



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1612

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Donde hubo fuego, cenizas quedan: el efecto del fuego en la escorrentía superficial

SUÁREZ MUÑOZ, M. (1), HERRERO LANTARÓN, J. (2), BONET GARCÍA, F. J. (3)

(1) Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba.

(2) Grupo de Ecología Global. Departamento de Ecología. Modelling Nature. Universidad de Granada.

(3) Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal. Universidad de Córdoba

Resumen

Los incendios forestales son impulsores importantes de la desertificación en ambientes mediterráneos al exponer el suelo a la erosión por precipitaciones torrenciales. Es importante modelizar adecuadamente este proceso para predecir los posibles impactos de los incendios forestales sobre la desertificación. Tradicionalmente, la modelización del impacto del fuego se ha centrado en la pérdida de protección de la cubierta vegetal frente a la lluvia. Sin embargo, el fuego también afecta a las propiedades hidrológicas del suelo y de la vegetación. El fuego disminuye la interceptación por parte de la cubierta vegetal y aumenta la escorrentía superficial a causa de la impermeabilización temporal de la superficie del suelo afectado por el incendio. Esto tiene efectos opuestos en el balance final del agua, con cambios difíciles de evaluar sobre la infiltración, evapotranspiración desde el suelo y recarga de acuíferos. Evaluar correctamente el balance de agua tras un incendio es crucial, ya que determina el recurso disponible en el subsuelo, el caudal de barrancos y la regeneración futura de la vegetación. La cuantificación y valoración de estos factores en términos de servicios ecosistémicos mediante modelado hidrológico permite evaluar la eficacia de distintos escenarios de gestión. Esta contribución presenta una aproximación metodológica para incorporar la dinámica de la escorrentía superficial en la modelización de un paisaje forestal afectado por un Gran Incendio Forestal (Los Guájares, Granada, 2022, 5505 ha). Utilizando un modelo hidrológico de base física y alta resolución espacial y temporal, se establece una metodología reproducible para obtener las propiedades hidrológicas del suelo y la vegetación pre y posincendio. Para ello se utiliza información detallada de la vegetación preincendio y la severidad del incendio.

Palabras clave

Modelización hidrológica, incendio forestal, vegetación, desertificación

1. Introducción

La cuenca mediterránea se caracteriza por una prolongada sequía estival y precipitaciones concentradas en pocos eventos de elevada intensidad. En esta zona, la actividad humana es intensa, produciendo alteraciones y perturbaciones en el paisaje a corto, medio y largo plazo. Como resultado del clima y la actividad humana, el paisaje mediterráneo se caracteriza hoy día por una cobertura vegetal que combina parches de vegetación natural con masas antrópicas o antropizadas



bajo condiciones de estrés hídrico en aumento debido al cambio climático. El intenso uso del territorio, además, aumenta la ocurrencia y propagación de incendios forestales, que impulsan procesos de desertificación al exponer el suelo a la erosión tras eventos torrenciales.

La estacionalidad y escasez de las precipitaciones en la cuenca mediterránea hacen del agua un recurso fundamental para la vegetación y el ser humano. Eventos como los incendios forestales suponen una alteración importante del flujo de agua y tienen relevantes consecuencias sobre el funcionamiento de los ecosistemas y los servicios ecosistémicos que éstos proveen. Por ello es crucial evaluar correctamente el balance de agua tras un incendio, ya que determina el recurso disponible en el subsuelo, el caudal de barrancos y la regeneración futura.

Tradicionalmente, la modelización del impacto del fuego se ha centrado en la pérdida de protección de la cubierta vegetal frente a la lluvia, junto con la pérdida por retención de agua superficial por interceptación directa del agua de lluvia que esto también supone. Sin embargo, el fuego también afecta a la superficie del suelo, al material acumulado sobre el mismo y a otros procesos importantes realizados por la vegetación dentro del ciclo hidrológico como es la transpiración. Todo ello se traduce en cambios en parámetros hidrológicos relacionados con la vegetación y el suelo, que son la causa del aumento de escorrentía superficial directa, la disminución de la evapotranspiración y el aumento de la erosión que se producen tras un incendio. Estos cambios se van revirtiendo con el tiempo a medida que la vegetación se recupera y la superficie y capa superficial del suelo se lava.

Los modelos hidrológicos de base física, en contraposición a aquellos empíricos o conceptuales, nos permiten simular con cierta consistencia procesos o fenómenos ocurridos bajo escenarios hipotéticos de transformación de la realidad física para los cuales el modelo no haya sido específicamente calibrado y validado, por no existir datos reales para ello. Es lo que ocurre tras un incendio. El reto es detectar qué parámetros o propiedades hidrológicas se están viendo afectadas y en qué medida e intensidad.

La valoración de estos factores mediante modelado hidrológico permite mejorar la cuantificación de los impactos del fuego sobre la hidrología del paisaje afectado. Este trabajo describe la metodología empleada para incorporar la dinámica de la escorrentía superficial en la modelización de un paisaje forestal afectado por un Gran Incendio Forestal. El trabajo describe la metodología aplicada en el caso del incendio de Los Guájares (Granada, 2022), pudiendo ser aplicada en contextos similares.

