



<http://opn.to/a/B2SL2>

ARTÍCULO ORIGINAL

Curvas tensión humedad y función conductividad hidráulica en suelos Pardos

Moisture tension curve and hydraulic conductivity function in Brown soils

Ing. Maryla Romero Campos*, Dr.C. Greco Cid Lazo, Dr.C. Felicita González Robaina, Dr.C. Teresa López Seijas
Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN. El presente trabajo tiene como objetivo modelar el funcionamiento hídrico del suelo a partir de sus propiedades hidráulicas (curva tensión humedad y función conductividad hidráulica) además de la determinación de la retención y el movimiento de agua, en un suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido, en Guáimaro, Provincia Camagüey hasta más de 60 cm de profundidades, utilizando el modelo de van Genuchten. Los valores de tensión humedad determinados en el laboratorio a partir de muestras de suelo inalteradas a través del método de la caja de arena y la Olla de Richard, se ajustaron mediante el software RECT. Se demostró que la función analítica estima con confianza las curvas - tensión humedad para el suelo estudiado, al obtenerse coeficientes de determinación mayores a 0,98. Se propone una curva tensión - humedad promedio para este suelo como alternativa a la no existencia de estudios de estática de agua en el suelo en esta región. El modelo de Mualen y Van Genuchten permitió obtener a partir de las curvas tensión - humedad, la conductividad hidráulica de no saturación para cada una de las 3 profundidades del perfil de suelo estudiado.

Palabras clave: Mualen y Van Genuchten, modelación, software.

ABSTRACT. The objective of the present work is to model the hydric functioning of the soils from the hydraulic properties (moisture tension curve and hydraulic conductivity function) and determine the retention and movement of water in a grayish Sialitic Brown soil, in Guáimaro, Camagüey Province, up to more than 60 cm depth, using van Genuchten's model. Moisture stress values determined in the laboratory from unaltered soil samples through the sandbox method and Richard's Pot, the values obtained were adjusted using the RECT software. The results showed that the analytical function confidently estimates the curves - moisture stress for the soil studied, when obtaining coefficients greater than 0,98. An average tension - humidity curve is proposed for this soil as an alternative to the non-existence of studies of static water in the soil in this region. The model of Mualen and Van Genuchten allowed to obtain from the Voltage - humidity curves, the hydraulic conductivity of no saturation for each of the 3 depths experienced of the soil profile studied.

Keywords: Mualen and Van Genuchten, Modeling, Software

INTRODUCCION

Los fenómenos físicos que determinan la estática y la dinámica del agua en los suelos son en la mayoría de los casos muy difíciles de estudiar en condiciones de campo, no solo debido a la variabilidad espacial y temporal que esas propiedades manifiestan; si no también a la forma de tomar las muestras para el análisis (alterada o inalterada) así el volumen a tomar. Por tal razón en los estudios dedicados al estudio de la fertilidad física de los suelos han recurrido a herramientas de modelación para profundizar en los estudios del funcionamiento hídrico de los suelos los cuales, permiten abordar

una cuestión puramente teórica, en cuyo caso su finalidad es puramente teórica, o una situación real, orientado a dar una respuesta concreta (García, 2004), formalizar en un modelo de simulación nuestra percepción del fenómeno real y simular el efecto de diferentes alternativas.

Para ello, es necesario conocer las propiedades hidráulicas del suelo, curva de retención de humedad en el suelo (CTH) y la función conductividad hidráulica. Generalmente el número de puntos medidos para la curva resulta una cantidad reducida debido al trabajo de campo y laboratorio, así como los costos requeridos,

por lo que, si se ajustan estos datos a una función analítica, es posible la estimación de puntos intermedios dentro del rango experimental en que no han sido medidos. Por otra parte, resulta menos difícil la utilización de estos modelos para la estimación de la conductividad hidráulica en función de la humedad y el empleo de ambas en modelos hidrológicos (Han *et al.*, 2010)

Por otra parte, resulta menos engorrosa la utilización de estos modelos para la estimación de la conductividad hidráulica en función de la humedad y el empleo de ambas en modelos hidrológicos (Nielsen *et al.*, 1986). La ventaja del uso de modelos analíticos en los estudios de agua en el suelo incluye una fácil comparación de propiedades hidráulicas de los suelos, interpolación de datos faltantes e información adecuada para la aplicación de los modelos de flujo en la zona no saturada (van Genuchten, 1992).

