

# EMPLEO DEL BALANCE DE ENERGIA Y DATOS DE RADIACION SOLAR PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACION DE LOS CULTIVOS<sup>1</sup>

Por CARLOS J. GRASSI<sup>2</sup>

## INTRODUCCION

La *evapotranspiración* o evaporación de una superficie de terreno, total o parcialmente cubierto con vegetación, es consecuencia de: 1º, la velocidad de suministro de energía para cambiar el estado físico del agua; 2º, la velocidad de traslado del vapor de agua formado desde la superficie evaporante a la atmósfera.

El cambio de estado del agua, del líquido al gaseoso, se realiza en el proceso evapotranspiratorio por acción de la fuente energética que representa la *radiación solar*; la cantidad de energía necesaria por unidad de masa, o calor latente de vaporización, es en tal caso función de la temperatura del agua, requiriéndose a 20° C aproximadamente 580 cal/g. La velocidad de traslado del vapor de agua formado, en cambio depende de la diferencia de potencial o de tensión de vapor, entre el agua en las células del mesófilo y la atmósfera circundante.

El suelo y la planta ejercen determinada *resistencia* a la libre circulación del agua desde el suelo a la atmósfera, de tal manera que su transporte a través del sistema, puede asimilarse a la ley de Ohm en electricidad: directamente proporcional a la diferencia de potencial o inversamente proporcional a la resistencia.

En una superficie libre de agua, la resistencia a la evaporación es ejercida por una capa de aceite inmediatamente superior a la misma de unos pocos milímetros de espesor, donde el movimiento del vapor de agua es sólo por difusión. En el sistema suelo-planta existen factores de resistencia en el suelo, raíz, tallo, hoja y en la interfase hoja-aire. Según TAYLOR (1963), la mayor caída de potencial (mayor resistencia), se produce en la interfase hoja-aire.

<sup>1</sup> Texto resumido de la conferencia dictada en el Instituto de Edafología e Hidrología de la Universidad Nacional del Sur, el día 4 de diciembre de 1964.

<sup>2</sup> Ingeniero Agrónomo, Master of Science en Irrigación y Drenaje, profesor titular de Hidrología Agrícola en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo.

La reducción con el tiempo del contenido hídrico del suelo y por lo tanto de su potencial, disminuye la conductividad del agua en este medio y la velocidad de su movimiento hacia la raíz. Correlativamente y como consecuencia del bajo potencial hídrico en el suelo, se produce el cierre estomático, aumentando así la resistencia a la evapotranspiración del sistema suelo planta. La caída en la velocidad de evapotranspiración, que se produce durante el período de maduración de los cultivos, puede igualmente interpretarse como un aumento de la resistencia.

Lo expuesto tiene por fin señalar la posibilidad de empleo de medidas de orden físico, para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos: energía disponible para el proceso evapotranspiratorio y velocidad de movimiento del vapor de agua formado durante el mismo. Los métodos que se apoyan en estos principios se dividen en: 1º, Método basado en el traslado del vapor de agua ("vapor transfer method"); 2º, Método basado en el balance de energía ("energy balance method").

El método del *traslado del vapor de agua*, se basa en medidas de gradientes de presión de vapor y de velocidad de viento. La ecuación de Thornthwaite - Holzman tiene en cuenta dichos factores, sin embargo las posibilidades de su empleo están limitadas por problemas de orden instrumental, dado la elevada precisión requerida para apreciar gradientes.

El método del *balance de energía* en cambio, se basa en medidas más fáciles de realizar en la práctica y en el aceptable acuerdo, comprobado experimentalmente, entre las medidas de evapotranspiración y radiación.

En esta conferencia, nos referiremos en particular al método del balance de energía y datos de radiación solar, para estimar la velocidad de evapotranspiración de los cultivos. Distinguiremos antes la diferencia entre evapotranspiración potencial y real.

*Evapotranspiración potencial*  $E_p$ , es la máxima evapotranspiración posible, bajo las condiciones climáticas existentes, cuando el suelo está abundantemente provisto de agua y cubierto totalmente por la vegetación.

*Evapotranspiración real o actual*  $E_a$ , es la evapotranspiración que se produce en condiciones reales, teniendo en cuenta que en determinados períodos la cobertura vegetal es incompleta y los niveles de humedad en el suelo son variables. La diferencia entre evapotranspiración real y potencial, depende del estado de energía del agua en el suelo y de factores anatómicos y fisiológicos de la planta: así varía con la especie y a su vez en las diferentes fases del ciclo vegetativo de los cultivos.

## BALANCE DE ENERGIA

De la energía que llega al nivel de los cultivo en forma de *radiación global*  $R_g$ , y que comprende la radiación solar directa y difusa, parte es reflejada y la mayor proporción constituye la *radiación recibida*  $R_r$ . La energía reflejada se expresa por un coeficiente de reflexión o *albedo*  $r$ , que depende de las características de la superficie evaporante, especialmente de su color.

