



VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN EL SECTOR SEMIÁRIDO DE LA CUENCA DEL DUERO (ESPAÑA)

Spatial and temporal variability of soil moisture in the semiarid area of the Duero basin (Spain)

A. Ceballos Barbancho, J. Martínez Fernández, V. Hernández Santana,
C. Morán Tejada y S. Casado Ledesma

*Departamento de Geografía, Universidad de Salamanca, C/Cervantes, 3 - 37002 Salamanca (España)
E-mail: ceballos@usal.es - Fax 923 29 47 71*

Resumen: El objetivo de este trabajo es determinar las propiedades físicas e hidrodinámicas de los suelos y los factores que controlan la variabilidad espacial y temporal de la humedad edáfica en el sector semiárido de la cuenca del Duero. Para ello se contó con una red de medición de la humedad del suelo, con un total de 20 estaciones, dotadas cada una con 4 sondas TDR (Time Domain Reflectometry) insertadas a distintas profundidades. En cada uno de los puntos de muestreo de la humedad se determinó la textura, la densidad aparente, el contenido de materia orgánica y la curva de retención hídrica. El período de estudio comprendió un total de 21 meses, en donde se registraron situaciones climáticas contrastadas. Los resultados muestran que la fracción textural es la principal variable para explicar los patrones de distribución espacial de la humedad del suelo a lo largo del tiempo. Su influencia es directa sobre i) la capacidad de retención hídrica de los suelos, con una cantidad de agua útil para las plantas entre un 6,5 y un 8,9 % vol., ii) la variabilidad espacial de la humedad en el conjunto de la zona y iii) su distribución a lo largo del perfil. Finalmente, un aspecto destacable es la notable influencia de la materia orgánica, a pesar de sus bajos contenidos, en la capacidad de retención hídrica de los suelos estudiados.

Palabras clave: humedad del suelo, variabilidad espacial, textura, materia orgánica, capacidad de retención hídrica, cuenca del Duero.

Abstract: The aim of the present work is to determine the physical and hydrodynamic properties of the soils and the factors that govern the spatial and temporal variability of soil moisture in the semiarid sector of the Duero basin (Spain). To accomplish this, we used a soil moisture-measuring network, with 20 stations, each endowed with 4 TDR (Time Domain Reflectometry) probes inserted at different depths. At each of the soil moisture sampling points we determined the texture, bulk density, organic matter content and the water retention curve. The study period lasted 21 months, during which contrasted climatic situations were recorded. The results show that the textural fraction is the main variable accounting for the patterns of spatial soil moisture distribution over time. Its effect is direct on i) the water retention capacity of the soils, with an amount of plant available water ranging between 6.5 and 8.9 % vol.; ii) the spatial variability of the soil moisture throughout the area, and iii) soil moisture distribution along the profile. Finally, an outstanding aspect is the considerable effect of the organic matter, despite its low contents, on the water retention capacity of the soils studied.

Keywords: soil moisture, spatial variability, texture, organic matter, water retention capacity, Duero basin.



A. Ceballos Barbancho, J. Martínez Fernández, V. Hernández Santana, C. Morán Tejada y S. Casado Ledesma. Variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo en el sector semiárido de la cuenca del Duero (España). *Rev. C & G.*, 19 (3-4), 63-77.

1. Introducción

El contenido de agua del suelo es una variable de estado con múltiples implicaciones sobre el funcionamiento de los sistemas naturales. Desde una perspectiva hidrogeomorfológica, independientemente de las características de la lluvia, la división de la precipitación entre infiltración y escorrentía está directamente relacionada con el volumen de espacio poroso no ocupado por el agua al inicio del evento (Phillips, 1992; Kutilek y Nielsen, 1994; Mahmood, 1996; Gómez Plaza, 2000). Igualmente, la estabilidad de los agregados de un suelo, y por tanto su erodibilidad o susceptibilidad a ser erosionado, estará condicionada por su valor de humedad (Cerdà, 1997; Martínez-Mena et al., 1998). Hawke y McConchie (2003) han investigado el papel de los cambios espacio-temporales del contenido de agua del suelo sobre algunos procesos relacionados con la estabilidad de laderas. Finalmente, trabajos como los de Shakesby et al. (2000) y Doerr et al. (2003) destacan la relación existente entre hidrofofobia, contenido de agua en el suelo y la respuesta hidrológica y erosiva de sistemas naturales a distintas escalas.

La variabilidad de la humedad del suelo está gobernada por un conjunto amplio de factores cuya importancia está condicionada por la escala espacio temporal de análisis (Western et al., 1998). Vinnikov et al. (1996) y Wagner et al. (1999) distinguen, de forma general, entre una escala de detalle o local, en donde el dominio espacial varía en un rango de centenas de metros y el temporal es de varios días; y una escala regional, en donde el dominio espacial es del orden de 400-800 km, y el temporal siempre superior a un mes. En el primer caso, una serie de factores locales como la topografía (pendiente, orientación, curvatura de la ladera, área de contribución específica, elevación relativa), propiedades del suelo (textura, materia orgánica, estructura y macroporosidad) y cobertura vegetal, explicarán las diferencias (Famiglietti et al., 1998; Gómez-Plaza et al., 2001); mientras que en el segundo caso el factor climático será clave (Seyfried, 1998; Entin et al., 2000).

En un contexto de cambio global, el estudio de la humedad del suelo es de gran interés en ambientes mediterráneos debido a una serie de circunstancias propias de los mismos. Ejemplo de ello son la

irregularidad y/o escasez de las precipitaciones (Ceballos et al., 2004), las elevadas tasas de evapotranspiración (Rana y Katerji, 2000), la dependencia de la actividad agraria del estado hídrico del suelo (Conacher y Sala, 1998), la relación existente entre estructura y composición de las formaciones vegetales y evolución de la humedad edáfica (Canadell y Zedler, 1995) o la importancia del contenido de agua del suelo en la respuesta erosiva y, por tanto, geomorfológica del sistema (Kosmas et al., 1994; Fitzjohn et al., 1998).

En este trabajo se presentan los principales resultados y conclusiones de una investigación sobre la variabilidad espacial y temporal de la humedad del suelo, llevada a cabo en el sector central de la cuenca del Duero. En el artículo se han planteado dos objetivos generales: i) determinar las propiedades físicas e hidrodinámicas de los suelos de la zona y ii) comprender los factores que controlan la variabilidad espacial y temporal de la humedad edáfica en dicho territorio.

2. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el sector central de la cuenca del río Duero (41,1-41,5° N, 5,1-5,7° W), en la confluencia de las provincias de Salamanca, Zamora y Valladolid, con una altitud comprendida entre los 700 y 900 m. Se trata de un sector de 1.285 km² de superficie representativo de las condiciones semiáridas que caracterizan a algunas regiones de la Península Ibérica con precipitaciones inferiores a los 400 mm (Fig. 1).

El sustrato geológico está constituido por materiales sedimentarios del Mioceno -areniscas, conglomerados, calizas detríticas y limos- y depósitos fluviales del Cuaternario -conglomerados, gravas y arenas- (Siemcalska, 1997). Los suelos predominantes responden, de forma general, a las tipologías de luvisoles, regosoles, leptosoles y cambisoles, según la clasificación de la FAO (1998), con un predominio de las texturas arenosas en los horizontes superficiales, en la mayoría de los casos.