Según Angel y Pineda (2019) en la literatura es posible encontrar múltiples métodos para determinar las propiedades hidráulicas. Sin embargo, algunos de estos métodos requieren dispositivos costosos y muy específicos, otros necesitan personal con especial destreza, mientras otros, son muy trabajosos y consumen mucho tiempo. Esto provoca que no todos los países usen las mismas metodologías y métodos, sino que éstos serán seleccionados acorde a las posibilidades de cada uno. También el tipo de suelo será una razón para seleccionar uno u otro método (Ruiz *et al.*, 2006).

Para el empleo de muchos modelos computacionales se requieren la curva tensión-humedad y la conductividad hidráulica, expresadas ambas como funciones analíticas. Estas propiedades resultan indispensables para explicar la retención y el movimiento del agua en el suelo con exactitud (Ruiz, 1997; Díaz *et al.*, 2008; López *et al.*, 2016).

Un aspecto fundamental en los modelos es disponer de las propiedades hidráulicas principales del suelo, es decir la curva tensión humedad y la función conductividad hidráulica, ya que sin una descripción adecuada de la parte del suelo- agua – planta - atmósfera (SAPA) correspondiente a la relación suelo-agua, no es posible después estimar correctamente el comportamiento del cultivo (Mahdian y Gallichand, 1996; Angel y Pineda, 2019).

El modelo de van Genuchten ha sido utilizado con, Nielsen *et al.* (1983) en un trabajo coordinado por la Agencia Internacional de la Energía Atómica en once países, obtuvo para este modelo el mejor ajuste en comparación con el de Brooks y Corey. También van Genuchten y Nielsen (1985) lo utilizaron para más de 200 curvas tensión humedad obtenidas tanto “in situ” como en laboratorio, para suelos de diversas texturas, obteniendo mejor ajuste en comparación a Brooks y Corey.

En Cuba, la determinación de la curva tensión humedad (CTH) se ha realizado fundamentalmente vinculado a trabajos de investigación y utilizando muestras alteradas de suelos (Herrera *et al.*, 1986; Delgado, 1987). Sin embargo, la medición en el campo o laboratorio de esta propiedad consume mucho tiempo, costo y frecuentemente es impracticable debido al alto grado de variabilidad espacial y temporal, por lo que muchos autores han intentado encontrar métodos analíticos que permitan determinar y representar gráficamente este parámetro hidráulico. A pesar de existir algunos resultados relevantes no se ha continuado profundizando en este tema. Por tal razón el objetivo de este estudio es la determinación de curvas tensión humedad y la conductividad hidráulica de no saturación en suelos Pardos, a partir del software RECT que permite la estimación de puntos intermedios por donde se mueve el agua en el suelo.

MÉTODOS

Localización y características generales de la zona de estudio

El trabajo se realizó con muestras de suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido, según Instituto de Suelos (1999), de la región de Guáimaro en la provincia de Camagüey. Se tomaron las muestras cerca del lugar donde aparece el perfil típico de este tipo de suelo, correspondiente al mapa genético de suelos de Cuba a escala de 1: 25 000.

En la Tabla 1 aparecen las características más importantes desde el punto de vista hidropedológico, reportadas por Cid *et al.* (2012).

TABLA 1. Características hidropedológicas del suelo Pardo Sialítico Grisáceo mullido

Prof cm	SBDM Da g cm ⁻³	SDUL Cc cm ³ cm ⁻³	SLCF Arena %	SLCL Arcilla %	SLSI Limo %	SLDR Inf. Básica m día ⁻¹	SLLL Límite Prod cm ³ cm ⁻³	SSAT Suelo Satur. cm ³ cm ⁻³	SSKS K sat cm hr ⁻¹
20	1,51	0,291	67,8	10,2	22,0	0,6	0,233	0,430	1,8
40	1,46	0,277	64,2	15,2	20,6		0,222	0,450	3,0
60	1,43	0,259	53,8	32,2	14,0		0,207	0,460	2,4
80	1,59	0,289	51,9	22,5	25,6		0,231	0,400	3,0

LEYENDA:

