

CALIBRACION Y APLICACION DEL BALANCE VERSATIL DE HUMEDAD DE SUELO EN LA REGION SEMIARIDA DE CORDOBA

J.C. SOLA (1)

Recibido: 24-12-87

Aceptado: 11- 7-88

RESUMEN

El balance hídrico versátil, fue utilizado en Manfredi (Córdoba) para estimar el contenido de agua útil diaria en el suelo, a partir de datos de precipitación y de evapotranspiración potencial.

Se presenta aquí la calibración de dicho modelo, para un suelo típico de la región semiárida central de Córdoba y bajo la cobertura de un cultivo de soja. Fueron incorporadas al modelo modificaciones en el sistema de recarga de agua en el suelo, atendiendo las características físicas de la región, y en el método para determinar la evapotranspiración.

Se presentan los resultados de su aplicación, con la determinación del consumo hídrico total del cultivo y por períodos fenológicos, así como la variación de la humedad del suelo diaria de los seis estratos considerados para la campaña agrícola 1984-1985.

Se encontró que el balance versátil puede ser utilizado para simular en forma diaria el agua útil del suelo, con un error de estimación que varió entre un 6 y un 16,5%. Las modificaciones realizadas al modelo permitieron lograr una mejor correlación entre los valores observados y estimados de humedad del suelo.

Palabras clave: balance hídrico versátil, calibración, recarga, agua útil.

CALIBRATION AND APPLICATION OF THE VERSATILE SOIL MOISTURE BALANCE IN THE SEMIARID REGION OF CORDOBA

SUMMARY

A versatile soil moisture balance, was applied in Manfredi (Córdoba) to simulate, variations in daily soil moisture availability using rainfall and potential evapotranspiration data.

The model calibration for a typical soil semiarid region of Central Córdoba with a soybean crop is presented. Modifications in the process of soil water recharge considering the physical characteristics of the area and in the method to estimate evapotranspiration were incorporated.

The total water consumption by the crop at each phenological stage and the daily variability of the soil moisture of the six soil layers for the 1984/85 growing season was analyzed.

It was found that the versatile balance can be used on a daily basis to estimate soil moisture availability with an estimate error between 6 and 16.5%. The proposed modifications allowed to get a better correlation between estimated and observed soil moisture.

Key words: automatic micrometeorological station, energy balance, net radiation, soil heat flux, sensible heat, latent heat.

(1) Becario de formación superior del CONICET. Lugar de trabajo en el CENTRO DE INVESTIGACIONES HIDRICAS DE LA REGION SEMIARIDA (CIHRSA) San Martín 1570 (5152) Villa Carlos Paz, Córdoba.

INTRODUCCION

En el transcurso de las últimas décadas se ha progresado considerablemente en el estudio de la relación entre la humedad del suelo y la productividad de los cultivos, pero la aplicación a gran escala de los resultados experimentales se dificulta notablemente al no disponerse normalmente de información sistematizada de humedad del suelo para las regiones y períodos en consideración.

Aunque se han perfeccionado significativamente los procedimientos para medir la humedad del suelo (método gravimétrico, tensiómetros, sonda de neutrones, etc.), todos presentan deficiencias, requiriendo calibraciones considerables y repetidas para proporcionar datos suficientemente representativos en relación al espacio y al tiempo.

A partir de la metodología de balance hídrico desarrollada por Thornthwaite y Mather (1955), varios investigadores (Holmes y Robertson, 1959; Baier y Robertson, 1965; Ritchie y Otter, 1984) han propuesto "métodos de balance continuos" utilizando datos meteorológicos estándar, con el objeto fundamental de encontrar las variaciones de humedad en el suelo y la evapotranspiración real de cultivos, praderas y suelos desnudos. Las técnicas de balance hídrico, se basan en principios físicos y la principal dificultad con que tropiezan es la determinación de la evapotranspiración, que no ha sido adecuadamente incorporada en los modelos (Hildreth, 1978). Desde hace varios años investigadores del Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida, CIHRSA (Da Porta et al., 1986) han estado estudiando todos los aspectos relativos a la evapotranspiración y, más recientemente, con la participación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) se han determinado los consumos hídricos del cultivo de soja, aplicando el método del balance de

energía. Estas experiencias indican que la ecuación de Penman (1948) es una de las más adecuadas para estimar la evapotranspiración potencial de cultivos y praderas.

Baier y Robertson (1966), propusieron la metodología de balance versátil de humedad de suelo, probada en numerosos países y en distintas condiciones de suelo y vegetación, demostrando buena precisión en la estimación de la humedad edáfica (Baier et al., 1979).

El objetivo de este trabajo fue adaptar y calibrar esta metodología para un cultivo de soja y para las condiciones edáficas, topográficas e hidrológicas de la región semiárida central de Córdoba.

MATERIAL Y METODO

Datos

El experimento se realizó sobre un lote de soja (CV "Carcarañá" INTA) de 45 ha, ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del INTA. Las observaciones de humedad se efectuaron por el método gravimétrico, a partir de aproximadamente 20 muestras tomadas sobre una superficie de 1 ha, hasta una profundidad de 90 cm desde diciembre a febrero y hasta los 180 cm desde marzo a mayo. El intervalo de tiempo entre muestreos fue de aproximadamente una semana. En cada punto de observación se tomaron muestras de los siguientes estratos: 0-15, 15-30, 30-50, 50-70, 70-90, 90-120, 120-150 y 150-180 cm de profundidad.

