

C-03-2023

Comunicación científico-técnica

Predicción y análisis del flujo del agua de riego en el suelo para una agricultura sostenible: 1. Caracterización del suelo a partir de ensayos en campo

Prediction and analysis of irrigation water flow in the soil for sustainable agriculture: 1. Soil characterization from field trials

Abyar, Hamid¹; Zubelzu, Sergio²; Sánchez, Raúl²; Juana, Luis²

- 1 Doctorando del Programa de Agroingeniería. ETS de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid. hamid.abyar@alumnos.upm.es.
- 2 Profesores del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad Politécnica de Madrid, en la ETS de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y Biosistemas..

Resumen:

Se presentan ensayos y métodos encaminados a caracterizar la infiltración de un suelo a partir de los ensayos en campo. Se analiza la influencia de la carga de agua y la infiltración por conductos preferentes. Se concluye que estos últimos son determinantes en el riego por superficie. En los ensayos con carga, la infiltración fue más de cuatro veces más rápida que en los de sin carga y la infiltración media por conductos principales en los ensayos realizado se estimó en 9 mm, aproximadamente el 7.5 % de la total. Se concluye que esta infiltración debe considerarse como variable aleatoria en los estudios de riego por superficie, si bien, considerando que se incrementa con la carga de agua. En los ensayos con carga además de mayor infiltración se ha obtenido una mayor variabilidad entre ensayos. Para considerar esta variabilidad aleatoria, descontada la indicada debida a los conductos principales, parece adecuado hacerlo en la conductividad hidráulica saturada. El coeficiente de variación de esta ha estado alrededor de 0.40 en los ensayos. Se propone una formulación para considerar el flujo en conductos principales con la ecuación de infiltración de Green-Ampt y métodos y medidas para determinar y discriminar entre sus parámetros. Asimismo, a partir de los parámetros determinados de la ecuación de Green-Ampt se indica cómo pueden estimarse el conjunto de parámetros de van Genuchten-Mualem, correspondientes a las curvas de retención de humedad y de conductividad hidráulica en subsaturación. Se discute y observa que varios parámetros pueden ajustar las observaciones y que para una discriminación completa de los parámetros es conveniente medidas complementarias, como puede ser algún contenido de humedad en la fase de redistribución.

Palabras clave: infiltración, Green-Ampt, parámetros de van Genuchten-Mualem, conductos principales.

Abstract:

Tests and methods aimed at characterizing soil infiltration based on field tests are presented. The influence of water load and infiltration through preferential conduits is analyzed and due to the importance obtained, in the tests carried out, it is concluded that they are determinants in surface irrigation. In the loaded tests, infiltration was more than four times faster than in the unloaded tests and the average infiltration through main ducts in the tests carried out was estimated at 9 mm. It is considered that this infiltration should be considered as a random variable in surface irrigation studies, although considering that it increases with the water load. In the load tests, in addition to greater infiltration, greater variability between tests has been obtained. To consider this random variability, discounting that indicated due to the main conduits, for simplicity it seems feasible to do so in the saturated hydraulic conductivity. The coefficient of variation of this in the tests is estimated to have been around 0.40. A formulation is proposed to consider the flow in main conduits instantly with the Green-Ampt infiltration equation and methods and measures to determine and discriminate between its parameters. Likewise, based on the parameters determined from the Green-Ampt equation, it is indicated how the set of van Genuchten-Mualem parameters corresponding to the moisture retention and hydraulic conductivity curves in subsaturation can be estimated. It is discussed and observed that several parameters can adjust the observations and that for a complete discrimination of the parameters, complementary measures are convenient, such as some moisture content in the redistribution phase.

Keywords: infiltration, Green-Ampt, van Genuchten-Mualem parameters, preferential flow

1. Introducción

A pesar de las sustanciales mejoras del riego gracias a la tecnología, el control del contenido de humedad y de la tensión matricial en el suelo es esencial mejorarlo para una agricultura competitiva y ambientalmente responsable.

La expresión de Green-Ampt (GA), que tiene base conceptual, incluye los aspectos más significativos de la infiltración: la conductividad hidráulica en saturación K_s , la altura de tensión de succión en el frente de avance π , la carga de agua a sobre la superficie; el contenido de humedad inicial θ y el de saturación del suelo θ_s , y la infiltración total acumulada i_a que junto con $\Delta\theta = \theta_s - \theta$ estimaría la posición del frente. La expresión de GA es aplicable a la fase de infiltración y, con modificaciones, a la de redistribución, así como para la aplicación desde líneas o desde puntos (goteros) (del Vigo *et al*, 2020, del Vigo *et al*, 2021). La carga de agua a , normalmente no es considerada, si bien, está presente en la infiltración de los riegos por superficie y puede tener un efecto importante, caso en los que a no pueda despreciarse frente a π , como ocurre muchos suelos.

