Geografía: Cambios, Retos y Adaptación
AGE y Universidad de La Rioja
pp. 311-317 (2023)

XXVIII Congreso de la Asociación Española de Geografía
ISBN 978-84-09-53925-3
DOI: 10.21138/CG/2023.lc

RESPUESTA DEL CAUDAL EN ESPACIOS MARGINALES DE LA MEDIA MONTAÑA MEDITERRÁNEA: ESTUDIO COMPARATIVO DE PEQUEÑAS CUENCAS

NOEMÍ LANA-RENAULT (id)[1]
ESTELA NADAL-ROMERO (id)[2]
CARMELO JUEZ (id)[2]
JOSÉ A. LLORENTE-ADÁN (id)[1]
DAVID REGÜÉS (id)[2]
PURIFICACIÓN RUIZ-FLAÑO (id)[1]
JOSÉ ARNÁEZ (id)[1]
JORGE LORENZO-LACRUZ (id)[1]

[1] *Área de Geografía Física. Universidad de La Rioja, 26004-Logroño*
[2] *Instituto Pirenaico de Ecología (IPE, CSIC), Campus de Aula Dei, Avda. Montañana, 1005, 50059-Zaragoza*

Autor de correspondencia: noemi-solange.lana-renault@unirioja.es

Resumen. El abandono de tierras de cultivo conlleva generalmente un incremento de la vegetación natural, con importantes implicaciones medioambientales. En este trabajo se estudia la respuesta del caudal en 5 cuencas de media montaña (< 3 km^2) en el Pirineo Central y el Sistema Ibérico. Tres de ellas representan escenarios de abandono de tierras: recolonización vegetal (Arnás), repoblación forestal (Araguás-repoblación) y terrazas de cultivo abandonadas (Munilla); una cuarta cuenca, cubierta por bosque natural (San Salvador), se corresponde con un ambiente no alterado; la quinta cuenca, ocupada por cárcavas (Araguás), representa el ambiente más degradado. Mientras que Arnás y Araguás-repoblación produjeron crecidas a lo largo de todo el año (13 y 18 respectivamente), en San Salvador (4) y Munilla (6) la respuesta en verano fue inexistente. Araguás registró un mayor número de crecidas (> 25), distribuidas a lo largo de todo el año. Los picos de caudal fueron muy superiores en Araguás, con tiempos de respuesta y recesión muy rápidos. Los picos de caudal siempre fueron más elevados en Arnás que en Araguás-repoblación, si bien en condiciones húmedas y precipitaciones intensas fueron similares. En ambas cuencas los tiempos de respuesta y recesión fueron relativamente cortos en condiciones secas. Las crecidas en San Salvador y Munilla se caracterizaron por tiempos de repuesta lentos y recesiones muy largas, indicando el predominio de escorrentía subsuperficial.

Palabras clave: caudal, crecida, cuenca de cabecera, abandono de tierras, montaña media mediterránea.

STREAMFLOW RESPONSE IN MARGINAL AREAS OF THE MEDITERRANEAN MID MOUNTAINS – A COMPARATIVE STUDY IN SMALL CATCHMENTS

Abstract. Farmland abandonment usually leads to vegetation expansion with important environmental consequences. In this study, we looked at the streamflow response of 5 small catchments (3 km^2) in the Central Pyrenees and Iberian Range. Three represent scenarios of land abandonment: vegetation recovery (Arnás), afforestation (Araguás-repoblación) and abandoned agricultural terraces (Munilla); another one, covered by natural forest (San Salvador), represents an non-disturbed environment; the las catchment, with a large proportion of badlands, is representative of a degraded environment. Whereas Arnás and Araguás registered floods all over the year (13 and 18, respectively), in San Salvador (4) and Munilla (6) the response in the summer was inexistent. Araguás registered the highest number of floods (> 25), spread through the whole year. The highest peakflows were observed in Araguás, with very short response times and recessions. Peakflows were

always higher in Arnás than in Araguás-repoblación, although under wet conditions and intense rainfall, they were similar. In both catchments response times and relatively short, especially in dry conditions. Floods in San Salvador and Munilla were characterized by slow response times and long recessions, suggesting the predominance of subsurface flows.

