

ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE LA DINÁMICA HIDROLÓGICA DE UN AMBIENTE MEDITERRÁNEO DE MONTAÑA. SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A LO LARGO DE 25 AÑOS DE INVESTIGACIONES EN LAS CUENCAS DE VALLCEBRE (PIRINEO ORIENTAL)

J. LATRON, P. LLORENS, P. GARCÍA-ESTRINGANA,
M. ROIG PLANASDEMUNT, F. GALLART

Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua (IDAEA), CSIC. Barcelona, (España).
E-mail: jérôme.latron@idaea.csic.es

RESUMEN

Este trabajo presenta un breve resumen de los principales resultados sobre el estudio y la modelización de los procesos hidrológicos, obtenidos en las cuencas de investigación de Vallcebre desde 1989. Estos resultados, obtenidos con diferentes enfoques complementarios, han permitido mejorar la comprensión y la modelización del funcionamiento hidrológico de las cuencas mediterráneas de montaña y proporcionan nuevos conocimientos utilizables en la evaluación de los efectos del cambio global sobre los recursos hídricos en cuencas mediterráneas operacionales.

Palabras clave: *Procesos hidrológicos, modelización, montaña mediterránea, Cuencas de investigación de Vallcebre.*

ABSTRACT

This paper presents a brief summary of the main results obtained in the Vallcebre research catchments since 1989 in the study and modelling of hydrological processes. These results, obtained with different complementary approaches have helped to improve the understanding and modelling of the hydrological functioning of Mediterranean mountain catchments and provide new usable knowledge in assessing the effects of global change on water resources in Mediterranean basins.

Key words: *Hydrological processes, modelling, Mediterranean mountain, Vallcebre research catchments.*

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y la modelización de los procesos hidrológicos se inició hace 25 años en las cuencas de investigación de Vallcebre con el objetivo de mejorar la comprensión y la modelización de los procesos hidrológicos que rigen la estacionalidad de la respuesta en ambiente mediterráneo. La aproximación utilizada combina diferentes enfoques complementarios (aproximación hidrométrica distribuida, trazadores ambientales, modelización hidrológica) y proporciona nuevos conocimientos utilizables en la evaluación de los efectos del cambio global sobre los recursos hídricos en cuencas mediterráneas operacionales.

Este trabajo presenta un breve resumen de los principales resultados obtenidos desde 1989 sobre la dinámica espacio-temporal de la precipitación, la partición de lluvia y la transpiración forestal, la dinámica del agua en el suelo y la respuesta hidrológica, así como algunos resultados derivados de la modelización a distintas escalas espacio-temporales. Los resultados referentes a la erosión y el transporte de sedimentos se presentan en Gallart *et al.* (en este volumen).

2. LAS CUENCAS DE INVESTIGACIÓN DE VALLCEBRE

Las cuencas de Vallcebre (0,15-4,17 km², Figura 1), están situadas en un área de montaña Mediterránea del Pirineo (1300

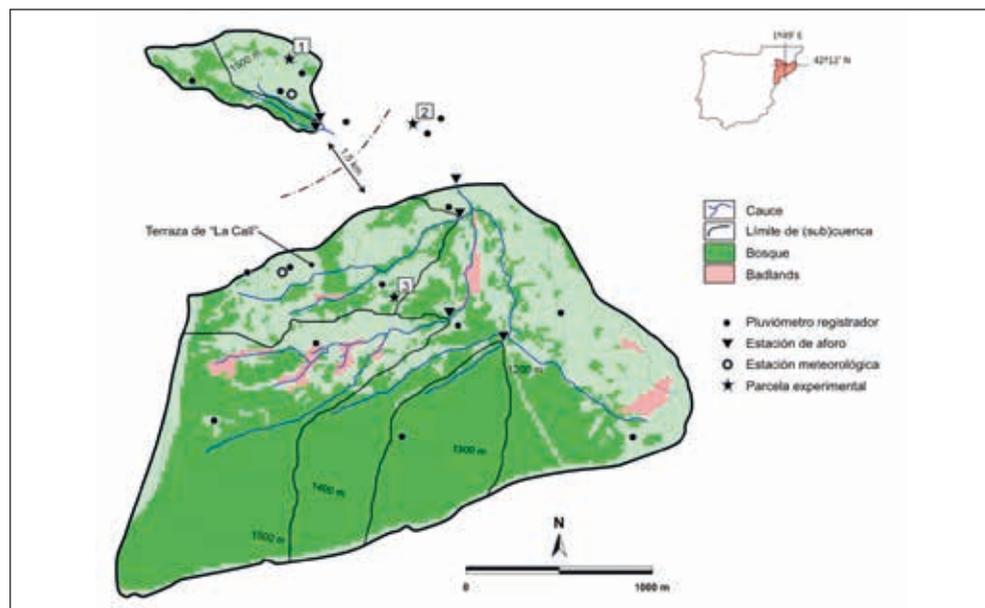


Figura 1: Mapa general de las cuencas experimentales de Vallcebre con la principal instrumentación hidrométrica. Se han indicado también las parcelas de medición de lluvia y transpiración (Parcelas de pinar de Cal Parisa (1) y Cal Rotes (3), y parcela de robledal de Cal Barrol (2)); Así como la terraza instrumentada para la medición de la variabilidad espacial de la humedad del suelo (Terraza de "La Call").