El clima es mediterráneo semiárido con matices continentales. Según Luengo et al. (2002), las características más destacables del clima de este área son la ocurrencia de inviernos rigurosos, tanto por las bajas temperaturas como por su duración, y

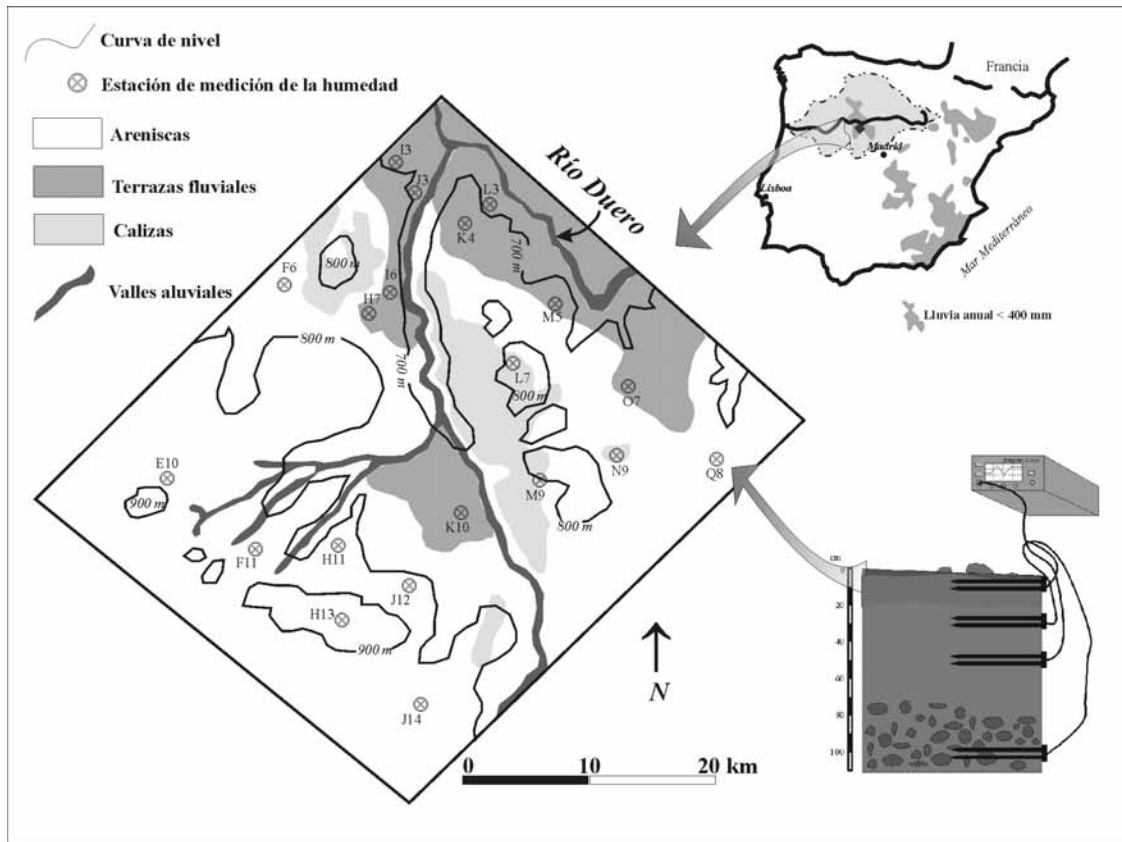


Figura 1. Localización de la zona de estudio, delimitación de las unidades fisiográficas, distribución de las estaciones de medición de la humedad del suelo y distribución de las sondas TDR en un perfil estándar.

Figure 1. Location of the study zone, delimitation of the physiographic units, distribution of the soil moisture-measuring stations, and distribution of the TDR probes in a standard profile.

de veranos secos, propios del clima mediterráneo, que pueden presentar temperaturas elevadas durante cortos períodos (Fig. 2). Las precipitaciones anuales son inferiores a 400 mm, representando el sector semiárido más occidental de la Península Ibérica (Fig. 1). La evapotranspiración potencial es de 908 mm, con 4 meses secos (junio, julio, agosto y septiembre), entendiéndose por mes seco aquel en donde la precipitación mensual es inferior a la temperatura media mensual multiplicada por dos (Rivas Martínez, 1987). La temperatura media anual es de 12,1 °C, siendo julio el mes más caluroso (21,7 °C) y el más frío enero (4 °C).

Dentro del perímetro del área de estudio están operativos 5 observatorios pertenecientes a la red del Instituto Nacional de Meteorología, disponiéndose

en dos de ellos de series diarias de temperaturas y precipitaciones, mientras que en los tres restantes los registros son exclusivamente pluviométricos. Debido a la baja variabilidad espacial de las precipitaciones, como consecuencia de la ausencia de contrastes topográficos y la proximidad de las estaciones meteorológicas, los datos pluviométricos del presente trabajo son producto del cálculo de la media aritmética de la lluvia registrada en las cinco estaciones (Ceballos et al., 2004). A partir de estos datos, también ha sido estimada la evapotranspiración aplicando el método de Turc (1961).

La superficie estudiada ha sufrido un intenso proceso de explotación agraria a lo largo de la historia, predominando cultivos de secano, como el cereal (trigo, cebada y avena) y el viñedo, en más

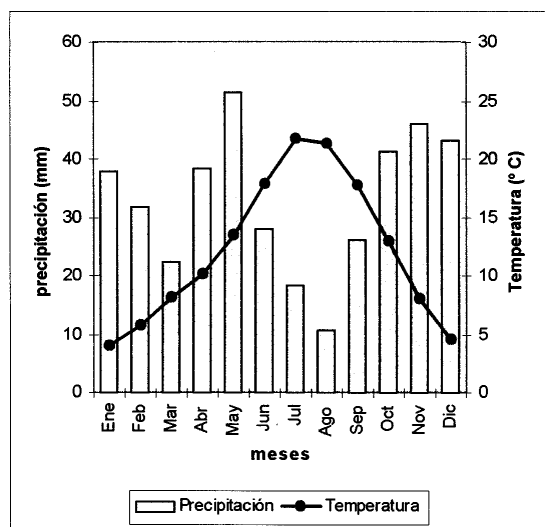


Figura 2. Diagrama ombrotérmico correspondiente a la estación meteorológica de Castronuño (Valladolid). Datos medios del período 1967-2000.

Figure 2. Ombrothermic diagram of Castronuño (Valladolid) weather station. Mean data from 1967-2000 period.

de un 80 % del territorio. El terreno restante está ocupado por parcelas de regadío (remolacha y maíz), fondos de valle con pastos y algunas manchas forestales, constituidas por un bosque potencial de *Quercus ilex* subsp. *ballota* y algunos rodales de *Pinus pinea* y *P. pinaster*, con una probable génesis antrópica.

3. Métodos y técnicas

3.1. Medición de la humedad del suelo con TDR (Time Domain Reflectometry)

El volumen de agua (α) contenido en el espacio poroso del suelo ha sido medido aplicando la técnica TDR (Topp y Davis, 1985; Cassel et al., 1994). Entre las distintas opciones técnicas, se ha elegido el empleo de una sonda de doble varilla de 25 cm de longitud y un ecómetro Tektronix 1502 C para el análisis de la señal. El dispositivo de medición fue calibrado y validado en un trabajo anterior (Martínez-Fernández y Ceballos, 2001) y la fórmula que se utiliza para la estimación del contenido de humedad volumétrico es la propuesta por Topp et al. (1980).

Se instalaron 20 estaciones de medición de la humedad del suelo, distribuidas en tres unidades edafo-fisiográficas delimitadas previamente considerando criterios topográficos, litológicos, edafológicos, geomorfológicos y tipos de uso del suelo. Debido a la homogeneidad observada en la topografía (topografía plana o muy levemente inclinada), en los usos del suelo (más del 80 % del territorio está ocupado por cultivos de secano), en la geomorfología (terrazas fluviales y superficies de erosión-sedimentación), se delimitaron tres unidades de acuerdo con la litología predominante y la variación de las propiedades físicas de los suelos en los perfiles: i) areniscas, ii) terrazas y iii) calizas. Las estaciones se distribuyeron entre las tres unidades de acuerdo con la importancia relativa de su extensión superficial.

