

DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SUELOS MEDIANTE UN PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE AUTOMATIZADO

ESTIMATING SOIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY WITH A FALLING HEAD AUTOMATED PERMEAMETER

Javier Álvarez-Benedí¹, David García-Sinovas¹, Rafael Muñoz-Carpena²

¹Servicio de Investigación y Tecnología Agraria, Junta de Castilla y León, Apdo. 172, 47080 Valladolid, España. javier@iq.cie.uva.es

²TREC-IFAS, University of Florida, 18905 SW 280 St., Homestead, FL 33031 (USA)

RESUMEN

La conductividad hidráulica es el principal parámetro requerido para la predicción del flujo de agua en suelos. Debido a su dependencia con la estructura del suelo y a la relativamente elevada variabilidad espacial de esta propiedad, la disponibilidad de métodos automatizados de estimación en campo es considerada como un aspecto de gran interés en el estudio de procesos de transporte de agua y solutos. En este trabajo se analizan estrategias de estimación de la conductividad hidráulica saturada en campo, basadas en el permeámetro de Philip - Dunne (falling head permeameter) y orientadas a la puesta en práctica de un dispositivo automatizado. En concreto, se estudia la utilización de dos puntos de la curva de infiltración (uno de ellos a 0% del calado y el otro a alturas de 1/2, 1/3 y 1/6 del mismo) y la optimización mediante el método de mínimos cuadrados no lineal Levenber-Marquardt con un número de puntos más elevado. Se pone de manifiesto que, aún siendo el método de optimización el que mejores resultados ofrece, la solución basada en los tiempos a 1/3 y 0% del calado ofrece unos resultados excelentes y una mayor aplicabilidad para la automatización. Se detalla también la construcción del dispositivo emplazando electrodos a diferentes alturas y el procedimiento de tratamiento de la señal necesario para obtener, a partir de la señal eléctrica muestreada, los valores de tiempo vs. calado necesarios para la aplicación de la estrategia seleccionada.

ABSTRACT

The saturated hydraulic conductivity is the principal parameter to predict water flow through soils. Due to the strong dependence of this parameter with soil structure and its relatively high spatial variability, the development of field automatic methods is a topic of much interest in water and solute transport studies. In this work, several strategies are analyzed for determining field saturated hydraulic conductivity. The Philip-Dunne (falling head) permeameter is used with the final purpose of developing an automated device. The use of two points from the infiltration curve is compared with a complete curve fitting using several experimental points and a nonlinear least-squares Levenberg-Marquardt algorithm. Although fitting produced better results, the use of data corresponding to 1/3 and 0% of the initial hydraulic head is shown to be almost as accurate as the fitted parameters. Additionally, this procedure was shown to be more practical for automation purposes as it requires less electrodes. Finally, the numerical signal treatment to obtain the time - head values from the electrical signal of the proposed device is also discussed.

Palabras clave: Infiltración, conductividad hidráulica, permeámetro automático

Keywords: Infiltration, hydraulic conductivity, automated permeameter

INTRODUCCIÓN

La estimación de las propiedades hidráulicas es un aspecto esencial en la predicción del movimiento de agua en el suelo. En la actualidad existe una gran variedad de métodos tanto en laboratorio como en campo, que pueden encontrarse en Klute (1986), Smith y Mullins (1991) o Topp et al. (1992). Estos métodos incluyen los que estiman la conductividad hidráulica (K) en campo y los que se basan en la recogida de muestras y su posterior estimación en el laboratorio. Sin embargo, la enorme dependencia de esta propiedad con respecto a la estructura del suelo hace que sea más recomendable un estudio de esta propiedad en campo en lugar de una recogida de muestras y su transporte hasta el laboratorio. Por otro lado, a pesar de posibles diferencias entre los métodos de estimación, la mayor incertidumbre a la hora de asignar valores de conductividad hidráulica a un escenario experimental surge de la gran variabilidad que esta propiedad presenta en campo, que puede llegar

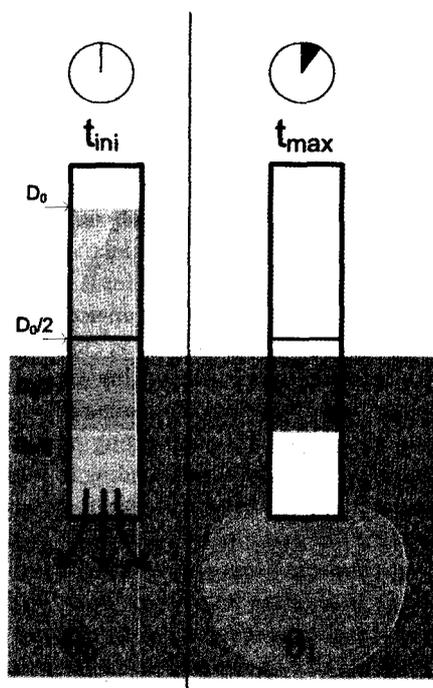


Figura 1. Experimento de infiltración con el permeámetro de Philip-Dunne: inicialmente (calado D_0 y tiempo t_{ini}) el suelo se encuentra a una humedad θ_0 , después de un tiempo (t_{max}) el permeámetro se vacía generándose un bulbo húmedo (humedad θ_1).

El tiempo puede además registrarse a diferentes calados (en la figura se señala el correspondiente a la mitad del calado t_{med}).

a ser hasta de 4 órdenes de magnitud en un mismo sitio experimental. Por estas razones, las dos premisas más atractivas de un método de estimación de conductividad hidráulica son la posibilidad de estimación directamente en campo y la capacidad de llevar a cabo muestreos en un gran número de puntos con el mínimo esfuerzo experimental.

