

ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES HÍDRICAS DE LOS SUELOS MEDIANTE EL USO DE FUNCIONES DE EDAFO-TRANSFERENCIA

Martínez Fernández, J. y A. Ceballos Barbancho.

Departamento de Geografía. Universidad de Salamanca. Cervantes, 3. 37002 Salamanca. jmf@gugu.usal.es

RESUMEN. La estimación indirecta de propiedades hídricas de los suelos mediante funciones de edafo-transferencia (*pedotransfer functions*), FET's, es una útil alternativa para zonas en las que los datos son escasos o inexistentes. En este trabajo se han utilizado dos bases de datos independientes, una para la generación y calibración de FET's, y otra para la validación de los modelos. Mediante el uso de FET's se ha perseguido un doble objetivo. En primer lugar, se pretendía la estimación de determinados valores característicos de la curva de retención, $\theta(h)$, (contenido de humedad a saturación, a capacidad de campo y punto de marchitamiento), de reconocida significación hidro-edáfica. Como segundo objetivo, se abordó la estimación de un número suficiente de valores de la función $\theta(h)$, para poder obtener la curva de retención hídrica completa y su modelización. En relación con la estimación de valores característicos de la curva de retención, se han obtenido FET's con resultados satisfactorios a partir de la utilización únicamente de dos o tres variables predictoras, básicamente fracciones texturales y densidad aparente y, ocasionalmente, materia orgánica. Los porcentajes de varianza explicada por las ecuaciones de regresión son siempre altos. La bondad de las estimaciones, en términos de error medio y de raíz del error cuadrático medio, ha sido muy satisfactoria. Se estimaron nueve valores de la curva de retención con el objeto de comparar las diferencias entre la modelización a partir de datos medidos en laboratorio y los obtenidos a partir de las FET's. En todos los casos la bondad de las estimaciones es elevada. Se muestra que la estimación de $\theta(h)$ a partir de datos generados por FET's puede ser una alternativa para aquellos suelos en los que dicha información no esté disponible.

ABSTRACT. Pedotransfer functions (FET's) are a useful tool to estimate soil water characteristics when there aren't data or the information is scarce. Two independent databases were used to generate and to validate FET's. This paper has two main goals. Firstly, three well defined values of $\theta(h)$ (saturated soil moisture, field capacity and wilting point) were estimated by specific FET's. Secondly, the entire retention capacity curve was estimated and fitted using several points of $\theta(h)$ estimated by FET's. Only two or three soil physical variables are needed to estimate the three specific soil water values. Mainly texture, bulk density and organic matter have the best results as independent variables. The estimations are good in term of mean error and rooted mean squared error. Nine points of the retention curve were estimated to compare fitted curves

from observed data and fitted curves from estimated data. In all cases studied the estimation goodness is satisfactory. The results show that $\theta(h)$ estimation using pedotransfer functions can be an alternative method when information about soil water properties is not available.

1.- Introducción

La modelización del comportamiento del agua en la denominada zona no saturada está siendo objeto de una atención creciente en los últimos años. Es indudable su interés para el estudio de procesos como la absorción de agua y nutrientes por las raíces, la contaminación de suelos y acuíferos, la erosión edáfica, la recarga subterránea o el establecimiento del balance hídrico. La modelización del agua en el suelo requiere el conocimiento preciso de una serie de propiedades físicas e hídricas. La información básica sobre las primeras suele estar disponible, como es el caso de la composición granulométrica, el contenido de materia orgánica, la densidad aparente o la porosidad, pues forman parte de las analíticas rutinarias. Sin embargo, es más improbable que en un determinado punto o territorio existan datos sobre propiedades hídricas fundamentales para la modelización hidrológica de un suelo. Una de esas propiedades básicas es la capacidad de retención de agua, expresada por la curva característica de humedad, $\theta(\psi)$, y definida como la relación entre el contenido de humedad (θ) y el potencial matricial (ψ) o energía con la que es retenida por el suelo.

