

DINÁMICA DEL AGUA EN MALLINES DE LA PATAGONIA

II. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL PERFIL DEL SUELO

HORNE, Federico E.¹, DUFILHO Ana C.¹, POLLA Gabriela M.¹

Palabras claves: dinámica freática, subirrigación

SUMMARY

The patagonean mallines (wet meadows) are small productive areas in relation to the arid mesetas due to the local formation of groundwater (GW) table that provides soil moisture. However, in summer GW levels drop and capillary flow do not meet the evapotranspiration requirements.

A specific mallin is studied here in order to analyze the feasibility of sub irrigation by controlling the GW levels through the management of input-output flows.

The soil is characterized by its hydrophysics constant and Richards equation is applied and solved for boundary conditions representing the evapotranspiration flow and GW level.

This approach was validated with GW and soil moisture observed data. The subirrigation appears to be an interesting method for controlling soil moisture and hence productivity in mallines with economic advantage in relation with traditional surface irrigation schemes.

INTRODUCCIÓN

Los mallines en Patagonia (4% de la superficie) tienen una producción de pastos 20 a 30 veces superior a la meseta árida. Estas pequeñas áreas son estratégicas para el desarrollo Patagónico pues resisten inversiones productivas, sin embargo por su misma productividad está sujeta a la sobrecarga animal, degradación del ecosistema y consecuente erosión del cauce central afectando la dinámica hídrica del mallín.

En muchos mallines extraandinos la productividad se ve restringida por el déficit de humedad edáfica durante el período de verano. Esto ha llevado a sistematizaciones para riego mediante técnicas que procuran distribuir el agua por medio de conducciones en curvas de nivel. Sin embargo, un análisis del movimiento del agua en el perfil del suelo permitió comprobar la importancia del flujo capilar ascendente como motor de la subirrigación. El control del nivel freático mediante la recarga del acuífero, permitiría satisfacer la demanda evapotranspiratoria a lo largo del año, sin necesidad de implementar sistemas de riego por superficie.

¹ Docentes de la Cátedra de Hidráulica e Hidrología Agrícola - Universidad Nacional del Comahue.C.C.85.8303 Cinco Saltos, Río Negro, Argentina. Email:Fehorne@uncoma.edu.ar

A los fines prácticos esto lleva a una concepción distinta del riego en los mallines. En vez de una distribución del agua en superficie, se trataría de buscar el mejor método de recargar el acuífero a efectos de controlar el nivel freático de manera que el flujo capilar satisfaga la evapotranspiración (EVT). Este concepto puede derivar a obras de sistematización de mucho menor costo y de menor perturbación del suelo del mallín.

MATERIALES Y METODOS

El proceso central de ésta hipótesis se basa en el movimiento de agua en la franja no saturada del suelo ubicado entre la freática y la superficie.

Ecuación de flujo

La ecuación diferencial parcial usado para describir el movimiento del agua en una dimensión en un medio poroso no saturado fue establecido por Richards en 1931 y se puede expresar:

$$B(h) \frac{dh}{dt} = \frac{d}{dz} \left[K(h) \left(\frac{dh}{dz} - \cos(A) \right) \right] \quad (1)$$

$h = h(z, t)$ potencial matricial

$z =$ dimensión en la dirección del flujo (positivo hacia abajo)

$t =$ tiempo

$A =$ ángulo entre dirección flujo y la vertical

$K(h) =$ conductividad hidráulica - función de h

$B(h) =$ capacidad específica, variación del contenido de humedad θ respecto de z .

$$B(h) = \frac{d\theta}{dz}$$

Cuando el flujo se realiza en dirección vertical $\cos A = 0$. En el caso de flujo horizontal $\cos A = 1$. La ecuación (1) es fuertemente no lineal debido a la función $K(h)$, lo cual dificulta su solución analítica o semianalítica quedando restringida a pocos casos muy simplificados (Kutilek, 1994). Los métodos numéricos permiten soluciones precisas de (1) para condiciones de borde no triviales, más ajustados a los casos reales. En el presente trabajo se aplica un esquema implícito de diferencias finitas descrito por Haverkamp (1977).

