

MÉTODOS EMPLEADOS EN CUBA PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE SUELOS

Methods Used In Cuba For Determining Soil Hydraulic Properties

Maria Elena Ruiz^{1†}, Hanoi Medina¹ y Julián Herrera²

RESUMEN

Las propiedades hidráulicas de los suelos (curva característica y función conductividad hidráulica) determinan la retención y el movimiento de agua en los mismos. A partir de ellas es posible estimar el agua aprovechable por los cultivos, las necesidades de riego y la capacidad de un suelo para infiltrar el agua. Estas propiedades se consideran uno de los principales datos de entrada para los modelos de base física para la simulación del uso del agua y los rendimientos de los cultivos presentes, en las investigaciones sobre los efectos del cambio climático y en los sistemas para la toma de decisiones agrícolas e hidrológicas. Este artículo hace un recuento histórico de los métodos empleados en Cuba para la determinación de la curva característica y de la función conductividad hidráulica, principalmente para suelos no expansivos. Se ofrecen, además, algunos de los resultados que marcaron pauta en el trabajo con estas propiedades en Cuba, como fueron la obtención de los valores medios de los parámetros de ajuste al modelo de Van Genuchten para Ferrasoles, Cambisoles, Fluvisoles, Arenosoles y Vertisoles; las funciones conductividad hidráulica obtenidas mediante el método del drenaje interno para un Ferrasol y estimadas de forma indirecta a partir de la curva característica; y la conductividad hidráulica de saturación obtenida con diferentes métodos. Por último, teniendo en cuenta la variabilidad espacial de estas propiedades, se ilustra cómo la función de pedotransferencia empleada por Tomasella es la que estima más adecuadamente las curvas características de Ferrasoles de la llanura Habana, Matanzas, en Cuba.

Palabras clave: curva de retención de humedad, función conductividad hidráulica, Cuba.

SUMMARY

Soil hydraulic properties (soil water characteristic curve and hydraulic conductivity function) are the main soil properties for determining soil water retention and soil water movement in soil. From these properties it is possible to assess the available water for crops, the irrigation water needed and the capacity of a soil for water infiltration. They are considered one of the main inputs for deterministic crop simulation models. Today these models are used to assess climate change effects in agriculture and hydrology and also for decision-making systems. This paper presents: 1) historical survey on the methods used in Cuba for determining characteristic soil curve and soil hydraulic conductivity function mainly for non expansive soils; 2) average values of Van Genuchten model parameters for Ferralsols, Cambisols, Fluvisols, Arenosols, and Vertisols; 3) hydraulic conductivity functions in Ferralsols determined by internal drainage method and estimated from the characteristic soil water curve using saturated hydraulic conductivity obtained by different methods. Finally, considering spatial variability of soil hydraulic properties, it is illustrated how the Tomasella pedotransfer function most adequately estimates characteristic curves of Ferralsols in the Havana Matanzas plain in Cuba.

Index words: soil water characteristic curve, hydraulic conductivity function, Cuba.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades hidráulicas del suelo, i.e. la curva característica del agua en el suelo (relación entre la humedad volumétrica (θ) y el potencial matricial del agua en el suelo (ψ) y la función conductividad hidráulica, representada como $K(\theta)$, por variar fuertemente con la humedad volumétrica, son las principales propiedades para cuantificar la retención y el movimiento del agua

¹ Grupo de Investigaciones Agrofísicas, Universidad Agraria de la Habana. Apartado Postal 18, San José de las Lajas. 32700 Habana, Cuba.

[†] Autor responsable (mruiz@isch.edu.cu)

² Centro de Hidrología y Calidad del Agua (CENHICA). Ave. de las Palmas 18401, Boyeros, ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: octubre de 2004. Aceptado: febrero de 2006.

Publicado como ensayo en *Terra Latinoamericana* 24: 311-318.

en los suelos. Desde el punto de vista práctico, es común emplear, en lugar del potencial matricial, el cual tiene signo negativo en suelos no saturados, su valor modular representado por h y llamado "tensión de humedad"; por consiguiente, la curva característica se representa también por $\theta(h)$ y algunos autores también la llaman "curva tensión humedad" o "curva de retención de humedad".

Por muchos años, $\theta(h)$ se ha empleado sólo para la determinación de "magnitudes estáticas", como la capacidad de campo, el punto de marchitez y el aprovechamiento del agua por los cultivos; sin embargo, el sistema suelo agua-planta-atmósfera (SAPA) es un sistema dinámico y debe estudiarse de esta manera. Este enfoque se ha retardado hasta pocas décadas atrás en que se logró una mayor comprensión de los procesos del SAPA y un desarrollo notable de la computación.

