

Universitat Politècnica de València

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

Desarrollo de criterios para el diagnóstico de las medidas
de emergencia post incendio en proyectos de restauración
forestal

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor:

Francisco Javier de la Poza García

Tutores:

Antonio D. del Campo García

Javier Pérez Romero

Manuel Esteban Lucas Borja

Valencia, 26 de julio de 2021



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

Anexo
Ficha resumen del Trabajo de
Fin de Grado

Datos personales

Nombre y apellidos: Francisco Javier de la Poza García

Datos del trabajo de fin de grado

Título del TFG:	Desarrollo de criterios para el diagnóstico de las medidas de emergencia post incendio en proyectos de restauración forestal
Titulación:	Ingeniero Técnico Forestal y del Medio Natural
Codirector/a:	Antonio D. del Campo García (UPV – Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente)
Codirector/a:	Manuel Esteban Lucas Borja (UCLM - E.T.S. Ingenieros Agrónomos y Montes de Albacete)

Resumen

El presente trabajo se plantea en el seno de la Red Silvadapt.net con el fin de identificar las medidas de restauración post incendio más eficaces, dentro de un contexto nacional, para regular la escorrentía superficial e incentivar el crecimiento y/o rebrote de la vegetación, debido a que no existe información técnica accesible para una correcta elección de estas obras de emergencia, ni tampoco una metodología e indicadores para su evaluación.

El objetivo es elaborar criterios para el diagnóstico de ejecución y localización de obras de emergencia post incendio en un contexto de monte, además de consolidar indicadores específicos para la evaluación y monitorización de la eficacia de estas medidas.

La metodología empleada es el uso de satélite para evaluar la evolución de la cobertura vegetal, en zonas tratadas y en zonas aledañas que sirvan de control, según intensidad del fuego, zona, clima, pendiente, suelo, material geológico, etc.

Los resultados proporcionan criterios para el diagnóstico de ejecución de obras post incendio según la muestra de incendios forestales de los últimos años en distintas zonas de España, donde se han hecho fajinas y otras medidas de emergencia.

Palabras clave

post incendio, restauración forestal, cobertura vegetal, satélite, medidas de emergencia

Resum

El present treball es planteja en el si de la Xarxa Silvadapt.net amb la finalitat d'identificar les mesures de restauració post incendie més eficaços, dins d'un context nacional, per a regular l'escolament superficial i incentivar el creixement i/o rebrot de la vegetació, pel fet que no existeix informació tècnica accessible per a una correcta elecció d'aquestes obres d'emergència, ni tampoc una metodologia i indicadors per a la seua avaluació.

L'objectiu és elaborar criteris per al diagnòstic d'execució i localització d'obres d'emergència post incendie en un context de muntanya, a més de consolidar indicadors específics per a l'avaluació i monitoratge de l'eficàcia d'aquestes mesures.

La metodologia emprada és l'ús de satèl·lit per a avaluar l'evolució de la cobertura vegetal, en zones tractades i en zones limítrofes que servisquen de control, segons intensitat del foc, zona, clima, pendent, sòl, material geològic, etc.

Els resultats proporcionen criteris per al diagnòstic d'execució d'obres post incendie segons la mostra d'incendis forestals dels últims anys en diferents zones d'Espanya, on s'han fet fajinas i altres mesures d'emergència.

Paraules clau

post incendie, restauració forestal, cobertura vegetal, satèl·lit, mesures d'emergència

Abstract

This work is proposed within the Silvadapt.net Network in order to identify the most effective post-fire restoration measures, within a national context, to regulate surface runoff and encourage the growth and/or regrowth of vegetation, since there is no accessible technical information for a correct choice of these emergency works, nor a methodology and indicators for their evaluation.

The objective is to develop criteria for the diagnosis of the execution and location of post-fire emergency works in a bushland context, as well as to consolidate specific indicators for the evaluation and monitoring of the effectiveness of these measures.

The methodology used is the use of satellites to evaluate the evolution of vegetation cover in treated areas and in surrounding areas that serve as a control, according to fire intensity, area, climate, slope, soil, geological material, etc.

The results provide criteria for the diagnosis of post-fire works execution according to the sample of forest fires in recent years in different areas of Spain, where fajinas and other emergency measures have been carried out.

Key words

post-fire, forest restoration, vegetation cover, satellite, emergency measures

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Planteamiento del TFG, justificación y de objetivos.	1
1.2.	Revisión del estado del arte	2
1.3.	Tipos de medidas/obras de emergencia post incendio que se realizan en España	4
1.4.	Factores que afectan a la efectividad de los tratamientos	6
1.5.	Indicadores para evaluar la eficiencia de las obras	6
II.	MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO	8
2.1.	Base de datos de medidas de emergencia post incendio	8
2.1.1.	Medio bio-físico (escala monte)	8
2.1.2.	Estado forestal.....	13
2.1.3.	Características del fuego (severidad)	15
2.1.4.	Tipos de obras de emergencia realizadas	18
2.1.5.	Indicadores de desempeño	19
2.2.	Procesado en Google Earth Engine (GEE).....	21
2.2.1.	Delimitación del incendio.....	21
2.2.2.	Preprocesado de la zona de actuación.....	22
2.2.3.	Caracterización de la zona del incendio	22
2.2.3.1.	Clasificación según pendiente y orientación	23
2.2.3.2.	Clasificación de pendiente, orientación y severidad del fuego	23
2.2.4.	Índices de vegetación y Deltas calculados.....	23
2.2.5.	Series temporales de las clasificaciones.....	24
2.3.	Análisis cuantitativo y cualitativo de la información.....	25
III.	VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS	26
3.1.	Por indicadores de naturaleza satelital	26
3.2.	Por tipo de gestión post incendio (actuación y no actuación)	29
3.3.	Por tipo de tratamiento según la zona (ecoregión y/o bioclima)	29
3.4.	Por factores de media escala: fisiografía.....	30
3.5.	Por efecto de la severidad del fuego	30
3.6.	Integración de fisiografía, severidad, zona y tratamiento.	31
3.7.	Inventarios de campo para validar los resultados.....	33
IV.	CRITERIOS QUE CONSIDERAR EN LA PLANIFICACIÓN Y CONCLUSIONES	35

INDICE

V. REFERENCIAS	39
VI. ANEJOS	43
6.1 Anejo I. Mapas de Usos del suelo.....	43
6.2 Anejo II: Mapas de Medidas de emergencia realizada	46
6.3 Anejo III: Caracterizar la zona del incendio	52
6.4 Anejo IV: Gráficos y tablas resultado de la Valoración	55
6.5 Anejo V. Índice de biodiversidad.....	66

INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fajinas (izquierda) y acordonado (derecha). Fuente: Vega (2013).....	4
Figura 2. El uso de helicóptero para la dispersión de paja de cereal (helimulching). Fuente: Arellano (2013).....	5
Figura 3. Albarradas elaboradas con fustes de pies quemados. Fuente: Guillén (2017).....	5
Figura 4. Mapa Geológico de Hellín (perímetro del incendio marcado en rojo). Fuente: elaboración propia.....	9
Figura 5. Mapa Geológico de Villanueva del Arzobispo (perímetro del incendio marcado en rojo). Fuente: elaboración propia.....	10
Figura 6. Mapa Geológico de Villanueva del Arzobispo (perímetro del incendio marcado en rojo). Fuente: elaboración propia.....	11
Figura 7. Mapa Geológico de Alcoy (perímetro del incendio marcado en rojo). Fuente: elaboración propia.....	12
Figura 8. Rangos de severidad del fuego establecido por la USGS. Fuente: USDA (2021).....	16
Figura 9. Severidad del fuego para: Hellín (sup. izquierda), Cazorla (sup. derecha), Arbo (inf. izquierda) y Llutxent (inf. derecha). Fuente: Acceso repositorio, Silvadapt.net (2021).....	17
Figura 10. Media de los 4 incendios para los deltas de los 7 índices. Fuente: elaboración propia.....	26
Figura 11. Normalizados con máx. y mín. los distintos índices para cada zona y el total (barra negra). Hellín: (AB_He; Cazorla: J_Ca; Arbo: PO_Ar y Llutxent: V_Ll). Fuente: elaboración propia.....	27
Figura 12. Diagrama de cajas (box-plots) para representar las medianas y cuartiles y los valores atípicos.....	27
Figura 13. Diagrama de cajas (box-plots) filtrado por tratamiento (Treat = 1).....	28
Figura 14. Integración de fisiografía, severidad y zona, para los índices MSI y NBR. Fuente: elaboración propia.....	32
Figura 15. Mapa de usos del suelo de la zona afectada por el incendio en Hellín (Albacete). Fuente: elaboración propia.....	43
Figura 16. Mapa de usos del suelo de la zona afectada por el incendio en Cazorla (Jaén). Fuente: elaboración propia.....	44
Figura 17. Mapa de usos del suelo de la zona afectada por el incendio en Arbo (Pontevedra). Fuente: elaboración propia.....	44
Figura 18. Mapa de usos del suelo de la zona afectada por el incendio en Llutxent (Valencia). Fuente: elaboración propia.....	45
Figura 19 Medidas de emergencia para el control de la erosión post incendio en Hellín (Albacete). Fuente: elaboración propia.....	46
Figura 20. Medidas para eliminar la madera quemada y preparar el suelo para la posterior repoblación. Fuente: elaboración propia.....	47
Figura 21. Diques y obras de fábrica para el control de la erosión en la zona afectada por el incendio. Fuente: elaboración propia.....	48

INDICE

Figura 22. Medidas de gestión de la madera quemada para el control de la erosión post incendio en Cazorla (Jaén). Fuente: elaboración propia.....	49
Figura 23. Medidas de gestión de la madera quemada para el control de la erosión post incendio en Arbo (Pontevedra). Fuente: elaboración propia.....	50
Figura 24. Medidas de gestión para el control de la erosión post incendio en Llutxent (Valencia). Fuente: elaboración propia.....	51
Figura 25. Hellín (sup. izquierda), Las Villas (sup. derecha), Arbo (inf. izquierda) y Llutxent (inf. derecha). Fuente: Acceso repositorio, Silvadapt.net (2021).....	52
Figura 26. 18 clases de Hellín (arriba izquierda), Las Villas (arriba derecha), Arbo (debajo izquierda) y Llutxent (debajo derecha). Fuente: Acceso repositorio, Silvadapt.net (2021).....	54
Figura 27. Valores resales de los 7 índices utilizados en este trabajo para las 4 zonas analizadas. Fuente: elaboración propia.....	57
Figura 28. Cambio en el tiempo de estos índices para las respectivas zonas afectadas. Fuente: elaboración propia.....	59
Figura 29. Cálculo de $\ln(T/C)$ para cada zona analizada. Fuente: elaboración propia.....	60
Figura 30. Valores reales para los 3 índices con tratamiento (1 → barra roja) o control (0 → barra azul)....	60
Figura 31. Gráficos con los valores reales para cada uno de los 3 índices y sus Deltas correspondientes con y sin actuación de emergencia post incendio, aplicando las medias de las medias de los dos grupos (Tratamiento y Control). Fuente: elaboración propia.....	61
Figura 32. Resultados individualizados por zona para los índices MSI y NBR. Fuente: elaboración propia.....	62
Figura 33. Resultados individualizados por zona para el índice NDVI. Fuente: elaboración propia.....	63
Figura 34. Resultados según pendiente (slope) y orientación (aspect) para los 3 índices seleccionados. Fuente: elaboración propia.....	63
Figura 35. Resultados según pendiente (slope) y orientación (aspect) para Delta3_6 y Delta3_9 de los 3 índices seleccionados. Fuente: elaboración propia.....	64
Figura 36. Resultados según las tres clases de severidad del fuego para los 3 índices seleccionados y sus Deltas. Fuente: elaboración propia.....	65

INDICE

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorización de la severidad del fuego. Fuente: elaboración propia.....	17
Tabla 2. Índices satelitales susceptibles al cambio de la cobertura vegetal. Fuente: elaboración propia...20	
Tabla 3. Ejemplo del formato de base de datos para 6 clases. Fuente: elaboración propia.....	24
Tabla 4. Integración de fisiografía, severidad, zona y tratamiento para los índices MSI y NBR y sus deltas, indicando si el índice da mayor recuperación de la cobertura en zonas control “C” o en zonas con actuación “A”. Fuente: elaboración propia.....	33
Tabla 5. Porcentaje de cobertura para tratamiento y control en Llutxent (Valencia). Fuente: elaboración propia.....	34
Tabla 6. Planificación de la gestión para el incendio de Hellín (Albacete). Fuente: elaboración propia...38	
Tabla 7. Planificación de la gestión para el incendio de Cazorla (Jaén). Fuente: elaboración propia.....	38
Tabla 8. Planificación de la gestión para el incendio de Arbo (Pontevedra). Fuente: elaboración propia.....	38
Tabla 9. Prueba “t” de Student (Levene’s Test for Equality of Variances significativo siempre).....	61
Tabla 10. Riqueza y biodiversidad (índice de Shannon), en el caso de Hellín. Fuente: elaboración propia...66	
Tabla 11. Riqueza y biodiversidad (índice de Shannon), en el caso de Cazorla. Fuente: elaboración propia.....	67
Tabla 12. Riqueza y biodiversidad (índice de Shannon) en el caso de Arbo. Fuente: elaboración propia....	67
Tabla 13. Riqueza y biodiversidad (índice de Shannon) para el caso de Llutxent. Fuente: elaboración propia.....	68

INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Introducción

1.1. Planteamiento del TFG, justificación y de objetivos.

El planteamiento de este trabajo es el de elaborar criterios para el diagnóstico de las medidas de emergencia post incendio en proyectos de restauración forestal mediante el análisis de una muestra de incendios forestales ocurridos en los últimos años en distintas zonas de España donde se hayan hecho este tipo de obras. Para ello, se evalúa mediante uso de satélite la evolución de la cobertura vegetal, en zonas tratadas y en zonas no tratadas que sirven de control. De este modo, se podrán proporcionar criterios que optimicen tanto la planificación como la ejecución de estos tratamientos forestales, según la intensidad del fuego y la fisiografía del terreno (tipo de pendiente y orientación), además de la zona, clima, suelo, material geológico, etc.

Este trabajo fin de grado se plantea en el seno de la Red Silvadapt.net (<https://silvadaptnet.webs.upv.es>), que integra a distintas instituciones españolas con el fin de desarrollar una gestión forestal adaptativa al cambio climático. En particular, el grupo de fuego de dicha red se ha marcado como objetivo identificar las medidas de restauración post incendio más eficaces dentro de un contexto nacional y a la vez establecer criterios de diagnóstico e indicadores sobre qué tipo de medidas y qué condiciones de ejecución maximizan su eficacia en un contexto más local.

Tras grandes incendios forestales, las administraciones públicas suelen habilitar presupuestos extraordinarios destinados a obras de emergencia para el control de la erosión y riesgo hidrológico en las áreas afectadas. Estas obras consisten fundamentalmente en fajas o cordones, albarradas, aplicaciones de mulch, etc., con la finalidad principal de regular la escorrentía superficial e incentivar el crecimiento y/o rebrote de la vegetación. No obstante, no existe información técnica accesible para una correcta elección de estas medidas en base a criterios o factores de juicio.

