debido a la volatilización y transformación de los nutrientes, así como la eliminación por gravedad y viento de las cenizas (Caon *et al.* 2014). Mantener las cenizas en la superficie es importante para la limitación de la pérdida de nutrientes y

fomentar la vegetación después del fuego. Las medidas post-incendio son así esenciales para la retención de dichos nutrientes en el terreno, gracias a la estabilización que proveen.

En ocasiones, la capa de cenizas y restos orgánicos depositada tras el incendio puede proteger el suelo de la erosión durante un periodo de tiempo variable (Cerdà y Doerr, 2008). Cuando esta cubierta acaba por desaparecer, el agua de la lluvia genera impactos directos sobre la superficie del suelo, que puede fragmentar los agregados, es decir, puede acabar individualizando las partículas que los conformaban, que acaban disponiéndose entre poros, sellando así la superficie del suelo (Wittenberg e Inbar, 2009).

1.3 ÁREA DE ESTUDIO

Aragón es una de las 17 comunidades autónomas que conforman España. Se compone de tres provincias (Huesca, Zaragoza y Teruel), que contienen 731 municipios sobre una superficie de 47.720 km², que representa el 9.4% del territorio español. Se halla situado al nordeste de la península Ibérica y sus coordenadas son longitud 0°40'0.01" O, latitud 41°30'0" N.

El área de estudio se circunscribe a las zonas quemadas de Aragón por lo que, a continuación, se hace alusión a los marcos geológicos y geomorfológicos que corresponden a todo este territorio, así como su climatología y biogeografía.

1.3.1 MARCO GEOLÓGICO

El marco geológico en Aragón es muy extenso, pero puede agruparse en tres grandes unidades: los Pirineos y el Sistema Ibérico y la Depresión del Ebro.

- Los Pirineos: desde el punto de vista estructural son una cordillera muy compleja, con una alineación NW-SE donde se pueden distinguir diversas partes, las cuales se exponen a continuación.

Pirineo axial: compuesto por sedimentos paleozoicos, los materiales más antiguos del Pirineo. Dentro de él destacan varios batolitos graníticos que produjeron en sus

alrededores aureolas de metamorfismo. También se encuentran pizarras silúricas y carboníferas, así como calizas devónicas y carboníferas.

Sierras interiores: adosadas a la unidad anterior. Estas sierras están constituidas fundamentalmente por materiales mesozoicos y paleocenos. Es una inmensa banda de calizas de distintas purezas, mezcladas a veces con areniscas.

Depresión intrapirenaica: compuesta por el flysch, sedimentos eocenos de origen marino profundo, constituido por una alternancia de capas de areniscas y margas o arcillas (Soler-Sampere y Cayo Puigdefábregas, 1970). La depresión propiamente está ocupada por margas. En su reborde sur se encuentra una línea de conglomerados que fueron plegados al final de los movimientos alpinos. Por último, el sinclinorio de la Guarga y la depresión del río Gállego con un predominio de margas grisáceas o gris-azuladas (muy características porque sobre ellas la erosión ha trazado profundos abarrancamientos — Arguis — con bandas intercaladas de arenisca —puerto de Monrepós —) (Costa i Mercadal, Ramírez Merino, y Navarro Juli, 1998)

Sierras exteriores: se trata de la última unidad estructural pirenaica y está en contacto con las tierras llanas del valle del Ebro. Domina la caliza y en conjunto son los últimos pliegues de los mantos de corrimiento que se deslizan desde Gavarnie (Francia). El reborde sur está constituido por una banda de conglomerados.

- Sistema Ibérico: compuesto por un conjunto de sierras que presentan poca continuidad con una alineación NW-SE, que abarca desde las rocas más antiguas de todo Aragón correspondientes al precámbrico en forma de pizarras y esquistos, hasta rocas del Terciario, durante la orogenia alpina. Todo el sector quedó plegado con la orogenia alpina. Con la erosión posterior del Terciario y Cuaternario los materiales se sedimentaron en las depresiones y se acumularon hacia el Ebro.

- Depresión del Ebro: en la que se pueden distinguir dos partes

Los Somontanos Pirenaico e Ibérico: Son relieves en cuesta que enlazan los Pirineos y el sistema Ibérico con el centro. La erosión en estas zonas ha creado dos tipos de relieves característicos: las hoyas en el somontano Ibérico y los mallos en el Pirenaico. Los ríos a pie de monte han ido excavando amplios valles curso abajo.

Centro de la depresión: donde la alternancia de materiales duros y blandos han generado relieves de tipo muela; que son plataformas estructurales de materiales calizos

duros quedando más elevados por la erosión diferencial (Simón Gómez *et al.* 1998). Entre estas muelas se abren anchos valles de fondo plano, aptos para el cultivo, donde están los materiales paleógenos más modernos. Donde abundan los materiales blandos como arcillas margas y yesos se localizan paisajes acarcavados por la acción de la escorrentía superficial.

1.3.2 MARCO GEOMORFOLÓGICO

Los Pirineos, la Depresión del Ebro y la Cordillera Ibérica son las tres grandes unidades de relieve en las que se divide la Comunidad Autónoma de Aragón. Independientemente de su génesis y evolución, cada una de estas unidades atesora un conjunto de morfologías especialmente destacables, en algunos casos, singulares incluso a escala global.

En lo que respecta a los Pirineos, los elementos geomorfológicos más significativos son los propios de los modelados glaciario y periglaciario, presentes tanto de la zona axial de la cordillera como en las cotas más elevadas de las sierras interiores (Izquierdo Llavall, Casas Sainz, y Gil Peña, 2013).

De la Depresión del Ebro cabe mencionar como más destacable algunas muelas o planas como la Plana Negra, la Muela y la Plana de Zaragoza, todas ellas formadas por calizas neógenas e individualizadas gracias al encajamiento de la red fluvial circundante (Peña y Lozano, 2004). Del modelado kárstico destacan las dolinas y lagunas saladas y lagunas temporales de gran valor y singularidad ecológica.

La Cordillera Ibérica destaca por la presencia de extensas superficies de erosión de origen terciario muy bien conservadas, así como por procesos de karstificación especialmente activos que han dado como resultado campos de dolinas (Rosas, Sanz, y Menéndez-Pidal, 2016). Igualmente, son destacables algunos cañones fluviales como los de los ríos de la parte más al sur y formaciones endokársticas de especial singularidad. Por último, cabe mencionar también depresiones fluvio-kársticas de tipo polje como la de Gallocanta, un entorno de gran valor tanto geomorfológico como ecológico (Instituto Geográfico de Aragón, Gobierno de Aragón, 2009).

1.3.3 CLIMATOLOGÍA

Aragón se incluye dentro del ámbito del clima mediterráneo continentalizado, con inviernos fríos y veranos calurosos y secos. A pesar de ello, se trata de una Comunidad Autónoma cuyo territorio no presenta un clima homogéneo, sino que presenta variedad y contrastes como puede verse a continuación en la figura 1.

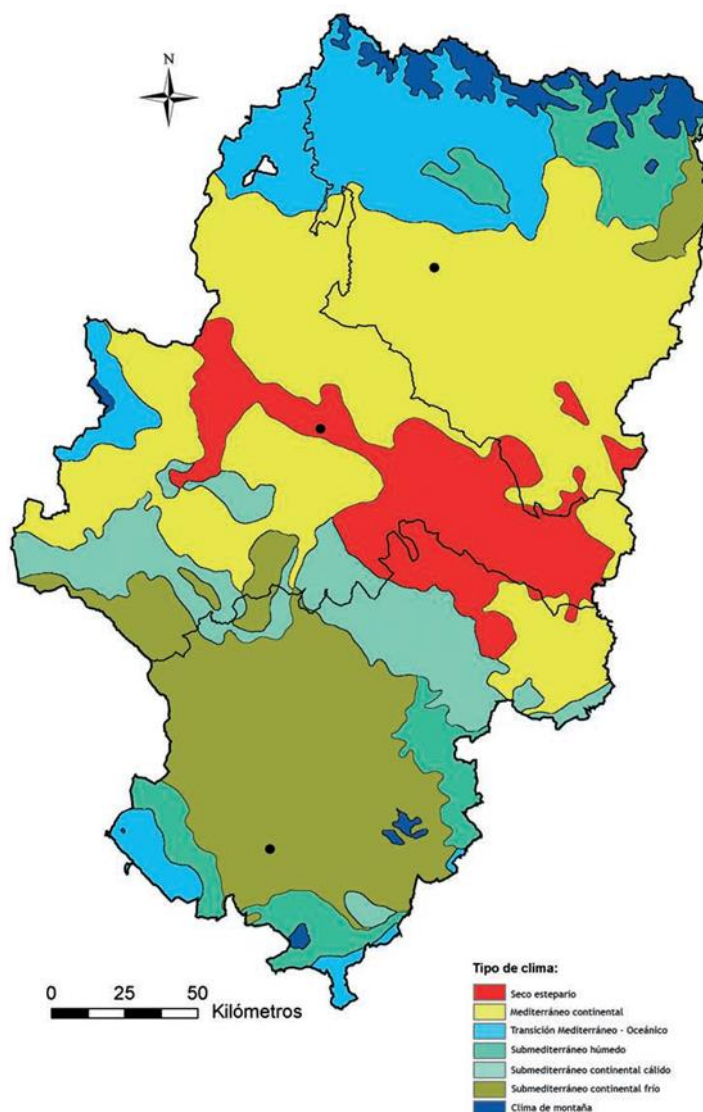


Figura 1. Distribución del clima en Aragón. Fuente: (López Martín, Cabrera Millet, y Cuadrat Prats, 2007).

Este clima debe sus características a la dinámica atmosférica regional (López Martín, Cabrera Millet, y Cuadrat Prats, 2007) que manda en estas latitudes y a la interferencia entre rasgos oceánicos y mediterráneos. Pero son la posición interior del

solar aragonés en el contexto peninsular, al abrigo de los Pirineos y del Sistema Ibérico, las acusadas diferencias altitudinales entre la montaña y el llano y la propia configuración topográfica del territorio, las que imprimen variedad a los climas aragoneses.

Todos estos factores explicarían los caracteres esenciales del clima de Aragón como son la escasa pluviometría en su sector central y los contrastes térmicos entre los fríos inviernos y los calurosos y alargados veranos, pudiendo abarcar amplitudes térmicas de hasta 55°C en algunos casos.

1.3.4 MARCO BIOGEOGRÁFICO

La riqueza y variedad de la vegetación en Aragón está en consonancia con la variedad del relieve y los ambientes climáticos que se presentan. Pueden distinguirse, de manera resumida, 9 ambientes fitoclimáticos en este territorio (Allué Andrade, 1990):

- Espartales y sapos, ambientes con pluviosidad escasa, calor en verano y frío en invierno, fuerte insolación y sustrato con una salinidad elevada. Apenas muestra vegetación arbórea o arbustiva. Las agrupaciones más típicas son los tomillares, aliagares, sisallares, etc.
- Sabinares, de la planta Sabina albar (*Juniperus thurifera*), ocupan los ambientes más fríos y secos de la depresión del Ebro. Suelen presentarse en masas abiertas, en ocasiones con ejemplares muy aislados
- Sarda, o monte espinoso de coscoja (*Quercus coccifera*). Se extiende por toda la depresión y ahora ocupan parte de los antiguos carrascales que no han podido sobreponerse a los procesos de pérdida de suelo a causa de los incendios forestales. Comparte este ambiente con el Pino carrasco (*Pinus halepensis*).
- Carrascales o encinares, (*Quercus ilex*), se extiende por la mayor parte de Aragón, desde la media montaña hasta las zonas más áridas de la depresión del Ebro. Se presenta tanto en montes bajos, donde se usan para el aprovechamiento de leñas, como en montes más abiertos.
- Quejigales, robles de tipo (*Quercus faginea*), se extienden a lo largo de toda la media montaña, es una especie cuyo brote tras un incendio es muy rápido, por lo cual, se podría decir que es un tipo de vegetación adecuado para las zonas que son afectadas de una manera recurrente por el fuego.

