

COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE UN SUELO A PARTIR DE DATOS MEDIDOS CON INFILTRÓMETRO DE DISCO

Comparison of calculation methodologies of hydraulic properties of a soil from data measured with a disc infiltrometer

Antonio M. Aoki¹ * y Roberto Sereno¹

ABSTRACT

Tension disc infiltrometers are being increasingly used for determining *in situ* saturated and near-saturated soil hydraulic properties. The objective of this paper was to compare two calculation methodologies for different soil hydraulic properties starting from data measured with a disc tension infiltrometer. The experiment was carried out on packed soil in samples extracted from the Ap horizon of a typic Haplustol soil with a silt loam texture. The disc infiltrometer utilized was of the type that applies water at pressures less than or equal to atmospheric pressure. Calculation methodologies used for the different hydraulic properties were: a) the White and Sully method, and b) the Ankeny method. By comparison and analysis of both methods, it was observed that the Ankeny method was less susceptible to originate error in the estimation of unsaturated hydraulic conductivity, producing values of 59.4 and 21.89 mm h⁻¹ when water was applied at -2 and -4 cm of pressure, respectively.

Key words: unsaturated hydraulic conductivity, packed soil.

RESUMEN

Los infiltrómetros de disco a tensión están siendo ampliamente usados para determinar propiedades hidráulicas *in situ* de suelos saturados o cercanos a la saturación. El objetivo de este trabajo fue comparar dos metodologías de cálculo de distintas propiedades hidráulicas del suelo a partir de datos medidos con infiltrómetros de disco a tensión. El ensayo se realizó sobre suelo reempaquetado de muestras extraídas del horizonte Ap de un suelo Haplustol típico, de textura franco-limosa. El infiltrómetro de disco utilizado fue del tipo que aplica agua con presiones menores o iguales a la presión atmosférica. Se utilizaron como metodologías de cálculo para distintas propiedades hidráulicas: a) el método propuesto por White y Sully, y b) el método propuesto por Ankeny. De la comparación y análisis de ambos métodos, se observó que el procedimiento propuesto por Ankeny fue menos susceptible a originar errores en la estimación de la conductividad hidráulica no saturada, obteniéndose valores de 59,4 y 21,89 mm h⁻¹ cuando se aplicó agua a -2 y -4 cm de presión respectivamente.

Palabras clave: conductividad hidráulica no saturada, suelo reempaquetado.

Trabajo presentado en el Taller de Física de Suelos: "Metodologías físicas para investigación de propiedades del suelo; unificación de procedimientos" organizado por la Asociación Argentina de Ciencia del Suelo y la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, en mayo de 2003. La Plata, Argentina.

¹ Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Av. Valparaíso s/n, Ciudad Universitaria, CC 509 (5000), Córdoba, Argentina. E-mail: aaoki@agro.uncor.edu *Autor para correspondencia.

Recibido: 29 de julio de 2003. Aceptado: 2 de febrero de 2004.

INTRODUCCIÓN

Los infiltrómetros de disco a tensión, descritos por Perroux y White (1988), están siendo ampliamente usados para determinar propiedades hidráulicas *in situ* de suelos saturados o cercanos a la saturación (Wilson y Luxmoore, 1988; Smettem *et al.*, 1995; Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000). Estos instrumentos permiten identificar en términos cuantitativos la contribución relativa de algunos de los parámetros hidrodinámicos fundamentales de los que depende el caudal de agua infiltrada, seleccionando determinado rango de presión durante la aplicación de agua. Es una técnica no destructiva, que no modifica el suelo ni su porosidad, y la medición es rápida, ya que el flujo no confinado en estado cuasi estacionario es alcanzado rápidamente. En este caso, la infiltración de agua en un suelo no saturado, en condiciones de estado estacionario, refleja las características de la red de poros, formada por yuxtaposición de partículas sólidas y elementos estructurales (Taboada Castro, 1998).

