UN NUEVO MODELO SIMULATIVO PARA LA ESTIMACION DEL REGIMEN DE HUMEDAD DE LOS SUELOS

Eusebio Jarauta
Departamento de Matemática Aplicada III
E.T.S.I.A. de Lleida - Universidad Politécnica de Cataluña
Jaime Porta
Departamento de Meteorología y Ciencia del Suelo
E.T.S.I.A. de Lleida - Universidad Politécnica de Cataluña

RESUMEN

En este trabajo se presenta un nuevo modelo matemático para la estimación del régimen de humedad de los suelos, a partir de información meteorológica de observatorio convencional y de información sobre los suelos de la zona. Se parte del análisis del modelo propuesto por F. Newhall en 1976. El nuevo modelo se ha validado con datos de perfiles hídricos reales medidos en campo a lo largo de cuatro años. El régimen de humedad estimado mediante el modelo propuesto se ajusta adecuadamente al régimen de humedad obtenido experimentalmente.

1.- INTRODUCCION

1.1.- REGIMEN DE HUMEDAD DEL SUELO: CONCEPTO Y DETERMINACION

El concepto de régimen de humedad de un suelo tal como se utiliza en la actualidad, fue introducido en 1975 por el Soil Survey Staff (USDA) en "Soil Taxonomy" (S.S.S., 1975). Tiene por objeto describir las disponibilidades de agua para las plantas estudiando la evolución del contenido de agua a lo largo del año en la zona del perfil del suelo denominada "sección de control de humedad" (SCH), caracterizada por tener una capacidad de retención de agua disponible (CRAD) de 50 mm y que tiene por encima una parte de 25 mm de CRAD. La SCH puede presentar tres estados distintos: húmeda toda ella (M), húmeda en alguna parte (B) y seca toda ella (D). La variación del estado de la SCH a lo largo del año se evalúa en función de la temperatura del suelo a 50 cm y se establecen 7 criterios distintos que, en función de su cumplimiento porcentual a lo largo de una serie de años, dan lugar a los diferentes tipos de regímenes de humedad del suelo. En el Cuadro 1 se representan los regímenes de humedad segun Soil Taxonomy (S.S.S.,1975), las ecuaciones lógicas que los definen y el porcentaje mínimo o máximo de cada criterio respecto al total de la serie en cada uno de los regímenes.

El régimen de humedad debe determinarse experimentalmente a partir de datos de campo; la ausencia de este tipo de información ha obligado a desarrollar modelos de simulación para estimar el régimen de humedad a partir de datos climáticos. Esta manera de proceder presenta dificultades intrínsecas: el suelo es un sistema complejo con diferentes espesores y horizontes y, por otra parte, el agua del suelo es una disolución que presenta cambios de estado y de propiedades. Ello requiere un enfoque global dentro del sistema suelo-planta-atmósfera modelizado mediante unas variables que lo caractericen a nivel de un volumen elemental representativo (Virto, 1982) y de las que se considera suficiente conocer su valor medio. El elemento fundamental para el estudio del régimen de humedad del suelo es el balance hídrico, representado por la ecuación:

$$V = I - (P + E + N) \qquad (1)$$

donde V es la variación del volumen de agua del suelo por unidad de área de superficie y unidad de tiempo; I es el flujo de infiltración y P, E y N son los flujos de percolación, de evaporación y de transpiración.

Para caracterizar el estado energético del agua del suelo se emplea el potencial hídrico, ϕ, que expresa la energia potencial específica en relacion al agua libre en las mismas condiciones (estado de referencia); el potencial hídrico consta de varios componentes, siendo los más importantes para este estudio el potencial matricial y el potencial gravitacional. El movimiento del agua en el suelo tiene lugar bajo un gradiente de potencial y puede producirse en dos situaciones: saturado y no saturado. En una zona semiárida, el flujo saturado tiene lugar en los horizontes superficiales durante la infiltración y el no saturado en la zona radicular y a lo largo del perfil durante la evaporación; la diferencia fundamental entre ambos flujos está en la conductividad hidráulica.

