

EROSIÓN Y ESCORRENTÍA EN RESPUESTA A LLUVIAS SIMULADAS E INCENDIOS EN BOSQUES SECOS DE MONTAÑA

ANDRÉS TÁLAMO^{1*}; RAMIRO BERMUDEZ²; LUCAS GARIBALDI³⁻⁴ & ANA CHAVEZ⁵

Recibido: 25-05-15

Recibido con revisiones: 24-09-15

Aceptado: 26-09-15

RESUMEN

Los incendios forestales podrían aumentar la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica, afectando importantes servicios ambientales. Esto cobra especial interés en paisajes de montaña cercanos a centros urbanos. Por lo tanto, estudiamos cómo varía la tasa de escorrentía y de erosión de suelos en respuesta a la ocurrencia de incendios forestales, a la intensidad de lluvia simulada, a la pendiente y a la humedad del suelo en una serranía de bosques subtropicales estacionales ubicados al este de la ciudad de Salta, Argentina. La tasa de escorrentía aumentó con la intensidad de lluvia simulada, la pendiente y la humedad del suelo, no así con la ocurrencia de incendios. En cambio, la erosión aumentó fuertemente con la ocurrencia de incendios, especialmente a mayor intensidad de lluvia simulada. En particular, la pérdida de suelos fue 21 veces mayor en laderas quemadas (con menor cobertura vegetal) en comparación a las no quemadas (con mayor cobertura vegetal) bajo intensas lluvias. Nuestros resultados aportan evidencia empírica sobre la importancia de las altas intensidades de lluvia en combinación con los incendios forestales.

Palabras clave. Incendios forestales, intensidad de lluvia, procesos hidrológicos, bosques serranos subtropicales.

SOIL EROSION AND RUNOFF IN RESPONSE TO SIMULATED RAINFALL AND WILDFIRES IN DRY MOUNTAIN FORESTS

ABSTRACT

Wildfires could enhance soil susceptibility to water erosion, affecting important environmental services, especially in mountain landscapes near urban centers. For this reason, we study runoff and soil erosion in response to occurrence of wildfires, intensity of simulated rain, slope and soil moisture, in a mountain landscape covered by subtropical dry forest, in the east of Salta city, NW Argentina. Runoff rate is increased with the intensity of simulated rain, slope and soil moisture, but not with the occurrence of wildfire. However, soil erosion increased strongly with the occurrence of wildfires, especially at greater intensities of simulated rain. Soil loss in burned sites was 21 times higher compared with unburned ones, under heavy simulated rain. Our results provide empirical evidence about soil erosion risks when high intensity rains occur in recently burned hillsides with low vegetation cover.

Key words. Dry mountain forests, hydrological processes, rain intensities, wildfire.

1 Instituto de Bio y Geociencias del NOA - Universidad Nacional de Salta - CONICET

2 Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Argentina.

3 Grupo de Investigación en Agroecología (AGRECO), Sede Andina, Universidad Nacional de Río Negro (UNRN).

4 CONICET.

5 Cátedra de Manejo y Conservación del Suelo y Topografía, Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Argentina.

*Autor de contacto: andrestalamo@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El fuego puede modificar no solo la estructura y composición de muchos ecosistemas tropicales y subtropicales, sino también su funcionamiento (Bond & Wilgen, 1996). Un aspecto importante del fuego y relativamente poco estudiado en ecosistemas boscosos de montaña, es su posible influencia sobre los procesos hidrológicos del suelo (infiltración, escorrentía, erosión del suelo) (Moody *et al.*, 2013). En épocas y bosques en donde los incendios forestales son frecuentes, cobra especial importancia comprender las posibles respuestas hidrológicas del suelo luego de la ocurrencia de incendios forestales, ya que podrían verse afectados algunos servicios ambientales (Cawson *et al.*, 2012).

