

NUEVO MÉTODO DE MEDIDA DE TASA DE INFILTRACIÓN DE AGUA EN EL SUELO POR INFILTROMETRÍA DE DISCO

David Moret-Fernández¹, César González Cebollada²

1: Departamento de Suelo y Agua
Estación Experimental de Aula Dei
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
PO Box 202, 50080, Zaragoza, España
e-mail: david@eead.csic.es, <http://www.eead.csic.es>

2: Área de Mecánica de Fluidos
Escuela Politécnica Superior de Huesca - Universidad de Zaragoza
Carretera de Cuarte s/n. 22071 Huesca, España
e-mail: cesargon@unizar.es

Palabras clave: Infiltrómetro de disco; Pérdidas de carga; Tasa de infiltración

RESUMEN. *Este trabajo presenta un método que, aplicado a un nuevo diseño de infiltrómetro de disco, permite calcular caudales (Q) a partir de la pérdida de carga (ΔH_T) producida en un tubo cilíndrico. El método consiste en un sistema de doble Mariotte donde ΔH_T se mide en un tubo de Mariotte conectado a un depósito de agua a través de un tubo de silicona de 2-mm de diámetro y 100-cm de longitud. Este método fue testado en laboratorio y en condiciones de campo donde los valores medidos de ΔH_T y Q fueron contrastados con sus valores teóricos. La excelente correlación ($r^2 = 0.99$) entre los valores teóricos de ΔH_T y Q y los correspondientes valores experimentales obtenidos tanto en laboratorio como en campo indican que este método es una alternativa viable a los métodos convencionales de medida de tasa de infiltración comúnmente utilizados en infiltrometría de disco.*

ABSTRACT. *This paper presents a method which, applied to a new design of the disc infiltrometer, allows calculating water flows (Q) from the water head losses (ΔH_T) taking place in a cylindrical pipe. The method consists in a double Mariotte system where ΔH_T is measured in a Mariotte tube connected to a water reservoir through a 2-mm diameter and 100-cm long silicone pipe. The method was tested in laboratory and field conditions where the measured ΔH_T and Q values were contrasted with the corresponding theoretical ones. The excellent correlation ($r^2 = 0.99$) observed between the theoretical and experimental ΔH_T and Q values, either in laboratory and field conditions, indicates that this method is a feasible alternative to the conventional methods for infiltration rates measurements commonly used in the disc infiltrometry technique.*

1. INTRODUCCIÓN

El infiltrómetro de disco es un instrumento de campo ampliamente utilizado para medir, en condiciones próximas a saturación, las propiedades hidráulicas del suelo tales como la conductividad hidráulica (K), la sortividad (S) (Perroux y White, 1988) o el número y tamaño de macro y meso-poros del suelo conductores de agua (Moret y Arrúe, 2007). Su gran manejabilidad y rapidez en las medidas de infiltración hacen que su uso se haya generalizado en numerosos estudios de hidrología, agronomía o ciencias del suelo. Este instrumento, generalmente fabricado en metacrilato, consta de una base o disco sobre la que se inserta un depósito de agua y una torre de burbujeo (Perroux y White, 1988). El diseño clásico de infiltrómetro, cuyo depósito reposa sobre el disco, ha evolucionado hacia nuevos diseños en los cuales el depósito se ha independizado de la base (Casey y Derby, 2002; Moret y Arrúe, 2005). Estos nuevos diseños permiten, a diferencia del diseño original, reducir el peso sobre la superficie de muestreo y eliminar así posibles errores relacionados con el colapso de la estructura suelo en condiciones próximas a saturación, especialmente en suelo recién labrados (Moret y Arrúe, 2005).

