

Simulación de la infiltración en suelos

Horst Blaesig Schlotfeldt
Raúl Arrijo Juárez

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Se estudia la infiltración de agua en suelos parcialmente saturados aplicando la ecuación de Richards restringida al flujo en dirección vertical cuya incógnita es el potencial matricial. Puesto que la humedad del suelo y la conductividad hidráulica son funciones unívocas del potencial matricial altamente no lineales, no hay solución analítica y se resuelve la ecuación numéricamente con un esquema implícito de diferencias finitas que conduce a un sistema de ecuaciones lineales, el cual se resuelve con el algoritmo de Newton-Raphson y dos condiciones de frontera iniciales superior e inferior. Para ello es necesario discretizar el perfil de suelo considerado en $n + 1$ elementos de espesor dz , para cada uno de los cuales se calcula la conductividad hidráulica a la mitad del elemento como el promedio de las conductividades del elemento en consideración y del siguiente en dirección vertical hacia abajo, así como el gasto en función de esta conductividad hidráulica. Se calculan tantas funciones hidráulicas como horizontes se tengan. El sistema de ecuaciones se resuelve para un número máximo de iteraciones y en caso de no convergencia, se divide por dos el intervalo de tiempo, repitiendo el procedimiento con los valores iniciales. El algoritmo expuesto se aplica a dos suelos homogéneos y se presentan los resultados obtenidos. Se reportan resultados comparables (Anlauf et al 1988) pero todavía deben contrastarse con mediciones.

Palabras clave: infiltración en suelos, simulación, suelos parcialmente saturados, ecuación de Richards, potencial matricial, humedad del suelo, algoritmo de Newton-Raphson.

Introducción

Tradicionalmente, la investigación geohidrológica ha estado orientada al estudio del flujo en medios porosos saturados, el cual se describe satisfactoriamente a partir de la ecuación de Darcy. Mayor atención, sin embargo, debe prestarse también al flujo parcialmente saturado en los procesos de mojado y de secado de los suelos, que son de mayor importancia para el diseño de las obras de irrigación y de drenaje agrícola.

En este trabajo se propone un algoritmo para modelar la infiltración del agua en el suelo, apoyándose en un enfoque matemático formalmente correcto y al mismo tiempo sencillo y eficiente. Para ello se utiliza un esquema numérico de diferencias finitas para resolver la conocida ecuación de Richards para el flujo en medios porosos no saturados. Para encontrar la solución de esta ecuación se utiliza el método de Newton-Raphson, que es tal vez el método más

empleado para localizar raíces, y el cual se generaliza aquí para la solución de un sistema de ecuaciones, cuyas incógnitas son los contenidos de humedad para diferentes puntos del medio poroso. El programa permite trabajar con perfiles de suelo homogéneos así como estratificados, estableciendo funciones hidráulicas para simular las condiciones de frontera superior e inferior y aplicando un mecanismo apropiado para inducir la convergencia. Para ilustrar el uso del programa y a manera de ejemplo se presenta el caso de infiltración en suelos arenosos y arcillosos.

Solución numérica de la ecuación de flujo de agua

La infiltración del agua en el suelo puede describirse como un movimiento unidimensional cuyo comportamiento obedece a la ecuación de Richards en tres di-

mensionales, restringida a la ordenada vertical (Richter, 1986):

$$s\Theta/st = -s\{k(s\Phi/sz - 1)\}/sz + A(t, z) \quad (1)$$

donde

- k = conductividad hidráulica (cm/d)
- Φ = potencial matricial (cm)
- z = profundidad medida desde la superficie del suelo (cm)
- Θ = contenido volumétrico de agua del suelo (%)
- t = Tiempo (d)
- A = adiciones o extracciones externas como función de la profundidad y del tiempo (1/d).

Puesto que Θ y k deben considerarse como funciones del potencial matricial, se trata aquí de una ecuación cuya incógnita es Θ .