- Matorrales y pinares Ibéricos, compuesto mayoritariamente por el marojo o rebollo (*Quercus pyrenaica*), pueden formar masas continuas de muy grandes dimensiones. Es una especie muy adaptada al fuego, brota de cepa y en agrupaciones sin ningún tratamiento selvícola contiene una elevada carga de combustible.
- Montano húmedo, con los hayedos como agrupaciones más características, los prados húmedos y los pinares musgosos. Habría que añadir a estas agrupaciones otras de gran importancia como son los pinares secos y bujedos, que también presentan una gran resistencia al fuego. Se localiza en el pirineo occidental y puntos aislados del Moncayo y Beceite.
- Subalpino, su vegetación característica son los pinares de Pino negro (*Pinus uncinata*). Cabe destacar las agrupaciones de vegetación de solana como los enebrales que están muy bien adaptadas a estas duras condiciones climáticas, que a su vez son muy resistentes a los incendios. Altitudes comprendidas entre 1.800 y 2.000 metros.
- Alpino-nival, corresponde a los roquedos de alta montaña, presentan altitudes por encima de los 2.200 metros. Su vegetación más característica son los prados alpinos, la vegetación arbórea es escasa por encontrarse sobre el límite natural del bosque (*timberline*) (Molero Mesa, 2010).

1.4 TELEDETECCIÓN E INCENDIOS FORESTALES

La colección de literatura dedicada a estudiar y analizar los incendios forestales a través de la teledetección es muy extensa y variada. Estas técnicas han ido avanzando y mejorando a lo largo de los años. Actualmente se dispone de inagotables metodologías aplicadas al análisis de los efectos que provocan los incendios forestales.

El geógrafo Emilio Chuvieco con sus publicaciones ha sido pionero en España a la hora de relacionar los métodos e imágenes de teledetección espacial y la aplicación a la gestión de fenómenos naturales distintos. Véase el ejemplo de *Cartografía y evaluación de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección* (1994), donde junto a Viedma analiza la capacidad de la teledetección para la realización de cartografías y la evaluación de daños provocados por los incendios forestales.

La teledetección, así como el uso de imágenes de satélite, proporcionan información muy útil en el contexto de las actuaciones post-incendio, teniendo cada vez más importancia desde el punto de vista de la gestión holística de los incendios forestales (Botella-Martínez y Fernández-Manso, 2017).

2. OBJETIVOS

Este trabajo se articula a partir de la definición de dos objetivos principales:

- (1) Analizar los patrones espaciales de zonas de escasa vegetación susceptibles a la erosión (ZEV-SE), en las zonas incendiadas de Aragón (>100 has), desde la década de 1970, que coadyuven en la determinación de directrices de planificación de la gestión hidrológica forestal en zonas alteradas por el fuego.
- (2) Evaluar el potencial de la aplicación de las imágenes GeoSat-2 para la discriminación espacial de las zonas de escasa vegetación mediante procesos de clasificación digital supervisado y análisis multicriterio. Asimismo, este estudio se realiza a dos escalas espaciales diferentes: (i) detalle (píxeles de 5 m), sólo en cuatro grandes incendios representativos de las diferentes condiciones ambientales de Aragón; (ii) general (píxeles de 25 m), para el resto de incendios forestales de Aragón.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso metodológico desarrollado en este estudio aparece esquematizado en la Figura 2. Consistió en una serie de etapas principales entre las que destacan, de manera cronológica: la delimitación de los incendios con una superficie superior a 100 hectáreas; un proceso de obtención y corrección de las imágenes de satélite de alta resolución espacial; la aplicación de un proceso de clasificación digital supervisado (que incluyó las fases de entrenamiento, asignación y verificación); el diseño de un modelo multicriterio

y la realización de la cartografía final a diferentes escalas; identificación de medidas en la planificación de las zonas de erosión.

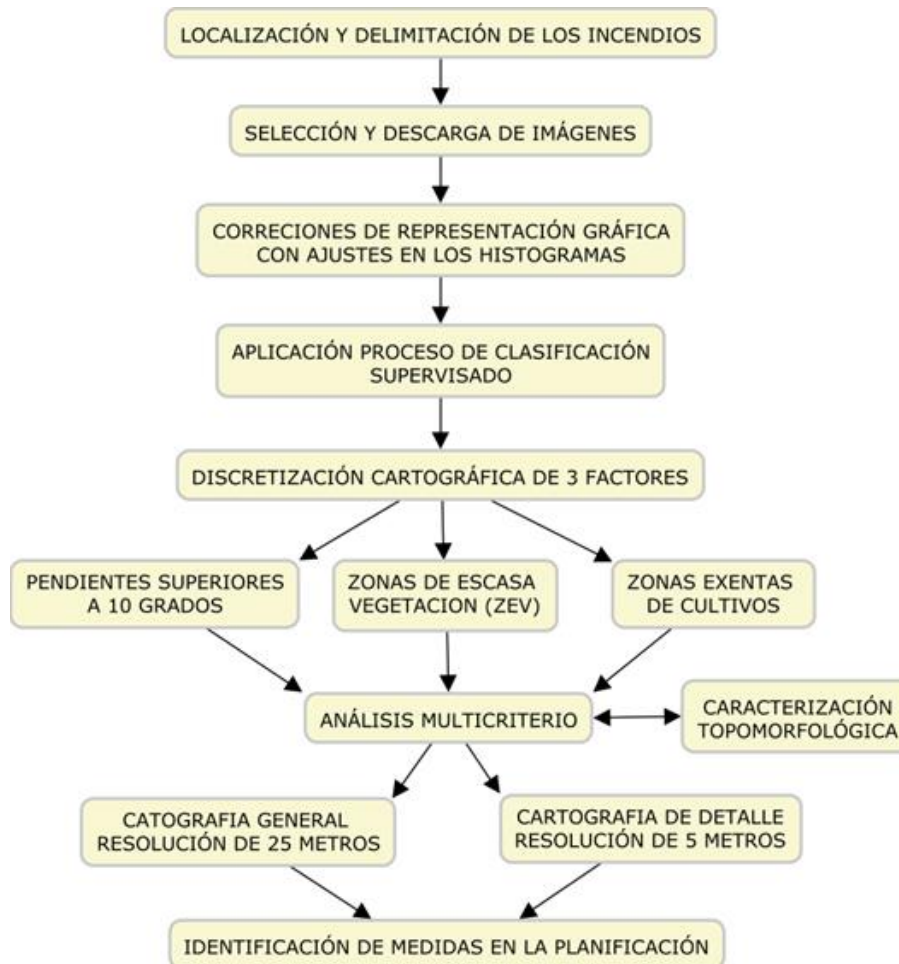


Figura 2. Esquema metodológico. Fuente: elaboración propia.

Para el estudio de las zonas incendiadas registradas se han utilizado una serie de materiales y métodos diferentes que pueden clasificarse de la siguiente manera.

3.1 MATERIALES

3.1.1 CARTOGRAFÍA DE INCENDIOS FORESTALES

El punto de partida del presente estudio comienza con la delimitación, en una única capa de datos, de los 203 incendios forestales con una superficie superior a 100

hectáreas, ocurridos desde agosto de 1967 hasta enero de 2020. Esta capa, de tipo *shapefile*, que incluye los perímetros de todos los incendios objeto de estudio, ha sido proporcionada por la Dirección General del Medio Natural y Gestión Forestal (Dirección General de Aragón), en el marco del proyecto de I+D+i: PID2020-118886RB-I00 “Análisis dinámico de la Resiliencia de los Paisajes Forestales afectados por el fuego (PaF) mediante indicadores espectrales multisensor”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación/Agencia Estatal de Investigación. Posee la información relativa a la provincia y municipio en el que se dio lugar el incendio, tipo, época, fecha y causa.

3.1.2 ORTOFOTOGRAFÍAS AÉREAS

Las imágenes obtenidas del apartado “descargas” de la web oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN en adelante) se corresponden con imágenes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de máxima actualidad de tamaño de píxel 0,25 m. Así, el mosaico de imágenes se compone de un total de 62 ortofotos con un peso total de 219 GB. Para su procesado se han degradado al tamaño de 1 m para agilizar los procesos y hacer viable su manejo. Para ello, dentro del software *ArcMap*, concretamente en *ArcCatalog*, se ha creado una *Geodatabase* (GDB en adelante) para dentro de ella insertar todos los PNOA de manera conjunta en un *grupo de mosaico*. Esta información ha sido utilizada para la validación de las cartografías de ZEV.

3.1.3 CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

Para las pistas forestales se usa una capa de tipo *shapefile* facilitada por Montes de Utilidad pública la Secretaría General Técnica del Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente que abarca aproximadamente la totalidad de las pistas dentro del perímetro de los incendios en cuestión. Para unos resultados más precisos se realiza un *buffer* de 5 metros.

3.1.4 MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)

Se han descargado los modelos digitales de pendientes de 2, 5 y 25 metros de resolución para la realización de los mapas de flujo, mapas de pendiente y mapas de acumulación de flujo con los procesos *Flow Direction*, *Slope* y *Flow Accumulation*, respectivamente.

Debido a esta diferencia de resolución espacial, las cartografías finales más al detalle se han realizado con las imágenes con resolución de 5 metros, mientras que la totalidad de los incendios, así como los datos estadísticos derivados de las mismas se realizaron con las imágenes de 25 metros de resolución para agilizar el proceso.

3.1.5. IMÁGENES SATELITALES GEOSAT

El Protocolo General de Actuación entre IGN/CNIG y CDTI, ha permitido una cobertura de los años 2021 y 2022 del territorio nacional español, con imágenes de satélite de muy alta resolución espacial (Consejo Superior Geográfico, Comisión Especializada del Plan Cartográfico Nacional). Las imágenes han capturado la totalidad del territorio español y se distribuyen a los usuarios en un formato integrable en Sistemas de Información Geográfica. La utilización de estas imágenes se ha realizado a través de una licencia para el uso no exclusivo de los productos satelitarios SPOT entre SPOT IMAGE y el usuario final para el proyecto «Plan Nacional de Teledetección».

GeoSAT-2 es un satélite de muy alta resolución de observación de la Tierra, óptico y multiespectral, operado en su totalidad por la empresa Geosat. Fue lanzado el 19 de junio de 2014. Uno de sus productos (lista completa de productos en Tabla 1) y del que en este caso hacemos uso son las imágenes *Bundle*, imágenes compuestas por composición pancromática (1 banda) + composición multiespectral (4 bandas). Contiene los productos pancromáticos y multiespectrales, en un mismo producto, con corrección de bandas. (Instituto Geográfico Nacional, 2021). Las características longitudes de onda de las bandas son las siguientes (Geosat, 2021):

- Azul: 466 nm – 525 nm
- Verde: 532 nm – 599 nm
- Rojo: 640 nm – 697 nm

- NIR: 770 nm – 892 nm

Tipo de producto	Nivel de procesado y resolución espacial		Bandas espectrales		
	L1B (native)	L1C (ortho)			
Pan-sharpened	1,0m	0,75m	Todas	R, G, B	NI, R, G
Pan	1,0m	0,75m	Solo banda PAN		
MS	4,0m	3,00m	Solo banda MS		
Bundle (PAN+MS)	1,0m (P), 4,0m (MS)	0,75m (P), 3,0m(MS)	Todas		

Tabla 1. Lista de productos disponibles en el GeoSat. Fuente: (Instituto Geográfico Nacional, 2021).

Se han obtenido imágenes satelitales multibanda del GEOSAT2021 en el servidor oficial del IGN como usuario autorizado previa mediante el software *FileZilla*, con cobertura Nacional VHR 2021-22. Sus requisitos quedan reflejados en la Tabla 2.

Requisito	Descripción
ÁREA	Debe cubrirse el territorio de España
GSD-PAN	GeoSAT-2 posee un GSD de 1m
GSD-MS	GeoSAT-2 posee 4 bandas multiespectrales (IRC, ROJO, VERDE y AZUL) con un GSD de 4m
SENSOR	GeoSAT-2 es capaz por sí mismo de llevar a cabo la cobertura de España
PRODUCTOS	Los productos GeoSAT-2 están ortorrectificados, con modelo calibrado del sensor
VENTANA TEMPORAL	Una cobertura para 2021 (Marzo- Octubre)
NUBOSIDAD	La nubosidad máxima permitida es del 10% del área (superficie de España) con una única misión
GEO-LOCALIZACIÓN	Los productos GeoSAT-2 disponen precisión de 1 píxel al 90% de nivel de confianza
RADIOMETRÍA	SNR>100 con 100w/m2/sr y una precisión radiométrica absoluta <10%
ILUMINACIÓN SOLAR	LTDN (hora local en el nodo descendente): 10:30+/- 1 hora
ÁNGULO DE ADQUISICIÓN	El requerimiento es cubrir con menos de 10º de ángulo de visión, hasta un máximo de 30º
NÚMERO DE COBERTURAS	Coberturas para el periodo 2021-2022
LICENCIA	Un EULA ad-hoc (Acuerdo de Licencia de Usuario Final) será proporcionado para esta campaña
SISTEMA DE REFERENCIA DE COORDENADAS (SRC)	ETRS89 / UTM 30 N - Territorio peninsular, Ceuta y Melilla (EPSG: 25830)
	ETRS89 / UTM 31 N - Islas Baleares (EPSG: 25831)
	REGCAN95 / UTM 28 N - Islas Canarias (EPSG: 4083)

Tabla 2. Requisitos de las imágenes GeoSat. Glosario: EULA, End-User License Agreement; GSD, Ground Sample Distance; IRC, Infrarrojo Cercano. Modificado de (Instituto Geográfico Nacional, 2021), elaboración propia.