Debido a esto, nuestros objetivos son identificar índices satelitales susceptibles al cambio de la cobertura vegetal para seleccionar aquellos que muestren sensibilidad en las zonas tratadas, estudiar la efectividad de las medidas en lapsos posteriores al incendio y su ejecución, y trata de elaborar criterios para el diagnóstico de ubicación de obras de emergencia post incendio en un contexto bioclimático/ecorregión. Con ello, es posible establecer posiciones de localización más eficientes de las obras de emergencia post incendio en un contexto de monte, además de consolidar indicadores específicos para la evaluación y monitorización de la eficacia de las obras de emergencia post incendio.

INTRODUCCIÓN

1.2. Revisión del estado del arte

El suelo es el recurso más importante y vulnerable de entre todos los afectados por un incendio. Son muchos los investigadores que relacionan el paso de un incendio con el aumento de la erosión. De todas las pérdidas posibles, la mayoría puede recuperarse a corto o medio plazo, excepto el suelo, cuya merma de calidad y merma física necesitará, en algunos casos, varios siglos para alcanzar parámetros similares a los que tenía antes del paso del fuego (Navarro, 2005).

El clima mediterráneo se caracteriza en gran medida por la torrencialidad, la estacionalidad, la variabilidad de las precipitaciones y la fuerte evapotranspiración, conjunto de factores climáticos que puede potenciar la erosión (Rubio, 1988). En las zonas mediterráneas, donde la producción de humus es muy baja, la recuperación de horizontes de hojarasca y fermentación puede tardar hasta 18 años (Ferrán y Vallejo, 1990).

Para medir la erosión producida por eventos lluviosos existen numerosos procedimientos, pero normalmente son métodos y equipos de alto coste, con numerosas salidas a campo y el posterior tratamiento de la muestra en laboratorio. En EE. UU se generalizó el empleo de unos colectores de sedimentos temporales (silt-fences) para frenar la erosión superficial. En contraposición con los métodos tradicionales, estas barreras son colectores de bajo coste y de fácil instalación (Robichaud y Brown, 2002).

Es probable que todos los bosques, con excepción de aquellos que están perpetuamente húmedos, hayan ardido en alguna ocasión (Spurr y Barner, 1973). Gracias a la diseminación y posterior germinación de las semillas que puede verse favorecida por el paso del fuego, como en la mayoría de las especies del género *Pinus*, o por la formación de rebrotes, común en especies del género *Quercus*, entre otros, los bosques se regeneran después de un incendio.

Debido al cambio climático y a la gran acumulación de combustible, muchos bosques, junto a sus recursos asociados, corren un riesgo en aumento de incendios forestales grandes y severos. Se están proponiendo tratamientos extensivos a los combustibles, pero no está claro dónde deben enfocarse dichos tratamientos (Miller et al., 2016).

Después de un incendio forestal, la evolución natural de la vegetación puede verse alterada por las prácticas de gestión posteriores. La extracción de madera quemada es una práctica relativamente común, lo que obedece generalmente a criterios

INTRODUCCIÓN

económicos, fitosanitarios o relacionados con la facilitación de labores de la gestión forestal, y también, aunque en menor medida, a razones estéticas (Bautista et al., 2004).

El empleo de tratamientos de emergencia post incendio es una labor que se viene practicando desde hace décadas en numerosos lugares del mundo, si bien su eficacia no es siempre satisfactoria y, como ya se ha mencionado, no hay datos sobre la efectividad de estas medidas según la zona de aplicación. Un estudio realizado en Grecia (Raftoyannis et al., 2005) ha evaluado la construcción de fajinas como tratamiento de emergencia post incendio, usando como indicadores la composición de especies, el crecimiento de las plantas y la cubierta de suelo, para medir la efectividad de este tratamiento. Este estudio concluye diciendo que el tratamiento con fajinas no demuestra eficacia en la recuperación del ecosistema. Además, añade que las características de la zona condicionan mucho la efectividad: riesgo de erosión, clima, materiales, etc.; y, por lo tanto, solo deben emplearse tras un exhaustivo estudio. A resultados similares llegaron con otro estudio realizado en Colorado (Gartner, 2002), donde se evaluó la erosión producida tras el paso del incendio en 4 cuencas hidrológicas, dos control y dos con fajinas. Las 4 parcelas obtuvieron prácticamente los mismos resultados, tanto en la producción de sedimento como en la formación de regueros, demostrando que la construcción de fajinas no era efectiva para el objetivo de reducir la erosión.

Según indica Miller et al. (2014), el Servicio Forestal del USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos) evalúa, tras un incendio, el riesgo de erosión y cómo este se distribuye por toda la zona quemada. Uno de los trabajos que intenta realizar USDA, es la gestión de la restauración post incendio vinculando imágenes satelitales con los modelos hidrológicos. Este estudio se basa en la cobertura de suelo como parámetro de erosionabilidad, en factores de media escala para predecir la erosión en laderas complejas y variadas espacialmente, en las condiciones y propiedades del suelo de hidrofobicidad y en los efectos de la severidad del fuego sobre la evolución de la cobertura vegetal, para desarrollar instrumentos y métodos de medición y monitoreo que determinen las tasas de erosión.

En el seno de este trabajo, resulta interesante el uso de imágenes satelitales para clasificar la severidad del fuego y evaluar el regenerado de la cobertura vegetal de las zonas afectadas, seleccionando aquellos índices que muestren mayor sensibilidad al cambio de la vegetación en las zonas tratadas. Con ello, se quiere estudiar la efectividad de las medidas en lapsos posteriores al incendio para poder elaborar criterios para el diagnóstico de localización y ejecución de las obras de emergencia, evaluando por factores de media escala (pendiente y orientación) y por la severidad del fuego, para distintas zonas incendiadas de España, con su ecoregión y/o bioclima característico.

INTRODUCCIÓN

1.3. Tipos de medidas/obras de emergencia post incendio que se realizan en España

Después de un incendio es muy común realizar la extracción o “saca” de la madera quemada. Esta intervención ocasiona alteraciones en el ecosistema y puede afectar negativamente a la recuperación de la vegetación. Para los restos no maderables existen diferentes tratamientos: el **astillado y esparcido** por la superficie afectada por el incendio o la recogida y apilado de los mismos según curvas de nivel formando **fajinas**, con los restos más finos, o **acordonados** de restos más gruesos y largos (figura 1). El uso de estas barreras permeables se está extendiendo por su efecto corrector frente a la erosión hídrica (Navarro, 2005), aunque lo cierto es que no se disponen de estudios que elaboren criterios para el diagnóstico de ejecución y localización de estas obras para el control de la erosión.

Estas zonas forestales de estudio con medidas de emergencia post incendio se dividen en dos bloques para poder contrastar los resultados: zona de actuación, donde se aplica uno o varios tratamientos de la madera quemada, y zona control, donde no se ha intervenido después del incendio (**quemado sin actuación**).



Figura 1. Fajinas (izquierda) y acordonado (derecha). Fuente: Vega (2013).

El acolchado (en inglés **mulching**) es una capa protectora o mantillo que se utiliza para cubrir el suelo descubierto de vegetación tras el paso del fuego. La aplicación de mulching de paja y/u otros materiales después de un incendio puede ser un tratamiento eficaz para el control de la erosión. Sin embargo, este acolchado puede afectar a la regeneración natural de la vegetación y debe tenerse en cuenta el origen del mulch para reducir posibles efectos indeseables en la vegetación autóctona.

El mulching de astilla, con muy baja cantidad, ha resultado ser poco eficaz en Galicia, pero no en otros experimentos con cantidades mucho mayores (Foltz y Robichaud., 2013). Los tratamientos de acolchado o mulching han ido ganando aceptación en los últimos años en comparación con otras alternativas menos eficaces

INTRODUCCIÓN

(Vega, 2016). El uso de helicóptero para la dispersión de paja cereal (**helimulching**), permite tratar en poco tiempo superficies quemadas considerables (figura 2).



Figura 2. El uso de helicóptero para la dispersión de paja de cereal (**helimulching**). Fuente: Arellano (2013)

Las **albarradas** (figura 3) se han utilizado ampliamente en Andalucía y Levante para la restauración de incendios. Para ello se emplean los fustes de los pies quemados, una vez apeados y procesados para su fácil manejo, en lugares como cárcavas y canales de desagüe, siguiendo el “criterio de cuenca” con el objetivo de contrarrestar la pérdida de suelo. Según indica Robichaud et al. (2000), a pesar de tener un gran impacto visual, parecen ser eficaces para alterar la respuesta hidrológica a tormentas de corta duración y alta intensidad, pero al igual que ocurre con las fajinas, no se ha detectado una respuesta positiva a eventos de baja intensidad y larga duración.



Figura 3. Albarradas elaboradas con fustes de pies quemados. Fuente: Guillén (2017).

INTRODUCCIÓN

1.4. Factores que afectan a la efectividad de los tratamientos

Son varios los factores de media escala (escala monte) que afectan a la efectividad de las medidas de emergencia post incendio. De todos estos, hemos seleccionado los más importantes para nuestro estudio, ya que engloban otros aspectos inherentes a ellos y con menor grado de afectación.

Por ello, hemos considerado la **fisiografía** del terreno para conocer las formas del relieve y el grado de inclinación o pendiente de las laderas, así como su **orografía**, para comprender el relieve de una zona relativamente pequeña y la orientación de sus laderas, ya que esto modifica las condiciones microclimáticas del lugar, según sea solana, recibiendo mayor cantidad de radiación solar, o umbría.

El tercer factor, y el más complejo, es la **severidad del fuego**. Por su relación directa con la cantidad de biomasa consumida, este factor está muy ligado a la recuperación vegetal y a la dinámica hidrogeomorfológica post incendio, estableciéndose, de forma general, que la alta severidad está vinculada a tasas de recuperación de la vegetación más bajas y tasas de erosión más elevadas que las áreas de baja severidad (Doerr et al., 2006; Moody et al., 2013). La necesidad de evaluar esta variable es aún mayor si se considera que el sentido actual del régimen de fuego mundial es hacia un aumento de la frecuencia, extensión, intensidad y severidad de los incendios (Chuvieco et al., 2008).

En consecuencia, la evaluación de estos factores proporciona información fundamental para priorizar la aplicación de tratamientos y medidas de emergencia que buscan minimizar los efectos del fuego y acortar el tiempo de recuperación del ecosistema afectado (Miller y Yool, 2002). Si a este conjunto de variables le añadimos el factor de **ecoregión y/o bioclima** del incendio, que contribuye a aspectos tales como el tipo de suelo, sus características edafológicas (considerando también su origen geológico) y la vegetación que sustenta, podemos discriminar los tratamientos post incendio para la restauración del ecosistema según la región en la que se encuentre (Atlántica, Mediterránea interior, litoral o de montaña).

1.5. Indicadores para evaluar la eficiencia de las obras

Todos los vegetales que se regeneran por vía vegetativa responden durante los primeros meses después del incendio, cualquiera que sea su estación (Trabaud, 1998), por lo que es importante evaluar el efecto sobre el suelo y la cubierta vegetal después de la intervención en lapsos posteriores a los meses de rebrote de las primeras plantas colonizadoras. Según Pausas et al. (1999) las especies de germinación obligada como

INTRODUCCIÓN

estrategia reproductiva alcanzan un elevado recubrimiento a los 18-30 meses después del incendio.

Uno de los indicadores sobre la eficiencia de las medidas de emergencia post incendio que se ha usado habitualmente es la evaluación de la **producción de sedimentos**. Para ello, en cada cuenca experimental se pueden instalar unas barreras temporales de malla geotextil permeable (silt-fences) por sus cualidades ya mencionadas. Al mismo tiempo se colocan pluviómetros repartidos entre las microcuencas para cuantificar la lluvia caída en cada evento. El peso de sedimentos que recoge el colector es la pérdida de suelo para cada evento de lluvia, obtenido así las tasas de erosión de la cuencas experimentales. Esta evaluación se realiza paralela a la valoración de otros indicadores, en los que se centra este estudio.

La **biodiversidad** de especies vegetales es un indicador difícilmente comparable debido a que es altamente influenciado por el tamaño de la zona de estudio y el tiempo transcurrido desde el incendio. De igual modo, en el caso de especies arbustivas de gran porte y de especies rebrotadoras y colonizadoras se obtienen tasas elevadas de cobertura vegetal en un breve periodo de tiempo tras el incendio. Por ello, la elección de una misma **especie principal** para las zonas analizadas, como indicador de la eficiencia de las medidas de restauración post incendio, puede ayudar a discriminar las distintas actuaciones según su efecto sobre la regeneración de dicha especie.

El estudio de la cobertura de suelo y de vegetación se suele llevar a cabo realizando transectos lineales siguiendo la línea de máxima pendiente en microcuencas. Sin embargo, para este estudio, cumpliendo con el objetivo de identificar índices generalizables que muestren sensibilidad en las zonas tratadas, se ha analizado el efecto de los tratamientos en la recuperación de la **cubierta vegetal** mediante imágenes satelitales para estudiar la efectividad de dichas medidas en lapsos de 3-6-9 meses desde la intervención.

Estos indicadores de naturaleza satelital, como el NBR (Normalized Burn Ratio) u otros índices: NDII, EVI, GCI, MSI, NDII, NDVI Y RVI; en los que también se ha trabajado, son clave para el análisis de estudios vinculados con incendios forestales.

Otros indicadores que pueden ayudar a valorar la eficiencia de las medidas de emergencia post incendio es la posible extensión de plagas por las maderas muertas que forman las obras de restauración y la eliminación de parte de la carga de combustible como gestión selvícola preventiva, y así, reducir la severidad de futuros incendios.

II. MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

II. Material y Desarrollo metodológico del trabajo

2.1. Base de datos de medidas de emergencia post incendio

Para el desarrollo metodológico del trabajo se ha seleccionado una muestra de incendios forestales ocurridos en los últimos años en distintas zonas de España (Hellín en Albacete, Cazorla y Las Villas en Jaén, Arbo en Pontevedra y Llutxent en Valencia) donde se han realizado fajinas, cordones, albarradas y/o mulching como tratamientos de emergencia post incendio. Estos incendios forman parte de la base de datos del grupo de trabajo de incendios forestales de Silvadapt.net. Se ha revisado la bibliografía relacionada y los trabajos previos a la base de datos para identificar los indicadores de suelo y vuelo más relevantes y estandarizables. Posteriormente, se ha comprobado cuáles de estos indicadores son medibles con información satelital para medirlos en la base de datos y ver su evolución temporal, en zonas tratadas y en zonas aledañas que sirvan de control. Por último, se ha validado la información satelital con información de campo de la base de datos (inventarios de riqueza y biodiversidad) para sacar los resultados que proporcionen criterios que optimicen la ejecución de estos tratamientos forestales. En este caso, se han inventariado, por proximidad, una parcela con tratamientos de emergencia (acordonado) para la restauración de la zona incendiada en Lluxent (Valencia), tomando como indicadores el porcentaje de cobertura vegetal y la elección de una especie principal para evaluar la regeneración tanto en las zonas de actuación como en las de no actuación o control, y poder validar la información satelital.

