

# Determinación de los parámetros del modelo de Brooks & Corey mediante el método de infiltración horizontal utilizando vinaza

Luis Felipe Nasner F.,<sup>1</sup> Hernán Rojas Palacios<sup>2</sup>

<sup>1y2</sup>. Facultad de Ingeniería y Administración Universidad Nacional de Colombia. AA 237. Palmira Valle.

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar los parámetros hidráulicos ( $n$ ,  $hd$  y  $m$ ) del modelo de Brooks y Corey (1964) y a partir de ellos poder obtener las curvas de retención de humedad (CRH) en tres suelos, para diferentes fluidos aplicados, mediante el método analítico propuesto por Wang Q.; Horton R.; y Shao M. (2002). Se realizaron pruebas de infiltración horizontal en tres suelos representativos del Valle del Cauca (Aurora, Providencia y CEUNP), cada uno con características físicas diferentes y utilizando como fluido vinaza en distintas concentraciones (0°Brix, 0.4°Brix y 2.1°Brix), La metodología fue escogida debido a que es una alternativa sencilla y rápida que minimiza los costos y tiempo en este tipo de pruebas de laboratorio y puede ser utilizada con fluidos diferentes al agua. Los resultados obtenidos muestran que la variación en los parámetros hidráulicos estimados difiere significativamente con el tipo de suelo.

**Palabras claves:** infiltración horizontal, parámetros hidráulicos, curva de retención de humedad.

## INTRODUCCIÓN

La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra a través de la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores. La infiltración del agua en el suelo, es uno de los procesos físicos más complejos, y que presenta una mayor variabilidad espacial. Esta variabilidad es específica para cada suelo y puede ser atribuida entre otros factores a diferencias de textura, composición química e intensidad de los sistemas de laboreo.

El proceso de infiltración no se da solamente de manera vertical, si tenemos en cuenta que después que el agua entra en el suelo la distribución de esta no es en una sola dirección, si no que se expande hacia los laterales, entonces podemos hablar que dentro del suelo ocurre un proceso de infiltración horizontal. Un caso simple del estudio de la infiltración horizontal bajo una carga hidráulica constante fue difundido por Bruce y Klute (1958): el método consiste en llenar una bandeja con suelo y en uno de sus extremos aplicar una carga hidráulica constante que el suelo ira succionando (sortividad), de esta manera se podrá apreciar el avance del frente de humedecimiento en el suelo el cual es relacionado con la cantidad de fluido adsorbido en diferentes intervalos de tiempo.

La determinación de las propiedades hidráulicas de un suelo son fundamentales en los estudios de las ciencias agropecuarias para la toma de decisiones. Las curvas de retención de humedad expresan la relación que hay entre el contenido de humedad en un suelo y su potencial. Igual que el fenómeno de la infiltración, los parámetros de esta dependen de las diferentes propiedades físicas del suelo y del fluido con el que se esté trabajando. Existe una gran variedad de métodos de laboratorio y modelos matemáticos para determinar las curvas de retención de humedad, pero el alto costo y el tiempo invertido en estas pruebas se convierten en un gran limitante. Uno de los modelos más antiguos, pero más utilizados es el modelo de Brooks y

Corey (PARDO y SALINAS). Este modelo relaciona el valor de la saturación efectiva con la tensión de humedad del suelo ( $h$ ) y unos parámetros como la presión de burbujeo ( $h_d$ ) y el índice de distribución del tamaño de los poros ( $n$ ), que pueden ser determinados mediante pruebas de laboratorio de física de suelos.

Wang, Horton y Shao (2002) desarrollaron un método analítico para determinar los parámetros del modelo de Brooks y Corey, utilizando el método de infiltración horizontal a partir de lecturas sencillas como la infiltración acumulada, el avance en el frente de humedecimiento y el tiempo. Este método además de ser práctico y fácil de implementar trae la ventaja de que se puede utilizar en fluidos diferentes al agua, más específicamente vinaza.

