

MEDIDA DE LA SORTIVIDAD DEL SUELO CON EL PERMEÁMETRO DE PHILIP-DUNNE

C. M. Regalado¹, A. Ritter¹, J. Álvarez Benedí² y R. Muñoz Carpena³

¹Instituto Canario Investigaciones Agrarias (ICIA), Dep. Suelos y Riegos, Apdo. 60 La Laguna, 38200 La Laguna, cregalad@icia.es; aritter@icia.es.

²Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, Apdo. 172, 47080 Valladolid, jabenedi@iq.uva.es.

³TREC-IFAS, Agricultural and Biological Engineering Dept. University of Florida, 18905 SW 280 St., Homestead, FL 33031 (USA), carpena@ufl.edu.

RESUMEN. Junto con la conductividad hidráulica (K_s), la sortividad (S) es uno de los parámetros relevantes en el estudio de la zona no saturada del suelo. Ambos parámetros pueden estimarse mediante el infiltrómetro de altura variable de Philip-Dunne, si se conocen los tiempos de infiltración y el incremento de humedad producido en el suelo tras un ensayo. Trabajos previos han demostrado la utilidad del permeámetro de Philip-Dunne para la estimación de K_s , sin embargo su potencial como método de medida de la sortividad ha recibido menor atención. En este estudio se investigan las posibilidades del método de Philip-Dunne para estimar S , analizando las condiciones de frontera que limitan el espacio de búsqueda de soluciones con significado físico, así como los factores de forma utilizados en el análisis de Philip para aproximar a una dimensión el flujo tridimensional de agua en el suelo. Además, se incluye un análisis de sensibilidad del método.

ABSTRACT. Sorptivity measurements with the Philip-Dunne permeameter. The saturated hydraulic conductivity (K_s) along with the sorptivity (S) are relevant parameters to be studied with regard to the vadose zone dynamics. Both may be estimated with the falling-head Philip-Dunne permeameter, given the moisture increment and times after an infiltration event. Previous studies have shown that the Philip-Dunne permeameter is useful for estimating K_s , but its potential as a sorptivity measuring technique has received little attention. In this paper the capabilities of the Philip-Dunne method to estimate S are investigated, such as the boundary conditions that limit the searching space of physically based solutions, and the shape factors used in Philip's analysis in order to reduce to one dimension the three-dimensional flux of water in the soil, investigating the method's sensitivity.

1. Introducción

En 1993 John Philip publicaba los resultados del análisis matemático que permitía estimar la conductividad hidráulica (K_s) a partir de mediciones, proporcionadas por

T. Dunne y E. Safran en una campaña científica por el Amazonas (Philip, 1993), de los tiempos de infiltración y el calado en un tubo lleno de agua e insertado en el suelo. Posteriormente, y en el seno de estas mismas Jornadas celebradas en la Universidad de Huelva, De Haro et al. (1998) investigan la utilidad y condiciones de aplicación del método de Philip, estudiando la sensibilidad de la estimación de K_s a los tiempos de infiltración medio (t_{med}) y de vaciado (t_{max}), al calado inicial del permeámetro (h_0) y al incremento de humedad ($\Delta\theta$) producido en el suelo tras un ensayo. Gómez et al. (2001) compararon los resultados obtenidos con el permeámetro de Philip-Dunne frente al infiltrómetro de tensión y el del doble anillo, encontrando valores similares para K_s , pero no así para la succión en el frente de avance (Ψ), donde los autores no encontraron explicaciones convincentes que justificaran los altos valores de Ψ obtenidos con el permeámetro de altura variable de Philip. Muñoz-Carpena et al. (2002) obtuvieron valores elevados de Ψ cuando se compararon los permeámetros de Philip-Dunne y Guelph, encontrando también valores altos de K_s , que los autores explican parcialmente en términos de volumen representativo, anisotropía del suelo y geometría de infiltración. En un intento por mejorar la aplicabilidad del método en campo y bajo el marco de la Zona No Saturada celebrada en Navarra, García-Sinovas et al. (2001) presentan un prototipo de automatización de las lecturas de calado y tiempos de infiltración del permeámetro de Philip-Dunne, confirmando los resultados obtenidos por Muñoz-Carpena et al. (2002) en suelos con texturas y características hidráulicas distintas. Finalmente, y en la misma línea de mejora de la aplicabilidad del método, Muñoz Carpena y Álvarez Benedí han desarrollado un programa de cálculo numérico bajo entorno Windows, Unix y MacOSx que facilita la implementación del procedimiento en campañas intensivas de medida (Muñoz-Carpena y Álvarez-Benedí, 2002).

