

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE LOS SUELOS DE MNASRA (MARRUECOS) MEDIANTE MEDIDAS INFILTROMÉTRICAS *IN SITU*

K. Tamoh¹, A. Maslouhi¹, L. Candela², y J. Carrera²

¹ Laboratoire de Mécanique des Fluides et des Transferts Thermiques. Faculté des Sciences, Université IBN TOFAIL, BP 133, 1400 Kénitra, Marruecos.

² Dep. de Ingeniería del Terreno y Geociencias. Universidad Politécnica de Cataluña-UPC, Edificio D-2 C/Gran Capitán S.N. 08034-Barcelona.

RESUMEN. Para determinar las curvas características de los suelos de Mnasra (NO de Marruecos) se ha utilizado un método basado en la combinación de ensayos *in situ* de infiltrómetro de disco y un código de simulación del flujo de agua en el suelo. Los ensayos se han realizado muestreando el suelo después del experimento, lo que permite estimar los parámetros de las curvas de Van Genuchten y Brooks y Corey. Sin embargo, cuando los parámetros así obtenidos se emplean para simular numéricamente el ensayo, los caudales calculados mediante simulación no concuerdan perfectamente con los medidos. Para resolver esta limitación, se han calibrado los parámetros por prueba y error hasta que la desviación entre simulaciones y medidas sea mínima. La metodología utilizada ha proporcionado buenos resultados. Los valores obtenidos son coherentes para suelos análogos, reproducen la historia de caudales medidos y los casi similares a los experimentales para los seis suelos estudiados.

ABSTRACT. Field experiments have been performed in order to obtain the characteristic (retention and unsaturated permeability) of six types of soils in the Mnasra region (NW Morocco). The experiments consisted of both disc infiltrometer flow rate measurements and soil sampling to determine water content at the end of the test. This allows determining both retention curve and permeability parameters directly from the experimental data. However, when these parameters are entered into a flow simulation code, the time evolution of flow rates is not well matched. Therefore, these parameters have been corrected by trial and error calibration of the observed flow rates. The resulting curves not only allow matching the flow rate history, but are consistent for all the soil types. We conclude that the adopted methodology represent an improvement over traditional methods.

1. Introducción

El estudio de los fenómenos de transferencia hídrica en el suelo, necesita una completa determinación de sus

características hidrodinámicas. En especial son de gran interés las curvas características que relacionan la conductividad hidráulica K ($L.T^{-1}$) y el contenido en agua θ (L^3/L^3) con la succión del agua h (L). Existen diversos métodos experimentales para medirlas, pero ninguno es fácil. La medición *in-situ* presenta diversas dificultades relacionadas con la variabilidad espacial de los parámetros, la heterogeneidad del suelo y los errores relativos a los experimentos realizados en el campo. Sin embargo, la obtención de estos parámetros *in-situ* es mejor para estudiar los fenómenos de flujo y transporte en el suelo que las medidas de laboratorio, que requieren modificar la muestra.

En este trabajo se realiza un estudio de caracterización hidrodinámica de los suelos de la región de Mnasra situada en el NO de Marruecos. Para ello, se han utilizado dos métodos complementarios:

1- Mediante la infiltrometría de disco, que permite medir las propiedades hidráulicas de los suelos próximos a saturación (Clothier y White, 1981; Perroux y White, 1988; Thony et al. 1991). Su interés reside en su aplicación *in-situ* y en su rapidez, lo que ha permitido realizar medidas a lo largo de toda la zona de Mnasra.

2- Mediante la utilización de un código de cálculo que simula la infiltración producida a partir de un infiltrómetro de disco. Esta segunda etapa permite corregir algunas estimaciones de los parámetros hidrodinámicos. La corrección se realiza mediante el calibrado de los parámetros para minimizar la desviación entre las evoluciones temporales de los caudales experimentales y simulados q ($L^3.T.L^{-2}$).

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

La región de Mnasra se sitúa en la zona costera de la llanura del Gharb en el NO de Marruecos. Constituye una banda paralela a la costa atlántica, situada en la margen derecha del río Sebou, entre 7-14 km de amplitud y que se extiende sobre una longitud de unos 50 km al norte de la ciudad de Kenitra. En total presenta una superficie de

alrededor de 50 000 ha. Se encuentran fundamentalmente formaciones arenosas de origen marino junto con formaciones aluviales de textura fina en los márgenes del río Sebou. Desde el punto de vista geomorfológico, la región de Mnasra puede subdividirse en dos grandes dominios:

i. Dominio de la zona costera arenosa, constituida por un conjunto de formaciones dunares y de depresiones interdunares.

ii. Dominio de la llanura aluvial del río Sebou.

