

EVALUACIÓN DEL USO DE FUNCIONES DE EDAFOTRANSFERENCIA PARA LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS EN SUELOS FRANCO-LIMOSOS (CUENCAS EXPERIMENTALES DE VALLCEBRE, ALT LLOBREGAT)

C. Rubio y P. Llorens

Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera". Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. crubio@ija.csic.es

RESUMEN. En las últimas décadas, se han desarrollado numerosos métodos para determinar las propiedades hídricas de los suelos en el campo y en el laboratorio. Generalmente, estas metodologías requieren de una elevada inversión económica y/o de tiempo debido a la gran variabilidad espacial de dichas propiedades. Por estos motivos, se han desarrollado las funciones de edafotransferencia, FETs, como método de estimación de propiedades hidrodinámicas a partir de propiedades edáficas de más fácil determinación. El objetivo de este trabajo es, evaluar y validar el uso de FETs, concretamente del modelo Rosetta (Schaap et al., 2001), para estimar parámetros hidráulicos de los suelos del área de estudio. El modelo *Rosetta*, es una herramienta útil en la predicción de propiedades hídricas de los suelos, sobretodo en los casos donde existe una escasez de datos de los diferentes parámetros hidrodinámicos. A partir de muestras inalteradas, se han realizado curvas experimentales características de la humedad utilizando el método del recipiente de tensión hídrica para los potenciales mátricos entre saturación y 20.0 kPa y el método de la membrana a presión para los potenciales entre 100 kPa y 1500 kPa. Paralelamente se han determinado las propiedades físicas de los suelos que se utilizan como variables de entrada en el modelo Rosetta: las fracciones texturales y la densidad aparente. La evaluación de los resultados preliminares aporta elementos interesantes que parecen confirmar la utilidad de este tipo de aproximación.

ABSTRACT. During the last decades many methods have been developed to determine soil hydraulic properties in the field and in the laboratory. As these methodologies are frequently time-consuming and/or expensive, indirect methods such as Pedotransfer functions (PTF) have been developed to estimate hydraulic properties from more easily measured soil properties. The aim of this work is to evaluate and validate the use of the Rosetta model (Schaap et al., 2001) to estimate the hydraulic parameters of the studied soils. Rosetta model is a useful tool to predict soil hydraulic properties specially when there is not sufficient information on hydraulic parameters. Retention curves have been made from unaltered samples using the "sand box" method for potentials between saturation and 20 kPa

and the pressure membrane method for potentials between 100 and 1500 kPa. At the same time physical properties (texture and bulk density) of sampled soils have been determined and used as input variables for the Rosetta model. Preliminary results indicate the usefulness of this kind of analysis to determine hydraulic properties.

1. Introducción

Las propiedades hidrodinámicas de los suelos, controlan los flujos y las reservas de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera (Elsenbeer, 2001), y por tanto, factores como la recarga de los acuíferos o los flujos de nutrientes y/o sustancias químicas entre el suelo y la vegetación (Mohanty et al., 1994). La elevada heterogeneidad y complejidad que tienen los suelos, condiciona la obtención de estas propiedades hidrodinámicas y su variabilidad espacio-temporal. Por este motivo se empezaron a estudiar fórmulas empíricas que solucionaran el esfuerzo y coste que suponía la obtención de información sobre las características hidrodinámicas de los suelos.

Debido a la dificultad que comporta la determinación de los parámetros que intervienen en las relaciones entre humedad volumétrica y potencial de succión, se intentó determinarlos a partir de propiedades del suelo más fácilmente medibles (Rawls et al., 1982; 1983). Estas relaciones, basadas en regresiones estadísticas entre las propiedades físico-químicas y propiedades hidrodinámicas del suelo se denominaron funciones de transferencia (Bouma y van Lanen, 1987) y posteriormente funciones de edafotransferencia (FETs) (Bouma, 1989, Hamblin, 1991).

