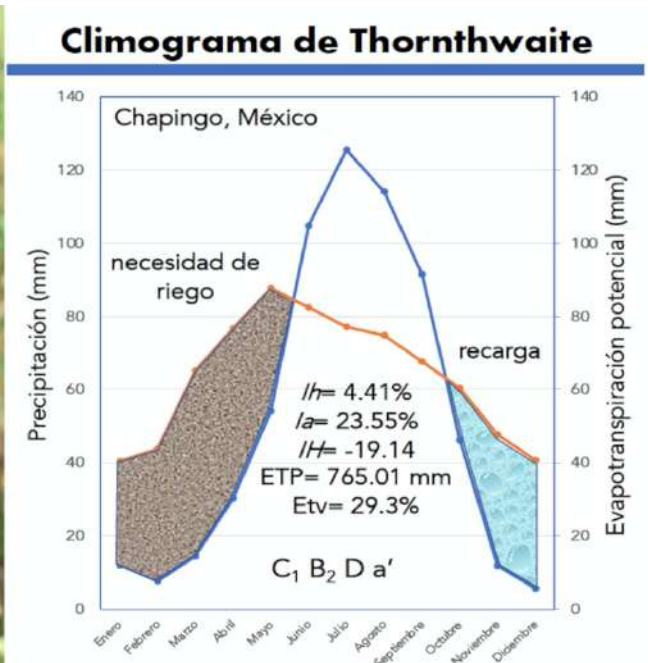
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE PREPARATORIA AGRÍCOLA
ÁREA DE AGRONOMIA

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP) POR EL MÉTODO DE THORNTHWAITE



SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Sistemas de Producción Agrícola

Elías Jaime Matadamas Ortiz

En este trabajo abordaremos paso a paso el procedimiento para el cálculo de la **evapotranspiración potencial** (ETP) por el método de Thornthwaite que, aunque es muy sencillo de realizar, a menudo se dificulta debido a las diversas operaciones que se precisan hacer.

Evapotranspiración potencial (ETP)

La evapotranspiración potencial es la cantidad total de agua que se perderá en una superficie completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo; a causa de la evaporación del agua de la superficie del suelo y de la transpiración de los tejidos vegetales, si en todo momento existe en el suelo la humedad suficiente para su uso máximo por las plantas, y por efecto de la energía radiante del sol.

A partir de este concepto básico podemos calcular la ETP de cualquier sitio que cuente con registros de **temperatura** y **precipitación pluvial** generados en una estación meteorológica. Estos datos deben ser el promedio de una serie histórica de, al menos, unos treinta años para que los resultados puedan ser útiles a la hora de tomar decisiones prácticas en el manejo agronómico de los sistemas de producción agrícola.

Para nuestros propósitos, tomaremos como ejemplo los datos climatológicos de una de las varias estaciones meteorológicas que operan en la sede central de la Universidad Autónoma Chapingo, y que son monitoreadas por el **Servicio Meteorológico Nacional**, el cual depende de la **Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)**. En la página electrónica del mencionado servicio, podemos descargar esta información de las localidades que cuentan con una estación meteorológica. No obstante, siendo nuestro territorio vasto, existen muchas localidades agrícolas de las cuales no tenemos registros. En tal caso, podemos seleccionar una localidad próxima a nuestro sitio de estudio (que si cuente con una estación) para trabajar con esos datos.

Datos de temperatura y precipitación pluvial de la estación Chapingo, México.