En la literatura, se encuentran múltiples métodos para determinar las propiedades hidráulicas que se han revisado a través de los trabajos de Klute (1986) y más reciente por Dane y Topp (2002). Sin embargo, algunos de estos métodos requieren de dispositivos costosos y específicos; otros, necesitan personal con especial destreza, mientras que otros son trabajosos y consumen mucho tiempo. Esto provoca que no en todos los países se usen los mismos métodos, sino que éstos se seleccionen acorde con las posibilidades de cada uno. También el tipo de suelo es una razón para seleccionar uno u otro método.

En Cuba, se ha trabajado durante tres décadas con relación a estas propiedades, utilizando métodos diferentes e incluso conceptos diferentes, por lo cual se considera oportuno realizar una reseña histórica de la evolución en la determinación de estas propiedades y ofrecer algunos de los resultados que marcaron pautas en su uso en Cuba.

En el presente trabajo se persiguen los objetivos: 1) realizar un recuento histórico de los métodos empleados para determinar las propiedades hidráulicas en Cuba; 2) ofrecer los resultados de la comparación de los modelos analíticos de Brooks y Corey (1964; 1966), Gardner (1970) y Van Genuchten (1980) para algunos agrupamientos de suelos cubanos; 3) mostrar la función conductividad hidráulica obtenida a partir del método del drenaje interno y de la estimación a partir de la curva característica en Ferrasoles de la zona occidental de Cuba; y 4) exponer los resultados al comparar varias

funciones de pedotransferencia al caso de Ferrasoles de la región occidental de Cuba.

BREVE RESEÑA HISTÓRICA

Carrillo (1980) reportó los primeros valores sobre determinaciones de $\theta(h)$ en Cuba, realizados a partir de muestras alteradas procesadas en la "prensa de Richards" (Richards, 1949). Durante esta etapa, Llanos *et al.* (1987), siguiendo el mismo procedimiento, obtuvieron otras curvas.

Sin embargo, las curvas obtenidas con muestras alteradas no son representativas del comportamiento hidráulico de los suelos, principalmente en la parte húmeda de $\theta(h)$, donde la retención de la humedad depende más de la estructura del suelo; de ahí que, en 1986 y en el marco del proyecto FAO CUB/86/004, se introdujo en el Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD) el dispositivo llamado "caja de arena" (Eijkelkamp, Giesbeek, Holanda), con el cual es posible estudiar con más detalle la zona húmeda de la curva de retención de humedad.

De 1985 a 1992, el IIRD realizó un intenso trabajo para determinar las curvas características $\theta(h)$ en perfiles denominados "típicos" de los suelos más representativos del país y presentes en las empresas agrícolas más importantes que disponían de riego (Herrera *et al.*, 1990). Simultáneamente, se construyeron manómetros para una sola muestra de suelo de dos centímetros de alto, usando suelos alterados, en el Instituto de Suelos y el Departamento de Física de la Universidad Agraria de La Habana. También, en esta etapa, se determinaron las primeras $\theta(h)$ *in situ* en Ferrasoles cubanos de la zona occidental que se compararon con curvas obtenidas a partir de muestras inalteradas en laboratorio y con muestras alteradas, demostrando la imposibilidad de continuar empleando curvas halladas a partir de muestras alteradas para estudios de necesidades hídricas de los cultivos (Ruiz *et al.*, 1997). Igualmente, se compararon varios modelos analíticos para el ajuste de los datos recolectados de $q(h)$ (Ruiz *et al.*, 1991; Ruiz y Utset, 1992).

Es bueno señalar que el Ferrasol es el más representativo de las áreas agrícolas en Cuba y se extiende en más de 1900 km² (Camacho *et al.*, 1984), principalmente en la llanura Habana-Matanzas (zona occidental del país) y en la llanura roja de la provincia de Ciego de Ávila (zona central del país). Estos suelos

tienen un alto contenido de arcilla (igual a o mayor de 90%) y un pequeño contenido de materia orgánica, sin embargo, muestran uniformidad física y química en profundidad (Klimes, 1980). Además, presentan buen estado de agregación y no se expanden.

