TEMA 3
EVAPORACIÓN, TRANSPIRACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

3.1.- Evaporación

La evaporación, según los hidrólogos, es el conjunto de fenómenos que transforman el agua en vapor, por un proceso específicamente físico. Estos fenómenos intervienen en el ciclo hidrológico, desde el momento en que la precipitación llega a la superficie del suelo.

Los dos factores principales que influyen en la evaporación desde una superficie libre de agua son:

a.- El suministro de energía que provee el calor de vaporización, siendo principalmente la radiación solar.

b.- Habilidad para transportar el vapor de agua, fuera de la superficie de evaporación; que depende de la velocidad del viento sobre la superficie y del gradiente de humedad específica en el aire, por encima de ella.

La fuente de agua, importante, para el fenómeno de evaporación es el agua que impregna las capas superficiales del terreno; que no es otra que aquella agua procedente de la lluvia recientemente caída e infiltrada a pequeña profundidad en el suelo o aquélla que por efecto de la capilaridad sube desde el nivel freático.

La evaporación desde la superficie terrestre, comprende:

a.- Evaporación directa desde la superficie del suelo y desde la superficie de la vegetación.

b.- Transpiración a través de las hojas de las plantas, mediante la cual, el agua es extraída por las raíces de éstas y expulsadas a la atmósfera a través de los estomas de las hojas.

La evaporación se mide en mm de agua por unidad de tiempo, el cual puede ser día o mes.

3.1.1.- Factores fundamentales de la evaporación

3.1.1.1.- Factores meteorológicos.- Por orden de importancia, se tienen:

1.- Déficit higrométrico ó déficit de saturación de la atmósfera.- Es la humedad relativa del aire y la misma ya fue definida en el Tema 1.

2.- Temperatura del aire.- En la cual para un mismo contenido de humedad relativa, la evaporación crece con el aumento de la temperatura del agua o de la superficie de evaporación: Esta temperatura varía en el mismo sentido que varía la temperatura del aire.

3.- Radiación solar.- La evaporación absorbe calor, el cual es suministrado por la radiación solar transformada en energía calórica por la superficie de evaporación.

4.- Velocidad del viento.- Asegura reemplazo de aire más o menos saturado, en contacto con la superficie de evaporación, por nuevas capas que tienen una temperatura y humedad generalmente más bajas.

5.- Presión barométrica.- La evaporación aumenta cuando la presión disminuye.

3.1.1.2.- Calidad del agua.- Se sabe que la evaporación disminuye a medida que la concentración de sal aumenta en la superficie de evaporación.

3.1.1.3.- Factores que caracterizan la naturaleza y el estado de la superficie de evaporación.-

Estos factores son los siguientes:

c.1.- Superficie de Agua Libre.
c.2.- Nieve.
c.3.- Hielo.
c.4.- Suelo Desnudo.
c.5.- Vegetación.

Todas las superficies capaces de interceptar precipitación son fuentes potenciales de evaporación y están limitadas por la disponibilidad del agua o por la oportunidad de evaporación.

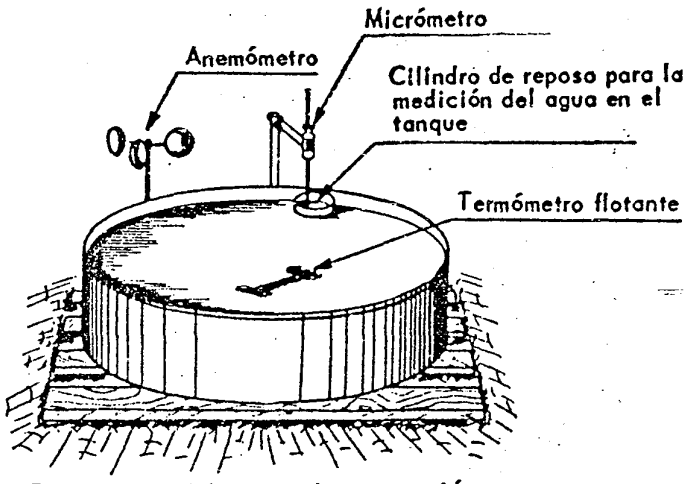
3.1.2.- Medición de la evaporación.- Algunos aparatos para la medición directa de la evaporación son:

3.1.2.1.- Evaporímetros.- Consisten en tanques de evaporación de los siguientes tipos:

3.1.2.1.1.- Tanque o tina exterior.- Se construyen de hierro galvanizado sin pintar. Tienen 1.22 m de diámetro, 25.4 cm de altura. Se colocan sobre una armadura de madera, a 15 cm de la superficie del suelo, para que exista circulación de aire por debajo del tanque y evitar calentamiento de sus paredes y que no exista influencia de la temperatura del suelo. Este tipo de tanque se muestra en la figura 3.1

En este tanque, la profundidad del agua se mantiene entre 20 y 17.5 cm.

La lámina de evaporación medida se calcula como la diferencia de los dos niveles observados, ajustados con la lluvia medida en un pluviómetro que siempre acompaña al tanque.



Dimensiones del tanque de evaporación
Tipo A del Wheather Bureau (U.S.A.)

Diámetro del tanque: 121.9 cm
Altura del tanque: 25.4 cm (10 pulg.)
Nivel de agua mantenido a 5 cm del borde

Figura 3.1.- Tanque o tina exterior.

Ventajas:

1.- El coeficiente de corrección varía muy poco.
2.- Fácil instalación.
3.- Fácil operación.
4.- Fácil mantenimiento.
5.- Fácil reparación, pueden detectarse posibles fugas desde la tina.
6.- Las medidas no corren el riesgo de ser falsas por efecto de la salpicadura de las gotas de agua que caen en el terreno próximo.

Desventajas:

1.- Son muy sensibles a las variaciones de la temperatura del aire.
2.- Son sensibles a los efectos de la insolación, arrojando resultados de evaporación superiores que los de los tanques flotantes.

El factor de corrección de los datos de evaporación de un tanque exterior es de 0.75

Para medir la evaporación, lo que se hace es medir la variación de peso de la vasija y luego se calcula la altura de agua que representa esa variación de peso.

Desventajas:

1 - Volumen de agua muy pequeño.

2.- Influencia de la velocidad del viento al tratar de hacer oscilar la vasija y falsear las medidas.