El punto de partida en este caso comienza con un *shapefile* con todas las pasadas que ha realizado el satélite en Aragón, en las que pueden observarse solapes y huecos. En algún caso, estos últimos pueden afectar a algún incendio de grandes magnitudes.

Para determinar cada foto a descargar de manera manual e individual se realiza una selección por localización cruzando la capa del perímetro de los incendios con la capa de las pasadas del GEOSAT, obteniendo así el listado de imágenes necesarias para el nuevo mosaico.

Una vez descargados los 167 archivos con un peso total de 115 GB, e importados al software ArcMap como mosaico con el mismo método que con las ortofotos, pueden observarse unas tonalidades muy oscuras que dificultan una buena identificación de las imágenes. Este problema queda resuelto con un ajuste del histograma basado en la visualización momentánea para agilizar el proceso, además de la alternancia de imágenes (*flicker*) con las ortofotos para aprovechar su precisión (0,25 m píxel). En este caso las diferencias entre imágenes contiguas no deberían dar problema puesto que no son *RGB*, si no valores de reflectividad, pero en el resultado final sí existen diferencias notables en la cartografía. Posteriormente se explica cómo se han atenuado las diferencias y mejorado los resultados.

3.1.6 SOFTWARE

En cuanto al software utilizado, todos los geoprosesos y cartografías necesarias se realizaron con el *software ArcMap*. Los procesos estadísticos se realizaron con el *software XLSTAT*, complemento de *Excel*, que permite realizar los procesos de una manera útil, rápida y sencilla.

3.2 MÉTODOS

Como se ha comentado existen dos escalas de trabajo en el tratamiento de datos, las cartografías finales de detalle se trabajan con las imágenes con resolución espacial de 5 metros mientras que las cartografías y resultados estadísticos finales de la totalidad de los incendios se obtienen de las imágenes de resolución de 25 metros agilizando así su procesamiento.

La clasificación digital supervisada es el principal proceso y base del estudio, éste requiere un conocimiento previo del terreno y de los tipos de cobertura que existen. Se realiza una combinación de los conocimientos previos con el análisis de las fotografías aéreas y los informes técnicos disponibles. Se definen y delimitan así las áreas de entrenamiento sobre la imagen, en este caso, píxeles de entrenamiento. Las características espectrales de tales píxeles son utilizadas a fin de “entrenar” un algoritmo de clasificación, el cual calcula los parámetros estadísticos de cada banda para cada sitio piloto y de esta forma proceder a evaluar cada nivel digital de la imagen, compararlo y asignarlo a una respectiva clase. Así entonces, la clasificación supervisada intenta definir las clases temáticas que no tengan claro significado espectral, razón por la que se considera un método artificial (Posada, 2004).

Para realizar una mejor clasificación, la familia de puntos de entrenamiento correspondientes a los cultivos se sustituye por la capa ya vectorizada de cultivos del mapa forestal de Aragón, descargado de la web IdeAragon, mucho más precisa y que agiliza los procesos.

Se dispone de un mapa de geología del terreno y otro de riesgo de erosión desde la web de IdeAragón, que se utilizan de referencia, pero, debido a su escasa resolución espacial, no se emplean como capas a implementar en el análisis multicriterio.

El análisis multicriterio en este caso nos sirve para discretizar las zonas objetivo, las ZEV-SE, a partir de múltiples criterios que se solapan espacialmente evocando a la división vertical propia de la información geográfica (De Cos Guerra y Reques Velasco, 2019). Esta aportación metodológica parte de la incorporación de una técnica ampliamente desarrollada para la toma de decisiones espaciales (Gómez y Barredo, 2005), que normalmente se ha enfocado hacia la búsqueda de la ubicación idónea para un determinado uso o actividad pero que en este caso ha servido para delimitar zonas con unas características singulares determinadas. El empleo de este tipo de análisis es novedoso en las imágenes GeoSat-2 debido a que son muy recientes.

La clasificación supervisada se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento; es decir áreas (cuantas) de las que se conoce a priori la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una firma espectral característica de cada una de las clases. El clasificador de máxima verosimilitud (o máxima probabilidad) asigna la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las categorías; se le

asigna a la clase a la que es más probable que pertenezca. Para atribuir los píxeles a una familia en concreto y poder posteriormente discretizarlos de manera supervisada se utiliza el proceso *Create Signatures*, para generar un archivo de firma único con tipo de archivo texto «.gsg». Una vez obtenido este archivo de firma deberá usarse con posterioridad en el proceso *Maximum Likelihood Classification*, con el objetivo de crear un nuevo *raster* con las familias de puntos señaladas anteriormente.

Los puntos de ensayo fueron tomados en un incendio de referencia, concretamente el del municipio de Bailo (Huesca), donde pueden marcarse los puntos de entrenamiento de todas las familias con alta precisión.

Al realizar el proceso de clasificación en el incendio donde se habían tomado los puntos no hubo ningún problema en la identificación de las familias, pero posteriormente al querer realizar el proceso en toda la zona de trabajo se encontró un grave problema en las imágenes descargadas. El mosaico presentaba unas variantes de tonalidad muy acusadas entre imágenes contiguas, incluso existen incendios que abarcan varias fotos donde las tonalidades de RGB no son las mismas haciendo imposible su clasificación en un solo proceso (Figura 3).

Se realiza una descripción de las circunstancias que rodearon a estos incendios desde el punto de vista de la ignición, características, consecuencias y medidas post-incendio aplicadas (Gobierno de Aragón, 2015).

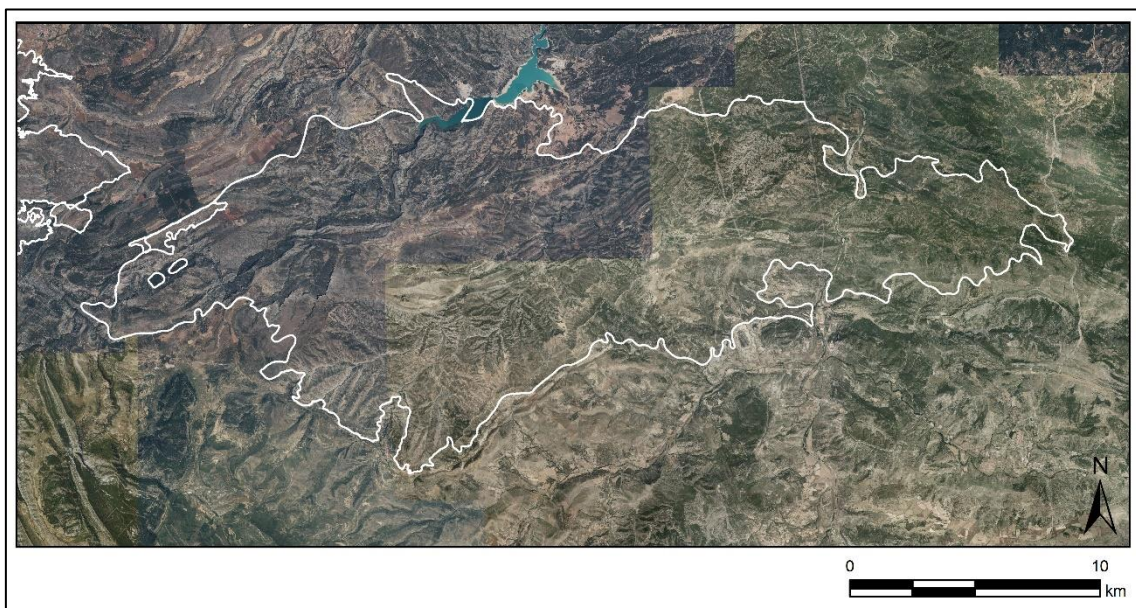


Figura 3. Ejemplo de los cambios de tonalidad en los PNOA en imágenes contiguas que provocan una mala clasificación, en concreto en el incendio de Villarluengo (Teruel). Elaboración propia.

Del mismo modo que con las ortofotos, en el incendio de referencia del municipio de Bailo (Figura 4) no hay problema aparente en la clasificación, pero cuando el proceso se extrapola a toda la zona de estudio se generan zonas de clasificación equivocada que coinciden con zonas donde fotos contiguas cambian de valores de reflectividad, en algunas ocasiones incluso pueden observarse nubes y sombras, que posteriormente serán resueltas creando otras familias independientes con esas reflectividades características.

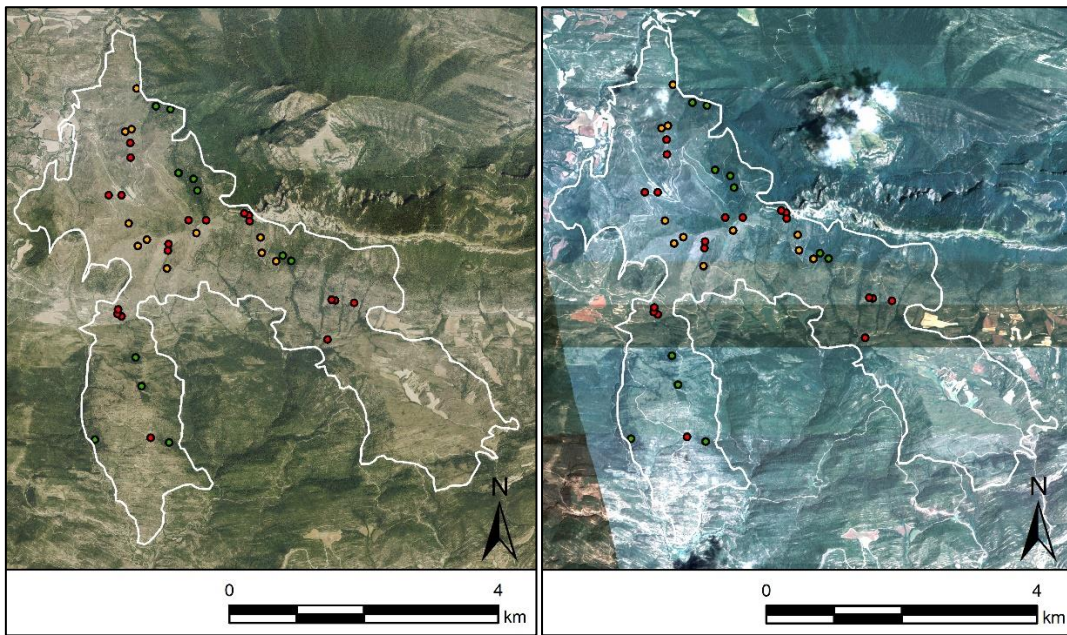


Figura 4. A la izquierda el incendio de Bailo, donde se han tomado los puntos de entrenamiento iniciales en PNOA y a la derecha en imagen del GEOSAT. Elaboración propia.

Como primera posible solución se tomaron puntos de entrenamiento a lo largo de varios incendios que presentaban imágenes contiguas con diferente reflectividad para ir mitigando en medida de lo posible la mala clasificación. Con esta toma de puntos adicional se percibe una notable mejoría al añadir familias de puntos de igual clasificación, pero con distinto nombre.

Después del procesamiento con los valores definitorios previos, se aplica al resultado obtenido un *majority filter* donde se obtienen así unos resultados cercanos a óptimos, con las zonas de erosión bien marcadas y presentando en su mayoría una correcta disposición.

Reclassify, este proceso se ha utilizado para generar *rasters* discretizando las pendientes superiores mayores o iguales a 10 grados de inclinación, así como valores de geomorfología del terreno como concavidad y convexidad a partir del mapa de flujo, que posteriormente con la herramienta *Raster calculator*, serán utilizadas para combinar todos estos factores.