Se pueden distinguir 3 tipos diferentes de FETs: las que predicen las propiedades hidrodinámicas a partir de modelos basados en las propiedades del suelo, las que predicen determinados valores de la curva característica de la humedad por su interés específico y las que predicen los parámetros que permiten construir de forma completa la relación entre la humedad volumétrica y el potencial matricial.

Según el tipo de análisis de la información, se pueden

diferenciar dos funciones de edafotransferencia básicas, las FETs de clase que utilizan exclusivamente la clase textural (Wösten et al., 1990) y las FETs continuas que utilizan todo el resto de variables posibles (Wösten et al., 1999).

El objetivo de este trabajo es evaluar y validar el uso de funciones de edafotransferencia, concretamente del modelo Rosetta (Schaap et al., 2001), para estimar parámetros hidrodinámicos de los suelos del área de estudio.

2. Material y métodos

Para la validación de las funciones de edafotransferencia Rosetta se ha utilizado una base de datos proveniente de 4 perfiles de suelo localizados en la parte central de la cuenca de Can Vila, de 0.56 km², en la zona de cabecera del río Llobregat.

Se han obtenido 36 muestras inalteradas con cilindros de volumen conocido, obteniendo también muestra alterada del mismo punto de muestreo, para los niveles 0-5, 5-10 y 10-15 cm. Para cada una de las muestras se ha determinado diferentes propiedades físico-químicas: distribución granulométrica a partir de tamización para la fracción comprendida entre 2000-50 μm y para las partículas inferiores a 50 μm el clasificador por difusión láser. La densidad aparente y la porosidad se han determinado a partir del volumen de muestra contenido en el cilindro. Para el análisis del contenido en materia orgánica se ha utilizado el método de la oxidación sulfocrómica y posterior valoración con sulfato ferroso amónico, mientras que en la determinación del carbonato cálcico total se ha utilizado la calcimetría a presión.

En la determinación de las propiedades hidrodinámicas para cada muestra, el método utilizado ha sido el recipiente de tensión hídrica para los potenciales mátricos de saturación, 0.25, 1, 3.2 10 y 20 kPa, mientras que para las succiones de 100, 320 y 1500 kPa se ha utilizado la membrana a presión (Martínez Fernández et al., 2001).

A los valores observados se les ha ajustado 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 la humedad volumétrica residual y a saturación respectivamente, α y n son parámetros de forma de curva. A partir de este modelo se ha realizado el cálculo del potencial de succión a -33 kPa, utilizando el soporte informático RETC (van Genuchten et al., 1991).

Para determinar los parámetros de la curva de van Genuchten se ha utilizado el programa Rosetta (Schaap et al., 2001). Éste, propone 5 modelos de FETs que se jerarquizan a partir de una función de edafotransferencia de *clase* (modelo H1) que utiliza únicamente la clase textural según USDA y 4 FETs *continuas* (modelos H2-H5), siendo el modelo H5 el que dispone de la máxima información de entrada (distribución granulométrica en arena, limo y arcilla, densidad aparente y dos puntos de

curva de succión a -33 y -1500 kPa.

Para validar los modelos de funciones de edafotransferencia consistió se calculó el error medio (ME) que indica la posible sobre y subestimación de los valores y calcular la diferencia cuadrática (RMSE), para determinar la dispersión de los mismos.

3. Resultados

3.1. Propiedades que influyen en las características hidrodinámicas.

En los resultados obtenidos (Tabla 1) se observa que, la fracción limo nunca es inferior al 60%, la de arena oscila entre el 8 y 23% y la de arcilla entre 15 y 28%. En general, estos resultados muestran que, en el conjunto de los perfiles la textura es muy homogénea, pudiéndose clasificar según la USDA (1975) como franco-limoso.

El valor medio de densidad aparente para todos los perfiles es de 1.18 g·cm⁻³ y la porosidad del 53%. Las diferencias más significativas se observan en profundidad, dado que, al aumentar ésta la densidad aparente también incrementa, disminuyendo la porosidad, con variaciones entre 0.95 g·cm⁻³ en superficie a 1.35 g·cm⁻³ en el nivel más profundo. El análisis de carbono orgánico oxidable indica que, en el conjunto de los perfiles el contenido de materia orgánica es elevado, siendo los perfiles situados en parcelas con bosque y en el nivel más superficial (0-5 cm) donde se dan los contenidos más elevados, entre 7 y 9%. En todos los casos se observa una pronunciada disminución de la materia orgánica en profundidad.

