



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-219

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Caracterización y análisis del área incendiada en Huesa, Quesada y Cabra de Santo Cristo (Jaén) para dar soporte a las actuaciones de restauración

SALAS CABRERA, F.J.³, VENEGAS TRONCOSO, J.³, BARTOL CANEDO, G.², GUZMÁN ÁLVAREZ, J.R.¹, GONZÁLEZ SECO, J.¹, MUÑOZ BUENDÍA, J. ², MADERO MONTERO, A. ², CARPINTERO SALVO, I.R.³, MONTOYA MANZANO, G.³, PRIETO MOLINA, R.³, SANTIAGO GAHETTE, A.³, CABALLERO GÓMEZ, M.³, JIMÉNEZ MARTÍN, M.E.³, MONTERO HERRANZ, R.L.³, VALES BRAVO, J.J.³, MENDEZ CABALLERO, E. M.³

¹ Dirección General de Gestión del Medio Natural. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. J. de Andalucía

² Delegación Territorial de Jaén, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía

³ Agencia de Medio Ambiente y Agua. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía

Resumen

En julio de 2015 se desencadenó un incendio forestal que afectó a los municipios jiennenses de Quesada, Huesa y Cabra de Santo Cristo. La Ley 5/1999 de Prevención y Lucha contra los Incendios Forestales, establece que los terrenos afectados por incendios precisan de un Plan de Restauración en el que se evalúe la situación de estos terrenos desde el punto de vista de la conservación de la flora, la fauna, el suelo y los ecosistemas, de manera que a partir de éste se propongan las actuaciones o medidas necesarias para la restauración o regeneración de los terrenos afectados.

Para la elaboración de dicho plan se ha seguido un procedimiento adaptado al propuesto en la *Guía técnica para la gestión de montes quemados* (ROJO, L. *et al.*, 2013), enriquecido con una serie de análisis predictivos basados en técnicas de correlación de información en formato digital (gran parte de ella obtenida a partir de sensores remotos: LiDAR, Landsat-8 y Pléiades) y datos (cualitativos y cuantitativos) tomados en campo.

Los diferentes análisis realizados y resultados obtenidos están dirigidos a apoyar de forma técnica y rigurosa la toma de decisiones implicadas en la evaluación, seguimiento y restauración de la superficie afectada por el incendio.

Palabras clave

Inferencia espacial, sensores remotos, LiDAR, Landsat-8, Pléiades.

1. Introducción

El 7 de julio de 2015 se inició un incendio forestal en el paraje conocido como "*La Cruz del Muchacho*" (término municipal de Quesada, provincia de Jaén), por el efecto de un rayo consecuencia de una tormenta seca. Las condiciones existentes de escasa humedad, altas temperaturas y fuerte viento propiciaron su rápida propagación. La primera cuantificación de la superficie afectada realizada a partir de imágenes de satélite y fotografías aéreas fue de 9.852,40 hectáreas de superficie forestal y 343,21 hectáreas agrícolas, con una superficie total recorrida por el fuego de 10.195,61 hectáreas. Esta superficie se repartía entre los términos municipales de Quesada, Huesa y Cabra de Santo Cristo. En su recorrido, el incendio afectó mayoritariamente a terrenos de titularidad pública (88%), propiedad tanto de la Junta de Andalucía (11%) como de Ayuntamientos (77%), siendo el restante de propiedad privada (22%). Si bien la zona no está incluida en la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA), se encuentra a escasos kilómetros del límite occidental del Parque Natural Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es aportar la información de base necesaria para elaborar el Plan de gestión para la restauración del área afectada por este incendio forestal, realizando un estudio de detalle tanto de la vegetación previa al incendio como de las características del medio físico y de la

incidencia del fuego, a fin de evaluar las necesidades de restauración de cada área en concreto. De dicho plan emanarán posteriormente y de forma justificada los diferentes proyectos necesarios que recojan las actuaciones a llevar a cabo para minimizar, en la medida de lo posible, los efectos de este incendio forestal.

3. Metodología

Considerado como el incendio más grave registrado en la provincia de Jaén en los últimos años (para su estabilización y control fue necesario desplegar a más de 500 profesionales y a 22 medios aéreos de diferentes administraciones), en su recorrido el fuego afectó mayoritariamente (cerca del 70% de la superficie) a cubiertas de pinar de pino carrasco (*Pinus halepensis*) naturalizadas y de repoblación, así como a extensiones de matorral estepario de talla media-baja (23% de la superficie). Parte de esta superficie (20% del total) presenta huella de las terrazas asociadas a las labores de repoblación. Respecto al estado de la vegetación post-incendio, tanto las observaciones de campo tras su extinción como los resultados de este estudio concluyen que la severidad del fuego incendio sobre los diferentes estratos (arbóreo, matorral y herbáceo) se encuentra dentro de niveles altos o muy altos.

En este estudio la metodología seguida ha sido una adaptación a este caso particular de los procedimientos plasmados en la *Guía técnica para la gestión de montes quemados* (ROJO, L. *et al.*, 2013), concretamente los relativos a la *evaluación preliminar* y *evaluación urgente* del impacto ecológico del incendio. La primera aplicación en Andalucía de esta metodología de trabajo comenzó con un pormenorizado análisis del territorio afectado, basado en múltiples factores que sintetizan y caracterizan aspectos relevantes a la hora de definir y, sobre todo priorizar, las zonas o rodales de actuación. Entre ellos se encuentran los asociados a los tipos de vegetación afectada por el incendio (comunidades vegetales involucradas, capacidad potencial y velocidad de regeneración natural después del fuego de las mismas), a las características del medio físico (fisiografía, litología y suelos, caracterización hidrológica y valoración del incremento esperado en los caudales de escorrentía, así como el riesgo de degradación por pérdida de suelo debida a la erosión) y a la severidad del incendio, como medida del grado de combustión de materia orgánica causada por el fuego. En este caso, la severidad del fuego se ha evaluado a partir de técnicas de teledetección, que permite obtener información de forma rápida para grandes coberturas espaciales, así como repetir la evaluación en diferentes momentos, en una serie temporal.