2.1.1. Medio bio-físico (escala monte)

A continuación, se da una breve descripción del medio físico y biótico de las distintas zonas estudiadas con tratamientos de emergencia post incendio para la restauración del ecosistema.

Hellín (Albacete):

La zona incendiada y objeto de estudio se encuentra ubicada en el término municipal de Hellín, en el sureste de la provincia de Albacete y pertenece a la cuenca hidrográfica del Segura. Este incendio, del 1 de julio de 2012, arrasó 5.466 ha de bosque de la Sierra de los Donceles ya que tuvo una gran velocidad de propagación debido a las condiciones climáticas y al alto contenido de combustible que existía en la zona.

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

Esta zona, se considera con un clima semiárido frío o estepario (BSk) según la clasificación climática de Köppen-Geiger. La temperatura media anual es de 15,9 °C, siendo julio el mes más cálido con un promedio de 26,3 °C. Hay pocas precipitaciones durante todo el año (326 mm al año), e igualmente, julio el mes más seco con 6mm (Climate-Data.org, 2021).

Como podemos observar en el Mapa Geológico de Hellín (IGME, 1980), hoja nº868, la zona afectada por el incendio consta principalmente de materiales carbonatados o calcáreos (ver figura 4).

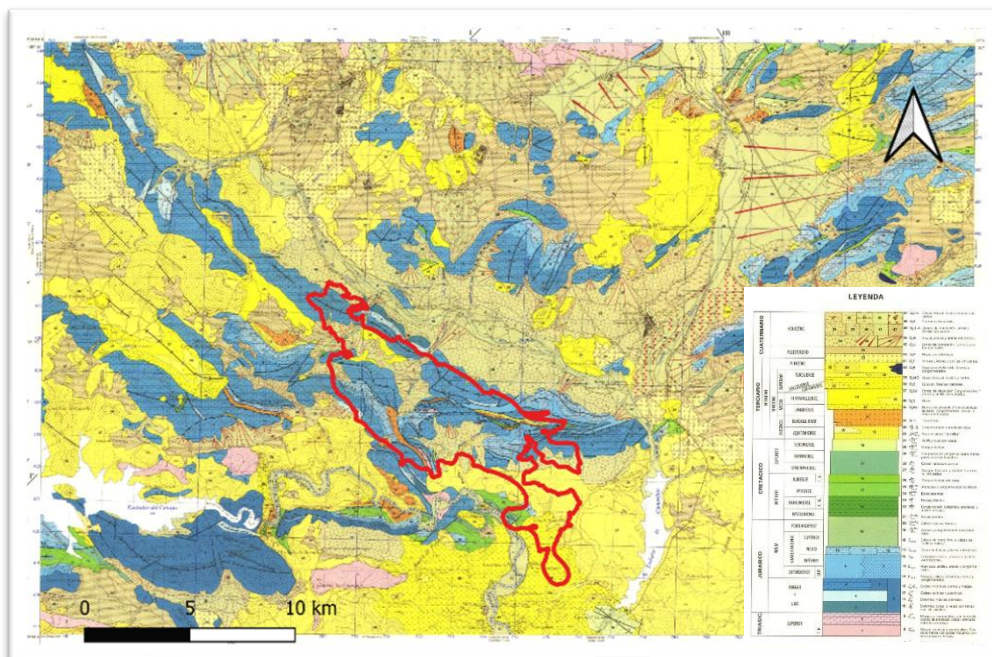


Figura 4. Mapa Geológico de Hellín (perímetro del incendio marcado en rojo). Fuente: elaboración propia

En cuanto a la fisiografía de la zona y sus características orográficas principales (figura ¿?), se trata de una pendiente muy variable donde se ha considerado baja (<15%), media (15-30%) y alta (>30%). Según el Modelo Digital del Terreno del CNIG (2019) en la orientación global de la zona estudiada domina la solana, con una media de 170 grados sexagesimales, diferenciado entre solana (90-270°) y umbría (0-90°; 270-360°). La altitud media es de 560m aproximadamente.

Cazorla, Segura y Las Villas (Jaén):

El incendio forestal del Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas acaecido en el mes de agosto de 2005 en las inmediaciones del pantano del Tranco de Beas, situado

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir, fue provocado por rayos de una tormenta eléctrica entre los días 7, 8, 9, 10 y 11. Un total de 5.889,4 ha ardieron en cuatro días.

Esta ubicación, está clasificada con un clima mediterráneo típico (Csa) según la clasificación climática de Köppen-Geiger, concretamente corresponde a un termotipo mesomediterráneo subhúmedo, donde la temperatura media anual es de 15,2 °C, siendo julio el mes más caluroso con una temperatura media de 26,9 °C. La precipitación ronda los 583 mm/año y es más baja en julio, con un promedio de 4 mm (Climate-Data.org, 2021).

Según el Mapa Geológico de Villanueva del Arzobispo (IGME, 1974), hoja nº667, las unidades litológicas dominantes corresponden a calizas y dolomías (ver figura 5).

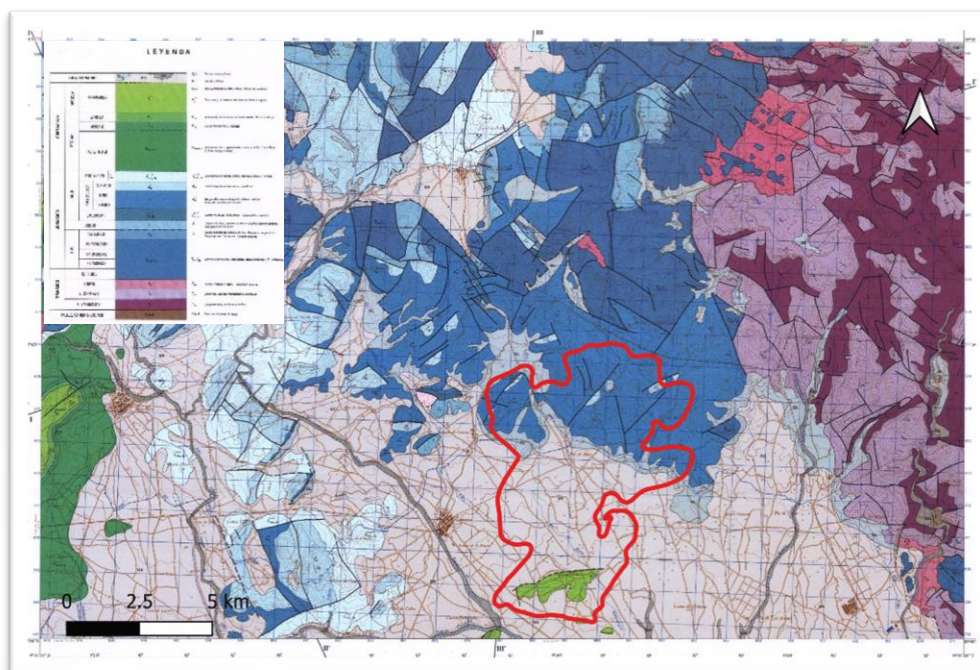


Figura 5. Mapa Geológico de Villanueva del Arzobispo (perímetro del incendio marcado en rojo). Fuente: elaboración propia.

El rango de pendiente en la zona de estudio es muy variado, encontrándose un 19,5% del terreno en pendientes inferiores al 30%, un 35,4% en pendientes entre el 30 y 50% y un 45,2% en pendientes superiores al 50%, empleando la misma clasificación que en el caso de Hellín. La altitud media es de 992m aproximadamente. Igualmente, hemos diferenciado entre solana (90-270°) y umbría (0-90°; 270-360°) para analizar el efecto de la orientación en las zonas afectadas para la recuperación del ecosistema.

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

Llutxent (Valencia):

Este incendio se produjo el 6 de agosto de 2018 y afectó a los términos municipales de Ador, Barx, Gandía, Pinet, Quatretonda, Rótova y Llutxent, pertenecientes a la cuenca hidrológica del Serpis, con una superficie total quemada de 3.270 ha, 3.146 ha de terreno forestal. La superficie afectada es mayoritariamente forestal (60%) con afecciones a la interfaz agrícola-forestal, además, el 64% está incluida en alguna figura de protección (Vallejo et al., 2018).

En la aplicación de la USLE para la zona afectada, el factor climático es el factor más importante para el riesgo erosivo, debido a la elevada intensidad de las precipitaciones. El clima de esta zona se considera como mediterráneo típico (Csa) según la clasificación climática de Köppen-Geiger, con una temperatura media anual de 16,4°C y una precipitación de, aproximadamente, 604 mm al año, siendo julio el mes más seco y cálido (Climate-Data.org, 2021).

Analizando el Mapa Geológico de Alcoy (IGME, 1970), hoja nº64, los suelos de la zona afectada por el incendio se desarrollan mayoritariamente sobre calizas y dolomías en menor medida (ver figura 7). La litología dominante es muy permeable, formando parte de un sistema kárstico activo en el cual las subsidencias son muy frecuentes, al igual que es abundante la pedregosidad, factores ambos que limitan la movilización del suelo (Valdecantos et al., 2018).

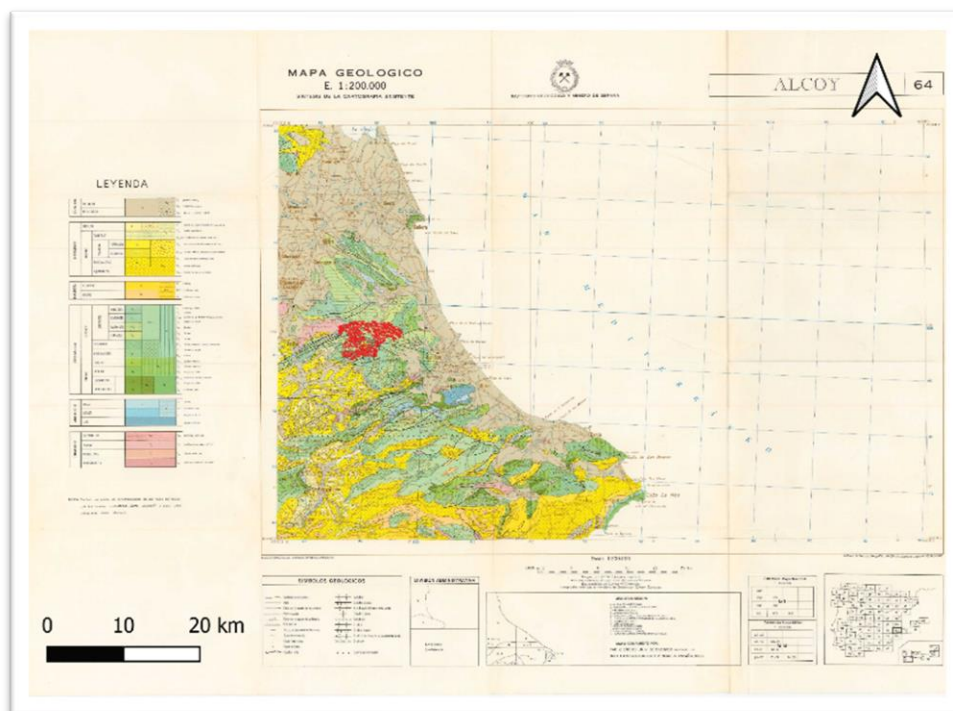


Figura 7. Mapa Geológico de Alcoy (perímetro del incendio marcado en rojo). Fuente: elaboración propia

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

Según Santana et al. (2018), en laderas de calizas y dolomías los suelos son poco profundos, fisurales y muy pedregosos, alternando suelos esqueléticos muy superficiales (*Entisol* según la Soil Taxonomy, *Leptosol* según el sistema FAO) con suelos más profundos en las fisuras (*Alfisol* según la Soil Taxonomy, *Luvisol* y *eutric* según la FAO). Por el contrario, en las bases de montaña donde se han conservado suelos arcaicos, estos están bien desarrollados, generalmente con un horizonte E eluvial y B iluvial en zonas poco alteradas.

En cuanto a la fisiografía de esta zona, el relieve es variable, con cotas máximas de 750 m en la parte central y cotas de apenas 200 m en los márgenes laterales, lo que origina pendientes bastante abruptas (superior al 45%) situadas sobre todo en el sector noreste. Por la zona se distribuye una densa red de drenaje, constituida por estrechos y profundos barrancos, excavados sobre fuertes pendientes (Valdecantos et al., 2018). La clasificación de la pendiente y orientación es idéntica a la realizada en los otros incendios.

Finalmente, según indica Alloza et al. (2018), en función del uso del suelo, se ha diferenciado 3 unidades ambientales dentro del perímetro del incendio atendiendo a su composición de especies: Matorrales de coscoja (*Quercus coccifera*), con carrasca (*Quercus ilex*) o con pino (*Pinus pinaster* y *P. halepensis*); Pinares, de pino rodeno (*P. pinaster*) y pino carrasco (*P. halepensis*), y Formaciones de frondosas, dominadas por el alcornoque (*Quercus suber*) y por la carrasca (*Q. ilex*).

2.1.2. Estado forestal

Para analizar la vegetación de cada área de estudio y su estado forestal, debemos distinguir entre la real y existente en la zona debido a la intervención antrópica o la vegetación potencial y que debería existir sin la alteración del ecosistema por parte del hombre.

En el Anejo I. Mapas de Usos del suelo, se pueden consultar los distintos usos para las zonas afectadas por los incendios estudiados.

Hellín (Albacete):

Según el Mapa de Series de Vegetación de Rivas Martínez (1987), en esta zona deberíamos encontrar (vegetación potencial) la serie 22b: Serie mesomediterránea manchega y aragonesa basófila de la encina (*Quercus rotundifolia*). *Bupleuro rigidi-Querceto rotundifoliae sigmetum*; y 29: Serie mesomediterránea murciano-almeriense,

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

guadiciano-bacense setabense valenciano-tarraconense y aragonesa semiárida de la coscoja (*Quercus coccifera*). *Rhamno lycioidis-Querceto cocciferae sigmetum*.

Analizando el Mapa Forestal de España (MFE50) para esta zona, la vegetación real y existente está dominada por bosques de coníferas (*Pinus halepensis*), pastizales naturales, vegetación esclerófila y matorral boscoso de transición, principalmente.

El mayor y principal daño producido en este entorno forestal ha sido provocado por este incendio de 2012, que quemó casi la totalidad de su superficie (5.000ha), afectando a este paraje con mayor concentración de *Pinus halepensis* y *Pinus pinea* de la vertiente meridional de las sierras de Hellín.

Cazorla, Segura y Las Villas (Jaén):

Según el Mapa de Series de Vegetación de Rivas Martínez (1987) la vegetación potencial de esta zona corresponde a las series 19e: Serie supra-mesomediterránea bética basófila del quejigo (*Quercus faginea*). *Daphno latifoliae-Acereto granatensis sigmetum*; 24f: serie supramediterránea bética basófila de la encina (*Quercus rotundifolia*). *Berberidi hispanicae-Querceto rotundifoliae sigmetum*; y 24e: Serie mesomediterránea bética marianense y araceno-pacense basófila de la encina (*Quercus rotundifolia*). *Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae sigmetum*.

