

EVALUACION DEL BALANCE DE ENERGIA EN UN CULTIVO  
DE SOJA BAJO CONDICIONES HIDRICAS EXTREMAS

C.A. PERRYRA (1)

Recibido: 18-2-88

Aceptado: 29-4-88

RESUMEN

*Durante la estación de cultivo de 1984-1985, se instaló una torre micrometeorológica automática sobre un cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) cv. Carcaraña INTA, en Manfredi, Córdoba.*

*Se registraron variables micrometeorológicas en forma horaria y diaria para evaluar los componentes del balance de energía. Se examinaron los flujos diurnos de radiación neta (Rn), calor del suelo (S), calor sensible (H) y calor latente (LE). El análisis se realiza en dos días típicos con condiciones meteorológicas similares de alta demanda atmosférica y con el cultivo totalmente desarrollado pero con distinta disponibilidad de humedad en el perfil de suelo explorado por las raíces.*

*En condiciones de muy bajo contenido de agua útil o de deficiencia hídrica, el 68,79% de la energía disponible, representada por (Rn-S) fue utilizada en evapotranspiración mientras que el flujo de calor sensible representó el 31,21%.*

*En condiciones de buena disponibilidad de humedad edáfica el 92,56% de la energía disponible fue consumida en evapotranspiración y el 7,44% en calor sensible.*

*La disponibilidad de agua en el perfil de suelo influyó marcadamente sobre los componentes del balance de energía del cultivo de soja.*

**Palabras clave:** torre micrometeorológica automática, balance de energía, radiación neta, calor del suelo, calor sensible, calor latente.

THE ENERGY BALANCE IN A SOYBEAN CROP UNDER EXTREME HYDROLOGICAL CONDITIONS

SUMMARY

*During the 1984-1985 growing season, a micrometeorological tower was installed on a soybean plot (*Glycine max* (L.) Merrill), cv Carcaraña INTA, at Manfredi, Córdoba.*

*Micrometeorological variables were recorded on a hourly and daily basis to analyze the energy balance fluxes. Diurnal patterns of net radiation, soil, sensible and latent heat fluxes were examined for two typical days with similar weather conditions. The crop was fully developed but subject to different available soil water contents.*

*When the soil has only 8% of available water, 68.79 of the available energy (Rn-S) was used for the evapotranspiration, process while sensible heat flux consumed 31.21% of Rn-S.*

*When the soil had 43% of available water, 92.56% of Rn-S was consumed in evapotranspiration and 7.44% in sensible heat.*

*The availability of water in the soil profile had a major influence over the energy balance components of the soybean crop.*

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

(1) Becario de Formación Superior del CONICET. Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida (CIHRSA). Avda. San Martín 1570. CC. 337 (5152) Villa Carlos Paz -Córdoba- Argentina

### INTRODUCCION

La soja (*Glycine max* (L.) Merrill) es uno de los cultivos de mayor importancia económica en el área central de la Argentina. En dicha área el conocimiento del consumo de agua por el cultivo es muy importante dado que se ubica dentro de la región semiárida donde el rendimiento de los cultivos se ve afectado principalmente por la disponibilidad de agua en el perfil del suelo explorado por las raíces.

Una determinación correcta del intercambio de energía entre el cultivo y la atmósfera que lo rodea contribuye a un mejor conocimiento y comprensión sobre el consumo de agua y el rendimiento del cultivo (Anderson y Verma, 1986).

En este sentido el método del balance de energía produce estimaciones adecuadas de evapotranspiración y ha sido ampliamente utilizado en diferentes cultivos (Baldochi et al, 1981; Bailey y Dabies, 1980; Heilman y Kanemasu, 1976; Rosenberg y Brown, 1973; Verma et al, 1978).

El presente trabajo tiene por objeto analizar la magnitud y variabilidad de los componentes del balance de energía en un cultivo de soja ubicado en la región central de la Argentina considerando dos días de la campaña agrícola con similares condiciones meteorológicas de alta demanda atmosférica y desarrollo del cultivo pero con diferente disponibilidad de humedad en el perfil de suelo.