La investigación reporta estudios sobre la vinaza utilizada como enmienda orgánica en suelos degradados y se le atribuye beneficios al suelo como: aumento de la estabilidad estructural, disminuye la densidad aparente, mejora la tasa de infiltración del agua y la conductividad hidráulica debido al incremento en el número de los macro y mesoporos. (Gabriela Civeira y Raul Lavado, 2006). La mejora de estas propiedades físicas del suelo y el estudio del comportamiento de las propiedades hidráulicas de suelo con vinaza, pueden ser una excelente ayuda para mejorar la implementación de sistemas de riego localizado y fertiriego.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con tres suelos representativos del Valle del Cauca, dos suelos Franco Limosos, **Aurora** (Ingenio Providencia, hacienda La Aurora, Suerte 109 A, Tablón 5.  $03^{\circ}40.213'N$  y  $76^{\circ}17.242'W$ ) y **Providencia** (Ingenio Providencia, hacienda Providencia, Suerte 002 A, Tablón 5.  $3^{\circ}40.213'N$  y  $76^{\circ}17.242'W$ ) y un suelo Franco Arenoso, **CEUNP** (Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia CEUNP.  $3^{\circ}25'39.81''N$  y  $76^{\circ}25'45.70''W$ ). Se trabajó con tamizado (tamiz N°10) y secado al aire. Se utilizaron 3 fluidos diferentes (Agua, Vinaza 0.4°Brix y Vinaza 2.1°Brix). Se realizaron 3 repeticiones de la prueba de infiltración horizontal por cada fluido en cada suelo, para un total de 27 repeticiones. Para el análisis de la información obtenida se utilizó un diseño experimental completamente al azar en arreglo factorial con dos factores, tres (3) niveles y tres (3) repeticiones.

Para las pruebas de infiltración horizontal se utilizó el modelo experimental propuesto por Bruce y Klute en 1958, en nuestro caso utilizamos bandejas fabricadas en madera, recubiertas en sus paredes con material rugoso (lija) y selladas con resina, con el fin de evitar flujo preferencial, el recipiente para el fluido fue fabricado utilizando el principio de la botella de Mariotte, se usó acrílico transparente con el objetivo de tener un medio visible del descenso volumétrico del fluido. Para la obtención de los parámetros de Brooks & Corey y las curvas de retención de humedad se utilizó el modelo analítico propuesto por Wang, Shao y Horton (2002) En el momento de realizar las pruebas de infiltración horizontal, se tomaron lecturas del descenso del fluido en la botella (infiltración acumulada) y avance en el frente de humedecimiento en la columna del suelo ( $X_f$ ) en diferentes intervalos de tiempo ( $t$ ).

Brooks y Corey (1964) presentan la ecuación que describe la curva de retención de agua en el suelo por:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{h_d}{h} \right)^n \quad \text{para } h \geq h_d \quad (1)$$

$$S_e = 1 \quad \text{para } h < h_d$$

Dónde  $\theta$  es el contenido volumétrico del agua en el suelo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $\theta_s$  es el contenido de agua en el suelo saturado ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $\theta_r$  es el contenido de agua residual ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $S_e$  es la saturación eficaz,  $h_d$  es la succión de entrada del aire (cm), y  $n$  es un parámetro que tiene en cuenta la distribución del tamaño de los poros.

Para el problema de la absorción de agua en una columna de suelo horizontal unidimensional, la ecuación de flujo y las condiciones iniciales de frontera son (Wang, Shao y Horton, 2002):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] \\ \theta(x, 0) &= \theta_i \\ \theta(0, t) &= \theta_s \\ \theta(\infty, t) &= \theta_i \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $\theta_i$  es el contenido de agua inicial en el suelo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

La solución a la ecuación diferencial parcial número 2 es dada por Wang, Shao y Horton (2002) para la estimación de los parámetros de Brooks y Corey, a partir del método de infiltración horizontal.

De la relación entre la infiltración acumulada ( $I$ ), tasa de infiltración ( $i$ ), avance en el frente de humedecimiento ( $X_f$ ) y tiempo ( $t$ ), se puede determinar los coeficientes  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  que están relacionados con los contenidos de humedad saturada  $\theta_s$ , residual  $\theta_r$  e inicial  $\theta_i$  y de esta forma estimar los parámetros del modelo de Brooks y Corey. Esta relación se muestra en las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$I = A_1 x_f \quad (3)$$

$$i = A_2 / x_f \quad (4)$$

$$x_f^2 = A_3 t \quad (5)$$

Donde

$$A_1 = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + n^2} + (\theta_r - \theta_i)$$

$$A_2 = a.n.k_s.h_d$$

$$A_3 = \frac{a.k_s.h_d \left( m - 1 - \frac{1}{n} \right)}{(\theta_s - \theta_r)}$$

