

**LA FÓRMULA DE PENMAN-MONTEITH FAO 1998  
PARA DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE  
REFERENCIA,  $ETo$**

**THE USE OF THE 1998 PENMAN-MONTEITH FAO FORMULA  
IN ORDER TO DETERMINE REFERENTIAL EVAPOTRANSPIRATION.  
( $ETo$ )**

*José Manuel Guevara Díaz*

**RESUMEN:**

La fórmula «FAO Penman Monteith56» (la cual preferimos denominar «**Penman-Monteith FAO98**»), es discutida en este trabajo como el procedimiento que permite de la manera más precisa, la estimación de la evapotranspiración de referencia  $ETo$ , valor fundamental en las actividades agrícolas y en el manejo de los recursos hídricos. La fórmula **Penman-Monteith FAO98** reemplaza con ventaja a las diversas formulaciones que se utilizaban hasta hace poco en la literatura climática para estimar la evapotranspiración potencial. En ese sentido, el balance hídrico que emplea la ETP estimada por la fórmula de Thornthwaite, se recomienda reemplazarla por la fórmula «**Penman-Monteith FAO98**» para obtener, en consecuencia, resultados mucho más acertados, tal como ya se enseña en el curso de Climatología de la Escuela de Geografía de la Universidad Central de

Venezuela. Con la idea que el artículo tenga un valor didáctico, se incluyen ejemplos seleccionados para aplicar la estimación de la evapotranspiración de referencia en diferentes condiciones: en casos con datos climáticos mensuales completos, en casos mensuales con variables climáticas incompletas, ETo para datos medios diarios, ETo para datos medios horario, etc., ya que pensamos que no basta con conocer una fórmula sino que es realmente necesaria su aplicación práctica que conduzca a su correcto dominio. También se incluyen y se utilizan, planillas de cálculos que hemos diseñado para utilizar con el Excel para facilitar el cálculo de la ETo. Se indican los programas de computación de mayor uso que permiten obtener la ETo de manera directa. Finalmente, se anexan tablas de coeficientes de cultivos para determinar evapotranspiración de cultivo dados, ETc, conociendo la evapotranspiración de referencia, ETo.

**PALABRAS CLAVE:** Evapotranspiración potencial, *evapotranspiración de referencia*, o fórmula de Penman Monteith FAO, cultivo de referencia.

\*\*\*\*\*

**ABSTRACT:**

The «FAO Penman Monteith 56» formula (which we shall refer to as «Penman-Monteith FAO 98») is discussed in this article as the procedure which allows the estimation of referential evapotranspiration in reference to ETO in the most precise way. This is a fundamental agricultural activity in the management of hydric resources. The Penman-Monteith FAO 98 formula replaces the characteristics of diverse formulations which were used till recently in the climatic literature to estimate potential evapotranspiration. In this sense, the hydric balance employed by PET estimated for the Thornthwaite formula, is recommended to be replaced by the Penman-Monteith FAO 98" in order to obtain more accurate results. This fact it is being taught in the Climatology courses at the school of Geography at Universidad Central de Venezuela. With the idea in mind that this article may have a didactic value selected examples are included as to apply the estimation of evapotranspiration in reference to different conditions in cases with complete monthly climatic data, in cases with incomplete climatic variables ETO for daily mean data, ETO for scheduled mean data, etc. because we think that it is not only enough to know a formula; it is also important to apply the formula practically leading to its appropriate control. Calculus forms we have designed are also included and used with Excel to facilitate the ETO calculations. Computer programs used which allow us to obtain the ETO directly are indicated.

Finally, coefficient culture tables are included which are used to determine evapotranspiration for given cultures (CET) which allow us to obtain the ETO directly, knowing referential evapotranspiration (ETO).

**KEY WORDS:** Potential evapotranspiration, referencial *evapotranpiration*, Penman-Monteith FAO formula, referential culture.

\*\*\*\*\*

## PRESENTACIÓN

El reconocimiento de la significación de la evapotranspiración en las actividades agrícolas y en el manejo de los recursos hídricos, aunado a la masificación en el uso de los microcomputadores personales y la utilización de las estaciones automáticas en agroclimatología, impulsó el uso de la fórmula de Penman 1948 para estimar la evapotranspiración en superficie líquida y la evapotranspiración en superficies con vegetación. Esta fórmula, modificada en 1965 por Monteith y denominada fórmula de Penman-Monteith, ha tenido una relevancia extraordinaria en las investigaciones sobre balance energético, balance hídrico, requerimientos de agua, programas de irrigación, entre otras aplicaciones, desplazando la diversidad de formulaciones utilizadas para estimar la evapotranspiración. Simultáneamente, el término evapotranspiración potencial, ETP, es reemplazado por el de *evapotranspiración de referencia, ETo*. Entre las investigaciones que traen tales cambios se destacan las realizadas por la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), la ASCE (American Society of Civil Engineers, USA) y la mayoría de las Universidades del mundo, como la de Idaho en Kimberly; la de Utah en Logan; la de California, en Davis; la de Texas en Bushland y la de Cranfield en Silsoe, Reino Unido, todas con grandes lisímetros y redes de observaciones de la ETo.

Las principales fórmulas que se utilizaban para estimar la evapotranspiración fueron comparadas con mediciones lisimétricas en campos experimentales, concluyendo que la ecuación de Penman-Monteith, estimaba la evapotranspiración con el menor error, y de esos estudios, surgieron modificaciones que mejoraron el enfoque de Penman-Monteith, así como el concepto evapotranspiración de referencia y la escogencia del cultivo de referencia.

Con apoyo de la FAO, Doorenbos y Pruitt (1975) publican *Guidelines for predicting crop water requirements* y lo mejoran en 1977 Doorenbos y Pruitt (1977Rev). En esta publicación se explican cuatro métodos de estimación de la ETo: la fórmula de Penman modificada por los investigadores de la FAO (fórmula de Penman FAO, actualmente en desuso); la de Makkink o «Radiación FAO»; la Fórmula de Blanney-Criddle; y, la ETo por el tanque evaporimétrico tipo A. Posteriormente, en 1990, la FAO revisa la metodología de estimación, requerimiento de agua, irrigación y drenaje utilizada hasta la fecha, para adaptarse a los avances surgidos desde los años 70 y publica en 1998 (Allen *et al.* 1998) un handbook denominado *Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements*, en *Irrigation and Drainage Paper 56*. Es allí donde se indican las recomendaciones más adecuadas sobre la estimación de la evapotranspiración y el uso de la fórmula «FAO Penman Monteith56», que se denominará «Penman-Monteith FAO98», para indicar que se refiere a la fórmula de Penman-Monteith con los ajustes de la FAO y publicada en 1998. En esta publicación está el concepto de evapotranspiración de referencia, tal como se utiliza actualmente, es decir, «*la evapotranspiración desde una superficie de un cultivo hipotético de 0,12 m de altura, 70 s/m de resistencia y 0,23 de albedo, la cual se asemeja a una superficie extensa de grama verde, de altura uniforme, en crecimiento y sin limitaciones de agua*» (Allen *et al.*, 1998). Nótese que la superficie de referencia no es de grama, sino un cultivo hipotético (una grama

hipotética) con características precisas, que se asemeja a la grama, pero en la práctica, se habla específicamente de las diferentes variedades de grama, como superficie de referencia para estimar la ETo, así como también se refieren a una superficie sembrada de alfalfa.

La fórmula de Penman-Monteith FAO98 es ampliamente recomendada como el método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia con validez mundial en los diferentes tipos de clima, por proveer resultados más consistentes para el uso real del agua por los cultivos y ha sido comprobada fehacientemente por organismos especializados, incluyendo la Organización Meteorológica Mundial. Con excepción de la fórmula de Hargreaves 1985 (también denominada Hargreaves-Samani 1985), las otras metodologías no son recomendadas actualmente para determinar la evapotranspiración de referencia.

#### ANTECEDENTE DE LA FÓRMULA PENMAN-MONTEITH FAO98

El antecedente de la fórmula Penman-Monteith FAO98, como se dijo anteriormente es, la fórmula de Penman-Monteith 1965, fórmula (1) al incluir Monteith en el modelo de Penman, la resistencia de la superficie de la cubierta vegetal. Esta fórmula de Penman-Monteith 1965 debe ser utilizada cuando la altura de la grama sea diferente a la altura estándar de 0,12 m por el cambio la resistencia superficial.

$$ET_o = \frac{\frac{\Delta}{\lambda}(Rn - G) + \frac{86400 \rho_a c_p (e_s - e_a)}{\lambda r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

Véase identificación de sus términos en la Penman-Monteith FAO98, más abajo. Como  $r_a$  en s/m y ETo en mm/día, la fórmula lleva 86400, pero si  $r_a$  en día/m, no lo incluye. Si Cp en kPa/kg°C y  $r_a$  en s/m, cambia 86400 por 86,4.

A la vez, la fórmula (1) tiene su fundamento en la clásica fórmula de Penman 1948, la cual indicamos de seguida para que el lector aprecie sus diferencias con las fórmulas (1) y (3):

$$ET_o = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \frac{Rn - G}{\lambda} + Ea}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (2)$$

Donde  $Ea = (1 + 0,536 u_2) 2,62 (e_s - e_a)$  en [mm/día];  $u$ , velocidad del viento a 2 m de altura<sub>2</sub> [m/s]  $e_s$ , y  $e_a$ , tensión de vapor actual y saturado, respectivamente, en kPa.

(Véase identificación de los términos en la fórmula de Penman Monteith FAO98, más abajo).

### **LA FÓRMULA PENMAN-MONTEITH FAO98**

Quizás uno de los mayores atributos de la fórmula Penman-Monteith FAO98 es que permite estimar la evapotranspiración de referencia,  $ET_o$ , en función de los elementos meteorológicos solamente: radiación solar neta, temperatura del aire, velocidad del viento y tensión de vapor del agua.

A continuación la fórmula de Penman Monteith FAO98, fórmula (3) y la identificación de sus términos, así como las distintas maneras de estimar muchos de sus datos meteorológicos cuando no se encuentran disponibles. Esto constituye una gran ventaja al poder ser utilizada en casos de imposibilidad de disponer de las observaciones meteorológicas en el sitio deseado.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (3)$$

Donde:

$ET_o$ , evapotranspiración de referencia (mm/día): «La evapotranspiración desde la superficie de un cultivo hipotético de 0,12 m de altura, 70 s/m de resistencia y de 0,23 albedo, la cual se asemeja a la evapotranspiración de una extensa superficie de grama activa, de altura uniforme, en crecimiento y sin limitaciones de agua» (Allen et al., 1998). Los datos deben ser medidos en condiciones que correspondan a la definición de  $ET_o$ , es decir, sobre una extensión de grama con evapotranspiración activa o sobre un ambiente con vegetación sana y con agua suficiente.