El suelo pertenece a la serie Onca-tivo y es un Haplustol Entico caracterizado por su textura franco-limosa, por su relieve llano y por su permeabilidad moderadamente rápida. En el Cuadro N° 1 se presentan las constantes físicas e hídricas del suelo.

El cultivo se sembró el 30-12-84 en surcos a 70 cm, a razón de 30 semillas/m. Los estados fenológicos se determinaron en forma diaria siguiendo la escala visual de Fehr (Fehr y Caviness, 1977).

Cuadro N° 1: Constantes físicas e hídricas del suelo en Manfredi (Córdoba)

Profundidad (cm)	Peso Específico Aparente (gr/cm ³)	Punto de Marchitez (mm de agua)	Capacidad de Campo (mm de agua)
0-15	1,34	22,3	48,4
15-30	1,31	21,8	47,0
30-50	1,22	26,1	57,3
50-70	1,19	24,5	55,2
70-90	1,19	24,5	54,7
90-120	1,19	36,1	81,8
120-150	1,19	35,7	81,8
150-180	1,19	35,7	81,8

La temperatura, tensión y déficit de saturación del vapor y velocidad del viento medios diarios, así como la precipitación y heliofanía relativa diarias fueron obtenidos de los archivos de datos de la estación agrometeorológica de la Estación Experimental, la que se encuentra a 1500 m de distancia de la parcela experimental.

EL BALANCE VERSÁTIL (VB)

Se trata de un procedimiento agrometeorológico desarrollado específicamente para utilizar datos diarios de precipitación y de evapotranspiración potencial (Baier y Robertson, 1966) con el objeto de simular las variaciones diarias del contenido de humedad en el suelo, sobre superficies cultivadas, desnudas o praderas naturales. A continuación se detallan los procesos básicos considerados en el modelo que, si bien se encuentran en el trabajo original, se incluyen para el seguimiento de las modificaciones propuestas en este estudio.

a) Extracción de humedad del suelo

Se realiza simultáneamente desde diferentes profundidades del perfil del suelo penetrado por las raíces, en relación a un porcentaje de la evapotranspiración potencial (ETP) y a la humedad del suelo utilizable en cada zona.

La evapotranspiración real diaria puede calcularse como:

$$ETR_i = \sum_{j=1}^n \left[k_j \cdot \frac{S_j(i-1)}{C_j} \cdot Z_j \cdot \left[-w(ETP_i - \overline{ETP}) \right] \right] \cdot ETP_i \cdot e \quad (1)$$

donde:

ETR_i: Evapotranspiración real del día *i*, finalizando en la observación de la mañana del día *i+1*.

\sum : Sumatoria del agua extraída desde la zona *j=1* a la *j=n*.

k_j: Coeficiente que expresa el monto de agua extraída por las raíces desde la zona *j* considerada y que es función del suelo y las plantas.

S_{j(i-1)}: Humedad disponible en la zona *j* al final del día (*i-1*), esto es, en la observación de la mañana del día *i*.

C_j: Capacidad de agua disponible en la zona *j*.

Z_j: Factor de ajuste para diferentes tipos de curvas de secado de suelo.

ETP_i: Evapotranspiración potencial para el día *i*.

w: Factor de ajuste que tiene en cuenta los efectos de la variación de ETP sobre ETR/ETP.

\overline{ETP} : Evapotranspiración potencial media del mes o estación.

La ETP se obtuvo con la fórmula de Penman (1948) a partir de datos diarios. La radiación neta (RN) fue calculada con la ecuación propuesta por

Penman (1948) adoptándose un albedo igual a 0,22.

El volumen total de humedad disponible para las plantas en el perfil del suelo fue subdividido en seis zonas de distinta capacidad. Cada zona constituye una capa horizontal de suelo de espesor variable y de una definida capacidad de humedad disponible.

Se adoptaron zonas que contienen el 5,0; 7,5; 12,5; 25,0; 25,0 y 25,0%, respectivamente, del total de humedad disponible para las plantas. Debido a que la distribución radicular difiere en profundidad de un suelo a otro, la ubicación de las zonas también difiere pero no así la fracción del total de agua útil. Esto hace posible usar un conjunto de coeficientes de cultivo (k_j) para un cultivo y un suelo particulares, asumiendo que el agua útil se extrae siguiendo siempre una característica patrón que depende del sistema radicular de la planta.

Estos coeficientes k_j constituyen uno de los parámetros básicos de ajuste del modelo y reflejan el monto de agua extraído por las raíces de las plantas desde las seis zonas consideradas del suelo a lo largo de la campaña, como una función de ETP.

Dado que las raíces absorben comparativamente más agua desde estratos más profundos (relativamente más húmedos) en períodos de sequía que cuando el perfil está uniformemente húmedo, Baier *et al.* (1979) propusieron modificar los k_j como sigue:

$$k_j' = k_j + \sum_{m=1}^{m=j-1} k_m \left[1 - \frac{S_m(i-1)}{C_m} \right] \quad (2)$$

donde:

k_j' : Coeficiente k ajustado para la zona j .

$S_m(i-1)$: Humedad disponible en la zona m del día anterior.