El permeámetro de Philip-Dunne consiste en un tubo cilíndrico que se extiende hasta la base de un hoyo en el suelo, ajustando los lados (idealmente sin fisuras). El agua se introduce rápidamente en el tubo con una altura de calado inicial D_0 . A partir de ese momento se observa la evolución del calado del agua en el tubo frente al tiempo $D(t)$ hasta el vaciado total del tubo (Figura 1). Disponiendo de una ecuación, basada en la conductividad hidráulica, que describa el descenso del calado frente al tiempo, es posible estimar el valor de esta propiedad a partir de un experimento de infiltración como el representado en la Figura 1.

El análisis de Philip (1993) para la descripción numérica de la infiltración desde un permeámetro de carga no constante (*falling head permeameter*) fue aplicado a una campaña de muestreos de Thomas Dunne y Elizabeth Safran en la Amazonia. Allí la portabilidad del equipo y la disponibilidad de agua era una restricción al uso de permeámetros más sofisticados. Aunque este dispositivo es muy sencillo, el problema es la deducción de las propiedades hidráulicas del suelo a partir de los datos de altura del agua $D(t)$ frente al tiempo $0 \leq t \leq t_{max}$ en un experimento de infiltración. A diferencia del más extendido comercialmente Permeámetro de Guelph (Reynolds et al., 1983) en el que la carga hidráulica se mantiene constante alcanzándose un régimen estacionario en el flujo de infiltración, los experimentos con el permeámetro de Philip-Dunne se basan precisamente en el análisis dinámico del flujo, requiriendo métodos matemáticos más exigentes. Así, mientras en el método de Guelph se requiere únicamente la resolución de ecuaciones algebraicas, en el método de Philip-Dunne es necesario realizar la búsqueda de raíces en funciones altamente no lineales y con necesidad de algoritmos de cálculo más sofisticados.

Recientemente Muñoz-Carpena et al. (2002) compararon los resultados obtenidos con los permeámetros de Guelph, Philip-Dunne y ensayos en laboratorio, y encontraron que la metodología de Philip-Dunne mostraba ventajas frente a otros métodos en términos de aplicabilidad y número de muestras requeridas para alcanzar un determinado grado de descripción. En

dicho trabajo, los autores utilizaron dos tiempos característicos del vaciado del permeámetro (correspondientes al nivel de agua a la mitad del tubo y al vaciado), siguiendo la metodología de Philip (1993) y Vanderlinden et al. (1998). En estos dos trabajos la detección del nivel del agua a la altura media se realizaba visualmente (lo que entraña cierta dificultad con tubos enterrados en el suelo), si bien Muñoz-Carpena et al. (2002) introdujeron el uso de un electrodo en la base del tubo para detectar con mayor precisión el tiempo de vaciado. Con este mismo planteamiento, García-Sinovas et al. (2001) propusieron una posible automatización del dispositivo mediante el emplazamiento de electrodos conectados a un sistema de adquisición de datos y la detección de un umbral de tensión característico para cada nivel de agua.

Dado que los electrodos pueden instalarse a diferentes alturas, conviene profundizar en la estrategia de resolución del modelo de infiltración de Philip (1993) para establecer qué altura es la que proporciona un valor de conductividad hidráulica que reproduzca con más fidelidad la infiltración en dicho suelo.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) analizar las diferentes estrategias en la resolución del modelo de infiltración de Philip (1993) en lo que se refiere a las alturas del calado consideradas en el experimento de infiltración y ii) a partir de ellas, proponer el emplazamiento de los electrodos en el dispositivo automático. Un requisito adicional para completar la automatización del dispositivo es el desarrollo de un método de tratamiento de señal que permita, a partir de la curva de tensión del permeámetro automático, obtener los datos de la estrategia seleccionada.

TEORÍA

El análisis de Philip se basa en varias simplificaciones del proceso de infiltración a partir del vaciado de un tubo cilíndrico, que funcionan muy bien en prácticamente todas las situaciones experimentales. En realidad el problema es geoméricamente muy complejo ya que la fuente de agua es una superficie circular (disco base del permeámetro). Philip planteó en coordenadas esféricas como fuente de agua una superficie semiesférica con el mismo área que el disco de la base, de forma que el radio de la semiesfera r_0 , y el del tubo r_i estaban relacionados por la expresión:

$$4\pi r_0^2 = \pi r_i^2 \Rightarrow r_0 = \frac{r_i}{2} \quad (1)$$

Donde r_i (m) es el radio interior del tubo (permeámetro). Esta aproximación se separa bastante de la realidad a tiempos cortos (inicio del experimento, en donde existe un flujo predominantemente unidimensional), pero funciona muy bien a tiempos medios y largos (final del análisis, con un flujo predominantemente tridimensional) precisamente el punto en el que se basan los cálculos propuestos por Philip (1993).

Una segunda aproximación es la utilización del planteamiento de Green y Ampt (1911). Esta, es una simplificación que ha mostrado muy buenos resultados en suelos uniformes, secos inicialmente y de textura gruesa, que producen un frente húmedo muy marcado, pero su comportamiento es peor en otras situaciones. El planteamiento de Green y Ampt no describe con detalle el perfil de humedad durante el proceso de infiltración, pero ofrece estimaciones acerca de la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada en función del tiempo. La principal hipótesis del planteamiento de Green y Ampt es que existe un frente húmedo que se puede definir con precisión. El interior del frente se supone uniformemente húmedo (θ_f) y con una conductividad hidráulica constante (K). Por lo tanto, se supone un frente de humedad que cambia abruptamente entre el valor húmedo y seco. El contenido de humedad (o el equivalente potencial) del frente húmedo tiene por tanto un valor conocido (que se determina con una medida al finalizar el experimento). En nuestro caso esta región de suelo húmedo es un bulbo que rodea el permeámetro, separando radicalmente una región húmeda de una seca.