Para la caracterización el patrón espacial de las ZEV-SE en cada incendio se utilizan las métricas contempladas en los estudios de Ecología del Paisaje. Una descripción de las métricas seleccionadas, de acuerdo con (McGarigal y Marks, 1995), es la siguiente:

- Número de Teselas o *Patch Number* NumP: El número de teselas es la métrica más sencilla que puede dar una idea de la medida en que las ZEV-SE se encuentran divididas o fragmentadas. Únicamente consiste en identificar el número de teselas o fragmentos individuales existentes década uno de las ZEV identificadas. Puede orientar acerca de la fragmentación.

- Tamaño medio de las teselas o *mean patch size* MPS: El tamaño medio del fragmento o tesela para las ZEV-SE identificadas muestra la superficie media de las manchas individuales. Junto al NumP, aporta información acerca de la fragmentación, un incremento del NumP junto a un crecimiento del MPS revelará un incremento de la fragmentación (Domingo Delgado *et al.* 2001). El proceso de fragmentación del ecosistema puede dividirse en una serie de efectos interrelacionados como son: la eliminación neta de superficie de los hábitats naturales, la división de los mismos fragmentos en fragmentos de menor extensión y los cambios posteriores en cada uno de ellos (Forman y Godron, 1986). En otros casos la fragmentación viene acompañada de otros factores como la existencia de vías de transporte (carreteras o pistas forestales) y otras estructuras artificiales que eliminan hábitat al mismo tiempo que dividen las zonas de vegetación (Forman y Alexander, 1998).

- Índice de Forma medio o *Mean Shape Index* MSI: El índice de forma es una métrica que aporta información de la complejidad geométrica de los fragmentos. Mide la relación entre el perímetro de un fragmento y el perímetro que tendría el fragmento más simple de la misma área. De tal forma que mayores valores de este índice muestran un incremento de la complejidad de sus formas. Aporta también una medida de compacidad/forma de los fragmentos, no es sensible al tamaño de la mancha.

- *Area Weighted Mean Shape Index* AWMSI: es igual a la suma de todos los parches, por cada perímetro de cada parche (metros) dividido entre la raíz cuadrada del área (m²), ajustado por una constante que se ajuste a un estándar circular (vector) o estándar cuadrado (raster), multiplicado por el área del parche (m²) y dividido por el total del área del incendio. En otras palabras, AWMSI es igual a la media del MSI de los parches, ponderado por el área del parche, así pues, los parches mayores pesan más que los pequeños.

3.2.1 PARÁMETROS RELACIONADOS CON MÉTRICAS DE ECOLOGÍA DEL PAISAJE

La ecología del paisaje ha sido obtenida mediante el uso de la herramienta *Landscape Metrics*, importada al *software ArcMap* que funciona a partir de capas vectoriales de un área, usa algoritmos que cuantifican las características espaciales de los parches, cantidad de los parches o del mosaico de paisaje. Para poder utilizar esta herramienta se han tenido que vectorizar todas las capas generadas en la calculadora de *rasters* con el proceso *Raster to polygon*.

Con el proceso *Zonal Statistics as Table* se obtiene en un fichero de texto toda la información estadística de cada incendio según la relación de píxeles y porcentaje en cada uno de ellos.

3.2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO APLICADO

En cuanto a la parte estadística, con el *software XLSTAT*, complemento de *Excel* se han podido realizar los siguientes gráficos e interpretaciones. Se han utilizado descriptivos de centralidad y dispersión para caracterizar la magnitud de las ZEV en cada incendio y la prueba Kruskal-Wallis (no paramétrica) (Fowler, Cohen, y Jarvis, 1998) para corroborar la existencia de diferencias, estadísticamente significativas, considerando las categorías de diferentes variables: provincia, época del año, década, etc. Una de las principales ventajas que presenta esta prueba es que no suele verse afectado por valores extremos en los datos. Mediante modelación de datos ANOVA (Gómez-Sánchez et al.

2018) (Alloza et al. 2014) se han obtenido los datos resultado de la combinación de los factores provincia y década.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El apartado resultados se estructura en función de la doble escala de trabajo con la que se conciben los objetivos del TFM: escala de detalle, en la que se aportan resultados cartográficos referidos a 4 grandes incendios tipo distribuidos por diferentes ecosistemas forestales de Aragón, y análisis global, en el que se muestran resultados de carácter estadístico.

Por otra parte, en cuanto al estudio multicriterio se refiere existen obras como la de (Tehàs Puig y Castelló Vidal, 2009). Análisis multicriterio aplicado al estudio del riesgo de propagación de un incendio forestal, donde se realiza un análisis multicriterio para el cálculo de valores del riesgo de propagación de los incendios.

Tal y como se menciona más arriba, de los 202 incendios se han seleccionado cuatro incendios de grandes dimensiones distribuidos a lo largo del periodo analizado, y teniendo en cuenta la variedad de los ecosistemas forestales de Aragón. En este caso los cuatro incendios seleccionados se ubican principalmente en los municipios de Bailo (Huesca), Luna (Zaragoza), Villarluengo (Teruel) y en Zuera (Zaragoza). En este último caso, dada la importante ocurrencia del fuego en el sector de los Montes de Zuera / Campo de San Gregorio, se ha analizado conjuntamente todas las zonas quemadas desde 1979.

Los tres criterios principales en los que se basa el estudio para la realización de las cartografías de detalle finales quedan representados en los primeros 3 cuadrantes de la imagen siguiente (Figura 5).

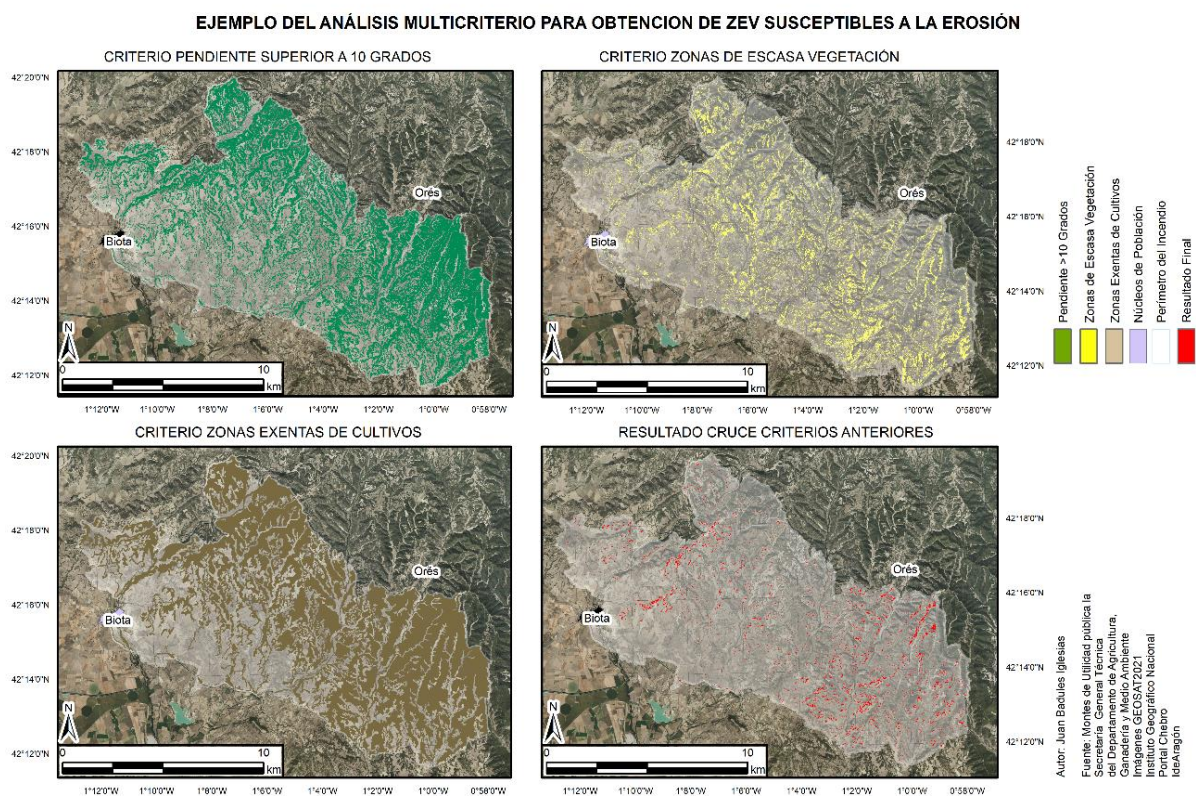


Figura 5. Variables consideradas en la cartografía final de ZEV-SE, correspondiente al incendio de Luna (2015).

4.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ZEV-SE EN ZONAS AFECTADAS POR INCENDIOS FORESTALES EN ARAGÓN

Como punto de partida para los análisis estadísticos, los datos correspondientes al incendio de Villarluengo (Teruel) del año 1982 se han eliminado de los cálculos, por presentar un valor muy elevado de 50,16% de ZEV-SE, no ateniéndose a los estándares puesto que el siguiente valor en la sucesión es de 32,36% presentando un “salto” excesivo.

Como valores estadísticos básicos se han considerado las variables de las ZEV-SE tanto en Hectáreas totales como en porcentajes de afección a los incendios obteniendo la tabla 3.

Estadístico	Ha ZEV Erosivas	% ZEV Erosivas
No. de observaciones	173	173
Mínimo	0	0
Máximo	4626,75	32,35660848
1° Cuartil	0,8125	0,438818565
Mediana	4,6875	1,304224553
3° Cuartil	24,25	4,456268706
Media	60,98771676	4,004173727

Tabla 3. recopilación de datos estadísticos cuantitativos referidos a las ZEV-SE en hectáreas y porcentaje. Elaboración propia.

El total de ambos valores, tanto las Hectáreas totales como el porcentaje del área total, representa 173 incendios, de las 3 provincias aragonesas y que abarcan desde el año 1982 al 2019, datos de los que hay registro.

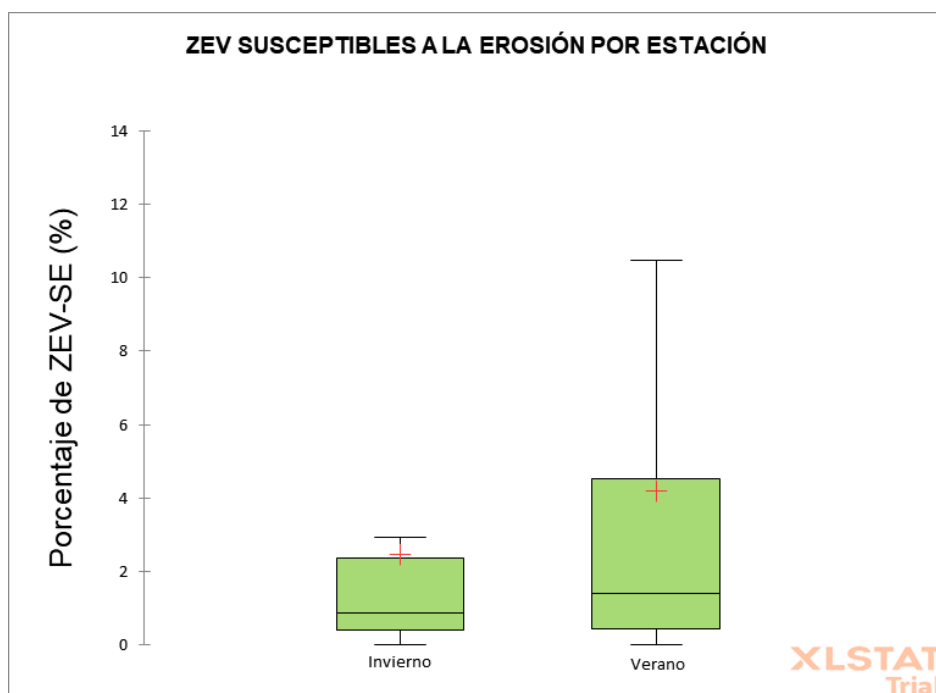


Figura 6. Distribución del porcentaje de ZEV-SE en zonas quemadas (n=173) agrupados por estación. Elaboración propia.

La figura 6 muestra un gráfico de cajas y bigotes (*box plot*) que recoge la distribución de los ZEV-SE en función de la estación en la que se produjeron los incendios (verano-invierno). Tal y como se aprecia fácilmente, en los incendios ocurridos durante el invierno la incidencia de las ZEV-SE es menor que en las superficies quemadas en verano.