Localidad: Chapingo, Estado de México.													
Localización: Latitud 19° 29' 5.7'' Longitud 98° 53' 11''													
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
T	13.1	14.4	16.7	18.3	19.0	18.5	17.5	17.5	17.2	16.2	14.7	13.3	**16.4**
P	12.1	7.7	14.5	30.3	54.2	104.8	125.5	114.1	91.5	46.2	11.9	5.7	**618.5**

1. Calcular el índice de calor para cada mes (i).

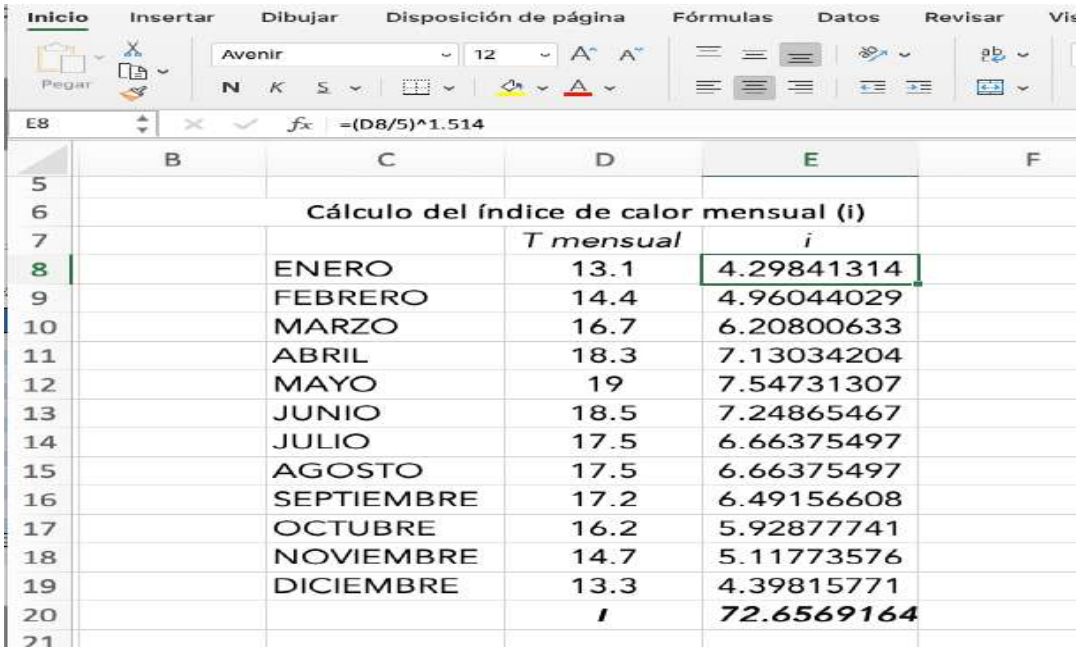
Para calcular el índice de calor mensual (i), utilizamos la siguiente fórmula:

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

Donde, t = temperatura media del mes que estamos calculando. Así, para el mes de enero tenemos que:

$$i = \left(\frac{13.1}{5}\right)^{1.514} = 4.298413$$

Debemos calcular este índice de calor para todos los meses de año. Los cálculos los podemos realizar manualmente o bien utilizar una hoja de cálculo de Excel, lo cual resulta más práctico y fácil:



	B	C	D	E	F
5					
6		Cálculo del índice de calor mensual (i)			
7			*T mensual*	*i*	
8		ENERO	13.1	4.29841314	
9		FEBRERO	14.4	4.96044029	
10		MARZO	16.7	6.20800633	
11		ABRIL	18.3	7.13034204	
12		MAYO	19	7.54731307	
13		JUNIO	18.5	7.24865467	
14		JULIO	17.5	6.66375497	
15		AGOSTO	17.5	6.66375497	
16		SEPTIEMBRE	17.2	6.49156608	
17		OCTUBRE	16.2	5.92877741	
18		NOVIEMBRE	14.7	5.11773576	
19		DICIEMBRE	13.3	4.39815771	
20			*I*	***72.6569164***	
21					

2. Calcular el índice de calor anual (*I*).

El índice de calor anual (*I*) resulta de la sumatoria de los índices de calor de cada uno de los meses del año:

$$I = \sum_{1}^{12} i$$

En nuestro ejemplo el índice de calor anual se calcula de la siguiente forma:

$$I = (4.29841 + 4.96044 + \ldots 5.11773 + 4.39815) = 72.6569164$$

Por medio de la hoja de cálculo Excel solo es necesario introducir la operación sumatoria y seleccionar los valores a sumar.