En consecuencia, los puntos de medida se han repartido entre los dos dominios citados. De las 6 zonas seleccionadas para los ensayos de infiltración tres de ellos se sitúan en el dominio arenoso: *Ouled Assal*, *Boukmour* y *Ouled Ziane*. En la llanura aluvial se han seleccionado: *El Kourchi* et *Ouled Tazi*, y *Zawya*. Esta división es mucho más clara cuando se observan las texturas de los suelos (Tabla 1):

Tabla 1. Textura de los suelos estudiados.

%	Zona costera			Llanura aluvial		
	<i>Ouled Assal</i>	<i>Boukmour</i>	<i>Ouled Ziane</i>	<i>El Kourchi</i>	<i>Ouled Tazi</i>	<i>Zawya</i>
arena	88	90	87	61	3	1
limo	9	6	10	22	59	39
arcilla	3	4	3	17	38	60

2.2. El infiltrómetro de disco

El infiltrómetro es un aparato cuyo principio consiste en estudiar la cinética de infiltración tras imponer en la superficie del suelo de un aporte continuo de agua (Perroux y White 1988).

Para cada ensayo se fija un valor de la succión h (altura de la columna de agua) y durante la infiltración se registra el desnivel de agua en el depósito. Una vez realizado el ensayo se toman muestras de suelo bajo el disco para determinar el contenido de agua asociado a la succión impuesta.

2.3. Características hidrodinámicas

Existen numerosos tipos de funciones para describir la dependencia de K y θ respecto h . Se ha empleado la más utilizada en la literatura, la relación de Van Genuchten (1980) para θ (h):

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s + \theta_r) \left(1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right)^{-m} \quad (1)$$

siendo θ_s el contenido en agua a saturación ($L^3.L^{-3}$), h_g un parámetro de estructura, ascenso capilar, (L), θ_r el contenido en agua residual ($L^3.L^{-3}$), y n y m parámetros que se relacionan mediante $m=1-2/n$.

Para la función $K(h)$, se utilizará la expresión de Brooks y Corey (1964):

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (2)$$

donde K_s es la conductividad hidráulica a saturación ($L.T^{-1}$) y η un parámetro de forma.

2.4. Ecuación de infiltración

Vanderveare (2000) mostró que la infiltración axisimétrica procedente de un infiltrómetro puede ser descrita mediante una ecuación con dos términos con la siguiente forma:

$$I(t) = S\sqrt{t} + Bt \quad (3)$$

donde S es la sorptividad y B se calcula según la expresión: (Haverkamp et al. 1994)

$$B = \frac{\gamma S^2}{r(\theta_1 - \theta_0)} + \frac{2 - \beta}{3} K_1 \quad (4)$$

donde r es el radio del infiltrómetro, γ es un parámetro comprendido entre 0.6 y 0.8 y β un parámetro de forma comprendido entre 0.5 y $\pi/4$.

3. Modelo matemático

El modelo utilizado se basa en la ecuación de flujo aplicada a una fuente circular situada horizontalmente en la superficie de un suelo homogéneo e isótropo. Se trata de una infiltración axisimétrica (la infiltración es simétrica respecto al eje de la fuente circular).

3.1. Hipótesis

La fuente impone una succión constante h_1 en la superficie (condición tipo Dirichlet), y el suelo presenta inicialmente un contenido volumétrico de agua θ_0 uniforme, o una presión efectiva $h_0 = h(\theta_0)$. El valor de $h_{0,0}$ está definido por las condiciones iniciales, y h_1 por las condiciones impuestas por la fuente.

Si se supone el medio homogéneo e isótropo se debe considerar una formulación axisimétrica de las ecuaciones que gobiernan las transferencias hídricas. La ecuación que rige el flujo en los medios porosos homogéneos como el suelo (Richards, 1931) en condiciones axisimétricas es:

$$c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (5)$$

3.2. Condiciones iniciales y de contorno

Inicialmente ($t=0$), se considera todo el dominio sometido a la misma presión efectiva h_0

Las condiciones límite se presentan en la Fig. 1.