Prof: Profundidad en *cm*

SBDM: Densidad Aparente o Peso Volumétrico en *g.cm⁻³*

SDUL: Límite Superior de la Reserva Fácilmente Utilizable (comúnmente llamada Capacidad de Campo) en *cm³ cm⁻³*

SLCF: Arena en %

SLCL: Arcilla en %

SLSI: Limo en %

SLDR: Tasa de Drenaje en *m.día⁻¹*

SLLL: Límite Inferior de la Reserva Fácilmente Utilizable (comúnmente llamado Límite Productivo) en *cm³ cm⁻³*

SSAT: Suelo Saturado en *cm³ cm⁻³*

SSKS: Conductividad Hidráulica Saturada en *cm hr⁻¹*

Los análisis de laboratorio se realizaron en la sede del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), en el Municipio Arroyo Naranjo, Provincia La Habana.

Método empleado para las pruebas de campo

Para la determinación de la conductividad hidráulica se utilizó el método del Inverso de Hoyo de barrena propuesto por Van Beers (1965).

Las muestras de suelo inalterado se tomaron con barrenas de la firma Eijkelkamp (1983), con anillos de 100 cm³ y fueron llevadas al laboratorio. Se analizaron 3 capas de suelo a las profundidades de 0-30 cm, 30-60cm y más de 60 cm, bajo el criterio que tienen un comportamiento hidropedológico bien contrastante entre ellas. En cada una de las capas se tomaron 3 réplicas para estudiar cada propiedad. En la Tabla 2 aparecen todas las tensiones estudiadas, tanto para la Caja de Arena (March 1983) como para la Olla de Richards (Richards, 1949).

TABLA 2. Tensión - Humedad Observada por profundidad.

Tensión cm c a (cm)	Tensión (pF)	Tensión (bar)	Humedad Observada (cm ³ cm ⁻³)		
			0-30 cm	30-60 cm	+60 cm
15000	4,2	15,00	0,085	0,279	0,254
10000	4	10,00	0,093	0,283	0,267
5000	3	5,00	0,103	0,318	0,267
1000	3	1,00	0,118	0,380	0,303
300	2	0,30	0,206	0,399	0,368
200	2	0,20	0,208	0,420	0,361
100	2	0,10	0,213	0,431	0,382

Método empleado para las pruebas de laboratorio

Luego de llevar los anillos de 100 cm³ al laboratorio se les colocó a las mismas en su parte inferior una malla fina sujeta por una goma para fijar la tela al anillo para evitar de esta forma la disgregación del suelo; se saturaron con agua las muestras y se pusieron en la caja de arena a diferentes picofaradio (PF) hasta 2 y posteriormente se ponen en la Olla de Richards hasta 15 000 cm de columna de agua o PF 4,2 para evaluar la relación entre el porcentaje de humedad del suelo y la tensión. La metodología utilizada fue a partir de la Caja de Arena (March, 1983).

Para la determinación de las CTH fueron empleadas la Caja de Arena y la Olla de Richards (Richards, 1949).

Base de dato de Excel

Los datos obtenidos en campo y en laboratorio se procesaron en Excel, tales como Humedad, Tensión, creando una base de datos. Las unidades utilizadas en cada dato se corresponden con la que utiliza el modelo por lo que se procedió a convertir las mismas con los cálculos siguientes:

- Humedad (%pss) / 100= Media Humedad g g⁻¹
- Medias Humedad g g⁻¹ * da (1,46) = Humedad Observada (cm³ cm⁻³)
- Tensión (columna de agua en cm) =log de la columna de

agua= Tensión (pF)

- Tensión (columna de agua en cm) / 1000= Tensión (bar)

Modelos analíticos

Para la evaluación de los modelos de retención de humedad del suelo se utilizó el software RETC (van Genuchten *et al.*, 2009) que es un programa computacional que se puede usar para analizar la retención de agua y las funciones de conductividad hidráulica de los suelos no saturados y que permite la estimación de puntos intermedios por donde se mueve el agua en el suelo.

Se determinaron los parámetros humedad de saturación y residual, así como alpha y n, que sirven de ajuste a los modelos analíticos empleados y que se presentan a continuación:

El modelo de van Genuchten con las restricciones m = 1-1/n, siendo la ecuación:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \alpha h^n)^m} \tag{1}$$

Donde:

θ - contenido de humedad (cm³ cm⁻³); θ_r y θ_s corresponde a la humedad residual y de saturación (cm³ cm⁻³); α- es un parámetro empírico; h -tensión (cm); n, m- parámetros de ajuste de la curva.

