

DEFICIENCIAS HÍDRICAS INDUCIDAS EN UN CULTIVO DE MAÍZ: EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO*

L.A. SERIO¹; J.M. GARDIOL² y AIDA I. DELLA MAGGIORA³

Recibido: 10/1 /04

Aceptado: 22/12/04

RESUMEN

El modelado del proceso de evapotranspiración en condiciones de estrés hídrico requiere del conocimiento de la evolución temporal de las variables que controlan el flujo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. Las variables más difíciles de monitorear son las relacionadas con el movimiento del agua en el suelo. En este trabajo, se aplicaron funciones empíricas para estimar la evolución temporal y espacial de la conductividad hidráulica y el potencial mátrico del suelo bajo un cultivo de maíz sometido a deficiencias hídricas en distintos subperíodos fenológicos. El patrón de distribución espacial y temporal de ambas variables se vio modificado de acuerdo al momento de ocurrencia y la severidad de las deficiencias hídricas.

Palabras clave. Maíz, evapotranspiración, deficiencia hídrica, potencial mátrico, conductividad hidráulica.

WATER DEFICITS APPLIED TO A MAIZE CROP: EFFECT ON SOIL HYDRAULIC PROPERTIES

SUMMARY

Modelling the evapotranspiration process under water stress conditions needs the knowledge about the time evolution of variables that control water flow in the soil-plant-atmosphere system. The most difficult variables to monitoring are that related to soil water movement. In this work, empirical functions were applied to estimate time and spatial evolution of hydraulic conductivity and matrix suction of soils under a maize crop exposed to water stress during different phenological stages. Time and spatial distribution patterns from both variables were modified in accordance to time of occurrence and severity of water deficits.

Key words. Maize, evapotranspiration, water deficit, matrix suction, hydraulic conductivity.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de evapotranspiración son una herramienta ampliamente utilizada para estimar el consumo de agua de los cultivos. Entre los modelos micrometeorológicos, el de Penman-Monteith (Monteith, 1973) es uno de los más difundidos. Este simula el flujo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, en condiciones potenciales, mediante un esque-

ma de resistencias basado en la analogía entre el proceso de difusión de vapor en la atmósfera y el flujo de corriente eléctrica a través de un conductor. Múltiples variantes de este modelo han sido aplicadas para simular procesos en distintas escalas espaciales y temporales (Shuttleworth y Wallace, 1985; Dolman, 1993; Kustas y Norman, 1999). Gardiol *et al.* (2003) aplicaron una variante propia del modelo de

*El resumen de este trabajo fue presentado en la X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología (Mar del Plata, Argentina, octubre 2004).

¹Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, Facultad de Agronomía, UBA. Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires. E-mail: serio@agro.uba.ar

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA

³Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias UNMDP - EEA INTA Balcarce.

Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración máxima de cultivos de maíz con distintas densidades de siembra en la localidad de Balcarce, provincia de Buenos Aires (Argentina).

La magnitud del flujo de vapor entre las hojas y la atmósfera es regulada por la acción de los estomas. Se han puesto muchos esfuerzos en simular la regulación causada por el cierre estomático a partir del estado hídrico de las hojas y los distintos factores que intervienen en la demanda atmosférica de vapor (Monteith, 1981; Monteith, 1995; Jones, 1998). En el modelo de Penman-Monteith, esta regulación está representada a través de una resistencia superficial (o resistencia estomática) de magnitud variable. En años recientes, se multiplicaron los estudios que hacen referencia al otro aspecto del balance de agua: la extracción de agua del suelo por las raíces. En condiciones de deficiencia hídrica, Calvet (2000) realizó ajustes empíricos a la resistencia estomática para expresarla en función del contenido de agua en el suelo. Serio *et al.* (2001) encontraron una relación empírica entre la resistencia estomática de un cultivo de maíz, la demanda atmosférica y el contenido de agua en el suelo, expresado como porcentaje de agua útil. Otros estudios han permitido consolidar la teoría de que el comportamiento estomático se halla regulado por señales químicas enviadas desde las raíces, en respuesta a deficiencias hídricas en el suelo (Tardieu y Davies, 1993; Steudle, 2000). No cabe dudas de que la extracción de agua del suelo por las raíces cumple un rol dinámico en el acoplamiento hidráulico del continuo suelo-planta-atmósfera. En los modelos, este acoplamiento se logra extendiendo el esquema de resistencias hacia las profundidades del suelo, para representar el flujo de agua desde el suelo hacia las raíces.