1.2.- ECUACIONES DEL FLUJO DE AGUA EN EL SUELO

La ecuación general del movimiento del agua en el suelo, resultado de combinar la ley de Darcy y la ecuación de continuidad, es:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \vec{\nabla}(K\vec{\nabla}H) \qquad (2)$$

siendo θ el contenido volumétrico y K la conductividad hidráulica. A partir de esta ecuación se introducen las características propias que describen en cada caso el flujo saturado y el no saturado. En el caso del flujo saturado, suponiendo que es vertical (movimiento unidimensional) el potencial hídrico ϕ coincide con la carga hidráulica H, que a su vez puede escribirse como $H = \psi - z$, siendo ψ el potencial matricial. Entonces la ecuación (2) adopta la forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(K\frac{\partial}{\partial z}(\psi - z)) = \frac{\partial}{\partial z}(K\frac{\partial \psi}{\partial z} - K) \qquad (3)$$

Las condiciones de contorno para resolver esta ecuación son:

$$\theta = \theta_s \qquad (saturación) \qquad para \quad z = 0,\ t > 0$$

$$\theta = \theta_i \qquad (inicial) \qquad para \quad z > 0,\ t = 0$$

Cuando el medio es homogéneo e isótropo y el régimen es permanente, la ecuación (2) se transforma en la ecuación de Laplace, $\nabla^2 H = 0$. En el caso del flujo no saturado, la conductividad hidráulica es función del potencial matricial o del contenido volumétrico, con lo que la ecuación (2) resulta:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \vec{\nabla}(K(\psi)\vec{\nabla}H) = \vec{\nabla}(K(\psi)\vec{\nabla}(\psi - z)) \qquad (4)$$

En el caso de movimiento vertical, la ecuación anterior adopta la forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(K(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial z}) - \frac{\partial K}{\partial z} \qquad (5)$$

Para un tratamiento más adecuado de esta ecuación, Childs y Collis-Georges (1950) introdujeron la difusividad hidráulica:

$$D(\theta) = K(\theta)\frac{d\psi}{d\theta} \qquad (6)$$

y entonces la ecuación general del flujo no saturado puede escribirse:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D(\theta)\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \qquad (7)$$

La dificultad para la aplicación de esta ecuación reside en que se desconoce la función analítica que relaciona D y θ, por lo que hay que recurrir a una modelización basada en medidas experimentales.

1.3.- EL MODELO DE NEWHALL (1976)

El modelo mas conocido para la estimación del régimen de humedad de los suelos, es el desarrollado por F. Newhall (1976); en el Cuadro 2 se han representado las características de diseño de este modelo. La aplicación del modelo de Newhall a datos climáticos del área meridional de Lleida (Jarauta, 1988), ha dado como resultado un régimen Ustic, lo cual no resulta aceptable de acuerdo con el estudio de la vegetación natural y la respuesta de los cultivos (Porta et al., 1982).

Se ha realizado un análisis detallado del modelo de Newhall que ha puesto de manifiesto los siguientes aspectos: no modeliza bien la variabilidad de la CRAD del suelo; no contempla la posibilidad de disponer de datos de precipitación diaria; no tiene en cuenta las pérdidas por escorrentía superficial, considerando eficaz toda la lluvia caída; modeliza de forma muy simple la evapotranspiración; no considera las diferencias reales entre suelos a efectos de infiltración y evapotranspiración; no tiene en cuenta las características del clima local ni de la orografía, que pueden hacer variar el régimen

de humedad de suelos próximos. Todas estas limitaciones del modelo han conducido a plantear y desarrollar un nuevo modelo matemático que tenga en cuenta estos aspectos, incorporando nuevos elementos de diseño que lo hagan mas acorde con la realidad.