Tabla 1. Valores promedio de las propiedades de los perfiles. M.O.= materia orgánica; CaCO₃ = carbonato cálcico y DA = densidad aparente

Perfil	n	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	M.O. (%)	CaCO ₃ (%)	DA (g·cm ⁻³)
TPABMS	9	7.7	63.9	28.4	8.6	3.9	1.17
TPSBMS	9	12.7	66.3	21.1	7.7	16.0	1.15
2TPABMS	9	22.4	62.2	15.4	8.5	51.0	1.18
2TPSBMS	9	23.1	60.0	16.8	6.9	47.1	1.23

Los resultados del análisis de CaCO₃ total para el conjunto de los suelos estudiados, muestran 3 grupos bien diferenciados: un primer perfil con un contenido de CaCO₃ del 4%, un segundo con el 16% y un último grupo alrededor del 50%. La tendencia general de todos los perfiles es un ligero aumento de CaCO₃ en profundidad.

3.2. Curva característica de la humedad

Las curvas de succión para las unidades estudiadas presentan un comportamiento similar entre ellas, con una capacidad de retención hídrica alrededor de 0.60 cm³·cm⁻³ y una diferencia en el contenido de humedad entre curvas del 6% a saturación. Para la zona de la curva cercana a la capacidad de campo se ha determinado un valor de humedad de aproximadamente 35%, con una diferencia

entre curvas del 4%. En la zona de la curva correspondiente a los -1500 kPa de potencial succión el contenido hídrico es de $0.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, con una diferencia entre curvas igual a la anterior (Fig. 1).

En las determinaciones de los perfiles realizadas en profundidad se observa que las diferencias más acusadas se encuentran en superficie (0-5 cm) y para potenciales mátricos alrededor de saturación.

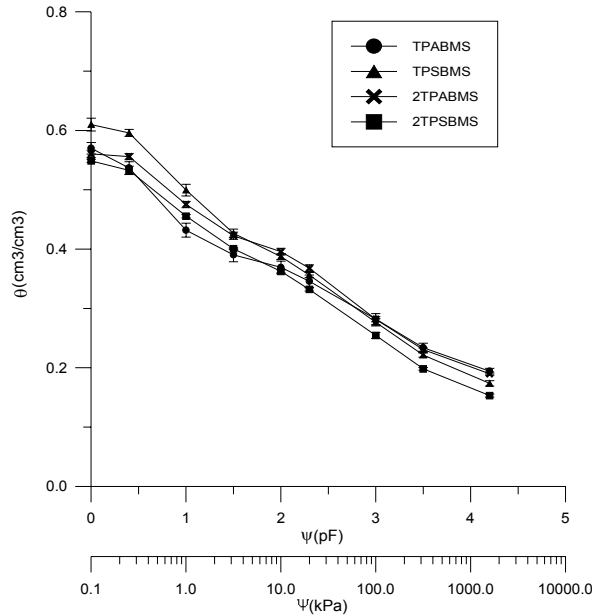


Fig. 1. Curvas características de la humedad de los perfiles estudiados, ± 1 error estándar.

3.3. Ajuste a los datos observados

Para el ajuste de los datos observados se ha utilizado el modelo de van Genuchten (1980). El modelo, ha proporcionado ajustes muy aceptables con coeficientes de determinación superiores al 0.98 y estadísticamente significativos ($\alpha = 0.01$) en todos los casos.

3.4. Funciones de edafotransferencia Rosetta

La figura 2, muestra dos de los 5 modelos diferentes de funciones de edafotransferencia con que permite trabajar el programa Rosetta. Se trata de una FET de clase (modelo H1) donde la cantidad de información de entrada es

mínima y de carácter cualitativo (clase textural según USDA) y una FET continua (modelo H5), que necesita el máximo de información cuantitativa posible: porcentajes de las fracciones granulométricas, densidad aparente y dos puntos de la curva de succión (-33 y -1500 kPa).