La extracción de agua del suelo ocurre como consecuencia de la existencia de un gradiente de potencial entre el suelo y las raíces. La cantidad de agua extraída depende, además, de la resistencia que ejerce el suelo al movimiento del agua y de la densidad y distribución de las raíces (Gardner, 1960). En consecuencia, la extracción de agua desde el suelo (F_w) se puede representar a través de la siguiente expresión:

$$F_w = \frac{\psi_s - \psi_r}{R_s} \quad (1)$$

donde ψ_s es el potencial de agua del suelo, ψ_r el potencial de agua de las raíces y R_s la resistencia del

suelo al flujo de agua. La resistencia R_s es inversamente proporcional a la conductividad hidráulica del suelo (K), a la densidad de raíces (ρ_r) y al espesor de la capa de suelo considerada (Δz). Comparada con las otras resistencias del continuo suelo-planta-atmósfera, ésta adquiere una magnitud significativa cuando el suelo comienza a secarse y la conductividad decrece (Brunini y Thurtell, 1998).

El potencial de retención de agua y la conductividad hidráulica son los parámetros que caracterizan a cada tipo de suelo desde el punto de vista hidráulico. En muchos casos, la falta de mediciones de estos parámetros se convierte en un factor limitante para la aplicación de modelos numéricos del flujo de agua en el suelo y en particular para su acople a modelos de evapotranspiración. Debido a ello, se recurre al empleo de funciones empíricas y al trazado de curvas de retención en función del contenido de humedad y de la textura del suelo. Wösten *et al.* (2001) realizaron un detallado compendio y clasificación de este tipo de funciones.

En este trabajo se aplicaron las funciones empíricas desarrolladas por Saxton *et al.* (1986) para estimar el potencial mátrico y la conductividad hidráulica del suelo, con el objetivo de estudiar la distribución vertical y la evolución temporal de ambas variables, bajo el efecto de deficiencias hídricas inducidas en distintos subperíodos del ciclo de un cultivo de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos corresponden a una experiencia de campo desarrollada en la Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP) - EEA INTA de la localidad de Balcarce (37°45' S; 58°18' W), sobre un Paleudol petrocálcico, durante la campaña agrícola 1998-99. Se utilizó un cultivar de maíz Dekalb 639, sembrado en fecha y densidad óptimas para la región.

El suelo del ensayo fue tratado con insecticida y fertilizado con fósforo y nitrógeno. El terreno fue dividido en 16 parcelas de 5x7 m, separadas entre sí 0,7 m en el ancho y 1 m en el largo. Se instaló un sistema de riego por goteo, un tubo de acceso para sonda de neutrones en el centro de cada parcela y luego el suelo fue cubierto con una lámina de polietileno negro de 100 μ m de espesor para evitar el ingreso de agua de lluvia. La siembra se realizó en forma manual, perforando el polietileno en orificios de 2 cm, espaciados entre sí 17 cm y colocando

3 semillas por orificio. Cuando las plantas alcanzaron el estado de 2-3 hojas se ralearon dejando una planta por orificio. La densidad final fue de 85.714 pl.ha⁻¹. Las fechas de siembra y emergencia fueron el 15 y 21 de octubre, respectivamente.

Se aplicaron 4 tratamientos con 4 repeticiones, según el siguiente detalle:

- RRR: testigo, regado todo el ciclo de crecimiento;
- R₀R: deficiencia hídrica moderada alrededor de la fase de floración (subperíodo V12-R2);
- R₀R: deficiencia hídrica severa alrededor de la fase de floración (subperíodo V12-R2);
- RR0: deficiencia hídrica durante el llenado de granos (subperíodo R2-R6).

Los tratamientos fueron diferenciados según los porcentajes de agua útil en los primeros 60 cm de suelo, según se detalla en el Cuadro N° 1.