Este trabajo se integra en una serie de acciones de investigación cuya finalidad última es promover la integración de modelos hidrológicos y modelos de paisaje forestal para avanzar hacia la creación de modelos ecohidrológicos. En la actualidad disponemos de potentes herramientas digitales que permiten modelizar el ciclo hidrológico en diversas situaciones y territorios. También contamos con



modelos que simulan el crecimiento de la vegetación y su relación con el suelo, clima y otros factores abióticos. Creemos que es importante avanzar en la integración de ambas aproximaciones para mejorar la modelización del funcionamiento de los sistemas forestales.

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Mejorar la simulación del balance hídrico del suelo tras un incendio forestal
- Establecer una metodología reproducible y basada en fuentes de información accesibles para casos de uso similares
- Comparar el balance hídrico y la escorrentía superficial de un paisaje afectado por un incendio frente a la situación sin incendio

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El incendio de Los Guájares (sur de Granada) tuvo lugar en septiembre de 2022, afectando a un total de 5505 ha (Dirección General de Política Forestal y Biodiversidad, 2022). La zona afectada comprende áreas forestales de matorral arbolado disperso y arbolado, principalmente masas de repoblación de *Pinus halepensis* y *P. pinaster* (76 % de la superficie). También se vieron afectadas zonas de cultivos leñosos (almendros, olivos). El paisaje afectado presenta una topografía compleja, con elevadas pendientes que favorecen la escorrentía superficial tras eventos de precipitación. Este incendio es representativo de lo que podría ser la nueva normalidad en el contexto mediterráneo: grandes incendios que afectan a amplias zonas de matorral y coníferas bajo condiciones de alto riesgo de propagación del fuego (Rodríguez et al., 2023) y donde la precipitación se caracteriza por prolongados periodos de sequía con episodios puntuales de lluvias intensas.

3.2 Modelización hidrológica

Para la modelización de la escorrentía superficial se ha utilizado el modelo WiMMed (Herrero et al., 2014), desarrollado y aplicado en Sierra Nevada y zonas del sur de España (Egüen et al., 2010). WiMMed es un modelo físico de alta resolución temporal (hora) y espacial (típicamente celdas de 25 x 25 m, elegible por el usuario) que simula la hidrología de un paisaje a partir de información sobre la vegetación que hay en él, las características del suelo (topografía, tipología de suelo, litología) y las condiciones meteorológicas.

WiMMed considera la vegetación como una capa estática que interacciona con el agua mediante la interceptación de la precipitación y la transpiración. La interceptación de la precipitación por parte de la vegetación se calcula a partir de la capacidad de almacenamiento máximo de cada cobertura vegetal (parámetro denominado S_{max}). Esta cobertura viene determinada a su vez por la vegetación presente y el porcentaje de cada celda efectivamente cubierta por dicha vegetación (fracccub). Por su parte, la transpiración de la cubierta vegetal se calcula a través



un coeficiente dependiente del tipo de cobertura, que relaciona la evapotranspiración potencial y la real de cada día. La evapotranspiración real es estimada como el promedio de una función exponencial con respecto al grado de saturación de humedad del suelo en ese momento. El coeficiente aplicado distingue entre la capa superficial - típicamente los primeros 25 cm del suelo, más expuestos a la interacción atmosférica y la vegetación herbácea - ($k_{EvapSup}$) y la capa subyacente, alcanzada por raíces más profundas ($k_{EvapProf}$).

Las características del suelo (tipo de suelo y litología) en combinación con la vegetación presente sobre ese suelo son utilizadas para estimar otras propiedades hidrológicas como son la conductividad saturada de la capa superficial del suelo (K_s), que controla la infiltración (afectada por la vegetación por el coeficiente $factorK_s$), o la rugosidad superficial de Manning (n_{mann}), que controla la velocidad de circulación de la escorrentía superficial directa (Herrero et al., 2014) con los efectos en la erosión ($rootB_{biomass}$) (Millares et al., 2020). La K_s es un parámetro hidrológico que tradicionalmente se calcula exclusivamente a partir de las propiedades físico-químicas del propio suelo. Para tener también en cuenta el efecto de la vegetación, es decir, de las propiedades biológicas, sobre ese parámetro, en este trabajo incluimos el coeficiente $factorK_s$ que modifica el valor original de K_s en función de la vegetación presente sobre el suelo.

Por su parte, las series temporales de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento) son utilizadas por el modelo como forzamiento atmosférico que dirige todo el ciclo hidrológico que se simula, determinando específicamente la precipitación y su tipo, la evapotranspiración potencial, y el balance de energía en la nieve.

3.3 Simulaciones y datos de entrada

Con el fin de cuantificar el efecto del incendio sobre la escorrentía superficial se simuló el ciclo hidrológico anual de la zona bajo distintas configuraciones del paisaje y condiciones meteorológicas. Los datos meteorológicos considerados correspondieron al periodo 2000-2001 a 2019-2020, constituyendo una serie con gran variabilidad y representación de años secos y húmedos. Por su parte, las configuraciones del paisaje correspondieron a la inmediatamente anterior e inmediatamente posterior al incendio, para lo cual se generaron mapas de vegetación pre- y posincendio.