3. Calcular el coeficiente experimental de ajuste o también llamado constante de calor (a).

Este coeficiente se calcula utilizando el valor del índice de calor anual (*I*) y por medio de la siguiente fórmula:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0.017925 \times I + 0.49239$$

En nuestro ejemplo al sustituir el valor del índice de calor anual en la fórmula queda:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} (72.6569164)^3 - 7.71 \times 10^{-5} (72.6569164)^2 + 0.017925 (72.6569164) + 0.49239$$

$$a = 1.646654$$

4. Calcular la evapotranspiración potencial mensual sin ajustar ($ETP_{sin\ ajustar}$).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual sin ajustar para cada mes del año, o también llamada como ETP sin corregir, procedemos a utilizar la siguiente fórmula:

$$ETP\ sin\ ajustar = 16\left(\frac{10\ t}{I}\right)^a$$

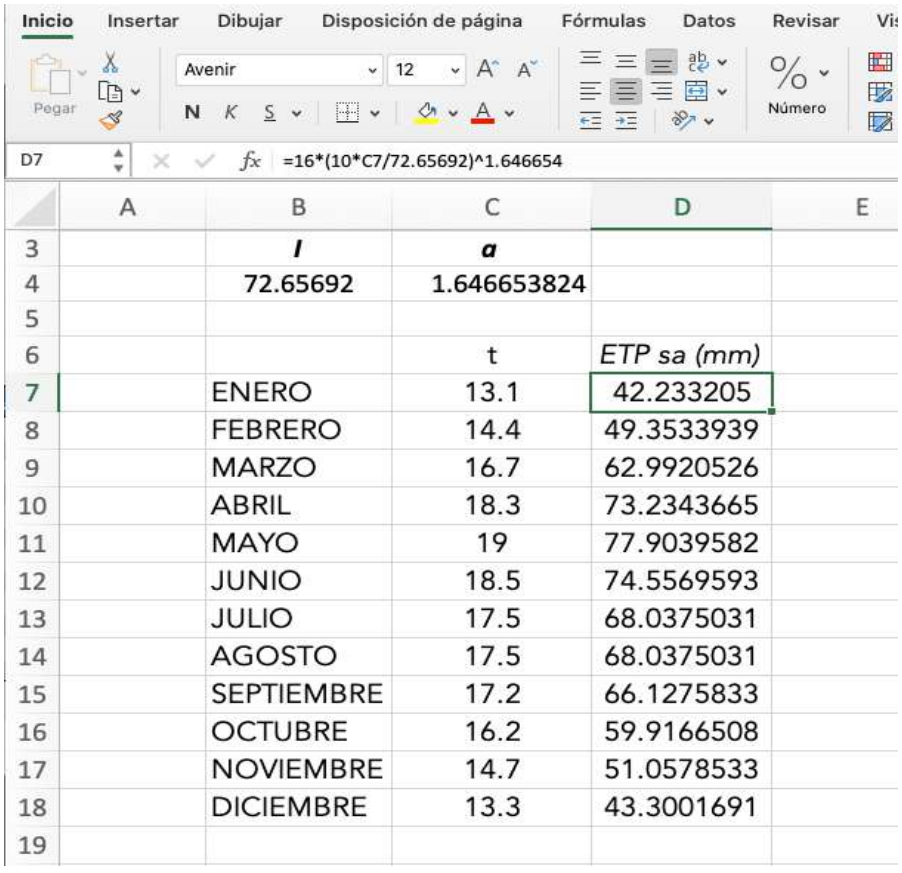
ETP sin ajustar = Evapotranspiración potencial mensual sin ajuste (mm).
t = Temperatura media del mes que estamos calculando (°C).
I = Índice de calor anual.
a = Constante de calor.

