# Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retención de humedad del suelo

G. López-Canteñs [1*], J. Herrera-Puebla [2], A. Ostos-Santos [3], L. Lizárraga-Mendiola [3] y J. Hernández-Avila[3]

[1] *Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. C.P. 56230. Chapingo, México.*
[2] *Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Arroyo Naranjo. AP 6090. Ciudad Habana. Cuba. Email: julian@iird.cu*
[3] *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Km 4.5, Carretera Pachuca-Tulancingo, Ciudad Universitaria s/n. C.P. 42184 Mineral de la Reforma, Hidalgo, Mexico. Email: abacu_ostos2002@yahoo.com.mx, lililga@gmx.net, herjuan@uaeh.reduaeh.mx*

*Application of mathematical models for the obtaining of the soil water retention curve*

**Abstract**
In modern agriculture the use of mathematical models is increasing to predict water and solute movement in the vadose zone of porous media. Thus, it is needed to know the soil hydraulic properties, among those that are the moisture content curve. This curve is obtained from various analytical models; however, they had not been evaluated with the Cuban soils. Furthermore, five analytical models were compared with 570 samples collected from different soils and regions of country, in the period 1990-2003. This evaluation uses the criteria of Square Quadratic Residuals (SQR), the variation coefficient ($r^2$), and the standard error. As a result, the Van Genuchten model with condition m = 1-1/n shows the best adjustment between measured and estimated values, with ranges of the SQR between $0.05x10^{-3}$ and $2.86x10^{-3}$ g $g^{-1}$ and $r^2$ more than 0.92. When using this model with data coming from altered or unaltered samples, appreciable variations were not obtained in the resulting curves for the tensions from 0 to 100 cm. It use to model, as well as of the estimated parameters for each soil groups can be used in the estimation of the necessary moisture content curve by the simulation models.

*Key words*: Soil, water, analytical models, soil water characteristic curve.

**Resumen**
En la agricultura moderna se ha incrementado el uso de modelos matemáticos que permiten caracterizar el movimiento del agua y el transporte de solutos en la zona no saturada, siendo necesario conocer las propiedades hidráulicas de los suelos, entre las que se encuentra la curva de retención de humedad. Para caracterizar la misma se han empleado varios modelos analíticos a nivel internacional, pero no han sido evaluados en suelos cubanos, por tal motivo el objetivo de la presente investigación fue comparar cinco modelos de estimación de la curva de retención de humedad del suelo, definiéndose el de mejor ajuste, así como los parámetros necesarios para su aplicación. Con este fin se recopilaron y procesaron 570 muestras obtenidas en diferentes suelos y regiones del país en el periodo 1990-2003, empleándose como criterio la suma de cuadrados residuales (SCR), el coeficiente de determinación ($r^2$) y el error estándar de los parámetros estimados. El modelo de Van Genuchten con la condición de m = 1-1/n resultó ser el que mejor se adaptó a las condiciones evaluadas, con SCR entre $0.05x10^{-3}$ y $2.86x10^{-3}$ g $g^{-1}$ y $r^2$ mayor que 0.92; al utilizar este modelo con datos provenientes de muestras alteradas o inalteradas, no se obtuvieron variaciones apreciables en las curvas resultantes para las tensiones de 0 a 100 cm. El empleo de este modelo, así como de los parámetros estimados para cada grupo de suelos pueden ser utilizados en la estimación de las curvas de retención de humedad necesarias por los modelos de simulación.

*Autor de correspondencia
Email: alelopez10@hotmail.com

*Palabras clave*: Suelo, agua, modelos analíticos, curva de retención de humedad en el suelo

## Introducción

El suelo y el agua son dos recursos fundamentales del ambiente agrícola. Con los avances en las nuevas tecnologías agrícolas, grandes cantidades de agua y productos químicos son aplicados al suelo cada año. Este uso excesivo, ha puesto en peligro nuestros recursos, en adición existe un incremento de incidentes de contaminación de los acuíferos y las aguas superficiales, erosión, etc. desde fuentes puntuales y no puntuales.

