

Efectos de un incendio forestal sobre la respuesta hidrológica de la cuenca mediterránea de Arbúcies (cordilleras costeras catalanas, NE España)

R. López Alonso^{1*}, A. Pérez Gispert¹ y R. J. Batalla²

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Lleida. Avda. Alcalde Rovira Roure, 191. 25198 Lleida. España

² Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. Avda. Alcalde Rovira Roure, 191. 25198 Lleida. España

Resumen

En agosto de 1994 un incendio forestal afectó al 15% de la superficie de la cuenca experimental de la riera de Arbúcies. Se trata de una cuenca mediterránea de 106 km², en la que predominan las masas de frondosas y los suelos arenosos y profundos. A partir de los registros continuos de precipitación y caudal, anteriores y posteriores al incendio (1991-1997), se seleccionaron 26 episodios con el objetivo de detectar modificaciones en la respuesta hidrológica de la cuenca debidas a los efectos del fuego.

Se ha detectado una mayor respuesta hidrológica para los episodios hasta seis meses después del incendio, tanto en volumen de escorrentía como en caudal máximo, siendo más acusado el incremento para los episodios de mayor magnitud. El incremento estimado en el caudal punta para el valor máximo del rango de registros de precipitación total es del 173%, mayor que el producido en la estimación de la precipitación neta, que es solamente del 40%. Los eventos ocurridos a partir de un año y medio después del incendio muestran una tendencia a la recuperación de la respuesta hidrológica previa al incendio.

Palabras clave: respuesta hidrológica, incendio forestal, cuenca mediterránea.

Abstract

Effects of forest fire on the hydrological response of a Mediterranean drainage basin (Arbúcies River, Catalan Coastal Ranges, NE Spain)

We analyse the hydrological response of the Arbúcies River basin after a wildland fire occurred in August 1994, which burnt 15% of its drainage area. The Arbúcies River is located in the Catalan Coastal Ranges, draining an area of 106 km². Deep sandy soils are predominant in the catchment. The study is based on rainfall and runoff records (1991-1997), from which twenty-six flood events were selected. River response, especially runoff volume and peak discharge, showed a remarkable increment for events occurred six months after the fire, in comparison with those of similar magnitude prior the fire. The higher the magnitude of the episodes the higher the degree of hydrological alteration. Maximum increment of peak discharge is 173%, which is substantially more important than that produced on the effective rainfall (+40%). Flood events tend to recover pre-fire hydrological response eighteen months after the fire.

Key words: hydrological response, forest fire, Mediterranean basin.

Introducción

La destrucción del ecosistema forestal de una cuenca de drenaje tiene efectos conocidos sobre su dinámica hidrológica (p. ej. Tiedeman *et al.*, 1979): a) por una parte, se produce la desaparición de la cubierta ve-

getal, lo que modifica directamente los procesos de interceptación y evapotranspiración, y b) por otra, se alteran notablemente las propiedades físicas y químicas del suelo, convirtiendo la materia orgánica superficial en cenizas solubles, y causando fenómenos como la hidrofobicidad del suelo, que afectan profundamente a los procesos hidrológicos (Chandler *et al.*, 1983). La falta de datos hidrológicos previos a los incendios es una de las principales dificultades en el análisis de sus

* Autor para la correspondencia: rlopez@eagrof.udl.es
Recibido: 08-05-03; Aceptado: 25-02-04.

efectos sobre la hidrología de cuencas (Lavabre *et al.*, 1993). La escorrentía superficial y, especialmente, el caudal del río es uno de los elementos más afectados. Scott y Van Wyk (1990) detectaron un aumento del 200% en la escorrentía anual y de hasta el 290% en los picos de las crecidas ocurridas durante el año siguiente al incendio de una cuenca en Sudáfrica. La forma de los hidrogramas de crecida también puede verse profundamente alterada, observándose picos secundarios rápidos y agudos, en lugar de las recesiones suaves anteriores (Brown, 1972). A los cambios en la hidrología les suceden los efectos sobre la erosión del suelo y el aumento de la carga química y de sedimento en los ríos que drenan la zona quemada (p. ej. Batalla y Sala, 1998; Inbar *et al.*, 1998; Moody y Martin, 2001; Batalla, 2002).

El análisis de los efectos hidrológicos de los incendios forestales se ve dificultado por la carencia de datos fiables antes y después de un incendio, ya que con gran frecuencia el interés por dichos efectos se inicia con posterioridad. Aun así, existen diferentes métodos de estudio en función del grado de planificación experimental. Una primera opción es la selección de cuencas gemelas y la quema controlada únicamente de una de ellas, midiendo con posterioridad los efectos del incendio (p. ej. Campbell *et al.*, 1977; Scott, 1993). El principal problema de este procedimiento es garantizar la suficiente similitud entre las cuencas elegidas. Como alternativa se puede plantear la quema controlada de una cuenca de la que se disponga una serie de datos suficientemente larga, contrastando así los efectos del incendio en una única cuenca. En ambos casos, dado que el incendio es provocado de forma controlada la superficie afectada por el fuego sólo va desde las decenas de metros cuadrados, correspondientes a las parcelas experimentales (p. ej. Cerdà, 1998; Inbar *et al.*, 1998), hasta las decenas de hectáreas en el caso de pequeñas cuencas (p. ej. Belillas, 1994). Sin embargo, cuando el incendio es por causas naturales o no controlado surge la posibilidad de estudiar las consecuencias en una superficie mayor, lo que reviste especial interés a fin de analizar la respuesta hidrológica a diferentes escalas. En ocasiones el incendio afecta a la totalidad o a parte de una cuenca instrumentada previamente con otros propósitos, por lo que se cuenta con registros anteriores y posteriores al fuego que pueden aprovecharse para un estudio de sus efectos (p. ej. Brown, 1972; Helvey, 1980; Lavabre *et al.*, 1993; Martin y Lavabre, 1997). Sin embargo, dado que en estos casos la instrumentación no se había

diseñado expresamente para tal fin pueden surgir ciertas limitaciones en la precisión de los datos. Una alternativa es instrumentar una parcela o cuenca gemela con posterioridad al incendio (p. ej. Prosser y Williams, 1998; Pierson *et al.*, 2001), aunque si la superficie quemada es de gran extensión resulta difícil encontrar una cuenca con la suficiente similitud.

En este artículo se presentan los resultados del estudio de los efectos hidrológicos de un incendio forestal no controlado y de extensión limitada acaecido en agosto de 1994 en la cuenca mediterránea de Arbúcies (Cordilleras Costeras Catalanas, España). El estudio ha fijado la atención en los efectos del fuego sobre la capacidad de las tormentas de generar crecidas en el cauce principal. Se han empleado para ello los registros de precipitación y caudal de diferentes eventos que comprenden un periodo de seis años aproximadamente centrados en la fecha del incendio. Este estudio representa una de las escasas oportunidades en el ámbito mundial de analizar las consecuencias hidrológicas de un incendio forestal natural o no controlado en una cuenca de gran extensión previamente instrumentada.