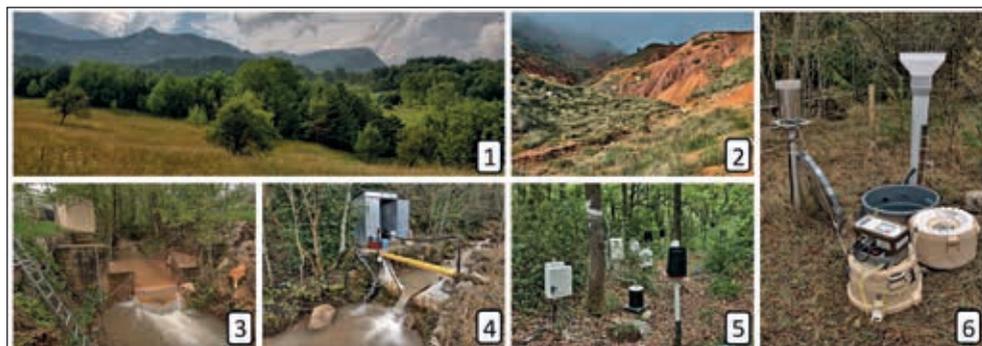


Figura 2: Vista general de las cuencas de investigación de Vallcebre (1). Vista general de un área acaravada (2). Estación de aforos de la cuenca de Cal Rodó (3). Estación de aforos de la cuenca de Can Vila (4). Red de pluviómetros registradores y anillos de escorrentía cortical con balancines para la medición de la variabilidad espacial de la partición de lluvia (5). Dispositivos para la medición y muestreo del agua de lluvia (6). Fotos: J. Latron.

m snm) con sustrato sedimentario y suelos limo-arcillosos (Rubio *et al.*, 2008). La cubierta vegetal originaria de *Quercus pubescens* Willd. en la mayor parte de la cuenca fue deforestada y aterrizada para usos agrícolas en el pasado. Actualmente la cubierta está formada principalmente por pastos y bosques de *Pinus sylvestris* L. de reforestación espontánea sobre antiguas terrazas de cultivo (Poyatos *et al.*, 2003). Las cuencas presentan también pequeñas extensiones de cárcavas (Figura 2). La precipitación media anual (1988-2013) es de 880 ± 200 mm y la evapotranspiración de referencia de 818 ± 30 mm. Existe una marcada estacionalidad que conlleva periodos con un marcado déficit hídrico en verano. En las cuencas, además de la monitorización de las variables meteorológicas, la precipitación y los caudales, se registran en continuo diversas variables de estado (humedad del suelo, tensiometría y niveles piezométricos) y flujos (partición de la lluvia y transpiración) (Figura 2). También se han realizado muestreos

intensivos del agua de lluvia, escorrentía y de diversos compartimentos hidrológicos.

3. PRECIPITACIÓN, PARTICIÓN DE LA LLUVIA Y TRANSPIRACIÓN FORESTAL

La precipitación anual se caracteriza por su alta variabilidad con un rango de variación de más de 700 mm entre valores extremos y una diferencia media entre años consecutivos de más de 200 mm. Existe también una gran variabilidad intra-anual, siendo el otoño y la primavera las dos estaciones con eventos de precipitación de mayor magnitud. A escala de evento, se ha observado una variabilidad espacial muy elevada de los totales pluviométricos durante tormentas convectivas de verano, (Latron, 2003).

La trascolación es el flujo dominante en las dos especies forestales estudiadas y representa un 74% de la precipitación incidente en los pinos y un 82% en los robles. En cambio, la escorrentía cortical