### CONSIDERACIONES TEORICAS

La ecuación del balance de energía se expresa generalmente de la siguiente manera:

$$R_n = LE + H + S \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned} R_n &= \text{flujo de radiación neta} && (W/m^2) \\ LE &= \text{flujo de calor latente} && (W/m^2) \\ H &= \text{flujo de calor sensible} && (W/m^2) \\ S &= \text{flujo de calor del suelo} && (W/m^2) \end{aligned}$$

La radiación neta fue medida y el flujo de calor sensible fue calculado utilizando las mediciones de los perfiles aerodinámicos de velocidad del viento y temperaturas (Stricker y Brutsaert, 1978) corregidos por estabilidad atmosférica. Para calcular H se utilizó la siguiente ecuación:

$$H = \frac{u^* \cdot k \rho c_p (T_1 - T_2)}{\ln \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d} - \psi_h \frac{Z_2}{L} - \psi_h} \quad (2)$$

con:

$$u^* = \frac{u \cdot k}{\ln \frac{Z_1 - d}{z_0} - \psi_m} \quad (3)$$

En donde:

- u = velocidad del viento (m/s)
- u\* = velocidad de fricción (m/s)
- k = constante de Karman (0,41)
- $\rho$  = densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)
- c<sub>p</sub> = calor específico del aire (J/kg.°C)
- T<sub>1</sub>- T<sub>2</sub>= diferencia de temperaturas entre dos niveles de medición 2 y 6 m respectivamente, (°C)
- Z<sub>1</sub> y Z<sub>2</sub>= alturas de medición 2 y 6 m
- Z<sub>0</sub> = longitud de rugosidad (0,13h;m)

**d** = desplazamiento del plano cero (0,66h; m)  
**h** = altura del cultivo (m)  
**L** = longitud de Monin-Obukhov (m)  
 $\psi_h$  = corrección por estabilidad del perfil de temperaturas  
 $\psi_m$  = corrección por estabilidad del perfil de velocidad del viento

La longitud de Monin-Obukhov se calculó en forma iterativa con la siguiente ecuación (Monin-Obukhov, 1954):

$$L = \frac{u^3 T \int cp}{k g H} \quad (4)$$

siendo:

**g** = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

Las expresiones para  $\psi_m$  y  $\psi_h$  dadas por Businger (1971) son:

$$\psi_m = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \operatorname{tg}^{-1} x + 1/2$$

$$x = (1 - 15 \xi)^{1/2} \quad \text{para } \xi < 0 \quad (5)$$

$$\psi_h = 2 \ln\left(\frac{1+y^2}{2}\right) \quad (6)$$

$$y = (1 - 9 \xi)^{1/2} \quad \text{para } \xi < 0$$

donde:

$$\xi = z/L$$

$$\psi_m = -4,7 \xi/L \quad \text{para } \xi > 0$$

$$\psi_h = -6,35 \xi/L \quad \text{para } \xi > 0 \quad (7)$$

El flujo de calor del suelo fue calculado utilizando las temperaturas de suelo medidas y empleando un método combinado (Bertz, 1969). El flujo **s** se descompone en dos sumandos: a) el cambio de las temperaturas de suelo respecto a la profundidad, a partir de una profundidad  $S_0$  previamente determinada y b) el cambio de las temperaturas con el tiempo a distintas profundidades. La ecuación general se expresa como:

$$S = -(\lambda \partial T / \partial z)_{p2} - \int_{p2}^{p1} s \cdot Cs \cdot dT/dt \, dz - \int_{p1}^0 s \cdot Cs \cdot dT/dt \, dz \quad (8)$$

donde:

$\lambda = z \cdot \int s \cdot Cs$  = conductividad de calor del suelo ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ )  
 $\int s$  = densidad del suelo ( $kg/m^3$ )  
 $Cs$  = calor específico del suelo ( $J/kg \cdot ^\circ K$ )  
 $a$  = difusividad térmica del suelo ( $m^2/s$ )

La difusividad térmica puede hallarse con la siguiente ecuación:

$$a = \frac{2 \pi / 86400 \cdot (p1 - p2)^2}{2 \left\{ \ln \left( \frac{T(p1)_{max} - T(p1)_{min}}{T(p2)_{max} - T(p2)_{min}} \right) \right\}} \quad (9)$$

Siendo:

**T(p1)max** y **T(p2)max** = máxima temperatura diaria a las profundidades **p1** y **p2**.  
**T(p1)min** y **T(p2)min** = mínima temperatura diaria a las profundidades **p1** y **p2**.

Por último, el flujo de calor latente (LE) ó evapotranspiración del cultivo, fue obtenido como un residuo de la ecuación (1) de balance de energía.

### MATERIALES Y METODOS

El experimento fue conducido desde noviembre de 1984 hasta mayo de 1985 en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA en Manfredi, Córdoba, Argentina (31°49'S, 63°46'W; 292 m.s.n.m.). El suelo es un Haplustol éntico (serie Oncativo) caracterizado por su textura franco limosa, relieve llano y permeabilidad moderadamente rápida.