Una alternativa para hacer frente a esta limitación es abordar el estudio de dichas propiedades hídricas mediante su estimación. Existen diferentes enfoques para estimar la función que describe la capacidad de retención hídrica para un determinado rango de potencial matricial o bien el contenido de humedad para un valor dado de potencial. Una de estas estrategias consiste en la estimación de tales propiedades mediante funciones de edafo-transferencia (FET's), *pedotransfer functions* (Bouma y Van Lanen, 1987; Bouma, 1989). Las FET's se basan en análisis de regresión para estimar propiedades hídricas a partir de características físicas de los suelos (textura, densidad aparente, materia orgánica, mineralogía de arcillas, porosidad, ...) con las que están relacionadas. Son funciones que tienen como argumentos básicos datos que se utilizan en las descripciones de los suelos y dan como resultado funciones hidrológicas (Tiejte y Tapkenhinrichs, 1993).

Se han propuesto diferentes FET's para la estimación de valores específicos de la función $\theta(\psi)$ (Aina y Periaswamy, 1985; Dahiya et al. 1988; Espino et al. 1995; Batjes, 1996; Romano y Santini, 1997; Mayr et al. 1999), de la curva de retención completa (Saxton et al. 1986; Wösten y Van Genuchten, 1988; Vereecken et al. 1989; Tiejte y Tapkenhinrichs, 1993; Scheinost et al. 1997; Romano y Santini, 1997; Van den Berg et al. 1997; Rajkai et al. 1999) o de los parámetros que la definen (Bouroufi et al. 1999). En ocasiones se formulan y proponen FET's generadas a partir de bases de datos de suelos con características contrastadas (Batjes, 1996; Van den Berg et al. 1997; Wösten et al. 1999; Rajkai et al. 1999), en otras se recurre a funciones preestablecidas con el objeto de comprobar cuales se adecuan mejor a los tipos de suelos de un determinado territorio (Tiejte y Tapkenhinrichs, 1993; Romano y Santini, 1997; Bastet et al. 1999; Young et al. 1999; Ungaro y Calzolari, 2001).

La ventaja fundamental del uso de FET's radica en poder conocer, de una forma precisa y fiable, atributos hídricos de los suelos que son costosos, tediosos y difíciles de medir, mediante el empleo de variables edáficas de medición sencilla o habitualmente disponibles en cualquier base de datos edafológica.

En este trabajo se ha perseguido un doble objetivo. Por un lado, estimar mediante funciones de edafo-transferencia determinados valores característicos de la curva de retención, de indudable significación física e hidrológica, como es el caso del contenido de humedad a saturación, el correspondiente a la capacidad de campo y el fijado como punto de marchitamiento. Como segundo objetivo, se abordó la estimación de un número suficiente de valores de la función $\theta(\psi)$, para poder obtener la curva de retención hídrica completa y, posteriormente, llevar a cabo su modelización.

2.- Material y métodos

2.1 Base de datos

Para la generación y calibración de las FET's se ha utilizado una base de datos proveniente de 25 perfiles de suelo (97 muestras) situados en el sector central de la cuenca del Duero (SE de la Prov. de Zamora), distribuidos sobre una superficie de 1287 km². Además, se empleó un conjunto de 50 muestras, correspondientes a otros 10 perfiles, recogidas en la misma zona e independientes de las anteriores, para la validación de los modelos. En la tabla 1 aparece un resumen de las características físicas de cada una de las bases de datos.

Cada una de las muestras duplicadas fueron analizadas en el laboratorio para determinar una serie de propiedades físicas e hídricas. Se analizó la composición textural mediante tamización para las fracciones arena (arena muy fina, fina, media, gruesa, muy gruesa y arena total) y limo (fino y grueso), y el método de la pipeta Robinson para la fracción arcilla. El contenido de materia orgánica se determinó mediante el método de oxidación con dicromato potásico.

La recogida de las muestras en monolitos de suelo inalterados y de volumen conocido, permitió el cálculo directo de la densidad aparente.