Datos de entrada al software RETC

Los datos que exige el software fueron tomados de López *et al.* (2010) para los suelos Pardos Sialítico Grisáceo Mullido. Los cuales se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3. Datos de entrada a RECT

θ _r (cm ³ cm ⁻³)	θ _s (cm ³ cm ⁻³)	α	n	K _s
0,1738	0,275	0,008	1,91	194,4

Criterio estadístico para evaluar el grado de ajuste

El grado de ajuste de cada función analítica a los pares de valores experimentales de tensión y humedad fue valorado a través del coeficiente de determinación (R²). Además se determinó el error estándar y el intervalo de confianza para el 95% de los parámetros estimados: θ_r, θ_s, α y n para el tipo de suelo estudiado.

Determinación de la Conductividad Hidráulica de no Saturación (K_{ns}) a partir de la curva tensión-humedad

La función para la conductividad hidráulica de no saturación fue obtenida a partir de la ecuación de Mualem (1976) y empleando los parámetros estimados de la curva tensión humedad. La expresión resultante en función de la tensión es:

$$K_{ns}(h) = K_s \frac{[1 - (\alpha h)^{n-1} (1 + (\alpha h)^n)^m]^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{m}{2}}}$$

Para la estimación de los parámetros que aparecen en la CTH y por consiguiente los necesarios para calcular K_{ns}, se empleó el programa RECT (van Genuchten, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 y 2 se presentan las curvas tensión humedad modeladas para el suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido para cada una de las tres profundidades evaluadas. Estas curvas fueron obtenidas con el uso del software RETC (van Genuchten *et al.*, 2009) que facilita la determinación de los parámetros del modelo de van Genuchten (1980), el cual tiene una alta complejidad matemática y ha sido demostrado su aplicabilidad para la mayoría de los tipos de suelos a pesar de la alta variabilidad

espacial de estas propiedades (Zhu y Mohanty, 2002)

En la Figura 1, se observa, para el rango de tensión entre 0 y 1000 cm de columna de agua los niveles de humedad sufren una caída brusca para un pequeño cambio de la tensión. Esa cantidad de agua que se pierde está en el rango de lo que se denomina “agua fácilmente aprovechable” para los cultivos en la mayoría de los suelos. A partir de este rango la variación de la humedad con el aumento de la tensión es más gradual con una diferenciación para la capa de 0-30 cm. En el caso de las capas inferiores no se muestran grandes diferencias significativas en las curvas.

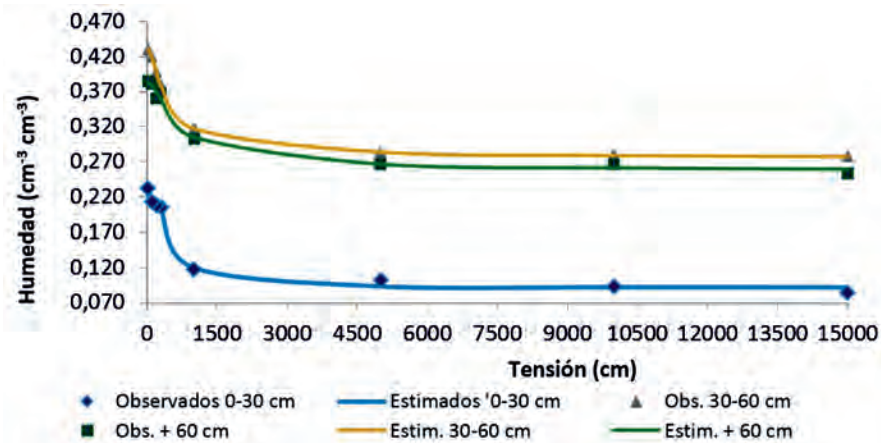


FIGURA 1. Curvas Tensión- Humedad de 0 a 15000 cm de columna de agua.

Este comportamiento diferenciado se aprecia mejor en la Figura 2 donde se muestran las curvas para el rango de tensiones de 0 a 1000 cm. La capa superficial de 0-30 cm tiene un comportamiento peculiar con relación a las otras dos capas donde se evidencia que para un mismo valor de tensión hay menor contenido de humedad en la capa superior respecto a las otras. Este fenómeno puede estar asociado a que la misma contiene dentro de sus características texturales un mayor contenido de arena, que se traduce en la disminución de la retención del agua por el suelo a consecuencia de una reducción notable de la microporosidad.