En el caso de caminos preferentes, el flujo no será unidimensional, si bien, en un infiltrómetro, como los ensayados, al cabo de un rato suele saturarse el suelo hasta la profundidad del conducto y vuelve a una situación de flujo unidimensional. La presencia o no de grietas o conductos preferentes puede determinar que la infiltración con carga tenga un carácter aleatorio mayor que la infiltración en subsaturación, donde las grietas no conducirían el agua. Así, en riegos a presión no se suele saturar el suelo o, de saturarse, no suele haber una carga apreciable.

El objetivo es caracterizar las características físicas del suelo que determinan el flujo del agua a partir de ensayos de infiltración en campo. Se plantean dos niveles de complejidad: Uno determinando K_s y π , además de i_{a0} si los datos lo aconsejan, para usar la ecuación de GA y otro para estimar los parámetros del modelo de van Genuchten-Mualem. La caracterización de las diferencias de infiltración aleatorias de unos puntos sea otros requerirá de la repetición de ensayos y se aplicarán a la K_s y a i_{a0} , en situaciones de saturación. Esto último, se considera básico para considerar este tipo de variación en riegos por superficie. En riegos a presión la infiltración de unos puntos a otros está determinada fundamentalmente por la descarga de los emisores.

2. Materiales y métodos

2.1. Ensayos en infiltrómetro con una carga de agua que se va agotando con la infiltración

Se han realizado ensayos de infiltración en columnas de sección transversal $4 \times 4 = 16 \text{ cm}^2$ y 100 cm de longitud, 85 cm con suelo. Un lado de la columna es transparente con objeto de observar el frente de humectación. Este lado es desmontable de forma que después del ensayo está facilitada la toma de muestra para la medición de humedad a lo largo del perfil. En los experimentos se tomaron tramos de 5 cm que se llevaron a estufa. El contenido de humedad gravimétrico θ_g inicial se midió metiendo muestras de 10 g de suelo en estufa.

2.1.1. Ecuación de Green-Ampt con infiltración inicial y carga con descenso por la infiltración.

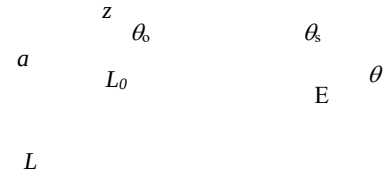
En el instante cero, se pone una lámina de agua o carga inicial a_0 y también en ese instante una lámina de agua i_{a0} se infiltra hasta una profundidad $L_0 = i_{a0}/\Delta\theta$ por conductos preferentes. Aplicando los

mismos conceptos que en GA, la situación posterior en un instante genérico t sería:

$$i_a = \Delta\theta \cdot L \rightarrow L = \frac{i_a}{\Delta\theta}$$

Aplicando la ecuación de Darcy, la velocidad de infiltración sería la conductividad hidráulica por el gradiente de potencial entre la entrada, con subíndice E, y el frente, con subíndice F, es decir:

$$i_i = K_s \cdot \frac{\phi_E - \phi_F}{L - L_0} = K_s \cdot \left(\frac{a + 0 - (-L - \tau_f)}{L - L_0} \right)$$



Descomponiendo: $i_a = i_a' + i_{a0}$, y la carga: $q_0 = a + i_{a0} + i_a'$, se obtiene:

$$i_i = K_s \cdot \left(1 + \frac{(a + \tau_f + L_0) \cdot \Delta\theta}{i_a'} \right) = K_s \cdot \left(1 - \Delta\theta + \frac{(a_0 + \tau_f + L_0 - i_{a0}) \cdot \Delta\theta}{i_a'} \right) = \frac{di_a'}{dt}$$

Figura 1. Situación del agua en un instante t para la hipótesis considerada para extender la expresión de Green-Ampt.

Y al integrar se obtiene la relación infiltración-tiempo:

$$t = \frac{1}{K_s \cdot (1 - \Delta\theta)} \cdot \left(i_a - i_{a0} - \frac{(a_0 + \tau_f + L_0 - i_{a0}) \cdot \Delta\theta}{(1 - \Delta\theta)} \cdot \ln \left(1 + \frac{(1 - \Delta\theta) \cdot (i_a - i_{a0})}{(a_0 + \tau_f + L_0 - i_{a0}) \cdot \Delta\theta} \right) \right) \quad (1)$$

En los ensayos, conocidos a_0 y $\Delta\theta$, midiendo los valores de t - a , pueden determinarse directamente los valores de t - i_a , ya que $i_a = a_0 - a$. Los parámetros a determinar son: K_s , τ_f y i_{a0} . Con objeto de simplificar las expresiones, se trabaja con variables adimensionales (con superíndice *), dividiendo por valores de referencia o escalas, con subíndice e ($t^* = t/T_e$, $i_a^* = i_a/I_{ae}$, ...). De esta forma, las curvas resultantes dependen únicamente de $i_{a0}^* = i_{a0}/I_{ae}$, siendo la curva $i_a^* - i_{a0}^*$ única en función de t^* , según las expresiones que siguen (Ecuaciones 1A):

$$t^* = i_a^* - i_{a0}^* - \ln(1 + i_a^* - i_{a0}^*) \quad \text{Con:} \quad I_{ae} = \frac{(a_0 + \tau_f + L_0 - i_{a0}) \cdot \Delta\theta}{1 - \Delta\theta} \quad T_e = \frac{I_{ae}}{K_s \cdot (1 - \Delta\theta)} \quad (1A)$$