3.3. Solución numérica

La elección de una solución numérica se debe al carácter no estacionario y no lineal de las ecuaciones diferenciales. Se ha utilizado el método de diferencias finitas implícitas por su adaptabilidad al dominio estudiado (Fig. 1). Se ha utilizado una malla irregular en las dos direcciones, radial y vertical, y se han refinado los dos lados de los extremos de la fuente que constituye un punto de no continuidad del flujo.

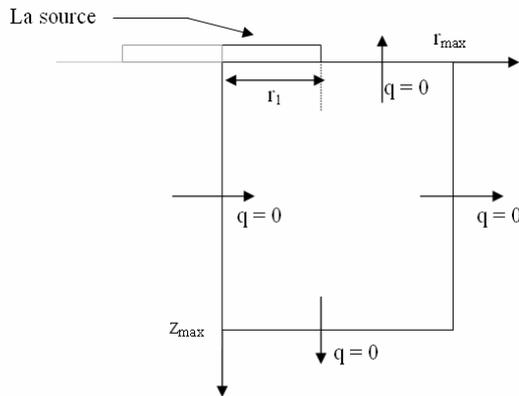


Fig. 1. Geometría del dominio de estudio.

Uno de los elementos que intervienen en la estabilidad y convergencia del programa es la elección del paso de tiempo. Debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar la precisión y el balance de masas (Celia et al. 1990), y por otro lado lo suficientemente grande para reducir al máximo el tiempo de ejecución del programa.

Estas dos condiciones, que son contradictorias, se han respetado al adoptar un paso de tiempo creciente a lo largo de la simulación. Inicialmente es pequeño cuando la cinética del fenómeno es muy rápida y se hace mayor para tiempos posteriores cuando la infiltración es estacionaria.

En las proximidades de la fuente el mallado es muy pequeño para tener una mayor precisión en esta región que presenta una singularidad.

3.4. Método de calibración

El procedimiento utilizado es el siguiente:

1- Se introducen en el código las características hidrodinámicas medidas. Así se generan las curvas de caudal procedente del disco del infiltrómetro $q_{sim}(t)$ en función del tiempo

2- En segundo lugar, se compara la curva de caudal simulado $q_{sim}(t)$ con la obtenida de forma experimental $q_{exp}(t)$. Si las dos curvas coinciden se conservan los parámetros obtenidos.

3- Si se observa una desviación entre $q_{sim}(t)$ y $q_{exp}(t)$, lo que es frecuente, se varían los valores de los parámetros y se efectúa una nueva simulación con los nuevos

parámetros. Esta etapa se repite hasta que la desviación entre q_{sim} y q_{exp} sea mínima.

Sin embargo, dado que los valores iniciales de estos parámetros proceden de medidas físicas próximas a saturación, se juzgó aceptable guardar los valores de K_s y el contenido de agua a saturación (θ_s), y adoptar $\theta_r=0$ para los suelos arenosos. En consecuencia, los parámetros que deben ser ajustados son h_g , n y η .

De acuerdo con este procedimiento no se corre el riesgo de encontrar problemas sobre la unicidad de la solución, dado que los parámetros a calibrar han sido inicializados introduciendo los valores experimentales y que no son en absoluto muy distantes de los verdaderos valores del suelo.

4. Resultados y discusión

4.1. Resultados experimentales

La campaña de medidas se realizó durante el mes de septiembre de 2000. Se utilizaron 2 infiltrómetros de disco de diámetro diferente (0.25 m y 0.20 m) con diversa succión (entre 0 m y -0.2 m). El contenido volumétrico inicial de agua θ_0 y el volumen seco se obtuvieron a partir de muestreos con cilindros de suelo de un volumen de $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ (Tabla 2). Los valores muy pequeños de θ_0 indican que inicialmente el suelo estaba muy seco.

Tabla 2. Densidad seca y contenido volumétrico de agua en los suelos estudiados

	Zona costera			Llanura aluvial		
	Ouled Assal	Boukmour	Ouled Ziane	El Kourchi	Ouled Tazi	Zawya
ρ_d (kg/m ³)	1.447	1.493	1.552	1.410	1.2151	1.255
θ_0 (m ³ /m ³)	0.017	0.015	0.01	0.026	0.098	0.077

El suelo bajo el disco fue muestreado inmediatamente al final de cada ensayo. A partir de los numerosos ensayos realizados a diferentes presiones se reconstituyó una parte de la curva $\theta(h)$ para cada zona experimental.

