

AJUSTE METODOLÓGICO EN LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA "IN SITU" EN SUELOS VERTISOLES Y ENTISOLES DE LA REPÚBLICA ARGENTINA MEDIANTE EL PERMEÁMETRO DE GUELPH

E. Díaz, O. Duarte, J. Cerana y P. Fontanini

Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Entre Ríos. ediaz@fca.uner.edu.ar, oduarte@fca.uner.edu.ar, jcerana@fca.uner.edu.ar, pfontanini@uol.com.ar.

RESUMEN. La determinación de los parámetros hidráulicos en suelos de texturas extremas, arcillosas y arenosas, presentan problemas de difícil resolución. Dentro de las propiedades hidráulicas del suelo interesa conocer muy particularmente la "conductividad hidráulica saturada" (K_{fs}) para condiciones de campo. El objetivo del presente trabajo es ajustar la metodología de medición del permeámetro de Guelph en dos situaciones contrastantes: suelos de textura fina; Vertisoles; y textura gruesa; Entisoles; en la Mesopotamia de la República Argentina. En los primeros, la K_{fs} fue medida por medio de 44 ensayos en suelos de las provincias de Entre Ríos y Corrientes, mientras que para la segunda situación (Entisoles) se efectuaron 10 determinaciones. Además, se analizan los problemas operativos encontrados "in situ": resultados negativos de K_{fs} , insuficiente carga hidráulica en situaciones de alto contenido hídrico en el suelo, sellado con lodo en la salida de agua del permeámetro y preparación del orificio. Los valores obtenidos de K_{fs} en Entisoles presentaron un mínimo de 1,57 mm h⁻¹ en las texturas franco arenosas y un máximo de 108,07 mm h⁻¹ en las texturas arenosas. En los Vertisoles los valores se ubicaron entre 0,009 mm h⁻¹ y 0,66 mm h⁻¹ en texturas franco arcillo limosas. Por lo tanto, se considera que la adopción del permeámetro de Guelph es una herramienta de uso estándar y adaptable a distintas situaciones edáficas, que permite cuantificar el valor de K_{fs} en función de la variación de la textura de los suelos.

ABSTRACT. The determination of hydraulic parameters on clay, sand and extreme texture soils presents difficult resolution problems. Within the soil hydraulic properties, the most important in particular is "the saturated hydraulic conductivity" (K_{fs}) on land conditions. This study aims to compare, by means of the Guelph Permeameter, the rate of K_{fs} between two different soils: small texture (Vertisols) and big texture (Entisols) in the Mesopotamian fields of

Argentina. The Vertisols data were measured on 44 assessments in Entre Rios and Corrientes Province, whereas Entisols ones were measured on 10 sites. Also, it is analyzed some *in situ* problems in permeameter operating: negative K_{fs} , insufficient hydraulic rates on soils with high hydric content, mud smothered of the permeameter water outlet and the orifice preparation. The Entisols K_{fs} rates presented a minimum of 1.57 mm h⁻¹ on sandy loam textures and a maximum of 108.07 mm h⁻¹ on sandy textures. The Vertisols K_{fs} rates were between 0.009 mm h⁻¹ and 0.66mm h⁻¹ on silty clay loam textures. The Guelph Permeameter is a useful standard tool that can be adapted to different edaphic situations and can quantify K_{fs} rates variations on different texture soils.

1. Introducción

La determinación de los parámetros hidráulicos en suelos de texturas extremas arcillosas y arenosas presenta problemas de difícil resolución, producto de un inadecuado manejo del suelo y de las aguas en las zonas de riego. Estas dificultades son mayores en suelos expansivos que se agrietan al secarse Bouma y Loveday (1988). Dentro de las propiedades hidráulicas del suelo interesa conocer particularmente la "conductividad hidráulica saturada de campo" (K_{fs}), para condiciones de campo, ya que es la base por medio de la cual se han establecido las fórmulas que explican el flujo de agua en el suelo. Los valores de K_{fs} no son constantes para un mismo suelo, sino que varían con el lugar y el tiempo, debido a alguna de las siguientes razones: interacciones entre el medio poroso y el líquido (expansión de las arcillas, deterioro debido al riego con aguas salinas, etc.), cierre de los poros por aire entrampado, heterogeneidad del medio poroso, anisotropía y el efecto antrópico. Las técnicas de medición y monitoreo empleadas en suelos arenosos o francos pueden producir resultados erróneos en suelos arcillosos y son inútiles en suelos expansivos Bagarello (1993). El permeámetro de Guelph Reynolds y Elrick (1985) permite efectuar determinaciones en condiciones de campo, en la zona no saturada del suelo. El análisis de Richards es la base de los cálculos usados

