

ADAPTACION DE ALGUNOS METODOS DE CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION AL USO DE ORDENADORES

JUAN ANTONIO VERA APARICI (*)

RESUMEN. En el presente artículo se presentan tres métodos de cálculo de la evapotranspiración ampliamente conocidos: los debidos a H. F. Blaney y W. D. Criddle, a H. L. Penman y a C. W. Thornthwaite. La novedad consiste en que el empleo generalizado de ecuaciones evita completamente el uso de tablas en las que interpolar, con lo que los cálculos ganan en exactitud y quedan dispuestos para la incorporación de cualquier mejora futura.

ABSTRACT. In this paper three well-known calculation methods of evapotranspiration are presented: the ones from H. F. Blaney and W. D. Criddle, H. L. Penman and C. W. Thornthwaite. The generalized use of equations avoids wholly the use of tables to interpolate, therefore the calculations are more precise and can be improved in whatever future form.

1. INTRODUCCION

Las amplias posibilidades ofrecidas por los sistemas informáticos actuales han hecho imprescindible la adaptación de muchas metodologías de cálculo.

Entre ellas se hallan las que permiten el cálculo de la evapotranspiración (ET). La adaptación propuesta en este artículo consiste en la supresión total de las tablas utilizadas en una serie de métodos y su sustitución por las fórmulas que las generan.

Las ventajas de este cambio son evidentes: mejor comprensión del proceso, adecuación permanente a las mejoras (nuevos coeficientes, nuevas ecuaciones), aumento de la exactitud, eliminación de los errores de transcripción de las tablas y de la rigidez que les es intrínseca y, sobre todo, llenar un vacío ya señalado en 1965 por ELIAS y GIMENEZ en su libro «Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en España», en cuya página 20 se lee «El desarrollo matemático es laborioso, siendo necesario el empleo de tablas o ábacos para simplificar los cálculos».

Los métodos de cálculo de la ET que se exponen son los siguientes:

A. ET potencial según C. W. THORNTHWAITE.

- B. Factor mensual de uso consuntivo según H. F. BLANEY y W. D. CRIDDLE.
- C. ET del cultivo de referencia según el método de los autores de b) modificado por J. DOORENBOS y W. O. PRUITT.
- D. ET del cultivo de referencia según la fórmula de H. L. PENMAN modificada por J. DOORENBOS y W. O. PRUITT.

Por último una aclaración: en el título del artículo se han eliminado, de forma intencionada, los conceptos de «potencial» o «del cultivo de referencia», pues el objetivo de éste es la exposición de una metodología que elimina las interpolaciones y no el análisis crítico de los conceptos y de sus metodologías, que pudiera ser el tema de un próximo artículo.

2. PARAMETROS UTILIZADOS

A continuación se indican, por orden alfabético, los parámetros, funciones, variables y constantes utilizadas. Para la asignación del nombre se ha seguido, de una manera flexible, la terminología propuesta por GUPTA y otros (1977).

Los números que aparecen entre paréntesis al final de algunas definiciones remiten al de la ecuación que sirve para calcular la función en cuestión. Así, por ejemplo, la declinación (DEC) se calcula mediante la ecuación (2). Una vez conocida y con el valor de la latitud (LAT) se puede calcular la

(*) Ingeniero Agrónomo. Jefe de la División de Cálculo y Apoyo Informático del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX IMOPUI.

duración del día astronómico (NA) mediante la ecuación (10).

El hecho de que los números no sean correlativos se debe a que algunas ecuaciones se han considerado genéricas y se incluyen en el apartado siguiente (ecuaciones 1 a 23) y el resto son específicas de los métodos de cálculo y se incluyen en ellas (ecuaciones 24 a 37).

Las constantes empleadas: PI, PMA, PMV, R, S0, SIGMA y la de conversión de Kelvin a grados Celsius (273,15) proceden de WEAST (1984).