2.- MATERIAL Y METODOS

El estudio experimental se realizó en al área meridional de Lleida, al oeste de Cataluña; esta zona está caracterizada por un clima semiárido con un régimen de lluvias irregular con dos máximos en otoño y primavera y veranos calurosos y secos. Para la toma de datos de campo se seleccionaron dos parcelas de control en las que se determinaron las siguientes variables:

- Límites que acotan la sección de control de la humedad del suelo. El método utilizado fue el de los infiltrómetros de Müntz
- Densidad aparente de los diferentes horizontes del perfil. La determinación se realizó en cada horizonte mediante el método del cilindro
- Perfil hídrico medido con una periodicidad de 7 a 14 días. El perfil hídrico se determinó por el método de referencia (gravimétrico) hasta una profundidad que incluyera toda la sección de control de humedad
- Temperatura del suelo a 50 cm. Se midió con un geotermómetro instalado en la parcela de control
- Curvas características de humedad. Se determinó la curva característica de cada horizonte, trabajando a siete potenciales para cada muestra, entre -33 y -1500 kPa

Para el tratamiento de la información de campo se elaboró un programa que, a partir de los datos de humedad de la muestra húmeda y la muestra seca, proporciona el estado de la sección de control. Para la caracterización climática de la comarca se analizaron las series pluviométricas de 14 observatorios (8 de los cuales se instalaron a raíz de la presente investigación). El análisis estadístico de las series se realizó con el programa STATGRAFICS.

3.- RESULTADOS Y DISCUSION

Los límites que acotan la SCH en la zona estudiada concuerdan con los valores estándar dados por Soil Taxonomy y coinciden con la zona radicular de los principales cultivos de la comarca. La determinación de la densidad aparente pone de manifiesto que en los horizontes de superficie este valor es sensiblemente menor por efecto del laboreo. Los perfiles hídricos determinados muestran una evolución del estado de la sección de control, que va desde el húmedo en invierno, el parcialmente seco en primavera y otoño y totalmente seco en verano. La relación entre la temperatura del suelo a 50 cm (T_s) y la temperatura media mensual del aire (T_a) es muy similar en primavera y en otoño, pero en invierno y verano hay un desfase dado por:

$$T_s(invierno) = T_a(invierno) - 1.6^oC$$

$$T_s(verano) = T_a(verano) + 1.56^oC$$

El régimen de humedad determinado experimentalmente a partir de los perfiles hídricos obtenidos es Xeric, que concuerda con las características de la vegetación de la zona y la respuesta de los cultivos.

4.- FORMULACION DEL NUEVO MODELO

La experiencia adquirida al aplicar el modelo de Newhall, el análisis de los resultados experimentales obtenidos y el examen de las exigencias a que debería responder un modelo que eliminara las discrepancias observadas, han servido de base para desarrollar un nuevo modelo de simulación para estimar el régimen de humedad de los suelos, cuyas características fundamentales de diseño se representan en el Cuadro 3 y que se desarrollan brevemente a continuación.

En el modelo se consideran ocho perfiles de diferente CRAD, de acuerdo con las características reales de los suelos. Pueden utilizarse datos de precipitación diaria o de precipitación mensual; en este caso, la mitad de la precipitación mensual (precipitación débil) se distribuye uniformemente a lo largo del mes y la otra mitad (precipitacion fuerte) se introduce en el perfil el día 15; la secuencia de infiltración es

variable y se dispone de una secuencia universal de referencia.

Para calcular la cantidad de agua evapotranspirada se utiliza una adaptación de la fórmula de Blaney–Criddle (1952) similar a la realizada por Doorenbos y Pruitt (1977). A partir de la temperatura media mensual (T) y el porcentaje de horas diurnas del mes (p), que depende de la latitud, se calcula el factor $f = p(0.46T + 8.13)$ y a continuación se calcula la evapotranspiración de referencia, Ω_o, mediante la función lineal:

$$\Omega_o \ (mm/dia) \ = af + b \qquad (8)$$

donde a y b son parámetros que dependen de las condiciones del clima local. A continuación se calcula la evapotranspiración referencial del cultivo, Ω_c, mediante:

$$\Omega_c \ (mm/dia) \ = \eta\Omega_o \ (mm/dia) \qquad (9)$$

donde η es el coeficiente de cultivo, que depende del tipo de cultivo, las condiciones de la cubierta vegetal y las condiciones climáticas locales. Se calcula la evapotranspiración real, Ω_r, a partir de la Ω_c y de las siguientes variables: S_t, agua disponible en el suelo por unidad de profundidad en el instante t; S_a, capacidad de retención de agua disponible por unidad de profundidad; q, fracción de agua disponible (depende del cultivo); A, profundidad del perfil.