$\Delta$ , pendiente de la curva de la tensión de vapor saturado (kPa/ °C)

$\Delta = (2503,6 \times \exp(17,27 T / (T+237,3))) / (T+237,3)^2$  en (kPa/°C) y T en °C

También por:  $D = (0,00587 T + 0,6414)^7$  en (kPa/°C) y T en °C

$R_n$ , radiación neta sobre la superficie del cultivo (MJ/ m<sup>2</sup> día)

G, flujo calórico utilizado en el calentamiento del suelo (MJ/ m<sup>2</sup> día)

$(R_n - G)$ , energía **disponible** en la superficie del suelo e igual a la energía desde la superficie hacia el aire (H + IE) por el calor sensible, H, (convección) y calor latente, IE (evaporación)

$\gamma$ , Constante psicrométrica (kPa/°C) = 0,001628 (P/l); P en kPa = 101,3((293-0,0065z)/293)<sup>5,26</sup>

$u_2$ , velocidad del viento a 2 m de altura, en m/s. Se estima por:  $u_2 = 4,87 u_z / \ln(67,8z - 5,42)$

$u_z$ , velocidad del viento en m/s, observada a una altura, z en m

$(e_s - e_a)$ , déficit de tensión de vapor (kPa);  $e_s$  y  $e_a$  tensión de vapor saturado, y actual respectivamente

$\lambda$ , Calor latente de vaporización (MJ /kg). Se considera fijo a 20 °C = 2,45 MJ/kg; (1/l) = 0,408

$900 \gamma U_2 / (T+273)$  [mm/ día °C] = 86400  $\tilde{n}_a c_p / r_a \lambda$  [mm/día °C]

T, temperatura media del aire, en °C, calculada por:  $T = (T_{max} + T_{min}) / 2$

$\tilde{n}_a$  = densidad del aire seco a presión constante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$  = calor específico del aire húmedo:  $0,001013$  ( $\text{MJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ )

#### **Notas complementarias esenciales sobre la fórmula:**

- Aunque la fórmula es ampliamente conocida por FAO Penman-Monteith56, preferimos denominarla Penman-Monteith FAO98 para destacar el año de publicación.

- **Periodos de aplicación** de la fórmula

A) En periodo **mensual**, pero la ETo se expresa en mm/día.

B) En periodo **diario**: se entra con los datos medios diario y la ETo también se expresa en mm/día. En periodo diario  $G = 0$ , es decir, se ignora el valor del flujo de calor hacia el suelo, por ser insignificante para 24 horas.

C) En periodo **horario**: Se entra con los datos medios horarios y el resultado de ETo en mm/h; pero 900 se cambia por 37; 0,34, por 0,24 en el día y por 0,96, en la noche.

- **Superficie de Cultivo**. La fórmula usa grama como superficie de referencia, cuyos datos están incluidos en las constantes: resistencia superficial del cultivo,  $r_s = 70$  s/m; resistencia aerodinámica,  $r_a = 208/u_2$  s/m; albedo, 0,23; altura de la grama 0,12 m;  $(1 + r_s/r_a) = (1 + 0,34 u_2)$ .

A pesar de la aparente complejidad, la Penman-Monteith FAO1998 es una fórmula simplificada, puesto que en ella son constantes: el cultivo de referencia, su altura, su albedo y su resistencia superficial; la densidad del aire y el calor latente de vaporización. En cuanto a las unidades, utiliza las del sistema internacional de unidades (SI), por ejemplo, su resultado en [mm/día] milímetros de agua evaporada durante un día; la tensión de vapor en kilopascal (no en milibar ni otra unidad de presión); la energía utilizada en el proceso de la evapotranspiración en [ $\text{MJ}/\text{m}^2$  día], megajoule entre unidades de superficie en metros cuadrados y temporal en día y viento en [m/s], metro entre segundo.



En el año 2000, la ASCE amplía la fórmula para ser aplicada también a la alfalfa como superficie de referencia y con esta modificación, la fórmula Penman-Monteith FAO98, es conocida por «fórmula de Penman-Monteith ASCE 2000» (Allen, 2000). En este trabajo no se usará, pero si se aplica la fórmula de Penman-Monteith FAO98 a superficie de referencia con alfalfa, en la fórmula (3) se hacen los cambios siguientes: Se cambia la altura de 0,12 de la grama por 0,5 m de la alfalfa;  $r_s$  70 s/m por 50 s/m en el día y 200 s/m, en la noche; se reemplaza 900 ( $C_n$ ) por 1600, y 0,34 ( $C_d$ ) por 0,38 tanto para datos mensuales como diarios. Se reemplaza 900 ( $C_n$ ) por 66 y 0,34 ( $C_d$ ) por 0,25 para datos horarios en horas diurnas. Se reemplaza 900 ( $C_n$ ) por 66 y 0,34 ( $C_d$ ) por 1,70 para datos horarios en horas nocturnas. (Allen, 2000; Snyder, 2000).

### **ESTIMACIONES UTILIZADAS EN LA FÓRMULA DE PENMAN-MONTEITH FAO1998**

La aplicación de esta fórmula requiere datos climáticos completos durante un periodo suficientemente largo de observación, tal como se aplica en climatología, por ello, lo ideal es disponer de la información proveniente de sitios con estaciones agroclimatológicas para aplicar la fórmula. Como tal condición ideal es más bien lo excepcional en casi todos los países y en especial, los ubicados en zonas intertropicales, en Allen *et al.* (1998) se hicieron las siguientes recomendaciones que a nuestro juicio solucionan efectivamente el problema de la información incompleta:

En primer lugar, cuando sólo hay disponibles datos sobre temperatura máxima y mínima recomiendan estimar la ETo por la fórmula de Hargreaves (o Hargreaves - Samani) válida para periodos mensual, semanal y de 10 días:

$$ETo = 0,0023 Ra/\lambda (T_{media}+17,8) (T_{max} - T_{min})^{0,5} \text{ en [mm/día]}$$

T, temperatura media en °C calculada por  $(T_{max} + T_{min})/2$

$T_{max}$ ,  $T_{min}$ : temperaturas media de las máximas y temperatura media de las mínimas, respectivamente, en °C.

Ra, radiación extraterrestre (en la cima atmosférica) sobre superficie horizontal en [MJ/m<sup>2</sup> día]

$\lambda$ , Calor latente de vaporización (MJ /kg).  $\lambda$ , = 2,45 MJ/kg a 20 °C.

Segundo, recomiendan estimar los diferentes elementos que se indican a continuación mediante las fórmulas que siguen:

**T, temperatura media del día**, o del mes en °C, como el promedio de la máxima y la mínima:

$$T = (T_{max} + T_{min})/2$$

T<sub>máx.</sub>, T<sub>mín.</sub>, temperatura máxima y mínima del día o del mes, °C, respectivamente

**Oscilación térmica, °C**

$$(T_{max} - T_{min}) = (Rs/Ra k)^2 \text{ (expresión despejada de: } Rs = Ra k (T_{max} - T_{min})^{0,5})$$

(k = 0,16, zonas continentales; 0,19, zonas costeras e influencia de cuerpos de agua)

**Temperatura máxima y mínima, conociendo la temperatura media:**

$$T_{max} = T_{med} + (Rs/Ra k)^2/2; \quad T_{min} = T_{med} - (Rs/Ra k)^2/2 \text{ (k = 0,16, zonas continentales; 0,19, zonas costeras e influencia de cuerpos de agua)}$$

**$u_2$ , velocidad del viento a 2 m de altura, en m/s:**

$$u_2 = 4,87 u_z / \ln(67,8z - 5,42)$$

$u_z$ , velocidad del viento observada en m/s, a una altura,  $z$  en m

**P, presión atmosférica en kPa:**

$$P = 101,3 ((293 - 0,0065 z) / 293)^{5,26}$$

(Temperatura y gradiente altotérmico constantes: 20°C y 0,0065 °C/m);  $z$ , altitud, m

**Tensión de vapor saturado a una temperatura dada, kPa:**

$$e_s = 0,611 \exp(17,27 T / (T + 237,3))$$

$T$ , temperatura del aire, media, máxima o mínima, °C

$e_s$ , tensión de vapor saturado a la temperatura dada: media, máxima o mínima, °C

**Tensión de vapor saturado medio de un día, semana o mes, kPa:**

$$e_s = (e_s(T_{\max}) + e_s(T_{\min})) / 2$$

$$e_s = (0,611 \exp(17,27 T_{\max} / (T_{\max} + 237,3)) + 0,611 \exp(17,27 T_{\min} / (T_{\min} + 237,3))) / 2$$

$e_s(T_{\max})$  y  $e_s(T_{\min})$ , tensión de vapor saturado a la temperatura máxima y mínima, respectivamente.

**Tensión de vapor actual, kPa:**

$$e_a = ((e_{s \text{ tmax}} 0,01 \text{ HR}_{\min}) + (e_{s \text{ tmin}} 0,01 \text{ HR}_{\max})) / 2$$

$e_{s \text{ tmax}}$ ;  $e_{s \text{ tmin}}$ : tensión de vapor saturado a la temperatura máxima y mínima, respectivamente, en kPa

$\text{HR}_{\min}$ ,  $\text{HR}_{\max}$ : humedad relativa mínima y máxima de un día o media de un lapso, en %, respectivamente.

$$e_a = e^{\circ}(T_{\text{dew}}) = 0,611 \exp(17,27 T_{\text{dew}} / (T_{\text{dew}} + 237,3))$$

$$e_a = e^{\circ}(T_{\text{min}}) = 0,611 \exp(17,27 T_{\text{min}} / (T_{\text{min}} + 237,3)) \text{ (asumiendo } T_{\text{min}} \text{ muy cerca de } T_{\text{dew}})$$

$T_{\text{dew}}$ , punto de rocío (temperatura a la cual debe descender el aire para saturarse)

Cuando el valor de  $HR_{\text{min}}$  es impreciso, se usa sólo  $HR_{\text{max}}$ :  $e_a = e_s(t_{\text{min}}) * 0,01 HR_{\text{max}}$

Si sólo se tiene  $HR$  media del periodo, la peor opción:  $e_a = 0,01 HR_{\text{media}} \times (e_s(t_{\text{max}}) + e_s(t_{\text{min}})/2)$

#### Punto de rocío en °C:

$$T_{\text{dew}} = (116,91 + 237,3 \ln(e_a)) / (16,78 - \ln(e_a))$$

$e_a$ , tensión de vapor actual en kPa

$$T_{\text{dew}} = (112 + 0,9 T_h) (e_a / e_{s,h})^{1/8} - 112 + 0,1 T_h$$

$T_h$ , temperatura del termómetro húmedo y  $e_{s,h}$ , tensión de vapor a la temperatura húmeda

En condiciones de «referencia» de la ETo (terreno con agua suficiente, cultivado con grama de 0,12 m de altura, resistencia, 70 s/m y albedo 0,23) en climas húmedos y subhúmedos, se cumple generalmente que:  $T_{\text{dew}} = T_{\text{min}}$  y en climas áridos y semi áridos:  $T_{\text{dew}} = T_{\text{min}} - 2$ .