Estadístico	Estación-Invierno	Estación-Verano
Mínimo	0,00	0,00
Máximo	13,78	32,36
1° Cuartil	0,41	0,44
Mediana	0,87	1,42
3° Cuartil	2,37	4,52
Media	2,48	4,19

Tabla 4. recopilación de datos estadísticos cuantitativos referidos a las ZEV susceptibles a la erosión según la estación en la que sucedieron (verano-invierno). Elaboración propia.

En términos generales, tanto en las superficies quemadas en invierno como en verano, los porcentajes son bajos (<2%) (Tabla 4), siendo ligeramente superiores en el caso de los incendios de verano, como se ha comentado más arriba. Sin embargo, llama la atención las diferencias en relación con la media, más elevada en los incendios de verano, debido a la incidencia en este parámetro de centralidad de los casos extremos. Estos últimos son más importantes en los incendios de verano, al encontrar incendios en los que la superficie con problemas de erosión es superior al 10% del área quemada. A pesar de ello, la mayoría en ambas estaciones pertenecen a incendios con escasa ZEV-SE. Sin embargo, se presentan incendios con muy alto valor en las ZEV-SE, que, aunque son escasos, son graves, puesto que la media es muy alta, muy desplazada de la mediana, en verano el valor máximo es muy elevado.

No obstante, al encontrarse la media rondando el tercer cuartil en ambos casos puede determinarse que este factor no comporta un papel estadísticamente significativo en la distribución de la magnitud de las ZEV-SE.

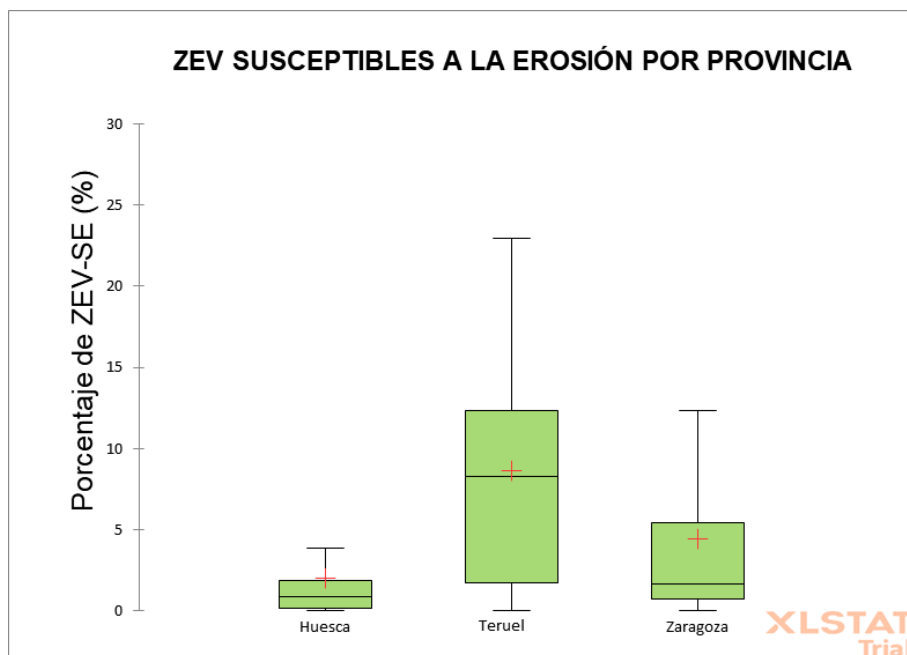


Figura 7. Distribución del porcentaje de ZEV-SE en zonas quemadas (n=173) agrupados por provincia. Elaboración propia.

Estadístico	PROV-Huesca	PROV-Teruel	PROV-Zaragoza
No. de observaciones	71,00	24,00	78,00
Mínimo	0,00	0,02	0,00
Máximo	19,85	32,36	31,63
1° Cuartil	0,14	1,72	0,73
Mediana	0,86	8,30	1,65
3° Cuartil	1,85	12,33	5,45
Media	1,98	8,64	4,42

Tabla 5. recopilación de datos estadísticos cuantitativos referidos a las ZEV susceptibles a la erosión en según la provincia a la que pertenecen. Elaboración propia.

Ahora se procede a estudiar la evolución por provincia. En la tabla 5, se aprecia que el porcentaje de ZEV-SE en la provincia de Teruel es mucho más alto que en Zaragoza y Huesca siendo el número total de incendios mucho menor que en estas dos provincias (Instituto Geográfico de Aragón, Gobierno de Aragón, 2009).

Podemos observar (Figura 7) que todos los incendios en general en la provincia de Teruel presentan altos ZEV-SE, ya que la media y mediana prácticamente coinciden y siendo ambos valores muy elevados, respecto a las otras provincias, que presentan muchos incendios con poca incidencia y algunos con más gravedad que marcan un valor máximo destacado como puede ser en el caso del grafico de Zaragoza.

Ante la gravedad de la situación, el Gobierno de Aragón debería reconsiderar el gasto de inversión en la reordenación del territorio para la gestión de los incendios en la provincia de Teruel, porque, aunque haya un número escaso de incendios estos son muy graves.

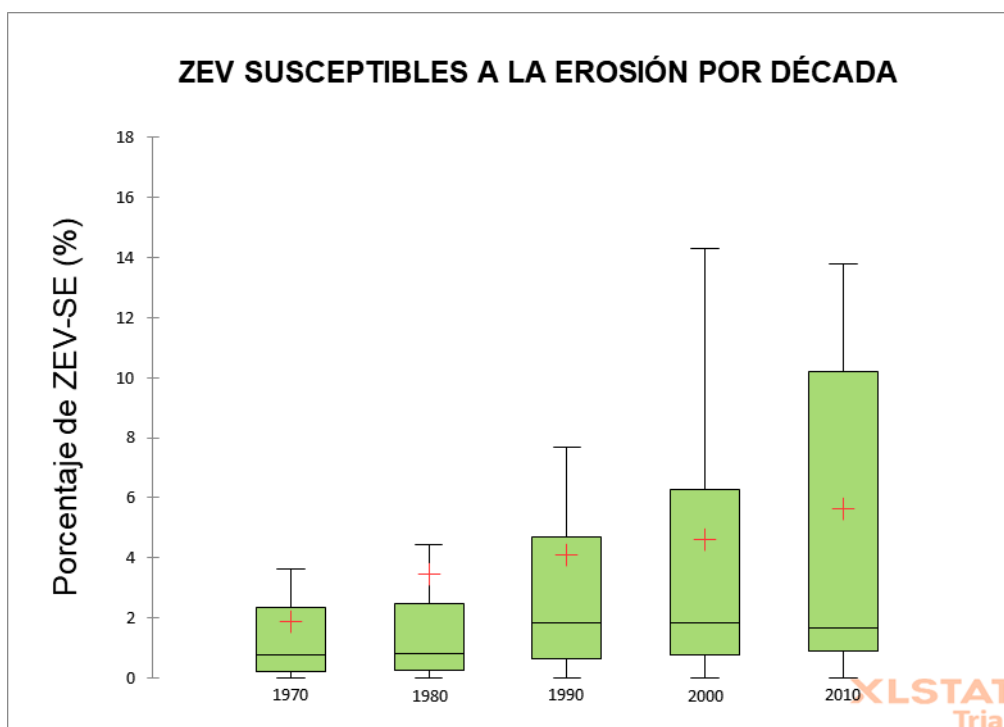


Figura 8. Distribución del porcentaje de ZEV-SE en zonas quemadas ($n=173$) agrupados por década. Elaboración propia.

Estadístico	DECADA-1970	DECADA-1980	DECADA-1990	DECADA-2000	DECADA-2010
No. de observaciones	18,00	55,00	38,00	37,00	25,00
Máximo	8,21	30,51	23,61	32,36	31,63
1° Cuartil	0,23	0,27	0,64	0,76	0,88
Mediana	0,76	0,80	1,84	1,85	1,65
3° Cuartil	2,33	2,48	4,70	6,27	10,19
Media	1,87	3,47	4,10	4,63	5,65

Tabla 6. recopilación de datos estadísticos cuantitativos referidos a las ZEV-SE según la década en las que se produjeron los incendios. Elaboración propia.

En cuanto a las ZEV-SE, vemos ahora por décadas (figura 8) cuál ha sido la evolución durante este periodo. Lo primero que se debe analizar es que en todas ellas hay pocos incendios con muchas ZEV-SE frente al total de ellos, esto puede verse por la diferencia entre el valor de la mediana y la media, al ser la media muy superior a la mediana. Cabe resaltar que en la década de 1980 existen incendios con ZEV-SE muy grandes que alteran el valor de la media en la lectura, presentándola por encima del Q3.

A lo largo de las décadas se ve un crecimiento de la severidad de los incendios (Tabla 6), al presentarse cada vez ZEV-SE mayores. En el gráfico, esto queda representado con un incremento de valores entre la mediana y Q3, por lo tanto, la media va creciendo a lo largo de las décadas.

	MEDIA % ZEV SUSCEPTIBLES A LA EROSIÓN POR POLIGONO
Teruel década 2000	10,298
Teruel década 1990	8,980
Teruel década 1980	7,444
Zaragoza década 2010	6,806
Teruel década 2010	5,930
Zaragoza década 1990	5,100
Zaragoza década 1980	3,992
Huesca década 2010	3,788
Zaragoza década 2000	3,477
Zaragoza década 1970	2,462
Huesca década 1990	2,127
Huesca década 2000	1,775
Huesca década 1980	1,599
Huesca década 1970	1,119

Tabla 7. Tabla con escala cromática donde se muestran los % de ZEV -SE según provincia y década.

Con esta Tabla 7 se puede observar que los incendios que presentan ZEV erosivas mayores pertenecen a la provincia de Teruel, frente a las de Huesca y Zaragoza.

Se observa asimismo que a lo largo del tiempo se han ido incrementando estas zonas en todas las provincias, siendo más relevante en la provincia de Teruel, con esto se justifican los estudios y gráficos anteriormente mostrados.