La radiación recibida por la superficie evaporante, puede entonces ser expresada por la ecuación:

$$R_r = R_g (1 - r) \quad (1)$$

Donde:

$r$  es el albedo (menor que la unidad)

PENMAN (1948), ha propuesto una ecuación para estimar  $R_r$ , a partir de la radiación teórica  $R$ :

$$R_r = R (0,18 + 0,55 n/N) \quad (2)$$

Donde:

$n/N$  es la fracción de insolación (actuales sobre posibles horas de sol).

La radiación en ausencia de atmósfera  $R$ , varía para cada localidad y época del año, en función de la latitud, la declinación y el ángulo horario.

A su vez la superficie evaporante pierde energía por el proceso de irradiación, constituyendo lo que se denomina *radiación emitida*  $R_e$ . La ley de Stefan-Boltzman establece que la energía irradiada depende de la temperatura y de las características de la superficie irradiante. A partir de la ley de Stefan - Boltzman, BRUNT ha dado una ecuación para  $R_e$

$$R_e = G T_a^4 (0,56-0,09 \sqrt{e_a}) (0,10 + 0,9 n/N) \quad (3)$$

Donde:

$G$  es la constante de Stefan-Boltzman

$T_a$  es la temperatura absoluta, en grados Kelvin

$e_a$  es la presión de vapor del aire

La diferencia entre la radiación recibida y la emitida, es la *radiación neta*  $R_n$ .

$$R_n = R_r - R_e \quad (4)$$

En un complejo balance de energía,  $R_n$  se invierte en 1º, flujo calórico vertical hacia el suelo y hacia el aire; 2º, calor latente de vaporización del agua; 3º, calor almacenado en el volumen foliar del cultivo; 4º, flujo calórico horizontal. Tal como lo establece

TANNER (1960), el número de términos que intervienen en el balance de energía pueden ser reducidos cuando el plano de referencia es la superficie del terreno (fig. 1) ; entonces:

$$R_n = S + A + E_a \quad (5)$$

Donde:

S es el flujo calórico empleado en el calentamiento del suelo.

A es el flujo calórico empleado en el calentamiento del aire: convección.

$E_a$  es el flujo calórico empleado en evapotranspiración.

Los términos que componen la ecuación (5), se emplean en nuestra discusión, expresados en altura equivalente de agua evaporada por día (mm/día). Los términos A y S pueden cambiar de signo, tal como resulta al comparar (fig. 1) el balance de energía correspondiente al día y a la noche. El aporte de energía *advectiva* en pleno día por efecto del movimiento de masas de aire caliente ("efecto de oasis"), cambia el signo de A, resultando así una mayor disponibilidad de energía para evapotranspiración.

Despejando  $E_a$  de la ecuación (5):

$$E_a = R_n - S - A \quad (6)$$

La *relación de Bowen*  $\beta$  vincula A con S:

$$\beta = A/E_a; \text{ y por lo tanto: } A = \beta E_a \quad (7)$$

Reemplazando la (7) en la (6), y operando:

$$E_a = \frac{R_n - S}{(1 + \beta)} \quad (8)$$

Para efectuar detallados balances diarios de energía, el calentamiento del suelo tiene su significación; sin embargo para lapsos mayores que comprenden varios días, el valor de S carece de importancia en relación a la  $R_n$ . Para  $S = 0$  en la (8), y dividiendo ambos miembros de la ecuación por  $R_n$ , se obtiene:

$$\frac{E_a}{R_n} = \frac{1}{(1 + \beta)} \quad (9)$$

Se analizan a continuación cuatro casos hipotéticos de superficie evapotranspirante, y la variación en cada uno de ellos de  $\beta$  y de  $E_a/R_n$ .

1. Terreno totalmente cubierto por la vegetación y con adecuado nivel de humedad edáfica: la energía radiante empleada en

calentar el suelo es mínima y no se produce pérdida de calor por convección.