La última aproximación del método de Philip es que el flujo de agua en el suelo se debe a una contribución de dos componentes: la primera da cuenta de los efectos de "presión + capilaridad" y la segunda del efecto de la gravedad. En ausencia de gravedad el flujo sería simétrico en todas las direcciones, generándose un bulbo esférico, pero a medida que aumenta el tiempo y debido a la componente gravitacional, la excentricidad del bulbo se hace mas patente. Por lo tanto, Philip considera un flujo esférico, debido a presión + capilaridad, que es perturbado por la gravedad.

ANÁLISIS NUMÉRICO

Consideramos un suelo uniforme con una humedad θ_0 (m^3 agua / m^3 suelo). El bulbo húmedo (región húmeda del suelo) va a tener una humedad superior θ_1 y una conductividad hidráulica media K (m/s). Tanto θ_1 como K se consideran constantes. La infiltración acumulada se puede calcular a partir del incremento del radio del bulbo húmedo, sabiendo la diferencia de contenido de humedad volumétrica medida en el suelo seco (θ_0 , inicio del experimento) y en el bulbo húmedo (θ_1 , final del experimento). Así, para un tiempo t , si el radio del bulbo es $R(t)$ e inicialmente era r_0 , la infiltración acumulada ($i(t)$ = incremento del volumen del bulbo x incremento de humedad, en m^3) viene dada por:

$$i(t) = \frac{4}{3} \pi (R(t)^3 - r_0^3) (\theta_1 - \theta_0) \quad (2)$$

El análisis de Philip (1993) se basa en calcular la velocidad del flujo de agua (V_0) a través de la superficie esférica de radio r_0 (de acuerdo a la primera hipótesis del modelo que se ha mencionado anteriormente). Esta puede relacionarse fácilmente con la diferencia de humedad del bulbo húmedo respecto del suelo seco y el aumento del radio del propio bulbo $R(t)$, asumiendo el modelo de Green-Ampt (segunda hipótesis del modelo de Philip, 1993):

$$V_0(t) = \frac{\text{velocidad de infiltración}}{\text{superficie de la esfera}} = \frac{di}{4\pi r_0^2} = (\theta_1 - \theta_0) \left(\frac{R}{r_0}\right)^2 \frac{dR}{dt} \quad (3)$$

A partir de aquí, V_0 es separada en 2 componentes, la debido a presión + capilaridad y la gravitacional (tercera hipótesis del modelo de Philip, 1993): sólo la primera componente es utilizada en la resolución del modelo, mientras que la contribución gravitacional no se incluye como tal, si bien se aproxima con un factor $\pi^2/8$ que es introducido para ajustar el flujo del modelo (inicialmente esférico) al real (esferoide deformado por la gravedad). Al resolver la ecuación diferencial resultante se obtiene una expresión para t , el tiempo adimensional:

$$\tau(A, \rho) = \left(1 + \frac{1}{2A}\right) \ln \left(\frac{A^2 - 1}{A^2 - \rho^2}\right) - \frac{3}{2A} \ln \left(\frac{A-1}{A-\rho}\right) + \frac{\sqrt{3}}{A} \left[\tan^{-1} \frac{A+2\rho}{\sqrt{3A}} - \tan^{-1} \frac{A+2}{\sqrt{3A}} \right] \quad (4)$$

Donde ρ es el radio del bulbo húmedo adimensional, y A es un parámetro que depende de D_0 (la altura

inicial del calado del agua en el tubo, en metros), Ψ_m^f (el potencial del frente de humedad en el suelo, propiedad física dependiente del contenido de humedad) y de la diferencia $\Delta\theta = (\theta_1 - \theta_0)$. Las ecuaciones 5 a,b,c muestran las relaciones entre variables:

$$\rho = \frac{R}{r_0}, \quad \tau = \frac{8Kt}{\pi^2 r_0}, \quad A = \left(\frac{3 \left(D_0 - \Psi_m^f + \frac{\pi^2 r_0^2}{8} \right)}{r_0 \Delta\theta} - 1 \right)^{1/3} \quad (5 \text{ a,b,c})$$

En la resolución del modelo también se utiliza un valor adimensional para la altura del agua en el permeámetro:

$$\delta = \frac{3D}{(\Delta\theta r_0)} \quad (6)$$

La relación entre el radio del bulbo y la altura del agua, en forma adimensional fue calculada por Philip aplicando la ecuación de conservación de materia:

$$\rho = (\delta + 1)^{1/3} \quad (7)$$

que implica que el valor máximo es $\rho_{max} = (\delta_0 + 1)^{1/3}$ donde δ_0 es el valor de δ para $D = D_0$, altura inicial del agua en el permeámetro.

MATERIALES Y MÉTODOS

1.- Estrategias para la estimación de la Conductividad Hidráulica a partir de experiencias con el permeámetro de Philip-Dunne

1.1.- Estrategia 1: Solución de la ecuación 4 para dos tiempos:

Partiendo de la ecuación 4, para $\tau = f(A, \rho)$, si se dispone de los valores de la altura del calado (δ en la ecuación 6 y su correspondiente ρ en la ecuación 7) a dos tiempos diferentes (τ), se plantea un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (A y el radio adimensional del bulbo ρ). Los tiempos propuestos por Philip (1993), y utilizados por De Haro et al. (1998), García-Sinovas et al. (2001) y Muñoz-Carpena et al.

