



2

Estudio de los procesos hidrológicos y erosivos asociados a los incendios forestales



2.1

La lluvia simulada como herramienta para la investigación del efecto de los incendios forestales sobre los suelos

Artemi Cerdà¹, Elena Marcos², Joan Llovet³, Elena Benito⁴, Fernando Pérez-Cabello⁵, Xavi Úbeda⁶, Antonio Jordán⁷, Lorena M. Zavala⁷ y José Damián Ruiz-Sinoga⁸

¹Departament de Geografia, Universitat de València, Blasco Ibáñez, 28, 46010-València. artemio.cerda@uv.es

²Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, 24071, León.

³Fundación CEAM, Departament d'Ecologia (CEAM), Ciències Fase 5, Ap. 99, 03080, Alacant.

⁴Facultad de Biología, Departamento de Biología Vegetal y Ciencias del Suelo, Universidad de Vigo, Campus Lagoas-Marcosende, 36310, Vigo.

⁵Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna, 12, 50009, Zaragoza.

⁶Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, Montalegre, 6, 08001, Barcelona.

⁷Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química (Universidad de Sevilla), Profesor García González, 1, 41012, Sevilla.

⁸Departamento de Geografía, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071, Málaga.

La lluvia simulada como herramienta para la investigación del efecto de los incendios forestales sobre los suelos

Artemi Cerdà¹, Elena Marcos², Joan Llovet³, Elena Benito⁴, Fernando Pérez-Cabello⁵, Xavi Úbeda⁶, Antonio Jordán⁷, Lorena M. Zavala⁷ y José Damián Ruiz-Sinoga⁸

¹ Departament de Geografia, Universitat de València, Blasco Ibáñez, 28, 46010-València. artemio.cerda@uv.es

² Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, 24071, León.

³ Fundació CEAM, Departament d'Ecologia (CEAM), Ciències Fase 5, Ap. 99, 03080, Alacant.

⁴ Facultad de Biología, Departamento de Biología Vegetal y Ciencias del Suelo, Universidad de Vigo, Campus Lagoas-Marcosende, 36310, Vigo.

⁵ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna, 12, 50009, Zaragoza.

⁶ Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, Montalegre, 6, 08001, Barcelona.

⁷ Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química (Universidad de Sevilla), Profesor García González, 1, 41012, Sevilla.

⁸ Departamento de Geografía, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071, Málaga.

RESUMEN

La lluvia simulada es una herramienta de gran ayuda para descifrar las características hidrológicas y erosivas post-incendio de los suelos debido a que los cambios tras el fuego son efímeros, y la lluvias naturales, especialmente en el mediterráneo, caóticas. En este capítulo se describe el funcionamiento de los simuladores de lluvia, las características técnicas de los aparatos, los protocolos y los métodos empleados en los estudios desarrollados por los investigadores españoles en zonas afectadas por el fuego. Tras una revisión de la evolución de los simuladores de lluvia, se apunta un protocolo básico a seguir para realizar experimentos con lluvia simulada, si bien cada experimento e investigación requerirá cambios y adaptaciones coherentes con el objetivo del estudio. También se presentan experimentos básicos que se han empleado para conocer el efecto de los incendios sobre los suelos en distintas zonas del territorio nacional. Se muestran algunos ejemplos de simuladores de lluvia. Los doce experimentos aquí presentados son una muestra de la variada contribución de los simuladores de lluvia a entender el impacto del fuego sobre los suelos, la generación de escorrentía y la pérdida de sedimentos y aguas.

SIMULADORES DE LLUVIA. ORIGEN Y EVOLUCIÓN

Fue la ciencia estadounidense la primera que tuvo en cuenta los beneficios que aportaba el uso de la lluvia simulada a los estudios de la erosión e hidrología de los suelos. El extraordinario trabajo desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos como respuesta a las malas prácticas agrícolas de los granjeros americanos que desencadenaron las temibles “Dust Bowl” en la década de 1930, potenció investigaciones que darían lugar a los estudios más completos sobre erosión y degradación de suelos hasta la fecha. El desarrollo de la *Universal Soil Loss Equation* (Wischmeier y Smith, 1978), la cuantificación de los procesos erosivos, el estudio de la erosividad de la lluvia mediante la determinación del tamaño de las gotas de lluvia (Laws y Parsons, 1943), y la evaluación de la erosionabilidad de los suelos, junto a los estudios de la hidrología de laderas (Horton 1939), fueron temas de investigación que se desarrollaron gracias y junto al diseño y desarrollo de los simuladores de lluvia.



Figura 1. Simuladores de lluvia. A la izquierda LADERASIM (Large Detachable Rainfall Simulator) (Cerdà, 1995) con parcelas de 3 x 6 m, en el centro un simulador goteador (Imeson, 1977, con mejoras desarrolladas por el profesor Erik Cammeraat) con parcelas de 100 x 50 cm, y a la derecha simulador pulverizador (Cerdà et al., 1997) con parcelas circulares de 0,24 m². Los tres simuladores de lluvia se utilizaron por el equipo de MEDALUS de la Universiteit van Amsterdam en sus estudios en la cuenca del Guadalentín donde se tomaron las fotografías de la izquierda y el centro. La fotografía de la derecha se tomó en las dunas de Nizzana, y Hanoch Lavee, de espalda y de pie, ejerce de escala.

Fue el estudio de los procesos y las tasas de erosión lo que desencadenó una fiebre de construcción de simuladores de lluvia (Nichols y Sexton, 1932; Neal, 1938), que se contagió a los estudios de hidrología de los suelos (Beutner et al., 1940), en especial al estudio de la infiltración (Holtan, 1961). Estos primeros simuladores de lluvia estaban destinados a reproducir la lluvia en pequeñas parcelas, pero no pasó mucho tiempo hasta que los estudiosos de la hidráulica construyeron cuencas experimentales en los propios laboratorios, con lo que tuvieron que construir simuladores de lluvia de grandes dimensiones (Christiansen, 1941; Izzard, 1944; Holtan y Kirkpatrick, 1950; Chow y Yen, 1974). Pero también el interés por conocer el ciclo hidrológico en detalle, y en concreto el proceso de infiltración y generación de escorrentía llevaron al uso de la lluvia simulada que pronto sustituyó a los infiltrómetros de cilindro (Cerdà, 1995).

Los simuladores de lluvia pioneros no tuvieron en cuenta la erosividad de la lluvia. Su objetivo era distribuir el agua aplicada en toda la superficie de la parcela. Los trabajos de Laws (1941), y más tarde Spilhaus (1948), demostraron que las lluvias podían variar ampliamente en su capacidad de movilización de materiales según el tamaño de gota y la velocidad terminal alcanzada durante los experimentos. Esos estudios pusieron en evidencia que era necesario estudiar la relación entre la intensidad y el tamaño de las gotas (Laws y Parsons, 1943; Gunn y Kinzer, 1949), y sus resultados desencadenaron una carrera hacia la imitación de la lluvia natural que permitió el desarrollo de nuevos simuladores de lluvia (Jones, 1959; Hudson, 1963), los cuales que propiciaron un avance substancial en el desarrollo de ecuaciones e índices de erosión obtenidos a partir de estudios experimentales (Wischmeier, 1959; Smith y Wischmeier, 1962; Chow y Harbaugh, 1965; Wischmeier y Smith, 1978; Wilson y Rice, 1987). Después de esta era dorada de la innovación técnica de los simuladores quedó establecida la necesidad de conocer la distribución del tamaño de las gotas de lluvia y su energía cinética. La innovación realizada en EEUU se copió en distintos países: Rose (1960) en Uganda, Kazó (1966) en Hungría, y Steinhart (1966) en Israel son buenos ejemplos. No obstante, la ciencia americana dio otro paso de gigante en la mejora de los simuladores de lluvia con la construcción de grandes aparatos del tipo pulverizador (Meyer y McCune, 1958) que dieron paso a una serie de nuevos inventos (Cerdà, 1999).

En España se desarrollan simuladores de lluvia basados en la técnica de la pulverización (Sanroque et al., 1984; Benito-Rueda et al., 1986; Calvo et al., 1988; Navas et al., 1990; Pelegrín et al., 1989; Lasanta et al., 2000) (Figura 1). En esta expansión, la técnica de la simulación de lluvia llega a distintas ramas de la ciencia, aunque fueron los ingenieros agrónomos americanos los pioneros en su diseño, desarrollo y uso.

Con el crecimiento en número de simuladores de lluvia se produjo una clara especialización. De entre los más de doscientos modelos publicados (Cerdà, 1999) y sus variantes es posible encontrar simuladores con bajas y altas intensidades de lluvia, automatizados y manuales, pequeños y grandes, fáciles de transportar y manejar, pero también costosos en mantenimiento, transporte y uso. Se ha producido una clara tendencia hacia simuladores desmontables, pero en su origen fueron instrumentos pesados, costosos y de difícil manejo por su diseño para uso en campos agrícolas donde se podía acceder con maquinaria pesada (Meyer, 1960). Según Lane (1986) y en ello estamos de acuerdo, fue el interés de ecólogos, edafólogos, geomorfólogos e hidrólogos lo que propició la diversificación en diseños y objetivos. El interés por los simuladores de lluvia ha llevado a una continua modificación y adaptación de los modelos, incluso a las lluvias de una región (Bubbenzer et al., 1979), lo que también propició un aumento de los estudios de la erosividad de la lluvia (Carter et al., 1974).

Los simuladores de lluvia pueden formar las gotas sin o con escasa presión a través de pequeños tubos o agujas, o bien mediante pulverización con boquillas. Los primeros, denominados goteadores son difíciles de utilizar en el campo, mientras que los segundos, denominados pulverizadores, son aptos para uso tanto en laboratorio como en zonas de difícil acceso. El primer simulador de lluvia fue del tipo goteador (Ellison, 1947) y formaba gotas a través de fibras de algodón. Estos rudimentarios aparatos consiguieron mejorar y sofisticarse (Rowe, 1940; Barnes y Costel, 1957; Peterson y Bubbenzer, 1984), pero se hizo evidente su escasa capacidad de imitar las lluvias naturales. Fue Laws (1941) quien observó que la energía cinética dependía del tamaño y altura de caída de las gotas. Se introdujeron entonces agujas hipodérmicas de metal o polietileno para aumentar el tamaño de las gotas, pero la altura de la caída de las gotas no pudo cambiarse. No obstante, se desarrolló este tipo de simuladores de lluvia para estudiar la estabilidad de agregados (McCalla, 1944; Low, 1954; Rai et al., 1954; Pereira, 1956). En los simuladores goteadores es fácil controlar las características de la lluvia por medio de técnicas como la separación de las agujas, la variación en el tamaño de éstas o bien el cambio en la presión del agua del depósito superior (Mutchler y Hersmeier, 1965; Munn y Hungtinton, 1967). Más tarde se idearon sistemas de interrupción del paso del agua en la parte superior de cada aguja lo que permitía un mayor control de la producción de la lluvia (Römkens et al., 1975). Los tamaños de las gotas en estos instrumentos son idénticos ya que los formadores de gotas son iguales. Pero, en cambio, cada simulador de lluvia presenta tamaños distintos: 2,2 mm de diámetro medio de gotas en Bubbenzer y Jones (1971), o bien 5,6 mm en Adams et al. (1957).

Los simuladores de lluvia del tipo goteador se han utilizado sobretodo en laboratorio por la dificultad de transporte y su fragilidad. Además, para alcanzar la velocidad terminal de las gotas deberían ser muy altos y, por lo tanto, poco manejables en el campo. Epema y Riezebos (1983) demostraron que para los tamaños de gota más grandes los simuladores de lluvia deberían alcanzar

alturas de más de 10 m para que la velocidad terminal, y con ello la energía cinética, fuese la correcta. Además de la velocidad terminal, los simuladores goteadores producen gotas del mismo tamaño y que precipitan en el mismo lugar, con lo que no se reproduce la estocasticidad de la lluvia ni la distribución de gotas de distintos tamaños. Se idearon simuladores con movimiento para que las gotas cayeran en distintos puntos (Kleijn et al., 1979; Poesen, 1984), y se colocaron mallas entre el suelo y los formadores de gotas para que estas rompieran y formasen lluvias con gotas de distinto tamaño (Imeson et al., 1982). Brakensiek et al., (1979) introdujo aire comprimido para que las gotas salieran de los formadores con distintos tamaños. La complejidad en el uso de los simuladores goteadores reside en la necesidad de colocar los depósitos de agua en la parte alta del simulador de lluvia, lo que les da una gran inestabilidad. Aunque se ha conseguido simplificar su uso, y hacerlos portátiles y manejables por un operador (McQueen, 1963; Blackburn et al., 1974), o de uso sencillo en laboratorio (Hino et al., 1987; 1988; Kamphorst, 1987), los investigadores prefieren los simuladores pulverizadores para zonas de difícil acceso.

Los primeros simuladores pulverizadores utilizaban la *boquilla tipo F* (Wilm, 1943), las cuales se orientaban hacia arriba con lo que se perdía la energía cinética dada por la presurización. Las publicaciones de Laws y Parsons (1943) sobre la importancia del tamaño y velocidad de impacto de las gotas dieron lugar a la construcción de estructuras metálicas para colocar las boquillas a una altura adecuada. Lejos de ser abandonadas, las boquillas tipo F se mantuvieron para medir la infiltrabilidad de suelos vegetados, en los que el impacto de las gotas sobre el suelo es amortiguado por las plantas (Horton, 1939; Beutner et al., 1940; Holtan y Kirkpatrick, 1950; Leathan y Riesbol, 1950). Las boquillas tipo *FA* y *F*, aún se utilizaron en la década de los 70 (Dortignac, 1951; Parcker, 1957; Meewing, 1969).

El primer gran simulador de lluvia, con una energía cinética similar a la lluvia natural fue el *rainulator* (Meyer y McCune, 1958), que además permitía el uso de parcelas grandes (75 m²) (Meyer, 1960). El logro de una lluvia intensa y con elevada energía se consiguió con la boquilla 80100 Veejet, pero presentaba la desventaja de que las intensidades de la lluvia eran desorbitadas. La solución para mantener los tamaños de gota y reducir la intensidad fue aportada por Bubenzer y Meyer (1965) mediante la oscilación de las boquillas, una solución que copiaron otros investigadores (Asseline y Valentin, 1978; Foster et al., 1979). Las modificaciones del *rainulator* han afectado incluso a las boquillas, siendo sustituida la 80100 por la 80150 Veejet, ya que en esta última, la energía cinética es mucho mayor (Meyer y Harmon, 1979).

El simulador de Swanson (1965) evitaba la aparatosidad y los altos costes del *rainulator*. Swanson lo consiguió al acoplar las boquillas a un aspersor de molinete móvil para producir lluvia simulada sobre las mismas parcelas del *rainulator*. La mejora en la transportabilidad del simulador de Swanson fue una obsesión entre los colaboradores del autor y en diseños posteriores (Auerswald, 1986; Simanton et al., 1986). De los grandes simuladores de lluvia, con obsesión por las grandes parcelas y su uso en campos de cultivo, se pasó a instrumentos de menor tamaño que permitían estudiar el proceso de infiltración, generación de escorrentía y erosión con detalle. Bertrand y Parr (1961) desarrollaron el "Infiltrómetro dispersador de Purdue" que ha sido ampliamente utilizado para estudiar el proceso de infiltración (Shriner et al., 1977; Martínez et al., 1979) debido a que empleaba intensidades de lluvia bajas (Figura 2).

