

Aplicación de fotografía de alta resolución espacial para el seguimiento de la dinámica post-fuego en parcelas de campo

Pérez-Cabello, Fernando^{1 a}; Montorio, Raquel^a; García-Martín, Alberto^a; Palacios, Vicente^a; De la Riva, Juan^a; Echeverría, María T. ^a; Ibarra, Paloma^a; Lasanta, Teodoro^b

^(a) Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza,

C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España.

^(b) Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Avda. Montañana 1005, Apdo. 202, 50192 Zaragoza, España.

RESUMEN

El objetivo es el seguimiento de los procesos post-fuego, que determinan la dinámica hidrogeomorfológica (regeneración vegetal, desaparición de cenizas, incremento de pedregosidad...), y de los patrones espaciales en dos ambientes diferentes: semiárido y submediterráneo. Se utilizan fotografías verticales de alta resolución espacial en el visible, de periodicidad mensual, sobre parcelas experimentales sometidas a quema controlada. Las imágenes –corregidas y clasificadas– permiten caracterizar el comportamiento en los dos ambientes durante el año posterior al fuego.

Palabras clave: dinámica post-fuego, fotografía de alta resolución espacial, patrones espaciales.

ABSTRACT

The objective is to monitor the post-fire processes, which determine the hydro-geomorphological dynamic (vegetation recovery, ashes removal, increment of stoniness...), and the spatial patterns in two different environments: semiarid and sub-Mediterranean. High spatial resolution vertical visible photographs are used, with a monthly frequency, in experimental plots where prescribed fires were conducted. Images –geometrically corrected and classified– allow contrasting the different behaviour between the two environments during the year following the fire.

Keywords: post-fire processes, high spatial resolution photograph, spatial patterns.

Introducción

Las consecuencias del fuego en los procesos erosivos y la regeneración vegetal manifiestan una elevada variabilidad espacio-temporal, resultando difícil su generalización. Uno de los factores que mejor explican este fenómeno es la complejidad de las interacciones que se producen entre los factores bióticos (estrategias de regeneración de las especies afectadas, estructura vegetal...) y abióticos (condiciones meteorológicas tras el fuego, erodibilidad del suelo...), que convergen en los escenarios de intensidad-severidad relacionados con el incendio.

De la bibliografía existente se pueden extraer interesantes conclusiones acerca de las consecuencias ecológicas del fuego, pero que deben ser analizadas en un correcto marco técnico-metodológico y en la adecuada consideración de la escala a la que han sido obtenidas. Desde el punto de vista del suelo, las observaciones generales sugieren que el fuego acelera temporalmente las tasas de erosión (Pyne *et al.*, 1996; Soler y Sala 1990; Imenson *et al.*, 1992; Soto, 1993; Pardini *et al.*, 2002; Shakesby y Doerr, 2005). Todo ello como consecuencia de la destrucción de la vegetación y de la altera-

¹ Contacto autor: Te: +34 976 761000 ext. 3908 Fax: +34 976 761506

Correo electrónico: fcabello@unizar.es

Copyright: Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

ción de las propiedades químicas y físicas del suelo a causa de las altas temperaturas alcanzadas, afectando así la capacidad de infiltración del agua y su resistencia a la erosión (Imenson *et al.*, 1992; González-Pérez *et al.*, 2004). En relación con los efectos sobre la vegetación, la principal consecuencia es su combustión total o parcial. No obstante, los mecanismos de rebrote y germinación desarrollados por numerosas plantas mediterráneas permiten un proceso rápido de recubrimiento vegetal, alcanzando características semejantes a las preexistentes (Hanes, 1971; May, 1991).

En el contexto de las consecuencias del fuego sobre el binomio erosión-vegetación se han utilizado diversos métodos y técnicas para su estudio y seguimiento. En relación con la erosión destaca –para su cuantificación en áreas quemadas– el análisis en parcelas de erosión y cuencas experimentales. Por otra parte, con objeto de explicar adecuadamente los datos de flujo y sedimento obtenidos mediante estas técnicas, resulta necesario considerar información adicional sobre otras variables y procesos. Para responder a tal requerimiento se llevan a cabo, habitualmente, descripciones adicionales cualitativas de la regeneración vegetal: inventarios florísticos, transeptos y prospección visual, estimación de la aparición de costras, variación temporal de la cubierta de cenizas, etc.