#### Calor latente de vaporización (MJ/kg):

$$\lambda = 2,501 - (0,002361 T)$$

$T$ , temperatura media del aire en °C

#### $\Delta$ , pendiente de la curva de la tensión de vapor saturado, (kPa/°C):

$$\Delta = (2503,6 \exp(17,27 T / (T + 237,3))) / (T + 237,3)^2$$

$$\text{También por: } \Delta = (0,00587 T + 0,6414)^7$$

$T$ , temperatura media diaria u horaria del aire en °C (obtenida con máxima y mínima)

**Constante psicrométrica (kPa/°C):**

$$\gamma = 0,001628 (P/1) = 0,000665 P$$

$$P \text{ en kPa} = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26}$$

$\lambda$  = calor latente de vaporización (MJ /kg)

**Densidad del aire,  $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>:**

$$\rho = 1000P / T_{v_k} R = 3,486 P / T_{v_k}$$

$T_{v_k} = T_k / (1 - 0,378(ea/P))$ ; Sí  $ea$  entre 1 a 5 kPa y  $P$  entre 80 a 100 kPa,  $T_{v_k} \approx 0,01 T_k$

$T_{v_k}$ , temperatura virtual, K

$P$ , presión atmosférica;  $ea$ , tensión de vapor, en kPa y  $R = 287$  [J/kg K]

**Estimación del flujo calórico por radiación hacia el suelo,  $G$ , (MJ/m<sup>2</sup>día):**

$$G = C (T_i - T_{i-1}) (\Delta z / \Delta t)$$

$C$ , capacidad calórica del suelo (MJ/m<sup>3</sup>°C)

$(T_i - T_{i-1})$ , diferencia entre la temperatura del aire, al inicio y al final periodo, °C

$\Delta t$ , lapso de tiempo considerado, mayor de 10 días

$\Delta z$ , profundidad efectiva del suelo, m (0,1 a 0,2 en uno o pocos días y 2 m o más, en meses)

$G$  es positivo si suelo en calentamiento, el signo (+) indica la dirección del flujo, para restarse a la radiación neta e influir en la evapotranspiración:  $R_n - (+G) = R_n - G$ . Si el flujo fuese (-) el suelo en enfriamiento y calor va desde el interior del suelo a la superficie y se suma a  $R_n$ :  $R_n - (-G) = R_n + G$ .

$G = 0$ , para periodos de uno a 10 días;  $G_{hr} = 0,5 R_n$  (en horas nocturnas);  $G_{hr} = 0,1 R_n$  (en horas diurnas) ya que el flujo no se correlaciona con la temperatura

$$G_{mes} = 0,07 (T_{mes \text{ siguiente}} - T_{mes \text{ anterior}}) \text{ considerando } C = 2,1 \text{ (MJ/ m}^3 \text{ °C)}$$

$$G_{mes} = 0,14 (T_{mes} - T_{mes \text{ anterior}}) \text{ (Sí } T \text{ del mes siguiente se desconoce)}$$

**Estimación de la radiación solar global sobre superficie horizontal, Rs**

- a) Si existen datos de radiación solar en estación cercana, ( $R_p$ ,  $R_{ap}$ ) dentro de una zona climáticamente homogénea, se utilizan como la radiación solar estimada.
- b) Si la distancia de Norte a Sur es mayor que 50 km, se estima por:  $R_s = R_a (R_{sp} / R_{ap})$
- c) Si existe oscilación térmica diaria ( $T_{max} - T_{min}$ ), la  $R_s$  se estima por  $R_s$  de Hargreaves:  
 $R_s = k R_a (T_{max} - T_{min})^{0.5}$  (MJ/m<sup>2</sup>día);  $k = 0,16$  en zonas costeras y  $0,19$  en zonas continentales, sin influencia de cuerpos de agua.
- d) Para islas:  $R_s = 0,70 R_a - 4$  (MJ/m<sup>2</sup>día)

**Radiación neta, Rn, sobre la superficie del cultivo de referencia (MJ/m<sup>2</sup> día)**

$$R_n = R_s (1 - \alpha) - \sigma ((T_{max}^4 + T_{min}^4) / 2) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) (1,35 (R_s / R_{so}) - 0,35)$$

$R_n$ , diferencia entre la radiación solar global y la radiación emitida por la superficie  $\alpha$ , albedo de la grama como superficie de referencia, 0,23

$\sigma$ , Constante de Stefan-Boltzmann ( $4,903 \cdot 10^{-9}$  MJ K<sup>-4</sup> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>); **Si  $\sigma$  expresado en hora**, se debe dividir entre 24 y corresponderá a  $2,043 \cdot 10^{-10}$  [MJ/K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>h]

T, temperatura media del día, calculada por:  $(T_{max}^4 + T_{min}^4) / 2$  en K

$T_{máx.}$ ,  $T_{mín.}$ : temperatura máxima y mínima del día, K, respectivamente;  $e_a$ , presión de vapor actual en kPa.

$R_s$ , **radiación solar global** sobre superficie horizontal observada por el actinógrafo, (MJ/m<sup>2</sup>día)

$R_s = (\text{directa} + \text{difusa} + \text{reflejada})$

Si no se tiene  $R_s$ , se estima por:  $R_s = R_a (0,25 + 0,50 (n/N))$

$n$ , insolación en horas;  $N$ , insolación máxima posible, en horas

$N = 24 \omega_s / \pi$  En Anexo 2, se indican los valores de N para el día 15 de cada mes

$\omega_s$ , ángulo horario a la hora de la puesta del sol (rad) =  $\arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta))$

**R<sub>a</sub>, Radiación extraterrestre sobre superficie horizontal en periodo de un día, MJ/m<sup>2</sup> día:**

$$R_a = (1440/\pi) C_s d_r \sin \phi$$

$$R_a = (1440/\pi) C_s d_r (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s)$$

$\omega_s$ , ángulo horario a la hora de la puesta del sol (rad).  $\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta))$

**R<sub>ah</sub>, Radiación extraterrestre sobre superficie horizontal en periodo de una hora o menor, MJ/m<sup>2</sup> h**

$$R_{ah} = (720/\pi) C_s d_r ((\omega_2 - \omega_1) \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1))$$

$((\omega_2 - \omega_1) \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1))$  no es sen altitud solar, es sen diferencia alt.sol

$$\text{Como } (\omega_2 - \omega_1) = (15^\circ) = 0,2618 \text{ rad}$$

$$R_{ah} = (720/\pi) C_s d_r (0,2618 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1))$$

$\omega_1$ ,  $\omega_2$ , y  $\omega$ , ángulos horarios al inicio, final y a la hora intermedia del lapso, en radianes

$$\omega_2 = \omega + (\pi t_1 / 24) = (\pi / 12) (t - 12 + Sc + 0,06667 (L_z - L_m)) + (\pi t_1 / 24)$$

$$\omega_1 = \omega - (\pi t_1 / 24) = (\pi / 12) (t - 12 + Sc + 0,06667 (L_z - L_m)) - (\pi t_1 / 24)$$

t1, longitud del lapso. Para una hora =1, para media hora, 0,5, para un minuto, 1/60;  $\omega$ , ángulo horario en punto medio del lapso

$L_z$ , longitud del centro del huso horario (°) medido desde el N en SOAR. 60W = 60°, pero 60E=30°;

$L_m$ , longitud del sitio (°); t, hora de 0 a 23 a mitad del lapso. Si el lapso es entre las 10 y 11, t=10,5 h (no 10,30); Sc, es la ecuación del tiempo:

$$Sc = 0,1645 \sin(0,034523(j-81)) - 0,1255 \cos(0,017261(j-81)) - 0,025 \sin(0,017261(j-81))$$

$\delta$ , declinación solar, rad =  $0,409 \sin((2\pi J/365) - 1,39)$

J, día del año, siendo 1 el 1° de enero y 365, el 31 de diciembre; M = mes

J = Mes (275 /9)+ día del mes - k (k= 32 en M de 30 días y agosto; 33 en M de 31 días; 30 en Fe y 31, en E)

$\phi$ , latitud de la estación meteorológica (rad). Es negativa en el Hemisferio Sur

$C_s$ , constante solar,  $0,082 \text{ MJ/m}^2 \text{ min} = 1,96 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ . (Si Ra en  $\text{W/m}^2$ ,  $C_s = 1367$ , pero fórmula sin 1440 en lapso diario y con  $C_s$  y 12 en lapso horario)

$d_r$ , distancia relativa Tierra-Sol al cuadrado =  $(\text{dist media T-S} / \text{dist actual T-S})^2 = 1 + 0,033 \cos(2\pi J/365)$

$\phi$ , altitud solar, en radianes

$R_{so}$  radiación solar en sup. horizontal en día despejado ( $\text{MJ/m}^2 \text{ día}$ ) =  $(2 \times 10^{-5} z + 0,75) \text{ Ra}$

(Válida en lapso diario u horario de baja turbidez, altitud solar, menor de  $50^\circ$  y altura, z, menor de 6000 m)

$R_{so}$  radiación solar en días de alta turbidez ( $\text{MJ/m}^2 \text{ día}$ ) =  $\exp(-0,0021P/K_t \sin \phi) \text{ Ra}$

$K_t$  coeficiente de turbidez, entre 0,5, alta turbidez, y 1, cielo limpio

$R_s/R_{so}$ , expresa la nubosidad relativa y su valor entre 0,25 y 1

1 mm de agua evaporada =  $2,45 \text{ MJ/kg} = 585 \text{ cal/g} = 0,68 \text{ kWh/kg}$

1 mm de agua evaporada/día =  $2,45 \text{ MJ/m}^2 \text{ día} = 58,5 \text{ cal/cm}^2 \text{ día} = 28,4 \text{ W/m}^2$

$1 \text{ W/m}^2 = 0,0864 \text{ MJ/m}^2 \text{ día} = 0,0352 \text{ mm/día} = 0,0014694 \text{ mm/h}$

#### Conversión de ETo sobre alfalfa a ETo sobre grama:

$E\text{To grama} = (1,2 + (0,023367(U_2 - 2) - 0,0023367)(HR_{\min} - 45)) / E\text{To alfalfa}$



### **ET, ETP, y ETc, CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA, ETo**

La evapotranspiración de una cubierta vegetal se refiere al concepto general de la evapotranspiración, o proceso conjunto de sustracción de agua desde el suelo húmedo, mediante su evaporación y mediante la transpiración de las plantas, hacia la atmósfera. La evapotranspiración potencial, ETP o ET, es la evapotranspiración máxima que ocurre en una cubierta vegetal de un cultivo verde corto, pero sin ser especificado y el suelo sin limitaciones de agua. Desde los años 70 el término evapotranspiración potencial ha venido siendo reemplazado por el de evapotranspiración de referencia, ya definido al inicio. El uso de esta evapotranspiración de referencia, ETo, tiene una gran ventaja puesto que no depende del tipo de cultivo, de la etapa de su desarrollo, de las prácticas de cultivo, ni de los factores edáficos, y sus valores en cualquiera de las cuatro estaciones del año o de localidades diferentes, son por consiguiente comparables, puesto que la evapotranspiración de referencia en todos los lugares del mundo serían estimadas en relación con la misma superficie de referencia (Allen *et al.*, 1998), lo que no ocurre con la evapotranspiración potencial, ETP, (calculada por las diferentes fórmulas suficientemente conocidas) por no haber una superficie única, una superficie con la cual hacer referencia durante el proceso de la evapotranspiración.