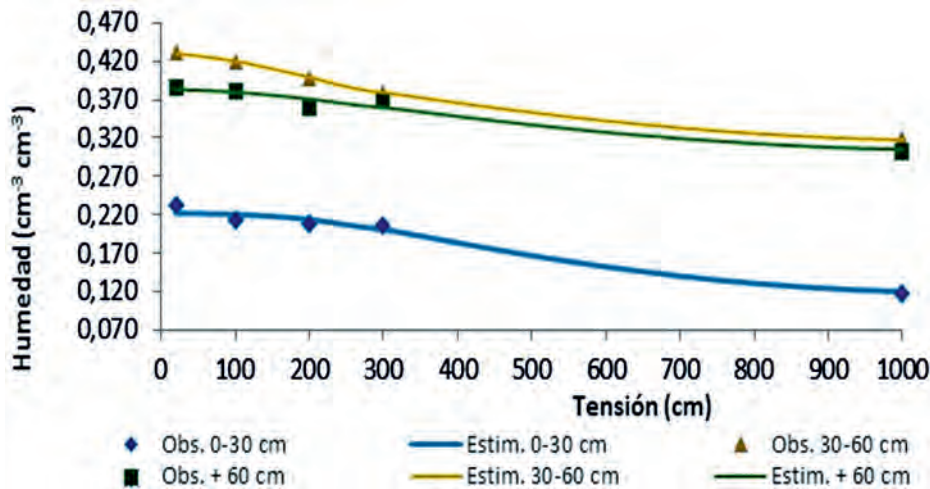


FIGURA 2 Curvas Tensión- Humedad de 0 a 1000 cm de columna de agua

Al analizar más detalladamente las profundidades de 30-60 y 60 más en el rango de 0 cm a 1000 cm de columna de agua, se observa como comienza a diferenciarse el comportamiento entre ellas en el rango de tensiones más bajas de 0 a 300 cm, que corresponde al rango entre la saturación y muy cercano a la capacidad de campo, lo cual debe estar asociado a los altos contenidos de arcilla que favorecen la retención del agua por

el suelo; sin embargo para el siguiente aumento de tensiones el comportamiento es más gradual.

En la Tabla 4 se refleja que el modelo de van Genuchten determina con precisión la CTH, con coeficientes de determinación (R^2) de 0,98, 0,99 y 0,98, lo que demuestra que el modelo describe de forma apropiada los procesos de retención de agua en el suelo para cada una de las profundidades estudiadas.

TABLA 4. Parámetros de van Genuchten estimados para cada profundidad en un suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido

Variable	θ_r	θ_s	α	n	m	Ks	R ²
0-30 cm							
Valor estimado	0,092	0,22	0,0022	2,84	0,56	194,4	0,986
Error	0,006	0,007	0,0005	0,61			
30-60 cm							
Valor estimado	0,27	0,43	0,0038	1,93	0,482	194,4	0,999
Error	0,001	0,0009	0,0001	0,036			
+60 cm							
Valor estimado	0,256	0,38	0,0024	2,0	0,5	194,4	0,988
Error	0,008	0,006	0,0007	0,37			

θ_r - humedad residual.
 θ_s - humedad de saturación (cm³ cm³).
 α - parámetro empírico.
n, m- parámetros de ajuste de la curva.
Ks- conductividad hidráulica de saturación

Resultados similares fueron obtenidos por López *et al.* (2010) en un estudio de comparación de 570 curvas de diferentes tipos de suelos agrícolas cubanos obtenidas en el periodo 1990 – 2003, con valores de R² promedio de 0,97 para las condiciones m = 1-1/n del modelo de van Genuchten y plantean que es el más apropiado para describir el proceso de retención de agua en el suelo.

En la Tabla 4 se observan valores inferiores a 1 del error estándar para cada parámetro del modelo de van Genuchten con el término m = 1-1/n, lo cual se considera aceptable si se tiene en cuenta la variabilidad de los mismos en el suelo, según señala Warrick (2003).