La primera mención de conductividad hidráulica en Cuba, según Enriquez y Álvarez (1986), aparece en el artículo clásico de Bennett y Allison (Bennett y Allison, 1928). Esto se debe a que antes de 1970 se realizaron muy pocos trabajos de investigación, en relación con las propiedades hidráulicas de los suelos en Cuba, y no fue hasta 1972, con la publicación del trabajo de Nakaidze y Simeón (1972), que aparece por primera vez en la literatura técnica cubana un trabajo con información cuantitativa de estas propiedades. Este trabajo recogía información para la mayor parte de los suelos del país. Debe aclararse que en este caso, como propiedad hidráulica relacionada con el movimiento del agua en el suelo, se utilizó la velocidad de infiltración estabilizada, determinada mediante el método de los anillos concéntricos. En estas primeras investigaciones, el concepto de función conductividad hidráulica no estaba presente y los primeros pasos se dirigieron a determinar la conductividad hidráulica saturada en las investigaciones preliminares encaminadas al establecimiento de drenajes agrícolas (Márquez y Enriquez, 1984). En este caso, el método utilizado fue el de la barrena invertida, adaptación del método de la barrena utilizado para suelos con nivel freático cercano a su superficie y que aparece descrito en Klute (1986).

Las primeras determinaciones de la conductividad hidráulica no saturada se hicieron en Ferrasoles de la estación experimental del IIRD, en Alquizar (Utset y Ruiz, 1985), y en el Instituto Nacional de Ciencia Agrícola (Ruiz *et al.*, 1994), utilizando, en ambos casos, el método de drenaje interno (Watson, 1966). La metodología de cálculo empleada fue la reportada por Nielsen *et al.* (1973). También se llevó a cabo empleando tensiómetros de mercurio y un TDR tipo

TRIME, en el marco de un proyecto conjunto entre Bélgica y Cuba, ejecutado entre 1999 y 2005.

Debido a que el método del drenaje interno es trabajoso y consume mucho tiempo, se introdujo un método indirecto que consiste en determinar la función conductividad hidráulica a partir de la $\theta(h)$, usando una combinación de la teoría Mualem-Van Genuchten (Maulem, 1976; Van Genuchten, 1980) y los valores de conductividad hidráulica de saturación K_s determinados a partir del permeámetro de carga constante en laboratorio y del método de la barrena invertida. Los resultados se presentaron en Ruiz *et al.* (1994). Un resumen de todos los métodos empleados en Cuba, hasta el momento, para la determinación de la función conductividad hidráulica aparece en el Cuadro 1.

Ante la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas, la imposibilidad de determinar con exactitud estas propiedades en cada uno de los campos y las posibilidades que brindan el empleo del conjunto formado por un Sistema de Información Geográfica y los modelos de simulación para tomar decisiones en la agricultura, se introdujeron métodos indirectos para determinar $\theta(h)$ y $K(\theta)$. En este sentido, se emplean cada vez con mayor frecuencia las llamadas "Funciones de Pedotransferencia". No obstante, dichas funciones deben emplearse cuidadosamente, porque no hay "una función de pedotransferencia universal" sino que ésta depende del conjunto de datos utilizados para su obtención (Schaap y Leij, 1998). En Cuba, el primer trabajo sobre funciones de pedotransferencia para obtener la curva característica se realizó en Ferrasoles (Medina *et al.*, 2000).

MATERIALES Y MÉTODOS

Uno de los principales resultados en el trabajo con las propiedades hidráulicas fue decidir qué modelo se ajustaba mejor a los principales suelos agrícolas cubanos; para esto, se recopilaron un total de 176 $\theta(h)$

Cuadro 1. Métodos utilizados en Cuba para estimar la conductividad hidráulica de saturación K_s y de no saturación K_{ns} .

Conductividad hidráulica de no saturación (K_{ns})		Conductividad hidráulica de saturación (K_s)	
Métodos directos	Métodos indirectos	Métodos directos	
<i>In situ</i>	A partir de $\theta(\psi)$ con la teoría de Mualem-Van Genuchten	<i>In situ</i>	En laboratorio
Método del drenaje interno		Barrena invertida, anillos de infiltración [†] , piezómetro, permeámetro de Guelph	Permeámetro de carga constante con muestras inalteradas

[†] Para tiempos infinitos la velocidad de infiltración estabilizada tiende a K_s .

pertencientes a diferentes suelos de las empresas agrícolas más importantes de Cuba y determinadas en el Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. El criterio seguido para la selección fue escoger las curvas pertenecientes a la capa de 0 a 50 cm, correspondiente a la profundidad efectiva de los principales cultivos. Las curvas se obtuvieron empleando muestras inalteradas con anillos de 100 cm³ y a partir de tres réplicas en la caja de arena y la prensa de Richards. Las descripciones de estos equipos aparecen desde hace décadas en la literatura (Richards, 1949; Klute, 1986; Dane y Topp, 2002). Los modelos comparados aparecen en el Cuadro 2.

La suma cuadrática media de residuos se utilizó para determinar el modelo de mejor ajuste. Para encontrar el valor de los parámetros del modelo de Van Genuchten, se empleó el código SOHYP (Van Genuchten, 1978), mientras que para los otros dos modelos se elaboró un programa en Turbo Pascal. Mayores detalles pueden encontrarse en Ruiz y Utset (1991).