En este caso, los parámetros que determinan la curva de infiltración con la que comparar con la observada serían T_e , I_{ae} y i_{a0} . En el caso de conocer i_{a0} , caso que sea distinto de cero, para cada valor de I_{ae} puede determinarse el valor de T_e por mínimos cuadrados (entre los t_i observados y los estimados $t_{ie} = t_i^* \cdot T_e = \dots$), resultando la siguiente expresión:

$$T_e = \frac{\sum t_i \cdot (i_a^* - i_{a0}^* - \ln(1 + i_a^* - i_{a0}^*))}{\sum (i_a^* - i_{a0}^* - \ln(1 + i_a^* - i_{a0}^*))^2} \quad (2)$$

Finalmente, se determinan, los parámetros τ_f y K_s con las relaciones (1B):

$$\tau_f = \frac{I_{ae} \cdot (1 - \Delta\theta)}{\Delta\theta} - a_0 - L_0 + i_{a0} \quad K_s = \frac{I_{ae}}{T_e \cdot (1 - \Delta\theta)} \quad (3)$$

Obsérvese que el suponer i_{a0} y I_{ae} para determinar T_e por mínimos cuadrados puede ser sustituido por suponer i_{a0} y τ_f , y determinar por mínimos cuadrados K_s y también determinar la suma de cuadrados que produce el ajuste con dichos parámetros y haciendo barridos de las variables i_{a0} y de τ_f obtener los tres parámetros que hacen menor los mínimos cuadrados. En cualquier caso, cualquier procedimiento de ajuste deberá de tener en cuenta una posible elevada correlación entre variables en determinados rangos.

2.1.2. Ecuación de Green-Ampt con infiltración inicial instantánea y carga constante.

Las expresiones anteriores se refieren a una infiltración con una carga que se va reduciendo con la infiltración y con una infiltración inicial en el instante cero. En el caso de que la carga a sea constante (1) pasa a (1c):

$$t = \frac{1}{K_s} \cdot \left(i_a - i_{a0} - (a + L_0 + \tau_f) \cdot \Delta\theta \cdot \ln \left(1 + \frac{i_a - i_{a0}}{(a + L_0 + \tau_f) \cdot \Delta\theta} \right) \right) \quad (1c)$$

La expresión (1A) es válida pero las escalas cambian:

$$t^* = i_a^* - i_{a0}^* - \ln(1 + i_a^* - i_{a0}^*) \quad \text{Con:} \quad I_{ae} = (a + L_0 + \tau_f) \cdot \Delta\theta \quad T_e = \frac{I_{ae}}{K_s} \quad (1Ac)$$

De las nuevas escalas se despejarían los parámetros:

$$\tau_f = \frac{I_{ae}}{\Delta\theta} - a - L_0 \quad K_s = \frac{I_{ae}}{T_e} \quad (3c)$$

2.1.3. Parámetros de van Genuchten-Mualem.

Los ensayos realizados han sido simulados mediante la integración de las ecuaciones de la filtración, con los parámetros de van Genuchten-Mualem para las expresiones que definen las curvas de la tensión matricial h y la conductividad hidráulica K en función del contenido de humedad θ según:

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + (\alpha \cdot h)^n \right)^{-m} = \left(1 + h^{*n} \right)^{-m} \quad (4)$$

$$\frac{K}{K_s} = \theta^{*\lambda} \cdot \left(1 - \left(1 - \theta^{*1/m} \right)^m \right)^2 \quad (5)$$

En la primera interviene, además del contenido de humedad a saturación θ_s , el contenido de humedad residual θ_r , que no es posible eliminar, el parámetro α y los exponentes n y m (en la mayoría de las ocasiones se supone $m = 1-1/n$). Para la segunda, además del exponente m anterior, aparece la conductividad hidráulica en saturación K_s y el exponente λ que, en la mayoría de las ocasiones se supone 0.5. Como consecuencia, si se conocen θ_s y θ_r , $m = 1-1/n$ y $\lambda = 0.5$, es necesario estimar tres parámetros: α , K_s y n o m .