El efecto del fuego sobre los procesos hidrológicos puede depender de la combinación del fuego con varios factores. Por un lado, las condiciones climáticas, principalmente las lluvias, serían un factor determinante de los efectos post-incendios (Moody *et al.*, 2013). Un fuego con una severidad constante puede generar diferentes magnitudes de escorrentía y erosión dependiendo de la intensidad de las lluvias (Cawson *et al.*, 2012). Por otro lado, las características del terreno, como la pendiente, la cobertura de vegetación, hojarasca y cenizas, el tipo de suelo (Sensoy & Kara, 2013) y el régimen de fuego (Cawson *et al.*, 2012; Cawson *et al.*, 2013; Moody *et al.*, 2013) también son factores a considerar. Sorpresivamente, no conocemos estudios que hayan abordado simultáneamente la intensidad de las lluvias, la pendiente del terreno, la humedad del suelo pre-lluvia y la cobertura del suelo post-incendio. Comprender la relación entre los incendios forestales y los factores mencionados, sería fundamental para evaluar la magnitud de los riesgos asociados a la pérdida de cobertura vegetal por incendios forestales.

La relación fuego-procesos hidrológicos del suelo ha sido estudiada en diferentes bosques secos del mundo (Cheney *et al.*, 2012; McCaw *et al.*, 2012; Zumbunnen *et al.*, 2012; Ehrensperger *et al.*, 2013; Kodandapani, 2013), sin embargo, los bosques secos de montaña en Latinoamérica han recibido escasa o nula atención. Los bosques secos ubicados en serranías del noroeste de la Argentina, han sufrido en los últimos años incendios forestales frecuentes que afectaron la cobertura vegetal de las laderas (SADS 2014). Surge la inquietud de conocer si los efectos del fuego dependerán de la intensidad de las lluvias y de otros factores como la pendiente del terreno, la humedad del suelo y su cobertura post-incendio. En este estudio,

planteamos la hipótesis de que los incendios forestales, al dejar desprotegidas las laderas, afectarán los procesos hidrológicos del suelo. Esperamos encontrar un aumento de la escorrentía y la erosión en combinación con diferentes intensidades de lluvia, evidenciándose efectos interactivos entre ambos factores: mayor efecto a intensidades elevadas de lluvia en laderas quemadas (Cawson *et al.*, 2012). Además, los procesos hidrológicos podrán ser más afectados en sectores con pendientes pronunciadas, con suelos saturados de humedad antes de las lluvias y con baja cobertura del suelo. Para poner a prueba estas predicciones, realizamos un experimento de campo con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes intensidades de lluvia, del estado de laderas (quemadas naturalmente y no quemadas), de la pendiente, de la humedad del suelo y de la cobertura del suelo sobre la escorrentía y erosión de suelo, en laderas de bosques secos de montaña ubicados en la provincia de Salta, noroeste de la Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Salta (departamento Capital), sobre las laderas de la Serranía de Mojotoro con exposición al Valle de Lerma. Se emplaza en una superficie aproximadamente de 760 hectáreas distribuidas en una faja de laderas de exposición oeste, entre los extremos 24° 41' 16,8" y los 24° 48' 32,4" S. El 7,5% (57 hectáreas) del área de estudio corresponde a zonas afectadas por incendios ocurridos en los meses de invierno del 2012. La formación vegetal corresponde a un Bosque Seco Subtropical cuyo estrato arbóreo está formado por *Anadenanthera colubrina*, *Tipuana tipu*, *Handroanthus impetiginosus*, *Schinus areira*, *Ceiba chodatii*, *Trichocereus terscheckii*, entre otros. Entre las plantas herbáceas predominan *Paspalum commune*, *Setaria parviflora*, *Nassella neesiana*, entre otras (Novara, 1985). El clima es Subtropical Serrano con estación seca. La temperatura media es de 21 °C en enero y de 11 °C en julio. La precipitación media anual es de 600-800 mm, con veranos lluviosos e inviernos secos (Bianchi & Yáñez, 1992). El suelo es Hapludol fluvéntico, de textura franca, con bloques subangulares medios a finos y presencia de raíces (Castrillo *et al.*, 2009).

