

La tesis titulada *Comportamiento hidrogeomorfológico tras incendios forestales en escenarios semiáridos*, se plantea como compendio de artículos y mención internacional. El doctorando Francisco Javier León Miranda disfrutó de una beca FPI del Ministerio de Ciencia e Innovación (**BES-2008-003056**) en el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza por 48 meses, en la que ha desarrollado una labor como investigador ligada al proyecto de investigación, también financiado por el citado Ministerio *Comportamiento y modelización espacio temporal del transporte de sedimento en distintos usos del suelo: El papel de los incendios forestales (CGL2007-66644-C04-04)*. Dicha labor está destinada a la realización de la Tesis Doctoral, dirigida por los doctores María Teresa Echeverría Arnedo y David Badía Villa. Además se incorporó a Geoforest, grupo de investigación del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, incluido en el grupo de investigación, considerado de excelencia por la Diputación General de Aragón, *Cambio Global y Geomorfología*, cuyo investigador responsable es el Dr. Blas Valero, del Instituto Pirenaico de Ecología del CSIC.

1. Hipótesis del Proyecto de Investigación:

El proyecto se enmarca en la temática de los incendios forestales y se centra en dos incendios ocurridos el primero en agosto de 2008 en los municipios de Zuera y Castejón de Valdejasa, y el segundo en agosto de 2009 en los municipios de Tauste y Remolinos, dentro de los Montes de Castejón o el Castellar, ambos en la provincia de Zaragoza.

Debido a que los incendios forestales desajustan las relaciones entre los diferentes componentes de las comunidades donde irrumpen, iniciándose a su vez, una serie de reajustes que principalmente será hidro-geomorfológica y bio-edáfica. Además se deben conocer las características y elementos del medio afectado (pendiente, exposición, morfología topográfica; litología; clima; vegetación previa y tras el incendio; procesos geomorfológicos y suelos; y usos del suelo). Por otro lado, debido a la existencia de interrelaciones entre esos elementos citados que van a influir en la dinámica posterior al incendio y que además, pueden ser modelizados e implementados en un SIG (Sistema de Información Geográfica). De esta forma, se nos plantean dos tipos de hipótesis:

- Hipótesis de carácter metodológico: el tratamiento upscaling sobre escenarios quemados mediante el uso y la combinación de diferentes herramientas geográficas (teledetección, SIG, trabajo experimental) constituye la aproximación idónea para el análisis de las consecuencias del fuego sobre algunos parámetros ambientales, tales como el suelo, la vegetación y procesos ligados a ellos, producción de flujo y sedimento, cambios mineralógicos...
- Hipótesis de contenidos: el fuego en ambientes semiáridos, en los que la fragilidad de los suelos y de la vegetación está acompañada por procesos hidrogeomorfológicos intensos, constituye un factor ambiental que ralentiza la recuperación del ecosistema, desencadenando en ocasiones procesos irreversibles, tales como la erosión del suelo. Ahora bien, la presencia de determinados factores ambientales tales como la exposición topográfica (laderas de orientación norte) puede suponer un escenario de

detalle en el que las relaciones entre factores ambientales generan condiciones favorables a la recuperación post-fuego.

2. Objetivos del Proyecto de Investigación

En el marco de este proyecto, se presenta un objetivo más general, en el cual la investigación va encaminada a determinar cómo y cuánto el fuego ha alterado los balances ambientales habituales en determinados ecosistemas semiáridos y a determinar el tiempo necesario para su recuperación, tras un incendio forestal.

Además este proyecto presenta unos objetivos específicos, que pretende avanzar en las investigaciones de las consecuencias de los incendios mediante:

- La realización de trabajos experimentales con infiltrómetros, simuladores de lluvia y parcelas experimentales, para analizar la susceptibilidad del suelo a la erosión y el papel de la vegetación en ese proceso erosivo. Se ha analizado el comportamiento hidrogeomorfológico, producción de flujo y sedimento, en relación con otros factores ambientales y en escenarios diversos post-fuego.
- El análisis de las propiedades edáficas del suelo que han sido modificadas por el incendio y que pueden condicionar la dinámica de los procesos de erosión tras el fuego.
- Comprobar el papel de alguna medida de restauración habitual, como el acolchado mediante astillas, en el comportamiento hidro-geomorfológico mediante ejercicios de simulación de lluvia.
- La elaboración de un modelo cartográfico a escala local de la capacidad de alteración del fuego en la estructura edáfica y en las formaciones vegetales. Mediante datos de satélite, del modelo digital del terreno (MDT) y otras informaciones consideradas en el contexto de un Sistema de Información Geográfica (SIG) específico, capaz de facilitar la integración de todas estas variables.

