



## DINÁMICA DE LA HUMEDAD DE LAS FORMACIONES SUPERFICIALES EN UNIDADES ESPACIALES REPRESENTATIVAS DE ECOSISTEMAS ADEHESADOS

*Soil surface water dynamics in different spatial units under dehesa landuse system*

A. Ceballos Barbancho, y J. Martínez Fernández

*Departamento de Geografía, Universidad de Salamanca. C/ Cervantes, 3. 37002 Salamanca.  
e-mail: ceballos@usal.es*

**Resumen:** El objetivo del presente trabajo es el estudio del comportamiento hidrológico de las formaciones superficiales correspondientes a diferentes niveles de degradación de un ecosistema adehesado. Durante un año hidrológico completo se realizó un seguimiento de la humedad superficial del suelo, apreciándose su dependencia de elementos climáticos, como las precipitaciones y la ETP, así como de los factores topográficos y edáficos. Se analizó una serie de parámetros y variables físicos e hidrodinámicos del suelo. Los resultados muestran que la capacidad máxima de almacenamiento de agua depende del nivel de degradación de la superficie, reflejado en variables como la fracción textural limo-arcillosa y el contenido de materia orgánica. No obstante, se ha observado una cierta homogeneidad en la cantidad de agua disponible en las diferentes unidades espaciales. El contenido de agua en el suelo muestra una gran sensibilidad respecto a la distribución de las precipitaciones y la evolución de la tasa de evapotranspiración. Las implicaciones hidrológicas de la estacionalidad de la dinámica del agua del suelo en este tipo de ecosistema son notables, ya que es un factor clave que influye en los mecanismos generadores de escorrentía superficial en las vertientes y que, a escala de cuenca, permite explicar los caudales generados, las características de los hidrogramas y el modelo de flujo.

**Palabras Clave:** humedad del suelo, variabilidad espacial, formaciones superficiales, dehesa

**Abstract:** The main goal of this paper is to study the soil surface hydrological behaviour corresponding to different degradation levels in the dehesa ecosystem. During a complete hydrological year soil moisture measurements were taken of the surface and it was observed their dependence on climatic variables, as rainfall and ETP, and topographic and soil factors. A set of physical and hydrodynamic soil parameters and variables was analysed. The results demonstrate that the maximum water holding capacity depends of the surface degradation levels related to silty-clay textural fraction and organic matter content. Nevertheless, certain homogeneity in the available soil water content was observed at the different spatial units. The soil water content shows a high sensitivity to rainfall distribution and the evolution of ETP over time. The hydrological consequences of the seasonal soil behaviour are important in this type of ecosystem. That is a key factor which affects runoff generation mechanisms at the slopes, and explains the flow volume, the characteristics of the hydrographs and the type flow at the catchment scale.

**Key words:** soil moisture, spatial variability, surface formations, dehesa



Ceballos Barbancho, A. y Martínez Fernández J. Dinámica de la humedad de las formaciones superficiales en unidades espaciales representativas de ecosistemas adehesados. *Rev. C. & G.*, 16 (1-4), 33-42.

### 1. Introducción

La dehesa constituye un sistema consuetudinario de utilización agro-silvo-pastoral del bosque

mediterráneo que ha permitido la conservación de notables extensiones del mismo en el oeste de la Península Ibérica. Aunque existe una disparidad de cifras según las fuentes, en la actualidad compren-

de entre 2 y 2.5 millones de hectáreas (Gómez Manzaneque, 1998).

Debido a la singularidad de este paisaje, con una notable importancia económica y, sobre todo, medioambiental, es necesario el desarrollo de estudios que profundicen en el conocimiento de los procesos físicos que operan en el mismo, prestando una especial atención al funcionamiento de los ciclos más vulnerables, como el del agua. Además, ello permitirá evaluar los posibles impactos que el “cambio global” puede causar en ecosistemas, de antemano frágiles, como el mediterráneo (Scarascia-Mugnozza *et al.*, 2000).

Un claro ejemplo del vínculo entre el funcionamiento y viabilidad de la dehesa y los recursos hídricos se encuentra en la marcada estacionalidad de los pastos, debido a su dependencia de las precipitaciones, y, al hecho constatado, de la mayor duración de los mismos en aquellos lugares caracterizados por una mayor capacidad de retención hídrica de sus suelos (Bernet, 1995).

El conocimiento de las propiedades físicas del suelo es esencial en el desarrollo de las investigaciones hidrogeomorfológicas por el control que ejercen sobre el proceso de infiltración, y por tanto, del contenido de agua edáfica (Martínez Fernández, 1994; Martínez Fernández y López Bermúdez, 1996). En relación con ello, la humedad del suelo es un importante elemento del ciclo hidrológico con un papel fundamental en el funcionamiento de múltiples procesos estrechamente interconectados como los de infiltración, percolación, escorrentía superficial y pérdida de suelo (Cerdà, 1995, 1997; Burt y Slattery, 1996; Merz y Plate, 1997). Este hecho hace necesaria la generación de estudios que profundicen en el conocimiento del comportamiento de la humedad superficial en diferentes ámbitos geográficos y climáticos, prestando una especial atención a su variabilidad espacio-temporal (Famiglietti *et al.*, 1998). Apesar de la importancia del agua en el suelo, desde una perspectiva hidrológica y ecológica, el número de estudios sobre esta temática en España es bajo, especialmente en las zonas semiáridas (Cerdà, 1996a; Fitzjohn *et al.*, 1998; Ceballos y Schnabel, 1998a; Gómez-Plaza *et al.*, 2000).