Se calcula el límite de agua disponible, A, mediante:

$$A = (1 - q)AS_a \qquad (10)$$

que representa la cantidad de agua del suelo por encima de la cual la evapotranspiracion es constante, es decir, la Ω_r vendrá dada por:

$$\Omega_r = \Omega_c \qquad si \ \ AS_t \geq A \qquad (11)$$

$$\Omega_r = \frac{\Omega_c}{A}AS_t \qquad si \ \ AS_t < A \qquad (12)$$

Se trata ahora de obtener una metodología de cálculo de la Ω_r correspondiente al día t, conociendo la cantidad de agua contenida en el perfil al final del día anterior, $t - 1$. La evapotranspiración real se define como:

$$\Omega_r(t) = -\frac{d}{dt}(AS_t) \qquad (13)$$

Sustituyendo (12) en (13) resulta:

$$-\frac{d}{dt}(AS_t) = \frac{\Omega_c}{A}AS_t = LAS_t; \quad (L = \frac{\Omega_c}{A}) \quad (14)$$

Esta ecuación diferencial de variables separadas admite como solución

$$AS_t = \kappa e^{-Lt} \quad (\kappa = cte. \ de \ integración) \ (15)$$

Para determinar la constante κ, se aplica como condición inicial la cantidad de agua contenida en el perfil al final del día anterior, es decir AS_{t-1}, con lo cual resulta:

$$\kappa = AS_{t-1}e^{L(t-1)} \qquad (16)$$

Sustituyendo (16) en (15) se obtiene:

$$AS_t = e^{L(t-1)}AS_{t-1}e^{-Lt} = e^{-L}AS_{t-1} \qquad (17)$$

Sustituyendo (17) en (12) se calcula la evapotranspiración real cuando en el suelo hay limitación de agua:

$$\Omega_r(t) = Le^{-L}AS_{t-1}, \quad si \ \ AS_{t-1} < A \qquad (18)$$

Las ecuaciones (11) y (18) permiten elaborar un algoritmo de cálculo del balance hídrico diario, mucho más preciso que el empleado en el modelo de Newhall que lo realiza cada 15 días. La secuencia de evapotranspiración es también variable al igual que la de infiltración, habiéndose establecido una secuencia de referencia. El programa que ejecuta el modelo esta escrito en lenguaje PASCAL y es de muy fácil instalación en un ordenador personal con sistema operativo MS-DOS; su diagrama de flujo se representa en la Figura 1.

Para validar el modelo formulado se ha aplicado a series de datos climáticos del área meridional de Lleida y se han comparado las estimaciones obtenidas mediante su aplicación con los resultados experimentales determinados en los puntos de control. Se ha aplicado a series de datos climáticos de observatorios situados entre Zaragoza y Huesca y se obtienen resultados acordes con los datos de campo disponibles acerca del comportamiento de los suelos y la respuesta de la vegetación.

5.- CONCLUSIONES

1.- El nivel de resolución del modelo de Newhall no resulta suficiente en áreas de transición entre los regímenes Xeric y Aridic.

2.- En un modelo para estimar el régimen de humedad del suelo debe tenerse en cuenta la capacidad de retención de agua disponible del perfil, la precipitación efectiva, las características del clima local, las características orográficas de la zona y las propiedades de los suelos.

3.- El modelo propuesto incorpora una serie de mejoras que hacen que sus estimaciones se ajusten mejor a la realidad de los estados de humedad de los suelos de una zona semiárida como la estudiada.