CUADRO N° 1. Umbrales de humedad para la aplicación de riego en los distintos tratamientos, expresados como porcentajes de agua útil en la capa 0-60 cm.

Tratamiento	FASES		
	Vegetativa	Floración	Llenado
RRR	50	70	50
R ₀ 1R	50	50	50
R ₀ 2R	50	30	50
RR0	50	70	30

Las observaciones fenológicas se realizaron dos veces por semana en 6 plantas por parcela (Cuadro N° 2). Para el registro se utilizó la clasificación de Ritchie y Hanway (1982). Los tratamientos aplicados modificaron la evolución fenológica del cultivo, como así también la transpiración y su rendimiento final (Della Maggiora *et al.*, 2000).

La medición del contenido de humedad en el suelo se realizó a intervalos de entre 3 y 5 días. En la capa superficial (0-10 cm) se aplicó el método gravimétrico. En el resto del perfil se utilizó una sonda de dispersión de neutrones (Neutron Probe 4300, Troxler Inc., Research Triangle Park, NC), midiendo cada 10 cm hasta los 40 cm de profundidad y a partir de allí cada 20 cm, hasta la profundidad de la capa de tosca, variable entre 80 y 160 cm en el sitio experimental. Los datos obtenidos fueron convertidos a valores de humedad en volumen (θ), aplicando la ecuación de calibración del instrumento.

A partir de muestras extraídas en dos lugares dentro de sitio experimental, se determinaron en laboratorio las texturas del suelo, expresadas como porcentaje de arena, limo grueso, limo fino y arcilla, y el porcentaje de materia orgánica en cada horizonte del suelo. Dado que los horizontes naturales no coincidían con las capas equiespaciadas en que se midió la humedad, los datos texturales fueron recalculados aplicando interpolación lineal (Cuadro N° 3).

El potencial de agua en el suelo (ψ_s) y la conductividad hidráulica (K) en cada capa fueron estimados mediante

CUADRO N° 2. Estados fenológicos del cultivo de maíz. Fechas de ocurrencia y días desde emergencia (DDE). Los valores resultaron del promedio de observaciones en 24 plantas por tratamiento.

FASE	DESCRIPCIÓN	TRATAMIENTO							
		RRR		RR0		R ₀ 1R		R ₀ 2R	
		Fecha	DDE	Fecha	DDE	Fecha	DDE	Fecha	DDE
S	Siembra	15/10		15/10		15/10		15/10	
E	Emergencia	21/10		21/10		21/10		21/10	
V6	6 hojas expandidas	23/11	33	23/11	33	23/11	33	23/11	33
V12	12 hojas expandidas	18/12	57	22/12	61	20/12	59	22/12	61
VT	Panojamiento	4/1	75	5/1	76	7/1	78	9/1	80
R1	Aparición de estigmas	7/1	78	9/1	80	10/1	81	11/1	82
R2	Cuaje (ampolla)	13/1	84	14/1	85	15/1	86	22/1	93
R3	Grano lechoso	25/1	96	25/1	96	25/1	96	1/2	103
R4	Grano pastoso	5/2	107	5/2	107	5/2	107	12/2	114
R5	Grano dentado	19/2	121	15/2	117	19/2	121	1/3	131
R6	Madurez fisiológica	15/3	145	9/3	139	15/3	152	22/3	152

CUADRO N° 3. Texturas del suelo por capas.

PROFUNDIDAD (cm)	ARCILLA (%)	LIMOS (%)		ARENA (%)	MATERIA ORGÁNICA (%)	CLASE TEXTURAL
		FINO	GRUESO			
0-10	26,35	22,29	17,21	34,15	4,18	Franco
10-20	26,51	22,40	17,21	33,88	4,18	Franco
20-30	26,98	22,45	17,18	33,38	4,11	Franco
30-40	28,88	20,57	17,04	33,51	2,67	Franco arcilloso
40-60	42,85	14,58	14,22	28,34	1,15	Arcilloso
60-80	42,05	14,47	13,13	30,34	0,85	Arcilloso
80-100	29,67	20,58	14,85	34,89	0,55	Franco arcilloso
100-120	22,69	23,91	14,82	38,58	0,31	Franco
120-140	16,46	28,64	19,88	35,02	0,28	Franco limoso