En cuanto a ETc, o evapotranspiración de un cultivo cualquiera, ¿Cómo se determina con la nueva metodología?

La evapotranspiración de cualquier cultivo, ETc, se obtiene al multiplicar la ETo por el coeficiente de dicho cultivo, K<sub>c</sub> (Véase K<sub>c</sub> en Anexo 3 al final): **ETc = K<sub>c</sub> ETo.**

Por ejemplo, si la ETo es 3,4 mm/día, obtenida con los datos meteorológicos, la evapotranspiración de un terreno cultivado con patilla

en estado inicial de desarrollo, será:  $3,4 \times 0,4 = 1,36$  mm/día, pero si la plantación está en su desarrollo intermedio o final, entonces, se utilizan los coeficientes de cultivos para esos lapsos: 1,00 y 0,75 respectivamente, y la evapotranspiración de la patilla en cultivo será ahora 3,4 mm/día en desarrollo intermedio, y 2,55 mm/día al final del desarrollo. Como se aprecia con este caso, la evapotranspiración de referencia con el coeficiente de cultivo, permite discriminar la evaporación en diferentes etapas del cultivo y en consecuencia, mayor precisión en la determinación de la cantidad de agua a utilizar en el momento requerido por el cultivo. Se está ante conceptos agroclimatológicos y agronómicos de alta utilidad en el manejo del agua para riego y para la obtención del mejor rendimiento de los cultivos y así lo señalan Allen *et al.*, (1998) en el concepto de ETc, como la evapotranspiración en cultivos sanos, bien fertilizado, en filas largas, suelo óptimo, buen suministro de agua y con producción completa.

#### **PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA, ETo**

Además de determinar la ETo, los programas de computación facilitan enormemente los cálculos de requerimientos de agua. Entre los que hemos examinado y utilizado se encuentran los siguientes, todos los cuales pueden ser bajados de internet:

El programa Cropwat de Derek *et al.*, (1998)

El programa Ref-ET de Allen (2001)

El programa ETo de Raes (2000)

El programa AWSET.de Hess (2000)

También se obtienen datos de ETo en muchas páginas de la web. Sobre estos datos se debe decir que las estaciones automáticas que indican el valor de la ETo diaria, no miden esta variable, puesto que no existe tal aparato, sino que la estiman en periodos cortos, por ejemplo, de una hora, 5 minutos, aplicando la fórmula de Penman Monteith FAO98 u otra modalidad, y al final del día, la suma de los valores horarios constituye la ETo de ese día. De esa forma lo calcula la red CIMIS de la Universidad de California. En cualquier caso, es obligado saber como opera la estación automática, para poder comparar sus valores con datos de otras estaciones o con los datos estimados por los programas disponibles anteriormente enumerados.

### **Ejemplos de cálculo de la ETo por la fórmula de Penman-Monteith FAO98**

Como decíamos con anterioridad, para que un artículo como éste, sea realmente útil, las formulaciones discutidas deben ser ejemplarizadas en situaciones diferentes, como se ilustra en las páginas que siguen:

#### **a) Cálculo de ETo en periodo mensual con información de una estación agroclimatológica**

Mes: abril; Lat.: 13° 44' N; Altitud, 2 m;  $u_2$ , 2 m/s; T, 30,2 °C;  $e_s$ , 4,42 kPa;  $e_a$ , 2,85 kPa

$\Delta$ , 0,246 kPa/°C;  $R_n$ , 14,33 (MJ/m<sup>2</sup>dia); G, 0,14 (MJ/m<sup>2</sup>dia);  $\gamma$ , 0,067 kPa/°C

**Solución:** Como todos los datos se conocen, se reemplazan directamente en la ecuación de Penman-Monteith FAO98:

$$ET_o = \frac{0,408 \times 0,246(14,33 - 0,14) + \frac{900 \times 0,067 \times 2(4,42 - 2,85)}{(30,2 + 273)}}{0,246 + 0,067(1 + 0,34 \times 2)} = 5,72 \text{ mm/día}$$

Interpretación:  $ET_o = 5,72$  mm/día, luego, en abril, la evapotranspiración de referencia = 171,6 mm.

**b) Periodo de horario.** Suponiendo el mismo lugar y los mismos datos de temperatura, viento, tensión de vapor, pero ahora suponiendo que son valores medios entre las 2 y las 3 de la tarde.  $\Delta$  y  $\gamma$ , se mantendrán con iguales valores, pero  $R_n = (14,33/24)$  y  $G = (0,1R_n)$  MJ/m<sup>2</sup>h:

$$ET_o = (0,408 D (R_n - G) + ((37 \text{ g } u_2 / (T + 273)) (e_s - e_a)) / (\Delta + (\gamma (1 + 0,24 u_2)))$$

**Solución:** Como los datos son conocidos, se reemplazan en la ec. de  $ET_o$  en lapso horario:

$$ET_o = (0,408 \times 0,246 \times (0,597 - 0,06) + ((37 \times 0,0674 \times 2) / (30,2 + 273)) \times (4,42 - 2,85)) / (0,246 + (0,067 \times (1 + 0,24 \times 2)))$$

$ET_o = 0,23$  mm/h. La evapotranspiración de referencia en el lapso dado fue 0,23 mm

**c) Periodo de un día.** Sean los datos de una estación automática en Molen, Utah, a 0,6822 radianes de latitud; altitud, 1818 m; día 5 de enero:  $\Delta$ , 0,0578 kPa/°C;  $\gamma$ , 0,0542 kPa/°C;  $T_{max}$ , 14,9 °C;  $T_{min}$ , (-6,6) °C;  $(e_s - e_a)$ , 0,86 kPa;  $u_2$ , 2 m/s;  $R_n$ , 0,89;  $G$ , cero:

Obs: La temperatura a utilizar es la media de la máxima y mínima

$$ET_o = (0,408 \Delta (R_n - 0) + ((900 \gamma u_2) / (T + 273)) (e_s - e_a)) / (\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2))$$

$$ET_o = (0,408 \times 0,0578 \times (0,89 - 0) + (900 \times 0,0542 \times 2 \times 2 / (4,2 + 273)) \times (0,86)) / (0,0578 + 0,542 \times (1 + 0,34 \times 2)) = 2,2 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$$

**d) Cálculo de la ETo del mes de enero, dada la información de un periodo de 30 años.**

Mes: enero; Latitud: 11°25' Long: 69°41'; Alt. 12 m; Tmax: 31,4°C; Tmin: 24,1°C; HR: 75%;  $u_{12,=}$  19,1 km/h; insolación: 9,1 horas. Temperatura del mes anterior y siguiente, respectivamente: 26,7 °C y 27,6 °C

Recuerde que la ETo de un mes en mm/día se calcula para el día 15 del mes dado. Luego, para el mes de enero, será la ETo para el 15 de enero.

**Temperatura media del mes:**  $T = (T_{\max} + T_{\min})/2 = (31,4 + 24,1)/2 = 27,8 \text{ °C}$

Constante psicrométrica (kPa/°C),  $g = 0,001628 (P/\lambda) = 0,001628 * 101,17/2,45 = 0,0672$

P en kPa =  $101,3 * ((293 - 0,006 * 12)/293)^{5,26} = 101,2 \text{ kPa}$

**Pendiente de la curva de la tensión de vapor saturado, (kPa/°C):**

$\Delta = (0,00587 * 27,8 + 0,6414)^7 = 0,218 \text{ (kPa/°C)}$

$\lambda = 2,501 - (0,002361 T) = 2,45$ . (valor considerado como una constante)

**Viento** a 12 m de altura: 19,1 km/h = 5,31 m/s; ajustado a la altura de 2 m:

$u_2 = 4,87 * 5,31 / \ln(67,8 * 12 - 5,42) = 3,86 \text{ m/s}$ .

**Ra, Radiación extraterrestre sobre superficie horizontal en periodo de un día, MJ/ m<sup>2</sup> día**

$R_a = (1440/\pi) C_s d_r (\omega_s \text{ sen } \varphi \text{ sen } \delta + \cos \varphi \cos \delta \text{ sen } \omega_s)$

$R_a = (1440/\pi) 0,082 * 1,0319 (1,492 * \text{sen}(0,119) \text{ sen}(-0,3702) + \cos(0,119) \cos(-0,3702) \text{ sen}(1,492)) R_a = 31,3 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$

Latitud = 11° 25 ' = 11,417 = 0,199 radianes

$\omega_s$ , ángulo horario a la puesta del sol.  $\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta))$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(0,199) \tan(-0,3702)) = 1,492 \text{ rad}$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(2\pi J/365) = 1 + 0,033 \cos(2\pi \times 15/365) = 1,0319$$

$$\delta, \text{ declinación solar, rad} = 0,409 \sin((2\pi J/365) - 1,39) = 0,409 \sin((2\pi \times 15/365) - 1,39) = -0,3702$$

$C_s$ , constante solar,  $0,082 \text{ MJ/m}^2 \text{ min}$

$R_s$ , (Radiación solar global sobre superficie horizontal) =  $R_a (0,25 + 0,50 (n/N))$

$$R_s = 31,2 \times (0,25 + 0,50 (9,1/11,4)) = 20,2 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$$

$$N = 24 \times \omega_s / \pi = 24 \times 1,492 / \pi = 11,4 \text{ horas}$$

**Tensión de vapor saturado, kPa:**

$$e_s = 0,611 \exp(17,27 T / (T + 237,3)) = 0,611 \exp(17,27 \times 27,8 / (27,8 + 237,3)) = 3,73$$

**Tensión de vapor actual, kPa**

$$e_a = (0,01 \text{ HR}) (e_s) = (0,01 \times 75) 3,74 = 2,79$$

**Radiación neta, sobre la superficie del cultivo de referencia (MJ/m<sup>2</sup> día)**

$$R_n = R_s (1 - \alpha) - \sigma ((T_{\max}^4 + T_{\min}^4) / 2) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) (1,35 (R_s / R_{so}) - 0,35)$$

$$R_n = 20,2 (1 - 0,23) - 4,903 \times 10^{-9} ((273 + 31,4)^4 + (273 + 24,1)^4) / 2 (0,34 - 0,14 \sqrt{2,79}) (1,35 (20,2 / 23,4) - 0,35) = 12,11$$

**R<sub>so</sub> radiación solar en día despejado (MJ/m<sup>2</sup> día)**

$$R_{so} = R_a (2 \times 10^{-5} z + 0,75) = 31,3 * (2 \times 10^{-5} \times 12 + 0,75) = 23,4$$

**Flujo calórico por radiación hacia el suelo, G (MJ/m<sup>2</sup>día)**

$G_{mes} = 0,07 (T_{mes \text{ siguiente}} - T_{mes \text{ anterior}}) = 0,07 (27,6 - 27,6) = 0,0$ , En el lapso considerado de 31 días, mes de enero no llega calor al interior del suelo (signo +) que le reste a Rn:  $(R_n - (+G)) = R_n - G$ , tampoco calor en el suelo que suba a la superficie (signo -) que le sume a la radiación neta:  $R_n - (-G) = R_n + G$ .