El mapa de la vegetación preincendio se generó a partir del Sistema de Información sobre el Patrimonio Natural de Andalucía (SIPNA) 2020, disponible en formato abierto (Portal Ambiental de Andalucía). Esta base de datos espacial contiene información a escala de detalle (1:10.000) sobre la ocupación del suelo y la vegetación presente en el territorio andaluz. Para cada polígono, el SIPNA reporta el porcentaje ocupado por tipología de cobertura, además del porcentaje de suelo desnudo, entre otras variables. A cada tipo de cobertura se le asignaron valores para cada uno de los parámetros hidrológicos considerados en WiMMed (**Tabla 1**) en base a la bibliografía disponible (Muñoz-Carpena y Ritter, 2005; Herrero et al., 20011). A partir de estos valores se calcularon las propiedades hidrológicas de cada

celda del paisaje preincendio como el promedio ponderado de las coberturas presentes. Desde la perspectiva hidrológica de la interceptación, es importante señalar que la imputación de un cierto tipo de cobertura a un polígono no implica que la totalidad del mismo esté cubierta por ese tipo de vegetación, ya que también incluirá espacios libres expuestos a la lluvia directa. Así, si en un polígono se define un porcentaje ocupado por quercíneas se considera que en esta superficie las copas de los árboles ocluyen una parte de la lluvia, mientras que otra parte estará expuesta.

Tabla 1. Propiedades hidrológicas por tipo de cobertura. Smax: capacidad máxima de almacenamiento de agua por parte de la vegetación; fraccub: porcentaje de cobertura de vegetación; n_mann: rugosidad superficial de Manning; rootB_biomass: porcentaje de biomasa presente en los 10 primeros cm del suelo, relacionado con su erodibilidad; factorKs: coeficiente de modificación de la conductividad saturada superficial del suelo Ks en función de la vegetación presente; kEvap: coeficiente de transpiración de la cubierta vegetal que relaciona evapotranspiración diaria potencial y real para la capa superficial del suelo (kEvapSup) y la capa subyacente (kEvapProf).

Cobertura	Smax (mm)	fraccub (‰)	n_mann	rootB_biomass (10cm)	factorKs	kEvap	Sup	kEvap	Prof
Arbolado: Quercíneas	1,5	950	0,10	0,60	1,1	0,07		0,035	
Arbolado: Coníferas	1,4	950	0,10	0,30	1,0	0,08		0,045	
Arbolado: Eucaliptos	1,5	950	0,10	0,30	1,0	0,10		0,055	
Arbolado: otras frondosas	1,5	950	0,10	0,30	1,0	0,08		0,045	
Matorrales	1,0	650	0,08	0,60	1,1	0,07		0,03	
Herbáceas	0,7	1000	0,04	0,05	1,2	0,05		0,01	
Suelo desnudo	0,2	1000	0,025	0,05	1,2	0,03		0,00	
Cultivos herbáceos	0,7	600	0,04	0,20	0,9	0,08		0,04	
Cítricos	1,8	500	0,04	0,27	0,8	0,08		0,03	
Olivar	1,5	300	0,03	0,27	0,8	0,04		0,01	
Viñedo	1,3	200	0,03	0,27	0,8	0,04		0,01	
Otros frutales	1,3	150	0,03	0,27	0,8	0,03		0,01	
Agua	0,0	1000	0,01	0,00	1,0	1,00		0,00	
Edificaciones	0,0	0,013	0,00	0,0	0,00		0,00		
Viales	0,0	0,013	0,00	0,0	0,00		0,00		
Zona verde urbana	1,3	350	0,03	0,20	1,1	0,05		0,03	

Zona de extracción o vertido	0,0	0,05	0,00	1,0	0,03	0,00
------------------------------	-----	------	------	-----	------	------

Por su parte, el mapa de la vegetación posincendio se generó a partir de la cobertura de vegetación presente antes del incendio y la severidad del fuego, asumiendo un porcentaje de eliminación de cobertura según el tipo de vegetación y el nivel de severidad (**Tabla 2**), y ajustando el porcentaje de suelo desnudo en consecuencia. El mapa de severidad fue obtenido a partir del material elaborado por el equipo de Observación del Territorio del Área de Tecnología de la Información de la Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía (Dirección General de Política Forestal y Biodiversidad, 2022). La severidad corresponde a la clasificación en cuatro niveles del índice dNBR (differential Normalized Burn Ratio), comúnmente utilizado en el estudio de áreas forestales quemadas (Lentile et al., 2006). En este caso, el mapa de severidad se obtuvo mediante el cálculo del NBR antes y después del incendio y su posterior ajuste y calibrado con datos DRON obtenidos con fecha posterior al incendio. Una vez aplicada la severidad del incendio sobre la vegetación previa, las propiedades hidrológicas del paisaje posincendio se calcularon de la misma manera que el paisaje preincendio. Se consideró que las coberturas correspondientes a tipologías distintas de vegetación se mantuvieron constantes tras el incendio.

