

**VALIDACION DE UN MODELO DE BALANCE HIDROLOGICO VERSATIL  
PARA MAIZ EN CONDICIONES DE SEMIARIDEZ**

J.L. DARDANELLI (1) y J.C. SOLA (2)

Recibido: 09-01-91

Aceptado: 04-03-91

**RESUMEN**

El modelo de balance hidrológico versátil, fue empleado en Manfredi (Córdoba), para estimar diariamente el contenido de agua útil en un suelo Haplustol éntico de la serie Oncativo, en la región semiárida central de la provincia de Córdoba. La estimación se realizó en un período que incluyó cuatro meses de barbecho y el ciclo evolutivo de un cultivo de maíz. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se introdujo la ecuación de Penman, utilizándose la precipitación efectiva determinada en campo.

La calibración del modelo se efectuó por medio de iteraciones sucesivas, partiendo de coeficientes encontrados en una calibración preliminar, hasta encontrar el mejor ajuste entre los valores observados de agua útil del suelo y los simulados por el modelo. Se obtuvieron buenas estimaciones de humedad del suelo con errores de calibración entre el 1 y 12% en los distintos estratos. Las pérdidas por escorrentía, 200 mm, significaron un 35% del monto precipitado en el período diciembre a marzo. La eficiencia de barbecho estimada por el modelo fue sólo del 24%, indicando importantes pérdidas por evaporación y escorrentía. En un balance global, el agua almacenada en el perfil del suelo a la siembra aportó sólo el 11% de los 338 mm estimados como evapotranspiración real del cultivo.

Estos resultados sugieren la necesidad de encontrar técnicas de manejo que disminuyan en el sistema las pérdidas por escurrimiento superficial y evaporación del suelo.

**Palabras clave:** humedad del suelo, evapotranspiración, modelación, maíz.

**VERSATILE MOISTURE BALANCE MODEL CALIBRATION FOR CORN IN SEMI-ARID CONDITIONS**

**SUMMARY**

The versatile soil moisture balance model was used in Manfredi (Córdoba), to estimate in a daily basis the water content in an entic Haplustol soil serie Oncativo, located at the central semi-arid Córdoba Region. Estimations were done during one period which included four fallow months and a corn crop growth cycle. The Penman equation to calculate potential evapotranspiration was introduced. On the other hand, field effective rainfall measured in the field was used in the model.

Model calibration was performed by successive iterations up to find the best fit between the observed and the simulated values. Good soil moisture estimations with calibration errors between 1 and 12% for the different layers, were obtained. Losses by runoff during the period December-March totalized 200 mm, 35% of the rainfall. The model estimated a 24% fallow efficiency. In a whole balance, soil profile stored water at sowing gaved only 11% from the 338 mm estimated as crop actual evapotranspiration.

These results suggest the need of founding management techniques in order to diminish both runoff and soil evaporation losses.

**Key words:** soil moisture, evapotranspiration, modelling, corn.

(1) Estación Experimental Agropecuaria INTA Manfredi, (5988) Manfredi, Córdoba - Argentina - (2) Centro de Investigaciones hídricas de la región semiárida (CIHRSA). Ambrosio Olmos 1142. (5000) Córdoba - Argentina-

### INTRODUCCION

La relación entre la evapotranspiración de un cultivo y su productividad ha sido documentada en numerosos estudios (Hanks, 1983). El consumo de agua por un cultivo está determinado en gran medida por la humedad disponible en el suelo, cuya determinación periódica es engorrosa y aplicable a parcelas experimentales. La extrapolación de los resultados experimentales al gran cultivo se dificulta notablemente al no disponerse de información periódica de humedad de suelo para las áreas consideradas (Ravelo y Sola, 1988). En general, los datos disponibles carecen de representatividad en relación al espacio y al tiempo, y sólo tienen una validez muy localizada.