para determinar la conductividad hidráulica saturada. Richards ha encontrado una solución efectiva de cálculo de la K_{fs} , considerando el flujo tridimensional del agua en el suelo, considera todas las fuerzas que contribuyen para el flujo tridimensional del agua dentro del suelo: la presión del agua dentro del suelo, la fuerza de atracción de la gravedad a través del fondo del pozo y la fuerza de atracción de la capilaridad del agua externa que atrae hacia el suelo circundante. La medición se realiza a partir de un hoyo en donde se mantiene una Carga Hidráulica (H) constante (Reynolds et al 1985) (Ecuación 1).

$$K_{fs} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n C_i Q_i \left(\frac{C_i a_i^2}{2} + H_i^2 \right) - \sum_{i=1}^n H_i C_i Q_i \sum_{i=1}^n H_i \left(\frac{C_i a_i^2}{2} + H_i^2 \right)}{2\pi \left\{ \sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i a_i^2}{2} + H_i^2 \right)^2 - \left[\sum_{i=1}^n H_i \left(\frac{C_i a_i^2}{2} + H_i^2 \right) \right]^2 \right\}} \quad (1)$$

Donde: C: factor de proporcionalidad ideal dependiente principalmente de la relación H/a , Q: caudal (L^3T^{-1}), a: diámetro del orificio (L), H: carga hidráulica (L).

Las primeras experiencias con el permeámetro de Guelph en Argentina fueron las realizadas por Benavidez y Bricchi (1995), que trabajaron en suelos franco arenosos de Río Cuarto (Córdoba), habiendo encontrado ventajas sobre otros métodos. Durante las investigaciones realizadas en el proyecto "Sustentabilidad del Cultivo de Arroz en la Provincia de Entre Ríos" (U.N.E.R.), se realizó la puesta a punto de la metodología de medición del permeámetro de Guelph para suelos Vertisoles. Los resultados fueron presentados en el XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo; Cerana et al (2002) y Benavidez et al (2002).

El objetivo del presente trabajo es adaptar la metodología de medición del permeámetro de Guelph en dos situaciones contrastantes: suelos de textura fina, Vertisoles y textura gruesa Entisoles de la República Argentina.

2. Material y métodos

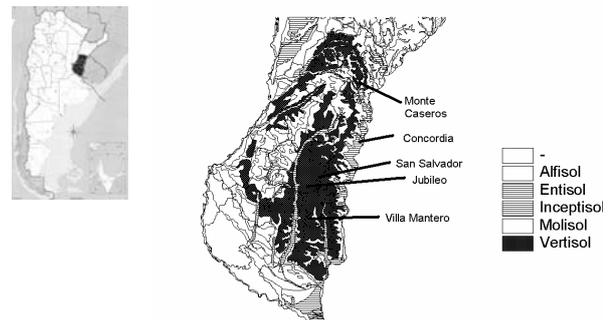
2.1. Ubicación de las mediciones

Entre Ríos y Corrientes son las principales provincias de Argentina con Vertisoles. En Entre Ríos abarcan zonas en el centro - sur, sudeste, centro - este y nordeste de la provincia (Departamentos San Salvador, Gualeguaychú, Uruguay, Colón, Villaguay y Tala) y en menor superficie en los departamentos Concordia, Federación, Federal, La Paz, Paraná y Gualeguay. Se ha considerado una superficie de 1.000.000 ha con condiciones apropiadas para la producción de arroz. En la provincia de Corrientes se encuentran en el sur, donde ocupan aproximadamente 200.000 ha. Las mediciones sobre suelos Vertisoles fueron efectuadas en los Departamentos Jubileo, Villa Mantero, San Salvador (provincia de Entre Ríos) y Monte Caseros (provincia de Corrientes). Por otra parte los suelos Entisoles se ubican al este de la provincia de Entre Ríos, sobre las terrazas aluviales del río Uruguay. Dichas terrazas, constan de suelos arenosos rojizos y suelos arenosos sobre sedimentos aluviales antiguos, más

arcillosos, con características muy variables a corta distancia. Los mismos se disponen en una franja irregular, paralela a la costa del río, en un ancho que varía de 2 a 30 km. Correspondiendo a establecimientos de usos del suelo forestal, citrícola y desde hace pocos años a la producción de arándanos. Las mediciones en suelos Entisoles se realizaron en el Departamento Concordia. Fig. 1.

