

# COMPONENTES



M Sc Ing. Rocío Hernández

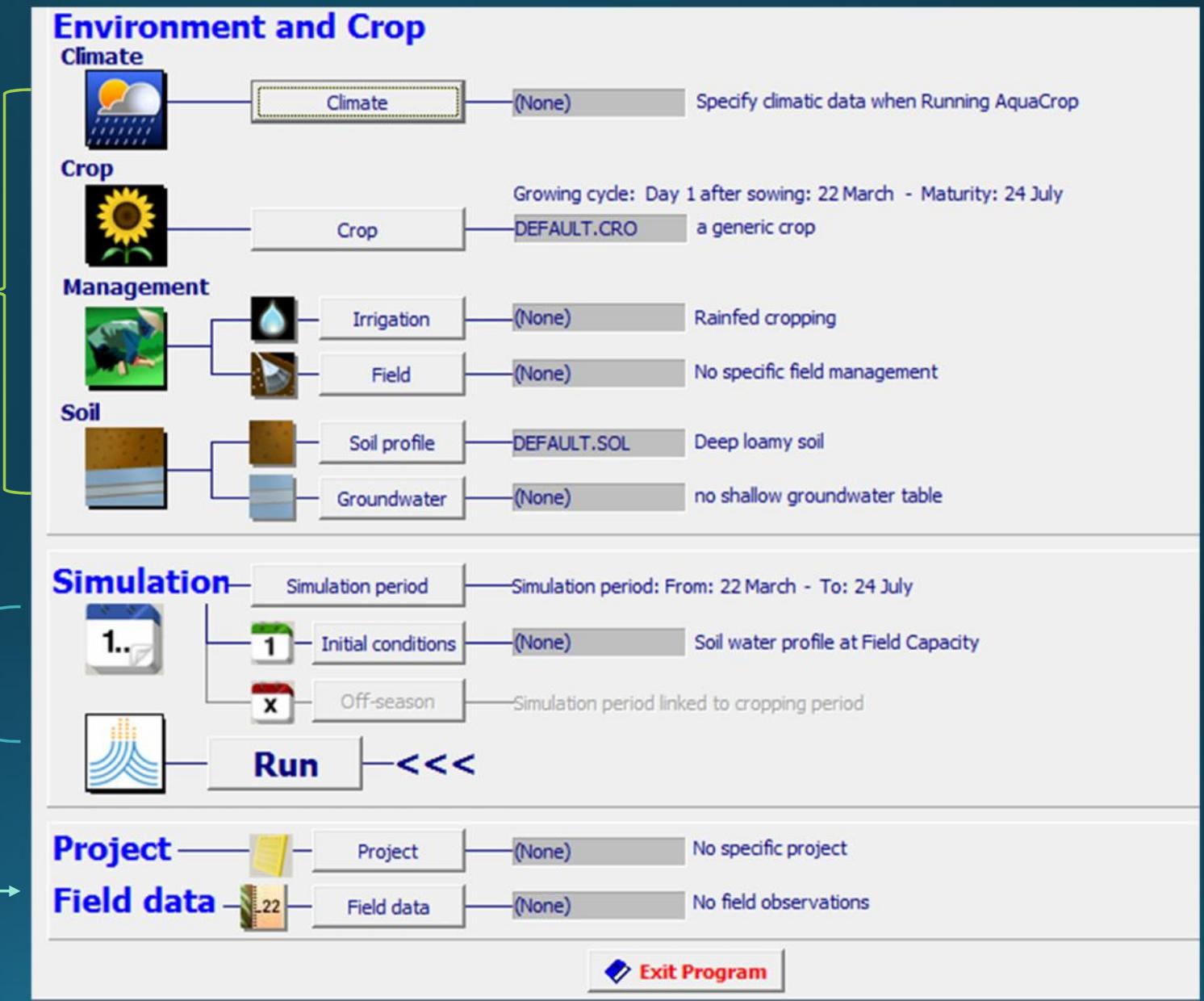
M Sc Ing. Leandro Martín

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO  
MENDOZA - ARGENTINA

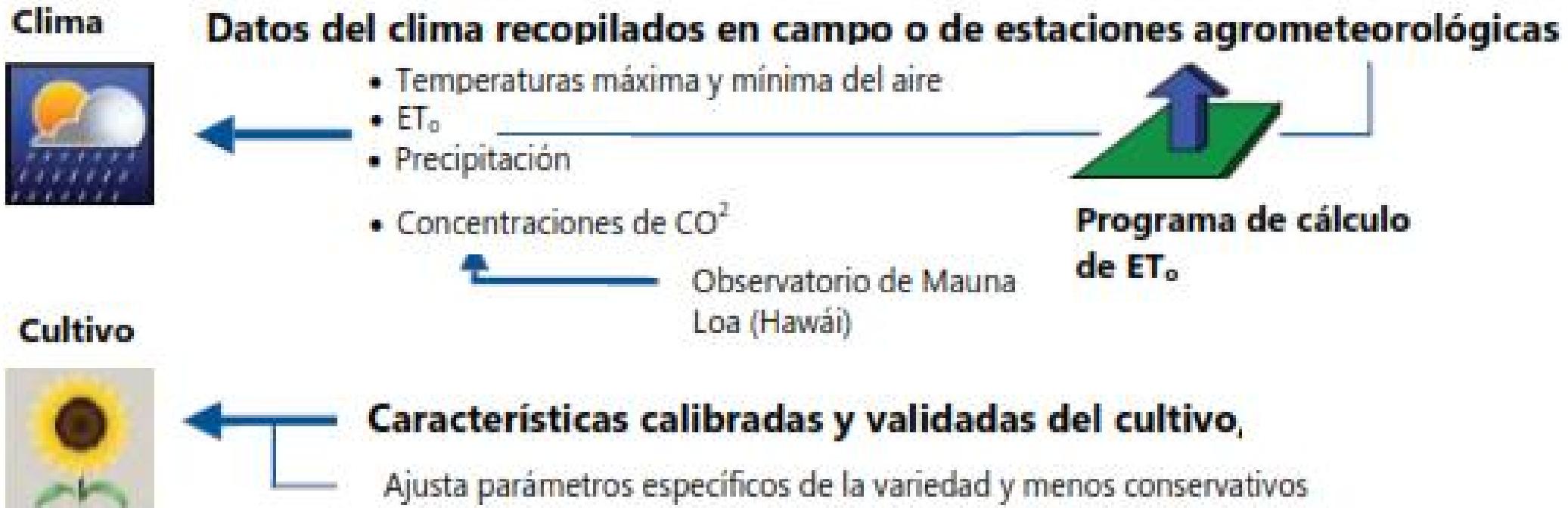
Definen el entorno en el que se desarrollará la cosecha

Datos de simulación: fecha de siembra y condiciones iniciales

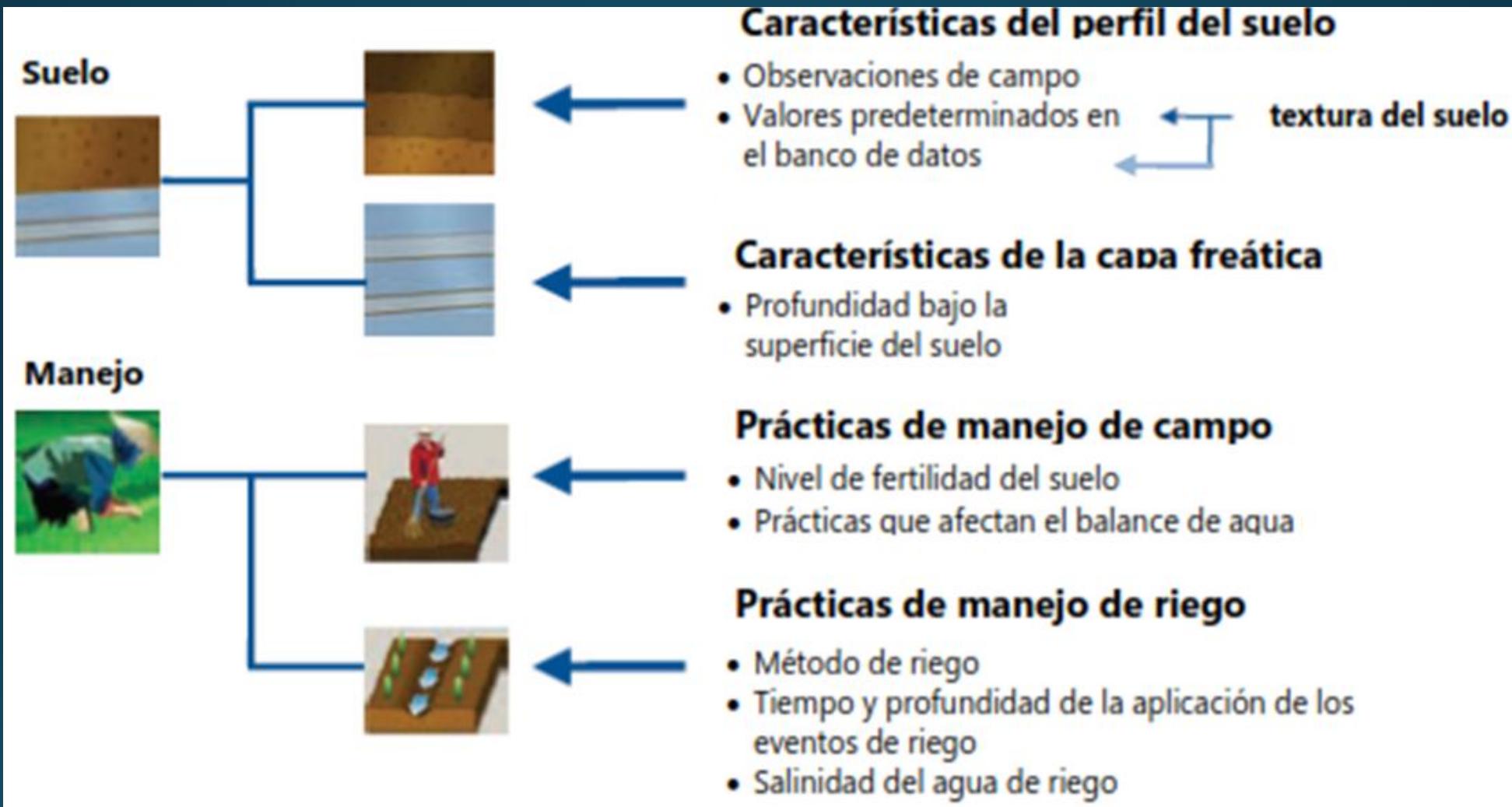
Datos reales de ensayos en campo para validar simulación



# DATOS DE ENTRADA

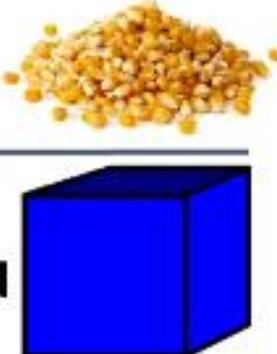


# DATOS DE ENTRADA



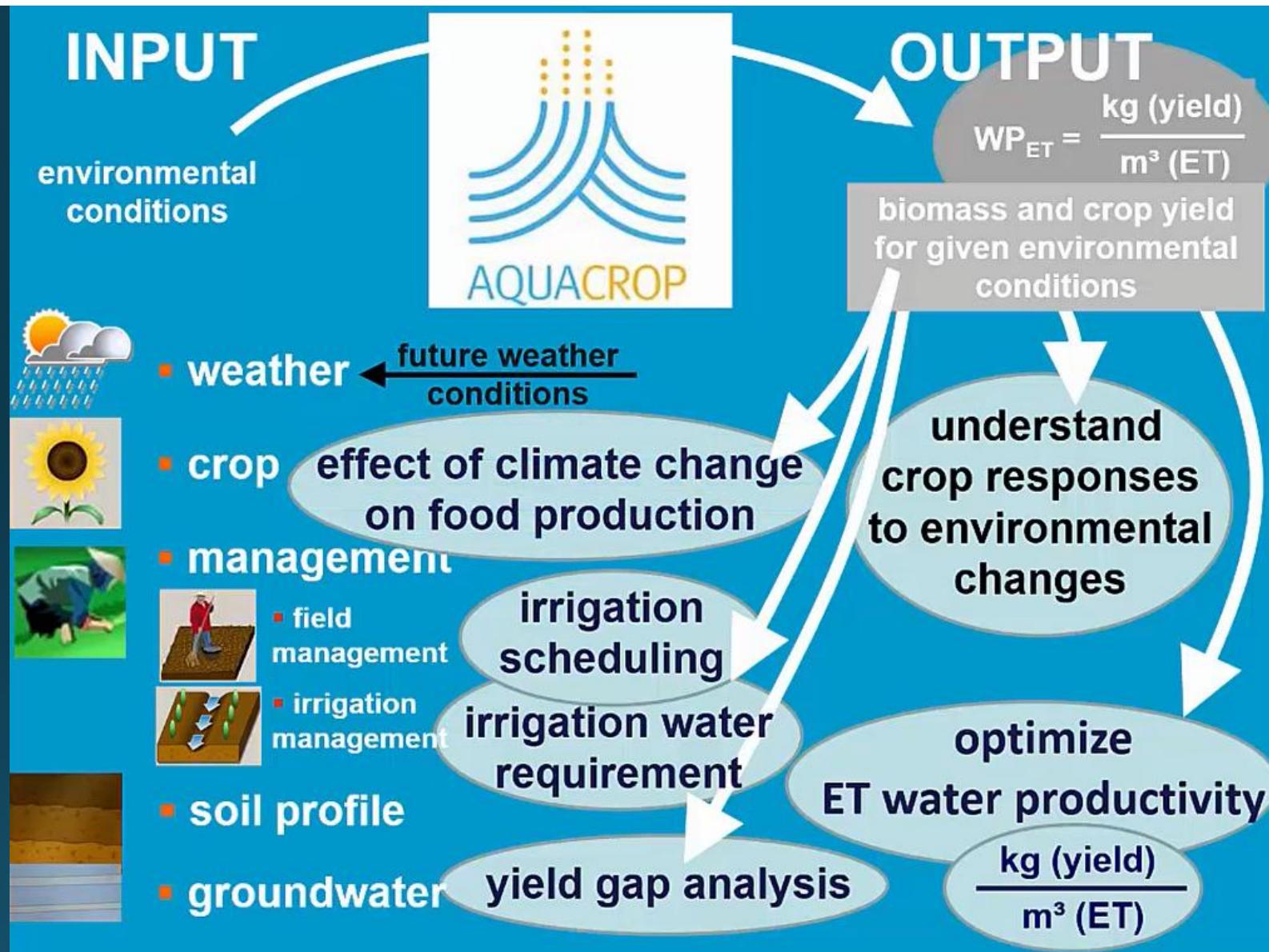
## DATOS DE SALIDA

- BIOMASA y RENDIMIENTO
- INDICADOR DE DESEMPEÑO: *Productividad del agua evapotranspirada (WP<sub>ET</sub>) o Eficiencia del uso del agua (WUE)*

$$\text{WUE} = \frac{\text{yield produced}}{\text{water evapotranspired}}$$
$$\text{WP}_{\text{ET}} = \frac{\text{kg (yield)}}{\text{m}^3 (\text{ET})}$$


Optimizar  
la WP<sub>ET</sub>

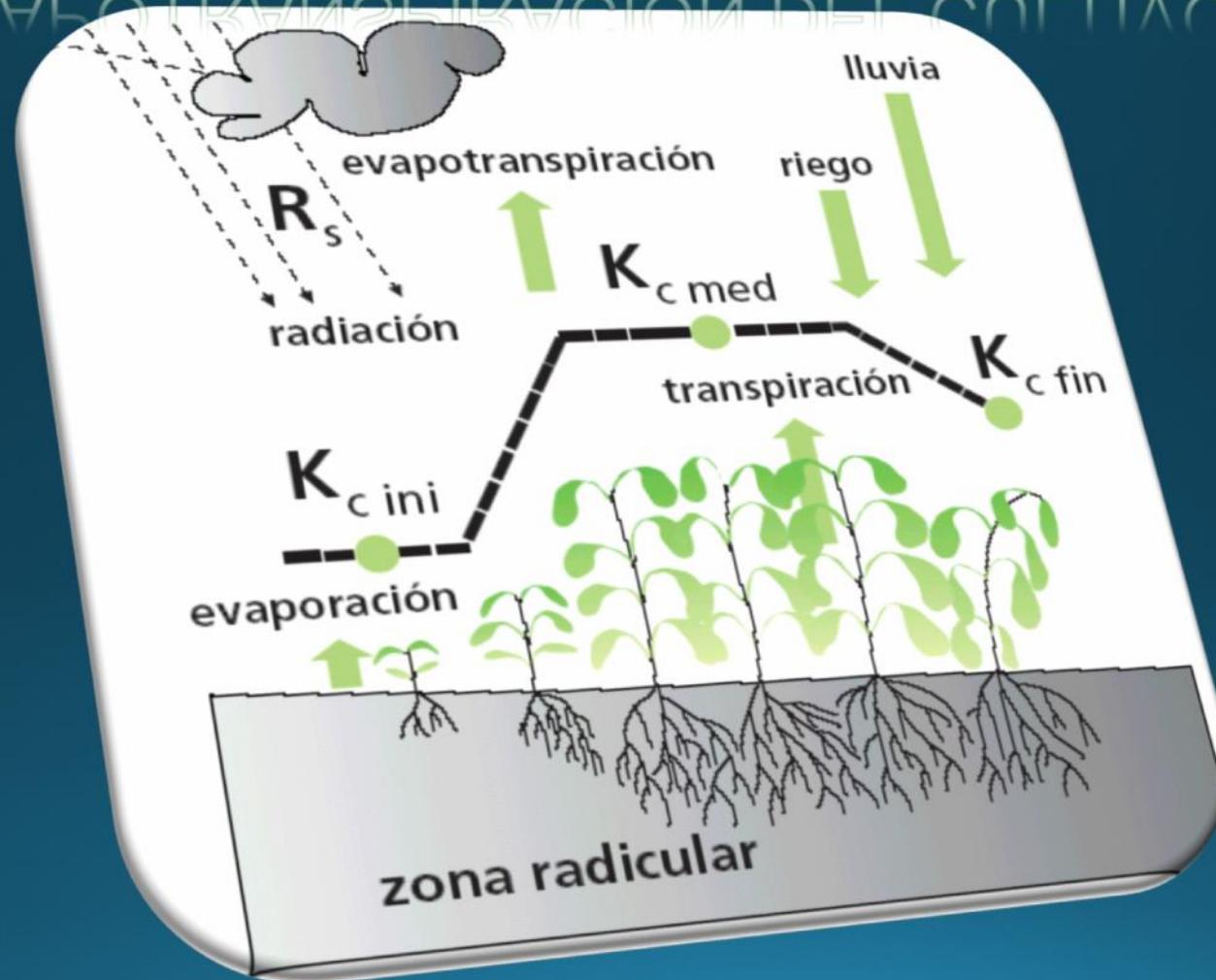
- Cambio de la fecha de plantación
- Selección de otro cultivar
- Cambiar el manejo del cultivo (mulching, fertilidad del suelo)
- Aplicar riegos deficitarios