El Balance Hidrológico Versátil (BHV), desarrollado por Baier y Robertson (1966), permite estimar en forma diaria el contenido de humedad del suelo y dichas estimaciones de humedad edáfica son representativas para el lote considerado. Una vez calibrado el modelo, se puede simular la evolución de la humedad del suelo en forma continua, para un mismo tipo de cultivo y suelo. Se requieren solamente observaciones meteorológicas disponibles en general en estaciones convencionales, y datos de suelo y cultivo relativamente sencillos de obtener. Existen otros modelos que exigen una mayor cantidad de datos de entrada, no siempre fáciles de obtener. Sin embargo, De Jong (1988), comparando el modelo de BHV con otro de mayor complejidad, que requiere información adicional en cuanto a características físicas del suelo, concluyó que ambos predicen la evolución de la humedad del suelo con similar precisión.

Sola (1988) calibró el BHV para un cultivo de soja con datos obtenidos en Manfredi (Córdoba), encontrando una precisión aceptable, con errores de estimación entre 6 y 16,5% para los distintos estratos de suelo. Similar

grado de ajuste obtuvo Rotondo (1988), para un cultivo de colza en Río Cuarto (Córdoba). Sola y Dardanelli (1989), calibraron el modelo en forma preliminar para el cultivo de maíz, encontrando errores en la estimación del agua edáfica disponible entre el 2 y 8%. Sin embargo, la escasa cantidad de observaciones de humedad edáfica, y la necesidad de precisar mejor la escurriencia, dado que el algoritmo que el modelo posee para estimar el escurrimiento superficial no produce resultados satisfactorios en el suelo considerado, hicieron necesaria una segunda campaña de calibración.

El objetivo de este trabajo fue el de validar el modelo de BHV para un suelo representativo de la región semiárida de Córdoba, y para un período que incluyó suelo en barbecho y el ciclo evolutivo de un cultivo de maíz.

### MATERIALES Y METODOS

El experimento se realizó en la Estación experimental agropecuaria INTA Manfredi (31°49'S, 63°46'W), sobre un lote de 11 ha en el que se sembró maíz híbrido Morgan 400 después de soja. La fecha de siembra fue el 23 de diciembre de 1989, con una densidad de 4 a 5 semillas por metro lineal a 0,70 m entre hileras quedando a cosecha 5,2 plantas/m<sup>2</sup> (52.000 plantas/ha). Dentro del lote se eligió una parcela experimental de 80 x 20m. Los estadíos fenológicos del cultivo se determinaron semanalmente, utilizando la escala de Ritchie y Hanway (1982). La cosecha se realizó en mayo de 1990, determinándose el rendimiento corregido al 14% de humedad.

El suelo en que se realizó el ensayo es un Haplustol éntico, mixto méxico térmico, perteneciente a la Serie Oncativo, caracterizado por un perfil franco limoso, con drenaje moderado a rápido (Jarsun *et.al.*, 1987). La Capacidad de Campo (CC) fue determinada a campo, en parcelas con suelo similar al de este experimento (Bach-

**Cuadro N° 1: Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), densidad aparente y agua útil para un suelo de la serie Oncativo.**

Profundidad (cm)	CC (W%)	PMP (W%)	Dens.ap. (gr/cm <sup>3</sup> )	Agua útil (mm)
0-15	29,0	9,6	1,24	36,0
15-30	24,7	9,6	1,26	28,6
30-45	24,0	9,8	1,20	25,6
45-75	23,3	9,6	1,18	48,4
75-105	22,6	9,3	1,17	46,7
105-165	22,6	8,8	1,17	97,2

meier y Dardanelli, 1990). Para los primeros 15 cm se tomó como CC el máximo valor observado durante el período de mediciones. El Punto de Marchitez Permanente (PMP) fue establecido como el valor de Humedad Gravimétrica (W%) obtenido a -15 bares sobre muestras disturbadas (Bachmeier y Buffa, 1988). En el cuadro N° 1 se aprecian los valores de CC, PMP, densidad aparente y agua útil para diferentes estratos considerados.