LA LLUVIA SIMULADA COMO HERRAMIENTA PARA LA INVESTIGACIÓN DEL EFECTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES SOBRE LOS SUELOS



Figura 2. Simuladores de lluvia. En el centro el "Purdue sprinkling infiltrometer" utilizado desde los años 60 para parcelas de tamaños inferiores a 1 m² (Bertrand y Parr, 1961), y ahora utilizado por distintos investigadores en zonas afectadas por incendios forestales. Lee Harold MacDonald, de espaldas y con camiseta blanca, lidera la realización del experimento y la investigación desde la Colorado State University. A la derecha el simulador de lluvia "rotating disk" desarrollado por Morin et al., (1967). A la izquierda una de las primeras versiones del simulador goteador de Imeson (1977). Fotografías de Anton Charles Imeson.

Fue un grupo de investigadores israelíes (Morin et al., 1967) quienes dieron un nuevo impulso al conseguir bajas intensidades de lluvia con tamaños de gota elevados mediante el uso de discos que eliminaban parte de la lluvia producida a alta intensidad (Figura 2). Modificaciones de este instrumento han sido utilizadas posteriormente (Amerman et al., 1970) y se ha mejorado su transportabilidad (Ratwitz et al., 1972; Gierson y Oades, 1977; Marston, 1982). Los simuladores de lluvia pulverizadores se han ido diseñando de acuerdo con las necesidades de los investigadores (Steinhart y Hillel, 1966; Anderson et al., 1968; Holland, 1969; Ponce, 1975; Ponce y Hawkins, 1978; Johnston et al., 1980; Bork, 1981; Hirschi et al., 1981; Hodges y Bryan, 1982; 1982; Parcker y Schumm, 1982; Scoging, 1982; Luk et al., 1986; 1987; Tossell et al., 1987; Calvo et al., 1988; Becher, 1990; Cerdà, 1995; Cerdà et al., 1997) de ahí el elevado número de diseños. Unos son extremadamente sofisticados y costosos (Neibling et al., 1981; Onstand et al., 1981; Bouyer-Bower y Burt, 1989; Herlihy et al., 1990; Hirschi et al., 1990). Otros permiten cambiar la



Figura 3. Simuladores de lluvia. Simulador de lluvia con aspersores desarrollado por el grupo del *Fysisch Geografisch Bodemkundig Laboratorium* de la Universiteit van Amsterdam para sus estudios en Badlands en España. A la derecha un simulador de lluvia construido improvisadamente para su uso en Marruecos. Una escalera y un protector de viento fueron suficientes para desarrollar el instrumento. Fotografías de Anton Charles Imeson.

intensidad de la lluvia durante los experimentos o la recogida automatizada de las muestras (Lusby, 1977; Foster et al., 1982; Moore et al., 1983; Marien y Vandewiele, 1986; Essery et al., 1987; Miller, 1987; Hirschi et al., 1990; Wilson y Rice, 1990).

A partir de los años 80 se produce un crecimiento inusitado de los tipos y modelos de simuladores de lluvia dirigido a imitar lluvias de distintas características en el laboratorio y el campo. Las principales características de la lluvia natural que han de conseguir los simuladores de lluvia son las siguientes (Meyer, 1979a, b): i) distribución del tamaño de las gotas de lluvia similar a la de la lluvia natural; ii) velocidad de impacto similar a la velocidad terminal de las gotas en la lluvia natural; iii) intensidad de lluvia correspondiente a las condiciones naturales de la zona de estudio; iv) energía cinética similar a la de la lluvia natural; y v) lluvia uniforme y distribución aleatoria de las gotas. Además, el área experimental que debe cubrir el simulador de lluvia debe ser representativa de los tratamientos y condiciones que van a ser evaluadas. Así, por ejemplo, parcelas pequeñas de alrededor de 1 m² pueden ser suficientes para estudiar la infiltración o la salpicadura por impacto de la lluvia mientras que se requieren parcelas de mayor tamaño para evaluar el desprendimiento y transporte por el flujo de escorrentía (Meyer, 1994). En los simuladores de lluvia, a la vez que se produce una tecnificación que permite mayor precisión y superficie mojada, se desarrollan instrumentos de bajo coste y fácil uso (Figura 3).

INCENDIOS FORESTALES, SUELOS Y SIMULADORES DE LLUVIA

Tras un incendio forestal, a los cambios súbitos introducidos por el fuego, se suma la progresiva modificación del suelo por los sucesivos eventos erosivos y la recuperación de la cobertura vegetal. Conocer el impacto del fuego sobre el suelo, y su evolución posterior, pasa por conocer el efecto de la lluvia, ya que esta desencadenará cambios relevantes fruto de la movilización de sedimentos, semillas, cenizas, nutrientes y aguas. Estudiar esos procesos hidrológicos y erosivos durante las semanas, meses y años después del incendio depende de la instalación en pocos días de instrumental en el campo, o del muestreo del suelo y su transporte al laboratorio. Debido a la activa dinámica postincendio, al escaso tiempo disponible para la instalación del instrumental adecuado y a la variabilidad de las lluvias naturales el uso de simuladores de lluvia se ha convertido en una herramienta imprescindible para muchos investigadores.

En el caso de los suelos afectados por incendios forestales, las ventajas de utilizar lluvia simulada es más evidente por las efímeras condiciones de los suelos afectados por el fuego. Además, en los ecosistemas mediterráneos, y debido a la irregularidad de las lluvias, el utilizar lluvia simulada asegura el disponer de mediciones en el momento deseado. También debemos recordar, que si el objetivo de la medición es conocer las tasas de erosión es muy probable que los eventos extremos no se produzcan después del incendio, por lo que se pueden reproducir con lluvia simulada. En general, la lluvia simulada es más rápida de producir, más eficiente, más controlada y más adaptable que la lluvia natural. Además, con la lluvia simulada se tiene el máximo control sobre el experimento por parte del investigador. Pero también hay inconvenientes: los

simuladores de lluvia suelen ser representativos de un área muy reducida y pueden no reproducir la lluvia natural con exactitud. Pero en el caso de estudiar los procesos edáficos y erosivos a escala de pedón o ladera, los simuladores de lluvia son herramientas de gran ayuda. Debemos entender que los estudios con lluvia simulada no pretenden sustituir las investigaciones realizadas con lluvia natural, sino complementarlas.

PROTOCOLOS

El uso de simuladores de lluvia en zonas afectadas por incendios forestales debe permitir la comparación en la zona quemada con una zona control no afectada por el fuego, o bien hacer un seguimiento de la evolución postincendio que permita conocer los efectos de los incendios sobre el suelo. En todos los casos la investigación parte de experimentos individuales que permitirán disponer de repeticiones de medidas en la misma zona. Cada uno de esos experimentos debe de seguir un protocolo de ejecución que sería el siguiente:

Fase 1. Tratamiento previo

1. Elección de la zona a estudiar, y su control si procede.
2. Seleccionar las zonas donde se instalarán las parcelas con el objetivo de que sean representativas de la zona de estudio.
3. Instalación de las parcelas, y comprobación de su buen drenaje y recolección de las escurrientías y sedimentos (Figura 4).
4. Toma de muestras del suelo de cada parcela para la determinación de sus propiedades. Se deben tomar muestras de las cenizas y caracterizarlas en el campo (densidad y textura) y posteriormente en el laboratorio. La humedad del suelo puede determinarse *in situ* o en laboratorio a partir de muestras representativas.



Figura 4. Detalle de una parcela circular tras un experimento con lluvia simulada (Cerdà et al., 1997). En la parte superior se muestra una visión oblicua y en la inferior una visión vertical. A la izquierda, la parcela antes del experimento (arriba) con y sin cubierta (arriba y abajo); a la derecha, cubierta por la estructura metálica que permite comprobar el volumen de lluvia al actuar como un pluviómetro de 0,24 m². Experimentos desarrollados por Merche B. Bodí y Francisco Javier León Miranda.

5. Descripción del perfil del suelo, con especial atención a los primeros 5 centímetros, y a la presencia de costras, macroporos, vegetación y restos de hojarasca. En el caso del suelo quemado se debe describir las cenizas.
6. Toma de fotografías de la parcela. Es muy importante la toma de una fotografía vertical para determinar la cubierta del suelo.

7. Comprobación en laboratorio del funcionamiento del simulador de lluvia. Se debe comprobar que las boquillas producen la lluvia deseada para el experimento. Para ello es muy recomendable en parcelas pequeñas ($< 3 \text{ m}^2$) disponer de una parcela móvil sellada que permita cuantificar la lluvia antes y después del experimento (Figura 4).

Fase 2. Ejecución del experimento

1. Colocación del simulador de lluvia sobre la parcela.
2. Puesta a punto de los aforadores (automáticos o manuales), de los pluviómetros y de los cronómetros.
3. T1. Se inicia la lluvia. Determinar el momento del encharcamiento inicial (se detecta cuando hay brillos en la superficie del suelo, T_{p1}), y encharcamiento total (cuando el 40% de la parcela potencialmente encharcable muestra un encharcamiento evidente, T_{p2}). También se debe determinar cuando se produce el inicio de la escorrentía superficial (primer movimiento de la escorrentía en superficie, T_{r1}) y cuando la escorrentía es evidente (cuando hay conexión entre charcos o drenaje claro, T_{r2}). Finalmente se determina el momento en que aparece caudal en la salida (T_{rs}) que determinará el inicio de la curva de escorrentía que será cuantificada a intervalos regulares de tiempo (por ejemplo, 1 minuto) o de caudal (por ejemplo, 100 mL).
4. T2. Inicio de las mediciones de la escorrentía. Se deben tomar a intervalos regulares para determinar con exactitud la forma de la curva. Si el caudal es elevado, se puede determinar incluso cada 10 segundos. Cada muestra de escorrentía, o bien una muestra cada 5 ó 10 minutos, debe ser conservada para su posterior análisis en el laboratorio.
5. T3. Fin de la lluvia. Suelen reproducirse lluvias de 60 minutos ya que ésto permitirá hacer análisis de tiempos inferiores si fuera necesario. La duración del experimento debe estar relacionada con la intensidad de la lluvia. Si la lluvia simulada es intensa debe reducirse el tiempo, y al contrario. Tras el fin de la lluvia se debe seguir midiendo la escorrentía para determinar el caudal y para conocer el tiempo hasta el fin de la escorrentía (T_f), lo que permitirá conocer el tiempo de tránsito de la escorrentía sobre la parcela.
6. Durante la lluvia simulada, uno de los componentes del equipo -siempre la misma persona- debe determinar los T_p , T_r , T_{ro} , T_f , y tomar notas sobre los cambios sufridos por la superficie. También se deben tomar fotografías que luego permitirán reconstruir el experimento, y a ser posible grabar los experimentos en video con el fin de poder revisar el buen funcionamiento del aparato y tener registrados los cambios en la superficie de la parcela, lo cual es de gran ayuda en el caso de los incendios forestales debido a la efímera presencia de cenizas.

Fase 3. Mediciones después de la lluvia

1. Toma de fotografías y de muestras del suelo para determinar la humedad después de la lluvia.
2. Descripción y medida del frente de humedad mediante excavación (Figura 5). Se debe abrir primero el tercio inferior de la parcela. Después el centro de la parcela y finalmente el tercio supe-

rior. Esto permitirá tener tres frentes de humedad a distintas distancias del colector de escorrentía. En parcelas de más de 2 m² es aconsejable abrir más frentes de humedad. Estos frentes deben de abrirse, medirse y describirse entre 10 y 30 minutos después del experimento.

3. Al abrirse perfiles para la determinación del frente de humedad se pueden encontrar zonas secas y húmedas alternantes, o zonas de flujo preferente. Si se cree conveniente se deben tomar muestras para poder determinar en laboratorio las razones de estas diferencias, que suelen ser debidas a la presencia de sustancias hidrofóbicas.



Figura 5. De izquierda a derecha y de arriba abajo, se puede observar la excavación de los frentes de humedad y detalles de los mismos en experimentos desarrollados en julio de 2010 con distintos tipos de ceniza por Merche B. Bodí y Francisco Javier León Miranda.

Fase 4. Laboratorio y gabinete

1. En el campo se deben clasificar y ordenar las muestras, además de comprobar con la ficha de campo que todas las muestras están en condiciones. Las muestras para la determinación de nutrientes en la escorrentía deben ser refrigeradas y analizadas con prontitud (antes de 24 h).
2. Se debe determinar la concentración de sedimentos tan pronto como sea posible. Por desecación de la muestra es el método más habitual, pero se puede utilizar la turbidez o el filtrado de la muestra para acelerar el proceso.
3. Determinar la humedad de las muestras del suelo tomadas antes y después del experimento a distintas profundidades.
4. Pasar a soporte electrónico las fichas de campo. Se recomienda hacerlo tan pronto como sea posible para poder hacer cálculos básicos y sencillos (por ejemplo caudal total y coeficiente de escorrentía) y de esa forma tomar decisiones sobre si se deben hacer cambios en el tipo de lluvia o parcelas.
5. Iniciar el cálculo de las variables deseadas: caudal, sedimentos totales o composición química de la escorrentía, entre otros.
6. Desarrollar una base de datos para cada experimento y cada zona.

Es necesario por lo tanto disponer de plantillas (Tablas 1 y 2) que permitan de forma repetida tomar datos en el campo durante el experimento ya que esto ayuda a que la toma de datos sea completa, y a que los participantes centren su atención en el control del funcionamiento del simulador de lluvia, los cambios en la superficie del suelo y en la medición de la escorrentía.

Tabla 1. Ejemplo de ficha utilizada para simulaciones de lluvia. En azul se muestran las notas de campo y en verde los datos de laboratorio. Parcela control.

Zona de estudio	Bixquert (Valencia)	Fecha	08/12/2005	Tamaño			
Roquedo	Calizas	Hora	12:30	1 m ²			
Pendiente	10°	Humedad					
Vegetación	Maquia (<i>Quercus coccifera</i>)	(0-1 cm)	14,78%				
	<i>Brachypodium retusum</i>	(4-5 cm)	19,22%				
Participantes	Artemi Cerdà (toma de tiempos), Quique Terol, Antonio G.-Morera						
Parcela	BXC01	Tiempo					
Cubierta (%)	89%	Observaciones	Tp 18' 25" - 25' 20"	salida			
Plantas	87%	vegetación	Tr 27' 40" - 35' 30"	salida			
Musgos	32%	densa	Trs 45' 00"				
Líquenes	2%	estrato	Tf 01' 25"				
Frag. de roca	45%	arbustivo	Observación	Escorrentía insignificante			
Costras	0%	herbáceo		Interceptación elevada			
Cenizas	0%	musgos	Intensidad	55 mm h ⁻¹			
Experimento							
T	Caudal (ml)	CS (g l⁻¹)	CE (m S⁻¹)	T	Caudal (ml)	CS (g l⁻¹)	CE (m S⁻¹)
1				36			
2				37			
3				38			
4				39			
5				40			
6				41			
7				42			
8				43			
9				44			
10				45	Trs 45' 00"		
11				46	5		
12				47	10		
13				48	15		
14				49	19		
15				50	20	0,22	325
16				51	19		
17				52	22		
18	Tp, 18' 25"			53	18		
19				54	23		
20				55	20		
21				56	21		
22				57	25	0,25	169
23				58	20		
24				59	19		
25	Tp, 25' 20"			60	22		
26				61	12		
27	Tr, 27' 40"			62	61' 25" 02	Trf 01' 25"	
28				63			
29				64			
30				65			
31				66			
32				67			
33				68			
34				69			
35	Tr, 35' 30"			70			

LA LLUVIA SIMULADA COMO HERRAMIENTA PARA LA INVESTIGACIÓN DEL
EFECTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES SOBRE LOS SUELOS

Tabla 2. Ejemplo de ficha utilizada para simulaciones de lluvia. En azul se muestran las notas de campo y en verde los datos de laboratorio. Parcela quemada cinco meses después del incendio.