4.- El régimen de humedad de los suelos del área meridional de Lleida es Xeric (con probabilidad de régimen Aridic en los suelos de poca profundidad), contrariamente al régimen Ustic que resulta al aplicar el modelo de Newhall.

REFERENCIAS

Doorenbos, J y W.O. Pruitt (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. Estudios FAO riego y drenaje (num.24)

Gascó, J.M. y V. Ibañez (1978). Criterios para la estimación del régimen de humedad de los suelos. Anales INIA, serie general; (6):61-76

Hillel, D. (1980). Fundamentals of Soil Physics. Academic Press

Jarauta, E. (1988). Determinación del régimen de humedad de los suelos de secano del área meridional de Lleida. Diputación de Lleida

Jarauta, E. (1989). Modelos matemáticos del régimen de humedad de los suelos; aplicación a la determinación del régimen de humedad de los suelos del área meridional de Lleida. Tesis Doctoral, UPC

Newhall, F. (1976) Calculation of soil moisture regimes from the climatic record. U.S.D.A., Soil conservation service.

Porta, J. y otros (1982). Els sòls de Catalunya: àrea meridional de Lleida DARP.

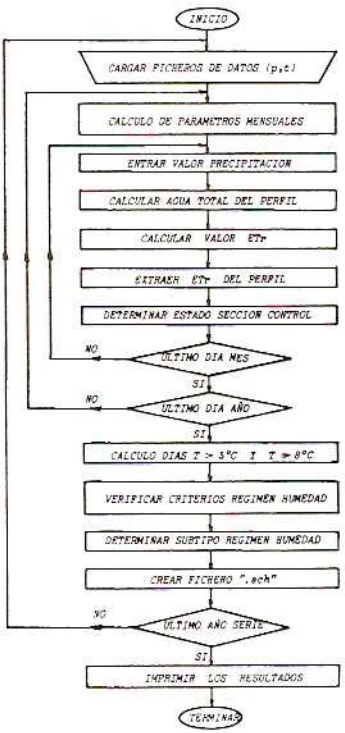
Soil Survey Staff, (1975). Soil Taxonomy. Agriculture Handbook No 436. U.S.D.A., Soil conservation service.

Virto, L. (1982). Principios físicos de los estados de equilibrio hídrico e higrométrico de los suelos. II curso sobre Tecnología del Riego. 32 pp.

SUMMARY

A new mathematical model is presented to estimate the soil moisture regime from available climatic and soils information data. The model is derived from the Newhall's simulation model (1976). The new model has been tested with field measures of soil water contents along four years. Estimated moisture regime with the new model agrees with experimental soil moisture regime.

Figura 1.- Diagrama de flujo del programa que ejecuta el modelo simulativo expuesto en este trabajo.



Cuadro 1.- Regímenes de humedad según Soil Taxonomy: ecuaciones lógicas y porcentaje de cumplimiento de los criterios

Parámetros de temperatura	Rég. humedad	Ecuación lógica
	ARIDIC(1)	(A=1) y (B=0)
Tm ≤ 22 °C	UDIC(1)	(C=0) y (D=0)
y δ > 5 °C	USTIC(1)-I	(A=0) y (C=1) y (D=0) y (E=1)
	USTIC(1)-II	(A=0) y (C=1) y (E=0)
(Areas frías	XERIC-I	(A=0) y (B=0) y (D=1) y (E=1)
y templadas)	XERIC-II	(A=1) y (B=1) y (D=1) y (E=1)
	XERIC-III	(A=0) y (B=1) y (D=1) y (E=1)
Tm > 22 °C	ARIDIC(2)	(A=1) y (B=0)
y/o δ ≤ 5 °C	UDIC(2)	(C=0)
	USTIC(2)-I	(C=1) y (F=1)
(Areas	USTIC(2)-II	(C=1) y (F=0)
tropicales)	USTIC(2)-III	(C=1) y (F=1) y (G=1)