En cuanto a la sortividad, S ($m s^{-1/2}$), ésta se puede estimar mediante $S^2 \approx 2K_s \Psi \Delta\theta$ (Philip, 1969), si se conocen los valores de K_s , Ψ e incremento de humedad, $\Delta\theta$ (diferencia entre la humedad a saturación, θ_s ($m^3 m^{-3}$), y el contenido inicial de humedad de un suelo, θ_0), y suponiendo un frente de avance del agua en pistón (modelo de infiltración de

Green y Ampt). La sortividad caracteriza los primeros estadios del proceso de infiltración, y en consecuencia representa el efecto del potencial mátrico en la misma. Es por tanto, junto con la K_s , el parámetro físico que caracteriza la entrada de agua en un suelo, como se deduce de la expresión (Philip, 1987)

$$I(t) = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + K_s \quad (1)$$

donde I es infiltración y t es tiempo. En la ec. (1), el papel de la capilaridad (sortividad) disminuye con la raíz cuadrada de t , mientras que el segundo término es independiente del tiempo y refleja el valor máximo de conductividad, de manera que para $t \rightarrow \infty$, $I = K_s$.

Experimentos previos realizados con el permeámetro de Philip-Dunne han concentrado sus esfuerzos en la aplicabilidad del método de Philip para estimar K_s , sin que la medida de la sortividad haya recibido atención alguna. En este trabajo se investigan las posibilidades del método de Philip-Dunne para estimar S , analizando las condiciones de frontera que limitan el espacio de búsqueda de soluciones con significado físico, y los factores de forma utilizados en el análisis de Philip para reducir a una dimensión el flujo tridimensional de agua en el suelo. Además se incluye un análisis de sensibilidad del método.

2. Fundamentos teóricos: Análisis del permeámetro de altura variable de Philip-Dunne

El permeámetro de altura variable de Philip-Dunne consiste en un tubo de radio interior r_i , inicialmente ($t=t_0$) lleno de agua hasta una altura o calado $h=h_0$, y que se inserta manteniendo un contacto íntimo con el suelo. El análisis de Philip parte de una simplificación geométrica, en la que la superficie “real” de infiltración (un disco húmedo inicial que evoluciona hacia un bulbo cuasi esférico) se sustituye por esferas concéntricas de superficie equivalente con radio inicial $r_o = r_i/2$. El flujo equivalente resultante se ajusta al flujo “real” mediante un coeficiente $8/\pi^2$, obtenido a partir de mapas conformes. Esta simplificación permite la descripción tridimensional del flujo de agua en el suelo mediante una única coordenada radial r . El flujo puede considerarse tridimensional cuando se alcanza un volumen de mojado V_m equivalente a un cilindro de radio r_i y altura $2r_i$, esto es $V_m = 2\pi r_i^3 = 16\pi r_o^3$, lo que en términos del calado del permeámetro se traduce en $h_0 - h = 4\Delta\theta r_o$. Cálculos preliminares demuestran que este volumen se alcanza cuando se han infiltrado tan sólo 6 cm del calado inicial ($h_0=30$ cm), con lo que el siguiente análisis puede considerarse válido para tiempos grandes. Remitimos al lector al artículo original de Philip (1993) para los detalles del análisis. A continuación se destacan únicamente aquellos conceptos que más adelante serán utilizados en este trabajo.

Del principio de conservación de la masa se deduce la siguiente relación entre el calado $h(t)$ y el radio del bulbo (esfera) húmedo $R(t)$

$$h(t) = h_0 - \frac{1}{3} \Delta\theta \left\{ \frac{R(t)^3}{r_o^2} - r_o \right\} \quad (2)$$

Derivando se obtiene

$$\frac{dh}{dt} = -\Delta\theta \left(\frac{R}{r_o} \right)^2 \frac{dR}{dt} \quad (3)$$

Con lo que llegamos a la siguiente ecuación diferencial en función de las variables adimensionales τ y ρ (Philip, 1993)

$$\frac{d\tau}{d\rho} = \frac{3\rho(\rho-1)}{a^3 - \rho^3} \quad (4)$$

sujeta a la condición de frontera $\tau = 0$ ($\rho = 1$), y donde

$$\tau = \frac{8K_s t}{\pi^2 r_o^2}; \quad \rho = \frac{R}{r_o}; \quad a^3 = \frac{3(\Psi + h_0 + \pi^2 r_o / 8)}{r_o \Delta\theta} + 1 \quad (5)$$

Integrando la ecuación (4) obtenemos una expresión que relaciona el tiempo, τ , y calado, ρ , adimensionales, en función de la succión en el frente de avance, Ψ , y el incremento de humedad $\Delta\theta$ producido en el suelo tras un ensayo

$$\tau(\Delta\theta, \Psi) = \left(1 + \frac{1}{2a} \right) \log \left(\frac{a^3 - 1}{a^3 - \rho^3} \right) - \frac{3}{2a} \log \left(\frac{a-1}{a-\rho} \right) + \frac{\sqrt{3}}{a} \arctan \left(\frac{\sqrt{3}a(\rho-1)}{2a^2 + a(\rho+1) + 2\rho} \right) \quad (6)$$