Observando el Mapa Forestal de España (MFE50), para el área afectada por el incendio en el Parque Natural de Cazorla, Segura y las Villas, la vegetación real y principal correspondía en su origen a formaciones vegetales relictas de pino salgareño (*Pinus nigra* subs. *salzmanii*) a más de 1000 m de altitud, y por debajo, la vegetación natural de encinares y quejigales fue sustituida en muchas zonas por pinares de repoblación, con predominio de pino carrasco (*Pinus halepensis*), así, como en otras zonas, las intervenciones antrópicas motivaron la expansión de manchas boscosas de pino negral o resinero (*Pinus pinaster*).

Arbo (Pontevedra):

De acuerdo con el Mapa de Series de Vegetación de Rivas Martínez (1987), para esta zona la vegetación potencial corresponde a la serie 8c: Serie colina galaico-portuguesa acidófila del roble (*Quercus robur*). *Rusco aculeati-Querceto roboris sigmetum*.

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

Según el Mapa Forestal de España (MFE50), para la zona de Arbo y A Chan, la vegetación real y existente en este área de estudio estaba compuesta principalmente por matorrales y rodales de pino resinero (*Pinus pinaster*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.) de tamaño no comercial. Las especies arbustivas dominantes eran *Ulex europaeus* L., *Cytisus striatus* (Hill) Rothm. y *Erica cinérea* L.

Llutxent (Valencia):

Referido a la vegetación potencial, la zona incendiada está dominada por encinares mediterráneos. Según el Mapa de Series de Vegetación de Rivas Martínez (1987), esta vegetación corresponde a las series 23b: Serie meso-termomediterránea valenciano-castellonense subhúmeda del alcornoque (*Quercus suber*). *Asplenio onopteridis-Querceto suberis sigmetum*; 27c: Serie termo-mesomediterránea valenciano-tarraconense murciano-almeriense basófila de la encina (*Quercus rotundifolia*). *Rubio longifoliae-Querceto rotundifoliae sigmetum*; 29: Serie mesomediterránea murciano-almeriense, gadiceno-bacense setabense valenciano-tarraconense y aragonesa semiárida de la coscoja (*Quercus coccifera*). *Rhamno lycioidis-Querceto cocciferae sigmetum*; y 30a: Serie termomediterránea setabense y valenciano-tarraconense seca del lentisco (*Pistacia lentiscus*). *Querceto cocciferae-Pistacieto lentisci sigmetum*.

En cambio, la vegetación real y existente previa al incendio, estaba constituida principalmente por matorral (90% de la superficie quemada). Según la cartografía PATFOR, la escasa cubierta de arbolado estaría formada sobre todo por pino carrasco (*Pinus halepensis*) y pequeños rodales de pino rodeno (*Pinus pinaster*), encina (*Quercus ilex*) y alcornoque (*Quercus suber*), donde el estado de conservación previo al incendio era considerado favorable para todos los hábitats (Vallejo et al., 2018).

2.1.3. Características del fuego (severidad)

La severidad del fuego se considera como uno de los parámetros más importantes para predecir la respuesta del ecosistema. Algunos autores distinguen entre la evaluación inicial, realizada de forma inmediata, y la evaluación extendida, retrasada hasta la primera estación de crecimiento de la vegetación (Key, 2006). Para este trabajo, resulta interesante ver la magnitud del cambio ecológico causado por el fuego a corto plazo (3 meses desde el incendio).

La superficie de las áreas afectadas por un incendio se cubre de diferentes materiales en función de las características del fuego. Frente a la estimación visual en

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

campo, muy costosa en tiempo y dinero, la observación remota proporciona información con una gran cobertura espacial, de forma rápida y continuada (Patterson y Yool, 1998).

Debido al particular comportamiento de las masas forestales frente al espectro electromagnético en el infrarrojo, el estudio de la severidad del fuego a través del índice NBR es una de las vías que podemos utilizar durante los análisis de imágenes satelitales con el fin de evaluar la regeneración de la cubierta vegetal tras un incendio. Este índice permite analizar la severidad del fuego a través de una sencilla ecuación:

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

Se trata de una relación entre bandas multiespectrales del infrarrojo cercano “NIR” e infrarrojo de ondas cortas “SWIR” con un rango de valor comprendido entre -1 y 1, donde los valores positivos muestran zonas de vegetación sana o en regeneración y los valores negativos indican áreas con cobertura vegetal afectada o sin vigor. El valor NBR se debe a que la firma espectral de la vegetación sana muestra elevados niveles de reflectividad en el NIR descendiendo bruscamente hacia el SWIR, adquiriendo un comportamiento opuesto la vegetación afectada por un incendio.

La diferencia de este índice, calculado para dos momentos temporales distintos (antes y después del incendio), nos permite delimitar la superficie afectada y calcular la severidad del fuego para cada uno de los píxeles que la componen. A medida que el valor es más alto, quiere decir que el daño sufrido es más severo. Esto es debido, a que en el valor del píxel antes del incendio tenía un valor superior al posterior, indicando que la vegetación ha sufrido una pérdida de vigor consecuente de la perturbación.

$$\Delta NBR = NBR_1 - NBR_2$$

El siguiente paso, es reclasificar la imagen para convertir el valor de los píxeles de continuo a cuantitativo. Para ello, se readapta el rango propuesto por la USGS (figura 8) con mayor número de clases a 3 categorías (Severidad baja, media y alta) (ver tabla 1).

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10 ³)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

Figura 8. Rangos de severidad del fuego establecido por la USGS. Fuente: USDA (2021)

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

Severidad del fuego	Valor δ NBR
Baja (Low)	0,1-0,25
Media (Medium)	0,25-0,5
Alta (High)	>0,5

Tabla 1. Categorización de la severidad del fuego. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se puede observar cómo queda clasificada la severidad del fuego (ver figura 9) para los distintos incendios estudiados en este trabajo.

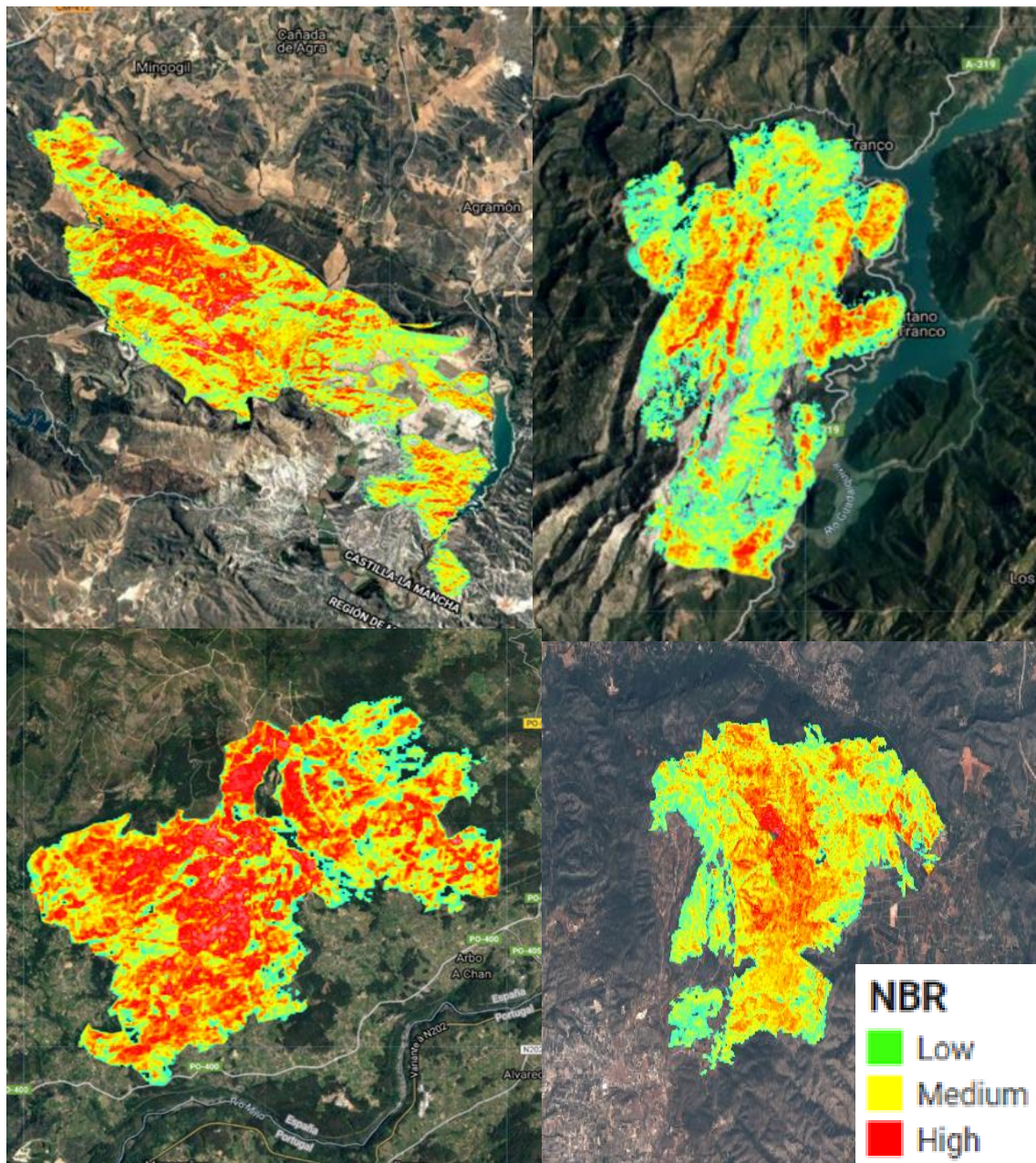


Figura 9. Severidad del fuego para: Hellín (sup. izquierda), Cazorla (sup. derecha), Arbo (inf. izquierda) y Llutzent (inf. derecha). Fuente: Acceso repositorio, Silvadapt.net (2021).

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

2.1.4. Tipos de obras de emergencia realizadas

En el Anejo II. Mapas de Medidas de emergencia realizadas, quedan recogidos los mapas de la gestión realizada en las zonas afectadas por los distintos incendios estudiados.

Tras el incendio de **Hellín** (Albacete), la administración pública habilitó un presupuesto extraordinario para la ejecución de obras de emergencia para el control de la erosión en áreas afectadas. Por ello, hasta 3 empresas forestales han participado en la gestión de la madera quemada como tratamiento post incendio para la restauración del ecosistema, colocando albarradas perpendicularmente aguas abajo de canales de desagüe o cárcavas y construyendo fajinas y acordonados en las laderas siguiendo curvas de nivel para disminuir la longitud efectiva de la pendiente (figura 19. Anejo II). Estas actuaciones se comparan con zonas sin actuación para ver la recuperación de la vegetación y la efectividad de estas medidas. Además, esta zona ha contado con otras medidas de gestión de la madera quemada (figura 20. Anejo II). Concretamente, se han eliminado los residuos o materiales finos in situ y se ha realizado la “saca” de madera más gruesa para mitigar la posible extensión de plagas. Solo en una determinada zona se ha preparado el terreno mediante subsolado y ahoyado para la posterior repoblación de especies arbóreas. La construcción de diques y obras de fábrica realizadas dentro del perímetro (figura 21. Anejo II) del incendio para el control de la erosión, aunque no se puede considerar como una medida de emergencia post incendio de gestión de la madera quemada, ya que se trabaja con otro material, si comparte el objetivo de actuar como barrera/filtro para retener el material arrastrado favoreciendo la acumulación de sustrato favorable para la regeneración natural de la cubierta vegetal.

En el **Parque Natural de Cazorla, Segura y las Villas**, tras el impacto del fuego se consideró urgente acometer diferentes actuaciones para la restauración de la vegetación y protección del suelo frente a los procesos erosivos y disminución del riesgo sobre infraestructuras y personal del parque, además de reducir el impacto visual y ofrecer actividades con fines de fomento preservando la regeneración natural. Entre las actuaciones realizadas, se procedió a la eliminación y retirada de la vegetación quemada y la construcción de hidrotecnias para el control de la escorrentía superficial. De las infraestructuras de corrección hidrología-forestal realizadas, las ya mencionadas fajinas y acordonados de ramaje creados con los residuos leñosos generados en la intervención de emergencia han sido considerados para la elaboración de este trabajo (figura 22. Anejo II). Las zonas quemadas por el incendio sin tratamiento alguno (sin apeo ni eliminación) sirven de zonas control para la evaluación de la efectividad de las medidas post incendio realizadas en el área afectada.

En **Arbo** (Pontevedra) (figura 23. Anejo II), en algunas zonas afectadas por un alto grado de severidad del fuego se llevó a cabo la adición de una cubierta de paja de cereal

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

desde helicóptero (helimulching). Esta dispersión de paja permite tratar en poco tiempo superficies quemadas considerables. En el resto de las zonas afectadas, con tratamiento y con un menor grado de severidad del fuego, se ha empleado mulching o astillado de madera para cubrir la superficie, en búsqueda de mejorar las condiciones ambientales para la restauración del ecosistema. Igualmente, para poder evaluar la efectividad de las medidas de emergencia post incendio, se han asignado zonas quemadas sin tratamiento (zonas control).

El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación destinó más de 700.000 euros a la restauración hidrológico-forestal del área afectada por el incendio de **Llutxent** (Valencia). Por ello, en la superficie afectada se han realizado distintas actuaciones para el control de la erosión. En las zonas de pinar con buen acceso, se han construido fajinas y acordonados con la madera quemada en los meses posteriores al incendio (figura 24. Anejo II), siendo su efectividad dispar (Santana et al., 2021). En algunas laderas de elevada pendiente se han realizado albarradas. En el entorno de la Marxuquera se han realizado plantaciones de especies rebrotadoras, tanto de porte arbóreo como de matorral, complementadas con la restauración de muros de mampostería y la creación de charcas artificiales (Santana et al., 2021). Todas estas zonas con tratamiento tienen zonas aledañas que sirven de control (zonas quemadas sin actuación).

2.1.5. Indicadores de desempeño

Para este estudio, se ha analizado la recuperación de la cobertura vegetal como indicador de la efectividad de los tratamientos de emergencia post incendio mediante imágenes satelitales para lapsos de 3-6-9 meses desde la intervención en zonas afectadas por los incendios de Hellín, Cazorla, Arbo y Llutxent. Para validar los resultados, se han consultado los inventarios de campo de la base de datos obtenida en el seno de Silvadapt.net, y se ha inventariado, por proximidad, una parcela de la zona afectada por el incendio en Llutxent (Valencia).

La teledetección basada en el espectro óptico es considerada una técnica adecuada para estudios como la severidad del fuego, la exposición del suelo, los cambios en el contenido de humedad y la aparición de nuevas cubiertas. (Vlassova et al., 2014). Cuanto más próximas se encuentran las firmas espectrales menor cambio en las imágenes, y consecuentemente, menor regenerado de la cobertura vegetal.