El desarrollo metodológico de este trabajo ha supuesto integrar una gran cantidad de información original y diseñar procedimientos para convertir esta información en variables distribuidas espacialmente de modo regular en toda la zona de trabajo. Buena parte de los montes públicos afectados por el incendio contaban con un proyecto de ordenación aprobado (el 78% de la superficie recogida por el fuego estaba incluida en el ámbito de un proyecto de ordenación elaborado por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio), cuya información ha sido de gran utilidad para la caracterización de las cubiertas vegetales implicadas. Por otro lado, para una correcta definición de las diferentes unidades ambientales existentes en el área de estudio se realizó una exhaustiva recopilación de la información digital disponible, procedente en su mayoría del Catálogo de información ambiental de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM): variables orográficas, climáticas, litológicas y edáficas, de hidrología y erosión, etc. Toda esta información se completó y actualizó con la ayuda de una campaña de prospección de campo tras el incendio, en la que se realizó la recogida sistemática de información cuantitativa y cualitativa.

La última fase consistió en un proceso de síntesis e integración de las variables espaciales recopiladas y generadas, con el fin de identificar, en función de los criterios definidos, las zonas o rodales más vulnerables, donde sería recomendable priorizar las labores restauradoras y centrar las

inversiones destinadas a la restauración (definición e identificación de las zonas o rodales prioritarios de actuación).

4. Resultados

A continuación se resumen los hitos y resultados obtenidos para alcanzar el objetivo marcado.

A. Caracterización de la zona afectada por el incendio

- **Prospección de campo tras el incendio**, campaña de recogida sistemática de información cuantitativa y cualitativa en puntos de muestreo, de acuerdo a las indicaciones recogidas en la *Guía técnica de gestión de montes quemados* (ROJO, L. *et al.*, 2013). La elección de estos puntos de muestreo se hizo atendiendo a criterios de accesibilidad y representatividad y grado de severidad del incendio. De hecho, uno de los bloques de información más importantes que se recabó durante esta fase fue la relativa al grado de severidad del fuego sobre la vegetación, clasificado en *No afectada, Baja, Media, Alta y Muy alta*.

Tabla 1. Grados de severidad de afección al arbolado

SEVERIDAD	DESCRIPCIÓN
Baja	La base del tronco se ha visto chamuscada, pero la copa se mantiene verde
Media	El tronco se ha visto parcialmente quemado. Parte de la copa se ha sofamado o se ha consumido, pero más del 50% de la misma se mantiene verde
Alta:	La copa se ha visto afectada principalmente por sofamado, de manera que más del 50% de la copa mantienen hojas secas en las ramas. Estas hojas pueden estar en el suelo si la prospección se realiza varias semanas después del fuego, En algunos casos puede mantenerse una parte de la copa verde
Muy alta:	La copa se ha visto afectada principalmente por combustión (fuego de copa), de manera que las hojas se han consumido completamente. Menos del 50% de la copa mantienen hojas secas en las ramas

La campaña de prospección de campo tuvo lugar entre el 14 y el 23 de diciembre de 2015 y el resultado fue 95 puntos de muestreo, cada uno con su correspondiente estadillo y colección de imágenes (309 fotografías). La ubicación final del centro de la parcela se realizó con GPS con una precisión inferior a 5 m.

- **Caracterización de la vegetación previa al incendio**; definición de las unidades de diagnóstico: esta fase del trabajo resulta decisiva, ya que las características de la vegetación afectada por el fuego van a determinar su vulnerabilidad ecológica a corto plazo (respuesta de la vegetación tras el incendio). Para la definición de las unidades de diagnóstico pre incendio se ha partido de la rodalización llevada a cabo en los trabajos de informe selvícola asociados a diferentes Proyectos de ordenación de los montes públicos afectados. Esta información ha resultado de enorme valor, sobre todo para recuperar la relativa a estratos inferiores (matorral, herbáceo), dado que la elevada afección por el fuego dificultó su identificación tras el incendio. El 78% de la superficie recogida por el fuego está incluida en el ámbito de un proyecto de ordenación elaborado por la Administración forestal, por lo que para el restante 22% de superficie afectada, la información relativa a vegetación pre incendio fue la ofrecida por la base cartográfica SIOSE Andalucía 2011 (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo; REDIAM).
-
- El mosaico vectorial obtenido a partir de la rodalización selvícola y SIOSE fue posteriormente revisado en gabinete, editando a través de herramientas SIG sobre ortofotografías aéreas (Ortofotografía rigurosa color de Andalucía; Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, IECA 2013) y de satélite (Pléiades 0,5x0,5 m) disponibles para la zona de estudio. Destacar en esta fase del trabajo la identificación y delimitación sobre la ortofoto de satélite Pléiades posterior a la fecha del incendio de las zonas aterrazadas o abancaladas, a escala de detalle. Se procedió

también a reajustar sobre estas ortofotos el límite del área recorrida por el incendio, mediante la comparación de los pares infrarrojos correspondientes a las fechas de 5 de julio de 2015 (pre incendio) y de 6 de noviembre de 2015 (post incendio).