En respuesta a estos problemas ambientales ha habido un incremento en los esfuerzos por desarrollar prácticas de manejo agrícola sostenibles, que integren los elementos correspondientes al continuo agua-suelo-planta-atmósfera. En tal sentido, se desarrollan y aplican modelos matemáticos que permiten caracterizar el movimiento del agua y el transporte de solutos en la zona no saturada.

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). 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 (Turgut y Sabit, 2008).

Los modelos empíricos de retención de humedad del suelo, pueden dividirse en cuatro categorías según su relación funcional: exponencial, potencial, coseno hiperbólico y función error. Muchos autores utilizan una función potencial para caracterizar la retención de humedad del suelo (Brooks y Corey, 1964; Van Genuchten, 1980).

El modelo de Brooks y Corey constituyó el modelo más popular entre los investigadores por su simplicidad ya que la curva puede ser representada como una recta en una gráfica log-log. Sin embargo Van Genuchten y Nielsen (1985) señalan que este modelo produce resultados aceptables sólo para suelos tamizados, de textura gruesa, con una distribución de poros relativamente estrecha, mientras que Hillel (1998) plantea que el mismo es válido para tensiones que no correspondan al rango húmedo.

El modelo de Van Genuchten ha sido utilizado con éxito por varios investigadores, entre los que se destacan, 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 de tensión humedad obtenidas tanto "in situ" como en laboratorio, para suelos de diversas texturas, obteniendo mejor ajuste en comparación a Brooks y Corey.

Ruiz (1997) ajustó 26 CTH correspondientes a un suelo Ferralítico Rojo (Ferralsol) a los modelos de Gardner y Van Genuchten obteniéndose una suma de cuadrado residual menor en 2.5 veces para el modelo de Van Genuchten. También Ruiz *et al.* (2006) compararon los modelos de Gardner, Brooks y Corey y Van Genuchten para 173 curvas de retención de humedad de diferentes agrupamientos de suelos, siendo en todos los casos el modelo de Van Genuchten el que obtuvo menor suma de cuadrados residuales media.

En Cuba se han empleado diferentes modelos de simulación en las investigaciones y el manejo agrícola, siendo uno de los parámetros fundamentales, el conocimiento de la CTH. Sin embargo, la medición en el campo o laboratorio de esta propiedad consume mucho tiempo, costo y frecuentemente impracticable debido al alto grado de variación espacial y temporal, por lo que muchos autores han intentado encontrar métodos analíticos que permitan determinar y representar gráficamente este parámetro hidráulico. Sin embargo, a pesar de existir algunos resultados relevantes no se ha continuado profundizando en este tema, por lo que el trabajo tiene como objetivo comparar cinco

modelos de estimación de la curva de retención de humedad del suelo, para definir el de mejor ajuste a los suelos agrícolas, así como los parámetros necesarios para su aplicación.

## Material y Métodos

*Curva de retención de humedad del suelo*

Se recopilaron y validaron 570 curvas de diferentes tipos de suelos agrícolas cubanos obtenidas en el periodo 1990 - 2003, que fueron determinadas en el laboratorio a partir de muestras alteradas e inalteradas, con rangos de tensiones entre 0 y 150 m, empleándose la caja de arena, la caja de caolín y la prensa de Richard (EIJKELKAMP, 2010). En el tabla 1 se muestran los tipos de suelos en los cuales se realizaron las determinaciones y que aparecen agrupados según la textura predominante, la II Clasificación Genética de los suelos cubanos y la clasificación FAO-UNESCO (Instituto de Suelos. ACC, 1980), encontrándose una gran diversidad de éstos, que van desde las arcillas del tipo caolinitica y montmorillonitica hasta los arenosos.