Fuente: Aquacrop-Training module, FAO (2016)

# CLIMA

## EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO





## EVAPOTRANSPIRACIÓN: Combina 2 procesos por lo que el agua se pierde a través de la superficie del suelo

EVAPORACIÓN:  
Suelo

TRANSPIRACIÓN:  
Planta

Vaporización: Agua líquida en  
vapor de agua

## EVAPORACIÓN

Factores:

- ✓ Energía ➡ radiación solar  
➡ temperatura del aire
- ✓ Gradiente de presión de vapor ➡ humedad atmosférica  
➡ velocidad del viento
- ✓ Grado de cobertura del suelo
- ✓ Cantidad de agua disponible en la superficie evaporante
  - ➡ precipitación
  - ➡ riego
  - ➡ ascenso capilar

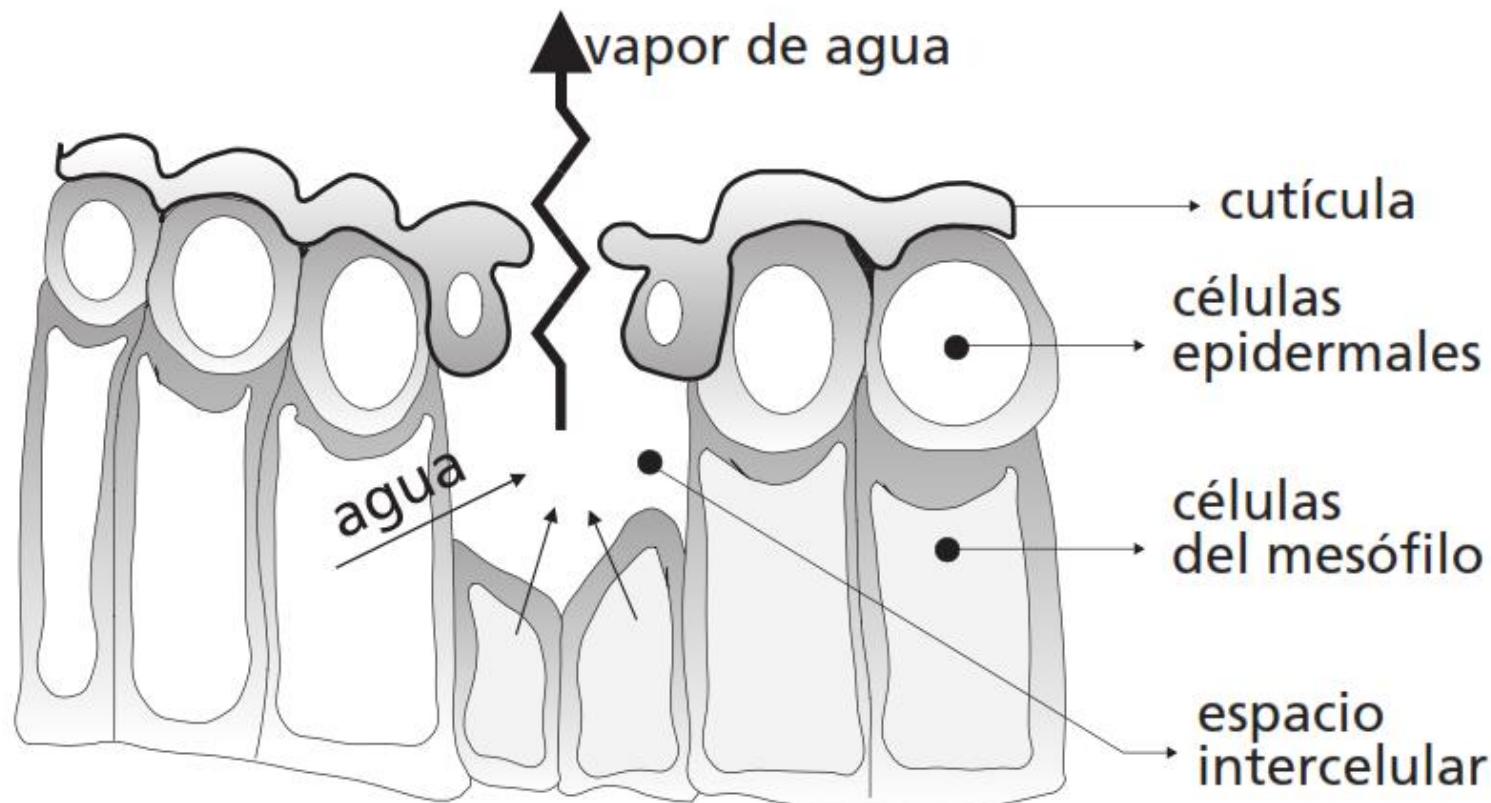
# TRANSPIRACIÓN

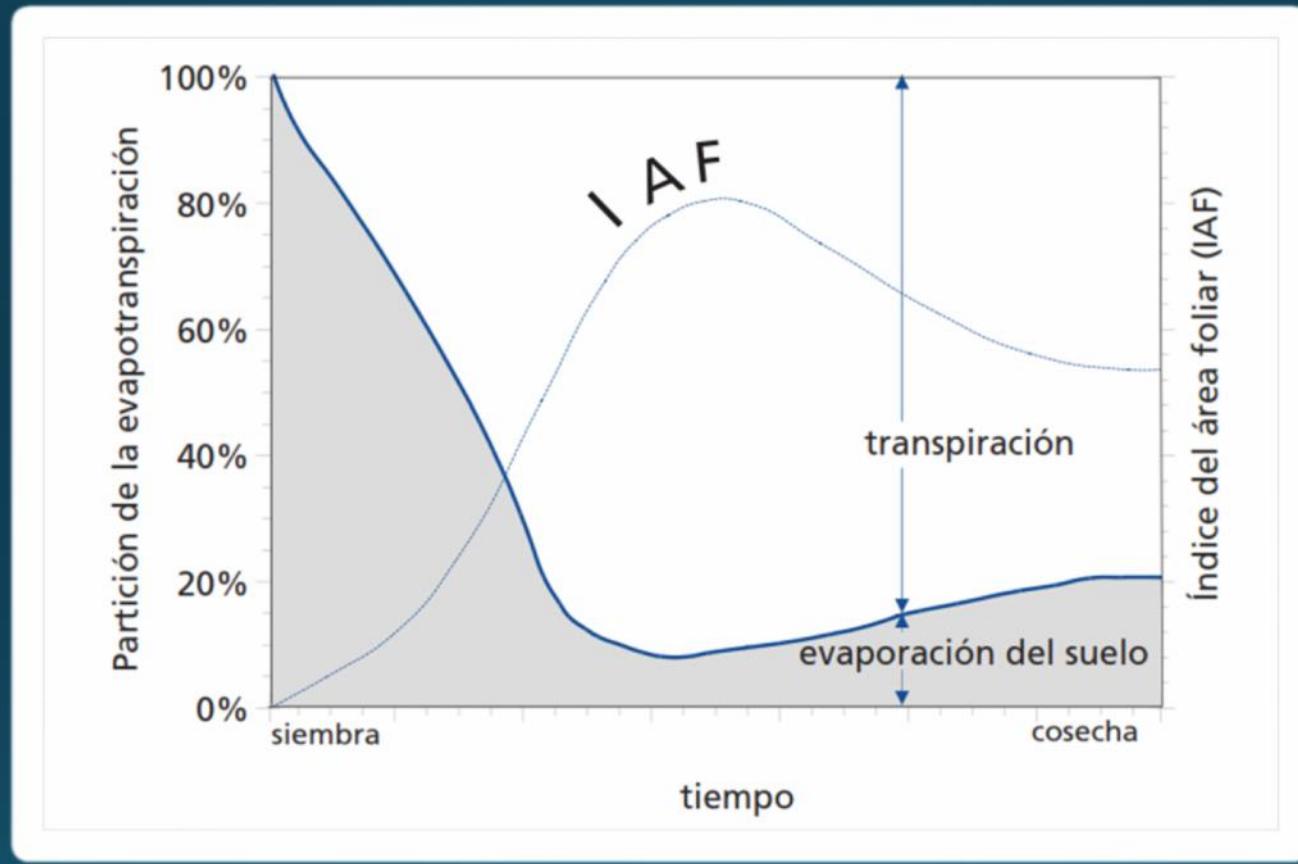
Factores:

- ✓ Energía  radiación  
 temperatura del aire
- ✓ Presión de vapor  humedad atmosférica  
 velocidad del viento
- ✓ Contenido de agua en el suelo
- ✓ Capacidad del suelo de conducir agua hacia las raíces
- ✓ Salinidad del suelo y del agua de riego
- ✓ Características del cultivo
- ✓ Medio donde se produce
- ✓ Manejo del cultivo

# ESTOMAS

## Atmósfera





**IAF ( $\text{m}^2 / \text{m}^2$ ) = área de hoja /área de suelo debajo de ella**  
Máximo valor antes o en la floración

# ET<sub>o</sub> – EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

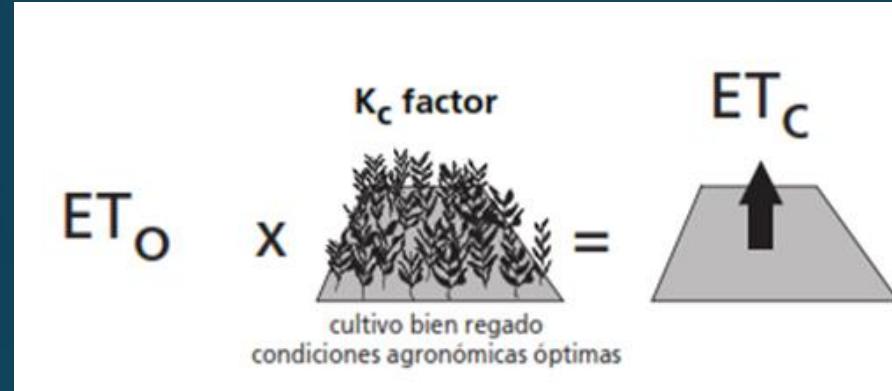
## Tasa de evapotranspiración de un cultivo de referencia sin restricciones de agua



- Afectado solo por parámetros climáticos
- Caracteriza el poder evaporante de la atmósfera en una época y localidad determinada
- Altura uniforme: 12 cm.

# ET<sub>c</sub> – EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTANDAR

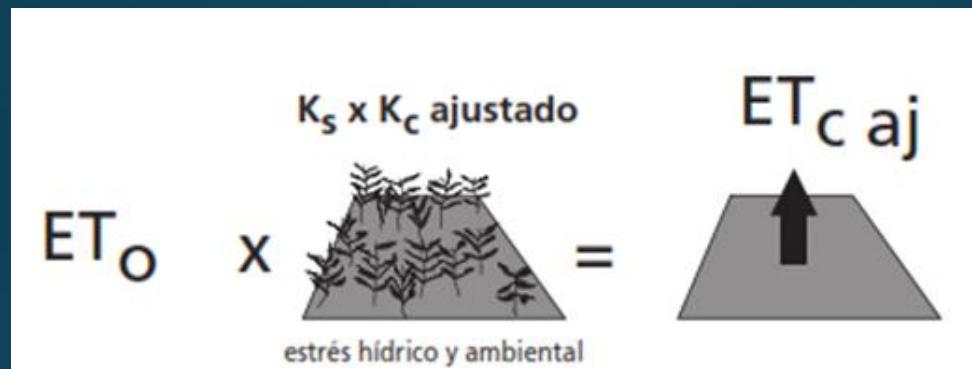
## Evapotranspiración de cualquier cultivo



- Libre de plagas y enfermedades
- Buena fertilización
- Condiciones óptimas de suelo y agua
- Alcanza la máxima producción para una localidad dada

## ET<sub>c</sub> – EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES NO ESTANDAR

Evapotranspiración de cualquier cultivo que crece bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a la estándar



- Presencia de plagas y enfermedades
- Baja fertilidad del suelo
- Salinidad
- Exceso o falta de agua

# EVAPOTRANSPIRACIÓN

- EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ET<sub>0</sub>)
  - Variables climáticas
- EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ET<sub>c</sub>)
  - Variables climáticas
  - Factores de cultivo
- EVAPOTRANSPIRACIÓN BAJO CONDICIONES NO ESTÁNDAR (ET<sub>c<sub>aj</sub></sub>)
  - Variables climáticas
  - Factores de cultivo
  - Manejo y condiciones ambientales

## VARIABLES CLIMÁTICAS

- Radiación
- Temperatura del Aire
- Humedad Atmosférica
- Velocidad del viento

## FACTORES DE CULTIVO

- Tipo de cultivo
- Variedad
- Etapa de desarrollo

## **MANEJO Y CONDICIONES AMBIENTALES**

- Salinidad
- Baja fertilidad del suelo
- Uso limitado de fertilizantes
- Horizontes duros o impermeables en el suelo
- Ausencia de control de enfermedades
- Mal manejo del suelo
- Cubierta del suelo
- Densidad del cultivo
- Contenido de agua del suelo
- Prácticas de cultivo
- Método de riego
- Barrera rompevientos

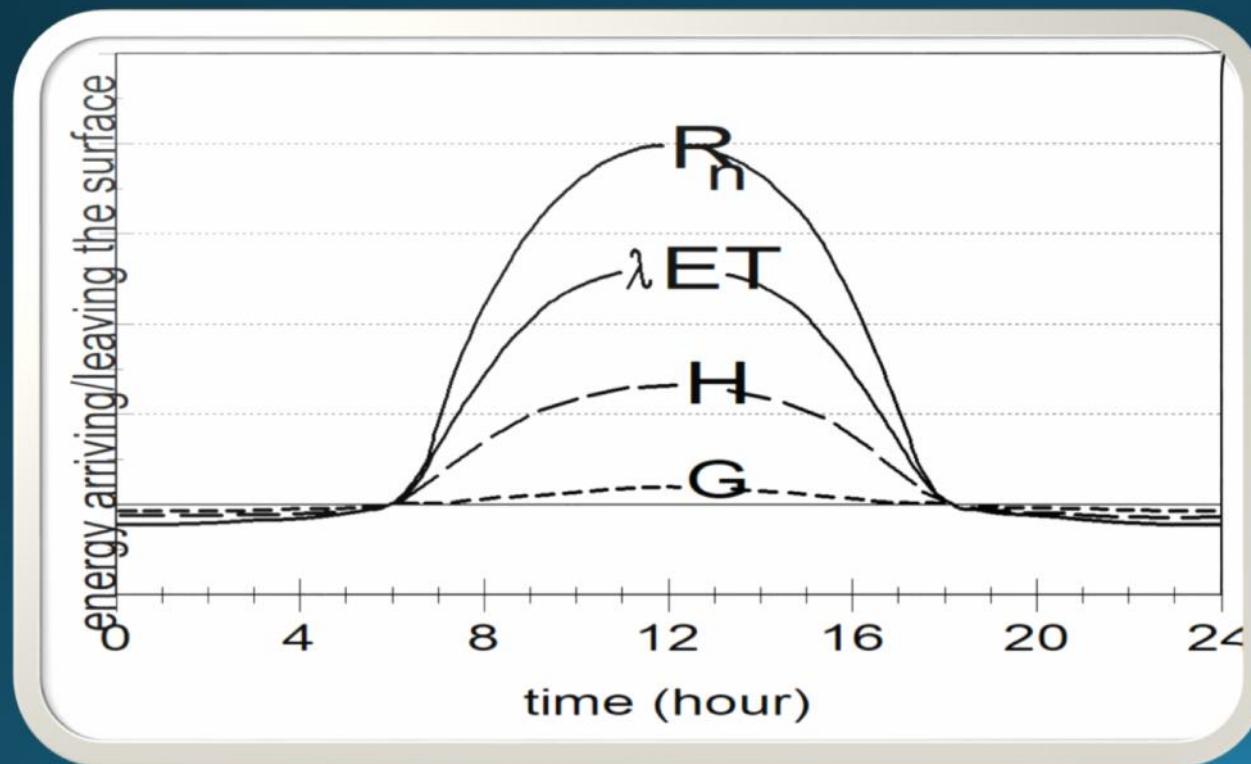
# DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

## I. MEDICIÓN DE ET

- Métodos de balance de energía y microclimáticos (requieren medidas precisas, principalmente usados en investigación):
  - ✓ principio de transformación de la energía
  - ✓ método de transferencia de masa (movimientos verticales de masas de aire por arriba de la cubierta vegetal que transportan vapor de agua y energía), y se basan en la relación de Bowen.
- Balance de agua en el suelo
- Lisímetros de drenaje o de pesada (ET medida en términos de cambio de masa o diferencia entre el agua aplicada y drenada)

## BALANCE DE ENERGÍA

- la radiación neta proveniente de la atmósfera ( $R_n$ ) (+ = aporta energía)
- el calor sensible (flujo de calor) del suelo ( $G$ )
- el calor sensible del aire ( $H$ )
- la evaporación o evapotranspiración, expresada como densidad de flujo de calor latente ( $\lambda ET$ ). ( $\lambda$  representa el calor latente necesario para vaporizar una unidad de agua )

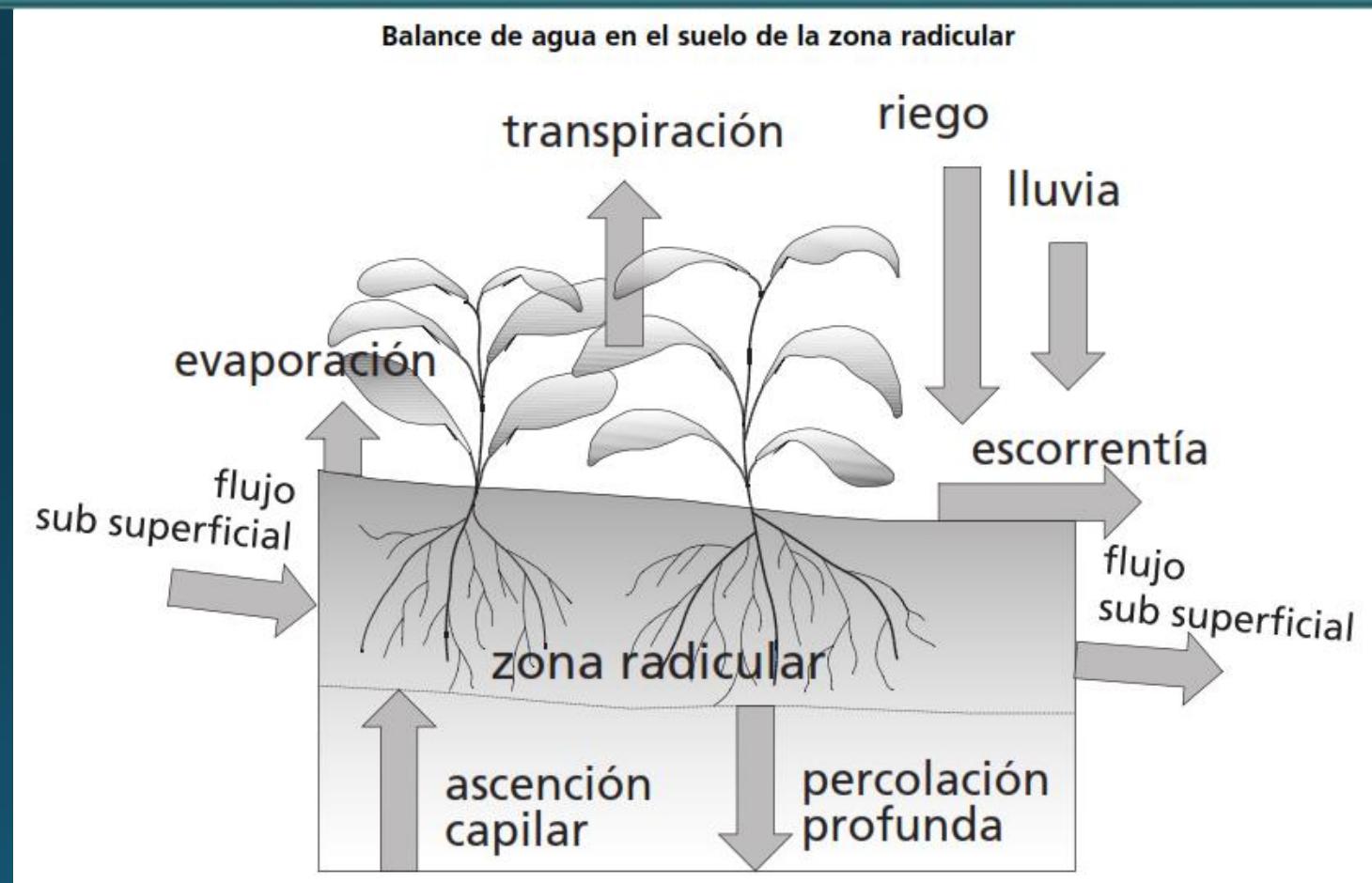


$$R_n - \lambda ET - G - H = 0$$

(+)  $R_n$  = aporta energía  
(+)  $G, H, \lambda ET$  = retiran energía

# BALANCE HÍDRICO

$$\text{ET} = R_{(\text{riego})} + P_{(\text{lluvia})} - ES_{(\text{esc.super})} - D_{(\text{perc.prof})} + C_{(\text{capil.})} \pm \Delta FS_{(\text{flujo horiz subsuperf.})} \\ \pm \Delta SW_{(\text{cambio cont humedad suelo})}$$