Los coeficientes  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ , son necesarios para la determinación de los parámetros de Brooks y Corey y fueron estimados mediante regresión lineal a partir de las graficas propuestas por el método matemático establecido. El valor de  $A_1$  a partir de los datos de la grafica de *infiltración acumulada (I) vs frente de humedecimiento (Xf)*, el valor de  $A_2$  a partir de los datos de la grafica de *tasa de infiltración (i) vs el inverso del frente de humedecimiento (1/Xf)* y el valor de  $A_3$  a partir de los datos de la grafica de *tasa del frente de humedecimiento al cuadrado (Xf<sup>2</sup>) vs el tiempo (t)*. Los valores de la tasa de infiltración son obtenidos a partir de la derivada de la

ecuación obtenida mediante regresión potencial de la grafica de infiltración acumulada (I) vs tiempo (t).

Por lo tanto los parámetros  $n$ ,  $m$ , y  $h_d$  pueden ser expresados como:

$$n = \sqrt{\frac{\theta_s - \theta_r}{A_1 + \theta_i - \theta_r} - 1} \quad (6)$$

$$h_d = \frac{A_2}{a.n.k_s} \quad (7)$$

$$m = \left( \frac{A_3(\theta_s - \theta_r)}{a.k_s.h_d} + 1 \right) + \frac{1}{n} \quad (8)$$

Los contenidos de humedad inicial, saturación y residual de los suelos, fueron determinados por el método de la estufa, en el momento de realizar cada prueba de infiltración horizontal y el valor de  $a$  es aproximado a 1.

La conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) se obtuvo mediante regresión lineal ajustando la grafica de la infiltración acumulada (I) vs tiempo (t), seleccionando los datos finales, el valor de la pendiente de la función obtenida nos representa el valor de la conductividad hidráulica saturada horizontal ( $K_s$ ).

La función que describe el comportamiento de la curva de retención de humedad (CRH) es la ecuación 1. Conociendo los parámetros  $h_d$  y  $n$ , obtenidos a partir de las ecuaciones 6 y 7, en función de  $A_1$  y  $A_2$ , podemos calcular la saturación efectiva ( $S_e$ ) a diferentes valores de tensión ( $h$ ). Conociendo los valores de la saturación efectiva ( $S_e$ ) y los contenidos de humedad residual y saturación  $\theta_r$  y  $\theta_s$ , podemos obtener los porcentajes de contenido de humedad para las diferentes tensiones aplicadas, en los diferentes suelos para los distintos fluidos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza no mostro diferencias significativas entre los fluidos aplicados, para los valores de los parámetros hallados ( $n$ ,  $h_d$  y  $m$ ). Para los tres parámetros se encontró que la diferencia radica en el tipo de suelo trabajado, donde los datos de mayor variación se encuentran en el suelo CEUNP (Franco Arenoso). La tabla 1 muestra los valores obtenidos para los parámetros de Brooks & Corey en los tres suelos trabajados y los diferentes fluidos aplicados.

Analizando los datos obtenidos para el parámetro " $n$ " se encontró que valor más alto se presento en el suelo CEUNP para el fluido 0.4°Brix ( $n = 1.127$ ) y el menor valor lo presento el suelo Aurora en para el fluido 2.1°Brix ( $n = 0.338$ ). El parámetro " $n$ " indica el índice de distribución del tamaño de los poros en el suelo lo cual es razonable con el análisis de varianza obtenido, pues el mayor valor se presento en un suelo arenoso (CEUNP) y el menor valor en un suelo Limoso (Aurora).

Para el parámetro " $h_d$ " se encontró que el mayor valor presento en el suelo Providencia para el fluido 2.1°Brix ( $h_d = 98.865$  cm.) contrastando con el menor que se presento en el suelo 3 (CEUNP) para el fluido 0.4°Brix ( $h_d = 34.146$  cm.). El valor de  $h_d$  indica la succión de entrada del aire (cm) por tanto esta variación puede darse debido a que los suelos arenosos (CEUNP) requieren una menor presión de entrada del aire para desplazar el fluido contenido en el, en comparación con los suelos con mayor contenido de fracción fina (Providencia y Aurora).