Material y Métodos

Medio físico de la cuenca y descripción del incendio

La cuenca de la riera de Arbúcies está situada en la parte norte de las Cordilleras Costeras Catalanas, tiene su cabecera en la cordillera Prelitoral y desagua en la depresión Prelitoral a la altura de Hostalric (figura 1). La cuenca está situada en los términos municipales de Arbúcies y Sant Feliu de Buixalleu, en la provincia de Girona, a una distancia de 75 km de Barcelona y a 25 km del mar Mediterráneo. La riera de Arbúcies es uno de los afluentes principales del río Tordera. La cuenca estudiada tiene una superficie de 106 km², una pendiente media del 32% y una elevación media de 565 m. El cauce principal tiene una longitud de 23,5 km y una pendiente media del 3,2%.

El clima de la cuenca de Arbúcies se puede clasificar como mediterráneo húmedo, que se caracteriza por veranos secos, aunque sin llegar al estiaje total, y unos máximos de precipitación en otoño y primavera (Martín-Vide, 1985). La precipitación media anual es de 976,1 mm con una desviación estándar de 301,7 mm. El río es perenne y presenta un caudal medio anual de

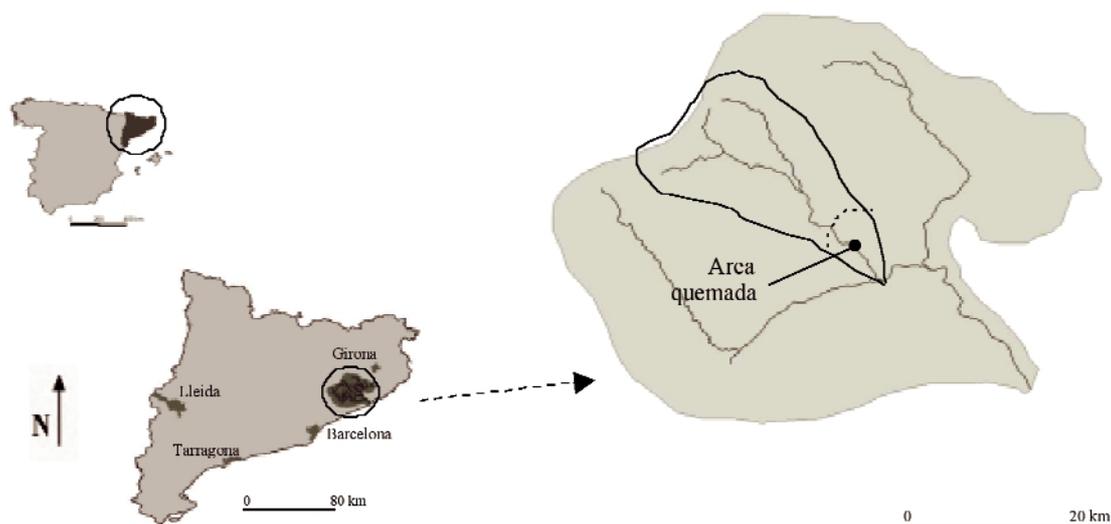


Figura 1. Localización de la cuenca de Arbúcies en el marco de la cuenca del río Tordera (NE Península Ibérica), con indicación del área quemada en agosto de 1994.

1,1 m³/s. La serie de temperaturas disponibles para el núcleo de Arbúcies (1970-80) da una temperatura media anual de 12,3°C, con una ligera variación interanual ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

La granodiorita es la roca más común entre las rocas plutónicas de esta región, ocupando el 70% de la superficie de la cuenca de Arbúcies. Los leucogranitos se encuentran en el 10% de la superficie de la cuenca, a menudo con una transición gradual hacia la granodiorita. También hay áreas de esquistos y micaesquistos (5%), neis (5%) y pequeñas áreas de mármol (< 1%), todas ellas en la parte baja de la cuenca. Los suelos son de tipo pardo ácido, moderadamente ácidos con una textura areno-limosa y predominio de la fracción de arena gruesa que se explica por el tipo de roca madre y su notable grado de alteración. La profundidad de los perfiles varía entre 17 y 46 cm (Herrer, 1981).

Aproximadamente un 96% de la superficie de la cuenca se halla ocupada por vegetación forestal. Las especies de frondosas se extienden por un 62% de su superficie, los bosques mixtos de coníferas y frondosas ocupan un 29% del total y el resto se reparte entre masas puras de coníferas y matorral. Las masas de frondosas con mayor extensión son las de *Quercus suber* L. y *Quercus ilex* L., o las de sus asociaciones fitosociológicas, que ocupan el 48% de la superficie de la cuenca y se distribuyen principalmente en la mitad noroeste de la misma. Las asociaciones de coníferas y

frondosas, integradas por *Pinus pinea* L., *Quercus suber* L. y *Quercus ilex* L., se encuentran distribuidas en la mitad sudeste de la cuenca. Es, asimismo, significativa la presencia de hayedos (7% de ocupación de toda la cuenca) en el oeste, rodeando a Les Agudes en las cotas superiores a 900 m y hasta los 1600 m. En la misma zona que los hayedos pero en cotas superiores al límite del arbolado encontramos enebrales. Por otra parte, a lo largo de la red de drenaje principal se localizan de forma continua choperas (3%). Respecto a la vegetación forestal cabe remarcar que por lo general presenta un rango de variación del porcentaje de cobertura del terreno que oscila entre el 80 y el 100%, para todas las especies. Los usos agrícolas y urbanos son muy minoritarios no sobrepasando el 5% de la superficie total de la cuenca, y ligados principalmente al núcleo urbano de Arbúcies.

El incendio aconteció en agosto de 1994 y resultó calcinada la parte baja de la cuenca, con un 10% de la superficie totalmente quemada y un 5% afectada parcialmente (Batalla y Sala, 1998). El incendio fue de alta intensidad, tal y como pusieron de manifiesto las cenizas blancas que cubrían toda la zona afectada. El fuego alcanzó la parte de la cuenca hasta cuatro kilómetros aguas arriba de la estación de aforo de caudal (figura 1) y afectó principalmente a masas mixtas de coníferas y frondosas, choperas y vegetación de ribera. No se llevó a cabo un seguimiento de la evolución en la regeneración de la cubierta vegetal, no obstante,

aproximadamente a los tres años del incendio se podía observar un abundante regenerado de pino y un vigoroso rebrote de los pies de encina. No se hizo ningún esfuerzo de regeneración artificial de la zona quemada.