White y Sully (1987) propusieron que los resultados de infiltración obtenidos con técnicas de mediciones *in situ* pueden ser usados para estimar las consecuencias de la degradación estructural del suelo desde el punto de vista hidrológico. Estos aparatos han demostrado ser útiles para caracterizar prácticas de manejo de suelo (Ankeny *et al.*, 1990; Potter *et al.*, 1995) y estructura del suelo (Wilson y Luxmoore, 1988). Jarvis *et al.* (1987) utilizaron el infiltrómetro para determinar tasas y vías de infiltración en suelos arcillosos, y Perroux y White (1988) demostraron la contribución del flujo de los macroporos al flujo total, comparando tasas de medidas de infiltración a varios potenciales de aplicación de agua. Por otra parte, utilizando el infiltrómetro de disco con algún ión marcador, tal como Cl^- , es posible deducir el contenido efectivo de agua móvil de muestras extraídas de abajo del disco después de un período de infiltración (Angulo-Jaramillo *et al.*, 1996).

Se han desarrollado distintos procedimientos para estimar la conductividad hidráulica (K_0) y la sortividad (S_0) a partir de datos de infiltración

obtenidos con infiltrómetros (Smettem y Clothier, 1989; Ankeny *et al.*, 1991; Cook y Broeren, 1994; Smettem *et al.*, 1994; Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000). Estos métodos usualmente se basan en la aproximación al estado estacionario de Wooding (1968). Además, es posible estimar diferentes escalas de tamaños de poros y de tiempo que caracterizan un suelo (White y Sully, 1987), entre las que encontramos la longitud media de capilares macroscópicos (λ_c), la estimación de un tamaño medio de poro característico (λ_m), la escala de tiempo capilar (t_c), y el tiempo gravimétrico (t_{grav}).

El objetivo de este trabajo fue comparar dos metodologías de cálculo de distintas propiedades hidráulicas del suelo a partir de datos medidos con infiltrómetros de disco a tensión. Esta fue una primera etapa de selección de la metodología de cálculo, que se empleó en un trabajo posterior, en el que se caracterizaron distintas propiedades hidráulicas a partir de medidas *in situ* en diferentes sitios de ensayo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en el año 1997 en el laboratorio de Manejo de Suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, República Argentina. Se extrajeron muestras del horizonte superficial de un suelo Haplustol típico, de textura franco-limosa, con un perfil modal Ap (0-14), A12 (14-20), B2 (20-40), B3 (40-60), C1 (60-84), C2 Ca (+84). Las muestras se secaron al aire, se molieron y se tamizaron en un tamiz de 2 mm. Luego se colocaron en un recipiente cuadrado transparente de 25 cm de lado y 15 cm de altura y se las compactó hasta llegar a la densidad aparente del suelo original (suelo reempaquetado). El suelo original se ubica a 25 km al sur de la ciudad de Córdoba (31°19' lat. Sur, 64°13' long. Oeste) en un área que posee clima semiárido, con alrededor de 700 mm de precipitación anual e inviernos secos. La pendiente general del terreno oscila entre 0,2 y 1,8%. El Cuadro 1 muestra las propiedades del horizonte superficial de dicho suelo.

Cuadro 1. Valores de pH, densidad aparente, porosidad total, materia orgánica, arena, limo y arcilla del horizonte Ap. Córdoba, Argentina.

Table 1. Values of pH, bulk density, total porosity, organic matter, sand, silt and clay in the Ap horizon. Córdoba, Argentine.

Parámetro	Valores	Parámetro	Valores
Profundidad (cm)	0-14	Materia orgánica (g kg ⁻¹)	2,5
pH	6,7	Arena (%)	21,5
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1,28	Limo (%)	57,3
Porosidad total ¹	0,540	Arcilla (%)	21,1

¹ Valores estimados a partir de la densidad aparente.

El infiltrómetro de disco (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Centre (CSIRO), for Environmental Mechanics, Double negative head disc permeameter, serial N° 9509185, Canberra, Australia) que se utilizó era del tipo que aplica agua con presiones menores o iguales a la presión atmosférica. Esto permite estimar diámetros de poros equivalentes que corresponden a los capilares que succionan agua a presiones iguales o mayores a las fijadas en el infiltrómetro. Este aparato (Figura 1) consiste esencialmente de un disco de 20,5 cm de diámetro cubierto en su base por una fina membrana de nylon (M) con poros de 20 µm de diámetro. El tubo (RD) sirve de Mariotte y posee una entrada móvil de aire (C1) que se usa para ajustar el potencial agua (ψ_0) en la base de la membrana de nylon. El tubo (RA) sirve de depósito de agua y lleva una escala graduada que permite leer los volúmenes de agua infiltrados en función del tiempo.