Zona de estudio	Bixquert (Valencia)	Fecha	07/12/2005				
Roquedo	Calizas	Hora	11:30				
Pendiente	11°	Humedad					
Vegetación	Maquia (<i>Quercus coccifera</i>)	(0-1 cm)	12,65%				
Incendio reciente (junio)	suelo desnudo con rebrotes	(4-5 cm)	18,02%				
Participantes	Artemi Cerdà (toma de tiempos), Quique Terol, Antonio G.-Morera						
Parcela	BXQ05	Tiempo					
Cubierta (%)	56%	Observaciones	Tp	3' 05" - 4' 30"	costra		
Plantas	5%	suelo	Tr	5' 05" - 6' 15"	costra		
Musgos	2%	desnudo	Trs	7' 00"	costra		
Líquenes	0%	piedras	Tf	02' 33"			
Frag. de roca	54%	abundantes	Observación	Escorrentía elevada			
Costras	23%			Salpicadura evidente			
Cenizas	14%		Intensidad	55 mm h ⁻¹			
Experimento							
T	Caudal (ml)	CS (g l⁻¹)	CE (m S⁻¹)	T	Caudal (ml)	CS (g l⁻¹)	CE (m S⁻¹)
1				36	525		
2				37	546		
3	Tp ₁ 3' 05"			38	586		
4	Tp ₂ 4' 30"			39	535		
5	Tr ₁ 5' 05"			40	547	3,49	385
6	Tr ₂ 6' 15"			41	548		
7	Trs 7' 00"			42	569		
8	26			43	532		
9	58			44	515		
10	112	5,32	423	45	548	2,98	358
11	198			46	529		
12	246			47	578		
13	385			48	565		
14	425			49	548		
15	489	4,95	459	50	562	2,54	342
16	501			51	564		
17	523			52	578		
18	542			53	596		
19	515			54	547		
20	526	4,65	432	55	596	2,65	316
21	535			56	548		
22	546			57	598		
23	572			58	572		
24	542			59	565		
25	515	3,45	400	60	569	3,01	290
26	523			61	201		
27	563			62	56		
28	548			63	62' 33" 10	Trf 02' 33 "	
29	523			64			
30	585	3,84	416	65			
31	586			66			
32	548			67			
33	579			68			
34	565			69			
35	536			70			

EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS

Esta sección mostrará ejemplos de la contribución de los simuladores de lluvia a entender los efectos de los incendios forestales sobre los suelos. Se presentan ejemplos de experimentos realizados por investigadores con experiencia y se describe el diseño del experimento, los resultados más relevantes y las principales conclusiones.

Experimento 1. Cambio en la tasa de infiltración en los suelos quemados

La capacidad de infiltración final estable de un suelo es una propiedad que tiene implicaciones no sólo edáficas, sino también hidrológicas y ambientales a escala de pedón, ladera y cuenca de drenaje. Esta propiedad del suelo se ha cuantificado mediante infiltrómetros de cilindro que podían ser de anillo sencillo o doble. Este método requiere el encharcamiento de varios centímetros de profundidad, lo que es artificial ya que en las laderas los suelos nunca se encharcan como lo hacen los campos de regadío por inundación, que fue donde se aplicó el método del infiltrómetro de cilindro originalmente. La lluvia simulada permitía cuantificar la infiltración mediante la diferencia entre la lluvia y la escorrentía. Y las mediciones cada minuto de la escorrentía permitía también dibujar la curva de infiltración, y obtener parámetros con una significación hidrológica relevante: K_s conductividad hidráulica saturada, o tasa de infiltración final estable (f_c , según la ecuación de Horton). Para medir la tasa de infiltración a través de la escorrentía es muy importante que la parcela sea de reducido tamaño, ya que el retraso o tránsito de la escorrentía por la parcela es atribuido como infiltración. En estos experimentos la interceptación de la vegetación se toma también como infiltración. Por ello, en los suelos quemados, al haberse reducido considerablemente la vegetación y la hojarasca aumenta la precisión de las medidas.

En las laderas de Bixquert y Xàtiva (Valencia), se realizaron experimentos con lluvia simulada a 55 mm h^{-1} (5 años de periodo de retorno) en 10 parcelas de la zona quemada y en 10 parcelas de la zona no quemada (control) durante el invierno de 2005 (Figura 6). Se midieron las tasas de escorrentía cada minuto, y al sustraerlas de la precipitación se pudo calcular la tasa de infiltración instantánea y las tasas de infiltración final estable ajustando esos datos mediante la ecuación de Horton (1939).



Figura 6. Vista del simulador de lluvia (Cerdà et al., 1997) con modificaciones en la estructura introducidas para experimentos diseñados por Merche B. Bodí y Francisco Javier León Miranda. A la izquierda se puede ver la nueva estructura de 8 apoyos y a la derecha con la cubierta protectora del viento.

Tabla 3. Tasas de infiltración final estable (f_c) obtenidas a partir de las mediciones realizadas con lluvia simulada en diciembre de 2005 en la zona de estudio de Bixquert. La tasa de infiltración final estable se obtuvo a partir de la sustracción de la tasa de escorrentía de la tasa de lluvia y el ajuste de la ecuación de Horton. Ver Cerdà (1996).

Parcelas	Quemado	Control
f_c	mm h^{-1}	mm h^{-1}
1	33,14	55,00
2	36,25	55,00
3	34,89	49,25
4	30,15	52,32
5	29,32	52,47
6	38,25	53,84
7	27,15	55,00
8	25,65	55,00
9	34,33	51,36
10	27,96	52,45
Media	31,71	53,17

Los incendios forestales claramente provocan una reducción de las tasas de infiltración como lo demuestra la comparación entre las mediciones realizadas en el suelo control con el que ha sufrido un incendio seis meses antes (Figura 7). El efecto de la falta de vegetación, suelos húmedos, y la ausencia de cenizas da lugar a costras y con ello a tasas de infiltración más bajas. En la zona quemada, la tasa de infiltración final estable fue de 31,71 mm h^{-1} , y osciló entre 27,15 mm h^{-1} y 38,15 mm h^{-1} (Tabla 3). La zona no quemada mostró tasas de infiltración siempre más altas: 53,17 (49,25 - 55,00 mm h^{-1}) y con cuatro parcelas

sin escorrentía, lo que apunta a tasas de infiltración potencialmente más altas. Estos experimentos se realizaron sin alterar los suelos y la vegetación natural, por lo que la interceptación de las plantas en las parcelas no quemadas es cuantificada como infiltración.

Experimento 2. Cambio en la tasas de escorrentía, concentración de sedimentos y tasas de erosión como consecuencia del incendio

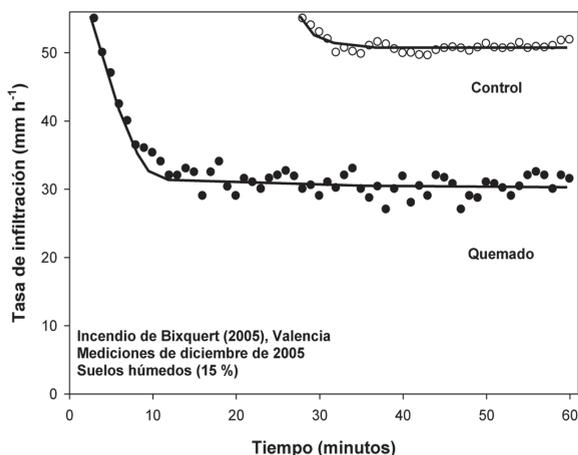


Figura 7. Cambios en la tasa de infiltración instantánea en dos parcelas (quemada y control) del incendio de Bixquert de 2005. Mediciones de invierno. Se ajusta una curva (ecuación de Horton) para determinar las tasas de infiltración final estable (f_c).

La pérdida de vegetación y hojarasca, la formación de costras por el impacto de las gotas y el taponamiento de los poros de los suelos por las cenizas son algunos de los procesos que favorecen una reducción de la capacidad de infiltración de los suelos. Y sus consecuencias son el aumento de la escorrentía y la aceleración del transporte de los sedimentos. La lluvia simulada puede facilitar la cuantificación de estos cambios al comparar parcelas control con las parcelas quemadas bajo lluvias idénticas.

Un ejemplo de esta estrategia de parcelas pareadas lo tenemos en los

Tabla 4. Cambios en la escorrentía (caudal, %), la concentración de sedimentos, SC (g L^{-1}) y la tasa de erosión ($\text{g m}^2 \text{h}^{-1}$) para 10 parcelas afectadas por un incendio (quemado) y 10 no afectadas (control) en el incendio de Bixquert de 2005. Mediciones de invierno con suelos húmedos.

Parcelas	Caudal	Caudal	SC	SC	Erosión	Erosión
	Quemado %	Control %	Quemado g L^{-1}	Control g L^{-1}	Quemado $\text{g m}^2 \text{h}^{-1}$	Control $\text{g m}^2 \text{h}^{-1}$
1	39,75	0,00	3,25	0,00	71,05	0,00
2	34,09	0,00	2,98	0,00	55,88	0,00
3	36,56	10,45	3,14	0,19	63,15	1,09
4	45,18	4,87	3,65	0,52	90,70	1,39
5	46,69	4,60	2,75	0,21	70,62	0,53
6	30,45	2,11	2,86	0,23	47,91	0,27
7	50,64	0,00	2,45	0,00	68,23	0,00
8	53,36	0,00	3,72	0,00	109,18	0,00
9	37,58	6,62	3,42	0,26	70,69	0,95
10	49,16	4,64	2,45	0,27	66,25	0,69
Media	42,35	3,33	3,07	0,28	71,36	0,49

experimentos realizados en el incendio de Bixquert de 2005, donde se seleccionaron 10 parcelas pareadas. Las afectadas por el incendio presentaron tasas de escorrentía elevadas, 42,35% de media, con valores que oscilaron entre los 30,45% y los 53,35% (Tabla 4). Las parcelas control presentaron una escorrentía de 3,33% con cuatro parcelas sin escorrentía, y una que alcanzó el 10,45% de la lluvia recibida. Como promedio, este caudal es 12,72 veces más alto en la zona quemada en realidad muestra diferencias más altas. La escorrentía de las parcelas control es escasa y cuando se produce existen 4 de 6 parcelas que pueden absorber las escorrentías generadas por otras parcelas. Por lo tanto, a escala de ladera, la escorrentía será nula en la zona no quemada y, en cambio, muy abundante en la zona quemada.

El uso de lluvias simuladas con idéntica intensidad, duración y características permite cuantificar con detalle el efecto de los incendios en parcelas pareadas. Con la lluvia natural las dificultades en la toma de datos es mayor, pudiendo producirse diferencias en la precipitación como fruto de su alta variabilidad espacial; o bien la lluvia se produce de forma inesperada cuando no funcionan los instrumentos de medición, es tan intensa que desborda los depósitos, los sensores y colectores de datos no funcionan adecuadamente. O bien durante meses no se produce la lluvia esperada.

Experimento 3. Cambios temporales en la pérdida de agua y suelo en parcelas pareadas: quemadas *versus* control

Además de poder comparar los valores totales, la lluvia simulada permite una cuantificación exquisita de los caudales y de las tasas de erosión y sus cambios en el tiempo. Desde que se inicia la

lluvia se producen mediciones que muestran con exactitud cuando es más eficiente el proceso de erosión. De esta manera también puede determinarse si el proceso de erosión está dominado por el material disponible, por la capacidad de carga del caudal, o si hay respuestas hidrofóbicas.

En la figura 8 se muestran los cambios en la concentración de sedimentos en dos parcelas (suelo quemado y control) después del incendio de Bixquert de 2005. Se puede comprobar cómo la concentración de sedimentos es ínfima siempre en la zona no quemada, y no se presenta una tendencia clara hacia el aumento o el descenso en la concentración de sedimentos con el tiempo. En la parcela quemada, en cambio, hay muchos sedimentos disponibles al inicio de la arroyada, por lo que la concentración de sedimentos alcanza cerca de 5 g L⁻¹. El lavado de los sedimentos hace que su concentración en la escorrentía decazca hasta valores muy inferiores, y ello a pesar de mayores caudales. Por lo tanto, el proceso de erosión en las zonas quemadas está controlado por la capacidad de transporte de la arroyada al haber un exceso de sedimentos disponibles para la erosión.

En la figura 9 se muestran los cambios en la tasa de escorrentía en dos parcelas (quemado y control) después del incendio de Bixquert de 2005. En la parcela control, la escorrentía se inicia después de 28 minutos de lluvia y el caudal es reducido incluso al final de los 60 minutos de lluvia (5 mm h⁻¹). En cambio, en la parcela quemada se puede comprobar cómo la escorrentía se genera tras sólo 5 minutos de lluvia, aumenta de forma súbita a los 10 minutos y alcanza la tasa estable (22 mm h⁻¹) que se mantiene con variaciones mínimas del caudal. Estas mediciones a intervalos de 60 segundos permiten conocer la respuesta para lluvias de menor duración. Por ejemplo, una lluvia

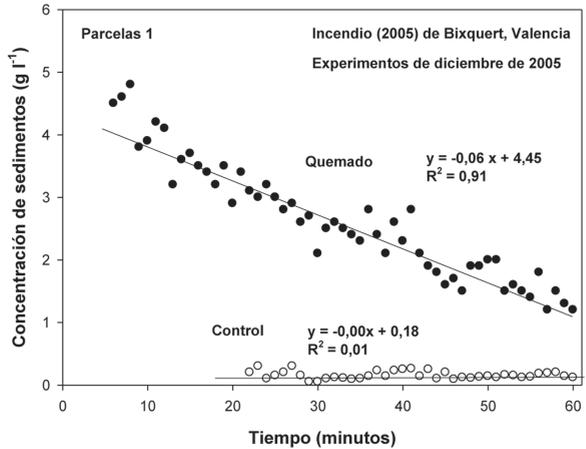


Figura 8. Evolución de la concentración de sedimentos durante un experimento con lluvia simulada con parcelas pareadas (control vs quemado) en Bixquert Valencia. Se presenta la parcela 1 con mediciones cada minuto de la concentración de sedimentos.