Instrumentación y registros hidrológicos

La cuenca de la riera de Arbúcies fue objeto de estudio entre 1990 y 1994 en el marco de un proyecto sobre transporte fluvial de sedimentos. Con este fin se llevaron a cabo mediciones y muestreos de carga sólida e iónica en el río. Con el propósito de caracterizar de manera general la respuesta fluvial de la cuenca y poderla correlacionar con la carga sólida, se instalaron diversos instrumentos de medición hidrológica. Por lo tanto, el diseño de la medición no obedecía específicamente al control de los efectos de un incendio. En este contexto, el registro de precipitación se inició en 1991 con un pluviógrafo de banda tipo Hellmann localizado en el núcleo urbano de Arbúcies, que a su vez se hallaba ubicado centralmente en la cuenca de estudio. El aparato referido suministra en banda de papel cuadriculada un registro continuo y acumulado de la precipitación con resolución temporal de una hora y altura de precipitación de una décima de milímetro. Por consiguiente, a partir de dicha información es posible contar con el hietograma horario de las tormentas estudiadas. El registro pluviométrico se abandonó a finales de 1997 por razones presupuestarias y de falta de personal.

El sistema de aforo de caudal corresponde a la estación de aforo nº 56 de la Agència Catalana de l'Aigua, actual organismo titular de la estación, y consta de un vertedero y un limnógrafo registrador. El vertedero, de labio fino, determina una sección de control hidráulico en el que se asegura una relación biunívoca entre profundidad de agua y caudal, representada en la curva de aforo. La calibración más reciente de la estación antes del incendio se realizó a partir de aforos semanales y durante crecidas entre 1990 y 1993 (Batalla, 1993), y mediante análisis hidráulico (Martín-Vide *et al.*, 1994). El registro de la altura de agua en el vertedero se confía a un limnógrafo de flotador de la compañía OTT®, que representa la variación del nivel con el tiempo (limnograma) en una banda cuadriculada de escala temporal horaria y escala de calado 1:10. Desde 1990 hasta 1994 se realizó una calibración semanal y durante las crecidas mediante un

molinete hidráulico C-2 OTT®. Asimismo, se cuenta con la serie histórica de registro, iniciada en 1967, de caudal máximo instantáneo anual y caudal diario máximo anual. Con el fin de determinar el hidrograma de caudal de paso horario directamente generado por las tormentas estudiadas se procedió a la separación del flujo base mediante el método de la línea recta propuesto en Chow *et al.* (1988).

Adoptando el criterio de seleccionar aquellos eventos para los que se registró un caudal máximo instantáneo de crecida superior a un umbral en torno a 1 m³/s resultaron 26 episodios comprendidos en el periodo 1991 y 1997, con una altura de precipitación que variaba entre 18,0 mm y 244,7 mm y con un caudal máximo instantáneo entre 0,8 m³/s y 27,14 m³/s. En la tabla 1 se muestra, para los 26 episodios escogidos, el valor de los parámetros hidrológicos registrados, siendo P la altura de precipitación bruta, Pe la altura de precipitación neta, T un índice de la estructura temporal de la tormenta (Ceballos, 1999), Qm el caudal máximo instantáneo del hidrograma de escorrentía y tb el tiempo base del hidrograma. La altura de precipitación efectiva (Pe) se ha determinado dividiendo el volumen de escorrentía del hidrograma registrado entre el área de la cuenca, mientras que el tiempo base (tb) es la duración total del hidrograma. El índice T se calcula como:

$$T = \sqrt{P_{tot}} + \sqrt{\frac{Max1 - MedLL}{DTLL}}$$

denotando P_{tot} la precipitación total de la tormenta en mm, Max1 la precipitación máxima horaria del hietograma en mm/h, MedLL la intensidad media de precipitación calculada sobre la duración total del evento en mm/h y DTLL la desviación típica respecto a MedLL en mm/h.

Metodología de análisis

Con objeto de detectar respuestas hidrológicas diferenciales motivadas por el efecto del fuego se han definido tres conjuntos de datos en función de su ocurrencia respecto al incendio. El primer conjunto (C1) comprende 14 episodios anteriores al incendio de agosto de 1994; el segundo (C2) lo forman cinco eventos del primer semestre posterior al incendio, y por último, al tercer conjunto (C3) pertenecen siete episodios posteriores a un año y medio después del incendio. El motivo de considerar dos conjuntos de episodios pos-

Tabla 1. Valor registrado de P, Pe, T, Qm, tb, tp y tr de cada episodio

Evento	Fecha	P (mm)	Pe (mm)	T (-)	Qm (m ³ /s)	tb (h)	tp (h)	tr (h)
1	08/05/91	66,4	3,94	9,80	5,39	53	26	6
2	29/11/91	244,7	29,22	17,81	27,14	129	74	11
3	23/01/92	98,5	6,72	11,50	8,57	58	12	21
4	01/05/92	54,9	0,37	9,24	0,80	27	10	7
5	01/06/92	48,1	1,16	8,40	3,79	30	5	4
6	06/06/92	26,4	0,17	6,50	0,89	12	5	7
7	05/07/92	36,6	0,56	7,90	2,49	27	2	1
8	26/09/92	35,0	0,65	7,90	2,22	28	4	8
9	08/10/92	39,0	0,49	7,50	2,53	20	4	4
10	24/12/92	108,0	3,76	12,60	6,65	61	30	4
11	04/02/93	61,4	1,29	9,10	2,55	33	14	5
12	13/03/93	90,1	4,47	11,76	5,62	75	25	13
13	29/04/93	18,0	2,38	5,88	3,79	43	12	5
14	22/09/93	70,8	0,71	10,20	2,25	27	11	24

15	24/08/94	14,6	0,12	4,70	1,80	10	2	1
16	29/09/94	45,1	0,91	8,30	2,55	30	15	4
17	09/10/94	119,3	7,65	12,60	22,73	59	7	15
18	04/11/94	30,3	0,72	7,40	2,90	34	20	11
19	02/12/94	69,4	3,74	9,80	6,20	39	9	15

20	15/12/95	89,3	2,14	11,10	9,80	21	7	8
21	14/10/96	109,2	2,60	11,96	4,44	46	20	1
22	11/11/96	102,8	7,01	12,00	12,22	72	13	9
23	07/12/96	96,4	7,44	11,40	20,72	33	15	0
24	24/01/97	55,0	1,34	8,70	2,55	34	10	2
25	03/06/97	58,7	1,85	9,20	10,03	22	8	23
26	28/06/97	25,0	0,43	6,20	2,64	13	3	6

P: altura de precipitación bruta. Pe: altura de precipitación neta. T: índice de estructura temporal de la tormenta. Qm: caudal máximo instantáneo del hidrograma de escorrentía. tb: tiempo base del hidrograma. tp: tiempo al pico del hidrograma (tiempo entre el inicio de la escorrentía y el instante de caudal máximo). tr: tiempo de respuesta (tiempo entre el inicio de la tormenta y el inicio de la escorrentía). Las líneas discontinuas separan los conjuntos C1, C2 y C3.

teriores al incendio ha venido determinado por el hecho de que no se pudo seleccionar ningún episodio entre seis meses y un año y medio posterior al incendio, por lo que tal lapso de tiempo podría significar un comportamiento diferencial, habida cuenta de la gradual recuperación de la respuesta hidrológica de la cuenca a la situación anterior no perturbada.