Para caracterizar las propiedades hidráulicas del suelo reempaquetado en estudio se aplicó agua a -2 y -4 cm de presión. Se efectuaron tres y seis repeticiones respectivamente, a partir de muestras extraídas al azar del suelo original. La infiltración acumulada se determinó a partir de las lecturas en la escala graduada del depósito (RA). A partir de estas lecturas se compararon dos métodos de cálculo para distintas propiedades hidráulicas: a) El método propuesto por White y Sully (1987), y b) el método propuesto por Ankeny *et al.* (1991).

En las determinaciones en que no se alcanzaba el flujo en estado estacionario (q_0), se calculó mediante la ecuación exponencial tipo Horton (Ecuación 1):

$$i = i_i + (i_i - i_f) \exp(-\beta t) \quad (1)$$

en donde: i = velocidad de infiltración que varía entre i_i y i_f ; $i_f = q_0$ = velocidad de infiltración final; i_i = velocidad de infiltración a $t = 0$ o inicial; β = tiempo al cual $i_i - i_f$ disminuyó al 36,8% de su variación total ($i_i - i_f$); t = tiempo transcurrido desde la equilibración del suelo.

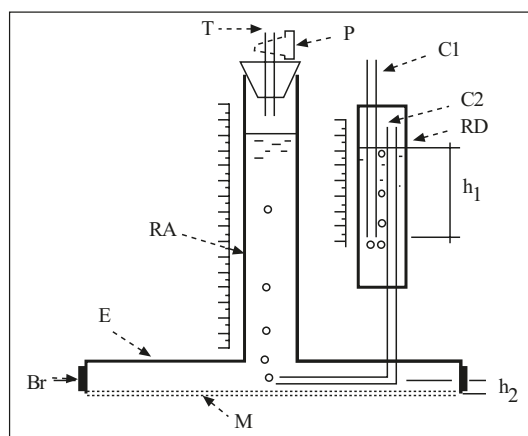


Figura 1. Esquema del infiltrómetro de disco a tensión. RA: depósito de alimentación; RD: Mariotte; M: membrana de nylon; C1: capilar móvil para ajustar potencial; C2: capilar de aireación; T: tubo de llenado; P: robinete o pinza de Mohr; Br: base de goma para sujetar malla; E: base no saturada, $h_0 = h_2 - h_1$, h_0 es negativa para $h_1 > h_2$

Figure 1. Schematic of the tension disc infiltrmeter. RA: reservoir of influx, RD: Mariotte, M: nylon membrane, C1: mobile capillary to adjust potential, C2: air entry capillary, T: filling tube, P: Mohr clamp, Br: membrane retaining band, E: unsaturated base, $h_0 = h_2 - h_1$, h_0 is negative for $h_1 > h_2$

A modo de ejemplo, en la Figura 2 se observa la estimación del flujo en estado estacionario, simulado a partir de datos experimentales obtenidos en un ensayo efectuado con infiltrómetro de disco a tensión a -2 cm de presión en un suelo Haplustol típico reempaquetado.

Con el fin de calcular la humedad volumétrica inicial y final de los ensayos, en estas experiencias se la determinó gravimétricamente al comienzo y al final de cada medición, como así también la densidad aparente del suelo reempaquetado en los 10 cm superiores, según lo describen Blake y Hartge (1986).

Análisis estadístico

Se realizó mediante estadística descriptiva para el análisis de los distintos factores, y en donde se buscó diferencia entre tratamientos se utilizó el test de comparación de medias de Tukey para un nivel de significancia del $\alpha = 0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 pueden observarse los valores calculados para distintos parámetros hidráulicos. Se observa que para presiones de -2 cm los valores de S_0 , q_0 y K_0 son mayores que para presiones de -4 cm; esto se debe a la diferencia de rangos de tamaños de poros que actúan en el proceso de infiltra-

ción. Aumentos en las tensiones resulta en cantidades menores de agua infiltrada al quedar excluidos los poros más grandes en el transporte de agua (Potter *et al.*, 1995). En este sentido, Ankeny *et al.* (1990) determinaron que incrementos en la tensión de medición disminuyen la tasa de infiltración en el suelo, debido a que tanto el tamaño como el número de poros que conduce agua es menor. Wilson y Luxmoore (1988) afirmaron que el descenso en la tasa de infiltración debido al incremento de la tensión de medición, podría ser descrito por una función exponencial del tamaño de poros más grandes que contribuyen al flujo de agua en el suelo.