Keywords: streamflow discharge, flood, headwater catchment, land abandonment, Mediterranean mid mountain.

1. INTRODUCCIÓN

El abandono de tierras de cultivo es el cambio de uso más importante ocurrido en la media montaña mediterránea en el último siglo (García-Ruiz y Lana-Renault, 2011; Lasanta *et al*., 2017). A lo largo de este proceso, los antiguos campos cultivados y las áreas de pastoreo han sido recolonizadas progresivamente y de manera espontánea por matorrales y bosques. En otros muchos casos, las antiguas zonas cultivadas fueron ocupadas por repoblaciones forestales, con el fin de controlar los procesos de degradación del suelo tras el abandono. Así, amplias zonas de cabecera han sido revegetadas, con importantes implicaciones medioambientales. El aumento de la vegetación ha conllevado, en la mayor parte de los casos, una disminución en la producción de escorrentía y los picos de caudal (García-Ruiz *et al.*, 2011; Lana-Renault *et al*., 2020); asimismo, se ha observado una disminución del aporte de sedimentos a los cauces (Quiñonero-Rubio *et al*., 2016), con notables alteraciones en la geomorfología fluvial (Sanjuan *et al*., 2016). El abandono de cultivo en la media montaña mediterránea afecta tanto a campos en pendiente como a laderas aterrazadas. En éstas últimas, el efecto del abandono es complejo puesto que la construcción de las terrazas supuso una alteración de la topografía original dando lugar, tras el abandono, a nuevas dinámicas hidro-geomorfológicas (Moreno-de-las-Heras *et al*., 2019), según el tipo de terraza y la evolución de la cubierta vegetal. La variedad de paisajes abandonados conlleva una importante incertidumbre a la hora de evaluar las consecuencias hidrológicas del abandono de tierra de cultivos en las zonas de montaña.

En este trabajo, se analiza la respuesta de caudal en tres cuencas de pequeño tamaño, representativas de diferentes ambientes abandonados en espacios marginales de la media montaña mediterránea (revegetación espontánea por matorral, repoblación forestal, terrazas de cultivo abandonadas), y se comparan los resultados con una cuenca no alterada y cubierta por bosque natural, y otra cuenca con una importante superficie de zonas degradas (cárcavas). Trabajar a escala de pequeña cuenca tiene importantes ventajas (Latron y Lana-Renault., 2018) ya que: i) es una unidad del paisaje que permite controlar entradas y salidas y, por lo tanto, elaborar fácilmente balances de agua y sedimentos, ii) posibilita integrar la información entre laderas y cauces, y iii) el tamaño reducido permite estudiar unidades espaciales que son homogéneas en cuanto a litología, cubierta vegetal y condiciones climáticas. Así, las cuencas de estudio tienen tamaños y topografía similares y, salvo la cuenca en terrazas abandonadas, se encuentran todas ellas muy próximas entre sí, de manera que comparten las mismas condiciones climáticas.