Este conjunto de objetivos requieren un tratamiento upscaling. Es decir, un estudio que comienza con una escala de detalle de la respuesta bio e hidro-geomorfológica, analizada a medio plazo, de los diferentes escenarios afectados por el fuego, con el propósito de extraer una serie de diagnósticos con los que validar los resultados del modelo cartográfico obtenido en paralelo, finalizando el estudio con una evolución temporal de las medidas correctoras y de restauración aplicadas al territorio quemado, localizado en otro continente por estar elaborado durante una estancia en el USGS de Boulder (Colorado, USA).

3. Caracterización del área de estudio

Este proyecto se aborda, desde una perspectiva geográfica, donde el dominio forestal de los Montes de Castejón (Zaragoza) está relacionada con su capacidad de reconstrucción tras el fuego, a partir de un número específico de elementos ambientales interrelacionados y de su posterior modelización espacial. Los Montes de Castejón quedan situados en el sector central

de la Depresión del Ebro, enmarcados por el sur con el río Ebro, y sus afluentes el Gallego al este y el Arba al oeste, y las Sierras de Erla y las Pedrosas al norte.

En el proyecto se seleccionan dos áreas experimentales, correspondientes a los incendios de Castejón de Valdejasa-Zuera (UTM 30T, X671106, Y4644584), en agosto de 2008, que abarca una extensión de 2800 ha, provocado por un accidente de coche, y por otro lado, al incendio de Remolinos-Tauste (UTM 30T, X656794, Y4639884), en agosto de 2009, debido a unas maniobras militares, que abarcó 6800 ha.

La vegetación característica del incendio de Castejón-Zuera estaba formada por un bosque mixto de *Pinus halepensis* Mill y *Quercus coccifera* L., y de un matorral formado por *Brachypodium phoenicoides* L., *Brachypodium retusum* Pers., *Juniperus oxycedrus* L., *Lonicera etrusca* G., *Genista scorpius* L., *Helianthemum marifolium* Mill, *Osyris alba* L., *Pistacea lentiscus* L., *Rhamnus lyciodes* L. subsp. *lyciodes*, *Rosmarinus officinalis* L. Mientras que en incendio de Remolinos-Tauste, se caracterizaba por ser un área de matorral, cuyas principales especies dominantes eran *Genista scorpius* L., *Retama sphaerocarpa* L., *Rosmarinus officinalis* L., *Gypsophila struthium* Willk subsp. *hispanica*, *Ononis tridentata* L., y *Quercus coccifera* L. y algunos parches en los que aparece el *Pinus halepensis* Mill. y *Quercus ilex* L. subsp. *ilex*.

El clima es Mediterráneo continental, con una media anual de lluvia de 450 mm con una variación de temperatura de -7.1° C a 36.5° C. La ETP está alrededor de 1406 mm (usando el método de Penman Monteith, FAO56) y esta aumenta por los vientos que se dan en la zona los cuales hacen que el déficit de agua de esta área sea unos de los mayores de Europa (Herrero and Synder, 1997). Las unidades geomorfológicas (200 y 748 msnm) son plataformas carbonatadas y formaciones evaporíticas del terciario y vales, es decir, valles de fondo plano. Respecto a los suelos, tenemos por un lado, los suelos calizos, cuyo material parenteral es *Rendzic Phaeozem* con textura franco arcilloso, clasificado con horizontes Ah. Y por otro lado, tenemos suelos yesíferos, cuyo material parenteral es *Haplic Gypsisols* (IUSS, 2007), con textura franca y clasificada con horizontes Ah (Badía et al., 2013).