Reemplazando las variables observadas y estimadas en la fórmula:

$$E_{To} = (0,408 \Delta (R_n - G) + ((900 \gamma u_2) / (T + 273)) (e_s - e_a)) / (\Delta + (\gamma (1 + 0,34 u_2)))$$

$$E_{To} = (0,408 \times 0,218 (12,11 + 0,0) + ((900 \times 0,0672 \times 3,86) / (27,8 + 273)) (3,73 - 2,79)) / (0,218 + (0,0672 (1 + 0,34 \times 3,86))) = 4,82 \text{ mm/día y } E_{To} \text{ de enero} = 149,4 \text{ mm}$$

Comparación con programas: 5,5 mm/día (por Crowat); 4,9 (por ETo), y 5,6 (por Daylyet)

**e) Cálculo de la evapotranspiración de referencia horaria.**

Se desea estimar la ETo durante el lapso de 3 pm a 4 pm del día 15 de enero. Latitud: 10,78°; Long: 70,16; longitud del huso horario correspondiente, Lz: 60°, Altitud de la localidad, 20 m; Tmax: 33,0°C; Tmin: 21,0°C; HR: 76%; U<sub>1,2m</sub> 4,83; insolación: 0,68 horas.

Recuerde lo dicho en la introducción sobre el periodo de una hora:

El cálculo de la ETo del lapso entre las 15 a 16 horas, corresponde a la hora intermedia 15,5 del día. En la fórmula de Penman Monteith FAO98 para el lapso horario, se reemplaza 900 por 37 en el numerador; 0,34 por 0,24 en el denominador en horas diurnas (y por 0,96, en horas nocturnas) quedando la expresión como sigue:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,24 u_2)}$$

**Temperatura media:**  $T = (T_{\max} + T_{\min})/2 = T = (33,0 + 21,0)/2 = 27,0^\circ\text{C}$

**Constante psicrométrica (kPa/°C),**  $\gamma = 0,001628 (P/\lambda) = 0,001628 * 101,1/2,45 = 0,067$

P en kPa =  $101,3 * ((293 - 0,006 * 12)/293)^{5,26} = 101,1$

**Pendiente de la curva de la tensión de vapor saturado, (kPa/°C):**

$\Delta = 3,38639 (0,05904(0,00738 * 27,0 + 0,8072)^7 - 0,0000342) = 0,209$

$\lambda = 2,501 - (0,002361 T) = 2,45$ , su valor se considera constante

**Viento** a 12 m de altura: 4,83 m/s. Ajustado a la altura de 2 m:

$u_2 = 4,87 * 4,83 / \ln(67,8 * 20 - 5,42) = 3,51$  m/s.

**Radiación extraterrestre sobre superficie horizontal en periodo de una hora o menor, MJ/ m<sup>2</sup> h**

$R_{ah} = (720/\pi) C_s d_r ((\omega_2 - \omega_1) \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1))$

$R_{ah} = (720/\pi) 0,082 * 1,032 * (0,2618 \sin(0,1831) \sin(-0,37) + \cos(0,1831) \cos(-0,37) (\sin 1,01 - \sin 0,75)) = 2,60$  MJ/ m<sup>2</sup> h

$\omega_1$  y  $\omega_2$ , ángulo horario al inicio y final del periodo, radianes



$$\omega_2 = (\pi/12) (0,06667(L_z - L_m) + t + Sc - 12) + (\pi/24) = 0,2618 t + 0,2618 Sc + 0,0175(L_z - L_m) - 3,011$$

$$\omega_1 = (\pi/12) (0,06667(L_z - L_m) + t + Sc) - (\pi/24) = 0,2618 t + 0,2618 Sc + 0,0175(L_z - L_m) - 3,272$$

$$\omega_2 = (\pi/12) (0,06667(60 - 70,16) + 1 - 0,155 - 12) + (\pi/24) = 1,27 \text{ rad}$$

$$\omega_1 = (\pi/12) (0,06667(60 - 70,16) + 1 - 0,155) - (\pi/24) = 1 \text{ rad}$$

$t$ , longitud del lapso. Para una hora =1, para media hora, 0,5, para un minuto, 1/60

$L_z$ , longitud del centro del huso horario (°) medido desde el N en SOAR. 60W = 60°, pero 60E=30°;

$L_m$ , longitud del sitio (°);  $t$ , hora de 0 a 23 a mitad del lapso. Si el lapso es entre las 10 y 11,  $t=10,5$  h (no 10,30)

$Sc$ , la ecuación del tiempo, en horas:

$$Sc = 0,1645 \text{ sen}(0,034523(j-81)) - 0,1255 \text{ cos}(0,017261(j-81)) - 0,025 \text{ sen}(0,017261(j-81))$$

$$Sc = 0,1645 \text{ sen}(0,034523(15-81)) - 0,1255 \text{ cos}(0,017261(15-81)) - 0,025 \text{ sen}(0,017261(15-81)) = -0,155$$

$$d_{r,} = 1 + 0,033 \text{ cos}(2\pi J/365) = 1 + 0,033 \text{ cos}(2\pi * 15/365) = 1,032$$

$$\delta, \text{ declinación solar, rad} = 0,409 \text{ sen}((2\pi J/365) - 1,39) = 0,409 \text{ sen}((2\pi * 15/365) - 1,39) = -0,370$$

$C_s$ , constante solar: 0,082 MJ/m<sup>2</sup> min

$R_s$ , (Radiación solar global sobre superficie horizontal) =  $R_a (0,25 + 0,50 (n/N))$

$$R_s = 2,6 * (0,25 + 0,50 (0,68)) = 1,6 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}$$

**Tensión de vapor saturado, kPa:**

$$e_s = 0,611 \exp(17,27 T / (T + 237,3)) = 0,611 \exp(17,27 * 27,8 / (27,8 + 237,3)) = 3,76$$

**Tensión de vapor actual, kPa**

$$e_a = (0,01 \text{ HR}) (e_s) = (0,01 * 76) 3,57 = 2,86$$

**Radiación neta**, sobre la superficie del cultivo de referencia ( $\text{MJ/m}^2 \text{ h}$ )

$$R_n = R_s (1 - \alpha) - \sigma ((T_{\max}^4 + T_{\min}^4) / 2) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) (1,35 (R_s / R_{so}) - 0,35)$$

(T en grados kelvin)

$$R_n = 1,6 (1 - 0,23) - 2,043 \times 10^{-10} (273 + 27,0)^4 (0,34 - 0,14 \sqrt{0,90}) (1,35 (1,6 / 1,98) - 0,35) = 1,08$$

**$R_{so}$  radiación solar en día despejado ( $\text{MJ/m}^2 \text{ h}$ )**

$$R_{so} = R_a (2 \times 10^{-5} z + 0,75) = 1,6 * (2 \times 10^{-5} \times 20 + 0,75) = 1,98$$

**Flujo calórico** por radiación hacia el suelo,  $G = 0,1 * R_n = 0,1 * 1,08 = 0,11 (\text{MJ/m}^2 \text{ h})$

Llega  $0,11 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}$  al interior del suelo (signo +) que le resta a  $R_n$ :  $(R_n - (+G)) = R_n - G$

Reemplazando las variables observadas y estimadas en la fórmula:

$$ET_o = (0,408 \Delta (R_n - G) + ((37 \gamma u_2) / T_k) (e_s - e_a)) / (\Delta + (\gamma (1 + 0,24 u_2)))$$

$$ET_o = (0,408 * 0,209 (1,08 - 0,11) + ((37 * 0,067 * 3,51) / (27 + 273)) (3,76 - 2,86)) / (0,209 + (0,067 (1 + 0,24 * 3,51))) = 0,33 \text{ mm/h}$$

**Interpretación:** En el lapso comprendido entre las 3 y las 4 de la tarde, la evapotranspiración sobre una superficie totalmente cubierta de grama con una altura de 12 cm, resistencia superficial de 70 s/m, albedo 0,23 y con suministro de agua suficiente para su desarrollo, fue 0,33 mm/h. Esta evapotranspiración es denominada de referencia, por ser con relación a un cultivo seleccionado de referencia, la grama, siempre en las mismas condiciones indicadas.

**f) Cálculo de la evapotranspiración de referencia mensual, ETo en mm/día por la fórmula de Penman Monteith FAO 1998 (PM FAO98) mediante el Excel**

En la hoja que hemos diseñado, la ETo se obtiene en la última fila al colocar los datos climatológicos mensuales de: temperaturas (media de las máximas y media de las mínimas); viento, a la altura de observación, humedad relativa e insolación en las casillas respectivas. Además, latitud, altitud de la estación, altura del anemómetro y día del año. Los resultados corresponden a la aplicación de la ETo expresada por la fórmula PM FAO98:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \text{ mm / día}$$