Condiciones Iniciales y de borde

Para un suelo cuyo perfil tiene una longitud L , las condiciones iniciales se expresan

$$h(z, t) = h(z, 0) \quad \text{para} \quad t = 0 \quad \text{y} \quad 0 < z < L \quad (2)$$

Las condiciones de bordes que deben ser especificadas a cada extremo ($z=0$ y $z=L$) de la "columna" de suelo simulado, estos pueden ser de tres tipos:

- potencial constante $h(0,t)$ ó $h(L,t) = h_0$ **(3)**

- flujo constante $q_0 = -K(h) \left[\frac{dh}{dt} - \cos(A) \right]_{a=0, z=L}$ **(4)**

- tipo mixto $q_0 = -K(h) \left[\frac{dh}{dt} - \cos(A) \right]_{a=0, z=L}$ **(5)**

$$\begin{aligned} h(0,t) &= h_0 && \text{para } t \leq t_0 \\ h(z,t) &= h_L && \text{para } t > t_0 \end{aligned}$$

La condición de borde mixta se ajusta a la simulación de lluvia efectiva sobre la superficie. La evapotranspiración se introduce por imposición de un flujo constante negativo en $z=0$. El nivel freático que conforma el límite inferior del perfil $z=L$ se expresa como borde de potencial constante $h(L,t) = 0$. La resolución de la ecuación (1) requiere la provisión de la función de conductividad hidráulica por lo cual se utilizó la propuesta por (Van Genuchten, 1980).

$$K(h) = K(\text{sat}) \frac{1 - (a|h|)^{b-1} * [1 + (a|h|^b)^m]^2}{\{1 + (a|h|^b)^m\}^{m/2}} \quad \text{para } h < 0$$

(6)

$K(h) = K(\text{sat})$ para $h = 0$
 donde $m = 1 - 1/b$

Asimismo la función de retención hídrica del suelo utilizada (Van Genuchten, 1980) tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \theta(h) &= \theta(\text{res}) + \{\theta(s) - \theta(\text{res})\} / \{1 + (a|h|^b)^m\}^m && \text{para } h < 0 \\ \theta(h) &= \theta(s) && \text{para } h = 0 \end{aligned}$$

(7)

Los parámetros a y b son datos de entrada al sistema basado en determinaciones de humedad θ del suelo sometido a distintas tensiones, y $m = 1 - 1/b$.

El esquema numérico de diferencias finitas establece una ecuación (ecuación 1, ver incrementos finitos) por nodo interior i, j ; siendo i la posición espacial discretizada en Δz y j la posición temporal discretizada en Δt . Se debe incluir una ecuación para cada condición de borde en los extremos, arribando a un sistema de n ecuaciones algebraicas con n incógnitas $[h]$, $[B]$ y $[K]$.

Aplicación al caso de los mallines

Como primer paso se validó el esquema teórico presentado mediante la aplicación del mismo a datos observados en un mallín extraandino de Pilcaniyeu y presentado por (Cremona et al, 1995).

Se contó básicamente con series temporales de humedad a tres profundidades 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm, profundidad del nivel freático, evapotranspiración y precipitación para un período de tiempo de 18 meses. El suelo está caracterizado por sus constantes hídricas dadas por tres observaciones de contenido hídrico sujeto a tensiones de: θ (h=0), θ (h=0,3 atm) y θ (h=15 atm).

Estas observaciones se hacen simultáneamente para tres mallines, definidos por la condición del pastizal como bueno, regular y pobre, y para tres sitios distintos dentro de cada mallín: uno central, vecino al cauce, con una comunidad de Juncus bálticus; otro en el anillo intermedio, donde predomina la Festuca pallescens y el tercero periférico en la zona de transición entre mallín y estepa.

A partir de esta información se simuló el comportamiento para diversos períodos. Sin embargo por contarse con información más precisa de las constantes hídricas se prestó particular atención a las observaciones tomadas en la zona de Festuca pallescens durante el período Diciembre-Mayo, período que se utiliza para el presente trabajo. Este período se caracterizó por tener bajo aporte de lluvias y alta demanda evapotranspiratoria, lo cual interesa a los objetivos del trabajo puesto que esta demanda debe satisfacerse con aportes de la freática. El flujo vertical ascendente establece un buen indicador de las posibilidades de subirrigación.