Los valores obtenidos para el parámetro "m" en los suelos Aurora y Providencia muestran un comportamiento similar en comparación a los valores obtenidos en el suelo CEUNP. Esta variación puede darse debido a que el parámetro "m" está en función de la variable  $A_3$  que a su vez involucra el avance en el frente de humedecimiento y tiempo. El suelo CEUNP es el suelo con mayor contenido de arenas (66.4%) en comparación con el suelo Aurora y Providencia, lo que indica que el avance en el frente de humedecimiento en este suelo fue mucho más rápido y se obtuvieron valores muy diferentes en la función  $A_3$  en relación a los valores en los otros dos suelos.

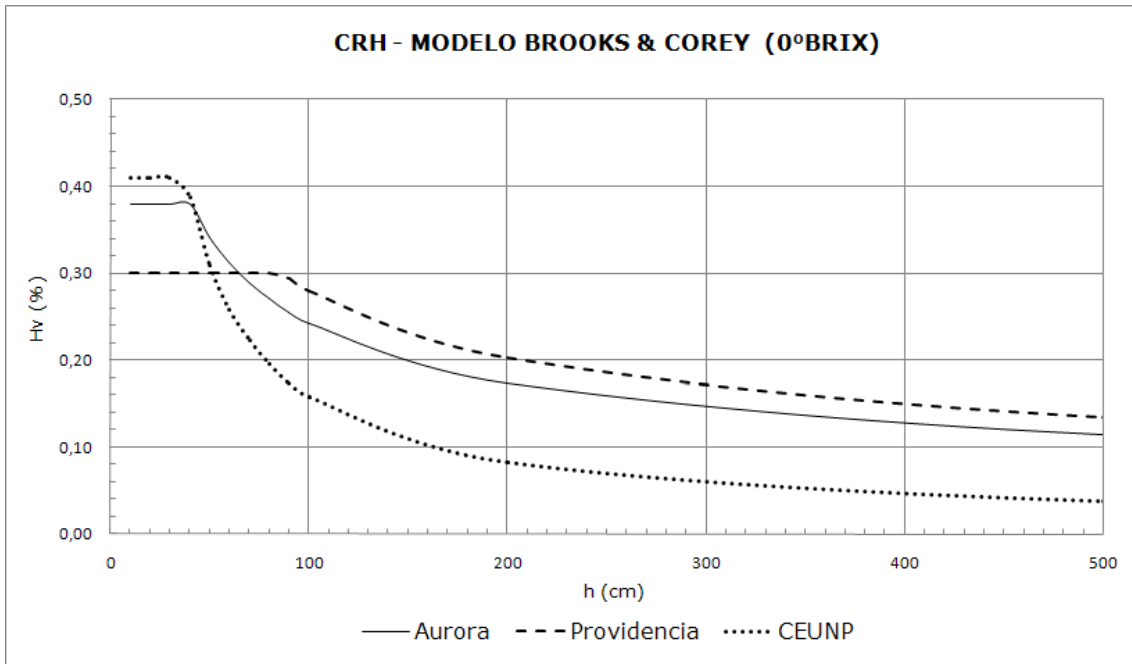
SUELO	PARAMETRO "n"			PARAMETRO $h_d$ (cm)			PARAMETRO "m"		
	0 °Brix	0,4 °Brix	2,1 °Brix	0 °Brix	0,4 °Brix	2,1 °Brix	0 °Brix	0,4 °Brix	2,1 °Brix
<b>AURORA</b>	0,522	0,724	0,338	40,343	53,437	56,522	4,186	4,591	4,951
<b>PROVIDENCIA</b>	0,482	0,453	0,344	85,905	70,42	98,865	4,239	4,46	4,944
<b>CEUNP</b>	1,02	1,127	1,054	37,711	34,146	29,432	5,808	7,711	6,986

**Tabla1.** Valores promedio de los parámetros de Brooks & Corey obtenidos a partir de las pruebas de infiltración horizontal.