3.1.2.3.- Cuerpos de porcelana porosa.- Están constituidos por esferas, cilindros o placas de porcelana blanca porosa, tal como se muestra en la figura 3.4. La manera de medir la evaporación es midiendo la cantidad de agua que pasa del cilindro al envase poroso, ya que este último se satura y genera la evaporación. Es alimentado constantemente por el cilindro que contiene el agua.

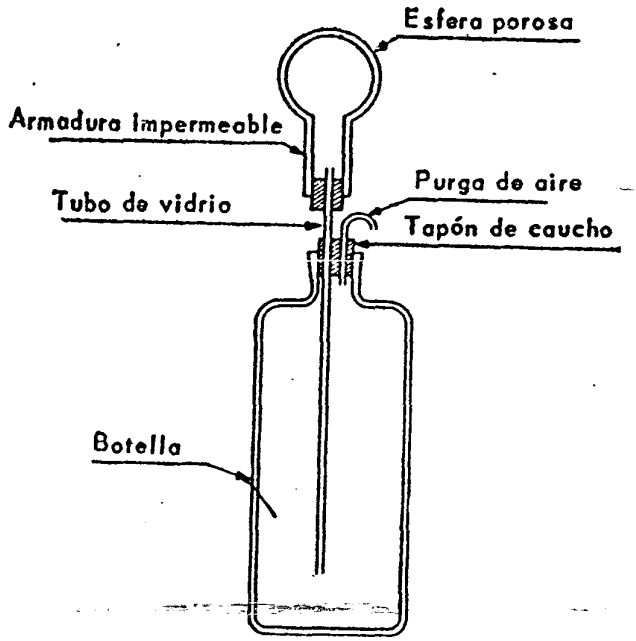


Figura 3.4.-Cuerpo de porcelana porosa.

3.1.2.4.- Superficie de papel húmedo o evaporímetro PICHE.- Está constituido por un tubo cilíndrico de vidrio, de 25 cm. de largo y 1.5 cm de diámetro, graduado, encerrado en su parte superior, mientras que en la inferior se cierra con una hoja circular de papel filtro normalizada de 30 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor, fijada por capilaridad y mantenida por un resorte, tal como se muestra en la figura 3.5.

El aparato se llena de agua destilada, la cual al irse evaporizando a través del papel filtro, va bajando en el cilindro. Se puede así medir la cantidad de agua evaporada a través de las diferencias entre las lecturas.

Este aparato presenta la desventaja de no tomar en cuenta la influencia de la insolación, ya que se debe instalar bajo abrigo, para mantenerlo alejado de la influencia de la precipitación.

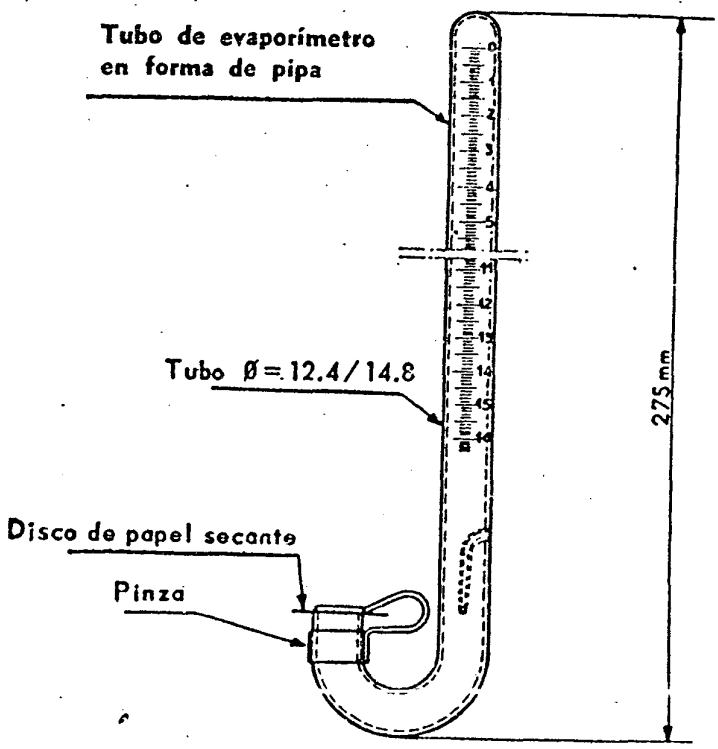


Figura 3.5.- Evaporímetro PICHE.

3.1.3.- Fórmulas empíricas para el cálculo de la evaporación.-

Cuando no se cuenta con mediciones directas de la evaporación, pueden usarse ciertas fórmulas empíricas, las cuales han sido obtenidas para tomar en consideración los datos meteorológicos corrientemente disponibles, con la finalidad de obtener resultados suficientes para estudios hidrológicos generales.

3.1.3.1.- Fórmula de Lugeon.- Viene dada por:

$$E = 0.398\, n\, (e_s - e_a)\, \frac{273+t}{273}\, \frac{760}{B-e_s} \qquad 3.1$$

donde:

E = evaporación en mm de agua para el mes de n días

e_s = presión de vapor de agua saturado, para la temperatura máxima media mensual t, en mm de Hg.

e_a = presión del aire para el momento de la lectura de t. Se obtiene multiplicando la presión de vapor de agua saturado por la humedad relativa, en mm de Hg.

B = presión barométrica media mensual, en mm de Hg.

t = valor medio mensual de la máximas diarias, en °C.

3.1.3.2.- Fórmula de Meyer.- Nos da la evaporación media mensual de un tanque de evaporación o de una superficie de agua libre, en función de la humedad relativa media y de la velocidad del viento.

$$E_m = C\, (e_s - e_a)\left(1 + \frac{V}{10}\right) \qquad 3.2$$

donde:

E_m = evaporación media mensual en pulgadas

e_s = presión de vapor de agua saturada para la temperatura media mensual, en pulgadas de Hg.

e_a = presión de vapor del aire para la temperatura media mensual, en pulgadas de Hg.

V = velocidad media mensual del viento a 8 metros de la superficie, en millas/hora, medidas a 25 pies sobre la superficie del agua.

C = coeficiente empírico
C = 15 = para tanques de evaporación o charcas poco profundas.
C = 11 = para depósitos y lagos profundos.