$$\beta = 0; \text{ por lo tanto: } \frac{Ea}{Rn} = 1$$

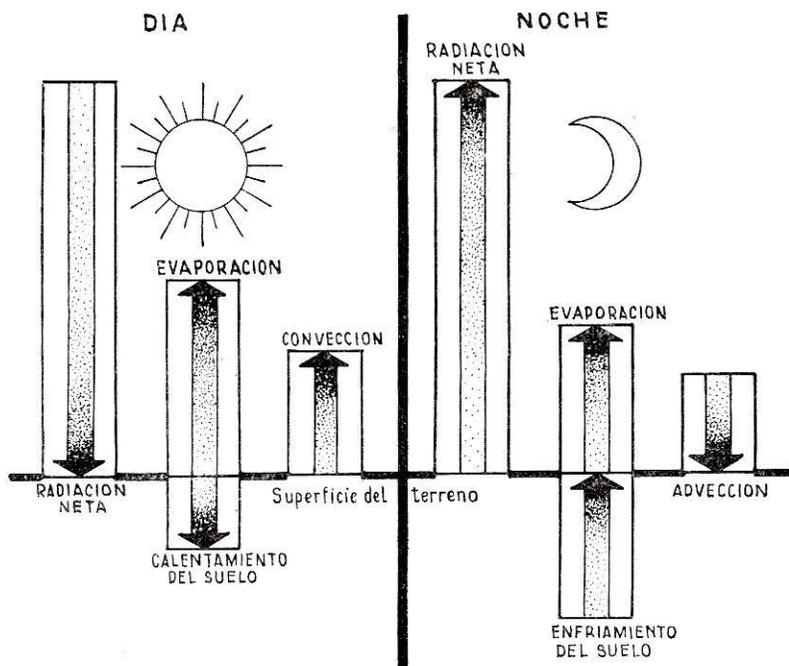


Fig. 1. — Esquema de un balance de energía al nivel del suelo

2: Terreno parcialmente cubierto por la vegetación y con adecuado nivel de humedad edáfica: el suelo se calienta algo más que en el caso anterior y existe un flujo calórico vertical por convección.

$$\beta \rightarrow +; \text{ por lo tanto: } \frac{Ea}{Rn} < 1$$

3. Terreno descubierto totalmente de vegetación y de bajo nivel de humedad edáfica: el suelo se calienta más que en el caso anterior y se producen elevadas pérdidas de calor por convección. El caso es similar al 2, aunque al adquirir  $\beta$  valores muy altos, puede la relación  $Ea/Rn$  aproximarse a cero.

4. Terreno cubierto totalmente de vegetación y con buen nivel de humedad edáfica, pero rodeado de desierto: aporte de energía advectiva.

$$\beta \rightarrow -; \text{ por lo tanto: } \frac{Ea}{Rn} > 1$$

El aporte de la energía advectiva, tiene una significación tal, que se han comprobado relaciones hasta de  $E_a/R_n = 2$ . La variación del "efecto de oasis" con el área del terreno sin limitaciones en la humedad edáfica, ha sido estudiada por HALSTEAD y COVEY (1957):

Tamaño del área humedad	Temperatura a 1.60 m (°C)	Evapotranspiración mm/día
Tanque a 1,80 m de lado . . . . .	30,0	4,5
Parcela de 15 m de lado . . . . .	28,6	2,6
Parcela de 90 m de lado . . . . .	23,8	1,9
Parcela de 1.600 m de lado . . . . .	20,0	1,3

A su vez  $E_a/R_n$  varía a lo largo del ciclo vegetativo, la figura 2 tomada de PRUITT (1964), y que contiene observaciones de  $E_a/R_n$  en ryegrass perenne, muestra variaciones que van desde 0,68 a 1,04. Con respecto a valores horarios, PRUITT (1963) observa algo simi-

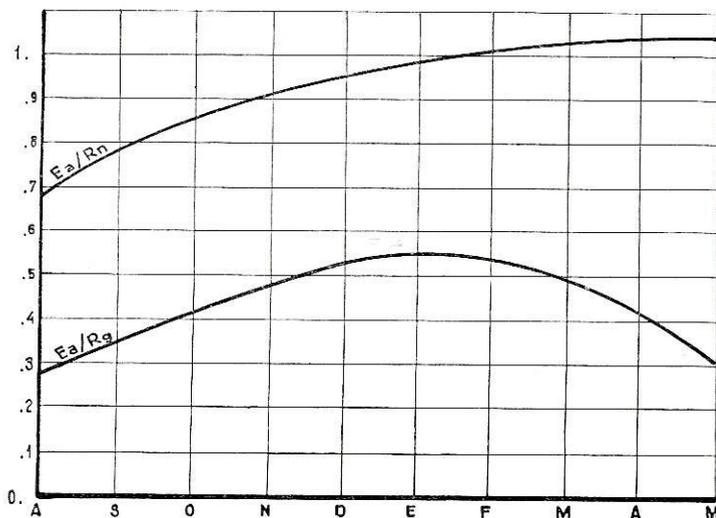


Fig. 2. — Según Pruitt (1964)

lar: la relación  $E_a/(R_n + S)$  aumenta de 0,5 dos horas después de la salida del sol a 1,00, entre las 14 y 15 hs. superando el valor de 1,00 después de las 15 hs. La situación es análoga en ambos casos, se trata de un mayor calentamiento de la superficie, un exceso de la velocidad de enfriamiento por evapotranspiración, lo que produce energía convectiva que queda disponible para este proceso.

## EFECTO DEL CULTIVO EN EL BALANCE DE ENERGIA

En terrenos cubiertos con vegetación, siendo el cultivo la superficie evaporante, influyen determinadas características del mismo relacionadas con su morfología, estructura y color. Cabe destacar al respecto: 1) el coeficiente de reflexión o albedo; 2) la forma de la vegetación; 3) la resistencia a la circulación del aire (aspereza); 4) la densidad de siembra y proporción de cubrimiento del terreno; 5) el estado de maduración.