La FET H5 es la que presenta los valores estimados más cercanos a los medidos, sobretodo en la zona cercana a la capacidad de campo. Los valores de los parámetros θ_s , θ_r , α y n de la ecuación de van Genuchten (1980) determinados a partir de las FETs Rosetta, presentan en todos los casos ajustes poco significativos (Tabla 2). Para una $p = 0.01$ son estadísticamente significativos los modelos H3 y H4 para θ_r y el modelo H1 para α y n . Para una $p = 0.05$ los modelos H3, H4 y H5 para θ_s , H2 y H3 para α y H5 para n . Se observa que no aumenta la significación estadística de los parámetros al aumentar la complejidad de la FETs.

A partir del cálculo del error medio, se observa que, en general, se da una mayor subestimación del contenido hídrico a potenciales de succión cercanos a saturación y para succiones próximas a los -1500 kPa para los dos modelos. La FET H5 es la que presenta los mejores ajustes sobretodo para el área de la curva más cercana a la capacidad de campo. La diferencia máxima entre los valores estimados y los medidos en todos los perfiles la encontramos siempre cerca de la saturación, siendo el valor medio de esta diferencia de un 15%. Para los pF elevados este valor es aproximadamente del 7%. La zona próxima a capacidad de campo, es la que presenta unas diferencias menores (1%). En general la dispersión es máxima en los primeros 5 cm, disminuyendo en profundidad para el conjunto de las FETs.

4. Discusión

Los contenidos de humedad para los diferentes puntos de succión de las curvas estudiadas pueden considerarse elevados, tanto a saturación ($\cong 0.60 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) como a altos potenciales mátricos ($\cong 0.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), pudiéndose relacionar seguramente con el elevado porcentaje de la fracción limo y arcilla de los perfiles (>75%).

Tabla 2. Ajustes de todos los parámetros hidrodinámicos para todas las muestras de los perfiles estudiados aplicando el modelo de van Genuchten (1980). Los valores estadísticamente significativos para $\alpha = 0.01$ están marcados en negrita i para $\alpha = 0.05$ subrayados; SLA = arena, limo y arcilla; DA = densidad aparente; $\theta_{33, 1500}$ = humedad volumétrica a diferentes presiones de succión.

	Coeficientes de determinación (r^2)				ME ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	RMSE ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
	θ_r	θ_s	α	n		
Clase textural	0.037	0.101	<u>0.462</u>	<u>0.371</u>	-0.052	0.083
SLA	0.208	0.060	0.726	0.002	-0.052	0.081
SLC+DA	<u>0.439</u>	0.784	0.547	0.002	-0.029	0.075
SLC+DA+ θ_{33}	<u>0.468</u>	0.743	0.283	0.231	-0.041	0.072
SLC+DA+ θ_{33} + θ_{1500}	0.138	0.779	0.010	0.593	-0.032	0.058