La medida de la infiltración acumulada de agua en el suelo, a partir de la cual se calculan las propiedades hidráulicas, se realiza generalmente de forma manual anotando a intervalos constantes de tiempo el descenso de nivel de agua en el depósito del infiltrómetro. Este sencillo método de medida, que exige una atención continua sobre el infiltrómetro, puede ser fácilmente automatizado utilizando uno o varios transductores de presión insertados en el depósito del infiltrómetro y conectados a un datalogger (Ankeny et al., 1988; Casey y Derby, 2002) o utilizando la técnica de TDR mediante la inserción de un sonda de tres electrodos en el depósito del infiltrómetro (Moret et al., 2004). Por lo general, los depósitos utilizados en los infiltrómetros de disco suelen ser tubos cilíndricos de diámetro reducido (i.e. 5 cm de diámetro interno -d.i.-), lo que permiten efectuar medidas bastante precisas de caídas de nivel agua. Estos diseños, sin embargo, obligan a que en experimentos de larga duración (i.e. infiltraciones a varias tensiones en un mismo punto) se deba interrumpir las medidas para efectuar el rellenado del depósito, tarea que, aparte de tediosa, puede causar errores en las medidas de infiltración debido al propio manejo del infiltrómetro.

Este trabajo propone un nuevo método que, aplicado a un diseño de infiltrómetro con disco separado del depósito, permite medir la tasa de infiltración de agua en el suelo a partir de la pérdida de carga producida en el tubo de conexión entre disco y depósito. Este método fue calibrado en laboratorio y testado en campo utilizando un nuevo prototipo de infiltrómetro de disco.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Teoría

El movimiento de un fluido incompresible a lo largo de una tubería cilíndrica de diámetro D (m) viene caracterizado por la ecuación de Bernoulli (Giles et al., 1994)

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \Delta H_T \quad (1)$$

donde v_i (m s^{-1}), z_i (m) y P_i ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$) son, respectivamente, la velocidad media de circulación del fluido, la altura de la superficie del fluido y la presión en el punto i , respectivamente. El parámetro g (m s^{-2}) es la aceleración gravitatoria, γ ($\text{Kg m}^2 \text{s}^{-2}$) es el peso específico del fluido, definido como la densidad ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) multiplicada por g , y ΔH_T (m) es la pérdida de carga del fluido en movimiento.

Considerando dos depósitos conectados con una conducción de longitud L y diámetro D (Fig. 1), la pérdida de carga producida entre los puntos 1 y 2, cuando el fluido circula desde el depósito derecho hasta el depósito izquierdo, puede ser derivada a partir de la ecuación (1), teniéndose

$$\Delta H_T = h_{1-B} - h_{1-B}, \quad (2)$$

donde h_{i-j} es la diferencia de altura entre los correspondientes puntos mostrados en la Fig. 1.

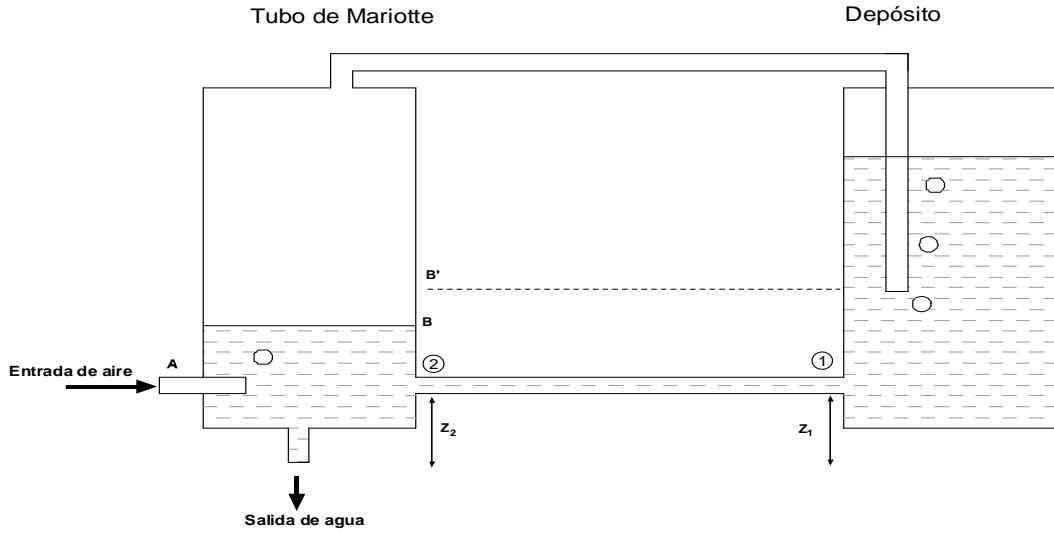


Figura 1. Esquema de un sistema de doble Mariotte utilizado para la medida de caudales a partir de la pérdida de carga.