Diseño experimental

El experimento se realizó durante noviembre de 2012, antes de la ocurrencia de las lluvias de verano. Los factores evaluados fueron el *Estado de la ladera* (quemada y no quemada) y la *Intensidad de lluvia simulada* (75, 110 y 145 mm h⁻¹). Las intensidades utilizadas se corresponden a eventos de lluvia de

baja, media y alta intensidad para el área de estudio, respectivamente (Bianchi & Yáñez, 1992). Mediante un Diseño en Bloques Completos al Azar con parcelas divididas, seleccionamos 6 sectores (bloques) en diferentes laderas de la Serranía San Bernardo - Mojotero, cada bloque abarcando una porción quemada y otra no quemada (parcelas mayores). Dentro de cada parcela mayor, se aplicaron los 3 niveles del factor Intensidad de lluvia simulada en una subparcela de 32,5 cm x 32,5 cm. Paralelamente, en cada subparcela registramos otras variables cuantitativas para ser incluidas en el modelo como co-variables (pendiente, humedad del suelo pre-simulación y cobertura del suelo pre-simulación). Las variables de respuesta fueron la tasa de escorrentía (% de agua recolectada del total de agua adicionado) y la erosión del suelo (g de sedimentos ha⁻¹ evento de 20 minutos⁻¹).

Simulación de lluvias

Los simuladores de lluvia son equipos diseñados con la finalidad de aplicar agua en forma similar a la lluvia natural y bajo condiciones controladas. En este trabajo utilizamos un simulador siguiendo los modelos propuestos por Rostagno & Garayzar (1995) y Cobo Quintero & Amézquita Collazos (1999). Para obtener los niveles de intensidad de lluvia experimentados (75, 110 y 145 mm h⁻¹) realizamos la simulación de lluvia con volúmenes de 2636,74, 3867,20 y 5097,67 cm³ por eventos de 20 minutos de duración. La simulación se realizó sobre una parcela delimitada por un marco metálico de 10 cm de alto, instalada en el suelo en el sentido de la pendiente. La parcela en su parte baja presenta un pequeño canal que recibe el agua no infiltrada en el suelo que es recuperada por gravedad y constituye el escurrimiento superficial (Rostagno & Garayzar, 1995). Para determinar la masa del material removido por las lluvias simuladas fue necesario primero evaporar el agua de los escurrimientos superficiales recogidos para separar la fase sólida de la líquida. Los materiales resultantes fueron pesados en una balanza electrónica en laboratorio.

Análisis de datos

Estimamos dos modelos lineales generales de efectos mixtos, uno con escorrentía y otro con erosión del suelo como

variable dependiente, para evaluar el efecto fijo de la intensidad de lluvia simulada (variable categórica con tres niveles: 75, 110 y 145 mm h⁻¹), del estado de la ladera (variable categórica con dos niveles: quemadas naturalmente y no quemadas) y de la interacción entre la intensidad de lluvia y el estado de la ladera. Los modelos también incluyeron como variables predictoras cuantitativas a la pendiente y a la humedad del suelo previo a las simulaciones. Ambos modelos consideraron al bloque como factor aleatorio y tuvieron en cuenta la estructura anidada de los factores (Bloque < Ladera < Intensidad). Las variables analizadas cumplieron con los supuestos de distribución normal y de homogeneidad de varianzas. La inferencia estadística fue realizada a partir de análisis de la varianza (ANOVA). Todos los análisis fueron realizados en el ambiente de programación R (R Development Core Team, 2012), con el paquete nlme (Pinheiro *et al.*, 2012). Las laderas quemadas presentaron menor cobertura del suelo que las laderas no quemadas (Tabla 1), por lo que las diferencias entre laderas quemadas y no quemadas podrían reflejar un efecto mediado a través de cambios en la cobertura del suelo, entre otros aspectos. Debido a la alta variabilidad que caracteriza a los estudios de campo y a que consideramos que sería mucho más riesgoso cometer un error de tipo II (concluir que no existen efectos cuando en realidad sí existen) que cometer un error de tipo I, trabajamos con un nivel de significación del 10%.