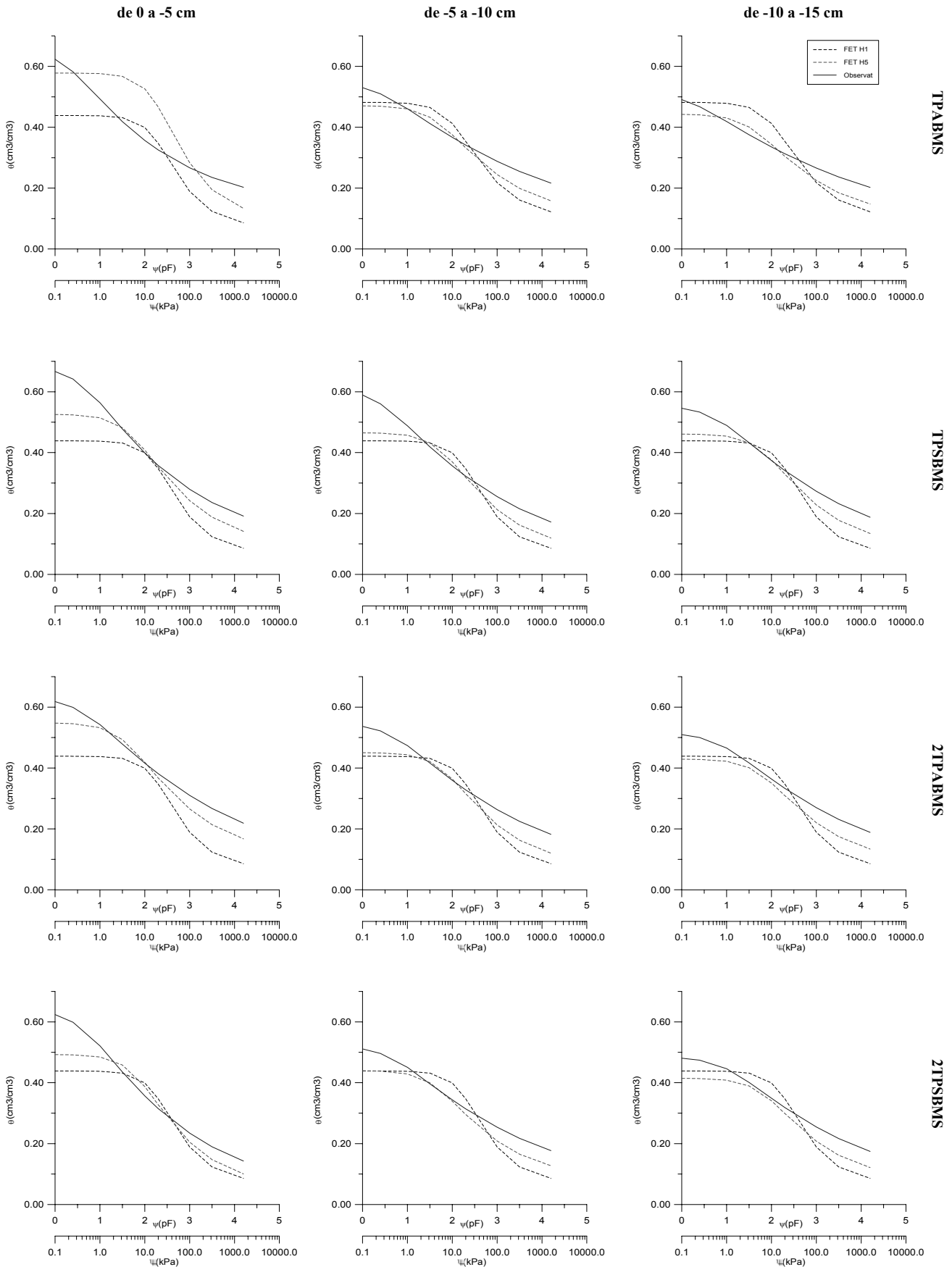


Fig. 2. Curva característica de la humedad observada y FETs modelos H1 y H5 de los perfiles estudiados.

Resultados similares han sido obtenidos anteriormente por Llorens (1991) y Haro et al. (1992) en áreas cercanas a la zona de estudio, y por Regüés (1995) en las zonas de cárcavas de la cuenca de Cal Rodó.

En la determinación del comportamiento hidrodinámico de dos curvas características de la humedad de 2 de los perfiles estudiados, con contenidos diferentes de la fracción fina (limo y arcilla), se observa que, la humedad volumétrica siempre es superior en el perfil con mayor contenido en fracción fina sobretudo para succiones cerca de la saturación y sensiblemente superior para potenciales cerca del punto de marchitez permanente. Este incremento en la capacidad de retención, posiblemente esté relacionado con el porcentaje de fracción fina y el comportamiento hidrodinámico de los limos y arcillas (Gupta y Larson, 1979; Rawls et al., 2003).