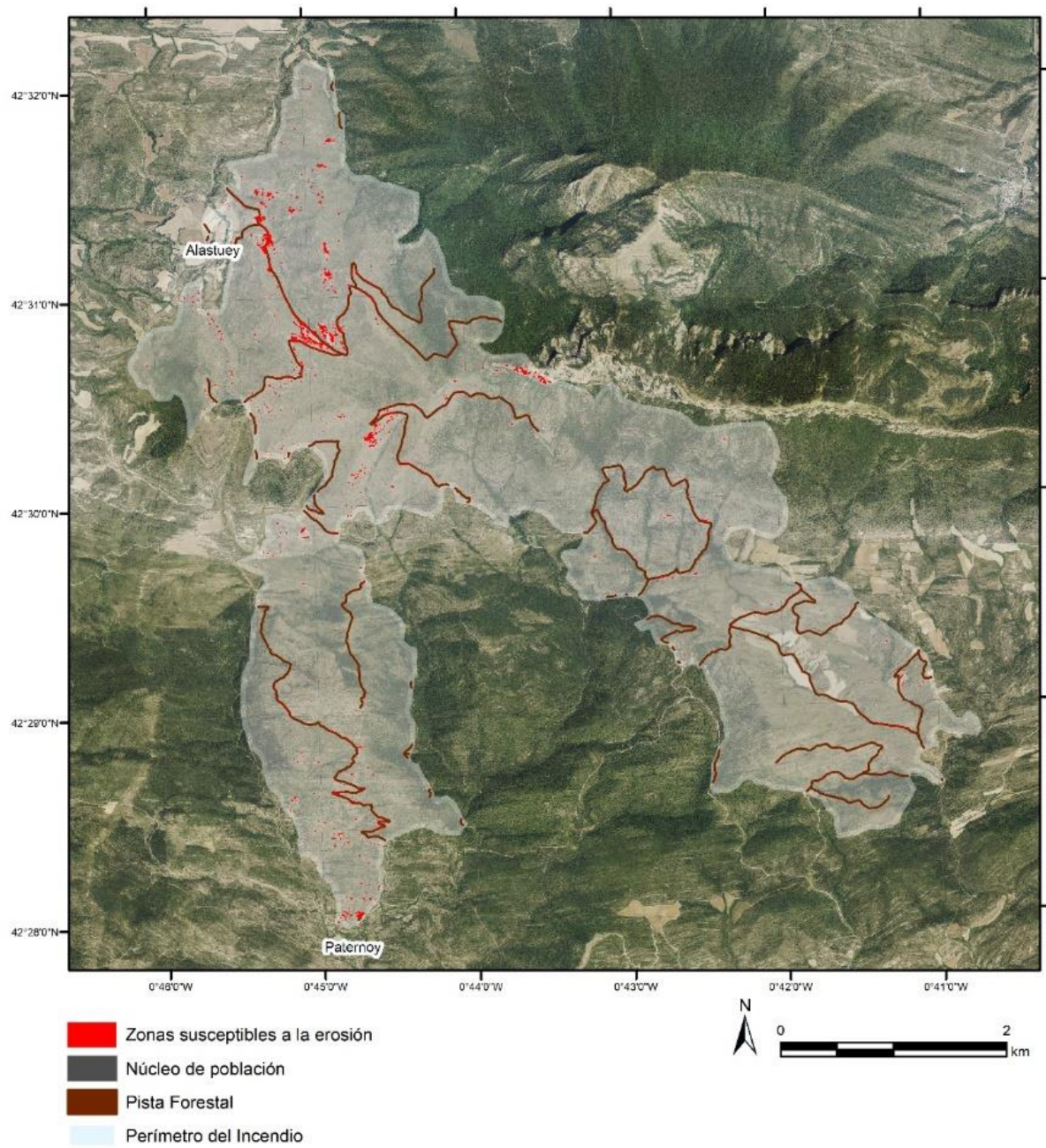
4.2 RESULTADOS CARTOGRÁFICOS

En las siguientes páginas se exponen los resultados cartográficos de la delimitación de los perímetros de los cuatro incendios analizados al detalle, obtenidos a partir de combinación del resultado de un proceso digital de clasificación supervisada, base de este estudio, la cual ha permitido una delimitación precisa de las ZEV y un posterior análisis multicriterio.

4.2.1 INCENDIO DE SAN JUAN DE LA PEÑA (BAILO (1994))

En este mapa (Figura 9), pueden verse en color rojo las ZEV-SE correspondientes al incendio de San Juan de la Peña (1994). Este incendio se originó en la localidad de Paternoy en el verano de 1994, llevando una dirección sur-norte hasta la generación del ramal derecho con dirección SE, afectó a una superficie total de 1813 hectáreas.

ZEV SUSCEPTIBLES DE EROSIÓN EN EL INCENDIO DEL ENTORNO DE BAILO



Autor: Juan Badules Iglesias

Fuente: Montes de Utilidad pública la Secretaría General Técnica del Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente Instituto Geográfico Nacional Imágenes GEOSAT2021 Portal Chebro IdeAragón

Figura 9. Distribución espacial de las pistas forestales y de las ZEV-SE correspondientes al Incendio de San Juan de la Peña (Bailo).

Las ZEV-SE quedan especialmente representadas en las laderas de umbría, aspecto este último que llama la atención por la mayor capacidad estructural de regeneración que detentan las formaciones vegetales situadas en este contexto topomorfológico de este incendio, de todas las ZEV-SE un 49.45% se localizan en zonas convexas mientras que un 50.55% lo hacen en zonas cóncavas. En el análisis de la ecología del paisaje existen un total de 1046 “parches”, que presentan una talla media de 0.016 has el dato más pequeño de los 4 incendios presentados en detalle; la relación de incremento entre el número de parches y la media del tamaño de los parches es muy inferior al resto también (65.284), lo que indica una muy poca fragmentación del territorio. A su vez el AWMSI presenta un valor de 1.94, valor similar al del incendio de Luna, lo que indica que todos los parches tienen un peso similar aproximado.

Sin embargo, en los años posteriores al incendio, en esta zona se llevaron a cabo tareas de extracción de madera y reforestación forestal que pudieron tener un impacto negativo y de carácter puntual en la degradación del suelo. A su vez, estas zonas, se desarrollan en pequeños “parches”, con características que se presentaran en el apartado 4.2.5., muchos de los cuales aparecen espacialmente vinculados al trazado de las pistas forestales. Las ZEV-SE abarcan 34,56 hectáreas que suponen un 1,92% del área quemada.

Esta escasa entidad de las ZEV-SE puede estar relacionado con la efectividad en la regeneración del bosque, puesto que es un incendio de 1994, con una antigüedad suficiente como para que los trabajos de reforestación dieran sus frutos, dato que queda reflejado en su cartografía.

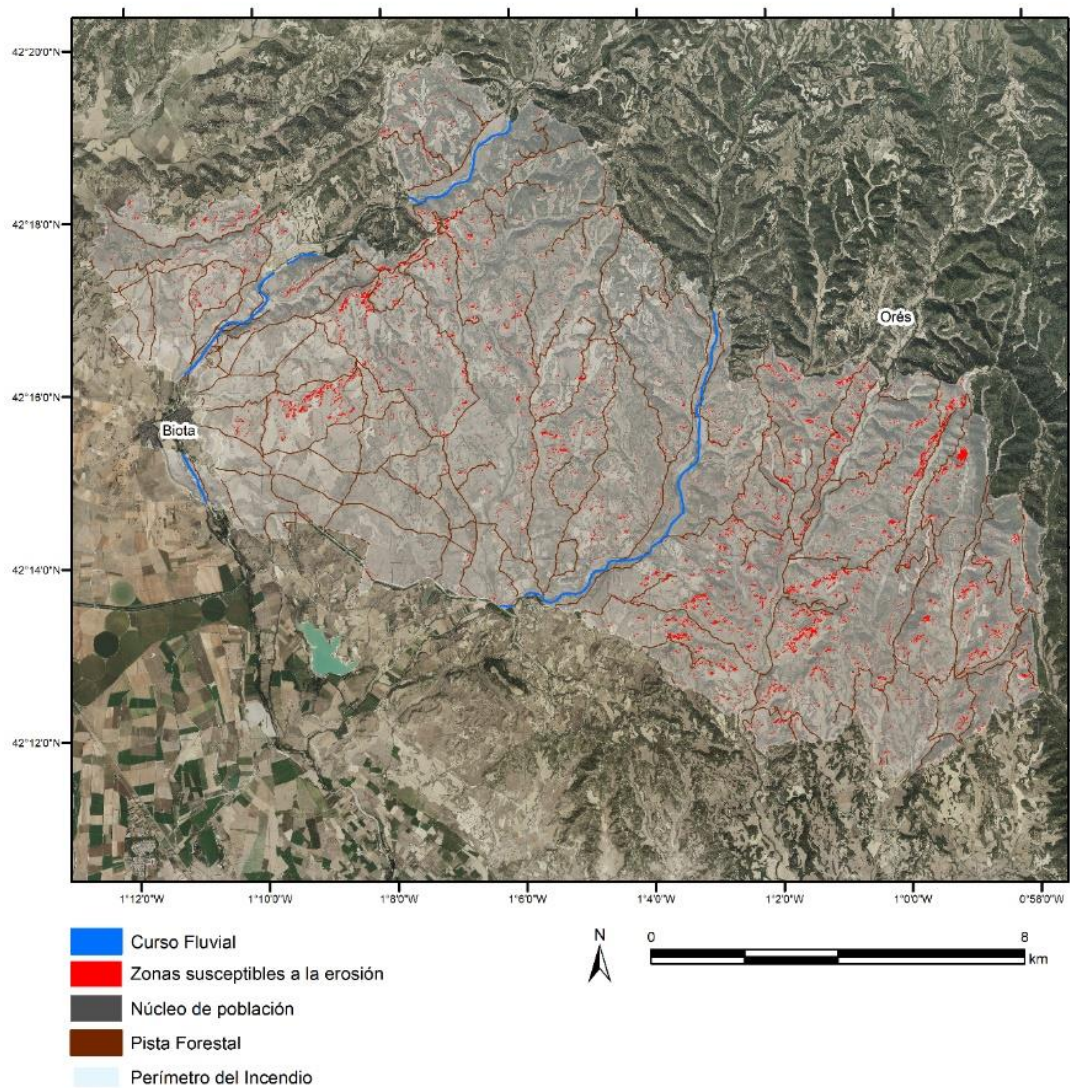
4.2.2 INCENDIO DE LUNA (ORÉS, ASÍN, EJEA DE LOS CABALLEROS, BIOTA) (2015)

El día 4 de julio de 2015 a las 16:34 horas se origina en el término municipal de Luna, provincia de Zaragoza, un incendio forestal que se extendió por los municipios de Orés, Asín, Uncastillo, Ejea de los Caballeros y Biota, afectando a un total de 13.889 hectáreas.

El punto de inicio del presente incendio se localiza en un val de cultivo, mosaico agroforestal de cereal y masa forestal de origen natural de pino carrasco. La causa del

mismo se atribuye a una negligencia producida por los motores y máquinas de una herramienta propia para la agricultura, concretamente, por el de una cosechadora. Fue detectado por los trabajadores de la torre de Vigilancia ubicada en la zona alta de Puy-Sevilla (Luna).

ZEV SUSCEPTIBLES DE EROSIÓN EN EL INCENDIO DEL ENTORNO DE LUNA



Autor: Juan Badules Iglesias

Fuente: Montes de Utilidad pública la Secretaría General Técnica del Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente Instituto Geográfico Nacional Imágenes GEOSAT2021 Portal Chebro IdeAragón

Figura 10. Cartografía correspondiente a la zona del municipio de Luna.

Este incendio de 2015 (Figura 10) originado viene a ratificar la problemática creciente de los grandes incendios forestales, no tanto en el contexto medioambiental dada la alta resiliencia del ecosistema tras el paso del fuego, sino en políticas de gestión de emergencia; autoprotección, organización de los recursos y minimización de los daños.

A continuación, se presentan los datos aportados por el Gobierno de Aragón en el *informe del incendio de Luna* referidos a los daños medioambientales (Gobierno de Aragón, 2015).

Los daños medioambientales producidos por el incendio, objeto de un plan de recuperación, pueden resumirse en:

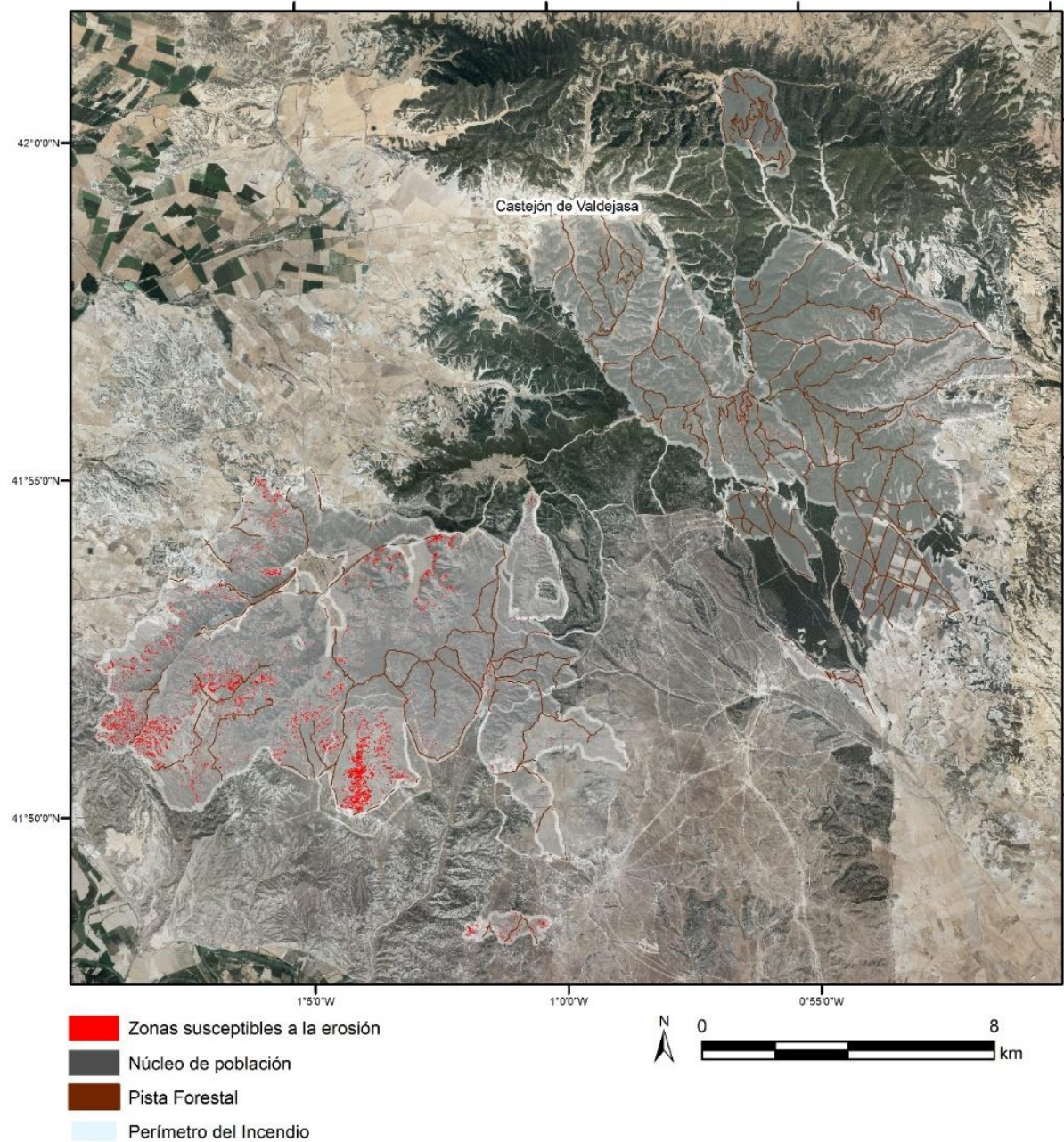
Destrucción de la flora, fauna y de sus hábitats; pérdidas de suelo, con el consiguiente riesgo de erosión y desertificación; daños en la calidad de las aguas por los aportes de cenizas y sedimentos a los cursos fluviales; emisiones a la atmósfera de CO₂ y consiguiente contribución al cambio climático; pérdida de paisaje; pérdidas de aprovechamientos forestales; y daños en infraestructuras viarias, debido a una menor protección del suelo por parte de la cubierta vegetal, lo que origina mayores escorrentías y aparición de regueros. Todos ellos son de difícil cuantificación económica, pero tienen importantes repercusiones en la planificación de las actuaciones de restauración.