Este trabajo presenta una metodología que, en el marco de las parcelas de erosión, permite evaluar y cartografiar la distribución espacio-temporal de los procesos superficiales, contribuyendo a la explicación de la producción de flujo y sedimento. El análisis realizado se basa en la captura periódica de fotografías verticales en la parte visible del espectro y su posterior tratamiento digital con objeto de identificar la distribución espacial de los materiales. Una experiencia semejante, aunque con variantes tanto en técnicas como en objetivos, fue propuesta por Calera *et al.* (2001), quienes describen un procedimiento para evaluar la cubierta vegetal con fotografías digitales y clasificación supervisada. La aparición de sombras generadas por la cubierta vegetal y las condiciones de iluminación son los principales problemas en la aplicación de tal diseño experimental.

Metodología

Áreas de estudio y parámetros del fuego experimental

Las quemadas se realizaron en dos parcelas experimentales de 3x8 m, ubicadas en laderas

de orientación sur con 12° de pendiente. Una de ellas localizada en la Estación Experimental de Peñaflores (EEP), en el sector central de la Depresión del Ebro (provincia de Zaragoza), la otra en la Estación Experimental de Aísa (EEA), en el Pirineo (provincia de Huesca).

El clima en EEP es mediterráneo seco, con una precipitación anual de 300 mm y una temperatura media de 15°C; el suelo es un Regosol calcáreo desarrollado sobre una terraza fluvial cuaternaria; la vegetación es de matorral mediterráneo, dominada por un germinador obligado: *Rosmarinus officinalis* (romero). La EEA, con una precipitación total de 1200 mm y una temperatura media anual de 10°C, tiene clima submediterráneo; el suelo es un Calcisol sobre el flysch eoceno y la vegetación es de matorral submediterráneo con presencia dominante de otra germinadora obligada: *Genista scorpius* (aliaga).

El fuego se llevó a cabo el 16 de octubre y el 24 de noviembre de 2004, respectivamente para EEP y EEA, a las 12 horas local.

Diseño metodológico

Los cambios en la estructura vegetal y en las características del suelo se analizaron con fotografías verticales de alta resolución, con objeto de relacionar esta información con los datos de escorrentía y erosión. Para ello, se construyó una estructura metálica de 3x2x2 m sobre la que se mueve una cámara digital –Reflex Nikon D100– que captura fotografías en el visible según un muestreo regular estratificado de 50x50 cm, obteniéndose un total de 95 imágenes por parcela. Las observaciones se realizaron con periodicidad mensual. Para garantizar la homogeneidad en la iluminación y evitar los problemas ligados a las sombras de la propia vegetación, la estructura se cubrió con un toldo negro. Las imágenes fueron tratadas en ERDAS 8.7.

Tratamiento de las imágenes

El primer tratamiento aplicado fue la corrección geométrica, que hubo de realizarse con gran cuidado, por cuanto se iba a analizar una serie temporal de imágenes. La imagen de febrero fue corregida a proyección UTM (Elipsoide Internacional 1909, EU Datum 1950, 30N) a partir de un modelo polinomial de segundo orden; se utilizaron 60 puntos de control con precisión milimétrica obtenidos con GPS (Leica GPS500). Para minimizar los cambios en la radiometría se aplicó el método de asignación del «vecino más próximo», generándose píxeles de 1 mm. Esta primera imagen se utilizó como referencia para la rectificación de las restantes (Fig. 1).



Fig. 1. Mosaico de imágenes de las parcelas tras el fuego: EEA (izquierda) y EEP (derecha).