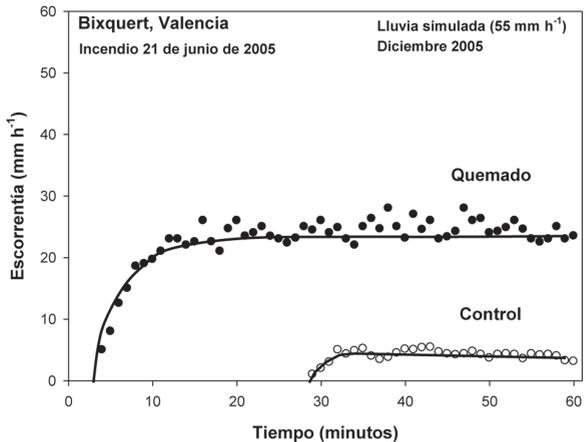


Figura 9. Evolución de la tasa de escorrentía durante un experimento con lluvia simulada con parcelas pareadas (Control - Quemado) en Bixquert (Valencia). Se presenta la parcela 1 con mediciones cada minuto del caudal.

de 20 minutos de duración y 18 mm de precipitación total no producirá escorrentía en la zona control, pero en la zona quemada dará lugar a un caudal de 4 Lm⁻². Esta precisión sólo la podemos conseguir con la lluvia simulada y con la estrategia de parcelas pareadas.

Experimento 4. Dinámica de la escorrentía y la concentración de sedimentos durante experimentos de simulación de lluvia

La dinámica de la tasa de escorrentía y de la concentración de sedimentos pueden verse afectadas tras la acción del fuego. La disminución de la cobertura vegetal normalmente produce un fuerte incremento en las tasas de escorrentía tras la acción de la lluvia. La mayor inestabilidad de agregados producida por la disminución en el contenido de materia orgánica, así como la mayor intensidad del desprendimiento de partículas ocasionado por el impacto directo de las gotas de lluvia, aún bajo una intensidad moderada, afecta también a la concentración de sedimentos en el agua de escorrentía. Sin embargo, tanto la generación de escorrentía como la concentración de sedimentos muestran un comportamiento irregular en función del tiempo. En este ejemplo se muestra un ensayo realizado en Évora (Portugal) tras un incendio natural ocurrido en 2008 (Figura 10). Para llevar a cabo las simulaciones de lluvia se seleccionaron 10 parcelas en zonas afectadas por el fuego donde la formación de cenizas había sido escasa (<1 mm; RSC), y 10 parcelas en puntos donde la formación de cenizas había sido alta (1-2 cm; RCC). Como control, se seleccionaron otras 10 parcelas en zonas no afectadas por el fuego adyacentes al área quemada. Se utilizó un simulador de lluvia similar al descrito por Lasanta et al. (2000), con una estructura en forma de pirámide truncada sobre patas metálicas extensibles, protegido del viento. La lluvia se produjo mediante una boquilla situada a 3 m de altura, cayendo sobre un área circular delimitada por un anillo de acero de 40 cm de diámetro que permitía dirigir la escorrentía hacia un punto de recogida, donde cada 2 minutos era muestreada para determinar su volumen y la concentración de sedimentos mediante filtrado. La intensidad de lluvia se fijó en 50 mm h⁻¹, valor representativo en el área de estudio, y los experimentos de simulación se prolongaron durante 30 minutos.

Las figuras 11 y 12 muestran la variación de las tasas de escorrentía y concentración de sedimentos en función del tiempo. Durante los primeros minutos de simulación de lluvia se muestra un incremento suave de la tasa de escorrentía en todos los casos. A partir de unos minutos, puede observarse cómo la tasa de escorrentía se incrementa mucho más rápidamente en el área que-



Figura 10. Área control (a) y área afectada por el fuego (b). Fotografía: A. Jordán (a) y L.M. Zavala (b).

mada sin cenizas. El área cubierta por cenizas muestra un incremento más suave, estabilizándose tras los primeros 10 minutos de simulación. El área control, donde la interceptación por parte de la vegetación es más alta, muestra una tasa de escorrentía en torno a 10 mL min⁻¹, lo que equivale tan sólo al 20 % de la precipitación.

Las curvas de escorrentía y concentración de sedimentos como función del tiempo presentan una forma que variará según las condiciones de la superficie analizada y las características de la lluvia simulada, pero ofrecen un patrón característico. Tanto una como otra variable pueden incrementarse o decrecer en distintos momentos del experimento, mostrando puntos máximos y mínimos característicos, así como pueden estabilizarse o no pasado un cierto umbral de tiempo. Autores como Moore y Singer (1990), Roth y Helming (1992) han dividido las etapas de formación de la escorrentía en tres fases. En la fase I (pre-escorrentía) se produce el encharcamiento de la superficie del suelo y la acumulación en zonas localizadas debido a irregularidades de la superficie, pero la capa de agua no se desplaza ni es capaz de arrastrar sedimentos. Durante la fase II, las tasas de aumento de la escorrentía aumentan de forma pronunciada, coincidiendo con un aumento continuo en la tasa de pérdida de suelo, hasta llegar a un máximo de concentración de sedimentos en la capa superficial de agua, seguido por una fuerte disminución de la tasa de erosión hacia el final de la fase II.

El incremento en la generación y velocidad de la escorrentía se detiene debido a cambios en la respuesta hidrológica del suelo. Al inicio de la lluvia, la resuspensión de sedimentos ocasionada por la salpicadura de las gotas de agua puede formar una delgada capa de sellado que dificulta la infiltración y favorece el encharcamiento y el desplazamiento de la capa de agua acu-

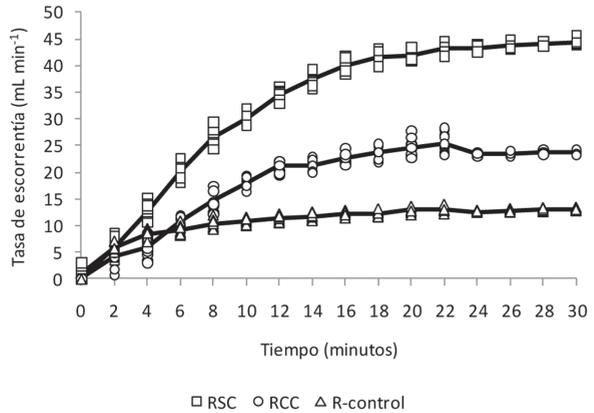


Figura 11. Dinámica de la tasa de escorrentía en función del tiempo. RSC: área quemada sin cubierta de cenizas (< 1 mm); RCC: área quemada con cubierta de cenizas (1-2 cm); R-control: área control no afectada por el fuego.

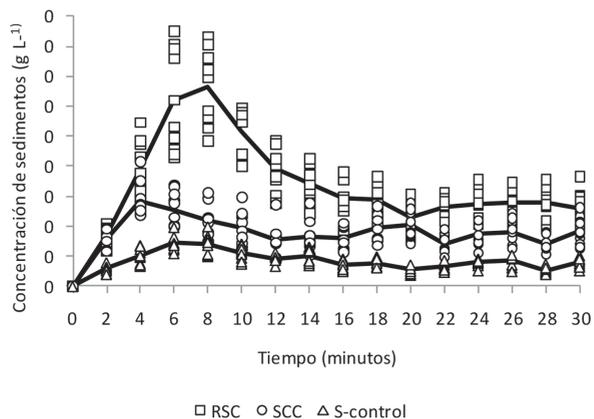


Figura 12. Dinámica de concentración de sedimentos en la escorrentía en función del tiempo. RSC: área quemada sin cubierta de cenizas (< 1 mm); RCC: área quemada con cubierta de cenizas (1-2 cm); R-control: área control no afectada por el fuego.

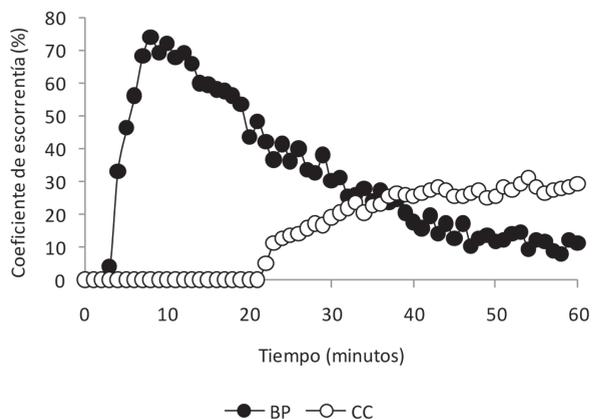


Figura 13. Dinámica de concentración de sedimentos en la escorrentía en función del tiempo en dos parcelas experimentales: BP, suelo desnudo repelente al agua bajo *Pinus halepensis*, y CC, suelo cultivado de carácter hidrofílico.

mulada en superficie (Martínez-Zavala y Jordán, 2008). El encharcamiento origina un incremento en la presión de la columna de agua, que puede variar de manera apreciable dependiendo de las irregularidades de la superficie, forzando la infiltración del agua. Además, el encharcamiento prolongado durante los minutos iniciales causa una inhibición de la repelencia al agua del suelo, favoreciendo también la infiltración. La presencia de una capa de cenizas en el suelo permite una gran capacidad de almacenamiento de agua en la superficie del suelo (Cerdà y Doerr, 2008; Zavala et al., 2009) por lo que la formación de escorrentía será más lenta, aún

cuando la infiltración en la capa de suelo mineral sea aún débil, como se aprecia en la figura 11.

Por último, en la fase III (estado estable), las tasas de escorrentía y pérdida de suelo llegan a un equilibrio. Este comportamiento puede deberse a los cambios en la cohesión de la superficie del suelo. Los picos de producción de sedimentos aparecen cuando los agregados se desestabilizan y rompen como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia. La resistencia al corte de los agregados disminuye a medida que la humedad del suelo se acerca a la saturación. A medida que aumenta la escorrentía en los primeros minutos, las partículas finas van siendo arrastradas, llegando un momento en que su concentración en la escorrentía disminuye como consecuencia de su agotamiento. Tras un período de lluvia prolongado, la producción de sedimentos procedentes de los agregados más inestables se ve disminuida, mientras que los más estables pueden seguir sin aportar sedimentos.

La repelencia al agua inducida en el suelo por efecto del fuego puede afectar a la dinámica de la escorrentía en el suelo, ya que inhibe la infiltración. Como consecuencia, tanto el encharcamiento como la formación de escorrentía se aceleran, tal como se observó por Jordán et al. (2008). En el siguiente experimento se analizó la dinámica de la escorrentía sobre dos parcelas experimentales ($0,24 \text{ m}^2$) en la estación experimental de El Teularet-Sierra de Enguera (Valencia), en 2002. Se utilizó un simulador de lluvia descrito por Cerdà et al. (1997). La lluvia simulada se produjo a una intensidad de $53,45 \text{ mm h}^{-1}$ durante un período de 60 minutos. La primera de las parcelas experimentales seleccionadas corresponde a un suelo desnudo repelente al agua bajo *Pinus halepensis*, que mostraba una densa capa de acículas así como hifas de hongos (BP); en el segundo caso, se trata de un suelo cultivado, que no presentaba repelencia al agua (CC). En los dos casos, la pendiente media era del 5%. La figura 13 muestra la dinámica de la curva de escorrentía en cada caso. En el caso de la parcela CC, suelo hidrofílico, la escorrentía no se inicia hasta después de 22 minutos, creciendo de manera moderada hasta los 36-40 minutos. Pos-

teriormente, la escorrentía alcanza un equilibrio con la infiltración, estabilizándose en $55,5 \pm 3,2$ mm min⁻¹ con un coeficiente de escorrentía medio de 27,1%. En el caso del suelo repelente al agua (PB), la escorrentía se inicia tras los primeros 3 minutos y alcanza un máximo en el minuto 8 del ensayo, en el que el coeficiente de escorrentía determinado es 74,2%. Durante esta fase del ensayo, la repelencia al agua de la superficie del suelo inhibe la infiltración. Transcurrido un cierto tiempo de contacto entre el suelo y el agua acumulada en la superficie, la hidrofobicidad se destruye, iniciándose la infiltración. Posteriormente, por tanto, el coeficiente de escorrentía disminuye progresivamente hasta el final del experimento.

Experimento 5. Implicaciones de la repelencia al agua del suelo en la generación de escorrentía y en la erosión postincendio

La repelencia al agua inducida o favorecida por el fuego ha sido citada frecuentemente como una de las principales causas del incremento de la escorrentía superficial y la erosión acelerada del suelo en las áreas quemadas. El empleo de lluvia simulada constituye una herramienta muy útil para relacionar la repelencia al agua del suelo quemado con diferentes parámetros hidrológicos y erosivos. Mediante un simulador de lluvia portátil descrito por Benito et al. (2001) se llevó a cabo una experiencia en una zona forestal (repoblación con *Pinus pinaster*) localizada en el municipio de Padrón (A Coruña) que sufrió en el año 2004 un incendio de intensidad media-alta.

El simulador de lluvia está formado por una estructura metálica con forma de pirámide truncada elaborada con tubos de aluminio de 3 cm de diámetro. Las patas telescópicas permiten adaptar el simulador a la pendiente del terreno (Figura 14). En su parte superior se ha soldado



Figura 14. Vista general del simulador de lluvia utilizado en el experimento 4 y detalle del sistema formador de lluvia utilizado por Benito et al. (2001).

una placa metálica en la cual se conecta una boquilla pulverizadora (Fulljet 1/8 GG6SQ de Spraying Systems Co.). Este sistema genera un modelo de aspersión con una zona de impacto cuadrada, obteniendo ángulos de aspersión entre 40° y 105° y caudales de 0,9 a 7,7 L min⁻¹ para presiones de trabajo que oscilan entre 0,01 y 1 MPa. La unidad de bombeo consiste en una bomba de presión (Jabsco ITT) conectada a una batería de 12 voltios y a un sistema regulador de presión con un manómetro y una llave de paso que permite regular de forma manual la presión de salida del agua. El suministro de agua se realiza desde un tanque de 50 litros y mediante un sistema de mangueras de goma que permiten el transporte hasta la boquilla. Finalmente, se coloca un protector de viento confeccionado con una fina tela de rejilla plástica, con el fin de evitar interferencias durante el experimento.

Las características de la lluvia simulada fueron las siguientes: una intensidad de 50 mm h⁻¹ obtenida aplicando una presión de 0,02 MPa y una altura de caída de 2 m; un diámetro mediano de gota (D₅₀) de 1,2 mm y una energía cinética de 13,05 J m⁻² mm⁻¹. Se trabaja con parcelas de 1 m² de superficie delimitadas por tres láminas metálicas de 1 m de longitud y 10 cm de altura, que se colocan en el suelo con cuidado de no alterarlo (Figura 15). La parcela se cierra en su parte frontal con una estructura metálica en forma de V con un orificio de salida en el vértice que permite recoger la escorrentía superficial y el sedimento generado durante la experiencia.

Se seleccionaron dos parcelas con una pendiente del 20% y un mes después de producirse el incendio se aplicó lluvia simulada durante 30 minutos. La escorrentía generada se midió a intervalos de 1 minuto y en 1 de cada 3 minutos se recogieron muestras para determinar las tasas de erosión. Se midió la repelencia al agua mediante el método MED (ver capítulo 2.4; Jordán et al., 2001) y la humedad del suelo antes y después de aplicar la lluvia simulada.

Antes de la aplicación de la lluvia simulada, la humedad del suelo era muy baja con un valor medio de 5,15% en la capa superficial y de 2,13% entre 2 y 10 cm de profundidad. El fuerte calentamiento de la superficie del suelo por el paso del fuego favoreció la desaparición de la repelencia al agua en los dos primeros centímetros del suelo (en comparación con la fuerte repelencia superficial observada en un área próxima no quemada) pero indujo, sin



Figura 15. Detalle de la parcela experimental (1 m²) utilizado por Benito et al. (2001).