Varios métodos han sido propuestos para estimar K_s y Ψ a partir de (6). Philip (1993) calcula K_s y Ψ a partir de las curvas t_{max}/t_{med} vs. τ_{max} así como t_{max}/t_{med} vs. Ψ . Por el contrario De Haro et al. (1998) proponen encontrar el mínimo global de la función objetivo $\tau_{max}/\tau_{med} - t_{max}/t_{med} = 0$, sujeta a las siguientes restricciones:

- cota superior: $a > \rho_{max}$
- cota inferior:

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \frac{\tau_{max}}{\tau_{med}} = \frac{1 - 3\rho_{max}^2 + 2\rho_{max}^3}{1 - 3\rho_{med}^2 + 2\rho_{med}^3} \quad (7)$$

Muñoz-Carpena et al. (2002) comparan el método de De Haro et al. (1998) con dos alternativas. En la primera resuelven el sistema bidimensional $t_{max} = t_{max}(K_s, \Psi)$; $t_{med} = t_{med}(K_s, \Psi)$, y la comparan con el ajuste no lineal de la función $\tau = \tau(\rho)$ al conjunto de datos (t_i, h_i) , obteniendo resultados consistentes. Tanto en un caso como en el otro, la estimación de K_s y Ψ demandan cálculo numérico, con lo que dichos métodos llevan aparejado el desarrollo de códigos numéricos *ad hoc*.

3. Resultados

3.1. Tamaño y procedencia de los muestreos

Los resultados presentados proceden de estudios previos en suelos cuyas propiedades físico-químicas pueden consultarse en las referencias correspondientes. En concreto, se incluyen en este estudio las mediciones (n=70) de Muñoz-Carpena et al. (2002) llevadas a cabo en un suelo agrícola con carácter ándico; las mediciones realizadas por García-Sinovas et al. (2001) en tres parcelas experimentales (n=40, 11, 10) de Valladolid (España) con texturas y granulometrías distintas y que fueron la base de un Trabajo Fin de Carrera previo (Antolín Barriuso, 2001); los experimentos posteriores en una de dichas parcelas vallisoletanas (Zamadueñas) sobre una muestra n=100 (García-Sinovas et al., 2002); finalmente, las medidas (n=57) realizadas con el permeámetro de Philip-Dunne en una cuenca hidrológica del Parque Nacional de Garajonay (Informe INIA-RTA01-097, 2002). En total se analizan 288 medidas procedentes de 5 suelos distintos. Por tanto las conclusiones obtenidas a continuación se consideran suficientemente generales como para extrapolarse a otros escenarios, y vienen en parte a resolver críticas previas realizadas sobre la validez del método de Philip que hacían referencia a que anteriores resultados no habían sido comprobados bajo suelos con distinto origen. El análisis que a continuación nos ocupa viene además apoyado por resultados teóricos independientes de las características del suelo, reforzando por tanto su generalidad.

3.2. Estimación de K_s y S

El problema del método de Philip para el cálculo de K_s y S a partir de medidas de t_{med} , t_{max} y $\Delta\theta$, está relacionado con la obtención de un número relativamente grande (García-Sinovas et al., 2001) o pequeño (Muñoz-Carpena et al., 2002) de valores fuera de los límites superior ($a > \rho_{max}$) e inferior (7), con lo que a lo largo del siguiente análisis subyace este problema. Algo similar ocurre con la aparición de valores negativos de K_s en el método de dos alturas del permeámetro de Guelph, que previos autores achacan a la existencia de heterogeneidad, no uniformidad del suelo, etc. (Elrick y Reynolds, 1992). En el caso del permeámetro de Guelph, este problema se ha “resuelto” mediante el método de una altura, o el análisis de Vieira, que hace uso de los valores $K_s > 0$ y $\Psi > 0$ para recalcular los valores negativos de conductividad y potencial matricial (Vieira et al. 1998). En el caso del permeámetro de Philip-Dunne, no se han desarrollado métodos que resuelvan este problema, salvo la relajación de la restricción $a > \rho_{max}$, cuya violación, implica un valor $\Psi < 0$, que no es admisible físicamente. En este trabajo se apuntan más adelante algunas explicaciones que indican el origen de dichas soluciones anómalas. Siguiendo el método propuesto por Philip (1993) para estimar K_s y Ψ a partir de observaciones de $h(t)$, la Figura 1 representa la relación t_{max}/t_{med} vs. τ_{max} así como t_{max}/t_{med} vs. Ψ para el total de las 288 muestras procedentes de los cinco suelos