2. MÉTODOS

2.1. Las cuencas y el equipamiento

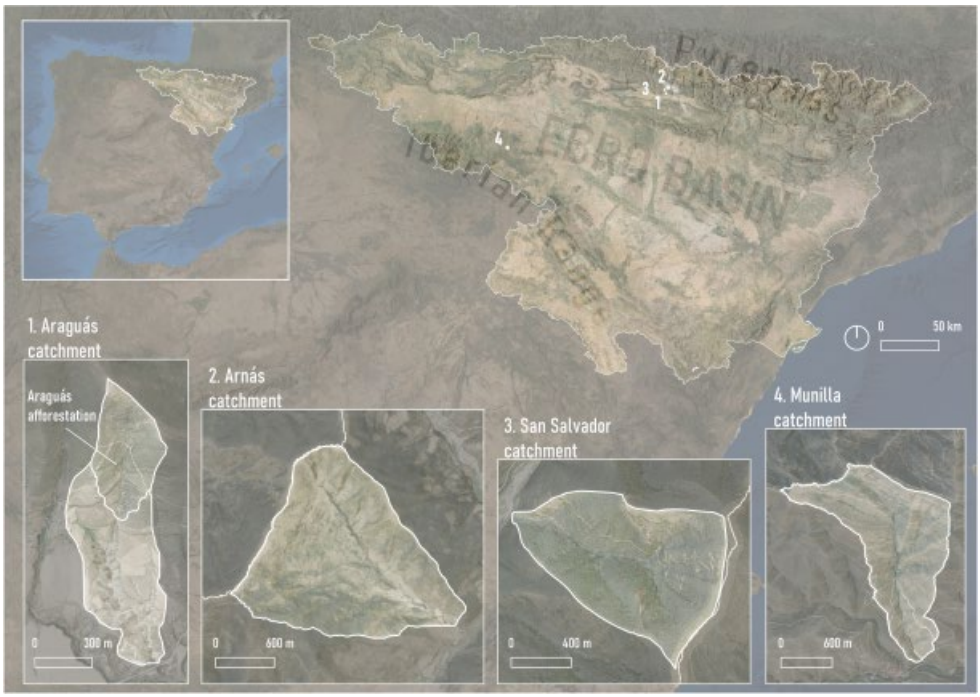
Las cuencas de Arnás, Araguás-repoblación, Araguás y San Salvador se encuentran en la parte alta del río Aragón, en el Pirineo central (Figura 1), entre 875 y 1340 m s.n.m.. El sustrato es flysch eoceno, salvo en Araguás, que está compuesto por margas eocenas. La temperatura media anual es de 10 ºC y la precipitación media está comprendida entre 750 y 950 mm, con máximos en otoño y primavera y frecuentes tormentas estivales.

- Arnás (2,84 km^2), monitorizada desde 1996, es representativa de un ambiente de campos abandonados sujetos a una recolonización vegetal espontánea, y constituye un mosaico de matorrales (64%) con diferentes densidades de cubierta y bosques (27%), distribuidos en la cuenca en función de la topografía y las características de los suelos.
- Araguás-repoblación (0,12 km^2), monitorizada en 2007, fue antiguamente cultivada y reforestada en los años 60, de manera que actualmente el 75% de su superficie está cubierto por pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y pino laricio (*Pinus nigra*).

- En Araguás (0,45 km^2), monitorizada desde 2004, las cárcavas representan el 25% de su superficie, por lo que puede considerarse como representativa de un ambiente degradado.
- San Salvador (0,92 km^2), monitorizada desde 1998 y cubierta totalmente por pino silvestre (*P. sylvestris*), quejigo (*Quercus faginea*) y hayas (*Fagus sylvatica*), constituye un ambiente sin alterar.

La cuenca de Munilla (1,92 km^2), monitorizada a partir de 2012 y ocupada por antiguas terrazas de cultivo, se localiza en el valle del Cidacos, en el Sistema Iberico riojano, entre 775 y 1175 m s.n.m.. La litología está compuesta por materiales secundarios de la facies Weald (margas, limonitas y estratos de areniscas calcáreas). La temperatura media está en torno a 10 ºC y las precipitaciones anuales se encuentran en torno a 450 mm, con un carácter marcadamente equinoccial. Las formaciones vegetales actuales consisten en prados de diente y formaciones más o menos densas de matorral de recolonización compuestas básicamente por aliagas (*Genista scorpius*) o jaras (*Cistus laurifolius*). Las terrazas ocupan el 40% de la superficie de la cuenca y están delimitadas por un muro de piedra de entre 1 y 4 m de altura en función de la pendiente de la ladera.

