

## RELACIONES ENTRE LA DINÁMICA LOCAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA RESPUESTA HIDROLÓGICA A ESCALA DE CUENCA. RESULTADOS PRELIMINARES

J. Latron<sup>1,2</sup>, C. Rubio<sup>1</sup> y P. Llorens<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera", CSIC. Solé i Sabaris s/n, 08028 Barcelona.

<sup>2</sup> Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC. Avda Montañana 1005, 50059 Zaragoza; jlatron@ipe.csic.es

**RESUMEN.** La cuenca de Can Vila (0.56 km<sup>2</sup>) situada en el Prepirineo ha sido monitorizada desde 1995 para la caracterización tanto de la respuesta hidrológica a su salida como de su dinámica interna. Los resultados obtenidos hasta la fecha permiten un buen conocimiento del funcionamiento hidrológico a escala de cuenca. Sin embargo, los procesos hidrológicos a escala local (terrazas) son menos conocidos, aunque la cartografía de campo de las áreas contributivas a la escorrentía ha mostrado el importante papel que tienen las terrazas en la formación de áreas saturadas. Con el objetivo de estudiar el papel de la topografía en terrazas sobre la generación de escorrentía, se ha monitorizado una terraza (1000 m<sup>2</sup>) con 128 sondas de TDR automáticas situadas en una malla regular, con la finalidad de capturar la dinámica espacio-temporal de la humedad en los 30 primeros centímetros de suelo. Asimismo, se ha instalado una pequeña estación de aforo aguas abajo de la terraza para medir la escorrentía que se produce en un pequeño canal de drenaje, con la finalidad de evaluar la conectividad hidrológica entre la terraza y el torrente principal. Resultados preliminares correspondientes a un evento intenso de verano, muestran que aunque la parte superficial del suelo presente saturación el caudal medido en el canal de drenaje es muy pequeño, ilustrando la falta de conectividad hidrológica entre el área de terrazas y el torrente para este tipo de eventos. En estas condiciones estivales, la escorrentía medida a la salida de la cuenca se genera fuera de las terrazas, concretamente en áreas de la cuenca donde aparece en superficie la roca impermeable.

**ABSTRACT.** The Can Vila research catchment (0.56 km<sup>2</sup>), located in the Pre-Pyrenees has been monitored since 1995 to study both its hydrological response and its internal hydrological dynamics. Results obtained up to now allow a rather complete understanding of the hydrological functioning of the catchment. However, local scale (terrace scale) hydrological processes have been less investigated, even if runoff contributing areas maps have shown the importance of the terraced topography in controlling the development of saturated areas. In order to study the role of the terraced topography on runoff generation, a single terrace (1000 m<sup>2</sup>) has been monitored with 128 automatic

TDR probes distributed on a regular grid, to follow the space-time dynamics of soil water content in the first 30 cm of the soil. A small gauging station has been also installed to measure runoff occurring in a ditch adjacent to the terrace, in order to evaluate the hydrological connectivity between the terrace and the main stream. Preliminary results corresponding to an intense summer storm showed that even if topsoils reached saturation, discharge measured in the ditch remained very low, showing the lack of hydrological conductivity between the terrace and the stream for this type of events. During summer conditions, most of the runoff measured at the outlet of the catchment is consequently generated outside of the terraced area, most likely on small impervious areas located close to the stream.

---

### 1. Introducción

El contenido de agua en el suelo es una variable esencial en hidrología, que tiene una influencia muy importante sobre ciertos procesos hidrológicos como las crecidas, o sobre las interacciones suelo-atmósfera (Loague, 1992; Famiglietti et al. 1998; Bárdossy y Lehmann, 1998). Además, el contenido de agua en el suelo se caracteriza por una gran variabilidad espacio-temporal (Grayson et al. 1997; Western y Grayson, 1998; Wilson et al. 2003; Western et al. 2004), que aumenta marcadamente la no-linealidad de dichos procesos hidrológicos. Frente a esta situación, a escala de cuenca es muy importante conocer la evolución espacio-temporal del contenido de agua en el suelo con la finalidad de comprender mejor el funcionamiento hidrológico de la misma. El seguimiento del contenido de agua en el suelo tendría que realizarse de acuerdo con los conocimientos hidrológicos ya adquiridos en una cuenca, y a una escala espacial y temporal suficientemente detallada para permitir un análisis conjunto de esta con las otras variables hidroclimáticas generalmente medidas en la cuenca.