Como resultado de esta fase del estudio se dispone de una capa vectorial de detalle (tamaño medio de rodal de 5 hectáreas) que discrimina dentro del área incendiada las siguientes unidades:

Tabla 2. Unidades de vegetación en el área incendiada

UNIDAD DE CARACTERIZACIÓN	SUPERFICIE (ha)	(%)
Pinares de <i>P. halepensis</i> naturales o naturalizados	4.357,20	44,57
Matorrales y espartizales	2.290,17	23,42
Pinares de <i>P. halepensis</i> de repoblación	1.440,93	14,74
Roquedos y zonas de escasa vegetación	803,59	8,22
Pinares de <i>P. halepensis</i> de repoblación poco desarrollados	475,19	4,86
Cultivos - Pastos	262,18	2,68
Sabinar/Enebral	135,14	1,38
Vegetación ripícola	11,6	0,12
Cortafuegos	0,71	0,01
Edificaciones	0,35	0,00
Cantera	0,06	0,00
Total:	9.777,12	100,00

- **Evaluación de las formaciones de pinar:** dado que el 65% de la superficie afectada por el fuego está cubierta por formaciones de pinar de carrasco de diferente origen y estado de desarrollo, ha sido de especial importancia realizar una buena caracterización de las mismas. Además, el tratamiento de la madera quemada (extracción o no extracción) suele ser una cuestión a plantear en zonas quemadas con presencia de arbolado, por lo que disponer de información relativa a la distribución de ésta en la zona afectada resulta de gran valor a la hora de tomar decisiones.

Esta caracterización dasométrica (valores medios de %FCC, densidad, altura, diámetro normal, volumen con corteza, y biomasa asociada a fuste y ramas) se ha realizado a partir de la información aportada por los diferentes inventarios forestales realizados en la zona -proyectos de ordenación, Tercer Inventario Forestal Nacional (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2008) y prospección de campo-, si bien los datos puntuales fueron interpolados espacialmente y así disponer de información en todo el área recorrida por el incendio (tamaño de celda de 10 x 10 m). Para ello se recurrió a la técnica de Regresión-Kriging, de inferencia espacial basado en la combinación del análisis de regresión múltiple (con variables ambientales) con las técnicas geoestadísticas de interpolación espacial (*Kriging ordinario*). Los valores de *altura media del arbolado* (m) y de *fracción de cabida cubierta* (FCC%) pudieron obtenerse de forma directa para toda el área afectada por el incendio y con la misma resolución espacial (10 x 10 m) sin necesidad de hacer ninguna labor de inferencia espacial de datos puntuales, dada la disponibilidad de información LiDAR (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea: PNOA. Instituto Geográfico Nacional) para el ámbito del incendio. A partir de los valores de densidad, diámetro y altura, se obtuvieron los restantes mediante funciones de producción y biomasa (GUZMÁN ÁLVAREZ *et al.* 2012, RUIZ-PEINADO *et al.* 2011).

Tabla 3. Variables dendrométricas determinadas para este estudio y método de obtención

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	METODOLOGÍA DETERMINACIÓN
NT	Densidad estrato arbóreo (pies/ha)	Regresión-Kriging
DN	Diámetro normal medio (cm)	
HT	Altura media estrato arbóreo (m)	Análisis datos LiDAR PNOA
FCC	Fracción de cabida cubierta estrato arbóreo (%)	
VCC	Volumen con corteza (m ³ /ha)	Funciones de producción (GUZMÁN ÁLVAREZ <i>et al.</i> 2012)
BF	Biomasa de fuste (t/ha)	Funciones de biomasa (RUIZ-PEINADO <i>et al.</i> 2011)
BRG	Biomasa de ramas gruesas >7cm (t/ha)	

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	METODOLOGÍA DETERMINACIÓN
BRM	Biomasa de ramas media 2-7 cm(t/ha)	
BRF	Biomasa de ramas finas <2 cm (t/ha)	

- **Clasificación de las formaciones de matorral-herbazal:** dada su importancia tanto a nivel de presencia (25% de la superficie afectada), como por su función ecológica y protectora. Para ello se ha seguido un esquema de trabajo similar al descrito para las formaciones de pinar. Puesto que las distintas estrategias reproductivas (germinadora o rebrotadora) de las especies vegetales origina importantes diferencias en la rapidez de respuesta inmediatamente después del fuego, es preciso poder diferenciar el porcentaje de recubrimiento de ambos tipos para poder determinar la posible velocidad regeneración y, por consiguiente, las zonas más o menos vulnerables desde el punto de vista de la erosión. Por otro lado, la composición del matorral existente antes del incendio puede ser un buen indicador de aquellos hábitats más evolucionados ecológicamente, con mayor potencialidad de regenerarse de forma natural, más favorables e idóneos. Por ello, se analizó la composición florística existente en las parcelas de inventario y posteriormente se interpoló espacialmente las variables de estado características de este estrato (*FCC%*, *Hm*, *fracción germinadora/rebrotadora*, *fracción pionero/maduro*) en todo el área afectada por el incendio.