Las pérdidas de carga totales en el sistema puede ser calculada según

$$\Delta H_T = \Delta H_C + \sum_1^n \Delta H_{s_i} \quad (3)$$

donde ΔH_C es la pérdida de carga continua en la tubería y ΔH_{s_i} es la pérdida de carga singular debida a estrechamientos, cambios de dirección y otras singularidades.

La pérdida de carga continua es descrita por la ecuación de Darcy-Weisbach (Giles et al., 1994)

$$\Delta H_C = f \left(Re, \frac{\varepsilon}{D} \right) \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

donde f es el factor adimensional de fricción, D es el diámetro interno del tubo, ε es la rugosidad de la tubería (m), L es la longitud de la tubería (m) y Re es el número de Reynolds, definido como

$$Re = \frac{vD}{\eta} \quad (5)$$

donde η es la viscosidad cinemática ($m^2 s^{-1}$) del fluido. La relación entre la temperatura del agua t ($^{\circ}C$) y la viscosidad cinemática del agua puede ser descrita según la ecuación empírica ($r^2=0.99$) obtenida a partir de la tabla de Giles et al. (1994) para valores de t .

$$\eta = 6.95(10)^{-10} t^2 - 5.31(10)^{-8} t + 1.78(10)^{-6} \quad (6)$$

Considerando que el factor de fricción para un flujo laminar ($Re < 2000$) viene dado por

$$f = \frac{64}{Re} \quad (7)$$

y que el caudal a través de una conducción circular cumple

$$Q = v\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (8)$$

la pérdida de carga continua ΔH_C puede ser expresada como

$$\Delta H_c = \frac{128\eta QL}{\pi g D^4} \quad (9)$$

La ecuación (9) es la ecuación de Bernoulli y muestra la relación lineal entre el caudal y la pérdida de carga continua en un flujo laminar de un fluido incompresible.

Las pérdidas de carga singulares en la tubería se calculan según (Giles et al. 1994)

$$\Delta H_s = K \frac{v^2}{2g} = K \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} \quad (10)$$

donde K es una constante dependiente del tipo de singularidad considerada.

Combinado las ecuaciones (3), (9) y (10) se obtienen que las pérdidas de carga totales pueden ser expresadas según

$$\Delta H_T = Q \frac{128\eta L}{\pi g D^4} + Q^2 \frac{8}{\pi^2 g D^4} \left(\sum_1^n K_i \right) \quad (11)$$

donde K_i es la constante de las pérdidas de carga singulares de cada una de las singularidades del sistema de doble Mariotte.

Resolviendo la ecuación (11), finalmente obtenemos que el caudal circulante puede relacionarse con la pérdida de carga total mediante

$$Q = \frac{\frac{128\eta L}{\pi g D^4} + \left[\left(\frac{128\eta L}{\pi g D^4} \right)^2 + \frac{32\Delta H_T \left(\sum_1^n K_i \right)}{\pi^2 g D^4} \right]^{1/2}}{16 \frac{\left(\sum_1^n K_i \right)}{\pi^2 g D^4}} \quad (12)$$