Tabla 1. Características físicas de los suelos analizados

	Densidad aparente (g.cm ⁻³)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)
Calibración (n=97)					
Mínimo	0.91	3.6	1.7	2.7	0.07
Máximo	1.94	93.3	48.1	64.4	12.48
Media	1.56	71.0	13.5	15.5	0.85
Desv. Típica	0.10	11.0	1.3	12.3	0.40
Validación (n=50)					
Mínimo	1.27	65.6	3.6	2.7	0.16
Máximo	1.78	89.7	19.3	21.6	2.87
Media	1.57	79.6	11.5	8.9	0.58
Desv. Típica	0.10	4.8	4.4	5.3	0.53

La capacidad de retención hídrica se analizó en cada uno de dichos monolitos. Se empleó el método del recipiente de tensión hídrica (Viville y Ambroise, 1982; Martínez Fernández, 1996) para valores de pF (logaritmo del potencial matricial expresado en cm de agua) igual a cero, hasta pF 2.3 ($\psi = -200$ cm), combinado con la utilización de la membrana a presión para valores de pF 3 ($\psi = -1000$ cm) a pF 4.2 ($\psi = -15000$ cm). Con esta metodología se obtuvieron para cada muestra nueve parejas de valores experimentales de humedad y potencial matricial, número más que suficiente para abordar la modelización de la curva de retención completa.

Se han distinguido tres valores característicos del contenido de humedad del suelo. En primer lugar, el contenido a saturación, θ_s , aquél que expresa la capacidad máxima de un suelo para albergar agua. Ha sido considerado como el correspondiente a un potencial matricial igual a cero. En segundo lugar, se determinó el contenido de humedad a capacidad de campo, θ_{cc} . Se refiere a la cantidad de agua que un suelo, inicialmente seco y posteriormente saturado, es capaz de retener una vez que el drenaje es inapreciable (Cassel y Nielsen, 1986). Este concepto, de indudable significación física e hidrológica, representa el límite superior de disponibilidad hídrica. Muy frecuentemente se suele hacer corresponder con un valor fijo de potencial matricial, algo que puede entrañar ciertas dosis de arbitrariedad. En este trabajo ha sido estimado el valor específico de potencial matricial o de pF, correspondiente al valor de humedad a capacidad de campo para cada muestra de suelo. Se ha obtenido dicho valor una vez calculada la curva de retención completa, a partir de los datos experimentales y su ajuste al modelo de Van Genuchten (1980). Es el valor coincidente con la intersección de las tangentes de las dos ramas de la curva que definen la inflexión de $\theta(\psi)$, previa a su estabilización para valores muy bajos de ψ .

Por último, se determinó el contenido de humedad conocido como punto de marchitamiento, θ_{pm} . Este valor, aunque también ha sido controvertido, es considerado como el límite inferior de disponibilidad de agua (Cassel y Nielsen, 1986) y se sitúa en la cantidad de humedad

retenida con una energía equivalente a $\psi = -15000$ cm (pF 4.2).

2.2 Análisis estadístico

El procedimiento para la formulación de FET's se basa en el establecimiento de análisis de regresión lineal múltiple entre características físicas (variables independientes) e hídricas (variables dependientes). Una vez verificada la bondad del ajuste de las funciones y obtenidas las FET's que mejor resultado han ofrecido (valor máximo de R^2 , $p < 0.001$), se ha llevado a cabo la validación de los modelos mediante estimaciones realizadas con muestras independientes de las utilizadas en la fase anterior.

Como variables predictoras se utilizaron las fracciones texturales arena, limo y arcilla, el contenido de materia orgánica y la densidad aparente. La estimación de variables hídricas conformó dos tareas diferenciadas. En primer lugar, se llevó a cabo la formulación de las FET's que mejor estimaran θ_s , θ_{cc} y θ_{pm} . En una segunda fase se abordó la estimación de las curvas de retención completas.

Habitualmente se procede a la estimación de $\theta(\psi)$ desde dos planteamientos diferentes. En unos casos se obtienen FET's para la estimación de determinados parámetros, ya sea de forma (Vereecken et al. 1989; Espino et al. 1995) o de base física (Arya et al. 1999), de modelos preestablecidos que definen la función. El segundo enfoque consiste en estimar mediante FET's un número reducido de puntos de la curva (Van den Berg et al. 1997) y a éstos aplicarles un modelo.