Cada estación de medición tiene 4 sondas insertadas horizontalmente a distintas profundidades (5, 25, 50 y 100 cm) con el propósito de estimar el contenido medio de humedad en el conjunto del perfil (Fig. 1). La red de estaciones de medición de la humedad del suelo de la Universidad de Salamanca (REMEDHUS) fue instalada en marzo de 1999, iniciándose la adquisición de datos en junio de 1999, en intervalos de 15 días, una vez estabilizado el perfil tras la instalación de las sondas (Martínez-Fernández y Ceballos, 2003).

Debido al uso agrícola extensivo del territorio, a la hora de analizar las propiedades físicas del suelo y el comportamiento de su contenido de humedad, se ha considerado por un lado los primeros 25 cm (sondas situadas a 5 y 25 cm) y por otro lado la base del perfil (sondas situadas a 50 y 100 cm). Los primeros 25 cm corresponden a la denominada capa arable del suelo. El nivel comprendido entre los 50 y 100 cm se caracteriza por la ausencia de alteración de sus características estructurales y la escasa afección de los procesos de evapotranspiración debido a una menor presencia de biomasa radicular y mayor profundidad.

El período de estudio comprende un total de 21 meses (desde junio de 1999 hasta febrero de 2001). Este intervalo de tiempo se caracterizó por una acusada variabilidad de las precipitaciones, que permitió, por un lado, analizar las dos situaciones extremas posibles (valores de humedad edáfica por encima de capacidad de campo, α_{cc} , y valores de humedad edáfica próximos a punto de marchitamiento,

α_{pm}) y, por otro, evaluar la respuesta de los distintos tipos de suelo ante diferentes situaciones estacionales de ausencia de precipitaciones.

3.2. Propiedades físicas e hidrodinámicas de los suelos

Para una mejor comprensión de la respuesta hidrológica del los suelos, se estudiaron determinadas propiedades físicas e hidrodinámicas de los perfiles edáficos de cada una las estaciones de medición de humedad. En cada uno de los 20 perfiles, y en las cuatro profundidades, se recogió una muestra de suelo inalterado por duplicado ($n = 160$) en cilindros metálicos (100 cm^3 de volumen) que, manejados adecuadamente, permitieron trabajar en condiciones de no alteración desde el punto de vista estructural. Se determinó la i) densidad aparente del suelo, pesando la muestra de volumen conocido una vez secada en una estufa durante 24 horas a 105° C ; ii) la textura, aplicando la clasificación del USDA mediante tamizado para las fracciones arena y limo, y el método de la pipeta de Robinson para las arcillas, y iii) el contenido en materia orgánica, mediante oxidación con dicromato potásico.

La estimación de la función $\alpha(\psi)$, es decir, la relación existente entre el contenido de humedad, α , y la energía con la que está retenida, ψ (potencial matricial), se hizo en el laboratorio mediante el método del recipiente de tensión hídrica (Martínez Fernández, 1996), combinado con la membrana a presión. Con este método se calcularon nueve puntos de la curva de retención, número más que suficiente para afrontar la estimación de la curva completa. Para dicha estimación se utilizó el modelo de Van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + |\alpha\psi|^n\right]^{(1-1/n)}}$$

donde α_r y α_s son el contenido de humedad residual y a saturación, respectivamente, a y n son parámetros empíricos de forma. Para este ajuste se empleó el paquete informático RETC (Van Genuchten et al., 1991).

A partir de la estimación del valor de la humedad a capacidad de campo (α_{cc}) y el correspondien-

te al punto de marchitamiento (α_{pm}), se determinó la cantidad de agua útil para las plantas (CAU):

$$CAU = \alpha_{cc} - \alpha_{pm}$$

4. Resultados y discusión

4.1. Propiedades físicas e hidrodinámicas de los suelos

El análisis textural (tabla 1) ha resultado de gran utilidad para confirmar el agrupamiento de las estaciones de medición de humedad en las unidades edafo-fisiográficas señaladas en el apartado 3, y poder interpretar el comportamiento hidrológico de los suelos. La relación entre textura y propiedades hidrológicas de los suelos ha sido ampliamente estudiada (Saxton et al., 1986; Smettem y Gregory, 1996; Kim et al., 1997; Arya et al., 1999).

En la unidad areniscas, la fracción arena nunca supera valores del 80 % en las dos profundidades analizadas (capa arable del suelo: 0-25 cm; base del perfil: 50-100 cm), con una apreciable concentración de arcilla en el horizonte inferior, que en algunos casos se traduce en la aparición de un horizonte argílico producto del lavado de material fino en el horizonte superior. En este último hay un mayor equilibrio entre las fracciones limo y arcilla. La clase textural media calculada para el conjunto de la unidad es franco-arenosa. En la unidad terrazas es destacable el dominio de la fracción arena, con una media de 85,1 y 83,5 % a 0-25 y 50-100 cm respectivamente, y, sobre todo, una apreciable homogeneidad textural en todo el perfil. En relación con la fracción arcilla, en la unidad terrazas nunca se supera el umbral del 10 % en ninguna de las dos profundidades analizadas. La clase textural de la unidad es arenosa-franca. En la unidad calizas, la textura es franco-arcillo-arenosa en el conjunto del perfil, con una fracción arcilla superior al 25 %, tanto en la base como en la superficie. Debido al proceso de lavado de material fino, la textura arenosa es más abundante en el horizonte superior (53,8 %) que en la base (45,4 %).

En relación con el contenido de gravas (tabla 1), los valores están comprendidos, en la mayoría de los casos, entre un 15 y un 20 %, aunque con una apreciable variabilidad espacial, a pesar de la agrupación de perfiles por unidades.

Tabla 1. Propiedades físicas e hidrodinámicas de los suelos en los horizontes superior (0-25 cm), inferior (50-100 cm) y conjunto del perfil (5, 25, 50 y 100 cm) correspondientes a las distintas estaciones de medición de humedad. M.O.: materia orgánica, D.A.: densidad aparente, α_{cc} : contenido de humedad a capacidad de campo, α_{pm} : contenido de humedad en punto de marchitamiento, CAU: cantidad de agua útil para las plantas.

Table 1. Physical and hydrodynamic properties of the soils in the upper horizon (0-25 cm), lower horizon (50-100 cm) and throughout the profile (5, 25, 50 and 100 cm) corresponding to the different soil moisture measuring stations. M.O.: organic matter; D.A.: bulk density; α_{cc} : soil moisture content at field capacity; α_{pm} : soil moisture content at wilting point; CAU: plant available water.