RESULTADOS

Descripción general de laderas quemadas y no quemadas

Las laderas no quemadas tuvieron el suelo cubierto casi en su totalidad por una capa (5-7 cm) de hojarasca y ramas de pequeño calibre de *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze y *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan. Por el contrario, las laderas quemadas tuvieron un suelo prácticamente desnudo presentando una capa de cenizas de 0,5 a 1,5 cm de espesor (Tabla 1).

La tasa de escorrentía promedio para todas las laderas quemadas fue de 14,23% ± 2,43 (media ± EE; n=18), y

Tabla 1. Descripción de las laderas quemadas y no quemadas en cuanto a su pendiente (%), humedad del suelo (%) y cobertura vegetal del suelo (%). E.E.: error estándar de la media muestral.

Table 1. Slope (%), soil moisture (%) and ground cover (%) in burned and unburned hillsides. E.E.: standard error of the mean.

	Laderas quemadas (n=6)		Laderas no quemadas (n=6)	
	$\bar{x} \pm E.E.$	Rango	$\bar{x} \pm E.E.$	Rango
Pendiente (%)	26,22 ± 4,72	9 - 68	32,17 ± 3,83	7 - 48
Humedad (%)	0,18 ± 0,05	0,07 - 0,38	0,19 ± 0,03	0,07 - 0,29
Cobertura (%)	1,08 ± 0,82	0 - 5	99,17 ± 0,83	95 - 100

para las laderas no quemadas fue de $16,70\% \pm 2,61$. Por otro lado, la erosión promedio en 20 minutos de simulación fue de $54,35 \text{ g m}^{-2} (\pm 12,84; n=18)$ en las laderas quemadas, y de $6,90 \text{ g m}^{-2} (\pm 3,01; n=18)$ en las laderas no quemadas.

Efecto de factores y covariables

No encontramos evidencias para afirmar que la tasa de escorrentía dependa del estado de la ladera, pero sí observamos una mayor tasa de escorrentía a mayor intensidad de lluvia simulada, independientemente del estado de la ladera (interacción no significativa) (Tabla 2; Fig. 1a). Además, la escorrentía se relacionó positivamente con la

pendiente y con la humedad del suelo pre-simulación (Tabla 2; Fig. 2).

La erosión dependió significativamente del estado de la ladera en interacción con la intensidad de lluvia (Tabla 2), perdiéndose una mayor cantidad de suelo cuando se simuló la lluvia con mayor intensidad. A intensidades de lluvia simulada de 75 mm y 110 mm, se perdió respectivamente 3 y 5 veces más suelo en laderas quemadas en comparación a las no quemadas, mientras que con una intensidad de 145 mm, en las laderas quemadas se perdió 21 veces más suelo (Fig. 1b). No detectamos evidencias de relación lineal entre la erosión con la pendiente ni con la humedad del suelo pre-simulación (Tabla 2; Fig. 3).

Tabla 2. Efectos de los factores estado de la ladera (Ladera), intensidad de lluvias simuladas y su interacción, y de la pendiente y humedad del suelo sobre la escorrentía y la erosión del suelo. Para cada fuente de variación (FV) se muestran los grados de libertad del numerador (gl num) y denominador (gl den), los valores del estadístico F de Snedecor, y los valores de probabilidad. El nivel de significación fijado fue 0,10 (ver métodos).

Table 2. Effects of hillside's state (Ladera), simulated rainfall intensity (Intensidad) their interaction, slope (Pendiente) and soil moisture (Humedad) on runoff and soil erosion. For each source of variation (FV) we show the numerator and denominator degrees of freedom (gl num and gl den), F Snedecor value and its probability. The significance level was 0.10 (see methods).