2.2. Diseño experimental

Se realizó un experimento de laboratorio para calibrar este método de medida de caudales a partir de la pérdida de carga, y que posteriormente será aplicado a un diseño de infiltrómetro de disco. Para tal fin, se diseñó un sistema de doble Mariotte (Fig. 1) en el que un depósito cilíndrico (tubo de metacrilato de 800 mm altura y 50 mm diámetro interno) se conectó a un tubo de 350 mm altura y 25 mm de diámetro interno (tubo de Mariotte) a través de un tubo de silicona de 1018.5 mm de longitud y 2.05 mm de diámetro (D). El diámetro interno efectivo del tubo de silicona se calculó a partir del volumen de agua contenido en el mismo. En el extremo inferior de ambos tubos de metacrilato se insertó un transductor de presión diferencial (Microswitch, Honeywell, modelo 26PC-series, rango de medida ± 1 psi) conectados ambos a un datalogger (CR1000, Campbell Scientist Ins), según el diseño propuesto por Casey y Derbi (2002). Del extremo superior del tubo de Mariotte se extendió un segundo tubo de silicona (1500 mm longitud y 3 mm de diámetro interno) que se insertó a una altura de 20 cm en el depósito de agua (Fig. 1). La salida de agua y entrada de aire en el sistema se efectuó a través de dos tubos de silicona insertados, respectivamente, en la base y a 2 cm de altura en el tubo de Mariotte. En condiciones estáticas, la altura en el tubo de Mariotte se corresponde con la altura de entrada de aire en el depósito. Sin embargo, en condiciones de flujo de agua, la altura de la columna de agua en el depósito de Mariotte varía en función del caudal circulante por el tubo de silicona. La calibración del método consistió en contrastar, para un total de seis caudales diferente (desde 0.5 a 2.5 l h⁻¹) medidos a partir de la caída de nivel de agua en el depósito,

los valores de caída de nivel de agua medidos en el tubo de Mariotte con correspondientes valores de pérdida de carga calculados utilizando la Ec. (11). La temperatura del agua se midió utilizando un sensor de temperatura tipo termistor (Campbell Sci., modelo 107-L, rango de medida -35 a 50 °C, error de medida ± 0.2 °C), que conectado al datalogger, estaba insertado en la base del depósito de agua. La Fig. 2 muestra los valores de la constante de pérdidas singulares utilizadas en el modelo.

2.3. Diseño del infiltrómetro de disco y experimentación de campo

El infiltrómetro de disco utilizado en este trabajo, que parte de un diseño inicialmente propuesto por Moret y Arrúe (2005) y consiste en un sistema de doble Mariotte similar al descrito en el experimento de laboratorio del apartado 2.2 (Fig. 2) tiene un disco de 10 cm de diámetro sobre el que se inserta el tubo de Mariotte y está conectado a una torre de burbujeo. Al igual que en el experimento de laboratorio del apartado 2.2., el nivel de agua en el depósito y tubo de Mariotte fue automatizado con dos transductores de presión diferencial (TP) conectados a un datalogger, y la temperatura del agua fue monitorizada con un termistor insertado en la base del depósito de agua.