Unidad	Estación	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Gravas (%)	M.O. (%)	D.A. (gr cm ⁻³)	θ_{cc} (%)	θ_{pm} (%)	CAU (%)
Areniscas 0-25 cm (n = 8)	Media	72,8	12,4	14,8	18,7	0,74	1,60	0,137	0,066	0,071
	Desv. Est.	5,8	4,6	4,3	11,7	0,25	0,10	0,031	0,031	0,013
	Coef. Var. (%)	7,9	36,8	28,7	62,7	34,0	6,60	22,4	47,2	18,5
Terrazas 0-25 cm (n = 9)	Media	85,1	8,2	6,7	14,5	0,31	1,60	0,097	0,028	0,069
	Desv. Est.	3,2	2,4	2,2	6,7	0,06	0,10	0,018	0,011	0,009
	Coef. Var. (%)	3,7	29,2	32,5	46,0	20,1	6,6	18,5	39,6	12,4
Calizas 0-25 cm (n = 3)	Media	53,8	20,7	25,5	20,1	1,71	1,37	0,223	0,134	0,089
	Desv. Est.	6,7	3,2	5,3	10,6	0,79	0,08	0,020	0,017	0,003
	Coef. Var. (%)	12,5	15,7	20,6	52,8	46,2	3,6	9,0	12,6	3,5
Coef. Var. estaciones (0-25 cm)	(%), todas	15,7	46,7	58,5	58,0	84,4	8,3	37,1	71,6	16,7
Areniscas 50-100 cm (n = 8)	Media	70,2	10,3	19,5	19,4	0,35	1,61	0,166	0,097	0,069
	Desv. Est.	8,9	4,0	7,6	11,4	0,14	0,11	0,042	0,041	0,009
	Coef. Var. (%)	12,6	38,9	39,1	58,8	40,1	6,6	25,3	42,3	13,0
Terrazas 50-100 cm (n = 9)	Media	83,5	7,7	8,8	15,6	0,23	1,63	0,105	0,040	0,065
	Desv. Est.	6,0	3,0	4,6	8,5	0,05	0,04	0,023	0,018	0,007
	Coef. Var. (%)	7,2	39,4	52,4	54,6	21,6	2,3	21,7	44,7	10,2
Calizas 50-100 cm (n = 3)	Media	45,4	27,1	27,5	13,1	1,53	1,39	0,268	0,180	0,088
	Desv. Est.	2,7	5,5	5,3	9,6	0,91	0,05	0,028	0,010	0,012
	Coef. Var. (%)	5,9	20,4	19,6	73,7	59,2	3,6	10,5	5,6	15,6
Coef. Var. estaciones (50-100 cm)	(%), todas	15,7	20,3	65,7	58,1	61,0	122,0	41,8	66,5	14,6

El contenido de materia orgánica es bajo (tabla 1), con valores inferiores al 2 % en todos los casos. Esto se debe probablemente a la utilización agrícola de los suelos y a las limitaciones naturales propias de un ambiente semiárido. En las areniscas y terrazas, sólo dos de los 17 perfiles superan el umbral del 1 % y ello ocurre únicamente en el horizonte superior. En todos los casos se aprecia una disminución en el contenido de materia orgánica conforme aumenta la profundidad. Estos datos son significativos para ilustrar las limitaciones físicas de los suelos del área estudiada. Montanarella (2002) considera que un suelo con un contenido de materia orgánica < 1,7 % se encuentra en un estado que puede ser calificado de “pre-desertificación”. Este valor sólo es superado por el perfil L7 en su capa arable.

Respecto a la densidad aparente (tabla 1), el conjunto de estaciones incluidas en las unidades areniscas y terrazas presentan un valor alto y muy similar ($\approx 1,6 \text{ gr cm}^{-3}$). En la unidad calizas la densidad aparente es inferior a $1,4 \text{ gr cm}^{-3}$, debido probablemente a la mayor presencia de arcilla y materia orgánica y a la influencia de ambas en el mayor volumen del espacio poroso –macroporos entre agregados y microporos en el interior de los propios agregados– (Brady y Weil, 2002).

El valor de humedad, expresado en términos de cantidad de agua para las plantas (CAU), no varía de forma apreciable, en el conjunto de los perfiles, debido a la relación lineal observada entre α_{cc} y α_{pm} en los suelos estudiados y al hecho de que ambas variables aumenten o disminuyan en la misma proporción en cada uno de los perfiles. El registro más

Tabla 2. Coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en el análisis de regresión entre el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento (PM) y las fracciones texturales del suelo (** $P < 0,01$; NS = no significativo). Datos correspondientes al conjunto del perfil (0-100 cm), primeros centímetros del perfil (0-25 cm) y base del perfil (50-100 cm).

Table 2. Coefficients of determination (R^2) obtained in the regression analysis between the soil water content at field capacity (CC) and wilting point (PM) and the textural fractions of the soil (** $P < 0,01$; NS = not significant). Data correspond to the whole profile (0-100 cm), first centimetres of the profile (0-25 cm), and base of the profile (50-100 cm).

		Arena	Limo	Arcilla
CC	(0-100 cm)	- 0,89**	0,56**	0,89**
	(0-25 cm)	- 0,76**	0,01 ^{NS}	0,08 ^{NS}
	(50-100 cm)	- 0,86**	0,54**	0,74**
PM	(0-100 cm)	- 0,90**	0,57**	0,90**
	(0-25 cm)	- 0,77**	0,00 ^{NS}	0,04 ^{NS}
	(50-100 cm)	- 0,90**	0,51**	0,83**

bajo de CAU fue de 6,5 % en la base del perfil de las terrazas, mientras que el valor más alto se midió en las calizas (8,9 %). Este hecho contrasta, sin embargo, con las apreciables diferencias observadas tanto en α_{cc} como en α_{pm} , dependiendo de la distribución de las distintas fracciones texturales. En un análisis de regresión lineal paramétrico, considerando α_{cc} y α_{pm} como variables dependientes y las propiedades físicas del suelo como variables independientes, referido al conjunto de los 20 perfiles, se aprecia que en todos los casos la fracción arena es la variable con mayor grado de explicación ($R^2 = 0,76$), indistintamente del horizonte que se analice (Tabla 2 y Fig. 3). Estos resultados confirman la importancia de la textura para explicar la variabilidad espacial del contenido de agua en el suelo, en este caso expresado en valores significativos de la curva de retención, como se ha puesto de manifiesto en diferentes trabajos (Crave y Gascuel-Odoux, 1997; Gómez-Plaza et al., 2001; Ceballos et al., 2002a). En el caso estudiado, los mejores coeficientes obtenidos con la arena se explican por la relación negativa existente entre esta fracción textural y el volumen de agua retenida en el suelo. La fracción arena favorece altas tasas de infiltración, un drenaje efectivo del suelo y apreciables pérdidas por evaporación como consecuencia de su baja capacidad de retención hídrica (Ceballos et al., 2002b).

En el caso de la unidad areniscas, la mayor cantidad de arcilla en la base del perfil explica que los valores de α_{cc} y α_{pm} aumenten respecto a los de la superficie (tabla 1). Los valores más bajos de α_{cc} y α_{pm} se observan en la unidad terrazas debido al predominio de la fracción arenosa. En esta misma unidad, además, las diferencias entre las dos partes del perfil son pequeñas, en relación con las dos unidades restantes, debido a la mayor homogeneidad textural del perfil. Finalmente, la unidad con menor cantidad de arena es la que registra los valores más altos de α_{cc} y α_{pm} , apreciándose, además, diferencias entre los horizontes de acuerdo con las diferencias en esta fracción textural.

4.2. Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo

La figura 4 muestra la evolución temporal del contenido de humedad del suelo a lo largo del período estudiado, considerando el valor medio del total de las 20 estaciones incluidas en la zona de estudio, en los primeros 25 cm del perfil, la base del mismo y en su conjunto (media del valor de humedad a 5, 25, 50 y 100 cm). Se aprecia la estrecha dependencia de la humedad del suelo de la distribución de las precipitaciones y de la mayor o menor intensidad del proceso de evapotranspiración, con tres períodos representativos de condiciones ambientales contrastadas.

El primer período corresponde a los meses de junio y julio de 1999, en donde solamente un evento de precipitación superó el umbral de los 10 mm (13,1 mm el día n° 42, correspondiente al 12/07/1999) y la tasa de ETP alcanzó un máximo

Tabla 3. Coeficientes de variación (CV) de los distintos estados de humedad del suelo

Table 3. Coefficient of variance (CV) of the different states of soil moisture.