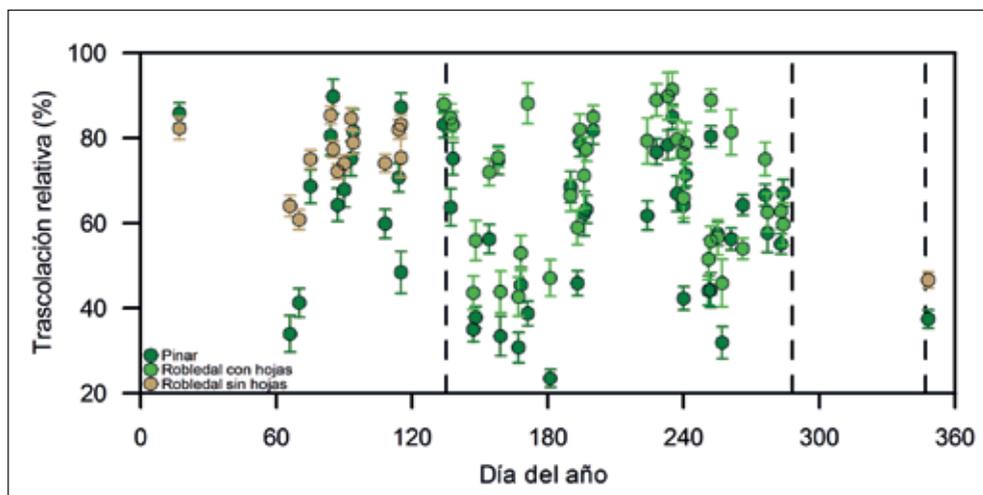


Figura 3: Trascolación relativa de los eventos registrados durante 3 años en las parcelas de roble y pino. Las líneas discontinuas verticales separan los periodos con hojas y sin hojas.

representa solo alrededor del 2% en ambas especies. Las tasas de interceptación se sitúan, por tanto, en un 25% y un 15% de la precipitación incidente en pinares y robledales respectivamente (Llorens *et al.*, 1997; 2013; Muzyló *et al.*, 2012a). Las diferencias observadas en la trascolación del roble durante el periodo con hojas y sin hojas son menores, siendo la interceptación relativa solo un 5% superior en el periodo con hojas (Figura 3). Esta pequeña diferencia es debida a una combinación diferente de factores predominantes en cada periodo. Además de las diferencias en la capacidad de saturación, la intensidad de la lluvia y la velocidad del viento, también se ha observado que los tiempos de secado de las copas son el doble de largos durante el periodo con hojas, debido a una menor ventilación dentro del dosel (Llorens *et al.*, 2014).

Durante el periodo en que se monitorizó la transpiración de ambas especies se

observó que la transpiración fue el doble en el pino que en el roble (Poyatos *et al.*, 2005). Sin embargo, el pino mostró una fuerte reducción de la transpiración al aumentar el déficit de agua en el suelo (Llorens *et al.*, 2010), poniéndose de manifiesto diferencias importantes en la respuesta fisiológica de ambas especies frente a la sequía (Poyatos *et al.*, 2008). Así mismo, el estudio de la relación entre clima y crecimiento indica un efecto de las tendencias de crecimiento pasadas, así como la eficiencia en el uso del agua sobre la resiliencia frente a la sequía, más evidente en el pino silvestre que en roble (Morán-López *et al.*, 2014).

4. DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO

A escala de cuenca, la humedad del suelo muestra un patrón temporal caracterizado por la ocurrencia de periodos de déficit marcado en verano y, eventualmen-

te menos pronunciado, en invierno (Latron *et al.*, 2009). La variabilidad espacial de la humedad del suelo (0-80 cm) es mínima en condiciones secas y durante periodos de saturación (Llorens *et al.*, 2003; García-Estringana *et al.*, 2013). Por el contrario, las mayores diferencias de humedad del suelo entre ubicaciones se observan en condiciones de humedad intermedias. La topografía y la cubierta vegetal han sido identificadas como los principales factores que controlan los patrones de humedad del suelo. Como resultado de las pérdidas por interceptación, la cubierta forestal introduce cierta variabilidad en los patrones espaciales de humedad del suelo; siendo los perfiles de humedad en el bosque, en general, más secos que los perfiles en pastos (Gallart *et al.*, 1997 y 2002). A escala local, dentro de una misma terraza, la humedad del suelo (0-30cm) disminuye al aumentar la distancia desde la parte interna de la terraza, y su variabilidad aumenta con el aumento de la humedad (Latron *et al.*, 2005). El monitoreo de la variabilidad espacial de la humedad del suelo, ha permitido establecer que, con mediciones en una cuadrícula de 10x10m, las frecuencias más adecuadas para estimar el contenido medio de agua en el suelo a escala de una terraza son de menos de 8 horas durante los periodos de humectación y de hasta un día durante los de desecación (Molina *et al.*, 2014).

Los datos de niveles piezométricos obtenidos, tanto en condiciones de sequía como en condiciones muy húmedas, muestran una marcada dinámica espacio-temporal de la capa freática con un comportamiento más heterogéneo que el observado en ambientes más húmedos. En condiciones húmedas, la variabilidad

espacial de la capa freática es baja, con una dinámica similar en toda la cuenca. Al contrario, durante los periodos secos y especialmente durante los periodos de humectación de la cuenca (cambio progresivo de seco a húmedo), la variabilidad espacial de la capa freática aumenta considerablemente, mostrando diferentes respuestas, con una temporalidad diferente entre piezómetros (Latron *et al.*, 2010).