Figura 1. Localización de las cinco cuencas de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Las cinco cuencas están equipadas con un instrumental que incluye: i) pluviómetros de balancín instalados en el sector bajo y alto de cada cuenca; ii) sensores de humedad y temperatura del aire y, en el caso de Arnás, San Salvador y Munilla, una estación meteorológica completa dotada, además, de un piranómetro y un anemómetro; iii) una estación de aforo a la salida de la cuenca con sensores de presión para medir la altura de la lámina de agua y estimar los caudales; iv) piezómetros con sensores de nivel para medir la altura del nivel freático en diferentes puntos de la cuenca. En Arnás, San Salvador, Araguás y Munilla, se dispone de sistemas para medir el transporte de sedimentos. Todos estos aparatos están conectados a *dataloggers* que registran la información de manera continua y la almacenan a un paso de tiempo 10-minutal.

2.2. Análisis de datos

Se seleccionaron, en cada cuenca, tres años con precipitaciones anuales promedias y que presentan las series de precipitación y caudales más completas. El análisis de la respuesta de caudal se llevó a cabo a escala de crecida. Las crecidas se definieron como un aumento de caudal ante un evento pluviométrico superior a 5 mm, y se identificaron visualmente a partir del hidrograma obtenido a un paso de tiempo 10-

minutal. Para la separación del hidrograma de crecida se utilizó el método de Hewlett y Hibbert (1967) con una pendiente constante igual a 1.83 l s^{-1} km^{-2} $día^{-1}$, tal y como proponen Latron *et al*. (2008).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cuenca de Araguás (ambiente degradado) fue la que produjo un mayor número de crecidas (un promedio anual de 25,7), que se registraron a lo largo de todo el año (Tabla 1). El número promedio de crecidas en Arnás (13) y Araguás-repoblación (18,3), ambas representativas de ambientes revegetados tras el abandono de cultivos, fue muy superior al de un ambiente de bosque natural (3,7), mostrando claramente que el comportamiento de estos ambientes renaturalizados todavía está lejos de ser como el de un ambiente natural, a pesar de presentar una importante cubierta vegetal. Es interesante observar cómo Araguás-repoblación, cubierta en su mayor parte por bosque, responde con más frecuencia a los eventos pluviométricos, sugiriendo una mayor facilidad para generar escorrentía que Arnás. La cuenca de Munilla (terrazas abandonadas) produjo un número reducido de crecidas (6 de promedio), ligado al comportamiento hidrológico de las laderas aterrazadas, así como a una menor precipitación que las cuencas pirenaicas.

En todos los casos, la primavera fue la estación con una mayor respuesta del caudal, y el verano y el otoño las que presentaron una respuesta más limitada. Esta estacionalidad en los caudales ha sido analizada en profundidad en estudios previos (García-Ruiz *et al*., 2008; Nadal-Romero *et al*., 2008; Lana-Renault *et al*., 2014), en los que se ha demostrado que los caudales en estos ambientes guardan una estrecha relación con las reservas hídricas de la cuenca, de manera que es en la primavera cuando las condiciones de humedad del suelo son más elevadas y explican la mayor respuesta del caudal. A lo largo del verano, las reservas hídricas del suelo van disminuyendo debido a una menor precipitación y una mayor evapotranspiración ligada a las altas temperaturas y, por lo tanto, su contribución a la generación de escorrentía es mínima. Por el contrario, los eventos pluviométricos de alta intensidad, típicos en esta época del año, pueden generar escorrentía sobre áreas desprovistas de vegetación y con suelo degradados. Ello explica la mayor ocurrencia de crecidas en esta época del año en Araguás (con una gran superficie de cárcavas), en menor medida en Arnás y Araguás-repoblación (revegetadas pero con algunas zonas que conservan todavía escasa vegetación y/o suelos más degradados), y la ausencia o casi ausencia de crecidas en San Salvador, cubierta totalmente por bosque natural. En Munilla, la época con un menor número de crecidas es el otoño, cuando las reservas hídricas de la cuenca alcanzan sus valores mínimos.