4. Diseño metodológico del área de estudio

Se decidió la instalación de una serie de parcelas-test y se abordó el estudio experimental de una serie de parámetros e indicadores, relacionados con el objetivo de la tesis. A continuación se detallan las fases del trabajo realizado:

- Recopilación bibliografía relacionada con el tema de los incendios forestales y sus consecuencias ambientales.
- Recorrido detallado por el área incendiada para identificar áreas-test sobre las que llevar a cabo el trabajo experimental.
- Utilización y tratamiento de imágenes de satélite y ortoimágenes, para la delimitación y la zonificación del incendio en función de su severidad.

- Instalación de transectos de vegetación para el análisis evolutivo de la regeneración vegetal, según una serie de parámetros tales como pendiente, exposición, segmento de ladera y severidad del fuego.
- Campañas de recogida de muestras de suelos, correspondientes a diferentes escenarios quemados (quemado con cenizas, quemado con cenizas y acículas, quemado con musgo y control) y su posterior análisis de laboratorio, con el objetivo de evaluar los cambios físicos y químicos como consecuencia del fuego.
- Campaña de campo destinada a analizar el comportamiento de la infiltración del agua en el suelo mediante el uso de un infiltrómetro. Previamente se seleccionaron los escenarios espaciales para llevar a cabo el trabajo (quemado con cenizas, quemado con cenizas y acículas, quemado con musgo y control, contando además con la pendiente, exposición y micro topografía del terreno).
- Campañas de simulaciones de lluvia para evaluar los efectos hidrogeológicos sobre litologías calizas, en ambas situaciones (quemado y no quemado) y aplicando tratamientos de acolchado.

5. Resultados publicados

Los resultados obtenidos procedentes de las dos áreas experimentales (incendios de 2008 y 2009) y bajo tipos de suelos diferentes (yesosos y calcáreos) localizadas en los Montes de Castejón, pueden quedar recogidos en las siguientes publicaciones realizadas por el doctorando y sus directores:

1. J. León, M.T. Echeverría, D. Badía, C. Martí, C. Álvarez, 2013. Effectiveness of wood chips cover at reducing erosion in two contrasted burnt soils. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 57, 27–37.

Mediterranean ecosystems have been severely affected by fires in the last decades. Due to social and economical changes, wildfires have caused hydrological and geomorphologic changes to be more pronounced, resulting in enhanced soil erosion. Soil heating caused by fires affects soil aggregate stability, water infiltration and may generate hydrophobicity. In order to understand how wildfire affects the soil hydrological behavior in general, and infiltration and runoff processes in particular, it is advantageous to use a rainfall simulator. Over the burnt areas wood-chips mulching was applied in order to reduce the rain-splash, and to measure the erosion reduction. The study was carried out on gypseous and calcareous soils in northeast Spain, affected by wildfire in 2009. Results showed that gypseous soils have higher runoff and sediment production rates compared to limestone. The application of wood-chips reduced in all cases runoff and sediment yield and the effect of fire on water repellency was apparent especially on calcareous soils.

2. J. León, M.B. Bodí, A. Cerdà, D. Badía, 2013. The contrasted response of ash to wetting: the effects of ash type, thickness and rainfall events. *Geoderma*, 209–210, 143–152.

This paper analyses the role of i) ash type (black or white), ii) thickness (5, 15 and 30 mm-thick) and iii) temporal variation (0, 15 and 40 days) under three simulated rain events (55 mm for 1 h) on soil surface hydrology. The rainfall was simulated on 0.25 m² plots, and time to ponding, runoff and runoff discharge were measured. The infiltration rates, the initial infiltration rate (f_0), the steady-state infiltration rate (f_c), and the infiltration decay factor (k), were calculated and the Horton infiltration equation applied. The results show that soils covered with white ash doubled the runoff rates of soils covered with black ash. In general, runoff decreases as the ash thickness increases and the runoff decreases with the number of rainfall events after the fire in plots covered with white ash. Ponding time and k are positively correlated by the ash thickness and f_0 and f_c are correlated by the rainfall events (in three runs). Ash type and ash depth are key factors on the soil hydrology after a wildfire.