Para ello, se ha identificado una serie de índices satelitales susceptibles al cambio de la cobertura vegetal: NBR, EVI, GCI, MSI, NDII, NDVI Y RVI; para seleccionar aquellos que muestren sensibilidad en las zonas tratadas. La diferencia de aplicar el índice antes y después del incendio nos permite determinada cuál ha sido el regenerado de la

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

cubierta vegetal. Estos índices, han sido desarrollados por diferentes autores siguiendo un orden cronológico, el cual se detalla a continuación (ver tabla 2).

RVI	Índice de relación de vegetación. División simple entre las bandas roja e infrarroja cercana. Se está utilizando para evaluaciones del índice de biomasa y área foliar (Pearson y Miller, 1972).
NDVI	Índice adimensional que describe la diferencia entre la reflectancia visible e infrarroja cercana de la cubierta vegetal. Puede usarse para estimar la densidad del verde en un área de suelo (Rouse et al., 1973)
NDII	Índice de infrarrojos de diferencia normalizada. Utiliza una formulación de diferencia normalizada en lugar de una relación simple, y los valores aumentan con el aumento de agua (Hardisky et al., 1984)
MSI	Índice de estrés por humedad. Los valores de este índice oscilan entre 0 y más de 3, siendo el rango común para la vegetación verde de 0,2 a 2 (Rock et al., 1986)
GCI	Índice de clorofila verde. Útil para monitorear el impacto de la estacionalidad y las tensiones ambientales (Gitelson et al., 1996)
NBR	Índice normalizado de relación de quemado. Aprovecha los NIR y SWIR, para detectar áreas quemadas y monitorear la recuperación del ecosistema (López y Caselles, 1991)
EVI	Índice mejorado de vegetación. Se utiliza para medir el verdor de la vegetación y es más sensible en áreas con vegetación densa (Jiang et al., 2008)

Tabla 2. Índices satelitales susceptibles al cambio de la cobertura vegetal. Fuente: elaboración propia.

El *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI, ha sido uno de los índices de vegetación más aplicados, obteniendo buenas relaciones debido a la fuerte relación existente ente la severidad del fuego y la cantidad de vegetación consumida (Díaz et al., 2003; Doerr et al., 2006; Rogan y Yool, 2001). Sin embargo, el *Normalized Burn Ratio* NBR ha sido sin duda el índice espectral más utilizado ya que mejora los resultados obtenidos por otros índices (Epting et al., 2005; Hudak et al., 2007; Tanase et al., 2011). Sabiendo que el desarrollo de los índices espectrales es un proceso ligado a la aparición de nuevos satélites, puede destacarse la reciente formulación del índice MSI (Veraverbeke et al., 2012), aunque con resultados todavía preliminares, parece mejorar la estimación ofrecida por el índice NBR.

Además, se ha calculado la diferencia entre un mismo índice para distintos lapsos temporales, es decir, los Delta o diferencias con lapsos de 3, 6 y 9 meses (ver apartado siguiente). El índice NBR es comúnmente usado con datos pre y post incendio, con el índice *delta Normalized Burn Ratio* (δ NBR) (Key y Benson, 2006).

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

2.2. Procesado en Google Earth Engine (GEE)

La plataforma Google Earth Engine (GEE) es una herramienta basada en la nube de datos para el análisis geoespacial a escala planetaria. Permite realizar procesos de teledetección con grandes cantidades de datos y cuenta con repositorio con una gran colección de información y replicabilidad de estudios.

2.2.1. Delimitación del incendio

Para delimitar el perímetro de cada incendio ha sido necesario conocer la fecha en la que estos se produjeron (Hellín: 2012; Cazorla: 2005; Arbo: 2016; Llutxent: 2018) e importar las zonas de interés "ROI" para reducir las colecciones de datos satelitales utilizadas para analizar.

Se ha utilizado la colección Landsat (L5, L7 y L8) por la amplia temporalidad de sus imágenes satelitales. Se han buscado imágenes Landsat 7 para la zona de interés de Hellín, debido a que este sensor estuvo operativo en 2012. Para el resto de los incendios se ha usado Landsat 5 (Cazorla) y Landsat 8 (Valencia y Pontevedra). Dado que Landsat 7 tiene unos fallos (gaps) de "bandedado sin dato en la imagen" hemos tenido que ampliar el abanico de tiempo a ± 3 meses al incendio para detectar los cambios en la vegetación para la zona de interés de Hellín y conseguir que la colección de imágenes sea completa, subsanando el fallo variable en posición en cada escena, aunque cuando se calcula el Delta del índice NBR los rangos se suavizan un poco. Por ello, y para hacerlo de forma comparativa, se han creado dos colecciones de imágenes para todos los incendios analizados siguiendo este lapso, una antes del incendio (-3 meses) y otra posterior (+3 meses).

A continuación, hemos filtrado a cada imagen de cada colección (Pre-Post) la máscara de nubes (separado: L5 y L7 o L8) para extraer los píxeles conflictivos (nubes o sombras de nubes). Una vez que se tienen los valores que corresponden al terreno, se convierte a imagen única cada colección, calculando a cada píxel el valor promedio de todas las imágenes que componen la colección. Es decir, hemos reducido cada colección a una única imagen (promedio) de antes y de después del incendio.

El índice NBR (Normalized Burn Ratio) fue diseñado para resaltar las áreas quemadas y estimar la severidad del fuego, por lo que lo hemos creado para conseguir la diferencia de aplicarlo entre antes y después del incendio y hemos restado ambas para obtener la Imagen de Cambio en la zona (Δ NBR). Esta máscara de detección de Incendios indica que si Δ NBR > 0,1 hay cambio entre imágenes antes y después del incendio para el índice, y por lo tanto, cambio asociado a pérdida de vigor de la vegetación.

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

Este índice se aplica a cada imagen para reclasificarlas como 3 zonas de severidad del fuego y poder obtener los Deltas. Hemos empleado los siguientes rangos: Daño bajo (δNBR : 0,1-0,25 \rightarrow Low \rightarrow Clase 1), daño medio (δNBR : 0,25-0,5 \rightarrow Medium \rightarrow Clase 2) y daño alto (δNBR : $> 0,5$ \rightarrow High \rightarrow Clase 3). Estos rangos no son los comunes usados en análisis de incendios, pero el significado de los valores de δNBR puede variar según la escena para obtener los mejores resultados, ya que hemos tenido una colección de datos más amplia para librar nubes y gap. Por último, se exporta cada clase por separado y el perímetro total del incendio.

2.2.2. Preprocesado de la zona de actuación

Obteniendo el perímetro del incendio la zona quemada, con el software Qgis se seleccionan las áreas con medidas de emergencia realizadas dentro de este, como zonas de gestión (zona con actuación), con 75 muestras en el caso de Hellín. El resto de la zona quemada la consideramos como zonas de no gestión con 2284 muestras, también en este caso. Estas capas han sido obtenidas en el seno de Silvadapt.net. Estas muestras se obtienen de la subdivisión del territorio en distintas clases según orientación, pendiente y severidad del fuego (ver punto siguiente).

Debido a que la metodología empleada para el procesado en GEE es idéntica para los 4 incendios, se va a tomar como ejemplo el caso de Hellín para la explicación técnica de su desarrollo.

2.2.3. Caracterización de la zona del incendio

Se han realizado dos clasificaciones diferentes. Una donde las variables forman parte de la orografía (pendientes y orientaciones), obteniendo 6 clases o categorías diferentes para toda la superficie incendiada, y otra, donde además de las anteriores también se tiene en cuenta la severidad del fuego, con 18 clases.

En el Anejo III. Clasificar la zona del incendio, se pueden ver las imágenes de cómo se han caracterizado las zonas de los incendios.

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

2.2.3.1. Clasificación según pendiente y orientación

Se ha usado el modelo digital del terreno (DTM) de 30 metros de resolución para obtener las pendientes y orientaciones de la zona incendiada y se ha reclasificado cada capa de valor continuo a discreto. Para ello, los rangos de valores son:

- Pendiente (3 categorías): Baja (<15% → Clase 1), Media (15-30% → Clase 2) y Alta (>30% → clase 3).
- Orientación (2 categorías): Umbría (90º-270º → Clase 1) y Solana (<90º; >270º → Clase 2).

Al cruzarlas se obtienen 6 clases o categorías para las distintas zonas afectadas (figura 25. Anejo III).

2.2.3.2. Clasificación de pendiente, orientación y severidad del fuego

A continuación, se ha dividido estas 6 zonas por las clases de severidad del fuego calculadas con el Delta del índice NBR: Bajo (0.1-0.25 → Clase 1), Medio (0.25-0.5 → Clase 2) y Alto (>0.5 → Clase 3). Al cruzarlas tenemos 18 clases correspondientes a las diferentes categorías para toda la superficie incendiada (figura 26. Anejo III).

2.2.4 Índices de vegetación y Deltas calculados

Se han calculado siete índices para toda la superficie incendiada: NBR, NDVI, NDII, MSI, RVI, GCI, EVI2; para aplicar estadística básica y ver cuáles son capaces de detectar diferencias entre zona de actuación y no actuación y por lapsos de 3, 6, y 9 meses, y también entre clases para zona de actuación o no actuación, y por lapso (3-6-9 meses). Estos índices se aplican a diferentes momentos tras el incendio para ver la respuesta o la recuperación de la vegetación a corto-medio plazo. Los lapsos donde los índices se calculan son:

- 3 meses desde el incendio = valor promedio (fecha incendio - 3 meses después)
- 6 meses desde el incendio = valor promedio (6 meses después - 9 meses después)
- 9 meses desde el incendio = valor promedio (9 meses - 12 meses después)

Además, se han calculado las diferencias entre índices con diferentes lapsos:

- Delta 3_6 meses = (índice 6 meses después – índice 3 meses después)
- Delta 6_9 meses = (índice 9 meses después – índice 6 meses después)
- Delta 3_9 meses = (índice 9 meses después – índice 3 meses después)

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

2.2.5. Series temporales de las clasificaciones

Se han comparado tanto las 6 clases como las 18 clases diferenciándolas entre zonas con actuación y sin actuación para todos los índices calculados para la superficie afectada. Este paso sirve para crear las bases de datos donde se intenta posteriormente calcular las diferencias entre las zonas dentro del incendio y ver cómo se comporta cada clase frente a la recuperación de la vegetación en el corto-medio plazo de 9 meses. Esta tabla se genera cuando se exportan los resultados de la plataforma de GEE para trabajar con los análisis estadísticos y poder comprobar las relaciones.

Las columnas de los 3, 6 y 9 meses se han repetido para cada índice y delta (ver tabla 3). Los valores de Actuación son el promedio para cada categoría de las 75 muestras que hay en 6 clases y de las 195 muestras de 18 clases (caso de Hellín).

Zona	Clase	3 meses	6 meses	9 meses
Actuación	Umbria-pdt1			
Actuación	Umbria-pdt2			
Actuación	Umbria-pdt3			
Actuación	Solana-pdt1			
Actuación	Solana-pdt2			
Actuación	Solana-pdt3			
/				
No Actuación	Umbria-pdt1			
No Actuación	Umbria-pdt2			
No Actuación	Umbria-pdt3			
No Actuación	Solana-pdt1			
No Actuación	Solana-pdt2			
No Actuación	Solana-pdt3			

Tabla 3. Ejemplo del formato de base de datos para 6 clases. Fuente: elaboración propia.

La base de datos para 18 clases es idéntica, pero se ha multiplicado cada zona por los tres valores de severidad del fuego (bajo, medio y alto), dando 195 muestras de actuación y 2.284 muestras de no actuación para la zona afectada por el incendio en Hellín.

MATERIAL Y DESARROLLO METODOLÓGICO DEL TRABAJO

2.3. Análisis cuantitativo y cualitativo de la información

Con el programa Excel se ha hecho todo el tratamiento de datos de la muestra de incendios estudiados en este trabajo, y la mayor parte de las comparaciones se han realizado mediante análisis de varianza (ANOVA) de un factor: Tratamiento (A y NA). Las relaciones entre variables fueron analizadas mediante análisis de regresión. Para los análisis estadísticos se ha usado SPSS 20.0.

El análisis de los datos trata de estudiar si dos variables (continua, llamada variable respuesta y categórica, llamada factor), son independientes o no en la zona de estudio. Se organizan las variables y los factores: la variable respuesta es el valor de los índices de vegetación y el factor los tratamientos. Vemos si hay diferencias significativas en el valor de la variable continua según el valor que tome la variable categórica, es decir, si el factor influye en la variable respuesta. El resumen estadístico muestra el recuento de las clases categóricas de cada tratamiento.

Para poder determinar las medidas de emergencia post incendio que han afectado significativamente a la recuperación de la vegetación se ha empleado el valor “p-value” ($\alpha = 0,05$, $\alpha = 0,01$ (1 %) y $\alpha = 0,1$, que son los niveles aconsejados en muchos textos elementales de estadística.

La tabla ANOVA descompone la varianza de los índices de vegetación en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Si el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los índices entre un nivel de Tratamiento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. Si la muestra presenta varianzas heterogéneas, se ha usado una prueba no paramétrica.

III. VALORACION DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

III. Valoración de la efectividad de las medidas a corto plazo

En la evaluación de las obras de emergencia para la conservación de suelo en las zonas afectadas por los incendios de Hellín, Cazorla, Arbo y Llutxent, se ha diferenciado entre áreas que presentan dichas actuaciones y zonas control, sin actuación alguna. La selección de las zonas de estudio se hizo de modo que reflejaran las características dominantes en la zona afectada por cada incendio.

3.1. Por indicadores de naturaleza satelital

Según el comportamiento general de los índices espectrales de vegetación (SVI), se han seleccionado los más sensibles para el objetivo de este trabajo: identificar los índices satelitales más susceptibles al cambio de la cobertura vegetal para estudiar la efectividad de los tratamientos post incendio en lapsos posteriores al incendio y su ejecución. Inicialmente, se han revisado los valores generales de los 7 índices utilizados en este trabajo para las 4 zonas analizadas (figura 27. Anejo VI. Gráficos y tablas resultado de la Valoración).

A continuación, se analiza el cambio en el tiempo de estos índices para las respectivas zonas afectadas por los incendios de Hellín, Cazorla, Arbo y Llutxent (figuras 28. Anejo IV). Se ha prescindido del Delta 6_9 por no ser susceptible al cambio de la cobertura vegetal en ninguna zona de gestión, y se ha aplicado la media de los 4 incendios para los otros Deltas de cada índice (ver figura 10).