En este caso se ha utilizado una aproximación cercana a este segundo enfoque. Se obtuvieron las FET's que mejor ajuste daban en relación con la estimación de los nueve puntos de la función $\theta(\psi)$ obtenidos experimentalmente. Es bastante usual la utilización de dos o tres valores de potencial (Rawls et al. 1982; Puckett et al. 1985), como máximo, y en pocas ocasiones se ha empleado un número similar de puntos (Batjes, 1996).

A los valores estimados mediante dichas funciones se les ajustó el modelo de Van Genuchten, (1980):

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

donde θ_r y θ_s son el contenido de humedad residual y a saturación, respectivamente, α y n son parámetros empíricos de forma. Para este ajuste se empleó el paquete informático RETC (Van Genuchten et al. 1991). Por último, se compararon los resultados así calculados con los del ajuste de este modelo a los valores obtenidos experimentalmente.

Para la verificación de la bondad de las estimaciones llevadas a cabo con las FET's los resultados fueron evaluados mediante el cálculo del error medio (EM) y de la raíz del error cuadrático medio (RECM), definidos del siguiente modo:

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - e_i)^2}{N} \times 100 \quad (2)$$

$$RECM = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - e_i)^2}{N} \right]^{1/2} \times 100 \quad (3)$$

donde N es el número de observaciones y $(m_i - e_i)$ es la diferencia entre el valor medido, m_i , y el valor estimado, e_i . El error medio sirve para identificar la posible presencia de sesgo, es decir, una sistemática sobreestimación o subestimación de los valores estimados. RECM ofrece información sobre la dispersión entre valores observados y estimados.

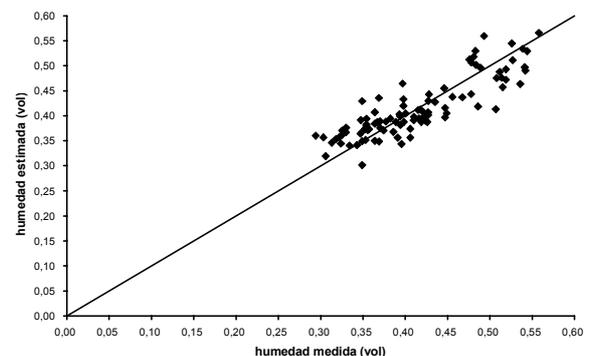
3.- Resultados y discusión

3.1 Análisis de regresión múltiple

En la tabla 2 aparecen las FET's, relativas a los tres valores de $\theta(\psi)$ referidos, que mejor resultado han dado en el análisis de regresión múltiple. En los tres casos la bondad del ajuste es bastante satisfactoria en términos de varianza explicada, EM y RECM. La relación entre valores medidos y estimados (Fig. 1) es bastante buena. Únicamente se aprecia un grado mayor de dispersión en el caso del contenido de humedad a saturación, como pone de manifiesto también el valor de RECM. Esto puede deberse no sólo al procedimiento de estimación, sino también al error inherente al método experimental (Martínez Fernández, 1996). La manipulación de muestras completamente saturadas siempre es más problemática que cuando han perdido parte de su contenido de humedad.

Para θ_s se ha obtenido la mejor función con la combinación de la fracción arcilla, el contenido de materia orgánica y la densidad aparente. Con valores de potencial matricial de cero o próximos, las características estructurales tienen un mayor protagonismo en relación con la retención de agua, en detrimento de las características texturales. Esto explica la presencia tanto de la densidad aparente como de la materia orgánica, aunque en el caso de esta última es reseñable el que la relación obtenida sea inversa. Esto, a primera vista podría parecer sorprendente, pero quizá tenga su explicación en el bajo contenido de materia orgánica (media 0.85%) de la mayoría de los suelos analizados.

a)