- A. Exponente en la ecuación (1).
- ALFA. Albedo referido a la unidad.
- ALT. Altitud de la estación en metros.
- AP. Coeficiente de corrección del factor F (32).
- AT. Exponente en el método de THORNTHWAITE (26).
- BP. Coeficiente de corrección del factor F (33).
- C. Coeficiente de corrección de la ET de PENMAN (37).
- CP. Calor específico del aire seco a presión constante.
- DEC. Declinación solar en grados (2).
- DELTA. Pendiente de la curva de saturación de vapor en mbar/°C o hPa/°C (3).
- DIA. Día del año tomando como origen el 1 de enero = 1.
- DINST. Distancia instantánea de la Tierra al Sol.
- DM. Duración del mes en días.
- DMED. Distancia media de la Tierra al Sol.
- EA. Presión de vapor de saturación en mbar o hPa (4).
- ED. Presión de vapor en mbar o hPa (5).
- ETO. Evapotranspiración del cultivo de referencia en mm/día (31) y (34).
- ETP. Evapotranspiración potencial corregida en mm/mes (28).
- ETP12. Evapotranspiración potencial mensual sin corregir en mm/mes (27).
- F. Factor mensual de consumo (30).
- FACTRS. Factor de conversión de cal.cm-2.día-1 a mm.día-1 (6).
- FU. Función de viento en la ecuación de PENMAN (36).
- GAMMA. Constante psicrométrica en mbar/°C (7).
- GTA. Gradiente térmico ambiental en K/m.
- HRMAX. Humedad relativa máxima en %.
- HRMED. Humedad relativa media en % (8).
- HRMIN. Humedad relativa mínima en %.
- I. Índice de calor mensual (24).
- IA. Índice de calor anual (25).
- LAMBDA. Calor latente de vaporización en kcal/kg (9).

LAT. Latitud en grados.

NA. Número astronómico de horas diarias de sol (10).

NAT. Número astronómico de horas anuales de sol (11).

NRATIO. Cociente entre el número de horas de sol reales y el máximo posible (12).

NRE. Número de horas de sol reales.

PI. Constante de valor igual a 3,141593.

PMA. Peso molecular del aire seco = 0,028964 kg.mol-1.

PMB. Presión atmosférica media en la estación en mbar o hPa (13) o (14).

PMB0. Presión atmosférica a la altura de referencia.

PMV. Peso molecular del vapor de agua = 0,018153 kg.mol-1.

R. Constante universal de los gases = 1,9872 cal.K-1.mol-1.

RA. Radiación extraterrestre en cal.cm-2.día-1 (15).

RB. Radiación neta terrestre. Sus unidades deben ser coherentes con las de RS (17).

RN. Radiación neta (18).

RS. Radiación solar (19).

S0. Constante solar. Dependiendo de los autores los valores oscilan entre 1,94 y 2,00 cal.cm-2.min-1.

SIGMA. Constante de STEFAN-BOLTZMANN = 117,093*E-9 cal.cm-2 día-1.K-4.

T. Temperatura en C.

TK. Temperatura media en Kelvin (20).

TK0. Temperatura en K a la presión PMB0.

TMAX. Temperatura máxima en °C.

TMED. Temperatura media en °C (21).

TMIN. Temperatura mínima en °C.

U2. Velocidad del viento en 2 m de altura en km/día.

UDIA. Velocidad del viento entre las 7 y las 19 h en km/día.

UHT. Altura del anemómetro en m.

UHTFC. Factor de corrección de la lectura del anemómetro a la altura de referencia (22).

UNOCHE. Velocidad del viento entre las 19 h y las 7 h.

URATIO. Cociente entre la velocidad diurna y nocturna del viento (23).

W. Factor de ponderación de la ETP de PENMAN (35).

3. ECUACIONES AUXILIARES

Las ecuaciones auxiliares o genéricas, es decir, aquellas que tienen aplicación en otros campos de la Meteorología y de la Climatología, se han ordenado alfabéticamente según la función definida.

Como no se expresan en el Sistema Internacional de Unidades es importante resaltar la exigencia de coherencia en las unidades: por ejemplo, entre DELTA y GAMMA, entre NA y NRE y entre RA, RB, RN y RS. En esta misma línea hay que señalar que los argumentos de las funciones trigonométricas se expresan en grados sexagesimales.

Frente a la propuesta de la FAO (DOORENBOS y PRUITT, 1977) de calcular la radiación extraterrestre y la terrestre en equivalentes de evaporación (mm/día) se ha preferido el método más exacto consistente en calcular ambas en cal. cm-2.día-1 y posteriormente aplicar un factor de corrección de la radiación (FACTRS).

Las ecuaciones auxiliares a las que nos hemos referido son:

Exponente de la ecuación de variación de la presión con la altura en el caso de atmósfera adiabática:

$$A = 0,034165/GTA \quad (1)$$

Haciendo $GTA = 0,0065$ k/m (valor medio atmosférico) $A = 5,26$.