Esta fórmula nos calcula el valor de la evapotranspiración potencial sin ajuste para cada mes en milímetros (mm), si queremos este valor en centímetros (cm), lo debemos dividir entre 10. (10 mm = 1 cm).

En el ejemplo que estamos utilizando, para el mes de enero, al sustituir valores en la fórmula tenemos:

$$ETP\ sin\ ajustar = 16\left(\frac{10\ x\ 13.1}{72.6569164}\right)^{1.646654} = 42.233205\ mm$$

Al hacer las operaciones se debe tener en cuenta que en primer lugar se deben hacer las operaciones que están entre paréntesis, luego resolver la potencia y finalmente la multiplicación por 16. Así mismo, si estamos utilizando una hoja de cálculo Excel, debemos tener cuidado de introducir correctamente la función (*fx*):



	A	B	C	D	E
3		***I***	***a***		
4		72.65692	1.646653824		
5					
6			t	*ETP sa (mm)*	
7		ENERO	13.1	42.233205	
8		FEBRERO	14.4	49.3533939	
9		MARZO	16.7	62.9920526	
10		ABRIL	18.3	73.2343665	
11		MAYO	19	77.9039582	
12		JUNIO	18.5	74.5569593	
13		JULIO	17.5	68.0375031	
14		AGOSTO	17.5	68.0375031	
15		SEPTIEMBRE	17.2	66.1275833	
16		OCTUBRE	16.2	59.9166508	
17		NOVIEMBRE	14.7	51.0578533	
18		DICIEMBRE	13.3	43.3001691	
19					

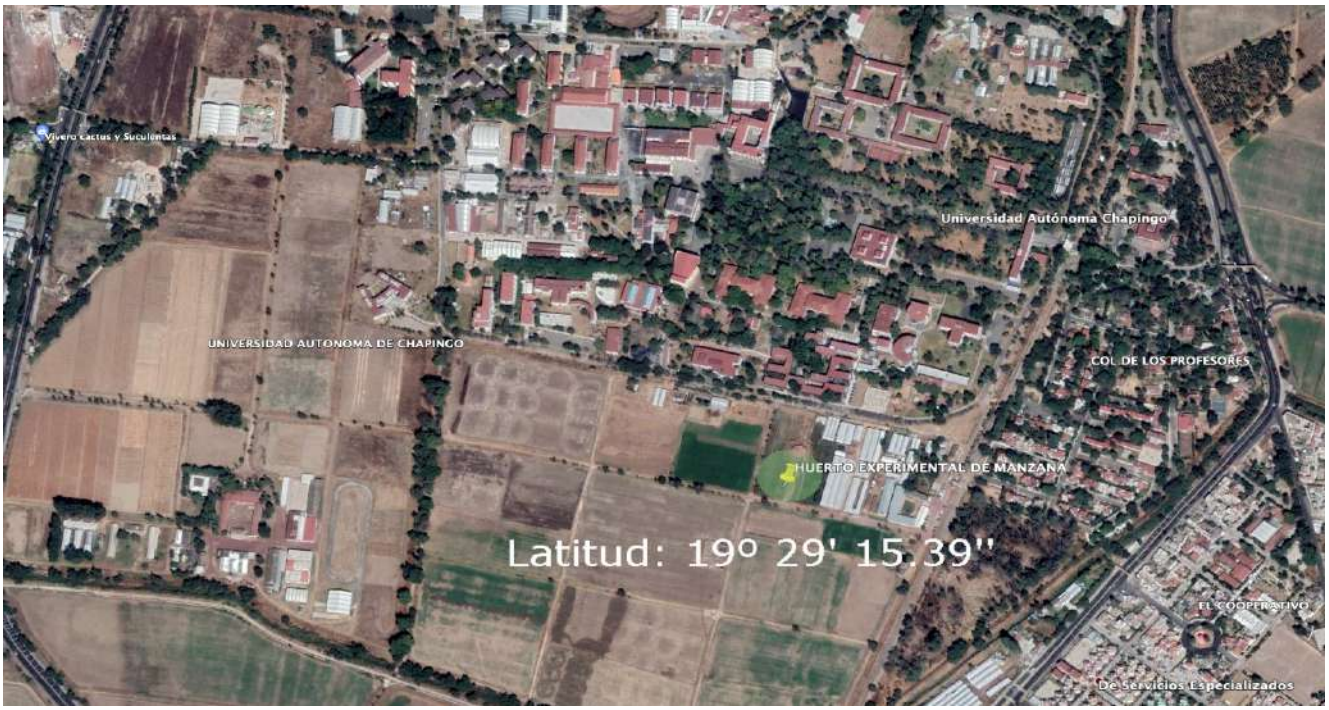
5. Obtener los valores del número máximo de horas de insolación diarias para el sitio de estudio que dependen de la latitud y del mes del año (*N*).