## II. ET CALCULADA CON DATOS METEOROLÓGICOS

### Método FAO Penman-Monteith:

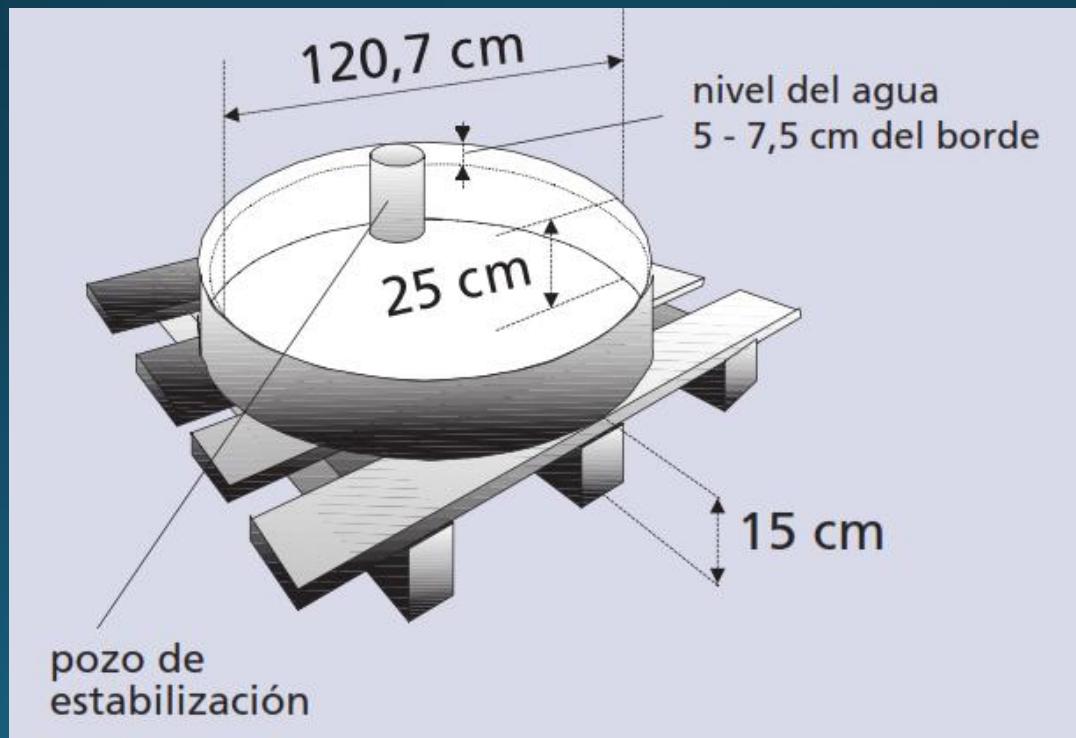
Método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia,

- $Etc \text{ (bajo } condiciones \text{ estándar)} = Eto \times Kc$
- $Etc_{aj} \text{ (bajo } condiciones \text{ no estándar)} = Etc_{aj} = Eto \times Kc \times Ks$

se ajusta mediante  $Ks$  (coeficiente de estrés hídrico) o modificando el coeficiente de cultivo.

### III. ET estimada con el tanque de evaporación

Estimación de la evapotranspiración de referencia mediante evaporación de una superficie de agua. La relación entre la evaporación del tanque y la ETo se realiza utilizando coeficientes empíricos. Método práctico.



# FAO PENMAN-MONTEITH

## EN FUNCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR, TEMPERATURA, HUMEDAD, VIENTO

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + x \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + x (1 + 0.34 U_2)}$$

$ET_o$	evapotranspiración de referencia ( $\text{mm dí}\text{a}^{-1}$ )
$R_n$	radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dí}\text{a}^{-1}$ )
$R_a$	radiación extraterrestre ( $\text{mm dí}\text{a}^{-1}$ )
$G$	flujo del calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dí}\text{a}^{-1}$ )
$T$	temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )
$u_2$	velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )
$e_s$	presión de vapor de saturación (kPa)
$e_a$	presión real de vapor (kPa)
$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
$\Delta$	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$\gamma$	constante psicrométrica (kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

## Datos necesarios para el cálculo de ETo

***Localización:***

- altura sobre el nivel del mar (m) y latitud (grados norte o sur) necesarios para ajustar algunos parámetros climáticos al valor medio local de la presión atmosférica (función de la elevación del sitio sobre nivel del mar) y para calcular la radiación extraterrestre ( $R_a$ ) y, en algunos casos, la duración máxima de la insolación ( $N$ ). En el cálculo de  $R_a$  y  $N$  la latitud se expresa en radianes. Valor positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur.

***Temperatura: diaria  
(promedio) máxima y  
mínima ( $^{\circ}C$ ):***

- En casos en que sólo se disponga de temperaturas medias, el cálculo es válido, pero podría esperarse una subestimación.

### ***Humedad:***

- presión real (promedio) diaria de vapor (kPa). En caso de que no estén disponibles, pueden ser derivados de la humedad relativa máxima y mínima (%), de los datos psicrométricos (temperaturas de bulbo seco y húmedo en °C) o de la temperatura del punto de rocío (°C)

### ***Radiación:***

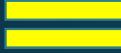
- neta diaria (promedio) ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) medida con un piranómetro o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo.

### ***Viento:***

- velocidad del viento (promedio) diaria ( $\text{m s}^{-1}$ ) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo.

# EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

RADIACIÓN  


AERODINAMICO  


ETo

## Evapotranspiración de referencia del pasto

$$\left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \right] [0,408 (R_n - G)]$$

mm día<sup>-1</sup>

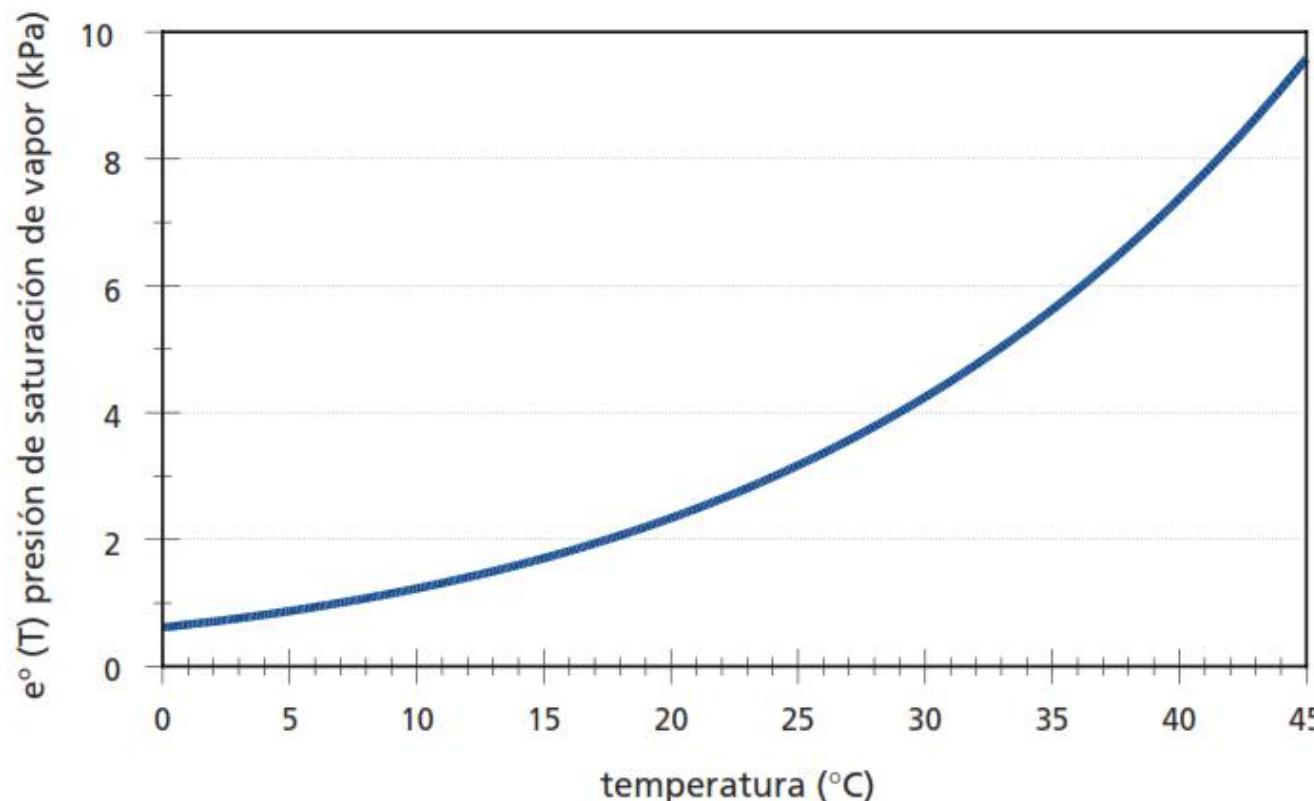
$$\left[ \frac{\gamma}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \right] \left[ \frac{900}{T + 273} \right] u_2 [(e_s - e_a)]$$

mm día<sup>-1</sup>

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

mm día<sup>-1</sup>

FIGURA 11  
Presión de saturación de vapor ( $e^\circ$ ) en función de la temperatura: curva de  $e^\circ(T)$



Como se puede observar en la Figura 11, la pendiente de la curva cambia exponencialmente con la temperatura. A temperaturas bajas, la pendiente es pequeña y varía levemente con el incremento de temperatura. A temperaturas elevadas, la pendiente es mayor y pequeños cambios de temperatura producen grandes cambios grandes en la pendiente. La pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,

CUADRO A2.4

Pendiente de la curva de presión de vapor ( $\Delta$ ) para diferentes temperaturas (T)

$$\Delta = \frac{4098 * \left[ 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (\text{Ec. 13})$$

T °C	$\Delta$ kPa/°C	T °C	$\Delta$ kPa/°C	T °C	$\Delta$ kPa/°C	T °C	$\Delta$ kPa/°C
1,0	0,047	13,0	0,098	25,0	0,189	37,0	0,342
1,5	0,049	13,5	0,101	25,5	0,194	37,5	0,350
2,0	0,050	14,0	0,104	26,0	0,199	38,0	0,358
2,5	0,052	14,5	0,107	26,5	0,204	38,5	0,367
3,0	0,054	15,0	0,110	27,0	0,209	39,0	0,375
3,5	0,055	15,5	0,113	27,5	0,215	39,5	0,384
4,0	0,057	16,0	0,116	28,0	0,220	40,0	0,393
4,5	0,059	16,5	0,119	28,5	0,226	40,5	0,402
5,0	0,061	17,0	0,123	29,0	0,231	41,0	0,412
5,5	0,063	17,5	0,126	29,5	0,237	41,5	0,421
6,0	0,065	18,0	0,130	30,0	0,243	42,0	0,431
6,5	0,067	18,5	0,133	30,5	0,249	42,5	0,441
7,0	0,069	19,0	0,137	31,0	0,256	43,0	0,451
7,5	0,071	19,5	0,141	31,5	0,262	43,5	0,461
8,0	0,073	20,0	0,145	32,0	0,269	44,0	0,471
8,5	0,075	20,5	0,149	32,5	0,275	44,5	0,482
9,0	0,078	21,0	0,153	33,0	0,282	45,0	0,493
9,5	0,080	21,5	0,157	33,5	0,289	45,5	0,504
10,0	0,082	22,0	0,161	34,0	0,296	46,0	0,515
10,5	0,085	22,5	0,165	34,5	0,303	46,5	0,526
11,0	0,087	23,0	0,170	35,0	0,311	47,0	0,538
11,5	0,090	23,5	0,174	35,5	0,318	47,5	0,550
12,0	0,092	24,0	0,179	36,0	0,326	48,0	0,562
12,5	0,095	24,5	0,184	36,5	0,334	48,5	0,574

27,25 °C      0,212 Kpa/°C

CUADRO A2.2

Constante psicrométrica ( $\gamma$ ) para diferentes altitudes (z)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0,665 \cdot 10^{-3}$$

(Ec. 8)

z (m)	$\gamma$ kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$	z (m)	$\gamma$ kPa/ $^{\circ}\text{C}$	z (m)	$\gamma$ kPa/ $^{\circ}\text{C}$	z (m)	$\gamma$ kPa/ $^{\circ}\text{C}$
0	0,067	1 000	0,060	2 000	0,053	3 000	0,047
100	0,067	1 100	0,059	2 100	0,052	3 100	0,046
200	0,066	1 200	0,058	2 200	0,052	3 200	0,046
300	0,065	1 300	0,058	2 300	0,051	3 300	0,045
400	0,064	1 400	0,057	2 400	0,051	3 400	0,045
500	0,064	1 500	0,056	2 500	0,050	3 500	0,044
600	0,063	1 600	0,056	2 600	0,049	3 600	0,043
700	0,062	1 700	0,055	2 700	0,049	3 700	0,043
800	0,061	1 800	0,054	2 800	0,048	3 800	0,042
900	0,061	1 900	0,054	2 900	0,047	3 900	0,042
1 000	0,060	2 000	0,053	3 000	0,047	4 000	0,041

basada en  $\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ .

La presión atmosférica, P, es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La evaporación en altitudes elevadas ocurre en parte gracias a la baja presión atmosférica que se expresa con la constante psicrométrica. Este efecto es, sin embargo, pequeño y en los procedimientos del cálculo, el valor medio para una localidad es suficiente.

$e_s - e_a$

## déficit de presión de vapor (kPa)

\*es= presión de vapor de saturación

Presión de saturación de vapor  $e_s = [(e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})]/2$

\*ea= presión real de vapor

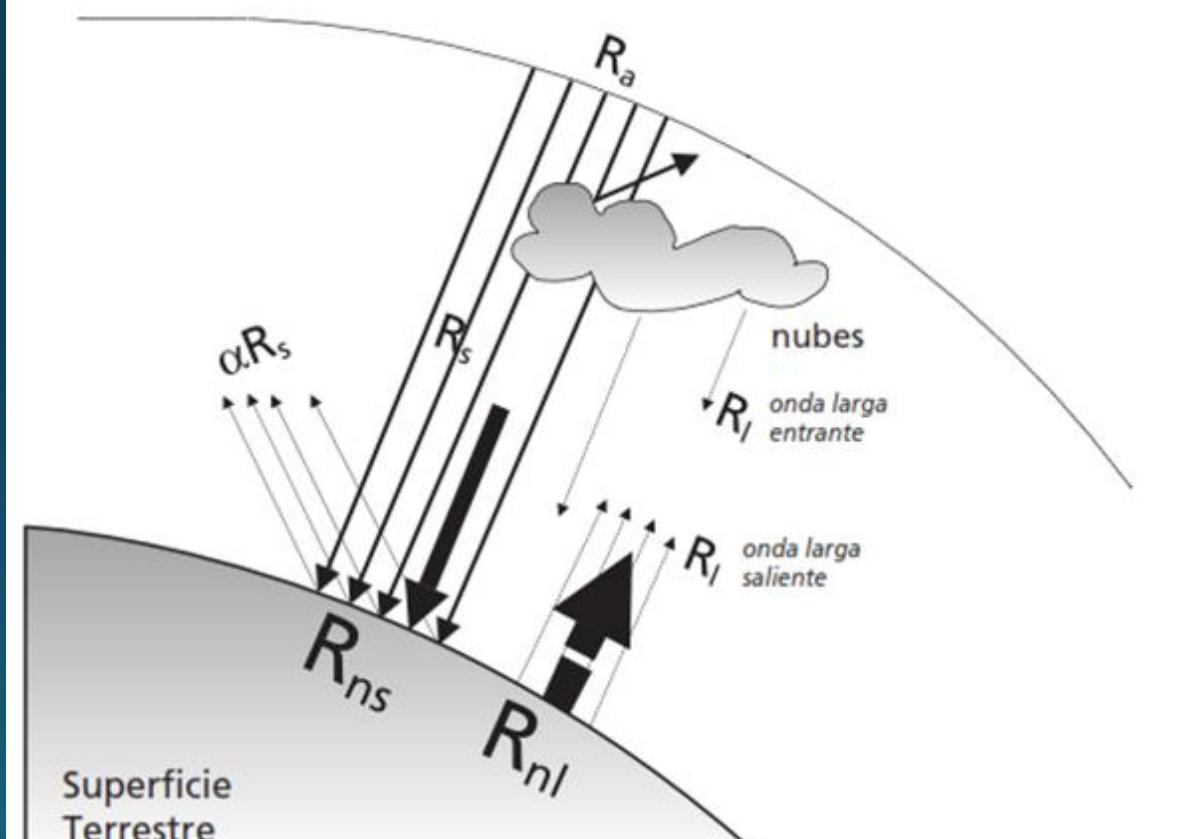
Presión de saturación de vapor ( $e^o(T)$ ) para diferentes temperaturas (T)

$$e^o(T) = 0,6108 * \exp\left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right] \quad (\text{Ec. 1})$$

T °C	e <sup>o</sup> (T) kPa	T °C	e <sup>o</sup> (T) kPa	T °C	e <sup>o</sup> (T) kPa	T °C
1,0	0,657	13,0	1,498	25,0	3,168	37,0
1,5	0,681	13,5	1,547	25,5	3,263	37,5
2,0	0,706	14,0	1,599	26,0	3,361	38,0
2,5	0,731	14,5	1,651	26,5	3,462	38,5
3,0	0,758	15,0	1,705	27,0	3,565	39,0
3,5	0,785	15,5	1,761	27,5	3,671	39,5
4,0	0,813	16,0	1,818	28,0	3,780	40,0
4,5	0,842	16,5	1,877	28,5	3,891	40,5
5,0	0,872	17,0	1,938	29,0	4,006	41,0
5,5	0,903	17,5	2,000	29,5	4,123	41,5
6,0	0,935	18,0	2,064	30,0	4,243	42,0
6,5	0,968	18,5	2,130	30,5	4,366	42,5
7,0	1,002	19,0	2,197	31,0	4,493	43,0
7,5	1,037	19,5	2,267	31,5	4,622	43,5
8,0	1,073	20,0	2,338	32,0	4,755	44,0
8,5	1,110	20,5	2,412	32,5	4,891	44,5

La radiación neta es la diferencia entre la radiación neta de la onda corta ( $R_{ns}$ ) y la radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ ) en los periodos horarios. Por lo tanto:

$$R_n = R_{ns} - \underline{R_{nl}}$$



# RADIACIÓN EXTRATERRESTRE, Ra

CUADRO A2.6

Radiación extraterrestre diaria ( $R_a$ ) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes<sup>1</sup>

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (\text{Ec. 21})$$

(valores en MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>

Hemisferio Norte												Lat. grad.	Hemisferio Sur											
Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic		Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic
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	45,3
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	44,7
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	44,1
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	43,9
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	43,9
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	43,9
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	44,0
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	44,1
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	44,3
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	44,4
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	44,5
10,1	15,7	23,3	32,2	33,8	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	44,5
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	44,6
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	44,6
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	44,6
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	44,6
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	44,5
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	44,4
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	44,3
19,9	24,8	30,7	35,5	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	44,1
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	43,9
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	43,6
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	43,3
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	43,0
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	42,6
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	42,1
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	41,7
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	41,2
29,9	33,1	36,1	38,1	38,4	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	40,6	
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	40,0
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	39,4
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	38,7
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	38,0	38,0
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	37,2
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	36,4
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	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6	

<sup>1</sup> Los valores de  $R_a$  durante el día 15<sup>mo</sup> del mes, proveen una buena estimación (error <1%) de  $R_a$  promediada de todos los días del mes. Solamente en casos de latitudes muy elevadas (mayores a 55° N o S) y durante los meses invernales, las desviaciones podrían ser mayores al 1%.