Tabla 2. Porcentaje de eliminación de cobertura por tipo de vegetación y grado de severidad del incendio. Basado en Balde et al., 2023 y Cadena et al., 2020.

Severidad	Herbáceas	Matorrales	Arbolado
	Nula		
Baja	100	100	40
Moderada	100	100	65
Alta	100	100	85

Adicionalmente, se realizó un cálculo simplificado de los efectos del incendio sobre la estructura superficial del suelo y del incremento de hidrofobicidad que éste experimenta (DeBano, 1966; DeBano and Krammes, 1966; Neary, 2011). La reducción en K_s observada o estimada en zonas incendiadas tiene un rango de variabilidad enorme, que en ocasiones se ha reportado con valores de reducción de K_s de hasta el 90% (Blake et al., 2010). Este efecto se reduce en el tiempo a medida que el suelo se va lavando, en un proceso que se prolonga durante 1 ó 2 años después del incendio (Ritsema and Dekker, 2003). La modelización de la hidrofobicidad del suelo es difícil porque requiere la medición de la escorrentía superficial en zonas quemadas desde el preciso momento en el que el incendio se produce, existiendo aún poca información al respecto (Wang et al., 2020). En este trabajo se han tomado como referencia los valores reportados por Robichaud (2000) y Neary (2011) para realizar una primera aproximación de este efecto en los momentos inmediatamente posteriores al incendio. En la **Tabla 3** se resumen los valores de reducción de K_s adoptados para cada grado de severidad.

Tabla 3. Porcentaje de reducción del parámetro Ks superficial del suelo por efecto del aumento de la hidrofobicidad tras un incendio.

Severidad	Reducción Ks
Nula	
Baja	15
Moderada	25
Alta	40

4. Resultados

El efecto del incendio sobre las propiedades hidrológicas de la zona afectada se refleja en la **Tabla 4**. La capacidad de almacenamiento de agua por parte de la vegetación (Smax), así como la transpiración de la misma (kEvap Sup y Prof) se reducen drásticamente debido a la disminución en la cobertura vegetal, lo que también ocasiona una pérdida en la rugosidad superficial del suelo. Como consecuencia, aumenta la velocidad superficial de la escorrentía. Por su parte, la conductividad saturada de la capa superficial del suelo (Ks) disminuye al incorporar el efecto del incendio sobre la hidrofobicidad del suelo.

Tabla 4. Valores medios de los parámetros hidrológicos del modelo Wimmed en la zona afectada por el incendio de Los Guájares (Granada, septiembre de 2022).

Parámetro	Valor preincendio	Valor posincendio
Smax (mm)	0,64	0,355
kEvapSup (adim)	0,0048	0,0029
KEvapProf (adim)	0,00053	0,00021
n_mann (admi)	0,046	0,034
Velocidad superficial (m/s)	0,74	0,82
Ks superficial (mm/h)	9,82	8,57

Los cambios producidos por el incendio sobre las propiedades hidrológicas del suelo resultan en una disminución en la interceptación y evapotranspiración de la vegetación del paisaje con y sin incendio durante, al menos, el año posterior al incendio. En promedio, la disminución en la interceptación y evapotranspiración se traduce en una mayor acumulación de agua subterránea, que pasa de un 27,9% a un 29,9% de toda la precipitación. Esta disminución, no obstante, varía en gran medida dependiendo de la precipitación en el año inmediatamente posterior al incendio (**Figura 1**).