Los valores de *N* los obtenemos de la siguiente tabla:

Número máximo diario de horas de sol según latitud Norte en h/d.

Lat.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
0º	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
5º	11.9	12.0	12.1	12.2	12.4	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
10º	11.6	11.8	12.1	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.2	11.9	11.7	11.5
15º	11.4	11.6	12.1	12.4	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
20º	11.1	11.4	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
25º	10.8	11.3	12.0	12.8	13.4	13.7	13.6	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
30º	10.5	11.1	12.0	12.9	13.7	14.1	13.9	13.2	12.4	11.5	10.7	10.2
35º	10.2	10.9	12.0	13.1	14.1	14.6	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
40º	**9.7**	**10.6**	**12.0**	**13.3**	**14.4**	**15.0**	**14.7**	**13.7**	**12.5**	**11.2**	**10.0**	**9.4**
45º	**9.2**	**10.4**	**11.9**	**13.6**	**14.9**	**15.6**	**15.3**	**14.1**	**12.5**	**11.0**	**9.5**	**8.8**
50º	8.6	10.1	11.9	13.8	15.5	16.3	15.9	14.5	12.6	10.8	9.1	8.1
55º	7.7	9.6	11.8	14.2	16.4	17.5	17.0	15.1	12.7	10.4	8.4	7.2
60º	6.8	9.1	11.8	14.6	17.2	18.7	18.0	15.6	12.7	10.1	7.6	6.3

Nuestro sitio de estudio se localiza en el Campo Experimental "San Ignacio" de la Preparatoria Agrícola y más precisamente en el Huerto Experimental de manzana (*Malus pumila* L.):



En principio, podríamos haber tomado las coordenadas de la localización de la estación meteorológica, pero para lograr mayor exactitud hemos decidido ubicarnos en nuestra parcela de estudio que tiene una latitud de 19º 29′ 15.39′′.

Estas coordenadas geográficas en grados, minutos y segundos deben ser transformadas a coordenadas decimales de la siguiente manera:

Los segundos se dividen entre 60 para obtener los minutos.

Minutos = (15.39′′ / 60) = 0.2565

La fracción de minutos resultantes la sumamos a los minutos de la coordenada:

29 + 0.2565 = 29.2565′

La suma de los minutos se divide entre 60 para obtener los grados.

Grados = (29.2565′ / 60) = 0.4876

La fracción de grados resultantes la sumamos a los grados de la coordenada:

19 + 0.4876 = 19.4876º

Con las coordenadas transformadas a decimales podemos recurrir a la Tabla de valores del número máximo de horas diarias de insolación que dependen de la latitud y del mes (*N*). No obstante, esta tabla solo nos proporciona los valores para cada uno de los meses del año a valores de latitud que van cada 5 grados, es decir, para nuestro ejemplo, los valores de 15 y 20º, y nuestra latitud es de 19.4876º.