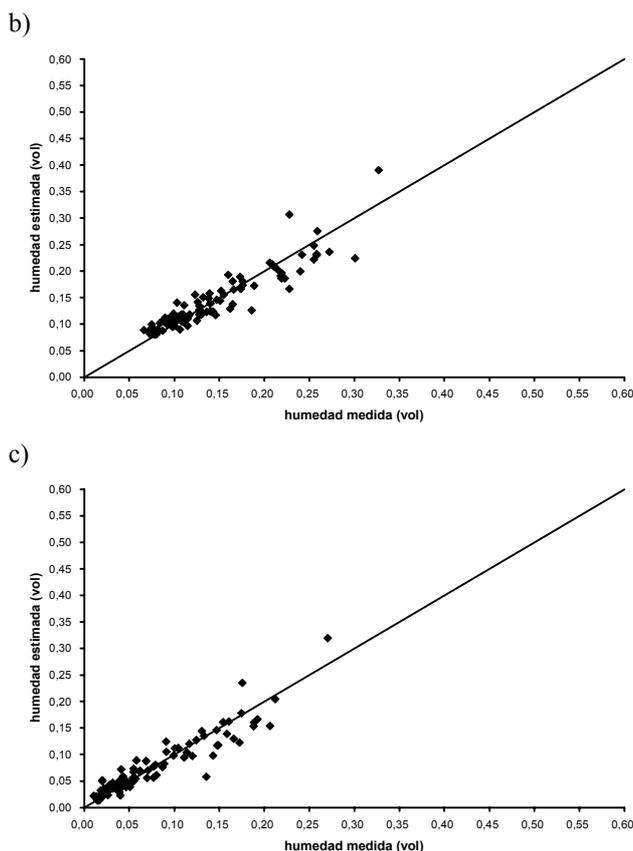


Fig.1. Comparación entre valores medidos y estimados con las FET's correspondientes al contenido de humedad a saturación (a), capacidad de campo (b) y punto de marchitamiento (c).

Tanto θ_{cc} como θ_{pm} tienen a las fracciones arena y arcilla como variables predictoras. A medida que el potencial matricial se hace más negativo, es decir, la succión aumenta, las características texturales son las principales responsables de la capacidad de retención. La relación inversa de la arena y directa de la arcilla ponen de manifiesto dicho comportamiento.

En la tabla 3 aparece el resultado del análisis de regresión para los nueve valores experimentales de la curva de retención. Para alcanzar el mejor ajuste en todos los casos ha sido necesario recurrir únicamente a dos o tres variables predictoras. El hecho de necesitar un número tan reducido de variables, todas ellas muy comunes, redundando en la versatilidad de las FET's y en su aplicabilidad.

Se ha utilizado la transformación logarítmica de algunas variables, para obtener un mejor resultado. Desde hace tiempo (Gosselink et al. 1984) se ha demostrado que las

relaciones entre determinadas propiedades físicas no siempre son lineales.

Aunque el ajuste es ligeramente inferior en el caso de los puntos próximos a pF 0, el resultado, en general, es satisfactorio. El EM es muy bajo, siempre próximo a cero y no se evidencia ningún sesgo significativo. El grado de dispersión entre valores medidos y estimados, expresado por RECM, es bastante bajo, siempre inferior al 5%. Igual que ocurría con los tres valores analizados anteriormente, se observa, en relación con las variables predictoras, una distribución similar entre las que tienen una significación estructural (materia orgánica y densidad aparente) y textural, a lo largo de la curva de retención. Un hecho reseñable es la presencia de la fracción arcilla como variable predictoras en todas las FET's. A pesar de que en los suelos de la base de datos utilizada la fracción predominante es la arena (Tabla 1), un contenido reducido de arcilla (15.5% de media) parece tener una incidencia decisiva en la capacidad de retención de dichos suelos.