Se considera la expresión integral de Neuman (1976) para determinar τ_f :

$$\tau_f = \frac{1}{K_s} \cdot \int_{h(\theta_o)}^{h(\theta_s)} K \cdot dh \quad (6)$$

Para cada exponente m puede determinarse el valor de α que permite obtener el valor de τ . La discriminación de m (α se determina conocido m) nuevamente puede ayudarse con las diferencias entre valores observados y estimados de la infiltración. Con menores valores de m salen infiltraciones con más curvatura (si se iguala en punto final la de menor m estaría por arriba), pero puede resultar difícil pues los datos observados no suelen ajustarse a las curvas perfectamente. En este sentido puede ser conveniente conocer algún dato de la fase de redistribución (menor a menor m) o del potencial matricial h para algún contenido de humedad θ .

3. Resultados y discusión

3.1. Ensayos de infiltración en columnas con carga. Ajuste a Green-Ampt.

Los datos usados se muestran en la tabla 1. Se han incorporado también los parámetros i_{a0} , K_s y τ_i , obtenidos haciendo mínima la suma de las diferencias al cuadrado SC entre los tiempos observados y estimados con la ecuación (1). En la figura 2 se recogen los datos de infiltración observados y los ajustados.

Los resultados mostrarían que en los dos ensayos con $a_0 = 15$ cm y uno con $a_0 = 10$ cm, han tenido una infiltración inicial apreciable, observada claramente de forma visual en el ensayo 2A. También que hay una variación clara entre ensayos con la misma carga y, si bien, en los ensayos de mayor carga han infiltrado más, hay uno con carga $a_0 = 10$ cm, 3B, que ha infiltrado más que otro con carga 15 cm, 3A, y uno con carga 5 cm, 2C, más que otro con carga 10 cm, 2B.

Datos medios considerados comunes:						
$\theta_0 \cong 0.030$; $\theta_s \cong 0.505$; $\theta(0, 1d) \cong 0.37$						
Ensayo	1B	2A	2B	2C	3A	3B
a_0 (cm)	10	15	10	5	15	10
t (min)	i_0 (cm)					
0	0	0	0	0	0	0
0.5	1.6	2.5	0.8	1.3	1.8	3
1	2.2	4	1.5	2	3.1	4.2
2	3	5.8	2	2.6	4.8	5.2
3	3.5	7.1	2.7	3.1	5.3	6.2
5	5.0	8.2	3.4	4.2	6.8	7.7
7	5.8	9.2	4.1		7.8	9
10	6.9	10.6	5		8.8	
15	8.6	12.3	6.3		10.5	
20		13.7	7.6		12	
25			8.5		13.5	
t_f (min)	19.6	24.8	29	6.4	29.5	9.5

Tabla 1. Datos de infiltración usados y ajuste SOLVER.

Ensayo	1B	2A	2B	2C	3A	3B	
i_{a0} (cm)	0.00	2.58	0.00	0.26	1.10	0.98	
K_s (cm/min)	0.0844	0.0003	0.1752	0.3229	0.0014	0.0018	
τ_i (cm)	45.2	25961	1.6	1.9	4509	5204	Σ SC
SC (min ²)	0.25	1.04	0.46	0.06	1.18	0.03	3.01

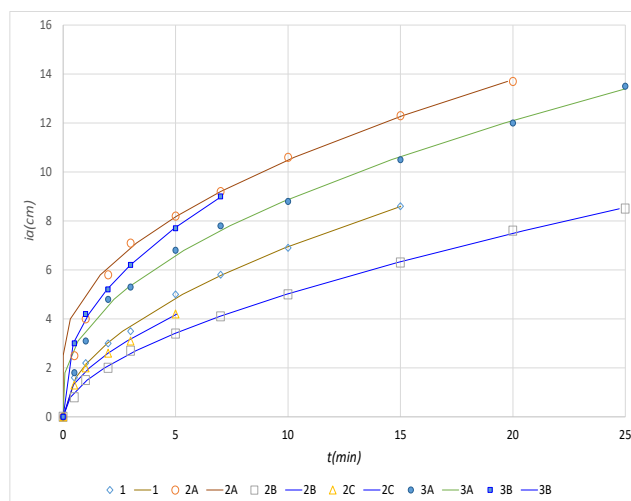


Figura 2. Ajuste y parámetros correspondientes al mínimo SC entre tiempos observados y estimados usando la expresión (1).

En la figura 3a, se muestra, para el primer ensayo la raíz del error cuadrático medio, REMC (min), en función de los valores de τ_i y K_s que se seleccione, considerando un $i_{a0} = 0$. Asimismo, en línea de punto y raya línea valor de K_s que hace mínimo REMC para cada τ_i , calculado con la expresión 2. En la figura 3b se detallan los errores a lo largo de esta curva de menor REMC. Resultados conceptualmente similares se obtienen en el resto de ensayos.

Se observa que hay un punto óptimo, si bien, hay pequeñas diferencias del error a lo largo de la curva óptima. De desplazarnos perpendicular a la curva óptima los errores aumentan de forma más importante. Cabe concluir que en la curva denominada como óptima, en la zona de valores de τ_f menores de 10 ($\log_{10} \tau_f = 1$) el valor de K_s es mayor y cambia menos.