El objetivo de este trabajo es el estudio del comportamiento hidrológico de las formaciones superficiales correspondientes a diferentes unida-

des espaciales representativas de diversos niveles de degradación de la dehesa, determinando el volumen de agua disponible y la evolución temporal del mismo a lo largo de un año hidrológico. Se presta una especial atención a la influencia de la humedad superficial del suelo sobre la dinámica del ecosistema dehesa, incidiéndose en sus implicaciones hidrológicas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Zona de estudio

La toma de datos de campo se realizó en una pequeña cuenca hidrográfica de 35.4 ha (Cuenca Experimental de Guadalperalón), dedicada desde 1990 al estudio de los procesos hidrogeomorfológicos que operan en el ecosistema dehesa (Bernet *et al.*, 1994; Schnabel, 1997; Mateos y Schnabel, 1998; Ceballos, 1999). Situada a 22 km al noreste de la ciudad de Cáceres (Figura 1), forma parte de la superficie de erosión finimiocena que conforma la denominada penillanura cacereña. Los suelos se asientan sobre el sustrato pizarroso del complejo esquisto grauváquico, encuadrándose dentro del grupo de los Regosoles y Leptosoles según sus características topográficas y/o fisiográficas.

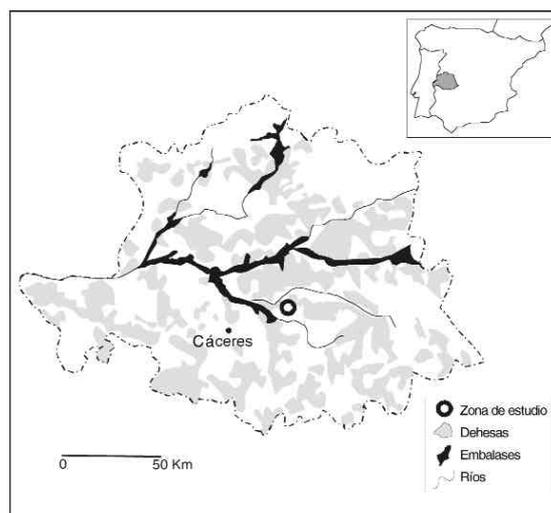


Figura 1. Localización de la zona de estudio  
Figure 1. Location map of the study site.

El clima es netamente mediterráneo, con una estación seca muy marcada de 4 meses de duración. La temperatura media es de 16 °C, mientras que la precipitación media en el período 1907-2000 ha sido de 517 mm, con una apreciable variabilidad tanto interanual (Coeficiente de variación = 30.5 %) como intra-anual (52.2 %) y un predominio de los años secos sobre los húmedos. Atendiendo a estas características bioclimáticas, la vegetación potencial pertenece a la serie climatófila mesomediterránea de la encina (*Quercus ilex* subsp. *ballota*).

Uno de los aspectos más interesantes de la zona de estudio es que en poco espacio existe una apreciable diversidad de estadios de degradación representativos del paisaje adehesado. Se alternan zonas con una densidad de arbolado próxima a los 45 pies/ha y estrato herbáceo denso, con zonas sin árboles, con matorral disperso y una extensión superficial de suelo desnudo significativa. A partir de la propuesta de Schnabel (1997), de acuerdo con el tipo, distribución y nivel de degradación de la vegetación, así como el uso del suelo, se distinguen las siguientes unidades espaciales (Figura 2):

**I: ladera degradada y sin arbolado.** Representa el nivel más alto de degradación de la zona con frecuentes afloramientos de pizarra. Orientada hacia el oeste, y con una pendiente media de 11°, la vegetación se reduce a individuos dispersos de *Lavandula stoechas*. El tipo de suelo predominante es el Leptosol, con una profundidad que no sobrepasa los 30 cm.

**II: ladera con arbolado (espacio entre los árboles).** Vertiente arbolada, caracterizada por la presencia de encinas (*Q. ilex* subsp. *ballota*) con una densidad entre 5 y 45 pies por hectárea. El estrato herbáceo es denso, aunque con una cobertura superficial variable a lo largo del año. Las especies presentes son representativas de las comunidades oligotróficas mesomediterráneas de sustratos ácidos (*Medicago* subsp., *Bromus*, subsp., *Hordeum*, subsp., *Trifolium* subsp., etc). La profundidad media del suelo está entre los 25 y 45 cm, predominando los pertenecientes al grupo de los Leptosoles. La pendiente media de la ladera es de 14° y está orientada hacia el este.

**III: ladera con arbolado (espacio bajo los árboles).** Esta unidad representa el espacio situado bajo la copa de los árboles, donde la profundidad media del suelo puede alcanzar los 65 cm. En función de la variabilidad espacial de la profundidad, los suelos se distribuirán dentro de los Leptosoles y Regosoles. La pendiente media es de 14° y está orientada hacia el este.

**IV: zona coluvial en las laderas.** Comprende los tramos cóncavos de las laderas rellenos de sedimentos, presentando los suelos una profundidad variable entre los 40 y 70 cm (Regosoles). La vegetación está constituida por un pastizal estacional de *Erodium* subsp., *Spergularia* subsp., *Bromus* subsp., etc. Orientada hacia el este, la pendiente media es de 11°.