El funcionamiento hidrológico de la cuenca de Can Vila ha sido estudiado durante casi 10 años. Los resultados

obtenidos hasta la actualidad muestran que la topografía en terrazas juega un rol importante en la generación de escorrentía, modificando los patrones de saturación dentro de la cuenca.

Con la finalidad de estudiar el papel de la topografía en terrazas en la generación de escorrentía, una terraza ha sido monitorizada para el seguimiento de la dinámica espacial y temporal de la humedad del suelo. Los resultados preliminares obtenidos a escala de terraza (local) se presentan aquí, así como su relación con la respuesta a escala de cuenca.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Área de estudio

La cuenca de Can Vila está situada en la cabecera del río Llobregat en el Prepirineo catalán. La cuenca tiene un área de 0.56 km<sup>2</sup>, con altitudes entre 1115 y 1458 m sobre el nivel del mar. El clima es sub-mediterráneo con unos valores medios anuales de 924 mm de precipitación y 700 mm de evapotranspiración de referencia (Gallart et al. 2002). Los suelos desarrollados sobre un substrato margoso tienen una textura franco-limosa y se caracterizan por el descenso rápido de la conductividad hidráulica en profundidad. Las terrazas de cultivo (normalmente entre 10 y 20 m de ancho) fueron construidas en el siglo XIX en más del 70% de la cuenca. La cuenca está cubierta principalmente por pastos, sin embargo, como resultado de la reforestación espontánea de las terrazas de cultivo (Poyatos et al. 2003), el bosque cubre actualmente un 34% de la cuenca.

Además de la estación de aforos y una estación meteorológica, el diseño instrumental de la cuenca, iniciado a principios de 1995, incluye varios piezómetros y

tensiómetros de registro continuo, así como una red de sondas de medida de la humedad del suelo por el método TDR.

Los resultados obtenidos hasta la actualidad (Latron et al. 2000; 2004; Gallart et al. 2002; Latron, 2003) muestran que la dinámica estacional tanto de la precipitación como de la evapotranspiración tienen una influencia importante en la respuesta hidrológica de la cuenca.

### 2.2. Seguimiento del contenido de agua en el suelo

Además de la instrumentación a escala de cuenca (Fig. 1), una terraza ha sido monitorizada con 128 sondas TDR. Esta terraza tiene una pendiente inferior al 10% y los suelos de textura franco-limosa tienen una notable homogeneidad textural, tanto lateral como vertical, y presentan una profundidad inferior a 1 m (Rubio, 2005).

Las sondas de TDR están colocadas en una red regular (2.5\*2.5m) (Fig.1), son sondas CS605 (Campbell Scientific Inc.) de 30 cm insertas verticalmente en el suelo están controladas por 2 unidades idénticas que incluyen, 9 multiplexores SDMX50 y un TDR100 conectado a un colector de datos CR10X, todos ellos de Campbell Scientific Inc. Cada unidad, controla también 18 termistores para la medida de la temperatura del suelo. Todo el sistema ha trabajado correctamente para un 80% de las sondas de humedad, produciéndose algunos problemas en las sondas localizadas en la parte interna de las terrazas durante periodos húmedos (saturación). Las medidas se registran cada 20 minutos con la finalidad de capturar las variaciones de la humedad del suelo durante los eventos lluviosos, manteniendo además una cantidad de datos recogidos razonable (12000 datos/día). El contenido de agua en el suelo se calcula utilizando la relación de Topp et al. (1980).