Formalmente la ecuación (1) es una ecuación diferencial parabólica de segundo orden. Las ecuaciones diferenciales parciales parabólicas se caracterizan en el caso más simple porque tienen una dimensión en el espacio y su valor varía con el tiempo (esto es, representan un estado no permanente). A diferencia de las ecuaciones elípticas, las ecuaciones diferenciales parciales *EDP* parabólicas están acotadas con respecto a su dimensión espacial pero no con respecto al tiempo. Debido a su naturaleza variable con el tiempo, las soluciones para este tipo de ecuaciones pueden presentar problemas de estabilidad. Una forma de resolver la ecuación (1) numéricamente, es sustituir las derivadas parciales por diferencias finitas, y la ecuación resultante se resuelve por uno de dos enfoques: explícito o implícito.

Los métodos explícitos presentan problemas de convergencia y estabilidad debido a que los intervalos diferenciales de espacio y tiempo que se usen dx y dt deberán estar relacionados en una proporción aritmética adecuada para minimizar errores de truncamiento y evitar oscilaciones. Estos problemas pueden resolverse si se emplea un método implícito, en el cual la derivada espacial se aproxima con diferencias finitas para un nivel de tiempo futuro, mientras que en el enfoque explícito la derivada espacial se aproxima para tiempo presente, por lo que no es posible resolver la *EDP* parabólica para una sola incógnita, sino que contiene varias incógnitas y deberá establecerse un sistema de ecuaciones cuya solución es simultánea. El enfoque implícito requiere de condiciones de frontera para poder ser resuelto, debido a que se generan más incógnitas que ecuaciones matemáticamente, la solución para un esquema implícito es más compleja que para un esquema explícito.

Aunque el método implícito tiende a ser estable y convergente, presenta un defecto de aproximación en el tiempo que por diferencias tiene una exactitud de primer orden mientras que la aproximación en el espacio por diferencias tiene una exactitud de segundo orden. Esto se puede solucionar con el uso de algoritmos más complejos matemáticamente, tal como la aproximación de Crank-Nicolson. La *EDP* parabólica (1) puede ser generalizada a dos dimensiones en el espacio, siendo la principal limitación una mayor complejidad matemática tanto en la formulación como en la solución.

En este sentido la ecuación (1) tiene una estructura parecida a la ecuación general de procesos de transporte. Los procedimientos de solución ahí empleados son sin embargo aquí de un valor limitado, puesto que Θ y k son funciones altamente no lineales del potencial matricial Φ , por lo que no existen para la ecuación de Richards soluciones analíticas exactas, sino solamente soluciones cuasi-analíticas desarrollos en serie, (Philipp, 1957), las cuales sin embargo son válidas sólo para condiciones de frontera muy restringidas y ante todo sirven para probar la validez de las soluciones numéricas (Richter, 1986).

La ecuación del flujo de agua en el suelo puede resolverse numéricamente con el procedimiento de Newton-Raphson (Remson *et al*, 1971) el cual permite obtener una solución numérica con el uso de una aproximación por diferencias finitas totalmente implícita bajo la suposición de que las relaciones $\Theta(\Phi)$ y $k(\Phi)$ son funciones unívocas del potencial matricial Φ sin considerar el fenómeno de histéresis.

Para una descripción más detallada deben definirse primero las condiciones de frontera superior e inferior del perfil de suelo considerado. Mientras no se llegue a la saturación, en la superficie del suelo se infiltrará la precipitación total q_N . En estado de saturación, el potencial matricial Φ no deberá sobrepasar un valor dado PH , que representa la altura máxima de estancamiento de agua en la superficie del suelo.

$$\begin{aligned} &\text{para } z = 0; t > 0 : \\ &q_N = k(s\Phi/sz - 1) \text{ y } \Phi \leq PH \end{aligned} \quad (2)$$

Para la frontera inferior L , deberá establecerse ya sea un potencial matricial Φ_L es decir:

$$\text{para } z = L ; t > 0 : \quad \Phi_L = \phi \quad (3)$$

o, alternativamente, debe simularse la existencia de una capa impermeable. Esto significa

$$\text{para } z = L ; t > 0 : \quad q_w = 0 \quad (4)$$

Para la formulación por diferencias finitas de la ecuación (2) se divide el perfil de suelo considerado con profundidad L en $n + 1$ elementos de espesor dz . El elemento $n + 1$ debe considerarse, al igual que al elemento con índice 0, como un elemento de frontera. Por lo tanto, el índice i para la profundidad $z = i * dz$ en la ecuación (5) varía del 1 a n .