A partir de los tres conjuntos definidos en el párrafo anterior (C1, C2, C3) se han definido tres agrupaciones con el fin de detectar una respuesta hidrológica diferente antes y después del incendio y, además, comprobar si la respuesta posterior al incendio puede considerarse homogénea, es decir, en qué medida persisten los efectos del fuego entre un año y medio y tres años después. La primera agrupación (A1) contrasta, por un lado, C1 y, por otro, la suma de C2 y C3. La segunda agrupación (A2) contrasta los tres conjuntos (C1, C2 y C3) individualmente, a fin de detectar res-

puestas diferenciales entre los tres periodos considerados. Por último, la tercera agrupación (A3) contrasta, por un lado, la suma de C1 y C3 y, por otro, C2.

La respuesta hidrológica de la cuenca se modelará, atendiendo a la información disponible y al fin de contraste que se persigue, a partir de la regresión lineal simple. Como procedimiento general, dentro de cada agrupación se contrastarán únicamente aquellas rectas de regresión cuyo coeficiente de determinación (R^2) alcance al menos un valor de 0,50 y además cuente con un nivel de significación inferior al 5% ($p < 0,05$) (calculado mediante la transformación a una distribución t de Student). En caso contrario no se emplearan como elemento de análisis y cuantificación. Como variables dependientes, que permitan una descripción sintética del comportamiento hidrológico, se han tomado la precipitación neta (Pe) y el caudal máximo de los hidrogramas de escorrentía (Qm). Estas

dos variables se han correlacionado con P, T y tb cuando Pe es la variable dependiente y con P, T, tb y Pe cuando lo es Qm. No se ha tomado directamente la intensidad media o máxima de precipitación de cada episodio como variable independiente explicativa dado que trabajos precedentes informan de la falta de correlación entre las variables dependientes escogidas y la intensidad de precipitación en cuencas forestales (p. ej. Hewllet, 1977 y 1984; Ávila, 1988; Ceballos, 1999). Merece ser notado, sin embargo, que el índice T toma en cuenta, además de la altura total de precipitación, la intensidad de precipitación.

Con el fin de decidir si el episodio fechado el 29/11/91 era una observación influyente, dada su magnitud extrema (especialmente en cuanto a P, Pe, tb y tp), se compararon las regresiones P-Pe y Pe-Qm resultado de involucrar, por un lado, a todos los eventos y, por otro, a los restantes después de eliminar el citado episodio. A partir del impacto que provocaba el episodio con fecha 29/11/91 en las rectas de regresión y del análisis de los gráficos de residuos, éste se rechazó en los análisis posteriores que tenían como finalidad el fin de detectar comportamientos diferenciales respecto al incendio. Por ello, el conjunto C1 constará de 13 eventos y el total de episodios será de 25.

Hipótesis y limitaciones

Dado que la instrumentación no se había diseñado específicamente con el objeto de analizar los efectos hidrológicos del incendio de agosto de 1994, se deben asumir una serie de hipótesis respecto a aquellas variables que no han sido registradas. En primer lugar, se ha considerado admisible que la precipitación registrada en el único pluviógrafo es suficientemente representativa de toda la cuenca. Este hecho se justifica por dos razones: a) la centralidad del pluviómetro en el conjunto de la cuenca, que tanto puede recoger lluvias asociadas al paso de frentes desde el oeste como lluvias producto de episodios de levante, y b) por el alto umbral de caudal punta impuesto en la selección de eventos (en torno a 1 m³/s), lo que permite deducir que las crecidas estudiadas son el resultado de una precipitación generalizada y no el efecto de una tormenta localizada en una zona reducida de la cuenca.

Por otra parte, ya que no se cuenta con mediciones directas del contenido de agua en el suelo en el periodo inmediatamente anterior a los episodios analizados, se clasificarán las tormentas, en virtud del método del

Tabla 2. Clases antecedentes de humedad en función de la precipitación de los cinco días anteriores según el método del Número de Curva (Mintegui y Robredo, 1993)

Clase antecedente de humedad	Precipitación durante los cinco días previos (mm)	
	Periodo húmedo	Periodo seco
Clase I. Seca	< 12,5	< 35,5
Clase II. Normal	12,5-28,0	35,5-53,0
Clase III. Húmeda	> 28,0	> 53,0

Número de Curva (NRCS, 1997), en tres clases en función de la condición antecedente de humedad estimada a partir de la precipitación en los cinco días previos al evento y la época del año (tabla 2). La información correspondiente a la precipitación de los cinco días anteriores solamente se halla disponible hasta noviembre de 1994, por lo que para ocho de los 26 episodios no es posible una clasificación con el método empleado. Sin embargo, el resto de los episodios se agrupan en la clase seca, a excepción de uno (fechado el 26/09/92) que lo hace en la normal, mientras que ninguno lo hace en la húmeda. De lo anterior se desprende que la pauta general de los episodios con datos de precipitación antecedente es la pertenencia a la clase seca y que las excepciones lo hacen en el grupo siguiente, con lo que no ocurren contrastes acusados entre clase seca y húmeda. Si se asume que esta pauta se cumple para el resto de los episodios en los que no hay datos, entonces cabe asumir que la influencia de las condiciones antecedentes de humedad en la variabilidad observable de la respuesta hidrológica es sustancialmente inferior que la atribuible al efecto del fuego.

Resultados

Primera Agrupación (A1)

En la tabla 3 se presenta la matriz del coeficiente de determinación para la primera agrupación (A1) [siempre que el coeficiente de determinación de la recta de regresión sea mayor o igual a 0,50 y tenga un nivel de significación inferior al 5% ($p < 0,05$)] en la que se contrasta, por un lado, C1 y la suma de C2 y C3, por otro. Basándose en las dos rectas de regresión obtenidas es posible calcular el incremento que se produce en la variable dependiente, Pe o Qm, para un valor dado de la variable independiente. En la tabla 4 se presenta el incremento calculado para la recta de regre-

Tabla 3. Matriz del coeficiente de determinación (R^2) de la regresión lineal simple para A1

	P	T	tb	Pe
<i>Pe</i>				
C1	0,53	—	0,79	—
C2+C3	0,68	0,64	0,56	—
<i>Qm</i>				
C1	0,55	—	0,73	0,92
C2+C3	0,55	0,52	—	0,82

Únicamente aparece el valor de aquellas rectas de regresión con $R^2 \geq 0,50$ y $p < 0,05$.

sión correspondiente a la suma de C2 y C3 sobre la de C1, cuando se calcula sobre el valor mediano y máximo del rango de datos registrados de la variable independiente. En síntesis se puede afirmar que después del incendio se detecta un incremento de la respuesta hidrológica, es decir, un aumento de Pe o Qm y que, en general, es más acusado para el rango superior de episodios registrados. Asimismo, se aprecia que Qm es más sensible al incremento que Pe.