En las figuras 3 se ha asumido un valor de $i_{a0} = 0$ en la expresión (2). Si el proceso de cada ensayo se repite para un barrido de valores de i_{a0} se pueden obtener los valores de estos que, en cada ensayo, permite un menor error cuadrático medio, ver figura 4. Se observa que en el ensayo 2A, pero también en el 3A y 3B. Es conveniente la consideración de valores de i_{a0} para obtener mejores ajustes. Los mínimos de la figura 4 tienen asociados también un valor de τ_f y K_s , que se muestran en la tabla 2.

El aumento de i_{a0} desplaza hacia abajo la curva denominada óptima de forma que puede determinarse los valores de los i_{a0} para que todos los ensayos se corten en un punto con el valor de τ_f y K_s , siempre que estén por debajo de las curvas que resultaría para $i_{a0} = 0$. En las figuras 5, se representa el resultado para dos valores de τ_f y el valor más alto de K_s (al menos un ensayo tiene $i_{a0} = 0$). Se puede hacer un barrido para todos los τ_f y así hacer otra curva óptima del conjunto y buscar el óptimo en ella. Pero con estos puntos con un único valor de τ_f y K_s no se ajustan bien las observaciones de los ensayos realizados.

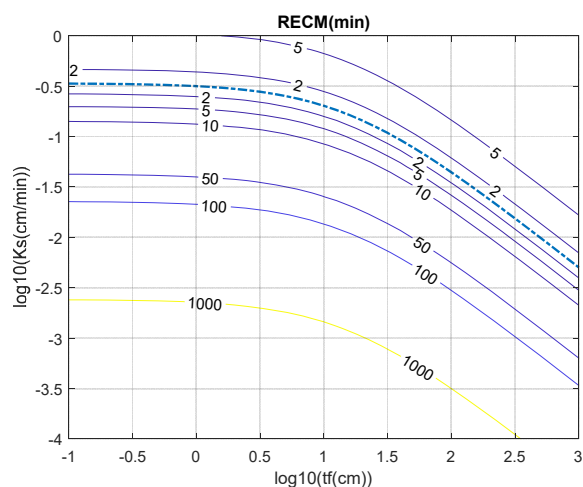


Figura 3a. REMC en el ensayo 1 en función de los logaritmos decimales de τ_f y K_s y valor de K_s que lo hace mínimo para cada τ_f .

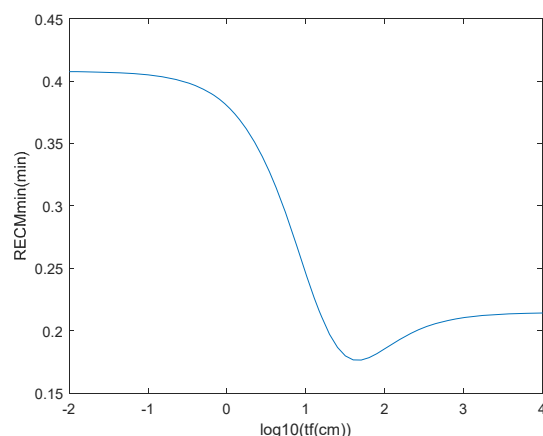
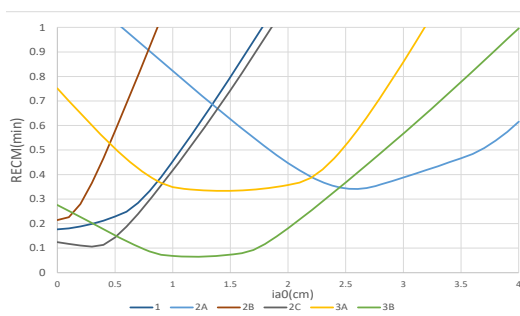


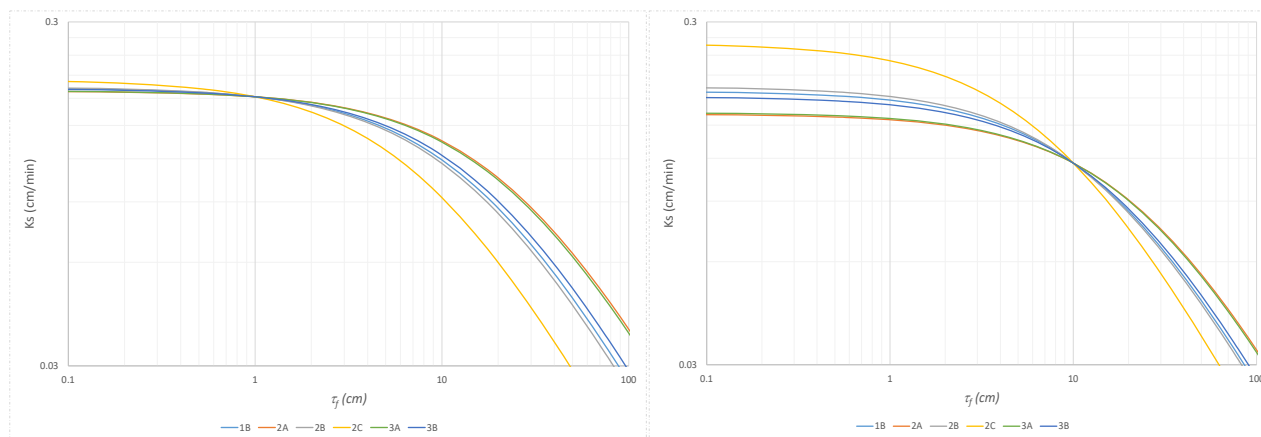
Figura 3b. REMC en el ensayo 1 en función del logaritmo decimal de τ_f , para el valor de K_s que lo hace mínimo.