C_m : Capacidad de agua útil en la zona m .

Cuadro N° 2: Coeficientes k_j para un cultivo de soja obtenidos en Missouri, EEUU. (Ravelo, 1978)

ESTADO FENOLOG.	ESTRATO DEL SUELO					
	1	2	3	4	5	6
P - E	0,20	0,15	0,15	0,10	-	-
E - F	0,20	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05
F - Pf	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,05
Pf - Fe	0,15	0,15	0,20	0,20	0,15	0,10
Fe - H	0,10	0,15	0,20	0,15	0,10	0,10

k_m : Coeficiente k correspondiente a la zona m .

En el Cuadro N° 2 se presentan el conjunto de coeficientes obtenidos por Ravelo (1978) para soja, con la misma metodología de trabajo.

La humedad del suelo disponible para las plantas (S_j), se considera como el monto total de agua que existe desde capacidad de campo a punto de marchitez permanente. Sin embargo, es bien sabido que el agua no está igualmente disponible para el uso de las plantas a lo largo de este rango. Veigmeyer (1955), Pierce (1958), Denmead y Shaw (1962), Fitzpatrick *et al.* (1967), entre otros, propusieron curvas como las de la Figura 1, que expresan distintos tipos de relaciones entre la evapotranspiración relativa (ETR/ETP) y la disponibilidad de agua útil del suelo.

La variable Z_j de la ecuación (1) representa la diferencia entre la relación lineal y cualquiera de las otras curvas mostradas en la Figura 1 y constituye otro de los parámetros de ajuste del modelo.

El término $e^{-w(ETP_i - \overline{ETP})}$ toma en cuenta los efectos de las diferentes proporciones de la demanda atmosférica diaria (ETP_i) sobre la evapotranspiración relativa, comparada con el promedio de ETP para el mes o la estación (\overline{ETP}) bajo diferentes condiciones de deficiencias hídricas (w).

Se obtiene w a partir de la siguiente expresión:

$$w = 7,9 - 0,11 \cdot \frac{S_j'(i-1)}{S_j} \cdot 100 \quad (3)$$

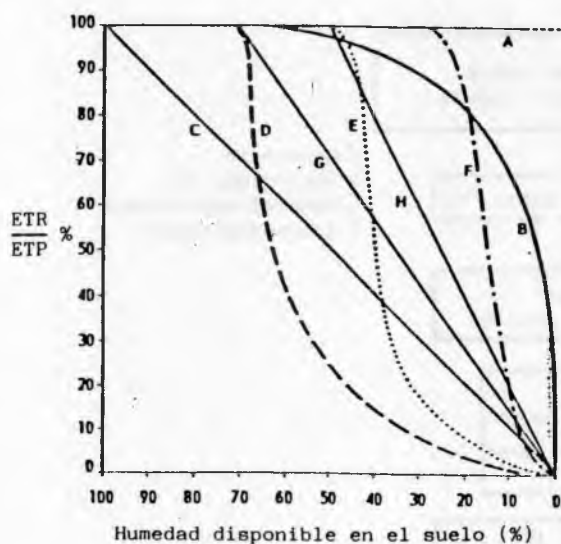


Figura 1: Varias relaciones entre ETR/ETP y la humedad disponible en el suelo (Baier y Robertson, 1966)

b- Recarga de humedad del suelo

En el BV, la recarga de agua del suelo es enteramente el resultado de la precipitación, sea ésta líquida o en forma de nieve. Dentro de este sistema se consideran en el modelo los siguientes procesos: lluvia, infiltración, escurrimiento superficial, drenaje subterráneo y la humedad del suelo en el día anterior.

Mediante un algoritmo tomado de Linsley et al. (1949), el modelo prevé la partición de la lluvia en escurrimiento superficial y lluvia efectiva, entendiéndose como tal a aquella parte de la precipitación total que efectivamente infiltra en el suelo.

$$RRI = ROFFi + INFLi \quad (4)$$

donde la INFLi para una RRI mayor o igual que una pulgada es:

$$INFLi = 0,9177 + 1,811 \cdot \text{Log } RRI - 0,97.$$

$$\frac{Sj,(i-1)}{Cj} \cdot \text{Log } RRI \quad (5)$$

donde:

$Sj,(i-1)$: Humedad del suelo en la zona j del día (i-1)

Cj : Capacidad de agua disponible en la zona j

RRi : Precipitación diaria que finaliza en la mañana del día (i+1)

Baier y Robertson propusieron inicialmente una "cadena de embalses" como la forma de distribuir el agua infiltrada a las distintas zonas, pues ninguna zona adyacente a otra recibirá agua hasta que la de más arriba haya llegado a capacidad de campo. Cuando todas las zonas del perfil considerado se encuentren en capacidad de campo, cualquier exceso o remanente de agua infiltrada será considerado como drenaje subterráneo.

Baier, et al. (1979) proponen repartir el agua infiltrada a cada zona con una función que solamente se aplica cuando el porcentaje entre la humedad del suelo y la capacidad para cada zona es menor que 0,9:

$$INFLi,j = \left[1 - \frac{Sj,(i-1)}{Cj} \cdot b \right] \cdot \left(INFLi \sum_{n=1}^{j-1} INFLi,n \right) \quad (6)$$

donde:

$INFLi,j$: nueva infiltración del día i a cada zona j del suelo

b : coeficiente de percolación que va de 0 a 1

Esto significa que la infiltración se distribuye entre las zonas como una función del monto total infiltrado, el contenido de humedad relativo en cada zona y el coeficiente de percolación (b), el que constituye el tercer parámetro de calibración.