Segunda Agrupación (A2)

En la tabla 5 se presenta la matriz del coeficiente de determinación para la segunda agrupación (A2) (siempre que el coeficiente de determinación de la recta de regresión alcance al menos un valor de 0,50 y tenga un nivel de significación inferior al 5% ($p < 0,05$)) en la que se contrastan C1, C2 y C3 independientemente, mientras que en las figuras 2 a 5 se representan las rectas de regresión correspondientes.

En la tabla 6 se presenta el incremento calculado para las rectas de regresión de C2 y C3 respecto de la recta C1 cuando se calcula sobre el valor mediano y máximo del rango de datos registrados de la variable

independiente. Nuevamente, se puede afirmar que después del incendio se detecta un incremento de la respuesta hidrológica, es decir, un aumento de Pe y Qm; que es más acusado para el rango superior de episodios registrados. Después del incendio se detecta un incremento de la respuesta hidrológica más intenso para Qm como variable dependiente que para Pe cuando se contrastan las rectas de regresión correspondientes a C2 y C1. Asimismo, se observa que para el rango máximo de Pe es superior el incremento en la recta de C2 que en la de C3.

Tercera Agrupación (A3)

En la tabla 7 se presenta la matriz del coeficiente de determinación para la primera agrupación (A3) (siempre que el coeficiente de determinación de la recta de regresión alcance un umbral de 0,50 y tenga un nivel de significación inferior al 5% ($p < 0,05$)) en la que se contrasta, por un lado, la suma de C1 y C3, y por otro, C2. En la tabla 8 se presenta el incremento calculado para la recta de regresión de C2 sobre la de la recta suma de C1 y C3, cuando se calcula sobre el valor mediano y máximo del rango de datos registrados de la variable independiente. En, general, puede afirmarse que la respuesta hidrológica es mayor para el conjunto de episodios ocurridos durante los seis meses después del incendio (C2) que para la suma de C1 y C3. En este caso no es tan clara la tendencia a un mayor incremento en Pe o Qm cuando se toma el valor máximo de la de la variable independiente registrada respecto del mediano, como se refleja en la regresión P-Pe. No es posible constatar un mayor incremento en las rectas de regresión de Qm que en las de Pe (tal y como ocurría en A1 y A2) dado que para ninguna de las variables independientes se cuenta con ambas rectas.

Tabla 4. Incremento de la precipitación neta y del caudal máximo para la recta de regresión C2+C3 respecto de C1 según A1

	P (mm)		T		tb (h)		Pe (mm)	
	Med.	Máx.	Med.	Máx.	Med.	Máx.	Med.	Máx.
	58,7	119,3	9,2	12,6	33,0	75,0	1,3	7,7
Incremento Pe (%)	14	20	—	—	81	36	—	—
Incremento Qm (%)	84	117	—	—	—	—	18	31

Med y Máx.: valor mediano y máximo, respectivamente, del rango de datos registrados de la variable independiente. Únicamente se contrastan aquellas rectas de regresión con $R^2 \geq 0,50$ y $p < 0,05$.

Tabla 5. Matriz del coeficiente de determinación (R^2) de la regresión lineal simple para A2

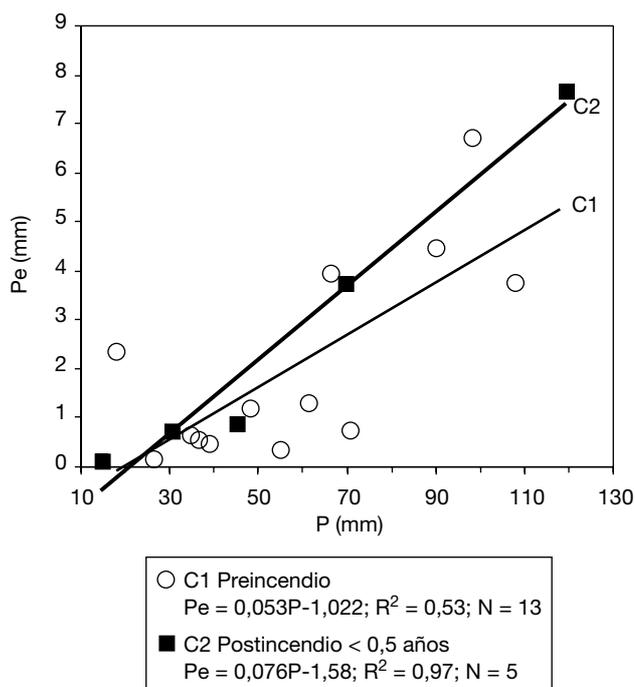
	P	T	tb	Pe
<i>Pe</i>				
C1	0,53	—	0,79	—
C2	0,97	0,86	0,81	—
C3	—	—	—	—
<i>Qm</i>				
C1	0,55	—	0,73	0,92
C2	0,88	—	—	0,93
C3	—	—	—	0,72

Únicamente aparece el valor de aquellas rectas de regresión con $R^2 \geq 0,50$ y $p < 0,05$.

Discusión

Comparando las rectas de regresión de las tres agrupaciones (A1, A2 y A3) se ha observado un aumento del volumen de escorrentía, expresado en forma de precipitación efectiva, después del incendio, representado como C2, C3 o la suma de ambos. Este incremento de la escorrentía puede explicarse fundamentalmente en función de la disminución de la capacidad de infiltración e interceptación que produce el fuego.

Asimismo, se ha observado un incremento del caudal máximo, tanto en función de la precipitación bruta como en función de la precipitación neta. Cabe inferir, por tanto, que el proceso de generación y propagación de la escorrentía en la cuenca sufre una transformación debida al incendio, alcanzando un caudal máximo mayor para un mismo volumen de escorrentía. Este fenómeno se puede explicar por una respuesta hidrológica de la cuenca más rápida después del fuego. En efecto, al disminuir la capacidad de in-

**Figura 2.** Segunda agrupación (A2). Contraste de regresión P-Pe.

terceptación e infiltración por efecto del incendio se genera más escorrentía superficial y ésta escurre con mayor velocidad hacia la red de drenaje, por lo que ocurren hidrogramas de crecida con mayor punta de caudal y menor tiempo al pico. Esta explicación está en consonancia con los estudios de Sempere *et al.* (1994 y 1996), según los cuales después del incendio se aprecia en el hidrograma unitario de la cuenca un acusado aumento del caudal máximo y una disminución del tiempo al pico, es decir, el valor punta es mayor y se presenta antes.