	Húmedo	Intermedio	Seco
Perfil completo			
(0-100 cm) CV (%)	30,0	27,4	30,1
Capa superficial			
(0-25 cm) CV (%)	32,9	30,3	36,1
Base (50-100 cm)			
CV (%)	30,6	31,8	35,4

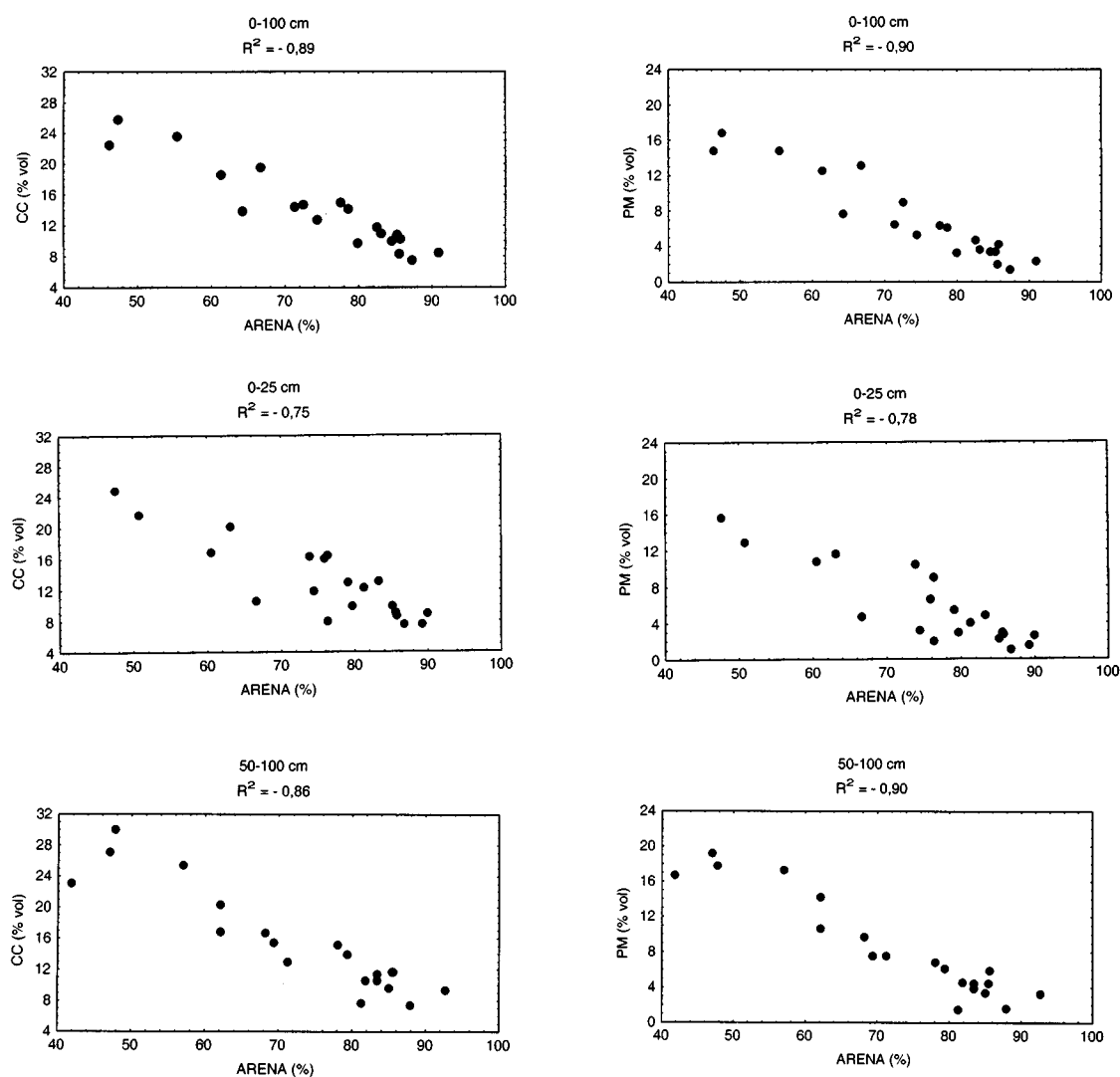


Figura 3. Análisis de regresión entre la fracción arena y los contenidos de humedad a capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento (PM), en el conjunto del perfil (0-100 cm), en la capa más superficial (0-25 cm) y en la base del mismo (50-100 cm). Nivel de significación $p < 0.01$. Datos correspondientes a las 20 estaciones de medición.

Figure 3. Regression analysis between the sand fraction and the soil moisture contents at field capacity (CC) and wilting point (PM) throughout the profile (0-100 cm), in the surface-most layer (0-25 cm) and the base of profile (50-100 cm). Level of significance $p < 0.01$ Data correspond to 20 measuring stations.

de $5,4 \text{ mm d}^{-1}$ durante la segunda quincena del mes de julio. El valor mínimo de humedad medido, para el conjunto del perfil, fue igual a 13,4 %, aunque con una diferencia apreciable entre la superficie y la base del perfil como consecuencia de la heterogeneidad textural del perfil.

Tras un otoño con precipitaciones por encima del promedio, hay que subrayar la existencia de un

período invernal seco que interrumpió el proceso de recuperación de la reserva de agua del suelo, habitual en esta estación del año. Entre el 1 de noviembre de 1999 y el 20 de marzo de 2000 únicamente cayeron 45 mm de lluvia sobre el conjunto de la zona. Sólo se registró un día con lluvia por encima del umbral de los 10 mm y se midió una racha seca de 50 días consecutivos. A pesar de ello,

Figura 4. Evolución temporal de la humedad media del suelo en el total del perfil edáfico (0-100 cm), en los primeros 25 cm y en la base del mismo (50-100 cm) durante el período de estudio. En la parte superior aparece la evolución de la precipitación (barras) y evapotranspiración –ETP– (línea gris discontinua con trazo fino) diarias.

Figure 4. Temporal evolution of soil moisture throughout the soil profile (0-100 cm), in the first 25 cm, and at the base of the profile (50-100 cm) during the study period. At the top: evolution of daily precipitation (bars) and evapotranspiration –ETP– (discontinuous fine grey line).

llama la atención la escasa afección sufrida por el valor de humedad medio en el conjunto del perfil, nunca por debajo del 15 %. Sólo al final de la racha seca se observa una inflexión apreciable en la línea que describe la evolución de la humedad en los primeros 25 cm del perfil. Este comportamiento se explica, en parte, por las bajas temperaturas características de los inviernos de la zona, que repercuten en una bajísima tasa de ETP. Concretamente, en los meses analizados la tasa de ETP nunca superó los 1,8 mm d⁻¹, siendo igual a 0 durante la primera quincena del mes de enero de 2000.

El verano de 2000 fue un período muy crítico en la zona, desde el punto de vista de la disponibilidad hídrica. La precipitación total registrada entre el 20 de mayo y el 10 de septiembre no superó los 30 mm. No hubo ningún día con una precipitación media superior a 10 mm, se produjo una racha de

30 días secos consecutivos y la ETP fue muy alta (la segunda quincena de agosto registró un promedio de 5,2 mm d⁻¹). Como consecuencia de ello, a comienzos del mes de septiembre se midió el valor mínimo de humedad de toda la serie (11,4 %), aunque con una diferencia apreciable entre la superficie y la base del perfil.

Finalmente, es conveniente destacar la evolución de la humedad en los últimos meses de la serie estudiada, caracterizados por la persistencia de precipitaciones, con varios eventos por encima de los 10 mm. El valor medio del perfil alcanzó un máximo del 23 % en el mes de enero de 2001, y permaneció más o menos estable durante las semanas posteriores. Es muy probable que en este período se hayan medido los valores máximos posibles en el perfil. En un trabajo anterior (Ceballos et al., 2002b), tras una serie de simulaciones de lluvia, en

las cuales los suelos alcanzaron la tasa de infiltración estable en los primeros 25 cm del perfil, el valor de humedad medido nunca superó el umbral del 20 %, cifra ligeramente inferior al máximo de humedad medido a la misma profundidad al final del período estudiado (21,4 % el día 8 de enero de 2001).