las relaciones obtenidas por Saxton *et al.* (1986), en función de θ y los datos texturales:

$$\psi_s = A \cdot \theta^B \quad (2)$$

$$K = \exp(\alpha + \beta/\theta) \quad (3)$$

donde A, B, α y β son funciones empíricas de los porcentajes de arena y arcilla.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presenta la distribución del potencial mátrico ψ_s con la profundidad y con el tiempo. El tiempo está expresado en días desde emergencia (DDE). Los potenciales están expresados en unidades de metros de columna de agua equivalente. En todos los tratamientos se observó inicialmente homogeneidad de ψ_s en casi todo el perfil, con valores superiores a -5 m. La mayor variabilidad temporal de ψ_s corresponde a las profundidades de donde se está extrayendo la mayor cantidad de agua. La gran variabilidad de ψ_s en los primeros cm del suelo se debe a la mayor densidad de raíces y la reposición de agua mediante el riego. En el tratamiento regado (RRR, Figura 1.a), a profundidades mayores que 60 cm hay muy poca variabilidad temporal de ψ_s , indicando que la mayor cantidad de agua se extrae de los 60 cm superiores, coincidiendo con los patrones de extracción de maíz bajo riego observados en campañas anteriores

(Gardiol *et al.*, 1997). En los tratamientos R0₁R y R0₂R (Figuras 1.c y 1.d) se observa la caída del potencial cerca de superficie entre los 50 y 90 DDE, los que alcanzaron valores de -80 y -110 m, respectivamente. Esto obligó a las plantas a extraer agua de mayores profundidades, como se evidencia al comparar con el caso RRR. A partir de los 93 DDE, cuando en la capa superior se aumentó el agua útil mediante el riego, en ambos tratamientos se extrajo poco agua por debajo de los 60 cm. En el tratamiento RR0 (Figura 1.b) no hubo una caída tan grande del potencial en la capa superior durante el período en que se indujo la deficiencia hídrica (a partir de 90 DDE). Esto puede deberse a que la deficiencia se indujo cuando las raíces estaban ya totalmente desarrolladas y habían alcanzado mayores profundidades, donde tenían agua disponible. Evidencia de ello es que en este tratamiento es donde el potencial cae más fuertemente en profundidades mayores a los 60 cm durante la parte final del ciclo del cultivo.

En la Figura 2 se presenta la distribución de la conductividad hidráulica K con la profundidad y con el tiempo. Debido a que K puede variar en un amplio rango, abarcando varios órdenes de magnitud, para su representación gráfica se calculó el logaritmo en base 10 ($\log_{10}(K)$), de manera que una variación de un dígito en el gráfico corresponde a una variación de un orden de magnitud en la conductividad hidráulica.