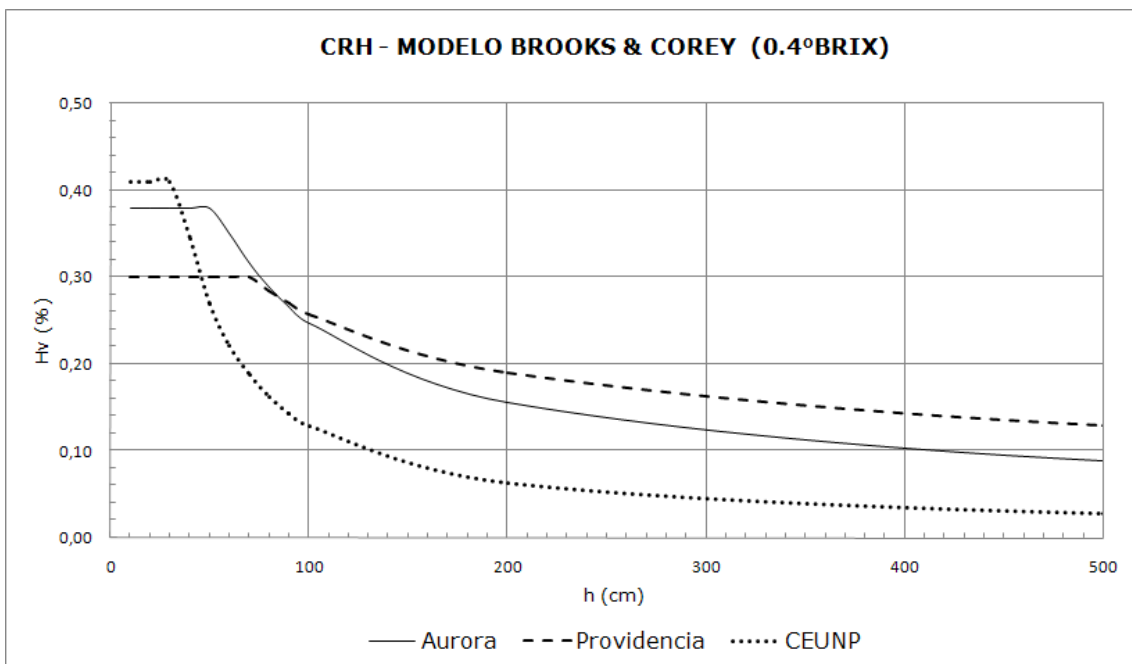
Analizando las curvas de retención de humedad obtenidas para los tres suelos en los diferentes fluidos aplicados, podemos decir que los suelos Aurora y Providencia tienen más capacidad de retener mayor cantidad de fluido a tensiones altas, en comparación al suelo CEUNP. Este comportamiento puede atribuirse a la textura que presentan los suelos, pues los suelos livianos (CEUNP) presentan una menor oposición a retener el fluido a una misma tensión aplicada en comparación a un suelo arcilloso o limoso (Aurora y Providencia).

Las curvas de retención de humedad estimadas para los tres suelos en los fluidos 0°Brix y 0.4°Brix presentan un comportamiento similar (Figura 1 y figura 2). La diferencia en los contenidos de humedad a diferentes valores de tensión aplicada entre suelos es mínima, esta dispersión mínima puede darse debido a que la concentración de la vinaza en el fluido 0.4°Brix es mínima y muy cerca a la concentración del fluido 0°Brix (agua).