En las tablas 4 y 6 se ha podido observar que los efectos del incendio han provocado un aumento del

Tabla 6. Incremento de la precipitación neta y del caudal máximo de las rectas de regresión de C2 y C3 sobre la regresión de C1 según A2

	P (mm)		T		tb (h)		Pe (mm)	
	Med.	Máx.	Med.	Máx.	Med.	Máx.	Med.	Máx.
	58,7	119,3	9,2	12,6	33,0	75,0	1,3	7,7
C2. Incremento Pe (%)	36	40	—	—	54	160	—	—
C2. Incremento Qm (%)	112	173	—	—	—	—	30	115
C3. Incremento Pe (%)	—	—	—	—	—	—	—	—
C3. Incremento Qm (%)	—	—	—	—	—	—	78	81

Med y Máx.: valor mediano y máximo, respectivamente, del rango de datos registrados de la variable independiente. Únicamente se contrastan aquellas rectas de regresión con $R^2 \geq 0,50$ y $p < 0,05$.

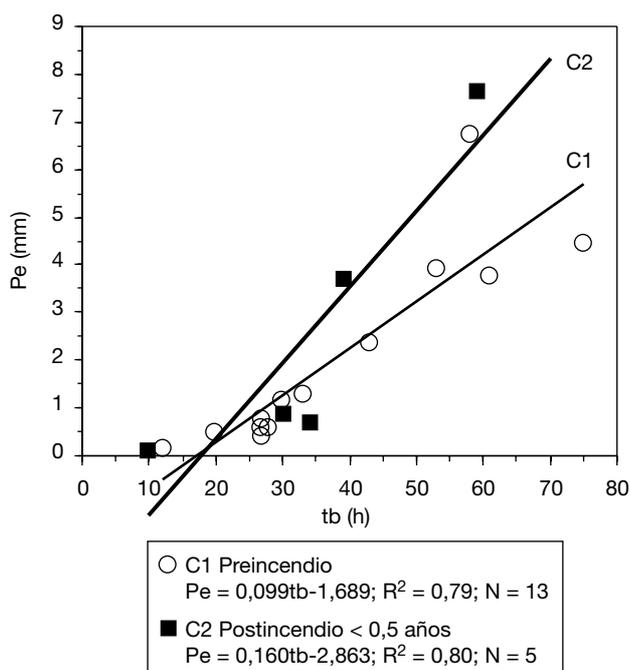


Figura 3. Segunda agrupación (A2). Contraste de regresión tb-Pe.

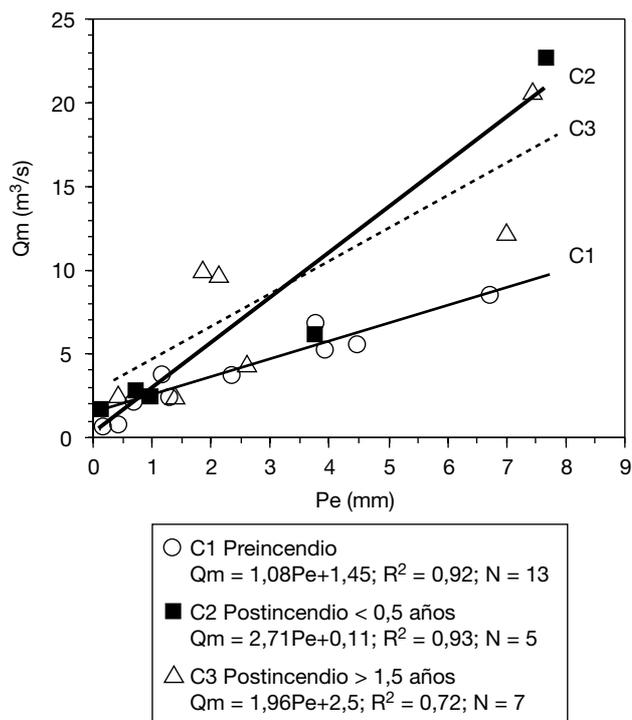


Figura 5. Segunda agrupación (A2). Contraste de regresión Pe-Qm.

caudal máximo mayor que el de la precipitación neta, lo que coincide con otros estudios (p. ej. Scott y VanWyk, 1990; Sempere *et al.*, 1994). Lo anterior se explicaría porque el incremento del caudal máximo responde a la concomitancia de dos fenómenos, por

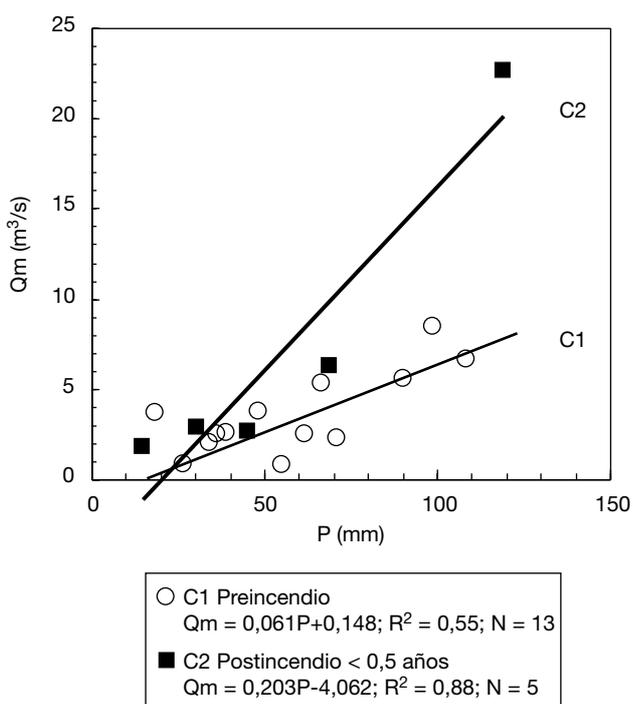


Figura 4. Segunda agrupación (A2). Contraste de regresión P-Qm.

una parte el aumento del volumen de escorrentía, y por otra, el aumento en la velocidad de respuesta de la cuenca al tránsito de ese volumen de escorrentía, especialmente en eventos de mayor magnitud.

Comparando los resultados de las tablas 4 y 6, se aprecia un incremento de la precipitación neta y del caudal máximo después del incendio mayor durante los seis meses posteriores al incendio (C2) que durante todo el periodo posterior al incendio (suma de C2 y C3). Es decir, los efectos del incendio son más acusados justo después de éste que transcurrido más de un año y medio, por lo que la respuesta hidrológica se va recuperando hacia valores previos a la perturbación.