Por otra parte, los valores del coeficiente “ α ” se encuentran en el rango de 0,0022-0,0024 excepto para la capa intermedia que es algo superior (0,0038), lo cual está en el rango de los valores reportados por López *et al.* (2010) para este tipo de suelos.

Los parámetros relacionados con la humedad residual y

de saturación obtenidos con la modelación se diferencian de otros estudios, lo que pudiera estar asociado a los errores de las interacciones que efectúa el modelo (van Genuchten, 2000) para obtener los parámetros óptimos y a la variabilidad propia de estos niveles de humedad.

Ruiz (1997) planteó que la utilización de las curvas de retención de humedad determinadas en laboratorio a partir de muestras inalteradas, pueden considerarse como un resultado exitoso, teniendo en cuenta lo trabajoso que resulta y el tiempo que lleva la determinación de las curvas “in situ”; como se muestra no se observan diferencias significativas entre la humedad observada en el laboratorio a partir de muestras inalteradas y la estimada por el software para ninguna de las tensiones evaluadas en las capas estudiadas (Tablas 5, 6 y 7), la que refleja, en algunos casos, que los datos estimados se subestimaron sistemáticamente, no siendo las diferencias en ningún caso superior a 0.

TABLA 5. Desviación entre la humedad observada y estimada de 0-30 cm en un suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido

Tensión (cm)	Humedad Observada (cm ³ cm ⁻³)	Humedad Estimada (cm ³ cm ⁻³)	Desviación Observada-Estimada
15000	0,0850	0,0926	-0,0076
10000	0,0930	0,0928	0,0002
5000	0,1030	0,0939	0,0091
1000	0,1180	0,1204	-0,0024
300	0,2060	0,2009	0,0051
200	0,2080	0,2143	-0,0063
100	0,2130	0,2209	-0,0079
20	0,2320	0,2221	0,0099

TABLA 6. Desviación entre la Humedada observada y estimada de 30-60 cm en un suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido

Tensión (cm)	Humedad Observada (cm ³ cm ⁻³)	Humedad Estimada (cm ³ cm ⁻³)	Desviación Observada-Estimada
15000	0,279	0,2781	0,0009
10000	0,280	0,2797	0,0003
5000	0,283	0,2845	-0,0015
1000	0,318	0,3178	0,0002
300	0,380	0,3793	0,0007
200	0,399	0,3996	-0,0006
100	0,420	0,4205	-0,0005
20	0,431	0,4305	0,0005

TABLA 7. Desviación entre la Humedada observada y estimada de más de 60 cm en un suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido

Tensión (cm)	Humedad Observada (cm ³ cm ⁻³)	Humedad Estimada (cm ³ cm ⁻³)	Desviación Observada-Estimada
15000	0,254	0,2594	-0,0054
10000	0,267	0,2612	0,0058
5000	0,267	0,2665	0,0005
1000	0,303	0,3053	-0,0023
300	0,368	0,3599	0,0081
200	0,361	0,3712	-0,0102
100	0,382	0,3801	0,0019
20	0,385	0,3834	0,0016

En la figura 3 se presenta la conductividad hidráulica modelada en función de la tensión para cada una de las profundidades, a partir de los datos obtenidos por el software, mostró que para valores entre 0 y 700 cm de columna de agua en las tres capas ocurre un decrecimiento brusco desde altos valores para las humedades cercanas a la saturación, donde se encuentra el espacio poroso lleno de agua, a valores cercanos a la unidad para tensiones entre 500-700 cm, lo que está asociado a los contenidos de arcilla presentes en este tipo de suelo que favorecen la retención del agua en la microporosidad.

A partir de este valor de tensión, la conductividad hidráulica decrece y aumenta el contenido de agua retenido como ya se obser-

vó en el análisis de las curvas tensión humedad hasta los 1000 cm.

En la profundidad de 0-30 cm de suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido el proceso es menos brusco a diferencia de las otras dos profundidades; lo que está asociado al elevado contenido de arena que presenta esta capa según lo definido en la Tabla 1. No obstante, en esta capa se tienen los mayores valores en la conductividad de saturación, característico de texturas con altos contenidos de arena, por lo que el comportamiento del decrecimiento de la conductividad con la disminución de la humedad es más rápido, lo que coincide con Gómez (2011), que plantea, que es mayor en suelos arenosos que en arcillosos, a bajas tensiones mátricas y, al contrario a tensiones más altas.