En enero, la ETo fue 151,2 mm; F, 152,5 mm, etc y la ETo anual 2010 mm

	Lat:	Long:	Altura:	Alt viento	Albedo												
	11,42	69,68	12	12	0,23												
	0,1993	1,2162															
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic					
Día del año	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349					
T <sub>maz</sub> °C	31,4	31,8	32,5	32,9	33,9	34,1	33,9	34,6	34,9	34	32,7	31,6					
T <sub>main</sub> °C	24,1	23,3	23,9	24,7	25,3	25,5	25,1	25,5	25,6	25,2	24,5	23,6					
T <sub>media</sub> °C	27,8	27,6	28,2	28,8	29,6	29,8	29,5	30,1	30,3	29,6	28,6	27,6					
D	0,217	0,215	0,222	0,229	0,239	0,241	0,237	0,244	0,247	0,239	0,227	0,216					
P, Kpa	101,17	100,91	100,91	100,91	100,91	100,91	100,91	100,91	100,91	100,91	100,91	100,91					
g kPa/°C	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067					
Uobs, m/s	5,31	5,81	6,56	6,44	6,22	6,19	6,11	6,06	5,81	4,83	4,64	4,81					
U <sub>2</sub> , m/s	3,86	4,23	4,77	4,68	4,52	4,50	4,44	4,41	4,23	3,51	3,37	3,50					
HR %	75	73	73	74	75	74	75	74	74	76	78	77					
es, kPa	3,74	3,78	3,93	4,06	4,26	4,31	4,24	4,38	4,44	4,26	4,01	3,78					
e, kPa	2,79	2,76	2,87	3,00	3,19	3,19	3,18	3,24	3,28	3,24	3,13	2,91					
(es-e), kPa	0,95	1,02	1,06	1,05	1,06	1,12	1,06	1,14	1,15	1,02	0,88	0,87					
drT-S	1,032	1,023	1,010	0,992	0,978	0,968	0,968	0,976	0,991	1,008	1,023	1,032					
Declinación,	-0,370	-0,230	-0,050	0,167	0,328	0,407	0,375	0,236	0,037	-0,166	-0,335	-0,407					
Ws, rad	1,49	1,52	1,56	1,60	1,64	1,66	1,65	1,62	1,58	1,54	1,50	1,48					
Insolación, n (h)	9,1	9,5	9,4	8,3	8,1	8,7	9,5	9,4	8,9	8,2	8,3	8,4					
Insolación, N (h)	11,40	11,64	11,92	12,26	12,53	12,67	12,61	12,37	12,06	11,74	11,46	11,33					
(n/N)	0,798	0,816	0,788	0,677	0,647	0,687	0,754	0,760	0,738	0,698	0,724	0,741					
Ra, MJ/m2 día	31,2	34,0	36,6	38,0	37,9	37,4	37,4	37,7	36,9	34,7	31,7	30,3					
Rs, MJ/m2 día	20,24	22,4	23,6	22,4	21,7	22,2	23,5	23,7	22,9	20,8	19,4	18,8					
Ro, MJ/m2 día	23,40	25,5	27,4	28,5	28,4	28,0	28,1	28,3	27,7	26,0	23,8	22,7					
Rn, MJ/m2 día	12,11	13,65	14,78	14,40	14,19	14,40	15,17	15,43	14,86	13,37	12,14	11,36					
G, MJ/m2 día	0,00	0,03	0,09	0,10	0,07	-0,01	0,02	0,05	-0,03	-0,12	-0,14	-0,06					
Rn-G, MJ/m2 día	12,19	13,62	14,69	14,31	14,12	14,41	15,16	15,37	14,89	13,48	12,28	11,42					
<b>ETo, mm/día</b>	<b>4,88</b>	<b>5,45</b>	<b>5,89</b>	<b>5,77</b>	<b>5,71</b>	<b>5,90</b>	<b>5,93</b>	<b>6,15</b>	<b>6,02</b>	<b>5,26</b>	<b>4,67</b>	<b>4,46</b>					
<b>ETo, mm/mes</b>	151,2	152,5	182,7	173,1	177,1	176,9	183,9	190,6	180,6	163,1	140,2	138,1					
<b>ETo, mm/año</b>	2010																

**g) Cálculo horario de ETo en mm/h de 7 am a 8 am y 2 pm a 3 pm del 1 de octubre.**

Se conocen:  $u_2$ ; HR, insolación y temperatura media por  $(T_{max}+T_{min})/2$ .

	Lz	Lm	
<i>Estación:</i>	Lat.: 16,22	Long: 16,25	Altura: 8
	0,2830	0,2836	Alt viento: 2
			Albedo: 0,23
			Lz: 15
			14a 15
Horas	<b>7 a 8</b>		<b>2 a 3</b>
Hora intermedia, hora y décima	7,50		14,50
Temperatura media de máximas °C			
Temperatura media de mínimas °C			
Temperatura media °C	23,3		38,0
Gradiente presión vapor sat, d, kPa/°C	0,172		0,360
Presión atmosférica, kPa	101,0		101,0
Constante psicrométrica, g, kPa/°C	0,067		0,067
Velocidad viento observado, m/s	4,23		3,3
Velocidad del viento a 2 m, m/s	4,23		3,30
Humedad relativa %	73		52
Tensión de vapor saturación, es, kPa	2,861		6,625
Tensión de vapor real, ea, kPa	2,09		3,445
es - ea, kPa	0,77		3,18
Distancia relativa Tierra-Sol, dr	1,033		1,0001
Declinación, d, (radianes)	-0,075		-0,075
Ecuación del tiempo, Sc	0,1889		0,1889
Insolación, horas	0,71		0,88
Insolación máxima, horas	1		1
Insolación relativa, n/N	0,71		0,88
Ang horario al final de la hora, $\omega_2$ , rad	-1,020		0,813
Ang horario al inicio de la hora, $\omega_1$ , rad	-1,281		0,552
Radiación extraterrestre, Ra (MJ/m2h)	1,868		3,532
<b>Rad solar Global, Rs, ( MJ/m2h)</b>	1,130		2,437
Idem con cielo despejado ( MJ/m2h)	1,401		2,650
<b>Radiación neta, Rn (MJ/m2h)</b>	0,775		1,737
Flujo de calor en el suelo, G, MJ/m2·h	0,077		0,174
Energía disponible en el suelo, Rn-G	0,697		1,564
<b>ETo, PM-FAO1998, mm/h</b>	<b>0,248</b>		<b>0,653</b>
		$((\omega_2-\omega_1))$	

**Observaciones:**

$$ET_o = (0,408 \Delta (R_n - G) + ((37 \gamma u_2)/T_k) (e_s - e_a)) / (\Delta + (\gamma(1 + 0,24 u_2)))$$

En  $R_n$ , la const  $\sigma$  se debe dividir por 24 para quedar  $\sigma = 2,043 \times 10^{-10}$  [MJ/K<sup>4</sup>m<sup>2</sup> h]

Superficie de referencia:: suelo con agua abundante cubierta de grama activa de altura 0,12 m; albedo 0,23;

resistencia superficial, 70 s/m; resistencia aerodinámica,  $208/u_2$  s/m y calor de vaporización 2,45 MJ/kg

La temperatura media, T, para todos los efectos, es el promedio de las máximas y mínimas diarias en °C

El lapso ( $\omega_2 - \omega_1$ ) siempre es una hora = 15° = 0,2618, usar este valor en ecuación de Ra; La hora, t, de 0 a 24

Angulo horario al final del lapso,  $\omega_2$ ,  $0,2618^* \text{ hora a mitad del lapso} + 0,2618 \text{ Sc} + 0,017;5 (Lz - Lm) - 3,011$

Angulo horario al inicio del lapso,  $\omega_1$ , se usó:  $0,2618^* \text{ hora a mitad del lapso} + 0,2618 \text{ Sc} + 0,0175 (Lz - Lm) - 3,272$

**LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CONDICIONES ESTÁNDAR, ETc, Y LA DETERMINACIÓN DEL Kc**

Como se afirmó con anterioridad, la evapotranspiración en condiciones estándar, ETc, es la ETo multiplicada por el coeficiente del cultivo:  $ETc = K_c ET_o$ .

A su vez, el coeficiente de cultivo,  $K_c$  se obtiene experimentalmente mediante lisímetros con los cuales se mide la evapotranspiración del cultivo, ETc y la ETo en la parcela cubierta con grama:

$$K_c = (ETc/ET_o)$$

El coeficiente del cultivo expresa la diferencia de evapotranspiración de un cultivo en condiciones estándar: cubierta vegetal, propiedades del follaje y la resistencia aerodinámica del cultivo, en relación con la ETo de las características del cultivo de referencia (grama con 0,12 m de altura, resistencia de 70 s/m y albedo de 0,23)

$K_c$  se utiliza para lapsos mayores de 10 días y su valor se encuentra en la tabla del Anexo 3 (Tabla 12 de Allen et al., 1998) en condiciones climáticas estándar: clima sub-húmedo ( $RH_{min}$  45%, viento de calma a moderado, unos 2 m/s) en la cual  $K_c$  varía según su etapa de desarrollo: inicial (siembra con 10% de cobertura); desarrollo (de 10% de cobertura a cobertura total); media (de cobertura total a inicio de la madurez, con amarillamiento o caída de las hojas); etapa final (desde el inicio de la madurez, a la cosecha). Cuando el suelo se encuentra descubierto de vegetación,  $K_c$  se semeja al  $K_c$  de la etapa inicial,  $K_c$  ini. La fig No. 1 indica la variación del  $K_c$  medio, suficientemente útil para balance hídrico y planes de irrigación.

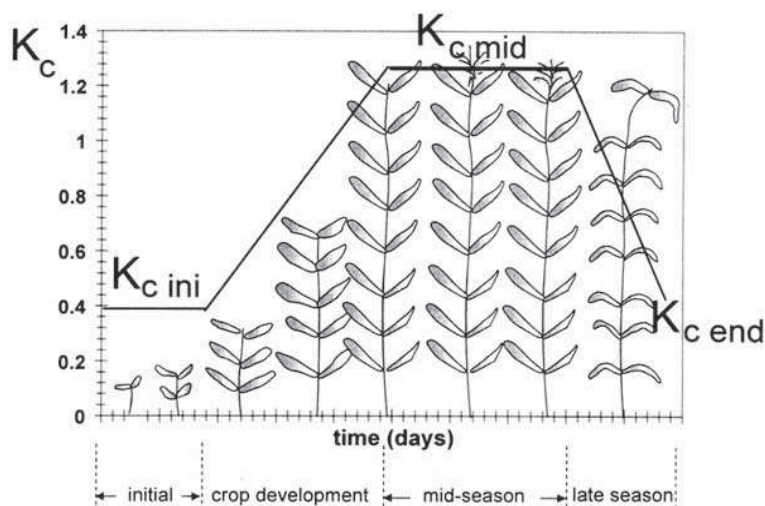


Fig. 1. Variación del  $K_c$  medio en cultivo perenne.

Fuente: Fig. 25 de Allen et al, 1998.

En él se aprecia que inmediatamente después de la siembra anual o del inicio de las nuevas hojas en cultivos perennes,  $K_c = K_{c\text{ ini}}$ , es menor de 0,4, luego, empieza a aumentar, y llega a un máximo,  $K_{c\text{ mid}}$ , cerca del máximo desarrollo de la planta, para decrecer durante el último periodo, cuando las hojas inician sus caídas, hasta llegar al valor de  $K_{c\text{ end}}$ .