A medida que aumenta el albedo  $r$ , disminuye la proporción de la radiación global recibida por el cultivo, ecuación (1). Una compilación de valores de  $r$  ha sido realizada por JENSEN y Haise (1962):

Cobertura vegetal	Albedo $r$
Praderas en terrenos altos y secos .....	0,31-0,33
Cultivos hortícolas comunes.....	0,24-0,28
Alfalfa (calc.).....	0,03
Cultivos de trigo y centeno.....	0,10-0,25
Cultivos de papa.....	0,20-0,25
Praderas.....	0,15-0,25

Del cuadro anterior se deduce que la mayor parte de los cultivos anuales tienen un valor de  $r$  dentro del orden de 0.20; o sea que el 80 % de la radiación solar que llega al nivel de los cultivos es recibida por los mismos. La alfalfa, en cambio, presenta un valor bajo y próximo al de una superficie libre de agua, para la cual se acepta  $r = 0.05$ .

La aspereza del cultivo a la circulación de aire afecta la función del viento de la fórmula de evaporación de MEYER:

$$E = f(u)(e_s - e_a) \quad (10)$$

Donde:

$u$  es la velocidad del viento;

$e_s$  es la presión de vapor a saturación de la superficie;

$e_a$  es la presión de vapor media del aire.

La función del viento  $f(u)$  ha sido estudiada por BUSINGUER (1956), quien introdujo un coeficiente de aspereza en función de la altura del cultivo; al aumentar la altura de las plantas crece  $f(u)$ , y como consecuencia la energía empleada en evaporación  $E$ .

La densidad de siembra y el porcentaje de cubrimiento de terreno por el cultivo incide en el balance de energía. Al comienzo

del ciclo vegetativo, parte del terreno descubierto por el escaso cubrimiento que proporciona la vegetación, se calienta más que el provisto de un completo tapiz vegetal; como consecuencia aumenta  $S$  y  $A$  y la relación  $Ea/Rn < 1$ . A medida que aumenta el tamaño del cultivo y se cubre el terreno completamente, la relación varía menos y se mantiene la mayor parte del año próximo a la unidad (fig. 2).

En alfalfa, la siega modifica el balance de energía, aumenta  $S$  y  $A$ , y como consecuencia disminuye la energía disponible para evapotranspiración. Como dato ilustrativo al respecto, se transcriben a continuación los resultados de dos balances de energía realizados por TANNER (1960), en un cultivo de alfalfa-brome; corresponden a distinto año y época. En el primer caso a), la alfalfa se encuentra en su completo crecimiento vegetativo, y en el segundo, b), después de la siega:

a) Julio 9, 1956	b) Septiembre 9, 1957
$Rn = 5,71$ mm	$Rn = 2,26$ mm
$S = -0,50$ mm	$S = 0,14$ mm
$Ea = 8,57$ mm	$Ea = 1,46$ mm
$A = -2,36$ mm	$A = 0,66$ mm

En a) el cultivo ha utilizado en el proceso evapotranspiratorio incluso energía advectiva, ya que de los 8.57 mm evapotranspirados sólo 5.71 mm han sido aportados por la radiación neta; en b), en cambio, con posterioridad al corte, de los 2.26 mm que totaliza la radiación neta, sólo han sido empleados en evapotranspiración 1.46 mm.

En maduración, el cultivo reduce la velocidad de evapotranspiración, y como consecuencia aumenta  $S$  y  $A$ . Un efecto similar se observa cuando crece la resistencia por limitaciones de la humedad edáfica. En tal caso la energía que no se invierte en evapotranspiración se emplea en elevar la temperatura del suelo y el flujo calórico vertical por convección.

#### PROCEDIMIENTOS PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRACION EN BASE A RADIACION NETA

Las medidas de radiación neta han demostrado ser un procedimiento preciso de estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos. Para períodos reducidos, incluso, ha resultado superior al método de control del contenido hídrico del suelo por gravimetría, ya que el error de muestreo reduce la precisión para intervalos menores de una semana.

El empleo del "net radiometer" para medir  $R_n$  parece posible en la actualidad, una vez superadas las objeciones formuladas a los primeros aparatos; en especial teniendo en cuenta el creciente interés por los radiómetros de tipo económico, como el sugerido por SUOMI y KUHN, discutido por TANNER et al. (1960).

Sin embargo, dado que  $E_a/R_n$  es variable a lo largo del ciclo vegetativo, se requiere conocer la relación de BOWEN  $\beta$ ; ello descartando, con fines de aplicación, la escasa incidencia de  $S$ . De acuerdo a lo expuesto  $\beta$  debe considerar: 1) el efecto de la energía advectiva actuando sobre el cultivo; 2) la variación del tamaño del cultivo a lo largo del ciclo vegetativo y el efecto de maduración al final del mismo.