*Modelos analíticos*

Para la evaluación de los modelos de retención de humedad del suelo se utilizó el software RETC realizado por Van Genuchten *et al.* (2000), a partir del cual 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 (vG1) y m = 1-2/n (vG2), tiene la siguiente ecuación:

$$Se = [1+(\alpha h)^n]^{-m}$$

El modelo de Brooks y Corey (BC) se basa en la ecuación siguiente:

$$Se = (\alpha h)^{-\lambda}$$

La Distribución Lognormal (DLN) (Kosugi, 1996) es representada por el modelo

$$Se = 1/2erfc(ln\ h/ho)/2^{1/2}\sigma$$

y la Porosidad Dual (PD) (Durner, 1994) se determina como

$$Se = w_1[1+(\alpha_1 h)^{n}{}_1]^{-m}{}_1 + w_2[1+(\alpha_2 h)^{n}{}_2]^{-m}{}_2$$

Donde: $Se = (\theta-\theta r)/(\theta s-\theta r)$, saturación efectiva; $\theta r$ y $\theta s$ corresponde a la humedad residual y de saturación (g $g^{-1}$); $\theta$ contenido de humedad (g $g^{-1}$); $\alpha$, $\alpha_1$, $\alpha_2$ es un parámetro empírico; n, $m$, $n_1$, $m_1$, $n_2$ y $m_2$ son parámetros de ajuste de la curva; h tensión (cm); *erfc* función de error complementario; $\lambda$ parámetro característico del suelo y $\sigma$ desviación estándar.

*Determinación de los parámetros del modelo*

Para la estimación de los parámetros desconocidos de los modelos evaluados se utilizó un proceso de optimización de mínimo cuadrado no lineal. El mismo se basó en la partición de la suma total de cuadrados de los valores observados en una parte descrita por el modelo ajustado y una parte residual que involucra los valores observados y los estimados por el modelo. Por lo que el proceso de

**Tabla 1. Agrupamiento de los suelos a partir de las clasificaciones genéticas y texturales.**

| Textura predominante | II Clasificación Genética de Cuba | Clasificación FAO-UNESCO |
|---|---|---|
| Arena - Franco arenoso | Arenoso | Arenosol |
| Franco arenoso - Franco | Ferralítico Cuarcítico Amarillo Rojizo Lixiviado | Acrisol |
| Franco arenoso - Franco | Pardo Grisáceo | Cambisol |
| Arcilla - Franco | Pardo sin Carbonatos | Cambisol |
| Arcilla - Franco | Pardo con Carbonatos | Cambisol |
| Arcilla - Franco arcilloso | Fersialítico Pardo Rojizo | Luvisol |
| Arcilla - Franco arcilloso | Gley Húmico | Gleysol |
| Arcilla - Franco arcilloso | Gley Ferralítico | Gleysol |
| Arcilla - Franco arcilloso | Gley Amarillento | Gleysol |
| Arcilla - Franco arcilloso | Ferrítico Púrpura | Ferralsol |
| Franco - Arcilla | Aluvial | Fluvisol |
| Arcilla | Ferralítico Rojo | Ferralsol |
| Arcilla | Ferralítico Amarillento | Lixisol |
| Arcilla | Oscuro Plástico Gleyzado | Vertisol |
| Arcilla | Oscuro Plástico Gleysoso | Vertisol |
| Arcilla | Oscuro Plástico no Gleyzado | Vertisol |

ajuste de la curva consistió en encontrar una ecuación que maximice la suma de cuadrados asociada con el modelo y por otro lado minimice la suma de cuadrados residuales. Este parámetro estadístico refleja el grado de ajuste y la contribución de los errores aleatorios y será referido como la función objetivo *O(b)* en la cual *b* representa el vector del parámetro desconocido y se resuelve aplicando el método del vecino máximo de Marquardt (Marquardt, 1963). Siendo la función objetivo para el ajuste de la curva de retención de humedad en el suelo, la siguiente:

$$O(b) = \sum_{i=1}^{N} \left\{ w_i \left[ \theta_i - \hat{\theta}_i(b) \right] \right\}^2$$

Donde: $\theta_i$ y $\hat{\theta}_i$ corresponden a los contenidos de humedad en el suelo observados y ajustados (g/g), *N* es el número de datos de retención, $w_i$ es el factor de peso para cada dato de la curva de retención.