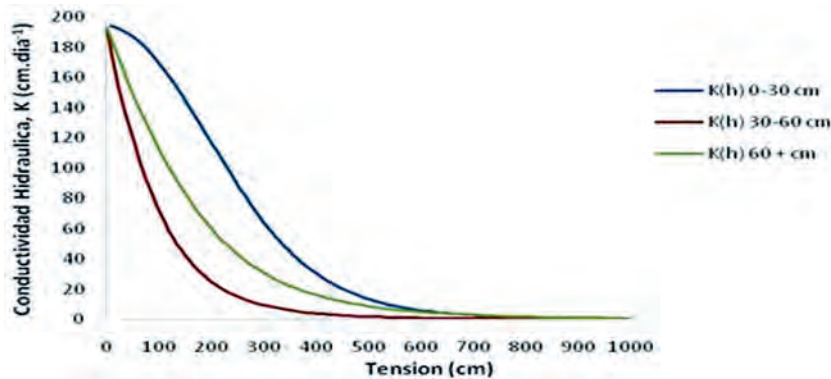


FIGURA 3. Función conductividad hidráulica en un suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido.

CONCLUSIONES

- Las Curvas Tensión- Humedad obtenidas en el laboratorio a partir de muestras inalteradas ajustadas al modelo de Van Genuchten permitieron definir las propiedades fundamentales de retención de humedad y el movimiento hídrico en un suelo Pardo Sialítico Grisáceo Mullido estudiado a partir de la determinación de la Función Conductividad.
- Los valores de coeficientes de determinación superiores a 0,98 demuestran que es aceptable desde el punto de vista

estadístico el ajuste de las Curvas Tensión-Humedad y la Función Conductividad Hidráulica a partir de la modelación de las mismas mediante del software RECT.

- Se pudo apreciar que la curva Tensión Humedad en la profundidad de 0-30 tuvo una caída más marcada asociado a las diferencias estructurales que contiene la capa superficial respecto a las otras.
- La conductividad Hidráulica se comporta de manera diferenciada en cada una de las profundidades debido a la heterogeneidad textural de cada una de las capas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANGEL, L. M.; PINEDA, D. G.: Medición de la conductividad y curvas de retención de humedad en suelos parcialmente saturados utilizando metodologías modernas, Tesis en opción al grado de Ingeniero Civil, Universidad católica de Colombia, Bogotá, 2019.
- BEERS, W, F, J, VAN, Some nomographs for the calculation of drain spacings, Wageningen, Netherlands, International Institute for Land