5. RESPUESTA HIDROLÓGICA Y PROCESOS DE ESCORRENTÍA

A escala estacional y mensual, no existen relaciones simples entre los volúmenes de precipitación y escorrentía (Latron *et al.*, 2008). A escala de evento, el coeficiente de escorrentía de crecida tiene un claro patrón estacional, en el que se alterna un periodo húmedo, cuando la cuenca es hidrológicamente activa y muestra una respuesta significativa a la precipitación, y un periodo estival seco, cuando la cuenca reacciona muy poco (Gallart *et al.*, 1997; Latron *et al.*, 1997). La posición de la capa freática juega un papel importante en la relación precipitación-escorrentía; por encima de un determinado umbral, cuanto más alto está el nivel piezométrico mayor es la respuesta para una lluvia determinada. La relación entre escorrentía y nivel piezométrico es sin embargo compleja (Latron & Gallart, 2008).

El análisis de los potenciales hídricos del suelo y la dinámica de los niveles piezométricos durante crecidas representativas ha permitido identificar 3 tipos característicos de respuesta hidrológica a lo largo del año (Figura 4). En condiciones secas, la escorrentía se genera principalmente por superación de la capacidad de infiltración en áreas con baja permeabilidad

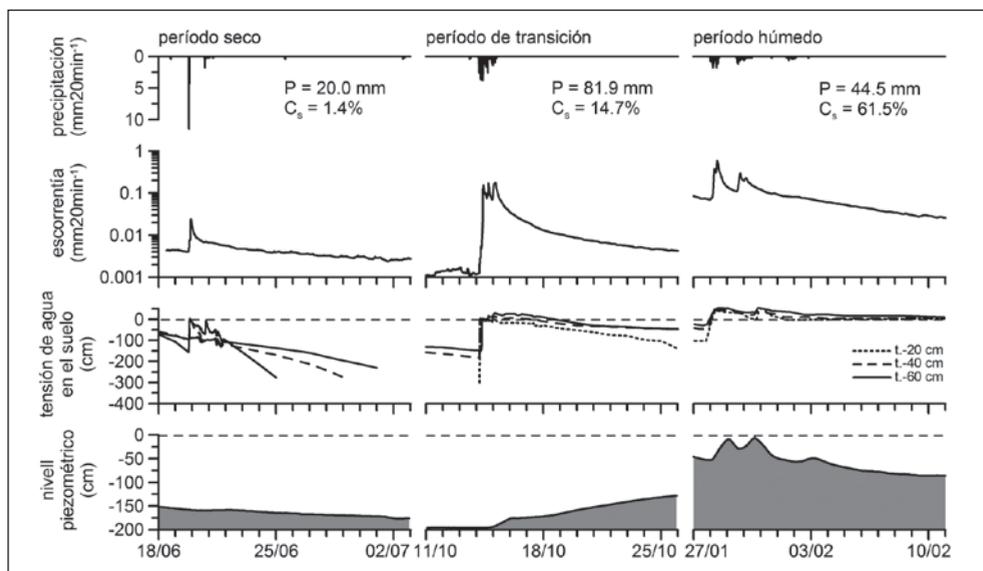


Figura 4: Dinámica de la tensión de agua en el suelo y del nivel piezométrico durante eventos en condiciones secas, de transición y húmedas. Estas dinámicas diferentes, función de las diferentes condiciones de humedad antecedente de la cuenca, provocan una respuesta hidrológica con coeficientes de escorrentía (C_s) muy contrastados (Cuenca de Can Vila, Vallcebre).