Otro parámetro de ajuste utilizado es el coeficiente de determinación ($r^2$), que se representa por la ecuación siguiente:

$$r^2 = \frac{\left[ \sum w_i \hat{y}_i y_i - \frac{\sum \hat{y}_i \sum y_i}{\sum w_i} \right]^2}{\left[ \sum w_i \hat{y}_i^2 - \frac{\left( \sum \hat{y}_i \right)^2}{\sum w_i} \right] \left[ \sum y_i^2 - \frac{\left( \sum y_i \right)^2}{\sum w_i} \right]}$$

Donde: $y_i$ y $\hat{y}_i$ son los valores ajustados y observados respectivamente.

Además se determinó el error estándar de los parámetros ajustados, teniendo en cuenta la función objetivo, el número de observaciones, el número de parámetros desconocidos a ser ajustado y la matriz inversa siguiendo el procedimiento de Daniel y Wood (1971) y se emplearon como patrón de comparación los rangos de validez establecidos por Shaap y Leij (1998) para los parámetros θr, θs, α y n y las propiedades físicas e hidráulicas promedios para cada tipo de suelo.

## Resultados y discusión

Se evaluó el funcionamiento de los 5 modelos analíticos a partir de la suma de cuadrados residuales, mostrándose en el tabla 2 los valores obtenidos para cada tipo de suelo. Un análisis de los mismos reflejan que el modelo de Van Genuchten describe con precisión la CTH, es decir hay una mejor correspondencia entre las curvas de retención obtenidas experimentalmente y las estimadas, siendo la variante vG1 con un valor promedio de $0.89 \times 10^{-3}$ g $g^{-1}$ la que mejor describe los datos obtenidos en el laboratorio. Resultados similares se han obtenido por diferentes autores entre los que se encuentran Ruiz *et al.* (2006) que obtuvieron SCR que oscilan entre $0.31 \times 10^{-3}$ y $4.09 \times 10^{-3}$ g $g^{-1}$ al

**Tabla 2. Suma de Cuadrados Residuales(SCR) ($x10^{-3}$ g/g) y coeficiente de determinación por tipo de suelo y modelo analítico.**