2.2. Propiedades físicas de los suelos del estudio

Los Vertisoles, poseen textura arcillosa, considerados como impermeables o de lenta permeabilidad. Suelos difíciles de labrar, en seco son muy duros, cuando están mojados muy plásticos y adhesivos. Presentan microrrelieve gilgai originados en el movimiento en masa del suelo por cambio en su estado de humedad, observable en el terreno o en fotos aéreas. Por la misma capacidad de expansión y contracción que presentan estos suelos, al secarse forman grietas, particularmente en el subsuelo que están asociadas al flujo "by pass", que consiste en un rápido movimiento vertical del agua gravitacional atravesando horizontes secos o insaturados. Bouma y Loveday, (1988), Mc Intyre et al (1982). Para comprender el movimiento del agua en suelos agrietables, Talsma y van der Lelie, (1976), Fig. 2; considera un modelo de infiltración donde las grietas del suelo irán cerrándose por el hinchamiento durante el humedecimiento.



Escala Aproximada 1 : 10.000.000

Fig. 1. Mapa de Entre Ríos y sur Corrientes, sitios de medición y suelos.

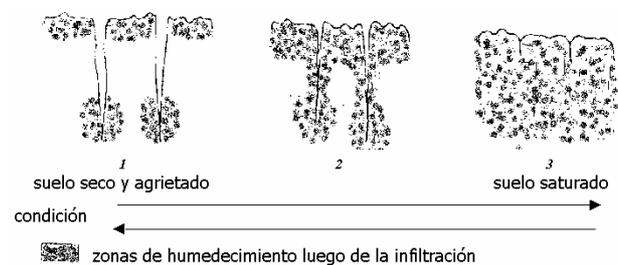


Fig. 2. Modelo de humedecimiento de Talsma y Van der Lelie

Dentro de los Entisoles de la provincia de Entre Ríos se encuentran dos divisiones: los suelos arenosos rojizos, los cuales son profundos, con textura arenosa a areno-franca, sin distinción de horizontes, tienen 5 – 12% de arcilla. Los materiales arenosos rojizos yacen sobre sedimentos franco-arcillo-arenosos a arcillo arenosos, a una profundidad que

varía de 60 a más de 250 cm, con grandes diferencias a corta distancia. Los suelos arenoso pardos, son aquellos que tienen horizontes densos, muy poco permeables y penetrables. Una característica típica de ellos es que muestran una amplia gama de variabilidad de rasgos que son el resultado de las diferencias locales en el régimen de sedimentación, conformando muchas veces un “mosaico” de suelos.

2.3 Cálculo de la conductividad hidráulica saturada.

Para proceder al cálculo de la K_{fs} , se utilizó la ecuación desarrollada por Elrick et al (1989). En la Ecuación 2 de K_{fs} los tres términos del denominador representan, respectivamente la contribución de la presión hidráulica, la gravedad y la capilaridad para el total del flujo externo del orificio. Para la resolución matemática de dicha ecuación se debe optar por un valor del parámetro α^* . El parámetro α^* es un índice de la capilaridad, Reynolds et al. (1992) equivalente a K_{fs}/ϕ_m y es aproximadamente igual al α en la ecuación de Gardner, cuando los suelos están en capacidad de campo o mas secos Elrick et al. (1989), donde ϕ_m es un índice de porosidad. De las observaciones efectuadas en el terreno, apoyadas por la descripción del perfil y la consulta a publicaciones Bagarello (1993 - 1997), Reynolds (1993), Bagarello y Provenzano (1996); Elrick et al (1989); se seleccionó un valor α^* de 4 m^{-1} para los suelos saturados de texturas finas y de 12 m^{-1} para los de textura más gruesa. El parámetro α^* relaciona la textura y la estructura del suelo, siendo un índice de capilaridad. Las estimaciones del parámetro α^* son dadas por Elrick et al, (1989) y las utilizadas en este trabajo se han resumidos en la Tabla 1.