$$q_i = k_{i+1/2} * \{(\Phi_{i+1} - \Phi_i)/dz - 1\} \quad (5)$$

donde

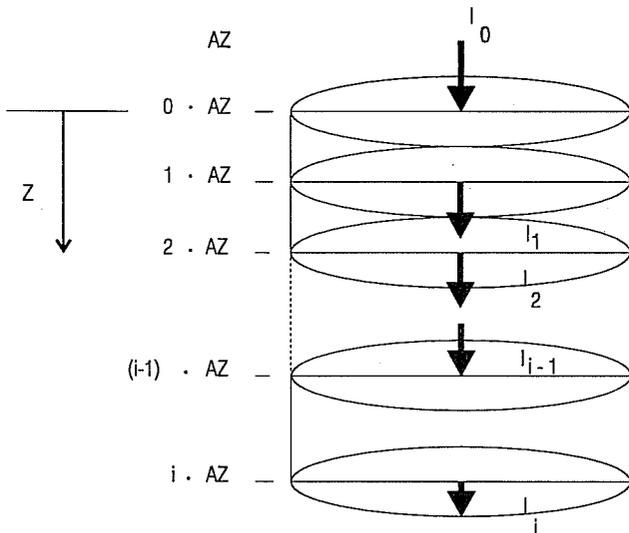
i = subíndice que corresponde al elemento y
 dz = distancia entre los centros de los elementos.
 Ver ilustración 1.

El cálculo de la permeabilidad $k_{i+1/2}$ en el interior del elemento se realiza arbitrariamente, ya que no existe una ley de validez general para su determinación, normalmente se prefiere usar la media geométrica de las conductividades de elementos contiguos. Se encontró, sin embargo, que el uso de la media aritmética (Haverkamp y Vauclin, 1979) conduce al mismo resultado con el algoritmo aquí utilizado, cuando los tamaños de los elementos han sido adaptados al problema, es decir, cuando una disminución en el espesor del elemento dz no provoca una modificación considerable en los potenciales matriciales calculados, Por lo tanto, la conductividad hidráulica se calcula como sigue para este modelo:

$$k_{i+1/2} = \{k(\Phi_i) + k(\Phi_{i+1})\}/2 \quad (6)$$

Los gastos q_i calculados con la ecuación (5) se sustituyen en la aproximación implícita por diferencias finitas de la ecuación de continuidad, como sigue:

1. Esquema para la discretización de la profundidad



$$(\Theta_{ij} - \theta_i^{j-1})/dt = [(q_i^j - q_{i-1}^j)/dz] + A(t, z) \quad (7)$$

donde

j = superíndice que corresponde al intervalo de tiempo y
 dt = amplitud del intervalo de tiempo.

Aquí debe recordarse, que no sólo θ_i , sino también q_i han sido considerados funciones unívocas del potencial matricial Φ_i . Todo el problema consiste por lo tanto en encontrar a partir de los potenciales matriciales (y con ello de los contenidos de humedad) los nuevos potenciales matriciales Φ_i para el instante $j - 1$, que cumplan con la ecuación (7). Puesto que el subíndice i en la ecuación (7) varía de 1 a n , esta ecuación representa un sistema de n ecuaciones con $n + 2$ incógnitas en el cual los potenciales matriciales Φ_0 y Φ_n aún no están definidos, por lo que las ecuaciones no pueden ser resueltas todavía. Lo anterior corresponde a que no se han considerado condiciones de frontera. Para obtener el potencial matricial Φ_0 , utilizamos la formulación por diferencias finitas de la ecuación (2).

$$q_n = k_{1/2} \{(\Phi_1 - \Phi_0)/(dz/2) - 1\} \quad y \quad \Phi_0 \leq PH \quad (8)$$

De lo anterior se obtiene

$$\Phi_0 = \Phi_1 - (dz/2)(1 + q_n/k_{1/2}) \quad y \quad \Phi_0 \leq PH \quad (9)$$

Las condiciones de frontera inferiores (3) y (4) pueden representarse fácilmente con las restricciones

$$\Phi_n = \text{const} = \Phi_L \quad (10)$$

y

$$q_w = 0 \quad (11)$$

Con ello hemos reducido el número de incógnitas a n y podemos resolver el sistema de ecuaciones (7). Partiendo de los valores iniciales dados para el potencial matricial Φ_i en el instante $t = 0$, se calculan los potenciales para el instante $t + dt$. Estos valores se sustituyen en la ecuación (7) y se calculan los valores para el siguiente intervalo de tiempo de la misma manera. Se repite este cálculo hasta alcanzar el final del período de simulación.