En cuanto al orden de magnitud de los distintos parámetros hídricos obtenidos, se asemejan a los citados por la bibliografía. White y Sully (1987) trabajando con presiones de -1 cm sobre un suelo franco reempaquetado, determinaron valores de S_0 y K_0 de $41 \text{ mm h}^{-1/2}$ y $12,6 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente. Por otra parte, Smettem *et al.* (1994), utilizando un suelo franco arenoso, que pasaron a través de una malla de 2 mm para luego reempaquetarlo a una densidad de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$, estimaron una S_0 para los primeros tiempos de medición de 56 y $50 \text{ mm h}^{-1/2}$ para potenciales de aplicación de agua de -2 y -3 cm, respectivamente. Cabe destacar que, en un trabajo posterior, se caracterizaron las modificaciones de K_0 y de la porosidad de un suelo Haplustol típico, por efecto de las labranzas y factores ambientales a par-

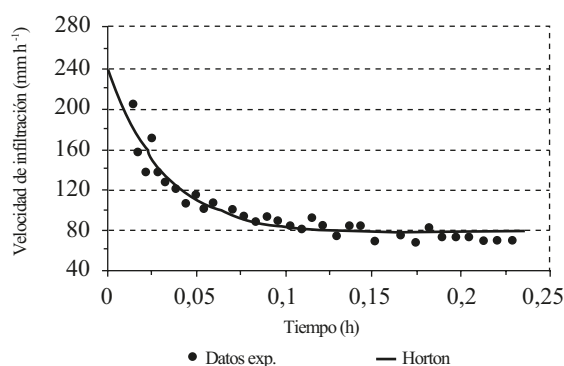


Figura 2. Determinación del flujo a estado estacionario a-2 cm de presión mediante simulación con una ecuación tipo Horton en un suelo Haplustol típico reempaquetado, $i_f = q_0$ = Velocidad de infiltración final = $75,79 \text{ mm h}^{-1}$.

Figure 2. Determination of state stationary flow at-2 cm of pressure by means of simulation with a Horton type equation on a packed typic Haplustol soil, $i_f = q_0$ = final infiltration rate = 75.79 mm h^{-1} .

Cuadro 2. Valores de contenido hídrico entre el comienzo y final de cada experimento (θ_n y θ_o), sortividad (S_o), flujo estacionario (q_o), conductividad hidráulica (K_o), calculados por el método White y Sully (1987) y conductividad hidráulica por el método de Ankeny *et al.* (1991) en un suelo Haplustol Típico reempaquetado.

Table 2. Values of hydric content between initiation and termination of each experiment (θ_n y θ_o), sorptivity (S_o), stationary flow (q_o), hydraulic conductivity (K_o), estimated by the White and Sully method (1987) and hydraulic conductivity estimated by the Ankeny *et al.* (1991) method on a packed typic Haplustol soil.

Presión cm	$\theta_o - \theta_n$	White y Sully (1987)			Ankeny <i>et al.</i> (1991)
		S_o mm h ^{-1/2}	q_o mm h ⁻¹	K_o mm h ⁻¹	K_o mm h ⁻¹
-2	0,26	42,79	75,79	26,63	59,40
-4	0,26	26,92	26,72	7,13	21,10
-4	0,24	27,77	29,16	6,69	22,68

tir de datos medidos *in situ* en tres sitios de ensayo que poseen diferentes propiedades físicas, químicas y topográficas.

Existió una diferencia notable entre la K_o obtenida por el método de White y Sully (1987) y la obtenida por el método de Ankeny *et al.* (1991). Esto se debería a que en el primer caso la K_o se estima a partir del cálculo de S_o en los primeros minutos de medición, además de requerir los cambios en el contenido volumétrico de agua en la superficie de infiltración, parámetros que son de dificultosa obtención, tanto en suelos húmedos como en aquellos que son altamente permeables (Smettem y Clothier, 1989). Este último tipo de suelos (por ejemplo suelos arenosos), tienen efectos de flujos gravitatorios importantes y, por tanto, la S_o puede ser rápidamente dominada por la K_o ; por otra parte, en suelos que presentan un gran efecto capilar (por ejemplo suelos arcillosos), la S_o puede ser desdibujada por el flujo capilar lateral (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000).