Tabla 1. Número promedio de crecidas registradas en cada cuenca, anual y estacionalmente.

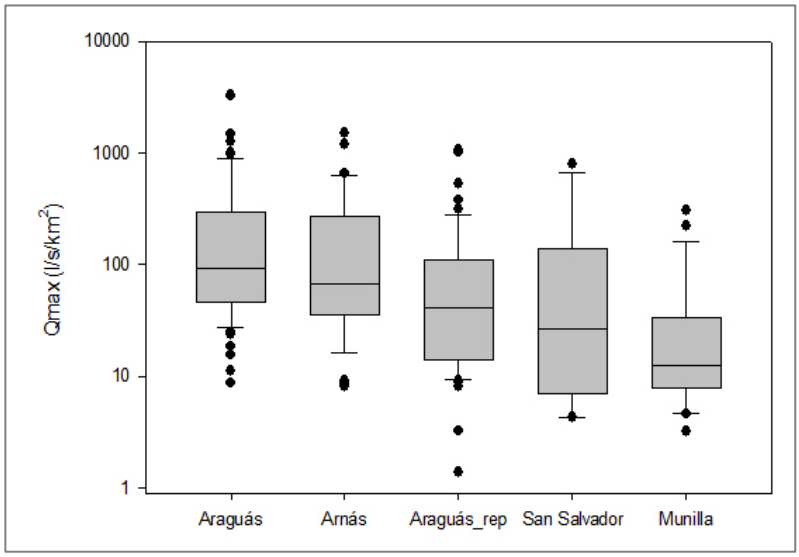
Cuenca	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Año
Araguás	11	3,7	5,3	6,7	25,7
Arnás	6,0	2,3	1,7	3,0	13
Araguás-repoblación	9,3	2,3	2,7	4,0	18,3
San Salvador	1,3	0	1,0	1,3	3,7
Munilla	3,0	1,3	0,5	1,3	6

Fuente: Elaboración propia.

Las características de las crecidas fueron muy contrastadas entre los ambientes estudiados. La Figura 2 sugiere que existe una relación inversa entre la magnitud del pico de caudal y la cubierta vegetal. aunque la cuenca de Munilla demostraría un comportamiento distinto como consecuencia de las diferencias morfológicas y litológicas. Así, los picos de caudal fueron muy superiores en Araguás (mediana 97 l/s/km^2), con máximos que pudieron alcanzar, bajo precipitaciones muy intensas (65 mm/h en 5 min), los 3000 l/s/km^2. En Arnás, los picos de caudal fueron superiores (mediana 68 l/s/km^2) a los de las cuencas forestales, con máximos de más de 1500 l/s/km^2 bajo condiciones de humedad del suelo elevadas o precipitaciones intensas. Es interesante observar que los picos de caudal en Araguás-repoblación (mediana 41 l/s/km^2 y picos que pudieron alcanzar los 1000 l/s/km^2 con precipitaciones intensas o abundantes) fueron superiores a los de San Salvador (mediana 26 l/s/km^2 y picos que rara vez alcanzaron los 500 l/s/km^2), lo cual está indicando que la capacidad de las repoblaciones forestales para regular eventos extremos es más limitada que la de un bosque natural (Nadal-Romero *et al*., 2021). Por último, la cuenca de Munilla es la que registró picos de caudal más bajos, con un valor mediano de 12 l/s/km^2 y picos máximos que raramente

alcanzaron los 200 l/s/km^2. Este comportamiento está asociado con la presencia de terrazas de cultivo con suelos profundos y permeables.

Figura 2. Picos de caudal en las cuencas estudiadas (mediana, 1er y 3er cuartil, 1er y 9º decil, y datos atípicos*).*



Fuente: Elaboración propia.