3.1.3.3.- Fórmula de los Servicios Hidrológicos de la antigua URSS.- Resulta de la observación efectuada en tanques de evaporación en un área de 20 a 100 m^2.

$$E = 0.15\, n\, (e_s - e_a)\, (1 + 0.072\, V_2) \qquad 3.3$$

donde:

E = evaporación, en mm/mes

n = número de días del mes considerado

e_s = presión de vapor de agua saturado, en milibares, correspondiente a la temperatura media del agua en su superficie.

e_a = valor medio de la presión efectiva, en milibares, en el aire a 2 metros sobre la superficie del agua.

V_2= velocidad del viento, en m/seg, a 2 metros sobre la superficie del agua

3.1.3.3.- Fórmula de Chistianssen y Guillén.- Viene dada por la siguiente expresión:

$$E = K\, C_T\, C_H\, C_W\, C_S\, C_{DP}\, C_M \qquad 3.4$$

E = evaporación a la sombra, en mm/día

K = constante = 2.957

$$C_H = 2.12 - 1.75\, H^2 \qquad 3.5$$

H = humedad relativa promedio mensual

$$C_T = -0.490 + 0.0621\, T \qquad 3.6$$

T = temperatura media mensual, en °C

$$C_S = 0.53 + 0.784\, S \qquad 3.7$$

S = insolación media mensual

$$C_W = 0.728 + 0.0494\, V_2 \qquad 3.8$$

V_2 = velocidad del viento a 2 metros de la superficie del agua, en Km/hora

$$C_{DP} = 1.15 - 0.015\, D_P \qquad 3.9$$

D_P = número de días de precipitación durante el mes considerado, con precipitaciones de 1 mm o mayores.

C_M = coeficiente que es función del mes y viene dado en la tabla 3.1

Tabla 3.1.- Coeficiente C_M para cada mes

MES	C_M	MES	C_M
Enero	0.991	Julio	1.033
Febrero	1.035	Agosto	0.997
Marzo	1.036	Septiembre	0.961
Abril	1.065	Octubre	0.947
Mayo	1.038	Noviembre	0.925
Junio	1.045	Diciembre	0.968

Ejemplo 3.1.- Estime la evaporación media para el mes de Abril, por medio de todas las ecuaciones que pueda aplicar, si se tiene la siguiente información:

Temperatura media mensual = 26.9 °C
Ubicación = 2° 46' de latitud norte
Velocidad del Viento a 2 metros sobre la superficie del agua = 10 km/hora
Insolación = 80 %
Número de días de lluvia = 26
Humedad Relativa = 88%
Coeficiente de reflexión = 30%

a.- Fórmula de Lugeon.- No puede aplicarse, ya que lo que se necesita es la temperatura media máxima del mes y la dada por los datos es la media mensual, además se necesita la presión barométrica, la cual no es aportada.

b.- Fórmula de Meyer.- El único inconveniente para la utilización de la fórmula de Meyer, radica en que la velocidad que nos dan como dato es la correspondiente a 2 metros sobre la superficie del agua, y la fórmula está dada para una velocidad a 8 metros sobre la superficie del agua, esto no es inconveniente ya que a partir de la Ecuación 1.3, puede calcularse la mencionada velocidad, por tanto:

Si consideramos pastos espesos con profundidad menor de 50 cm., de la tabla 1.5, se tiene que Z_0 = 5 cm.

$$\frac{V_{8m}}{10\,\frac{Km.}{hora}} = \frac{\ln\left(\frac{800}{5}+1\right)}{\ln\left(\frac{200}{5}+1\right)} \Rightarrow V_{8m} = 13.68\,\frac{Km.}{hora}$$

Calculando e_s, para una temperatura de 26.9 °C, se obtiene:

e_s = 29 mm de Hg = 1.14 pulgadas de Hg.

Entonces: e_a = 0.88 x 29 mm de Hg = 25.52 mm de Hg = 1.005 pulg. de Hg.

E_m = 15 (1.14 - 1.01) pulgadas de Hg. (1 + 12.79 millas/hora / 10) =
4.45 pulgadas/mes = 11.29 cm/ mes = 112.9 mm/mes

c.- Fórmula de los Servicios Hidrológicos de la Antigua URSS.-

e_s = 29 mm de Hg = 21.5 milibares
e_a = 25.52 mm de Hg = 18.9 milibares
n = 30 días
V_2 = 10 Km / hora = 2.78 m/seg

E = 0.15 x 30 (21.5 - 18.9) (1 + 0.072 x 2.78) mm/mes = 14.04 mm/mes

d.- Fórmula de Chistianssen y Guillén.-

C_T = -0.490 + 0.0621 x 26.9°C = 1.18
C_H = 2.12 - 1.75 x 0.88^2 = 0.77
C_w = 0.728 + 0.0494 x 10 = 1.22
C_S = 0.53 + 0.784 x 0.80 = 1.16
C_{DP} = 1.15 - 0.15 x 26 = 0.76
C_M = 1.065

E = 2.957 x 1.18 x 0.77 x 1.22 x 1.16 x 0.76 x a.065 mm/día = 3.08 mm /día
E = 92.33 mm/mes

3.2.- Transpiración. Mecanismo de la transpiración.-

Las plantas extraen del suelo el agua que necesitan para su subsistencia. El agua penetra la planta a través de las raíces y atraviesa el tronco, ramas y llega hasta su destino final que son las hojas. Sólo diminutas porciones del agua absorbida queda en los tejidos de la planta, siendo el excedente absorbido devuelto a la atmósfera en forma de vapor a través de las hojas por medio del fenómeno conocido como **transpiración**.

3.2.1.- Factores que afectan la transpiración.-

3.2.1.1.- Factores fisiológicos.- Dependerán del tipo de planta, es decir, será función del número y del tipo de estoma, extensión y características de la capa protectora y estructura de la hoja.

3.2.1.2.- Factores Ambientales.- Estos factores son:
3.2.1.2.1.- Temperatura.
3.2.1.2.2.- Humedad de la atmósfera.
3.2.1.2.3.- Velocidad del viento.
3.2.1.2.4.- Insolación.
3.2.1.2.5.- Humedad del suelo.

3.2.2.- Medición de la transpiración.- Los procedimientos de medición se clasifican en tres categorías:

3.2.2.1.- Procedimientos basados en la medición directa del vapor de agua transpirado.