La Tabla 3 muestra los valores de los parámetros de ajuste del modelo de Van Genuchten (1980):

Tabla 3. Parámetros de la curva de retención para los suelos estudiados

	Zona costera			Llanura aluvial		
	Ouled Assal	Boukmour	Ouled Ziane	El Kourchi	Ouled Tazi	Zawya
θ_s (m ³ /m ³)	0.39	0.35	0.37	0.36	0.60	0.53
θ_r (m ³ /m ³)	0	0	0	0.05	0.065	0.08
h_g (m)	0.078	0.051	0.058	0.0184	0.0384	0.081
n	3.02	2.77	2.75	2.29	2.19	2.35

Los valores de estos parámetros son muy similares para la zona arenosa. Esto se explica por el hecho de que los suelos pertenecen al mismo tipo de perfil. Sin embargo, se

observa una tendencia diferente para los suelos de la llanura aluvial.

Los parámetros K_s y η obtenidos del modelo de Brooks y Corey (1964) a partir de las diversas parejas medidas de $K(h)$ se muestran en la Tabla 4.

Los mismos comentarios mencionados para las curvas de retención pueden hacerse para los suelos de la zona costera. En efecto, los tres suelos de la zona arenosa están caracterizados por parámetros similares. Sin embargo, el parámetro η presenta un valor diferente para la zona de *Boukmour*. La infraestimación de este parámetro de forma está relacionado probablemente con la naturaleza de la curva $K(h)$, por lo que se obtienen puntos experimentales muy dispersos (Fig. 4b). Por lo que respecta a los resultados de la llanura aluvial, se constata que el valor de K_s correspondiente a *Ouled tazi*, está sobreestimado al ser un suelo limo-arcilloso (Tabla 1).

Tabla 4. Parámetros del modelo de Brooks y Corey $K(h)$ obtenidos a partir de los suelos muestreados

	Zona costera			Llanura aluvial		
	<i>Ouled Assal</i>	<i>Boukmour</i>	<i>Ouled Ziane</i>	<i>El Kourchi</i>	<i>Ouled Tazi</i>	<i>Zawya</i>
K_s (m/s)	$3.8 \cdot 10^{-5}$	$7.7 \cdot 10^{-5}$	$5.1 \cdot 10^{-5}$	$10.6 \cdot 10^{-5}$	$5.7 \cdot 10^{-5}$	$9.7 \cdot 10^{-6}$
η	5.8	3.5	7.35	5.01	16.03	9.34

4.2. Corrección de los parámetros mediante un código numérico.

El estudio experimental ha permitido disponer para cada uno de los suelos estudiados las curvas $K(h)_{exp}$ y $\theta(h)_{exp}$ caracterizadas por una pareja de parámetros ($K_s, \theta_s, \theta_r, h_g, n, \eta)_{exp}$. Estos parámetros proceden del ajuste de los valores experimentales del modelo de Van Genuchten (1980) para $\theta(h)$ y del modelo de Brooks y Corey (1964) para $K(h)$. En las proximidades de valores pequeños de presión efectiva (h), el ajuste es un poco difícil dada la ausencia de puntos experimentales. Esto se debe a que las medidas experimentales por infiltrometría de disco no permiten medir más de 0.2 m de succión. Esta limitación no puede quedar sin efecto en el ajuste de las curvas $K(h)$ y $\theta(h)$ y en consecuencia, en la determinación de sus parámetros. Sin embargo, se puede considerar que los valores de los parámetros K_s y θ_s se estiman con mayor precisión, dado que hacen referencia a un estado de saturación del suelo, donde las medidas experimentales abundan. En consecuencia se consideran aceptables los valores K_s y θ_s . Por le contrario, el resto de los parámetros (h_g, n, η) pueden mostrar valores ligeramente distintos a los obtenidos en el estudio experimental.

Por todas estas razones, se ha recurrido a un código numérico para simular los ensayos de infiltración a partir de un infiltrómetro de disco. Los fundamentos matemáticos de este código han sido presentados anteriormente. El interés de utilizar un código numérico reside en el hecho de que permite verificar si el conjunto de parámetros ($K_s, \theta_s, \theta_r,$

$h_g, n, \eta)_{exp}$ permite obtener mediante simulación las curvas de infiltración medidas con una mayor exactitud.