estudiados. Dos conclusiones pueden obtenerse de esta figura. En primer lugar se observa que para valores alrededor de $t_{max}/t_{med} \approx 5$ las estimaciones de succión en el frente (Ψ) violan la condición de positividad (Figura 1b). Este valor de t_{max}/t_{med} marca el límite a partir del cual el conjunto de valores (t_{max}/t_{med} , τ_{max}) se desvía de la línea de tendencia $\tau_{max} = 0.7342 t_{max}/t_{med} - 1.1258$ ($r^2 = 0.96$), obtenida a partir del ajuste de los puntos que cumplen $\Psi > 0$ (Figura 1a). Dado que K_s y Ψ están ligados a través de la ec. (6), los valores de t_{max}/t_{med} correspondientes a $\Psi < 0$ no son válidos para estimar el correspondiente τ_{max} , y deben ser por tanto descartados.

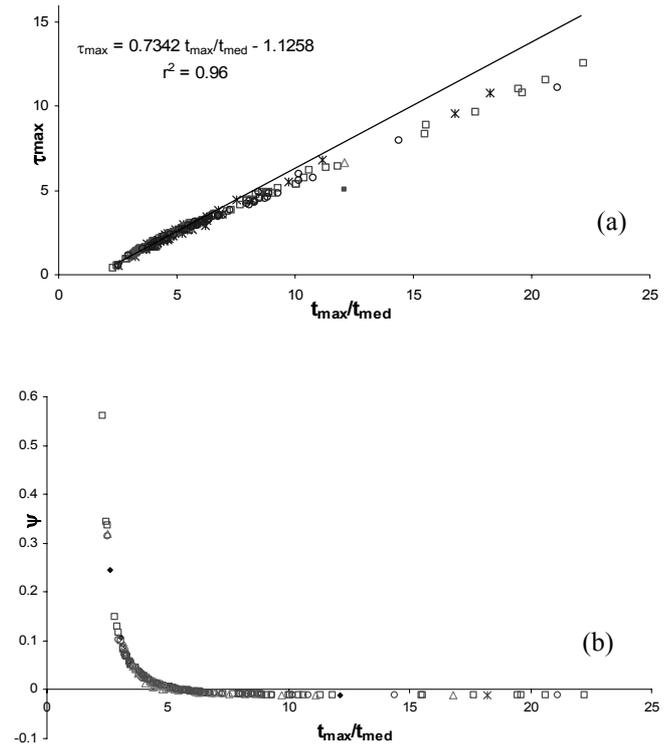


Fig. 1. Relación t_{max}/t_{med} vs. τ_{max} (a) y t_{max}/t_{med} vs. Ψ (b) para el conjunto de 288 medidas realizadas en cinco suelos distintos (representados por símbolos diferentes).

La línea de tendencia $\tau_{max} = 0.7342 t_{max}/t_{med} - 1.1258$ ($t_{max}/t_{med} < 5$) se obtiene del ajuste de medidas realizadas en suelos con distintas características y diferentes humedades de partida. Conocidos los valores de t_{med} y t_{max} , ésta proporciona por tanto un método rápido y sencillo para estimar τ_{max} , y en consecuencia K_s a través de $\tau_{max} = 8K_s t_{max} / (\pi^2 r_o)$. Nótese que t_i en principio no depende sólo de K_s y Ψ , sino también de $\Delta\theta$, según se deduce de la ec. (6). Sin embargo, la generalidad de la curva de ajuste obtenida parece contradecir esta hipótesis. Esto es así tan sólo en apariencia, y únicamente indica, como demostramos a continuación y más adelante mediante un análisis de sensibilidad en la sección 3.3, el poco peso del término $\Delta\theta$ en la ec. (6).

Al igual que hemos llevado a cabo para el conjunto de

valores $(t_{max}/t_{med}, \tau_{max})$, la siguiente ecuación resulta del ajuste de los puntos $(t_{max}/t_{med}, \Psi)$ mostrados en la Figura 1b, $\Psi = a + b\Theta + c\Theta^{-1} + d\Theta^2 + e\Theta^{-2} + f\Theta^3 + g\Theta^{-3} + h\Theta^4$ ($r^2 = 0.998$), donde $\Theta = \log(t_{max}/t_{med})$ y a, b, c, d, e, f, g, h son parámetros de ajuste (\log es logaritmo neperiano). Un ajuste razonablemente válido ($r^2=0.994$) se obtiene, sin embargo, con un modelo más sencillo de dos parámetros,