Para el estudio de los factores que gobiernan la variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo en zonas semiáridas, Gómez-Plaza et al. (2001) proponen la distinción de tres estados en el contenido de humedad: húmedo, intermedio y seco. Según el citado trabajo, la delimitación de los umbrales de humedad que separan los distintos estados establecidos es una decisión que adopta el investigador tras el análisis de una serie de observaciones, significativa en cuanto al valor de su información. A partir de los datos de precipitación, ETP y contenido de agua en el perfil del suelo en el período estudiado, es probable que la serie analizada refleje tanto el valor máximo como el mínimo susceptibles de ser medidos en la zona, como ya se ha señalado. Utilizando el criterio anterior, para el conjunto del perfil, el estado húmedo correspondería a un valor promedio de humedad superior al 20 %, el estado intermedio se referirá a aquellos valores comprendidos entre el 15 y el 20 % y el estado

seco correspondería a cifras inferiores al 15 %. Para cada uno de los tres estados fue calculado un valor medio, a partir de la media aritmética de aquellas mediciones con valores comprendidos en los rangos anteriormente señalados, con el objetivo de determinar los factores que regulan los modelos de distribución espacial de la humedad y su variación estacional (Fig. 5). De esta figura puede deducirse la permanencia temporal de los patrones espaciales de humedad, en función de la distribución similar de las estaciones, independientemente del estado de humedad. Por otro lado, se observa el agrupamiento de los perfiles de humedad coincidente con las unidades edafo-fisiográficas establecidas a priori. En el sector izquierdo del gráfico se localizan los perfiles agrupados en la unidad areniscas (perfiles E10, F6, H11, J14, H13, J12, F11, Q8), en el sector central, correspondiendo con los valores más bajos, se localizan los perfiles pertenecientes a la unidad terrazas fluviales (H7, I3, I6, J3, L3, K10, K4, M5, O7). Finalmente, promediando los valores más altos, en la parte derecha de la figura se encuentran los tres perfiles incluidos en la unidad calizas (N9, M9, L7).

La tabla 3 muestra los coeficientes de variación de los valores medios de humedad de las estaciones de control, correspondientes a los promedios tem-

E10 F6 H11 J14 H13 J12 F11 Q8 H7 I3 I6 J3 L3 K10 K4 M5 O7 N9 M9 L7

Figura 5. Valor de humedad medio de los perfiles correspondientes a los promedios temporales de los distintos estados de humedad: seco, intermedio y húmedo.

Figure 5. Mean soil moisture value of the profiles, corresponding to the temporal means of the different states of soil moisture: dry, intermediate and wet.

porales de los distintos estados de humedad y a diferentes profundidades. Se trata de un dato útil para comprobar si existe alguna tendencia entre variabilidad espacial y estado de humedad según proponen Qiu et al. (2001). Los resultados que aparecen en la tabla 3 muestran una notable homogeneidad en los coeficientes de variación calculados tanto para el conjunto del perfil como para los dos horizontes del mismo. Este resultado también apoya la hipótesis de una apreciable estabilidad del patrón de distribución espacial de la humedad en los suelos de la zona (Martínez-Fernández y Ceballos, 2003). No obstante, en los datos correspondientes al horizonte superficial y la base del perfil en el estado seco, sí se aprecia una mayor variabilidad que se puede atribuir al efecto de las fracciones texturales finas del suelo y al contenido de materia orgánica, a pesar de sus bajos valores, sobre la capacidad de retención hídrica (Ingelmo et al., 1994).

Para explicar las diferencias espaciales de humedad en los distintos estados analizados deben considerarse diversos factores como ya han sugerido estudios previos: i) variabilidad de los elementos del clima (Seyfried, 1998), ii) contrastes topográficos, orientación de las laderas y posición relativa del punto de medición en las laderas (Crave y Gascuel-Oudou, 1997; Famiglietti et al., 1998; Gómez-Plaza et al., 2000), iii) características de la cobertura superficial y uso de los suelos (Fu et al., 2000; Cantón et al., 2004), iv) propiedades físicas e hidráulicas del suelo (Saxton et al., 1986; Jaynes y Hunsaker, 1989; Famiglietti et al., 1998), v) tipo de flujo de agua a través de la matriz del suelo

dependiendo del valor de humedad edáfica antecedente (Grayson et al., 1997), etc. Debido a la uniformidad climática del territorio, la desconexión hidrológica de las estaciones de humedad, y la homogeneidad, tanto topográfica como del uso del suelo, característica del conjunto de la zona, se ha prestado una especial atención al análisis de las propiedades físicas del suelo como factor diferenciador de la distribución de su contenido de humedad. Para ello, se ha realizado un análisis de regresión entre cada uno de los tres estados de humedad anteriormente establecidos, y las variables fracción arena, limo y arcilla, el porcentaje de gravas, la materia orgánica y la densidad aparente. Por un lado, se ha realizado un análisis del conjunto del perfil y por otro se han analizado por separado la denominada capa arable (0-25 cm) y la base (50-100 cm) del perfil (tabla 4).

En dicha tabla se aprecia el papel determinante de las fracciones arena y arcilla para explicar las diferencias espaciales en los tres estados de humedad, considerando el conjunto del perfil, con un valor de R^2 0,55 en todos los casos, siendo esta circunstancia más evidente en el estado húmedo frente a los estados intermedio y seco. En el caso de la capa arable del suelo, la única variable que ha mostrado un coeficiente de determinación significativo con los tres estados de humedad ha sido la fracción arena, con un valor de R^2 entre 0,52 y 0,59. Se trata de una relación inversa debido a la escasa capacidad de retención de humedad de dicha fracción. En el caso de la base del perfil, de nuevo son las fracciones arena y arcilla las que presentan un mayor grado de explicación, observán-

Tabla 4. Coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en el análisis de regresión entre el contenido de agua en el suelo promedio de los distintos estados de humedad y las propiedades físicas del suelo (* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; NS = no significativo). Datos correspondientes al conjunto del perfil (0-100 cm), primeros centímetros del perfil (0-25 cm) y base del perfil (50-100 cm).

Table 4. Coefficients of determination (R^2) obtained in the regression analysis between the soil water content, mean of the soil of the different states of moisture, and the physical properties of the soil (* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; NS = not significant). Data correspond to the whole profile (0-100 cm), first centimetres of the profile (0-25 cm), and base of the profile (50-100 cm).

Estado de humedad	Húmedo			Intermedio			Seco		
	0-100 cm	0-25 cm	50-100 cm	0-100 cm	0-25 cm	50-100 cm	0-100 cm	0-25 cm	50-100 cm
Variabes físicas									
Arena	-0,64**	-0,58**	-0,61**	-0,55**	-0,52**	-0,40**	-0,55**	-0,59**	-0,37**
Limo	0,34**	0,07 ^{NS}	0,28*	0,26*	0,01 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,28*	0,00 ^{NS}	0,14 ^{NS}
Arcilla	0,72**	0,19 ^{NS}	0,64**	0,66**	0,08 ^{NS}	0,48**	0,64**	0,05 ^{NS}	0,44**
Gravas	-0,00 ^{NS}	-0,00 ^{NS}	-0,01 ^{NS}	-0,00 ^{NS}	-0,00 ^{NS}	-0,00 ^{NS}	-0,01 ^{NS}	-0,00 ^{NS}	-0,03 ^{NS}
Materia Orgánica	0,23*	0,02 ^{NS}	0,07 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,01 ^{NS}
Densidad aparente	-0,23*	-0,02 ^{NS}	-0,19 ^{NS}	-0,14 ^{NS}	-0,00 ^{NS}	-0,08 ^{NS}	-0,12 ^{NS}	-0,00 ^{NS}	-0,09 ^{NS}

Tabla 5. Resultados del análisis de regresión múltiple paso a paso entre el contenido medio de agua en el suelo de los distintos estados de humedad y las propiedades físicas del suelo. Datos correspondientes al conjunto del perfil (0-100 cm), a los primeros centímetros (0-25 cm) y a la base del mismo (50-100 cm). Valor-p <0,001.