3.2.2.2.- Procedimientos basados en la medida del cambio de peso de la planta y del terreno que la alimenta.

3.2.2.3.- Procedimientos basados en la medición de cantidad de agua necesaria para la alimentación de la planta y de su transpiración.

De los estudios en numerosos tipos de cultivo y plantas se tienen las siguientes observaciones en relación a la transpiración:

1.- Variaciones diurnas de la transpiración.- Están ligadas a las variaciones de la humedad, temperatura y sobre todo de la variación de la intensidad de la luz.
2.- Variaciones estacionales.- Están ligadas a la actividad vegetativa de la planta y a las variaciones del poder de evaporación de la atmósfera.
3.- Variaciones interanuales.- Los meses de fuerte evaporación, coincide con los meses de crecimiento de las plantas, por lo que es de suponer que la transpiración aumente en este período.
4.- Influencia de la humedad del suelo.- La intensidad de la transpiración es función de la humedad del suelo, en la zona de las raíces y se anula cuando el contenido de humedad es menor al "coeficiente de marchitez permanente" , que corresponde al punto de contenido de humedad del suelo donde las plantas no son capaces de extraer el agua mínima necesaria y por tanto la planta se marchita y muere.

3.3.- Evapotranspiración

Las pérdidas de vapor de agua a partir de los suelos, representada por el fenómeno de evaporación directa del suelo y el de la transpiración a partir de la superficie de las hojas de las plantas, combinada ambas dos, es lo que se conoce como **evapotranspiración**, y es la responsable de la mayor parte de la pérdida del agua de los suelos, bajo las condiciones normales del campo. También se le conoce como **evaporación total** y su media anual sobre un largo período varía relativamente poco en grandes regiones si se consideran cuencas bastantes extensas.

3.3.1.- Evapotranspiración potencial.- Se define como aquella evapotranspiración que ocurriría si existiese siempre un suministro adecuado de humedad.

3.3.2.- Medición de la evapotranspiración.-

3.3.2.1.- Medición directa de la evapotranspiración.- Se lleva a cabo a través de aparatos llamados **lisímetros**, los cuales están formados por un depósito que se encuentra enterrado, de paredes verticales, abierto en su parte superior y relleno del terreno que se quiere estudiar hasta una decena de centímetros del borde superior, tal como se muestra en la Figura 3.6

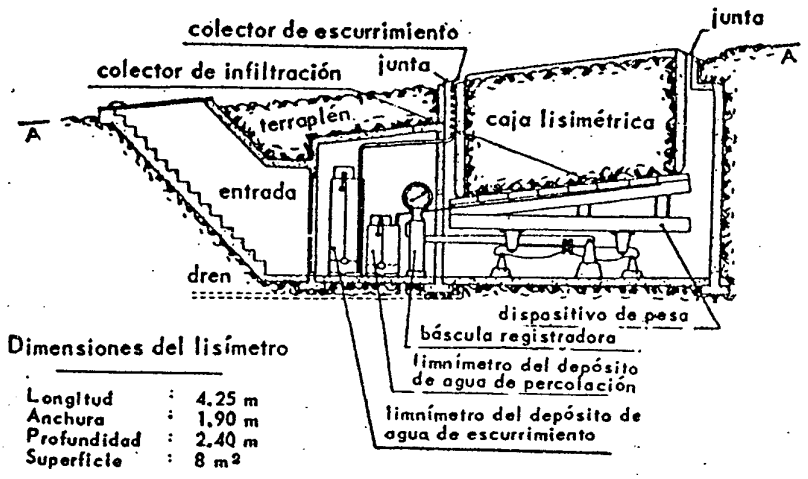


Figura 3.6.- Lisímetro

La superficie del suelo dentro del lisímetro se encuentra sometida a los agentes atmosféricos y recibe la lluvia natural. El suelo contenido en el lisímetro es drenado a un punto determinado para su medición.

3.3.2.2.- Superficies naturales de evaporación o parcelas de ensayo.-

Se elige una parcela de terreno de algunos m^2, de tal manera que el suelo sea homogéneo en superficie y profundidad. Se miden las precipitaciones y la humedad del suelo en algunos puntos de la parcela y a diferentes profundidades. Se puede determinar la variación del agua subterránea y luego la evaporación.

3.3.3.- Fórmulas empíricas para la estimación de la evapotranspiración

3.3.3.1.- Fórmula de Coutagne.-

$$(ET)_p = P - \lambda P^2 \qquad 3.10$$

donde:

$(ET)_p$ = evapotranspiración, en m/año
P = precipitación, m/año

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T} \qquad 3.11$$

T = temperatura media anual, en °C

La ecuación 3.10 es aplicable si la precipitación P está comprendida entre $1/(8\lambda)$ y $1/(2\lambda)$.

Si la precipitación es menor de $1/(8\lambda)$, la evapotranspiración es igual a la evaporación y por lo tanto no existirá escurrimiento superficial.

Si la precipitación es superior a 1/(2λ), la evapotranspiración es independiente de las mismas y la ecuación 3.10 toma nueva forma si se sustituye P = 1/(2λ):

$$(ET)_p = \frac{0.8 + 0.14T}{4} \qquad 3.12$$

3.3.3.2.- Fórmula de Turc.- Adapta 254 curvas de evapotranspiración en función de la precipitación y temperatura, observadas en diferentes cuencas, las cuales se muestran en la figura 3.7, de tal forma que la fórmula queda:

$$(ET)_p = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \qquad 3.13$$

donde :

$(ET)_p$ = evapotranspiración, mm/año

$L = 300 + 25\,T + 0.05\,T^2$ 3.14

T = temperatura media anual, en ° C.

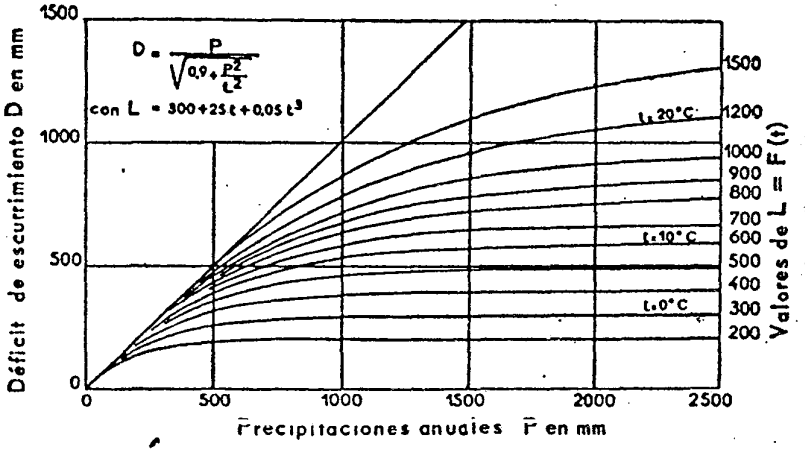


Figura 3.7.- Curvas base para la fórmula de Turc.

