

Cálculo de la ETP mediante la fórmula de Jensen-Haise

En los recuadros está un caso práctico resuelto

Calcular la ETP para el mes de Junio en Matacán (aeropuerto a 10 km al Oeste de Salamanca).

Datos generales

Latitud= 41°N

Altitud=790 metros

Mes más cálido= Julio

Media de las **máximas** diarias de Julio= 29,8°C

Media de las **mínimas** diarias de Julio= 12,9°C

Datos para el periodo concreto que se desea calcular: mes de Junio

nº medio de horas de sol= 10,4

temperatura media= 19,6 °C

1º) Calculamos la presión de vapor a saturación correspondiente a la temperatura media de las **máximas** y de las **mínimas** del mes más cálido mediante la siguiente expresión¹ :

$$e = 6,108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3}\right)$$

donde: e = Presión de vapor a saturación (mbar) correspondiente a la temperatura t (°C)

Aplicamos la fórmula dos veces: con la temperatura media de las **mínimas** y de las **máximas** del mes más cálido, obteniendo respectivamente e_1 y e_2 :

$$e_1 = 6,108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot 12,9}{12,9 + 237,3}\right) = 14,88 \text{ mbar}$$

$$e_2 = 6,108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot 29,8}{29,8 + 237,3}\right) = 41,95 \text{ mbar}$$

2º) Calculamos los coeficientes C_T y T_x , necesarios para la fórmula:

$$C_T = \frac{1}{38 - \frac{h}{152,5} + \frac{380}{e_2 - e_1}} \quad ; \quad T_x = -2,5 - 0,14(e_2 - e_1) - \frac{h}{550}$$

donde: h = Altitud del lugar (metros)

$$C_T = \frac{1}{38 - \frac{790}{152,5} + \frac{380}{41,95 - 17,88}} = 0,0213$$

$$T_x = -2,5 - 0,14(41,95 - 17,88) - \frac{790}{550} = -7,726$$

¹ **exp (x)** quiere decir **e^x**. (Surge una confusión con la letra e : aquí nos estamos refiriendo al número e (2,718...) mientras que en esta fórmula, e se refiere a la presión de vapor. No la hemos cambiado porque es usual utilizar la e para esta variable)

3º) Cálculo de R_s (Radiación solar incidente sobre la superficie)

Si disponemos de medidas de R_s en otras unidades, podemos convertirlas a su equivalente en **mm/día** (la evaporación equivalente a esa energía):

Para pasar de **MJulio/m²/día** a **mm./día** multiplicar por : $238,85 / (597,3 - 0,57 T)$

donde T = temperatura media del periodo elegido.

Con un mínimo error, basta multiplicar por 0,406.

Si no disponemos de medidas directas de R_s , podemos evaluarlo a partir del **número de horas de sol (n)**, mediante la expresión siguiente²:

$$R_s = R_o \left(0,18 + 0,55 \frac{n}{N} \right)$$

donde: R_o = Radiación solar si no existiera atmósfera (Tabla)

n = número de horas de sol reales (medidas con un heliógrafo)

N = número máximo teórico de horas de sol (Tabla)

Si tampoco disponemos de medidas de horas de sol reales (n), se puede estimar n/N aproximadamente, para la zona estudiada, por ejemplo: 0,8 para los meses de verano, 0,6 para primavera y otoño, 0,4 para invierno.

Leemos en las tablas, al final de este documento, (para 41º de latitud y para Junio) la radiación solar que llegaría si no hubiera atmósfera (17,3 mm/día) y el máximo teórico de horas de sol (15,1 horas). Datos medidos: 10,4 horas de sol diarias

$$R_s = 17,3 \left(0,18 + 0,55 \frac{10,4}{15,1} \right) = 9,67 \text{ mm / día}$$

4º) $ETP = C_T (T - T_x) \cdot R_s$

donde: ETP = Evapotranspiración (en las mismas unidades que se hayan utilizado para la R_s)

R_s = Radiación solar incidente a nivel del suelo (cal/cm²/día ó mm/día)

T = temperatura media del periodo de cálculo elegido (semana, mes,...)