<sup>2</sup> Los valores pueden ser convertidos a sus equivalentes en mm dia<sup>-1</sup> si se dividen por Lambda = 2,45.

## RADIACIÓN NETA = RN ONDA CORTA – RN ONDA LARGA

### 1) Radiación solar onda corta

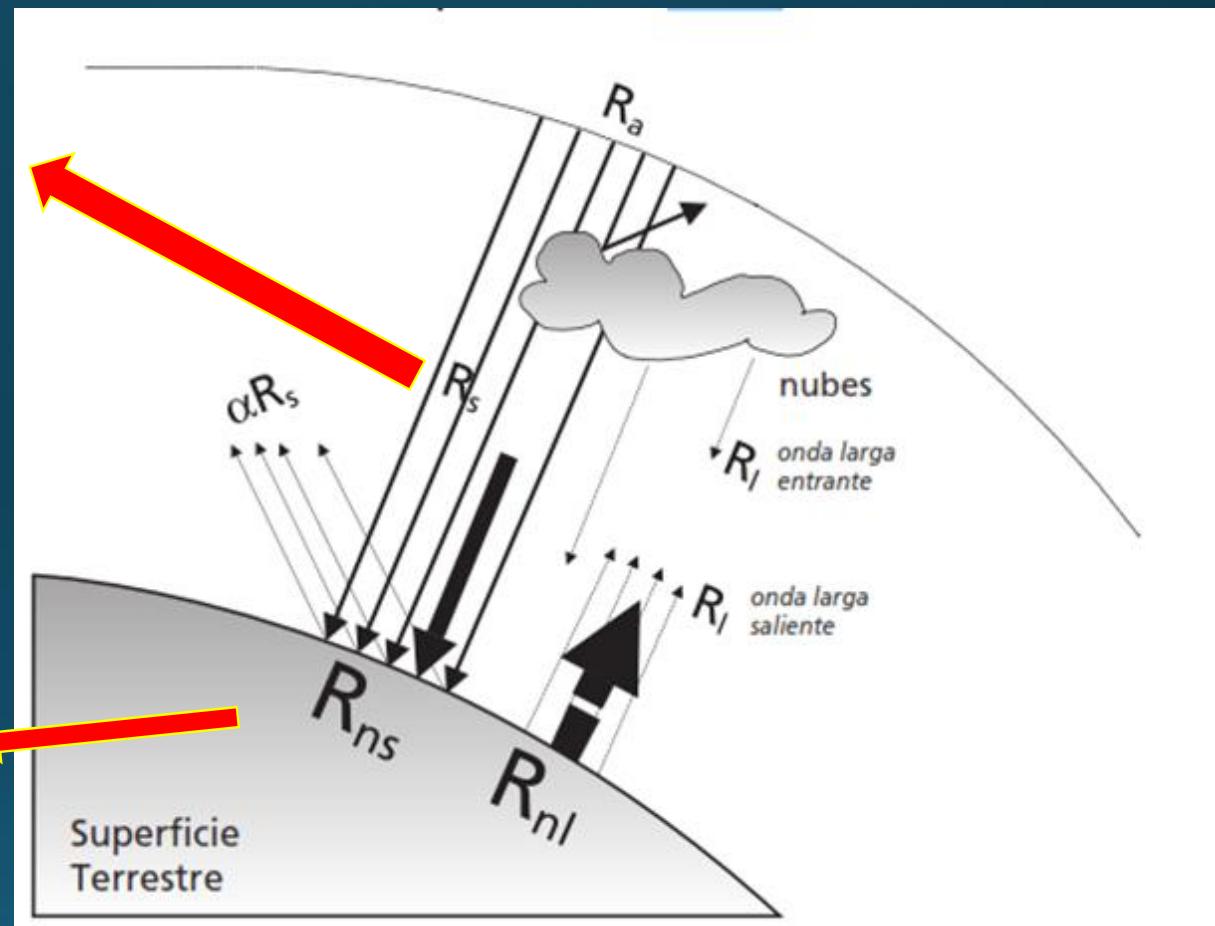
$$R_s = (0,25 + 0,50 n/N) R_a$$

### 2) Radiación solar en día despejado ( $n=N$ )

$$R_{so} = [0,75 + 2 (\text{Altitud})/ 100\,000] R_a$$

### 3) Radiación neta solar onda corta

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$



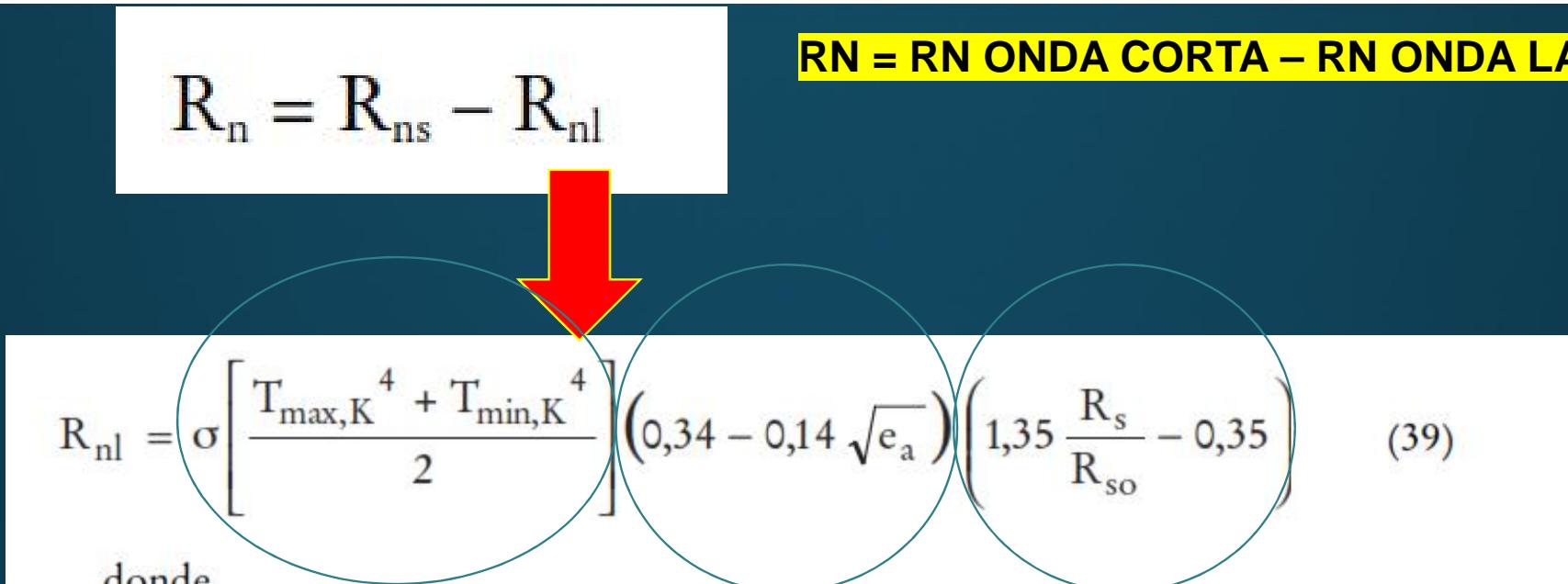
$\alpha$  albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético de referencia [adimensional],

*Radiación relativa de onda corta (Rs/Rso):* cociente de la radiación solar (Rs) y de la radiación solar de un día despejado (Rso); varía aproximadamente entre 0,33 (nubosidad elevada) y 1 (cielo despejado)

*Duración solar relativa (n/N):* expresa la nubosidad atmosférica-el cociente de la duración real de la insolación, n, y la duración máxima posible de la insolación o de la luz del día N; N es función de la latitud y de la fecha.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

**RN = RN ONDA CORTA – RN ONDA LARGA**



$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (39)$$

donde

- $R_{nl}$  Radiación neta de onda larga [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ],
- $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann [ $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ],
- $T_{max,K}$  temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [ $K = {}^\circ\text{C} + 273,16$ ],
- $T_{min,K}$  temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [ $K = {}^\circ\text{C} + 273,16$ ],
- $e_a$  presión de vapor real [kPa],
- $R_s/R_{so}$  radiación relativa de onda corta (valores  $\leq 1,0$ ),
- $R_s$  radiación solar medida o calculada (Ecuación 35) [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ],
- $R_{so}$  radiación en un día despejado (Ecuación 36 o 37) [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ].

## Constante Stefan Boltzmann

CUADRO A2.8  
oTK4 (de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann) para diferentes temperaturas (T)

Con $\sigma = 4,903 \cdot 10^{-8} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ y $T_k = T[\text{°C}] + 273,16$					
T (°C)	oTK <sup>4</sup> (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	T (°C)	oTK <sup>4</sup> (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	T (°C)	oTK <sup>4</sup> (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
1,0	27,70	17,0	34,75	33,0	43,08
1,5	27,90	17,5	34,99	33,5	43,36
2,0	28,11	18,0	35,24	34,0	43,64
2,5	28,31	18,5	35,48	34,5	43,93
3,0	28,52	19,0	35,72	35,0	44,21
3,5	28,72	19,5	35,97	35,5	44,50
4,0	28,93	20,0	36,21	36,0	44,79
4,5	29,14	20,5	36,46	36,5	45,08
5,0	29,35	21,0	36,71	37,0	45,37
5,5	29,56	21,5	36,96	37,5	45,67
6,0	29,78	22,0	37,21	38,0	45,96
6,5	29,99	22,5	37,47	38,5	46,26
7,0	30,21	23,0	37,72	39,0	46,56
7,5	30,42	23,5	37,98	39,5	46,85
8,0	30,64	24,0	38,23	40,0	47,15
8,5	30,86	24,5	38,49	40,5	47,46
9,0	31,08	25,0	38,75	41,0	47,76
9,5	31,30	25,5	39,01	41,5	48,06
10,0	31,52	26,0	39,27	42,0	48,37
10,5	31,74	26,5	39,53	42,5	48,68
11,0	31,97	27,0	39,80	43,0	48,99
11,5	32,19	27,5	40,06	43,5	49,30
12,0	32,42	28,0	40,33	44,0	49,61
12,5	32,65	28,5	40,60	44,5	49,92
13,0	32,88	29,0	40,87	45,0	50,24

### Radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )

La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia. Esta relación se expresa cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann.

## G = Flujo de calor del suelo

□ Para períodos mensuales:

Si se asume una capacidad calorífica constante del suelo de  $2,1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  y una profundidad media de suelo, la Ecuación 41 se puede utilizar para derivar G para períodos mensuales:

$$G_{\text{mes},i} = 0,14 (T_{\text{mes},i} - T_{\text{mes},i-1}) \quad (44)$$

donde

$T_{\text{mes},i}$  temperatura media del aire en el mes i [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{mes},i-1}$  temperatura media del aire en el mes i -1 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

➤ **Velocidad del viento**: es menor cerca de la superficie y aumenta con altura. Para el cálculo de la evapotranspiración, se requiere la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie. Para ajustar los datos obtenidos a alturas diferentes a la estándar (2m):

$$U_2 = U_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)}$$

$U_2$  = velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [ $\text{m s}^{-1}$ ],

$U_z$  = velocidad del viento medida a  $z$  m sobre la superficie [ $\text{m s}^{-1}$ ],

$z$  = altura de medición sobre la superficie [m].

# FAO PENMAN-MONTEITH EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

RADIACIÓN

Evapotranspiración de referencia del pasto

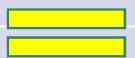
$$\left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \right] [0,408 (R_n - G)]$$



mm día<sup>-1</sup>

AERODINAMICO

$$\left[ \frac{\gamma}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \right] \left[ \frac{900}{T + 273} \right] u_2 [(e_s - e_a)]$$



mm día<sup>-1</sup>

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

mm día<sup>-1</sup>

La ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación clara, precisa y simple de los factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración.

## Superficie de referencia:

- Es un cultivo hipotético de pasto,
- con una altura asumida de 0,12 m,
- con una resistencia superficial fija de  $70 \text{ s m}^{-1}$  (suelo moderadamente seco, riego con una frecuencia semanal aproximadamente)
- y un albedo de 0,23 (similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo).

# ECUACION DE Hargreaves y Samani

$$ET_0 = 0,0023 * Ra * (T + 17,8) * TD^{0,5}$$

- Ra: Radiación extraterrestre en mm/día (por tabla 9) o  
 $Ra \text{ (MJ/m}^2\text{.día)} * 0,408 = Ra \text{ (mm/día)}$
- TD: Diferencia de temperatura diaria (Máxima – Mínima, °C)
- T: Temperatura media (°C)

Ejemplo para Mendoza en enero:

$T^\circ \text{ media} = 22,4^\circ\text{C}$ ;  $(T^\circ \text{ max} - T^\circ \text{ min}) = 14^\circ\text{C}$ ; Latitud =  $33^\circ$

$$ET_0 = 0,0023 * 17,8 * (22,4 + 17,8) * 14^{0,5} = 6,16 \text{ mm/dia}$$

**Tabla 1: Radiación extraterrestre expresada en equivalente de evaporación, en mm dia<sup>-1</sup>**

Hemisferio Norte													Lat.	Hemisferio Sur												
En.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	En.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.			
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2		
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2		
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3		
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3		
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3		
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3		
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3		
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2		
7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34	17.9	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2		
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32	17.9	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1		
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8*	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1		
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9		
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8		
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7		
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5		
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	12.0	13.9	15.8	17.0	17.4		
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1		
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8		
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.0	14.5	15.8	16.5	16.6		
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5		
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2		
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0		
13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7		
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4		
14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1		
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0	15.0	15.2	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8		

$m^3$ por hectárea por día ( $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )	$1 m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1} = 0.1 \text{ mm día}^{-1}$
litros por segundo por hectárea ( $L s^{-1} \text{ ha}^{-1}$ )	$1 L s^{-1} \text{ ha}^{-1} = 8.640 \text{ mm día}^{-1}$
Radiación equivalente en megajoules por metro cuadrado por día ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )	$1 MJ \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1} = 0.408 \text{ mm}\text{día}^{-1}$

Altura de agua	Volumen por unidad de área		Energía por unidad de área
$mm$ $\text{día}^{-1}$	$m^3 \text{ ha}^{-1}$ $\text{día}^{-1}$	$I s^{-1}$ $\text{ha}^{-1}$	$Mj \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$
1mm $\text{día}^{-1}$	1	10	0.116
1 m <sup>3</sup> $\text{ha}^{-1}$ $\text{día}^{-1}$	0.1	1	0.012
1 l $s^{-1}$ $\text{ha}^{-1}$	8.64	86.4	1
1 MJ $\text{m}^{-2}$ $\text{día}^{-1}$	0.408	4.082	0.047
			1

## MÉTODO DEL TANQUE EVAPORIMETRO

- Los tanques proporcionan una medida del *efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad* sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua.
- La evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$ET_o = K_p E_{pan}$$

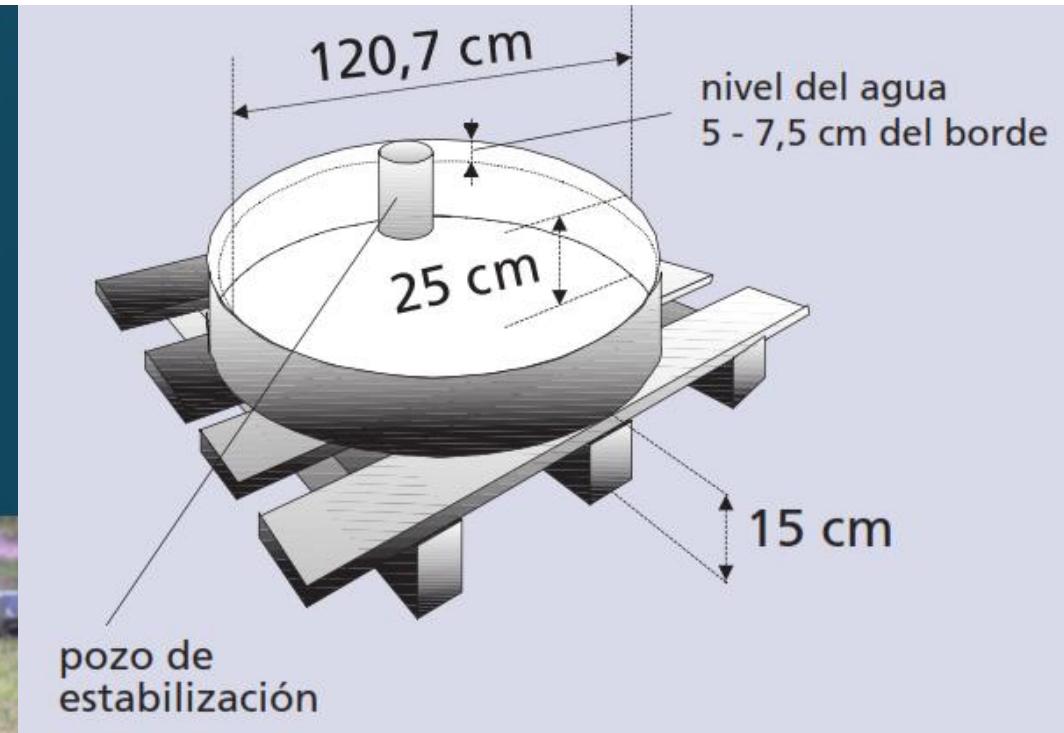
Eto = evapotranspiración de referencia [mm día<sup>-1</sup>],

Kp = coeficiente del tanque evaporímetro [-],

Epan = evaporación del tanque evaporímetro [mm día<sup>-1</sup>].