(2002), fueron por conveniencia experimental los correspondientes a la mitad del calado y final del experimento (t_{med} y t_{max}). Puesto que τ es el tiempo adimensional, la relación entre el tiempo de vaciado del permeámetro (τ_{max}) y el calado a media altura (τ_{med}) ha de ser:

$$\frac{\tau_{max}}{\tau_{med}} = \frac{t_{max}}{t_{med}} \Rightarrow \frac{\tau_{max}}{\tau_{med}} - \frac{t_{max}}{t_{med}} = 0 \quad (8)$$

t_{max} y t_{med} son valores conocidos (medidos durante el experimento), y τ_{max} y τ_{med} pueden obtenerse a partir de la solución de Philip, en función de A y ρ (ecuación 4) de forma que $\tau_{max} = f(A, \rho_{max})$ y $\tau_{med} = f(A, \rho_{med})$. Los radios del bulbo adimensional cuando el permeámetro se ha vaciado y cuando el calado está a la mitad se obtienen de la ecuación 7:

$$\rho_{max} = (1 + \delta_0)^{1/3}; \rho_{med} = (1 + \delta_0/2)^{1/3} \quad (9)$$

Por lo tanto τ_{max}/τ_{med} es una función de A , ya que ρ_{max} y ρ_{med} se calculan a partir de las ecuaciones anteriores y la ecuación 8 es de la forma $f(A) = 0$: Buscando la raíz de esa función, se obtiene un valor de A y a partir de ahí la conductividad hidráulica se obtiene previa estimación de $t_{max} = f(A, \rho_{max})$ y $K = (\pi^2 \rho_0 \tau_{max}) / (8 t_{max})$ (de la ecuación 5 b).

Una cuestión interesante que ya se ha mencionado anteriormente es que a tiempo $t \rightarrow 0$ el flujo es unidimensional, mientras que a tiempo $t \rightarrow t_{max}$ el flujo es, como refleja el modelo, tridimensional. Esto introduce un ligero error en el modelo que disminuye a medida que $t \rightarrow t_{max}$. Esta dependencia entre el error y los tiempos utilizados en la solución propuesta hace interesante evaluar si tiempos tomados a otras alturas diferentes a $D = D_0/2$ (al que se ha denominado t_{med}) producen resultados mejores que los utilizados hasta ahora.

En este trabajo se comparan los resultados basados en las tres siguientes variantes de esta estrategia: (t_{med} , t_{max}), ($t_{1/3}$, t_{max}) y ($t_{1/6}$, t_{max}) donde $t_{1/3}$ y $t_{1/6}$ representan los tiempos para distancias de calado a 1/3 y 1/6 del valor final respectivamente.

1.2.- Estrategia 2: Solución de la ecuación 4 para un tiempo, conocido ψ_m^f

Existe una alternativa a este procedimiento si se conoce o se estima el valor de potencial en el bulbo. En ese caso es posible calcular A directamente (ecuación 5 c) y solo con el valor de t_{max} es posible estimar la conductividad hidráulica. Sin embargo la estimación del potencial en campo no es en absoluto precisa, ya que en realidad lo que se determina habitualmente es el contenido volumétrico de humedad, siendo el potencial mátrico estimado a partir de una curva de succión ($\psi = f(\theta)$) sujeta a bastante incertidumbre. Por esta razón esta estrategia fue desechada en nuestro trabajo.

1.3.- Estrategia 3: Ajuste de los coeficientes mediante un método no lineal

En el caso de que se disponga de varias medidas de altura de agua en el tubo (m) y tiempo (s), puede llevarse a cabo un ajuste no lineal de los valores obtenidos por el modelo frente a los datos experimentales. La principal desventaja de este método es la mayor demanda de datos experimentales y por otro lado, las dificultades de búsqueda del mínimo global, fuertemente dependientes de los valores iniciales.

A la hora de plantear este tipo de ajuste, parece más razonable que los parámetros elegidos sean la propia conductividad hidráulica K y el potencial en el frente del bulbo húmedo del suelo ψ_m^f , ya que ambos tienen un claro sentido físico. El proceso consiste entonces en obtener A a partir de ψ_m^f (ecuación 5 c) y calcular para cada altura experimental D_i , su correspondiente valor adimensional (δ_i , aplicando la ecuación 6) y el radio adimensional del bulbo (ρ_i , aplicando la ecuación 7). Finalmente, con los valores de A y r_i es posible acudir a la ecuación 4 para obtener el tiempo adimensional $\tau_i = f(A, \rho_i)$ correspondiente a dicha altura. Finalmente t_i se obtiene de la ecuación 5 b, con lo que se dispone de los pares de valores experimentales y estimados de alturas y tiempos (D_i , t_i) y los valores de tiempo estimados por el modelo de t_i para cada altura.

En este trabajo se ha utilizado el método de Mínimos Cuadrados no lineal Levenberg - Marquardt (Press et al., 1992) implementado en Visual Basic para Excel, tomando como condiciones iniciales para ψ_m^f y K las soluciones basadas en dos tiempos (estrategia 1).

2.- Descripción de los experimentos de infiltración

Se han utilizado dos sitios experimentales diferentes para realizar las experiencias de infiltración en campo. Ambos corresponden a la finca "Zamadueñas" ubicada en una terraza del río Pisuerga, en Valladolid (España). La Tabla 1 resume las principales características de estos suelos.

Tabla 1. Características de suelos usados.