Las imágenes fueron clasificadas de forma supervisada mediante el método de máxima probabilidad para la identificación de los materiales: cubierta vegetal (total o parcialmente quemada), suelo desnudo, piedras, cenizas negras, cenizas blancas y restos orgánicos, cuya presencia depende del momento dentro de la serie temporal.

Sobre los datos extraídos se procedió (1) al análisis de la serie temporal, considerando las tendencias observadas en los materiales; y (2)

al análisis de las diferencias entre dos momentos extremos, considerando el inmediato post-fuego y el final del período (10 y 11 meses, respectivamente, en EEA y EEP).

Resultados

Estación Experimental de Peñaflo (EEP)

La situación previa al fuego se caracteriza por una proporción semejante –en torno al 20/30%– de vegetación, suelo desnudo y piedras, aunque con una presencia algo mayor –33,3%– de cubierta vegetal (Fig. 2). Es destacable el significativo porcentaje –en torno al 15%– de restos vegetales leñosos, vivos o muertos, de *Rosmarinus officinalis*, especie dominante de los matorrales semiáridos de este sector. El patrón espacial en manchas de la vegetación es de gran importancia para conocer las localizaciones en las que rebrota o germina, como se pondrá de manifiesto más adelante, en concordancia con lo manifestado por Camereaat e Imeson (1999).

A pesar del fuerte viento durante la quema, su intensidad fue moderada por la escasez y discontinuidad del combustible. No obstante, el fuego experimental causó una pérdida de vegetación de en torno al 65%, permaneciendo un cubrimiento de tan sólo 12,3%. El suelo desnudo, las piedras y los restos vegetales leñosos permanecieron estables o con leves incrementos tras el fuego. La superficie antes cubierta de vegetación fue ocupada por cenizas blancas y negras, siendo estas últimas las más presentes, con una proporción, respectivamente, del 4,97% y 12,02%.

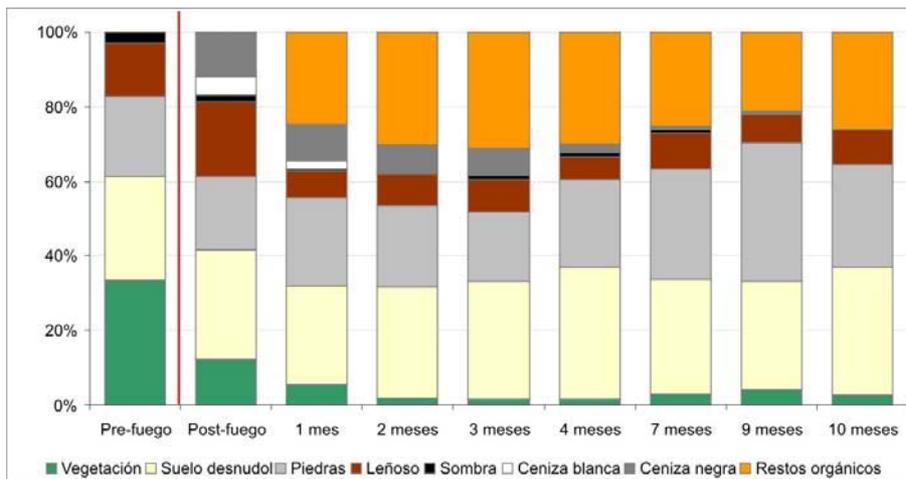


Fig. 2. Evolución temporal del porcentaje de cubrimiento en EEP

La evolución temporal de los porcentajes de cubrimiento, recogida en la Fig. 2, permite constatar la supresión y la aparición de algunos materiales, así como su variación en el tiempo; en todo caso, debe subrayarse la linealidad en esta evolución. La permanencia de las cenizas blancas es muy baja, reduciéndose un mes después de la quema en un 61,3% de la superficie inmediatamente tras el fuego y desapareciendo a los dos meses. Las cenizas negras, aunque reducen su presencia entre el 1 y el 2% y aparecen de forma creciente mezcladas con otros materiales como el suelo desnudo, están presentes hasta el final del período analizado.