## TANQUE TIPO “A”

Fe galvanizado (calibre 22)

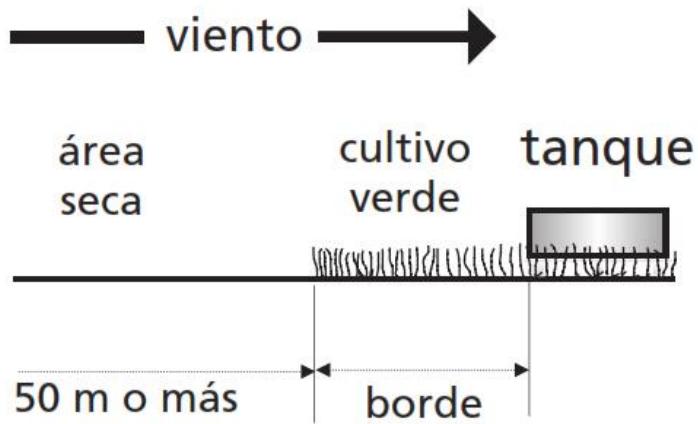


## **COEFICIENTE DEL TANQUE EVAPORÍMETRO (KP)**

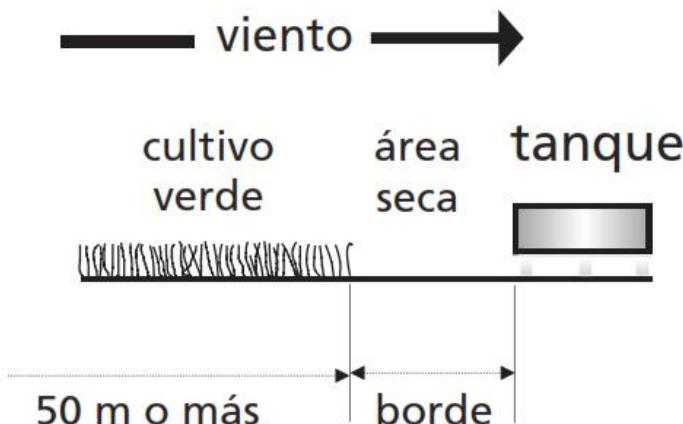
**Depende:**

- ✓ Cobertura del suelo
- ✓ Ubicación del tanque
- ✓ Viento
- ✓ Condiciones generales de humedad

## Caso A



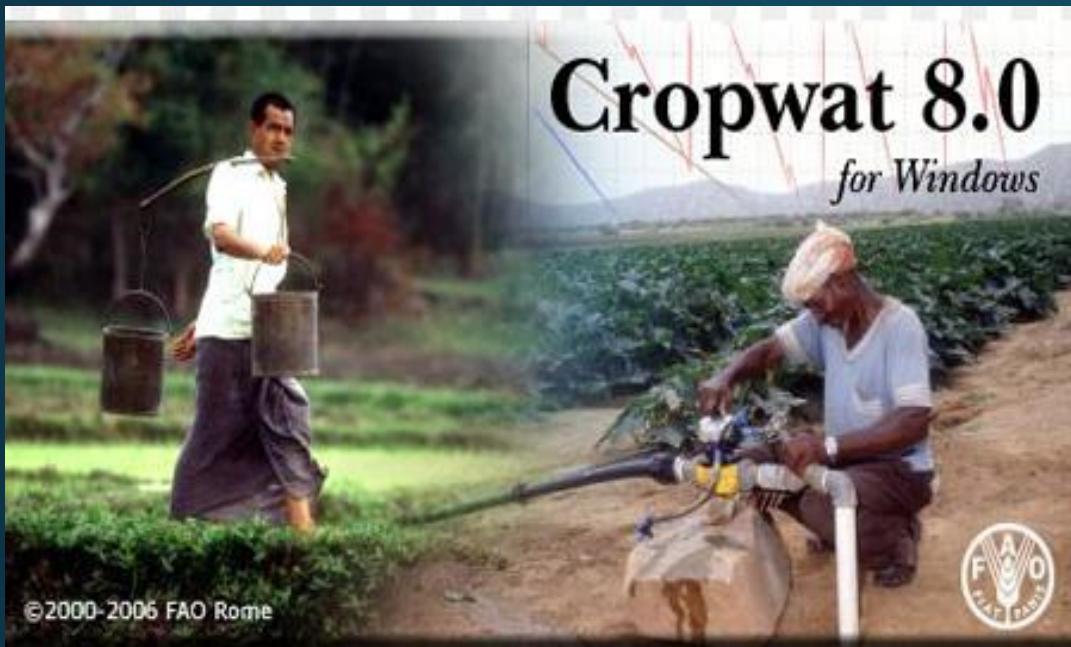
## Caso B



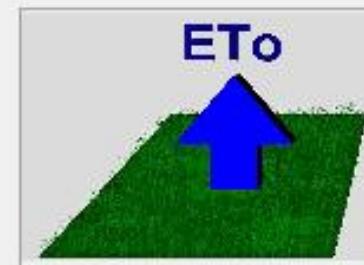
- ✓ CASO A: Localizado en zona de pasto corto verde y rodeado por suelo en barbecho (desnudo)
- ✓ CASO B: Sobre un suelo en barbecho y rodeado por cultivo

Coeficientes del tanque evaporímetro ( $K_p$ ) para el tanque Clase A para diversas localizaciones y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa (Serie FAO Riego y drenaje No. 24)

Tanque Clase A	HR media	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada						Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo								
		baja			media			alta			baja			media		
		< 40	40-70	> 70	< 40	40-70	> 70	< 40	40-70	> 70	< 40	40-70	> 70	< 40	40-70	> 70
Velocidad del viento (m s <sup>-1</sup> )	Distancia del cultivo a barlovento (m)							Distancia del barbecho a barlovento (m)								
Baja		1	,55	,65	,75			1	,7	,8	,85					
	< 2	10	,65	,75	,85			10	,6	,7	,8					
		100	,7	,8	,85			100	,55	,65	,75					
		1 000	,75	,85	,85			1 000	,5	,6	,7					
Moderada		1	,5	,6	,65			1	,65	,75	,8					
	2-5	10	,6	,7	,75			10	,55	,65	,7					
		100	,65	,75	,8			100	,5	,6	,65					
		1 000	,7	,8	,8			1 000	,45	,55	,6					
Alta		1	,45	,5	,6			1	,6	,65	,7					
	5-8	10	,55	,6	,65			10	,5	,55	,65					
		100	,6	,65	,7			100	,45	,5	,6					
		1 000	,65	,7	,75			1 000	,4	,45	,55					
Muy alta		1	,4	,45	,5			1	,5	,6	,65					
	> 8	10	,45	,55	,6			10	,45	,5	,55					
		100	,5	,6	,65			100	,4	,45	,5					
		1 000	,55	,6	,65			1 000	,35	,4	,45					

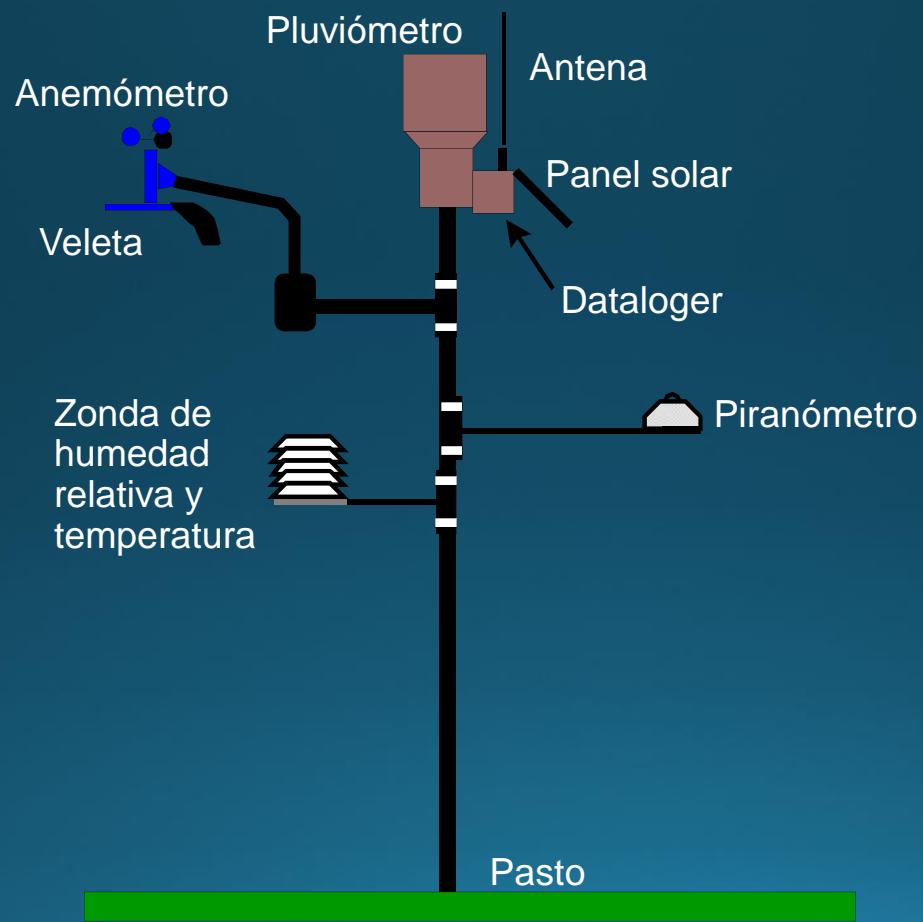


## ETo calculator



**Evapotranspiration from a reference surface**

# Estación Agrometeorológica Automatizada



# APLICACIONES DE ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS

USO	UBICACIÓN	PENDIENTE
• Pronóstico de Riego en Tiempo Real	• En cultivo de referencia: pasto de 12cm altura, bien regado y cortado con albedo de 0.23, área libre de obstrucciones	• Plano o poca pendiente
• Pronóstico de Plagas y Enfermedades	• En el cultivo de interés (área homogénea, todos los árboles de la misma altura)	• De preferencia con poca pendiente; si hay pendiente fuerte, repetir mediciones en la parte más alta y en la más baja de la huerta
• Pronóstico de Heladas	• En el cultivo de interés	• Si existe desnivel importante, replicar mediciones de Temperatura y Hum. Rel. en la parte más alta y en la más baja de la huerta

# APLICACIONES DE ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS

USO	VARIABLES MEDIDAS	ALTURAS DE SENSORES
Pronóstico de Riego en Tiempo Real	➤ Radiación Solar ➤ $T_{air}$ , Hum. Rel. ➤ Vel. y Dir. del Viento ➤ Precipitación	Libre de obstrucciones 1.5m 2m 1m, libre de obstrucciones
Pronóstico de Plagas y Enfermedades	➤ $T_{air}$ , Hum. Rel. ➤ $T_{suelo}$ ➤ $T_{follaje}$ , Hum. Hoja ➤ Precipitación ➤ Radiación Solar ➤ Vel. y Dir. del Viento	> 2m arriba del cultivo -15 cm dentro del follaje 1m, libre de obstrucciones libre de obstrucciones > 2m arriba del cultivo
Pronóstico de Heladas	➤ $T_{air}$ , Hum. Rel. ➤ $T_{suelo}$ ➤ $T_{follaje}$ ➤ Precipitación ➤ Radiación Solar ➤ Vel. y Dir. del Viento	> 2m arriba del cultivo 0m (en la superficie del suelo) dentro del follaje 1m, libre de obstrucciones libre de obstrucciones >2m arriba del cultivo

## MANTENIMIENTO NO-TÉCNICO

- Limpiar la protección de radiación y el filtro del sensor de temperatura y humedad relativa.
- Nivelar y limpiar el piranómetro.
- Nivelar y limpiar el orificio y la cucharilla(s) del pluviómetro
- Alinear verticalmente los sensores del viento.
- Limpiar la caja del dataloger, revisar el desecante en la caja (recargar si es necesario).
- Limpiar el área del suelo arriba del sensor de temperatura del suelo (si está instalado): remover la basura y/o vegetación alta

## MANTENIMIENTO NO-TÉCNICO

- Revisar que los cables/alambrres no estén dañados o cortados (causado por animales o vandalismo)
- Revisar que los cables expuestos a la intemperie no estén degradados por la luz UV
- Cortar el pasto/vegetación bajo y alrededor de la estación
- Revisar y ajustar tensores para asegurar que la estación esta instalada bien y nivelada

# MANTENIMIENTO TÉCNICO

Sensor	Periodo de Mantenimiento Técnico (y/o Recalibración)
Temperatura del Aire	Cada 1-2 años: calibración en laboratorio
Humedad Relativa	Cada 6 meses - 1 año: calibración en laboratorio
Piranómetro	Cada año: calibración en situ o en laboratorio
Anemómetro	cada 1 año: cambio de baleros y calibración
Veleta del viento	cada 2 años: cambio de baleros y calibración
Pluviómetro	cada 1 año: calibración en situ, cada 3-5 años: calibración en laboratorio
Temperatura del Suelo	cada 2 años: calibración en laboratorio
Cables expuestos a la intemperie	cada 5-7 años: cambiar cables
Dataloger	cada 5-10 años: enviar para revisión a la compañía proveedora

# MANTENIMIENTO TÉCNICO

Sensor	Precisión requerida
<b>Velocidad del viento</b>	$\pm 10\%$ para velocidades $>1 \text{ m s}^{-1}$
<b>Dirección del viento</b>	$\pm 10^\circ$
<b>Temperatura del aire</b>	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
<b>Temperatura del punto de rocío</b>	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
<b>Humedad relativa</b>	$\pm 1\%$
<b>Presión de vapor</b>	equivalente a $\pm 0.1^\circ\text{C}$ en la temperatura del punto de rocío
<b>Radiación solar</b>	$\pm 1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
<b>Precipitación acumulada (ppt)</b>	0.1 mm para $\text{ppt} \leq 10 \text{ mm}$ ; 2% para $\text{ppt} > 10 \text{ mm}$

$$ETc \text{ (bajo condiciones estándar)} = Eto * Kc$$

**COEFICIENTE DEL CULTIVO =  $Kc = ETc/Eto$**

- El factor  $Kc$  representa las diferencias en la evaporación del suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia.
- Varía principalmente en función de las características del cultivo, y solo varia en una pequeña proporción en función del clima.
- Representa el efecto integrado de las 4 características principales que diferencian a un cultivo en particular del cultivo del pasto de referencia:

## CARACTERÍSTICAS QUE DIFERENCIAN A UN CULTIVO EN PARTICULAR RESPECTO AL PASTO DE REFERENCIA

<i>Altura del cultivo:</i>	<i>Albedo:</i>	<i>Resistencia del cultivo:</i>	<i>Evaporación:</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>tiene influencia en el valor de la resistencia aerodinámica y en la transferencia turbulenta del vapor del agua desde el cultivo hacia la atmósfera.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>de la superficie del suelo y del cultivo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>es afectada por el área foliar (cantidad de estomas), edad, condición de la hoja y grado de control estomático. Tiene influencia en el valor de la resistencia de la superficie, <math>r_s</math>.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>que ocurre en el suelo, especialmente en la parte expuesta del mismo.</li></ul>

# FACTORES QUE DETERMINAN EL COEFICIENTE DEL CULTIVO

## Tipo de Cultivo:

- diferencias en *albedo, altura del cultivo, propiedades aerodinámicas y características de los estomas y hojas de las plantas.*

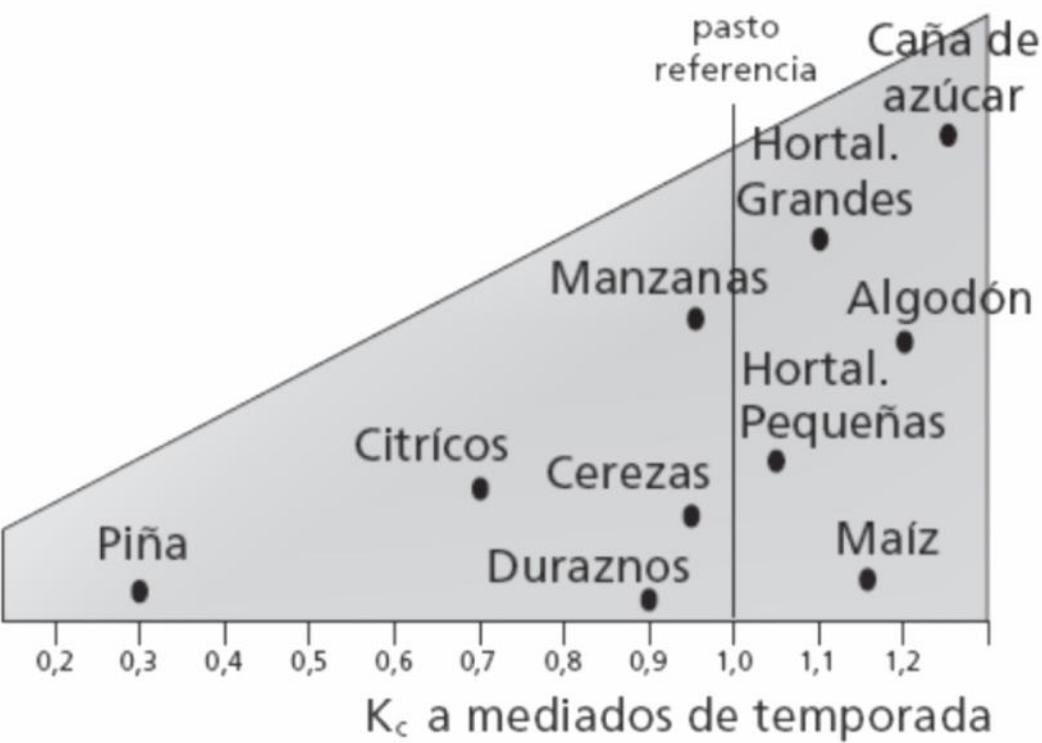
## Clima:

- variaciones en la velocidad del viento afectan el valor de la resistencia aerodinámica de los cultivos y por lo tanto el Kc, que también varía al modificarse las condiciones de humedad.

## Evaporación del suelo:

- las diferencias en la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, que existen entre los cultivos de campo y el cultivo de referencia, están incorporados en el coeficiente del cultivo.