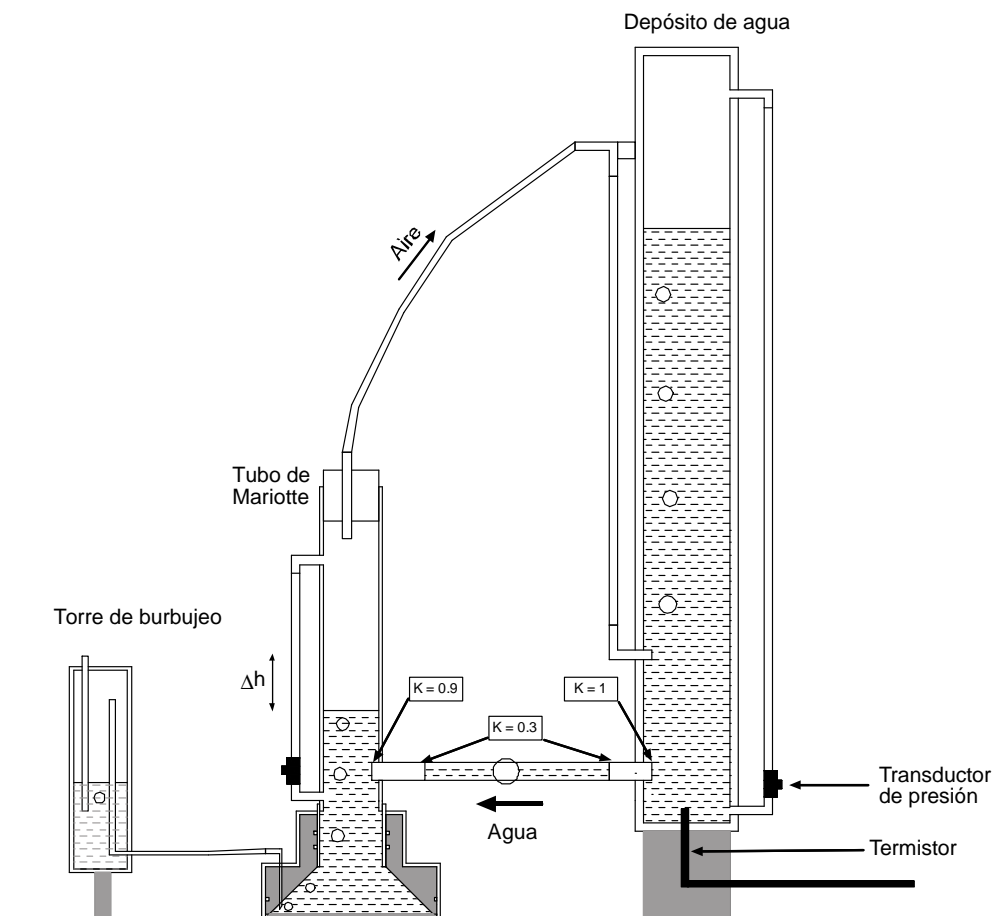


Figura 2. Esquema del infiltrómetro de disco utilizado en los experimentos de campo.

Con el fin de comprobar la viabilidad del método de medida de caudales aplicado a la técnica de infiltrometría de disco, se realizaron tres experimentos de campo en suelos con diferente grado de compactación (Tabla 1). La densidad aparente del suelo se midió con el método del cilindro sobre una zona próxima a los puntos de medida de infiltración. Las medidas se realizaron sobre el horizonte 1-10 cm del suelo tras suprimir la costra superficial. La base del disco del infiltrómetro se cubrió con una tela de nylon (20 μm de luz) y se dispuso de una capa arena entre la base del disco y el suelo para mejorar el contacto entre ambas superficies. La altura inicial en el tubo de Mariotte, previa a las medidas de infiltración, se obtuvo por el llenado por gravedad del sistema disco+tubo de Mariotte (Fig. 2) situado éste sobre una bolsa de plástico ubicada sobre la capa de arena. Una vez estabilizado el nivel de agua en el tubo de Mariotte, se retiró la bolsa de plástico y se situó el disco sobre la capa de arena para iniciar las medidas de infiltración. Se efectuaron medidas de infiltración a varias tensiones según tipo de suelo (Tabla 1). Las tasas de infiltración medida con los transductores de presión a partir de la caída de nivel de agua en el depósito del infiltrómetro fueron contrastadas con los caudales de infiltración obtenidos tras aplicar en la Ec. (12) la caída de nivel de agua en el tubo de Mariotte.

Tabla 1. Condiciones de suelo en el experimento de campo para testar el nuevo método de medida de tasas de infiltración a partir de la pérdida de carga, densidad aparente (ρ_b), humedad volumétrica inicial (θ_0) y relación de tensiones de infiltración (ψ) utilizadas en los experimentos.

Suelo	Observación	ρ_b (g cm^{-3})	θ_0 (cm cm^{-3})	ψ (cm)
SAC	Suelo franco altamente compactado tras pase de tractor	1.39	0.03	-10, -5, -1, 0
NL	Suelo franco bajo un sistema de no laboreo en un experimento de larga duración (1989-2009) de laboreo de conservación tras 8 meses de barbecho de una rotación cereal-barbecho	1.43	0.18	-5, -3, -1, 0
SR	Suelo franco tras un pase de rotocultor y una lluvia de 10 mm	1.12	0.17	-10, -5, -1

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El número de Reynolds (Ec. 5) calculado para el tubo de silicona y los diferentes valores de Q fue siempre inferior a 2000 (Tabla 2). Estos resultados indican que el régimen del flujo de agua a través del tubo de silicona fue siempre laminar. La excelente correlación (Fig. 3) ($r^2 = 0.99$) entre los valores de ΔH_T medidos en el tubo de silicona (1018.5 mm de longitud y 2.05 mm d.i.) a partir de la caída de nivel de agua en el tubo de Mariotte y los correspondientes valores calculados con la Ec. (11) para los caudales mostrados en la Tabla 2, indican que el método de medidas de caudales a partir de ΔH_T es muy preciso y puede ser una alternativa viable para la medida de tasas de infiltración con infiltrómetros de disco. A pesar de esta buena correlación, los resultados muestran que, para $\Delta H_T > 16$ cm, el modelo teórico tiende a desviarse de los resultados experimentales. Estas diferencias podrían atribuirse a pérdidas de carga singulares no incluidas en el modelo (p.e. curvatura del tubo de silicona) que pueden llegar a ser significativas a caudales elevados.