Otro proceso observado ha sido la aparición, un mes después del fuego, de restos de materia orgánica por la combinación de suelo desnudo con la ceniza a causa de la escorrentía. Este material permanece constante hasta el final del período analizado, en una proporción importante (25-30%).

Finalmente, se constata que la evolución de la vegetación en este medio semiárido tiene una tendencia regresiva. La ganancia de la función lineal que se ajusta a esta evolución es de -0,45 ($r^2 < 0.4$). Esta relación es debida a la mortalidad de la fracción vegetal que sobrevivió, fenómeno producido durante el primer mes posterior al fuego; más tarde, la vegetación permanece estable con recubrimiento del 2%. Este

hecho se relaciona probablemente con la influencia de factores coyunturales como la lluvia tras el fuego, que fue inferior a la media, y el impacto del fuego en sí mismo. A partir de la primavera se observa un leve incremento, alcanzando porcentajes en torno al 4%, aunque con descensos en los meses centrales del verano.

En relación con los cambios en magnitud y dirección entre los dos momentos extremos, se observan importantes transformaciones y tendencias en los materiales superficiales (Tabla 1), relacionados principalmente con los procesos de regeneración vegetal y erosión.

La cubierta vegetal ha experimentado un fuerte descenso en sus porcentajes absolutos, variando desde el 12,28% al 2,70%. La vegetación que persistió al fuego murió en los meses posteriores, haciendo aparecer piedras, suelo desnudo y restos vegetales leñosos. Tan sólo permaneció, a los 10 meses, una ínfima proporción de vegetación (1,19%). No se observa, por tanto, un proceso global de regeneración, a excepción de pequeños brotes en el suelo desnudo o en los restos vegetales leñosos que explican el porcentaje que aparece al final del período. La regeneración en las áreas cubiertas por cenizas es prácticamente inexistente (0,16%). Unido a esta pérdida de vegetación, las sombras casi han desaparecido (del 1,56% al 0,02%).

PES	Inmediato post-fuego (16/10/2004)								
	Vegetación	Suelo desn.	Piedras	Leñoso	Sombra	Ceniza blanca	Ceniza negra	Restos orgán.	TOTAL
Vegetación	1,19	0,46	0,27	0,49	0,12	0,06	0,10	0,00	2,70
Suelo desnudo	2,80	13,26	7,15	6,41	0,25	1,55	2,85	0,00	34,28
Piedras	3,38	8,92	5,65	5,36	0,42	1,36	2,59	0,00	27,68
Leñoso	1,72	1,70	1,68	2,04	0,29	0,48	1,33	0,00	9,24
Sombras	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02
Cenizas blancas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cenizas negras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Restos orgánicos	3,18	5,07	4,98	5,70	0,49	1,52	5,14	0,00	26,08
TOTAL	12,28	29,42	19,74	20,01	1,56	4,97	12,02	0,00	100,00

Tabla 1. Cambios entre el inmediato post-fuego y transcurridos 10 meses en EEP.

La pérdida de cubierta vegetal implica la reducción del agente fundamental de intercepción y, por tanto, el incremento de la erosión. La lluvia encuentra menos obstáculos en su camino hacia el suelo, aumentando su energía cinética y su acción erosiva. Los procesos de erosión en la parcela quemada se producen en forma de

arroyada superficial, mediante remoción de los materiales. Este flujo superficial afecta a las cenizas, removiéndolas y haciendo aparecer el suelo y las piedras infrayacentes (4,40% y 3,95%, respectivamente) o mezclándolas con el suelo desnudo, generando materia orgánica (6,66%).

El material edáfico fino fue también movilizado, generando cambios en el suelo desnudo y la superficie de piedras. La desaparición de esta fracción fina generó un incremento del porcentaje de piedras en algunas áreas, especialmente en la parte alta de la parcela (8,92%) y en los valores globales, que pasan de 19,74 % a 27,68%. La movilización de la fracción fina tuvo lugar en áreas previamente cubiertas por piedras o restos de vegetación leñosa, especialmente en la parte baja de la parcela, explicando los cambios en este tipo de cubierta (7,15% de piedras y 6,41% de residuos vegetales leñosos) y el mantenimiento en los valores globales del suelo desnudo (de 29,42% a 34,28%). El suelo desnudo y las piedras, a pesar de los cambios que han experimentado, mantienen mayores porcentajes de superficie sin cambio de ocupación entre las dos fechas (13,26% y 5,65%, respectivamente).