FIGURA 20  
Valores típicos de  $K_c$  para diferentes cultivos completamente desarrollados



Las especies que presentan estomas solamente en la parte inferior de la hoja y/o que presentan gran resistencia en las hojas, presentarán valores relativamente menores de  $K_c$ . Este es el caso de los cítricos y los frutales de hojas caducas.

pasto de  
referencia

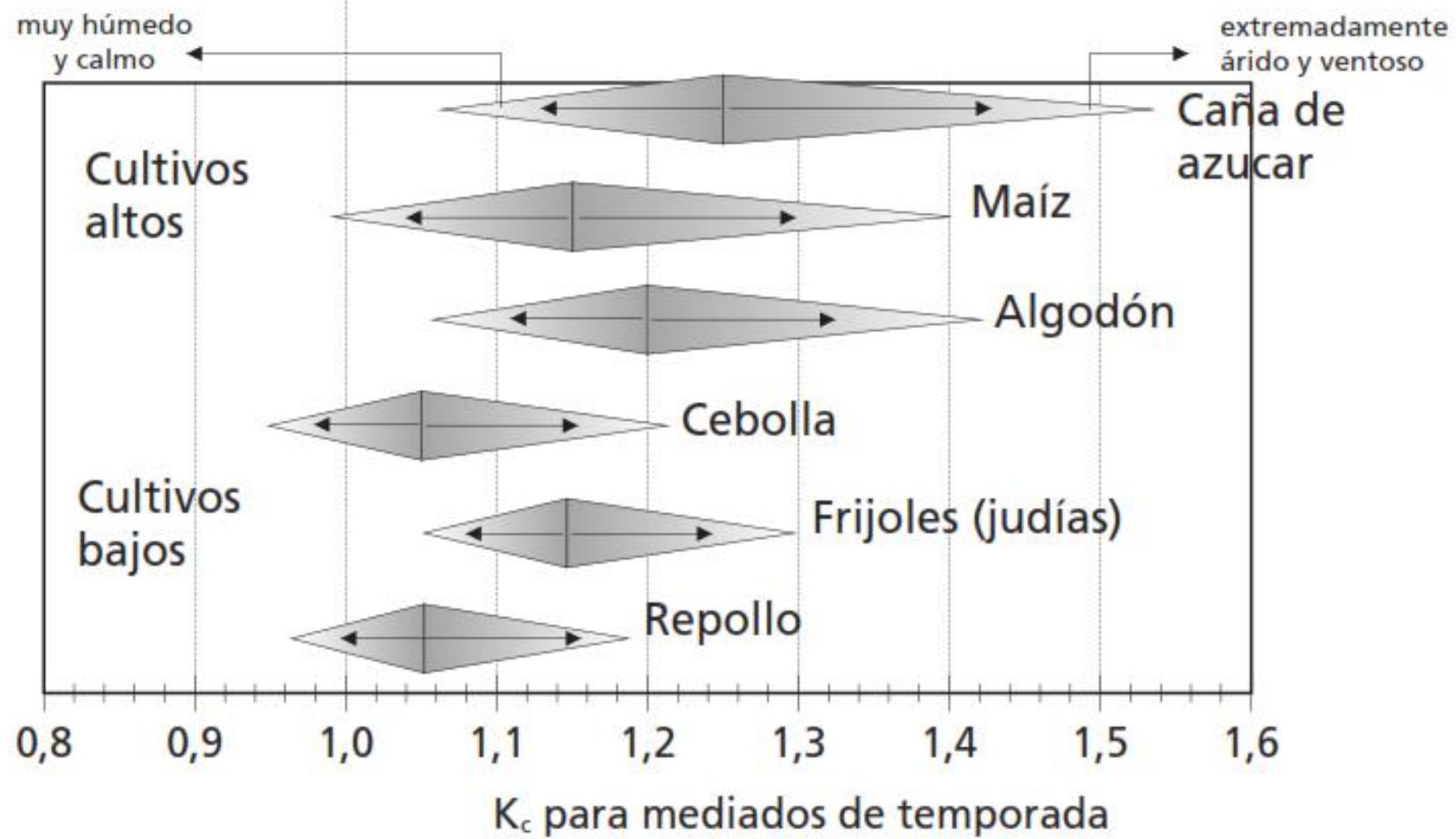
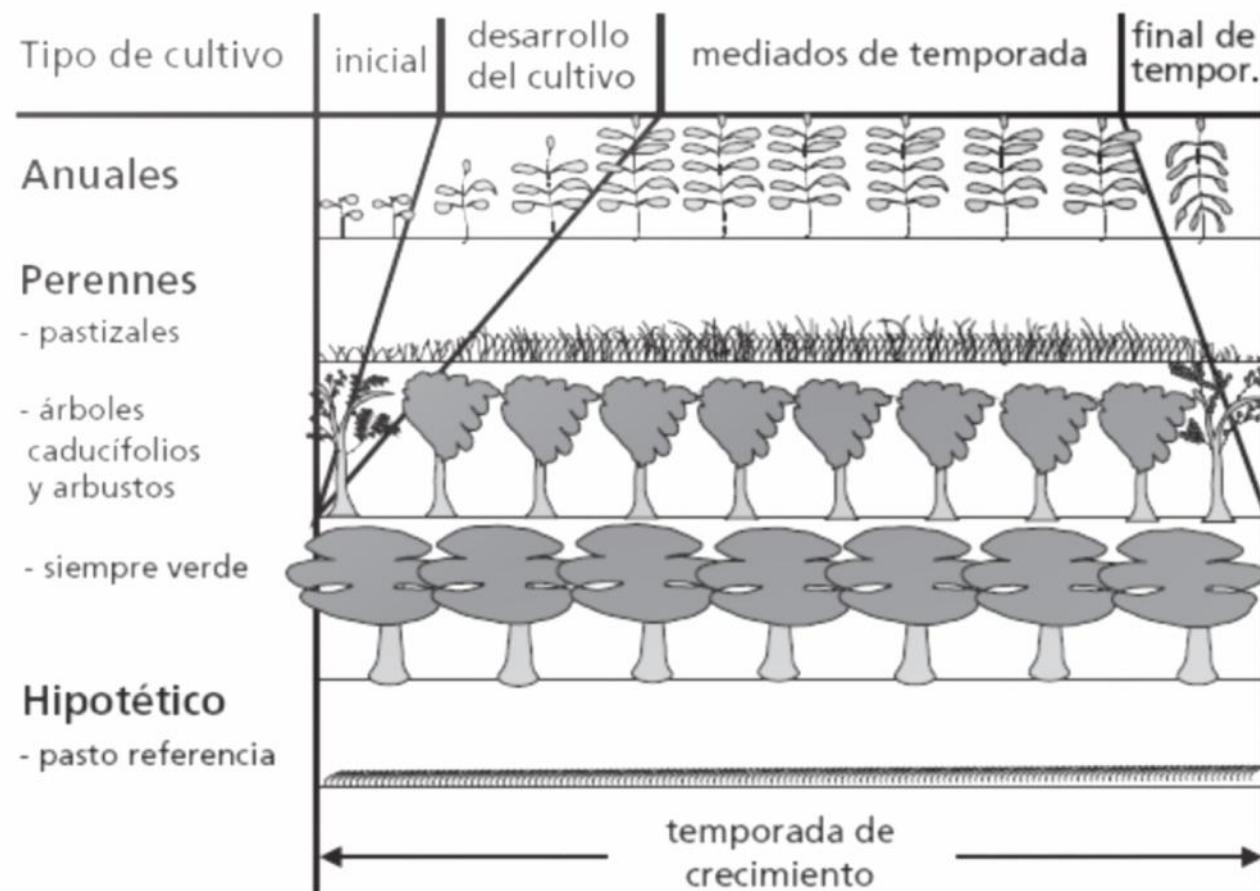


FIGURA 23  
Etapas de desarrollo de diferentes cultivos



# Etapas del crecimiento del cultivo

## *Etapa inicial ( $Kc_{ini}$ ):*

- desde siembra o aparición de las primeras hojas (cultivos perennes) hasta 10% de cobertura del suelo. El Kc depende principalmente del estado hídrico del suelo:
  - *-poder evaporante de la atmósfera*
  - *-magnitud del evento de humedecimiento*
  - *-intervalo de tiempo entre eventos de humedecimiento*

## *Etapa de desarrollo del cultivo:*

- desde que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa (70-80%) o IAF = 3.

## *Etapa de mediados de temporada ( $Kc_{med}$ ):*

- entre cobertura completa hasta comienzos de madurez (amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto). El valor de Kc en esta etapa es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales.

## *Etapa de finales de temporada ( $Kc_{fin}$ ):*

- entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia.

CUADRO 9

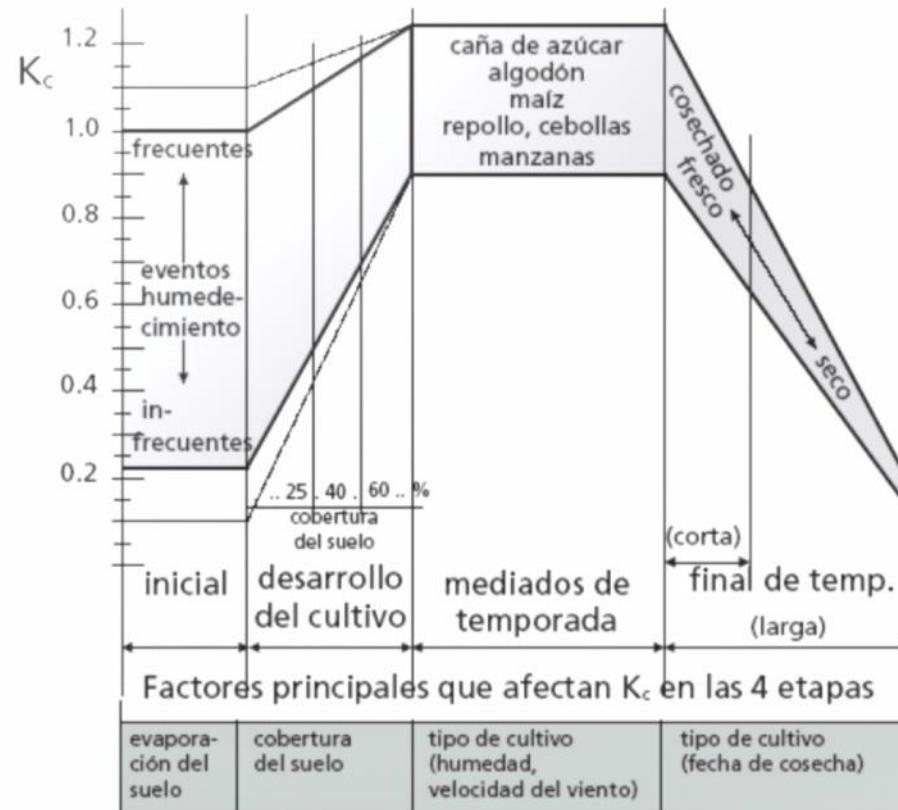
Valores aproximados de  $K_{cav}$  correspondientes a eventos moderados de humedecimiento (10-40 mm) y texturas medias del suelo.

Intervalo entre eventos de humedecimiento	Poder evaporante de la atmósfera ( $ET_0$ )			
	bajo 1 - 3 mm dia <sup>-1</sup>	moderado 3 - 5 mm dia <sup>-1</sup>	alto 5 - 7 mm dia <sup>-1</sup>	muy alto > 7 mm dia <sup>-1</sup>
- menor que semanal				
- semanal	1,2 - 0,8	1,1 - 0,6	1,0 - 0,4	0,9 - 0,3
- mayor que una vez por semana	0,8	0,6	0,4	0,3
	0,7 - 0,4	0,4 - 0,2*	0,3 - 0,2*	0,2* - 0,1*

Valores obtenidos a partir de las Figuras 29 y 30

(\*) Nótese que el intervalo entre riegos podría ser demasiado largo para sostener una transpiración completa en algunos cultivos anuales jóvenes.

FIGURA 24  
Rangos típicos esperados del valor de  $K_c$  para las cuatro etapas del crecimiento



## COEFICIENTE DE CULTIVO

- I. **Coeficiente único del cultivo ( $K_c$ )**: los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se combinan en un coeficiente  $K_c$  único. Se usa para casos de métodos de riego por aspersión y superficie e intervalos de riego de 10 o más días.
- II. **Coeficiente dual del cultivo ( $K_{cb} + K_e$ )**: se determinan por separado los efectos de la transpiración del cultivo y de la evaporación en el suelo.

El coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) se usa para describir la transpiración de la planta, y el coeficiente de evaporación del agua del suelo ( $K_e$ ) para describir la evaporación que ocurre en la superficie del suelo.

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

# COEFICIENTE DE CULTIVO

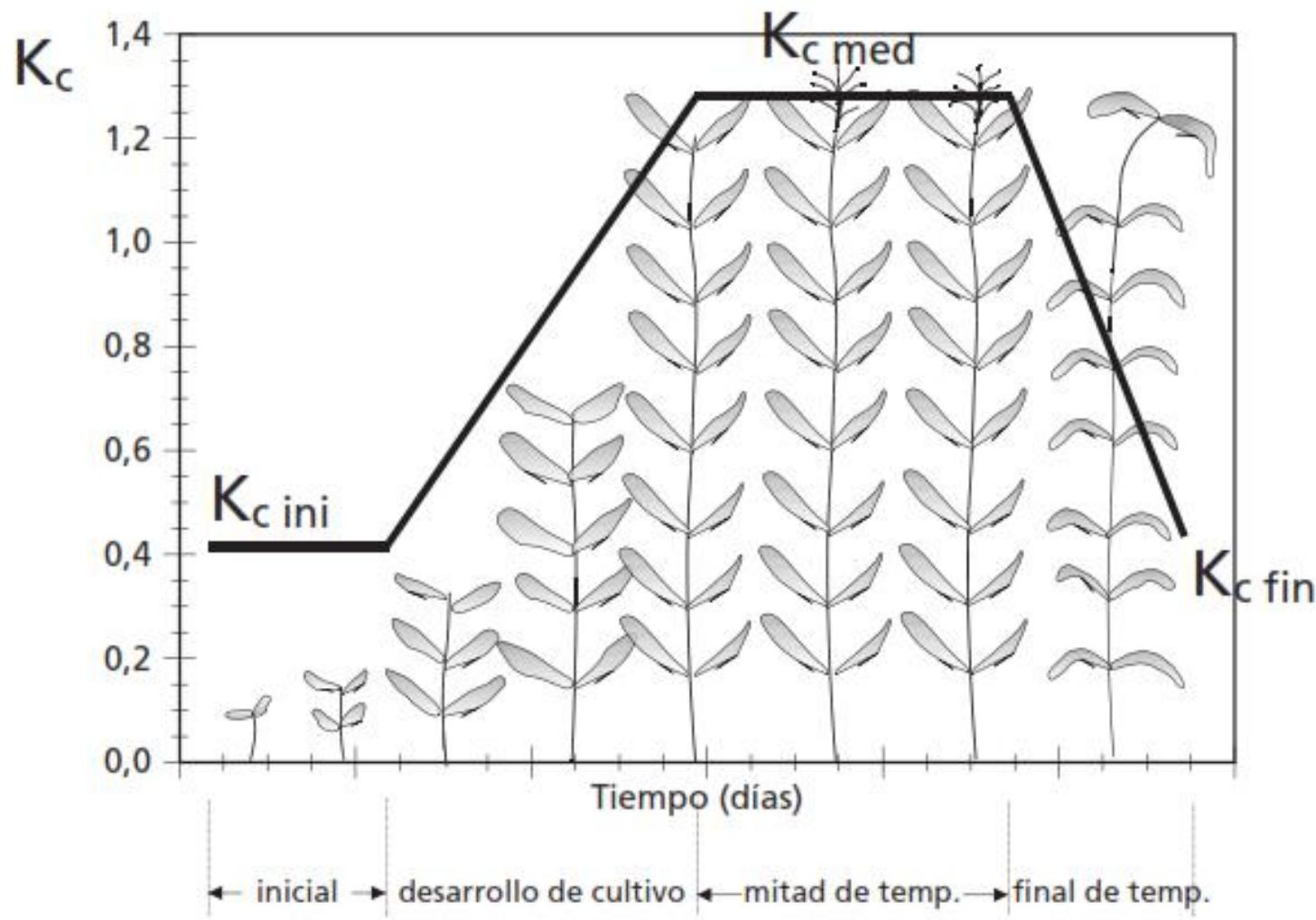
## *El coeficiente basal del cultivo (Kcb)*

- =  $ET_c/ET_0$  cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero el contenido de agua en la rizósfera es totalmente adecuado para mantener la transpiración de la planta.
- Importante en la etapa inicial, 5-10% menor que  $K_c$  en la etapa media.

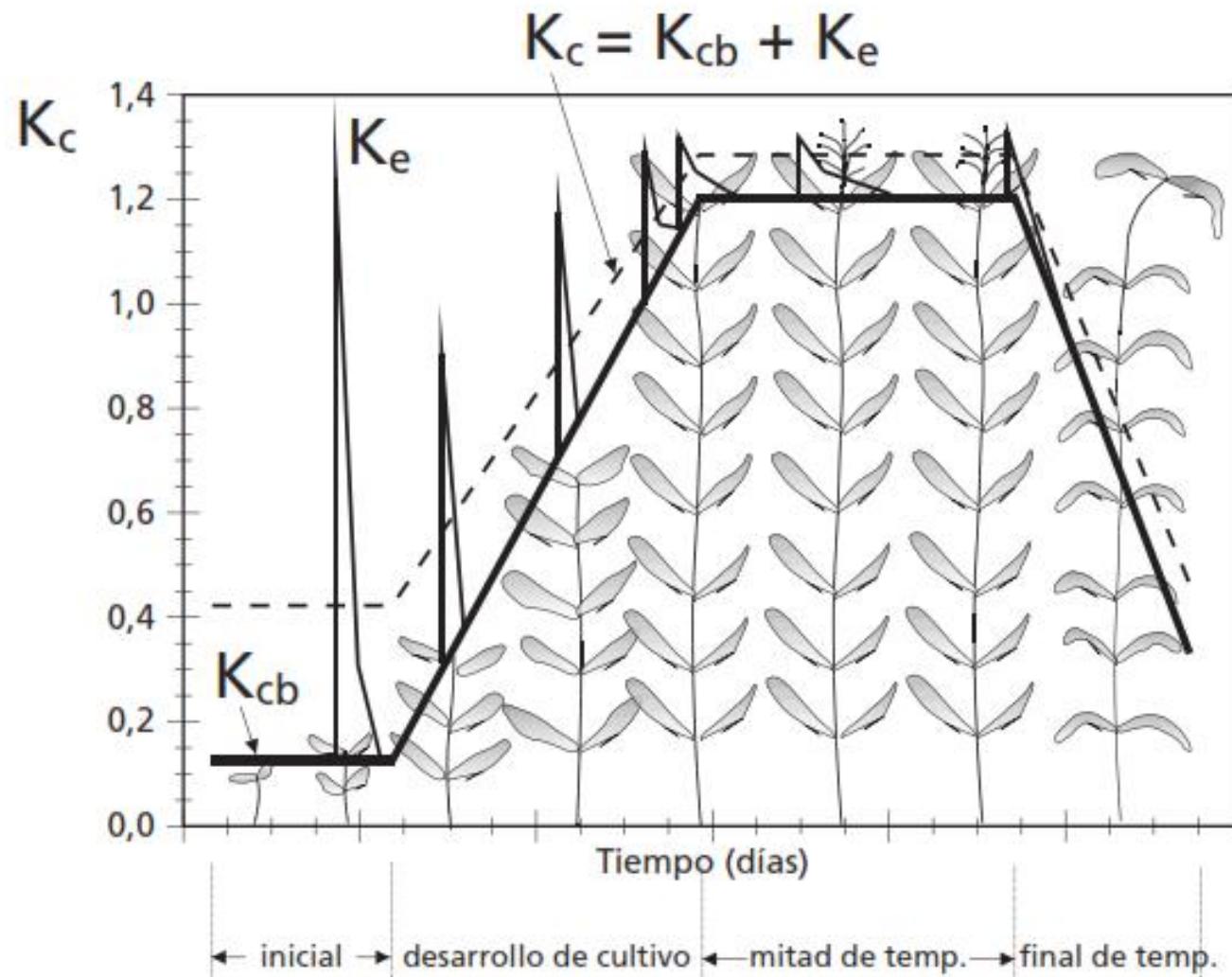
## *El coeficiente de evaporación del agua del suelo (Ke)*

- Describe el componente de evaporación que ocurre en la superficie del suelo.
- Será grande después de una lluvia o riego, se reducirá a medida que se seca la superficie del suelo y será nulo cuando no exista agua para evaporación.
- Deberá usarse en caso de calendario de riego en tiempo real y para riegos de alta frecuencia, pivote central o movimiento lineal.