Ensayo	1B	2A	2B	2C	3A	3B	Media
a_0 (cm)	10	15	10	5	15	10	
i_{a0} (cm)	0.00	2.60	0.00	0.30	1.40	1.20	0.92
K_s (cm/min)	0.0847	0.0007	0.1762	0.3794	0.0736	0.1944	ΣSC
τ_f (cm)	45.0	10000	1.5	0.3	57.5	30.0	
SC (min ²)	0.25	1.05	0.46	0.06	1.11	0.03	2.95

Figura 4. RECM, que puede obtenerse en cada ensayo en función del valor considerado de i_{a0} .

Tabla 2. Valores de i_{a0} que permiten obtener un valor mínimo de SC en los ensayos con la expresión (1) y valores τ_j y K_s con los que se consiguen.



a) $\tau_j = 1 \text{ cm}$, $K_s = 0.182 \text{ cm/min}$,
 $\Sigma SC = 21 \text{ min}^2$, $RECM_m = 1.63 \text{ min}$
 $i_{a0} = 1.63, 3.97, 0.00, 1.21, 2.63 \text{ y } 3.97$

b) $\tau_j = 10 \text{ cm}$, $K_s = 0.116 \text{ cm/min}$,
 $\Sigma SC = 37 \text{ min}^2$, $RECM_m = 1.70 \text{ min}$
 $i_{a0} = 1.70, 4.55, 0.00, 0.89, 3.24 \text{ y } 4.10$.

Figura 5. Curvas óptimas para que se corten en el τ_j deseado, a) $\tau_j = 1$ y b) $\tau_j = 10$.

Como consecuencia, nos quedaremos con las curvas óptima de cada ensayo para los i_{a0} de la tabla 2 y determinaremos los K_{si} de cada ensayo para un π único, figura 6. En ella, también se ha representado para cada π el $RECM_m$ y el coeficiente de variación de las conductividades CV_{Ks} de los 6 ensayos para el τ_j correspondiente.

Se observa que, hay un valor de τ_j que hace mínimo la RECM, pero las diferencia en el error en el rango representado no son grandes. Asimismo, hay un valor distinto que hace mínimo el CV_{Ks} pero que, igualmente, las diferencias no son muy importantes.

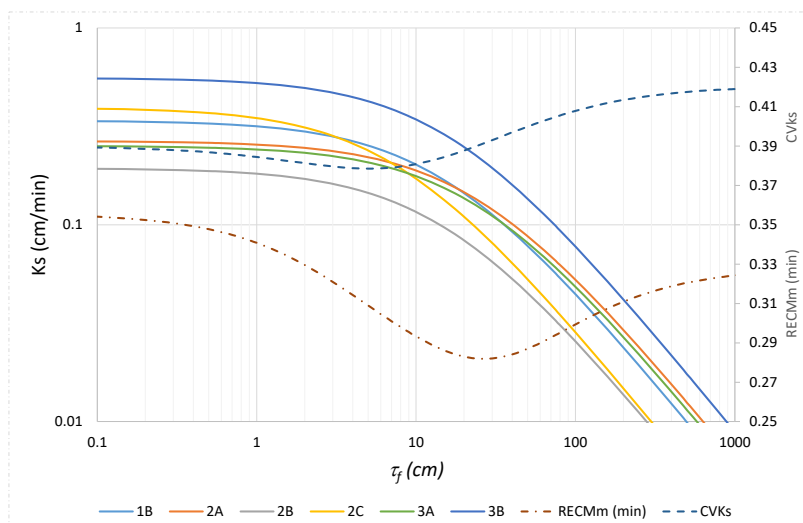


Figura 6. Conductividad hidráulica K_s obtenida por mínimos cuadrados en función de τ_j , valor medio de la raíz cuadrática media de los ensayos $RECM_m$ y coeficiente de variación de los K_s de los distintos ensayos para cada τ_j , CV_{Ks} .

El valor del mínimo error, $RECM_m = 0.28$ min, se produce para $\tau_f = 27.5$ cm, la caracterización de los ensayos sería la de la tabla 3 y los ajustes con ellos se muestran en la figura 7. La caracterización correspondiente al mínimo del CV_{K_s} y los detalles del ajuste también se presentan en la misma tabla y figura. Los ajustes parecen razonables y los valores de los parámetros no difieren demasiado.