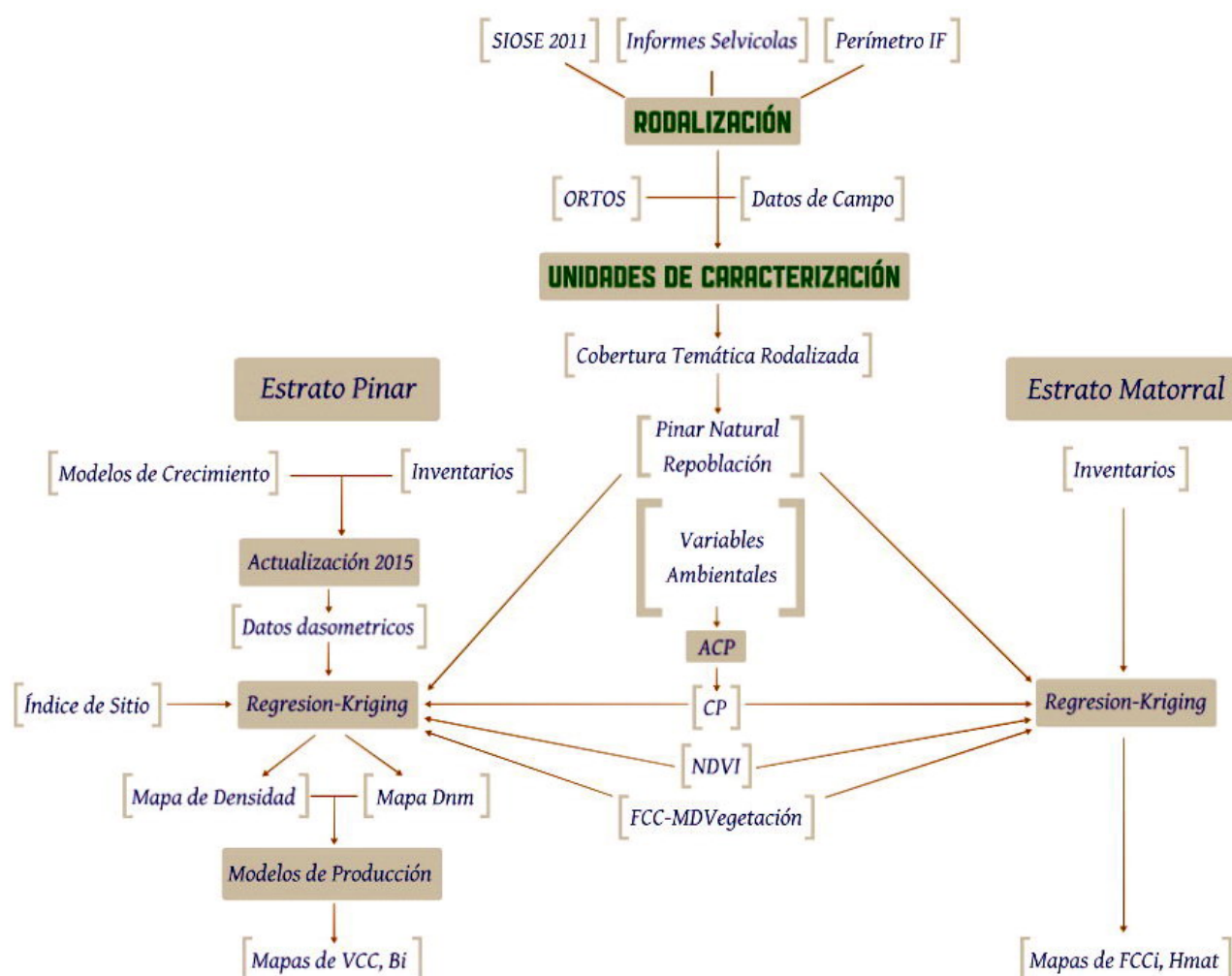


Figura 1. Diagrama de flujo para la caracterización de la vegetación afectada por el incendio

B. Evaluación del impacto ecológico del incendio

Una vez caracterizada a nivel de detalle la vegetación existente antes del incendio (delimitación de las unidades de vegetación, así como cuantificación y clasificación de los estratos arbóreo y de matorral), se procedió a evaluar el impacto ecológico del incendio. Este concepto integra tanto la vulnerabilidad ecológica a corto plazo, dependiente a su vez de la susceptibilidad del suelo y capacidad de respuesta de la vegetación, como de la severidad del fuego.

La susceptibilidad del suelo se ha evaluado mediante la integración de la litología, indicador de la erosionabilidad, partiendo de la Cartografía geológica digital continua (Plan Geode, escala 1:50.000; Instituto Geológico y Minero de España, Ministerio de Ciencia y Tecnología), la topografía del terreno (pendiente del terreno, en %, derivada del modelo digital de elevación de 10x10 m de la REDIAM, incorporando posteriormente las zonas aterrazadas), la erosión potencial (a partir de la cartografía aportada por el Inventario Nacional de Erosión de Suelos; INES. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente) y las cubiertas protectoras del suelo (partiendo de la información ráster sobre fracción de cabida cubierta de la masa arbolada y del matorral, concretamente el porcentaje de suelo desnudo). Estas variables fueron normalizadas (rango 0-1), mediante la división de los valores resultantes entre el valor máximo obtenido, determinando la Susceptibilidad del suelo mediante la suma de las 5 variables que inciden en esta característica.

La susceptibilidad de la vegetación se ha evaluado mediante la capacidad de respuesta de la misma a la acción del fuego. Esta capacidad a su vez depende de las características de cada uno de los estratos (composición, estrategia reproductiva, estado de madurez, recubrimiento), su estado fitosanitario y de la recurrencia de incendios a la que se ha visto afectada. Dado que el estado fitosanitario de las masas antes del incendio era bueno y que la zona no se ha visto afectada por incendios recurrentes, estas dos últimas variables no se han incluido en el análisis. Respecto a las características de cada estrato de vegetación, se ha tenido en cuenta la FCC del estrato arbóreo asociado a masas de pinares (naturales/naturalizados o de repoblación) en estado de fustal/latizal, no considerando las zonas de pinar de repoblación poco desarrolladas (baja capacidad de regeneración natural debido a la escasez de piñas y, por tanto, de semillas). Por otro lado, se ha incluido la información relativa a fracción de cabida cubierta del matorral-herbazal rebrotador (zonas con alto porcentaje de recubrimiento de este tipo de vegetación son menos vulnerables). La determinación final de la Susceptibilidad o vulnerabilidad de la vegetación a la acción del fuego resulta de la suma de los valores obtenidos para las variables con incidencia en esta característica.