Los restos vegetales leñosos, debido a la combustión de la cubierta vegetal y la muerte de la que subsistió, disminuyen en la parcela (de 20,01% a 9,24%), siendo removida o cubierta por otros materiales. Estas superficies aparecen en el momento final considerado cubiertas

por suelo desnudo, piedras y, parcialmente, restos vegetales leñosos.

Un porcentaje importante de suelo desnudo, tanto original como movilizado sobre las piedras y los restos vegetales leñosos, cambia en el período analizado a restos orgánicos, como resultado de su movilización y de su combinación con cenizas (15,75%), explicando su gran importancia al final del período (26,08%).

La representación cartográfica de estos cambios se traduce en la predominancia de los colores rojizos (Fig. 4), que –de acuerdo con la leyenda– expresan áreas que experimentan una pérdida de vegetación en beneficio de otras cubiertas, fundamentalmente el suelo.

Estación Experimental de Aísa (EEA)

En la parcela de Aísa, la vegetación previa al fuego cubría el 80% de la superficie total, con una escasa presencia de suelo desnudo, piedras y restos vegetales leñosos (10,05, 4.15 y 4,34% respectivamente). La continuidad del combustible favoreció la propagación del fuego, que consumió prácticamente la totalidad de la vegetación, 90,5%, permaneciendo tan sólo el 7,57% (Fig. 3).

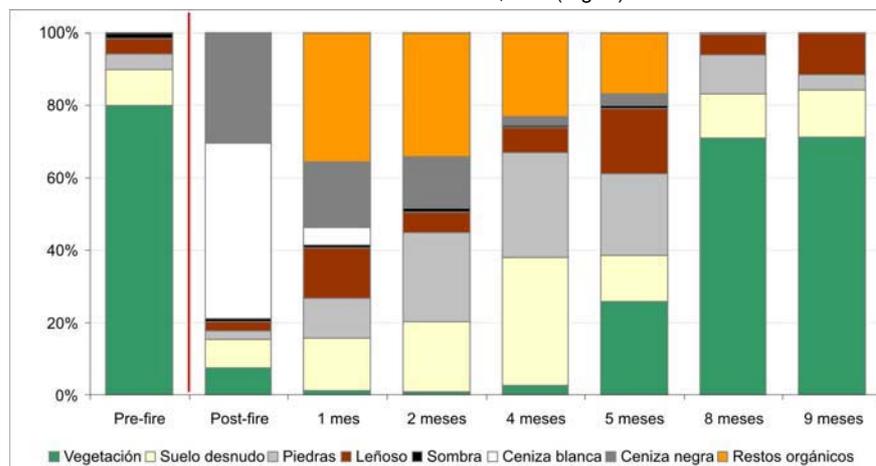


Fig. 3. Evolución temporal del porcentaje de cubrimiento en EEA.

La combustión de la cubierta vegetal generó una importante cantidad de cenizas, que cubrieron la práctica totalidad de la parcela (los porcentajes de suelo desnudo, piedras y restos vegetales leñosos experimentaron un descenso relativo a los previos al fuego por la expansión de las cenizas). Entre las cenizas, las blancas expresan mayores porcentajes que las negras (48,46 y 30,33% respectivamente), indicando una alta intensidad de fuego.