En la Figura 1 se presentan los registros de precipitación, evapotranspiración y nivel freático que se utilizaron como entrada en el sistema y la serie de humedad de suelo con la cual se contrastaron los resultados. Se indican también las constantes hídricas del suelo analizado.

		Quincenas (diciembre-junio)												
CONDICION BUENA	unida d	D	D	E	E	F	F	M	M	A	A	M	M	J
Humedad 0-30	cc/cc	0,62	0,50	0,47	0,42	0,50	0,42	0,55	0,50	0,47	0,48	0,50	0,55	0,58
Humedad 30-60	cc/cc	0,62	0,50	0,54	0,38	0,37	0,54	0,62	0,47	0,50	0,41	0,42	0,54	0,62
Humedad 60-90	cc/cc	0,62	0,38	0,55	0,42	0,33	0,53	0,67	0,50	0,55	0,50	0,52	0,62	0,62
Precipitación	mm	5	0	3	0	0	25	0	7	14	6	0	0	0
Evapotranspiración	mm	46,0	38,0	50,0	51,0	42,0	42,0	38,0	34,0	21,0	7,0	4,0	4,0	5,0
Profundidad freática	m	0,60	0,75	0,85	1,00	1,20	1,30	1,10	1,10	0,95	0,85	0,70	0,60	0,50
Ctes. hídricas		θ			θ				θ					

		sat 0.62	0.3 0.33 atm	15 0.18 atm
--	--	----------	-----------------	----------------

La simulación se hizo por períodos de quince días con un $\Delta t = 0,05$ horas y un $\Delta z = 1$ cm para la discretización vertical del perfil.

Los parámetros físicos del suelo a, b, m requeridos para la ecuación de Van Genuchten, se obtuvieron por optimización del ajuste de la función (7) a los puntos observados de contenido hídrico a tres tensiones distintas. Se obtuvieron valores para $a = 0.0123$ y $b = 1.793$, de la ecuación 6 y 7.

Para cada período de quince días simulado se establecieron las condiciones iniciales de humedad en el perfil. Para el primer período se fijó la humedad observada al primero de diciembre. Las condiciones iniciales de los períodos subsiguientes se fijaron en base a la distribución de humedad resultante al final del período anterior simulado de 15 días. Las condiciones de borde se establecieron de la siguiente manera:

- a) Para la superficie de suelo $z=0$: condiciones de borde de flujo constante $q = P - Evt$
- b) límite inferior $z=L$, limitado por el nivel freático con potencial constante $h=0$

Como resultado primario de la simulación se obtiene los contenidos de humedad para diferentes profundidades.

En las Figuras 2 se presenta los valores calculados y observados de contenido hídrico (entre 0-30 cm de profundidad) para cada quincena, mostrando un razonable ajuste.