PENMAN (1948) ha combinado el balance de energía con la ecuación aerodinámica (10), obteniendo una ecuación que permite calcular la evaporación de una superficie libre de agua,  $E_o$ . En la (10) reemplaza  $e_s$  por la tensión de vapor al punto de rocío  $e_a$ ; por lo tanto:

$$E = f(u) (e_d - e_a) \quad (10')$$

Dado que se requiere una ecuación similar para  $A$ :

$$A = \gamma f(u) (T_s - T_a) \quad (11)$$

Donde:

$\gamma$  es la constante psicrométrica;

$T_s$  es la temperatura de la superficie evaporante;

$T_a$  es la temperatura del aire.

Por definición, la pendiente de la curva de tensión de vapor vs. temperatura  $\Delta$ , será:

$$\Delta = \frac{\Delta e}{\Delta T} = \frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} \quad (12)$$

Reemplazando en la ecuación de la relación de BOWEN y operando se llega a:

$$E_o = \frac{\Delta R_n + \gamma E}{\Delta + \gamma} \quad (13)$$

Para pasar de evaporación de una superficie libre de agua a evapotranspiración, PENMAN utiliza un factor reductor  $f$ , cuyos valores van desde 0,6 para los meses invernales, a 0,8 para los meses de verano. Con relación a una superficie libre de agua,  $f$  tiene en cuenta el menor número de horas diarias que los estomas permanecen abiertos.

Posteriormente PENMAN y SCHOFIELD (1951) han dado una ecuación para calcular directamente evapotranspiración potencial  $E_p$ :

$$E_p = \frac{\Delta R_n + E}{\Delta + \gamma/SD} \quad (14)$$

En dicha fórmula S.D constituye la resistencia a la difusión a través de los estomas, ya que S es un factor estomático y D es un factor derivado de la duración del día.

Trabajos de comprobación de la fórmula de PENMAN han sido realizados por TANNER y PELTON (1960) en Wisconsin, AZIZ en Utah (1961) y MAKINK (1957) en Holanda. De dichos trabajos se infiere que la fórmula de PENMAN puede dar un importante error cuando se estima la evapotranspiración de lapsos reducidos; sin embargo, existe coincidencia en el sentido de que la más importante fuente de error en el empleo de esta fórmula está en la estimación de  $R_n$  con la ecuación (2) y (3). Además, al haber sido desarrollada en un clima húmedo (Rothamsted, Gran Bretaña), no toma en cuenta el efecto de la energía advectiva. Al respecto, al probar AZIZ (1961) la fórmula en Utah, Estados Unidos, comprobó que el monto evapotranspirado por un cultivo de alfalfa superó en un 41 % a la radiación neta; y que dicha energía adicional provino del área de terrenos áridos vecinos al lugar de la experiencia.

#### PROCEDIMIENTOS PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRACION EN BASE A MEDIDAS DE RADIACION GLOBAL

Dado la falta de datos de  $R_n$  y con miras a un perfeccionamiento de los métodos de estimación de las necesidades de agua de los cultivos, en base a datos más confiables que los registros de temperatura media, últimamente se ha orientado el procedimiento a otra medida de la radiación: la radiación global  $R_g$ .

Tal como se ha mencionado anteriormente, la radiación recibida al nivel de los cultivos representa en media el 80 % de  $R_g$ ; promediando las relaciones que pueden obtenerse del gráfico de PRUITT para ryegrass perenne (fig. 2), resulta que  $R_n$  representa el 46 % de  $R_g$ .

Al distanciarse más cuantitativamente  $R_g$  de  $E_a$ , es lógico que esta medida resulte menos exacta que la  $R_n$  para estimar evapotranspiración. Sin embargo, al estar  $R_g$  más en fase con  $E_a$  que otros factores climáticos, aumentan significativamente las posibilidades de su empleo.

La radiación global, medida en el piranógrafo, se registra en todas las estaciones meteorológicas bien montadas del mundo. En nuestro país, con motivo del Año Geofísico Internacional, el Servicio Meteorológico Nacional (1962), publicó datos de  $R_g$  medidos

en el piranógrafo Robinson, correspondientes a 22 localidades del país.

Empleando los datos compilados por JENSEN y HAISE, correspondientes a más de 1.000 períodos de 1 a 2 semanas, en los cuales se registró la evapotranspiración y la radiación global en localidades del oeste de los Estados Unidos, JENSEN y HAISE (1962-1963) y GRASSI y CHRISTIANSEN (1964) obtuvieron las ecuaciones que se discuten a continuación.

#### Fórmula de JENSEN y HAISE

Ha sido desarrollada para estimar la evapotranspiración que se produce en períodos breves, de aproximadamente una semana, en función de los registros de  $R_g$ .

Para diferentes cultivos se ha representado la relación de  $E_a/R_g$  en función de:

a) Porcentaje de cubrimiento del terreno por el cultivo o del volumen foliar estimado en forma relativa, en *cultivos anuales*. Alcanzando el 100 % de cubrimiento del suelo, cambia la escala considerándose simplemente los días después de dicha etapa.

b) Porcentaje de duración de la estación de crecimiento, en *alfalfa*.

c) Valores absolutos de tiempo, días o meses, en *frutales*.