Régimen de humedad	Temperatura del suelo a 50 cm	Criterios Soil Taxonomy (% de cumplim) A	B	C	D	E	F	G
Aridic		>50	≤50					
Udic(1)	Tm < 22°C y Tv - Ti ≥ 5°C			≤50	<60			
Udic(2)	Tm ≥ 22°C y/o Tv - Ti < 5°C			≤50				
Ustic(1) I	Tm < 22°C y	≤50		>50	<60	≥60		
II	Tv - Ti ≥ 5°C	≤50		>50		<60		
Ustic(2) I	Tm ≥ 22°C y/o			>50			>50	
II	Tv - Ti < 5°C			>50				>50
Xeric I	Tm < 22°C y	≤50			≥60	≥60		
II	Tv - Ti ≥ 5°C		≥60		≥60	≥60		
III		≤50	≥60		≥60	≥60		

Significado de los estados de la sección de control y notación utilizada para las variables de temperatura del suelo

A = Seca la mitad o más de los días acumul. con temp. suelo > 5 °C
B = Húmeda tot. o parc. 90 días consec. o más con temp. suelo > 8 °C
C = Seca o parcialmente seca 90 días acumulados o más
D = Seca 45 días consec. o más en 4 meses sig. solst. verano
E = Húmeda 45 días consec. o más en 4 meses sig. solst. invierno
F = Parcialmente húmeda 180 días acumulados o más
G = Parcialmente húmeda 90 días consecutivos o más
Tm= Temperatura media anual del suelo a 50 cm
Tv= Id. id. durante el verano; Ti= Id. id. durante el invierno
δ = Tv - Ti
1 = cumple el criterio; 0 = No cumple el criterio

Cuadro 2.- Características de diseño del modelo de Newhall (1976)

ELEMENTOS DE DISEÑO	IMPLEMENTACION EN EL MODELO
Modelización del perfil del suelo	Perfil homogéneo, isótropo, bien drenado, de 200 mm de capacidad de retención de agua disponible (CRAD), dividido en 8 x 8 = 64 casillas de idéntica capacidad (las filas segunda y tercera constituyen la sección de control de humedad)
Cantidad de agua infiltrada en el suelo	Toda la precipitación mensual
Cantidad de agua evapotranspirada	Fórmula de Thornthwaite (1945)
Secuencia de llenado del perfil	Por casillas de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Secuencia universal, fija para todos los tipos de suelos
Secuencia de vaciado del perfil	Universal por diagonales, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo
Mecanismo de entrada de agua en el perfil	Tres entradas de precipitación al mes: la mitad el día 15 i las otras dos partes iguales los días 1 i 16. Imposibilidad de utilizar datos de precipitación diaria
Cálculo del régimen de humedad del suelo	Criterios de Soil Taxonomy (1975)

Cuadro 3.- Características de diseño del nuevo modelo simulativo expuesto en este trabajo.

ELEMENTOS DE DISEÑO	IMPLEMENTACION EN EL MODELO
Modelización del perfil del suelo	Perfil homogéneo, no isótropo, bien drenado, de capacidad de retención de agua disponible (CRAD) variable, adaptable a las características del perfil
Cantidad de agua infiltrada en el suelo	La precipitación mensual corregida teniendo en cuenta la eficacia de las precipitaciones. Posibilidad de emplear datos de precipitación diaria
Cantidad de agua evapotranspirada	Adaptación del modelo de Blaney-Criddle
Secuencia de llenado del perfil	Adaptable a las características de los suelos, con una secuencia de referencia
Secuencia de vaciado del perfil	Adaptable a las características de los suelos, con una secuencia de referencia
Mecanismo de entrada de agua en el perfil	Entrada diaria de la precipitación correspondiente (datos de precipitación diaria). La mitad de la precipitación total mensual el día 15 i el resto repartida en cantidades iguales para cada día (datos de precipitación mensual)
Cálculo del régimen de humedad del suelo	Criterios de Soil Taxonomy (1975) eliminando la coincidencia de subtipos