Suelo	Textura			Densidad aparente
	% Arcilla	% Limo	% Arena	(g/cm ³)
Z1	13.7	14.0	72.3	1.59
Z2	25.3	26.0	48.7	1.47

El permeámetro utilizado consistió en un tubo de metacrilato de 0.036 m de diámetro interior y 0.040 m de diámetro exterior. Se llevaron a cabo experiencias con altura inicial de calado de 0.3 m (excepcionalmente se llevó a cabo una experiencia con altura inicial de 0.6 m con el fin de disponer de una curva de infiltración con más puntos). En su extremo inferior, el tubo lleva adherida una redcilla de plástico de luz de malla de 0.0018 m para evitar dispersión de las partículas de suelo en el instante del llenado del permeámetro (García-Sinovas

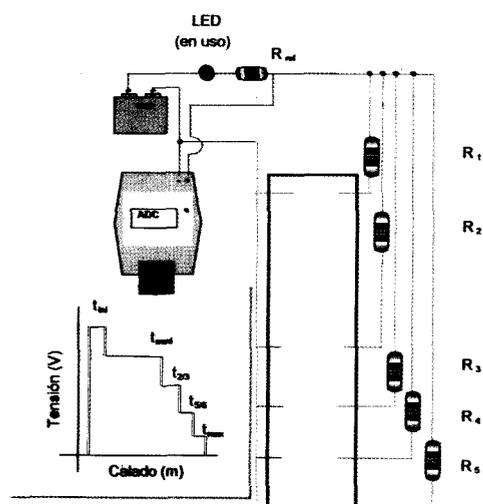


Figura 2. Esquema del permeámetro de Philip-Dunne automatizado con electrodos a alturas D_0 , $D_0/2$, $D_0/3$, $D_0/6$, y 0 m. Señal generada que permite establecer los tiempos correspondientes a cada calado (t_{ini} , t_{med} , $t_{1/3}$, $t_{1/6}$ y t_{max} , respectivamente). R_i denota resistencias de valor $R_{(i-1)} = R_{ref} = 1.2 K\Omega$ y $R_{i>1} = 2 R_{(i-1)}$.

et al., 2001). A lo largo del tubo se insertaron 5 parejas de electrodos metálicos, dispuestos en la parte superior ($t_{inicial}$), a 0.15 m de la base (t_{med}), a 0.10 m ($t_{1/3}$), a 0.05 m ($t_{1/6}$) y en la propia base (t_{max}) coincidiendo con el vaciado del tubo (Figura 2). Los electrodos de un lateral estaban conectados entre sí, mientras que los otros cinco pasan a través de resistencias de distinto valor (R, 2R, 4R, 8R y 16R, respectivamente, siendo R = 1 K Ω , en nuestro caso). El sistema registra la caída de tensión en una resistencia en serie con el circuito del permeámetro (R= 1.2 K Ω).

La Figura 2 muestra el esquema del dispositivo utilizado. El equipo de medición dispone de un convertidor analógico-digital (ADC) modelo ICP-CON 7017 (ICPDAS Co., Taiwan), que permite gestionar 8 permeámetros y que se conecta con el puerto serie RS232 de un ordenador portátil a través de un transmisor de datos ICP-CON 7520 (ICPDAS Co., Taiwan). El conjunto de los permeámetros y convertidor ADC se alimenta a través de una batería de 12 V. La adquisición de datos se gestiona desde el programa ADQ 2000 Philip-Dunne, 1.0 (Álvarez-Benedí, 2002). Con este diseño puede establecerse una relación entre el nivel de agua y la caída de tensión en la resistencia de medida.

El proceso de medición en campo requiere la excavación en el suelo de un agujero con una barrena de tipo Edelman de 0.07 m de diámetro (Eijkelkamp, The Netherlands). A continuación, se determina la humedad inicial del suelo (humedad del suelo seco θ_d), para lo que se utiliza una sonda Theta-Probe ML2x (Delta-T, UK). El sistema ThetaProbe estima el contenido de humedad (θ_v) de un volumen de suelo, a través de los cambios en la constante dieléctrica. Posteriormente, se introduce el permeámetro, rellenando el espacio comprendido entre el tubo y las paredes del agujero con la tierra que se ha sacado, apisonándola de manera que quede bien sellado. El experimento se inicia con el llenado de los tubos con agua y finaliza cuando éstos se han vaciado. Una vez concluido el experimento, se extraen los permeámetros y se determina la humedad final del suelo (correspondiente al bulbo húmedo θ_p) con la misma sonda ML2x.

En este trabajo, además de los valores recogidos por el sistema automático de adquisición de datos, se tomaron lecturas visuales en permeámetros con una escala gráfica milimetrada, con el fin de disponer de más puntos en las curvas de infiltración que aclarasen posibles diferencias entre las estrategias 1 (dos tiempos) y 3 (ajuste no lineal de la curva completa) para la estimación de la conductividad hidráulica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.- Análisis de las curvas de tensión para los puntos automáticos

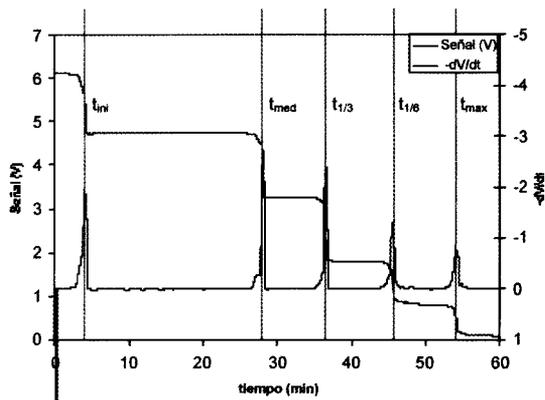


Figura 3. Evolución de la señal (Voltios) en un experimento con velocidad de infiltración constante. Las líneas verticales representan los tiempos a los que el análisis de la señal (derivada en color rojo) identifica cada uno de las cinco alturas a las que están instalados los electrodos (D_0 , $D_0/2$, $D_0/3$, $D_0/6$, y 0).