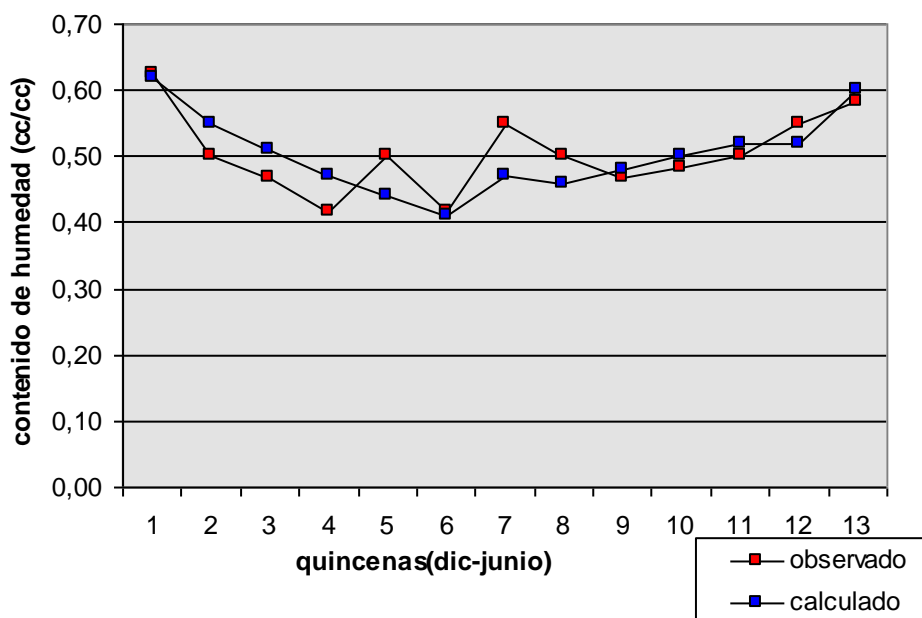


Figura 2: contenido de humedad entre 0-0.3 m de profundidad

Debe tenerse en cuenta que:

- 1) se trabajó con observaciones quincenales, con precipitación y evaporación distribuida uniformemente en este período.
- 2) se consideró constante el nivel freático durante los períodos simulados.
- 3) el suelo es supuesto como homogéneo e isotrópico no contemplando fracturas y grandes poros en contacto con el agua libre. Las mismas constantes hídricas son aplicadas a todo el perfil estudiado.
- 4) se desprecia el proceso de histéresis.
- 5) la EVT se impone en la superficie del suelo siendo que la vegetación toma el agua de acuerdo a la distribución de sus raíces.

El ajuste para los valores de humedad en el estrato superficial (0-30 cm) es un indicador del buen funcionamiento del modelo matemático puesto que es el estrato más alejado de la freática, cuya superficie libre controla en gran medida el flujo vertical ascendente. Además de distribución de humedad en el perfil $\theta(z,t)$, se obtuvo $K(z)$ por resolución directa del sistema de ecuaciones generados. Apartir de estos se calculó la densidad del flujo por la aplicación de la ecuación de Darcy Buckingham:

$$q(z,t) = -K(h) \frac{\partial h}{\partial z}$$

Validado el procedimiento teórico, se ensayaron diversas situaciones basadas en variaciones del flujo evapotranspiratorio y se calculó la profundidad freática adecuada que lo satisficiera. Para ello se consideró que la demanda evapotranspirativa era satisfecha cuando el potencial hídrico a los 15 cm de profundidad no superaba los 2,5 m de tensión lo cual para el suelo estudiado significa un contenido de humedad no menor a 35%. Esta restricción está basada en la hipótesis de no producir estrés hídrico a la vegetación nativa. Se desconsideró el potencial osmótico suponiendo bajas concentraciones salinas.

En la Figura 5 se observa para el tipo de suelo estudiado (curva central) las profundidades freáticas requeridas para satisfacer la EVT. Cabe destacar que las características físicas de este suelo permite cubrir el rango de EVT estacional del lugar.

Un segundo análisis consistió en repetir la estimación de profundidad freática para distintas EVT pero variando la K_s del suelo. Para esto se repitieron simulaciones aplicando el criterio anterior pero suponiendo suelos con $K_s = 1, 2$ y 4 m/día. La Figura 5 indica que para menores K_s se requieren menores profundidades al manto saturado o mayor gradiente, lo cual parece una conclusión obvia de la ecuación de Darcy Buckingham. Sin embargo a los fines prácticos resulta interesante comprobar que variaciones entre 1 y 4 m/d de K_s pueden mantener un flujo

ascendente de 3 y 10 mm por día, respectivamente, para una profundidad a la napa de, por ejemplo, 1 m. Esto habla de la sensibilidad del flujo ascendente respecto a las variables físicas/hídricas del suelo. Es observable también que cuando la demanda evapotranspiratoria se hace mayor, el proceso se hace más sensible a la profundidad de la freática.