FV	gl num	gl den	Escorrentía		Erosión	
			F	P	F	P
Ladera	1	4	0,33	0,59	21,01	0,01
Intensidad	2	19	2,58	0,10	2,42	0,12
Ladera x Intensidad	2	19	0,11	0,90	3,45	0,05
Pendiente	1	19	3,30	0,08	1,91	0,18
Humedad del suelo	1	19	5,54	0,08	1,98	0,23

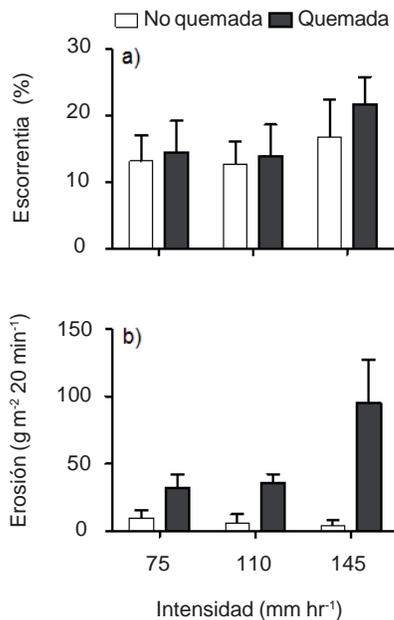


Figura 1. Tasa de escorrentía (a) y erosión del suelo (b) en función de la intensidad de lluvia simulada y del estado de la ladera (quemada o no quemada). Se muestra la media aritmética + 1 error estándar ($n=6$).
Figure 1. Runoff (a) and soil erosion (b) in relation to simulated rainfall intensity and hillside's state (burned or unburned). Mean + 1 SE are shown ($n=6$).

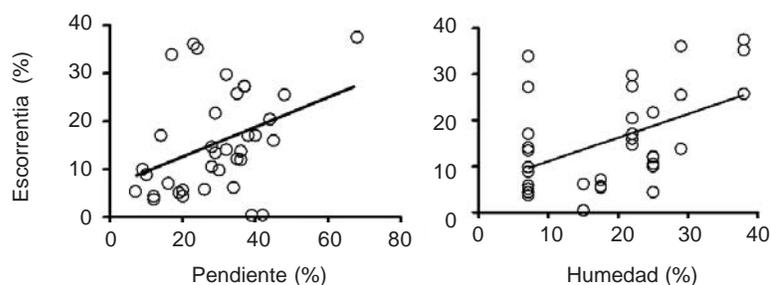


Figura 2. Tasa de escorrentía en función de la pendiente de la ladera y de la humedad del suelo pre-simulación.

Figure 2. Runoff in relation to slope and soil moisture.

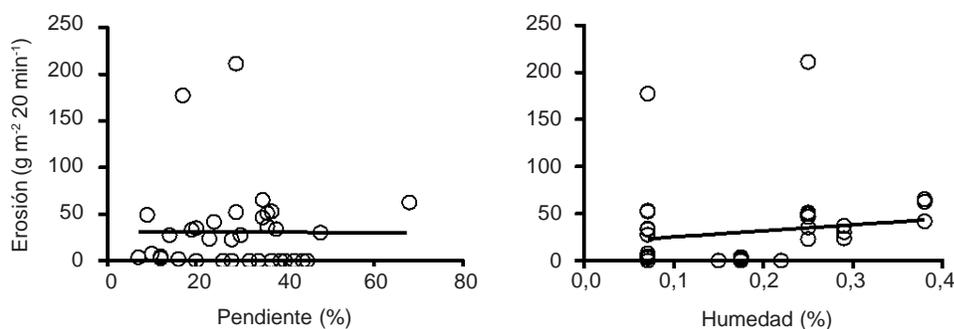


Figura 3. Erosión del suelo en función de la pendiente de la ladera y de la humedad del suelo pre-simulación.

Figure 3. Soil erosion in relation to slope and soil moisture.

DISCUSIÓN

Los incendios forestales al dejar el suelo desprotegido, pueden ocasionar que el efecto de las lluvias sea más evidente, teniendo implicancias en la modificación de los procesos hidrológicos del suelo. En las laderas del bosque seco montañoso del noroeste argentino, nuestros resultados experimentales sugieren que la intensidad de lluvia simulada en los niveles experimentados afectó positivamente tanto la escorrentía como la pérdida de suelos. Por otro lado, la pérdida de cobertura vegetal producto de los incendios forestales fue un factor relevante en determinar la gran erosión del suelo, más aún a intensidades elevadas de lluvia.