Tabla 2. Número de Reynolds y pérdidas de carga continuas (ΔH_C) (Ec. 9), singulares (ΔH_S) (Ec. 10) y totales (ΔH_T) (Ec. 11) calculadas en laboratorio para cuatro caudales diferentes y un tubo de silicona de 1018.5 mm de longitud y 2.05 mm de diámetro interno.

Caudales	Nº de Reynolds	ΔH_C	ΔH_S	ΔH_T
1 h^{-1}			cm	
0.54	93	4.01	0.03	4.04
1.06	185	7.95	0.11	8.06
1.65	287	12.34	0.27	12.61
2.55	443	19.03	0.65	19.68

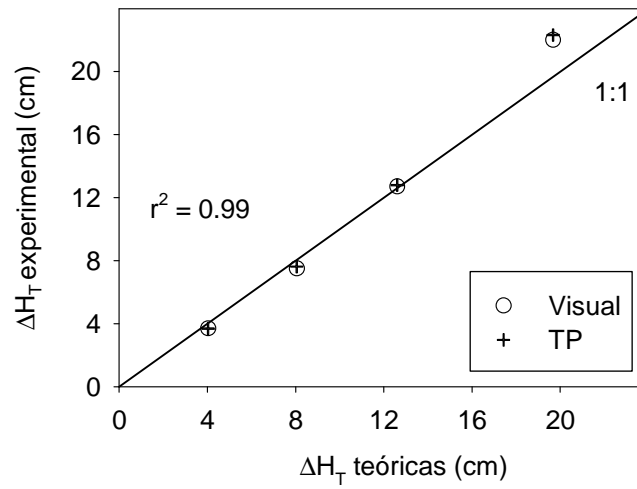


Figura 3. Relación entre las pérdidas de carga totales (ΔH_T) medidas visualmente (o) y con transductores de presión (TP) (+) en el sistema de Mariotte para un tubo de silicona de 1018.5 mm de longitud y 2.05 mm de d.i. y las teóricas calculadas con la Ec. (11) para los caudales mostrados en la Tabla 2.

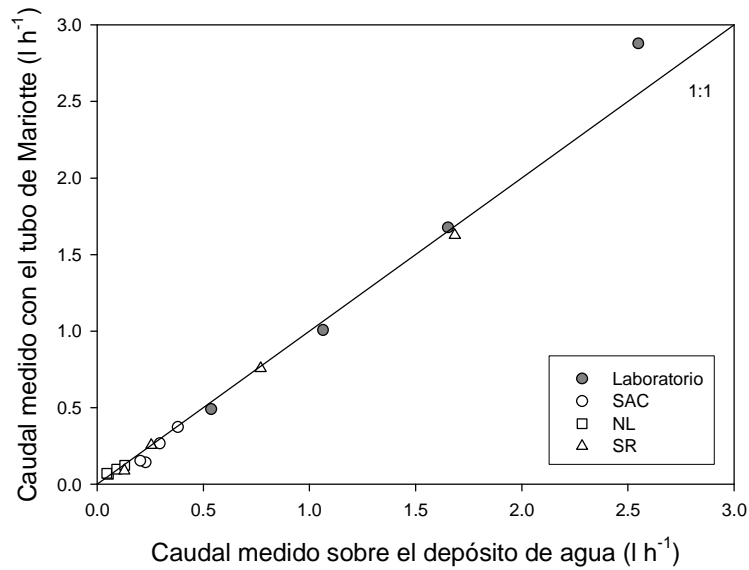


Figura 4. Relación, para los experimentos de laboratorio y campo (Tabla 1), entre el caudal medido a partir de la caída de nivel de agua en el depósito del infiltrómetro y el caudal calculado con la Ec. (12) a partir de la caída de nivel de agua medida en el tubo de Mariotte.