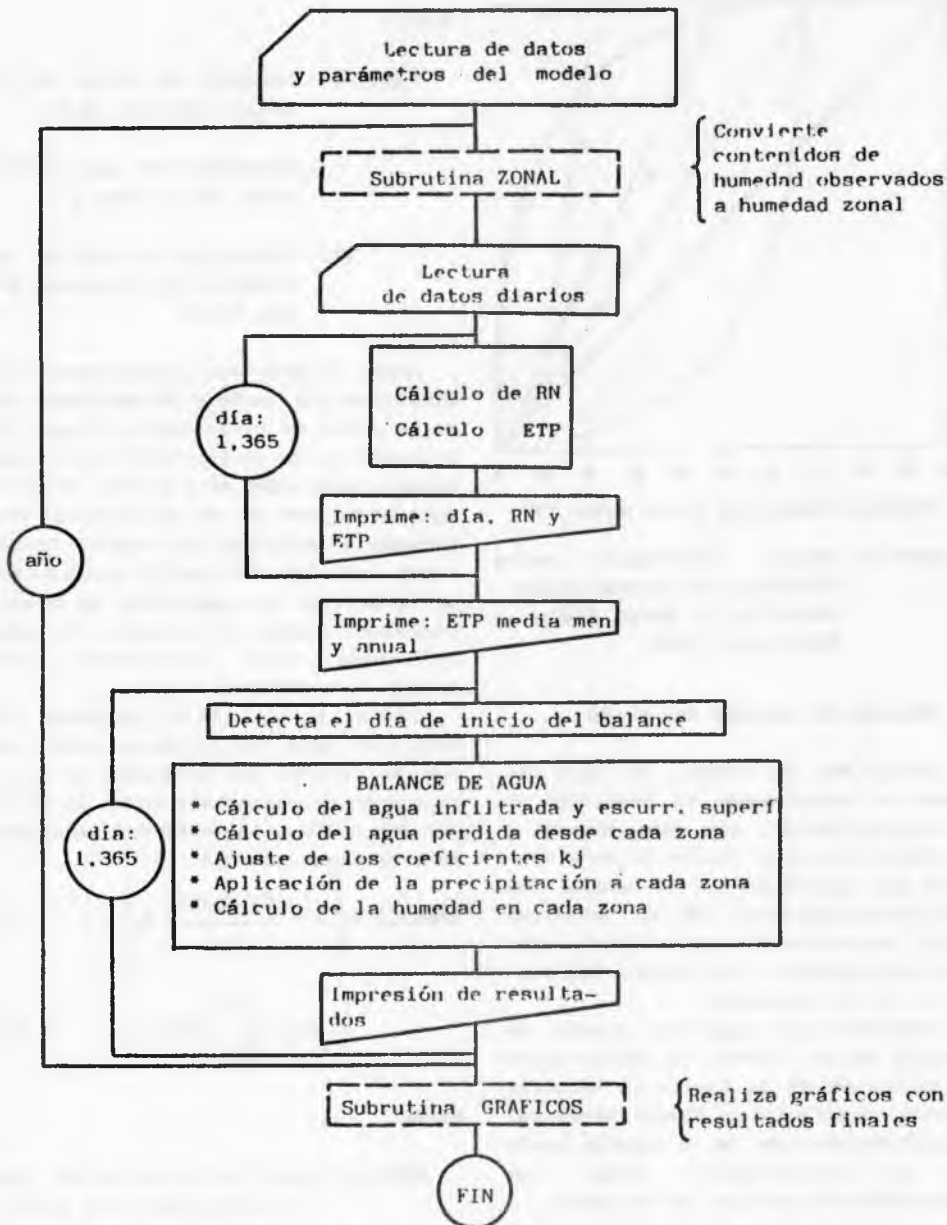


Figura 2: Diagrama de bloques del modelo de simulación del balance de humedad del suelo (BV).

El monto de agua que puede infiltrar y permanecer en una determinada zona no puede exceder el déficit para esa zona y ese día.

El déficit está dado por:

$$DEF_{j,i} = C_j - S_{j,(i-1)} + ETR_{j,i} \quad (7)$$

DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL MODELO

El modelo se programó en lenguaje FORTRAN y ejecutó en una computadora Digital Microvax II del CIHRSA.

En el diagrama de bloques de la Figura 2, se presenta la secuencia gene-

ral del cálculo, diseñado para este estudio. Los archivos de entrada: **ENTER.DAT** y **MAN*.DAT**, así como los de salida: **GRAFI.SAL**, **ETP.SAL** y **BALMAN.-SAL** también fueron rediseñadas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Calibración del modelo

El método de calibración empleado fue el de aproximaciones sucesivas, a través de la modificación de los coeficientes k_j , z_j y b en cada paso, con el objeto de conseguir mejores ajustes entre los valores estimados y los observados de humedad del suelo.