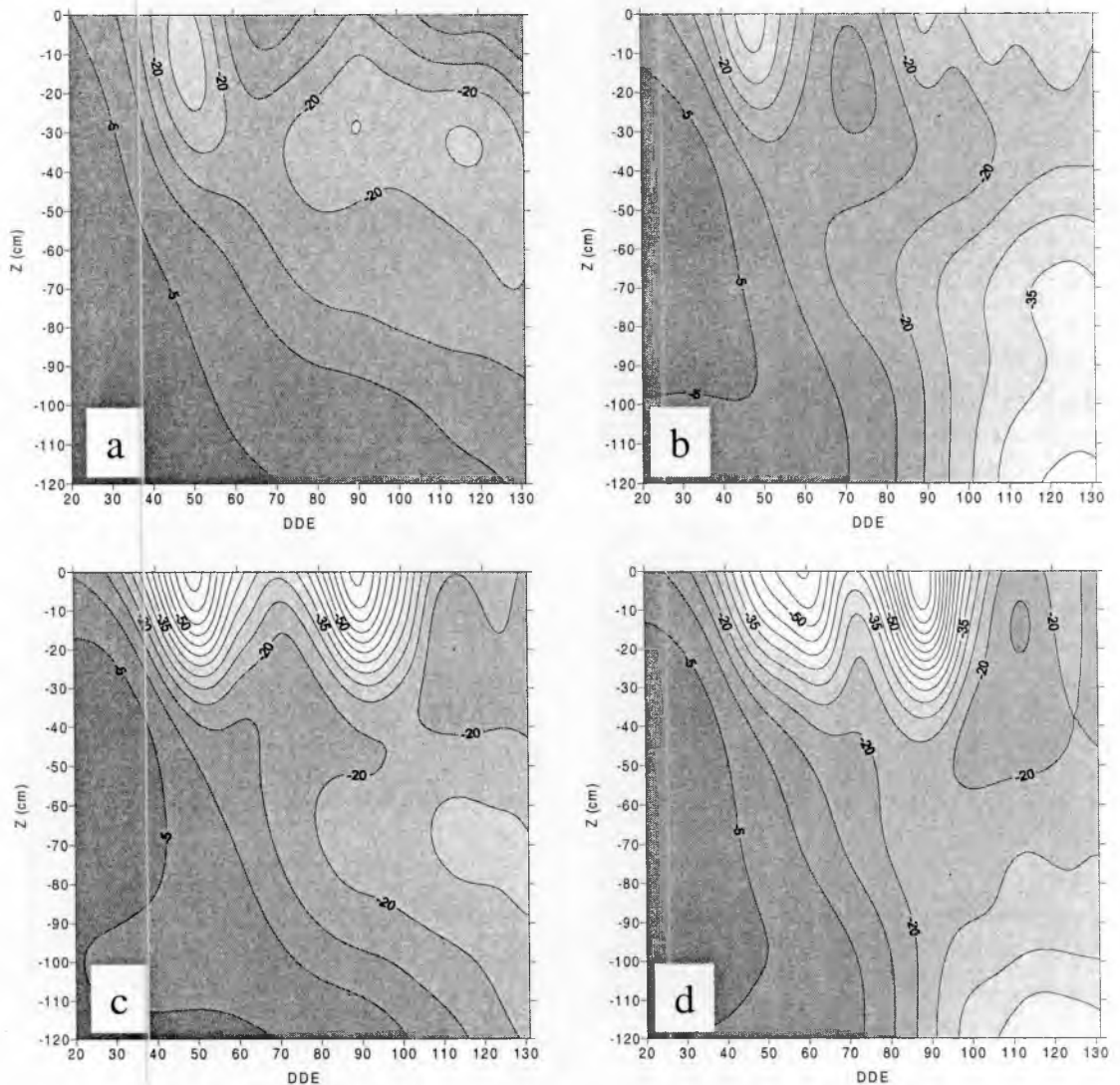


FIGURA 1. Distribución del potencial de agua en el suelo (ψ_s) con la profundidad (eje vertical, en cm) y el tiempo (eje horizontal, en DDE) en los cuatro tratamientos aplicados: a) RRR; b) RR0; c) R0,R; d) R0,R.

Se observan patrones de variación de K similares a los observados en el potencial ψ_s . Cerca de la superficie, y en todos los tratamientos, la conductividad inicial fue del orden de 10^{-4} m.d^{-1} . La gran sensibilidad de K a la humedad del suelo se evidencia

en los primeros centímetros, donde el contenido de agua es muy variable y K decrece hasta 3 órdenes de magnitud en el testigo regado (RRR, Figura 2.a) y entre 6 y 7 órdenes de magnitud en los tratamientos con deficiencias hídricas alrededor de la fase de