En este punto debemos hacer una **interpolación** con la ayuda de la siguiente fórmula:

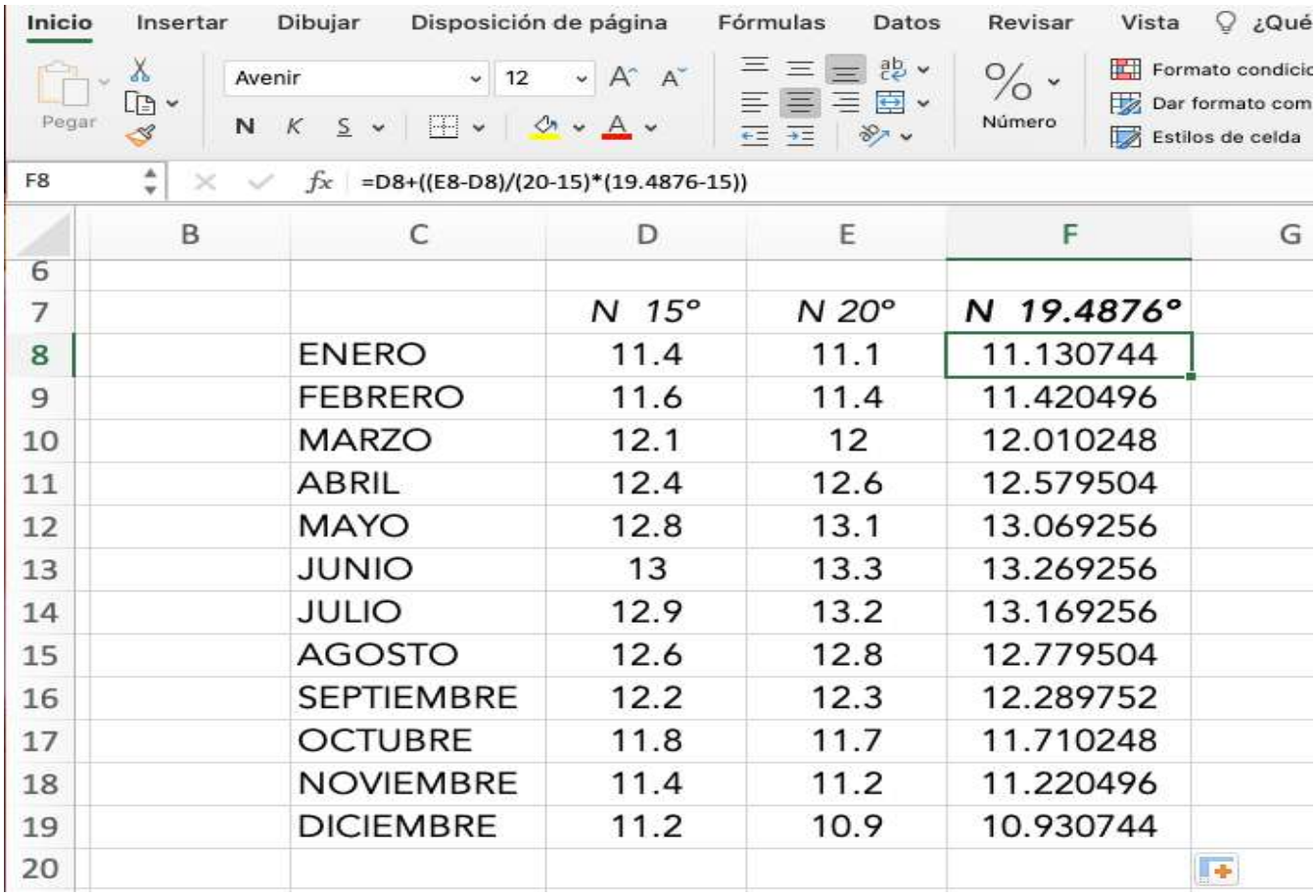
$$y = y0 + \left(\frac{y1 - y0}{x1 - x0}\right)(x - x0)$$

y = Valor de N buscado.
y_0 = Valor de N a la latitud menor de la tabla.
y_1 = Valor de N a la latitud mayor de la tabla.
x_0 = Latitud menor de la tabla.
x_1 = Latitud mayor de la tabla.
x = Latitud del sitio de estudio.