Tabla 5. Principales parámetros hidrológicos y erosivos obtenidos en las experiencias con lluvia simulada en dos parcelas quemadas en la zona de estudio de Padrón (A Coruña). Tr, tiempo de inicio de escorrentía; Em, escorrentía media; Ce, coeficiente de escorrentía; fc: infiltración final estable; Te, tasa de erosión.

Parcela	1	2
Tr (segundos)	40	120
Em (mm h ⁻¹)	19,69	27,1
Ce (%)	39	54
fc (mm h ⁻¹)	22,76	23,06
Te (g m ⁻² h ⁻¹)	8,79	11,07

embargo, un grado de repelencia muy fuerte (MED 24%) entre 2 y 20 cm de profundidad. Como consecuencia, la escorrentía se inició rápidamente en ambas parcelas, y se alcanzaron coeficientes de escorrentía en torno al 50% que sin embargo, a esta escala de trabajo, no se tradujeron en tasas de erosión elevadas (Tabla 5). Ésto puede ser debido a que, cuando se trabaja en parcelas de pequeña superficie y con episodios de lluvia relativamente cortos, no se llega a alcanzar una concentración y velocidad del flujo suficiente como para producir un arrastre de sedimentos importante.

Al finalizar las experiencias se comprobó que únicamente se habían humedecido los dos primeros cm del suelo que no mostraron repelencia al agua, mientras que por debajo de 2 cm, el suelo se mantuvo muy seco (2,89%) y con una hidrofobia muy fuerte.

El simulador de lluvia da la posibilidad de poder aplicar lluvias idénticas sucesivas en la misma parcela y en diferentes periodos post-incendio por lo que se presenta como una metodología muy útil para estudiar la evolución de la respuesta hidrológica y erosiva y su relación con los cambios observados en la repelencia al agua y en la humedad del suelo.

Experimento 6. Diferenciación entre el efecto directo del fuego y la pérdida de cubierta vegetal provocada por el mismo en un ambiente semiárido

El fuego tiene un efecto directo sobre la superficie del suelo, provocado por el incremento de la temperatura y la deposición de cenizas y otros restos, y además un efecto indirecto, a causa de los cambios en la cobertura de la vegetación y los horizontes orgánicos, lo que da lugar a una variación en la incidencia de elementos externos, especialmente la lluvia en zonas semiáridas sobre la superficie. Teniendo en cuenta estas premisas, se llevó a cabo un experimento con el objetivo de analizar los cambios en los procesos de generación de escorrentía y movilización de sedimentos tras un incendio forestal y bajo ambiente semiárido, donde cabe esperar una recuperación de la vegetación lenta, y dedicando especial atención al efecto de las lluvias otoñales sobre un suelo poco protegido.

El área de estudio se localizó en el Término Municipal de Benidorm (provincia de Alicante), al sureste de la Sierra Cortina. Los suelos son del tipo Cambisol calcáreo (Driessen et al., 2001) y el clima corresponde a semiárido termomediterráneo. La vegetación previa al incendio estaba formada por un matorral calcícola con algunos pies de pino carrasco (*Pinus halepensis*) y algarrobo (*Ceratonia siliqua*). Se seleccionaron dos laderas cercanas, de orientación, substrato litológico y características edáficas equiparables, una afectada por el incendio forestal y otra no quemada. En cada una de ellas se instalaron 5 parcelas (0,24 m²) para medir la capacidad de infiltración y el arrastre de sedimentos utilizando el simulador de lluvia descrito por Calvo et al. (1988) y Cerdà et al. (1997) (ver en la figura 6 una remodelación de este instrumento). En el caso de las parcelas instaladas en la ladera quemada, se llevaron a cabo 2 series de simulaciones de lluvia, la primera poco después del incendio y la segunda 6 meses más tarde, tras el primer periodo de lluvias otoñales. La intensidad de la lluvia simulada fue de 55 mm h⁻¹ y los valores de escorrentía se ajustaron a la ecuación de Horton (1939) para estimar la infiltración final estable (*f_c*). Los resultados no mostraron diferencias significativas entre la *f_c* obtenida en la ladera no quemada respecto a la quemada justo después del incendio (Tabla 6). Por el

Tabla 6. Tasa de infiltración final estable (f_c , mm h^{-1}) obtenida en las distintas parcelas instaladas en ambiente semiárido, abarcando laderas no quemadas y quemadas, y en este último caso con medidas tomadas justo después del incendio y tras el periodo de lluvias otoñal.

Parcela f_c (mm h^{-1})	No quemado	Quemado Antes de las lluvias	Quemado Después de las lluvias
1	52	43	17
2	53	46	25
3	43	28	15
4	40	56	33
5	51	53	44
Media \pm std	48 \pm 6	45 \pm 11	27 \pm 12

Tabla 7. Concentración de sedimentos en el agua de escorrentía (cs) obtenida en las distintas parcelas instaladas en ambiente semiárido, abarcando laderas no quemadas y quemadas, y en este último caso con medidas tomadas justo después del incendio y tras el periodo de lluvias otoñal (-, insignificante).

Parcela cs (g L^{-1})	No quemado	Quemado Antes de las lluvias	Quemado Después de las lluvias
1	0	1,1	1,6
2	0	1,5	2,8
3	-	1,0	1,3
4	-	-	0,8
5	-	-	0,8
Media \pm std	48 \pm 6	45 \pm 11	27 \pm 12

contrario, esta capacidad de infiltración disminuyó significativamente después de las lluvias otoñales (Llovet et al., 1994). Una posible explicación sería las diferencias en la humedad del suelo entre ambos periodos. De todos modos, las diferencias en cuanto a humedad del suelo no fueron muy elevadas. Otra explicación sería la acción de las lluvias otoñales sobre un suelo desprotegido, que provocaría una degradación estructural de su superficie y la formación de costras.

La concentración de sedimentos en el agua de escorrentía fue prácticamente insignificante en el caso de las parcelas instaladas en la ladera no quemada (Tabla 7). Respecto a las parcelas situadas en la ladera afectada por el incendio, la concentración de sedimentos fue algo más del doble tras las lluvias otoñales que justo después del fuego, lo que unido a la mayor producción de escorrentía dio lugar a un arrastre de sedimentos 4 veces superior tras las lluvias otoñales que a las pocas semanas del incendio.

Experimento 7. Diferenciación entre el efecto directo del fuego y la pérdida de cubierta vegetal provocada por el mismo. Efectos del sustrato litológico y de la orientación

En el experimento anterior quedó patente la influencia del fuego como agente que altera la cubierta vegetal del suelo, y por lo tanto el interés de llevar a cabo seguimientos temporales del comportamiento hidrológico del suelo que ha resultado afectado por un incendio forestal. Este nuevo experimento tuvo como objetivo profundizar en el estudio de la respuesta temporal del suelo quemado, incorporando el posible efecto que podría tener tanto el sustrato litológico como la orientación. El método fue parecido al utilizado en el experimento anterior, lluvia simulada sobre microparcelas, con mediciones llevadas a cabo antes y después de la acción de las lluvias sobre el suelo quemado. En este caso se seleccionaron laderas con suelos desarrollados sobre los dos tipos de sustrato litológico más abundantes en el este de la Península Ibérica (calizas y margas) y distinguiendo entre orientaciones contrastadas (umbrías y solanas). Estas parcelas se distri-

buyeron al sur de la Sierra Mariola, a caballo entre las provincias de Valencia y Alicante. La localidad presenta un clima subhúmedo mesotérmico, suelos tipo Leptosol renzínico sobre calizas y Cambisol calcáreo sobre margas (FAO, 2001), y una vegetación previa al incendio compuesta por matorrales densos (dominados por coscoja, aliaga, romero y distintas especies de jara) con pies dispersos de pino carrasco, vegetación muy frecuente en esta región.

La tabla 8 muestra los resultados de los análisis de datos obtenidos (Llovet, 2005). Cabe destacar que, al igual que ocurrió bajo condiciones ambientales semiáridas, se observó

una disminución significativa de la infiltración final estable estimada antes y después del periodo de lluvias posterior al fuego. Por el contrario, el efecto de éstas sobre la concentración de sedimentos no pasó de tener una significación residual. El sustrato litológico ayudó a explicar significativamente la varianza encontrada. Así, la infiltración final estable en suelos sobre calizas prácticamente dobló a la de suelos sobre margas, mientras que la concentración de sedimentos fue casi la mitad sobre calizas que sobre margas. Por el contrario, la orientación no se mostró como un factor relevante: solamente fue significativa su interacción con el sustrato y el tiempo, indicando que la dinámica temporal fue parecida en las parcelas sobre calizas norte y sobre margas sur por un lado, y en las parcelas sobre calizas sur y sobre margas norte por el otro.

Experimento 8. Aplicación de la lluvia simulada para el estudio del choque térmico y la pérdida de cubierta vegetal bajo condiciones controladas en el laboratorio

La simulación de lluvia, además de método para estimar la capacidad de infiltración, la generación de escorrentía y el arrastre de sedimentos, puede ser útil para estudiar el efecto de la propia lluvia sobre el suelo bajo condiciones controladas. El experimento que se describe a continuación tuvo como fin profundizar en la diferenciación del efecto directo del fuego sobre el suelo (incremento de la temperatura, deposición de cenizas y otros restos) de su efecto indirecto como factor que provoca cambios en la cubierta del suelo. Se controló tanto el nivel de fuego aplicado como la lluvia posterior al tratamiento térmico, pero partiendo de muestras inalteradas de suelo, algo poco habitual en experimentos de laboratorio.

La zona de estudio está situada en el término municipal de Onil (provincia de Alicante). Presenta un clima subhúmedo mesotérmico, suelos tipo Cambisol calcáreo (FAO, 2001) y una vegetación compuesta por un aulagar muy denso, con alto riesgo de sufrir incendios forestales (Baeza

Tabla 8. Resultados del análisis de la varianza de los datos de infiltración final estable (*fc*) y concentración de sedimentos en el agua de escorrentía (*cs*) obtenidos a partir de las simulaciones de lluvia, en función de los factores sustrato (S), orientación (O), tiempo transcurrido desde el incendio (T) y parcela (P). Las diferencias significativas están marcadas: (*) diferencia significativa al 5%; (**) diferencia significativa al 1%.

	Infiltración (<i>fc</i>)	Sedimentos (<i>Cs</i>)
S	F=20,513 sig=0,001**	F=18,782 sig=0,002**
O	F=0,925 sig=0,361	F=0,662 sig=0,437
T	F=15,813 sig=0,028*	F=6,387 sig=0,086
S × O	F=0,366 sig=0,560	F=0,694 sig=0,426
S × T	F=0,182 sig=0,680	F=1,690 sig=0,226
O × T	F=0,241 sig=0,635	F=0,592 sig=0,461
T × P	F=0,696 sig=0,578	F=0,969 sig=0,449
P (S × O)	F=2,602 sig=0,085	F=0,996 sig=0,502
S × O × T	F=6,455 sig=0,032*	F=0,168 sig=0,692

et al., 2006). Se tomaron un total de 40 muestras inalteradas de suelo mediante cilindros de 20 cm de diámetro y 10 cm de profundidad. Tras eliminar manualmente la cobertura vegetal y de horizontes orgánicos, rechazar muestras que presentasen indicios de alteración y repartir el resto al azar, se sometieron a diferentes niveles de quema con ayuda de un soplete de boca ancha, lo que proporcionó un incremento de temperatura de la superficie del suelo desde 0°C (muestras control) hasta 800°C. El tratamiento se llevó a cabo mediante un simulador de lluvia fijo instalado en un patio interior del edificio de Ciencias de la Universidad de Alicante. El equipo consistió en un sistema de bombeo de agua eléctrico, una válvula de retorno para controlar la presión y una conducción de agua hasta un pulverizador. Este equipo permitió controlar y calibrar las características de la lluvia, trabajar con una altura de caída de las gotas de agua elevada (7,5 m) y evitar la distorsión debida al viento. Entre los resultados obtenidos, cabe destacar que la lluvia provocó una disminución significativa de la capacidad de infiltración del suelo, independientemente de la intensidad de quema. Es decir, la lluvia afectó a las muestras desprovistas de cobertura, pero no afectó de forma distinta las muestras muy, poco o nada quemadas. Por otra parte, las muestras con mayor capacidad de infiltración previa al efecto de la lluvia se mostraron más vulnerables a la degradación debida a la propia lluvia (Llovet et al., 2008).

Experimento 9. Producción de sedimentos y escorrentía en brezales quemados y revegetados

Uno de los principales impactos de los incendios forestales es la pérdida de vegetación así como de la capa de hojarasca. La desaparición de ambos componentes del ecosistema provoca alteraciones importantes en las características del suelo, tales como aumentos en la temperatura, disminución del contenido de humedad, disminución en la estabilidad de los agregados y un aumento de la erosión (Givannini y Lucchesi, 1993; Viegas, 1997), sobre todo en la zona mediterránea. Uno de los métodos más empleados para disminuir las pérdidas de suelo por erosión y acelerar la recuperación del mismo es la revegetación de zonas quemadas. Diferentes estudios muestran que la pérdida de suelo es elevada inmediatamente después de la quema (Giovannini y Lucchesi, 1993; Sala et al., 1994) y ésta se reduce con el tiempo y el establecimiento de la vegetación. Por ello, lo que se pretende con estos trabajos es acelerar el crecimiento de la vegetación en los primeros meses tras el fuego para proteger el suelo y evitar la degradación del mismo (Pinaya y Díaz-Fierros, 1996; Vallejo, 1997).

En este trabajo se ha utilizado la simulación de lluvia para determinar los cambios producidos en las tasas de escorrentía y producción de sedimentos después de una quema experimental y a los 18 meses tras la recuperación de la cubierta vegetal de la zona.

El estudio se llevó a cabo en una zona concubierta de matorral dominado por *Erica australis* en la provincia de León. En este área se realizó una quema experimental en julio de 1993, cuyas características se pueden encontrar descritas en Marcos et al. (1998 y 2000). En marzo de 1994, se revegetó la zona quemada utilizando diferentes combinaciones de especies, todas ellas naturales de la zona de estudio. Para realizar los ensayos de revegetación, se establecieron 15 parcelas permanentes de 4 m² (cuatro tratamientos y un control replicados tres veces) distribuidas de manera aleatoria. Los tratamientos ensayados fueron los siguientes:

1. Siembra de herbáceas con las siguientes especies: *Lotus corniculatus*, *Agrostis capillaris* y *Festuca rubra*.
2. Siembra de herbáceas y matorral: *Lotus corniculatus*, *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra*, *Calluna vulgaris*, *Cytisus scoparius* y *Erica australis*.
3. Siembra de herbáceas y arbolado: *Lotus corniculatus*, *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra* y *Quercus pyrenaica*.
4. Siembra de herbáceas, matorral y arbolado: *Lotus corniculatus*, *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra*, *Calluna vulgaris*, *Cytisus scoparius*, *Erica australis* y *Quercus pyrenaica*.
5. Control.