Las cantidades de curvas se distribuyeron, según los grupos de suelos, de la siguiente manera: Ferrasoles (63), Cambisoles (23), Fluvisoles (24), Arenosoles (20) y Vertisoles (48).

Otro resultado importante fue la comparación entre curvas características realizadas *in situ* y mediante muestras inalteradas y alteradas, a las mismas profundidades

Otro resultado importante fue medir la conductividad hidráulica saturada (Ks) por métodos diferentes del tradicional de la barrena invertida y determinar la conductividad no saturada (Kns) del suelo por primera vez en Cuba. Las determinaciones de estas dos propiedades se realizaron en Ferrasoles, pertenecientes

Cuadro 2. Modelos analíticos para la curva característica.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \alpha h^n)^m} \quad \text{Van Genuchten (1980)} \quad (1)$$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h}{h_b} \right)^{-\lambda} \quad \frac{h}{h_b} \geq 1$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad \frac{h}{h_b} < 1 \quad \text{Brooks y Corey (1966)} \quad (2)$$

$$h = a \theta^{-b} \quad \text{Gardner (1970)} \quad (3)$$

θ_r = humedad residual, θ_s = humedad de saturación, α , n , m , a , b = parámetros de ajuste, λ = parámetro dependiente del suelo, h_b = presión de burbujas.

al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas en la provincia de La Habana, donde estos suelos son mayoritarios. La Ks en laboratorio se determinó empleando el permeámetro de carga constante en laboratorio a partir de muestras inalteradas tomadas con tres réplicas en 56 puntos seleccionados aleatoriamente. La Kns se determinó empleando el método del drenaje interno (Watson, 1966), con la metodología de cálculo de Nielsen *et al.* (1973). El método se llevó a cabo para las profundidades de 0 a 5, 15 a 30, 30 a 45, 45 a 60 y 60 a 75 cm, en 1988 y en 1990. Los valores de Kns obtenidos con el método de drenaje interno *in situ*, se ajustaron siguiendo la ecuación de Davidson *et al.* (1969) con vistas a comprobar el grado de uniformidad del perfil desde el punto de vista hidráulico:

$$K(\theta) = K_o \exp[c(\theta - \theta_s)] \quad (4)$$

donde: θ_s : humedad de saturación y "c" y K_o son parámetros de ajuste.

Dada la importancia de los Ferrasoles, desde el punto de vista agrícola, se seleccionaron estos suelos para la estimación de sus curvas características a partir de las funciones de pedotransferencia más frecuentemente empleadas en la literatura internacional (Cuadro 3).

Para analizar la calidad del ajuste se calcularon la diferencia media (MD) y la diferencia cuadrática media (RMSD).

$$MD = \frac{1}{b-a} \int_A^B (\theta_p - \theta_m) dh \quad (5)$$

$$RMSD = \left[\frac{1}{b-a} \int_A^B (\theta_p - \theta_m)^2 dh \right]^{1/2} \quad (6)$$

donde: θ_p y θ_m representan las humedades estimadas y medidas, respectivamente, mientras que A y B son los intervalos de integración para los potenciales evaluados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado que es imposible la caracterización determinística de los parámetros del modelo de Van Genuchten para todos los campos, producto de la variabilidad espacial (Zhu y Mohanty, 2002), se determinaron los valores medios de los parámetros

Cuadro 3. Funciones de pedotransferencia utilizadas para estimar las curvas de retención de humedad.

Modelo	Ecuación
Rawls <i>et al.</i> (1982)	$\theta_{vk} = a_{k,1} + a_{k,2} \text{ Arena} + a_{k,3} \text{ Limo} + a_{k,4} \text{ Arcilla} + a_{k,5} \text{ MO} + a_{k,6} \rho_b$
Vereecken <i>et al.</i> (1989)	$X_i = a_{i,1} + a_{i,2} \text{ Arena} + a_{i,3} \text{ Arcilla} + a_{i,4} \text{ CO} + a_{i,5} \rho_b + a_{i,6} \text{ Arena}^2$
Batjes (1995)	$\theta_{vk} = a_{k,1} \text{ Limo} + a_{k,2} \text{ Arcilla} + a_{k,3} \text{ CO}$
Tomasella <i>et al.</i> (2000)	$X_i = a_{i,1} + a_{i,2} \text{ ArenaG} + a_{i,3} \text{ ArenaF} + a_{i,4} \text{ Limo} + a_{i,5} \text{ Arcilla} + a_{i,6} \text{ CO} + a_{i,7} \rho_b + a_{i,8} \text{ ArenaG} \cdot \text{ArenaF} + \dots$ $+ a_{i,j} \text{ LimoG} \cdot \text{ArcillaF} + a_{i,j+1} \text{ ArenaG}^2 + \dots + a_{i,n} \text{ Limo}^2$