Declinación solar (grados):

$$DEC = 23,45 * SEN(72 * (284 + (DIA)/73)) \quad (2)$$

Pendiente de la curva de saturación de vapor (JENSEN, 1974, p. 123) en mbar/°C:

$$DELTA = 1,99932 * (0,00738 * T + 0,8072) ** 7 - 0,00116 \quad (3)$$

$$T > -23 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Presión de saturación de vapor (JENSEN, op. cit., p. 123) en mbar:

$$EA = 33,8639 * (((0,00738 * T + 0,8072) ** 8) - 0,000019 * ABS(1,8 * T + 48) + 0,001316) - 51 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 54 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

Presión de vapor (las unidades son las de EA):

$$ED = 0,01 * EA(TMED) * HRMED \quad (5)$$

Factor de conversión de unidades de radiación (cal.cm-2.día-1) a unidades de evaporación (mm.día-1) (ELIAS y GIMENEZ, op. cit., p. 41):

$$FACTRS = 10/LAMBDA \quad (6)$$

De acuerdo con la expresión anterior, FACTRS es variable; no obstante, GUPTA y otros, op. cit., utilizan un valor constante de 0,017, correspondiente a $LAMBDA = 586$ kcal/kg, prácticamente igual a la equivalencia propuesta por PENMAN (1963): 1 mm de evaporación = 59 cal. cm-2.día-1.

Constante psicrométrica en mbar/°C:

$$GAMMA = 0,3831 * PMB/LAMBDA \quad (7)$$

El factor 0,3831 es igual al cociente entre el calor específico del aire seco a presión constante y el cociente entre los pesos moleculares del vapor de agua y del aire seco. De la teoría cinética de los calores específicos resulta que:

$$CP = 3,5 * R/PMA$$

Al dividir por PMV/PMA queda:

$$3,5 * R/PMV = 0,3831 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Humedad relativa media en %:

$$HRMED = 0,5 * (HRMAX + HRMIN) \quad (8)$$

Calor latente de vaporización, en kcal/kg (JENSEN, op. cit., p. 122):

$$LAMBDA = 595 - 0,51 * TMED \quad (9)$$

Número astronómico de horas de sol, en horas/día:

$$NA = 0,1333 * ARC \text{ COS}(-TAN(LAT) * TAN(DEC)) \quad (10)$$

Número astronómico de horas de sol anuales (suma de los 12 productos de las horas astronómicas diarias de sol por el número de días del mes):

$$NAT = SUM(NA * DM) \quad (11)$$

Cociente entre el número de horas de sol medidas y el máximo astronómico:

$$NRATIO = NRE/NA \quad (12)$$

Presión atmosférica en mbar o hPa (JENSEN, op. cit., p. 122):

$$PMB = 1013 - 0,1055 * ALT \quad (13)$$

Esta expresión (y otras similares) son válidas para latitudes medias. En otro caso, habrá que utilizar ecuaciones del tipo de la de LAPLACE (atmósfera isoterma) o como la que se indica a continuación (atmósfera adiabática):

$$PMB = PMB0 * (1 - GTA * ALT/TK0) ** A \quad (14)$$

Radiación extraterrestre en cal.cm-2.día-1 (SELLERS, p. 16):

$$RA = (S0 * 1440 / PI) * (DMED/DINST) ** 2 * ((7,5 * PI * NA/180) * SEN(LAT) * SEN(DEC) + SEN(7,5 * NA) * COS(LAT) * COS(DEC)) \quad (15)$$

Dado que (DMED/DINST) ** 2 oscila entre 1,0344 (el 3 de enero) y 0,9674 (el 5 de julio), es decir, $\pm 3,5\%$ y lo laborioso del cálculo

(cf. MEENS, 1979), en ocasiones se prescinde de este parámetro (v. FERERES, 1987, p. 35).

Una fórmula aproximada para corregir RA según la excentricidad terrestre es la siguiente (ALAIZ, 1981):

$$(DMED/DINST) ** 2 = 1 + 0,033 * \cos(72 * (284 + (DIA)/73)) \quad (16)$$

Radiación neta terrestre en cal.cm-2.día (DOORENBOS y PRUITT, *op. cit.*, p. 27):

$$RB = (0,1 + 0,9 * NRATIO) * (0,34 - 0,044 * \sqrt{ED}) * \sigma * TK ** 4 \quad (17)$$

Radiación neta (sus unidades son las de RB y RS):

$$RN = (1 - ALFA) * RS - RB \quad (18)$$

Radiación solar (sus unidades son la de RA):

$$RS = RA * (A1 + B1 * NRATIO) \quad (19)$$

A1 = 0,25; B1 = 0,50 (DOORENBOS y PRUITT, *op. cit.*, p. 19).