Fue necesario definir las fechas de estados fenológicos del cultivo, en los cuales se produjeron cambios importantes en el patrón de extracción de humedad con respecto a la profundidad y al monto de agua extraída. En este caso se seleccionaron las siguientes: suelo desnudo (**DES**), siembra (**SIE**), emergencia (**EME**), floración (**FLO**), fructificación (**FRU**) y cosecha o recolección (**REC**), que se corresponden con las fechas señaladas en el Cuadro N°3 según observaciones directas de campo.

La profundidad para la cual fue aplicado el modelo fue de 1,5 metros, ya que se supone es el límite de exploración radicular del cultivo.

En el Cuadro N° 3 se presentan los coeficientes k_j del cultivo obtenidos en la calibración.

En cuanto al coeficiente z_j , se encontró un mejor ajuste con la utilización de la curva **G** para los tres primeros estratos del suelo y la **H** para las dos últimas (Figura 1). Ambas suponen una relación lineal decreciente entre la evapotranspiración relativa (**ETR/ETP**) y la humedad del suelo disponible, a partir de un porcentaje determinado y hacia abajo.

Como se ve en las observaciones de humedad presentadas en la Figura 3, no es necesario que un determinado estrato superior haya alcanzado la capacidad de campo para que se inicie la

percolación hacia el inmediato inferior, sino que como se expresa en la ecuación (6), el manto de agua infiltrado a cada zona es función de la humedad que el mismo poseía antes de la lluvia. Sucesivas pruebas indicaron que con un coeficiente de percolación b igual a 1, se lograban los mejores ajustes.

El algoritmo de infiltración presentado en la ecuación (5) fue mantenido, aunque puede ser ajustado en una etapa posterior o ante la presencia de otra topografía y/o suelo dado que, existe una fuerte relación entre el escurrimiento superficial, la intensidad de la precipitación y la pendiente del terreno.

Debido a la débil pendiente general de la zona, salvo para precipitaciones de gran monto o intensidad, el escurrimiento superficial puede considerarse como nulo, en el sentido de pérdida para el sistema (región). Se produce, en cambio, un escurrimiento superficial localizado desde áreas más altas hacia otras más bajas, aún dentro de un mismo lote, provocando anegamientos del suelo. A los fines de considerar estos aspectos se propone un séptimo almacenamiento, denominado "superficial", receptor del escurrimiento superficial producido en el día i , obtenido por la ecuación (4) y aplicado como dato de entrada al balance para el día $i+1$.

Al incluir este concepto se produjo una sustancial mejora en la efectividad del modelo, sobre todo en los primeros 30 días considerados y las primeras capas del suelo.

Por otro lado y debido a las características climáticas de la región, fue eliminado el proceso de derretimiento de nieve.

Los coeficientes de correlación obtenidos indican un buen grado de ajuste entre los valores observados y estimados para los cuatro primeros estratos del suelo (Cuadro N° 4). Respecto de los dos últimos, los coeficientes de correlación resultaron menores. El escaso número de pares de

Cuadro N° 3: Coeficientes de cultivo de soja (kj).

PERIODO	ESTADO	PROF. ESTRATO (cm)					
	FENOL.	0-6	6-16	16-35	35-76	76-113	113-150
01/12/84-30/12/84	DES-SIE	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
30/12/84-07/01/85	SIE-EME	0,05	0,07	0,10	0,10	0,07	0,02
07/01/85-01/03/85	EME-FLO	0,20	0,20	0,20	0,17	0,17	0,12
01/03/85-11/03/85	FLO-FRU	0,25	0,25	0,25	0,25	0,22	0,12
11/03/85-06/05/85	FRU-REC	0,25	0,25	0,32	0,37	0,22	0,15

Cuadro N° 4: Coeficientes de correlación, error cuadrático medio y relativo entre los valores observados y estimados.

	PROF. ESTRATO (cm)					
	0-6	6-16	16-35	35-76	76-113	113-150
AGUA UTIL(mm) [1]	11,3	16,9	28,2	56,3	56,3	56,3
COEFICIENTE DE CORREL.	0,89	0,92	0,92	0,97	0,3	0,6
ERROR CUADRAT. MEDIO (mm)[2]	1,86	2,61	3,58	4,71	3,40	5,27
ERROR RELATIVO (%) [2/1]	16,5	15,4	12,7	8,4	6,0	9,4

valores disponibles pudo haber determinado el menor ajuste.

Los errores cuadráticos medios indican también un buen grado de precisión de la estimación. Los dos últimos estratos poseen un error cuadrático medio de 3,4 y 5,27 mm, los cuales en términos relativos al agua útil total de cada estrato son porcentualmente más pequeños.

Se debe destacar que estos coeficientes podrían mejorar sensiblemente si las fechas de las observaciones de humedad se desplazaran un día antes a lo considerado, hecho que podría ocurrir debido a que no se registró la hora de la toma de muestra. Si la muestra fue tomada durante el transcurso de la mañana, correspondería ubicarla en el día anterior, ya que puede considerarse que todavía

no ocurrió gran parte de la ETR. Este mismo razonamiento podría aplicarse para la fecha en la que se produjo la precipitación.

El hecho de que la recarga de humedad se realice al final del día, tiene el sustento físico de que la mayoría de las tormentas en esta época del año son de carácter convectivo y, en general, se producen en horas de la tarde, cuando ya ocurrió el mayor porcentaje de evapotranspiración.