Para la solución del sistema de ecuaciones se utiliza el algoritmo de Newton-Raphson (Remson et al, 1971), cuya fórmula recurrente es:

$$x_{i+1} = x_i - f(x_i)/f'(x_i) \quad (12)$$

Esta expresión se puede obtener geométrica o analíticamente (Chapra y Canale, 1988). La obtención geométrica consiste en evaluar el valor de la pendiente $f'(x)$ para la función $f(x)$ en el punto x_i , cuya intersección con el eje x es una aproximación cercana a la raíz x_r , para la cual $f(x) = 0$. La pendiente, que equivale a la primera derivada de la función queda expresada como:

$$f'(x_i) = (f(x_i) - 0)/(x_i - x_{i+1}) \quad (13)$$

por lo tanto el valor de

$$x_{i+1} = x_i - f(x_i)/f'(x_i) \quad (14)$$

El algoritmo de Newton-Raphson puede obtenerse truncando la serie de Taylor en el término de la primera derivada:

$$f(x_{i+1}) \approx f(x_i) + f'(x_i) * (x_{i+1} - x_i) \quad (15)$$

y si se considera que $f(x_{i+1}) = 0$, ya que es raíz de la función, la ecuación (15) queda: $0 = f(x_i) + f'(x_i) * (x_{i+1} - x_i)$, de donde se despeja:

$$x_{i+1} = x_i - f(x_i)/f'(x_i) \quad (16)$$

Con la serie de Taylor se puede hacer una estimación del error de la fórmula que se expresa como sigue.

$$E_{i+1} \approx (-f''(x_r)/2f'(x_r)) * E_2^i \quad (17)$$

donde

x_r = raíz de la función

E_i = error para la iteración i

La ecuación (17) implica que el error al evaluar la raíz de la función es directamente proporcional al cuadrado del error anterior. Esto significa que el número de cifras decimales correctas se duplica aproximadamente para cada iteración, lo cual se denomina convergencia cuadrática. Este principio de cálculo puede ampliarse para la solución de sistemas de ecuaciones. Para ello la ecuación (7) se transforma de acuerdo a lo anterior:

$$f(\Phi_i) = (\Theta_i^j - \Theta_i^{j-1})/dt - (q_i^j - q_{i-1}^j)/dz - A(t, z) \quad (18)$$

y escribimos además de acuerdo con lo expuesto

$$\Phi_{i+1} \approx \Phi_i - f(\Phi_i)/f'(\Phi_i) \quad (19)$$

Esta fórmula de aproximación algorítmica permite resolver la ecuación del movimiento del agua.

Descripción del programa

Dentro del algoritmo central, cuyo diagrama de flujo se presenta en la ilustración 2 se calcula inicialmente la función f que se quiere minimizar, obteniendo primero las permeabilidades de los elementos interiores de acuerdo a la ecuación (6) y después el gasto $q(w)$, considerando a la ecuación (18) y la condición de frontera superior de la ecuación (8).