Temperatura media en Kelvin:

$$TK = TMED + 273,15 \quad (20)$$

Temperatura media del aire en °C:

$$TMED = 0,5 * (TMAX + TMIN) \quad (21)$$

Factor de conversión de la velocidad del viento a la altura de referencia:

$$UHTFC = (2/UHT) ** A \quad (22)$$

A = 0,17 para UHT > 2 y 0,22 en caso contrario (GUPTA y otros, p. 127).

A = 0,2 (JENSEN, *op. cit.*, p. 139).

Cociente entre las velocidades diurna y nocturna del viento:

$$URATIO = UDIA/UNOCHE \quad (23)$$

4. METODO DE C. W. THORNTHWAITE

El método comprende los pasos siguiente:

Cálculo de los índices de calor mensuales:

$$I = (0,2 * TMED) ** 1,514 \quad (24)$$

Cálculo del índice de calor anual:

$$IA = \sum(I) \quad (25)$$

Cálculo del exponente AT:

$$AT = A1 * (IA) ** 3 + A2 * (IA) ** 2 + A3 * (IA) + A4 \quad (26)$$

A1 = 0,675 * E-6

A2 = - 0,0771 * E-3

A3 = 0,01792

A4 = 0,49239

Cálculo de la evapotranspiración potencial mensual sin corregir:

$$ETP12 = 16 * (10 * TMED/IA) ** AT \quad (27)$$

Cálculo de la evapotranspiración potencial corregida (GARCIA y GONZALEZ, 1964, p. 27):

$$ETP = ETP12 * NA * DM/360 \quad (28)$$

Cálculo de la ETP (sin corregir) cuando la temperatura media mensual es superior a 26,5 °C.

En este caso se utiliza la relación:

$$ETP12 = A1 * TMED ** 2 + A2 * TMED + A3 \quad (29)$$

A1 = - 0,42

A2 = + 31,49

A3 = - 404,61

5. METODO DE H. F. BLANEY Y W. D. CRIDDLE

El factor mensual de uso consuntivo (o de consumo) se calcula según:

$$F = NA * DM * 100 * (0,4572 * TMED + 8,128)/NAT \quad (30)$$

Si se quiere calcular la ET0 según la modificación propuesta por DOORENBOS y PRUITT, la ecuación es:

$$ET0 = AP + BP * F \quad (31)$$

AP y BP valen, respectivamente:

$$AP = 0,0043 * HRMIN - NRATIO - 1,41 \quad (32)$$

$$BP \text{ (FERERES, } op. cit., p. 38) = A1 + A2 * HRMIN + A3 * NRATIO + A4 * UDIA + A5 * HRMIN * NRATIO + A6 * HRMIN * UDIA \quad (33)$$

A1 = 0,81917

A2 = 4,0922 * E-3

A3 = 1,0705

A4 = 0,065649

A5 = 5,9684 * E-3

A6 = 0,5967 * E-3

6. METODO DE H. L. PENMAN MODIFICADO

La modificación introducida por DOORENBOS y PRUITT calcula la evapotranspiración del cultivo de referencia:

$$ETO = C * (W * RN * FACTRS + (1-W) * FU * (EA-ED)) \quad (34)$$

El factor de ponderación W se calcula a partir de DELTA y GAMMA:

$$W = DELTA / (DELTA + GAMMA) \quad (35)$$

La función de viento, FU, vale:

$$FU = 0,27 * (1 + U2/100) \quad (36)$$

El factor de corrección C vale (FERERES, *op. cit.*, p. 36):

$$C = A1 + A2 * HRMAX + A3 * RS + A4 * UDIA + A5 * URATIO + A6 * UDIA * URATIO + A7 * HRMAX * UDIA + A8 * HRMAX * RS * URATIO \quad (37)$$

con RS en mm/día

$$\begin{aligned} A1 &= 0,6817006 \\ A2 &= 2,7864 * E-3 \\ A3 &= 0,0181768 \\ A4 &= -0,0682501 \\ A5 &= 0,0126514 \\ A6 &= 9,7297 * E-3 \\ A7 &= 0,043025 * E-3 \\ A8 &= -0,092118 * E-6 \end{aligned}$$

7. BIBLIOGRAFIA

- ALAIZ, E. (1984). «Energía solar. Cálculo y diseño de instalaciones». Sección de Publicaciones de la E.T.S.I.I. Madrid, 192 pp.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. (1977). «Guidelines for predicting crop water requirements». FAO, Irrigation and Drainage Paper N. 24, ed. revisada, Roma, 144 pp.
- ELIAS, F.; GIMENEZ, R. (1965). «Evapotranspiración

potenciales y balances de agua en España». Ministerio de Agricultura. Madrid, 297 pp + mapas.