Table 5. Results of the stepwise multiple regression analysis between the mean water content of the soil of the different states of soil moisture and the physical properties of the soil. Data correspond to the whole profile (0-100 cm), the first centimetres (0-25 cm) and the base of the profile (50-100 cm). P-value <0,001.

Profundidad	Estado de humedad	VARIABLES INDEPENDIENTES	R²
0-100 cm	Húmedo	Arcilla** y materia orgánica**	0,83
0-100 cm	Intermedio	Arcilla** y materia orgánica**	0,81
0-100 cm	Seco	Arcilla** y materia orgánica**	0,77
0-25 cm	Húmedo	Arena, arcilla*, materia orgánica, gravas y limo	0,81
0-25 cm	Intermedio	Arena**	- 0,52
0-25 cm	Seco	Arena, gravas, arcilla*, materia orgánica y densidad aparente	0,79
50-100 cm	Húmedo	Arcilla**, materia orgánica** y limo*	0,77
50-100 cm	Intermedio	Arcilla**, materia orgánica** y limo	0,69
50-100 cm	Seco	Arcilla**, materia orgánica* y limo	0,61

* p<0,05; **p<0,01

dose una apreciable diferencia entre el estado húmedo y los estados intermedio y seco.

Estos resultados son acordes con los hallados por otros autores que relacionaron la variabilidad espacial de la humedad del suelo con variaciones en la textura del mismo. Por ejemplo, Fitzjohn et al. (1998), en una zona de *badlands* en el centro de España, encuentran una dependencia significativa de la distribución de la humedad del suelo de las variaciones texturales del mismo. Gómez-Plaza et al. (2001) destacan la fracción arena como clase textural con mayor grado de explicación en suelos francos del sudeste peninsular, obteniéndose los mejores resultados en las correlaciones correspondientes al estado húmedo. Finalmente, Famiglietti et al. (1998), en suelos limosos y arcillosos en Texas, señalan la importancia que tiene el contenido de arcilla en la estación seca, en relación con su capacidad de retención hídrica, mientras que en los períodos húmedos encuentran una mayor relación con la porosidad.

Con el objetivo de mejorar el grado de explicación de la variabilidad espacial de la humedad, de acuerdo con la influencia de las propiedades físicas del suelo, y observar en qué grado estas propiedades se interrelacionan, se realizó un análisis de regresión múltiple paso a paso (*stepwise multiple regression analysis*). Esta técnica analiza la influencia de todos los factores incluidos en el modelo (variables independientes), eliminando

aquellos que no mejoran el grado de explicación de la variable dependiente. Considerando el conjunto de variables del suelo que aparece en la primera columna de la tabla 4, se logra incrementar a un 80 % el grado de la explicación de la variable dependiente como se muestra en la tabla 5 para el conjunto del perfil (0-100 cm). El mejor resultado se obtiene incluyendo en la regresión, como variables independientes, aquellas directamente relacionadas con la capacidad de retención hídrica de los suelos, como la fracción arcilla y la materia orgánica, a pesar de los bajos valores de ésta última, comentados con anterioridad. Destaca el hecho de que el resultado del análisis sea casi idéntico en los tres estados de humedad analizados, ya que, a diferencia de lo observado en alguno de los trabajos comentados anteriormente (Famiglietti et al., 1998), los factores que explican el contenido de agua en el suelo no varían estacionalmente. Esta circunstancia puede corroborar la elevada estabilidad temporal de la humedad del suelo en la zona estudiada (Martínez-Fernández y Ceballos, 2003).

Los resultados del análisis de regresión múltiple correspondiente a la capa arable del suelo muestran que, para mejorar el grado de explicación obtenido en el análisis de regresión simple (tabla 4), tiene que considerarse un conjunto amplio de factores. Aun así, con los datos del estado intermedio de humedad ningún modelo mejora el resultado de la regresión simple.

Finalmente, en el caso de la base del perfil, de nuevo sorprende la aparición de la materia orgánica, por tratarse de contenidos muy bajos en todos los casos. Es significativo también el papel del limo en relación con una mayor capacidad de retención hídrica del suelo. Para tratar de estimar el peso de la materia orgánica en el resultado de la regresión, se procedió a un análisis, para cada uno de los tres estados de humedad, considerando como variables independientes sólo el limo y la arcilla. Se observó una disminución apreciable en el valor de los coeficientes de determinación. En ausencia de materia orgánica, R^2 baja de 0,77 a 0,66 en estado húmedo, de 0,69 a 0,45 en estado intermedio y de 0,61 a 0,44 en estado seco. Estos resultados matizarían las conclusiones de trabajos como el de Danalatos et al. (1994), que apuntan que valores de materia orgánica bajos no tienen ningún tipo de efecto sobre la capacidad de retención de agua. En relación con el limo, su presencia en el modelo de regresión puede deberse al predominio de limo fino, con un tamaño de partículas más próximo al de la arcilla que al de la arena.

5. Conclusiones

La irregularidad pluviométrica durante el período analizado, propia de un clima mediterráneo, ha posibilitado el estudio del contenido de humedad del suelo ante condiciones ambientales contrastadas (estados húmedo, intermedio y seco). Esto ha permitido la identificación de los valores promedio máximo y mínimo de humedad del suelo.

Debido a la homogeneidad espacial de las variables climáticas, la ausencia de conexión hidrológica entre las estaciones de medición, la uniformidad topográfica y de usos del suelo, la textura ha sido la propiedad física del suelo más útil para comprender las diferencias en el comportamiento hídrico de los suelos estudiados.

Los resultados obtenidos muestran la incidencia directa de la textura sobre i) la capacidad de retención hídrica de los suelos y la cantidad de agua disponible para las plantas; ii) la variabilidad espacial de la humedad en el conjunto de la zona, iii) así como su distribución a lo largo del perfil.

A pesar del predominio de la fracción arena, superior al 70 % en la mayor parte del territorio, el

papel de las fracciones texturales más finas y de la materia orgánica es esencial para comprender la dinámica espacio-temporal de la humedad en los suelos estudiados.

El control del contenido de agua edáfica, por parte de las fracciones finas de la matriz del suelo, es independiente del valor medio de humedad, hecho que puede relacionarse con la apreciable estabilidad temporal de los patrones espaciales de humedad observados.

Los resultados obtenidos pueden ser de utilidad para comprender la respuesta de determinados sistemas hidrogeomorfológicos mediterráneos. En un contexto de cambio global, la humedad del suelo puede actuar como un indicador válido de la intensidad del mismo al ser una variable dependiente tanto de las precipitaciones como de las temperaturas. Igualmente, cambios en el uso del suelo (bien hacia una intensificación de las prácticas agrícolas, o bien hacia el abandono) pueden influir en propiedades del suelo como la distribución de la fracción textural o el contenido de materia orgánica que, como se ha visto en este trabajo, inciden directamente en la dinámica del agua en el suelo.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Junta de Castilla y León (Proyecto SA016-03), al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto REN2003-00381) y al Ministerio de Medio Ambiente (Proyecto RESEL), sin cuya financiación no habría sido posible la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Arya, L.M.; Leij, F.J. & Van Genuchten, M. Th., 1999. Relationship between particle-size distribution and soil water retention. In: M.Th. van Genuchten; F.J. Leij & L. Wu (Editors), *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. USDA-University of California, Riverside, pp. 931-946
- Brady, N.C. & Weil, R.R. (2002): *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, New Jersey. 960 pp.
- Canadell, J. & Zedler, P.H. (1995): Woody-plant underground structures. In: Kalin Arroyo, M; Zedler, P.H & Fox, M.D. (Ed.), *Ecology and Biogeography of Mediterranean*