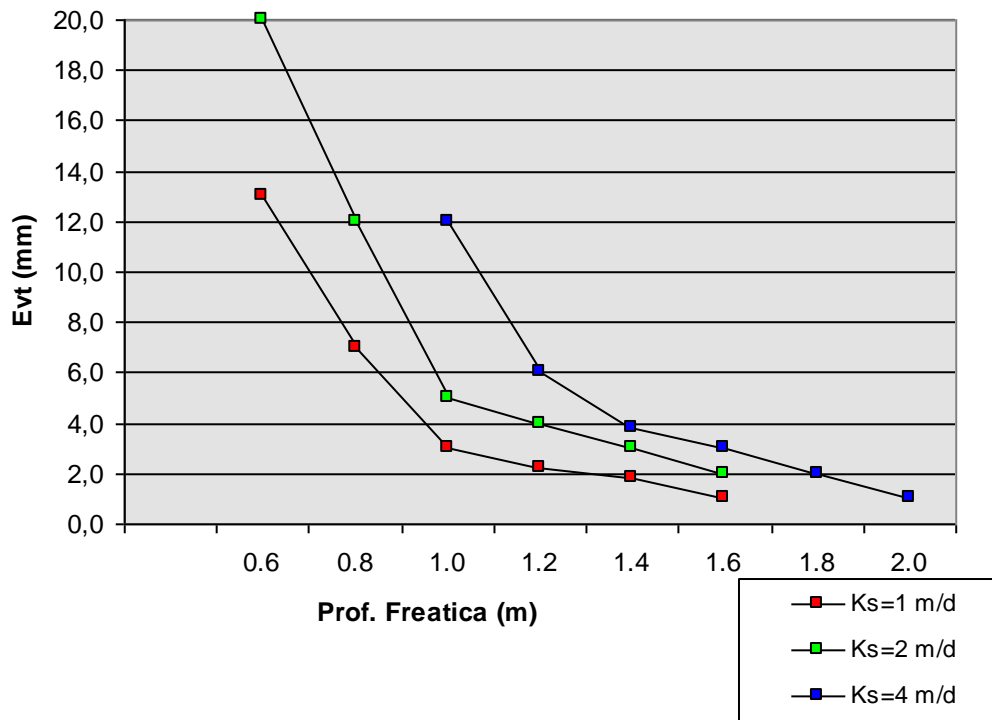


Figura 5: profundidad freática requerida para suplir demandas evapotranspirativas

CONCLUSIONES

- 1.El proceso que gobierna la variación estacional de humedad en un mallín pudo reproducirse mediante las ecuaciones que gobiernan el flujo no saturado a partir de datos de precipitación, evapotranspiración, nivel freático y parámetros físicos del suelo.
- 2.El movimiento de agua en el mallín estudiado permitió demostrar que el flujo vertical ascendente permite satisfacer la demanda evapotranspiratoria si el nivel freático está adecuadamente controlado. Esto permite inferir que la subirrigación puede ser un método de riego físicamente factible de implementar.
- 3.Esté proceso es fuertemente sensible a los parámetros físicos del suelo caracterizable por sus constantes hídricas.
- 4.Esta técnica de análisis es aplicable a otros mallines con características de suelo, clima e hidrogeología distintas siempre y cuando las ecuaciones de flujo sean aplicables.

RECOMENDACIONES

1) La provisión de agua desde la freática presupone la disponibilidad de este recurso, lo cual debe verificarse con un previo balance hídrico del mallín.

2) El movimiento ascendente del agua y su posterior evaporación pone de manifiesto al importancia de la concentración de sales. Este factor puede ser determinante de la degradación del mallín en muy corto plazo. El transporte de sales debe ser detalladamente estudiado.

3) La importancia de los parámetros físicos del suelo en este proceso induce a estudios de variabilidad espacial, antes de utilizarlos como base para el diseño de obras o para medidas de control en los mallines.

BIBLIOGRAFÍA

Cremona, M.V.; Lanciotti, M.L.; Bonvissuto, G.L., 1995. Dinámica del agua en mallines con diferente condición de pastizal en Patagonia Norte. INTA EEA Bariloche.

Haverkamp, R.M. et al, 1977. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. Soil Science Society of America Journal 41: 285-294.

Kutilek, M.; Nielsen, D.R., 1994. Soil Hydrology. Ed. Catena Verlag, Germany. pp 369.

Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1:318-333.

Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44: 892-898.