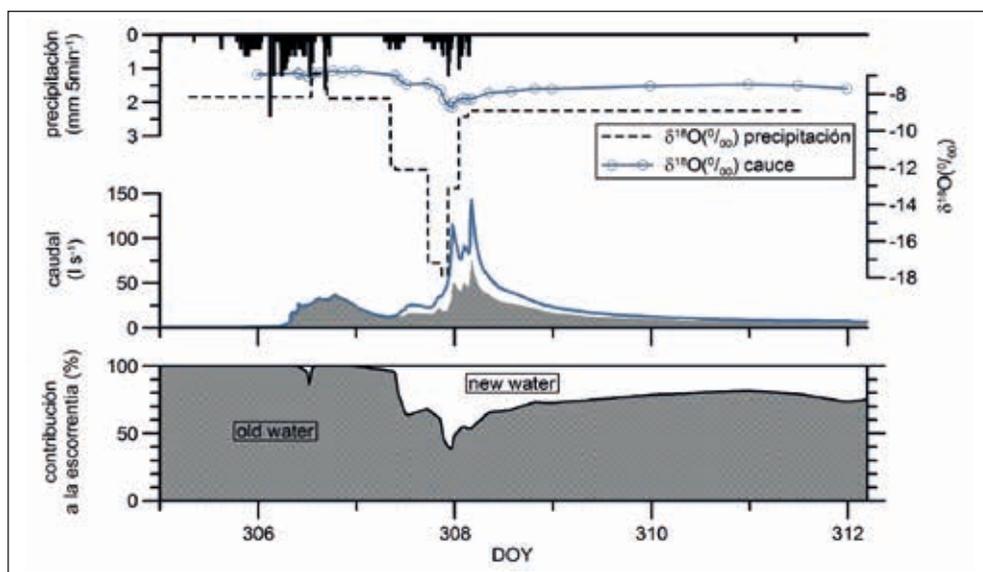


Figura 5: Evolución temporal de la señal isotópica (^{18}O) en el agua de lluvia y en la del cauce, y contribución (absoluta y relativa) del agua de lluvia ("new water") y el agua preexistente en la cuenca ("old water") a lo largo de una crecida (Cuenca de Can Vila, Vallcebre).

(principalmente las áreas de cárcavas), mientras que en condiciones de transición y húmedas predominan la escorrentía por saturación del suelo y los procesos de escorrentía dentro de las vertientes (Latron & Gallart, 2007 y 2008)

Los resultados obtenidos con el uso de trazadores ambientales indican que el tiempo medio de tránsito del agua del flujo de base en la cuenca es próximo a 10 años (Herrmann *et al.*, 1997) y que durante las crecidas, la contribución del agua preexistente en la cuenca es a menudo dominante. Las separaciones del hidrograma en 2 componentes utilizando isótopos estables (Figura 5) indican que el agua preexistente contribuye entre 30% y casi 100% a la escorrentía en función de las condiciones de humedad antecedentes, de la extensión de las áreas saturadas dentro de la cuenca y de las características de las precipitaciones (Latron *et al.*, 2014).

6. MODELIZACIÓN

Se han realizado diversos ejercicios de modelización con la finalidad de mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos o de probar la adecuación de modelos hidrológicos en condiciones de montaña Mediterránea.

La interceptación del pino silvestre se modelizó con el modelo analítico de Gash (Llorens, 1997) y con el modelo agregado BROOK (Llorens & Buchtele, 2000). Así mismo, las versiones modificadas para vegetación dispersa de los modelos de Gash y Rutter han sido aplicadas en el robledal (Muzylo *et al.*, 2012b). Los resultados obtenidos indican que los modelos de Gash y Rutter son suficientemente robustos para estimar las tasas de interceptación en con-

diciones mediterráneas, con errores similares a los obtenidos para otras especies y en otros climas. Sin embargo la precisión de dichos modelos a escala de evento es claramente inferior (Llorens *et al.*, 2013).

La evapotranspiración de un rodal de pino silvestre se modelizó con un modelo de 2 capas, utilizando una metodología que incorporaba la evaluación de la incertidumbre (Poyatos *et al.*, 2007). Recientemente, los datos de flujo de savia y de humedad del suelo del rodal de pinar han sido utilizados para mejorar un modelo mecanicista de transpiración (Sus *et al.*, 2014).

A escala de cuenca, se han probado diferentes modelos con la finalidad de valorar su capacidad de simular el balance hidrológico y la respuesta de cuencas Mediterráneas. Los resultados obtenidos con modelos agregados (Llorens, 1993; Buchtele *et al.*, 2000; Ciarapica & Todini, 2002; Ruiz-Pérez *et al.*, 2014) han evidenciado la dificultad de estos modelos en representar la estacionalidad característica de la hidrología mediterránea. Con los modelos distribuidos (Anderton *et al.*, 2002^a y 2002^b; Latron *et al.*, 2003 y 2004; Ciarapica & Todini 2002; Ruiz-Pérez *et al.*, 2014) se ha obtenido una simulación más satisfactoria de las series de caudales. Sin embargo, se ha puesto también de manifiesto la gran incertidumbre asociada a los resultados, así como la dificultad de simular correctamente las variables internas de las cuencas. Los modelos semi-distribuidos son los que han producido los resultados más interesantes desde el punto de vista del chequeo de hipótesis (Gallart *et al.*, 1994 y 1997). Estas estructuras de modelización más flexibles han permitido utilizar las variables internas para obtener