Para determinar las tasas de escorrentía y producción de sedimentos, se realizó una lluvia simulada después de la quema y al año y medio de la revegetación. La simulación de lluvia se llevó a cabo en una superficie de 1 m², dentro de cada parcela de 4 m². El simulador usado fue una modificación del propuesto por Wilcox et al. (1986), que presenta como sistema formador de lluvia una boquilla pulverizadora. Se simuló una lluvia de 180 mm h⁻¹, aplicada durante 5 minutos desde una altura de 2 m. En cada simulación se determinó la producción de sedimentos, la cantidad de escorrentía y las características del agua de escorrentía (pH, conductividad, nitratos, fósforo, potasio, sodio, calcio y magnesio). Antes de la realización de cada simulación de lluvia se realizaron inventarios de vegetación, estimando la abundancia de las especies presentes como porcentaje de cobertura.

La mayor cantidad de escorrentía se detecta inmediatamente después de la quema (Tabla 9), disminuyendo un año y medio después de los tratamientos. Sin embargo, la disminución de la escorrentía no es favorecida por los tratamientos de revegetación ya que no se observaron dife-

Tabla 9. Producción de sedimentos, escorrentía y valores de las características analizadas en el agua de escorrentía recolectada después de la quema (Quemado), y un año y medio después de realizar los tratamientos de revegetación: 1, Siembra de herbáceas (*Lotus corniculatus*, *Agrostis capillaris* y *Festuca rubra*); 2: Siembra de herbáceas y matorral (*Lotus corniculatus*, *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra*, *Calluna vulgaris*, *Cytisus scoparius* y *Erica australis*); 3: Siembra de herbáceas y arbolado: *Lotus corniculatus*, *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra* y *Quercus pyrenaica*; 4: Siembra de herbáceas, matorral y arbolado: *Lotus corniculatus*, *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra*, *Calluna vulgaris*, *Cytisus scoparius*, *Erica australis* y *Quercus pyrenaica*; y 5, control.

	Quemado	1	2	3	4	5
Sedimentos (g m ⁻²)	10,3	8,7	16,2	7,4	11,5	6,9
Escorrentía (L m ⁻²)	5,1	0,9	2,3	1,7	2,9	1,1
pH	5,1	5,2	5,3	5,1	5,3	5,3
Conductividad (μS cm ⁻¹)		80,4	72,2	88,1	67,5	81,5
Nitratos (mg L ⁻¹)	10,4	6,8	4,9	5,6	5,6	4,5
Fosfatos (mg L ⁻¹)	0,4	0,5	1,3	23,6	0,5	0,6
Calcio (mg L ⁻¹)		7,9	4,9	5,5	4,9	5,8
Magnesio (mg L ⁻¹)		1,6	2,4	3,7	1,8	2,7
Potasio (mg L ⁻¹)		5,8	5,0	4,8	4,5	6,1
Sodio (mg L ⁻¹)		1,6	1,5	1,7	1,4	2,1

Tabla 10. Correlaciones entre la producción de sedimentos y la escorrentía con el contenido de humedad del suelo, el porcentaje de carbono, el índice de estabilidad estructural (ISS), la granulometría y el porcentaje de cobertura vegetal y de suelo descubierto; (*) $p \leq 0,05$.

	Producción de sedimentos, R	Escorrentía, R
Humedad (%)	-0,103	-0,426
Carbono (%)	-0,258	-0,233
ISS	-0,138	-0,083
Arena (%)	0,582*	0,380
Limo (%)	-0,563*	-0,367
Arcilla (%)	-0,498	-0,146
Cobertura vegetal (%)	-0,070	-0,248
Suelo descubierto (%)	-0,004	0,248

rencias significativas ($F = 1,9$; $p \geq 0,05$) entre los mismos. Sin embargo, en la producción de sedimentos no se observa esta misma tendencia ya que en algunos de los tratamientos realizados la producción de sedimentos es incluso mayor que después de la quema, y tampoco se detectan diferencias ($F = 0,8$; $p \geq 0,05$) entre los tratamientos realizados.

La producción de sedimentos mostró una buena correlación con el contenido en arena del suelo (Tabla 9). Ésto podría explicar las diferencias observadas entre los tratamientos ensayados. El hecho de que tras la

quema los sedimentos encontrados no fueran tan elevados puede deberse a la capa de cenizas depositada tras la quema, las cuales pueden actuar como un estrato protector frente a la erosión, disminuyendo además el impacto de las gotas sobre el suelo (Cerdà, 1998). Así, Holcomb y Durgin (1979) señalan que parcelas tratadas con cenizas pueden reducir la erosión un 36% en comparación con las no tratadas.

El valor de pH en el agua de escorrentía oscila en torno a 5 en todos los casos analizados (Tabla 9), sin embargo los valores de conductividad varían en función de los tratamientos, encontrándose los más bajos en aquellos en que se introdujeron especies de matorral. En todos los casos estos valores indican que la cantidad de sales disueltas no es muy elevada pero todavía se pierden en cierta cantidad a pesar de los tratamientos ensayados y de la rápida regeneración natural, un 60% a los dos años de la quema (Marcos et al., 2000).

En cuanto a los nutrientes del agua de escorrentía cabe destacar la elevada concentración de nitratos encontrada tras la quema, casi dos veces superior a la detectada después. También la pérdida de nitratos es mayor en los tratamientos ensayados que en el control, aunque no se detectaron diferencias significativas ($F_{4,10} = 0,475$; $p \geq 0,05$). La concentración de fosfatos fue mayor en los tratamientos realizados que después de la quema, sobre todo en el tratamiento con herbáceas y roble. Esto es debido al lavado de las cenizas aún presentes en el suelo (Marcos, 1997). El fuego altera significativamente la forma y distribución de los nutrientes, siendo muy susceptibles de ser eliminados por lavado, sobre todo potasio y sodio. Al comparar el contenido de calcio y magnesio entre los tratamientos, se observa que no existen variaciones importantes entre ambos y las diferencias que se detectan probablemente sean debidas a la heterogeneidad del suelo. En cuanto a la concentración de potasio y sodio, las mayores pérdidas se encontraron en el control, presentando el resto de los tratamientos valores similares entre sí. En ningún caso se detectaron diferencias significativas en la concentración de nutrientes entre los tratamientos.

En general, tanto la escorrentía como la producción de sedimentos son bajas en estas formaciones de matorral. Por un lado, las características del suelo estudiado como altos conteni-

dos de materia orgánica y buena estabilidad de los agregados, la cual incluso mejora tras el incendio, tal y como encontraron Giovannini y Lucchesi (1983), disminuyen la erodibilidad del suelo. Por otro lado, la capacidad erosiva de la lluvia simulada fue bastante baja debido al tamaño de gota formado, que fue de 0,71 mm, valor menor que el encontrado por otros autores para la misma presión. Por otra parte, la energía cinética lograda fue el 50% de la que tiene la lluvia natural a la misma intensidad. Ello unido con la buena regeneración natural encontrada tras el fuego, hace que no sea necesario plantearse una revegetación tras el fuego en los matorrales de brezo existentes en la provincia de León, ya que no supone ninguna ventaja a la hora de disminuir las pérdidas de suelo y aumentar la retención de nutrientes.

Experimento 10. Cambios hidrológicos postincendio. Montes de Málaga

Una de los beneficios de la lluvia simulada para la investigación es la reproducción de eventos de lluvia idénticos en distintos periodos tras el incendio, entre zonas quemadas y no quemadas, y en distintas regiones. En Andalucía, a pesar de ser una región con incendios forestales recurrentes la aplicación de la lluvia simulada es aún escasa en zonas afectadas por incendios forestales. Se muestra a continuación un ejemplo del impacto de los incendios en la generación de escorrentía en los Montes de Málaga. La cuenca del arroyo Ancón, tributario del río Guadalhorce, presenta un sustrato geológico metamórfico de elevadas pendientes. Estos relieves están muy afectados por la acción incisiva de una densa red de drenaje la cual tiene que salvar un elevado desnivel altitudinal (generalmente >700 m) en apenas 10 km. De este modo, la erosión hídrica es el agente geomorfológico predominante. La cubierta natural de los Montes de Málaga es muy pobre a causa de una actividad agrícola secular (olivo, almendro, vid) la cual ha sido progresivamente abandonada de modo que hoy en día coexisten campos cultivados con otras ya abandonados y recolonizados por vegetación natural, en diferentes grados según las condiciones climáticas y el grado de degradación del suelo. La consecuencia son unas condiciones potenciales elevadas de erosión y degradación que pueden dirigir el sistema hacia la desertificación. Y en ese proceso los incendios tienen mucho que decir al afectar recurrentemente las zonas abandonadas.

La zona de estudio es un claro ejemplo de la evolución del ecosistema mediterráneo de las áreas cultivadas durante los últimos 50 años, que posteriormente fueron abandonadas y colonizadas por vegetación mediterránea de matorral. La vegetación del área corresponde a un alcornocal (*Quercus suber*) acompañado por un sotobosque de especies arbustivas mediterráneas en la asociación denominada *Smilaci mauritanicae-Querceto rotundifoliae quercetoso suberis*. No obstante, la vegetación dominante está compuesta sólo por especies de matorral mediterráneo fruto de la recuperación postincendio *Cistus monpeiliensis*, *Genita umbellata*, *Cistus albidus*, *Helichrysum retusum*, *Retama spaherocarpa*, *Ulex parviflorus*

En Julio de 2001 se produjo un incendio que arrasó cerca de 100 ha de matorral (Figura 16). Con objeto de determinar la evolución hidrológica y erosiva postincendio se realizaron simulaciones de lluvia transcurridos 3 meses y un año después del fuego, tanto en zonas incendiadas como control. Fueron 44 experimentos de 30 minutos de duración, y de las que 11 son control, 11 quemadas, 11 quemadas en los mismos sitios que las anteriores pero 1 hora después de la



Figura 16. Vista de la zona afectada por el incendio forestal en los Montes de Málaga.

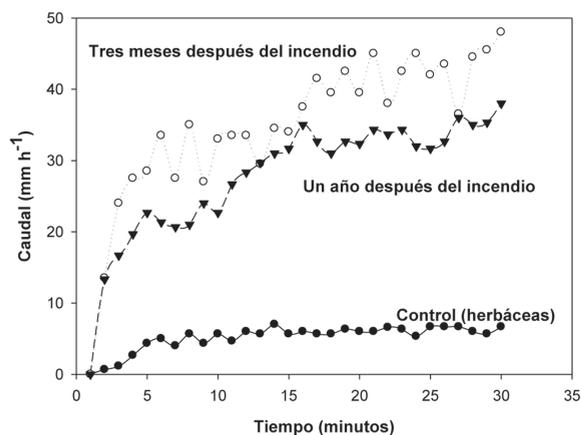


Figura 17. Caudal generado en los suelos control, tres meses y un año después del incendio en los montes de Málaga.

lluvia, por tanto con suelo húmedo, y 11 un año después. Cada 5 minutos se recogieron muestras de escorrentía para determinar la concentración de sedimentos.

La figura 17 presenta resultados de tres ejemplos de los experimentos realizados. Los resultados demuestran que las zonas no afectadas por los incendios forestales presentan tasas de escorrentía más bajas, mientras que a los tres meses se consiguen los caudales más elevados. Al año se inicia un descenso de la escorrentía fruto de la recuperación de la cubierta vegetal. La misma evolución presentó la pérdida de suelo, con un pico máximo en el otoño postincendio (tres meses) y una recuperación al año, fruto en parte del agotamiento de los materiales susceptibles de ser erosionados. Estos datos siguen que tras el incendio se produce un control del proceso de erosión por la capacidad de transporte y erosividad de la lluvia al haber mucho material disponible para ser erosionado. Tras un año, es la falta de sedimentos lo que hará que sea la capacidad erosiva de la lluvia la que determine la tasa de erosión.

Experimento 11. Respuesta hidrológica del suelo quemado con fuego prescrito

La quema prescrita es un instrumento de gestión forestal para reducir el riesgo de grandes incendios forestales. Sin embargo, sus efectos sobre el suelo todavía tienen que ser investigados en profundidad. Este experimento analiza los efectos de las quemas prescritas sobre la hidrofobicidad del suelo y la infiltración, y pretende entender mejor cómo las elevadas temperaturas del incendio, la presencia de una capa de hojarasca, el contenido de humedad, y la influencia de la textura afectan a la hidrología del suelo en zonas afectadas por incendios forestales.

Se realizaron quemas prescritas en cuatro parcelas diferentes situadas en el sur de Cataluña, por parte de los bomberos de la Generalitat, estas quemas registraron diferentes intensidades de

fuego. Antes y después de la quema se recogieron muestras para analizar la repelencia al agua con el test (WDPT). Se realizaron también tres simulaciones de lluvia antes de la quema y tres después de la quema en un área de 1 m², y se registró el contenido de humedad del suelo a cuatro profundidades diferentes con un TDR durante y después de las simulaciones (Figura 18). Las densidades de flujo de volumen y las velocidades de los frentes de humectación fueron calculados y comparados entre el antes y el después de la quema.

El desarrollo de la hidrofobicidad resultó estar relacionado con la intensidad del fuego y su duración y la textura del suelo (ver capítulo 2.4: Jordán et al., 2010). El alto porcentaje de arcilla en todas las parcelas y la corta duración de la entrada de calor durante la quema prescrita pueden haber impedido un desarrollo de la repelencia al agua demasiado severa. Aunque en la capa superficial (0 - 2,5 cm) sí hubo cambios en la hidrofobicidad del suelo (Figura 19), las muestras de suelo de la capa de entre 2,5-5 cm no mostraron ningún cambio en la repelencia al agua como consecuencia de las diferentes quemas prescritas.

La cantidad de materia orgánica en la superficie del suelo y su contenido de humedad también demostró ser importante para determinar la gravedad de la repelencia al agua. Una capa de hojarasca ligeramente húmeda puede tener un efecto aislante en el suelo mineral, si la intensidad del fuego y la duración no son muy altas. Una capa de hojarasca seca, por el contrario puede ser una fuente de calor adicional para el suelo mineral.

Los datos de humedad del suelo mostraron algunos cambios importantes ocurridos en el horizonte superior, mientras que en la mayoría de los casos, en los horizontes inferiores el contenido de humedad del suelo después de la quema llegó a los mismos valores que antes



Figura 18. A la derecha, vista del simulador goteador utilizado, y a la izquierda sondas TDR instaladas a distintas profundidades del suelo.

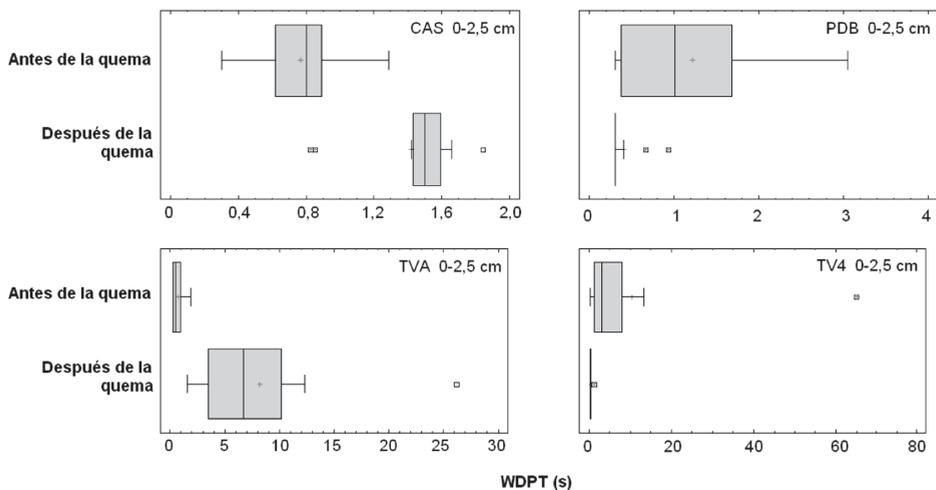


Figura 19. Análisis de hidrofobicidad con el test WDPT en cuatro de las parcelas quemadas con quema prescrita para una profundidad de 0 - 2,5 cm antes y después de las quemas.