Esta metodología se aplicó a los seis suelos estudiados. Para la zona arenosa, los parámetros corregidos se muestran en la Tabla 5.

Estos nuevos parámetros han permitido comparar las curvas $K(h)$ y $\theta(h)$ antes y después del calibrado para los suelos de la región arenosa. Los resultados se muestran en las Fig(s). 2 y 3.

Tabla 5. Valores medios de los parámetros n, h_g y η corregidos de la zona arenosa. Sd : desviación tipo

	<i>Ouled Assal</i>		<i>Boukmour</i>		<i>Ouled Ziane</i>	
	media	Sd	media	Sd	media	Sd
n	3.033	0.025	2.788	0.013	2,725	0.054
h_g (m)	0.0578	0.0076	0.0478	0.0032	0.0675	0.0026
η	5.783	0.20	3.92	0.27	6.16	0.20

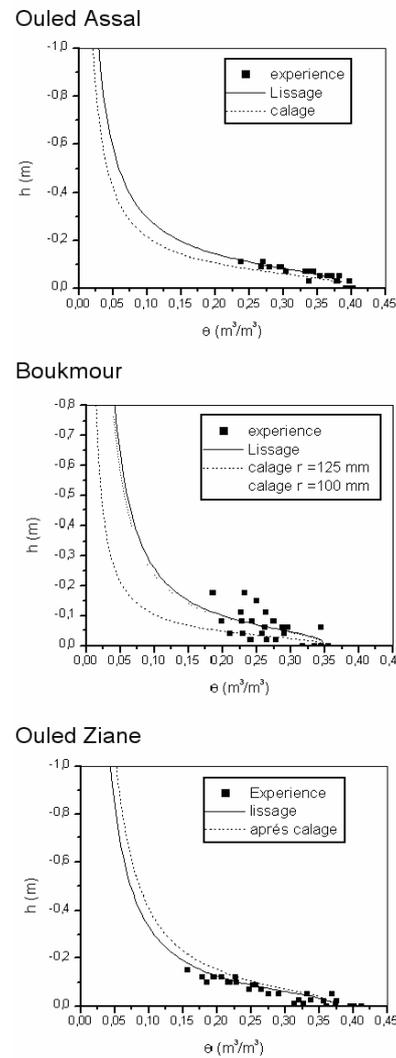


Fig. 2. Curvas de retención de los suelos de la zona arenosa.

Se observa que la corrección de los resultados por el código numérico ha producido nuevas curvas, diferentes de las obtenidas por ajuste (suavizado) de los puntos experimentales. También se puede constatar que para las curvas $\theta(h)$ de los tres lugares la corrección más importante es en la zona donde la succión es débil.

En el caso de Boukmour, las curvas $K(h)$ y $\theta(h)$ obtenidas mediante calibración del primer infiltrómetro están bastante alejadas de los puntos experimentales, pero para el resto de los suelos presentan valores comparables, tanto para $K(h)$ como para $\theta(h)$. Esta constatación hizo considerar solo los resultados del segundo infiltrómetro para Boukmour.

La media de los valores de los parámetros h_g , n y η calibrados a partir de los diversos ensayos de suelos en la llanura aluvial se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores medios de los parámetros n , h_g y η corregidos de la llanura aluvial. Sd: desviación tipo.

	El Kourchi		Ouled Tazi		Zawya	
	media	Sd	media	Sd	media	Sd
n	2.30	0.01	2.25	0.01	2.31	0.01
h_g (m)	0.0180	0.0009	0.0372	0.0016	0.0581	0.0021
η	6.17	0.94	16.32	0.31	9.93	1.07

Los bajos valores de la desviación tipo obtenidos para los tres parámetros muestran que la corrección debida al calibrado ha proporcionado valores similares para los diversos ensayos

En las Fig(s). 4 y 5 se muestra una comparación de las funciones $K(h)$ y $\theta(h)$ antes y después del calibrado para los suelos de la llanura aluvial. Muestra que la corrección es más importante en la región donde la presión está lejos del nivel de saturación, especialmente para le caso $\theta(h)$ de Ouled Tazi. Esto constituye el principio del método utilizado para corregir los parámetros hidrodinámicos.