θ_{vk} = humedad volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) ($k=1\dots n$ corresponde a los potenciales utilizados para las estimaciones, n es el número de potenciales utilizados para cada modelo), X_i = valor del parámetro del modelo de Van Genuchten (1978) ($i=1\dots 4$ se relaciona con los parámetros α , n , θ_s y θ_r), ArenaG = arena gruesa (2 a 0.2 mm), ArenaF = arena fina (0.2 a 0.05 mm), MO = contenido de materia orgánica (%), CO = carbón orgánico (%), ρ_b = densidad aparente del suelo (g cm^{-3}), $a_{k,j}$ y $a_{i,j}$ son coeficientes adimensionales.

correspondientes al modelo de mejor ajuste para contar con una primera aproximación del comportamiento de las curvas características para varios grupos de suelos cubanos. Estas curvas promedio pueden utilizarse como entrada a modelos de simulación para realizar experimentos de efectos relativos en las afectaciones de rendimientos de cultivos debidas a cambios climáticos o como punto de partida para utilizar factores de escala que permitan trabajar espacialmente. En el Cuadro 4 se presentan los valores de los parámetros del modelo de Van Genuchten para el grupo de suelos seleccionados para este estudio. En el caso de la humedad de saturación, el valor más alto se obtuvo para los Vertisoles y el valor más bajo para los Arenosoles. Si bien este es un resultado conforme con las observaciones prácticas, los valores obtenidos de los parámetros no reflejan, en todos los casos, realmente el comportamiento diferente de los suelos. En particular, esto se observa en el caso de los valores del parámetro "n", donde no fue posible establecer un cambio de valores que tuviese correspondencia lógica con el tipo de suelo. Esto hace comprensible que Van Genuchten y Nielsen (1985) consideraron estos parámetros sin interpretación física y en definitiva como parámetros de ajuste. No obstante, el conjunto de todos los parámetros define la forma de la curva, según el agrupamiento; por otra parte, en ocasiones, su comportamiento hidráulico no corresponde con sus características texturales, pues suelos como

los Ferrasoles, que pueden tener un contenido de arcillas de hasta 90%, se comportan hidráulicamente como Arenosoles, en cuanto a la facilidad para conducir el agua debido a sus propiedades estructurales.

Los resultados obtenidos con el método de drenaje interno correspondientes a las mediciones realizadas en los años 1988 y 1990 para las profundidades de 0 a 15, 15 a 30, 30 a 45, 45 a 60 y 60 a 75 cm aparecen en la Figura 1. Se han encerrado en una superficie los datos correspondientes a la profundidad de 0 a 15 cm que, en las dos repeticiones del método, mostraron un comportamiento diferente del resto de las profundidades. Este resultado se explica a partir de la alteración mayor que siempre sufre esta capa del suelo. El resto de los datos siguen el modelo de Davidson *et al.* (1969) significativamente con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.96$, lo que indica la uniformidad del suelo en la profundidad entre 15 y 75 cm.

Por otra parte, los resultados obtenidos con la aproximación de Mualem-Van Genuchten, utilizada como método indirecto, se presentan en la Figura 2. El valor de $K_s = 28.4 \text{ m d}^{-1}$ (Figura 2a) se determinó con el método de la barrena invertida, mientras que el valor de $K_s = 57.5 \text{ m d}^{-1}$ (Figura 2b) se obtuvo en el laboratorio, con muestras no alteradas, lo cual indica sobre la variabilidad que introduce en los valores obtenidos el método usado para determinar K . Esta variabilidad introducida por el método empleado ha sido

Cuadro 4. Valores medios de los parámetros del modelo de Van Genuchten para algunos agrupamientos de suelos cubanos.

Suelos	θ_r	α (cm^{-1})	n	m	θ_s
Ferrasoles	0.176	0.016	1.867	0.375	0.388
Cambisoles	0.184	0.014	1.902	0.430	0.378
Fluvisoles	0.179	0.012	1.858	0.427	0.447
Arenosoles	0.125	0.016	1.892	0.456	0.390
Vertisoles	0.315	0.008	1.795	0.409	0.631

θ_r = humedad residual; θ_s = humedad de saturación; α , n , m = parámetros de ajuste.