Smettem *et al.* (1995) afirmaron que una incorrecta estimación de S_o tiene una gran influencia en la K_o calculada a partir del método de White y Sully (1987), ya que la magnitud del error es proporcional al cuadrado de S_o . Estos autores calcularon una conductividad de -34 mm h^{-1} a partir de un dato erróneo de S_o , obtenido de los primeros minutos de infiltración, medido con un infiltrómetro de tensión a -3 cm sobre un suelo

franco arenoso reempaquetado. En el método de Ankeny *et al.* (1991), la K_o se calcula a partir de los últimos valores de la infiltración acumulada, cuando esta ya llegó a su estado estacionario, independientemente de lo que ocurre en la primera etapa de infiltración. Monhanty *et al.* (1994) observaron que en suelos con K_o elevada, el valor de K_o a saturación, medido durante un intervalo de tiempo corto, puede estar limitado por la conductancia del material de contacto (arena) y la porosidad de la membrana.

CONCLUSIONES

- Existe una estrecha relación entre las determinaciones a distintas tensiones y los valores de las propiedades hidráulicas.
- Los valores de los distintos parámetros de la infiltración medidos para suelo reempaquetado, fueron semejantes a los encontrados en la bibliografía.
- El procedimiento propuesto por Ankeny *et al.* (1991) es menos susceptible de originar errores en la estimación de K_o .

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado con el apoyo económico de la Agencia Córdoba Ciencia, de la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

LITERATURA CITADA

- Angulo-Jaramillo, R., J.P. Gaudet, J.L. Thony, and M. Vauclin. 1996. Measurement of hydraulic properties and mobile water content of a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:710-715.
- Angulo-Jaramillo, R., J.P. Vandervaere, S. Roulier, J.L. Thony, J.P. Gaudet, and M. Vauclin. 2000. Field measurement of soil hydraulic properties by disc and ring infiltrometers, a review and recent developments. *Soil Till. Res.* 55:1-29.
- Ankeny, M.D., M. Ahmed, T.C. Kaspar, and R. Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:467-470.
- Ankeny, M.D., T.C. Kaspar, and R. Horton. 1990. Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:837-840.
- Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. p. 363-375. *In* A. Klute (ed.). *Methods of soils analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.
- Cook, F.J., and A. Broeren. 1994. Six methods for determining sorptivity and hydraulic conductivity with disc permeameters. *Soil Sci.* 157:2-11.
- Jarvis, N.J., P.B. Leeds-Harrison, and J.M. Dosser. 1987. The use of tension infiltrometers to assess routes and rates of infiltration in a clay soil. *J. Soil Sci.* 38:633-640.
- Monhanty, B.P., R.S. Kanwar, and C.J. Everts. 1994. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:672-677.
- Perroux, K.M., and I. White. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1205-1215.
- Potter, K.N., H.A. Torbert, and J.E. Morrison. 1995. Tillage and residue effects on infiltration and sediment losses on vertisols. *Trans. ASAE* 38:1413-1419.
- Smettem, K.R.J., and B.E. Clothier. 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters. *J. Soil Sci.* 40:563-568.
- Smettem, K.R.J., J.Y. Parlange, P.J. Ross, and R. Haverkamp. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 1. Theoretical capillary approach. *Water Resour. Res.* 30:2925-2929.
- Smettem, K.R.J., J.Y. Parlange, P.J. Ross, and R. Haverkamp. 1995. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 3. Parameter estimation using a double-disk tension infiltrometer. *Water Resour. Res.* 31:2491-2495.
- Taboada Castro, M.M., M. Lado Liñares, A. Diéguez Villar, y A. Paz González. 1998. Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela. p. 101-127. *In* A. Paz González y M.T. Taboada Castro (ed.). *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica.* Universidad de la Coruña, La Coruña, España.
- White, I., and M.J. Sully. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.* 23:1514-1522.
- Wilson, G.V., and R.J. Luxmoore. 1988. Infiltration, macroporosity and mesoporosity distributions on two forested watersheds. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:329-335.
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4:1259-1273.