El cultivo de soja (cv. Carcaraña INTA, grupo de maduración VI) fue sembrado en hileras espaciadas a 0,70 m en un lote de 40 ha y sin riego.

Una estación micrometeorológica automática se instaló en el centro del lote para evitar los efectos de borde que pudieran afectar a los perfiles de temperatura y la velocidad del viento.

La temperatura del aire fue medida a 2, 3 y 6 m de altura sobre la superficie del suelo con sensores provistos de un miniventilador. También se registró la temperatura del bulbo húmedo a 3 m de altura con el mismo tipo de sensor. Al mismo tiempo se midió la diferencia de temperatura del aire entre los 2 y 6 m de altura.

La velocidad del viento fue medida a 3 y 6 m de altura utilizando anemómetros electrónicos con cazoletas.

Para medir la temperatura del suelo se colocaron sensores a 0,05 y 0,25 m de profundidad. Además se utilizó el valor registrado a 1 m de profundidad en la estación agrometeorológica de la EEA-INTA Manfredi.

Por último se registró la radiación neta con un radiómetro ubicado a 2 m de altura sobre la superficie del suelo y hacia el norte de la estación automática.

Todos los datos micrometeorológicos fueron registrados cada 5 minutos en una cinta magnética ubicada en un convertidor analógico-digital. Los datos fueron integrados a valores horarios utilizando un programa de computadora en lenguaje BASIC especialmente diseñado para este experimento. El convertidor mencionado así como las baterías

de alimentación se ubicaron en un compartimiento estanco de cemento construido a un lado de la torre bajo la superficie del suelo.

Al mismo tiempo se realizó un registro de los estados fenológicos del cultivo de soja siguiendo la escala de Fehr y Caviness (INTA, 1981). Una vez por semana se extrajeron muestras de suelo cada 0,10 m de profundidad para la determinación de la humedad hasta los 2 m de profundidad.

Los valores de los intercambios de energía sobre el cultivo de soja obtenidos para dos días elegidos, el 9/3/85 cuando el cultivo estaba sujeto a deficiencia hídrica (CDH) con un 8% de agua útil en el perfil del suelo y el día 20/3/85 cuando el suelo tenía un 43% de agua útil (SDH).

### RESULTADOS Y DISCUSION

Las condiciones del cultivo y los valores medios de las variables ambientales registradas en esos días se presentan en el Cuadro N° 1.

De acuerdo a la escala de Fehr y Caviness (1974) el estado R2 se denomina como plena floración y cuya descripción es: "Flores abiertas en uno de los dos nudos superiores (con una hoja completamente desarrollada) del tallo principal". Mientras que el estado R4 se denomina como plena frutificación y cuya descripción es: "Vainas de 2 cm de largo en uno de los cuatro nudos superiores (con hoja totalmente desarrollada) del tallo principal".

La Figura 1 muestra la marcha diurna de la temperatura del aire y la velocidad del viento medidas a 3 m de altura sobre la superficie del suelo. En el día con deficiencia hídrica (CDH), la velocidad del viento fue menor y la temperatura del aire fue mayor que la registrada el día con 43% de humedad edáfica (SDH).

El curso diurno típico de la radiación neta, del flujo de calor latente, de calor sensible y del suelo en el cultivo de soja en condiciones hí-

Cuadro N° 1: Condiciones del cultivo de soja y variables ambientales medias en Manfredi, Córdoba, Argentina.

Fecha	Altura del cultivo (m)	Cober-tura (%)	Estado Fenológico	Temperatura promedio °C	Viento promedio m/s	Humedad suelo (%)
9-3-85	0,67	100	R2	22,43	0,50	8
20-3-85	0,92	100	R4	19,13	2,89	43