El coeficiente de cultivo del maíz en sus diferentes etapas y la evolución de su curva, se muestra para Cuenca, España (CREA, s/f):

MAÍZ				
PERÍODOS	ESTABLECIMIENTO (I)	CRECIMIENTO VEGETATIVO (II)	ETAPA MEDIA (III) (Floración, Secundación e inicio de la formación de la mazorca)	ETAPA FINAL (IV) (Madurez del grano y matorral)
FECHA APROXIMADA	2ª s. de abr. → 20-30 días → 1ª s. de jun.	30-40 días → 2ª s. de jun.	40-50 días → 1ª s. de ago.	20-30 días → 1ª s. de oct.
$K_c$ APROXIMADO	0,40-0,50	0,40-0,50	1,05-1,15	1,05-1,15
ESTADO APROXIMADO DEL CULTIVO	Siembra	Estado de 6-7 hojas	Estado de 12-14 hojas	Estado lechoso puntas Madurez biológica

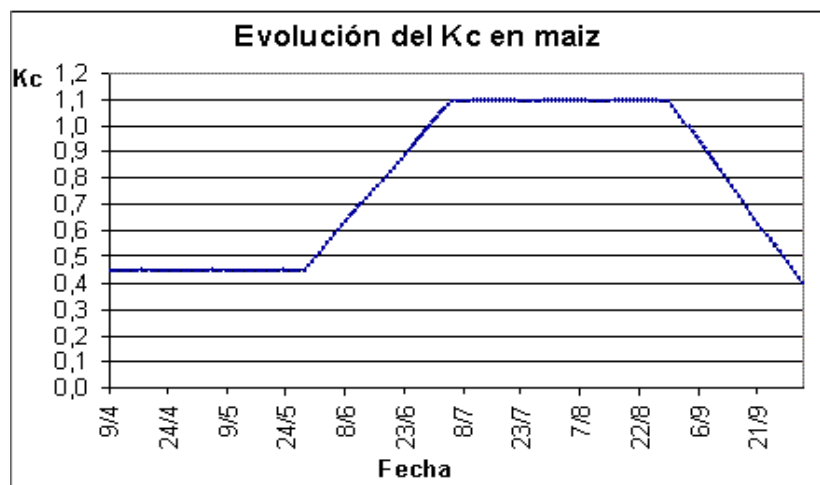


Fig. 2. Evolución del  $k_c$  del maíz.

Fuente. Crea, s/f.



De manera más precisa  $K_c$  se estima por la siguiente expresión:

$$K_{ci} = K_{cprev} + \left[ \frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{cnext} - K_{cprev})$$

(Allen *et al.*, 1998)

$i$  número del día en la etapa de desarrollo [1.. longitud de estación de crecimiento]

$K_{ci}$  coeficiente del día  $i$

$L_{stage}$  longitud de la etapa en consideración [días]

$\sum(L_{prev})$  suma de las longitudes de las etapas previas [días]

Se asume que durante las etapas inicial e intermedia,  $K_c$  es constante e igual al valor de  $K_c$  de la etapa de desarrollo en consideración; que  $K_c$  varía linealmente durante el desarrollo del cultivo y la última etapa al final de la etapa previa ( $K_{cprev}$ ); y que  $K_c$  al inicio de la etapa siguiente ( $K_{cnext}$ ), que es  $K_{cend}$  en el caso de la última etapa.

En el ejemplo que sigue, en Allen *et al.*, 1998, se calculan cuatro valores de  $K_c$ : a los 20 días, corresponde a la etapa inicial del cultivo (de 25 días) y  $K_c = K_{cini} = 0,15$ , obtenido gráficamente y para los 70 días, corresponde a la etapa intermedia del cultivo (de 80 días) y  $K_c = K_{cmid} = 1,19$ , obtenido gráficamente. Para 40 y 95 días se aplica la ecuación anterior:

Estimación de  $K_c$  los días 20, 40, 70 y 95, del cultivo dry bean.  
Fuente (Allen *et al.*, 1998)

Etapas del cultivo	Longitud (días)	$K_c$ (Figure 36, A1998)
Inicial	25	$K_{cini} = 0,15$
crop development	25	0.15... 1.19
mid-season	30	$K_{cmid} = 1.19$
late season	20	1.19 $K_{cend} = 0.35$
At $i = 40$ Crop development stage,		

$\sum(L_{prev}) = L_{ini} =$	25 días
$L_{stage} = L_{dev} =$	25 días
$K_c = 0.15 + [(40 - 25)/25](1.19 - 0.15) =$	0.77 -
At i = 95 late season stage	
$\sum(L_{prev}) = L_{ini} + L_{dev} + L_{mid} = (25 + 25 + 30) =$	80 días
$L_{stage} = L_{late} =$	20 días
$K_c = 1.19 + [(95 - 80)/20](0.35 - 1.19) = 0.56$	-
Los coeficientes en los días 20, 40, 70 y 95 para dry bean crop son: 0,15; 0,77; 1,19 y 0,56	

En los siguientes casos: cuando el periodo es diario; cuando se investiga la relación entre la variabilidad diaria de la humedad del suelo y la  $ET_c$ ; cuando la frecuencia de riego es alta; o cuando se requiere mayor precisión de la  $ET_c$ , el coeficiente  $K_c$  se presenta en dos coeficientes separados:  $K_{cb}$ , factor de transpiración (cultivo basal) y,  $K_e$ , factor de evaporación del suelo:  $K_c = K_{cb} + K_e$

#### CONVERSIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO DE LA ALFALFA, $K_c$ , EN $K_c$ GRAMA:

Dado que la alfalfa también es utilizada como superficie de referencia en la determinación de la evapotranspiración de referencia, sus valores de  $K_c$ , no se deben confundir con los valores de  $K_c$  de la grama, pero sí se pueden convertir entre ellos, al multiplicar el  $K_{c\text{alfalfa}}$  por un factor climático que varía entre 1 y 1,35. Así para clima húmedo y movimiento del aire en calma, el factor es 1,05; en clima semiárido y viento moderado, 1,20; y en clima árido y viento frecuente, 1,35.

## **A MANERA DE CONCLUSIÓN**

El éxito de la fórmula de Penman Monteith FAO98, que es la misma fórmula de Penman Monteith FAO56, al tiempo que reafirma el valor de los trabajos de Penman sobre la evapotranspiración durante muchos años, destaca el interés actual por la teoría y práctica de ese complejo proceso y pone de manifiesto que en gran parte, el uso y difusión de la fórmula se hizo realidad por la aparición de la computación y sus programas, ya que antes, el cálculo de la ecuación de Penman de 1948, no era nada amigable y se preferían otros procedimientos.

Por otra parte, es posible que el lector quede con la duda de si la evapotranspiración de referencia es o no es una evapotranspiración potencial. En nuestro criterio y comparando con los de otros autores como Hess (1996); Hess (2000); Delta-T Devices (s/f); A & M University. (2003); la evapotranspiración de referencia sí es una evapotranspiración potencial e incluso, algunos la denominan: Penman-Monteith evapotranspiración potencial para grama o en referencia a la grama. La explicación se fundamenta en que la evapotranspiración de referencia, como toda evapotranspiración potencial exige agua permanentemente en el suelo.

Anexo 1. Radiación Diaria extraterrestre ( $R_a$ ) por latitud para el día 15 del mes<sup>1</sup>  
(MJ/m<sup>2</sup> día)

Northern Hemisphere												Lat.	Southern Hemisphere										
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	deg.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov
0.0	2.6	10.4	23.0	35.2	42.5	39.4	28.0	14.9	4.9	0.1	0.0	70	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	37.3
0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42.0	38.9	28.6	16.1	6.0	0.7	0.0	68	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4
0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1	66	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6
1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30.0	18.4	8.5	2.4	0.6	64	41.0	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0
2.3	7.1	15.4	26.6	36.3	41.2	39.0	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3	62	41.2	31.5	20.4	9.6	3.4	1.2	2.0	6.4	15.5	27.2	38.3
3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2	60	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.6	16.7	28.1	38.7
4.3	9.6	17.7	28.4	37.0	41.3	39.4	32.0	21.7	12.1	5.5	3.1	58	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1
5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2	56	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5
6.5	12.0	20.0	30.0	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2	54	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9
7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9.0	6.4	52	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2
8.9	14.4	22.2	31.5	38.5	41.7	40.2	34.4	25.7	16.9	10.2	7.5	50	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6
10.1	15.7	23.3	32.2	38.8	41.8	40.4	34.9	26.6	18.1	11.4	8.7	48	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9
11.3	16.9	24.3	32.9	39.1	41.9	40.6	35.4	27.5	19.2	12.6	9.9	46	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1
12.5	18.0	25.3	33.5	39.3	41.9	40.7	35.9	28.4	20.3	13.9	11.1	44	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4
13.8	19.2	26.3	34.1	39.5	41.9	40.8	36.3	29.2	21.4	15.1	12.4	42	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6
15.0	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30.0	22.5	16.3	13.6	40	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8
16.2	21.5	28.1	35.2	39.9	41.8	40.8	37.0	30.7	23.6	17.5	14.8	38	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9
17.5	22.6	29.0	35.7	40.0	41.7	40.8	37.4	31.5	24.6	18.7	16.1	36	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0
18.7	23.7	29.9	36.1	40.0	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3	34	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0
19.9	24.8	30.7	36.5	40.0	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5	32	43.3	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0
21.1	25.8	31.4	36.8	40.0	41.2	40.6	38.0	33.4	27.6	22.2	19.8	30	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0
22.3	26.8	32.2	37.1	40.0	40.9	40.4	38.2	33.9	28.5	23.3	21.0	28	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9
23.4	27.8	32.8	37.4	39.9	40.6	40.2	38.3	34.5	29.3	24.5	22.2	26	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8
24.6	28.8	33.5	37.6	39.7	40.3	39.9	38.3	34.9	30.2	25.5	23.3	24	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7
25.7	29.7	34.1	37.8	39.5	40.0	39.6	38.4	35.4	31.0	26.6	24.5	22	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4
26.8	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6	20	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.2	38.6	41.2
27.9	31.5	35.2	38.0	39.0	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8	18	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	34.7	38.7	40.9
28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9	16	41.1	39.9	37.2	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.2	38.7	40.6
29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.0	36.7	33.9	30.6	28.9	14	40.6	39.7	37.5	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	35.6	38.7	40.2
30.9	33.8	36.5	38.0	38.0	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30.0	12	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8
31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37.0	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31.0	10	39.5	39.3	37.8	34.6	31.1	29.1	29.8	32.8	36.3	38.5	39.3
32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32.0	8	38.9	39.0	37.9	35.1	31.9	30.0	30.7	33.4	36.6	38.4	38.8
33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9	6	38.3	38.7	38.0	35.6	32.7	30.9	31.5	34.0	36.8	38.2	38.2
34.6	36.4	37.6	37.4	36.0	35.0	35.3	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9	4	37.6	38.3	38.0	36.0	33.4	31.8	32.3	34.6	37.0	38.0	37.6
35.4	37.0	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37.0	35.6	34.8	2	36.9	37.9	38.0	36.4	34.1	32.6	33.1	35.2	37.1	37.7	37.0
36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6	0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3

Fuente: Tabla 2.6 de Anexo 2 de Allen et al, 1998.

<sup>1</sup> Los valores de  $R_a$  para el 15° día del mes es una buena estimación (error < 1 %) de  $R_a$  promediado con todos los días del mes. Para latitud mayor de 55° (N o S) en invierno, más de 1% de error.