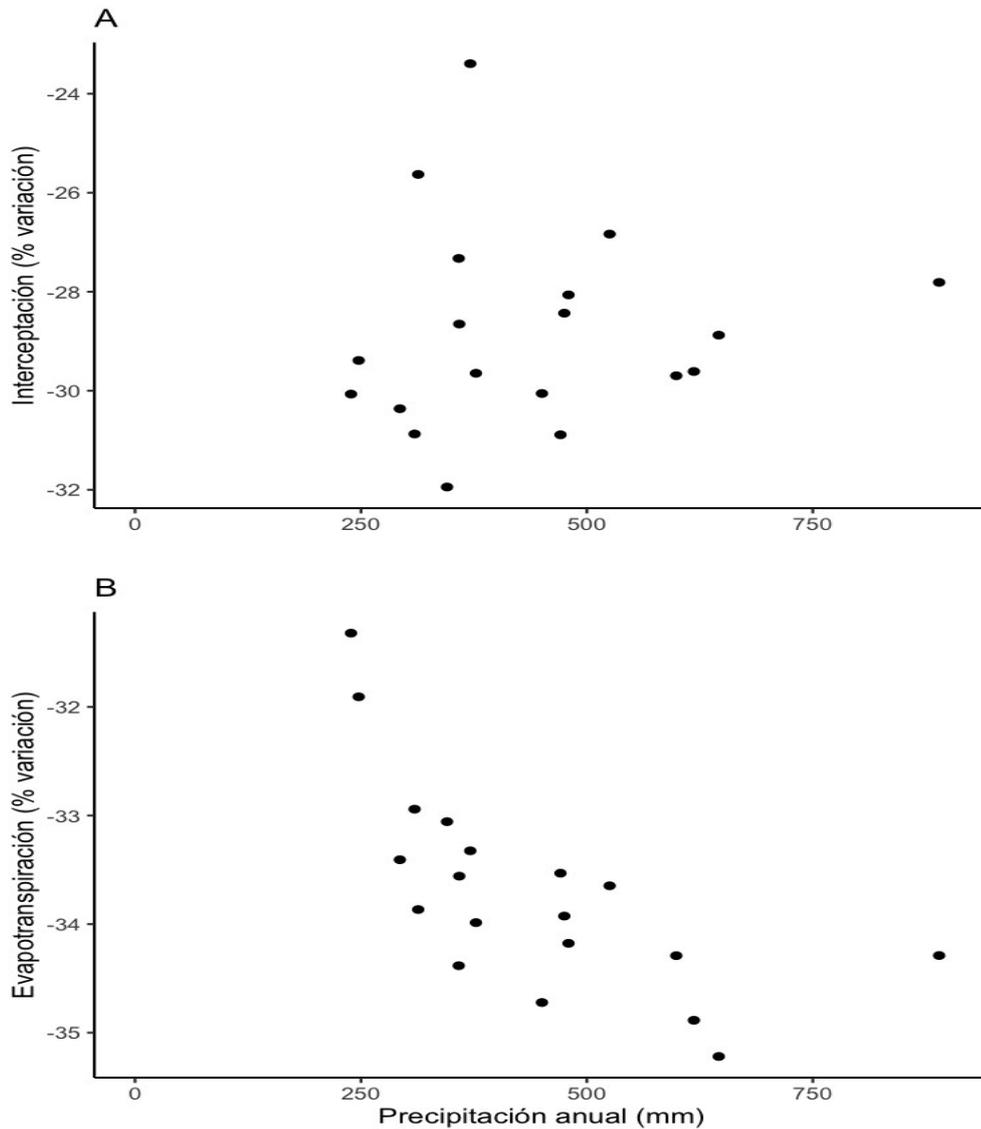


Figura 1. Porcentaje de variación en la evapotranspiración (A) y la interceptación (B) de la vegetación en el área afectada por el incendio de Los Guájares respecto de la precipitación del año inmediatamente posterior al incendio.

Los cambios en los distintos parámetros del modelo se traducen en cambios evidentes en los resultados de cada proceso hidrológico y, en definitiva, en el balance de agua. En cuanto al aumento de la escorrentía superficial directa se refiere, la **Figura 2** presenta el cambio producido en la misma, considerando el paisaje sin y con incendio. Por su parte, la **Tabla 5** muestra el balance completo del agua con y sin incendio.