| Tipo de suelo | vG1 | | vG2 | | BC | | DLN | | PD | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | SCR | $r^2$ | SCR | $r^2$ | SCR | $r^2$ | SCR | $r^2$ | SCR | $r^2$ |
| Arenoso | 1.21 | 0.98 | 1.28 | 0.98 | 1.34 | 0.97 | 2.40 | 0.96 | 80.47 | 0.97 |
| Ferralítico Cuarcítico Amarillo Rojizo Lixiviado | 1.32 | 0.96 | 1.47 | 0.95 | 1.83 | 0.95 | 1.82 | 0.95 | 50.68 | 0.90 |
| Pardo Grisáceo | 0.05 | 0.98 | 0.06 | 0.98 | 0.11 | 0.96 | 0.58 | 0.90 | 21.35 | 0.97 |
| Pardo sin Carbonato | 0.17 | 0.98 | 0.20 | 0.97 | 0.24 | 0.97 | 0.18 | 0.97 | 31.32 | 0.98 |
| Pardo con Carbonato | 0.59 | 0.97 | 0.62 | 0.97 | 0.67 | 0.97 | 0.79 | 0.97 | 66.83 | 0.96 |
| Fersialítico Pardo Rojizo | 0.51 | 0.97 | 0.50 | 0.96 | 0.61 | 0.96 | 1.15 | 0.94 | 14.28 | 0.96 |
| Gley Húmico | 1.26 | 0.99 | 1.31 | 0.98 | 1.69 | 0.98 | 3.68 | 0.96 | 102.54 | 0.98 |
| Gley Ferralítico | 1.25 | 0.98 | 1.17 | 0.98 | 0.92 | 0.98 | 1.04 | 0.97 | 63.77 | 0.98 |
| Gley Amarillento | 0.90 | 0.98 | 0.93 | 0.97 | 0.97 | 0.96 | 1.24 | 0.94 | 98.14 | 0.95 |
| Ferrítico Púrpura | 0.24 | 0.96 | 0.22 | 0.97 | 0.21 | 0.97 | 0.65 | 0.92 | 32.81 | 0.96 |
| Aluvial | 1.08 | 0.98 | 1.22 | 0.98 | 1.67 | 0.96 | 1.64 | 0.98 | 38.27 | 0.95 |
| Ferralítico Rojo | 0.88 | 0.97 | 0.72 | 0.98 | 1.31 | 0.98 | 0.93 | 0.97 | 92.62 | 0.94 |
| Ferralítico Amarillento | 2.86 | 0.97 | 2.61 | 0.97 | 3.28 | 0.97 | 2.96 | 0.97 | 80.90 | 0.93 |
| Oscuro Plástico Gleyzado | 0.43 | 0.98 | 0.70 | 0.98 | 0.70 | 0.97 | 0.36 | 0.97 | 82.10 | 0.95 |
| Oscuro Plástico Gleysoso | 1.52 | 0.96 | 1.52 | 0.96 | 1.44 | 0.95 | 1.94 | 0.95 | 319.86 | 0.94 |
| Oscuro Plástico no Gleyzado | 0.65 | 0.98 | 0.57 | 0.98 | 0.61 | 0.98 | 2.15 | 0.94 | 92.25 | 0.97 |
| Promedio | 0.89 | 0.97 | 0.91 | 0.97 | 1.07 | 0.96 | 1.39 | 0.95 | 74.61 | 0.95 |

ajustar las curvas de retención de humedad para diferentes suelos cubanos.

Los valores del coeficiente de determinación que aparecen en el tabla 2 corroboran los resultados anteriores con respecto al ajuste que existe entre los valores de humedad obtenidos en el laboratorio para cada punto de tensión de la curva con los estimados por los modelos analíticos evaluados. Siendo el modelo de Van Genuchten para las condiciones m = 1-1/n y m = 1-2/n, los que tienen mayor $r^2$ promedio, con valor de 0.97, lo que unido a los resultados de la SCR hace que el modelo vG1 sea el más apropiado para describir el proceso de retención de agua en el suelo.

El modelo de porosidad dual aunque tiene en cuenta una estructura de poros heterogénea, que es aplicable a los suelos evaluados, mostró los mayores valores de SCR con un promedio de $74.61 \times 10^{-3}$ g $g^{-1}$ y la menor $r^2$ promedio de 0.95 junto con el modelo de distribución lognormal, lo cual se debe a que en una muestra de suelo de 100 $cm^3$ solo se tiene una aproximación de la macroporosidad presente en el suelo.

En el tabla 3 aparecen los valores de los parámetros de Van Genuchten estimados con la condición m = 1-1/n para los agrupamientos de suelo estudiados. Un análisis de los mismos muestran que la humedad residual varía en cada agrupamiento, siendo el mínimo de 0.1021 g $g^{-1}$ para los suelos arenosos; valor este muy acertado debido a la cantidad de elementos silicios en forma de arena o gravas de cuarzo presentes en estos suelos y a contenidos de arcilla muy bajos, que no sobrepasan el 15% en los primeros 100 cm de profundidad. Mientras que el máximo fue de 0.2851 g $g^{-1}$ y se obtuvo para el suelo Oscuro Plástico Gleysoso, debido a la cantidad y al tipo de arcilla predominante en el mismo; la cual alcanza valores por encima del 50% y pertenece al grupo de la esmectita, considerado un mineral que retiene altos contenidos de humedad.