$$\log \Psi = a + b \sqrt{\frac{t_{med}}{t_{max}}} \quad (8)$$

donde $a = -13.518$ y $b = 19.691$, si consideramos sólo los pares de valores $(t_{max}/t_{med}, \Psi)$ con $\Psi > 0$. Como acabamos de discutir, resulta inesperado que a pesar de que t_i depende de $\Delta\theta$ como se deduce de la ec. (6), se obtiene una curva de ajuste independiente del incremento en humedad. Esta dependencia de t_i con $\Delta\theta$ se estudia a continuación haciendo uso de la ec. (6). La Figura 2 muestra la superposición de las parejas de puntos $(t_{max}/t_{med}, \Psi > 0)$ con la curva analítica $t_{max}/t_{med} = f(\Delta\theta, \Psi)$ que se obtiene a partir de (6), para dos incrementos de humedad distintos $\Delta\theta = 0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $\Delta\theta = 0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Como se puede observar en la Figura 2, un aumento de un orden de magnitud en el incremento de humedad, $\Delta\theta$, se traduce en una modificación muy pequeña en la forma de la curva, lo que explica la dependencia débil de $t_{max}/t_{med} = f(\Delta\theta, \Psi)$ con $\Delta\theta$, y por tanto el que sea posible representar ésta mediante una única curva independiente de $\Delta\theta$. Este resultado se discute con más detalle en la siguiente sección. Evidentemente, una expresión analítica del punto $t_{max}/t_{med} \approx 5$ en el que se alcanzan valores negativos de Ψ se obtiene de $t_{max}/t_{med} = f(\Delta\theta, 0)$.

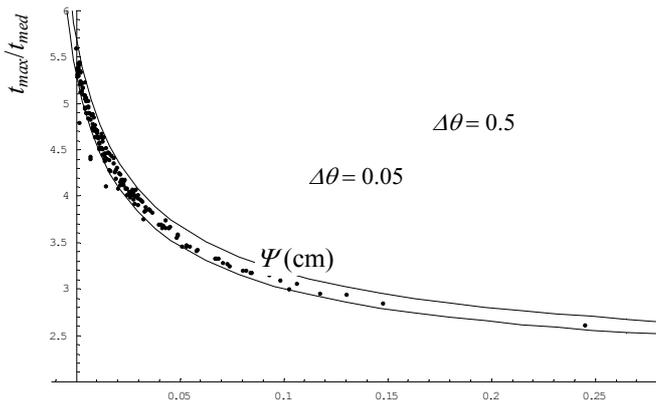


Fig. 2. Representación de los puntos $(t_{max}/t_{med}, \Psi > 0)$ y la curva $t_{max}/t_{med} = f(\Delta\theta, \Psi)$ obtenida a partir de la ec. (6) para dos incrementos de humedad distintos: $\Delta\theta = 0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (curva inferior) y $\Delta\theta = 0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (curva superior). Nótase que los ejes están invertidos con respecto a la Figura 1.

3.3. Análisis de sensibilidad

De los apartados anteriores queda claro que la relación t_{max}/t_{med} juega un papel decisivo en el comportamiento de K_s y Ψ , y por tanto de la sortividad $S \approx (2K_s \Psi \Delta\theta)^{1/2}$. Es por ello que dicha relación t_{max}/t_{med} se utiliza como parámetro de variación en el análisis de sensibilidad que se muestra a continuación. Previos trabajos (De Haro et al., 1998) han obviado la importancia de la relación t_{max}/t_{med} en el análisis de sensibilidad de K_s . La Figura 3 muestra los coeficientes de sensibilidad (porcentaje de variación con respecto al valor inicial) de K_s, Ψ y S para distintas relaciones de $t_{max}/t_{med} = 2.61, 3.74$ y 5.38 , haciendo variar ρ_o, t_{max}, t_{med} y $\Delta\theta$ en incrementos de $\pm 1\%$, dentro del intervalo $[-10\%, 10\%]$, alrededor del valor medido. Esto nos permite investigar con qué precisión se deben realizar las medidas de calado, tiempos máximo y medio así como de humedad de suelo. Nótese que las relaciones t_{max}/t_{med} elegidas son representativas de valores de K_s y Ψ lejos o próximos, respectivamente, de la región en la que Ψ pasa a ser negativa (véase Figura 1). Igualmente se incluye en el análisis de sensibilidad el efecto que tienen sobre el valor de K_s, Ψ y S las variaciones en el coeficiente $8/\pi^2$ (utilizado por Philip (1993) para ajustar el flujo “real” con el esférico del modelo). De esta forma es posible estudiar la sensibilidad de ésta hipótesis en la que está basado el modelo de Philip. Hay que señalar que este efecto no ha sido investigado anteriormente.