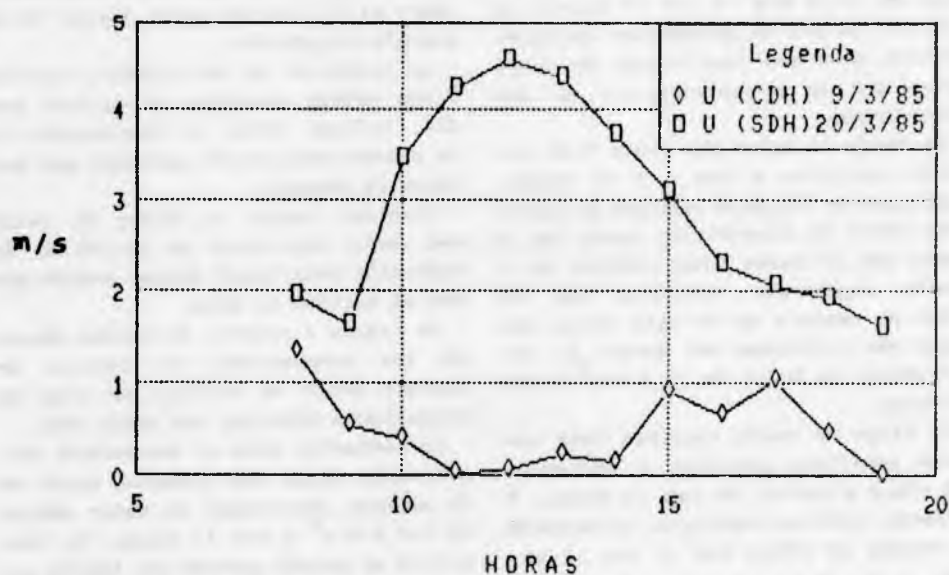
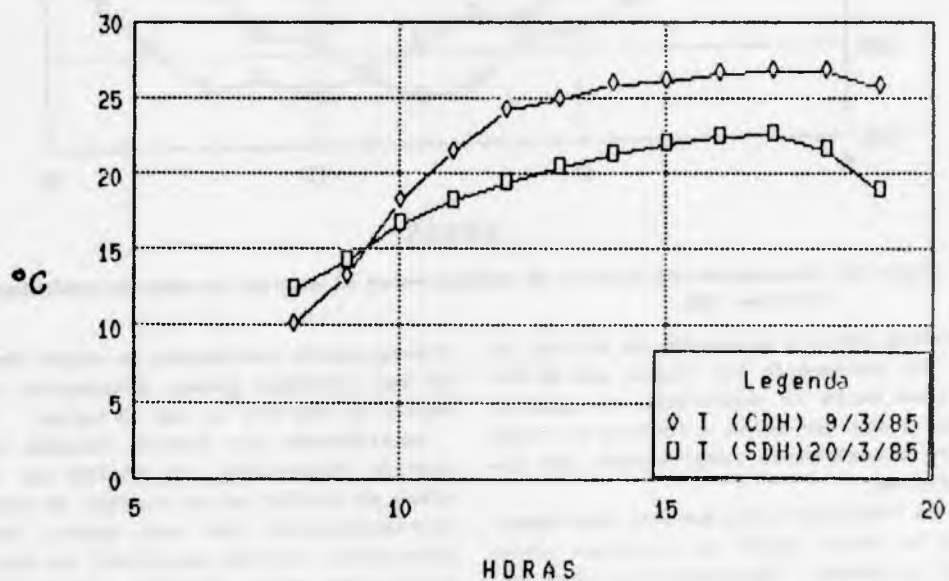


Figura 1: Marcha diaria de la temperatura del aire (T) y velocidad del viento (U) registradas sobre un cultivo de soja bajo condiciones.

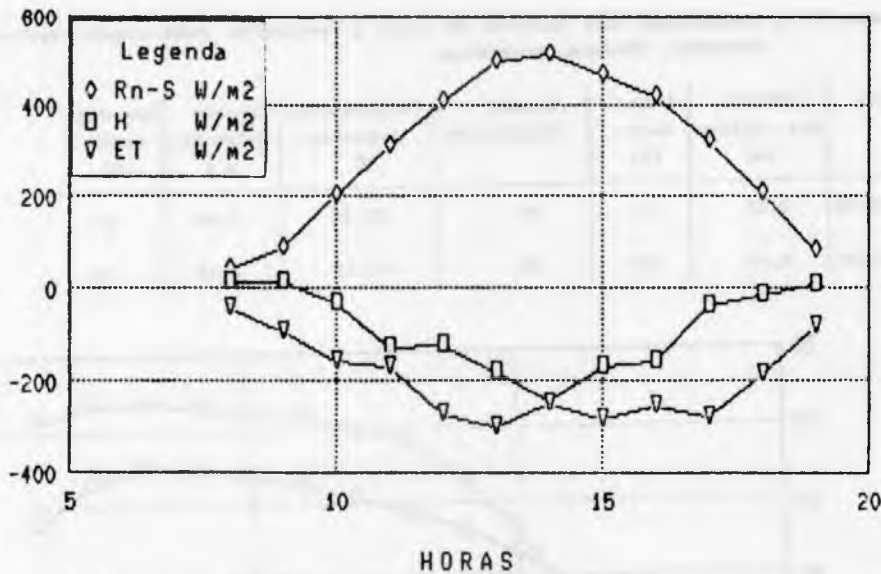


Figura 2: Componentes del balance de energía sobre el cultivo de soja en condiciones hídricas CDH.

dricas CDH, se presentan en la Fig. 2.