- Reclamation and Improvement, Bulletin No, 8, 48pp., 1965.
- CID, G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUIZ, M.E.: "Características físicas que definen el comportamiento hidráulico de algunos suelos de Cuba", Revista Ingeniería Agrícola, 2(2): 25-31, 2012, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- DELGADO, D.: *Estado energético del agua y su interrelación con las propiedades físicas e hidrofísicas de los suelos Ferralíticos Rojos de Cuba*, Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agropecuarias, Ministerio de la Agricultura, Ciudad de La Habana, Cuba, 1987.
- DÍAZ, J.; RUIZ, M.E.; ALONSO, G.; LEAL, Z.; ALMOZA, Y.: "Curvas tensión humedad de suelos representativos de la cuenca del río Cuyaguatate", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17(4): 60-63, 2008, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- EIJKELKAMP, Equipment for determining moisture characteristic curves of soil samples [pF Equipment] pF 04, 2 [015,5 bar], The Netherlands, 40 pp., 1983.
- GARCÍA, J. M.: Sysware. Barcelona, España. ISBN 84-609-2462-9. 315 pp., 2004.
- HAN, X.; SHAO, M.; HORTON, R.: "Estimating van Genuchten model parameters of undisturbed soils using an integral method", Pedosphere 20(1):55-62, 2010.
- GÓMEZ, M. J. A.: Conductividad hidráulica no saturada en tres suelos rojo arcillosos sometidos a distinto uso. Tesis en opción al título de Licenciado en agronomía, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Valdivia, Chile, 70 pp.; 2011.
- HERRERA, P. J.; GRECO, C.; LLANOS, M.A.: Relaciones tensión humedad para algunos suelos cubanos, EN Suelo y Agua, Actas del seminario de La Habana, Editorial Orstom, París, 1986.
- INSTITUTO DE SUELOS, Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba, AGRINFOR (Ed.), ISBN 959-246-022-1, Ministerio de la Agricultura, Ciudad de La Habana, Cuba, 64 pp., 1999.
- LÓPEZ, C. G.; HERRERA, P. J.; A, OSTOS-SANTOS, L, LIZARRAGA MENDIOLA Y J, HERNÁNDEZ-AVILA, Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retención de humedad del suelo, *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 6 (1): 44-50, 2010.
- LÓPEZ, T.; CID, G.; HERRERA, J.; GONZÁLEZ, F.: Eficiencia de almacenamiento del agua en suelos agrícolas irrigados de Cuba, en línea] Sitio Web de la representación de la FAO en Cuba, Disponible en: <http://bva.fao.cu/> 2010.
- LÓPEZ, S.T.; RUIZ, M.E.; GONZÁLEZ, R.F.; CID, L.G.; HERRERA, P.J.: "Actualización de herramientas disponibles para la precisión de balances hídricos del suelo en trabajos experimentales", Revista Ingeniería Agrícola, 6(3): 18-25, 2016, ISSN: 2306-1545, E-ISSN-2227-8761.
- MAHDIAN, M, H.; GALLICHAND, J.: Modeling soil water content and pressure head with SWACROP in potato fields, *Canadian Agricultural engineering* 38(1):1-11, 1996.
- MARCH, Equipment for determining moisture characteristic curves of soil samples EIJKELKAMP, 1983.
- NIELSEN, D, R.; REICHARDT, K.; WIERENGA, P.: Characterization of field measured soil water properties, In, *Isotope and Radiation techniques in soil physics and irrigation studies*, IAEA, pp, 55-78, 1983.
- NIELSEN, D.; TH. VAN GENUCHTEN, M.; BIGGAR, J.: "Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone", *Water resources research*, 22(9S): 89S-108S, 1986, ISSN: 0043-1397.
- RICHARDS, L.: "Methods of measuring soil moisture tension", *Soil Science*, 68(1): 95, 1949, ISSN: 0038-075X.
- RUIZ, M, E, Utilización del modelo SWACROP en la simulación del uso del agua y el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L., c.v, Desiree) en suelos Ferralíticos Rojos, Tesis doctoral, UNAH, Cuba, 88 pp, 1997.
- RUIZ, M. E., MEDINA, H, Revisión sobre métodos empleados en Cuba para determinar las propiedades hidráulicas en suelos no expansivos, Grupo de Investigaciones Agrofísicas, Universidad Agraria de la Habana, 14 pp, 2006.
- VAN BEERS, W. F. J.: The Auger Hole Method, Bull, No 1, International Ins, for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 32 p, 1965.
- VAN GENUCHTEN, M.: A Closed Form Equation For Predicting The Hydraulic Conductivity Of Unsaturated Soil, *Soil Sci, Soc, Am, J*, 44:892898, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M.: On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils, In, *Proc, Int, Worksh, Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*, University of California, USA, 1-14 pp, 1992.
- VAN GENUCHTEN, M.T.; NIELSEN, D.: "On describing and predicting the hydraulic properties", En: *Annales Geophysicae*, vol. 3, pp. 615-628, 1985.
- VAN GENUCHTEN, M.; SIMUNEK, J.; LEIJ, F. J.; SEJNA, M.: RECT versión 6.2, The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, US Salinity Laboratory, USDA, ARS. Riverside, California. SEPA, disponible en: www.hydrus3d.com, 2009.
- WARRICK, W.A.: *Soil water dynamics*, Ed. Oxford University Press, USA, 383 p., 2003, ISBN: 0-19-534411-1.
- ZHU, J.; MOHANTY, B.P.: "Spatial averaging of van Genuchten hydraulic parameters for steady-state flow in heterogeneous soils", *Vadose Zone Journal*, 1(2): 261-272, 2002, ISSN: 1539-1663.

*Autora para correspondencia: Maryla Romero Campos, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Recibido: 19/11/2019.

Aprobado: 13/03/2020.

Maryla Romero Campos, Inv. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Grecó Cid Lazo, Inv. Titular Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: dptoambiente1@iagric.cu

Felicita González Robaina, Inv. Titular Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Teresa López Seijas, Inv. Titular, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.