Varias conclusiones pueden obtenerse del análisis de sensibilidad presentado en la Figura 3: 1) Los tiempos máximo y medio son los que más influyen en el valor final de todas las variables estimadas (K_s, Ψ y S), pudiendo compensarse los errores de t_{max} y t_{med} , dado que las perturbaciones que causan en esas variables presentan signos opuestos (ver también De Haro et al., 1998); 2) La pendiente de la curva de sensibilidad a t_{max} y t_{med} se invierte en el caso de Ψ y S con respecto al efecto que producen sobre la estimación de K_s (comparar segunda y tercera fila de gráficos con la primera); 3) La sensibilidad de Ψ a t_{max} y t_{med} es mayor que la que presentan K_s y S , siendo en este último caso del mismo orden para valores de t_{max}/t_{med} bajos y medios (comparar primera y tercera fila de gráficos con la segunda); 4) La sensibilidad a la medida de $\Delta\theta$ en cualquiera de los casos es insignificante, lo que corrobora los resultados obtenidos en la Figura 2; 5) La sensibilidad al calado inicial (h_o) y al coeficiente $8/\pi^2$ es pequeña, sin embargo es relativamente importante en el caso de Ψ y S (no así de K_s) para valores de $t_{max}/t_{med} > 5$, próximos al punto en el que Ψ pasa a ser negativa; 6) Por último, la sensibilidad de Ψ y S , no así de K_s , a todos los parámetros (salvo a $\Delta\theta$) aumenta de forma drástica a medida que t_{max}/t_{med} crece, de tal manera que en la proximidad de $t_{max}/t_{med} \approx 5$, Ψ y S se muestran muy sensibles a variaciones mínimas ($< 2\%$) en los tiempos máximo y medio, el calado o el coeficiente $8/\pi^2$.