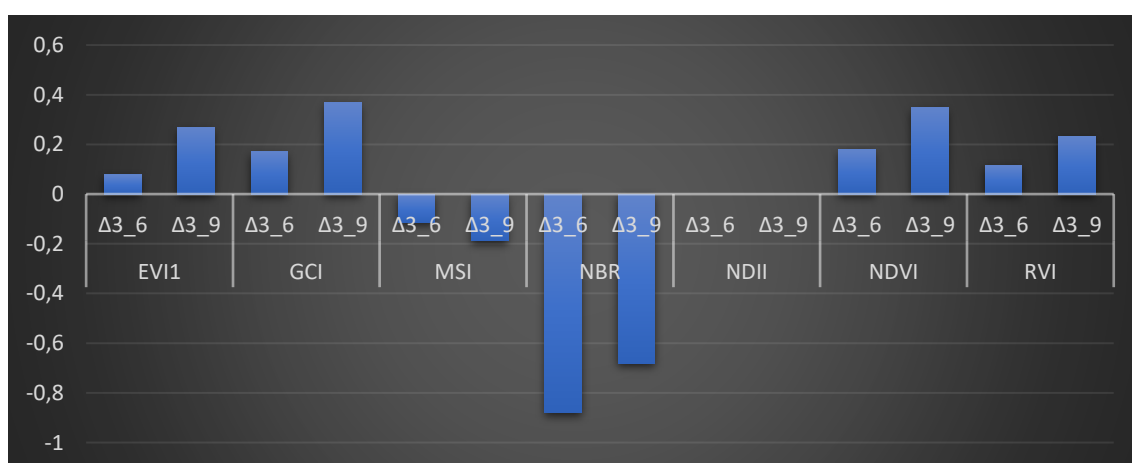


Figura 10. Media de los 4 incendios para los deltas de los 7 índices. Fuente: elaboración propia.

VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

Para comparar mejor qué índice recoge las dinámicas temporales, se han normalizado con máximo y mínimo (ver figura 11).

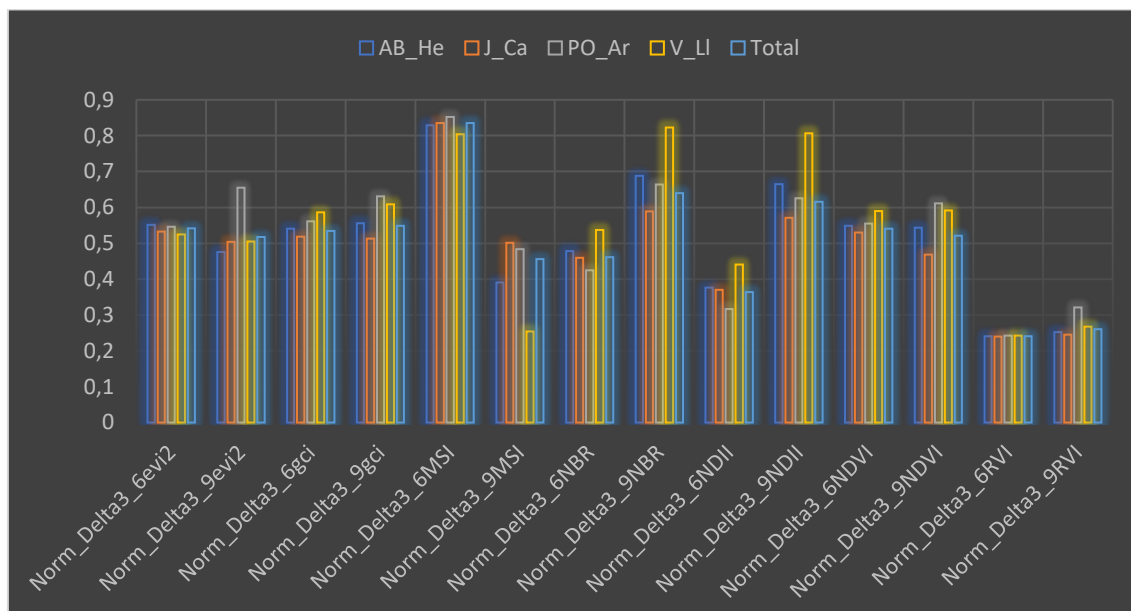


Figura 11. Normalizados con máx. y mín. los distintos índices para cada zona y el total (barra negra). Hellín: (AB_He; Cazoria: J_Ca; Arbo: PO_Ar y Llutxent: V_LI). Fuente: elaboración propia.

Los diagramas de cajas (box-plots) es un método estándar para representar gráficamente una serie de datos mostrando a simple vista la mediana y los cuartiles, además de representar los valores atípicos. Estos box-plots (ver figura 12) nos indican que los índices NBR y NDII son muy parecidos. Dado que NBR es más usado en un contexto de Incendios Forestales, hemos descartado el NDII.

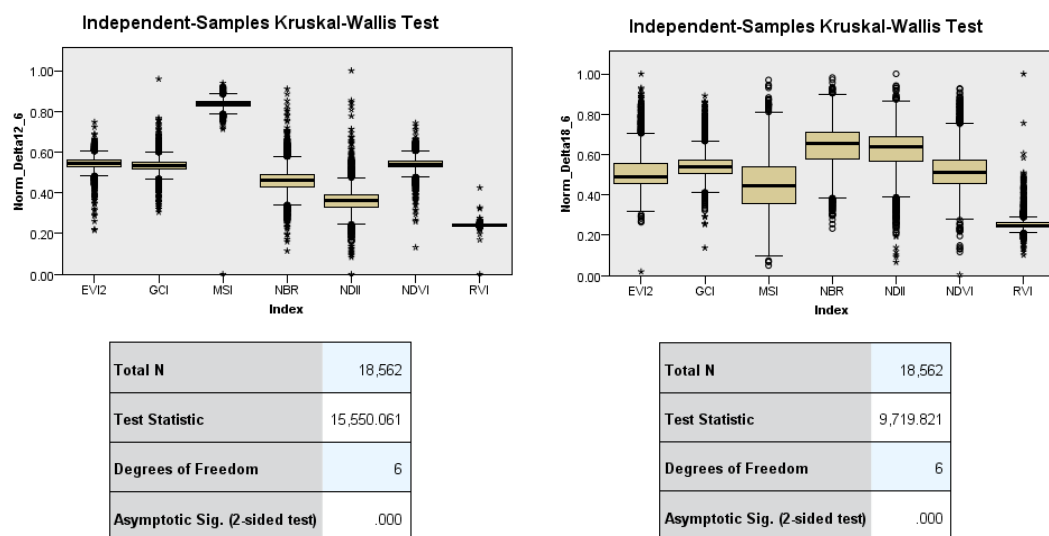


Figura 12. Diagrama de cajas (box-plots) para representar las medianas y cuartiles y los valores atípicos.

VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

Las pruebas de comparación intergrupos dicen que solo EVI2 y NDVI no discriminan entre ellos (figura 12). Por lo tanto, debido a su mayor utilización y respaldo por un mayor número de estudios, nos hemos quedado con NDVI y desechado EVI2.

Para seguir con la selección, GCI es otro candidato a la vista de los gráficos por su analogía con los dos anteriores. Si en el análisis estadístico filtramos por tratamiento, los tres índices: NDVI, EVI2 Y GCI; no difieren entre sí en las 6-18 clases establecidas. Por lo tanto, también podemos prescindir del índice GCI por los motivos ya mencionados.

Por último, el índice RVI tiene muy poca variación en comparación con el resto, de modo que también queda fuera de la selección ya que nos interesan aquellos índices más sensibles que son capaces de captar la variación del ecosistema.

Es importante que cuando hemos filtrado para tratamiento (Treat = 1) nuestros criterios se han mantenido (ver figura 13). Por lo tanto, se mantiene la selección de estos tres índices solo: MSI, NBR y NDVI, desechando los otros 4.

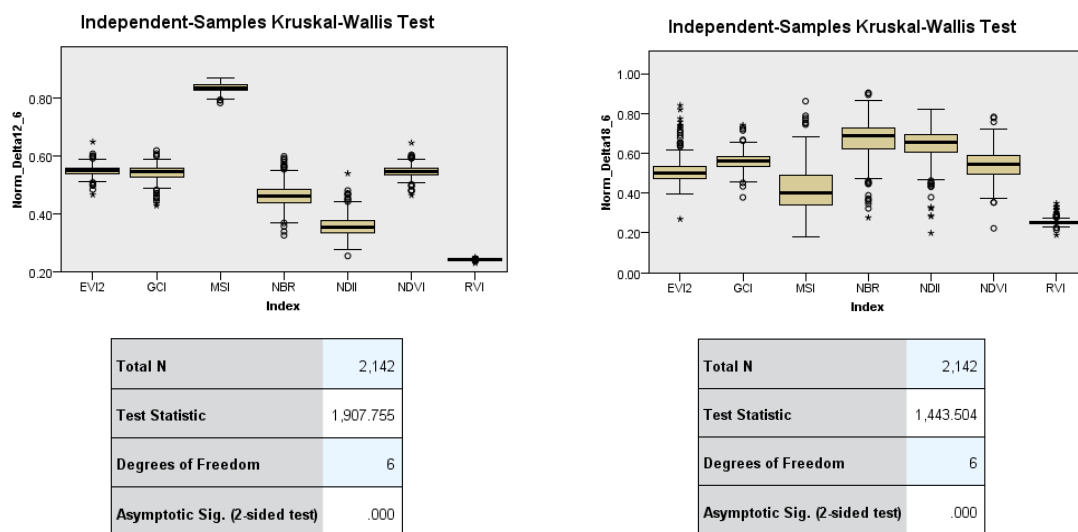


Figura 13. Diagrama de cajas (box-plots) filtrado por tratamiento (Treat = 1)

Además de estudiar la cobertura vegetal, es interesante ver como los tratamientos la afectan, por lo que es posible prescindir de alguno de los tres índices finales por su mayor o menor sensibilidad al efecto del tratamiento. Para ello, se ha calculado $\ln(T/C)$ (figura 29. Anejo IV), observando que los tres dan valores de delta en el corto plazo (Delta3_6) muy similares entre Tratamiento y Control, especialmente, viendo las columnas de totales para los 4 incendios. Para Delta3_9 hay mayores diferencias entre las zonas de gestión, mejorando los valores para Tratamiento. Debido a esto, se

VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

mantiene la selección de estos tres índices: MSI, NBR, y NDVI por ser susceptibles al cambio de la cobertura vegetal y al tipo de gestión realizada.

3.2. Por tipo de gestión post incendio (actuación y no actuación)

Con la selección de los índices que mejor responden para este estudio, por su sensibilidad al cambio y regenerado de la vegetación para lapsos temporales, apreciando también ese cambio entre tratamiento y control, lo siguiente es ver los valores reales para cada uno de los 3 índices con y sin actuación de emergencia post incendio, sin diferenciar nada más (figura 30. Anejo IV).

Llama la atención que los valores de los índices son siempre más favorables al regenerado de la vegetación en las zonas control que con tratamiento en los tres momentos post incendio evaluados: 3, 6 y 9 meses. Sin embargo, al observar las pendientes, es decir, la diferencia o Delta entre estos lapsos, parece que los tratamientos muestran mayor eficacia en el aumento de cobertura vegetal. Por lo cual, pasamos a un análisis más detallado. Tras realizar un análisis estadístico que nos diga donde hay diferencias significativas, la prueba “t” de Student nos dice que las observaciones comentadas en el párrafo anterior son estadísticamente significativas excepto en un par de casos (Delta3_6MSI Y Delta3_6NBR), tal y como está marcado en la tabla 9 del Anejo IV.

Como alternativa, la comparativa se hace agrupando primero por incendio y promediando tratamiento y control en cada caso y luego promediando para los cuatro incendios (medias de las medias de tratamiento y control). De este modo, no aparecen diferencias significativas entre tratamiento y control en ningún caso, lo que hace pensar que el efecto del tratamiento no es generalizable a todas las situaciones. No obstante, los 3 índices seleccionados, siguen mostrando un comportamiento similar al cambio de la cobertura vegetal para los 3 momentos temporales y en la diferencia entre ellos o deltas (figura 31, Anejo IV).

3.3. Por tipo de tratamiento según la zona (ecoregión y/o bioclima)

A tenor de lo observado en el punto previo, es crucial analizar los resultados individualizados por zona, donde el comportamiento general se mantiene en 3 de las 4 ecorregiones (Albacete, Pontevedra y Valencia), mientras que en Jaén la tendencia es diferente (figura 32, Anejo IV). Para las tres primeras zonas, y evaluando MSI Y NBR, los valores son más favorables para tratamiento, destacando Pontevedra con el Delta3_9. En Jaén, ocurre lo contrario, con mejores resultados en la zona control, pero con valores más favorables para Delta3_6, especialmente.

VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

Solo el NDVI se mantiene con patrones similares en todos los bioclimas analizados (figura 33, Anejo IV), con valores superiores en las zonas con tratamiento, exceptuando el caso de Pontevedra para Delta3_6. Cabe destacar que, para este Delta, MSI y NBR recogen valores más favorable en las zonas con tratamiento que en la zonas control.

3.4. Por factores de media escala: fisiografía

Algunos estudios demuestran la importancia del factor pendiente para explicar las tasas de recuperación de la vegetación. La orientación modifica sustancialmente las condiciones microclimáticas de las laderas. Por ello, se ha evaluado cada índice según la fisiografía de la zona para los lapsos de 3, 6 y 9 meses 6 (figura 34, Anejo IV).

Evaluando la pendiente y orientación de las zonas afectadas por los incendios estudiados, para MSI y NBR, los valores son más favorables para la regeneración en zonas con pendiente alta (>50%) y orientación Sur (solana), mientras que para NDVI, ocurre lo contrario, con valores más favorables para poca pendiente e indiferencia entre solana y umbría. Si analizamos los Deltas o diferencias entre lapsos temporales, se obtienen resultados más favorables en pendiente baja (<30%) y solana para el Delta3_9. Con el índice NDVI, esto ocurre también pero para Delta3_6 (figura 35, Anejo IV).

3.5. Por efecto de la severidad del fuego

El incendio forestal descontrolado puede ser un fuerte trauma biológico que, además, en los casos de fuegos con elevada intensidad, aumenta el riesgo de erosión hídrica. Los incendios de baja o moderada intensidad pueden aumentar la fertilidad del suelo y como consecuencia la infiltración. Por lo tanto, la tasa media de erosión varía según la intensidad del fuego.

Para ver el efecto de la severidad del fuego en la recuperación del ecosistema (figura 36, Anejo IV), se han evaluado los tres índices seleccionados (MSI, NBR y NDVI) según las tres clases de severidad valoradas en este trabajo: Baja (0.1-0.25 → Clase 1), Media (0.25-0.5 → Clase 2) y Alta (>0.5 → Clase 3). El regenerado de la vegetación presenta mejores resultados en zonas con severidad media y baja para los totales de los índices MSI y NBR durante el lapso analizado, pero los deltas tienen valores más favorables para severidad del fuego alta, indicando que hay una mayor recuperación del ecosistema tras el incendio cuando éste ha sido muy severo. Sin embargo, para NDVI, el regenerado de la cobertura vegetal responde mejor en zonas donde la severidad del fuego ha sido baja, aunque para Delta3_9, los valores mejoran para severidad alta.

VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

Como ya se ha mencionado anteriormente para otros factores considerados en este trabajo, MSI y NBR también comparten idénticos valores para las características del fuego y la posterior recuperación del ecosistema, siendo NDVI la excepción. Viendo esta disparidad en los resultados entre NDVI y los otros dos índices, para todos los factores y gestiones analizadas que afectan en la recuperación del ecosistema, se puede prescindir de él, y seleccionar solo los índices MSI y NBR para este estudio. Esto se debe a que la diferencia entre la reflectancia visible e infrarrojo cercano de la cubierta vegetal no perciba el regenerado de igual forma que los índices de estrés por humedad (MSI) y de relación de quemado (NBR).