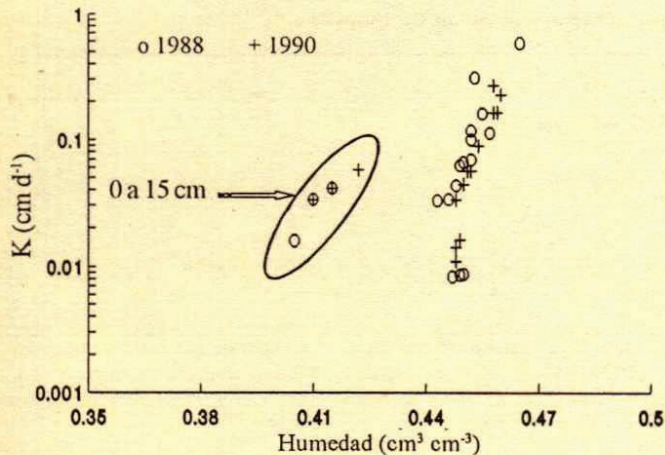


Figura 1. Resultados obtenidos para un Ferrasol para los años 1988 y 1990 y para todas las profundidades estudiadas (0 a 15, 15 a 30, 30 a 45, 45 a 60 y 60 a 75 cm).

reconocida por más de dos décadas, desde el trabajo de Bouma (Bouma, 1983).

Estas funciones para la conductividad, obtenidas de forma mucho más sencilla, se compararon con el método del drenaje interno (Ruiz *et al.*, 1994), demostrando que podían emplearse en primera aproximación, dada la gran variabilidad espacial de esta propiedad, expresada por coeficientes de variación de hasta 1000% (Warrick y Nielsen, 1980). Estas funciones también se utilizaron con éxito como entradas al modelo de simulación SWAP para estimar el uso del agua y el rendimiento de la patata en Ferrasoles. Dichas estimaciones se compararon con datos experimentales provenientes de cuatro cosechas

consecutivas. Los detalles pueden encontrarse en Ruiz *et al.* (1997).

Al estimar la curva de retención de humedad con las funciones de pedotransferencia reportadas por Tomasella *et al.* (2000), se obtuvieron valores de MD (-0.0201) y de RMSD (0.0586) más bajos para las funciones evaluadas (Cuadro 5). Aunque θ_s se subestimó sistemáticamente, se obtuvo un buen coeficiente de correlación (0.81). Al comparar este resultado con el obtenido por estos autores, la principal diferencia se obtuvo para θ_r , donde el coeficiente de correlación hallado es considerablemente bajo (0.34), sin embargo, los valores de este parámetro estático para α y n (0.323 y 0.468, respectivamente) fueron satisfactorios.

Contrario a lo que sucede con las funciones de Vereeken y Batjes, la forma de la curva estimada por la función de Tomasella *et al.* (2000) concuerda adecuadamente con la curva estimada, lo cual es un importante aspecto para los propósitos de modelación. En la Figura 3 pueden observarse todos los modelos usados, además de los datos experimentales. Es posible notar que el modelo Tomasella *et al.* (2000) es el más cercano a los datos experimentales. No obstante, no hubo una buena exactitud. Estos resultados se atribuyeron a las peculiaridades que están inherentes al funcionamiento hidráulico de los Ferrasoles y al tamaño de la muestra. No obstante, se alcanzaron los mejores ajustes utilizando funciones en las cuales se incluyen los datos de los suelos de regiones tropicales. Sin embargo, un análisis más profundo puede encaminarse a la inclusión de variables como los contenidos de óxido de hierro y aluminio.

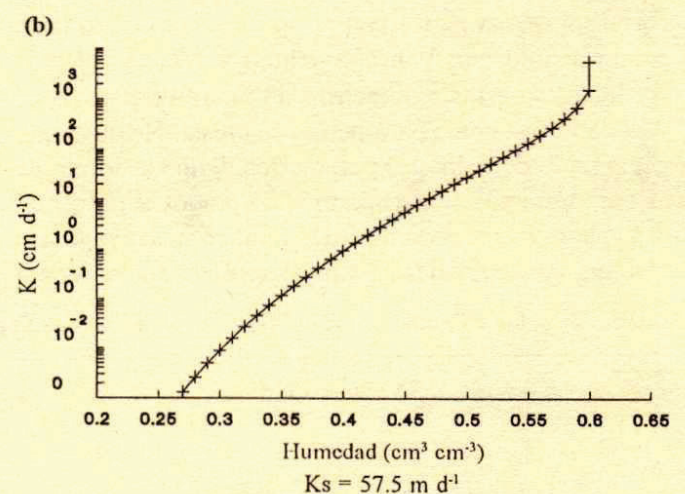
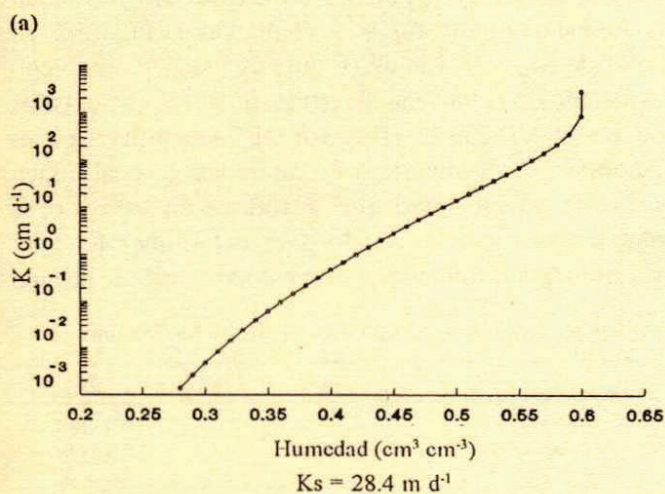