La humedad del suelo se midió con una periodicidad de 6 días durante el ciclo del cultivo, utilizándose la técnica gravimétrica en los primeros 15 cm del perfil, y una sonda de neutrones CPN modelo 501DR, desde ese nivel hasta 245 cm de profundidad, previamente calibrada (Bachmeier et al., 1990). Para este estudio, sólo se consideraron las observaciones realizadas hasta 165 cm de profundidad, por no registrarse extracción de agua edáfica por debajo de la misma.

La información meteorológica necesaria para calcular la ETP fue obtenida de la Estación Agrometeorológica de INTA Manfredi, ubicada a 2 km del lugar del experimento.

Con los datos meteorológicos, de humedad de suelo y fenológicos, se aplicó el modelo de BHV programado en lenguaje Fortran por Sola y Ravelo (1988). El BHV divide al suelo en seis estratos según porcentajes preestablecidos de agua útil, en los cuales se calibran los mecanismos de extracción y recarga de humedad. El método origi-

nal de estimación de la ETP fue sustituido por el de Penman, adoptándose un albedo de 0,22 (Sola, 1988).

La calibración del modelo se efectuó por medio de iteraciones sucesivas hasta obtener el mayor coeficiente de correlación y el menor error cuadrático medio, entre los valores de humedad edáfica observados y estimados por el modelo. Los parámetros de calibración del modelo son: 1) El Coeficiente de Cultivo (kj), que expresa el monto de agua extraído de cada estrato por las raíces, y que es función del suelo y del cultivo; 2) El Coeficiente de Percolación (b); y 3) La matriz de ajuste para distintos tipos de Curvas de Secado del Suelo (zj).

En este experimento se adoptaron como parámetros zj y b los valores obtenidos por Sola (1988) para soja, en el mismo tipo de suelo. La validación del modelo se efectuó entonces variando los valores del coeficiente kj, a partir de los obtenidos por Sola y Dardanelli (op. cit.), en una calibración preliminar. Para ello se dividió la totalidad del período considerado en cinco subperíodos, delimitados por una fecha de inicio y cinco estadios fenológicos que indican cambios importantes en los patrones de extracción de humedad: Suelo desnudo: (DES), tercera hoja (V3), novena hoja (V9), 50% de aparición de estigmas (R1), 20% de grano céreo (R5), y madurez fisiológica (R6). Se extrajeron muestras de humedad de suelo durante un período prolongado de suelo desnudo con el objeto

Cuadro N° 2: Coeficientes de cultivo de maíz (kj), para la campaña 1989/90.

Subpe- ríodo	Fechas	Estrato					
		1	2	3	4	5	6
DES-V3	20-08-89/05-01-90	0,25	0,11	0,03	0,01	0,00	0,00
V3-V9	06-01-90/27-01-90	0,27	0,15	0,11	0,09	0,08	0,03
V9-R1	28-01-90/18-02-90	0,22	0,22	0,16	0,16	0,08	0,03
R1-R5	19-02-90/25-03-90	0,28	0,21	0,32	0,23	0,07	0,02
R5-R6	26-03-90/30-04-90	0,31	0,21	0,34	0,13	0,04	0,02

de obtener coeficientes kj que expresaran la dinámica del agua en el suelo durante el barbecho.

Se incluyó el estadio V9 porque el mismo delimita un cambio importante en la tasa de crecimiento del cultivo. (Sola y Dardanelli, op. cit.).

#### RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro N° 2 se aprecian los coeficientes de cultivo (kj), obtenidos en el experimento.