- Ecosystems in Chile, California and Australia*, pp. 177-210. New York: Springer-Verlag, 455 pp.
- Cantón, Y.; Solé-Benet, A. & Domingo, F. (2004): Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. *Journal of Hydrology*, 285. 199-214.
- Cassel, D.K.; Kachanoski, R.G. & Topp, G.C. (1994): Practical consideration for using a TDR cable tester. *Soil Technology*, 7. 113-126.
- Ceballos, A.; Martínez Fernández, J.; Yuste, C. & Luengo Ugidos (2002a): Comportamiento hidrológico de suelos texturalmente contrastados del sector central de la Cuenca del Duero. En Pérez González, A., Vegas, J. & Machado, M.J. (eds): *Aportaciones de la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio*: 241-248. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Ceballos, A.; Martínez-Fernández, J.; Santos, F. & Alonso, P. (2002b): Soil-water behaviour of sandy soils under semi-arid conditions in the Duero Basin (Spain). *Journal of Arid Environments*, 51. 501-519.
- Ceballos, A.; Martínez-Fernández, J. & Luengo-Ugidos, M.A. (2004): Analysis of rainfall trends and dry periods on a pluviometric gradient representative of Mediterranean climate in the Duero Basin, Spain. *Journal of Arid Environments*, 58. 214-232.
- Cerdà, A. (1997): Distribución de la humedad del suelo en las cárcavas del sur del País Valenciano. *Cuadernos de Geografía*, 61. 1-13.
- Conacher, A.J. & Sala, M. (Eds) (1998): *Land Degradation in Mediterranean environments of the world*: nature and extent, causes and solutions. John Wiley and Sons, England. 520 pp.
- Crave, A. & Gascuel-Oudou, C. (1997): The influence of topography on time and space distribution of soil surface content. *Hydrological Processes*, 11. 203-210.
- Danalatos, N.G.; Kosmas, C.S.; Driessen, P.M. & Yassoglou, N. (1994): Estimation of the draining soil moisture characteristic from standard data as recorded in routine soil surveys. *Geoderma*, 64. 155-165.
- Doerr, S.H.; Ferreira, A.J.D.; Walsh, R.P.D.; Shakesby, R.A.; Leighton-Boyce, G. & Coelho, C.O.A. (2003): Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal. *Hydrological Processes*, 17. 366-377.
- Entin, J.K.; Robock, A.; Vinnikov, K. Y.; Hollinger, S.E.; Liu, S. & Namkhai, A. (2000): Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *Journal of Geophysics Research*, 105. 11865-11877.
- 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.
- FAO (1998): *World Reference base for soil resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. 88 pp.
- Fitzjohn, C.; Ternan, J.L. & Willians, A.G. (1998): Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. *Catena*. 32: 55-70.
- Fu, B.; Chen, L.; Ma, K.; Zhou, H. & Wang, J. (2000): The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in Northern Shaanxi, China. *Catena*. 39, 69-78.
- 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 respuesta hidrológica*. Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Madrid. 185 pp.
- Gómez-Plaza, A.; Alvarez-Rogel, J.; Albaladejo, J. & Castillo, V. (2000): Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrological Processes*, 14. 1261-1277.
- Gómez-Plaza, A.; Martínez-Mena, M., Albaladejo, J. & Castillo, V. (2001): Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, 253. 211-226.
- Grayson, R.B.; Western, A.W. & Chiew, F.H.S. (1997): Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls. *Water Resources Research*, 33. 2897-2908.
- Hawke, R.M. & McConchie, J.A. (2003): Variability of in situ moisture measurements and implications for modelling hillslope processes. *Environmental and Engineering Geoscience*, 9. 213-223.
- Ingelmo, F.; Cuadrado, S.; Ibáñez, A. & Hernández, J. (1994): Hydric properties of some Spanish soils in relation to their rock fragment content: implications for runoff and vegetation. *Catena*, 23. 73-85.
- Jaynes, D.B. & Hunsaker, D.J. (1989): Spatial and temporal variability of water content and infiltration on a flood irrigated field. *Transactions of ASAE*, 32. 1229-1238.
- Kim, C.P. & Stricker, J.N.M. (1996): Influence of spatially variable soil hydraulic properties and rainfall intensity on the water budget. *Water Resour. Res.*, 32. 1699-1712.
- Kosmas, C.; Moustakas, N.; Danalatos, N.G. & Yassoglou, N. (1994): The effect of rock fragments on wheat biomass production under highly variable moisture conditions in Mediterranean environments. *Catena*, 23. 191-198.
- Kutilek, M. & Nielsen, D.R. (1994): *Soil Hydrology*. Ed. Catena Verlag. 370 pp.
- Luengo Ugidos, M.A.; Ceballos, A.; Martínez Fernández, J. & Yuste, C. (2002): Las rachas secas en el sector central de la cuenca del Duero. *Investigaciones Geográficas*, 27. 65-82.
- Mahmood, R. (1996): Scale issues in soil moisture modelling: problems and prospects. *Progress in Physical Geography*, 20. 273-291.
- Martínez Fernández, J. (1996): *Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo*. Servicio Publicaciones. Universidad de Murcia. 191 pp.
- Martínez Fernández, J. & Ceballos, A. (2001): Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. En López, J.J. & Quemada, M. (eds), *Temas de Investigación de Zona no Saturada*: 37-43. Universidad Pública de Navarra. Gobierno de Navarra, Navarra.

- Martínez-Fernández, J. & Ceballos, A., (2003): Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1647-1656.
- Martínez-Mena, M.; Williams, A.G.; Ternan, J.L. & Fitzjohn, C. (1998): Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment. *Soil & Tillage Research*, 48 (1-2), 71-80.
- Montanarella, L. (2002). The protection of arid and semiarid soils in Europe. En Faz, A.; Ortiz, R. & Mermut A.R. (eds): *Sustainable use and management of soils in arid and semiarid regions*, vol. I: 148-161. Cartagena.
- Phillips, J.D. (1992): Deterministic chaos in surface runoff. En Parsons, A. J. & Abrahams, A.D. (eds): *Overland flow: hydraulics and erosion mechanics: 177-197*. UCL Press, London.
- Rana, G. & Katerji, N. (2000): Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, 13. 125-153.
- Rivas Martínez, S. (1987): *Memoria del mapa de las series de vegetación de España*. ICONA, Madrid.
- Qiu, Y.; Fu, B.; Wang, J & Chen, L (2001): Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 49. 723-750.
- Saxton, K.E.; Rawls, W.J.; Rosemberg, J.S. & Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Sci. Soc. Am. J.*, 50. 1031-1036.
- Seyfried, M. (1998): Spatial variability constraints to modeling soil water at diferent scales. *Geoderma*, 85. 231-254.
- Shakesby, R.A.; Doerr, S.H. & Walsh, R.P.D. (2000): The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *Journal of Hydrology*, 231-232. 178-191.
- Siemcalsa (1997): *Mapa Geológico y Minero de Castilla y León, 1:400.000*. Consejería de Industria, Comercio y Turismo, Junta de Castilla y León. Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León.
- Smettem, K.R.J. & Gregory, P.J. (1996): The relation between soil water retention and particle size distribution parameters for some predominantly sandy Western Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 34. 695-708.
- Topp, G.C. & Davis, J.L. (1985): Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49. 19-24.
- Topp, G.C.; Davis, J.L. & Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16. 574-582.
- 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.
- Vinnikov, K.Y.; Robock, A.; Speranskaya, N.A. & Schlosser, C.A. (1996): Scales of temporal and spatial variability of mid-latitude soil moisture. *Journal of Geophysical Research*, 101 (D3): 7163-7174.
- Wagner, W.; Lemoine, G. & Rott, H. (1999): A method for estimating soil moisture from ERS Scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment*, 70. 191-207.
- Western, A.W.; Blöschl, G. & Grayson, R.B. (1998): Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 205. 20-37.