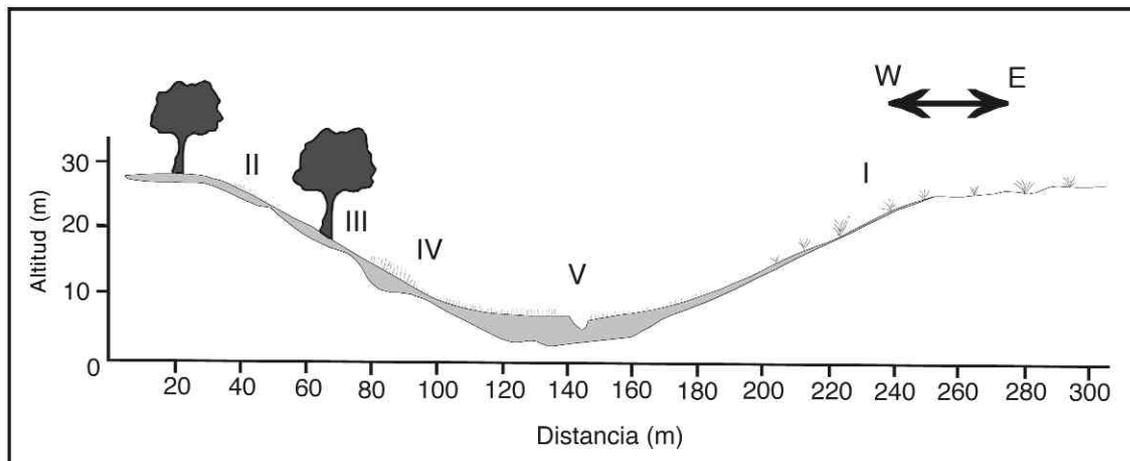


Figura 2. Catena con las unidades espaciales  
Figure 2. Catena with the spatial units.

**V: Fondo de valle.** Los fondos de valle rellenos de sedimentos pueden alcanzar una profundidad superior a los 150 cm, tratándose de Regosoles. La pendiente es baja, con una media de 2°. La vegetación es igual a la de la unidad IV.

## 2.2. Medición de las variables físicas e hidrológicas

En cada una de las unidades anteriores, durante un año hidrológico completo (1995-96), se realizó un muestreo sistemático ( $n = 550$ ) de la humedad edáfica superficial (0-5 cm) aplicando el método gravimétrico (Reynolds, 1970; Martínez Fernández y López Bermúdez, 1996). El muestreo se centró en ese nivel debido a que la capa más superficial del suelo presenta una mayor sensibilidad a las entradas por precipitación y salidas por evapotranspiración (Charpentier y Groffman, 1992; Ladson y Moore, 1992; González y López, 1994; Crave y Gascuel-Oudou, 1997; Famiglietti *et al.*, 1998). En este sentido, una serie de experimentos de simulación de lluvia realizados en la zona de estudio demostraron que, bajo condiciones de suelos muy secos ( $pF > 4.2$ ), la profundidad media del frente de humedad fue igual a 5.9 cm (desviación estándar = 2.6 cm), siendo la lluvia aplicada de 53 mm  $h^{-1}$  durante 60 minutos (Cerdá *et al.*, 1998).

Las muestras se recogieron a intervalos de tiempo irregulares, dependiendo de la distribución de las precipitaciones, y en un espacio inferior a la distancia de 1 m respecto a un punto fijo debido al carácter destructivo del método gravimétrico. Con el fin de establecer la influencia de la precipitación y evapotranspiración sobre la humedad edáfica, se efectuó un seguimiento de la precipita-

ción y temperatura media diaria mediante la recogida de datos en una estación meteorológica automática situada en la propia cuenca experimental. La evapotranspiración potencial diaria ha sido calculada a partir de los valores quincenales determinados según el método de Turc (1961), debido a su mejor ajuste, respecto al método de Thornthwaite, en climas mediterráneos (Lecarpentier, 1975).

Para la caracterización física e hidrodinámica de los suelos, se recogieron en cada una de las unidades espaciales monolitos duplicados de suelo inalterado de 100  $cm^3$  de volumen correspondientes a los primeros 5 cm del suelo. Se determinó la proporción de arcilla, limo, arena y gravas ( $\phi$  2-75 mm), el contenido de materia orgánica y la densidad aparente. Para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) se utilizó un permeámetro de carga constante. Las curvas de retención hídrica se obtuvieron aplicando el modelo Van Genuchten (1980) y utilizando 9 puntos de  $pF$  (desde 0 hasta 4.2) medidos en el laboratorio mediante el método del recipiente de tensión hídrica (Martínez Fernández, 1990) y la membrana a presión. Para la obtención de la curva completa a partir de los datos experimentales, se utilizó el programa RETC (Van Genuchten *et al.*, 1991). El análisis de las curvas de retención permitió calcular el valor de capacidad de campo (CC) para cada muestra y así determinar el contenido de agua útil (CAU) en cada caso, considerando el punto de marchitamiento (PM) igual al contenido de humedad a  $pF$  4.2, mediante la siguiente ecuación:

$$CAU = CC - PM$$

Tabla 1. Propiedades físicas del suelo en las diferentes unidades espaciales.  
Table 1. Physical properties of soils in the different spatial units.