Tabla 7. Matriz del coeficiente de determinación (R^2) de la regresión lineal simple para A3

	P	T	tb	Pe
<i>Pe</i>				
C1+C3	0,53	—	0,54	—
C2	0,97	0,86	0,80	—
<i>Qm</i>				
C1+C3	—	—	—	0,67
C2	0,88	—	—	0,93

Únicamente aparece el valor de aquellas rectas de regresión con $R^2 \geq 0,50$ y $p < 0,05$.

Tabla 8. Incremento de la precipitación neta y del caudal máximo para la recta de regresión C2 respecto de C1+C3 según A3

	P (mm)		T		tb (h)		Pe (mm)	
	Med.	Máx.	Med.	Máx.	Med.	Máx.	Med.	Máx.
Incremento Pe (%)	58,7	119,3	9,2	12,6	33,0	75,0	1,3	7,7
Incremento Qm (%)	33	32	—	—	13	51	—	—
	—	—	—	—	—	—	-12	23

Med y Máx.: valor mediano y máximo, respectivamente, del rango de datos registrados de la variable independiente. Únicamente se contrastan aquellas rectas de regresión con $R^2 \geq 0,50$ y $p < 0,05$.

Por otro lado, comparando las tablas 4 y 8 se observa un incremento de la precipitación efectiva después del incendio menor en el caso de A1 que en el de A3, por tanto, existe una mayor diferencia en volumen de escorrentía entre el grupo de episodios ocurridos antes y a partir de un año y medio después (suma de C1 y C3) y el grupo de episodios ocurridos dentro de los seis meses posteriores al incendio (C2) que entre la suma de C2 y C3, por un lado, y C1, por otro. Esto indicaría que la respuesta hidrológica en lo referente al volumen de escorrentía a partir de un año y medio después está más cerca de la respuesta hidrológica anterior a la perturbación. En cambio se observa lo contrario para el caudal máximo, es decir, parece que la respuesta hidrológica referente a la transformación de la escorrentía en hidrograma a partir de un año y medio después está más cerca de la respuesta hidrológica que presenta la cuenca justo después del incendio. Lo anterior también puede observarse en las rectas de regresión Pe-Qm de A2 (figura 5), donde la recta de los episodios ocurridos con posterioridad a un año y medio del incendio (C3) se sitúan en una posición intermedia entre C1 y C2, aunque más próxima a esta última.

El incremento estimado de la precipitación efectiva durante los seis primeros meses después del incendio es del 40% para el valor máximo del rango de precipitación bruta, mientras que el del caudal máximo es del 173% (tabla 6). Estos porcentajes de aumento ponen de relieve el acusado impacto que tiene el fuego sobre la respuesta hidrológica, especialmente si se tiene presente que la extensión quemada alcanzó únicamente el 15% de toda la cuenca. El orden de magnitud de estos incrementos se inscribe dentro del rango de variación del volumen de escorrentía y del caudal máximo que reflejan los diferentes estudios experimentales y que van del 25% al 2.000% para el volumen de escorrentía y del 45% al 6.000% para el caudal pico (López, 2001). La magnitud de los efectos del in-

cidio presenta una gran variabilidad, guardando relación directa con la extensión del fuego en la cuenca, la intensidad de su acción, el tipo de suelo afectado y la rapidez de la revegetación. (Ávila, 1996).

En las tablas 3, 5 y 7 se pone de manifiesto que el índice T de estructura temporal de la tormenta presenta una menor capacidad predictiva que la altura de precipitación bruta (P). Además, no ha contribuido al contraste de los efectos hidrológicos del incendio porque no se ha obtenido ninguna combinación de rectas de regresión que compartieran la misma variable dependiente, tal y como se puede observar en las tablas 4, 6 y 8.

En referencia a la duración de los efectos del incendio, se puede concluir que en el periodo comprendido entre un año y medio y tres años después del incendio los efectos de éste persisten, aunque en menor medida que durante los seis meses posteriores al incendio. De acuerdo con Ávila (1996) los efectos, en general, son de corta duración, entre uno y cinco años, y a medida que la vegetación de la cuenca se va recuperando el drenaje retorna a un comportamiento equiparable al anterior al incendio. Numerosos estudios confirman la persistencia de los efectos del incendio por encima de los dos años (Wright *et al.*, 1976; Belillas, 1994; Soto *et al.*, 1994; Martín y Lavabre, 1997). Mientras que Sempere *et al.* (1994) los detectan durante más de tres años, Campbell *et al.* (1977) y Van Wyk (1981) durante cuatro años, Klock y Helvey (1976) y Dyrness (1976) durante cinco años y varios autores por encima de los cinco años (Brown, 1972; Anderson *et al.*, 1976; Cerdà, 1998).

Conclusiones

Tanto el volumen de escorrentía como el caudal máximo, calculados según el modelo lineal de regresión,

son mayores durante los primeros seis meses posteriores al incendio que con anterioridad a éste. También se observa que este fenómeno es más acusado para los episodios de mayor magnitud. El incremento estimado del caudal punta para el valor máximo del rango de registros de precipitación total es del 173%, mayor que el producido en la estimación de la precipitación neta, que es solamente del 40%. Estos incrementos hacen patente el acusado impacto que tiene el fuego sobre la respuesta hidrológica de la cuenca, ya que la superficie quemada sólo alcanzó el 15% de la misma.

El sistema se va recuperando posteriormente al incendio, volviendo progresivamente a la respuesta hidrológica original, aunque no se restablece totalmente en el periodo comprendido entre un año y medio y tres años después del incendio. La respuesta hidrológica referente al volumen de escorrentía a partir de un año y medio después está más cerca de la respuesta hidrológica anterior a la perturbación. En cambio, se observa lo contrario para el caudal máximo, es decir, la respuesta hidrológica referente a la transformación de la escorrentía en hidrograma a partir de un año y medio después se encuentra todavía próxima a la respuesta hidrológica que presenta la cuenca durante los primeros seis meses después del incendio.

Agradecimientos

Los datos hidrológicos fueron facilitados por la Agència Catalana de l'Aigua de la Generalitat de Catalunya. Agradecemos la colaboración del GRAM, Grup de Recerca Ambiental Mediterrània, de la Universidad de Barcelona en la recogida de datos de campo, y a M^a Alba Solans de la Universidad de Lleida el análisis hidrológico preliminar de los efectos del incendio. Damià Vericat y Albert Rovira de la Universidad de Lleida colaboraron en la preparación de la figura 1.