En el caso de los suelos Ferríticos y Ferralíticos la humedad residual es relativamente alta, lo cual pudiera estar dado por el contenido de arcilla (entre 50 y 80 %), que hace que estos suelos tengan una gran cantidad de área superficial disponible para retener agua a valores de tensión elevadas. La humedad de saturación se encuentra dentro de los rangos de validez establecidos para los suelos cubanos, mientras que el resto de los parámetros se ajustaron a los criterios definidos por Shaap y Leij (1998).

En el tabla 4 se muestra el error estándar para cada parámetro del modelo de Van Genuchten siendo los valores promedio en la humedad residual, humedad de saturación, $\alpha$ y n de 0.0513 g $g^{-1}$, 0.0267 g $g^{-1}$, 0.0417 y 0.1273 respectivamente, lo que indica el rango de variación que pueden tener estos parámetros y a su vez se consideran como aceptables si se tiene en cuenta la variabilidad de los mismos en el suelo, señalada por Warrick (2003).

También se determinaron los limites superiores e inferiores de cada parámetro para el 95% de confianza y la matriz de correlación de los mismos, encontrándose que la $\theta r$ está altamente correlacionada con n, alcanzando un valor promedio de 0.9 y en menor cuantía con $\alpha$ (0.7); para el caso

**Tabla 3. Parámetros de van Genuchten por tipo de suelo.**

| Tipo de Suelo | θr (g/g) | θs (g/g) | α | n |
|---|---|---|---|---|
| Arenoso | 0,1021 | 0,4383 | 0,0205 | 1,467 |
| Ferralítico Cuarcítico Amarillo Rojizo Lixiviado | 0,1171 | 0,2970 | 0,0571 | 1,407 |
| Pardo Grisáceo | 0,1577 | 0,2234 | 0,0075 | 2,199 |
| Pardo sin Carbonatos | 0,1245 | 0,3437 | 0,0186 | 1,208 |
| Pardo con Carbonatos | 0,1395 | 0,4159 | 0,0346 | 1,393 |
| Fersialítico Pardo Rojizo | 0,1249 | 0,3692 | 0,0090 | 1,497 |
| Gley Húmico | 0,1355 | 0,4993 | 0,0539 | 1,407 |
| Gley Ferralítico | 0,1760 | 0,4494 | 0,0839 | 1,328 |
| Gley Amarillento | 0,1185 | 0,3100 | 0,0597 | 1,958 |
| Ferrítico Púrpura | 0,2018 | 0,3402 | 0,0083 | 1,265 |
| Aluvial | 0,1605 | 0,4239 | 0,0467 | 1,274 |
| Ferralítico Rojo | 0,2070 | 0,4394 | 0,3230 | 1,329 |
| Ferralítico Amarillento | 0,1371 | 0,3643 | 0,0934 | 1,266 |
| Oscuro Plástico Gleyzado | 0,2249 | 0,4655 | 0,0607 | 1,093 |
| Oscuro Plástico Gleysoso | 0,2851 | 0,5177 | 0,0797 | 1,313 |
| Oscuro Plástico no Gleyzado | 0,2708 | 0,4847 | 0,0056 | 1,327 |