Unidad	Clase Textural (USDA)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Gravas (%)	D. Ap. ( $gr\ cm^{-3}$ )	MO (%)
I	franco-limosa	39.3	50.6	10.1	48.1	1.52	1.9
II	franco-limosa	29.2	54.1	16.7	17.9	1.16	6.0
III	franca	32.0	47.7	20.3	32.4	1.05	9.6
IV+V	franco-limosa	19.3	57.8	22.9	7.0	1.27	5.2

D. Ap. = densidad aparente; M.O. = materia orgánica

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Caracterización física e hidrológica

La fracción textural predominante en los suelos estudiados es el limo, con un valor medio del 53 %, clasificándose como franco-limosos, con carácter general (Tabla 1). Dependiendo de la topografía y de la exposición se observa que el mayor contenido de arenas y gravas corresponde a las vertientes más degradadas (unidad I), mientras que en los suelos situados en las zonas deprimidas rellenas de sedimentos (unidad IV + V) el contenido de gravas es sensiblemente inferior y los finos (limos y arcillas) más abundantes, en relación con el resto de las unidades, como consecuencia de los procesos erosivos en las laderas adyacentes.

Los valores de densidad aparente oscilan entre 1.05 y 1.52 gr cm<sup>-3</sup> en las unidades III y I respectivamente. En el primer caso, la notable acumulación de materia orgánica (hojarasca) en el horizonte superficial del suelo, junto a la acción de las raíces, incide en una notable porosidad en este nivel y por lo tanto en una baja densidad aparente, mientras que en el caso de la unidad I el alto valor de densidad aparente está relacionado con la abundancia de gravas y unos bajos valores de materia orgánica.

El contenido de materia orgánica es muy variable. El valor más bajo (1.9 %) se ha medido en la unidad I, debido a su mayor nivel de degradación en relación con una cobertura vegetal escasa durante todo el año. Los valores más altos se han registrado, lógicamente, bajo la copa de los árboles (9.6 %) debido a un aporte continuado de restos orgánicos y también al efecto positivo del arbolado sobre el crecimiento de los pastos, ya que los protege de las heladas en invierno y de la excesiva radiación solar en verano. Valores intermedios se encuentran en las dos unidades restantes.

De modo general, la CAU es bastante uniforme en el conjunto de los suelos estudiados, con un valor medio de 0.105 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (Tabla 2). A pesar de ello, se detectan algunas diferencias en los valores de humedad correspondientes tanto a PM como a CC, dependiendo de la mayor o menor presencia de materia orgánica y de materiales finos (limo y

arcilla). En el caso de la unidad III los altos valores de humedad a CC y a PM se deben a la alta proporción de materia orgánica, mientras que en la unidad IV+V se deben a la alta proporción de la fracción limo-arcillosa en relación con el resto de unidades. A pesar de ello, los valores obtenidos son inferiores a los hallados por otros autores en zonas comparables. En este sentido, Dorronsoro (1992) calcula una CAU media de 0.15 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (no bajando nunca de 0.11 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) en suelos sobre pizarras, con textura franco-limosa, en la dehesa salmantina.

Los valores más altos de *Ksat* corresponden a aquéllas unidades con los valores de densidad aparente más bajos, por tanto con mayor porosidad, como es el caso de la unidad III con 62.3 cm h<sup>-1</sup>. El valor más bajo de *Ksat* (0.3 cm h<sup>-1</sup>) se encuentra en las vaguadas y fondos de valle rellenos de sedimentos (unidades IV y V) debido a su matriz fina (limos + arcillas = 80.7 %). En el caso de la unidad I, a pesar de la abundancia de gravas, la existencia de una costra milimétrica superficial, generalmente compuesta por líquenes, explica también la baja *Ksat*.

#### 3.2. Evolución temporal de la humedad

El año hidrológico analizado (1995-96) responde al modelo usual de año húmedo en la zona de estudio, con un reparto heterogéneo de la precipitación y una concentración de gran parte de la misma en un período que no suele exceder los tres meses. La precipitación anual fue de 720 mm, con una distribución muy desigual (Tabla 3) que permitió delimitar los umbrales, tanto máximos como mínimos, de almacenamiento de agua en el horizonte superficial del suelo. Entre mediados de noviembre de 1995 y comienzos de febrero de 1996 el total de precipitación fue de 512 mm distribuidos en 51 días de lluvia, representando un valor excepcional en la serie pluviométrica de la zona. Estas precipitaciones provocaron la saturación de los suelos de las diferentes unidades espaciales de la cuenca durante un período de tiempo variable según la posición topográfica y la profundidad del suelo (Figura 3). A partir de la segunda quincena de mayo hasta el final del período de medición no se contabilizó precipitación alguna, registrándose una racha seca de 104 días consecutivos sin lluvia (esta situación sólo se ha producido en una ocasión más

durante los 93 años de registros de la estación meteorológica de Cáceres). Esta circunstancia, junto a las altas temperaturas estivales (+ 0.25 °C respecto a la media), provocó una situación de acusado estrés hídrico manifiesta en los valores de humedad edáfica registrados.

La vertiente degradada (unidad I) presenta el valor máximo de humedad más bajo debido a su menor capacidad de retención y a la existencia de una costra liquénica milimétrica que inhibe el proceso de infiltración. Diversos trabajos señalan la existencia de costras superficiales milimétricas