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

Anexo 2. Insolación máxima posible en Horas por latitud, para el 15 del mes<sup>1</sup>

Inclinación													Sol días / horas												
Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic		
00	90	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	90	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	90		
05	70	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	80	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	80		
10	50	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	70	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	70		
15	30	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	60	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	60		
20	10	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	50	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	50		
25	-10	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	40	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	40		
30	-30	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	30	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	30		
35	-50	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	20	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	20		
40	-70	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	10	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	10		
45	-90	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	0	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	0		
50	-110	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-10	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-10		
55	-130	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-20	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-20		
60	-150	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-30	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-30		
65	-170	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-40	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-40		
70	-190	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-50	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-50		
75	-210	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-60	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-60		
80	-230	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-70	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-70		
85	-250	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-80	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-80		
90	-270	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-90	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-90		
95	-290	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-100		
100	-310	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-110	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-110		
105	-330	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-120	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-120		
110	-350	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-130	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-130		
115	-370	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-140	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-140		
120	-390	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-150	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-150		
125	-410	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-160	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-160		
130	-430	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-170	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-170		
135	-450	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-180	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-180		
140	-470	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-190	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-190		
145	-490	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-200	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-200		
150	-510	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-210	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-210		
155	-530	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-220	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-220		
160	-550	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-230	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-230		
165	-570	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-240	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-240		
170	-590	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-250	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-250		
175	-610	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-260	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-260		
180	-630	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-270	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-270		
185	-650	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-280	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-280		
190	-670	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-290	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-290		
195	-690	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-300	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-300		
200	-710	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-310	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-310		
205	-730	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-320	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-320		
210	-750	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-330	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-330		
215	-770	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-340	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-340		
220	-790	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-350	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-350		
225	-810	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-360	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-360		
230	-830	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-370	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-370		
235	-850	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-380	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-380		
240	-870	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-390	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-390		

Fuente: Tabla 2.7 de Anexo 2 de Allen et al (1998). ( $N = w_s (24/\pi)$ )

<sup>1</sup> Valores de N el día 15 del mes, (error <1 %) de N promediado con todos los días del mes. Latitudes mayores de 55° (N o S) en invierno se desvían más del 1%.

Anexo 3. Valores de  $K_c$ , y altura media máxima para diferentes cultivos manejados adecuadamente, en clima subhúmedo: ( $RH_{\min}$  45%,  $u_2$  m/s)

Cultivo		$K_{c \text{ mid}}$	$K_{c \text{ end}}$	Altura media máxima del cultivo (m)
<b>a. Small Vegetables</b>	<b>0.7</b>	<b>1.05</b>	<b>0.95</b>	
Broccoli		1.05	0.95	0.3
Carrots		1.05	0.95	0.3
Cauliflower		1.05	0.95	0.4
Lettuce		1.00	0.95	0.3
Onions		1.00	1.00	0.3
Spinach		1.00	0.95	0.3
<b>b. Vegetables - Solanum Famil (<i>Solanaceae</i>)</b>	<b>0.6</b>	<b>1.15</b>	<b>0.80</b>	
Sweet Peppers (bell)		1.052	0.90	0.7
Tomato		1.15 <sup>2</sup>	0.70-90	0.6
<b>c. Vegetables-Cucumber Famil (<i>Cucurbitaceae</i>)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>0.80</b>	
Sweet Melons		1.05	0.75	0.4
Watermelon	0.4	1.00	0.75	0.4
<b>d. Roots and Tubers</b>	<b>0.5</b>	<b>1.10</b>	<b>0.95</b>	
Cassava	0.3	0.80	0.30	1.0
Potato		1.15	0.75	0.6
Sugar Beet	0.35	1.20	0.70	0.5
<b>e. Legumes (<i>Leguminosae</i>)</b>	<b>0.4</b>	<b>1.15</b>	<b>0.55</b>	
Beans, green	0.5	1.05	0.90	0.4
Beans, dry and Pulses	0.4	1.15	0.35	0.4
Grabanzo	0.4	1.15	0.35	0.8
Peanut		1.15	0.60	0.4
Soybeans		1.15	0.50	0.5-1.0
<b>f. Perennial Vegetables (with winter dormancy and initially bare or mulched soil)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>0.80</b>	
Asparagus	0.5	0.95	0.30	0.2-0.8
Strawberries	0.40	0.85	0.75	0.2

<b>g. Cotton</b>	<b>0.35</b>	1.15-1.20	0.70-0.50	1.2-1.5
Sisal		0.4-0.7	0.4-0.7	1.5
<b>h. Oil Crops</b>	<b>0.35</b>	<b>1.15</b>	<b>0.35</b>	
Castorbean ( <i>Ricinus</i> )		1.15	0.55	0.3
Sesame		1.10	0.25	1.0
Sunflower		1.0-1.15	0.35	2.0
<b>i. Cereals</b>	<b>0.3</b>	<b>1.15</b>	<b>0.4</b>	
Barley		1.15	0.25	1
Oats		1.15	0.25	1
Spring Wheat		1.15	0.25-0.4	1
Millet		1.00	0.30	1.5
Sorghum		1.00-1.10	0.55	1-2
Rice	1.05	1.20	0.90-0.60	1
<b>j. Forages</b>				
Alfalfa Hay	0.40	0.95	0.90	0.7
Bermuda hay	0.55	1.00	0.85	0.35
- Extensive Pasture Grazing	0.30	0.75	0.75	0.10
Turf grass- warm season	0.80	0.85	0.85	0.10
<b>k. Sugar Cane</b>	<b>0.40</b>	<b>1.25</b>	<b>0.75</b>	<b>3</b>
<b>l. Tropical Fruits and Trees</b>				
Banana				
- 1 <sup>st</sup> year	0.50	1.10	1.00	3
- 2 <sup>nd</sup> year	1.00	1.20	1.10	4
Cacao	1.00	1.05	1.05	3
Coffee				
- bare ground cover	0.90	0.95	0.95	2-3
- with weeds	1.05	1.10	1.10	2-3
Palm Trees	0.95	1.00	1.00	8
Pineapple	0.50	0.30	0.30	0.6-1.2
<b>m. Grapes and Berries</b>				
Berries (bushes)	0.30	1.05	0.50	1.5
Grapes				
- Table or Raisin	0.30	0.85	0.45	2
<b>n. Fruit Trees</b>				

Almonds, no ground cover	0.40	0.90	0.65	5
Apples, Cherries, Pears				
- no ground cover, no frosts	0.60	0.95	0.75	4
Apricots, Peaches, Stone Fruit				
- no ground cover, no frosts	0.55	0.90	0.65	3
Avocado, no ground cover	0.60	0.85	0.75	3
Citrus, no ground cover				
- 70% canopy	0.70	0.65	0.70	4
- 50% canopy	0.65	0.60	0.65	3
- 20% canopy	0.50	0.45	0.55	2
Citrus, with active ground cover or weeds				
- 70% canopy	0.75	0.70	0.75	4
- 50% canopy	0.80	0.80	0.80	3
- 20% canopy	0.85	0.85	0.85	2
Conifer Trees	1.00	1.00	1.00	10
Olives (40 to 60% ground coverage)	0.65	0.70	0.70	3-5
Pistachios, no ground cover	0.40	1.10	0.45	3-5
Walnut Orchard	0.50	1.10	0.6518	4-5
p. Special. Open Water, <2 m depth , in subhumid climates or tropics 1.05 1.05				

Fuente: Cuadro modificado de la Tabla 12 de Allen et al, 1998.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A & M UNIVERSITY. (2003). Web page of the Texas A & M, Texas, USA. Documento en línea. Disponible en: <http://pet.tamu.edu/OldWWW/TEXASET/second/whatis.php>. [Consultado: 15/1/03].
- ALLEN, R. G; PEREIRA, Luis S.; RAES, D. y SMITH, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Food an Agriculture Organization of the United Nations, FAO. Rome. Documento en línea. <http://www.fao.org/docrep/>. [consultado: 11/11/02].



- ALLEN, R. G. (2001). *Manual de Ref-ET. Reference evapotranspiration calculation for FAO and ASCE standardize equations*. Version 2.00 for Windows. University of Idaho, Kimberly.  
<http://www.kimberly.uidaho.edu/edsuluc/.ref.et/manual.pdf>. [Consultado: 15/12/02].
- CREA. (s/f). *Centro Regional de Estudios del Agua, Servicio Integral de Asistencia al Regante*, SIAR, Documento en línea. Universidad de Castilla – La Mancha, España. Disponible en: [http://crea.uclm.es/~siar/cu\\_herba\\_ext\\_ma.html](http://crea.uclm.es/~siar/cu_herba_ext_ma.html). [Consultado: 10/2/03].
- DELTA-T, Devices. (s/f). *Soil and plant water measurement*. Burwell, Cambridge, England.
- DEREK, Clarke; Martin Smith, and Khaled El - Askari. (1998). *Cropwat4 v.4-3 for Windows: User Guide*. University of Southampton, United Kingdom.
- DOORENBOS, J. and PRUITT, W. O. (1975). *Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24*, FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- DOORENBOS, J. and PRUITT, W. O. (1977, Rev). *Guidelines for predicting Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, (rev)* FAO, Rome.
- HESS, T. (1996). Evapotranspiration estimates for water balance scheduling en the United Kingdom. *Irrigation News*. **25**:31-36. United Kingdom. Documento en línea. Disponible en: <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/iwe/documents/atmom.pdf>. [Consultado: 19/2/03].
- HESS, T. (2000). *AWSET Potential evapotranspiration programs for automatic weather station, version 3*. Cranfield University, Silsoe, United Kingdom.
- JACOBS, J. and REDDY, S. (2001). *Evaluation of reference evapotranspiration methodologies and AFSIRS crop water use simulation model*. Final Technical Report. University of Florida, Gainesville, Florida, USA.
- RAES, D. (2000). *ETo calculation of Reference evapotranspiration, version 1.0*. for Windows. Faculty of Agricultural and Applied Biological Science. K.U Leuven University, Leuven, Belgium.
- SNYDER, R. L.; ORGANG, M.; MATYC, S. y ECHING, S. (2002). *Crops coefficients*. Documento en línea. Regent of the University of California at Davis. Disponible: <http://www.lar.ucdavis.edu/croopesth/.biometeorology/evapotranspiration>. [Consultado: 20/12/02].

\*\*\*\*\*

*José Manuel Guevara Díaz* es egresado de la Universidad Central de Venezuela como Licenciado en Geografía, obtiene maestría en la Universidad de Boston y posteriormente, doctorado en la UCV. Durante su labor educativa universitaria de pregrado ha dictado los cursos de Meteorología, Climatología, Geografía Física, Geografía de Venezuela, Geografía Regional y Trabajo de Campo. A nivel de postgrado, Climatología Urbana y Problemas Climáticos de Venezuela. Su obra escrita es diversa con artículos publicados en revistas nacionales y extranjeras y en libros como: *Meteorología; La Geografía Regional, la Región y la Regionalización; Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos, Geografía de las regiones Central y Capital de Venezuela* y su más reciente, *Historia de la Escuela de Geografía de la UCV*.