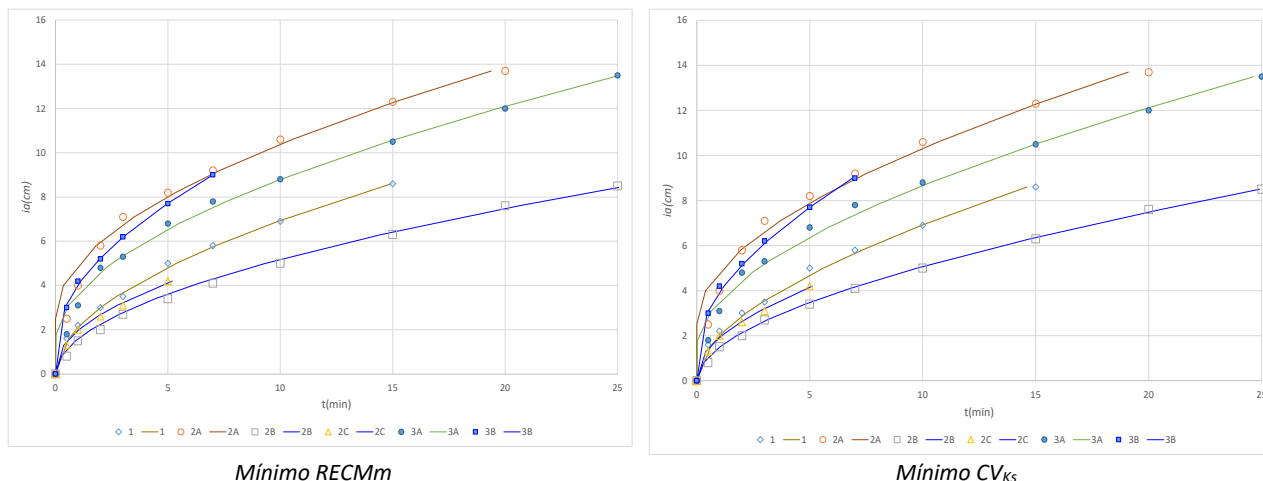


Figura 7. Datos de infiltración y curvas de ajuste obtenidas con los parámetros de la tabla 3 y la expresión 1.

Datos medios considerados comunes: $\theta_0 \cong 0.030$; $\theta_s \cong 0.505$; $\theta(0, 1d) \cong 0.37$								
Ensayo	1B	2A	2B	2C	3A	3B		
a_0 (cm)	10	15	10	5	15	10	i_{a0m}	$CV_{i_{a0}}$
i_{a0} (cm)	0.00	2.60	0.00	0.30	1.40	1.20	0.92	1.1
Mínimo $RECM_m$							$K_s m$	CV_{K_s}
K_s (cm/min)	0.1193	0.1253	0.0687	0.0865	0.1164	0.2055	0.1203	0.388
τ_f (cm)	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	$\sum SC$	
SC (min ²)	0.27	1.78	2.25	0.14	1.25	0.03	5.72	
Mínimo CV_{K_s}								
K_s (cm/min)	0.2529	0.2208	0.1453	0.2386	0.2077	0.4245	0.2483	0.379
τ_f (cm)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	$\sum SC$	
SC (min ²)	0.73	2.95	0.60	0.08	2.51	0.07	6.94	

Tabla 3. Valores de los parámetros propuestos para caracterizar los ensayos.

Cabe concluir que, para un rango amplio de valores de τ_f , si se ajusta K_s para cada ensayo se reproducen razonablemente las observaciones de la infiltración. Pero, para la discriminación entre τ_f y K_s conviene usar información adicional, como puede ser un contenido de humedad después de un periodo de redistribución.

3.2. Infiltración. Ajuste de los parámetros de van Genuchten-Mualem.

Como se indicó en la metodología, de conocer los contenidos de humedad indicados y la conductividad hidráulica, de suponer un valor de m , con la ecuación de Neuman, se puede determinar el valor de α para obtener el τ_f seleccionado. Y, con todos los parámetros, puede simularse los ensayos y compararlos con los observaciones. No obstante, dado que la expresión de Green-Ampt mayoraría un poco la infiltración adimensional en los tiempos intermedios (Sayah *et al*,

2016), para obtener ajustes como los anteriores, conviene, como primera aproximación incrementar K_s alrededor de un 10 %.

De proceder en el primer ensayo con los parámetros de la tabla 3 correspondientes al mínimo de RECM para reproducir adecuadamente las observaciones de contenido de humedad y de profundidad del frente es necesario suponer un m demasiado bajo. De adoptar los parámetros correspondientes al mínimo de CV_{Ks} , con el ya incrementado valor de $K_s = 0.2529 \cdot 1.1$, es igualmente necesario adoptar un valor bajo, pero en menor medida. Así con $m = 0.075$, resulta $\alpha = 0.0048$, y se obtienen los ajustes de la figura 8.