$$K_{fs} = \frac{CQ}{\left(2\pi H^2 + \pi a^2 C + \frac{2\pi H}{\alpha^*}\right)} \quad (2)$$

Donde: K_{fs} : conductividad hidráulica saturada a campo (LT^{-1}), α^* : parámetro que relaciona la textura y la estructura del suelo (L^{-1}), Q : caudal de agua medido (L^3T^{-1}), H : carga hidráulica colocada dentro del orificio (L), a : radio del orificio (L), C : factor de forma sin dimensiones.

Tabla 1. Valores de α^* para el cálculo de la K_{fs}

α^* (m^{-1})	Condiciones de porosidad
36	Arenas gruesas y gravas, pueden además incluir algunos suelos con gran estructura como grandes grietas y macroporos.
12	La mayor parte de los suelos estructurados desde arcillas, pasando por francos; además incluyendo arenas finas y gruesas desestructurados.
4	Suelos que tienen textura fina y desestructurados.
1	Materiales arcillosos poco estructurados, compactados.

La K_{fs} determinada en suelos Vertisoles y otros pertenecientes a subgrupos vérticos, se efectuó a una profundidad entre los 25-30 cm. En las localidades: San Salvador, Jubileo, Villa Mantero (Entre Ríos) y Monte Caseros (Corrientes), durante los años 2000 y 2001. En

suelos de textura arcillosa, se realizaron un total de 44 ensayos. Los valores de K_{fs} determinados en suelos Entisoles, se realizaron en el Departamento Concordia, a una profundidad de 15 cm, en el mes de febrero de 2003. En dicha localidad se efectuaron un total de 10 determinaciones. Para todas las mediciones se calculó el porcentaje de humedad edáfica por secado en estufa y textura a la profundidad donde se efectuaron las medidas. En la Tabla 2 se presentan la textura determinada a la profundidad a la que se realizó la determinación.

Tabla 2. Textura de los suelos Vertisoles y Entisoles en las provincias de Entre Ríos y Corrientes

Prof. Cm	Arcilla %	Limo %	Arena %	Clase Textural
30	38.9	58	3.2	Franco - arcillo - limosa
30	32.9	62.8	4.4	Franco - arcillo - limosa
30	29.8	24.8	45.5	Franco - arcillo - limosa
30	37	48.2	14.8	Franco - arcillo - arenosa
15	18.2	12.5	74.3	Franco - arenosa
15	5.8	11.4	82.5	Franco - arenosa
15	8.1	9	78.9	Franco - arenosa
15	3.8	8.2	87	Arenosa

3. Resultados

La Tabla 3 resume las determinaciones realizadas por sitio de medición, con su correspondiente orden de suelo. Presentando los valores de humedad obtenidos en estufa y los valores de K_{fs} promedio, mínimo y máximo. Las filas están ordenadas de acuerdo a los valores crecientes de K_{fs} , correspondiendo las texturas franco arcillo limosa y franco arcillo arenosa a suelos Vertisoles y subgrupos vérticos (Pelludertes y Argiudoles vérticos), y las texturas franco arenosa con arcillas (conocidos como Mestizos) y arenosa de los suelos Entisoles (Psamentes y Fluventes). Los valores de humedad gravimétrica para los suelos vertisoles son una clara señal de que las mediciones se han realizado en condiciones cercanas o superiores a capacidad de campo, por lo que no se presentan los característicos problemas de grietas, condición 3 de la Figura 2. La última columna incorpora el desvío standard de los datos (STD).

Tabla 3. Valores de K_{fs} en Vertisoles y Entisoles y sus desvíos standard.