La Figura 3 muestra la evolución de la tensión en función del tiempo para un experimento de velocidad de descenso del calado constante. En ella pueden observarse los diferentes escalones que se obtienen al disminuir el calado del agua durante el experimento. El procedimiento más sencillo para determinar el tiempo en el que el agua rebasa cada electrodo consistiría en establecer varios niveles de tensión umbral y evaluar en qué momento se va rebasando cada nivel. Por ejemplo, en la Figura 3 podría establecerse niveles de (5.5, 4.0, 2.5, 1.3 y 0.4 V para establecer los tiempos t_{ini} , t_{med} , $t_{1/3}$, $t_{1/6}$ y t_{max} respectivamente). Este procedimiento, inicialmente propuesto por García-Sinovas et al. (2001), puede presentar problemas en la práctica debido a que requiere ajuste de las tensiones umbral para diferentes condiciones experimentales (conductividad eléctrica del agua utilizada, tensión de la batería, etc.). Por este motivo se hace más recomendable un tratamiento de la señal basado en la estimación de la derivada con una eliminación del ruido. En nuestro caso, de entre los diferentes esquemas de tratamiento estudiados, el más ventajoso resultó ser el cálculo numérico de la derivada y un filtrado de ventana móvil de 0.5 min, calculando la derivada para el punto i -ésimo mediante la expresión:

$$-dV/dt \approx 1/(12\Delta t) * (V_{(i-2)} - V_{(i+2)}) + (2/3\Delta t) (V_{(i+1)} - V_{(i-1)}) \quad (10)$$

donde V_{i-1} , es la tensión del punto anterior, V_{i+1} , la tensión del punto siguiente, etc. Press et al. (1992) describen un procedimiento de filtrado polinómico general (Savitzky-Golay) con la posibilidad de cálculo simultáneo de la derivada.

2.- Análisis de la Solución de Philip

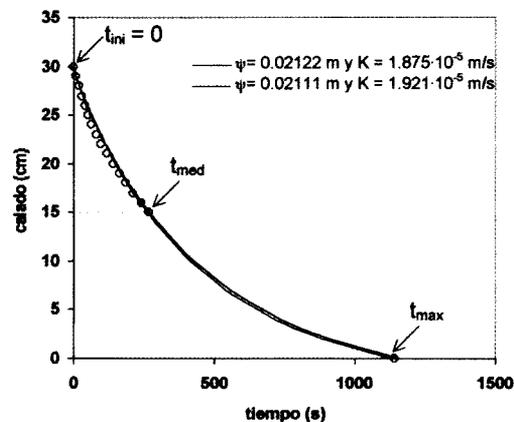


Figura 4. Curva de vaciado de un permeámetro y estimación de los tiempos medio y final (García-Sinovas et al., 2001). La línea negra representa la solución de Philip (1993) basándose exclusivamente en esos dos tiempos. La curva roja representa el mejor ajuste considerando todos los puntos experimentales.

La Figura 4 muestra un experimento de infiltración en el suelo Z1, en el que se recogen datos de tiempos a diferentes calados hasta t_{med} . La diferencia de humedad entre el bulbo y el suelo fue de $(\theta_j - \theta_0) = 0.28 \text{ m}^3/\text{m}^3$. La línea negra presenta la solución de Philip (1993) con la estrategia 1, basada en dos tiempos: $t_{med} = 269 \text{ s}$ y $t_{max} = 1140 \text{ s}$. Los resultados ($\psi = 0.02122 \text{ m}$ y $K = 1.875 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) son casi coincidentes con los que se obtienen en este caso con la estrategia 3: ajuste mediante el método de mínimos cuadrados no lineal de Levenberg-Marquardt con todos los puntos de la curva ($\psi = 0.02111 \text{ m}$ y $K = 1.921 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$), representada en rojo. En esta situación parece que la ecuación de Philip (1993) describe excelentemente la situación experimental y que la solución basada en dos tiempos es satisfactoria. Sin embargo, se aprecia ya en esta figura una cierta desviación de los puntos experimentales por debajo de la curva del modelo. Esta desviación podría atribuirse a la transición desde el flujo unidimensional al principio del experimento y el tridimensional que tiene lugar posteriormente (a lo que hemos

hecho referencia con anterioridad) y a la tercera hipótesis del modelo (aproximación del flujo de presión + capilaridad deformado por la gravedad).

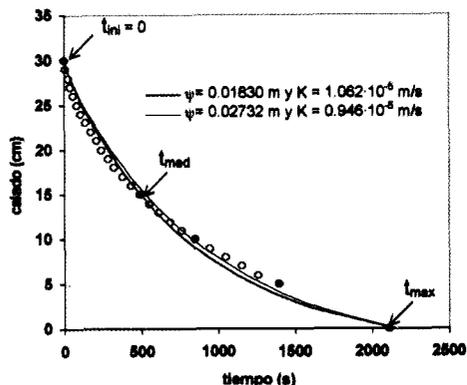


Figura 5. Curva de vaciado de un permeámetro. Los círculos oscuros indican puntos estimados con el dispositivo experimental automático (Figuras 2 y 3). La línea negra representa la solución de Philip (1993) basándose exclusivamente en los tiempos t_{med} y t_{max} . La curva roja representa el mejor ajuste considerando todos los puntos experimentales.