3.2 Estimación de las curvas de retención y validación de las FET's

A partir de los datos obtenidos mediante las FET's de la Tabla 3, se obtuvieron las curvas de retención de un grupo de suelos independientes de los empleados para generar las funciones. Se han agrupado por perfiles (diez en total) y los datos expuestos corresponden al valor medio de cada uno de ellos (cinco curvas por perfil). En la Tabla 4 se muestran los resultados tanto del ajuste al modelo de Van Genuchten, como de los parámetros que definen dicha función. Se han comparado las curvas medidas, es decir, las obtenidas a partir de datos experimentales, con las resultantes de aplicar el procedimiento descrito más arriba. En todos los casos hay una enorme similitud.

La comparación entre los datos medidos y los estimados (en la Fig. 2, se muestran dos ejemplos), pone en evidencia la gran proximidad en todos los casos. El análisis estadístico abunda en este sentido. EM es muy bajo en todos los casos (siempre inferior al 5%). Si bien es cierto que el error medio es siempre de sentido positivo, y esto podría llevar a pensar en una tendencia a la sobreestimación de los resultados de las FET's, ésta es muy reducida en cualquiera de los casos (Fig. 2). La bondad de las estimaciones se aprecia también en los valores de RECM, muy bajo en todos los casos y con resultados muy similares a los que se obtuvieron en las fase de calibración.

Tabla 2. FET's para los tres valores característicos de la capacidad de retención hídrica (MO es materia orgánica; DA es densidad aparente).

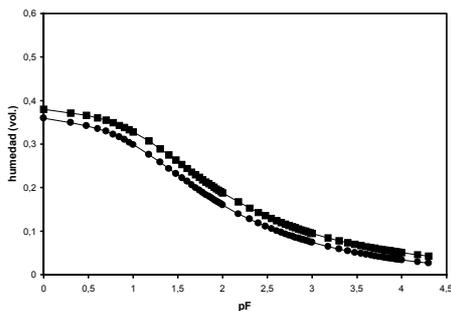
Variable	Función de Edafo-Transferencia	R ²	EM	RECM
θ_s	$0,889 + (0,00253 \cdot \text{arcilla}) - (0,0117 \cdot \text{MO}) - (0,321 \cdot \text{DA})$	0.74	0.03	3.47
θ_{cc}	$0,186 - (0,00127 \cdot \text{arena}) + (0,00325 \cdot \text{arcilla})$	0.85	-0.04	2.28
θ_{pm}	$0,113 - (0,00121 \cdot \text{arena}) + (0,00327 \cdot \text{arcilla})$	0.88	0.01	1.99

Tabla 3. Análisis de regresión para los valores de la curva de retención. DA es densidad aparente y MO es el contenido de materia orgánica. El asterisco indica que esas variables han sido transformadas por el valor de su logaritmo neperiano.

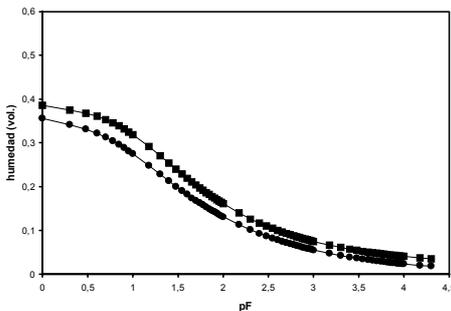
Variable dependiente	Variabes predictoras	R ²	EM	RECM
θ(pF 0)	DA, MO, arcilla	0.74	0.03	3.5
θ(pF 0.4)	DA, MO, arcilla	0.69	0.04	4.0
θ(pF 1.0)	DA*, arcilla*, limo*	0.68	0	4.2
θ(pF 1.5)	DA*, arcilla*, limo*	0.79	-0.02	4.2
θ(pF 2.0)	DA*, arcilla*, limo*	0.84	0.01	3.7
θ(pF 2.3)	DA*, arcilla*, limo*	0.84	-0.04	3.4
θ(pF 3.0)	arena, arcilla	0.86	0.03	2.7
θ(pF 3.5)	arena, arcilla	0.87	-0.06	2.3
θ(pF 4.2)	arena, arcilla	0.88	0.01	1.2

Tabla 4. Datos de las curvas utilizadas en la fase de validación de las FET's. θ_{res} es la humedad residual (cm³.cm⁻³), α (cm⁻¹) y n (adimensional) son parámetros de forma del modelo de Van Genuchten.