Para el mes de enero en nuestro ejemplo, el valor de N es:

$$y = 11.4 + \left(\frac{11.1 - 11.4}{20 - 15}\right)(19.4876 - 15) = 11.130744$$

Este procedimiento se realiza para todos los meses del año, y al utilizar una hoja de cálculo de Excel tenemos:



	B	C	D	E	F	G
6						
7			*N 15°*	*N 20°*	***N 19.4876°***	
8		ENERO	11.4	11.1	11.130744	
9		FEBRERO	11.6	11.4	11.420496	
10		MARZO	12.1	12	12.010248	
11		ABRIL	12.4	12.6	12.579504	
12		MAYO	12.8	13.1	13.069256	
13		JUNIO	13	13.3	13.269256	
14		JULIO	12.9	13.2	13.169256	
15		AGOSTO	12.6	12.8	12.779504	
16		SEPTIEMBRE	12.2	12.3	12.289752	
17		OCTUBRE	11.8	11.7	11.710248	
18		NOVIEMBRE	11.4	11.2	11.220496	
19		DICIEMBRE	11.2	10.9	10.930744	
20						

6. Calcular el coeficiente de ajuste del número máximo de horas diarias de insolación (N/12) para cada mes del año.

Para calcular este coeficiente (N/12) solo basta con dividir los valores de N entre 12. Así para el mes de enero de nuestro caso tenemos:

N/12 = 11.130744 / 12 = 0.927562

7. Calcular el coeficiente de ajuste para el número de días del mes (d/30) para cada mes del año.

Para calcular este coeficiente (d/30) solo tenemos que dividir el número de días que trae el mes que estamos calculando entre 30. Para el mes de enero que tiene 31 días tenemos:

$$d/30 = 31 / 30 = 1.0333333$$

8. Calcular la evapotranspiración potencial (ETP) para cada mes del año.

Finalmente, para el cálculo de la evapotranspiración potencial de cada mes del año vamos a utilizar la siguiente fórmula:

$$ETP = ETP\ sin\ ajustar \left(\frac{N}{12}\right)\left(\frac{d}{30}\right)$$

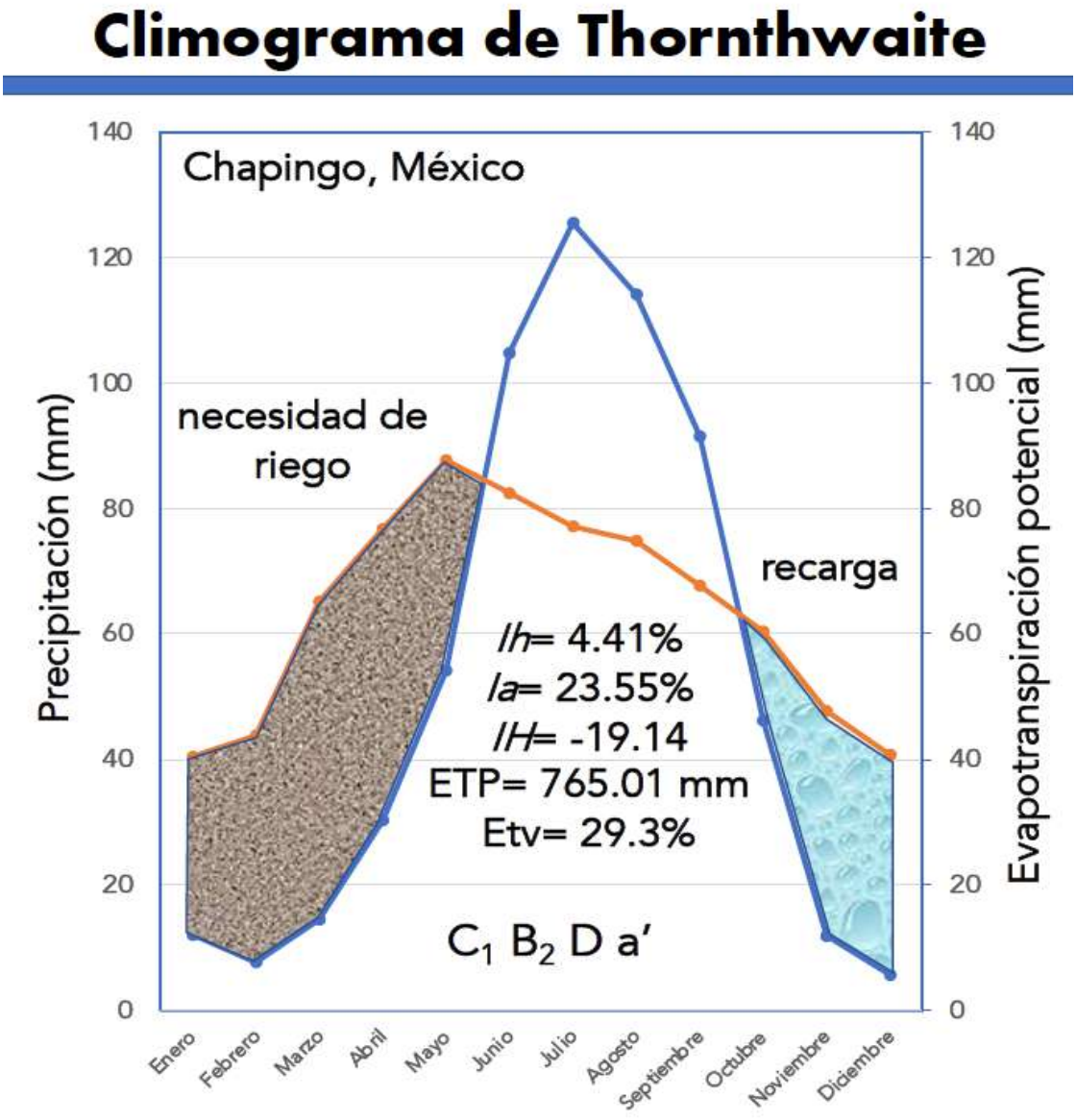
Para el mes de enero de nuestro ejemplo al sustituir en la fórmula tenemos:

$$ETP = (42.233205)\ (0.927562)\ (1.0333333) = 40.\ 4797119\ mm$$

Evapotranspiración potencial (ETP) para Chapingo, Estado de México.

MES	Temperatura media	Precipitación (mm)	ETP (mm)
Enero	13.1	12.1	40.48
Febrero	14.4	7.7	43.83
Marzo	16.7	14.5	65.14
Abril	18.3	30.3	76.77
Mayo	19.0	54.2	87.67
Junio	18.5	104.8	82.44
Julio	17.5	125.5	77.15
Agosto	17.5	114.1	74.87
Septiembre	17.2	91.5	67.72
Octubre	16.2	46.2	60.42
Noviembre	14.7	11.9	47.74
Diciembre	13.3	5.7	40.75
	16.4	**618.5**	**765.01**

Con los valores de ETP y de precipitación podemos elaborar el climograma de Thornthwaite:



Los valores de cada mes de ETP y de precipitación pluvial sirven posteriormente para hacer un **balance hídrico**, el cual a su vez nos indica los déficits o excedentes, los cuales utilizaremos para calcular los índices para determinar el grupo, tipos y subtipos de clima de acuerdo con esta clasificación. Estos índices son: **índice hídrico (Ih), índice de aridez (Ia), índice de humedad (IH) e índice de eficiencia térmica del verano (Etv).**