Referencias bibliográficas

- ANDERSON H.W., MARVIN D.H., KENNETH G.R., 1976. Forest and water; effects of forest management on floods, sedimentation, and water supply. General Technical Report PSW-18, USDA (Forest Service). Berkeley, California
- ÁVILA A. 1988. Balanç d'aigua i nutrients en una conca d'alzinar del Montseny. Servei de medi ambient de la Diputació de Barcelona. 219 pp.
- ÁVILA A., 1996. Efectes hidrològics del incendi. En: *Ecologia del foc*. Terradas J., ed. Proa, Barcelona, pp. 131-140.
- BATALLA R.J., 1993. Contribució del transport de sorres al balanç de sediment d'una conca granítica mediterrània. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona, Barcelona.
- BATALLA R.J., SALA M., 1998. Changes on sediment and dissolved load after wildland fire in a Mediterranean river basin. XXIII General Assembly European Geoph. Soc, Niza, Francia.
- BATALLA, R.J., 2002. Hydrological implications of forest fires: an overview. En: *Fire, landscape and biodiversity*. Pardini, G., Pinto, J., eds. Diversitas, Universitat de Girona, pp. 99-116.
- BELILLAS C.M., 1994. Fire effect on particulate matter outputs in a heathland watershed (NE, Spain). En: *Soil erosion as a consequence of forest fires*. Sala, M., Rubio, J.L., eds. Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 255-265.
- BROWN J.A.H., 1972. Hydrologic effects of a bushfire in a catchment in south-eastern new South Wales. *Journal of Hydrology* 15, 77-96.
- CAMPBELL R.E., BAKER M.B., FFOLLIOTT P.F., 1977. Wildfire effects on a ponderosa pine ecosystem: An Arizona case study. USDA Forest Service Papers, RM-191. Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station, Fort Collins, Colorado.
- CHANDLER C., CHENEY P., THOMAS P., TRABAUD L., WILLIAMS D. 1983. *Fire in Forestry, Vol. I: Forest Fire Behavior and Effects*. John Wiley & Sons, New York, NY, 450 pp.
- CHOW V.T., MAIDMENT D.R., MAYS L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 572 pp.
- CEBALLOS A., 1999. Procesos hidrológicos en una pequeña cuenca hidrográfica bajo explotación de dehesa en Extremadura. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura, Cáceres.
- CERDÀ A., 1998. Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland. *Hydrological Processes* 12, 1031-1042.
- DYRNESS C.T., 1976. Effect of wildfire on soil wettability in the High Cascades of Oregon. USDA Forest Service Papers, PSW-202. Pacific Northwest Forest and Range Experimental. Portland, Oregon.
- HERETER A., 1981. Estudi de la materia orgànica dels sòls del sector nord-oriental del Massís del Montseny. Tesina de Llicenciatura. Universitat de Barcelona, Barcelona.
- HEWLETT J.D., FORTSON J.C., CUNNINGHAM G.B., 1977. The effect of rainfall intensity on storm flow and peak discharge from forest land. *Water Resource Res* 13, 259-266.
- HEWLETT J.D., FORTSON J.C., CUNNINGHAM G.B., 1984. Additional test on the effect of rainfall intensity on storm flow and peak flow form wild-land basins. *Water Resource Res* 20, 985-989.
- INBAR M., TAMIR M., WITTENBERG.L., 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology* 24, 17-33.
- KLOCK G.O., HELVEY J.D., 1976. Soil-water trends following wildfire on the Entiat Experimental Forest. Fo-

- rest Ann. Proc. Tall Timbers Fire Ecol. Conf. N° 15, pp. 193-200.
- LAVABRE J., SEMPERE D., CERNESSON F., 1993. Changes in the hydrological response of a small mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology* 142, 273-299.
- LÓPEZ R., 2001. Consecuencias hidrológicas de los incendios forestales. *Foresta* 15, 42-46.
- MARTÍN-VIDE J., 1985. Estacionalidad de la precipitación y mediterraneidad en el Pirineo catalán. *Notes de Geografía Física* 13-14, 57-66.
- MARTÍN-VIDE J.P. *et al.*, 1994. Deducció de la corba de desguàs de l'estació d'aforament de la riera d'Arbúcies. *Univ. Politècnica de Catalunya y Universitat de Barcelona*. 17 pp.
- MARTIN C., LAVABRE J., 1997. Estimation de la part du ruissellement sur les versants dans les crues du ruisseau du Rimbaud (massif des Maures, Var, France) après l'incendie de forêt d'août 1990. *Journal des Sciences Hydrologiques* 42(6), 893-907.
- MINTEGUI J.A., ROBREDO, J.C., 1993. Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica. *Manual para un programa básico*. Fundación Conde del Valle de Salazar, 88 pp.
- MOODY J.A., MARTIN D.A., 2001. Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado front range. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1049-1070.
- NATIONAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE, 1997. Part 630: Hydrology National Engineering Handbook, USDA. Washington DC.
- PIERSON F.B., ROBICHA. P.R., SPAETH K.E., 2001. Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed. *Hydrological Processes* 15, 2905-2916.
- PROSSER I.P., WILLIAMS L. 1998. The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest. *Hydrological Processes* 12, 251-265.
- SCOTT D.F., VAN WYK D.B., 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *Journal of Hydrology* 121, 239-256.
- SCOTT DF. 1993. The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. *Journal of Hydrology* 150, 409-432.
- SEMPERE D., URBANO A., LAVABRE J., DOLZ, J., 1994. Consecuencias hidrológicas de los incendios forestales. *Ingeniería del Agua* 1 (4), 33-48.
- SEMPERE D., LAVABRE J., DOLZ J., 1996. El fuego y su impacto en la Hidrología de cuencas en el Mediterráneo. En: *Hidrología mediterránea. Los recursos hídricos en los países mediterráneos*. Iberdola Instituto Tecnológico, pp. 385-416.
- SOTO B., BASANTA R., BENITO E., PÉREZ R., DÍAZ-FIERROS F., 1994. Runoff and erosion from burnt soils in Northwest Spain. En: *Soil erosion as a consequence of forest fires*. Sala M., Rubio J.L. eds. *Geoforma Ediciones*, Logroño, pp. 91-98.
- TIEDEMANN A.R. *et al.*, 1979. Effects of fire on water. A state-of-knowledge review. General Technical Report WO-10, USDA, Forest Service, Washington DC.
- VAN WYK D.B., 1981. Influence of prescribed burning on nutrient budgets of mountain fynbos catchments in the south-western Cape, Republic of South Africa. *Proc. Symp on Dynamics and management of mediterranean type ecosystems*. USDA For Serv Gen Tech Rep PSW-58, pp. 390-396.
- WRIGHT H.A., CHURCHILL F.M., STEVENS W.C., 1976. Effect of prescribed burning on sediment, water yield, and water quality from dozed juniper lands in central Texas. *Journal of Range Manag* 29, 294-298.