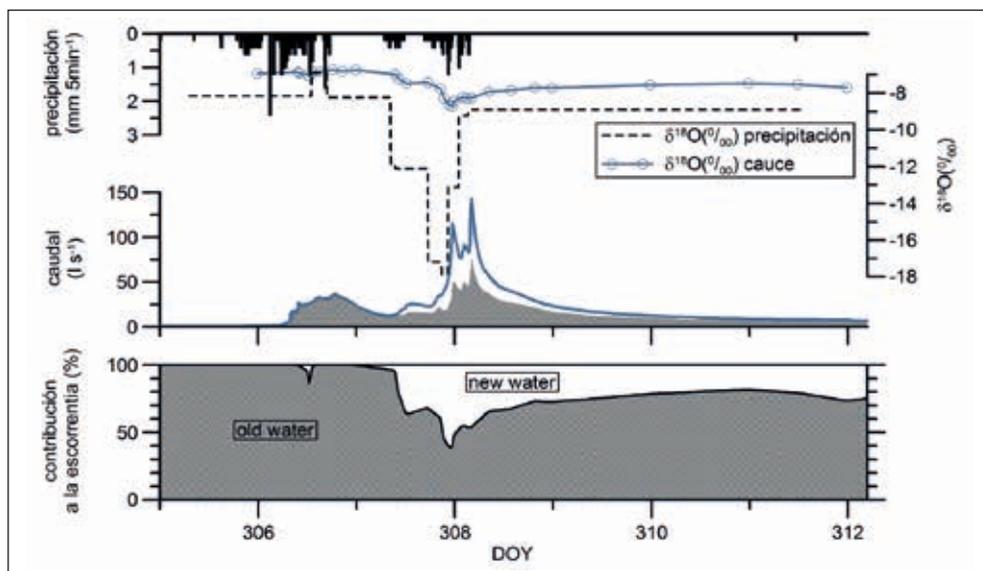


Figura 6: Caudal observado y simulado por los modelos hidrológicos TOPMODEL y TOPBAL durante un periodo de 8 meses comprendidos entre el verano y el invierno (Cuenca de Can Vila, Vallcebre).

información sobre los parámetros efectivos a escala de cuenca, con la finalidad de mejorar tanto el funcionamiento de la cuenca, como asegurar la robustez de los parámetros (Gallart *et al.*, 2007 y 2008). Por último, el reciente desarrollo del modelo TOPBAL (Llorens *et al.*, 2007; Gallart *et al.*, 2014) muestra resultados prometedores tanto en la mejora de la simulación del papel de diferentes cubiertas forestales en el balance de agua, como de la respuesta hidrológica en condiciones mediterráneas (Figura 6).

7. CONCLUSIONES

Las investigaciones realizadas en las cuencas de investigación de Vallcebre a lo largo de 25 años han permitido mejorar la comprensión y la modelización de los procesos hidrológicos que determinan la estacionalidad de la respuesta en ambiente

mediterráneo. La mejora del conocimiento y la modelización del funcionamiento hidrológico de las cuencas mediterráneas de montaña se ha realizado combinando diferentes enfoques complementarios como la aproximación hidrométrica distribuida, el uso de trazadores ambientales o la modelización hidrológica. El conjunto de resultados obtenidos proporciona nuevos conocimientos utilizables en la evaluación de los efectos del cambio global sobre los recursos hídricos en cuencas mediterráneas operacionales.

8. AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones en las cuencas de Vallcebre se han realizado con el soporte de distintos proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y la Comunidad Europea. Las cuencas experimentales de Vallcebre reciben también financiación del Convenio entre el CSIC y el Mi-

nisterio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (RESEL). J. Latron es beneficiario de un contrato dentro del programa Ramón y Cajal y M. Roig Planasdemunt de una beca FPI, ambos del MINECO. Los autores están muy agradecidos a todas las personas que han colaborado en las investigaciones realizadas durante estos 25 años en las cuencas de Vallcebre, y especialmente a: O. Ávila, X. Huguet, A. Molina, R. Poyatos, D. Regüés, C. Rubio y M. Soler.

Finalmente, los autores quieren expresar un agradecimiento muy especial a José M García-Ruiz por su contagiosa ilusión y tenacidad en el estudio geoecológico e hidrológico de las áreas de montaña.