Considerando la serie temporal, se observa una baja linealidad en la evolución de los materiales. Las cenizas desaparecieron rápidamente, las blancas en tan sólo dos meses, las negras en tres, debido a su fuerte incorporación al suelo, generando la aparición de materia orgánica durante el primer mes tras el fuego, así como la aparición de regeneración. Tres meses después del fuego, el suelo desnudo y la pedre-

gosisidad se incrementaron fuertemente, coincidiendo con la desaparición de la vegetación durante los meses invernales (siendo factores explicativos la baja temperatura y la intensa invernación). Con la llegada de la primavera (imagen del 25 de abril) se produjo un rápido y sostenido incremento de la vegetación, especialmente de herbáceas como *Brachypodium sp.*, *Carex flacca*, *Convolvulus arvensis* y *Centaurea junccea* y arbustivas como *Rosa sp.* Esta tendencia positiva se produce básicamente en detrimento del suelo desnudo, la pedregosidad y la materia orgánica. La tasa de regeneración durante el período estudiado se ajusta, en este medio, a una función exponencial.

En relación con los cambios en magnitud y dirección entre los dos momentos extremos analizados en el post-fuego, la dinámica más sobresaliente se asocia con los procesos de regeneración vegetal (Tabla 2). La cubierta vegetal experimenta un fuerte incremento asociado al proceso de regeneración, pasando del 7,57 al 71,27%. La nueva vegetación se desarrolla so-

bre el suelo desnudo (5,11%) y sobre las cenizas blancas y negras (33,3% y 23,01%, respectivamente). Un 75% de la vegetación que sobrevivió a la quema permanece constante hasta la última fecha analizada, la escasa proporción que muere tras el fuego pasa a ser sustituida por suelo desnudo y restos vegetales leñosos (9% y 10%, respectivamente). Las sombras experimentan un leve descenso (de 0,87 al 0,11%), que puede ser explicado por la naturaleza herbácea de la vegetación regenerada, a diferencia de la arbustiva previa.

La superficie de cenizas en la que no se produjo regeneración evolucionó, (1) en unos casos hacia suelo desnudo (7,03% y 3,19% para las cenizas blancas y negras, respectivamente) y que constituyen aproximadamente la totalidad de este tipo de cubierta al final del período analizado; (2) en otros hacia restos de vegetación leñosa (11,46%), mayoritariamente por la desaparición de las cenizas; y, (3) finalmente, hacia piedras (4,21%).

PES	Inmediato post-fuego (24/11/2004)								TOTAL
	Vegetación	Suelo desn.	Piedras	Leñoso	Sombra	Ceniza blanca	Ceniza negra	Restos orgán.	
Vegetación	5,67	5,11	1,66	1,85	0,65	33,33	23,01	0,00	71,27
Suelo desnudo	0,71	1,36	0,23	0,35	0,08	7,03	3,19	0,00	12,95
Piedras	0,40	0,42	0,21	0,14	0,03	1,91	1,11	0,00	4,21
Leñoso	0,79	0,89	0,24	0,31	0,12	6,13	2,99	0,00	11,46
Sombras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,03	0,00	0,11
Cenizas blancas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cenizas negras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Restos orgánicos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	7,57	7,78	2,34	2,66	0,87	48,46	30,33	0,00	100,00

Tabla 2. Cambios entre el inmediato post-fuego y transcurridos 10 meses en EEA.

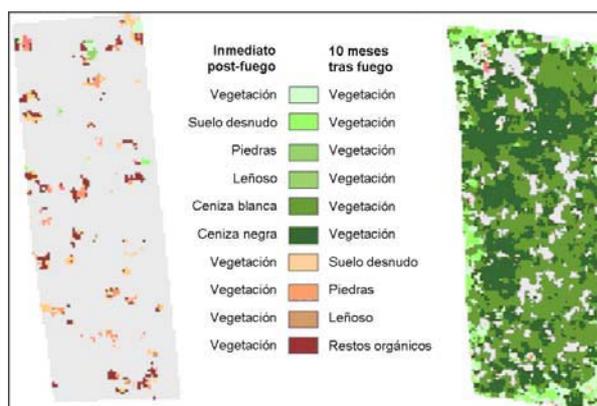


Fig. 4. Distribución espacial de los cambios en EEP (izquierda) y en EEA (derecha).