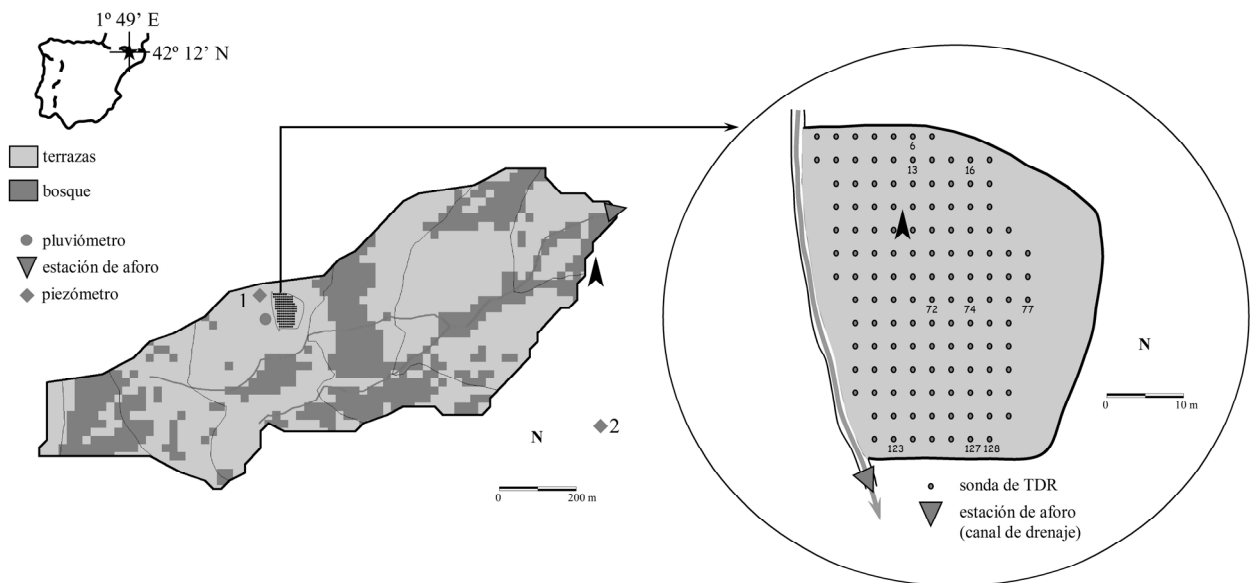