Para una determinación similar, pero para contenidos en materia orgánica muy diferentes, se han observado que, el contenido volumétrico de agua es muy superior en el perfil con mayor contenido en materia orgánica a potenciales mátricos cercanos a la saturación. Los contenidos de materia orgánica tienen una importante función en la capacidad de retención, principalmente a rangos de potencial mátrico bajos, aumentando la retención hídrica donde la acción de las propiedades texturales no es tan activa (p.ej. Bloemen, 1980; Buttle y House, 1997; Rawls et al., 2003).

En la predicción de los parámetros hidráulicos a partir de funciones de edafotransferencia del modelo Rosetta, para todos los casos, el mejor ajuste entre las curvas observadas y las estimadas se obtiene utilizando el modelo H5, mientras que el ajuste con menor fiabilidad lo da el modelo H1.

Tanto los valores de subestimación obtenidos a partir del cálculo del EM, como la dispersión obtenida a partir de las diferencias cuadráticas (RMSE), son del mismo orden de magnitud que los observados por diferentes autores con diferentes tipos de FETs (entre 0.02 y 0.11 m³·m⁻³) (Schaap et al., 2001; Wösten et al., 2001).

Es posible, que los ajustes obtenidos con el modelo de FET Rosetta estén influenciados por la distribución de las partículas de la fracción más fina de la clase limo. Utilizando como referencia la clasificación granulométrica de la CSSC (McKeague, 1978), se han determinado para todos los perfiles los diferentes tamaños de partícula que componen esta fracción, obteniendo un rango de porcentajes entre 84 y 57%. Por tanto, el hecho de que el modelo de FET H5 estime valores para los parámetros hidrodinámicos con bastante error, puede estar directamente relacionado con los porcentajes de esta fracción de limo más fino y su comportamiento hidrodinámico en estos suelos. Al considerar, el elevado porcentaje de la fracción (50-2 µm) según la textura USDA y la determinación de una elevada humedad volumétrica para unas FETs calculadas en función al porcentaje de una fracción limo única, es probable que la FET estime contenidos hídricos menores, propios de granulometrías más groseras, las cuales muestran en general, un comportamiento de

capacidad de retención menor.

La aplicación Rosetta parece útil en los casos que, el punto de la curva que se quiere obtener esté próximo a capacidad de campo. Conforme el modelo se aleja de este "punto" hacia los extremos de la curva, los valores estimados pierden fiabilidad, sobretudo para potenciales de succión bajos, observándose valores aproximadamente un 40% inferiores a los determinados.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que, la capacidad de retención de los perfiles estudiados es elevada, siendo los perfiles con contenidos de fracción fina más altos los que retienen mayor cantidad de agua, y que en conjunto, para potenciales de succión cerca de la saturación, los suelos con un mayor contenido en materia orgánica tienen la capacidad de retención superior.

En la validación de los modelos de funciones de edafotransferencia Rosetta, se ha observado que, la dispersión entre los valores medidos y estimados se encuentra dentro del rango observado por varios autores con diferentes FETs. La aplicación de Rosetta, puede proporcionar predicciones ajustadas de los parámetros hidrodinámicos para rangos de succión cerca de la capacidad de campo, pero si los puntos a obtener se alejan de esta zona de la curva hacia los extremos, presenta una subestimación de la humedad volumétrica, especialmente para los potenciales mátricos cercanos a saturación.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido posible gracias a una beca de investigación i Postgrado F.P.U. del Ministerio de Educación Cultura y Deporte y a los proyectos HIDROESCALA (REN2000-17009-C04-02/GLO) y PROHISEM (REN2001-2268-C02-01/HID). Los autores agradecen al Dr. José Martínez Fernández por la utilización del Laboratorio de Edafología de la Universidad de Salamanca y por los consejos sobre la hidrodinámica de suelos. Al Dr. Ramon Josa del Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología de la Universidad Politécnica de Cataluña por sus consejos sobre técnicas de análisis y a Rafael Poyatos por la colaboración en el trabajo de campo.