La relación  $E_a/R_g$ , variable en función del tiempo, ha sido tabulada para diferentes zonas de los Estados Unidos; además de los promedios semanales de  $R_g$  de localidades del oeste, registrados por la oficina meteorológica de aquel país.

La fórmula de JENSEN y HAISE expresa que:

$$E_a = \left( \frac{E_a}{R_g} \right)_m R_g \quad (15)$$

Donde:

$\left( \frac{E_a}{R_g} \right)_m$  es el valor medio de la relación, correspondiente a un período específico, adimensional.

$R_g$  es la radiación global, promedio del período correspondiente, expresada en altura equivalente de agua evaporada, mm/día.

La relación media considerada en la fórmula representa la incidencia del cultivo en el proceso evapotranspiratorio, variable en función del tiempo. En una especie anual (fig. 3), la relación es baja al comienzo del ciclo, cuando el cultivo, de reducido tamaño, aprovecha una mínima parte de la energía recibida; luego va aumentando hasta llegar a un máximo, cuando se alcanza el total cubrimiento del terreno, para caer finalmente por causas de orden fisiológico durante el proceso de maduración.

En un cultivo permanente, en cambio, que cubre totalmente el terreno, la relación  $E_a/R_g$  se mantiene con escasa variación durante todo el ciclo (fig. 2). El valor máximo de las relaciones obtenidas por JENSEN y HAISE en diferentes cultivos, al cubrir totalmente el terreno y sin aporte de energía advectiva, ha sido  $E_a/R_g = 0,55 - 0,60$ ; prácticamente en coincidencia con la relación máxima de la figura 2.

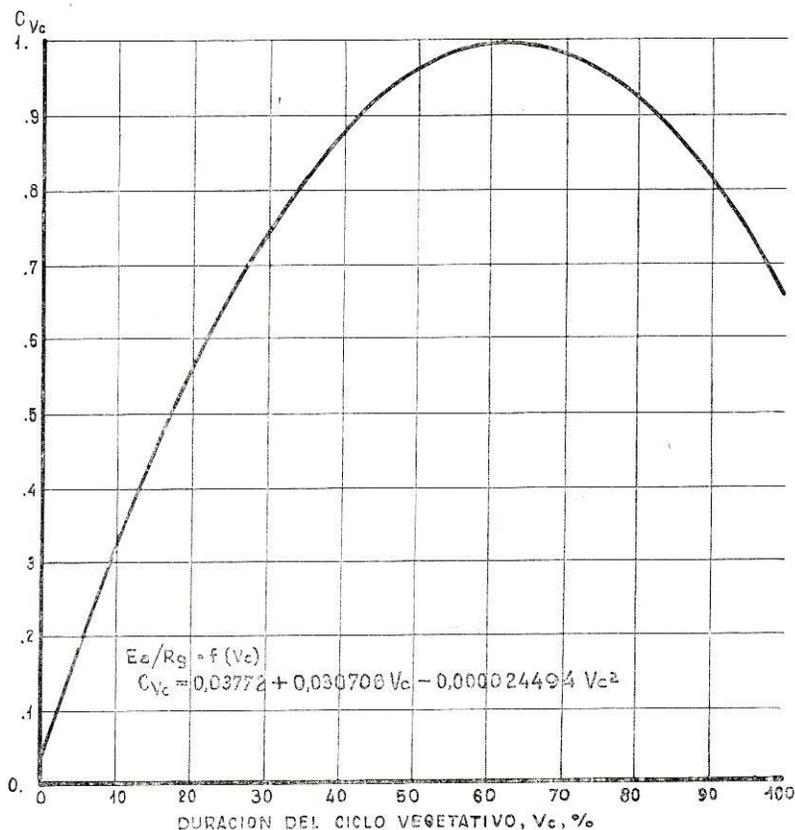


Fig. 3. — Según Grassi (1961)

La evapotranspiración acumulada para un determinado período comprendido entre  $t_1$  y  $t_2$ , se obtiene por integración de la (15):

$$E_a \text{ total} = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{E_a}{R_g} \right)_m R_g dt \quad (16)$$

JENSEN y HAISE han dado, asimismo, una fórmula para evapotranspiración potencial  $E_p$ , o sea para una completa cobertura ve-

En un cultivo permanente, en cambio, que cubre totalmente el terreno, la relación  $E_a/R_g$  se mantiene con escasa variación durante todo el ciclo (fig. 2). El valor máximo de las relaciones obtenidas por JENSEN y HAISE en diferentes cultivos, al cubrir totalmente el terreno y sin aporte de energía advectiva, ha sido  $E_a/R_g = 0,55 - 0,60$ ; prácticamente en coincidencia con la relación máxima de la figura 2.