La también excelente correlación ($r^2 = 0.99$) obtenida entre los caudales medidos, tanto en el experimento de laboratorio como en campo, a partir de la caída de nivel de agua en el depósito de agua y los caudales calculados con la Ec. (12) a partir de la caída de nivel de agua en el tubo de Mariotte indican que el método propuesto permite medir con bastante fiabilidad las tasas de infiltración de agua en el suelo (Fig. 4).

Por otro lado, este nuevo método de medida de caudales presenta, a diferencia del método convencional utilizado en infiltrómetros de disco, que mide la tasa de infiltración a partir de la caída de nivel de agua en el depósito del infiltrómetro, una serie de ventajas tales como: (1) medidas directas e instantáneas de la tasa de infiltración en vez de la infiltración acumulada; (2) monitorizar varias medidas de infiltración a la vez utilizando un solo depósito de agua de gran capacidad; (3) posibilidad de amplio rango de medida de caudales de infiltración utilizando tubos de conducción de agua de diferente diámetro; y (4) fácil automatización de los niveles de agua en los tubos de Mariotte utilizando transductores de presión (Casey y Derby, 2002) o métodos similares tales como la técnica TDR (Moret et al., 2004).

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un método que, aplicado a la técnica de infiltrómetros de disco, permite estimar caudales de agua (Q) a partir de la medida de las pérdidas de carga totales (ΔH_T) producidas en un tubo de silicona. El método consiste en un sistema de doble Mariotte donde ΔH_T se mide en un tubo de Mariotte conectado a un depósito de agua a través de un tubo de silicona de 2.05 mm de diámetro interno y 1018.5 mm de longitud. La excelente correlación entre los valores de ΔH_T y Q medidos en condiciones de laboratorio y campo y los correspondientes valores obtenidos teóricamente demuestran que este método es una alternativa viable a los métodos convencionales de medida de la tasa de infiltración de agua en el suelo comúnmente utilizado en infiltrómetros de disco. Este método permite, a diferencia del método clásico utilizado en infiltrómetros de disco, medir tasas de infiltración instantáneas o realizar medidas simultáneas de infiltración en varios puntos utilizando un solo depósito de agua de gran capacidad. Sin embargo, son necesarios nuevos estudios a fin de diseñar nuevos prototipos de infiltrómetros que permitan medidas simultáneas de infiltración en diferentes puntos incluyendo la fase transitoria de infiltración de agua en el suelo, así como nuevos sistemas que permitan automatizar los tiempos para el cambio de tensión en la torre de burbujeo.

Agradecimientos. El presente trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyectos: AGL2007-66320-CO2-02/AGR; 200840I214). Los autores agradecen la colaboración prestada por Valero Pérez y Darío Tesón.

REFERENCIAS

- Ankeny, M.D., Kaspar, T.C., Horton, R., 1988. Design for an automated tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 893–896.
- Casey, F.X.M., Derby, N.E., 2002. Improved design for an automated tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 64–67.
- Giles, R. V., Evett, J. B., Liu, C., 1994. Fluid Mechanics and Hydraulics. Ed. McGraw–Hill Book Company, New York. ISBN 0070205094.
- Moret, D., Arrúe, J.L., 2005. Limitations of tension disc infiltrometers for measuring water flow in freshly tilled soils. In: Faz Cano, A., Ortiz, R., Mermut, A.R. (Eds.), Sustainable Use and Management of Soils. *Arid and Semiarid Regions. Advances in Geoecology* 36. CATENA-ERLAG Series, Reiskirchen, Germany, pp. 197–204.
- Moret, D., Arrúe, J.L., 2007. Characterizing soil water-conducting macro- and mesoporosity as influenced by tillage using tension infiltrometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 500–506.
- Moret, D., López, M.V., Arrúe, J.L. 2004. TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers. *J. Hydrol.* 297, 229–235.
- Perroux, K.M., White, I., 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1205–1215.