Referencias

- Bloemen, G.W.; (1980): Calculation of hydraulic conductivities from texture and organic matter content. *Z. Pflanzenernähr, Bodenkd.*, nº 143. pp. 581-605
- Bouma, J. y van Lanen, J.A.J.; (1987): Transfer functions and threshold values, from soil characteristics to land qualities. A: Beek K.J. (Ed). Quantified in Land Evaluation. *Proceedings of Workshop in ISSS and SSSA*. Washintong, D.C.; 27 April-2 May 1986ITC, Enschede, The Netherlands, Int. Inst. Aerospace Surv. Earth Sci. nº 6. pp. 106-110
- Bouma, J.; (1989) Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.*, nº 9. pp. 177-213
- Buttle, J.M. y House, D.A.; (1997): Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporus soils in a forested basin. *Journal of Hydrology*, nº 203. pp. 127-142
- Elsenbeer, H.; (2001): Pedotransfer functions in hydrology. *J. Hydrology*, nº 251. pp. 121-122
- Gupta, S.C. y Larson, W.E.; (1979): Estimating soil water characteristic from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resour. Res.*, nº 15. pp. 1633-1635
- Hamblin, A.; (1991): Sustainable agricultural systems, what are the appropriate measures for soils structure?. *Aust. J. Soil Res.*, nº 29. pp.

709-715

- Haro, S., Fernández, J.F., Josa, R. y Gallart, F.; (1992): Papel hidrológico y geomorfológico de las propiedades del suelo en una zona pirenaica de campos abandonados (Cal Parisa, Vallcebre). A: López-Bermúdez, F., Conesa, C., Romero, M.A., (Eds), *Estudios de Geomorfología en España*, Vol. 1 S.E.G., Murcia. pp. 243-250
- Llorens, P.; (1991): *Resposta hidrològica i dinàmica de sediments en una petita conca pertorbada de muntanya Mediterrània*. Tesis doctoral, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona. 276 p.
- Martínez Fernández, J. y Ceballos Barbancho, A.; (2001): Estimación de propiedades hídricas de los suelos mediante el uso de funciones de edafo-transferencia. A: López, J.J. & Quemada, M. (Eds.). *Temas de Investigación en la Zona No Saturada*. Universidad Pública de Navarra. Pamplona. pp. 45-50
- McKeague, J.A. (Ed); (1978): *Manual on soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science (CSCS), Ottawa, Canada.
- Mohanty, B.P., Ankeny, M.D., Horton, R. y Kanwar, R.S.; (1994): Spatial variability of hydraulic conductivity measured by disc infiltrometer. *Water Resources Research*, nº 30. pp. 237-251
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. y Saxton, K.E.; (1982): Estimation of soil water properties. *Trans., ASAE*, nº 25. pp. 1316-1320
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. y Soni, B.; (1983): Agricultural management effects on soil water processes, Part I. Soil water retention and Green-Ampt parameters. *Trans., ASAE*, nº 26. pp. 1747-1752
- Rawls, W.J., Pachepsky, Y.A., Ritchie, J.C., Sobecki, T.M. y Bloodworth, H.; (2003): Effect of soil carbon on soil water retention. *Geoderma, en premsa*. pp. 1-16
- Regüés, D.; (1995): *Meteorización física en relación con los procesos de producción y transporte de sedimentos en un área acarcavada*. Tesis doctoral. Facultad de Geología, Universidad de Barcelona. 281 p.
- Schaap, M.G.; Leij, F.J. y Van Genuchten, M.Th.; (2001): ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. nº 251. pp. 163-176
- Van Genuchten, M.Th.; (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, nº 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 p.
- Wösten, J.H.M., Schuren, C.H.J.E., Bouma, J. y Stein, A.; (1990): Use of practical aspects of soil behavior to evaluate different methods of generate soil hydraulic functions. *Hydrol. Process.*, nº 4. pp. 299-310
- 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*, nº 90. pp. 169-185
- Wösten, J.H.M.; Pachepsky, Ya.A. y Rawls, W.J.; (2001): Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, nº251. pp. 123-150