En este caso, mediante la cartografía puede observarse que las ZEV-SE también están ligadas a las pistas forestales, concretamente se agrupan en trazas SW-NE cerca de la localidad de Biota al Oeste y de Orés en la parte más al este del mismo. Estas ZEV erosivas abarcan 536,69 hectáreas totales, lo que supone un 4,49% del total. En el contexto topo-geomorfológico de este incendio, de todas las ZEV-SE un 61.17% se localizan en zonas convexas mientras que un 38.83% lo hacen en zonas cóncavas. En el análisis de la ecología del paisaje existen un total de 14.667 “parches”, que presentan una talla media de 0.026 has, dato muy similar al del incendio de Zuera; la relación de incremento entre el número de parches y la media del tamaño de los parches muy similar al incendio de Zuera (561.099), lo que indica una fragmentación media del territorio. A su vez el AWMSI presenta un valor de 1.88, valor similar al del incendio de Bailo, lo que indica que todos los parches tienen un peso similar aproximado.

4.2.3 INCENDIOS DE ZUERA (1979-2009)

En esta cartografía (Figura 11) se abarcan dos agrupaciones de incendios en uno: los correspondientes al municipio de Zuera, al este y los de San Gregorio (Zaragoza), al oeste. Puede observarse que en la parte de Zuera hay muy pocas ZEV-SE y esto se debe a que el incendio es muy antiguo y ha habido tiempo de una regeneración del ecosistema reduciendo así de manera natural en gran medida las zonas erosionables. El incendio de la parte oeste, correspondiente al incendio de San Gregorio queda marcado por intensas agrupaciones de zonas erosivas al S-SW, esto se debe principalmente a la causa de generación del incendio, originado por el desarrollo de ejercicios militares dentro del campo de maniobras. Que haya más ZEV-SE también se debe a que es un incendio más moderno.

ZEV SUSCEPTIBLES DE EROSIÓN EN EL INCENDIO DEL ENTORNO DE ZUERA Y SAN GREGORIO



Autor: Juan Badules Iglesias

Fuente: Montes de Utilidad pública la Secretaría General Técnica del Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente
Instituto Geográfico Nacional
Imágenes GEOSAT2021
Portal Chebro
IdeAragón

Figura 11. Cartografía correspondiente a la zona del municipio de Zuera.

Así pues, en esta cartografía pueden darse dos casos que están bastante próximos espacialmente pero que presentan características independientes.

Los datos en hectáreas de ZEV-SE en estos casos son de 435 hectáreas en San Gregorio y 23,38 hectáreas en Zuera, lo que equivale a un 6,27% y un 0,73% del total de superficie del incendio respectivamente. En el contexto topo-geomorfológico de este incendio, de todas las ZEV-SE un 56.36% se localizan en zonas convexas mientras que un 43.64% lo hacen en zonas cóncavas. En el análisis de la ecología del paisaje existen un total de 12.305 “parches”, que presentan una talla media de 0,024 has, dato muy similar al del incendio de Luna; la relación de incremento entre el número de parches y la media del tamaño de los parches un muy similar al incendio de Luna (508.657), lo que indica una fragmentación moderada del territorio. A su vez el AWMSI es más elevado que en los incendios de Bailo o Luna, con un valor de 2.49, los parches grandes tienen un peso ligeramente superior que los pequeños.

4.2.4 INCENDIO DE VILLARLUENGO (1994)

En 1994 tuvo lugar un gran incendio en el municipio de Villarluengo originado por un rayo. Este incendio de tipo convectivo que sucedió en verano afectó un total de 29162 hectáreas. Las ZEV-SE tienen una superficie de 4626 hectáreas, lo que supone un 15,96% del total. En el contexto topo-geomorfológico de este incendio, de todas las ZEV-SE un 55.33% se localizan en zonas convexas mientras que un 44.67% lo hacen en zonas cóncavas. En el análisis de la ecología del paisaje existen un total de 63.974 “parches”, que presentan una talla media de 0,05 has, dato muy superior al del resto de incendios; la relación de incremento entre el número de parches y la media del tamaño de los parches mucho más elevada que el resto (1.146.905), lo que indica una alta fragmentación del territorio. A su vez el AWMSI es el más elevado de todos con un valor de 2.49, lo que indica que los parches mayores tienen mayor peso que los pequeños. La Figura 12 representa la cartografía del incendio más grave que mucha gente recuerda en la Comunidad Autónoma de Aragón, presenta un claro predominio de las ZEV-SE hacia la parte oeste del mismo. Es sin duda el más afectado de los 4 cartografiados en detalle.

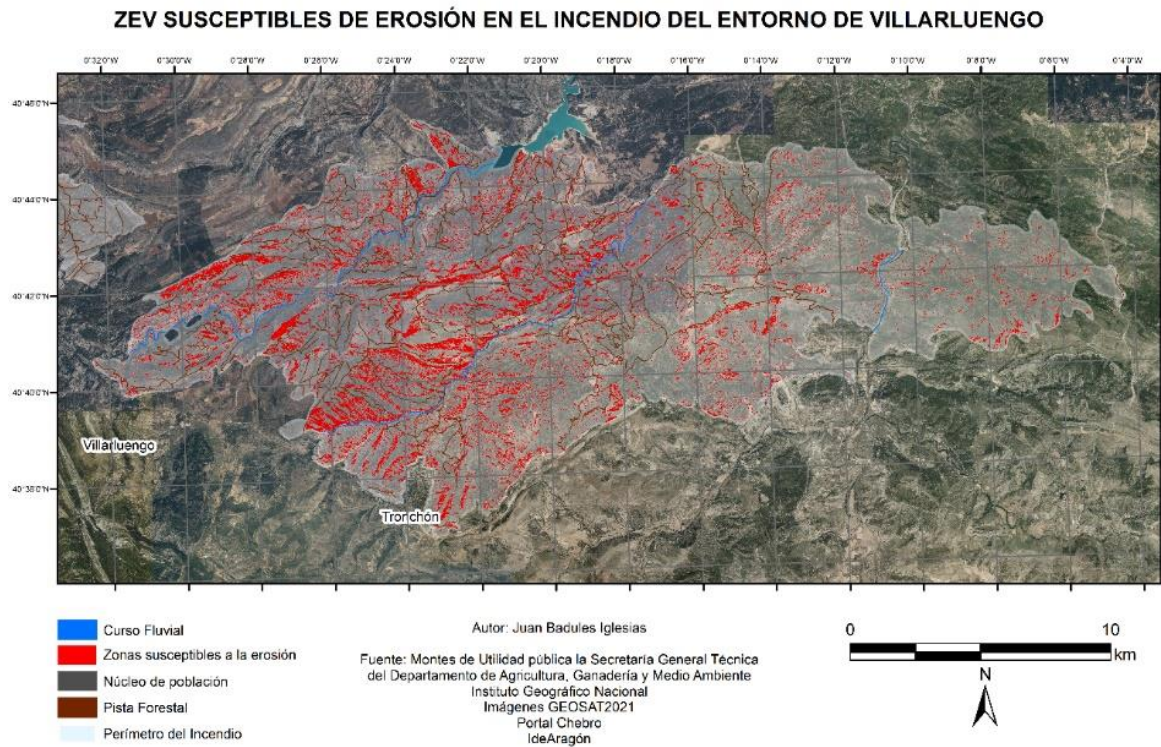


Figura 12. Cartografía correspondiente a la zona del municipio de Villarluengo.

Las actuaciones hidrológico forestal no tuvieron éxito o no fue el esperado puesto que como puede derivarse de la cartografía respecto al incendio de Bailo, se observa una clara predominancia de las ZEV susceptibles a la erosión actualmente, siendo un incendio que data de 1994 y podría considerarse como antiguo, con suficiente tiempo posterior para poder regenerarse.

4.2.5 INTERPRETACIÓN ECOLOGIA DEL PAISAJE

Para valorar la disposición de las ZEV-SE en los incendios a través de la ecología del paisaje se han seleccionado un conjunto de métricas de análisis espacial, de entre una cantidad muy elevada (O'Neill *et al.* 1988). Las métricas seleccionadas aportarán información acerca de la fragmentación, forma/compacidad y aislamiento o dispersión.

	OPTIONS	PATCH DENSITY AND SIZE METRICS			SHAPE METRICS	
METRICS	TOTAL LANDSCAPE AREA	NUMBER OF PATCHES	MEAN PATCH SIZE	NumP/MPS Growth	MEAN SHAPE INDEX	AREA WEIGHTED MEAN SHAPE IND
Name	TLA	NumP	MPS	NumP/MPS	MSI	AWMSI
BAILO	1.808,222	1046	0,0160	65.284,58	1,3399	1,9430
LUNA	15.249,167	14667	0,0261	561.099,87	1,3550	1,8873
VILLARLUENGO	29.031,397	63974	0,0558	1.146.905,59	1,3752	5,0769
ZUERA	15.950,246	12305	0,0242	508.657,98	1,3332	2,4961

Tabla 8. Recopilación de las métricas descritas por cada uno de los 4 incendios cartografiados al detalle. Elaboración propia.

Según las métricas recopiladas en la tabla 8, tanto el número de parches (*NumP*) como su talla media (*MPS*) presentan los valores máximos en el incendio de Villarluengo, observando así que este incendio tiene una alta fragmentación puesto que aumentan respectivamente el *NumP* y el *MPS*. El *MPS* de Villarluengo tan elevado respecto a los demás indica que la talla media de las teselas es superior. A este gran incendio les sigue los de Luna y Zuera/San Gregorio presentando unos valores intermedios respecto al valor más inferior, correspondiente al incendio de Bailo, estos valores concuerdan con lo observado en las cartografías.

El índice de forma medio, MSI, presenta en todos ellos valores muy similares, por lo que se puede inferir que las formas de los parches son muy similares en todos ellos. No ocurre lo mismo con el AWMSI, que sigue de nuevo destacando el valor de Villarluengo, donde las teselas de mayor tamaño tienen un peso superior que las de menor tamaño, mientras que en el resto presentan un ligero equilibrio, oscilando los valores entre 1,9 y 2,5.