En general, el promedio de los valores observados superan a los estimados, lo cual señala que el modelo tiende a subestimar la humedad del suelo. Sin embargo, si se tiene en cuenta que existen valores de humedad observados por encima de capacidad de campo y que el modelo es solamente capaz de estimar humedades que alcancen

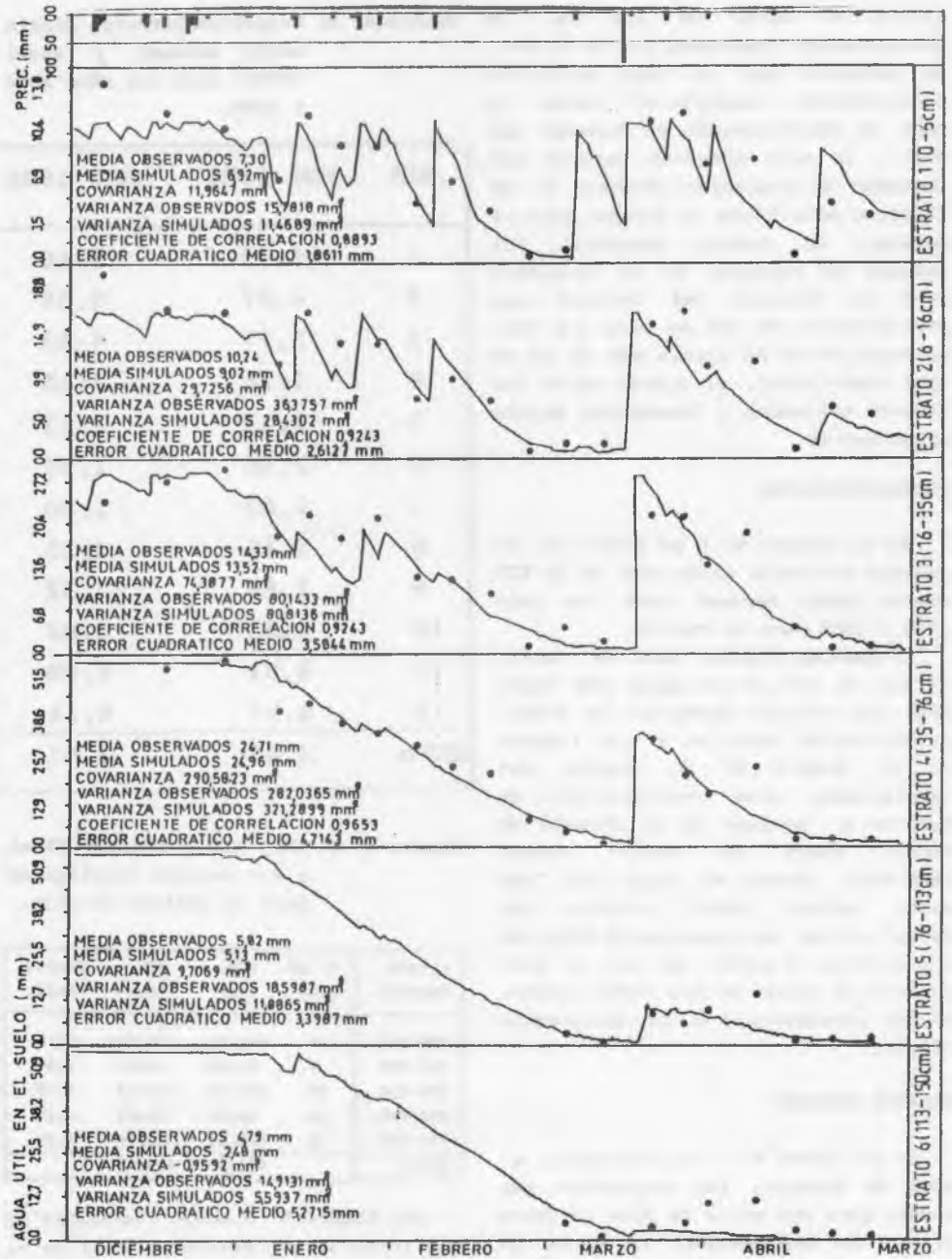


Figura 3: Variación diaria del contenido de humedad para seis estratos del suelo bajo un cultivo de soja.

ese máximo, es lógico que los promedios de los valores estimados sean menores.

De acuerdo a las observaciones de humedad del suelo del día 20-03-85

(79) se produjo una recarga considerable de la humedad edáfica luego de un período de 35 días de escasas o nulas precipitaciones (Figura 3). Dicha recarga implica la ocurrencia de una

lluvia no menor de 100 mm. La precipitación observada fue de 57 mm. Es probable que se haya producido escurrimiento superficial hacia la zona de observaciones de humedad del suelo, la cual presenta valores muy elevados de contenido hídrico. Si se utilizan sólo 57 mm de lluvia para el balance, el modelo subestima los valores de humedad. Si se considera para el cálculo del balance una precipitación de 100 mm para ese día, es decir 57 mm de lluvia más 43 mm de agua superficial, el ajuste entre los valores estimados y observados mejora notablemente.

EVOTRANSPIRACION

En el Cuadro N° 5 se puede ver la marcada variación estacional de la ETP diaria media mensual y anual (ETPa) para los años 1984 y 1985 para la región.