FERERES, E. (1987). «Necesidades hídricas de los cultivos, eficiencia de los métodos de aplicación y consumos totales en agua a nivel parcela». En «Simposio sobre necesidades hídricas de los cultivos y su abastecimiento». CERD y AERD. Madrid, 40 pp.

GARCIA, F.; GONZALEZ, F. (1964). «Métodos en uso y su empleo para el cálculo de la evapotranspiración». Ediciones Centro de Estudios Hidrográficos, N. 23. Madrid, 137 pp.

GUPTA, S. K.; PRUITT, W. O.; LONCZAK, J.; TANJI, K. K. (1977). «Computer programme for estimation of reference crop evapotranspiration». En: «Crop water requirements». FAO, Roma, pp. 120-133.

JENSEN, M. E. (1974). «Consumptive use of water and irrigation water requirements». ASCE. Nueva York, 215 pp.

MEENS, J. (1979). «Astronomical formulae for calculations». Monografien over Astronomie en Astrofysica, vol. 4, Volkssterrenwacht Urania, v.z.m.

PENMAN, H. L. (1963). «Vegetation and hydrology». Commonwealth Agricultural Bureaux. Technical Communication N. 53. Farnham Royal, 124 pp.

SELLERS, W. D. (1965). «Physical climatology». The University of Chicago Press. Chicago, 272 pp.

WEAST, R. C. (1984). «Handbook of chemistry and physics». CRC Press, Boca Raton, 65 edición.



NOVEDADES EDITORIALES

Librería Ciencia-Industria, S. L.

Plaza de San Juan de la Cruz, 3
Tels. 234 85 56 y 233 75 43

PEDIDOS: Contra reembolso ☐ — Cheque adjunto ☐

COASTAL ENVIRONMENTS. Introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines.

Carter, R. W. G. —10712—
1988 ed. 617 págs. 11.130 pts.

CONTENIDO: Waves and wave dominated coasts. Shoreline morphodynamics. Tidal and lake coasts. Long-term development of coasts. Sea-level changes. Sub-tidal and beach ecosystems. Coastal dunes. Coastal wetlands. Structures and organization. The management of coastal waters. Management of coastal lands and sediments. Management of coastal ecosystems. Coastal hazards.

EARTHQUAKE DESIGN PRACTICE FOR BUILDINGS

Key, D. —8983—
1988 ed. 218 págs. 10.600 pts.

CONTENIDO: The lessons from earthquake damage. Ground motion. The calculation of structural. Isolation and energy absorbers. Conceptual design. Design codes and lateral force design. Reinforced concrete design. Structural steelwork design. Foundations. Masonry. Non-structural elements. Non-building structures: a guide.

THERMAL HISTORY OF SEDIMENTARY BASINS. Methods and case histories:

Neser, N. D. —1924—
1989 ed. 319 págs. 10.812 pts.

CONTENIDO: Thermal history of sedimentary basins: Introduction and overview. Thermal conductivity of sedimentary rocks: Measurement and significance. Reaction of organic material to progressive geological heating. Molecular thermal maturity indicators in oil and gas source rocks. Temperature and time in the thermal maturation of sedimentary organic matter.

MARINE GEOTECHNICS

Poulos, H. G. —12311—
1988 ed. 473 págs. 22.260 pts.

CONTENIDO: Offshore resource development. The nature of submarine soils. Soil behaviour under cyclic loading. Marine geotechnical investigations. Foundations for offshore gravity structures. Foundations for jack-up rigs. Offshore pile foundations. Seafloor stability.



Un aliado
muy rentable.

Motobasculantes



14 Modelos de 1000 a 3000 Kgs.
Diferentes sistemas de descarga.
Tracción a 2 y 4 ruedas.



Carretillas Elevadoras

De 1000 a 2500 Kgs.



Pala Cargadora

Modelo standard: 400 litros.
Versiones con pinzas para troncos,
retro excavadora, etc.



Auto - hormigonera

Capacidad de amasada: 750 litros.



APART. P.O.B. 194
TEL. (93) 874 73 11
TELEX 53102 AUDU E
MANRESA (Barcelona) ESPAÑA