3.3.3.3.- Fórmula de Thornthwaite.- Data del año 1944 y se define por:

$$(ET)_p = C\, t^a \qquad 3.15$$

donde:

$(ET)_p$ = evapotranspiración potencial media mensual, en cmts.
t = temperatura media del mes,en ° C.
C y a = funciones del indice térmico anual

$$C = 1.6\left(\frac{10}{I}\right)^a \qquad 3.16$$

$$a = 6.75\text{x}10^{-7}\, I^3 - 7.71\text{x}10^{-5}\, I^2 + 1.79\text{x}10^{-2}\, I + 0.498 \qquad 3.17$$

También se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5 \qquad 3.18$$

$$I = \text{índice anual} = \sum_{i=1}^{12} i$$

i = índice mensual de temperatura, que viene dados por:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \qquad 3.19$$

En la cual t es la temperatura media mensual en grados centígrados.

La Ecuación 3.18 fue deducida para mes de 30 días y 12 horas de luz diaria, por lo tanto hay que corregir los valores de i por un coeficiente de corrección, dado por Criddle en la tabla 3.2, en función del mes y la Latitud.

Tabla 3.2.- Indice de iluminación en los hemisferios norte y sur, expresado en unidades de 30 días de 12 horas (según Criddle), para su utilización en el método de Thornthwaite.

Latitud N	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

3.3.3.4.- Fórmula de BLANNEY y CRIDDLE.- Data de 1931, basada en múltiples ensayos sobre zonas áridas y semiáridas.

$$(ET)_p = 0.01\,(45.72\,t + 812.8)\,K\,p \qquad 3.20$$

donde:

$(ET)_p$ = evapotranspiración Potencial del mes considerado, en mm.

t = temperatura media mensual en ° C.

p = Porcentaje de iluminación mensual, con respecto al año; dada por la tabla 3.3

K = Factor característico del tipo de cultivo, dado por la Tabla 3.4

Tabla 3.3.- Tanto por ciento de horas de sol diarias, Latitud de 46° al Sur a 60° al Norte.

Lat N	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep	Oct.	Nov.	Dic.
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.58
5	8.32	7.57	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.60	8.23	8.42	8.07	8.36
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.13
15	7.47	7.36	8.43	8.44	8.98	8.80	9.05	8.83	8.28	8.20	7.75	7.80
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.47
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.40	7.47
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.18
32	7.20	6.97	8.37	8.76	9.62	9.59	9.77	9.27	8.34	7.95	7.11	7.05
34	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92
36	6.99	6.85	8.36	8.85	9.82	9.82	9.99	9.40	8.37	7.85	6.92	6.79
38	6.87	6.79	8.34	8.90	9.92	9.95	10.1	9.47	8.38	7.80	6.82	6.06
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	7.52
42	6.63	6.65	8.31	9.00	10.14	10.22	10.35	9.62	8.40	7.69	6.62	6.37
44	6.49	6.58	8.30	9.06	10.26	10.38	10.49	9.70	8.41	7.63	6.49	6.21
46	6.34	6.50	8.29	9.12	10.39	10.54	10.54	9.79	8.42	7.57	6.36	6.04
48	6.17	6.41	8.27	9.18	10.53	10.71	10.80	9.89	8.44	7.51	6.23	5.87
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.99	10.00	8.46	7.45	6.10	5.65
52	5.77	6.19	8.21	9.29	10.85	11.13	11.20	10.12	8.49	7.39	5.93	5.43
54	5.55	6.08	8.18	9.36	11.03	11.38	11.43	10.26	8.51	7.30	5.18	5.74
56	5.30	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.40	8.53	7.21	5.54	4.89
58	5.01	5.81	8.12	9.55	11.46	12.00	11.98	10.55	8.55	7.10	4.31	4.56
60	4.67	5.65	8.04	9.65	11.74	12.39	12.31	10.7	8.57	6.98	5.04	4.22

Lat S	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep	Oct.	Nov.	Dic.
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.58
5	8.68	7.76	8.51	8.15	8.34	8.05	8.33	8.38	8.19	8.56	8.37	8.63
10	8.86	7.87	8.53	8.09	8.18	7.86	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.85
15	9.05	7.98	8.55	8.02	8.02	7.95	7.95	8.15	8.15	8.68	8.70	9.18
20	9.24	8.09	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	8.13	8.76	8.87	9.38
25	9.46	8.21	8.60	7.84	7.66	7.20	7.54	7.90	8.11	8.86	9.04	9.58
30	9.70	8.33	8.62	7.73	7.45	6.96	7.31	7.76	8.07	8.97	9.24	9.85
32	9.81	8.39	8.63	7.69	7.36	6.85	7.21	7.70	8.06	9.01	9.33	9.96
34	9.92	8.45	8.64	7.64	7.27	6.74	7.10	7.63	8.05	9.06	9.42	10.08
36	10.03	8.51	8.65	7.59	7.18	6.62	6.90	7.56	8.04	9.11	9.51	10.21
38	10.15	8.57	8.66	7.54	7.08	6.50	6.87	7.49	8.03	9.16	9.61	10.34
40	10.27	8.63	8.67	7.49	6.97	6.37	6.76	7.41	8.02	9.21	9.71	10.49
42	10.40	8.70	8.68	7.44	6.85	6.23	6.64	7.33	8.01	9.26	9.82	10.64
44	10.54	8.78	8.69	7.38	6.73	6.08	6.51	7.25	7.99	9.31	9.94	10.80
46	10.69	8.86	8.70	7.32	6.61	5.92	6.37	7.16	7.96	9.37	10.07	10.97

Tabla 3.4.- Coeficiente anual de evapotranspiración de regadío, K, más importantes en el Oeste de los Estados Unidos (Según Criddle)