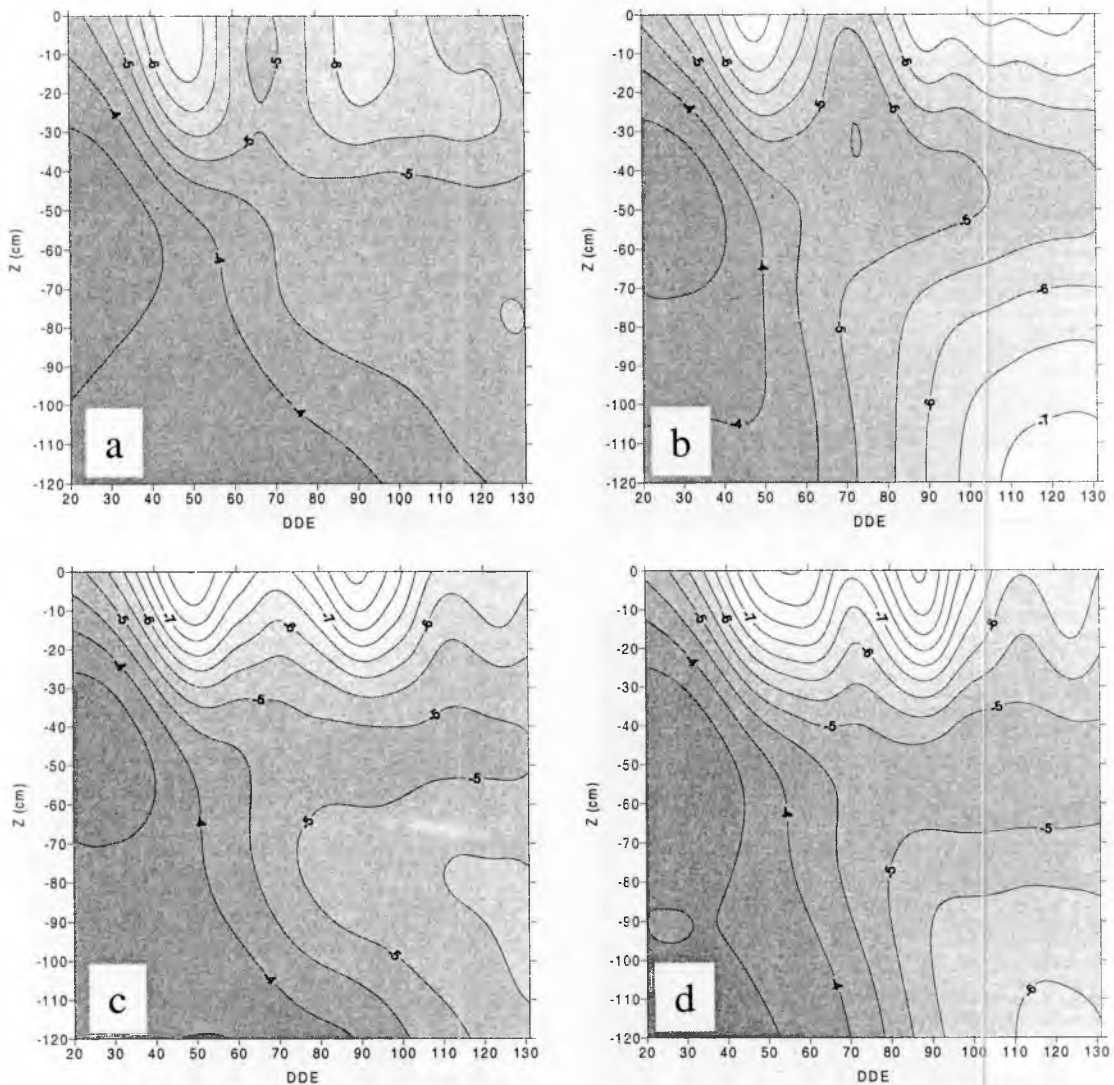


FIGURA 2. Distribución de la conductividad hidráulica del suelo (K) con la profundidad (eje vertical, en $m.d^{-1}$) y el tiempo (eje horizontal, en DDE) en los cuatro tratamientos aplicados: a) RRR; b) RR0; c) R0,R; d) R0,R. Los valores graficados corresponden a $\log_{10}(K)$.

floración (R0,R y R0,R, Figuras 2.c y 2.d respectivamente). El decaimiento exponencial de la conductividad con la humedad hace que en suelos relativamente secos un pequeño cambio en el contenido de agua provoque una gran variación de K .