Si bien las tendencias en la escorrentía siguieron parcialmente lo propuesto en nuestras predicciones en relación a los incendios, las mismas no fueron lo suficientemente marcadas como para detectar efectos significativos. La tasa de escorrentía (calculada como porcentaje de agua escurrida del volumen de agua adicionado) no dependió

estadísticamente del estado de la ladera, ni tampoco hubo un efecto interactivo entre ambos factores estudiados (estado de la ladera e intensidad de lluvia). Si bien, generalmente se considera que el fuego disminuye la capacidad de infiltración del suelo, y por lo tanto, aumenta la escorrentía, los resultados de diferentes estudios muestran que las respuestas son muy variables, dependiendo principalmente del tipo de suelo y de la intensidad del incendio a nivel del suelo (Shakesby & Doerr, 2006). El principal mecanismo propuesto para explicar la disminución de la infiltración luego de los incendios es la generación o el aumento de la repelencia al agua del suelo (DeBano, 2000; Shakesby & Doerr, 2006). Por tal razón, se puede proponer como posible explicación de nuestro resultado que la temperatura alcanzada por los incendios en los suelos estudiados no fue lo suficientemente elevada como para afectar significativamente la capacidad de repelencia al agua del suelo. La elevada heterogeneidad espacial y temporal de los efectos del fuego, fundamentalmente en estudios de campo

sobre laderas con diferentes pendientes y exposiciones, hacen difícil una predicción precisa de la infiltración (y de la escorrentía) luego de la ocurrencia de incendios forestales (Doerr & Moody, 2004; Shakesby & Doerr, 2006). Por otro lado, la tasa de escorrentía sí dependió de la intensidad de lluvia simulada, encontrándose una mayor escorrentía a mayor intensidad, independientemente del estado de la ladera (interacción no significativa). También la pendiente y la humedad del suelo modificaron positivamente la tasa de escorrentía. La mayoría de los estudios sobre estos temas, investigaron los efectos de solo uno o dos factores sobre las variables de respuesta como la infiltración, y son escasos los ejemplos de estudios multifactoriales. Por ejemplo, Huang *et al.* (2013) estudiaron los efectos simultáneos de la cobertura de la vegetación, de la intensidad de las lluvias y de la pendiente sobre la infiltración. En concordancia con nuestros resultados (interpretando el % de escorrentía como el complemento del % de infiltración), la infiltración dependió negativamente de la intensidad de lluvia y de la pendiente. Sin embargo, el factor que más influyó en la infiltración fue la cobertura del suelo (Huang *et al.*, 2013), a diferencia de nuestros resultados en donde la cobertura vegetal, afectada por los incendios, no influyó en el porcentaje de escorrentía. Una posible explicación a esta respuesta diferente es que la cobertura del suelo estudiada por Huang *et al.* (2013) correspondió a diferentes coberturas naturales encontradas en su área de estudio, mientras que en nuestro trabajo la diferencia de cobertura se debió a una perturbación como es el caso de los incendios forestales.

La intensidad de los incendios ocurridos pocos meses antes del estudio provocó la pérdida del estrato herbáceo, de la capa de hojarasca del suelo y del horizonte orgánico, modificando posiblemente algunas características del suelo como su agregación y estabilidad de los agregados (Larsen *et al.*, 2009; Llovet *et al.*, 2009; Jordán *et al.*, 2011; Mataix-Solera *et al.*, 2011; Morales *et al.*, 2013). Estas modificaciones podrían ser la causa de que en las laderas quemadas hayamos registrado una tasa de pérdida de suelo superiores a las encontradas en las laderas no quemadas. Sin embargo, el efecto de los incendios no puede analizarse aisladamente, porque, apoyando parcialmente nuestras predicciones, encontramos un efecto interactivo entre la intensidad de lluvia simulada y el estado de la ladera sobre una sola de las variables de respuesta consideradas (erosión). La ocurrencia de incendios en las laderas incrementó la pérdida de suelos en todas las intensidades de lluvia simuladas, pero la pérdida de suelo se incrementó significativamente con la máxima intensidad simulada (Fig. 1b).