CULTIVO	LONGITUD DEL PERIODO VEGETATIVO	COEFICIENTE DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (K)
Alfalfa	Período libre heladas	0.85
Algodón	7 meses	0.70
Arroz	3 - 4 meses	1.00
Leguminosas para grano	3 meses	0.75
Frutales de hoja caduca	Periodo libre heladas	0.65
Frutales Cítricos	7 meses	0.60
Judías	3 meses	0.65
Maíz	4 meses	0.75
Praderas	Período libre heladas	0.75
Remolacha Azucarera	5.5 meses	0.70
Sorgo	5 meses	0.70

3.3.3.5.- Fórmula de Penman.-

$$E = \frac{\Delta Q_n + 0.486 E_a}{\Delta + 0.486} \qquad 3.21$$

donde:

E = evapotranspiración, en mm/día

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor de agua, dada por la
Figura 3.8

E_a = evaporación, en mm/día = 0.35 (0.5 + 0.54 V_2) (e_s - e_2) 3.22

V_2 = velocidad del viento a 2 metros de la superficie del agua, en m/seg.

e_s = presión de vapor de agua saturado, en mm de Hg, la cual puede ser estimada en función de la temperatura, a partir de la figura 3.9.

e_2 = presión de vapor de agua a 2 metros de la superficie del agua, en mm de Hg.

$Q_n = R_g - R_e$ 3.23

R_g = radiación solar recibida (rad. reflejada/rad. actuante)

$$R_g = R\left(a+b\frac{n}{N}\right)(1-r) \qquad 3.24$$

a = 0.29 Cos θ

θ = latitud del sitio.

b = 0.48

r = coeficiente de radiación de la superficie

n = horas de sol para el período considerado

N = horas de sol máximas al día

R = radiación térmica extraterrestre, de acuerdo a la Tabla 3.5

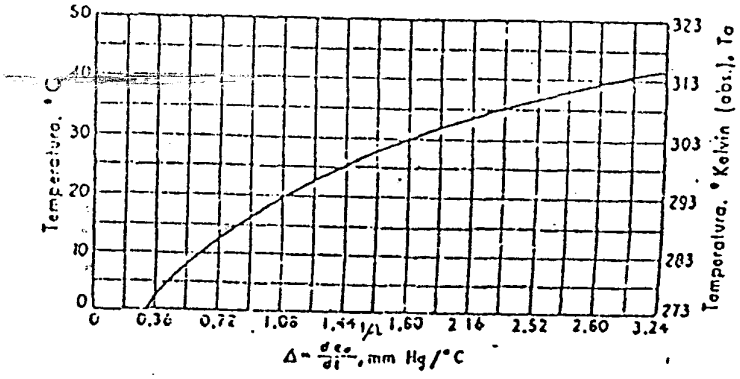


Figura 3.8.- La temperatura en función de la variable Δ.

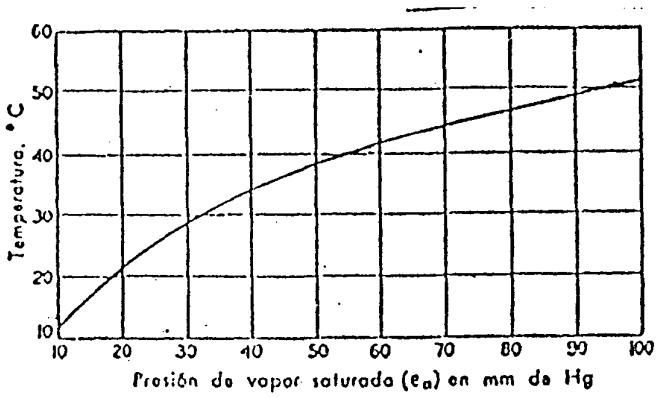


Figura 3.9.- Temperatura en función de la presión de vapor saturado.

Tabla 3.5.- Intensidad media mensual de la radiación solar (R), que mide sobre una superficie horizontal, en mm de agua evaporada por día (Según Criddle).

	Hemisferio Norte									
	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°
Enero	-	-	-	1.3	3.6	6.0	8.5	10.8	12.8	14.5
Febrero	-	-	1.1	3.5	5.9	8.3	10.5	12.3	13.9	15.0
Marzo	-	1.8	4.3	6.8	9.1	11.0	12.7	13.9	14.8	15.2
Abril	7.9	7.8	9.1	11.1	12.7	13.9	14.8	15.2	15.2	14.7
Mayo	14.9	14.6	13.6	14.6	15.4	15.9	16.0	15.7	15.0	13.9
Junio	18.1	17.8	17.0	16.5	16.5	16.5	15.8	14.8	13.4	11.6
Julio	16.8	16.5	15.8	15.8	16.1	16.3	16.2	15.7	14.8	13.5
Agosto	11.2	10.6	11.4	12.7	13.9	14.8	15.3	15.3	15.0	14.2
Septiembre	4.5	4.0	6.8	8.5	10.5	12.2	13.5	14.4	14.9	14.9
Octubre	-	0.2	2.4	4.7	7.1	9.3	11.3	12.9	14.1	15.0
Noviembre	-	-	0.1	1.9	4.3	6.7	9.1	11.2	13.1	14.6
Diciembre	-	-	-	0.9	3.0	5.5	7.9	10.3	12.4	14.3

	Hemisferio Sur									
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Enero	14.5	15.8	16.8	17.3	17.3	17.1	16.6	16.5	17.3	17.6
Febrero	15.0	15.7	16.0	15.8	15.2	14.1	12.7	11.2	10.5	10.7
Marzo	15.2	15.1	14.6	13.6	12.2	10.5	8.4	6.1	3.6	1.9
Abril	14.7	13.8	12.5	10.8	8.8	6.6	4.3	1.9	-	-
Mayo	13.9	12.4	10.7	8.7	6.4	4.1	1.9	0.1	-	-
Junio	11.6	9.6	7.4	5.1	2.8	0.8	-	-	-	-
Julio	13.5	11.9	10.0	7.8	5.6	4.3	1.2	-	-	-
Agosto	14.2	13.0	11.5	9.6	7.5	5.2	2.9	0.8	-	-
Septiembre	14.9	14.4	13.5	12.1	10.5	8.5	6.2	3.8	1.3	-
Octubre	15.0	15.3	15.3	14.8	13.8	12.5	10.7	8.8	7.1	7.0
Noviembre	14.6	15.7	16.4	16.7	16.5	16.0	15.2	14.5	15.0	15.3
Diciembre	14.3	15.8	16.9	17.6	17.8	17.8	17.5	18.1	18.9	19.3

Cálculos basados en el "Manual of Meteorology", de Napier Shaw, vol. II , Comparative Meteorology, 2da. Edición, Cambridge University Press 1936, pags. 4 y 5.