**Tabla 4. Error estándar de los parámetros de van Genuchten por tipo de suelo.**

| Tipo de Suelo | θr (g/g) | θs (g/g) | α | n |
|---|---|---|---|---|
| Arenoso | 0.0246 | 0.0788 | 0.0293 | 0.0821 |
| Ferralítico Cuarcítico Amarillo Rojizo Lixiviado | 0.0712 | 0.0151 | 0.0280 | 0.0965 |
| Pardo Grisáceo | 0.0025 | 0.0027 | 0.0042 | 0.3375 |
| Pardo sin Carbonatos | 0.0186 | 0.0128 | 0.0218 | 0.0968 |
| Pardo con Carbonatos | 0.0484 | 0.0143 | 0.0412 | 0.1268 |
| Fersialítico Pardo Rojizo | 0.0154 | 0.0100 | 0.0113 | 0.1698 |
| Gley Húmico | 0.0448 | 0.0052 | 0.0004 | 0.1804 |
| Gley Ferralítico | 0.0581 | 0.0771 | 0.0761 | 0.0941 |
| Gley Amarillento | 0.0439 | 0.0581 | 0.0778 | 0.1043 |
| Ferrítico Púrpura | 0.0827 | 0.0112 | 0.0096 | 0.3092 |
| Aluvial | 0.0698 | 0.0174 | 0.0608 | 0.0774 |
| Ferralítico Rojo | 0.0642 | 0.0147 | 0.0778 | 0.0977 |
| Ferralítico Amarillento | 0.0724 | 0.0549 | 0.0686 | 0.0560 |
| Oscuro Plástico Gleyzado | 0.0864 | 0.0087 | 0.0839 | 0.0479 |
| Oscuro Plástico Gleysoso | 0.0803 | 0.0318 | 0.0728 | 0.0885 |
| Oscuro Plástico no Gleyzado | 0.0380 | 0.0140 | 0.0036 | 0.0722 |

de la θs se obtuvo una correlación moderada con α y baja con n, siendo éstas de 0.7 y 0.4, respectivamente. Mientras que las variables de ajuste de la curva (α y n) tuvieron un valor de correlación de 0.8, lo que indica que existe una fuerte dependencia entre los parámetros que forman el modelo de Van Genuchten.

*Sensibilidad del modelo*

En la figura 1 se muestra que durante la estimación de la CTH con el modelo Van Genuchten, no se observaron diferencias apreciables entre los contenidos de humedad de saturación estimados y los determinados en el laboratorio, siendo el $r^2$ igual a 0.99 y la suma de cuadrados residuales de $6.44 \times 10^{-3}$ g $g^{-1}$. Esto demuestra que no es imprescindible definir el valor de $\theta s$ en el modelo, pudiendo estimarse al igual que los demás parámetros a partir de iteraciones en las cuales se busca minimizar la función objetivo.

Por otra parte si se desconoce en la curva experimental el contenido de humedad a tensión 0, esta puede utilizarse para determinar los parámetros del modelo de Van Genuchten $\theta r$, $\theta s$, $\alpha$ y $n$ ya que aunque es un valor extremo, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los rangos de validez permisibles. Similares resultados obtuvieron Van Genuchten y Nielsen (1985) al afirmar que es posible estimar la θs con el modelo, ya que tiene una alta variabilidad debido a los cambios de humedad que ocurren en el suelo producto del manejo agrícola, el tamaño de la muestra y el momento en que se toma la misma. También Warrick (2003) hace referencia a la variabilidad espacial de los valores extremos de la curva de retención de humedad en el suelo, señalando que tienen un coeficiente de variación que oscila entre 10 y 50 %, respectivamente.

En el caso que existan variaciones del contenido de humedad (>0.1 $cm^3$ $cm^{-3}$) en el rango de 0 a 100 cm, se afectan principalmente los parámetros $\theta s$ y $\alpha$ que representa el índice de distribución del tamaño de los poros; alcanzándose valores por encima de los recomendados para los suelos.

En el caso de la $\theta r$, puede determinarse la misma a partir de la extrapolación de datos de retención de humedad existentes o a través del modelo obteniéndose resultados dentro de los rangos definidos para los suelos estudiados, siendo necesario disponer de tensiones próximas al límite inferior de humedad (por encima de 1000 cm).

## Conclusiones

El modelo de Van Genuchten con la condición m = 1-1/n es el que mejor describe el comportamiento hidráulico de los suelos estudiados, siendo de $0.89 \times 10^{-3}$ g/g la suma de cuadrados residuales promedio.