Se puede observar que los coeficientes kj disminuyen considerablemente en los estratos de suelo más profundos, llegando a valores cercanos a cero en el sexto estrato, tendencia similar a la encontrada para maíz por Baier et al. (1979). Los coeficientes kj son consecuencia de un patrón de extracción característico del sistema radical de la especie. En coincidencia con los mismos autores, los éstos coeficientes tienden a aumentar con el avance del ciclo evolutivo del cultivo, alcanzando su máximo después de aparición de estigmas (R1), y decreciendo levemente hacia el final del ciclo evolutivo.

Comparando los valores obtenidos con una calibración preliminar (Sola y Dardanelli, op.cit.), se observan importantes disminuciones en el segundo y tercer estrato, debido a que, exceptuando algunos casos en que se disponía de valores de precipitación efectiva, se aplicó el algoritmo de infiltración propuesto por el modelo original, el cual subestima la escorrentía en el suelo donde se realizó el expe-

rimento. Además, por contarse en la calibración preliminar con escasas fechas de observación, se obtuvieron buenas correlaciones y bajos errores cuadráticos, pero es probable que se haya forzado al modelo a incluir como Evapotranspiración Real (ETR), una cantidad de precipitación que fue, en realidad, pérdida por escorrentía.

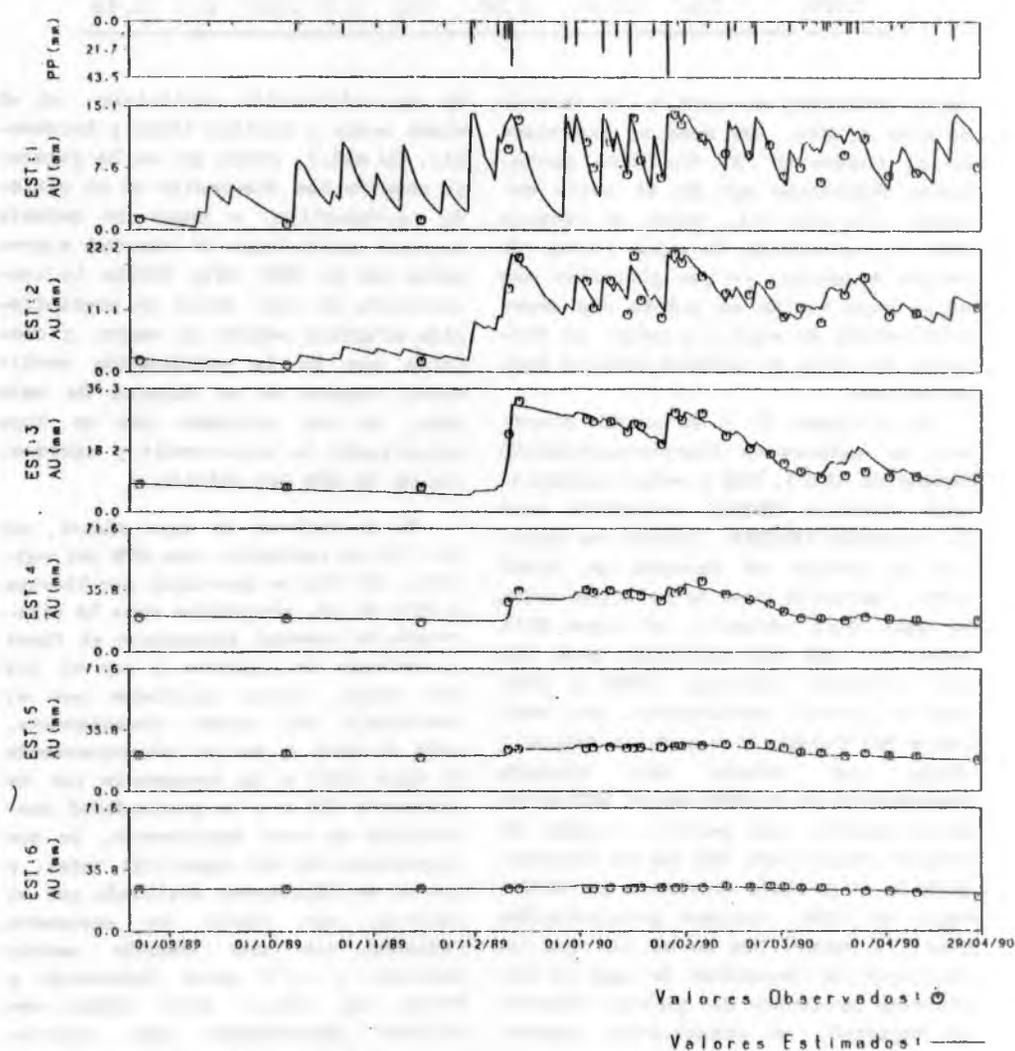
En este suelo, por sus características de débil estabilidad estructural y elevado porcentaje de limo (Jarsun et al., 1987), se produce un encostramiento superficial, lo que probablemente origine una baja tasa de infiltración básica. Por lo tanto, a pesar de que el ensayo se ubicó en un terreno relativamente plano, con pendiente del 0,15%, se puso de manifiesto una elevada proporción de escorrentía, en especial con lluvias intensas, lo que significó una pérdida neta de 200 mm en el sistema considerado, en el período diciembre de 1989 a marzo de 1990. Este monto significó un 35% de los 566 mm precipitados, y el 47% de las lluvias intensas que originaron escorrentía.