3. J. León, M. Seeger, D. Badía, P. Peters, M. T. Echeverría. 2014. Thermal shock and splash effects on burned gypseous soils from the Ebro basin (NE Spain). *Solid Earth*, 5, 131–140.

The aim of this research is to analyze the effects of moderate heating on physical and chemical soil properties, mineralogical composition and susceptibility to splash erosion. Topsoil samples (15 cm depth) were taken in the Remolinos mountain slopes (Ebro Valley, NE Spain) from two soil types: *Leptic Gypsisol* (LP) in a convex slope and *Haplic Gypsisol* (GY) in a concave slope. To assess the heating effects on the mineralogy we burned the soils at 105° and 205° C in an oven and to assess the splash effects we used a rainfall simulator under laboratory conditions using undisturbed topsoil subsamples (0–5 cm depth of Ah horizon). LP soil has lower soil organic matter (SOM) and soil aggregate stability (SAS) and higher gypsum content than GY soil. Gypsum and dolomite are the main minerals (>80 %) in the LP soil, while gypsum, dolomite, calcite and quartz have similar proportions in GY soil. Clay minerals (kaolinite and illite) are scarce in both soils. Heating at 105° C has no effect on soil mineralogy. However, heating to 205° C transforms gypsum to bassanite, increases significantly the soil salinity (EC) in both soil units (LP and GY) and decreases pH only in GY soil. Despite differences in the content of organic matter and structural stability, both soils show no significant differences ($P < 0.01$) in the splash erosion rates. The size of pores is reduced by heating, as derived from variations in soil water retention capacity.

4. J. León, A. Cerdà, M. Seeger, D. Badía, 2014. Applications of rainfall simulators to study areas affected by forest fires. *FLAMMA*, 5 (3), 116-120, 2014. ISSN 2171 - 665X.

Rainfall simulators are tools that have been in use since the 1930s. There are many models of rainfall simulators used in studies, including those that evaluate how soils are affected by wildfires. In this paper we characterize three models of rainfall simulators to compare the results obtained. These were used in three experiments; on burned soils, in the field and in the lab. From these experiments, we conclude that mulching of wood-chips on burned soils decreases erosion, soil heating increases the splash erosion and an ash cover reduces water runoff and soil losses.

5. J. León, M.T. Echeverría, D. Martín, D. Badía, 2013. Tools for assessing areas affected by forest fires. *FLAMMA*, 4 (3), 132-138, 2013. ISSN 2171 - 665X.

This paper presents tools for assessing and placing protection and rehabilitation treatments. With this objective, mapping-based models will be implemented in order to help technicians, researchers or forestry staff to identify the most vulnerable areas. Fire-affected areas are classified according to the degree of soil burn severity, with the help of satellite images (Landsat-TM, 30 m), soil information, the characteristics of plant communities and land use. Also, with this information, ecosystem vulnerability is modeled at the same spatial resolution. Furthermore, the model allows evaluating the temporal response of the different rehabilitation treatments or measures implemented. This experience was carried out in Formile Fire (Boulder, CO; USA), in September 2010. A series of measurements to reduce soil erosion risk are proposed, by selecting a number of areas according to soil burn severity and applying aero-mulching treatments (straw and wood chips). This treatment was repeated twice a year and evaluated a year later, with satisfactory results in the mulching-treated areas. The quality of the results depends on the update, quality and resolution of data required for the construction of the data layers included in the model.

6. J. León, M.T. Echeverría, C. Martí, D. Badía, 2014. Can ash control infiltration rate after burning? An example in burned calcareous and gypseous soils in the Ebro basin (NE Spain). *Catena*, in press.

The aim of this work is to determine the effect of the ash cover on infiltration rates. A single ring infiltrometer was used immediately after a wildfire and before the first storm events to determine the soil infiltration rate. A total of 24 infiltrations were made (2 soil types x 2 treatments x 6 replicates). In each infiltration experiment, the soil wetting front, the bulk density and stoniness were also measured. The results show that the final infiltration rate (f_c) values are higher in calcareous soils than in gypseous soils. The ash cover in calcareous burned soils only temporarily decreases the bulk density of topsoil and enhances infiltration.