FIGURA 25  
Curva generalizada del coeficiente del cultivo,  
correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo



**Curvas del coeficiente del cultivo mostrando las curvas de  $K_{cb}$  (línea gruesa), de la evaporación en el suelo  $K_e$  (línea delgada) y la curva correspondiente de  $K_c = K_{cb} + K_e$  (línea punteada)**



CUADRO 10

## Criterios generales de selección para los procedimientos del coeficiente único y dual del cultivo

	Coeficiente único del cultivo $K_c$	Coeficiente dual del cultivo $K_{cb} + K_s$
Propósito del cálculo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diseño y planificación del riego</li> <li>- manejo del riego</li> <li>- calendarios básicos de riego</li> <li>- calendarios de riego en tiempo real para aplicaciones no frecuentes de agua (riego por superficie y aspersión)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigación</li> <li>- calendarios de riego en tiempo real</li> <li>- calendarios de riego para aplicaciones de agua con alta frecuencia (micro-irrigación y riego por aspersión automatizado)</li> <li>- riego suplementario</li> <li>- estudios detallados de balance de agua en hidrología y suelos</li> </ul>
Escala temporal	diaria, 10 días, mensual (cálculos y datos)	diaria (cálculos y datos)
Método de cálculo	gráfico calculadora de bolsillo computadora	computadora

## COEFICIENTE ÚNICO DEL CULTIVO (Kc)

**Duración de las etapas de crecimiento:** publicación de la serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24 (usar sólo como guía general y para propósitos comparativos). Cuando sea posible se deberá utilizar *información local*.

**Valores tabulados de Kc:** En cuadros que incluyen valores típicos de  $Kc_{ini}$ ,  $Kc_{med}$  y  $Kc_{fin}$  correspondientes a distintos cultivos.

-ajustar el valor de Kc ini considerado según frecuencias de humedecimiento del suelo.

- $Kc_{med}$  y  $Kc_{fin}$  son representativos de climas sub-húmedos con una humedad relativa mínima promedio (HRmin) de alrededor 45 % y con velocidades del viento suaves a moderadas, promediando  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Para condiciones de mayor humedad o condiciones áridas, ajustar  $Kc_{med}$  y  $Kc_{fin}$

CUADRO 11

Duración de las etapas de crecimiento\* del cultivo  
para distintos períodos de siembra y regiones climáticas (días)

Cultivo	Inic. (L <sub>in</sub> )	Des. (L <sub>des</sub> )	Med (L <sub>med</sub> )	Final (L <sub>fin</sub> )	Total	Fecha de Siembra	Región
<b>a. Hortalizas Pequeñas</b>							
Brécol (Brócoli)	35	45	40	15	135	Sept.	Calif. Desierto, EU
Repollo	40	60	50	15	165	Sept.	Calif. Desierto, EU
Zanahoria	20	30	50/30	20	100	Oct/Ene.	Clima Árido
	30	40	60	20	150	Feb/Mar.	Mediterráneo
	30	50	90	30	200	Oct.	Calif. Desierto, EU
Coliflor	35	50	40	15	140	Sept	Calif. Desierto, EU
Apio (Céleri)	25	40	95	20	180	Oct.	(Semi)Árido
	25	40	45	15	125	Abril	Mediterráneo
	30	55	105	20	210	Ene.	(Semi)Árido
Tomate	30	40	40	25	135	Enero	Región Árida
	35	40	50	30	155	Abr/Mayo	Calif., EU
	25	40	60	30	155	Enero	Calif. Desierto, EU
	35	45	70	30	180	Oct/Nov.	Región Árida
	30	40	45	30	145	Abril/Mayo	Mediterráneo
Uvas	20	40	120	60	240	Abril	Latitudes Bajas
	20	50	75	60	205	Marzo	Calif., EU
	20	50	90	20	180	Mayo	Latitudes Altas
	30	60	40	80	210	Abril	Latitudes Medias (vino)
Pepino	20	30	40	15	105	Junio/Ago.	Región Árida
	25	35	50	20	130	Nov; Feb.	Región Árida
Calabaza de Invierno	20	30	30	20	100	Mar, Ago.	Mediterráneo
	25	35	35	25	120	Junio	Europa
Calabacín (zucchini)	25	35	25	15	100	Abr; Dic.	Medit.; Reg. Árida
	20	30	25	15	90	May/Junio	Medit.; Europa

\* Las duraciones de las etapas de crecimiento presentadas en este Cuadro son indicativas de condiciones generales, pudiendo variar significativamente de región a región, con las condiciones climáticas y de cultivo, y con la variedad del cultivo. Se recomienda al usuario obtener información local apropiada.

<sup>1</sup> Las crucíferas incluyen repollo, coliflor, brócoli y col de Bruselas. El amplio rango de duraciones de la temporada productiva es debido a diferencias en variedades y especies.

CUADRO 12

Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo,  $K_c$  y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ( $HR_{nh} \approx 45\%$ ,  $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$ ) para usar en la fórmula de la FAO Penman-Monteith ET<sub>c</sub>.

Cultivo	$K_{cw}^1$	$K_{cwed}$	$K_{cm}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
a. Hortalizas Pequeñas	0,7	1,05	0,95	
Brécol (Brócoli)		1,05	0,95	0,3
Col de Bruselas		1,05	0,95	0,4
Repollo		1,05	0,95	0,4
Zanahoria		1,05	0,95	0,3
Pimiento Dulce (campana)		1,05 <sup>2</sup>	0,90	0,7
Tomate		1,15 <sup>2</sup>	0,70-0,90	0,6
c. Hortalizas- Familia de las Cucurbitáceas	0,5	1,00	0,80	
Melón	0,5	0,85	0,60	0,3
Pepino – Cosechado Fresco	0,6	1,00 <sup>2</sup>	0,75	0,3
– Cosechado a Máquina	0,5	1,00	0,90	0,3
Calabaza de Invierno		1,00	0,80	0,4
Calabacín (zucchini)		0,95	0,75	0,3
Melón dulce		1,05	0,75	0,4
Sandía	0,4	1,00	0,75	0,4
d. Raíces y Tubérculos	0,5	1,10	0,95	
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4
Yuca o Mandioca – año 1	0,3	0,80 <sup>3</sup>	0,30	1,0
– año 2	0,3	1,10	0,50	1,5
Chirivía	0,5	1,05	0,95	0,4
Patata o Papa		1,15	0,75 <sup>4</sup>	0,6
Camote o Batata		1,15	0,65	0,4
Uvas – Mesa o secas (pasas)	0,30	0,85	0,45	2
– Vino	0,30	0,70	0,45	1,5-2

<sup>1</sup> Estos son valores generales de  $K_{cw}$  considerando un manejo típico del riego y humedecimiento del suelo. Para humedecimientos frecuentes, tal como en el caso de riego por aspersión de alta frecuencia o lluvia diaria, estos valores pueden aumentar sustancialmente pudiendo acercarse a 1,0 a 1,2. El valor de  $K_{cw}$  es una función del intervalo de humedecimiento y la tasa potencial de evaporación durante las etapas inicial y de desarrollo del cultivo, siendo estimado con mayor exactitud a través de las Figuras 29 y 30, o la Ecuación 7-3 del Anexo 7, o usando el coeficiente dual  $K_{cw} + K_e$ . Utilice el valor de  $K_{cm}$  para el grupo cuando no aparece un valor de  $K_{cw}$  para el cultivo.

<sup>2</sup> En algunas oportunidades, los Frijoles o Judías, Guisantes, Leguminosas, Tomates, Pimientos y Pepinos son cultivados utilizando empalizadas que alcanzan los 1,5 a 2 metros de altura. En estos casos es necesario incrementar los valores de  $K_c$ . Para frijoles o judías verdes, pimientos y pepinos se puede asumir un valor de 1,15 y en el caso de los tomates, frijoles secos y los guisantes, de 1,20. Bajo esas condiciones también debe aumentarse el valor de  $h$ .

<sup>3</sup> Los valores correspondientes a la etapa de mediados de temporada para la mandioca, asumen condiciones de no-estrés durante o después de la temporada lluviosa. Los valores de  $K_{cm}$  toman en cuenta el letargo durante la estación seca.

<sup>4</sup> El valor de  $K_{cm}$  para papas o patatas de ciclo largo con rotura de los estolones es alrededor de 0,40.

<sup>5</sup> El valor de  $K_{cm}$  corresponde a condiciones sin riego durante el último mes de la temporada productiva. El valor de  $K_{cm}$  para la remolacha azucarera es mayor, hasta 1,0, cuando ocurra riego o lluvias significativas durante el último mes.

CUADRO 9

Valores aproximados de  $K_{c_{in}}$  correspondientes a eventos moderados de humedecimiento (10-40 mm) y texturas medias del suelo.

Intervalo entre eventos de humedecimiento	Poder evaporante de la atmósfera ( $ET_0$ )			
	bajo 1 - 3 mm dia <sup>-1</sup>	moderado 3 - 5 mm dia <sup>-1</sup>	alto 5 - 7 mm dia <sup>-1</sup>	muy alto > 7 mm dia <sup>-1</sup>
- menor que semanal				
- semanal	1,2 - 0,8	1,1 - 0,6	1,0 - 0,4	0,9 - 0,3
- mayor que una vez por semana	0,8	0,6	0,4	0,3
	0,7 - 0,4	0,4 - 0,2*	0,3 - 0,2*	0,2* - 0,1*

Valores obtenidos a partir de las Figuras 29 y 30

(\*) Nótese que el intervalo entre riegos podría ser demasiado largo para sostener una transpiración completa en algunos cultivos anuales jóvenes.

## *Determinación del valor de $Kc_{ini}$ :*

Ajuste mediante las siguientes figuras (fig.29 y 30), según intervalo y magnitud del evento de humedecimiento (menor a 10 mm).

FIGURA 29

Valor promedio de  $Kc_{ini}$  relacionado con el nivel de  $ET_0$  y el intervalo de tiempo entre riegos o lluvias significativas durante la etapa inicial de crecimiento, para cualquier tipo de suelo, cuando los eventos de humedecimiento sean de ligeros a medianos (3-10 mm por evento)

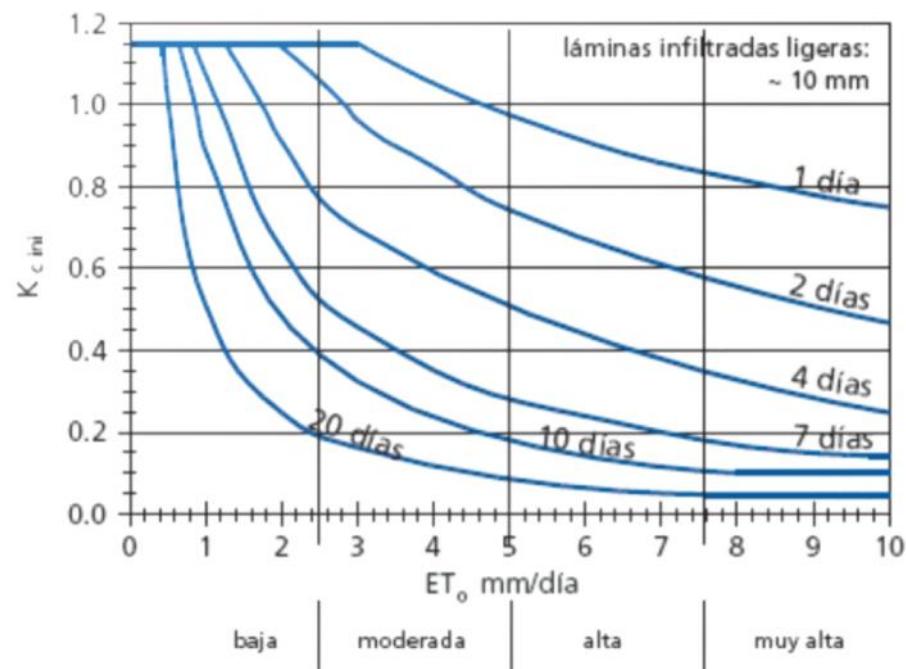


FIGURA 33  
Rangos esperados de  $K_c$  fin

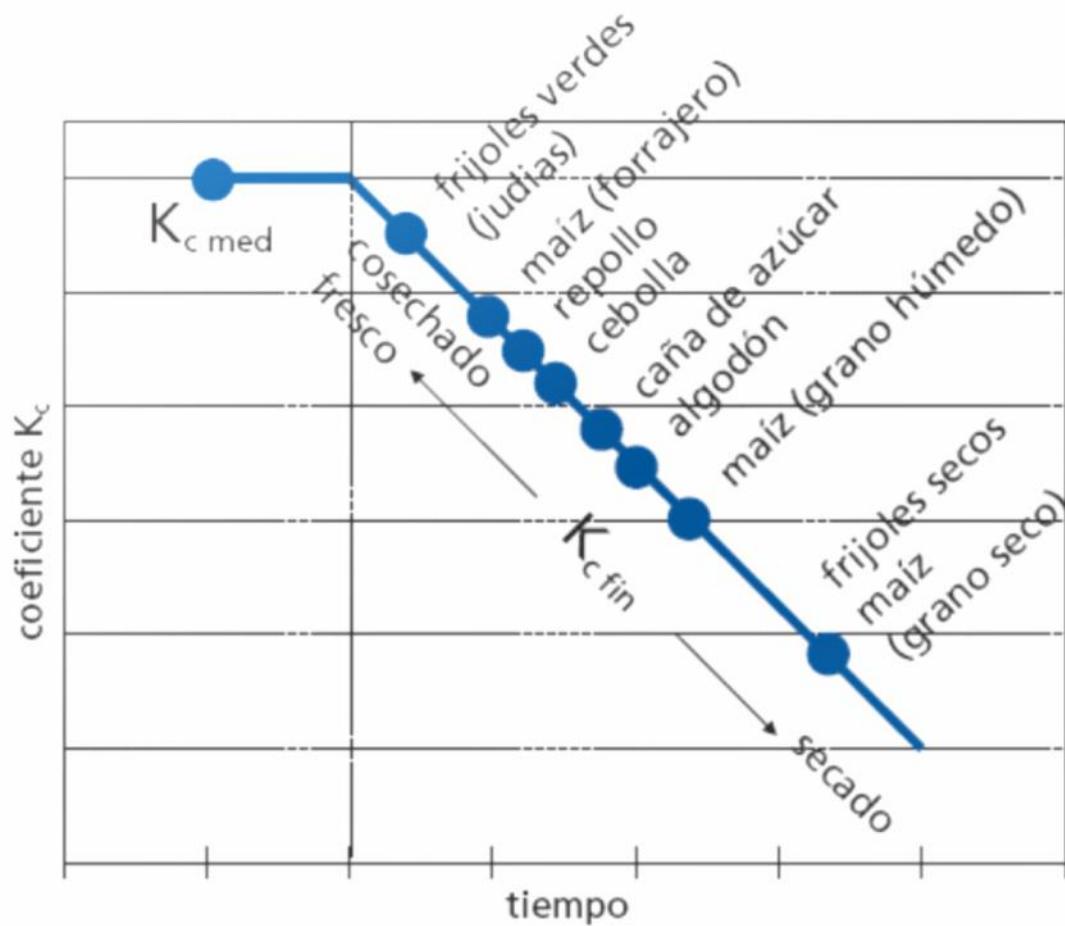
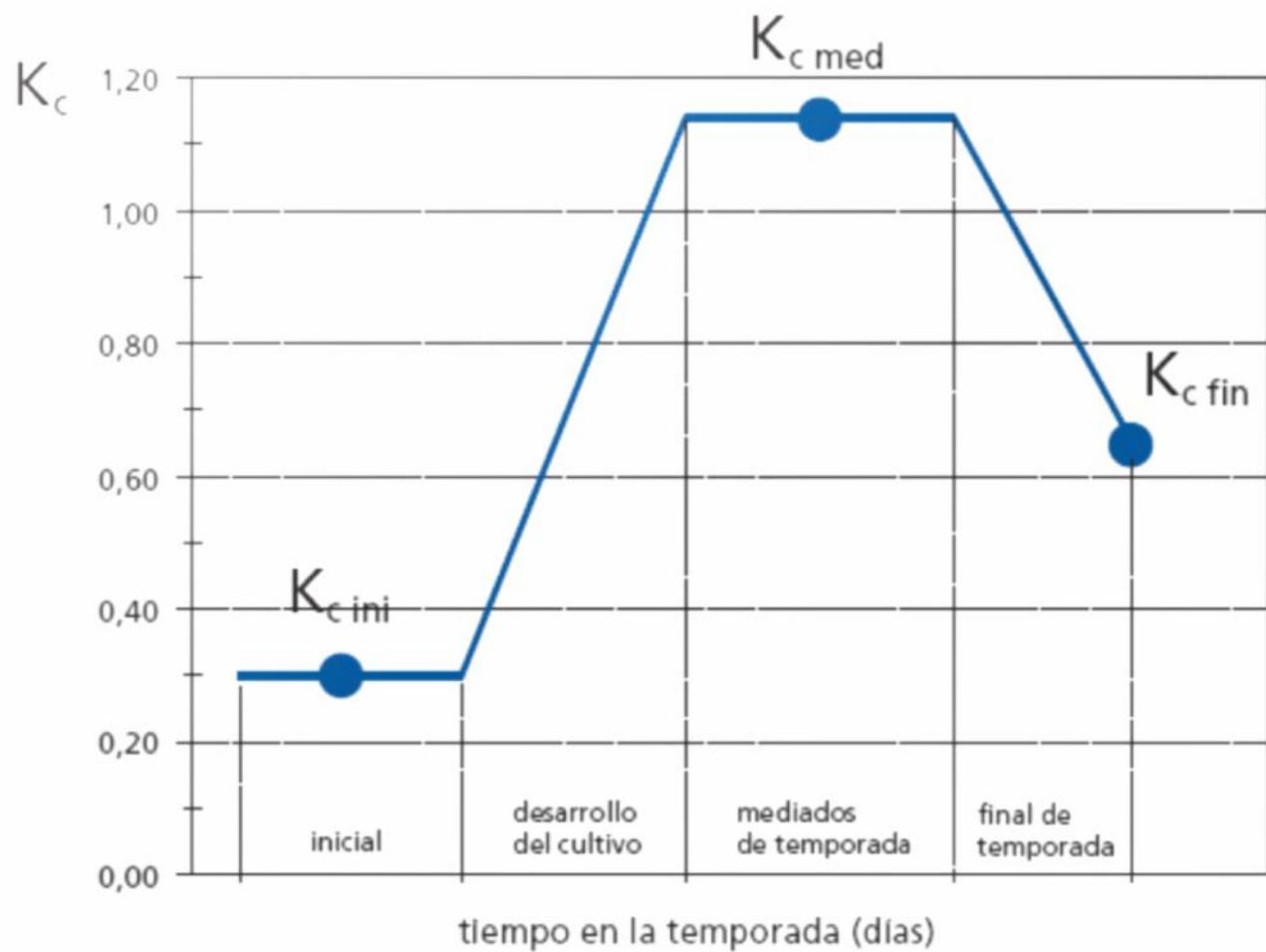
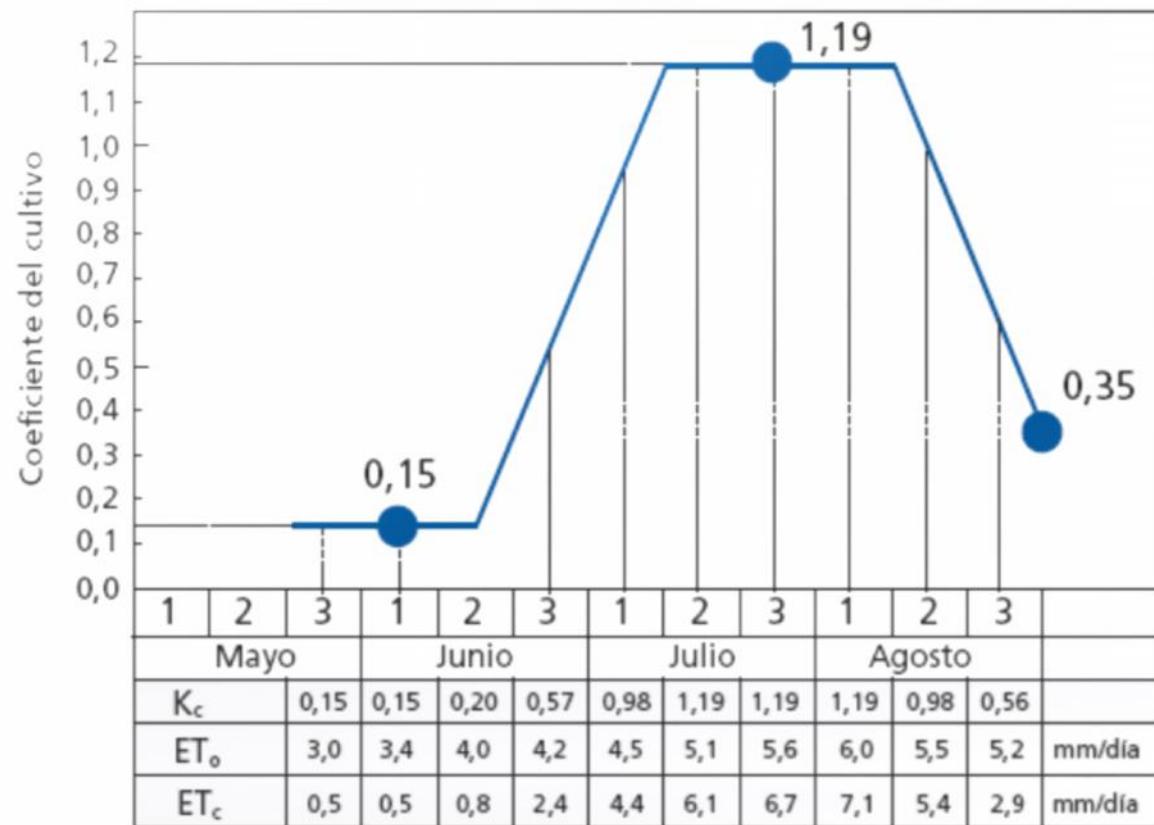