El consumo hídrico total del cultivo fue de 476,13 mm desde SIE hasta REC. Los valores obtenidos de evapotranspiración relativa y que figuran en el Cuadro N° 6, pueden ser considerados como coeficientes de cultivo a aplicar en la fórmula de Penman hasta el tercer estado (EME-FLO), donde el agua útil del suelo estuvo sobre niveles que satisficieron las necesidades hídricas del cultivo. A partir de allí se nota una súbita caída de los coeficientes, debido precisamente a la deficiencia hídrica.

BALANCE HIDRICO

En el Cuadro N° 7 se presentan, a modo de ejemplo, los resultados del modelo para una serie de días (archivo de salida BALM-AN.SAL) en donde se puede ver los cambios en los contenidos de humedad para los seis estratos de suelo (SL1, SL2, SL6), del total del perfil (HS6) y de los tres primeros estratos (HS3), como consecuencia de una determinada lluvia (PREC), de la ETR, la infiltración (INF) y la percolación profunda (PER).

Cuadro N° 5: Evapotranspiración diaria media mensual y anual (ETPa) para los años 1984 y 1985.

MES	AÑO 1984	AÑO 1985
1	5,48	5,48
2	4,87	5,59
3	3,77	4,43
4	2,84	3,15
5	2,12	2,12
6	1,46	1,89
7	1,63	1,80
8	2,11	2,33
9	2,84	2,32
10	4,83	3,82
11	4,91	4,98
12	4,77	5,14
ETPa	3,47	3,67

Cuadro N° 6: ETP, ETR y ETR/ETP final y por estados fenológicos para un cultivo de soja.

ESTADO FENOLOG.	N° DE DIAS	ETP (mm)	ETR (mm)	EVAPOT. RELAT.
DES-SIE	30	144,44	23,42	0,16
SIE-EME	8	43,83	22,91	0,52
EME-FLO	53	283,06	280,47	0,99
FLO-FRU	10	53,71	21,61	0,40
FRU-REC	55	170,84	150,94	0,88
TOTAL		695,88	499,35	

Del Cuadro N° 3 surge claramente de que forma se incrementan los kj en el transcurso del ciclo del cultivo, alcanzando un máximo en el período que se inicia con la fructificación y el avance de la actividad radicular sobre horizontes más profundos.

En la Figura 3 (archivo de salida *grafi.sal*), se muestran las variaciones de humedad observadas y estimadas

Cuadro N° 7: Resultados del BV para una serie de días de diciembre de 1984.

FECHA	FASE	PREC	ETP	ETR	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	ROFF	H56	HS3	INF	PER
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
336	1	0.00	6.04	1.37	10.87	16.76	24.16	56.39	56.39	56.39	0.00	220.96	51.80	0.00	3.22
337	1	0.00	5.16	0.78	10.62	16.51	23.90	56.39	56.39	56.39	0.00	220.19	51.02	0.00	0.00
338	1	0.00	6.12	0.92	10.31	16.20	23.59	56.39	56.39	56.39	0.00	219.26	50.10	0.00	0.00
339	1	0.00	7.11	1.07	9.95	15.84	23.24	56.39	56.39	56.39	0.00	218.19	49.03	0.00	0.00
340	1	32.10	6.43	0.97	11.18	16.76	27.51	56.39	56.39	56.39	3.14	224.62	55.45	28.96	21.57
341	1	29.00	5.46	0.82	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	3.70	225.30	56.13	28.45	26.95
342	1	15.00	1.93	0.29	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	0.00	225.30	56.13	18.70	18.41
343	1	7.50	4.77	0.72	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	0.00	225.30	56.13	7.50	6.78
344	1	0.00	6.29	0.94	10.86	16.45	27.88	56.39	56.39	56.39	0.00	224.36	55.19	0.00	0.00
345	1	0.00	5.90	0.89	10.57	16.15	27.58	56.39	56.39	56.39	0.00	223.47	54.30	0.00	0.00
346	1	0.00	5.83	0.88	10.27	15.86	27.29	56.39	56.39	56.39	0.00	222.59	53.42	0.00	0.00
347	1	1.00	6.78	1.03	10.93	15.52	26.94	56.39	56.39	56.39	0.00	222.56	53.39	1.00	0.00
348	1	0.00	5.04	0.76	10.68	15.27	26.69	56.39	56.39	56.39	0.00	221.80	52.63	0.00	0.00
349	1	0.00	5.99	0.90	10.38	14.97	26.39	56.39	56.39	56.39	0.00	220.89	51.73	0.00	0.00
350	1	0.00	5.65	0.85	10.09	14.68	26.10	56.39	56.39	56.39	0.00	220.04	50.88	0.00	0.00
351	1	16.50	5.99	0.90	11.18	16.26	28.19	56.39	56.39	56.39	0.00	224.79	55.63	16.50	10.84
352	1	18.00	6.27	0.94	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	0.00	225.30	56.13	18.00	16.55
353	1	0.00	3.98	0.60	10.98	16.57	28.00	56.39	56.39	56.39	0.00	224.70	55.54	0.00	0.00
354	1	20.50	3.74	0.56	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	0.00	225.30	56.13	20.50	19.34
355	1	0.00	2.65	0.40	11.04	16.63	28.06	56.39	56.39	56.39	0.00	224.90	55.74	0.00	0.00
356	1	0.00	1.99	0.30	10.94	16.53	27.96	56.39	56.39	56.39	0.00	224.60	55.44	0.00	0.00
357	1	0.00	2.73	0.41	10.81	16.39	27.82	56.39	56.39	56.39	0.00	224.19	55.02	0.00	0.00
358	1	32.00	6.40	0.97	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	3.55	225.30	56.13	28.45	26.37
359	1	14.60	1.88	0.28	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	0.00	225.30	56.13	18.15	17.87
360	1	13.50	2.86	0.43	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	0.00	225.30	56.13	13.50	13.07
361	1	0.00	2.16	0.32	11.07	16.66	28.09	56.39	56.39	56.39	0.00	224.97	55.81	0.00	0.00
362	1	3.60	3.31	0.50	11.18	16.76	28.19	56.39	56.39	56.39	0.00	225.30	56.13	3.60	2.78
363	1	0.00	5.24	0.79	10.91	16.50	27.93	56.39	56.39	56.39	0.00	224.51	55.35	0.00	0.00