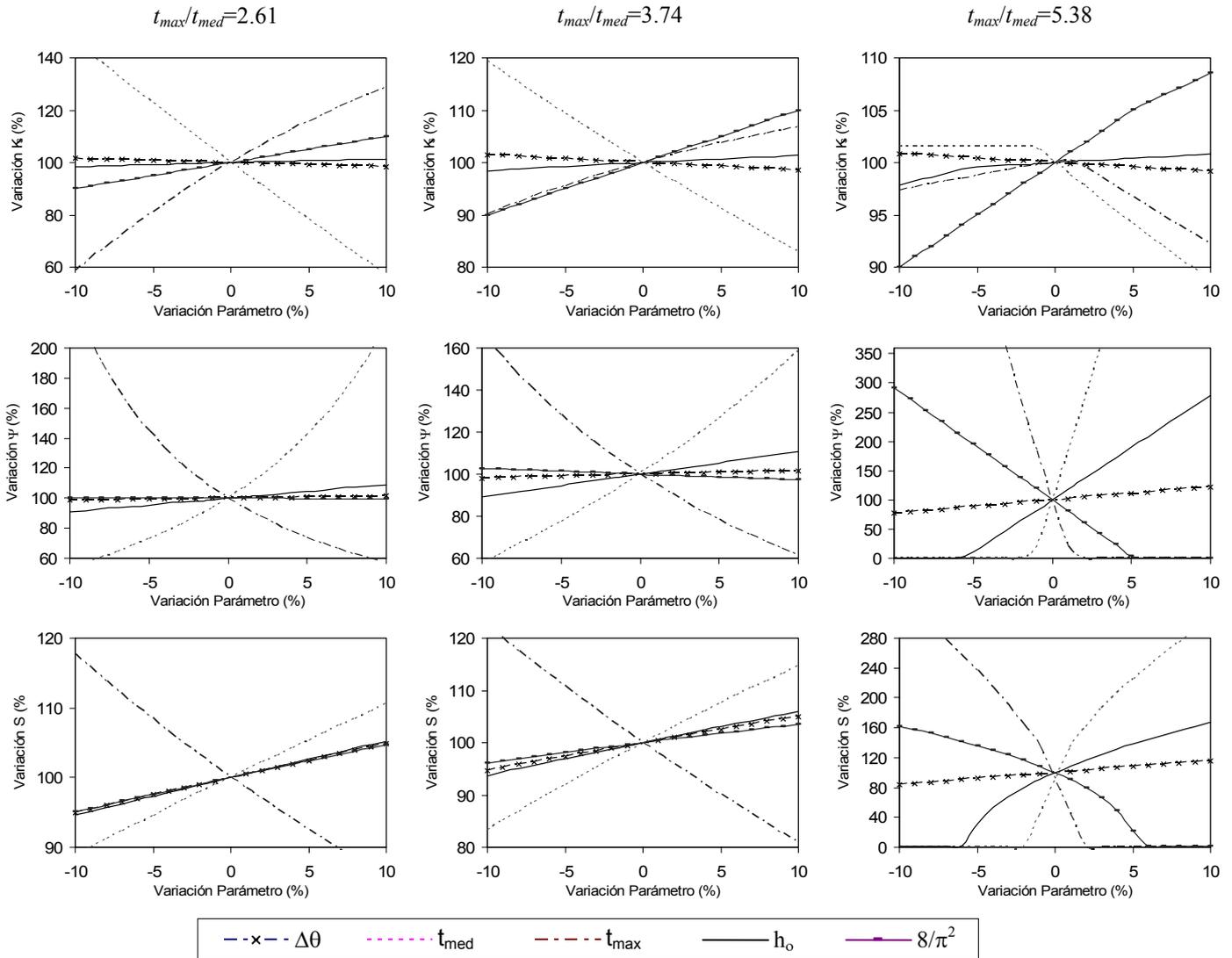


Fig. 3. Análisis de sensibilidad de K_s , Ψ y S (eje OY) ante variaciones de los parámetros h_o , t_{max} , t_{med} , $\Delta\theta$ y $8/\pi^2$ (representados por distintos símbolos) en el intervalo [-10%, 10%], para distintas relaciones $t_{max}/t_{med}=2.61, 3.74$ y 5.38 (de izquierda a derecha). En la última columna de gráficos las curvas en las que, a partir de un cierto valor de la variación en %, la pendiente se hace nula, corresponden al valor del parámetro para el que $\Psi < 0$ y por tanto el algoritmo no continua la búsqueda de soluciones. Nótese que el eje OY tiene diferente escala según los gráficos, para así mejorar su visualización.

4. Conclusiones

La medida de la sortividad puede proporcionar información relevante de propiedades hidráulicas y estructurales de un suelo, como son la difusividad, la curva de conductividad hidráulica y el “radio capilar macroscópico” medio. El permeámetro de Philip-Dunne permite estimar la sortividad a partir de mediciones en campo según $S \approx (2K_s \Psi \Delta\theta)^{1/2}$. Es por ello que el análisis de S , pasa por estudiar el comportamiento de las soluciones de K_s y $\Psi < 0$. El presente trabajo demuestra que la relación t_{max}/t_{med} rige la dinámica de dichas soluciones. Por un lado las siguientes relaciones

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= 0.7342 t_{max}/t_{med} - 1.1258, \\ \tau_{max} &= 8K_s t_{max}/(\pi^2 r_o), \\ \log \Psi &= -13.518 + 19.691(t_{max}/t_{med})^{-1/2}, \end{aligned}$$

permiten obtener de forma rápida y sencilla el valor de K_s y Ψ a partir de la relación de los tiempos medidos (t_{max}/t_{med}). Este método presenta ventajas con respecto a rutinas numéricas previas, más o menos elaboradas, principalmente en condiciones de campo, donde el uso de un PC portátil o calculadora programable pueden no ser viables (¡campaña de T. Dunne y E. Safran en el Amazonas!). Además no se requiere conocer $\Delta\theta$, para estimar K_s y Ψ , tarea que generalmente supone una gran inversión de tiempo y encarecimiento del método (Muñoz-Carpena et al., 2002). Las curvas de ajuste que se proporcionan son lo suficientemente exactas como para prescindir de dichos algoritmos numéricos, dado que en definitiva los valores de K_s y Ψ obtenidos deben ser considerados como una estimación del orden de magnitud en el que dichas propiedades del suelo se mueven (como se deduce de comparaciones previas con otros permeámetros). Como regla mnemotécnica la relación

aproximada $t_{max}/t_{med} < 5$, (estando relacionado este valor con las características de diseño, r_i y h_o , del permeámetro utilizado) nos permite descartar el ensayo en campo, de forma rápida, y repetirlo hasta obtener una relación de tiempos apropiada. Por otro lado la alta sensibilidad de la sortividad y la succión en el frente de avance, en la región próxima a $t_{max}/t_{med} \approx 5$, sugiere que las medidas de tiempos y calado deben realizarse con gran precisión. Todo ello refuerza la idea de la necesidad de automatización de las lecturas de t_{max}/t_{med} y h_o , ya explorada por previos autores, si el permeámetro de Philip-Dunne se pretende presentar como una alternativa sencilla a otros métodos para la medida de la sortividad en campo.