Sitio	Suelo	Hg. %	K_{fs}	K_{fs}	K_{fs}	S.T.D. ($mm\ h^{-1}$)
			Media	Mínima	Máxima	
San Salvador	Vertisol	42.9	0.10	0.026	0.29	0.106
	Jubileo	36.3	0.105	0.009	0.312	0.111
Monte Caseros	Vertisol	27	0.106	0.009	0.52	0.111
Villa Mantero	Vertisol	38.5	0.40	0.017	0.66	0.276
Concordia	Entisol	15.2	3.84	1.57	5.18	1.64
	Mestizo típico	6.9	88.30	24.98	141.67	141.6

Hg.: Humedad gravimétrica

4. Discusión

4.1. Efecto de la preparación del orificio

La confección del orificio es un paso de gran importancia para la técnica de medición del permeámetro de Guelph. La compactación y sellado de las paredes del orificio, origina subestimaciones en el valor de K_{fs} , en especial en suelos de textura fina con altos contenidos de humedad Koppi y Geering (1986); Asare et al (1993); Reynolds (1993); Bagarello y Provenzano (1996). Para remediar estos problemas, el permeámetro de Guelph, incluye en su caja de herramientas, dos barrenos de boca cortante. El primero, diseñado para realizar el orificio y el segundo para extraer la tierra excedente y aplanar el fondo del mismo. Además incluye un cepillo acondicionador - descompactador, que en su movimiento en sentido vertical elimina el sellado de las paredes. En las mediciones realizadas en los suelos Vertisoles de Entre Ríos y Corrientes, al utilizar los barrenos de la caja de herramientas, se produjo un efecto de sellado importante en las paredes del orificio. Además es de mencionar la poca practicidad que ofrecen para eliminar el suelo que extraen dichos barrenos. Por esto se reemplazaron los barrenos de boca cortante por uno de hoja cortante, perteneciente al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, de mejor desempeño en estos suelos. El cepillo acondicionador - descompactador, no produjo mejoras en la condición del orificio; por el contrario cuando el suelo se encuentra muy húmedo el enlodamiento y sellado de poros se ve aumentado con su uso. Este hecho es reportado también por Lilly (1994), quien observó una efectiva remoción de la zona compactada.

En los suelos de textura gruesa, existe el riesgo de un posible desmoronamiento de las paredes del orificio por el flujo del agua, humedecimiento del suelo y el peso ejercido por el permeámetro Bagarello (1997). Además el aumento del radio del orificio produce sobreestimaciones en el valor de K_{fs} obtenido Reynolds y Elrick (1985). Bagarello (1997) propone, la colocación de una malla protectora de alambre para evitar los problemas mencionados. En las mediciones realizadas en los Entisoles de Entre Ríos, no se observó desmoronamiento del orificio, por lo tanto no fue necesaria la utilización de una malla protectora de alambre.

El sellado de las ranuras de salida de agua del permeámetro, por el lodo formado en el fondo del orificio y el por el propio diseño del permeámetro, ocasionaba subestimaciones en los valores obtenidos de K_{fs} , o la inoperatividad del equipo. Lilly (1994) recomienda el uso de arena dentro del hoyo para evitar el aflojamiento de las paredes del orificio. En los suelos Vertisoles, la colocación de arena en el fondo del orificio, posteriormente de introducir el permeámetro en el orificio, introducir 3 ó 4 cm más de arena, evitó el sellado de las ranuras por el barro. Facilitando el correcto funcionamiento del permeámetro en suelos de texturas finas. Este procedimiento adoptado para los suelos de textura fina, produjo grandes mejoras en la operatividad del permeámetro al no subestimar los valores de K_{fs} .

4.2. Efecto de la elección de la carga hidráulica

La naturaleza hinchable - agrietable de los Vertisoles, según sea su contenido hídrico, produce grandes variaciones en los valores de K_{fs} . En períodos de bajas precipitaciones las arcillas expansivas se contraen, formando un complejo sistema de grietas y macroporos. Al inicio del riego o de las precipitaciones, los valores de K_{fs} se asemejan a los medidos en suelos arenosos. Por otra parte al encontrarse muy húmedos, el K_{fs} es cercano a cero. Las mediciones realizadas en los suelos Vertisoles, correspondieron a un período de altas precipitaciones y de balance hídrico positivo. En estas condiciones el suelo se mantuvo con alto contenido de humedad en el perfil, disminuyendo la macroporosidad y aumentando la microporosidad por efecto del hinchamiento. El empleo de H de 5 ó 10 cm, recomendadas por el manual, no alcanzaba a generar una presión suficiente para lograr el flujo del agua en el suelo, obteniendo valores de 0 mm h^{-1} de K_{fs} . Al aumentar H a valores de 20 cm, no se obtuvo valores nulos de K_{fs} . En todos los casos se considera que los valores de K_{fs} están siendo subestimados debido al efecto de enlodamiento de las paredes del orificio producido por el barreno. En todas las mediciones realizadas se empleó únicamente el reservorio interno del permeámetro, debido al bajo consumo de agua requerido para realizar la medición.