9. REFERENCIAS

- Anderton, S. P., Latron, J., White, S. M., Llorens, P., Gallart, F., Salvany, C. & O'Connell, P. E. (2002a): Internal evaluation of a physically-based distributed model using data from a Mediterranean mountain catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6: 67-83.
- Anderton, S., Latron, J. & Gallart, F. (2002b): Sensitivity analysis and multi-response, multi-criteria evaluation of a physically-based distributed model. *Hydrological Processes*, 16 (2): 333-353.
- Buchtele, J., Buchtelova, M., Gallart, F., Latron, J., Llorens, P., Salvany, M.C. & Herrmann, A. (2000): Rainfall-runoff processes modelling using SACRAMENTO and BROOK models in the Cal Rodó catchment (Pyrenees, Spain). UNESCO, *Technical Documents in Hydrology*, 37: 15-22.
- Ciarapica, L, Todini, E. (2002): TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. *Hydrological Processes*, 16 (2): 207-229.
- Gallart, F., Latron, J., Llorens, P. & Beven, K. (2007): Using internal catchment information to reduce the uncertainty of discharge and baseflow predictions. *Advances in Water Resources*, 30: 808-823.
- Gallart, F., Latron, J., Llorens, P. & Beven, K.J. (2008): Upscaling discrete internal observations for obtaining catchment-averaged TOPMODEL parameters in a small Mediterranean mountain basin. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33: 1090-1094.
- Gallart, F., Latron, J., Llorens, P. & Rabadà, D. (1997): Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 11: 1263-1272.
- Gallart, F., Llorens, P. & Latron, J. (1994): Studying the role of old agricultural abandoned terraces on runoff generation in a Mediterranean small mountainous basin. *Journal of Hydrology*, 159: 291-303.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J., Garcia-Estringana, P. & Beven K.J. (2014): Logros y desafíos en la simulación de la humedad del suelo y los niveles freáticos mediante un modelo hidrológico semidistribuido en las cuencas de Vallcebre. *Sociedad Española de Geomorfología*.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J. & Regüés, D. (2002): Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6 (3): 527-537.
- García-Estringana, P., Latron, J., Llorens, P. & Gallart F. (2013): Spatial and temporal dynamics of soil moisture in a Mediterranean mountain area (Vallcebre, NE Spain). *Ecohydrology*, 6: 741-753.
- Hermann, A., Bahls, S., Stichler, W., Gallart, F. & Latron, J. (1999): Isotope hydrological study of mean transit times and related hydrogeological conditions in Pyrenean experimental basins (Vallcebre, Catalonia). In: C. Leibundgut, J. McDonnell & G. Schultz (Eds), *Integrated Methods in Catchment Hydrology - Tracer, Remote Sensing and New Hydrometric Techniques*. IAHS publication (Red Book Series) nº 258: 101-110.
- Latron, J. (2003): *Estudio del funcionamiento hidrológico de una cuenca mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineos Catalanes)*. Tesis Doctoral, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, 269 pp., Barcelona.

- Latron, J., Anderton, S., White, S., Llorens, P. & Gallart, F. (2003): Seasonal characteristics of the hydrological response in a Mediterranean mountain research catchment (Vallcebre, Catalan Pyrenees): Field investigations and modelling. In: E. Servat, W. Najem, C. Leduc & A. Shakeel (Eds), *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions*. IAHS publication (Red Book Series) nº 278: 106-110.
- Latron, J. & Gallart, F. (2007): Seasonal dynamics of runoff-contributing areas in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 335: 194-206.
- Latron, J. & Gallart, F. (2008): Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 358: 206-220.
- Latron, J., Gallart, F. & Llorens, P. (2004): Comment on "TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales" by L. Ciarapica and E. Todini. *Hydrological Processes*, 18: 179-182.
- Latron, J., Llorens, P. & Gallart, F. (1997): Studying spatial and temporal patterns of runoff generation processes in a mountain mediterranean basin (Vallcebre, Catalonia). In: *Ecohydrological processes in small basins*, Viville, D. & Littlewood, I.G. (Eds), UNESCO, *Technical documents in Hydrology*, 14: 93-98.
- Latron, J., Llorens, P. & Gallart, F. (2009): The hydrology of Mediterranean mountain areas. *Geography Compass*, (3) 6: 2045-2064.
- Latron, J., Martínez-Carreras, N., Llorens, P. & Gallart, F. (2010): Spatio-temporal dynamics of the shallow water table in a Mediterranean mountain catchment (Vallcebre, North Eastern Spain). In H. Holzmann, R. Godina & G. Müller (Eds) *Hydrological Responses of Small Basins to a changing environment*: 163-165.
- Latron, J., Roig-Planasdemunt, M. & Llorens, P. (2014): Understanding the changing behaviour of a Mediterranean mountain catchment using stable isotopes and hydrometric data. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 16, EGU2014-1117.
- Latron, J., Rubio, C. & Llorens, P. (2005): Relaciones entre la dinámica local de la humedad del suelo y la respuesta hidrológica a escala de cuenca. Resultados preliminares. In: J. Samper-Calvete y A. Paz González. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* Vol. VII: 69-73.
- 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: 775-787.
- Llorens, P. (1993): Hydrological implications of afforestation of abandoned lands: Water balance simulation of a small Mediterranean mountainous basin. *Geologica Acta*, 28 (2-3): 131-138.
- Llorens, P., (1997): Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. 2. Assessment of the applicability of Gash's analytical model. *Journal of Hydrology*, 199 (3-4): 346-359.
- Llorens, P. & Buchtele, J. (2000): Rainfall interception modelling with BROOK model in a Mediterranean mountainous catchment with spontaneous afforestation by *Pinus sylvestris*. UNESCO, *Technical documents in Hydrology*, 37: 125-129.
- Llorens, P., Domingo, F., García-Estringana, P., Muzylo, A. & Gallart, F. (2014): Canopy wetness patterns in a Mediterranean deciduous stand. *Journal of Hydrology*, 512: 254-262.
- Llorens, P., Gallart, F., Latron, J., Poyatos, R., Rubio, C., García-Pintado, J. & Muzylo, A. (2007): Improving the balance simulation of a Mediterranean catchment using TOPBAL, a modified version of TOPMODEL. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, EGU2007-A-08603.
- Llorens, P., García-Estringana, P., Molina, A.J., Latron, J., Domingo, F. & Gallart, F. (2013): Monitorización y modelización de la partición de lluvia por pino silvestre y roble pubescente en las cuencas de investigación de Vallcebre (Prepirineo Catalán). In F. Belmonte-Serrato & A. Romero-Díaz (Eds): *Intercepción de la*