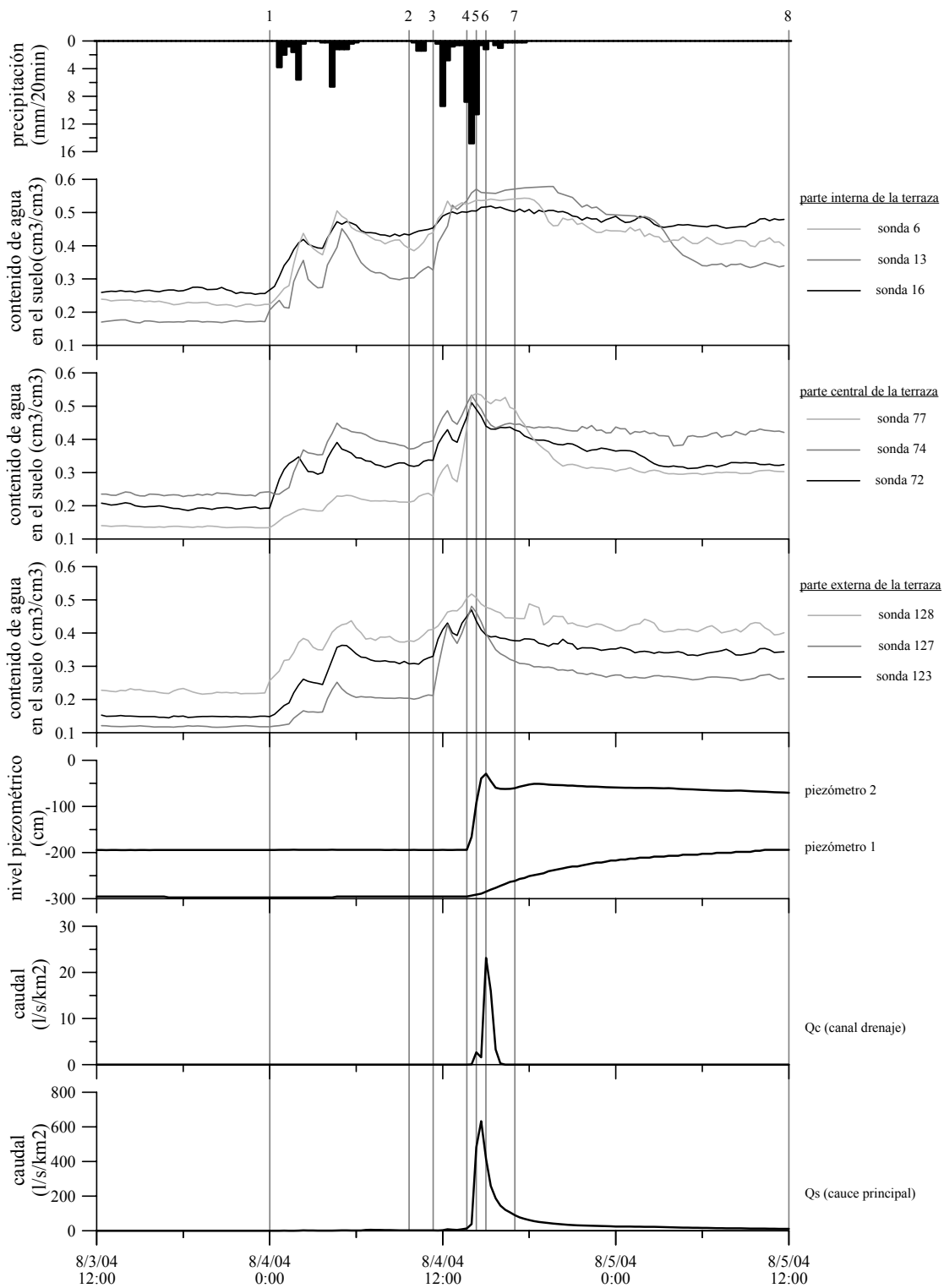