El manual operativo del permeámetro de Guelph 2800 k1 Soilmoisture Equipment Corporation (1987), propone para realizar la medición de la K_{fs} , la utilización del método de Reynolds y Elrick (1985a). Donde dos cargas hidráulicas distintas y consecutivas son mantenidas en el mismo orificio, para luego proceder al cálculo de K_{fs} . Esta metodología fue diseñada para trabajar en suelos que poseen un medio poroso homogéneo en el perfil donde se realiza la medición. Cuando esta condición no se cumple, la obtención de resultados negativos es muy frecuente Lilly (1994); Elrick (1989). Estos valores negativos de K_{fs} indicarían una distribución irregular de poros, la presencia de un pie de arado. Lilly (1994), no recomienda el empleo de dos H, cuando se presenten horizontes de pequeño espesor, menores a 20 cm de profundidad. La heterogeneidad que presentan los Vertisoles, junto con los cambios volumétricos sufridos por la humectación a través del tiempo; produjo resultados negativos en el 100 % de los casos en que se utilizó el sistema de dos cargas hidráulicas. Para evitar la obtención de resultados negativos, se optó por la metodología recomendada por Elrick et al. (1989), a través de la única ecuación, con los valores obtenidos por medio de una sola carga hidráulica. Con la ventaja adicional de reducir el tiempo de medición, para los suelos en estudio.

En los suelos Entisoles se seleccionó cargas hidráulicas de 12, 10 y 5 cm. La carga hidráulica de 10 cm se utilizó en sitios donde la textura al tacto del suelo poseía mayores contenidos de arcilla. Las cargas de 5 y 10 cm se empleó en los suelos de textura más arenosa, los resultados obtenidos con dichas cargas fueron similares.

4.3. Análisis de los valores

Los valores de K_{fs} promedio se ubicaron entre 0.1 mm h^{-1} y 0.4 mm h^{-1} . Estos bajos valores de K_{fs} reflejan las restricciones al flujo del agua en los Vertisoles, cuando el elevado contenido de humedad produce el hinchamiento, disminuyendo significativamente la cantidad de macroporos en el perfil del suelo. Bagarello y Provenzano (1996) trabajando con texturas franco arenosa considerando dos condiciones de humedad, suelo seco y húmedo, obtuvo valores decrecientes de K_{fs} a medida que aumenta el contenido hídrico. Los valores obtenidos son coincidentes con los valores de K_{fs} orientativos expuestos Young (1991) de 0.4 mm h^{-1} para suelos de textura fina

El valor promedio se ubicó en 53.38 mm h^{-1} ; con un rango de variación entre 1.57 mm h^{-1} y un máximo de 108.07 mm h^{-1} . En los suelos arenoso rojizos (de mayor contenido de arena), el valor medio obtenido fue de 82.94 mm h^{-1} . Mientras que en los suelos arenoso pardos, con mayor contenido de arcillas, el valor promedio fue de 8.8 mm h^{-1} . Es importante la disminución de los valores K_{fs} , debido al aumento del porcentaje de arcilla y la disminución del porcentaje de arena. Lilly A. (1994) realizó determinaciones en suelos de Escocia con texturas desde franco arcilloso a franco arenoso, donde los valores de K_{fs} tomaron un rango desde 0.25 mm h^{-1} hasta 20 mm h^{-1} . Estos valores de K_{fs} coinciden con los valores obtenidos en las mediciones realizadas en los suelos de similar textura en nuestra región.; 0.4 a 40 mm h^{-1} para suelos con buena estructura y $> 40 \text{ mm h}^{-1}$ para suelos de textura gruesa Young (1991).

5. Conclusiones

El permeámetro de Guelph constituye una herramienta válida para la medición de K_{fs} tanto para los suelos arcillosos agrietables como para los de texturas extremas, si se toman precauciones particulares. La adopción del permeámetro de Guelph, como una herramienta de uso estándar, permite comparar los valores de K_{fs} en suelos con distintas características texturales. Se ha comprobado la conveniencia del uso de H altas, de 20 cm , para suelos de textura fina con altos contenidos de humedad. El rango de valores de K_{fs} encontrados, refleja el comportamiento de los suelos de texturas extremas de la mesopotamia Argentina y es demostrativo de la sensibilidad del permeámetro.