Por convención los flujos que se dirigen hacia la superficie son positivos y los que emite o refleja el canopeo o superficie consideradas son negativos.

La radiación neta aumenta rápidamente su valor desde las primeras horas de la mañana, alcanzando su valor máximo de  $571,2 \text{ W/m}^2$  a las 14 horas; Rn exhibió un patrón parabólico característico para las condiciones de cielo claro que se presentaron en el día considerado.

El flujo de calor del suelo tuvo valores positivos a las 8 y 18 horas, indicando un flujo de energía dirigiéndose hacia la superficie; desde las 9 hasta las 17 horas los valores de S fueron negativos, indicando que el flujo de energía se dirigía hacia las capas más profundas del suelo. El valor máximo de S fue de  $75,5 \text{ W/m}^2$  a las 13 horas.

El flujo de calor sensible tuvo valores positivos pequeños a comienzos del día y a partir de las 11 horas, H presenta valores negativos, alcanzando un máximo de  $249,3 \text{ W/m}^2$  a las 14 horas.

El flujo de calor latente o evapo-

transpiración incrementa su valor desde las primeras horas, alcanzando un máximo de  $396 \text{ W/m}^2$  a las 13 horas.

Considerando los totales diurnos de energía disponible, un 68,79% de la misma se utilizó en el proceso de evapotranspiración. Por otra parte, una importante cantidad de (Rn-S) se consumió como calor sensible, representando el 31,21% del total diurno de la energía disponible.

La condición de deficiencia hídrica a que estaba sometido el cultivo ese día, influyó sobre la disminución de la evapotranspiración estimada por balance de energía.

Mientras tanto, el flujo de calor del suelo representó un 12,17% de la radiación neta total diurna medida sobre el cultivo de soja.

La Figura 3 muestra la marcha diurna de los componentes del balance de energía sobre un cultivo de soja en condiciones hídricas del suelo SDH.

La radiación neta se incrementó rápidamente desde las primeras horas de la mañana, alcanzando un valor máximo de  $544,2 \text{ W/m}^2$  a las 14 horas. Rn describió el patrón parabólico típico para días con condiciones de cielo claro.

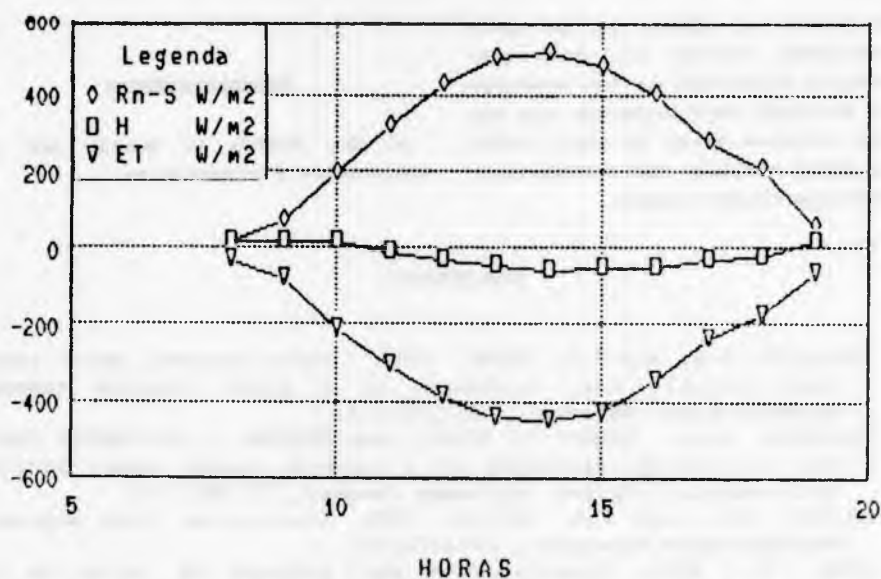


Figura 3: Componentes del balance de energía sobre el cultivo de soja con el suelo bien provisto de humedad SDH.