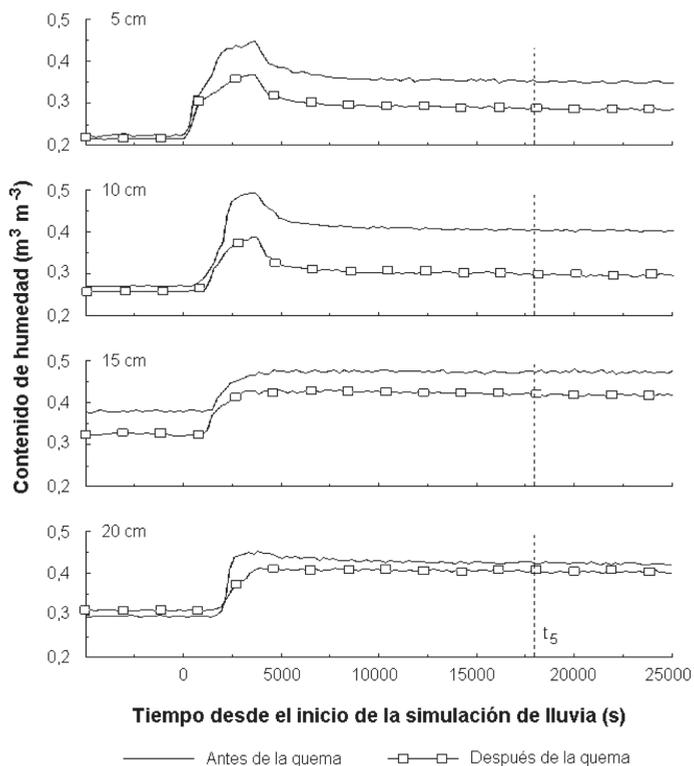


Figura 20. Humedad del suelo ($m^3 m^{-3}$) durante la primera de las simulaciones en una de las parcelas antes y después de la quema prescrita y a cuatro profundidades diferentes durante 5 horas de drenaje.

de quemar (Figura 20). La intensidad del fuego no alcanzó temperaturas lo suficientemente altas como para afectar a esta capa. Después de quemar, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo es más bajo que antes de quemar.

Las simulaciones de lluvia que se llevaron a cabo en las cuatro parcelas de quema prescrita no mostraron cambios significativos en la infiltración del agua y en la escorrentía como consecuencia del fuego. Sin embargo, una disminución en la capacidad de retención de agua de la capa superior del suelo se observó en todas las parcelas.

La infiltración rápida a través de macroporos, que especialmente puede jugar un papel importante en suelos arcillosos, y la alta variabilidad de la hidrofobicidad, que posiblemente lleve a la distribución diferencial del flujo de agua, permitiría que el agua se infiltre rápidamente en los horizontes más bajos del suelo después del fuego.

Experimento 12. Gestión postincendio y erosión en Aragón

La gestión de las zonas quemadas han sembrado muchas suspicacias por que en ocasiones se relacionan con el origen del fuego. Durante décadas se atribuyó a las empresas madereras la quema para realizar una extracción más económica. También hay suspicacias en el manejo postincendio porque en esas actuaciones no se tiene en cuenta el suelo, y pueden propiciar su degradación. Las investigaciones llevadas a cabo por Pérez Cabello et al. (2000; 2003) demuestran que las pérdidas de suelo en el postincendio están directamente relacionadas con el manejo. La combinación entre el fuego y las labores de saca y repoblación pueden desencadenar graves alteraciones en las propiedades físico-químicas de los suelo y con ello desencadenar elevadas pérdidas de suelo y agua. El estudio llevado a cabo en la Sierra de San Juan de Peña repitió lluvias de intensidad y duración similar en 38 parcelas (Tabla 11) demostró que las zonas afectadas por trochas y caminos de acceso, así como en las zonas replobladas de forma agresiva, se gene-

Tabla 11. Erosión bajo distintos tratamientos postincendio. Caminos, repoblaciones con alteración evidente (A), con escasa alteración (NA) y zona control. Te, tiempo de escorrentía, Ve, volúme de escorrentía, Er, erosión y Cs, Concentración de sedimentos.

Tratamientos	Caminos	Repoblación A	Repoblación NA	Control
Experimentos (n°)	8	9	9	12
Pendiente (°)	22	19	20	23
Grietas (%)	2	10	0	3
Genizas (%)	2	5	1	3
Piedras (%)	27	10	2	4
Costras (%)	8	13	0	6
Intensidad (mm h ⁻¹)	63	51	54	55
Te (min)	6	10	15	13
Ve (mm)	7	9	14	12
Er (g mm ⁻¹ h ⁻¹)	44	45	1	1
Escorrentía (%)	36	5	42	59
Cs (g L ⁻¹)	1,9	1,4	0,1	0,4



Figura 21. Vista de frentes de humedad que informan por su heterogeneidad de la presencia de zonas hidrofóbicas. En las superficies hidrofóbicas la escorrentía se infiltra en macroporos mediante flujos preferenciales que llevan el agua a mayor profundidad. Las fotografías se tomaron en 1995 en al dehesa de Extremadura. Estación experimental de Guadalupealón (Cerdà et al., 1998).

ran tasas de erosión elevadas, mientras que las zonas control on con repoblación con poca alteración del suelo la erosión es insignificante.

La elevada pérdida de suelo en las zonas afectadas por caminos y repoblaciones agresivas se producen por la presencia de altas concentraciones de sedimentos que sin duda son fruto del aumento de la erosionabilidad del suelo, Y ello a pesar de aumentar con capacidad de infiltración y reducir la escorrentía, especialmente en la zonas con repoblación agresiva (A). Esto se debe a que en los suelos menos alterados (repoblación NA y control) se debe mantener una respuesta hidrofóbica que si bien aumenta las escorrentías a escala de 1 m² impide la erosión.

Los trabajos de Pérez Cabello et al. (2000; 2003) demuestran mediante lluvia simulada que el mantenimiento o aumento de la hidrofobia de los suelos quemados ayuda a reducir la concentración de sedimentos en la escorrentía, su erosionabilidad y por la tanto la pérdida de suelo. La repelencia además condiciona la forma en la que se produce la infiltración de las aguas (Figura 21).

Las actuaciones agresivas con el suelo tras los incendios forestales rompen la estructura y las costras de los primeros milímetros del suelo y favorecen la erosión acelerada, que es especialmente grave en zonas de caminos, pistas forestales y trochas.

CONCLUSIONES

Se han revisado en este capítulo los métodos, técnicas y protocolos empleados en la cuantificación de la escorrentía, pérdida de suelo, infiltración, repelencia y humedad del suelo en zonas afectadas por incendios mediante técnicas basadas en el uso de la lluvia simulada, mostrando algunos ejemplos a seguir en el futuro por otras investigaciones. Las principales razones para el uso de la lluvia simulada en zonas quemadas se basan en que permite obtener resultados rápida e inmediatamente después del incendio. La lluvia simulada es una herramienta muy adecuada para comparar parcelas pareadas (control vs quemada), debido fundamentalmente a que permite reproducir eventos de lluvia idénticos en intensidad, magnitud, duración y tamaño de gota. Estas condiciones son las que permiten considerarla una herramienta fundamental para medir los cambios temporales y estacionales en la capacidad de infiltración, escorrentía o pérdida de

suelo. Si además se pretende desarrollar mediciones con lluvias intensas, con largos periodos de recurrencia, debemos entonces recurrir también a la lluvia simulada.

La lluvia simulada es por lo tanto una herramienta eficaz e imprescindible en los estudios hidrológicos y erosivos en las zonas quemadas, pero también debe ser vista como un complemento a otras mediciones como las parcelas cerradas o abiertas, o las cuencas de drenaje. Así se demuestra en los doce ejemplos aquí presentados, y en otros estudios desarrollados por investigadores de distintos países y formación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación del desarrollo de la Red Temática "Efectos de los incendios forestales sobre los suelos" (CGL2007-28764-E/BTE; CGL2008-01632-E/BTE y CGL2009-06861-E/BTE).

REFERENCIAS

- Adams, J.E., Kirkham, D. y Nielsen, D.R. 1957. A portable rainfall-simulator infiltrometer and physical measurements of soil in place. *Soil Science Society of America Proceedings*, 21, 473-477.
- Amerman, C.R., Hillel, D.I. y Peterson, A.E. 1970. A variable-intensity sprinkling infiltrometer. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 830-832.
- Anderson, J.U. Stewart, A.E. y Gregory, P.C. 1968. A portable rainfall simulator and runoff sampler. New Mexico State University Agricultural Experiment Station. Research Report 143. Las Cruces. 5 p.
- Asseline, J. y Valentin, C. 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, XV, 321-349.
- Auerswald, K. 1986. A Swanson-Type Rainfall Simulator for Erosion Studies. *Mitteilungen der Bodenkundlichen Gesellschaft*, 49, 224-225.
- Baeza, M. J., Raventós, J., Escarré, A. y Vallejo, V. R. 2006. Fire risk and vegetation structural dynamics in Mediterranean shrubland. *Plant Ecology*, 187, 189-201.
- Barnes, O.F. y Costel, G. 1957. A mobile infiltrometer. *Agronomy Journal*, 49, 105-107.
- Becher, H.H. 1990. Comparison of German and Swiss rainfall simulators- Relative srop energies and their distribution in time and space for simulated rains. *Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde*, 153, 409-14.
- Benito, E., de Blas, E., Santiago, J.L., Varela, M.E. 2001. Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 26, 211-219.
- Benito-Rueda, E., Gómez-Ulla, A. y Díaz-Fierros Viqueira, F. 1986. Descripción de un simulador de lluvia para estudios de erodibilidad del suelo y estabilidad de los agregados al agua. *Anales de Edafología y Agrobiología*, XLV, 1115-1126.
- Bertrand, A.R. y Parr, J.F. 1961. Design and operation of the Purdue sprinkling infiltrometer. *Purdue University Agricultural Experiment Station Research Bulletin* 723.
- Beutner, E.L., Gaebe, R.R. y Horton, R.E. 1940. Sprinkled-plot runoff and infiltration experiments on Arizona desert soils. *Transactions of the American Geophysical Union*, 21, 550-558.
- Blackburn, W.H., Meeuwing, R.O. y Skau, C.M. 1974. A mobile infiltrometer for use on rangeland. *Journal of Range Management*, 27, 322-323.

- Bork, H.-R. 1981. Oberflächenabfluss und infiltration. Ergebnisse von starkregensimulationene in der Süheide (ostniederdachsen) und in Süost- Spanien. Deutscher Geographentag, 43, 159-163.
- Bouyer-Bower, T.A.S. y Burt, T.P. 1989. Rainfall simulators for investigating soil response to rainfall. Soil Technology, 2, 1-16.
- Brakensiek, P.O., Rawls, W.J. y Hamon, W.R. 1979. Application of an infiltrometer system for describing infiltration into soils. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 22, 320-325.
- Bubbenzer, G.D. y Jones, B.A. 1971. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 14, 625-628.
- Bubbenzer, G.D. y Meyer, L.D. 1965. Simulation of rainfall and soils for laboratory research. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 8, 73-75.
- Bubbenzer, G.D., Molnau, M. y McCool, D.K. 1979. Palouse rainfall simulator. Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop 1978. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals, ARS-W-10/july 1979. Tucson, AZ. Pp.: 131-133.
- Calvo, A., Gisbert, B., Palau, E. y Romero, M. 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En: M. Sala y F. Gallart (Eds.), Métodos y técnicas para la medición de procesos geomorfológicos. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía, 1, 6-15.
- Carter, C.E. Greer, J.D. y Floyd, J.M. 1974. Raindrop Characteristics in South Central United States. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 17, 1033-1037.
- Cerdà, A. 1995. Soil moisture regime under simulated rainfall in a three years abandonedfield in Southeast Spain. Physics and Chemistry of the Earth, 20, 271-279.
- Cerdà, A. 1998. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. Catena, 32, 73-86.
- Cerdà, A. 1999. Simuladores de lluvia y su aplicación a la geomorfología. Estado de la cuestión. Cuadernos de Investigación Geográfica 25:45-84.
- Cerdà, A. y Doerr, S.H. 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. Catena, 74, 256-263.
- Cerdà, A., Ibáñez, S. y Calvo, A. 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. Soil Technology, 11, 161-168.
- Cerdà, A., Schnabel, S., Gómez-Amelia, D. y Ceballos, A. 1998. Soil hydrological Response under simulated rainfall in the Dehesa ecosystem, Extremadura, SW, Spain. Earth Surface Processes and Landforms, 23, 195- 209.
- Chow, V.T. y Yen, B.C. 1974. A laboratory watershed experimentation system. Hydr. Engr. Series nº 27, Civil Engineering Department, University of Illinois, 196 p.
- Chow, W.T. y Harbaugh, T.E. 1965. Raindrop production for laboratory watershed experimentation. Journal of Geophysical Research, 70, 6111-6119.
- Christiansen, J.E. 1941. The uniformity of application of water by sprinkler system. Agricultural Engineering, 22, 89-92.
- Dortignac, E.J. 1951. Desing and operation of Rocky Mountain Infiltrometer. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Paper 5. Fort Collins, CO. 68 p.
- Ellison, W.D. 1947. Soil erosion studies. II. Soil detachment hazard by raindrop impact. Agricultural Engineering, 28, 197-201.
- Epema, G.F. y Riezebos, H.Th. 1983. Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. En: J. De Ploey (Ed.), Rainfall simulation, runoff and soil erosion, Catena supplement, 4, 1-17.
- Essery, C.I., Wilcock, D.N. y Mcclean, W. 1987. A computer-based datalogging system used to investigate the infiltration process under natural rainfall conditions. Hydrological Processes, 1, 283-292.

- Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O. y Nachtergaele, F. 2001. Lecture notes on the major soils of the world. FAO. Roma.
- Foster, G.R., Eppert, F.P. y Meyer, L.D. 1979. A programmable rainfall simulator for field plots. Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop 1978. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals, ARS-W-10/july 1979. Tucson, AZ. Pp.: 45-63.
- Foster, G.R., Neibling, W.H. y Natterman, R.A. 1982. A programmable rainfall simulator. ASAE paper nº 82-2570.
- Giovannini, G. y Lucchesi, S. 1983. Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates. *Soil Science*, 136: 231-236.
- Giovannini, G. y Lucchesi, S. 1993. Effects of fire on soil physico-chemical characteristics and erosion dynamics. En: L. Trabaud, y R. Prodon (Eds.), *Fire in Mediterranean Ecosystems*. ECSC-EEC-EAEC. Bruselas. Pp: 403-412.
- Gunn, R. y Kinzer, G.R. 1949. Terminal velocity of water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 6, 243-248.
- Hino, M., Fujita, K. y Shutto, H. 1987. A laboratory experiment on the role of grass for infiltration and runoff processes. *Journal of Hydrology*, 90, 303-325.
- Hino, M., Odaka, Y., Nadaoka, K. y Sato, A. 1988. Effect of initial soil moisture content on the vertical infiltration process-a guide to the problem of runoff-ratio and loss. *Journal of Hydrology*, 102, 267-284.
- Hirschi, M.C., Barnhisel, R.I., Ruetten, M., Leopold, M. y Williams, R.G. 1981. Portable rainfall simulator for erosion studies. ASAE paper 80-2058.
- Hirschi, M.C., Mitchell, J.K., Freezor, D.R. y Lesikar, B.J. 1990. Microcomputer-Controlled Laboratory Rainfall Simulator. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33 (6) 1950-1953.
- Hodges, W.K. y Bryan, R.B. 1982. The influence of material behaviour on runoff initiation in the Dinosaur Badlands, Canada. En: R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books. Norwich. Pp.: 13-46
- Holcomb, G.J. y Durgin, P.B. 1979. Ash leachate can reduce surface erosion. Research Note PSW-342. United States Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Berkeley, CA.
- Holtan, H.N. 1961. A concept of infiltration estimates in watershed engineering. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-41-51. 25 p.
- Holtan, H.N. y Kirkpatrick, M.H. 1950. Rainfall infiltration and hydraulics of flow in runoff computations. *Transactions of the American Geophysical Union*, 31, 771-779.
- Holland, M.E. 1969. Design and testing of a rainfall system. Colorado State University Experiment Station. CER 69-70 MEH 21. Fort Collins, CO.
- Horton, R.E. 1939. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Transactions of the American Geophysical Union*, 693-711.
- Hudson, N. 1963. Raindrop characteristics in south central United States. *Rhodesian Journal of Agricultural Research*, 1, 6-11.
- Imeson, A.C. 1977. A simple field-portable rainfall simulator for difficult terrain. *Earth Surface Processes*, 2, 431-436.
- Imeson, A.C., Kwaad, F.J.P.M. y Verstraten, J.M. 1982. The relationship of soil physical and chemical properties to the development of badlands in Morocco. En: R.B. Bryan y A. Yair (Eds.), En: R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books. Norwich. Pp.: 47-70.
- Izzard, C.F. 1944. The surface profile of overland flow. *Transactions of the American Geophysical Union. Papers Hydrology*, 693-711.
- Jones, D.M.A. 1959. The shape of raindrops. *Illinois State Water Survey*, nº. 77.

- Jordán, A., Martínez-Zavala, L. y Bellinfante, N. 2008. Heterogeneity in soil hydrological response from different land cover types in southern Spain. *Catena*, 74, 137-143.
- Kamphorst, A. 1987. A small rainfall simulator for determination of soil erodibility. *Netherlands Journal of Agricultural Soil Science*, 35, 407-415.
- Kazó, B. 1966. A talajok vizgazdálkodási tulajdonságainak meghatározása mesterséges esőzetező Készülékkel. *Agrokémia és talajtan*, 15, 239-252.
- Kleijn, W.B., Oster, J.D. y Cook, N. 1979. A rainfall simulator with nonrepetitious movement of drop outlets. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 93-99.
- Lane, L.J. 1986. Erosion on rangelands: emerging technology and data base. *Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop 1985*. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals, ARS-W-10/july 1979. Tucson, AZ.
- Laws, J.O. 1941. Measurement of the fall-velocity of water drops and rain drops. *Transactions of the American Geophysical Union*, 22, 709-721.
- Laws J.O. y Parsons, D.A. 1943. The relationship of raindrop size to intensity. *Transactions of the American Geophysical Union*, 24, 452-460.
- Leathan, P. y Riesbol, H.S. 1950. Infiltration and retention test as related to spillway design floods. *Transactions of the American Geophysical Union*, 31, 234-242.
- Llovet, J. 2005. Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Alicante.
- Llovet, J., Bautista, S. y Cerdà, A. 1994. Influencia de las lluvias otoñales sobre la respuesta hidrológica y erosiva post incendio de los suelos en ambiente semiárido. En: J. Arnáez, J.M. García y A. Gómez (Eds.), *Geomorfología en España (Tomo II)*. Sociedad Española de Geomorfología. Logroño. Pp.: 81-92.
- Llovet, J., Josa, R. y Vallejo, V. R. 2008. Thermal shock and rain effects on soil surface characteristics. A laboratory approach. *Catena*, 74, 227-234.
- Low, A.J. 1954. The study of soil structure in the field and the laboratory. *Journal of Soil Science*, 5, 1-57.
- Luk, S.H. 1985. Effect of antecedent soil moisture content on rainwash erosion. *Catena*, 12, 129-139.
- Luk, S.H., Abrahams, A.D. y Parsons, A.J. 1986. A simple rainfall simulator and trickle system for hydrogeomorphological experiments. *Physical Geography*, 7, 344-356.
- Lusby, G.C. 1977. Determination of runoff and sediment by rainfall simulation. En: T.J. Toy (Ed.), *Erosion: research techniques, erodibility and, sediment yield*. Geobooks Ltd. Norwich. Pp.: 19-39.
- Marcos, E. 1997. Procesos edáficos en comunidades vegetales alteradas por el fuego. Tesis Doctoral. Universidad de León. León.
- Marcos, E., Luis, E. y Tárrega, R. 1998. Chemical soil changes in shrubland after experimental fire. En: L. Trabaud (Ed.), *Fire Management and Landscape Ecology*. International Association of Wildland Fire. Washington. Pp.: 3-11.
- Marcos, E., Tárrega, R. y Luis, E. 2000. Comparative analysis of runoff and sediment yield with a rainfall simulator after experimental fire. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14, 293-307.
- Martínez-Zavala, L. y Jordán, A. 2008. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in West Andalusia, Spain. *Soil Use and Management*, 24, 108, 117.
- Marien, J.L. y Vandewiele, G.L. 1986. A point rainfall generator with internal storm structure. *Water Resources Research*, 22, 475-482.
- Marston, D. 1982. A rainfall simulator for field determination of relative erosion potentials. *Journal of the Soil Conservation Service of New South Wales*, 38, 31-39.
- Martínez, M., Lane, L.J. y Fogel, M.M. 1979. Experimental investigation of soil detachment by raindrop impact. *Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop 1978*. United States Department of Agricul-

- ture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals, ARS-W-10/july 1979. Tucson, AZ. Pp.: 153-155.
- McCalla, T.M. 1944. Water drop method of determining stability of soil structure. *Soil Science*, 58, 117-121
- McQueen, I.S. 1963. Development of a hand portable rainfall-simulator infiltrometer. United States Geological Survey Circular 482.
- Meewing, R.O. 1969. Infiltration and soil erosion as influences by vegetation and soil in northern Utah. *Journal of Range Management*, 23, 185-188.
- Meyer, L.D. 1960. Use of the rainulator for runoff plot research. *Soil Science Society of America Proceedings*, 24, 319-22.
- Meyer, L.D. 1979a. Current rainfall simulators and research activities. Proceedings of Rainfall Simulator Workshop. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals ARM-W-10. Tucson, AZ. Pp.: 156-157.
- Meyer, L.D. 1979b. Methods for attaining desired rainfall characteristics in rainfall simulators. Proceedings of Rainfall Simulator Workshop. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals ARM-W-10. Tucson, AZ. Pp.: 35-45.
- Meyer, L.D. 1994. Rainfall simulators for soil erosion research. En: R. Lal (Ed.), *Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press. Ankeny, Iowa
- Meyer, L.D. y Harmon, W.C. 1979. Rainfall simulator for evaluating erosion rates and sediment sizes for row sideslopes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 22, 100-103.
- Meyer, L.D. y McCune, D.L. 1958. Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural Engineering*, 39, 644-648.
- Miller, W.P. 1987. A Solenoid-operated variable intensity rainfall simulator. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 832-834.
- Moore, D.C. y Singer, M.J. 1990. Crust formation effects on soil erosion processes. *Soil Science Society of American Journal*, 54, 1117-1123.
- Moore, I.D., Hirschi, M.C. y Barfield, B.J. 1983. Kentucky rainfall simulator. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 26, 1085-1089.
- Morin, J., Goldberg, D. y Seginer I. 1967. A rainfall simulator with rotating disk. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 10, 74-79.
- Munn, J.R. y Huntington, G.L. 1967. A portable simulator for erodibility and infiltration measurements on ruggedze characteristics of sediment from agricultural soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, 107-111.
- Mutchler, C.K. y Hersmeier, L.F. 1965. A review of rainfall simulators. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 6, 220-222.
- Navas, A., Alberto, F., Machin, J. y Galan, J. 1990. Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology*, 3, 385-397.
- Neal, J.H. 1938. The effect of the degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion. University of Missouri Agricultural Experiment Station Research Bulletin 280.
- Neibling, W.H., Foster, G.R., Natterman, R.A., Nowlin, J.D. y Holbert, P.V. 1981. Laboratory and field testing of a programmable plot-sized rainfall simulator. Erosion and sediment transport measurement. International Association of Hydrological Sciences Publication, 133, 405-414.
- Nichols, M.L. y Sexton, H.D. 1932. A method of studing soil erosion. *Agricultural Engineering*, 13, 101-103.
- Parker, P.E. 1957. Intermountain infiltrometer. USDA Forest Service, Ogden, Utah., Intermont. Forest and Range Experiment Station, Misc. Publ.
- Pelegrín, F., Camps, M., Moreno, F. y López, J. 1989. Estudio crítico del control de la intensidad de lluvia en un simulador para el cálculo de la infiltración de agua en el suelo. *Asociación Nacional de Ingenieros Agrónomos*, 24 Feria Técnica Internacional de la Maquinaria Agrícola. Zaragoza. Pp.:135-141.

- Pereira, H.C. 1956. Structure in tropical soils. *Journal of Soil Science*, 7, 68-74.
- Pérez-Cabello, F., Cáncer, L., de la Riva, J., Echeverría, M.T. e Ibarra, P. 2000. El papel de la vegetación quemada y del proceso de regeneración vegetal en relación con la pérdida de suelo. El caso del incendio de Agüero (Prepirinio oscense, España). *Il suelo*, 3, 24-30.
- Pérez Cabello, F., Sánchez de Mena, M^a.J., Echeverría, M^a.T. e Ibarra, P. 2003. Comportamiento hidrogeomorfológico de un bosque quemado y sometido a labores de repoblación. El incendio de San Juan de la Peña (Huesca, España). En Marzloff, M., Ries, J., de la Riva, J. y Seeger, M. (Eds.) *El cambio en los usos del suelo y la degradación del territorio en España*, pp. 85-97.
- Peterson, A.E. y Bubenzer, G.D. 1984. Intake rate - sprinkler infiltrometer. En: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America Book Series Number 5, American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Pinaya, I. y Díaz-Fierros, F. 1996. Influencia de varias mezclas de pratenses sobre la protección de suelos quemados a la erosión hídrica. *Abstract of First European Conference on Erosion Control*. Sitges. Pp.: 29-31.
- Poesen, J. 1984. The influence of slope angle on infiltration rate and hortonian overland flow volume. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Supplement Band*, 49, 117-131.
- Ponce, S.L. 1975. Examination of a nonpoint source loading function for the Mancos Shale wildlands of the Price River Basin, Utah. Tesis Doctoral. Department of Civil and Environmental Engineering. Utah State University. Logan, UT
- Ponce, S.L. y Hawkins, R.H. 1978. Salt pickup by overland flow in the Price River Basin, Utah. *Water Resources Bulletin*, 14, 1187-1200.
- Rai, K.D., Raney, W. A. y Vanderford, H. B. 1954. Some physical factors that influence soil erosion and the influence of aggregate size and stability on growth of tomatoes. *Soil Science Society of America Proceedings*, 19, 221-232.
- Rose, G.W. 1960. Soil detachment caused by rainfall. *Soil Science*, 89, 28-35.
- Roth, C.H. y Helming, K. 1992. Dynamics of surface sealing, runoff formation and interrill soil loss as related to rainfall intensity, microrelief and slope. *Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde*, 155, 209-216.
- Rowe, P.B. 1940. The construction, operation and use of the North Fork Infiltrometer. United States Department of Agriculture Flood Control Co-ordinating Committee Misc. Publ., 1. California Forest Range Experiment Station. Berkeley, CA.
- Sala, M., Soler, M. y Pradas, M. 1994. Temporal and spatial variations in runoff and erosion in burnt soils. *Abstracts of 2nd International Conference on Forest Fire Research*. Coimbra, Portugal. Pp.: 1123-1134.
- Sanroque, P., Rubio, J.L. y Sánchez, J. 1984. Simulador de lluvia para el estudio de la erosionabilidad del suelo en laboratorio. I Congreso Español de Geología, Colegio Oficial de Geólogos. Madrid. Vol. I, 783-794.
- Scoging, H. 1982. Spatial variations in infiltration runoff and erosion on hillslopes in semi-arid Spain. En: R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books. Norwich. Pp.: 89-112.
- Simanton, J.R., Johnson, C.W., Nyhan, J.W. y Romney, E.M. 1986. Rainfall Simulation on Rangeland Erosion Plots. En: L.J. Lane (Ed.). *Erosion on rangelands: emerging technology and data base*. Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop 1985. United States Department of Agriculture, Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals, ARS-W-10/july 1979. Tucson, AZ. Pp.: 11-17.
- Smith, D.D. y Wischmeier, W.H. 1962. Rainfall erosion. *Advances in agronomy*, 14, 109-148.
- Spilhaus, A. F. 1948. Drop size, intensity, and radar echo of rain. *Journal of meteorology*, 5, 161-164.
- Swanson, N.P. 1965. Rotating boom rainfall simulator. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 8, 71-72.

- Tossell, R.W., Dickinson, W.T., Rudra, R.P. y Wall, G.J. 1987. A portable rainfall simulator. *Canadian Agricultural Engineering*, 29, 155-162.
- Vallejo, R. 1997. La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana. CEAM. Valencia.
- Viegas, D. 1997. General features of forest fires. En: P. Balabanis, G. Eftichidis y R. Fantechi (Eds.), *Forest fire risk and management. Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards Course*. Report EUR 16719 EN. Bruselas. Pp.:5-13.
- Walker, P.H., Hutka, J., Moss, A.J. y Kinel, P.I.A. 1977. Use of a versatile system for soil erosion studied. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 609-612.
- Wilcox, B.P., Wood, M.K., Tromble, J.T. y Ward, T.J. 1986. A hand-portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *Journal of Range Management*, 39, 331-335.
- Wilm, H.G., 1943. The application and measurement of artificial rainfall on types FA and F infiltrometers. *Transactions of the American Geophysical Union*, 3, 480-484 .
- Wilson, B.N. y Rice, C.T. 1987. Large-Scale Laboratory Apparatus for Erosion Studies. ASAE Paper.
- Wilson, B.N. y Rice, C.T. 1990. An indoor soil erosion research facility. *Journal of Soil and Water Conservation*, 45, 645-648.
- Wischmeier, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal loss equation. *Soil Science Society of America Proceedings*, 23, 246-249.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion losses. United States Department of Agriculture, *Agriculture Handbook* 537.
- Wright, J.S. 1991. An assessment of the potential of vertical mulching for soil erosion control. MSc thesis. Silsoe College. Silsoe.
- Zavala, L.M., Jordán, A., Gil, J., Bellinfante, N. y Pain, C. 2009. Intact ash and charred litter reduces susceptibility to rain splash erosion post-wildfire. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1522-1532.