- lluvia por la vegetación en España*. IEA. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua: 237-253. ISBN: 978-84-92988-20-4.
- Llorens, P., Latron, J. & Gallart, F. (2003): Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en un área de montaña Mediterránea. Cuencas experimentales de Vallcebre (Alto Llobregat). In: J. Álvarez-Benedí and P. Mariñero (Eds). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* Vol. VI.: 71-76.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J. & Gallart, F., (1997): Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. 1. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, 199 (3-4): 331-345.
- Llorens, P., Poyatos, R., Latron, J., Delgado, J., Oliveras, I. & Gallart, F. (2010): A multi-year study of rainfall and soil water controls on Scots pine transpiration under Mediterranean mountain conditions. *Hydrological Processes*, 24: 3053–3064.
- Molina, A.J., Latron, J., Rubio, C.M., Gallart, F. & Llorens, P. (2014): Spatio-temporal variability of soil water content on the local scale in a Mediterranean mountain area (Vallcebre, North Eastern Spain). How different spatio-temporal scales reflect mean soil water content. *Journal of Hydrology*. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.040.
- Morán-López, T., Poyatos, R., Llorens, P. & Sabaté, S. (2014). Links between climatic growth sensitivity, water use strategies and recent growth trends in Scots pine and pubescent oak. *European Journal of Forest Research*, 133 (2): 369-382.
- Muzyło, A., Llorens, P. & Domingo, F. (2012a): Rainfall partitioning in a deciduous forest plot in leafed and leafless periods. *Ecohydrology*, 5: 759–767.
- Muzyło, A., Valente, F., Domingo, F. & Llorens, P. (2012b): Modelling rainfall partitioning with sparse Gash and Rutter models in a downy oak stand in leafed and leafless periods. *Hydrological Processes*, 26 (21): 3161–3173.
- Poyatos, R., Latron, J. & Llorens, P. (2003): Land use and land cover change after agricultural abandonment - The case of a Mediterranean Mountain Area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development*, 23 (4): 362-368.
- Poyatos, R., Llorens, P. & Gallart, F. (2005): Transpiration of montane *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. forest stands measured with sap flow sensors in NE Spain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9 (5): 493-505.
- Poyatos, R., Llorens, P., Piñol, J. & Rubio, C. (2008): Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and pubescent oak (*Quercus pubescens* Willd.) to soil and atmospheric water deficits under Mediterranean mountain climate. *Annals of Forest Science*, 65 (3). DOI: 10.1051/forest:2008003.
- Poyatos, R., Villagarcía, L., Domingo, F., Pinol, J. & Llorens, P. (2007): Modelling evapotranspiration in a Scots pine stand under Mediterranean mountain climate using the GLUE methodology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146 (1-2): 13-28.
- Rubio, C., Llorens, P. & Gallart, F. (2008): Uncertainty and Efficiency of different PedoTransfer functions application to soil hydrodynamic characterization at the small catchment scale. *European Journal of Soil Science*, 59: 339–347.
- Ruiz-Pérez, G., Medici C., Latron J., Llorens P., Gallart F. & Francés F. (2014): Investigating a small Mediterranean catchment behavior using three different hydrological models as hypotheses. Submitted to *Hydrological Processes*.
- Sus, O., Poyatos, R., Barba, J., Carvalhais, N., Llorens, P., Williams, M. & Martínez-Vilalta, J. (2014): Time variable hydraulic parameters improve the performance of a mechanistic stand transpiration model. A case study of Mediterranean Scots Pine sap flow data assimilation. Submitted to *Agricultural and Forest Meteorology*.