C_T, T_x = calculadas en el paso anterior

Utilizamos los valores de C_T, T_x calculadas en el paso 2º; son constantes para un determinado lugar geográfico. Una vez conocidas, para el cálculo de un periodo concreto se necesitan la temperatura, T , y la radiación solar, R_s de ese periodo.

$$ETP = 0,0213 (19,6 - (-7,726)) \cdot 9,67 = 5,64 \text{ mm./día} = 169,2 \text{ mm/mes}$$

Se adjunta un documento Excel para realizar los cálculos (pero, al menos una vez, conviene hacer los cálculos manualmente)

² Existen diversas versiones similares de esta expresión, por ejemplo (Glover et al. 1958, en Martín, 1983, p.292):

$$R_s = R_o \left(0,29 \cos \lambda + 0,52 \frac{n}{N} \right)$$

donde: λ = latitud (grados) (válida de 0º a 60º)

Radiación extraterrestre para el hemisferio Norte, expresada en evaporación equivalente (mm/día) (*) (Allen et al. 1998)

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1
48	4.1	6.4	9.5	13.1	13.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6
46	46.1	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

(*) La tabla está expresada en MJ /m² /día. Aquí está convertida en mm/día de acuerdo con la equivalencia: 1 mm = 2,45 MJ/m² (Allen et al., op. cit.)

Número máximo de horas de sol en el hemisferio Norte (**) (Allen et al. 1998)

Latitud	Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
70	0	6.6	11	15.6	21.3	24	24	17.6	12.8	8.3	2.3	0
68	1.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24	22.3	17	12.7	8.7	4.1	0
66	3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22	20.3	16.4	12.7	9	5.2	1.9
64	5	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16	12.6	9.3	6	3.7
62	5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8
60	6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6
58	6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2
56	7.3	9.3	11.5	13.9	16	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7
54	7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1
52	8	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5
50	8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9
48	8.6	10	11.6	13.4	15	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9	8.2
46	8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14	12.3	10.7	9.2	8.5
44	9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7
42	9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9
40	9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2
38	9.6	10.6	11.7	13	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11	9.9	9.4
36	9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6
34	10	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7
32	10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9
30	10.3	11	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1
28	10.4	11	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13	12.2	11.3	10.6	10.2
26	10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4
24	10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5
22	10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7
20	10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11	10.8
18	11	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9
16	11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1
14	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2
12	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3
10	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4
8	11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12	11.8	11.6	11.5
6	11.7	11.8	12	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12	11.9	11.7	11.7
4	11.8	11.9	12	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12	11.9	11.8	11.8
2	11.9	11.9	12	12	12.1	12.1	12.1	12.1	12	12	11.9	11.9
0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

(**) Para el hemisferio Sur corresponde el valor complementario de 24, por ejemplo:
para Enero a 30° de latitud Sur: $24 - 10,3 = 13,7$ horas

Bibliografía

Allen, R.G.; L. S. Pereira y D. Raes (1998).- *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* - FAO Irrigation and drainage paper **56**

Disponible en Internet en:

<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>

Aparicio, F.J. (1997).- *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa, 303 pp.

Dorenbos, J. y W.O. Pruitt (1977).- Las necesidades de agua de los cultivos. *Riego y Drenaje*, **24**. FAO. 195 pp. (Este trabajo ha sido actualizado por la FAO mediante el de Allen et al. 1998)

Martín, M. (1983).- Componentes primarios de Ciclo Hidrológico. *En: Hidrología Subterránea*, (E. Custodio & M.R. Llamas, eds.). Omega: 281-350.

Sánchez, M.I. (1992).- Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. *Cuadernos Técnicos Sociedad Española de Geomorfología*, nº 3, 36 pp.

Shuttleworth, W. J. (1992).- Evaporation. *En: Handbook of Hydrology*, (Maidment, D. R., editor). McGraw-Hill: 4.1- 4.53

Singh, V.P. (1992).- *Elementary Hydrology*. Prentice Hall, 973 pp.