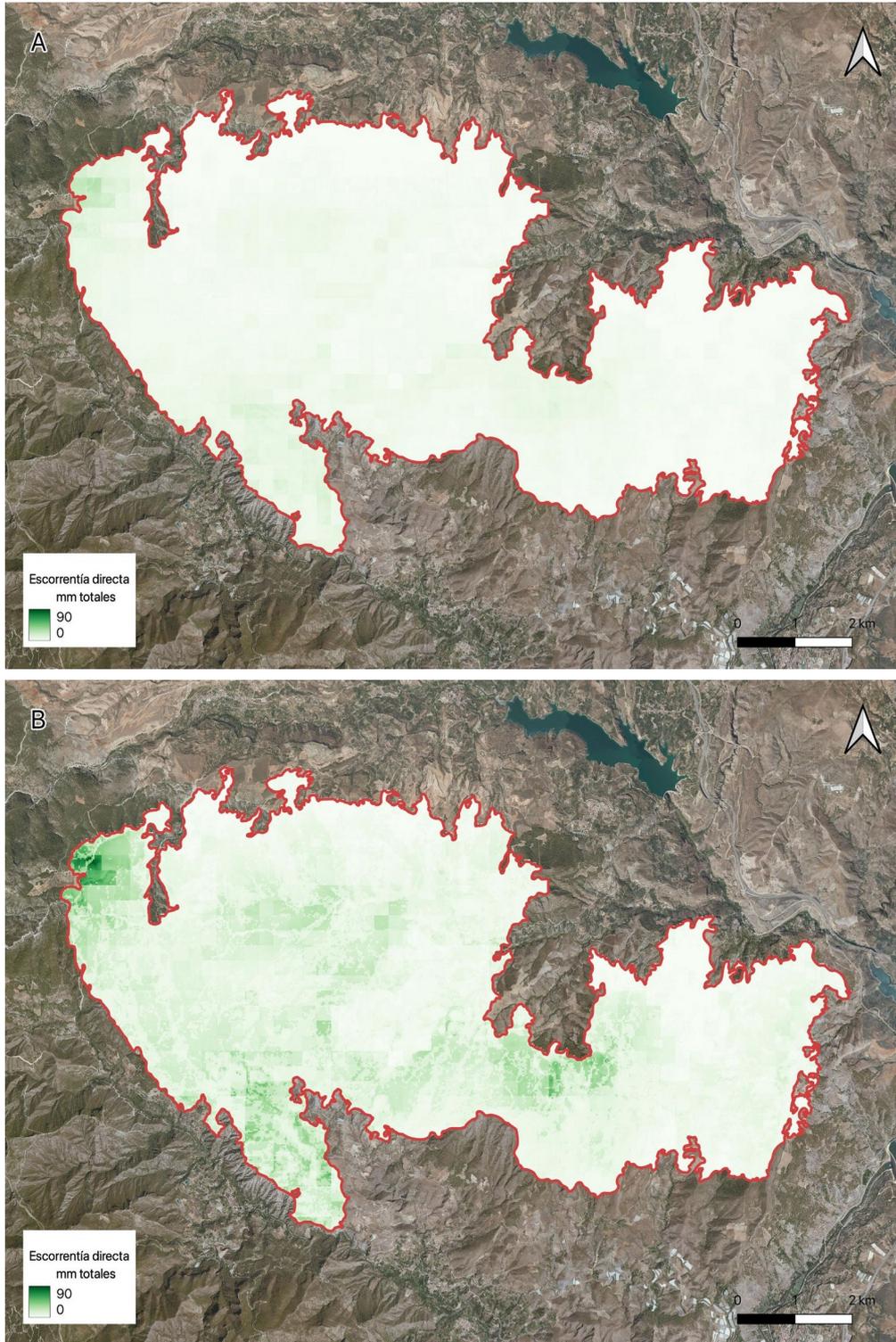


Figura 2. Variación en escorrentía directa superficial (mm totales) considerando el paisaje sin (A) y con incendio (B). Valores correspondientes al promedio para el periodo 2000-2001 a 2019-2002.

Tabla 5. Balance hidrológico de la zona de Los Guájaros con y sin incendio. Los valores se refieren al porcentaje sobre la precipitación total.

Sin incendio	Con incendio
460,6 hm ³ (100 %)	460,6 hm ³ (100 %)
0,2 hm ³ (0 %)	0,55 hm ³ (0,1 %)
73,6 hm ³ (16 %)	52,4 hm ³ (11,4 %)
386,8 hm ³ (84 %)	407,7 hm ³ (88,5 %)
43,2 hm ³ (9,4 %)	28,7 hm ³ (6,2 %)
128,6 hm ³ (27,9 %)	137,7 hm ³ (29,9 %)

5. Discusión

Este trabajo muestra el efecto de un incendio sobre el balance de agua de la zona afectada a partir de información básica sobre un paisaje quemado: la cobertura de la vegetación previa y la severidad del incendio.

La mejora en las últimas décadas de la cartografía de los mapas de usos y coberturas del suelo permite generar productos muy detallados, siendo la cobertura de la vegetación una variable fácilmente accesible a partir de múltiples fuentes de información relativas al paisaje forestal. En este caso se ha utilizado la información contenida en el SIPNA 2020, una fuente abierta y disponible para un territorio extenso (Andalucía) para la parametrización de las propiedades hidrológicas a través del modelo WiMMed.

En trabajos anteriores (Moreno-Llorca et al., 2020, Herrero et al., 2023) las propiedades hidrológicas del paisaje se asignaron a la clasificación de tipologías de coberturas (concretamente, al nivel N4 de la clasificación SIOSE). Esta metodología no tenía en cuenta posibles diferencias entre áreas clasificadas de igual manera, como sí se puede hacer en este caso. Así, la metodología actual mejora la definición de propiedades hidrológicas asociadas a la vegetación, ya que las particulariza para cada polígono considerando los porcentajes específicos de distintas clases de coberturas. Además, la información relativa a las coberturas corresponde una clasificación generalizable y fácilmente aplicable (**Tabla 1**), mientras que la clasificación SIOSE (nivel N4) sería difícilmente aplicable en zonas donde no existe esta información.

Para una adecuada simulación de la hidrología de un paisaje es necesario integrar las fuentes de información disponibles con un conocimiento profundo del paisaje, asegurando una parametrización óptima de las propiedades hidrológicas de las distintas coberturas. Así, por ejemplo, la categoría “otros frutales” abarca tipos de cultivos arbóreos hidrológicamente tan distintos como los cultivos tropicales en regadío o los cultivos de frutales de cáscara en secano. Por lo tanto, la nueva aproximación facilita la aplicación de la metodología a cualquier área donde sea posible obtener información sobre la cobertura, independientemente de la fuente,



aunque se hace preciso su aplicación integrada con conocimiento experto para una óptima parametrización del modelo.

Por su parte, la severidad del fuego se ha utilizado en este trabajo para determinar el grado de afección sobre la vegetación y, por extensión, sobre su nivel de cobertura del suelo (**Tabla 2**). La severidad del fuego es ampliamente utilizada en el análisis de paisajes afectados por incendios forestales (Lentile et al., 2006), y resulta fácilmente obtenible mediante el procesamiento de imágenes de satélite. Por ello, el establecimiento de reglas que relacionan la severidad con la pérdida de cobertura de distintas formaciones vegetales, aunque no exenta de limitaciones e incertidumbre, permite automatizar el efecto del incendio sobre la vegetación presente y, como consecuencia, las propiedades hidrológicas del área afectada. La combinación de información cualitativa y cuantitativa de la vegetación existente y la afección del incendio posibilita así la automatización de procesos para la conversión de los mapas de vegetación en mapas de propiedades hidrológicas de un paisaje afectado por el fuego.