R_e = radiación emitida = $\sigma\, T_a^4 \left(0.56 - 0.092\sqrt{e_s}\right)\left(0.1 + 0.9\,\frac{n}{N}\right)$ 3.25

El término $\sigma\, T_a^4$, se obtiene de la Tabla 3.6, en función de T_a, que representa la temperatura absoluta, de donde:

Tabla 3.6.- $\sigma\, T_a^4$ en función de la temperatura absoluta.

Temperatura °Absolutos	$\sigma\, T_a^4$ (mm agua/día)	Temperatura °Centígrados	$\sigma\, T_a^4$ (mm agua/día)
270	10.73	1.67	11.48
275	11.51	4.45	11.96
280	12.40	7.23	12.45
285	13.20	10.00	12.94
290	14.26	12.78	13.45
295	15.30	15.56	13.96
300	16.34	18.34	14.52
305	17.46	21.12	15.10
310	18.60	23.89	15.65
315	19.85	25.56	16.25
320	21.15	29.45	16.85
325	22.50	32.33	17.46
		35.00	18.10
		37.78	18.80

NOTA: Se supone el calor de evaporación constante e igual a 590 calorías.

Ejemplo 3.2.- Estime la evapotranspiración potencial, a partir de las fórmulas de Thornthwaite y de la de Blanney y Criddle, para una zona sembrada de 35% de Sorgo, 25% de Granos y 40% de maíz. La zona se encuentra a
0° 30' de Latitud Norte. La temperatura media para cada mes se da a continuación:

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
T (°C)	19.7	20.1	21.5	23.0	23.1	23.6	24.5	24.3	24.1	23.1	22.0	20.0

1.- Fórmula de Thornthwaite.- Para 0°30', y a partir de la Tabla 3.2, se estima el valor del coeficiente de corrección de i para cada mes, así:

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Fc	0.38	0.939	1.04	1.011	1.012	1.013	1.042	1.042	1.011	1.039	1.01	1.038

Se tiene entonces:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
i	3.03	7.72	9.46	10.19	10.27	10.62	11.55	11.41	11.14	10.54	9.52	8.47

I = 113.92

$a = 6.75\times10^{-7} \times 113.92^3 - 7.71\times10^{-5} \times 113.92^2 + 1.79\times10^{-2} \times 113.92 + 0.498 = 2.53$

ó

$a = (1.6/100)\ 113.92 + 0.5 = 2.32$

Para los cálculos se tomará el valor de 2.53

$$(ET)_p = 1.6\left(\frac{10\,t}{113.92}\right)^{2.53} = 0.00336\ t^{2.53}$$

MES	TEMPERATURA (°C)	EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm)
Enero	19.7	6.33
Febrero	20.1	6.66
Marzo	21.5	7.89
Abril	23.0	9.36
Mayo	23.1	9.46
Junio	23.6	9.99
Julio	24.5	10.98
Agosto	24.0	10.43
Septiembre	24.1	10.54
Octubre	23.1	9.46
Noviembre	22.0	8.37
Diciembre	20.0	6.57

2.- Fórmula de Blanney y Criddle.- Es la Ecuación 3.20, donde:

$$(ET)_p = 0.01\ (45.72\ t + 812.8)\ K\ p$$

El valor de K se estima a partir de la Tabla 3.4, donde:

Sorgo, K = 0.70
Maíz, K = 0.75
Granos, K = 0.75

$$K = 0.35 \times 0.70 + 0.40 \times 0.75 + 0.25 \times 0.75 = 0.77$$

El valor de p, se estima a partir de la Tabla 3.3, donde:

MES	TEMPERATURA (°C)	P	$(ET)_P$
Enero	19.7	8.48	111.9
Febrero	20.1	7.66	105.9
Marzo	21.5	8.49	111.4
Abril	23.0	8.22	118.0
Mayo	23.1	8.52	122.6
Junio	23.6	8.24	120.0
Julio	24.5	8.52	126.8
Agosto	24.0	8.50	125.9
Septiembre	24.1	8.21	121.0
Octubre	23.1	8.49	122.2
Noviembre	22.0	8.21	115.0
Diciembre	20.0	8.49	112.9

3.4.- Balance hídrico y déficit de escurrimiento medio anual

El **balance hídrico** en un suelo, no es mas que el análisis de las entradas y salidas que presenta el sistema que se está estudiando, para determinar cuando existe un excedente o cuando hay déficit dentro del mismo.

El análisis para un período considerado se estima a partir de la Ley de conservación de la masa, la cual nos dice:

$$(\text{Entradas} - \text{Salidas})_i = \text{Almacenamiento}_i \qquad 3.26$$

Las entradas del sistema se encuentran formado por:

a.- Aportes dentro del período considerado: Precipitaciones, P.
b.- Aportes procedentes del período precedente:
b.1.- Agua subterráneas y humedad del suelo.
b.2.- Nieve y glaciares.

La suma de estos dos últimos recursos, las denotaremos por R.

Las salidas del sistema son:

a.- Escurrimiento del período considerado, Q.
b.- Evapotranspiración del período considerado, D.
c.- Recursos acumulados al final del período considerado, $R + \Delta R$

Si manejamos que las entradas deben ser iguales a las salidas para que exista equilibrio, se tiene:

$$P + R = Q + D + R + \Delta R$$
$$P = Q + D + \Delta R$$

ΔR = Representa el almacenamiento de humedad en el suelo, para el período considerado.

La humedad del suelo es la cantidad de agua que ha quedado retenida en los espacios de vacíos de la masa de suelo sobre la cual ha de infiltrar la precipitación. Cuando los espacios de vacíos de ese suelo están secos, no existe humedad en el suelo y toda la precipitación que cae, antes de comenzar a escurrir comenzará a llenar estos espacios de vacíos. Si la precipitación continúa y logra llenar todos los espacios de vacíos disponibles es cuando comienza a existir escurrimiento, de lo contrario no se tiene.

$$D = P - Q - \Delta R$$

que es la misma ecuación 3.26 con la que se había dado inicio a este tema.