La severidad del fuego, entendida como el grado de combustión de materia orgánica viva o muerta causada por el incendio. Esta es una variable predictiva de gran interés para la gestión de áreas quemadas, puesto que va a condicionar la respuesta del ecosistema. De forma general, alta severidad está relacionada con tasas de recuperación de la vegetación bajas y niveles de erosión más elevados que las áreas de baja severidad (DOERR *et al.*, 2006; MOODY *et al.*, 2013). En consecuencia, proporciona información fundamental para priorizar tratamientos y medidas dirigidas a minimizar los efectos del fuego y acortar el tiempo de recuperación del ecosistema afectado.

Se procedió a identificar los *niveles de severidad ajustados con datos de campo* a partir de la diferencia que presenta el índice NBR determinado para dos imágenes Landsat-8 (sensor OLI); una tomada el 30 de junio (antes del incendio), y otra del 16 de julio (después del mismo), fechas muy próximas entre sí, lo que minimiza posibles cambios en la fenología de la vegetación que pudieran repercutir en sus valores. Dichos valores resultantes del índice deben ser agrupados en intervalos de severidad, flexibles y específicos de cada incendio. Para calibrar estos rangos de clasificación de la severidad del fuego se analizaron y compararon, punto a punto, los datos obtenidos de la prospección de campo. La siguiente gráfica muestra el ajuste entre los datos de campo y la

diferencia de NBR, representando los puntos de muestreo ordenados en función de la diferencia de NBR y coloreados según el nivel de afectación observada en campo. Las líneas de corte muestran los umbrales establecidos para el cálculo del mapa de severidad a partir de la diferencia de NBR. Como se puede observar, el ajuste es muy bueno, dado que únicamente en 9 puntos el valor de severidad observada no es igual al valor estimado con la imagen.

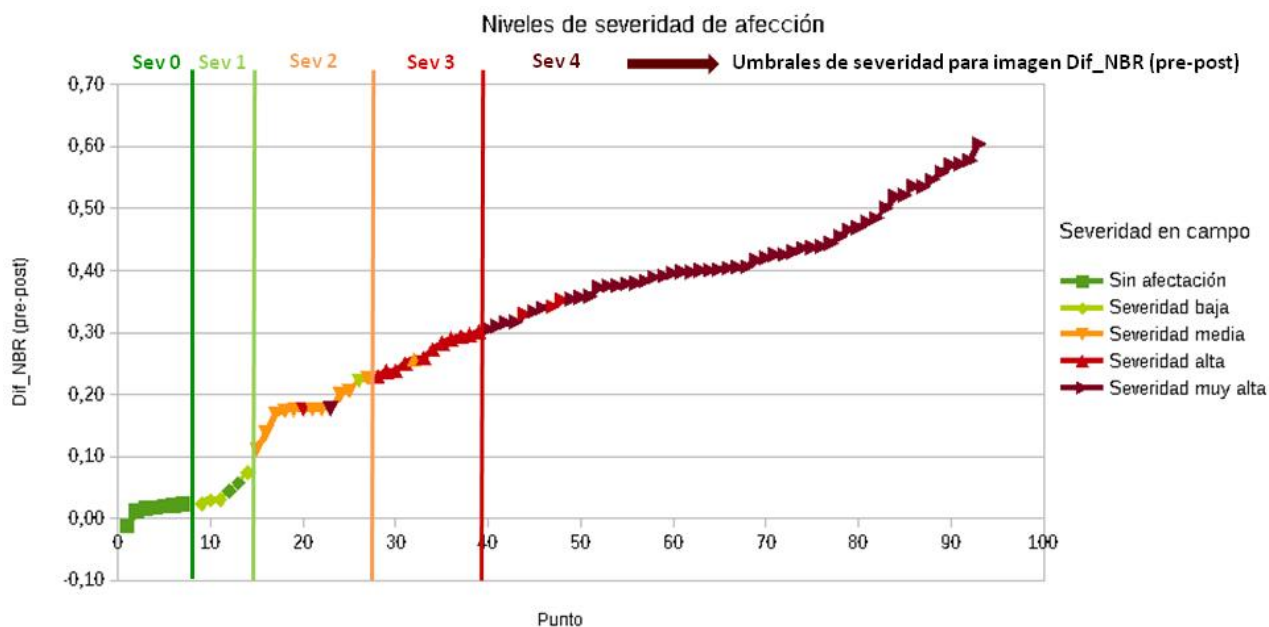


Figura 2. Diferencia de NBR por severidad determinada en los puntos de muestreo

La matriz de confusión del ajuste también muestra resultados bastante buenos, aunque se aprecia que las clases de severidad 1 y 3 tienen menor acierto y cierta confusión con las clases anterior y posterior.