Fig. 1. Mapa de la cuenca de Can Vila mostrando la localización del instrumental y de la terraza monitorizada.



**Fig. 2.** Precipitación, contenido de agua en el suelo, nivel piezométrico y caudales correspondientes a 2 días de verano con una lluvia intensa (82 mm). El contenido de agua en el suelo se muestra para 3 sondas en la parte interna, central y externa de la terraza. Los caudales fueron medidos cerca de la terraza monitorizada (canal de drenaje) y a la salida de la cuenca (cauce principal) (véase Fig. 1 para la localización de las sondas TDR, piezómetros y estaciones de aforo). 8 pasos de tiempo (1 a 8, antes, durante y después de la tormenta) han sido seleccionados para el análisis espacio-temporal de la dinámica del contenido de agua en el suelo.

Con la finalidad de poder relacionar el comportamiento a escala local de la terraza y la dinámica a escala de cuenca, un antiguo canal de drenaje, (de 60 cm de ancho y 40 cm de profundidad) que recoge la escorrentía de la terraza, se ha equipado con una pequeña estación de aforos.

### 3. Resultados y discusión

El periodo de 2 días analizado (Fig. 2) corresponde a una tormenta de verano con condiciones iniciales secas ( $\theta=0.16 \pm 0.04 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  en el paso de tiempo 1). Después de una primera lluvia (25.4 mm) el contenido de agua en el suelo aumentó hasta  $0.30 \pm 0.07 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ , pero no hubo una respuesta significativa ni del nivel piezométrico ni del caudal (tiempo 2). El segundo episodio de lluvia (56.2 mm) provocó un rápido aumento de la humedad del suelo ( $\theta=0.54 \pm 0.07 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ , tiempo 3) que coincidió con la respuesta del nivel piezométrico y del caudal a la salida de la cuenca. Justo después de la lluvia, el contenido de agua en el suelo comenzó a disminuir progresivamente mientras que el nivel piezométrico no varió (piezómetro 2) o aumentó ligeramente (piezómetro 1). En el 8º paso de tiempo el contenido medio de humedad era similar al del tercer paso ( $\theta=0.34 \pm 0.07 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  y  $\theta=0.32 \pm 0.08 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  respectivamente).

La información distribuida que proporcionan las sondas de TDR ilustra (Fig. 3) la variabilidad del contenido de

agua en el suelo a escala local e indica la existencia de posibles diferencias en su dinámica temporal dependiendo de la posición dentro de la terraza. La parte interna de la terraza parece alcanzar valores de humedad mayores antes que la parte externa, y además permanece húmeda más tiempo después de la lluvia. La variabilidad del contenido de agua en el suelo parece ser también mayor durante condiciones intermedias (los histogramas de la Fig. 4, tiempos 2, 7 y 8 presentan un mayor número de clases que durante las condiciones secas o húmedas (tiempos 1, 4 y 5).

A escala de cuenca, la respuesta a esta lluvia estival intensa fue relativamente pequeña (coeficiente de escorrentía  $< 0.05$ ), aunque el pico de caudal alcanzó los  $633 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$  a la salida. Tal como se ha descrito anteriormente (Latron, 2003) la escorrentía en estas condiciones se produce casi exclusivamente en pequeñas áreas de cárcavas próximas al cauce. El caudal específico medido en el canal bajo la terraza fue 25 veces menor que el medido a la salida de la cuenca, indicando la contribución marginal del área de terrazas a la escorrentía total, e ilustrando la falta de conectividad hidrológica entre la terraza y el cauce en condiciones estivales. Finalmente, el pico de caudal en el canal se registró 25 minutos después del pico registrado a la salida, sugiriendo que la escorrentía que se produjo en la terraza contribuyó mayoritariamente a la recesión.