FIGURA 34  
Curva del coeficiente del cultivo



*Determinación numérica del valor de  $K_c$ : para un período determinado de la temporada de crecimiento.*

FIGURA 36  
Curva de  $K_c$  y valores decadiarios de  $K_c$  y  $ET_c$  derivados del gráfico,  
para el cultivo de frijol (judías) seco del ejemplo (Recuadro 15)



## EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO EN CONDICIONES NO ESTÁNDAR

### ET<sub>c</sub> BAJO CONDICIONES DE ESTRÉS HÍDRICO

$$ET_{c\ adj} = (K_s K_{cb} + K_c) ET_o$$

o

$$ET_{c\ adj} = K_s K_c ET_o$$

K<sub>s</sub> = coeficiente de estrés hídrico

(describe el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo)

## Agua Disponible Total (ADT):

cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radical y cuya magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radical

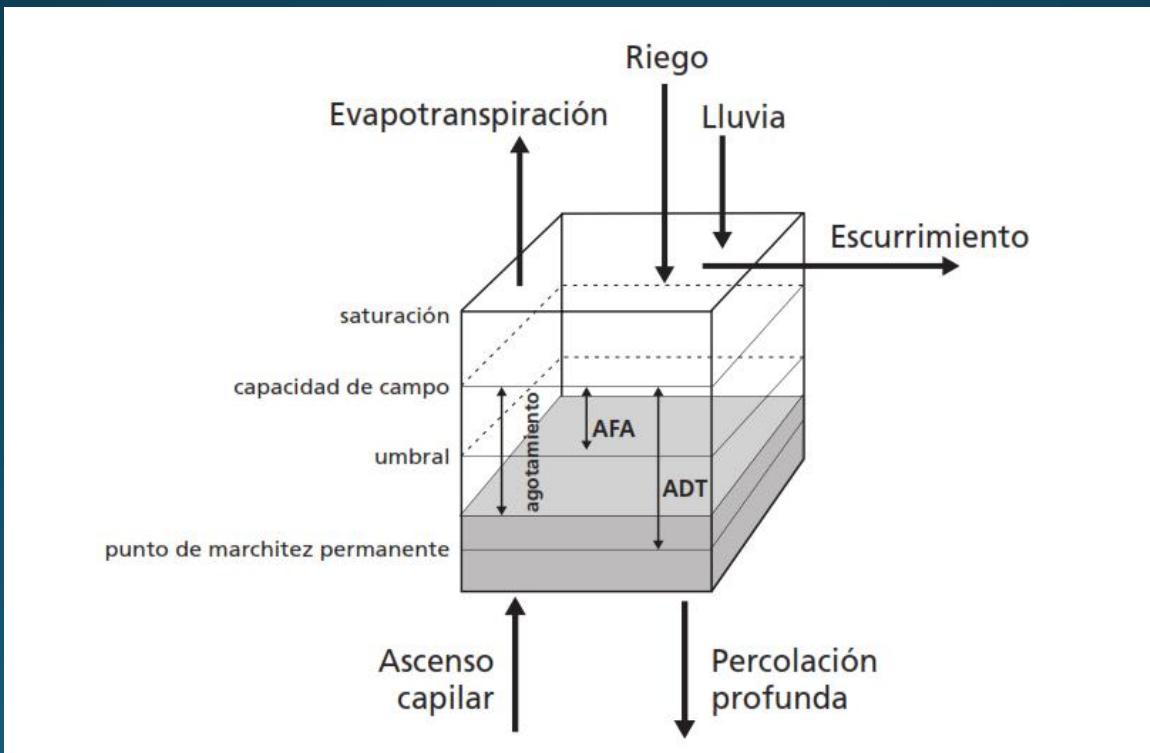
$$ADT = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r$$

ADT = total de agua disponible en la zona radicular del suelo [mm],

$\theta_{FC}$  = contenido de humedad a capacidad de campo [ $m^3 m^{-3}$ ],

$\theta_{WP}$  = contenido de humedad en el punto de marchitez permanente [ $m^3 m^{-3}$ ],

$Z_r$  = profundidad de las raíces [m]



**Agua fácilmente aprovechable (AFA):** fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico

$$AFA = p \cdot ADT$$

AFA = agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo [mm],  
p = fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ET) [0 -1]

El factor p:

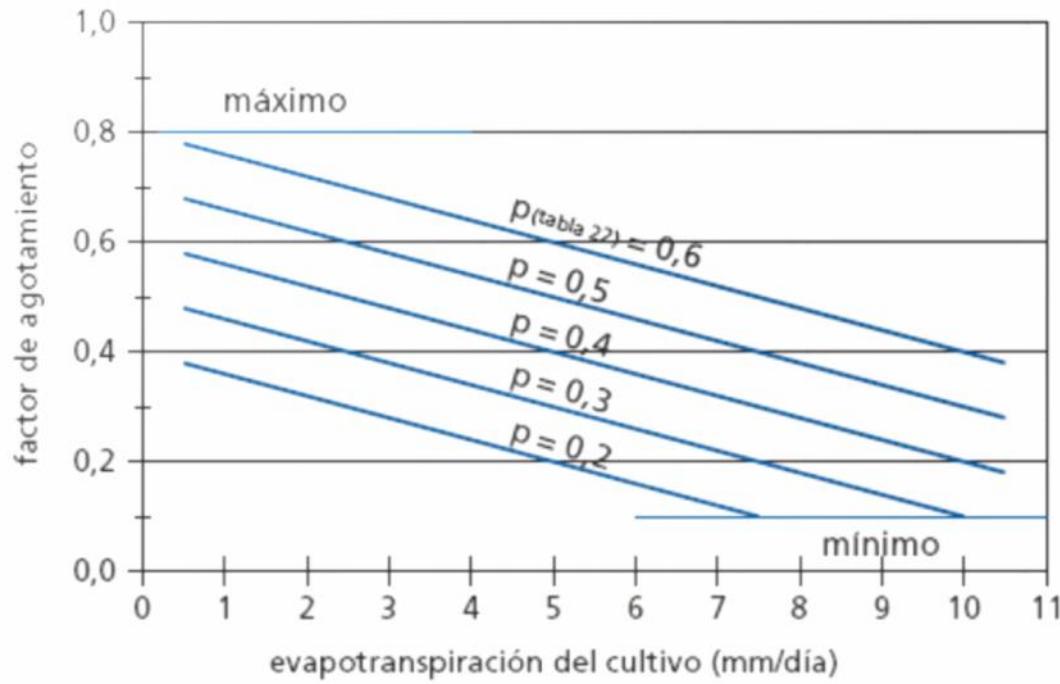
- varia de un cultivo a otro (raíces profundas: 0,7; raíces poco profundas: 0,3)
- está en función del poder evaporante de la atmósfera
- generalmente se utiliza un valor constante de p para cada período específico de desarrollo:

$$p = p_{Cuadro\ 22} + 0,04 (5 - ET_0)$$

CUADRO 22 (continuación)

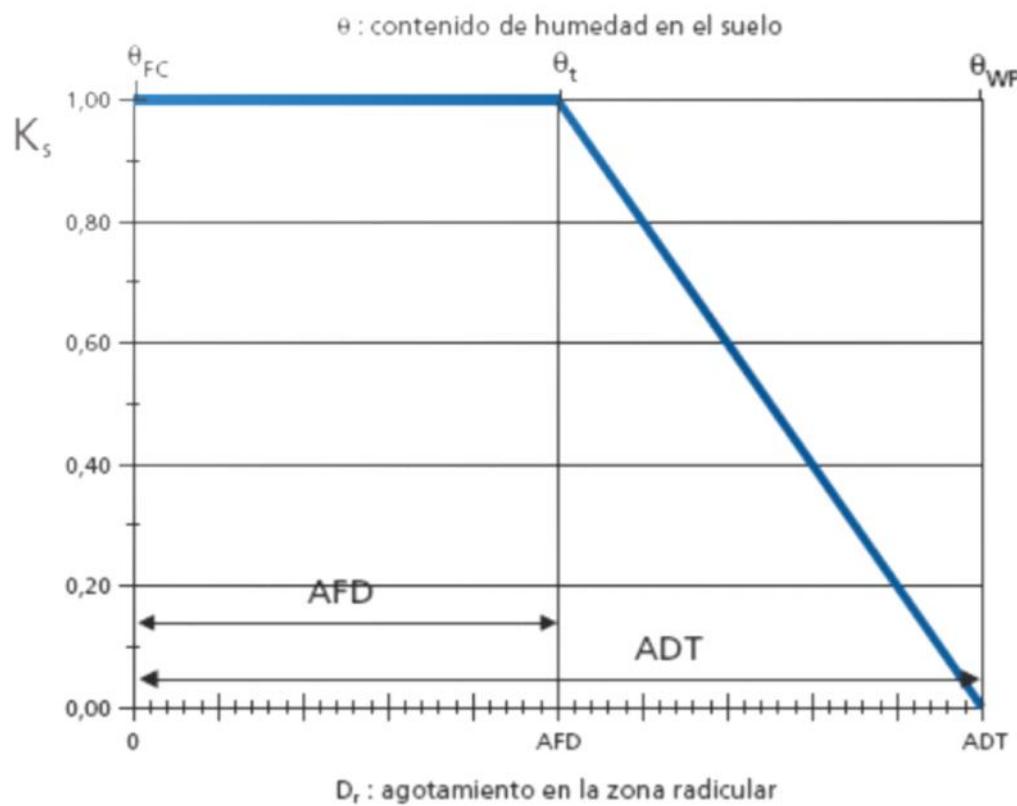
Cultivo	Profundidad radicular máxima <sup>1</sup> (m)	FracCIÓN de agotamiento <sup>2</sup> (para ET $\geq$ 5 mm dia <sup>-1</sup> ) P
e. Leguminosas (Leguminosae)		
Fríjoles o judías verdes	0,5-0,7	0,45
Fríjoles o judías, secos y legumbres	0,6-0,9	0,45
Fríjoles o judías, llima del Perú, vainas largas	0,8-1,2	0,45
Garbanzo (Chick pea)	0,6-1,0	0,50
Habas – Frescas	0,5-0,7	0,45
– Secas/Semilla	0,5-0,7	0,45
Garbanzo hindú	0,6-1,0	0,45
Caupis (cowpeas)	0,6-1,0	0,45
Maní o cacahuete	0,5-1,0	0,50
Lentejas	0,6-0,8	0,50
Guisantes o arveja – Frescos	0,6-1,0	0,35
– Secos/Semilla	0,6-1,0	0,40
Soya o soja	0,6-1,3	0,50
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inmediatamente desnudo o con mantillo)		
Alcachofa	0,6-0,9	0,45
Espárragos	1,2-1,8	0,45
Menta	0,4-0,8	0,40
Fresas	0,2-0,3	0,20
g. Cultivos Textiles		
Algodón	1,0-1,7	0,65
Lino	1,0-1,5	0,50
Sisal	0,5-1,0	0,80
h. Cultivos Oleaginosos		
Ricino	1,0-2,0	0,50
Canola (colza)	1,0-1,5	0,60
Cártamo	1,0-2,0	0,60
Uvas – Mesa o Secas (pasas)	1,0-2,0	0,35
– Vino	1,0-2,0	0,45

FIGURA 41  
Factor de agotamiento ( $p$ ) para diferentes niveles de evapotranspiración del cultivo



## COEFICIENTE DE ESTRÉS HIDRICO ( $K_s$ )

FIGURA 42  
Coeficiente de estrés hídrico,  $K_s$



## EFFECTOS DE LA SALINIDAD DEL SUELO

- ➡ La ecuación provee una aproximación inicial de la reducción que se produciría en la evapotranspiración bajo distintas condiciones de salinidad
- ➡ Si el valor promedio de CEe en la zona radicular se incrementa por encima del umbral crítico, se asume que la productividad del cultivo comenzará a disminuir en proporción al incremento de la salinidad
- ➡ La tasa de reducción de la productividad con el incremento de la salinidad se expresa en forma de una pendiente, b, la cual tiene unidades de porcentaje de reducción de la productividad por cada  $dS\ m^{-1}$  de incremento de CEe.
- ➡ El efecto de la salinidad en la productividad es específico de cada cultivo.

## RELACIÓN PRODUCTIVIDAD-SALINIDAD

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \left( CE_e - CE_{e \text{ umbral}} \right) \frac{b}{100}$$

$Y_a$	productividad real del cultivo
$Y_m$	productividad máxima esperada del cultivo cuando $CE_e < CE_{e \text{ umbral}}$
$CE_e$	conductividad eléctrica promedio del extracto de saturación en la zona radicular [ $dS m^{-1}$ ]
$CE_{e \text{ umbral}}$	conductividad eléctrica del extracto de saturación, correspondiente al umbral de $CE_e$ , cuando la productividad del cultivo comienza a reducirse por primera vez por debajo de $Y_m$ [ $dS m^{-1}$ ]
$b$	reducción de la productividad por incremento de $CE$ [%/ $(dS m^{-1})$ ]

Los valores de  $CE_{e \text{ umbral}}$  y  $b$  se obtienen por tabla

CUADRO 23

Tolerancia a las sales de cultivos agrícolas comunes, expresada como la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo correspondiente al umbral donde la productividad del cultivo se reduce por primera vez por debajo de la productividad potencial total ( $CE_{umbral}$ ), y expresada como la pendiente (b) de reducción en la productividad cuando la salinidad aumenta por encima del  $CE_{umbral}$ .

Cultivo <sup>1</sup>	$CE_{umbral}$ <sup>2</sup> (dS m <sup>-1</sup> )	b <sup>4</sup> (% / dS m <sup>-1</sup> )	Clase <sup>5</sup>
<b>a. Hortalizas pequeñas</b>			
Brócoli	2,8	9,2	MS
Col de Bruselas	1,8	9,7	MS
Repollo	1,0-1,8	9,8-14,0	MS
Zanahorias	1,0	14,0	S
Coliflor	1,8	6,2	MS
Apio (Céleri)	1,8-2,5	6,2-13,0	MS
Lechuga	1,3-1,7	12,0	MS
Cebolla	1,2	16,0	S
Espinaca	2,0-3,2	7,7-16,0	MS
Rábanos	1,2-2,0	7,6-13,0	MS
<b>b. Hortalizas – Familia de la Solanáceas</b>			
Berenjena	-	-	MS
Pimientos	1,5-1,7	12,0-14,0	MS
Tomate	0,9-2,5	9,0	MS
<b>c. Hortalizas – Familia de las Cucurbitáceas</b>			
Pepino	1,1-2,5	7,0-13,0	MS
Melones	-	-	MS
Calabaza de Invierno	1,2	13,0	MS
Calabacín (zucchini)	4,7	10,0	MT
Calabaza	3,2	16,0	MS
Sandía	-	-	MS