Tabla 4. Matriz de confusión del ajuste

IM. SEVERIDAD	VERDAD TERRENO. Muestras					Clase	Error comisión (%)	Error omisión (%)
	sev0	sev1	sev2	sev3	sev4			
sev0	60,67	20,00	0,00	0,00	0,00	sev0	14,29	39,33
sev1	32,58	48,89	3,00	0,00	0,41	sev1	60,71	51,11
sev2	6,74	22,22	80,00	23,81	1,65	sev2	40,30	20,00
sev3	0,00	8,89	14,00	44,44	2,89	sev3	36,36	55,56
sev4	0,00	0,00	3,00	31,75	95,05	sev4	8,53	4,95
Total:	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00			

- Precisión general = 79,65%
- Coeficiente de Kappa = 0,6674

Los resultados obtenidos manifiestan que cerca del 65% de la superficie afectada se clasifica dentro de niveles de severidad altos o muy altos.

Tabla 5. Superficie asociada a los diferentes niveles de severidad del fuego

Severidad	Rango $dNBR$	Superficie (ha)	(%)
No afectado	-0,53897 - 0,02308	327,01	3,3%

Baja	0,02308 - 0,07433	535,67	5,5%
Media	0,07433 - 0,22600	2.765,55	28,3%
Alta	0,22600 - 0,35173	3.403,65	34,8%
Muy alta	0,35173 - 0,71543	2.745,24	28,1%
Total:		9.777,12	100,0%

Los valores de vulnerabilidad ecológica y de severidad del fuego se integraron en cada una de las unidades de caracterización (rodales), determinando en cada una de ellas un valor sintético de impacto ecológico del incendio. Esta integración de las cartografías sobre la regeneración esperable y el riesgo de degradación permiten identificar las zonas más vulnerables (aquellas con menor capacidad de regeneración y un mayor riesgo de degradación de suelo), mientras que el nivel de severidad condiciona la respuesta del ecosistema a los efectos del fuego.

El proceso metodológico consistió en determinar, para cada rodal o unidad de diagnóstico, el tanto por uno de la superficie que este rodal alberga en cada una de las clases de vulnerabilidad y severidad definidas (*baja, media, alta y muy alta*), de forma que el sumatorio resultante del porcentaje de presencia en cada una de las clases, para cada variable, debe ser igual a uno. La determinación final del **Impacto ecológico del incendio** se obtuvo como la suma de los índices globales sintetizados para cada una de las componentes analizadas ($V_{\text{Suelo}_i} + V_{\text{Vegetación}_i} + \text{Severidad}_i$).



Figura 3. Diagrama de flujo para la evaluación del impacto ecológico del incendio

C. Otras variables definitorias de la zona afectada

Por último, otros factores considerados de interés para la caracterización y a tener en cuenta en la priorización de actuaciones, fueron:

- El resultado de un estudio hidrológico, dirigido a valorar la previsible alteración de los caudales punta dentro de la zona afectada por el incendio e identificar las zonas más vulnerables y, por tanto, prioritarias a la hora de llevar a cabo actuaciones restauradoras y de correcciones en cauces o laderas. Este análisis básicamente consistió en realizar el cálculo de los caudales esperados en las cuencas identificadas en dos situaciones (cobertura vegetal previa al incendio y la que resulta tras el mismo), para diferentes periodos de retorno, aplicando el método racional. Como resultado genérico se obtuvieron incrementos en los caudales punta de todas las subcuencas afectadas por el fuego, si bien hay diferencias entre ellas debido a variaciones en el porcentaje de afección por el incendio y a los distintos comportamientos hidrológicos, llegándose a alcanzar valores de hasta un

300% de variación (en algunas subcuencas se puede triplicar el caudal punta de salida tras el incendio).

- Índice de susceptibilidad frente a la erosión (Soil Erosion Susceptibility Index, SESI) elaborado en el marco del proyecto europeo PREFER (Prevention and REcovery of Forest Fire Emergency in the MediteRanean Area), a partir de imágenes Sentinel-2 (del 6 de diciembre de 2015) de resolución 10 metros.
- El resultado de un análisis de accesibilidad basado en la distancia a la red viaria existente, ya que la posibilidad de intervenir o no en una zona determinada puede estar condicionada por la accesibilidad y la distancia de la misma a una vía principal de dicha red. Para abordar este análisis fue necesaria la digitalización detallada de la red principal de caminos.

D. Identificación de rodales de actuación prioritaria

El proceso de evaluación finalizó con una fase de análisis donde se integraron todas las variables anteriormente descritas. De este modo se obtuvo un valor sintético de índice de priorización para cada uno de los rodales o unidades de caracterización definidos, lo que permite localizar e identificar las zonas más vulnerables, donde priorizar las labores restauradoras y centrar las posibles inversiones destinadas a la restauración. Esta integración, que puede contemplar la ponderación específica de una o más variables implicadas, en función de la significación o del criterio técnico que el evaluador quiera darle a cada una de ellas (*juicio experto*), en una primera aproximación se realizó sin llevar a cabo ninguna ponderación de variables (igual peso para todas). La valoración global del nivel de prioridad se llevó a cabo mediante la suma, a nivel rodal, de los índices obtenidos para cada una de las variables consideradas (normalizados al rango 0-1).