Referencias

Asare, S.N.; Rudra, R.P.; Dickinson, W.T.; Wall, G.J., 1993. Seasonal variability of hydraulic conductivity. *Trans ASAE* 36 (2), 451 - 457.

- Bagarello, V. 1993. Osservazioni sull'utilizzazione del Guelph Permeameter per la misura in campo della conducibilità idrica satura. In Proc. V Convegno Nazionale AIGR, Maratea (PZ) (In Italian).
- Bagarello, V. 1997. Influence of well preparation on field - saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph Permeameter. *Geoderma* 80 (1-2): 169 - 180.
- Bagarello, V.; Iovino, M. y Reynolds, W.D. 1999. Measuring Hydraulic Conductivity in a Cracking Clay Soil Using the Guelph Permeameter. *American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 42 (4): 957 - 964.
- Bagarello, V.; Provenzano, G. 1996. Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity. *Trans. ASAE* 39 (1), 153 - 159.
- Benavidez, R. Bricchi, E. 1995. La Conductividad Hidráulica Saturada en Condiciones de Campo: Método Experimental y sus Fundamentos Físicos. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Actas de la reunión 12 y 13 septiembre E.E.A. Paraná I.N.T.A. Pág. 42 - 51.
- Benavidez, R.; Fontanini, P.; Duarte, O. y Cerana, J. 2002. Medición de la Conductividad Hidráulica Saturada en Suelos Arroceros en Entre Ríos y Corrientes. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, 16 al 19 de abril.
- Bouma J., Loveday J. 1988 Characterizing soil water regimes in swelling clay soils, en *Vertisols Their distribution, properties, classification and management*, Tech.Mph. N°18 S.M.S.S. Ed L. Wilding R. Puentes Texas.
- Cerana, J.; Duarte, O.; Fontanini, P.; Rivarola, S.; Díaz, E. y Benavidez, R. 2002. Medición de Parámetros Hidráulicos en Suelos Expansivos. Implementación de la metodología del Permeámetro de Guelph para la determinación del k_{fs} en suelos arroceros de la provincia de Entre Ríos. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, 16 al 19 de abril.
- Dafonte Dafonte, J.; Valcárcel Armesto, M.; Neira Seijo, X. X.; y Paz González. 1999. Análisis de los métodos de cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con el permeámetro de Guelph. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*. Eds. R. Muñoz - Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife. ISBN 84 - 699 - 1258 - 5.
- Elrick, D.E.; Reynolds, W.D. y Tan, K.A. 1989. Hydraulic conductivity measurement in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monit. Review* 9, 184 - 193.
- Koppi, A.J.; Geering, H.R., 1986. The preparation on unsmearred soil surfaces and an improved apparatus for infiltration measurements. *J. Soil Sci.* 37, 177 - 181.
- Lilly, A. 1994. The determination of field - saturated hydraulic conductivity in some Scottish soils using the Guelph permeameter. *Soil Use and Management* 10: 72 - 78.
- McIntyre, D.S. 1982. Capillary rise from saline groundwater in clay soil cores. *Aust. J. Soil. Res.* 20: 305- 313
- Reynolds, W.D. 1993. Saturated hydraulic conductivity: field measurement. In: Carter, M.R. (Ed), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton. Pág. 599 - 613.
- Reynolds, W.D. Elrick, D.E., 1985. Measurement of field - saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity - pressure head relationship using the Guelph Permeameter. *Proceedings of the Conference on Characterisation and Monitoring of the vadose (Unsaturated) Zone*, National Water Well Association, Denver.
- Soilmoisture Equipment Corporation, 1987. 2800K1 Operating Instructions. Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, California, USA
- Talsman, J.H.M. and van der Lely. 1976. Infiltration and water movement in an in situ swelling soil during prolonged ponding. *Aust. J. Soil Res.* 14: 337 - 349.
- Young, E.G. 1991. *Hydraulic Conductivity of Saturated Soils*. Soil Analysis. Marcel Dekker, Inc. New York. 161 - 208.