Sin embargo, el dispositivo experimental presentado en este trabajo abre nuevas posibilidades por cuanto es posible determinar tiempos de vaciado del permeámetro relativos a calados por debajo del nivel del suelo que visualmente son muy difíciles o imposibles de obtener (Figura 1). Con estas nuevas posibilidades, las curvas generadas ofrecen información a tiempos cercanos al vaciado, donde es de esperar una mayor precisión (Philip, 1993). La Figura 5 muestra una curva realizada en el suelo Z2. En este caso el tiempo medio fue de $t_{med} = 489$ s y el final del experimento $t_{max} = 2113$ s. La diferencia de humedad fue de $(\theta_i - \theta_0) = 0.228 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. A diferencia de lo observado en el caso anterior y de lo encontrado en trabajos anteriores como Muñoz-Carpena et al. (2002), la disposición de valores por debajo de t_{med} hace que los valores de conductividad hidráulica obtenidos con la estrategias 1 (utilizando t_{med} y t_{max}) y 3 sean sensiblemente diferentes ($9.46 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ frente a $1.05 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, respectivamente). La curva correspondiente a la solución de Philip considerando t_{med} y t_{max} muestra además un desvío hacía valores superiores de calado en la primera mitad de la curva y hacía valores inferiores en la segunda mitad. Este comportamiento fue sistemático en todas las repeticiones del experimento en los suelos estudiados.

La primera consideración a partir de este resultado es que el método de ajuste de todos los puntos de

la curva produce, en general, mejores resultados, en términos de error cuadrático medio del calado estimado, que es el criterio que se ha utilizado para la optimización. La segunda consideración es que diferentes pares de valores producirán diferentes resultados según la estrategia 1, lo que está directamente relacionado con el siguiente objetivo de este trabajo: la consideración del emplazamiento óptimo de los electrodos.

Tabla 2. Comparación de los valores del potencial en el frente de humedecimiento (ψ) y conductividad hidráulica saturada en campo (K) obtenidos con las diferentes estrategias de estimación:

Estrategia	Tiempos	ψ (m)	K (m/s)	SSQ (s^2)
1.- Dos tiempos				
	t_{max} y t_{med}	0.0183	$1.062 \cdot 10^{-5}$	107811
	t_{max} y $t_{1/3}$	0.0322	$9.065 \cdot 10^{-6}$	67422
	t_{max} y $t_{1/6}$	0.0566	$7.375 \cdot 10^{-6}$	204487
3.- Ajuste no lineal de todos los Puntos de la Curva				
	(26 datos)	0.0273	$9.460 \cdot 10^{-6}$	63769

La Tabla 2 presenta los valores del potencial y de la conductividad hidráulica que se obtienen al aplicar diferentes estrategias de cálculo. La suma del error cuadrático medio (SSQ) se obtuvo a partir de los tiempos experimentales t_i y estimados (te_i) para cada calado, considerando todos los puntos de la curva:

$$SSQ = \sum_{i=1}^n (t_i - te_i)^2 \quad (11)$$

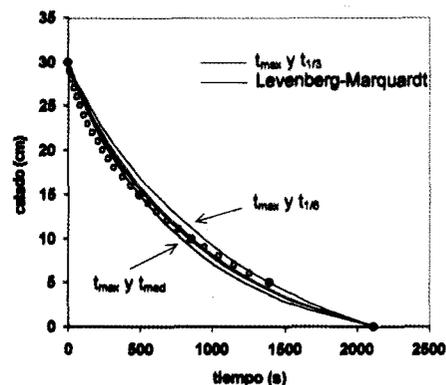


Figura 6. Comparación de las estrategias para estimación de la conductividad hidráulica basándose en diferentes pares de tiempos y el ajuste de la curva completa (los valores de ψ y K para todas las curvas se muestran en la Tabla 2). Los círculos huecos muestran la curva de infiltración completa y los círculos sólidos los obtenidos con el dispositivo automático

En la Figura 6 puede apreciarse claramente cómo el tiempo utilizado para cada una de las alternativas de la estrategia 1 (solución basada en dos tiempos) fuerza al paso de la curva por cada uno de los tiempos utilizado junto a t_{max} (t_{med} , $t_{1/3}$ y $t_{1/6}$ en el caso de las curvas representadas en la figura). La solución que más se aproxima no es la basada en t_{med} y t_{max} (utilizada en la bibliografía a la que se ha hecho referencia), sino la que se basa en los valores de $t_{1/3}$ y t_{max} . El error cuadrático medio de esta solución es muy próximo al mínimo obtenido mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt (Tabla 2).

Considerando los valores del potencial en el frente húmedo y de la conductividad hidráulica, puede concluirse que la variación de la conductividad hidráulica estimada con los diferentes puntos ha llegado a ser del 30% (Tabla 2). Este valor introducido por las diferentes estrategias de cálculo aún podría considerarse como moderado frente a la variabilidad de esta propiedad en campo. Sin embargo, la estimación en el potencial del frente húmedo estimado llega a variar hasta un 70% en función del punto utilizado para la estrategia de cálculo basada en dos tiempos. Considerando ambos criterios (valores obtenidos de K y ψ) los tiempos (t_{max} , $t_{1/3}$) y no (t_{max} , t_{med}) parecen los más indicados para ser utilizados en esta estrategia de cálculo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un dispositivo automático basado en el permeámetro de Philip – Dunne (*falling head*) que permite determinar automáticamente los tiempos a los que el calado se encuentra a 5 alturas diferentes. La principal ventaja es la posibilidad de determinar tiempos de calados por debajo del nivel del suelo, difícilmente accesibles de forma visual. La estimación de los tiempos basada en la señal eléctrica es más precisa y versátil si se lleva a cabo un análisis de la señal basada en el cálculo de la derivada con un filtrado simultáneo. De este modo es posible con un mismo esquema de cálculo poder dar respuesta a diferentes situaciones experimentales (conductividad eléctrica del agua, carga de la batería, etc.).