En el Cuadro N° 3 se observan los coeficientes de correlación, error cuadrático medio y error porcentual entre valores de agua útil observados y estimados por el modelo. Se verifica un buen ajuste en todos los estratos considerados, especialmente en los inferiores, donde los procesos de extracción y recarga son menos intensos.

La figura 1 muestra las variaciones diarias estimadas de humedad para los seis estratos considerados bajo un cultivo de maíz, y los valores obser-

**Cuadro N° 3: Coeficientes de correlación (r), error cuadrático medio (ECM) y error porcentual (E%) entre los valores estimados y observados de agua útil en los diferentes estratos del suelo.**

Estrato N°	1	2	3	4	5	6
Prof. (cm)	0-6	6-15	15-34	34-77	77-121	121-165
Agua Útil						
mm (1)	14,1	21,2	35,3	70,6	70,6	70,6
r	0,88	0,95	0,97	0,95	0,89	0,79
ECM, mm (2)	1,70	1,70	2,03	2,37	1,46	0,88
E% (2/1)*100	12,1	8,0	5,8	3,4	2,0	1,2



**Figura 1: Variación diaria del contenido de agua útil (AU) por estrato (EST). Las líneas verticales representan precipitaciones (PP) diarias.**

Cuadro N° 4: Evapotranspiración Real (ETR), Evapotranspiración Potencial (ETP), Evapotranspiración Relativa (EREL=ETR/ETP) e Índice de Humedad de Suelo (IHS) para cultivo de maíz. Campaña 1989/90.

Subperíodo	N° días	IHS 25%	IHS 100%	ETR mm	ETR mm	ETP mm	ETP mm	EREL
DES-SI	125	0,25	0,29	107	0,9	586	4,7	0,18
SI-V3	14	0,71	0,46	30	2,2	96	6,8	0,32
V3-V9	22	0,69	0,48	96	4,4	137	6,2	0,70
V9-R1	22	0,77	0,51	74	3,3	81	3,7	0,91
R1-R5	35	0,55	0,38	110	3,8	110	3,8	1,00
R5-R6	36	0,43	0,32	68	1,9	85	2,4	0,80
TOTAL SI-R6	129	0,60	0,41	378	2,9	509	3,9	0,74
TOTAL	254	0,43	0,35	485	1,9	1095	4,3	0,44

vados señalados con puntos. Se aprecia un buen ajuste, tal como se expresara en el Cuadro N° 3. Por otra parte, puede observarse que en el sexto estrato (121-165 cm), tanto la recarga como la extracción de agua fueron de escasa magnitud, lo que justifica que no se haya tenido en cuenta una mayor profundidad de suelo, a pesar de disponer de datos de humedad edáfica hasta 240 cm.