Los valor de $\theta r$, $\theta s$, $\alpha$ y $n$ obtenidos pueden ser utilizados para caracterizar el movimiento de agua en la zona no saturada, cuando no se disponen de

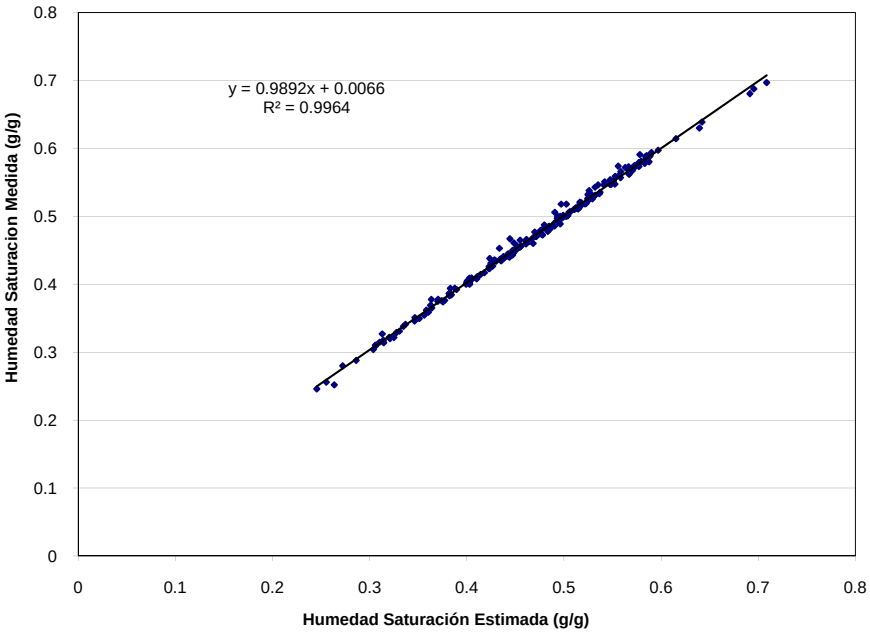



**Figura 1. Relación humedad de saturación estimada y medida.**

curvas de retención de humedad en el suelo.

El límite superior e inferior de humedad en el suelo puede ser estimado por el modelo RETC, para fines de riego y drenaje, alcanzándose valores precisos y confiables.

## Bibliografía


Brooks R.H. and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State Univ. Hydrology Paper No 3. 27 p.

Daniel C. y Wood, F.S. 1971. Fitting Equations to Data. Wiley-Interscience, New York, USA.

Durner W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resour. Res. 32(9):211-223.

EIJKELKAMP. 2010. Catalogue of agrisearch equipment. The Netherlands. 200 p.

Han X., Shao, M., Horton, R. 2010. Estimating van Genuchten model parameters of undisturbed soils using an integral method. Pedosphere 20(1):55-62.

Hillel D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press, USA. 757 p.

Instituto de Suelos. ACC. 1980. Clasificación genética de los suelos de Cuba. Ed. Academia, La Habana, Cuba. 28 p.

Kosugi K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resour. Res., 32(9):2697-2703.

Marquardt D. W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. J. Soc. Ind Appl. Math. 11 : 431-441.

Nielsen D.R., Reichardt, K and Wierenga, P. 1983. Characterization of field measured soil water properties. In. Isotope and Radiation techniques in soil physics and irrigation studies. IAEA. p. 55-78.

Ruiz M. E., Medina, H., Herrera, J. 2006. Métodos empleados en Cuba para determinar las propiedades hidráulicas de suelos. TERRA Latinoamericana 24(3):311-318.

Ruiz M. E. 1997. 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 p.

Shaap M. and Leij, F.J. 1998. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. Soil Science. 163(10):765-779.

Turgut K., Sabit, E. 2008. Calibration of van Genuchten Unsaturated Hydraulic Conductivity Parameters by Regression Technique. In International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology. Turkey, 175-181 p.

Van Genuchten M., Simunet, J., Leij, F. and Sejna, M. 2000. RETC version 6. Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. US Salinity Laboratory, USDA, ARS, USA. 68 p.

Van Genuchten M. and Nielsen D.R. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. Annales Geophysicae. 3(5): 615-628.

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

Warrick A. 2003. Soil water dynamics. Oxford University Press, USA. 383 p.