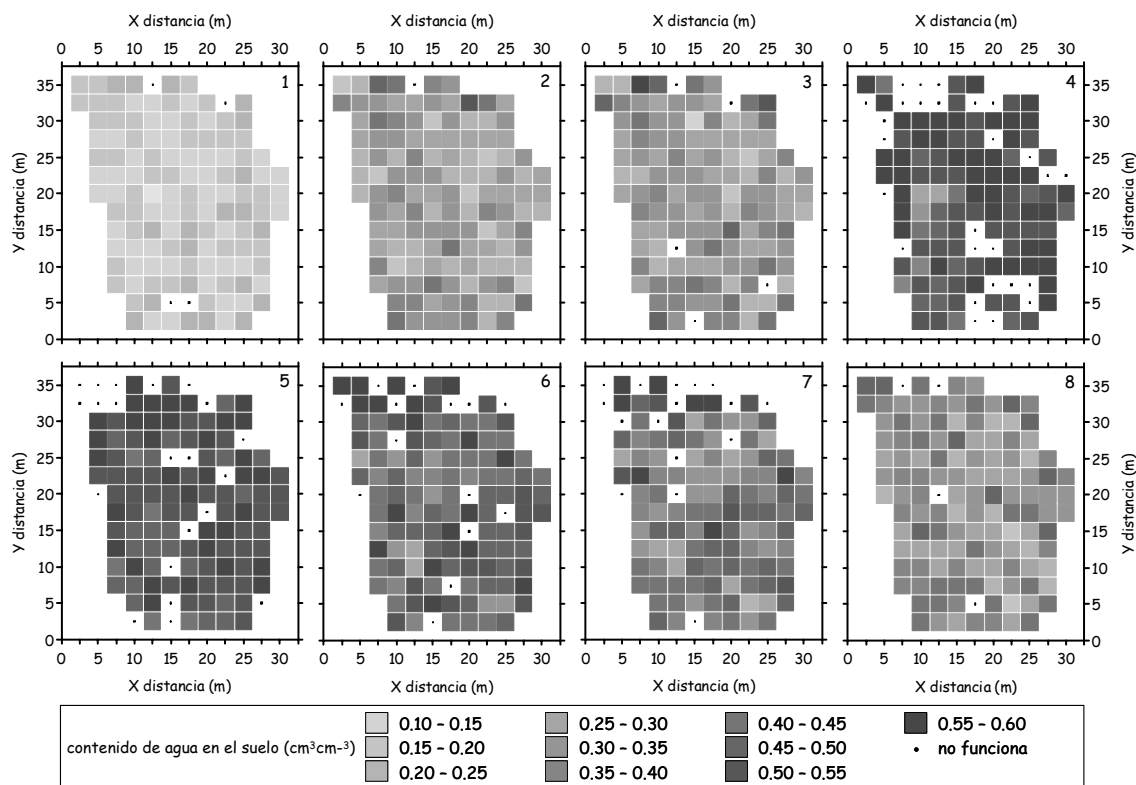


Fig. 3. Distribución espacial de la humedad del suelo en la terraza monitorizada para cada paso de tiempo (1 a 8) seleccionado en la figura 2.

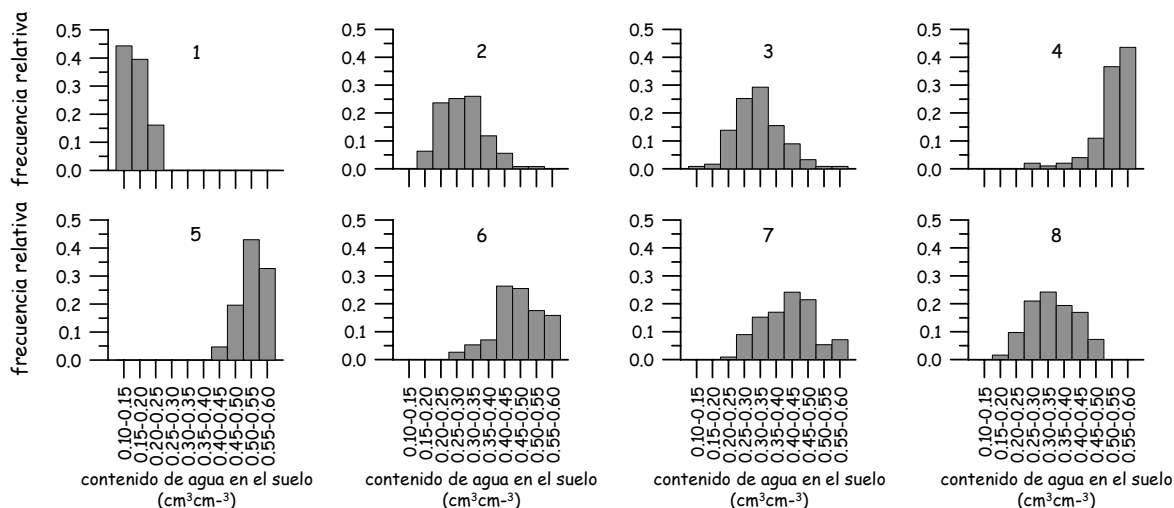


Fig. 4. Distribución de los valores de humedad del suelo en la terraza monitorizada para cada paso de tiempo (1 a 8) seleccionado en la figura 2.