Este trabajo permite analizar en detalle el impacto que genera la pérdida de cobertura vegetal sobre la interceptación del agua y la escorrentía superficial. Los resultados muestran con claridad cómo la escorrentía superficial se ha visto afectada por la ocurrencia del incendio. Las simulaciones han permitido simular dos efectos. Por un lado, la disminución de la capacidad de infiltración del suelo y el aumento equivalente de la cantidad de agua que escurre superficialmente de manera directa en los periodos de lluvia. Por otro lado, la disminución de la cubierta vegetal supone una disminución directa de la interceptación del agua de lluvia. Con menos protección por parte de la vegetación, hay más agua en superficie. Ambos fenómenos se solapan con el efecto común del aumento de la torrencialidad de la zona quemada, como consecuencia del aumento de los picos de los caudales superficiales, el aumento de la erosión de las zonas quemadas, y el aumento del arrastre de suelo junto con, en el caso particular del incendio, de las cenizas asociadas, con otras implicaciones asociadas sobre la calidad del agua.

Es importante destacar que, a pesar de la comentada impermeabilización del suelo, la infiltración total de agua en suelo y acuífero aumenta al haber más agua disponible en el sistema. La vegetación supone un consumo directo de agua por interceptación y evaporación desde la cubierta, y por transpiración desde el suelo. Al quedar esta mermada tras el incendio, existe más agua disponible en superficie para la escorrentía superficial, pero también para la infiltración en suelo. Una vez en el suelo, el agua no es eliminada tan rápido, lo que favorece una mayor humedad media y mayor percolación hacia las zonas de flujo subterráneo y acuíferos.

El efecto de las cenizas sobre la impermeabilización del suelo se ha abordado en este trabajo como una primera aproximación a la inclusión de la hidrofobicidad en la simulación de un incendio en una zona mediterránea. Para ello se han tomado como referencia los valores propuestos por Robichaud (2000) y Neary (2011), algo que, con limitaciones ha permitido mejorar la simulación del proceso hidrológico en su conjunto. Los resultados de escorrentía obtenidos con los valores escogidos



(Tabla 3) se mantienen relativamente conservadores (en torno al doble con el incendio que sin él), por lo que podrían considerarse reducciones de la K_s más pronunciadas, como otros autores sugieren (p.e. Blake et al., 2010). En el futuro sería adecuado seguir mejorando la modelización de la hidrofobicidad del suelo causada por el fuego, para lo cual serían necesarias medidas in-situ que permitieran calibrar adecuadamente los parámetros para la zona de estudio.

Los efectos sobre la hidrología de un incendio se extienden por un periodo muy variable entre distintos ejemplos analizados, y su duración final depende de varios factores relacionados con el tipo de suelo, el tipo de incendio, y el manejo de suelo antes y después del incendio (DeBano, 2003). Estos autores afirman que, en general, la hidrofobicidad generada por el incendio se diluye y lava suficientemente en 1 ó 2 años tras el incendio, por lo que el efecto real sobre el balance de agua, la ocurrencia de riadas y el arrastre de sustancias y sedimentos depende en gran medida de los tipos de años meteorológicos que acontezcan en los primeros años tras el incendio. La comparación de los resultados de la simulación entre ambos escenarios - con y sin incendio - relativos a 19 años hidrológicos distintos confirman esta influencia de la precipitación posincendio sobre el balance hídrico, con gran variabilidad en los balances de cada año.

6. Conclusiones

Este trabajo describe la modelización de la dinámica hidrológica de una zona forestal afectada por un Gran Incendio Forestal mediante una metodología sencilla y reproducible. La comparación entre el balance de agua de la zona afectada considerando la situación preincendio y paisaje posincendio muestra el profundo impacto del fuego sobre la interceptación del agua y la escorrentía superficial como resultado de la pérdida de cobertura vegetal. Los resultados confirman la influencia de la precipitación del año inmediatamente posterior al incendio sobre el balance hídrico, responsable de la gran variabilidad en los balances hídricos simulados bajo distintas condiciones meteorológicas. Por último, la incorporación de la impermeabilización del suelo causada por las cenizas a la modelización supone un avance en la simulación de la hidrología de zonas incendiadas, cuya optimización supone un reto a abordar en futuros trabajos.

7. Agradecimientos

Investigación realizada dentro del proyecto DesFutur con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea NextGenerationEU.

8. Bibliografía

BALDE, B.; BEGA-GARCÍA, C.; GELABERT, P. J.; AMEZTEGUI, A.; RODRIGUES, M.; 2023. The relationship between fire severity and burning efficiency for estimating wildfire emissions in Mediterranean forests. *J. For. Res.* 34:1195–1206

BLAKE, W. H.; THEOCHAROPOULOS, S. P.; SKOULIKIDIS, N.; CLARK, P.; TOUNTAS, P.; HARTLEY, R.; AMAXIDIS, Y.; 2010. Wildfire impacts on hillslope sediment and phosphorus yields. *JSSS* 10:671-682.