Figura 2. Función conductividad hidráulica obtenida a partir de Mualem-Van Genuchten empleando como K_s los valores determinados con el método de la barrena invertida (a) y el permeámetro de carga constante en laboratorio (b).

Cuadro 5. Comparación de las funciones de pedotransferencias utilizadas a partir de los valores de la diferencia media (MD) y de la raíz media cuadrática (RSMD).

Modelos	MD m ³ /m ³	RSMD m ³ /m ³
Tomasella <i>et al.</i> (2000)	-0.0221a	0.0586a
Batjes (1996)	0.0295b	0.0654b
Vereecken <i>et al.</i> (1989)	0.0353b	0.0833c
Rawls <i>et al.</i> (1982)	0.0799d	0.0885c

Las medias con diferentes letras resultaron significativamente diferentes ($\theta < 0.05$), según la prueba de Duncan de rango múltiple.

CONCLUSIONES

- El modelo de Van Genuchten es el de mejor ajuste para la curva de tensión de humedad.
- La variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas del suelo, lo caro de su determinación y el tiempo necesario para hallarlas, han motivado la implementación de métodos indirectos para determinarlas.
- De particular conveniencia práctica resulta la introducción de la estimación de la función conductividad hidráulica a partir de la curva de tensión de humedad, empleando los modelos de Mualem-Van Genuchten y los valores de la conductividad hidráulica de saturación, con vistas a su empleo como funciones de entrada a los modelos de simulación de cultivos y la posibilidad de pasar de la escala puntual de trabajo a una escala mayor.
- Asimismo, las funciones de pedotransferencia introducidas por Tomasella resultan las mejores para estimar las curvas características de los Ferrasoles.

LITERATURA CITADA

- Batjes, N.H. 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma* 71: 31-52.
- Bennett, H.H. y R.V. Allison. 1928. *The soils of Cuba*. Tropical Plant Research Foundation. Washington, DC, USA.
- Bouma, J. 1983. Use of soil survey data to select measurement techniques for hydraulic conductivity. *Agric. Water Manage* 6: 177-190.
- Brooks, R. y A. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper 3. Colorado State University. Denver, CO, USA.
- Brooks, R. y A. Corey. 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. *J. ASCE* 92: 61-88.
- Camacho, E., J. Paulín y R. Martínez. 1984. Propiedades físicas, hidrofísicas y físico mecánicas de los suelos Ferralíticos Rojos compactados de Cuba. *Cienc. Agri.* 20: 89-107.
- Carrillo, U. 1980. Estudio comparativo de algunos métodos para determinar el momento de riego. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. La Habana, Cuba.
- Dane, J.H. y G.C. Topp. 2002. *Methods of soil analysis. Part 4, Physical methods. Book Series 5.* Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Davidson, J., L. Stone, D. Nielsen y M. Larue. 1969. Field measurement and use of soil-water properties. *Water Resour. Res.* 5: 1312-1321.
- Gardner, W., D. Hillel y Y. Benyamini. 1970. Post irrigation movement of soil water. I. Redistribution. *Water Resour. Res.* 6: 3851-3861.
- Herrera, J., G. Cid y M. E. Ruiz. 1990. Regionalización de los suelos cubanos para el riego. Informe de Etapa 03 del resultado 01 del programa ramal 511 "Tecnologías de riego". Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. La Habana, Cuba.
- Klimes, S.A. 1980. *Suelos de Cuba. Tomo II.* Ed. Orbe. La Habana, Cuba.