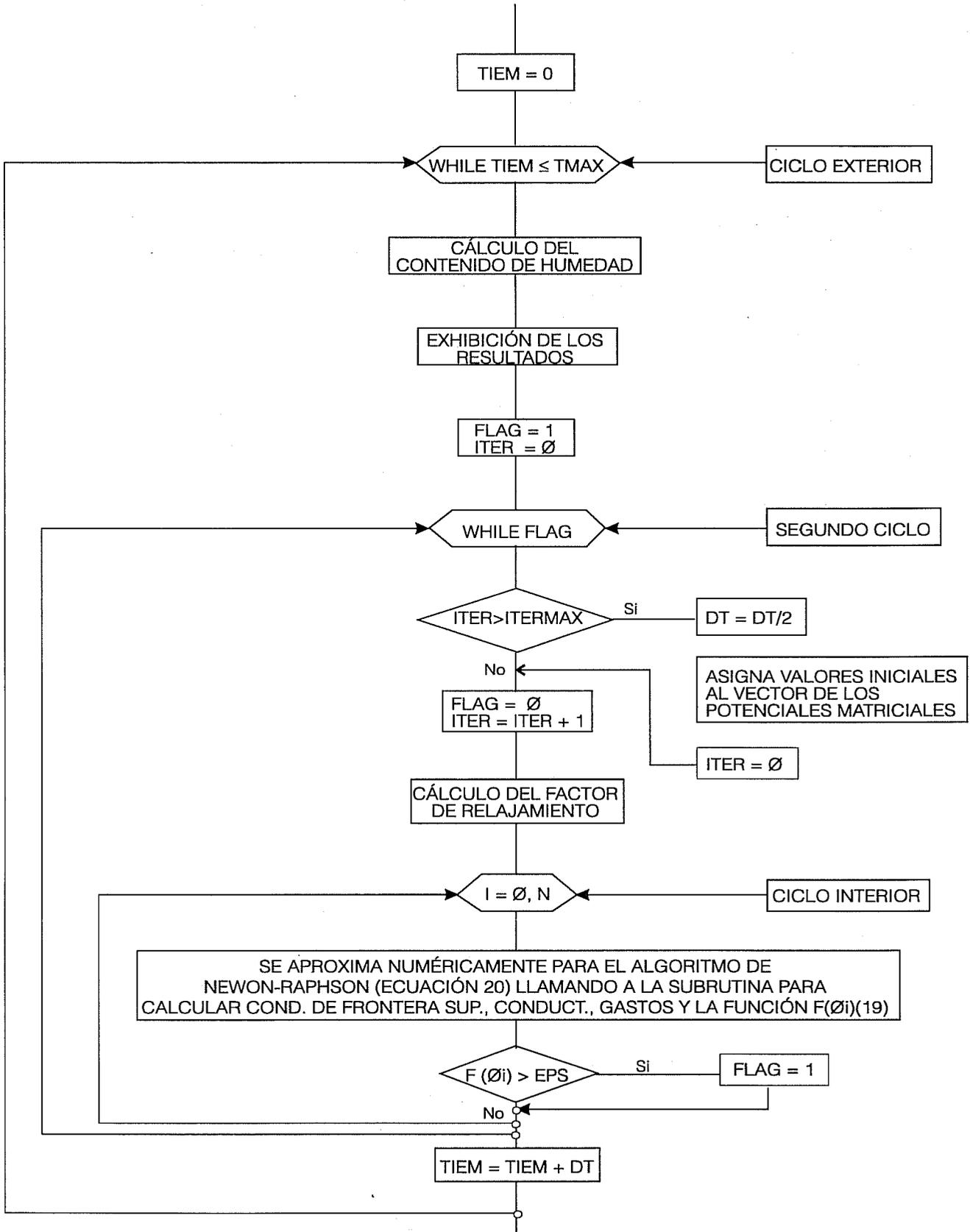
El procedimiento de iteración según la ecuación (19) contiene tres ciclos iterativos. El ciclo exterior trata al intervalo de simulación completo, el segundo realiza el cálculo de los potenciales matriciales para una iteración y en el ciclo interior se aproxima primero la derivada $f/\delta\Phi$ numéricamente y después se calcula el potencial matricial para la nueva iteración.

Si el valor de la función sobrepasa a la tolerancia establecida, se pone una bandera $FLAG = 1$. El segundo ciclo de iteración se repite por lo tanto hasta que se alcance en todos los elementos valores menores que la tolerancia establecida. En este momento el ciclo de iteración exterior avanza al nuevo intervalo de tiempo, calcula los contenidos de humedad a partir de los potenciales matriciales y exhibe los resultados.

Si después del número máximo de iteraciones preestablecido no se obtiene ningún resultado (por falta de convergencia) el intervalo de tiempo se divide por dos, a los potenciales matriciales se les asignan nuevamente sus valores iniciales y el procedimiento comienza de nuevo.