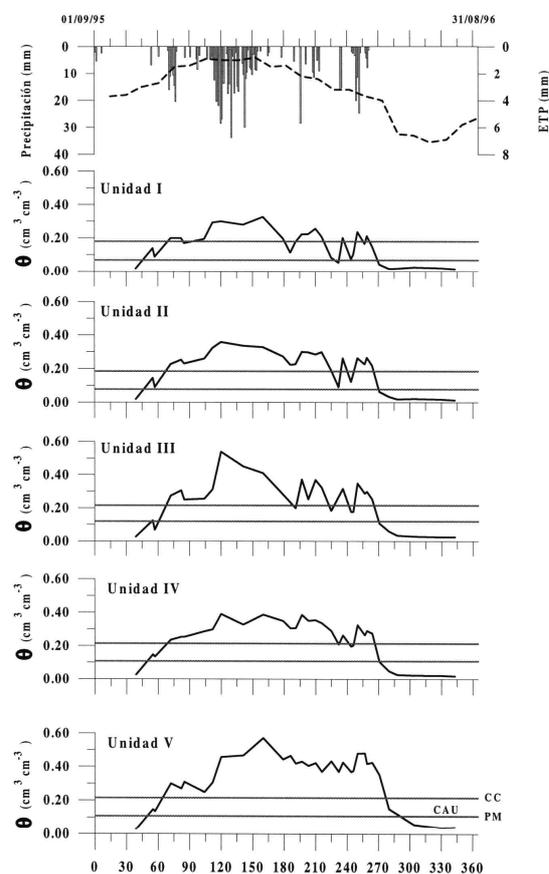


Figura 3. Evolución temporal de la precipitación (barras), evapotranspiración potencial (línea discontinua) y de la humedad del suelo (línea continua) en las diferentes unidades espaciales durante el año hidrológico 1995-96. El espacio comprendido entre las dos líneas grises horizontales (CC y PM respectivamente) corresponde a la CAU.

Figure 3. Temporal trends of precipitation (bars), ETP (discontinuous line) and soil water content (solid black line) in the different spatial units during the hydrological year 1995-96. The space between two grey lines is equivalent to available soil water.

como un factor con una influencia determinante sobre el proceso de infiltración (Imeson, 1984; Navas, 1988). Es la unidad que registra una mayor variabilidad del valor de humedad a lo largo del año de muestreo (CV = 62.1 %, Tabla 2), así como el período de tiempo más corto de todas las unidades en el cual los suelos permanecen por encima de su CC (Figura 4). Estos datos manifiestan la gran sensibilidad de la curva de humedad al reparto de las precipitaciones y a un aumento de la ETP en relación con la exposición (Reid, 1973), sin olvidar la escasa profundidad de los suelos en esta unidad, el bajo valor de la fracción limo-arcillosa y la abundancia de gravas en relación con el resto del área de la cuenca como apuntan otros trabajos (Crave y Gascuel-Odoux, 1997; Famiglietti *et al.*, 1998). Por ello, durante la segunda quincena del mes de abril es la única unidad con valores por debajo de PM.

A diferencia de la anterior, la unidad II tiene un valor de humedad máximo mayor y los suelos estuvieron por encima del valor de CC durante el 50 % del período de muestreo (Figura 4). No obstante, también es manifiesta la sensibilidad de la humedad al reparto pluviométrico y a los valores de ETP, ya que en la mencionada segunda quincena de abril el valor de humedad decae notablemente aproximándose al PM.

La unidad III presenta valores muy altos de humedad debido a su apreciable macroporosidad, habiéndose comprobado un alto grado de correlación ( $r^2 = 0.79$ ; valor-p = 0.000) entre contenido de agua en el suelo y volumen de espacio poroso

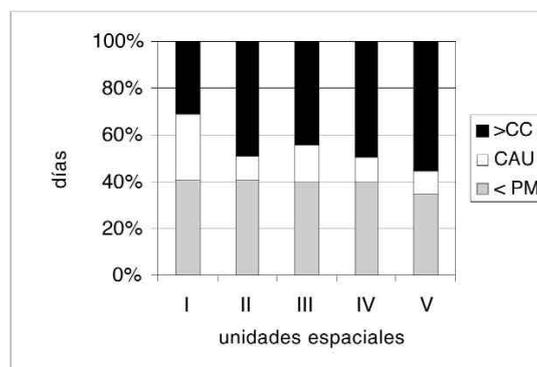


Figure 4. Temporal distribution of soil water content in the different spatial units during 1995-96.

Figura 4. Distribución temporal de los contenidos de humedad durante el año 1995-96 en las diferentes unidades espaciales.

Tabla 2. Propiedades hídricas del suelo en las diferentes unidades espaciales.  
 Table 2. Hydrological properties of soils in the different spatial units.

Unidad	CC ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	PM ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	CAU ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	Ksat ( $\text{cm h}^{-1}$ )	max ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	min ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	CV (%)
I	0.180	0.068	0.112	14.1	32.6	1.4	62.1
II	0.183	0.078	0.106	32.3	37.4	1.6	56.1
III	0.215	0.118	0.097	62.3	53.8	2.4	59.1
IV	0.213	0.107	0.106	0.3	39.0	1.7	51.9
V	0.212	0.107	0.106	0.3	57.0	2.7	46.8

CC = capacidad de campo; PM = punto de marchitamiento; CAU = cantidad de agua útil; Ksat = conductividad hidráulica saturada; qmax = valor máximo de humedad edáfica; qmin = valor mínimo de humedad edáfica; CV = coeficiente de variación de la serie temporal de humedad edáfica.

cuando la totalidad de los suelos de la cuenca se encontraban saturados o muy próximos a este estado. Dichos valores no se sitúan por debajo de PM hasta finales del mes mayo y comienzos de junio. No obstante, las continuas fluctuaciones en torno al umbral de CC en los meses de marzo, abril y mayo denotan también una apreciable sensibilidad ante la precipitación y ETP, y una alta capacidad de drenaje inducida por la alta porosidad, como también queda de manifiesto en el elevado valor de Ksat. Esta relación existente entre porosidad, Ksat y variabilidad del contenido de humedad del suelo durante períodos húmedos también es puesta de manifiesto en otros trabajos (Niemann y Edgell, 1993; Famiglietti *et al.*, 1998).