3.6. Integración de fisiografía, severidad, zona y tratamiento.

Para valora de momento, como se integran los factores fisiográficos (pendiente y orientación) y la severidad del fuego con las características bioclimáticas propias del lugar, y ver la respuesta de esta integración en cómo ha respondido la vegetación a la perturbación del ecosistema por el paso del incendio, se calculan las medias de las medias de dos grupos (Delta3_6 y Delta3_9), por ser un análisis estadístico más detallado, para los dos índices finalmente seleccionados: MSI y NBR; sin distinguir entre tratamiento y control.

Este análisis, se realiza para las clases o categorías de las zonas afectadas por estos incendios (17 clases, ya que una de las 18 categorías, solana_pdt3_f3, no aparece en ninguna zona afectada por estos incendios). Se puede observar (ver figura 14), que los dos índices muestran valores similares, por lo que avala la validez de los resultados.

Como es lógico, el Delta que distingue mayor cambio en la cobertura vegetal es el Delta que diferencia los dos lapsos temporales más lejanos (Delta3_9). Las clases que presentan mayores valores de cambio en la vegetación (ver figura 14), para los dos índices y este Delta, son: clase 1 (Umbría_pdt1_f1) y clase 2 (Umbría_pdt1_f2). También destaca, en menor medida, la clase 10 (Solana_pdt1_f1).

VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

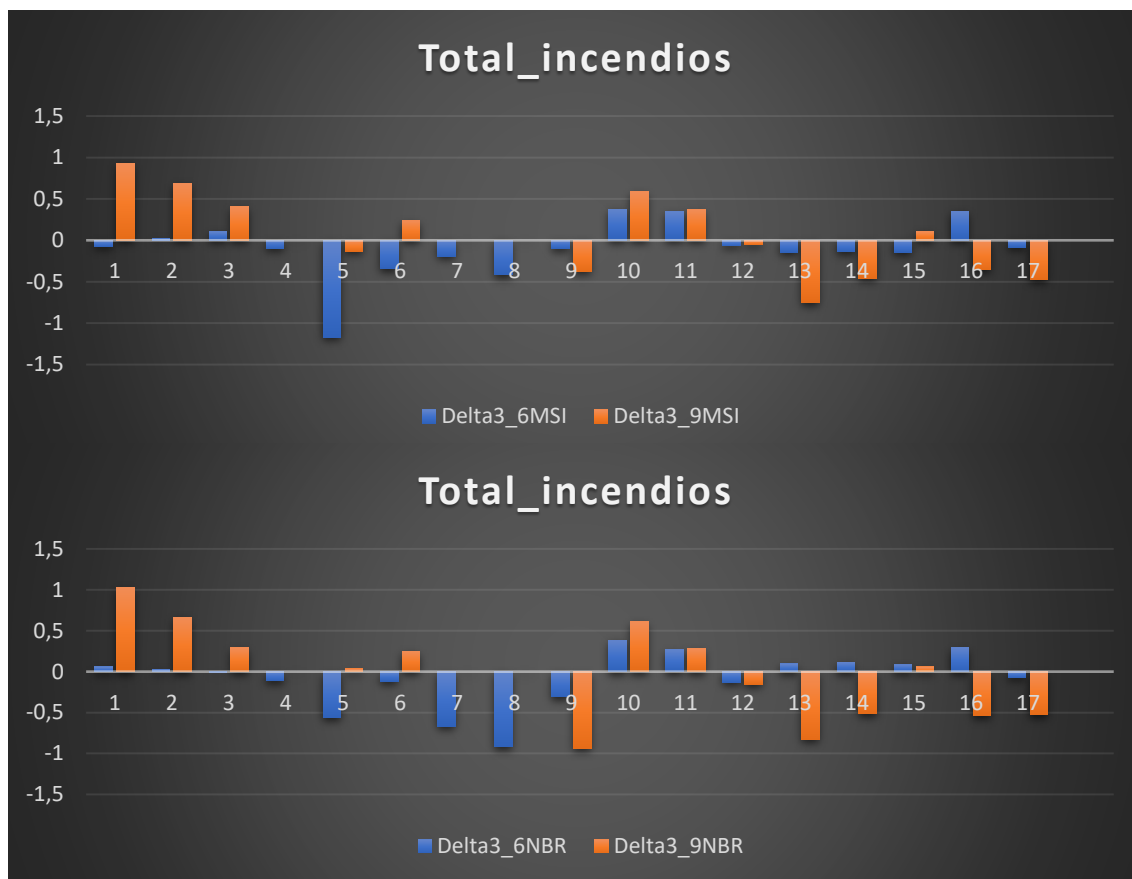


Figura 14. Integración de fisiografía, severidad y zona, para los índices MSI y NBR. Fuente: elaboración propia.

Aplicando, de nuevo, las medias de las medias de dos grupos, pero en este caso: tratamiento y control, e, igualmente, para las 17 clases de las zonas afectadas (ver tabla 4), se obtienen los valores de los índices y sus deltas para ver si son más favorables para las zonas control (C) o para las zonas con actuación (A), ambas pertenecientes a la misma categoría o clase.

Se puede observar (tabla 4), que en las clases 5 y 13 (Umbría_pdt2_f2 y Solana_pdt2_f1) es donde mejor responde el regenerado de la cobertura vegetal a los tratamientos de emergencia post incendio, para los totales de los índices en lapsos de 3 y 9 meses. En el resto de clases o categorías, parece que, no intervenir resulta más eficaz, debido a que se consigue mayor regenerado de la cobertura vegetal en las zonas control. Sin embargo, cuando analizamos los deltas, resulta interesante ver como las diferencias de cambio de cobertura vegetal producidas entre lapsos temporales (Delta3_6 y Delta_9) adquieren valores más favorables para zonas con actuación, exceptuando las clases 5 y 13, donde ahora el regenerado es mayor en las zonas control. Las clases 8 y 9 (umbría con pendiente alta y severidad media y alta), no responden favorablemente a estos tratamientos.

VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

CLASES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
MSI_3month	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C
MSI_9month	C	C	A	C	A	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C
NBR_3month	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C
NBR_9month	C	C	A	C	A	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C
Delta3_6MSI	A	A	A	A	C	C	A	C	C	A	C	C	C	C	A	A	A
Delta3_9MSI	A	A	A	A	C	A	A	C	C	A	A	A	C	C	A	C	C
Delta3_6NBR	A	A	A	A	C	C	A	C	C	A	C	C	C	A	A	A	A
Delta3_9NBR	A	A	A	A	C	A	A	C	C	A	C	C	C	A	A	C	C

Tabla 4. Integración de fisiografía, severidad, zona y tratamiento para los índices MSI y NBR y sus deltas, indicando si el índice da mayor recuperación de la cobertura en zonas control “C” o en zonas con actuación “A”. Fuente: elaboración propia.

3.7. Inventarios de campo para validar los resultados.

En los inventarios de campo realizados por los integrantes de Silvadapt.net en las distintas zonas afectadas, el indicador usado ha sido el índice de biodiversidad (ver Anejo V. Índice de biodiversidad), sin atender al regenerado de la cobertura vegetal frente a la cubierta de suelo desnudo.

Debido a esto, para validar el estudio previo realizado con información satelital, se han inventariado, en nuestro caso y por proximidad, dos parcelas con tratamientos de emergencia (acordonado) y zona control, para la restauración de la zona afectada en Lluxent (Valencia), tomando como indicador el porcentaje de cobertura de suelo. Este estadillo, se ha realizado 3 años después del incendio y de la ejecución de estas obras (2018-2021), para ver la respuesta de la vegetación (herbácea y leñosa) independientemente de la longevidad de su ciclo reproductivo. Para ello, se han realizado dos transectos perpendiculares a estos tratamientos, y otros dos en zonas aledañas que sirvan de control (total = 4 transectos), ambas con semejantes características fisiográficas y de severidad del fuego.

Los resultados obtenidos en este estadillo de campo (ver tabla 5), muestran que para la parcela 1, en la zona de actuación tenemos 83% de cubierta vegetal y 17% de cobertura de suelo (transecto 1) frente al 72% de cubierta vegetal y 28% de suelo desnudo en la zona control o sin actuación (transecto 2). Para la segunda parcela, en la zona con tratamiento de emergencia post incendio tenemos 79% de cobertura vegetal y 21% de suelo desnudo (transecto 3) frente al 68% de cubierta vegetal y 32% de suelo desnudo en la zona control (transecto 4).

VALORACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS A CORTO PLAZO

Acordonado 1		Control 1		Acordonado 2		Control 2	
Vegetación	83%	Vegetación	72%	Vegetación	79%	Vegetación	68%
Suelo	17%	Suelo	28%	Suelo	21%	Suelo	32%

Tabla 5. Porcentaje de cobertura para tratamiento y control en Llutxent (Valencia). Fuente: elaboración propia.

Esto quiere decir que, para los mismos factores de media escala (pendiente y orientación) y severidad del fuego, en la zona de Llutxent (Valencia), con un bioclima Mediterráneo litoral, las obras de emergencia realizadas, para la restauración post incendio del ecosistema, muestran mayor eficacia que las zonas control, donde no se ha realizado actuación alguna.

En conclusión, para el estudio del regenerado de la cobertura vegetal, el inventario de campo realizado en Llutxent muestra la eficacia de los tratamientos de emergencia post incendio, para el lapso de 3 años desde el incendio y ejecución de estas obras.

**IV. CRITERIOS QUE CONSIDERAR EN LA PLANIFICACIÓN Y
CONCLUSIONES**

CRITERIOS QUE CONSIDERAR EN LA PLANIFICACIÓN Y CONCLUSIONES

IV. Criterios que considerar en la planificación y conclusiones

A lo largo del presente estudio se ha pretendido evaluar la eficacia de los tratamientos de emergencia post incendio como medidas de conservación de suelo, analizando distintos indicadores de naturaleza satelital y realizando inventario de campo para poder validar los resultados, y con ello, desarrollar criterios que optimicen la ejecución de estas obras según factores de media escala y severidad del fuego, además de contrastar los resultados para diferentes ecorregiones y/o bioclimas de España. A continuación, se indican las diferentes conclusiones que se han alcanzado:

- El replicado de la metodología gracias a la plataforma Google Earth Engine (GEE), ha facilitado el análisis de datos de los distintos incendios obtenidos mediante información satelital comparable y la categorización de las zonas afectadas siguiendo patrones similares.
- Las zonas afectadas por los incendios estudiados (Hellín, Cazorla, Arbo y Llutxent) son muy diferentes entre sí, en cuanto a características fisiográficas (pendiente y orientación) y severidad del fuego, lo que ha ocasionado que falten clases o categorías en las clasificaciones (clases_6 y clases_18) de las distintas zonas categorizadas. Lo mismo ocurre cuando comparamos las pocas zonas de actuación, donde se han realizado estos tratamientos, frente al mayor número de zonas sin actuación, que prácticamente coincide con la zona afectada por el incendio.
- Para la valoración de los resultados, hay que considerar que no se han tenido en cuenta los componentes bioclimáticos para la ponderación de los resultados, como las precipitaciones de los meses posteriores al incendio y antes de la intervención para las obras de restauración analizadas, en cada uno de los incendios seleccionados para este trabajo. Igualmente, no queda reflejado como perjudica la ejecución de los tratamientos de emergencia (suelo compactado y trillado por la maquinaria) al inicio de la recuperación de la vegetación, principalmente herbáceas.
- Los índices o indicadores de naturaleza satelital más sensibles al cambio de la cobertura vegetal y que mejor separan los lapsos de 3, 6 y 9 meses de forma significativa (NBR, MSI), son los más empleados en estudios para detectar cambios en la vegetación cuando se analizan series temporales.
- A la hora de comparar los índices evaluados entre zonas con actuación y sin actuación, se puede observar cómo los deltas o diferencias entre lapsos tienen siempre valores más elevados en Tratamiento que en Control. Sobre todo, en Delta3_9, que es la diferencia entre lapsos más lejanos (entre el inicio y el final del periodo analizado). Sin embargo, pocas son las zonas donde el tratamiento de emergencia post incendio consiga que los valores de los índices de vegetación

CRITERIOS QUE CONSIDERAR EN LA PLANIFICACIÓN Y CONCLUSIONES

seleccionados superen a la zona control. Esta diferencia de resultados, entre los índices y sus deltas, para Tratamiento y Control, se debe a que en el corto plazo para evaluar la recuperación del ecosistema (periodo seleccionado con lapsos de 3, 6 y 9 meses desde el incendio), no es suficiente tiempo para ver el efecto de los tratamientos, debido a que la ejecución de estas obras puede mermar el regenerado en los meses posteriores al incendio. Por ello, los totales de los índices son más favorables para Control y los deltas para Tratamiento.

- Para las características fisiográficas de las zonas afectadas, a medida que la pendiente es más elevada los valores de los deltas son menos favorables en todos los índices, mientras que para la orientación, los valores son más altos en umbría para Delta3_6, mejorando después en solana para Delta3_9, pues se entiende que la dinámica de la vegetación también difiere.
- Como se ha mencionado antes, por las referencias relacionadas con las características del fuego, era de esperar, que a medida que la severidad del fuego aumenta, los valores totales de los índices son más bajos durante todo el lapso analizado, pero tienen valores más altos de deltas indicando que hay más recuperación de la cobertura vegetal tras el incendio.
- Al tener todas las componentes (fisiográfica- severidad) en cuenta y englobando todos los incendios estudiados en este trabajo, solo las clases 13 y 15 (Umbría_pdt2_f2 y Solana_pdt2_f1) son donde mejor responde el regenerado de la cobertura vegetal a los tratamientos frente a las zonas control, para los dos índices en lapsos de 3 y 9 meses. Sin embargo, cuando analizamos los deltas, resulta interesante ver como las diferencias de cambio de cobertura vegetal producidas entre lapsos temporales (Delta3_6 y Delta_9) adquiere valores más favorables para zonas con actuación, exceptuando las clases 5 y 13, donde, por el contrario, el regenerado es mayor en las zonas control.
- Dado que este análisis evalúa la recuperación inmediata tras un incendio, estas respuestas, principalmente, son para las plantas herbáceas y rebrotadoras que tienen un ciclo de reproducción más corto. Para analizar la recuperación de las especies leñosas de germinación obligada, debe contemplarse un abanico de tiempo más amplio. Por ello, el inventario realizado en Lutxent (Valencia), para validar los resultados obtenidos con los índices de vegetación de origen satelital, muestra que los valores más favorables para el regenerado de la cobertura vegetal, tanto para especies herbáceas como leñosas, se dan en las zonas con tratamiento, con un periodo de tiempo de 3 años desde el incendio y la ejecución de las obras de restauración (año 2018) hasta la realización del estadillo de campo (año 2021).
- Estas medidas, obtenidas con este estudio, apuntan a que las actuaciones de emergencia forestal post incendio, además de favorecer el regenerado de la vegetación herbácea, y leñosa en el caso comprobado de Valencia, tratan de proteger el suelo de la erosión de las primeras lluvias torrenciales tras el verano,

CRITERIOS QUE CONSIDERAR EN LA PLANIFICACIÓN Y CONCLUSIONES

según las características fisiográficas y severidad del fuego de la zona de actuación, respetando así las zonas donde los tratamientos tienen menor eficacia para la recuperación del ecosistema (clases 8,9 y 17, ya que 18 no hay, por pdt3), donde la realización de diques u obras de fábrica para el control de la erosión puede obtener mejores resultados.