Los tiempos de respuesta (definido como el tiempo transcurrido entre el centroide del evento pluviométrico y el pico de caudal) y de recesión (definido como el tiempo entre el pico de caudal y el tiempo en el que el caudal es igual a un tercio del pico) del caudal fueron también muy diferentes entre los ambientes estudiados. Si bien estos datos hay que interpretarlos con precaución porque pueden estar afectados por el tamaño y distribución de las pendientes de las cuencas, son indicativos de los procesos de generación de escorrentía dominantes en cada ambiente y confirman lo observado en estudios anteriores. Así, Araguás fue la cuenca que respondió más rápidamente (valor medio 1 h) y con recesiones más cortas (3 h), lo cual ilustra la importante contribución de flujos de escorrentía superficial (hortonianos) sobre las zonas de cárcavas (Nadal-Romero *et al*., 2018). Arnás y Araguás-repoblación respondieron algo más lentamente (2 h); sin embargo, las recesiones del caudal fueron más largas en Arnás (9 h) que en Araguás-repoblación (4h), sugiriendo la ocurrencia de procesos de escorrentía subsuperficial más lentos en Arnás, en zonas donde los suelos son más profundos (por ej., la ladera umbría con un bosque de sucesión bien desarrollado) (Lana-Renault *et al*., 2014, Nadal-Romero *et al*., 2016). San Salvador registró los tiempos de respuesta y recesión más largos (11 h, y 2 días y 6 h respectivamente), indicando claramente el predominio de flujos subsuperficiales (Serrano-Muela *et al*., 2008; Lana-Renault *et al*., 2011). Munilla se caracterizó por tiempos de respuesta relativamente lentos (6 h) y recesiones largas (11 h), sugiriendo también la ocurrencia de escorrentía subsuperficial en los suelos profundos de las terrazas.

4. CONCLUSIONES

La monitorización de pequeñas cuencas representativas de diferentes ambientes de la montaña media mediterránea (cárcavas, recolonización vegetal tras el abandono de cultivos, repoblación en antiguos campos de cultivo, bosque natural y terrazas de cultivo abandonadas) ha permitido el estudio de la respuesta del caudal en cada uno de ellos a escala de crecida. Los resultados indican respuestas muy contrastadas entre los diferentes ambientes, asociadas a diferentes procesos de generación de escorrentía (superficial, subsuperficial) dominantes. Además, muestran que no sólo la cubierta vegetal determina la respuesta hidrológica, sino también el tipo de vegetación (matorral, bosque, bosque de repoblación) y los suelos, los cuales todavía poseen características heredadas de un pasado agrícola. Estos resultados ponen de manifiesto la gran variabilidad de ambientes hidrológicamente diferenciados en la media montaña mediterránea y resalta la necesidad de considerar estas diferencias a la hora de gestionar el territorio y los recursos hídricos.

Agradecimientos: Esta investigación se ha realizado en el marco de los proyectos MANMOUNT (PID2019-105983RB- 100/AEI/10.13039/501100011033), financiado por MICINN-FEDER. y MOUNTWATER (TED2021-131982B-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y fondos Next Generation EU. Los autores agradecen al Ayuntamiento de Munilla la cesión de terreno así como su ayuda para la instalación del equipamiento.

REFERENCIAS

García-Ruiz, J.M., Lana-Renault, N. (2011). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special referent to the Mediterranean region - A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140, 317-338. http://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003

García-Ruiz, J.M., Regüés, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., Nadal-Romero, E., Navas, A., Latron, J., Martí-Bono, C., Arnáez, J. (2008). Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology,* 356, 245-260. http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.013

García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T., Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a Global Change scenario. *Earth-Science Reviews* 105, 121-139. http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006

Hewlett J.D., Hibbert A.R. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. En W.E. Sopper, H.W. Lull (Eds.), *Forest Hydrology* (pp. 275–290). UK: Pergamon Press.

Lana-Renault, N., J. Latron, D. Karssenberg, P. Serrano, D. Regüés, M.F.P. Bierkens (2011). Differences in stream flow in relation to changes in land cover: a comparative study in two sub-Mediterranean mountain catchments. *Journal of Hydrology,* 411, 366-378. http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.020.