Dado que no conocemos otros trabajos que hayan combinado experimentalmente ambos factores (fuego e intensidad de lluvia), no podemos evaluar si nuestros hallazgos son comunes a otros ambientes, aunque dicha relación de dependencia ya fue mencionada por Cawson *et al.* (2012).

Existen muchos antecedentes en ecosistemas mediterráneos europeos (ver revisión en Shakesby, 2011), pocos en bosques andino-patagónicos (Morales *et al.*, 2013), y hasta la fecha no conocemos estudios en bosques secos de montaña latinoamericanos que estudien la respuesta hidrológica y la pérdida de suelo en respuesta a la lluvia post-incendio. Dado la creciente presión antropogénica a la cual estos bosques están siendo sometidos en los últimos años (Portillo-Quintero & Sanchez-Azofeifa, 2010) y debido a los potenciales riesgos que existen al perder la cobertura vegetal de las laderas, más aún en zonas cercanas a centros poblados y con pendientes pronunciadas, recomendamos enfáticamente investigar la efectividad de potenciales tratamientos de control de erosión (e.g. aumentando la cobertura del suelo) en sectores incendiados y con pendientes pronunciadas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Subsecretario de Prevención y Emergencias del municipio capitalino (G Galíndez) por el apoyo logístico brindado. A la Subsecretaría de saneamiento Ambiental, Secretaría de Ambiente y Servicios Públicos Municipalidad de Salta (S Pontussi), por su apoyo, ideas, recomendaciones y gestión. A FL Ferreyra, AG Resina, G López, ML Aguilera y CNV Cabrera por su valioso apoyo en las diversas tareas de campo. A P Kirschbaum por su asesoramiento y recomendaciones en temas geológicos. Por último, agradecemos a J Llovet, a MG Wilson y a dos revisores anónimos por su valiosos comentarios realizados en una versión previa del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Badia, D & C Marti. 2008. Fire and rainfall energy effects on soil erosion and runoff generation in semi-arid forested lands. *Arid L. Res. Manag.* 22: 93-108.
- Bianchi, A & C Yáñez. 1992. Las precipitaciones en el Noroeste Argentino, Segunda Ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Salta.
- Bond, WJ & BW Wilgen. 1996. Fire and Plants: Population and Community Biology Series 14. New York: Chapman & Hall. Pp. 263.
- Cawson, JG; GJ Sheridan & HG Smith. 2012. Surface runoff and erosion after prescribed burning and the effect of different fire regimes in forests and shrublands: a review. *Int. J. Wildl. Fire* 21: 857-872.