La distribución espacial de todo este proceso ya comentado muestra un predominio de los colores verdosos (Fig. 4), que corresponden a áreas que experimentan un incremento de la cubierta vegetal a partir de otras superficies (fundamentalmente cenizas).

Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para cartografiar cambios en los materiales de superficie generados en parcelas sometidas a fuegos experimentales, a partir de información recogida los meses posteriores a la quema. Contribuye así a incrementar el conocimiento relativo a los principales procesos post-fuego: erosión y regeneración vegetal. Los resultados muestran las importantes diferencias que existen en el comportamiento en los ambientes analizados: el sub-mediterráneo de la estación EEA y el semiárido de EEP.

La parcela de EEA ha alcanzado un porcentaje de cubrimiento vegetal semejante al anterior al fuego. Una regeneración total, en términos de recubrimiento superficial, aunque el matorral previo ha dado paso a vegetación herbácea al final del período analizado. La rápida regeneración de esta parcela puede ser explicada por la importante presencia de *Brachypodium* sp., una herbácea perenne con gran capacidad de rebrote tras el fuego, así como por la existencia de condiciones climáticas favorables para la regeneración.

En el mismo período, en cambio, la parcela de EEP muestra muy bajos porcentajes de cubierta vegetal, inferiores a los registrados en el momento previo al fuego. Ello es indicativo de la ausencia de regeneración y de la mortalidad de la vegetación que sobrevivió, pudiendo ser aparentemente relacionado con la persistencia de sequía en este medio semiárido.

Aunque los procesos erosivos se incrementaron en los dos ambientes, la menor regeneración del semiárido convierte estas áreas en más vulnerables a la degradación del terreno tras la destrucción de la vegetación.

Desde un punto de vista metodológico, la captura de imágenes fotográficas de alta resolución espacial se ha mostrado una técnica adecuada para un mejor conocimiento de los procesos post-fuego en el marco de parcelas experimentales. Esta forma de observación permite cuantificar con rigor los cambios acaecidos y hacer el seguimiento de los cambios espaciales, superando algunos de los problemas más frecuentes en otros diseños experimentales, como la influencia de las sombras, obviadas por la protección procurada a las fotografías de la influen-

cia externa. Por otra parte, se obtiene además información muy útil para mejorar el estudio de la información sobre flujo y sedimentos que arrojan las parcelas de erosión.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyecto RS_Fire, CGL2005-04863/CLI) y el Gobierno de Aragón (proyecto PIR_Fire PIP098/2005).

Referencias

- Calera, A., Martínez, C., Meliá, J. 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *International Journal of Remote Sensing*, 22 17: 3357-3362.
- Cerdá, A., Lasanta, T. 2005. Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees 1. Water and sediment yield. *Catena*, 60: 59-80.
- González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Almendros, G. y Knicker, H. 2004. The effect of fire on soil organic matter - a review. *Environment International*, 30: 855-870.
- Hanes, T.J., 1971. Succession after fire in the chaparral of southern California. *Ecol. Monogr.*, 41: 27-52.
- Imeson, A.C., Verstraten, J.M., van Mulligen, E.J., Sevink, J. 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena* 19: 345- 361.
- May, T. 1999. Observaciones y reflexiones sobre el comportamiento tras fuego de algunas especies de la zona mediterránea de Andalucía Oriental. *Ecología*, 5: 125-134.
- Pardini, G., Gispert, M., Dunjo, G. 2002. Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Science of the total environment*, 328: 237-246.
- Pyne, S.J., Andrews, P.L., Laven, R.D. 1996. *Introduction to Wildland Fire*. New York.
- Shakesby, R.A., Doerr, S.H., 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74: 269-307.
- Soler, M., Sala, M. 1992. Effects of fire and of clearing in a Mediterranean *Quercus ilex* woodland: an experimental approach. *Catena*, 19: 321-332.
- Soto, B. 1993. Influencia de los incendios forestales en la fertilidad y erosionabilidad de los suelos de Galicia. Tesis doctoral, Facultad de Biología, Santiago de Compostela.