De las estrategias de estimación de la conductividad hidráulica basadas en la ecuación de Philip (1993), el uso de varios puntos de la curva y el ajuste

de mínimos cuadrados no lineal (estrategia 3) produjo los mejores resultados en términos de error cuadrático medio de la estimación. Sin embargo, la solución encontrada en este tipo de ajuste es fuertemente dependiente de los valores iniciales de K y ψ , requiriendo de una estimación previa a partir de la estrategia basada en dos tiempos (estrategia 1). Por lo tanto, la solución numéricamente más correcta sería la basada en la utilización de la estrategia 1 para obtener unos valores iniciales y a continuación la estrategia 3 para la determinación de los valores finales de conductividad hidráulica y potencial del frente (estrategia 1+3).

Sin embargo, la mejor alternativa a esta estrategia (1+3) para los experimentos realizados en los suelos utilizados en este trabajo, corresponde a la estimación basada en los tiempos ($t_{1/3}$ y t_{max}). De hecho, las diferencias entre los valores de la conductividad hidráulica y potencial del frente de humedecimiento fueron muy próximos con ambos planteamientos. Esto permite concluir que el emplazamiento idóneo de los electrodos en un sistema como el presentado en la Figura 2, sería el correspondiente a los calados $D0$, $D0/3$ y $D=0$ m, que equivalen a los tiempos $t_{ini}=0$ s, $t_{1/3}$ y t_{max} .

No obstante y a tenor de los resultados presentados en la Tabla 2 y las curvas que se presentan en la Figura 6, parece interesante la necesidad de revisar la ecuación de Philip (1993) de forma que se obtenga una mejor descripción del proceso de infiltración desde este tipo de permeámetros. Dos recientes trabajos de Warrick y Or (2002) y Elrick et al. (2002) profundizan en el efecto de la gravedad en la deformación del esferoide supuesto por Philip y abren nuevas alternativas que han de ser evaluadas en futuras investigaciones en este ámbito. Alternativamente, cambios en la geometría de la fuente semiesférica propuesta por Philip (1993), podrían mejorar el comportamiento del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Instituto Nacional de Investigación Agraria y Tecnología de los Alimentos (INIA) de España, proyecto CAL-01-029.

REFERENCIAS

- Álvarez-Benedí J. Software ADQPD-2000. Universidad de Valladolid, Departamento de Ingeniería Química, Grupo de trabajo en la Zona no Saturada del Suelo. www.iq.uva.es/suelos. [Acceso Octubre 2002].
- De Haro, J.M., Vanderlinden K., Gómez J.A. and Giráldez J.V. "Medida de la conductividad hidráulica saturada del suelo mediante el infiltrómetro de Philip-Dunne". En: A. González and E. Romero (eds.). *Progresos en la Investigación en la Zona no Saturada*. Ed. Universidad de Huelva, 9-20, 1988.
- Elrick D.E., Angulo-Jaramillo R., Fallow, D.J., Reynolds W.D., and Parkin G.W. Infiltration under constant head and falling head conditions. *Environmental Mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in the Biosphere. Geophysical Monograph 129.*, 47 – 53, 2002.
- García-Sinovas D., Regalado C., Muñoz-Carpena R., y Álvarez-Benedí J. Comparación de los permeámetros de Guelph y Philip-Dunne para la estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo. En J. J. López y M. Quemada (eds.) *Temas de Investigación en Zona no Saturada (V)*, Universidad Pública de Navarra, España. (V) : 31-36, 2001.
- Green W.H. and Ampt G.A. Studies on soil physics. 1 Flow of air and water through soils, *Journal Agric. Sci.*, 4:, 1-24, 1911.
- Klute A. *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods*, 2nd ed., No.9 (1) A.S.A.-S.S.S.A., Madison WI, 1986.
- Muñoz-Carpena R., Regalado C.M., Álvarez-Benedí J. and Bartoli F. Field evaluation of the new Philip-Dunne permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity., *Soil Sci.*, 167(1),: 9-24, 2002.
- Philip. Approximate analysis of falling-head lined borehole permeameter. *Water Resour. Res.*, 29 (11),: 3763-3768, 1993.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.R. and Flannery B.P. *Numerical recipes in C*. Cambridge University Press,: New York, 1992.
- Reynolds W.D., Elrick D.E. and Topp G.C. A re-examination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table., *Soil Sci.* 136,: 250-268, 1983.
- Smith K.A. and Mullins C.M. *Soil Analysis: Physical methods*. Marcel Dekker:, New York, 1991.
- Topp G.C. Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice, *Soil Sci. Soc. Am. Spec. Pub.*, 30, Madison, WI, 1992.
- Vanderlinden K., Gabriels D. and Giráldez J.V. Evaluation of infiltration measurements under olive trees in Córdoba., *Soil & Tillage Research*, 48, 303-315, 1998.
- Warrick A.W. and Or D. Effect of gravity and model characteristics on steady infiltration from spheroids. *Environmental Mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in the Biosphere.*, *Geophysical Monograph 129.*, 65- 70, 2002.