En la parte del programa para el ingreso de datos se pregunta primero por la profundidad del perfil de suelo considerado PS y por el número de elementos utilizados, con lo cual se calcula el tamaño del elemento dz . Los elementos se colocan de tal manera, que el centro del elemento frontera $n + 1$ se encuentre exactamente a la profundidad PS . En seguida se proporciona el valor inicial para el intervalo de tiempo DT y la duración total de la simulación. Si es necesario, el programa modifica al intervalo de tiempo. Con la ayuda de un parámetro de relajamiento PR puede modificarse el factor de relajación FR calculado anteriormente, si hay problemas de convergencia. Si el suelo es homogéneo, el número de funciones hidráulicas es igual a 1. Para un perfil de suelo heterogéneo o estratificado deben proporcionarse el número de horizontes hidráulicamente diferentes, sus espesores y los parámetros para cada una de las funciones hidráulicas. El número de parámetros hidráulicos es el número total de parámetros para la curva $\rho(F)$, (contenido de humedad en función del

2. Diagrama de flujo del algoritmo central



potencial matricial Φ , (FN THETA) y la función K , (FN K).

En seguida se pregunta por las condiciones de frontera inferiores. Si se da un valor mayor que -10^{11} para el potencial matricial, entra en vigor la condición de frontera (10). Para valores menores se considera a la frontera inferior como impermeable (condición de frontera (11)).

Generalmente, el potencial matricial máximo para la frontera superior PH se hace igual a cero. Es posible, sin embargo, modificarlo cuando se quiera permitir estancamiento de agua $PH > 0$ o cuando no se alcance la saturación completa $PH < 0$. Una vez ingresada la tasa de infiltración Q_0 el programa pregunta por los valores iniciales del potencial matricial y la asignación del comportamiento a una capa hidráulica. Finalmente deben proporcionarse los parámetros para las funciones THETA y K .

La rutina de salida calcula el balance de agua para un intervalo, dibuja el contenido de agua y exhibe posteriormente el instante de simulación, el intervalo presente, el balance de agua, la tasa de infiltración preestablecida, la infiltración acumulada presente y el gasto acumulado desde el elemento inferior. En seguida se proporcionan para cada elemento el contenido de agua, el potencial matricial, el gasto, la conductividad y la señalización de las funciones hidráulicas definidas. En ello debe tomarse en cuenta que el flujo $q(w)$ en el elemento 0 representa la tasa de infiltración presente, la cual puede ser menor que la preestablecida, si ocurre escurrimiento superficial.

El resto del programa contiene una rutina de ingreso y otra para la gráfica del sistema de coordenadas. La abscisa representa el contenido de agua y la ordenada la profundidad del centro del elemento respectivo.

Ejemplo de aplicación: Infiltración en suelos homogéneos

Para ilustrar el funcionamiento del programa anterior se analizó el proceso de infiltración en suelos homogéneos, por un lado en suelos arenosos y por el otro en suelos arcillosos (Anlauf *et al*, 1988). Las funciones hidráulicas para ambos suelos (Haverkamp y vaulin, 1979) son las siguientes:

$$k(\Phi) = k_s * A / (A + |\Phi| \Gamma) \quad (20)$$

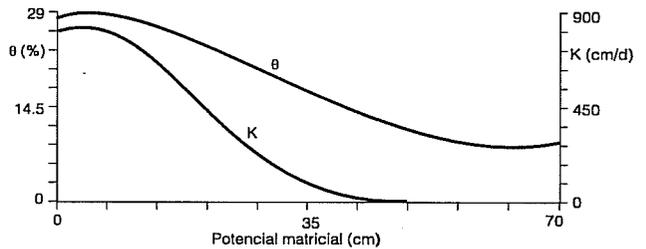
$$\Theta(\Phi) = \gamma(\Theta_s - \Theta_r) / (\gamma + |\Phi|^\beta) + \Theta_r \quad (21)$$

Los parámetros de la función en el cuadro 1 tienen los valores que se proporcionan. Las funciones están representadas en las ilustraciones 3 y 4.

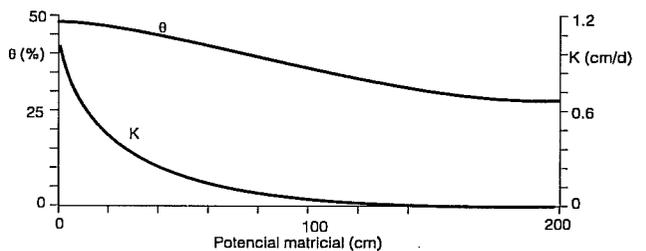
1. Valores de parámetros de la función para el cálculo de la infiltración en suelos arenosos y arcillosos.