Tabla 6. Variables contempladas en la propuesta de priorización de actuaciones

ID	VARIABLE	CRITERIO DE PRIORIDAD
V1	Tipo de unidad de vegetación	Se establece diferente valor de prioridad para cada una de las unidades. de vegetación presentes en el área incendiada: mayor para cubiertas arboladas, media para las de matorral y baja para el resto
V2	Orografía - mecanización	Dada la gran extensión del área recorrida por el incendio, se priorizan las zonas más afables orográficamente (a igualdad de condiciones del resto de variables, mayor valor de prioridad en zonas donde la ejecución sea menos compleja y costosa)
V3	Susceptibilidad de la erosión	A través de la combinación (promedio) de las dos fuentes de información disponibles: Índice de susceptibilidad frente a la erosión (PREFER) y Cartografía de erosión potencial (INES; MAGRAMA)
V4	Biomasa aérea	Se considera que las zonas con mayor biomasa existente serán prioritarias respecto a la que no tuviesen vegetación arbórea alguna, ya que las labores de extracción de la madera quemada facilita futuros trabajos de restauración en los pinares, reduce el riesgo de plagas y el impacto paisajístico y emotivo. Se determina mediante la suma de la distintas fracciones de biomasa obtenidas en la caracterización del pinar: biomasa de fustes, de ramas gruesas (> 7cm) y de ramas medias (2-7cm), en t/ha
V5	%FCC de matorral maduro	Mayor nivel de prioridad en zonas con presencia de matorral propio de etapas maduras, con objeto de evitar posibles daños en la regeneración futura y como indicador de hábitats más favorables
V6	Hidrología	A partir del incremento porcentual del caudal punta (para un periodo de retorno de 2 años). Cuencas con mayores incrementos se priorizan para acometer actuaciones de corrección hidrológica
V7	Severidad del incendio	Se considera más prioritario actuar en masas arboladas duramente castigadas por el incendio frente a las que presenten copas ligeramente flameadas que, si las plagas y la climatología las

ID	VARIABLE	CRITERIO DE PRIORIDAD
		respetan, podrían seguir adelante con su desarrollo
V8	Impacto ecológico del incendio	Como integrador de la vulnerabilidad del suelo, vulnerabilidad de la vegetación y severidad del fuego
V9	Distancia a la red principal de caminos	A partir de la agregación, a nivel rodal, del valor promedio de las distancias a la red viaria más cercana existentes para cada una de las celdillas contenidas en dicho rodal

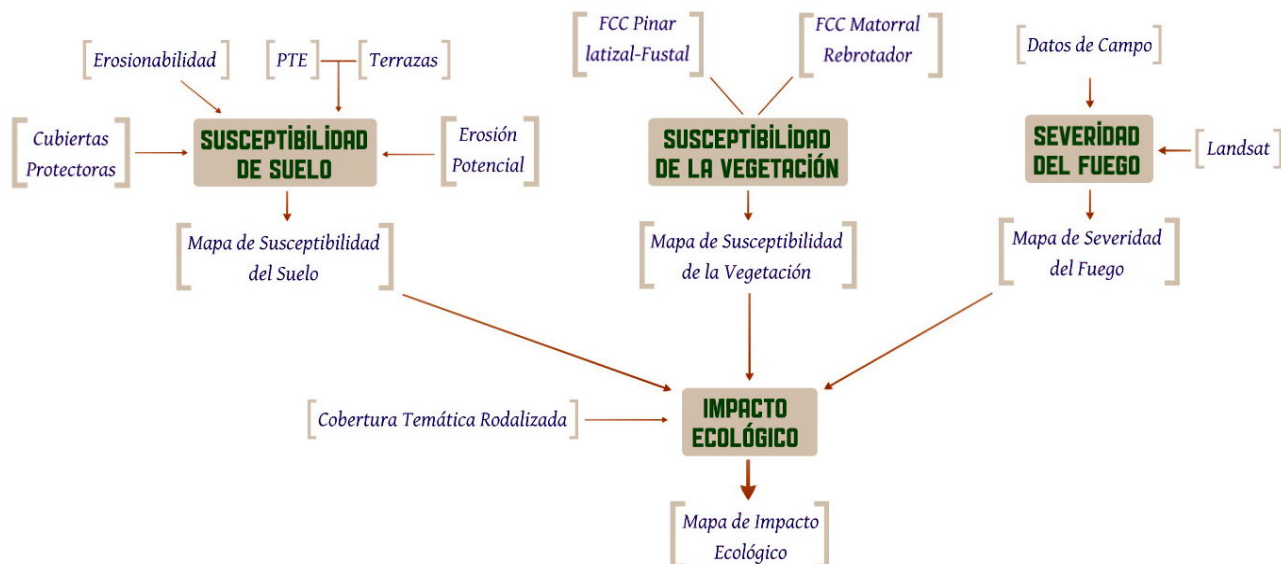


Figura 4. Diagrama de flujo para la priorización de las unidades de diagnóstico

Gracias a la aplicación de esta metodología se ha obtenido un amplio catálogo de información geográfica (vectorial y ráster) para toda el área afectada por este incendio. Las capas ráster presentan una resolución espacial de 10x10 metros y valores continuos de la variable de interés (valores tanto absolutos como normalizados al rango 0-1). Algunas de estas capas de información se combinaron con el objeto de disponer de síntesis temáticas (impacto ecológico del incendio, áreas prioritarias). Por otro lado, se ha obtenido una cartografía vectorial de detalle de las unidades de diagnóstico, basadas fundamentalmente en la caracterización de la vegetación previa al incendio y a la presencia/ausencia de bancales o terrazas. En cada uno de los polígonos que componen esta cartografía se agregó, mediante la determinación del valor promedio de las celdillas que se incluyen en cada uno de ellos, la información ráster obtenida para las variables estudiadas. Esta cartografía vectorial de diagnóstico es de enorme utilidad para realizar consultas y plantear estrategias y planificaciones orientadas a la restauración del área afectada.