Los artículos que se presentan están dedicados a evaluar el comportamiento hidrogeomorfológico de suelos afectados por incendios forestales (los cuatro primeros y el último), empleando como principal herramienta de análisis la lluvia simulada y la infiltración, mientras que el quinto artículo versa sobre modelos de detección y evaluación de suelos afectados por incendios forestales, mediante la aplicación de modelos en entornos SIG (Sistemas de Información Geográfica), con la ayuda de imágenes de satélite.

6. Conclusiones

Se puede concluir que los suelos yesosos presentan valores más altos de escorrentía y producción de sedimentos que los calcáreos. La aplicación de acolchado en ambos tipos de suelo después de un incendio forestal reduce las tasas de escorrentía, por lo tanto, el acolchado es muy eficaz. Los resultados de este tipo de aplicación han de ser tomadas en cuenta a la hora de regenerar las condiciones ecológicas pre-existentes al incendio, especialmente en ecosistemas frágiles como la zona en la que se localiza el proyecto, en un entorno semiárido y de suelos poco desarrollados. Además, sería interesante aplicar el acolchado junto con semillado adaptado a las condiciones edafoclimáticas de la zona quemada, de manera que estas medidas promueven la estabilización del suelo.

La catena caliza tenía un horizonte Ah orgánico muy rica, bien estructurado y de color oscuro, con un alto contenido total de limos. La designación de los horizontes yípsicos requiere un cierto porcentaje de yeso pedogénico (1% v / v), una medida que puede ser difícil de realizar en suelos ricos en yeso utilizando métodos de campo estándar.

Se han realizado una serie de experimentos llevados a cabo con simuladores de lluvia sobre suelos contrastados. Las conclusiones son las siguientes: i) el uso de astillas de madera da lugar a una clara reducción de las pérdidas de suelo, ii) la temperatura (200 ° C) aumenta la erosión por salpicadura y iii) la ceniza puede proteger el suelo contra la erosión y la pérdida de los recursos hídricos. Este trabajo destaca la importancia de conocer las características de la lluvia natural para comparar los resultados y el desarrollo de la medición y experimentos precisos.

Por último, el Modelo de Vulnerabilidad Edáfica es una herramienta útil, sencilla y complementaria del Soil Burn Severity, ofrece mayor información y, usando alta resolución espacial, permite obtener cartografía de alto detalle. Los resultados para esta zona son muy realistas, pese a la resolución espacial (30 m), y su verificación en campo da buen resultado. Por ello, es una herramienta recomendable para programar medidas correctoras y rehabilitar áreas afectadas por incendios forestales.

Referencias Bibliográficas:

- Abad, N., Bautista, S., Blade, C., Caturla, R.N. (2000): Seeding and mulching as erosion control techniques after wildfires in the Valencia region. In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M. (Eds.), Mediterranean Desertification Research Results and Policy Implications. Directorate-General Research, vol. 2. European Commission, Brussels, pp. 419–429.
- Aznar, J.M., González-Pérez, J.A., Badía, D., Martí, C. (2014): At what depth are the properties of a gypseous forest topsoil affected by burning? Land Degrad. Dev. DOI: 10.1002/ldr.2258.
- Cerdà, A. (1999): Simuladores de lluvia y su aplicación a la Georfología. Estado de la cuestión. Cuadernos de Investigación Geográfica, 25: 45-84.
- Doerr, S.H., Ferreira, A.J.D., Walsh, R.P.D., Shakesby, R.A., Leighton-Boyce, G., Coelho, C.O. A. (2003): Soil water repellency as a potential parameter in rainfall–runoff modelling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal. Hydrological Processes 17, 363–377.
- Iserloh, T., Ries, J.B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M.T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J.A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lázaro, R., León, F.J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Regüés, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-Benet, A., Wengel, R., Wirtz, S. (2013): European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. Catena 110, 100-112.
- Shakesby, R. (2011): Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. Earth-Sci. Rev. 105, 71-100.