No.	parámetro	arena	arcilla
1	$\Theta(s)$	0.287	0.495
2	$k(s)$	816.0	1.0272
3	$\Theta(r)$	0.075	0.124
4	γ	1,611,000	739.0
5	β	3.96	1.30
6	A	1,175,000	124.6
7	Γ	4.74	1.77

3. Funciones pF y K para un suelo arenoso



4. Funciones pF y K para un suelo arcilloso



Los demás datos requeridos para el cálculo están reunidos en el cuadro 2.

En las ilustraciones 5 y 6 se observa el contenido de agua para diferentes instantes. El intervalo entre las curvas es de 0.005 días para el suelo arenoso, ver ilustración 5, y de dos días para el arcilloso, ver ilustración 6. Se hace notar que el frente de infiltración para la arena se mantiene considerablemente menos inclinado que para la arcilla.

Conclusiones

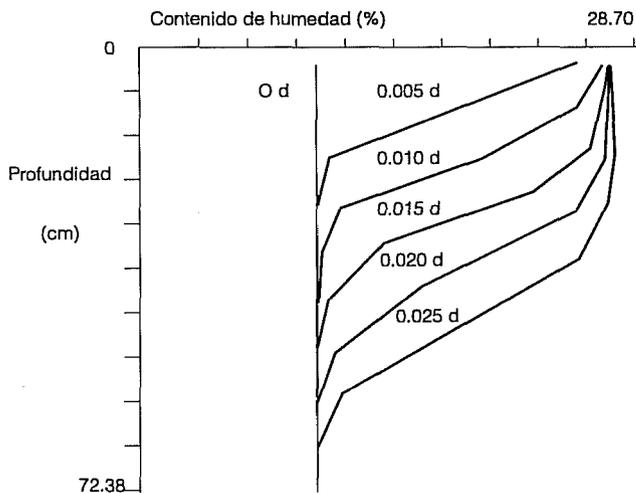
En el presente trabajo se empleó una solución numérica de la ecuación para el flujo unidimensional del agua, ecuación (1), con un esquema implícito por diferencias finitas que conduce a un sistema de ecuaciones lineales, el cual se resolvió con el algoritmo de Newton-Raphson y dos condiciones de frontera iniciales superior e inferior, para así poder calcular y dibujar los perfiles del contenido de humedad en un suelo durante el periodo de simulación. El algoritmo expuesto se aplicó inicialmente a suelos homogéneos, ver ilustraciones 5 y 6, los resultados

2. Datos para el cálculo de la infiltración en el suelo

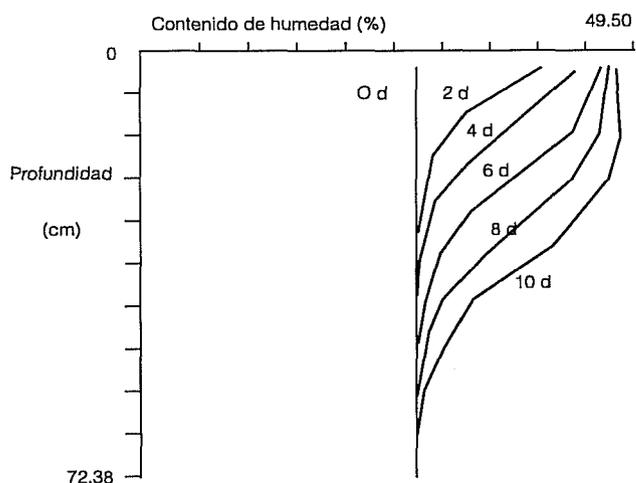
	Arena	Arcilla
Profundidad del perfil de suelo (cm)	80	80
Número de elementos	10	20
Intervalo de tiempo dt (días)	0.001	0.1
Tiempo total de simulación (días)	0.04	10
Parámetro de relajamiento	1	1
Número de funciones hidráulicas	1	1
Número de parámetros	7	7
Φ (m) (frontera inferior), (cm CA)	-61.5	-200
(= valor inicial)		
Φ (max) (frontera superior), (cm CA)	0	0
Tasa de infiltración (mm/día)	2000	3

CA = columna de agua

5. Perfiles del contenido de humedad durante la infiltración en un suelo arenoso en diferentes instantes (método de Newton-Raphson)



6. Perfiles del contenido de humedad durante la infiltración en un suelo arcilloso en diferentes instantes (Método de Newton-Raphson)



de la simulación obtenida para suelos arenosos y arcilloso. Se reportan resultados comparables (Anlauf *et al*, 1988), pero deben contrastarse todavía con mediciones. Se está equipando el laboratorio de geohidrología de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa para tales fines.