Curva		R ²	θ _{res}	α	n	EM (%)	RECM (%)
S01	medida	0.997	0	0.225	1.231	1.75	2.24
	estimada	0.998	0.039	0.226	1.311		
S02	medida	0.995	0.030	0.422	1.325	2.62	2.87
	estimada	0.997	0.056	0.216	1.396		
S03	medida	0.999	0	0.259	1.260	4.42	5.24
	estimada	0.998	0.012	0.113	1.311		
S04	medida	0.999	0.012	0.288	1.309	3.43	4.83
	estimada	0.999	0.020	0.109	1.417		
S05	medida	0.999	0	0.105	1.339	2.29	2.39
	estimada	0.999	0.013	0.087	1.335		
S06	medida	0.997	0	0.085	1.314	2.17	2.46
	estimada	0.999	0.011	0.092	1.323		
S07	medida	0.999	0.017	0.102	1.598	2.29	3.21
	estimada	0.998	0.021	0.088	1.415		
S08	medida	0.996	0	0.138	1.378	2.57	2.89
	estimada	0.999	0.018	0.101	1.406		
S09	medida	0.999	0.023	0.377	1.412	3.24	3.99
	estimada	0.999	0.020	0.110	1.390		
S10	medida	0.998	0.019	0.480	1.459	2.89	3.76
	estimada	0.998	0.022	0.107	1.475		



a)



b)

Fig. 2. Comparación entre curvas de retención medidas y estimadas con FET's en los perfiles S05 (a) y S08 (b).

4.- Conclusiones

Los resultados de este trabajo muestran que la utilización de funciones de edafo-transferencia puede ser una alternativa de gran utilidad cuando, como ocurre en multitud de lugares, no existe información sobre las propiedades hidráulicas de los suelos. La estimación de variables hídricas de destacada significación física, como es el caso del contenido de humedad a saturación, presente siempre en la modelización hidrológica, o los correspondientes al punto de marchitamiento o a la capacidad de campo, necesarios para aspectos como la estimación de la humedad disponible o el análisis del balance de agua, pueden obtenerse satisfactoriamente con la ayuda de FET's. Asimismo, una tarea más compleja, pero de interés indudable, como es la estimación de la curva de retención hídrica, puede ser abordada mediante el empleo de dichas funciones dando resultados plenamente satisfactorios. Esto se puede llevar a cabo mediante la utilización de bases de datos para generar y validar funciones de edafo-transferencia, como es el caso de este artículo, o bien, como se ha hecho en muchas ocasiones, aprovechando funciones previamente establecidas. En este

último caso, la validez de los resultados sería más cuestionable, pero los resultados pueden ser también satisfactorios.

Agradecimientos. Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto AMB98-0626) y a la Junta de Castilla y León (Proyecto SA55/00A) por la financiación que ha hecho posible este trabajo, y a Pilar Alonso y Carlos Yuste por su ayuda en los análisis de laboratorio.