Los diferentes resultados permitieron dar respuesta de forma rápida y fundamentada a cuestiones que se iban formulando en relación a las necesidades de acometer labores de emergencia en el área afectada por el fuego. En este sentido, la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía redactó un proyecto de ejecución de obra con objeto de actuar de manera urgente en zonas con alto potencial de regeneración natural y con alto riesgo erosivo. Dicho proyecto fue ejecutado por encomienda a la Agencia de Medio Ambiente y Agua, iniciándose la obra en octubre y quedando finalizada en diciembre del 2015, siendo el presupuesto de ejecución por administración-encomienda 995.592,12 €, cofinanciados con el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER). Las actuaciones que contemplaba este proyecto de obra básicamente eran relativas al tratamiento de la vegetación quemada y construcción de hidrotecnias, así como la mejora de accesos y actuaciones orientadas a la adecuación de infraestructuras ganaderas,

protección al regenerado frente a la herbívora y otras mejoras dirigidas a una adecuada reubicación de la cabaña ganadera en otros montes públicos.

Aparte de su utilidad para la concreción de este primer proyecto de actuaciones, el resultado de este estudio constituye la base para la elaboración del plan de restauración propiamente dicho, que contempla la definición de modelos de gestión y las actuaciones y/o tipos de tratamientos a llevar a cabo en cada uno de ellos.

5. Discusión

La caracterización de la zona afectada por este incendio ha sido el resultado de una fase de recopilación, análisis e interpretación de una enorme cantidad de información existente así como de otra tomada en campo tras el incendio. La delimitación de las unidades de diagnóstico y la caracterización de las cubiertas de pinar y de matorral fue relativamente rápida y sencilla, dada la información ofrecida por los inventarios forestales y los informes selvícolas realizados para los proyectos de ordenación de los montes públicos afectados. Estos datos pre incendio han sido empleados de forma individual o combinados con información geográfica de variables ambientales a través de técnicas de regresión-kriging, junto con los datos LiDAR PNOA y las imágenes de sensores remotos (Landsat-8 y Pléiades).

La información tomada en el muestreo de campo post incendio fue muy relevante para el ajuste del mapa de severidad del fuego. En este sentido, se puede afirmar que el mapa resultante de la estimación de la severidad con imágenes de satélite a partir de la diferencia de NBR (pre-post) proporciona muy buen resultado, con un alto ajuste a los datos de campo. No obstante, se aprecia cierta confusión entre las clases de severidad intermedias, que no se acaban de diferenciar correctamente. En este sentido, se desconoce si este hecho se trata de una tónica general para este procedimiento, o bien la causa puede deberse a que estas clases no están bien definidas en campo (se determinan pocos puntos) o no tienen la suficiente presencia en este caso particular, dado que realmente, la mayor parte de la zona recorrida por el fuego se ha visto afectada por una severidad muy alta.

En el marco de este estudio se realizó también un análisis comparativo para evaluar la posibilidad de estimar la severidad del fuego a partir de la diferencia de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; índice diferencial de vegetación normalizado. ROUSE et al., 1973) como alternativa al cálculo de la diferencia de NBR, dado que muchos sensores satelitales y aerotransportados carecen de la banda correspondiente al infrarrojo medio, base para el cálculo del NBR. Este es el caso de las imágenes Pléiades adquiridas para el análisis del incendio y planificación de las labores de restauración. Concretamente, se realizó un análisis comparativo entre la diferencia de NBR y la diferencia de NDVI (a partir del par de imágenes Landsat) encontrados en todos los puntos de muestreo en campo; a la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que la diferencia de NDVI no era tan buen estimador de la severidad de afección del fuego como la diferencia de NBR.

6. Conclusiones

En conclusión, los resultados obtenidos en la caracterización y análisis del área incendiada en Huesa, Quesada y Cabra de Santo Cristo (Jaén) han supuesto una sólida base para el diseño de las actuaciones de restauración posterior. La disponibilidad de información previa, tanto de proyectos de ordenación de montes afectados por el fuego como del repositorio de la REDIAM y la capturada por sensores remotos (Landsat 8, LiDAR PNOA y Pléiades), unida a la recogida *in situ* en una prospección de campo concreta y dirigida, ha agilizado esta fase de análisis, permitiendo disponer de resultados en un corto intervalo de tiempo tras la extinción del incendio.

Después del incendio acaecido, los principales riesgos a corto/medio plazo que hay que considerar son los derivados de la escorrentía en laderas y la gestión de la madera quemada para evitar la proliferación de enfermedades y plagas, por lo que los criterios para la priorización deben ir encaminados a la minimización del impacto erosivo, la efectividad en la gestión de la madera y el control fitosanitario. En paralelo, se ha de prestar atención a la reconstrucción/regeneración del paisaje y la biodiversidad.

La metodología seguida ha permitido contar con la información necesaria para poder identificar unidades homogéneas para el manejo de la vegetación afectada, el planteamiento de actuaciones de corrección hidrológica, de control fitosanitario y de seguimiento y apoyo a la regeneración natural, así como asignar diferentes niveles de prioridad y hacer una primera aproximación de la inversión necesaria para su ejecución.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la cofinanciación del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER), incluyéndose en el Eje 2, medida 226 “Ayudas a la recuperación potencial forestal e implantación de medidas preventivas”.

8. Bibliografía

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.

GUZMÁN ÁLVAREZ, J.R.; VENEGAS TRONCOSO, J.; SESEÑA RENGEL, A.; SILLERO ALMAZÁN, M.L.; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, J.A. 2012. Biomasa forestal en Andalucía, Modelo de existencias, crecimiento y producción. Coníferas. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. 2008. Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) 1997-2007. Madrid.

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.

ROJO, L.; ALLOZA, J.A., GARCÍA, S.; GIMENO, T.; BAEZA, M. J.; VALLEJO, V.R. 2013. Guía técnica para la gestión de montes quemados. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.

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. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p.

RUIZ-PEINADO, R.; RÍO, M.; MONTERO, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest systems*, 20 (1). 176-188.