En las zonas de acumulación (unidades IV y V), el valor de humedad permanece por encima del umbral de CC durante más de la mitad del año por término medio (Figura 4). A diferencia de las tres unidades anteriores, ambas se caracterizan por una baja Ksat, circunstancia que dificulta el drenaje de estos suelos, favoreciendo el encharcamiento superficial de los mismos. En estas zonas funcionó durante largos períodos el flujo subsuperficial debido a la saturación de las mismas. Entre las uni-

dades IV y V se observan importantes variaciones, tanto en el valor máximo de humedad registrado, como en el número de días por encima del punto de marchitamiento, debido al diferente valor de la pendiente del terreno en relación con su posición topográfica (Moore *et al.*, 1988). En el caso de la unidad IV la pendiente de la ladera es de 11°, lo que se traduce en una circulación del agua a través de la matriz del suelo mucho más efectiva que en los fondos de valle (unidad V), en donde se produce la acumulación del total de escorrentía procedente de las vertientes de la cuenca, tanto superficial como subsuperficial (en relación con procesos de exfiltración) y, además, el flujo subsuperficial es mucho más diferido debido a la escasa pendiente del valle principal y al bajo valor de Ksat. Todas estas circunstancias explican que sea la unidad espacial con mayor capacidad de almacenamiento y retención de agua, y en donde el valor de humedad varía menos a lo largo del tiempo (Tabla 2).

### 3.3. Implicaciones hidrológicas

Los resultados anteriores manifiestan una apreciable estacionalidad del contenido de agua super-

Tabla 3. Distribución mensual de la precipitación (P), temperatura media (Tm), temperatura media de las máximas, (Tmáx), temperatura media de las mínimas (Tmín) y evapotranspiración potencial (ETP) durante el año hidrológico 1995-96.  
 Table 3. Monthly distribution of precipitation (P), mean temperature (Tm), average of maximum temperature values (Tmáx), average of minimum temperature values (Tmín) and potential evapotranspiration (ETP) during the hydrological year 1995-96.

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Año
P	11.4	10.2	96.1	151.9	241.5	22.1	66.9	39.1	80.9	0	0	0	720.1
Tm	19.8	20.1	14.3	10.5	9.6	7.9	11.3	14.5	16.7	24.2	26.2	24.3	16.6
Tmáx	25.6	26.1	17.9	13.4	11.8	12.1	16.1	20.0	22.3	31.7	34.0	31.2	21.9
Tmín	14.0	14.2	10.8	7.9	6.7	3.7	6.5	8.9	11.0	16.7	18.5	17.4	11.4
ETP	108.7	83.4	43.6	29.1	27.2	42.0	71.4	96.4	119.4	197.5	215.5	172.3	1210

ficial de los suelos estudiados, debido a la variabilidad de los elementos climáticos y a la diversidad espacial de la cuenca. Esta circunstancia va a incidir directamente en la respuesta hidrológica del sistema considerando diferentes escalas de análisis.

La humedad antecedente es un factor clave para explicar la respuesta hidrológica de los suelos a diversas escalas (Cerdà, 1996b; Gómez-Plaza, 2000). En este sentido, experimentos de simulación de lluvia realizados en condiciones de humedad edáfica muy diferentes (suelos secos  $pF > 4.2$ ; suelos mojados  $pF < CC$ ) demuestran una reducción de la infiltración a la mitad en los suelos húmedos frente a los secos, así como una diferencia sustancial en los mecanismos generadores de escorrentía superficial, flujos hortoniano y superficial por saturación (Ceballos, 1999). Las diferencias entre los hidrogramas característicos de los ambientes húmedos y secos en la zona de estudio pueden resumirse en: 1) un mayor retraso del inicio de la escorrentía superficial en el período seco, 2) la tasa de infiltración estable es superior en el período seco y 3) la pendiente de la curva de escorrentía es mucho mayor en el período húmedo debido a la saturación del suelo.

A escala de vertiente, la humedad edáfica superficial influye en los umbrales de generación de escorrentía en términos de cantidad e intensidad de lluvia, así como en la variabilidad espacial de la escorrentía superficial. De este modo, mientras que en una situación de suelos secos los valores de escorrentía más altos se registran en las unidades más degradadas (I y II), en condiciones de suelos con contenidos de humedad por encima del valor de CC han sido las unidades de acumulación y relleno de sedimentos las que han registrado los mayores valores (Ceballos *et al.*, 1998). Por lo tanto, las áreas generadoras de agua y sedimentos variarán con los cambios de humedad del suelo.

Aunque en el establecimiento de un balance de agua a nivel de cuenca no se ha encontrado una relación estadística entre el contenido de agua en el suelo y el coeficiente de escorrentía, sin embargo, sí se ha observado que con valores de humedad superiores a la CC los coeficientes de escorrentía son elevados, ya que se minimiza el papel regulador de los fondos de valle sobre los caudales generados en la salida de la cuenca, apreciándose, en este estado, una correlación muy significativa entre

la escorrentía, la precipitación total y las intensidades máximas de lluvia (Ceballos y Schnabel, 1998b). En relación con este comportamiento, los fondos de valle rellenos de sedimentos se identificarían con el área fuente variable de escorrentía ("variable source area") según la definición de Troendle (1985). Por otro lado, la mayor o menor extensión de la superficie húmeda influye directamente en la duración del hidrograma y en la forma de su curva de recesión, en estrecha relación con los modelos de flujo hortoniano y flujo superficial por saturación (Ceballos y Schnabel, 1998b; Ceballos, 1999).