El flujo de calor del suelo tuvo valores negativos desde las 9 a las 17 horas indicando un flujo hacia las capas más profundas del suelo. Se alcanzó un valor máximo de  $35,2 \text{ W/m}^2$ .

El flujo de calor sensible mostró valores positivos temprano por la mañana y en las últimas horas de la tarde. El máximo valor H fue de  $59,8 \text{ W/m}^2$  a las 14 horas.

El flujo de calor latente o evapotranspiración respondió linealmente a Rn y describió un patrón parabólico similar como se puede observar en la figura 3. LE alcanzó su valor máximo de  $451,5 \text{ W/m}^2$  a la misma hora del máximo de Rn.

Considerando los valores totales diurnos, LE utilizó un 92,56% de la energía disponible representada por (Rn-S) indicando que la mayor parte de la energía se consumió en el proceso de evapotranspiración.

En este día la cantidad de energía (Rn-S) que se distribuyó hacia el flujo de calor sensible fue del 7,44%, cantidad considerablemente menor que el obtenido el día con deficiencia hídrica.

Por último, el flujo de calor del suelo representó un 5,04% del total diurno de Rn.

#### CONCLUSIONES

Se comprueba que la disponibilidad de humedad en el suelo influye marcadamente sobre el balance de energía y que este acusa ese estado hídrico modificando el porcentaje de energía disponible que se consume en evapotranspiración.

En condiciones de buen suministro de humedad en el suelo, la mayor parte de la energía disponible se consumió en evapotranspiración mientras que bajo severa deficiencia hídrica la evapotranspiración consumió menor porcentaje de energía disponible aumentando la proporción de energía consumida como calor sensible.

El método de balance de energía puede ser utilizado para estimar los flujos de energía en forma horaria y diaria, siendo un método con base física para estimar el consumo de agua de los cultivos.

Los resultados obtenidos aquí demuestran la utilidad del método de balance energético para medir y estimar los intercambios de flujos de energía entre el cultivo y el ambiente que lo rodea.



Actualmente el método es de mayor aplicabilidad debido al desarrollo tecnológico alcanzado en los sensores que se utilizan para registrar las variables intervinientes lo cual indica que se podrá utilizar más extensamente en investigaciones a campo.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Andrés C. Ravelo por los comentarios y sugerencias.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1) ANDERSON, D.E. and S.B. VERMA. 1986. Carbon dioxide, water vapor and sensible heat exchanges of a grain sorghum canopy. *Boundary-Layer Meteorol.*, 34:317-331.
- 2) BALDOCHI, D.D.; SHASHI B. VERMA, and NORMAN J. ROSENBERG 1981. Mass and energy exchanges of a soybean canopy under various environmental regimes. *Agronomy Journal*, 73:706-710.
- 3) BAILEY, W.G. and J.A. DAVIES. 1980. Evaporation from soybean. *Boundary-Layer Meteorol.*, 20:417-428.
- 4) BERZ, G., 1969. Investigación del balance de calor de la superficie de la tierra y de la transferencia atmosférica en la proximidad del suelo. *Instituto Meteorológico de Munich*, N° 16, pp. 94. Traducción al español N° 6044, CONICET.
- 5) BROWN, K.W. and N.J. ROSENBERG, 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agronomy Journal*, 65:341-347.
- 6) BUSINGER, J.A.; J.C. WYNGAARD, Y. YZUMI and E.F. BRADLEY. 1971. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal Atmos. Sci.*, 28:181-189.
- 7) FEHR, W.R. and C. CAVINESS. 1974. Estados de desarrollo de la planta de soja. *Special Report 80*, IOWA State University. Traducido al español por el Ing. Agr. J.C. Suárez, EERA INTA Marcos Juárez-Serie Producción Vegetal N° 1, 13 pp.
- 8) HEILMAN, J.L. and E.T. KANEMASU. 1976. An evaluation of a resistance form of the energy balance to estimate evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 68:607-611.
- 9) MONIN, A.S. and A.M. OBUKHOV. 1954. Dimensionless characteristics of turbulence in the atmospheric surface layer. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 93:223-226. Traducido al español.
- 10) STRICKER, H. and W. BRUTSAERT. 1978. Actual evapotranspiration over a summer period in the "Hupsel Catchment". *Journal of Hydrology*, 39:139-147.
- 11) VERMA, S.B.; N.J. ROSENBERG and B.L. BLAD. 1978. Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advection conditions. *J. Appl. Meteorol.*, 18:378-382, 1979.