En el Cuadro N° 4 se pueden observar los valores de Evapotranspiración Potencial (ETP), ETR y evapotranspiración relativa (EREL), entendida como la relación ETR/ETP. También se aprecia el Índice de Humedad de Suelo (IHS), definido como la relación entre el agua útil actual y el agua útil total. El IHS fue calculado para los tres primeros estratos (25%) y para todo el perfil considerado. Del análisis del Cuadro N° 4 y de la Figura 1 surge que existe una elevada dependencia de la ETR con el IHS en la parte superior del perfil. A pesar de haberse registrado 566 mm de lluvias, durante el período diciembre de 1989 a marzo de 1990, ninguna precipitación efectiva superó los 40 mm, lo que no favoreció la reposición de agua en los estratos profundos del perfil. Tampoco se registró, en consecuencia, percolación profunda.

Comparando los valores de EREL surtidos de esta calibración con aquellos

de una calibración preliminar en el mismo suelo y cultivo (Sola y Dardanelli, *op cit.*), surge que en la presente campaña han disminuido en el período reproductivo, a pesar de existir mejores condiciones de humedad expresadas por el IHS. Esto indica la conveniencia de usar datos de precipitación efectiva medida en campo, y confirma que en la calibración preliminar, cuando no se dispuso de este dato, es muy probable que se haya subestimado la escorrentía y sobreestimado la ETR del cultivo.

En un balance de agua global, de los 378 mm estimados como ETR del cultivo, 337 fueron aportados por lluvias y sólo 41 mm, entendidos como la diferencia de humedad almacenada al final y comienzo del cultivo o sea el 11% del total, fueron aportados por el almacenaje del suelo. Posiblemente, esto se debe a que el almacenamiento de agua útil a la emergencia fue de solamente 126 mm a la profundidad considerada en este experimento, lo que representa 45% del agua útil total, y que no es fácilmente utilizada por el cultivo, por cuanto se encuentra retenida con una succión matriz superior a -1,5 bares (Bachmeier y Buffa, *op. cit.*). Esto indica una elevada dependencia del cultivo respecto a las lluvias durante su ciclo evolutivo, lo cual es normal en la región, caracterizada por una marcada

deficiencia de agua en el período mayo a setiembre.

El modelo calculó para el período de barbecho, expresado por el subperíodo DES-SI (Cuadro N° 4), un aporte de 48 mm de agua al perfil, monto que comparado con los 200 mm de precipitaciones en dicho período indica un 76% de pérdidas por evaporación y escorrentía, lo cual significa una eficiencia de barbecho de sólo el 24%. Por lo tanto, serían necesarias prácticas culturales que redujesen las pérdidas de agua evaporada y escurrida, para que el incremento de reserva de agua en el perfil sea significativo.

El rendimiento del lote experimental alcanzó los 6800 kg/ha, que refleja las buenas condiciones de IHS en los tres primeros estratos (Cuadro N° 4). Tanto el rendimiento como los IHS fueron superiores a los observados en una calibración preliminar en maíz. (Sola y Dardanelli, *op. cit.*).

bre-marzo. Resulta necesario establecer un algoritmo de escorrentía para las condiciones locales, de forma de poder realizar estimaciones de humedad edáfica a partir de datos registrados en el pluviómetro.

3. En un balance global, el agua almacenada en el suelo a la siembra, que representaba el 45% del agua útil total, sólo aportó el 11% de los 378 mm consumidos por el maíz, y no se observaron pérdidas por percolación profunda.
4. La eficiencia de barbecho estimada por el modelo para cuatro meses previos a la siembra, fue de sólo el 24% sobre 200 mm precipitados, indicando apreciables pérdidas por evaporación y escorrentía, las que podrían reducirse con prácticas culturales adecuadas.