Lana-Renault, N., Regüés, D., Serrano, P., Latron, J. (2014). Spatial and temporal variability of groundwater dynamics in a sub-Mediterranean mountain catchment. *Hydrological Processes,* 28, 3288-3299. http://doi.org/10.1002/hyp.9892

Lana-Renault, N. E. Morán-Tejeda., M. Moreno de las Heras, J. Lorenzo-Lacruz, N. López-Moreno. (2020). Land-use change and impacts. En M. Zribi, L. Brocca, Y. Tramblay, F. Molle (Eds.). *Water Resources in the Mediterranean Region* (pp-257-286). Elsevier.

Lasanta, T., Arnáez, J., Pascual, N., Ruiz-Flaño, P. Errea, P., Lana-Renault, N. (2017). Space-time process and drivers of land abandonment in Europe. *Catena,* 149, 810-823. http://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.024

Latron, J, Lana-Renault, N (2018). The relevance of hydrological research in small catchments – a perspective from long-term monitoring sites in Europe. *Cuadernos de Investigación Geográfica-Geographical Research Letters* 44 (2), 387-395. http://dx.doi.org/10.18172/cig.3499

Latron J, Soler M, Llorens P, Gallart F. (2008). Spatial and temporal variability of the hydrological response in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Hydrological Processes* 22 (6), 775–787. http://doi.org/10.1002/hyp.6648.

Moreno de las Heras, M., Lindenberger, F., Latron, J., Lana-Renault, N., Llorens, P., Arnáez, J., Romero-Díaz, A., Gallart, F. (2019) Hydro-geomorphological consequences of the abandonment of agricultural terraces in the Mediterranean region: key controlling factors and landscape stability patterns. *Geomorphology*, 333, 73-91. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.014

Nadal-Romero, E., Cammeraat, E., Serrano-Muela, M.P., Lana-Renault, N., Regüés, D. (2016). Hydrological response of an afforested catchment in a Mediterranean humid mountain area: a comparative study with a natural forest. *Hydrological Processes,* 30, 2717-2733. http://doi.org/10.1002/hyp.10820.

Nadal-Romero, E., Peña, D., Regüés, D. (2018). Rainfall, run-off, and sediment transport dynamics in a humid mountain badland area: Long-term results from a small catchment. *Hydrological Processes*, 32, 1588–1606. https://doi.org/10.1002/hyp.11495

Nadal-Romero, E., Juez, C., Khorchani, M., Peña-Angulo, D., Lana-Renault, N., Regüés, D., Lasanta, T., García-Ruiz, J.M. (2021). Impacts of Land Abandonment on Flood Mitigation in Mediterranean Mountain Areas. En M C. S. S. Ferreira, Z. Kalantari, T. Hartmann, P. Pereira (Eds.), *Nature-Based Solutions for Flood Mitigation: Environmental and Socio-Economic Aspects.* Hdb Env Chem. https://doi.org/10.1007/698_2021_772

Quiñonero-Rubio, J.M., Nadeu, E., Boix-Fayos, C., de Vente, J. (2016). Evaluation of the effectiveness of forest restoration and check-dams to reduce catchment sediment yield. *Land Degradation and Development*, 27, 1018-1031. http://doi.org/ 10.1002/ldr.2331

Sanjuán, Y., Gómez-Villar, A., Nadal-Romero, E., Álvarez-Martínez, J., Arnáez, J., Serrano-Muela, M.P., Rubiales, J.M., González-Sampériz, P., García-Ruiz, J.M. (2016). Linking land cover changes in the sub-alpine and montane belts to changes in a torrential river. *Land Degradation y* Development, 27, 179-189. http://doi.org/10.1002/ldr.2294.

Serrano-Muela, M.P., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., Regüés, D., Latron, J., Martí-Bono, C., García-Ruiz, J.M. (2008). Forests and their hydrological effects in Mediterranean mountains: The case of the Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 28 (3). https://doi.org/10.1659/mrd.0876