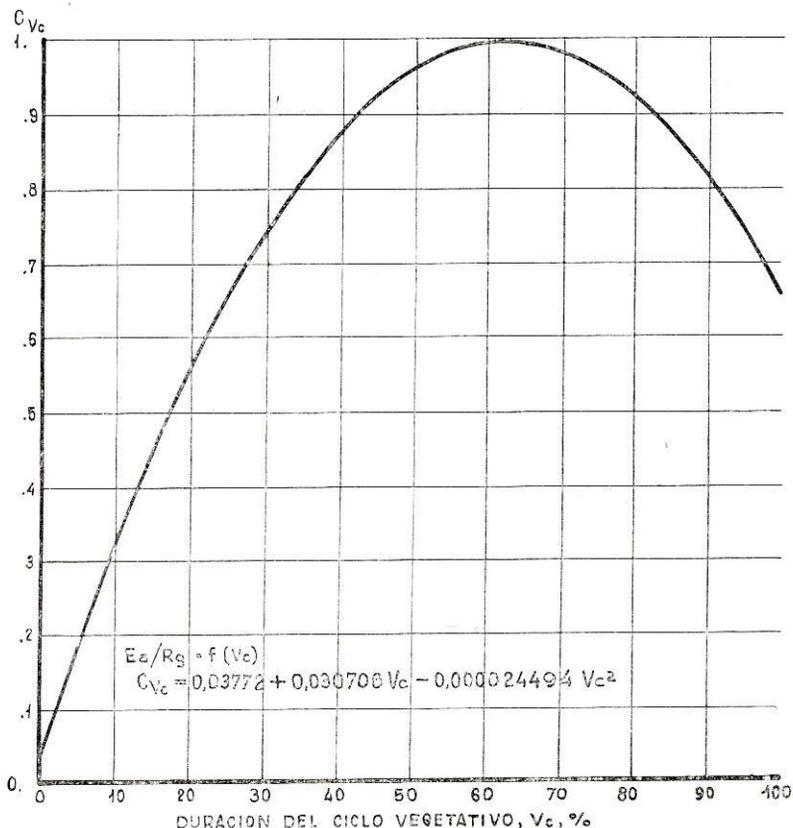


Fig. 3. — Según Grassi (1961)

La evapotranspiración acumulada para un determinado período comprendido entre  $t_1$  y  $t_2$ , se obtiene por integración de la (15):

$$E_a \text{ total} = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{E_a}{R_g} \right)_m R_g dt \quad (16)$$

JENSEN y HAISE han dado, asimismo, una fórmula para evapotranspiración potencial  $E_p$ , o sea para una completa cobertura ve-

En la fórmula, el producto  $C_{Cr} \cdot F$  o  $C_{Ve} \cdot F$  representa el efecto del cultivo, variable a lo largo del ciclo vegetativo; la figura 3 muestra la variación de  $C_{Ve}$  desde siembra de una especie anual hasta maduración y la curva respectiva representa a la ecuación (21). A diferencia del procedimiento de JENSEN y HAISE, el efecto del cultivo está aquí considerado en una ecuación que permite su cálculo directo en función del tiempo, expresado en forma relativa.

Al igual que en el caso de la fórmula de JENSEN y HAISE, la evapotranspiración de un período comprendido entre  $t_1$  y  $t_2$  se obtiene integrando la (18).

$$Ea \text{ total} = K F \int_{t_1}^{t_2} Rg C_T C_{Ve} dt$$

Para calcular  $C_{Ve}$  que corresponde al período entre  $t_1$  y  $t_2$ , se integra entre  $V_{e1}$  y  $V_{e2}$ :

$$A = \int_{V_{e1}}^{V_{e2}} (0,03772 + 0,030706 V_e - 0,00024494 V_e^2) dV_e$$

Calculadas las áreas bajo la curva,  $A_1$  y  $A_2$ , se obtiene  $C_{Ve}$  del período:

$$C_{Ve} = \frac{A_2 - A_1}{V_{e2} - V_{e1}}$$

#### *Análisis de las fórmulas expuestas con relación al balance de energía*

Se extiende a la fórmula de GRASSI-CHRISTIANSEN el balance de energía planteado por JENSEN y HAISE (1963). Para ello reemplazando en la (5),  $R_r$  de la (1) e igualando a cero:

$$Rg - Rgr - Ea - Re - A - S = 0$$

Sacando en la anterior  $Rg$  factor común, eliminando  $S$  por su escasa incidencia y dividiendo por  $Rg$ :

$$\frac{Ea}{Rg} = (1 - r) - \frac{Re}{Rg} - \frac{A}{Rg} \quad (21)$$

Dado que en la fórmula de GRASSI-CHRISTIANSEN:

$$\frac{Ea}{Rg} = K C_T C_{Cr} F \quad (22)$$

Al comparar la (21) y (22), resulta que los factores que integran el segundo miembro de la (22), tienen en cuenta el coeficiente de reflexión  $r$ , la radiación emitida  $Re$  y la radiación convectiva o advectiva  $A$ . Así para  $T = 20,0^\circ C$ ,  $C_{Cr} = 100\%$  y  $F = 1,00$ , se obtiene  $Ea/Rg = 0,537$  (valor de  $K$ ); prácticamente coin-

cidente con el de JENSEN y HAISE para completa cobertura vegetal, y con el obtenido por PRUITT (1964) en el mes de julio (enero en nuestro hemisferio).