- Cawson, JG; GJ Sheridan; HG Smith & PNJ Lane. 2013. Effects of fire severity and burn patchiness on hillslope-scale surface runoff, erosion and hydrologic connectivity in a prescribed burn. *For. Ecol. Manage.* 310: 219-233.
- Cheney, NP; JS Gould; WL McCaw & WR Anderson. 2012. Predicting fire behaviour in dry eucalypt forest in southern Australia. *For. Ecol. Manage.* 280: 120-131.
- Cobo Quintero, L & E Amézquita Collazos. 1999. Diseño, construcción y evaluación de un minisimulador de lluvia para estudios de susceptibilidad a erosión en laderas. *Rev. Suelos Ecuatoriales* 29: 66-70.
- De Luis, M; JC González-Hidalgo & J Raventós. 2003. Effects of fire and torrential rainfall on erosion in a Mediterranean gorse community. *L. Degrad. Dev.* 14: 203-213.
- DeBano, L. 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *J. Hydrol.* 231: 195-206.
- Doerr, SH & J Moody. 2004. Hydrological impacts of soil water repellency: on spatial and temporal uncertainties. *Hydrol. Process.* 18: 829-832.
- Ehrensperger, T; ZL Urech; M Rehnus & J-P Sorg. 2013. Fire impact on the woody plant components of dry deciduous forest in Central Menabe, Madagascar. *Appl. Veg. Sci.* 16: 619-628.
- Granged, AJP; A Jordán; LM Zavala & G Bárcenas. 2011. Fire-induced changes in soil water repellency increased fingered flow and runoff rates following the 2004 Huelva wildfire. *Hydrol. Process.* 25: 1614-1629.
- Castrillo, S; J Hernan; R Osinaga; HP Paoli; T Chafatinos; A Nadir; J Volante; YE Noe; LM Vale & MC Morales Poclava. 2009. Adecuación a un sistema de información geográfica del estudio «Los Suelos del NOA (Salta y Jujuy), Nadir A. - Chafatinos T., 1990». Convenio INTA-UNSa. Ediciones INTA.
- Huang, J; P Wu & X Zhao. 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena* 104: 93-102.
- Jordán, A; LM Zavala; J Mataix-Solera; AL Nava & N Alanís. 2011. Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *Catena* 84: 136-147.
- Kodandapani, N. 2013. Contrasting fire regimes in a seasonally dry tropical forest and a savanna ecosystem in the western Ghats, India. *Fire Ecol.* 9: 102-115.
- Larsen, IJ; LH MacDonald; E Brown; D Rough; MJ Welsh; JH Pietraszek *et al.* 2009. Causes of Post-Fire Runoff and Erosion: Water Repellency, Cover, or Soil Sealing? *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1393-1407.
- Llovet, J; M Ruiz-Valera; R Josa; & VR Vallejo. 2009. Soil responses to fire in Mediterranean forest landscapes in relation to the previous stage of land abandonment. *Int. J. Wildl. Fire* 18: 222-232.
- Mataix-Solera, J; A Cerdà; V Arcenegui; A Jordán; & LM Zavala. 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Rev.* 109: 44-60.
- McCaw, WL; JS Gould; NP Cheney; PFM Ellis & WR Anderson. 2012. Changes in behaviour of fire in dry eucalypt forest as fuel increases with age. *For. Ecol. Manage.* 271: 170-181.
- Moody, JA; RA Shakesby; PR Robichaud; SH Cannon & DA Martin. 2013. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Rev.* 122: 10-37.
- Morales, D; CM Rostagno & L Manna. 2013. Runoff and erosion from volcanic soils affected by fire: the case of *Austrocedrus chilensis* forests in Patagonia, Argentina. *Plant Soil* 370: 367-380.
- Novara, LJ. 1985. Las unidades de vegetación del Noroeste del Valle de Lerma (Provincia de Salta, República Argentina). *Doc. Phytosociologues* 9: 409-429.
- Portillo-Quintero, CA & GA Sanchez-Azofeifa. 2010. Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biol. Conserv.* 143: 144-155.
- Pinheiro, J; D Bates; S DebRoy; D Sarkar & RDC Team. 2012. nlme: Linear and nonlinear mixed effects models.
- R Development Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0: R Foundation for Statistical Computing.
- Ramos, MC; S Nacci & I Pla. 2003. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces. *Catena* 53: 365-376.
- Rostagno, CM & D Garayzar. 1995. Diseño de un simulador de lluvias para estudios de infiltración y erosión de suelos. *Cienc. del Suelo* 13: 41-43.
- SADS (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable). 2014. Estadística de incendios forestales 2013. Programa Nacional de Estadística Forestal. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Informe Técnico. 131 pp.
- Sensoy, H & O Kara. 2013. Slope shape effect on runoff and soil erosion under natural rainfall conditions. *Ifor. Biogeosc. For.* 7: 110-114.
- Shakesby, RA. 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Rev.* 105: 71-100.
- Shakesby, RA & SH Doerr. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Rev.* 74: 269-307.
- Zumbrunnen, T; P Menendez; H Bugmann; M Conedera; U Gimmi & M Buergi. 2012. Human impacts on fire occurrence: a case study of hundred years of forest fires in a dry alpine valley in Switzerland. *Reg. Environ. Chang.* 12: 935-949.