En las capas más profundas, en el tratamiento RRR hubo muy poca variación de K , entre 10^4 y $10^5 m.d^{-1}$. Las deficiencias hídricas inducidas obligaron a la extracción de agua desde más allá del metro de profundidad. Esto hizo decaer la conductividad en

esas profundidades hasta 10^{-7} m.d⁻¹ en el tratamiento con deficiencia durante el llenado de granos (RRO, Figura 2.b).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que las deficiencias hídricas inducidas mediante tratamientos diferenciados, con respecto a un testigo regado, modificaron sustancialmente la distribución espacial y temporal del potencial de agua y de la conductividad hidráulica del suelo, en las parcelas sometidas a dichos tratamientos.

El patrón de distribución espacial y temporal de ambas variables se vio modificado de acuerdo al

momento de ocurrencia y la severidad de las deficiencias hídricas. Esto sugiere una modificación en el patrón de extracción de agua del suelo por las raíces del cultivo de maíz.

Dado que la conductividad hidráulica representa la velocidad con la que el agua puede fluir en el suelo, conocer su distribución con la profundidad en un instante dado es un requisito indispensable para poder estimar la resistencia al flujo de agua en el suelo. El conocimiento de la variación temporal y con la profundidad de esta resistencia y del potencial de agua en el suelo puede ser utilizado para el desarrollo de modelos dinámicos acoplados que permitan estimar el flujo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera.

BIBLIOGRAFÍA

- BRUNINI, O and G. THURTELL. 1998. Resistance to water flow in the soil-plant system - A case study with indoor grown maize plants. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6: 171-178.
- CALVET, J.C. 2000. Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micro-meteorological data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103: 229-247.
- DELLA MAGGIORA, A.I.; J.M. GARDIOL; A.I. IRIGOYEN; E. SUERO y L. SERIO. 2000. Efecto de la disponibilidad de agua en el suelo sobre la transpiración, rendimiento y eficiencia de uso de agua de un cultivo de maíz (*Zea mays*). *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia* (CD-ROM). Sociedade Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro, Brasil. 9 p.
- DOLMAN, A.J. 1993. A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65: 21-45.
- GARDIOL, J.M.; A.I. IRIGOYEN; A.I. DELLA MAGGIORA y V. SILVA. 1997. Patrón de extracción de agua de cultivos de maíz y soja en un argiudol típico de Balcarce. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 17: 137-142.
- GARDIOL, J.M.; L.A. SERIO and A.I. DELLA MAGGIORA. 2003. Modelling evapotranspiration of corn (*Zea mays*) under different plant densities. *Journal of Hydrology*, 73: 188-196.
- GARDNER, W.R. 1960. Dynamic aspect of water availability to plants. *Soil Science*, 89: 63-73.
- JONES, H.G. 1998. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. *Journal of Experimental Botany*, 49: 387-398.
- KUSTAS, W.P. and J.M. NORMAN. 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94: 13-29.
- MONTEITH, J.L. 1973. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London.
- MONTEITH, J.L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107: 1-27.
- MONTEITH, J.L. 1995. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell and Environment*, 18: 357-364.

- RITCHIE, S.W. and J.J. HANWAY. 1982. How a corn plant develops. *Special Report N° 48*. Iowa State University. 17 p.
- SAXTON, K.E.; W.J. RAWLS; J.S. ROMBERGER and R.I. PAPENDICK. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1031-1036.
- SERIO, L.A.; A.I. DELLA MAGGIORA y J.M. GARDIOL. 2001. Efecto del agua disponible en el suelo y la demanda atmosférica sobre la resistencia estomática de un cultivo de maíz (*Zea mays*). *VIII Congreso Argentino de Meteorología y IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología* (CD-ROM). Centro Argentino de Meteorólogos, Buenos Aires. 8 p.
- SHUTTLEWORTH, W. and J. WALLACE. 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111: 839-855.
- STEUDLE, E. 2000. Water uptake by roots: effects of water deficit. *Journal of Experimental Botany*, 51: 1531-1542.
- TARDIEU, F. and W.J. DAVIES. 1993. Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant, Cell and Environment*, 16: 341-349.
- WÖSTEN, J.H.; Y.A. PACHEPSKY and W.J. RAWLS. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251: 123-150.