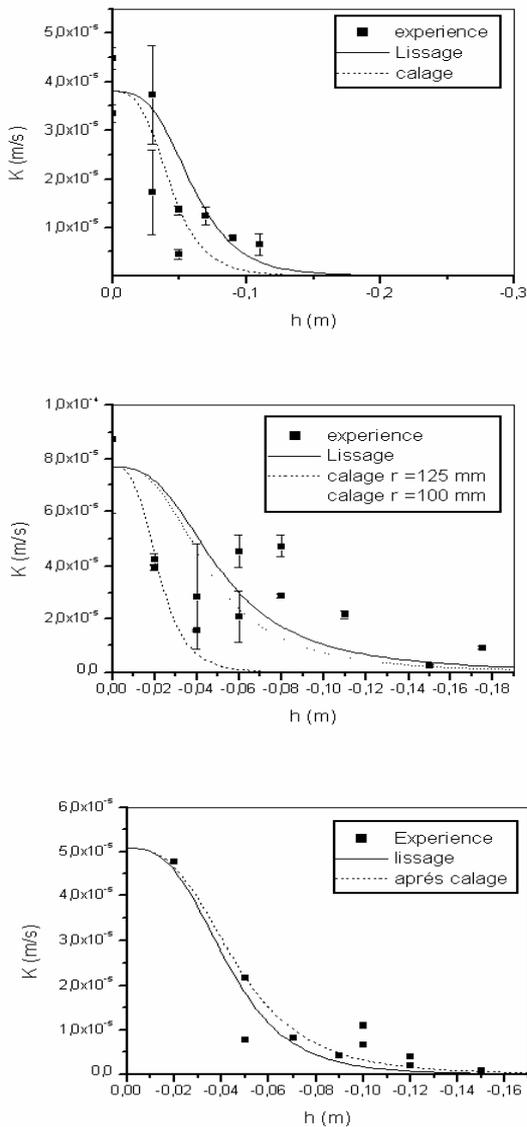


Fig. 3. Curvas de permeabilidad no saturada de los suelos de la zona arenosa a partir del ajuste de los datos de campo (línea continua) y tras la calibración (línea a trazos)

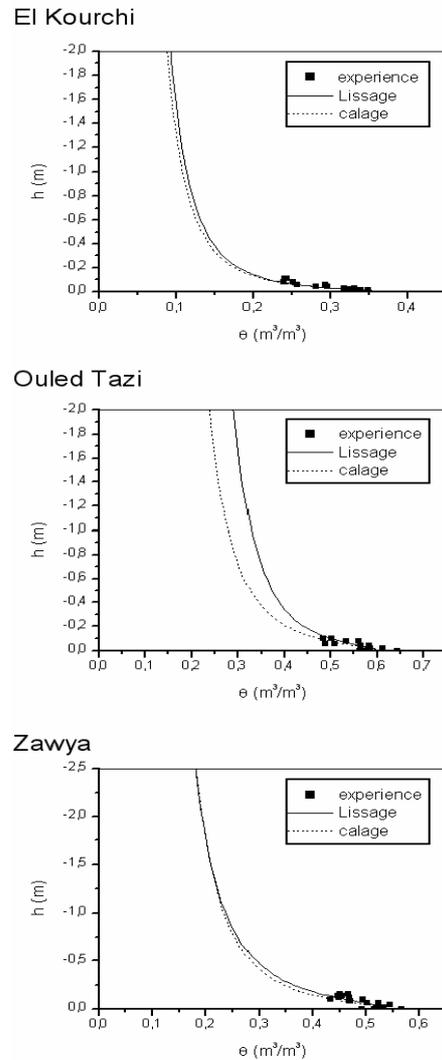


Fig. 4. Curvas de retención de los suelos de la llanura aluvial.

En general para los seis suelos estudiados se puede constatar que el parámetro n no presenta una gran modificación después de la corrección. Pero se debe señalar que una pequeña variación de este parámetro tiene un gran efecto sobre la forma de las curvas $K(h)$ y $\theta(h)$. Por un lado, afecta la curvatura de $\theta(h)$, y por otro lado influye en el valor de (m) dado que $m=1-2/n$. Sin embargo, el parámetro h_g , que casi siempre ha sido corregido a la baja, es el más afectado por la corrección.

Por otro lado se constata que la corrección mediante simulación ha proporcionado parámetros cuyos valores son muy similares a los experimentales pertenecientes a un mismo lugar, para n , h_g o η . Este hecho justifica la utilización de un código numérico para la corrección de los parámetros medidos.