5.- Referencias

- Aina, P.O. y Periaswamy, S.P. (1985): Estimating available water-holding capacity of western Nigerian soils from soil texture and bulk density, using core and sieved samples. *Soil Science*. 140. 1. pp. 55-58.
- Arya, L.M., Leij, F. y Van Genuchten, M.Th. (1999): Relation between particle-size distribution and soil water retention. En M.Th. Van Genuchten; F.J. Leij ; L. Wu (Eds.) *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. USDA. University of California, Riverside. pp. 931-946.
- Bastet, G., Bruand, A., Voltz, M., Bornand, M. y Quetin, P. (1999): Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of French soils. En M.Th. Van Genuchten; F.J. Leij ; L. Wu (Eds.) *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. USDA. University of California, Riverside. pp. 981-991.
- Batjes, N.H. (1996): Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma*. 71. pp. 31-52.
- Bouma, J. (1989): Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.* 9. pp. 177-213.
- Bouma, J. y Van Lanen, H.A.J. (1987): Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. En K. Beek; P.A. Burrough; D. McCormack (Eds.) *Quantified land evaluation procedures*. ITC Pub. No. 6. Enschede. The Netherlands. pp. 106-110.
- Bourouai, F., Haverkamp, R., Zammit, C. y Parlange, J.Y. (1999): Physically-Based Pedotransfer Function for Estimating Water Retention Curve Shape Parameters. En M.Th. Van Genuchten; F.J. Leij ; L. Wu (Eds.) *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. USDA. University of California, Riverside. pp. 947-958.
- Cassel, D.K. y Nielsen, D.R. (1986): Field capacity and available water capacity. In KLUTE, A. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. SSSA Book Series. 5. pp. 901-926.
- Dahiya, I.S., Dahiya, D.J., Kuhad, M.S. y Karwasra, S.P. (1988): Statistical equations for estimating field capacity, wilting point and available water capacity of soils from their saturation percentage. *J. Agric. Sci.* 110. pp. 515-520.
- Espino, A., Mallants, D., Vanclooster, M. y Feyen, J. (1995): Cautionary notes on the use of pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties. *Agr. Water Manag.* 29. 3. pp. 235-253.
- Gosselink, J.G., Hatton, R. y Hopkinson, C.S. (1984): Relationship of organic carbon and mineral content to bulk density in Louisiana marsh soils. *Soil Science*. 137. pp. 177-180.
- 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.
- Mayr, T., Jarvis, N. y Simota, C. (1999): Pedotransfer functions for soil water retention characteristics. En M.Th. Van Genuchten; F.J. Leij ; L. Wu (Eds.) *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. USDA. University of California, Riverside. pp. 993-998.
- Puckett, W.E., Dane, J.H.; y Hajek, B.F. (1985): Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49. pp. 831-836.
- Rajkai, K., Kabos, S. y Jansson, P.E. (1999): Improving prediction accuracy of soil water retention with concomitant variables. En M.Th. Van Genuchten; F.J. Leij ; L. Wu (Eds.) *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. USDA. University of California, Riverside. pp. 999-1004.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. y Saxton, K.E. (1982): Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*. 25. pp. 1316-1320.
- Romano, N. y Santini, A. (1997): Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. *J. of Hydrology*. 202. pp. 137-157.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Rosemberg, J.S. y Papendick, R.I. (1986): Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Sci. Soc. Am. J.* 50. 4. pp. 1031-1036.
- Scheinost, A.C., Sinowski, W. y Auerwald, K. (1997): Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape. I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*. 78. pp. 129-143.
- Tietje, O. y Tapkenhinrichs, M. (1993): Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57. pp. 1088-1095.
- Ungaro, F. y Calzolari, C. (2001): Using existing soil databases for estimating retention properties for soils of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy. *Geoderma*. 99. pp. 99-121.
- Van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44. pp. 892-898.
- Van Genuchten, M. Th., Leij, F.J. y 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.
- Van den Berg, M., Klamt, E., Van Reeuwijk, L.P. y Sombroek, W.G. (1997): Pedotransfer functions for estimation of moisture retention characteristics of Ferrasol and related soils. *Geoderma*. 78. 3-4. pp. 161-180.
- Vereecken, H.; Maes, J.; Feyen, J. y Darius, P. (1989): Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*. 148. pp. 389-403.
- Viville, D. y Ambroise, B. (1982): Détermination des courbes de rétention hydrique des sols par la méthode du bac à sable et à kaolin (pF < 2,7). *Recherches Géographiques*. 19-20-21. Strasbourg. pp. 253-256.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. y Le Bas, C. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*. 90. pp. 169-185.
- Wösten, J.H.M. y Van Genuchten, M. Th. (1988): Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Sci. Soc. Am. J.* 52. 6. pp. 1762-1771.
- Young, M.D.B., Growing, J.W., Hatibu, N., Mahoo, H.M.F. y Payton, R.W. (1999): Assessment and development of pedotransfer functions for semi-arid Sub-Saharan Africa. *Phys. Chem. of the Earth (B)*. 24. 7. pp. 845-849.