La relación de BOWEN también puede escribirse:

$$\beta = \frac{\Delta}{E_a} - 1$$

Reemplazando en la anterior,  $E_a$  de la (18):

$$\beta = \frac{R_n}{K R_g C_T C_{Cre} F} - 1$$

La relación  $R_n/R_g$ , variable a lo largo del año, puede obtenerse de las curvas de PRUITT para ryegrass perenne (fig. 2). Luego, haciendo  $K' = R_n/(K R_g)$ , la ecuación anterior queda:

$$\beta = \frac{K'}{C_T C_{Cre} F} - 1 \quad (23 a) \qquad \beta = \frac{K'}{C_T C_{Ve} F} - 1 \quad (23 b)$$

A modo de ejemplo, se calcula a continuación  $\beta$ , empleando los datos obtenidos por PRUITT (1962) en ryegrass perenne:

Temperatura mes de julio, $T = 76^\circ F (24,4^\circ C)$ .....	$C_T = 1,044$
Cubrimiento del terreno, $Cre = 100\%$ .....	$C_{Cre} = 1,000$
Factor de cultivo (calculado).....	$F = 0,981$

Relación  $R_n/R_g = 0,561$  para el mes de julio (enero en nuestro hemisferio); por lo tanto  $K' = 0,561/0,537 = 1,046$ .

$$\beta = \frac{1,046}{1,044 \cdot 1,000 \cdot 0,981} - 1 = 0,02$$

El resultado prácticamente coincide con el esperado:  $\beta = 0$ .

#### LITERATURA CITADA

- AZIZ, M. A., 1961. *The influence of advective energy on evapotranspiration*. Master of Science thesis, Utah State University Library, Logan, Utah (inédito).
- BUSINGUER, J. A., 1956. *Some remarks on Penman's equations for the evapotranspiration*. Netherlands Journal of Agricultural Science, 4 (1): 77-80.
- GRASSI, C. J., 1964. *Estimation of evapotranspiration from climatic formulas*. Master of Science thesis, Utah State University Library, Logan, Utah (inédito).
- HALSTEAD, H. y W. COVEY, 1957. *Some meteorological aspects of evapotranspiration*. Soil Science Society of America Proceedings, 21 (5): 461-464.

- JENSEN, M. E. y H. R. HAISE, 1962. *Estimating evapotranspiration from so ar radiation*. A preliminary report, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture (inédito).
- 1962. *Summary of measured evapotranspiration rates and the evapotranspiration-solar radiation data a various locations in Western United States*. Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture (inédito).
- 1963. *Estimating evapotranspiration from solar radiation*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 89 (4): 15-41.
- MAKKINK, G. F., 1957. *Ekzameno de la formulo de Penman*. Netherlands Journal of Agricultural Science, 5 (4): 290-315.
- PENMAN, H. L., 1948. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proceedings of the Royal Society of London, 193: 120-145.
- PENMAN, H. L. y R. K. SCHOFIELD, 1951. *Some physical aspects of assimilation and transpiration*. Society of Experimental Biology Symposium, 5: 115-129.
- PRUITT, W. O., 1962. *Correlation of climatological data with water requirements of crops*. Department of Irrigation, University of California, Davis, Annual report n° 3.
- PRUITT, W. O. y M. J. ASTON, 1963. *Atmospheric and surface factors affecting evapotranspiration*. Reprint of chapter III: *Investigation of energy and mass transfers near the ground including influences of the soil — plant — atmosphere system*, University of California, Davis.
- PRUITT, W. O., 1964. *Procedures for estimating crop water requirements for use in water allocations and for improvement of irrigation efficiency*. Department of Irrigation, University of California, Davis, Annual progress report.
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, 1962. *Datos de radiación solar, del período 1° de julio de 1957 al 31 de diciembre de 1958*. Secretaría de Aeronáutica, Buenos Aires.
- TANNER, C. B., 1960. *Energy balance approach to evapotranspiration from crops*. Soil Science Society of America Proceedings, 24 (1): 1-9.
- TANNER, C. B., J. A. BUSINGUER y P. M. KUHN, 1960. *The economical net radiometer*. Journal of Geophysical Research, 65 (11): 3657-3667.
- TANNER, C. B. y W. L. PELTON, 1960. *Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman*. Journal of Geophysical Research, 65 (10): 3391-3413.
- TAYLOR, S. A., 1963. *Simultaneous flow in soils and plants*, Chapte, V: *Water transport through plant from soil to atmosphere*. Utah State University, Logan, Utah.