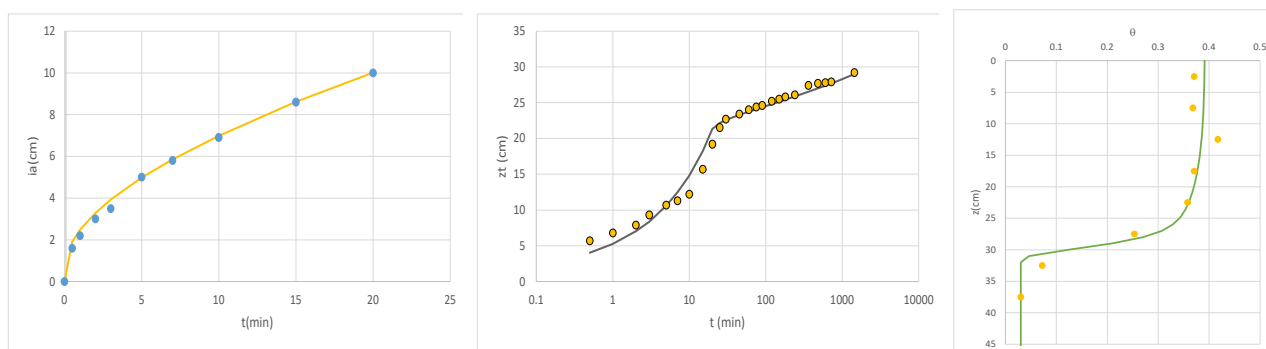


Figura 8. Ajustes de la infiltración, profundidad alcanzada y distribución de humedad un día después en el ensayo 1.

3.3. Primeros ensayos con carga muy pequeña.

Se han realizado dos ensayos abriendo o cerrando la alimentación de un gotero con objeto de que la carga en el suelo estuviese siempre alrededor de 1 o 2 mm. El primero hasta completar una infiltración equivalente a 15 cm, ensayo S1A, y otro con una de 10 cm, S1B.

Lo primero que cabe destacar es que la infiltración ha sido considerablemente más lenta. Si en los ensayos con carga los 10 o 15 cm se infiltraban en media hora o menos, en estos el primero tardó 145 min y el segundo 63.5 min. Destacar también que las diferencias entre ambos ensayos fueron considerablemente más pequeñas, lo que apunta a repetibilidad (ver figura 9).

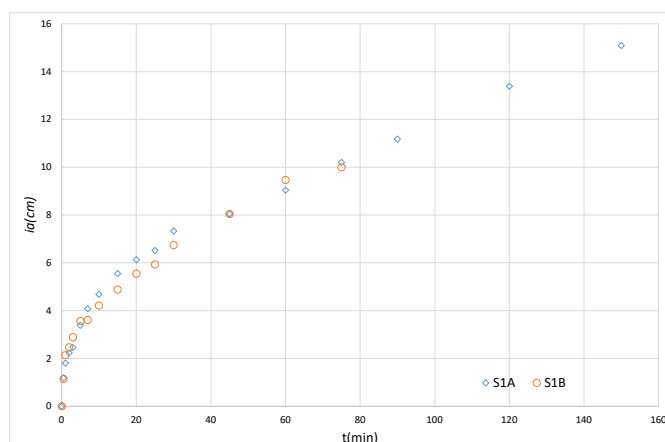


Figura 9. Infiltración observada en los ensayos S1A y S1B

4. Conclusiones

Parece viable caracterizar el suelo en cuando su infiltración a partir de observaciones en campo basadas en los ensayos planteados pues además cabe esperar que la información irá mejorando progresivamente.

La infiltración por conductos preferentes parece desprenderse que son determinantes en el riego por superficie y que deben considerarse. La infiltración con carga es mayor, lo que era esperable, pero, sobre todo, la variabilidad entre ensayos es mayor por comparación con los realizados sin carga. Para considerar esta variabilidad aleatoria, descontada la debida a los conductos principales, se propone hacerlo en la conductividad hidráulica.

Referencias

1. del Vigo A, Zubelzu S, Juana L. 2020. "Numerical routine for soil water dynamics from trickle irrigation". *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, 83: 371-385. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.01.058>
2. del Vigo A, Zubelzu S, Juana L. 2021. "Infiltration models and soil characterization for hemispherical and disc sources based on Green-Ampt assumptions". *Journal of Hydrology*, Elsevier, 595 (2021) 125966, 14 pp. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125966>.
3. Neuman S.P. (1976). Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt. *Water Resour. Res.* 12(3), 564-565.
4. Sayah B, Gil-Rodríguez, M., Juana, L., 2016. Development of one-dimensional solutions for water infiltration. Analysis and parameters estimation. *Journal of Hydrology*. 535, 226-234.