4.2.6 DIRECTRICES DE ACTUACIÓN EN ZONAS PRIORIZADAS

A la vista de los resultados cartográficos y estadísticos obtenidos pueden proponerse diversas líneas de actuación. Según los datos que se aportan acerca las áreas afectadas por los incendios de la comunidad de Teruel (véase ejemplo de Villarluengo) deberían ser objeto prioritario de actuaciones forestales, mediante restauración activa. Estos incendios no son los más numerosos, pero sí los más afectados, razón aún mayor para tener prioridad en procesos de restauración activa como siembra y plantación, puesto que la regeneración natural no está garantizada.

Por otra parte, los incendios de Huesca, como en el ejemplo de Bailo, no presentan porcentajes muy elevados de ZEV-SE, por lo que, en este caso, podría optarse por el uso de medidas de restauración pasivas, que, en definitiva, consisten en proteger el área afectada y dejar que el paso del tiempo afecte positivamente en la naturaleza.

Finalmente, los incendios que afectan a la provincia de Zaragoza, al presentar valores intermedios de porcentajes de ZEV-ES, se pueden proponer como zonas de actuación en los que debe realizarse modelos de restauración asistida, que pueden abarcar medidas como podas, clareos y rozas, puesto que la vegetación en estas zonas suele ser más arbustiva.

5. CONCLUSIONES

- I. La magnitud de las ZEV-SE afectan de media a un 4% del área total de cada incendio o a un total de 61 hectáreas de media. Sin embargo, existen valores más elevados, entre los que destaca un máximo de 32% o un total de 4.626 ha.
- II. Los factores que controlan dicha magnitud son los relativos al tiempo (los incendios más modernos presentan valores de ZEV-ES superiores) y la ubicación de los mismos (los incendios situados en la provincia de Teruel son los más afectados), pero existe una gran variabilidad, lo que nos permite detectar los incendios en los que se debe actuar de manera más urgente porque la regeneración natural no ha podido recuperar estas zonas o porque, tras el fuego, se han debido producir procesos de degradación edáfica que han eliminado la capacidad de regeneración vegetal). Se aprecia que, en algunos incendios analizados a escala de detalle, existe un cierto control de la distribución de las ZEV por la red de pistas forestales de una manera visual cualitativa aproximada.
- III. Las cuatro cartografías de los incendios analizados al detalle se han podido representar gracias al proceso digital de clasificación supervisada, base de este estudio, la cual ha permitido una delimitación precisa de las ZEV, basándonos en la alta resolución espacial y espectral de las imágenes GeoSat-2.
- IV. La caracterización de la morfología topográfica de las zonas de escasa vegetación susceptibles a la erosión puede facilitar la identificación de zonas en las que predominan procesos de acumulación o emisión de sedimentos.

- V. El uso de imágenes GeoSat-2, gracias a su resolución espectral (VIS-NIR) y alta resolución espacial (4 m), presenta un alto potencial para la discriminación espacial de superficies con riesgo de erosión, utilizando sistemas supervisados de clasificación digital. La contribución de la banda de infrarrojo cercano (NIR), dota a este producto de una mayor capacidad para la identificación de la vegetación en relación a otros productos de semejante resolución espacial (*e.g.* orto-fotografías del PNOA). Sin embargo, la variabilidad en las condiciones de iluminación debido a la secuencia de las pasadas del satélite a lo largo de 2021, constituye un problema a la hora de trabajar con todas las imágenes conjuntamente.
- VI. Para dar una mayor fiabilidad a los datos podrían aplicarse mejoras como por ejemplo, cuantificación en campañas de campo de la intensidad de los procesos erosivos; integración de procesos de corrección sobre las imágenes GeoSat-2 a nivel atmosférico y topográfico; integración de las imágenes de la cobertura correspondiente a 2022 para darle más consistencia al análisis; integración de índices de vegetación y otros neocanales; integración de variables relacionadas con la litología.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alloza, J., García, S., Gimeno, T., Baeza, M., & Vallejo, V. (2014). *Guía técnica para la gestión de montes quemados*. Madrid: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente.
- Allué Andrade, J. (1990). *Atlas Fitoclimático de España*.
- Aronson, J., Floret, C., Le Floch, E., Ovalle, C., & Pontanier, R. (1993). Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semiarid lands. (R. Ecol., Ed.) *A view from the south., 1*, 8-17.
- Badía, D., & Úbeda, X. (2013). Consecuencias hidrológicas y erosivas de un incendio forestal. *FuegoRed, 5 Efectos del fuego en el suelo*, 1-4.
- Bodí, M. B., Cerdá, A., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles(58)*, 33-55.
- Botella-Martínez, M., & Fernández-Manso, A. (2017). Estudio de la severidad post-incendio en la Comunidad Valenciana comparando los índices Δ NBR, $R\Delta$ NBR y RBR a partir de imágenes Landsat 8. *Revista de Teledetección, 49*, 33-47.
- Caon, L., Vallejo, V., Ritsema, Z., & Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews, 139*, 47-58.
- Castillo, M., Pedernera, P., & Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo, 19 (3)*, 44-53.
- Castro, J., Leverkus, A., & Guzmán-Álvarez, J. (2015). Técnicas blandas para la restauración de zonas quemadas en ambientes mediterráneos. (H. A. MA, Ed.) *Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España(56)*, 595-604.
- Cerdà, A., & Doerr, S. (2008). The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *catena, 74*, 256-263.
- Consejo Superior Geográfico, Comisión Especializada del Plan Cartográfico Nacional. (s.f.). *Plan Cartográfico Nacional 2021-2024*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- Corona, P., Koehl, M., & Marchetti, M. (2003). Advances in forest inventory for sustainable forest management and biodiversity monitoring. .
- Costa i Mercadal, J., Ramírez Merino, J., & Navarro Juli, J. (1998). Mapa Geológico de España, LANAJA. En I. T. España (Ed.).

- De Cos Guerra, O., & Reques Velasco, P. (2019). Vulnerabilidad territorial y demográfica en España. Posibilidades del análisis multicriterio y la lógica difusa para la definición de patrones espaciales. *Journal of Regional Research. Investigaciones regionales*.
- De las Heras Ibáñez, J. (2015). ¿Qué hacer después del fuego? Principales retos y algunas respuestas. (C. y. Español, Ed.) *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 39, 213-235.
- Domingo Delgado, J., Ramón Arévalo, J., & Fernández-Palacios, J. (2001). *Fragmentación de los ecosistemas forestales*.
- Forman, R., & Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*. New York: John Wiley and Sons Ltd. .
- Forman, T., & Alexander, E. (1998). Roads and Ther Major Ecological Effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 207-231.
- Fowler, J., Cohen, L., & Jarvis, P. (1998). Practical statistics for field biology. (U. K. 2nd edition. Wiley. England, Ed.) 259 .
- Geosat. (2021). Imagery User Guide. (G. E. Geosat, Ed.)
- Gobierno de Aragón. (2015). Informe del Incendio de Luna 04/07/2015. (D. d. Sostenibilidad, Ed.) 1-19.
- Gómez, M., & Barredo, J. (2005). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. (S. e. Ra-Ma., Ed.)
- Gómez-Sánchez, M., Lucas-Borja, M., Plaza-Álvarez, P., González-Romero, J., Sagra, J., Moya, D., & De las Heras, J. (2018). Efecto de los trabajos de restauración forestal en ladera después de incendio sobre la funcionalidad suelo y sobre la recuperación de la vegetación. *IV reunión del grupo de hidrología de la sociedad española de ciencias forestales*, 1-12.
- Instituto Geográfico de Aragón, Gobierno de Aragón. (2009). *Atlas de Aragón*. Obtenido de <https://idearagon.aragon.es/atlas/Aragon/info/medio-natural/medio-fisico/geomorfologia>
- Instituto Geográfico Nacional. (2021). Cobertura Nacional VHR 2021-22–Documento explicativo de la cobertura en España con productos GeoSAT-2.
- Izquierdo Llavall, E., Casas Sainz, A., & Gil Peña, I. (2013). Estructura de las Sierras Interiores en la zonas Surpirenaica (valles del Aragón y del Osia, Pirineos Centrales). Implicaciones en la cronología de la deformación. *Geogaceta*.
- Junta de Andalucía. (s.f.). La restauración de las áreas incendiadas. En *Plan INFOCA, Plan de Emergencia por Incendios Forestales de Andalucía* (Vol. XVII, págs. 306-317).

- Lamb, D., & Guilmour, D. (2003). *Rehabilitation and restoration of degraded forests*. (S. a. IUCN. Gland, Ed.)
- López Martín, F., Cabrera Millet, M., & Cuadrat Prats, J. (2007). *Atlas climático de Aragón*. (D. G. Aragón, Ed.)
- Martínez de Azagra Paredes, A. (2010). La desertificación: el otro cambio climático. (ETSIIAA, Ed.) *Foresta*, 46-51.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. (2011). Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science reviews*, 109(1), 44-60.
- McGarigal, K., & Marks, B. (1995). Spatial pattern analysis program for Quantifying Landscape Structure. *USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-351*.
- Miller, J., & Yool, S. (2002). Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 481-496.
- Molero Mesa, J. (2010). Escenarios fitocenológicos de observación para el seguimiento del cambio climático en Sierra Nevada.
- Moreira, F., & Vallejo, R. (2009). What to do after fire? Post fire restoration. (Joensuu, Ed.) *In: Y. Birot (ed.), living with wildfires: what science can tell us., Discussion Paper 15*.
- Moreira, F., Arianoutsou, M., Vallejo, R., de las Heras, J., Corona, P., Xanthopoulos, G., . . . Papageorgiou, K. (2012). Setting the scene for post-fire management. (S. Dordrecht, Ed.) *Post-fire management and restoration of southern European forests*, 1-19.
- Napper, C. (2006). BAER-Burned Area Emergency Response Treatments Catalog. . (U. F. Service, Ed.) *Watershed, Soil, Air Management, 0625 1801-STDTC*.
- O'Neill, R., Krummel, J., Gardner, R., Sugihara, G., Jackson, B., Deangelis, D., . . . Graham, R. (1988). Indices of landscape pattern. *Landscape ecology*, 1(3), 153-162.
- Peña, J., & Lozano, M. (2004). Las unidades del relieve Aragonés. *Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*.
- Pérez Cabello, F., Ibarra, P., Echeverría, M., & De la Riva, J. (2011). Apuntes sobre los efectos de los incendios forestales y restauración ambiental de áreas quemadas. Estado de la cuestión y principios generales. *Geographicalia*, 59-60, 295-308.
- Posada, E. (2004). Conceptos Básicos de Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales. (I. G. Codazzi, Ed.)

- Robichaud, P., Lewis, S., & Ashmun, L. (2008). *New procedure for sampling infiltration to assess post-fire soil water repellency*. USA: US department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Rosas, P., Sanz, E., & Menéndez-Pidal, I. (2016). Hidrogeología del Karst de Pico Frentes. *Estudios Geológicos*, 1-21.
- Shakesby, R. (2011). Post-Wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105(3), 71-100.
- Simón Gómez, J., Martínez Gil, J., Soriano Jiménez, M., Arlegui Crespo, L., & Caballero Burbano, J. (1998). *Estudio de riesgos naturales en los terrenos de la orla sudoeste de suelo urbanizable*. Zaragoza.
- Soler-Sampere, M., & Cayo Puigdefábregas, T. (1970). Líneas generales de la geología del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 5-20.
- Telhà Puig, A., & Castelló Vidal, J. (2009). Análisis multicriterio aplicado al estudio del riesgo de propagación de un. (S.-J. d. León, Ed.) *Montes y sociedad: Saber qué hacer.*, 2/15.
- Varela, M., & Benito, E. (2013). Repelencia al agua en suelos afectados por el fuego. (FuegoRed, Ed.) *Efectos del fuego en el suelo*, 1-6.
- Vázquez de la Cueva, A. (2016). Incendios forestales en la España peninsular (1974-2010) : análisis temporal espacial desde una perspectiva ecológica. (I. -I. Alimentaria, Ed.) *Monografías INIA. Serie forestal*, 29, 204.
- Viedma, O., & Chuvieco, E. (1994). Cartografía y evaluación de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección. *ATTIM Boletín de Información Técnica*, 167, 60-66.
- Wittenberg, L., & Inbar, M. (2009). The role of fire disturbance on runoff and erosion processes. A long-term approach, Mt. Carmel Case study, Israel. *Geographical Research*, 47, 46-56.
- Zavala, L., De Celis, R., & Jordán, A. (2014). How wildfires affect soil properties. A brief review. *Cuadernos de Investigación Geográfica*(40 (2)), 311-331.