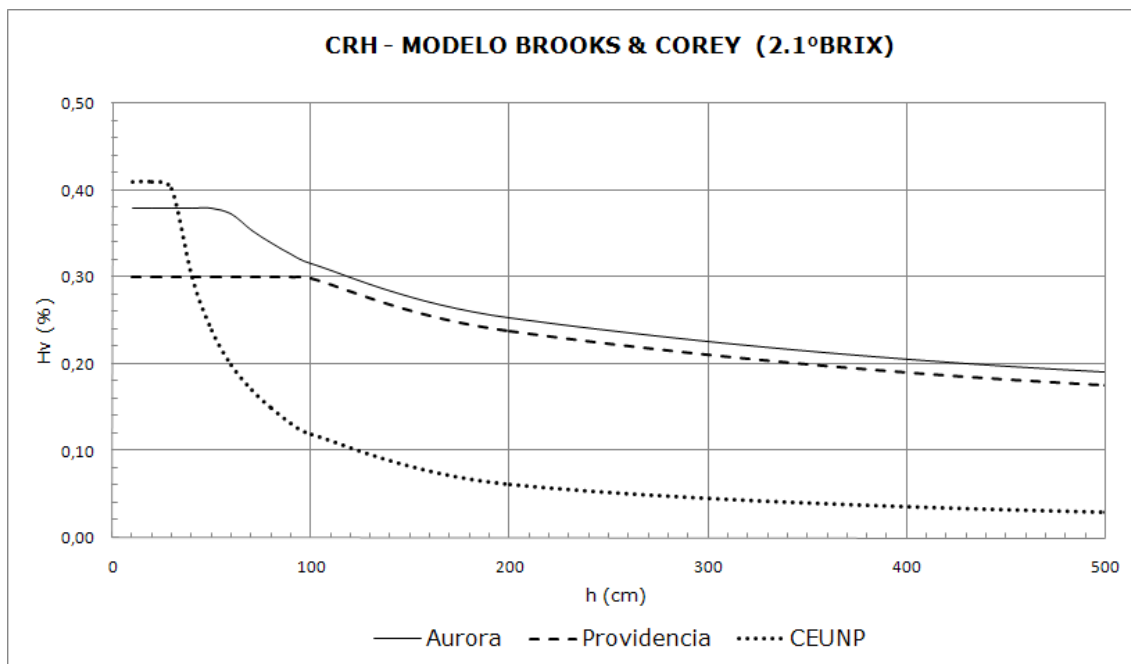
Las curvas de retención de humedad estimadas para el fluido 2.1°Brix presentó un comportamiento diferente en los suelos Aurora y Providencia. En la Figura 3, los suelos Aurora y Providencia muestran una mayor capacidad de retener más fluido a tensiones altas, en comparación a las curvas obtenidas con los fluidos 0°Brix y 0.4°Brix. Este comportamiento se puede asociar a dos aspectos. a) Los suelos Aurora y Providencia tienen un alto porcentaje de fracción fina, lo que hace que tengan la capacidad de retener mayor cantidad de fluido. b) El fluido 2.1°Brix presenta una concentración de vinaza más alta, lo que hace que se convierta en un fluido más denso y podría requerir de una mayor tensión para poderlo extraer de los poros



**Figura 1.** Curva de retención de humedad (CRH) para los tres suelos trabajados con el fluido 1 (0°Brix).



**Figura 2.** Curva de retención de humedad (CRH) para los tres suelos trabajados con el fluido 2 (0.4°Brix).



**Figura 3.** Curva de retención de humedad (CRH) para los tres suelos trabajados con el fluido 3 (2.1°Brix).

## CONCLUSIONES

Los valores estimados para los parámetros hidráulicos del modelo Brooks y Corey ( $n$ ,  $h_d$  y  $m$ ), mostraron diferencias en función al suelo trabajado, específicamente el suelo 3 (CEUNP) de textura gruesa.

Para las concentraciones de vinaza (0°Brix, 0.4°Brix y 2.1°Brix), las curvas de retención de humedad para el suelo 3 (CEUNP) fueron similares.

Para los suelos 1 y 2 (Aurora y Providencia), a medida que aumenta la concentración de vinaza las curvas de retención de humedad se sitúan en un nivel superior, indicando que podría existir una disminución del agua aprovechable del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

BRUCE, R.R; KLUTE, A. Methods of soils analysis: Infiltration. Disponible en: <<http://www.agron.iastate.edu/soilphysics/a577infiltr.pdf>> [Citado el 30 de julio de 2009].

CIVEIRA, Gabriela; LAVADO, Raul S. Efecto del aporte de enmiendas orgánicas sobre propiedades físicas e hidrológicas de un suelo urbano degradado. En: Ci. Suelo. Vol. 24, N° 2. Disponible en: <[http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol\\_24n2/242civeira123-130.pdf](http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_24n2/242civeira123-130.pdf)> [Citado el 19 de Mayo de 2009].

PARDO, J.M; SALINAS, L.M. Física, química y biología de suelos. Curva de retención de agua del suelo (swrc): análisis de estimaciones y ajustes. Disponible en: <[http://www.gt.umss.edu.bo/index/0601/adicio/ct\\_swrc.pdf](http://www.gt.umss.edu.bo/index/0601/adicio/ct_swrc.pdf)> [citado el 17 de octubre de 2009].

WANG, Quanjiu; HORTON, Robert; SHAO, Mingan. Horizontal infiltration method for determining Brooks-Corey model parameters. En: Soil science society of America

JOURNAL. Vol 66, N°6. (nov-dic 2002). Disponible en:  
<<http://soil.scijournals.org/cgi/reprint/66/6/1733>> [citado el 19 de mayo de 2009]