5. Conclusiones

Para la caracterización hidrodinámica de los suelos de Mnasra, se ha utilizado un método basado en la combinación de ensayos infiltrométricos in situ y un código de simulación numérica del flujo de agua en el suelo. Aunque los resultados experimentales muestran una buena estimación de los parámetros del suelo, no permiten determinar una parte de las curvas características $K(h)$ y $\theta(h)$. Esto se demuestra claramente cuando se introducen en el código numérico los parámetros de estas curvas obtenidos del experimento. Se constata que los caudales calculados mediante simulación no concuerdan perfectamente con los medidos. Ello es debido a que la zona humedecida bajo el disco pasa de un estado muy seco (succión muy alta) a un estado muy húmedo (la succión impuesta por el infiltrómetro es baja), que está próximo a saturación. En consecuencia, las curvas características, $K(h)$ y $\theta(h)$ están afectadas. Por ello se han calibrado los parámetros h_g , n y η por prueba y error hasta que la desviación entre simulaciones y medidas sea mínima.

La metodología utilizada ha proporcionado buenos resultados. Los valores ajustados a partir del calibrado numérico son casi similares a los experimentales para los seis suelos estudiados.

Referencias

Brooks, R.H. y C.T Corey, 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Papers, Colorado State University, Fort Collins.

Celia, M. A., E. T. Bouloutas, y R. L. Zarba 1990. A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation, Water Resour. Res., 26(7), 1483– 1496 pp.

Clothier, B.E. y White, I. 1981. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. Soil Sci. Soc. Am. J., 45, 241-245 pp

Haverkamp, R., Ross, P.-J., Smetten, K.R.J., y Parlange, J.-Y., 1994. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. Water Resour. Res., 30: 2931-2935 pp.

Perroux, K.M., y White, I. 1988 Design for disc permeameters. Soil Sci. Soc. Amer.J., 52: 1205-1215 pp.

SCET MAROC 1994. Etude pédologique au 1/20 000 de la TTI sur 100.000ha, Zone Mnasra:Z1 et Z2.

Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-898 pp.

Vandervaere, J.-P., Vauclin, M., y Elric, D. 2000. Transient flow from tension infiltrometers: I. The two-parameter equation. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1263-1272 pp.

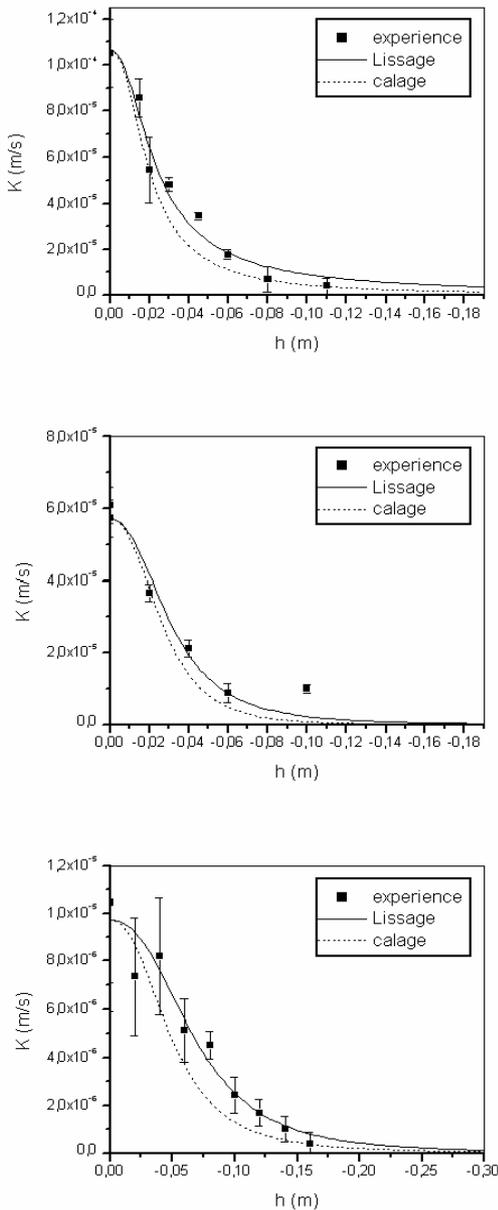


Fig. 5. Curvas de $K(h)$ los suelos de la llanura aluvial