Actualmente se está aplicando el programa a suelos estratificados de dos o más capas. Para el caso de, por ejemplo, dos capas donde un suelo arcilloso cubre una formación arenosa, deben de proporcionarse los parámetros para las dos funciones hidráulicas, asignando la primera función a los elementos que corresponden a la capa superficial y la segunda función a los elementos restantes del perfil de suelo. Los resultados obtenidos para este caso se publicarán en un futuro trabajo. Otra posibilidad de solución para la ecuación (1) es con métodos variacionales. La experiencia de los autores con estas soluciones numéricas ha demostrado que la convergencia de cualquier método numérico es altamente dependiente de la validez de los datos suministrados. Por ejemplo, en la ecuación (19), que se encuentra en el ciclo interior anidado del algoritmo central, se corre el riesgo de llegar a una división por cero si la derivada de la función se calcula para un punto de inflexión de ésta. Por ello, se requiere acumular una mayor experiencia práctica con los rangos de valores que pueden tomar las variables que intervienen en el algoritmo. Los cuadros 1 y 2 ilustra este aspecto.

Se considera de gran valor práctico una futura ampliación del sistema de simulación, con el fin de poder definir también la curva de capacidad de infiltración del suelo.

Referencias

Revisado: septiembre, 1993

Anlauf, R., Ch., Kurt, P. Liciya, A. Nuski-Schule, J. Richter, G., Springob, K. M. Syring, J., Utermann. Modelle für Prozesse im Boden, Stuttgart, Enke Verlag, 232 p., 1988.

Chapra, S. C. y Canale, R. P., Numerical Methods for Engineers, New York, McGraw-Hill, 812 p., 1988.

Van Genuchten, M. Th., 1981, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils" Soil Sci. Soc. Am. J., vol 44, p. 892-898, 1981.

Haverkamp, R. M. y M. Vauclin, "A note on estimating finite difference interblock hydraulic conductivity values for transient unsaturated flow problems", Water Resources Research, vol. 15, núm.3, pp. 180-187, 1979.

Kirkby, J. M., "A note on the use of a simple numerical model for the vertical, unsaturated fluid flow", Soil Science, no. 139, pp. 462-467, 1985.

Philipp, J. R., 1957, "The theory of infiltration 1", Soil Science, no. 83, pp.345-357, 1957.

Remson, I., G. M. Hornberger y F. J. Molz, 1971, Numerical methods in subsurface hydrology, Wiley New York, USA.

Richter, J. Der Boden als Reaktor, Stuttgart, Enke Verlag, 239 p., 1986.

Abstract

Blaesig, H. and R. Arrijoa "Infiltration Simulation in Soils". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, Vol. IX, Num 1, pages 5 – 12, January–April, 1994.

Water infiltration is studied in partially saturated soils applying Richard's equation restricted to vertical flow and having as an unknown the matrix potential. Since soil humidity and hydraulic conductivity are highly non-linear univocal functions of the matrix potential, there is no analytical solution and the equation is solved through a finite-difference implicit scheme that leads to a system of linear equations, which is solved using the Newton-Raphson algorithm and two upper and lower boundary initial conditions. The considered soil profile must be discretized with $n+1$ elements of Δz width, computing for each one of them the hydraulic conductivity at the middle of the element as the average of the conductivities of both the element under consideration and the next one in a downward vertical direction, as well as the discharge as a function of this hydraulic conductivity. As many hydraulic functions as available horizons are computed. The system of equations is solved for a maximum number of iterations and, if there is no convergence, the time interval is divided by two, thus repeating the process for the initial values. The algorithm shown is applied to two homogeneous soils and the results are presented. Comparable results are reported by Anlauf et al (1988), but these must be contrasted with measurements.

Key words: soil, infiltration, simulation, partially saturated soil, Richards's equation, matrix potencial, soil humidity, hydraulic conductivity, finite-difference implicit scheme, Newton-Raphson's algorithm.