#### 4. Conclusiones

La instrumentación de una terraza con 128 sondas TDR automáticas, proporciona una información relevante sobre la dinámica local de la humedad del suelo durante un evento lluvioso. Combinando esta información con la información a escala de cuenca puede evaluarse el grado de conectividad entre el área de terrazas y el cauce, obteniendo una mejor descripción del funcionamiento hidrológico de la cuenca. Los resultados presentados aquí corresponden al primer evento lluvioso significativo ocurrido después de la monitorización de la terraza. Un análisis similar en diferentes condiciones hidrológicas ayudará a una visión más completa del comportamiento estacional de esta cuenca Mediterránea. Además, el análisis geostatístico tanto de las propiedades de los suelos así como de los valores de humedad registrados (en curso de realización) permitirá una mejor comprensión de los patrones de saturación en la terraza estudiada y de sus implicaciones hidrológicas.

*Agradecimientos.* Esta investigación ha sido financiada por una ayuda de infraestructura científica cofinanciada con fondos FEDER, por los proyectos PIRIHEROS (REN2003-08678/HID) y CANOA (CGL2004-04919-C01-02/HID) financiados por el Plan Nacional de Investigación Científica y TempQsim (EVK1-CT-2002-00112) financiado por la Comisión Europea. Las cuencas de Vallcebre funcionan también gracias al convenio RESEL entre el CSIC y la DGCONA. La contribución del primer autor ha sido posible gracias a un contrato de investigador del CSIC en el marco del Programa I3P, cofinanciado por el Fondo Social Europeo, la del segundo autor gracias a una beca predoctoral FPU del MEC. Los autores agradecen la ayuda en los trabajos de campo a J. Delgado, F. Gallart, X. Huguet, N. Martínez, R. Poyatos y M. Soler.

#### Referencias

Bárdossy A., Lehmann W. 1998: Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis. *Journal of Hydrology*, 206: 1-15.

Famiglietti J. S., Rudnicki J. W., Rodell M. 1998: Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 210: 259-281.

Gallart F., Llorens P., Latron J., Regúés 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.

Grayson R. B., Western A. W., Chiew F. H. S., Blöschl G. 1997: Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls. *Water Resources Research*, 33 (12): 2897-2908.

Latron J. 2003: Estudio del funcionamiento hidrológico de una cuenca mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineos Catalanes). Tesis Doctoral, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, 269pp.

Latron J., Gallart F., Salvany C. 2000: Analysing the role of phreatic level dynamics on the streamflow response in a Mediterranean mountainous experimental catchment (Vallcebre, Catalonia). In: V. Elias and I. G. Littlewood (Eds.), "Catchment hydrological and biochemical processes in the changing environment", IHP-V Technical Documents in Hydrology, 37, UNESCO: 107-111.

Latron J., Llorens P., Gallart F. 2004: Dinámica estacional de las áreas fuente de escorrentía en una cuenca mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineos Catalanes). In: G. Benito and A. Díez Herrero (Eds.), "Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología". Actas de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, Toledo, 22-25/09/2004. Sociedad Española de Geomorfología y CSIC, 149-157.

Loague K. 1992: Soil water content at R-5. Part 1. Spatial and temporal variability. *Journal of Hydrology*, 139: 233-251.

Poyatos R., Latron J., Llorens P. 2003: Land use and cover change in a Mediterranean mountainous area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development*, 23 (4): 52-58.

Rubio C. 2005: Hidrodinámica de los suelos en un área de montaña media Mediterránea sometida a cambios de uso y cubierta. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. 194 pp.

Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P. 1980: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 574-582.

Western A. W., Grayson R. B. 1998: The Tarrawarra data set: Soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux. *Water Resources Research*, 34 (10): 2765-2768.

Western A. W., Zhou S-L., Grayson R. B., McMahon T. A., Blöschl G., Wilson D. J. 2004: Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 286: 113-134.

Wilson D. J., Western A. W., Grayson R. B., Berg A. A., Lear M. S., Rodell M., Famiglietti J. S., Woods R. A., McMahon T. A. 2003: Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30 cm depth, Mahurangi river catchment, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 276: 254-274.