CADENA, D. A.; FLORES-GARNICA, J. G.; FLORES-RODRÍGUEZ, A. G.; LOMELÍ-ZAVALA, M. E.; 2020. Efecto de incendios en la vegetación de sotobosque y propiedades químicas de suelo de bosques templados. *Agro Productividad Agro Product* 13:189–198

DEBANO, L. F.; KRAMMES, J. S.; 1966. Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *Hydrological Sciences Journal* 11(2):14-19

DEBANO, L. F.; 1966. Formation of non-wettable soils...involves heat transfer mechanism. Res. Note PSW-RN-132. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. 8 p.

DEBANO, L. F.; 2003. The role of fire and soil heating on water repellency. In: *Soil water repellency: Occurrence, consequences, and amelioration*. Ritsema, C. J., & Dekker, L. W. Eds. Elsevier. 232:193-202

DIRECCIÓN GENERAL DE POLÍTICA FORESTAL Y BIODIVERSIDAD; 2022. Obras de emergencia para la mitigación del riesgo hidrológico forestal de los terrenos públicos afectados por el incendio forestal de Sierra de Los Guájares. Septiembre de 2022. Memoria Valorada. *Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul*.

EGÜEN, M.; AGUILAR, C.; POLO, M. J.; MORENO, I.; HERRERO, J.; MILLARES, A.; LOSADA, M. Á. 2010. WiMMed, a distributed physically-based watershed model (II): Application examples. *Environmental Hydraulics: Theoretical, Experimental and Computational Solutions - Proceedings of the International Workshop on Environmental Hydraulics, IWEH 2009*, 229-231.

HERRERO, J.; MILLARES, A.; AGUILAR, C.; DÍAZ, A.; POLO, M. J.; LOSADA, M. A.; 2011. WiMMed. Base teórica. Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, University of Granada and Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología, University of Córdoba. Granada.

HERRERO, J.; MILLARES, A.; AGUILAR, C.; EGÜEN, M.; LOSADA, M. A.; 2014. Coupling spatial and time scales in the hydrological modelling of mediterranean regions: WiMMed. In: CUNY Academic Works. In: Presented at the International Conference on Hydroinformatics, p. 8. ITGE-Junta de Andalucía: Atlas Hidrogeológico de Andalucía. 216 pp. Madrid

HERRERO, J.; MILLARES VALENZUELA, A.; MORENO LLORCA, R.; 2023. Outputs of the WiMMed hydrological model for Sierra Nevada (Spain). Sept2015-Aug2022. <https://zenodo.org/records/10054665>

LENTILE, L. B.; HOLDEN, Z. A.; SMITH, A. M. S.; FALKOWSKI, M. J.; HUDAK, A. T.;



MORGAN, P.; LEWIS, S. A.; GESSLER, P. E.; BENSON, N. C.; 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *Int. J. Wildl. Fire* 15:319–345

MILLARES, A.; HERRERO, J.; BERMÚDEZ, M.; LEIVA, J. F.; CANTALEJO, M.; 2020. Long-term modelling of soil loss and fluvial transport processes in a mountainous semi-arid basin, southern Spain. *In: River Flow 2020 - Twentieth International Conference on Fluvial Hydraulic*. Delf, Netherlands.

MORENO-LLORCA, R.; VAZ, A. S.; HERRERO, J.; MILLARES, A.; BONET-GARCÍA, F. J.; ALCARAZ-SEGURA, D.; 2020. Multi-scale evolution of ecosystem services' supply in Sierra Nevada (Spain): An assessment over the last half-century. *Ecosystem Services*, 46:101204

MUÑOZ-CARPENA, R. M.; RITTER, A.; 2005. Hidrología agroforestal. Mundi-Prensa. Madrid.

NEARY, D. G. 2011. Impacts of wildfire severity on hydraulic conductivity in forest, woodland, and grassland soils. *In: Hydraulic Conductivity—Issues, Determination, and Application*, vol. 7, p. 123-142.

PORTAL AMBIENTAL DE ANDALUCÍA; 2020. Sistema de Información sobre el Patrimonio Natural de Andalucía (SIPNA). Consejería de Sostenibilidad y Medio Ambiente. Junta de Andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/acceso-rediam/descargas>

ROBICHAUD, P. R.; 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of hydrology* 231:220-229

RODRIGUES, M.; CUNILL CAMPRUBÍ, À.; BALAGUER-ROMANO, R.; COCO MEGÍA, C. J.; CASTAÑARES, F.; RUFFAULT, J.; FERNANDES, P. M., RESCO DE DIOS, V.; 2023. Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe. *Sci. Total Environ.* 859(2):160320

WANG, J.; STERN, M. A.; KING, V. M.; ALPERS, C. N.; QUINN, N. W.; FLINT, A. L.; FLINT, L. E.; 2020. PFHydro: A new watershed-scale model for post-fire runoff simulation. *Environ Model Softw* 123:104555