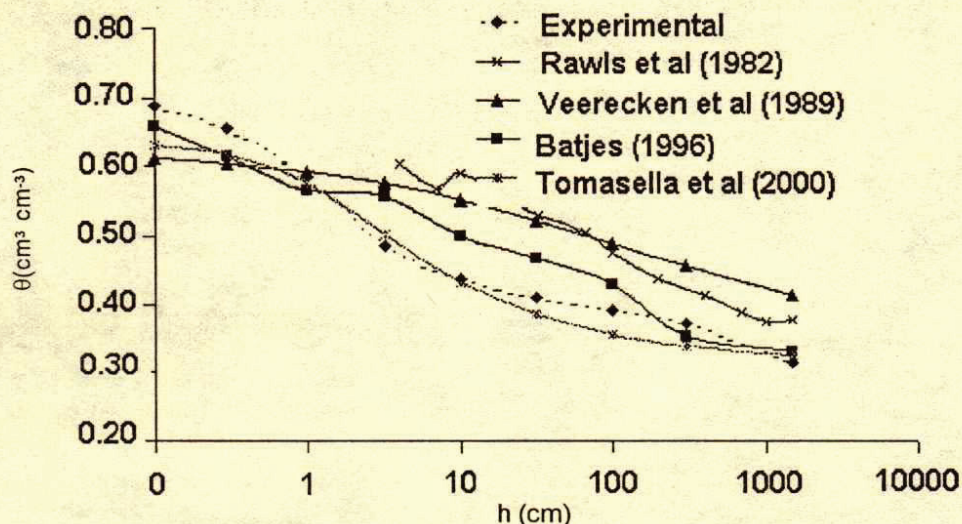


Figura 3. Curvas de retención de humedad estimadas por los modelos de Rawls *et al.* (1982), Vereecken *et al.* (1989), Batjes (1996) y Tomasella *et al.* (2000) comparados, los valores experimentales (según Medina *et al.*, 2000).

- Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 1. 2nd edition. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Klute, A. y C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. pp. 687-734. *In*: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 1. 2nd edition. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Llanos, M. A., J. Herrera y G. Cid. 1987. Curvas tensión humedad en algunos suelos de Cuba. *Cienc. Téc. Agric. Ser. Riego y Drenaje* 10: 2.
- Márquez, J. L. y J.L. Enriquez. 1984. Estimación de la conductividad hidráulica "K" a partir de la velocidad de infiltración básica. *Cienc. Téc. Agric. Ser. Riego y Drenaje* 7: 7-14.
- Medina, H., T. Mohamed, A. del Valle, y M. E. Ruiz. 2000. Estimating soil water retention curve in Rhodic Ferralsols from basic soil data. *Geoderma* 108: 277-285.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
- Nakaidze, H. y F. Simeón, 1972. Características de las propiedades hidrofísicas de los principales suelos de Cuba. *Voluntad Hidráulica* 10(23): 33-40.
- Nielsen, D., J. Biggar y K. Ehr. 1973. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Irigardía* 42(7): 215-259.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek y K.E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 108: 1316-1320.
- Richards, L. 1949. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.* 68: 95-112.
- Ruiz, M. E. y A. Utset. 1992. Curva tensión-humedad para algunos agrupamientos de suelos cubanos. *Cienc. Tec. Agrop.* 3: 11-14.
- Ruiz, M. E., A. Utset y A. Lau. 1991. Tres modelos analíticos para la curva tensión humedad en algunos suelos cubanos. *Revista Cubana de Física* XII: 25-30.
- Ruiz, M. E., A. Utset y A. Lau. 1994. Determinación de la conductividad hidráulica no saturada a partir del método del drenaje interno y de la curva tensión humedad. *Cienc. Tec. Agrop.* 4: 55-59.
- Ruiz, M. E., A. Utset, J. Bernal y A. Roque. 1997. Simulación del uso del agua y el rendimiento de la patata en un Ferralsol. *Investigación Agraria. Serie Producción y Protección de Vegetales (España)* 11: 45-50.
- Schaap, M. G. y F. J. Leij. 1998. A comparison of methods to predict unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1732-1741.
- Tomasella, J., M.G. Hódnnett y L. Rossato. 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 327-338.
- Utset, A. y M. E. Ruiz. 1985. Determinación de la conductividad hidráulica mediante el método del drenaje interno. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Alquizar. La Habana, Cuba.
- Van Genuchten, M. 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed form analytical model. Research Report 78-WR-08. Department of Civil Engineering. Princeton, NJ, USA.
- Van Genuchten, M. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Van Genuchten, M. y D. Nielsen. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys.* 3: 5615-5628.
- Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen y P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci.* 148: 389-403.
- Warrick, A. y D. R. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. pp. 319-344. *In*: D. Hillel (ed.). Applications of soil physics. Academic Press. New York, NY, USA.
- Watson, K. 1966. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Water Resour. Res.* 2: 709-715.
- Zhu, J. y B. Mohanty. 2002. Spatial averaging of Van Genuchten hydraulic parameters for steady-state flow in heterogeneous soils. *Vadose Zone J.* 1: 261-272.