#### 4.- Conclusiones

Las propiedades físicas de los suelos reflejan el nivel de degradación de las diferentes unidades espaciales de la zona estudiada, dependiendo de la topografía y la exposición. Este hecho es apreciable comparando las laderas más degradadas, orientadas al oeste, con escasa vegetación, suelos poco profundos, mayor contenido de arenas y gravas, alta densidad aparente, encostramiento superficial y bajo contenido de materia orgánica, con los fondos de valle rellenos de sedimentos y caracterizados por suelos profundos, con un pastizal estacional, mayor abundancia de finos y de materia orgánica. Estas diferencias, junto a las entradas por precipitación y las salidas por ETP, inciden notablemente en la duración del período en el cual la humedad del suelo permanece por encima de la capacidad de campo a lo largo del período de estudio.

Las zonas más degradadas muestran una mayor sensibilidad a la evolución de los elementos del clima como consecuencia de su menor capacidad de retención. En las zonas de acumulación, la capacidad de almacenamiento y de retención hídrica de los suelos es mayor, lo que explica que permanezcan por encima del umbral de capacidad de campo durante más de la mitad del período de estudio y que la variabilidad de la humedad a lo largo de la serie sea la más baja de todas las unidades.

Dependiendo de las condiciones antecedentes de humedad del suelo, se puede explicar una serie de cambios en los procesos hidrológicos propios de la zona estudiada en relación con la infiltración,

mecanismos generadores de escorrentía, variabilidad espacial de la escorrentía superficial, volumen de agua evacuado de la cuenca, características de los hidrogramas y modelos de flujo.

Finalmente, la gran sensibilidad de la humedad edáfica superficial observada, respecto a los períodos sin lluvias, puede agudizarse en el futuro de acuerdo con las previsiones sobre los impactos del cambio climático en amplios sectores de la Península Ibérica (Ayala-Carcedo y Iglesias, 2000; IPCC, 2001). Esta situación, junto a una utilización del medio inadecuada por parte del hombre (excesivo pastoreo, talas indiscriminadas, desbroces, etc), podría derivar en una serie de cambios que afectarían al funcionamiento hidrogeomorfológico de los ecosistemas adehesados y a la disponibilidad de agua en los mismos.

### Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyectos AMB95-0986-C02-02 y REN2000-1157-HID) por la financiación que ha hecho posible este trabajo, a C. Yuste y P. Alonso por la colaboración prestada en los análisis de laboratorio, y a A. Cerdà y un revisor anónimo por sus revisiones y sugerencias.

### Referencias bibliográficas

- Ayala-Carcedo, F.J. & Iglesias, A. (2000). Impactos del posible cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular. *El Campo de las Ciencias y las Artes*, 137, 201-222.
- Bernet, R. (1995). *La cubierta herbácea en sistemas de dehesa degradados: conexiones entre vegetación y erosión*. Fundicot Extremadura, Junta de Extremadura y Universidad de Extremadura, Cáceres, 150 pp.
- Bernet, R., Schnabel, S. & Gómez Amelia, D. (1994). La cubierta vegetal como factor de degradación en una zona de dehesa (Provincia de Cáceres). En: *Geomorfología en España. III Reunión Nacional de Geomorfología* (J. Arnáez, J.M. García-Ruiz & P. Gómez-Flaño, eds). S.E.G., Logroño, 211-225.
- Burt, T.P. & Slattery, M.C. (1996). Time-dependent changes in soil properties and surface runoff generation. En: *Advances in Hillslope Processes* (M.G. Anderson & S.M. Brooks, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, 75-95.
- Ceballos, A. (1999). *Procesos hidrológicos en una pequeña cuenca hidrográfica bajo explotación de dehesa en Extremadura*. Universidad de Extremadura, Madrid, 196 pp.
- Ceballos, A. & Schnabel, S. (1998a). Comportamiento de la humedad del suelo en una pequeña cuenca hidrográfica de la dehesa extremeña (Guadalperalón, Cáceres). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 24, 25-38.
- Ceballos, A. & Schnabel, S. (1998b). Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SWSpain). *Journal of Hydrology*, 210, 246-270.
- Ceballos, A., Schnabel, S. & Gómez-Amelia, D. (1998). Análisis de la variabilidad espacial del flujo superficial en las vertientes de una pequeña cuenca hidrográfica bajo explotación de dehesa. En: *Investigaciones recientes de la Geomorfología española* (A. Gómez Ortiz, F. Salvador Franch, L. Schulte & A. García Navarro, eds). Universitat de Barcelona, Geofoma Ediciones, Huesca, 503-510.
- Cerdà, A. (1995). Hidrología y erosionabilidad de los suelos en ambientes semiáridos, Petrer, Alicante. *Studia Oecologica*, 12, 159-163.
- Cerdà, A. (1996a). Régimen hídrico de los suelos en zonas acaravadas. Algunos ejemplos de la cuenca experimental de Petrer. Alicante. *Cadernos del Laboratorio Xeológico de Laxe*, 21, 685-694.
- Cerdà, A. (1996b). Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma*, 69, 217-232.
- Cerdà, A. (1997). Distribución de la humedad del suelo en las cárcavas del sur del País Valenciano. *Cuadernos de Geografía*, 61, 1-13.
- Cerdà, A., Schnabel, S., Ceballos, A. & Gómez-Amelia, D. (1998). Soil hydrological response under simulated rainfall in the dehesa ecosystem, Extremadura, SW, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 195-209.
- Charpentier, M.A. & Groffman, P.M. (1992). Soil moisture variability within remoting sensing pixels. *Journal of Geophysical Research*, 97, 18987-18995.
- Crave, A. & Gascuel-Oudou, C. (1997). The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content. *Hydrol. Process.*, 11, 203-210.
- Dorrnsoro Fernández, C. (1992). Suelos. En: *El libro de las dehesas salmantinas* (J.M. Gómez Gutiérrez, ed.). Junta de Castilla y León, Salamanca, 71-121.
- 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.
- Fitzjohn, C., Ternan, J.L. & Williams, A.G. (1998). Soil moisture variability in semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. *Catena*, 32, 55-70.
- Gómez Manzaneque, F. (1998). *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Ed. Planeta, Barcelona, 597 pp.
- Gómez-Plaza, A. (2000). *Variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad del suelo en una zona mediterránea*