#### CONCLUSIONES

1. El BHV es una herramienta que permitió determinar adecuadamente la variación diaria del contenido de humedad edáfica bajo un cultivo de maíz. Los errores de estimación fluctuaron entre el 1 y 12%.
2. Fue imprescindible para una calibración más precisa del modelo, la determinación en campo del escurrimiento superficial, que totalizó 200 mm, 35% de las lluvias en el período diciem-

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Andrés Ravelo, investigador del CONICET, por las oportunas sugerencias realizadas en la redacción de este trabajo; y a los Ings. Agrs. Francisco Núñez Vázquez y Héctor P. Salas, investigadores de la EEA INTA Manfredi, por la colaboración en los trabajos a campo. También agradecen al Ing. Raúl Vidal, Jefe del Centro de Cómputos del CIHRSA, por el asesoramiento brindado en la operación del modelo.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1) BACHMEIER, O.A. y E.V. BUFFA. 1988. Una función de ajuste para la curva característica de humedad de un suelo de la región central de Córdoba. *Actas del XIII Congreso de la Ciencia del Suelo, Corrientes (Arg.)*.

- 2) BACHMEIER, O.A.; J.L. DARDANELLI. 1990. Comparación entre el Límite Máximo de agua útil medido en campo con estimaciones de laboratorio en un Haplustol Entico. Presentado al XIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, S.C. de Bariloche, abril 1991.
- 3) BACHMEIER, O.A.; J.L. DARDANELLI y R.C. GIL. 1990. Calibración en campo de un medidor combinado humedad-densidad por emisión de radiaciones. Presentado al XIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, S.C. de Bariloche, abril 1991.
- 4) BAIER, W.; J.A. DYER and W.R. SHARP. 1979. The versatile soil moisture budget. *Tech. Bull.* 87. Land Resorce Res. Inst. Ottawa, Ontario. pp.10-11.
- 5) BAIER, W. and G.W. ROBERTSON. 1966. A new versatile soil moisture budget. *Cant. J. Plant Sci.*, 46:299-315.
- 6) DE JONG, R. 1988. Comparison of two soil-water models under semi-arid growing conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 68:17-27.
- 7) HANKS, R.J. 1983. Yield and water-use relationships: an overview. **IN:** TAYLOR, H.M.; JORDAN, W.R. and SINCLAIR, T.R. eds. *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wi. pp. 339-411.
- 8) JARSUN, B.A.; H. BOSNERO y E. LOVERA. 1987. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3163-32 Oncativo. Córdoba (Argentina). INTA-SMAG y R.R. Plan Mapa de Suelos. pp. 41-42.
- 9) RAVELO, A.C. y J.C. SOLA. 1988. Evapotranspiración y balance hídrico. Manual teórico. AADA y UNRC: pp. 75-92.
- 10) RITCHIE, S.W. and J.J. HANWAY. 1982. How a corn plant develops. *Special report N° 48*. Iowa St. Univ. of Sci. and Tech. Coop. Ext. Service. Ames, Iowa. 21 p.
- 11) ROTONDO, V.H. 1988. Calibración del balance hidrológico versátil para un cultivo de colza en Río Cuarto (Córdoba), pp.27-31.
- 12) SOLA, J.C. 1988. Calibración y aplicación del balance versátil de humedad de suelo en la región semiárida de Córdoba. *Rev. Fac. de Agronomía*, 9(1-2):29-40.
- 13) SOLA, J.C. y J.L. DARDANELLI. 1989. Calibración preliminar del balance hídrico versátil para un cultivo de maíz en condiciones semiáridas. *Revista Agronómica de Manfredi y Marcos Juárez* (en prensa).
- 14) SOLA, J.C. y A.C. RAVELO. 1988. Manual operativo del balance hídrico versátil. AADA-UNRC, 8 p.