Por último, con los criterios adquiridos en este trabajo, se planifica la localización más efectiva de los tratamientos de emergencia para los incendios analizados (Hellín en Albacete, Cazorla y las Villas en Jaén, Arbo en Pontevedra y Llutxent en Valencia) por categorías o clases según pendiente, orientación y severidad del fuego. No todas las categorías o clase tienen zona con actuación y control, por lo que quedan descartadas para evaluación.

Para la zona afectada por el incendio en Hellín (ver tabla 6), la efectividad de los tratamientos frente a la no actuación se consigue para el delta o diferencia entre lapsos más lejanos (desde los 3 a los 9 meses desde la intervención). En la evaluación de los índices por cada lapso, los valores más favorables se dan en las zonas control, exceptuando las clases 7, 12 y 15. Claramente, se indica localizar estos tratamientos en la categoría 7.

En Cazorla sucede lo contrario (ver tabla 7), siendo los valores de los índices más favorables para tratamiento cuando se analizan los lapsos por separado. Los valores de los deltas obtienen, para este caso, mejores resultados para las zonas control. Se puede indicar la localización de los tratamientos en las clases 15 y 17.

En el caso del incendio de Arbo (ver tabla 8), los tratamientos resultan eficaces siempre para los deltas, especialmente para la diferencia de 3- 9 meses desde la intervención. Se puede planificar la localización de las medidas de emergencia en las clases 5 y 13.

Para la zona incendiada en Llutxent (Valencia), solo existen zonas afectadas incluidas en la categoría o clase 3, por lo que no se ha elaborado la tabla correspondiente. Sin embargo, se puede decir que, para esta clase, los valores de los índices para cada lapso temporal son más favorables para control. En cambio, para las diferencias de estos lapsos o deltas, los valores son más favorables para tratamiento. Estos criterios, para este incendio, han sido validados con el inventario de campo realizado a los tres años del incendio y ejecución de las obras de emergencia.

Con este trabajo, ha sido interesante comprobar como la evaluación de índices de naturales satelital puede proporcionar criterios para el diagnóstico de localización y ejecución de las medidas de emergencia post incendio realizadas en España, y poder planificar para los incendios estudiados la gestión de restauración según factores de media escala (pendiente y orientación) y severidad del fuego.

Clase 1. Umbría_pdt1_f1
Clase 2. Umbría_pdt1_f2
Clase 3. Umbría_pdt1_f3
Clase 4. Umbría_pdt2_f1
Clase 5. Umbría_pdt2_f2
Clase 6. Umbría_pdt2_f3
Clase 7. Umbría_pdt3_f1
Clase 8. Umbría_pdt3_f2
Clase 9. Umbría_pdt3_f3
Clase 10. Solana_pdt1_f1
Clase 11. Solana_pdt1_f2
Clase 12. Solana_pdt1_f3
Clase 13. Solana_pdt2_f1
Clase 14. Solana_pdt2_f2
Clase 15. Solana_pdt2_f3
Clase 16. Solana_pdt3_f1
Clase 17. Solana_pdt3_f2
Clase 18. Solana_pdt3_f3

CRITERIOS QUE CONSIDERAR EN LA PLANIFICACIÓN Y CONCLUSIONES

HELLIN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
MSI_3month	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	A	A	C	A		
MSI_9month	C	C	A	C	C	A	A	A	C	C	C	A	C	A	A		
NBR_3month	C	C	A	C	C	C	A	C	C	C	C	A	C	C	A		
NBR_9month	C	C	A	C	C	A	A	A	C	C	C	A	C	C	A		
Delta3_6MSI	C	C	C	A	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C		
Delta3-9MSI	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	A	C		
Delta3_6NBR	C	C	C	A	C	C	A	C	C	C	C	C	A	C	C		
Delta3_9NBR	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A		

Tabla 6. Planificación de la gestión para el incendio de Hellín (Albacete). Fuente: elaboración propia.

CAZORLA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
MSI_3month				A	A	C	A	A	A	A	C	C	A	A	A	C	A
MSI_9month				C	C	C	A	C	A	A	C	A	A	C	A	C	A
NBR_3month				A	A	C	A	A	A	A	A	C	A	A	C	C	A
NBR_9month				A	A	C	A	C	A	A	C	A	A	C	A	C	A
Delta3_6MSI				C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	A	A
Delta3-9MSI				C	C	A	C	C	C	C	C	A	C	C	A	C	C
Delta3_6NBR				C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A
Delta3_9NBR				C	C	A	C	C	C	C	C	A	C	C	A	C	C

Tabla 7. Planificación de la gestión para el incendio de Cazorla (Jaén). Fuente: elaboración propia.

ARBO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
MSI_3month					A	C							A	C	C		
MSI_9month					A	C							A	C	C		
NBR_3month					A	C							A	C	C		
NBR_9month					A	C							A	C	C		
Delta3_6MSI					C	A							A	A	A		
Delta3-9MSI					A	A							A	A	A		
Delta3_6NBR					C	A							C	A	A		
Delta3_9NBR					A	A							A	A	A		

Tabla 8. Planificación de la gestión para el incendio de Arbo (Pontevedra). Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

V. REFERENCIAS

REFERENCIAS

V. Referencias

BAUTISTA, S.; GIMENO, T.; MAYOR, A.G.; GALLEGO, D., 2004. El tratamiento de la madera quemada tras los incendios forestales, en: Avances en el estudio de la gestión del monte mediterráneo. Valencia: Fundación CEAM. 547-570 pp. ISBN 84-921259-3-4

CHUVIECO, E.; GIGLIO, I.; JUSTICE, C., 2008. Global characterization of fire activity: toward defining fire régimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 14: 1488-1502.

DIAZ, R.; LLORET, F.; PONS, X., 2003. Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 1751-1763.

DOERR, S. H.; SHAKESBY, R.A.; BLAKE, W.H.; CHAFER, C.J.; HUMPHREYS, G. S.; WALLBRINK, P. J., 2006. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, 319 : 295-311.

EPTING, J.; VERBYLA, D.; SORBEL, B., 2005. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 96 : 328-339.

FERRAN, A. y R. VALLEJO, 1992. Litter dynamics in post-fire successional forests of *Quercus ilex*. *Vegetation*, vol.100 : 239-246 pp.

FOLTZ, R.B., ROBICHAUD, P.R., 2013. Effectiveness of pos-fire burned Area Emergency Response (BAER) Road treatments: results from three wildfires. USDA Forest Service RMRS –GTR-313.

GARTNER, J.D., 2002. Erosion from watersheds after wildfire : an evaluation of log erosion barriers, en : Colorado Convention Center Exhibit Hall, Denver Annual Meeting (October 27-30, 2002) T100. Geomorphic Impacts of Wildfire.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N., 1996. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ* 58, 289-98

HARDISKY; METRO, A.; DAIBER, F. C.; ROMANO, C. T.; KLEMAS, V., 1984. Remoto sintiendo de biomasa y antena neta anual productiva primaria de una marisma. *Detección remota de Environment* 16: 91-106. Doi: 10.1016 / 0034-4257 (84) 90055-5.

HUDAK, A. T.; MORGAN, P.; BOBBITT, M. J.; SMITH, A. M. S.; LEWIS, S. A.; LENTILE, L. B.; ROBICHAUD, P. R.; CLARK, J. T.; MCKINLEY, R. A., 2007. The Relationship of Multispectral Satellite Imagery to Immediate Fire Effects. *Fire Ecology Special Issue*, 3: 64-90.

JIANG, Z.; HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ* 112, 3833-3845.

REFERENCIAS

KEY, C. H.; BENSON, N. C., 1999. Measuring and remote sensing of burn severity, en: NEUENSCHWANDER, L.F., RYAN, K.C. (Eds.), Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop, vol. II (p. 284). Moscow, ID: University of Idaho and International Association of Wildland Fire.

KEY, C. H., 2006. Ecological and Sampling Constraints on Defining Landscape Fire Severity. *Fire Ecology*, 2: 34-59.

KEY, C. H. y BENSON, N. C., 2006. Landscape Assessment (LA), en: LUTES, D. C. ; KEANE, R. E.; CARATTI, J. F.; KEY, C. H.; BENSON, N. C.; SUTHERLAND, S.; GANGI, L. J. (eds.) FIREMON. Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

LOPEZ, M. J. y CASELLES, V., 1991. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto international*, 6: 31-37.

MILLER, J. D. y YOOL, S. R., 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.

MILLER, S.; ELLIOT, B.; ROBICHAUD, P.; FOLTZ, R.; FLANAGAN, D.; BROOKS, E., 2014. De las cuencas hidrológicas a la web: herramientas en línea para modelar la erosión del suelo forestal. *Science You Can Use Bulletin*. Edición 14. Fort Collins, CO: Estación de Investigación de las Montañas Rocosas. 10 pp.

MILLER, M. E.; ELLIOT, W. J.; BILLMIRE, M.; ROBICHAUD, P. R.; ENDSLEY, K. A., 2016. Rapid-response tools and datasets for post-fire remediation: Linking remote sensing and process-based hydrological models. *International Journal of Wildland Fire*. 25: 1061-1073.

MOODY, J. A.; SHAKESBY, R. A.; ROBICHAUD, P. R.; CANNON, S. H.; MARTIN, D. A., 2013. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews*, 122: 10-37.

NAVARRO MUÑOZ, A., 2005. El empleo de fajinadas y empalizadas en la corrección hidrológica de laderas afectadas por incendios forestales, en: IV Congreso Forestal Español, Zaragoza. Libro de resúmenes, conferencias y ponencias. Mesa Temática 6: Protección contra incendios forestales. 269 pp. I.S.B.N.: 84-921265-7-4

PATTERSON, M. W. y YOOL, S. R., 1998. Mapping Fire-Induced Vegetation Mortality Using Landsat Thematic Mapper Data : A Comparison of Linear Transformation Techniques. *Remote Sensing of Environment*, 65: 132-142.

PAUSAS, J.G.; CARBO, E.; CATURLA, R. N.; GIL, J. M.; VALLEJO, R., 1999. Post-fire regeneration patterns in the Eastern Iberian Peninsula. Elsevier, *Acta Ecología*, vol.20, núm. 5: 499-508 pp.

REFERENCIAS

PEARSON, R. L. y MILLER, L. D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado, en: Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment, ERIM International, Ann Arbor, MI. 1357-1381 pp.

RAFTOYANNIS, Y. and SPANOS, I., 2005. Evaluation of log and branch barriers as post-fire rehabilitation treatments in a Mediterranean pine forest in Greece. International Journal of Wildland Fire, vol.14 : 183-188 pp.

RIVAS-MARTÍNEZ, S., 1987. Memoria del mapa de series de vegetación de España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. I.S.B.N.: 84-85496-25-6

ROBICHAUD, P.R.; BEYERS, J.L.; NEARY, D.G., 2000. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. USDA Forest Service. General Technical Report. RMRS-GTR.-63.

ROBICHAUD, P.R. and BROWN, R.E., 2002. Silt fences: an economical technique for measuring hillslope soil erosion. USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-94. Fort Collins, CO. 24 pp.

ROCK, B. N. ; VOGELMANN, J. E. ; WILLIAMS, D. L.; VOGELMANN, A. F.; HOSHIZAKI, T., 1986. Remote detection of forest damage. Bioscience 36, 439-445.

ROGAN, J. y YOOL, S. R., 2001. Mapping fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo Mountains, Arizona and New Mexico. International Journal of Remote Sensing, 22: 3101-3121.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Progress Report RSC 1978-2. Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.

RUBIO, J.L., 1988. Agua y desertificación en la Comunidad Valenciana. Jornadas sobre El Agua, factor del desarrollo Valenciano, Generalitat Valenciana, Universidad Politécnica de Valencia [Comunicado de prensa].

SANTANA, V.M.; VALLEJO, V.R.; ALLOZA, J.A.; RODRIGUEZ, E.; SALESA, D., 2021. Seguimiento del estado de regeneración en el incendio de Llutxent. Conselleria d'Agricultura, Desenvolupament, Rural, Emergència Climàtica i Transició Ecològica. D.G. Prevenció de Incendis. Valencia: fundación CEAM. 11 pp.

SPURR, S.H. and BARNER, B.V., 1973. Forest ecology. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida. 687 pp.

TANASE, M.; DE LA RIVA, J.; CABELLO, F., 2011. Estimating burn severity at the regional level using optically based indices. Canadian Journal of Forest Research, 41: 863-872.

TRABAUD, L., 1998. Recuperación y regeneración de ecosistemas mediterráneos incendiados. Incendios forestales. Serie Geográfica. Vol.7, 37-47 pp. Ed. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá.

REFERENCIAS

VALLEJO, V.R.; ALLOZA, J.A.; SANTANA, V.M.; VALDECANTOS, A., 2018. Informe sobre el impacto del incendio forestal de Llutxent. Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural. D.G. Prevención de Incendios. Valencia: fundación CEAM. 56 pp.

VEGA HIDALGO, J.A., 2016. Prioridades de restauración de áreas forestales quemadas. A: III Reunión conjunta del Grupo de Trabajo de Repoblaciones Forestales (SECF) y el Grupo de Trabajo de Restauración Forestal (AEET). Cuaderno de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 42: 155-180.

VERAVERBEKE, S.; HOOK, S.; HULLEY, G., 2012. An alternative spectral index for rapid fire severity assessments. Remote Sensing of Environment, 123: 72-80.

VLASOVA, L.; CABELLO, F.; RODRIGUES, M.; MONTORIO, R.; GARCIA, A., 2014. Analysis of the Relationship between Land Surface Temperature and Wildfire Severity in a Series of Landsat Images. Remote Sensing, 5.

Referencias de sitios web:

CLIMATE-DATA.ORG, 2021. Clima: Temperatura, Climograma y Tabla climática, visto el 9 de mayo de 2021. <https://en.climate-data.org/>

IGME, 1980. Mapa Geológico de Hellín, hoja nº868. Escala: 1: 50. 000.
<https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?Id=843&language=es>

IGME, 1974. Mapa Geológico de Villanueva del Arzobispo, hoja nº667. Escala: 1:50000.
<https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?language=es&id=667>

IGME, 1972. Mapa Geológico de Salvatierra de Miño (IGME, 1972) hoja nº262. Escala: 1: 50. 000.
<https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?Id=262&language=es>

IGME, 1970. Mapa Geológico de Alcoy (IGME, 1970), hoja nº64. Escala; 1: 200.000.
<https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Sintesis200Hoja.aspx?Id=64&language=es>

MITECO.GOB, 2021. Mapa Forestal de España (MFE50). Escala: 1: 50.000. Proyecto realizado entre los años 1997 a 2006., visto el 15 de mayo de 2021.
<https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50.aspx>