por el modelo a lo largo de la campaña agrícola 1984-85, y por estratos. Debido a la falta de precipitaciones entre los días 50 y 75 se produjeron restricciones de humedad que, seguramente influyó en forma negativa en el rendimiento final del cultivo.

Al establecer un balance para todo el período, se tiene:

$$PP + (\text{HUM.inicial} - \text{HUM.final}) = \text{ETR} + \text{PER} \quad (8)$$

De un total de 472,91 mm de lluvia, se produjo una percolación (PER) de 187,93 mm; esto representa casi un 40% de la lluvia total. Los 285 mm infiltrados, retenidos por el suelo y luego utilizados por el cultivo, constituyeron solamente un 57% del agua evapotranspirada (ETR) por la soja. El 43% restante del consumo de agua fue aportado por el almacenaje del suelo al momento de la siembra (humedad inicial).

CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos con la modificación y aplicación del BV permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- a- El balance hídrico puede utilizarse para estimar, en forma diaria, el agua útil en el suelo para un cultivo de soja con una precisión aceptable. Los errores de estimación variaron entre un 6 y un 16,5%.
- b- Los ajustes efectuados en el proceso de almacenamiento superficial permitieron lograr una mejor correlación entre los valores observados y estimados de humedad edáfica.

c- La inclusión de la ecuación de Penman, para el cálculo de la ETP, permite realizar determinaciones más precisas de la ETR y del agua edáfica.

d- La precipitación no cubrió las demandas hídricas del cultivo para la temporada 1984-85. Una parte considerable de esa precipitación se perdió como percolación profunda, debido a la irregular distribución temporal y a su intensidad. La campaña agrícola se inició con abundante humedad en el suelo lo cual favoreció el rendimiento final del cultivo, confirmando la re-

sistencia del cultivo de soja a la escasez de agua cuando tiene un crecimiento inicial adecuado.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a las siguientes personas: Dr. A.C Ravelo, director de beca del CONICET, Ing. Liliana Costa, colaboradora en la elaboración y operación de los programas de computación, Tec. Juan C. Zeballos, colaborador en la recolección, tratamiento y carga de archivos de datos en máquina., Ing. Francisco Núñez Vázquez, quien proporcionó información agrometeorológica y apoyo de campo en la EEA-INTA Manfredi.

BIBLIOGRAFIA

- (1) BAIER, W. and GEO, W. ROBERTSON. 1966. A new versatile soil moisture budget. *Canadian Journal of plant Science*, 46:299-315.
- (2) BAIER, W., J.A. DYER and W.R. SHARP. 1979. The versatile soil moisture budget. *Agriculture Canada, Tech. Bull.* 87, 52 pp
- (3) DAPORTA, A.W., F. NUÑEZ VAZQUEZ, C.A. PEREYRA y J.C. SOLA. 1987. Evapotranspiración máxima de la soja en la región central de Córdoba. *Pub. III Reunión Argentina de agrometeorología*. pp 29-38.
- (4) FEHR, W.R. and C.E. CAVINESS. 1977. Stages of Soybean development. Iowa State University, *Special Report* 80, 11 pp.
- (5) HILDRETH, W.W. 1978. Soil Moisture Modeling Review. *Technical memorandum*, L.E.C. 11857 Houston, Texas.
- (6) HOLMES, R.M. and G.W. ROBERTSON. 1959. A modulate soil moisture budget. *Monthly Weather Rev.*, 87:101-106.
- (7) LINSLEY, R.M., M.A. KOHLER, and J.L. PAULUS. 1949. *Applied Hydrology*. Mc Graw Hill book Co. Inc., New York, 689 pp.
- (8) PENMAN, H.L. 1948. Natural Evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London (A)*, 193:120-145.
- (9) RAVELO, A.C. 1978. Modelling soybean yields from environmental data. *Ph. D. Thesis*, Univ. of Missouri, Columbia - Missouri.
- (10) RITCHIE, J.T. and S. OTTER, 1984.. Ceres-wheat. A user oriented yield model. *Agristars Publ. Mo ym-u3-0442-jsc-188-192*.
- (11) THORNTHWAITE, C.N. and J.R. MATHER. 1955. The water balance *Publ. Climtol. (Drexel Insti. Technol)*, 8:1-104.