Para la estimación del déficit mensual y llegar a cifras correctas, deben tomarse en cuanta las relaciones de un mes con el otro, mediante el valor de ΔR.

Para realizar el balance hídrico a un suelo, se aplica el método de Thornthwaite, el cual es el siguiente:

1.- Se calcula para cada mes del año a considerar, la evapotranspiración potencial.

2.-Se calcula la evapotranspiración real de la manera siguiente:
a.- Si la precipitación en el período considerado es mayor que la evapotranspiración potencial, se tiene entonces:

$(ET)_r = (ET)_p$

El excedente de la precipitación se almacena como humedad del suelo, ΔR, cuyas reservas aumentan hasta que éste se satura. El excedente que siga llegando una vez que se sature el suelo, pasa a ser el escurrimiento superficial, Q.
b.- Si la precipitación del período considerado es inferior a la evapotranspiración potencial, entonces:
b.1.- Si el almacenamiento de humedad en el suelo,ΔR, es suficiente para abastecer la insuficiencia de la precipitación, se tiene que:

$(ET)_r = (ET)_P$

b.2.- Si el almacenamiento de humedad del suelo, ΔR, es insuficiente para satisfacer la evapotranspiración potencial; la evapotranspiración real es inferior a la potencial y será la suma de la precipitación disponible en el período considerado más las reservas disponibles, es decir:

$(ET)_r = P + \Delta R$

3.- Existirá déficit en aquellos períodos donde, la precipitación no haya sido suficiente para lograr la saturación o el máximo valor de ΔR, se calcula el déficit de agua como:

Déficit $= (ET)_P - (ET)_r$

4.- Existirá excedente, en aquellos períodos en que la precipitación fue capaz de cubrir el máximo valor de ΔR y además cubrió la evapotranspiración potencial, que en este caso es la misma evapotranspiración real. El excedente se calcula como:

Excedente$_i$ = $Qi = (P - (ET)_r - \Delta R)_i$

Ejemplo 3.3.- Se tiene una cuenca ubicada a 8° 35' de Latitud Norte, sembrada de 30% de maíz, 20% de sorgo y 25% de arroz, el resto corresponde a praderas y zonas de pastos. Establezca el equilibrio hídrico en el suelo, calculando el déficit, excedente y evapotranspiración real, si se supone una capacidad de almacenamiento del suelo de 150 mm. A comienzos del mes de Enero las reservas están agotadas. A continuación se dan las temperaturas medias mensuales:

MES	TEMPERATURA (°C)	PRECIPITACIÓN (mm)
Enero	26.0	92.0
Febrero	27.8	96.0
Marzo	31.2	100.0
Abril	30.9	134.0
Mayo	34.5	246.0
Junio	38.3	258.0
Julio	39.3	250.0
Agosto	37.8	189.0
Septiembre	32.6	115.0
Octubre	31.7	89.0
Noviembre	30.0	74.0
Diciembre	29.2	62.0

1.- Se calcula la evapotranspiración potencial para cada mes. Aplicamos la ecuación 3.20 de Blanney-Criddle, de donde:

De la tabla 3.4, para cada uno de los porcentajes de siembra que se tiene, queda:

$$K = 0.75 \times 0.30 + 0.70 \times 0.20 + 1.00 \times 0.25 + 0.75 \times 0.25 = 0.803$$

Al aplicar la ecuación, nos queda:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct.	Nov.	Dic.
$(ET)_p$ (mm)	131.5	125.5	152.1	149.2	168.3	176.0	184.6	177.1	152.4	151.3	139.6	141.1

2.- Se calcula la evapotranspiración real, el excedente y el déficit, mediante la siguiente tabla:

MES	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
P (mm)	62.0	86.0	100.0	134.0	246.0	258.0
$(ET)_p$ (mm)	131.5	125.5	152.1	149.2	168.3	176.0
$P - (ET)_p$	- 69.5	- 39.5	- 52.1	- 15.2	77.7	82.0
ΔR	--	--	--	--	77.7	82.0
R (mm)	0	0	0	0	77.7	150.0
$(ET)_r$	62.0	86.0	100.0	134.0	168.3	176.0
DEFICIT (mm)	69.5	39.5	52.1	15.2	--	--
EXCEDENTE (mm)	--	--	--	--	--	9.7

MES	Jul.	Agos.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
P (mm)	250.0	189.0	115.0	89.0	74.0	62.0
$(ET)_p$ (mm)	184.6	177.1	152.4	151.3	139.6	141.1
$P - (ET)_p$	65.4	11.9	- 37.4	- 62.3	- 65.6	- 79.1
ΔR	--	--	- 37.4	- 62.3	- 50.3	--
R (mm)	150	0	112.6	50.3	0	0
$(ET)_r$	184.6	177.1	152.4	151.3	124.3	62.0
DEFICIT (mm)	--	--	--	--	15.3	79.1
EXCEDENTE (mm)	65.4	11.9	--	--	--	--

Tal como puede verse en la tabla, en los meses de enero, febrero, marzo y abril, la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación; y como, además, no hay reservas en el suelo, la evapotranspiración real se hace igual a la precipitación, mientras que el faltante pasa a ser déficit.

En los meses de mayo, junio, julio y agosto, la precipitación supera a la evapotranspiración potencial, por lo tanto la evapotranspiración real se hace igual a la potencial. La diferencia entre la precipitación potencial y la precipitación se almacena en el suelo hasta alcanzar su máxima capacidad, lo que se produce durante el mes de junio. A partir de ese momento dicha diferencia pasa a ser excedente.

En los meses de septiembre, octubre y diciembre la precipitación vuelve a ser menor que la evapotranspiración potencial, pero en esta ocasión hay una cierta reserva en el suelo. Así, el faltante necesario para cubrir la evapotranspiración potencial se obtiene del almacenamiento hasta que éste se agota en el mes de noviembre. A partir de ese momento la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial vuelve a ser de déficit.

Los valores globales son:

Deficit total anual = 270.7 mm

Excedente total anual = 87.0 mm

$(ET)_r$ = 1223.8 mm