Con respecto al origen de valores de $\Psi < 0$, sin significado físico, y consecuentemente de medidas de K_s y S inválidas, se propone la siguiente hipótesis. Una relación $t_{max}/t_{med} \gg 5$, implica que el descenso del agua en el permeámetro no es de la forma esperada según las hipótesis del modelo de Philip. La variación del calado $h(t)$ con el tiempo no sigue por tanto la cinética que sugiere la ec. (3). Es más, dicha cinética del calado implica a su vez una variación del radio del bulbo húmedo $R(t)$ de la forma expresada en la ec. (3), y por tanto una relación $h(t)$, $R(t)$ del tipo indicado en la ec. (2). Como se discute en la sección 2, dicha ec. (2) se obtiene a partir de criterios conservativos de masa, lo que sugiere que un cociente $t_{max}/t_{med} \gg 5$ supone una violación del principio de conservación de masa, y en definitiva de la variación de $R(t)$ con el tiempo. La pregunta que se plantea por tanto es cómo se origina dicha violación. El modelo de Philip considera un flujo simétricamente esférico. Supongamos condiciones en las que el flujo “real” se aleja de dichas condiciones de esfericidad. Éste podría ser el caso de un suelo arcilloso en el que la conductividad en la dirección horizontal sea mayor que en la vertical, lo que implicaría un bulbo con geometría elipsoidal prolongada. Igualmente vías preferenciales o la presencia de piedras en un suelo facilitan el flujo gravitacional frente al capilar y darían lugar a un bulbo elongado en la dirección vertical. Ambas condiciones en las que la excentricidad, exc , ($-1 < exc < 1$) del bulbo húmedo se aleja fuertemente del valor nulo, $exc=0$, correspondiente a una esfera, implicarían una violación de la conservación de masa y consecuentemente de la ec. (2). En tales condiciones el análisis de Philip, desarrollado para el caso esférico, pierde validez, y exige por tanto un análisis más elaborado en el que la excentricidad del bulbo entre en juego. Esta hipótesis apoya la mayor sensibilidad de la estimación de Ψ y S al coeficiente $8/\pi^2$, propuesto por Philip para ajustar el flujo “real” al flujo esférico equivalente, en la región $t_{max}/t_{med} > 5$, como se demuestra en la Figura 3.

Agradecimientos. El trabajo ha sido en parte financiado con fondos del INIA-Plan Nacional de I+D Agrario (Proyecto SC99-024-C2). C. M. Regalado agradece a D. García Sinovas la información proporcionada sobre las medidas llevadas a cabo en el muestreo de las parcelas de Valladolid y el envío de una copia del artículo García Sinovas, D. et al. (2002).

Referencias

- Antolín Barriuso, R. 2001. Caracterización espacial de la conductividad hidráulica en parcelas experimentales mediante los permeámetros de Guelph y Philip-Dunne. Trabajo Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Palencia. España.
- De Haro, J.M., K. Vanderlinden, J.A. Gómez y J.V. Giráldez. 1998. Medida de la conductividad hidráulica saturada. p. 9-20. En: A. González, D.L. Orihuela, E. Romero y R. Garrido (eds.). *Progresos en la Investigación de la Zona No Saturada*. Collectanea, 11. Universidad de Huelva, Huelva, España.
- Elrick, D.E. y Reynolds, W.D. 1992. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. p. 1-24. En: G.C. Topp, W.D. Reynolds y R.E. Green (eds.). *Advances in Measurements of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA, Madison, WI.
- García-Sinovas, D., Regalado C. M., Muñoz-Carpena R. y Álvarez-Benedí, J. 2001. Comparación de los permeámetros de Guelph y Philip-Dunne para la estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo. p. 31-36. En: J.J. López Rodríguez y M. Quemada Sáenz-Badillos (eds.) *Temas de Investigación en Zona no saturada*, Universidad Pública de Navarra, Navarra, España.
- García-Sinovas, D., Andrade-Benítez, M.A., Regalado-Regalado C. M. y Álvarez-Benedí, J. 2002. Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica medida con el permeámetro de Philip-Dunne. En: J. Dafonte Dafonte, A. Paz González, E. Vidal Vázquez (eds.). p. 53-57. *Resúmenes de las I Jornadas sobre Agricultura de Precisión*. A Coruña, España.
- Gómez, J.A., J.V. Giráldez y E. Fereres. 2001. Analysis of Infiltration and Runoff in an Olive Orchard under No-Till. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 291-299.
- Informe INIA RTA01-097. 2002. Informe Anual de seguimiento Proyecto “Ajuste del balance hidrológico y simulación por ordenador del comportamiento de una cuenca forestal de laurisilva en el Parque Nacional de Garajonay”. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Muñoz-Carpena R. y Álvarez-Benedí, J. 2002. WPDUNNE v1.0. Gainesville-Valladolid: UF-ITACL. <http://carpena.ifas.ufl.edu>.
- Muñoz-Carpena, R., C.M. Regalado, J. Álvarez-Benedí y F. Bartoli. 2002. Field evaluation of the new Philip-Dunne permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity. *Soil Science*. 167: 9-24.
- Philip, J.R. 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosci.* 5: 215-296.
- Philip, J.R. 1987. The infiltration joining problem. *Water Resour. Res.* 23: 2239-2245.
- Philip, J.R. 1993. Approximate analysis of falling-head lined borehole permeameter. *Water Resour. Res.*, 29:3763-3768.
- Vieira, S.R., W.D. Reynolds y G.C. Topp. 1988. Spatial variability of hydraulic properties in a highly structured clay soil. *Proc. Symp. Validation of Flow and Transport Models for the Unsaturated Zone*, Ruidoso, NM.