- semiárida. Efectos de las condiciones antecedentes en la respueta hidrológica. Tesis Doctoral, ETSI de Montes, Madrid (España), 185 pp.
- Gómez-Plaza, A., Álvarez-Rogel, J., Albadalejo, J. & Castillo, V.M. (2000). Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrol. Process*, 14, 1261-1277.
- González Hernández, F. & López Arias, M. (1994). Evolución del contenido hídrico del suelo en una masa adulta de *Pinus sylvestris L.* en el centro de España. En: *III Congreso Florestal Nacional. Os recursos florestais no desenvolvimento rural* (F. Páscoa, L. Pinheiro & A. Isidoro, eds). Dp. Eng. Florestal-ISA, Lisboa, 316-320.
- Imeson, A.C. (1984). Desertification in Europe. En: *Proceedings of the Information Symposium in the EEC Programme on Climatology* (R. Fantechi, & N. S. Margaris, eds.). Mytilene, Greece.
- IPCC (2001): *Climate change 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1032 pp.
- Ladson, A.R. & Moore, I.D. (1992): Soil water prediction on the Konza prairie by microwave remote sensing and topographic attributes. *Journal of Hydrology*, 138, 385-407.
- Lecarpentier, C. (1975). L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques. *Annales de Géographie*, 463-464, 257-274; 385-314.
- Martínez Fernández, J. (1990). Estudio de las características hidrodinámicas de los suelos: el método del recipiente de tensión hídrica. *I Reunión Nacional de Geomorfología*. S.E.G.-Instituto de Estudios Turolenses, 699-708.
- Martínez Fernández, J. (1994). Estimación de las propiedades físicas de los suelos a partir de variables edáficas de medición sencilla. En: *Geomorfología en España. III Reunión Nacional de Geomorfología* (J. Arnáez, J.M. García-Ruiz & P. Gómez-Flaño, eds). S.E.G., Logroño, 317-326.
- Martínez Fernández, J. & López Bermúdez, F. (1996). Métodos para el estudio de las propiedades hídricas de los suelos y formaciones superficiales. *Cuadernos Técnicos de la S.E.G.*, Geofoma, Logroño, 30 pp.
- Mateos, B. & Schnabel, S. (1998). Medición de la interceptación de las precipitaciones por la encina (*Quercus rotundifolia* Lam.): metodología y primeros resultados. En: *Investigaciones recientes de la geomorfología española* (A. Góméz Ortiz, F. Salvador Franch, L. Schulte & A. García Navarro, eds). Universitat de Barcelona, Geofoma Ediciones, Huesca, 529-537.
- Merz, B. & Plate, E. J. (1997). An analysis of the effect of spatial variability of soil and soil moisture on runoff. *Water Resources Research*, 33, 2909-2922.
- Moore, I.D., Burch, G.J. & Mackenzie, D.H. (1988). Topographic effects on the distribution of surface water and the location of ephemeral gullies. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 31, 1098-1107.
- Navas, A.M. (1988). *La participación de los yesos en la salinización de las aguas superficiales en la cuenca del Ebro*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 466 pp.
- Niemann, K.O. & Edgell, M.C.R. (1993). Preliminary analysis of spatial and temporal distribution of soil moisture on a deforested slope. *Physical Geography*, 14(5), 449-464.
- Reid, I. (1973). The influence of slope orientation upon the soil moisture regime and its hydrogeomorphological significance. *Journal of Hydrology*, 19, 309-321.
- Reynolds, S.G. (1970). The gravimetric method of soil moisture determination. Part I. A study of equipment and methodological problems. *Journal of Hydrology*, 11, 258-273.
- Scarascia-Mugnozza, G., Oswald, H., Piussi, P. & Radoglou, K. (2000). Forest of the Mediterranean region: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology and Management*, 132, 97-109.
- Schnabel, S. (1997). *Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (dehesas) in Extremadura, Spain*. Geofoma Ediciones, Logroño, 167 pp.
- Troendle, C.A. (1985). Variable source area models. En: *Hydrological Forecasting* (M.G. Anderson & T.P. Burt, eds). John Wiley and sons, London, 347-403.
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12, 12-49.
- Van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Van Genuchten, M. Th., Leij, F.J. & Yates, S.R. (1991). *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. EPA/600/2-91/065. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, USA, 85 pp.

Recibido 22 de octubre de 2001

Aceptado 15 de diciembre de 2001