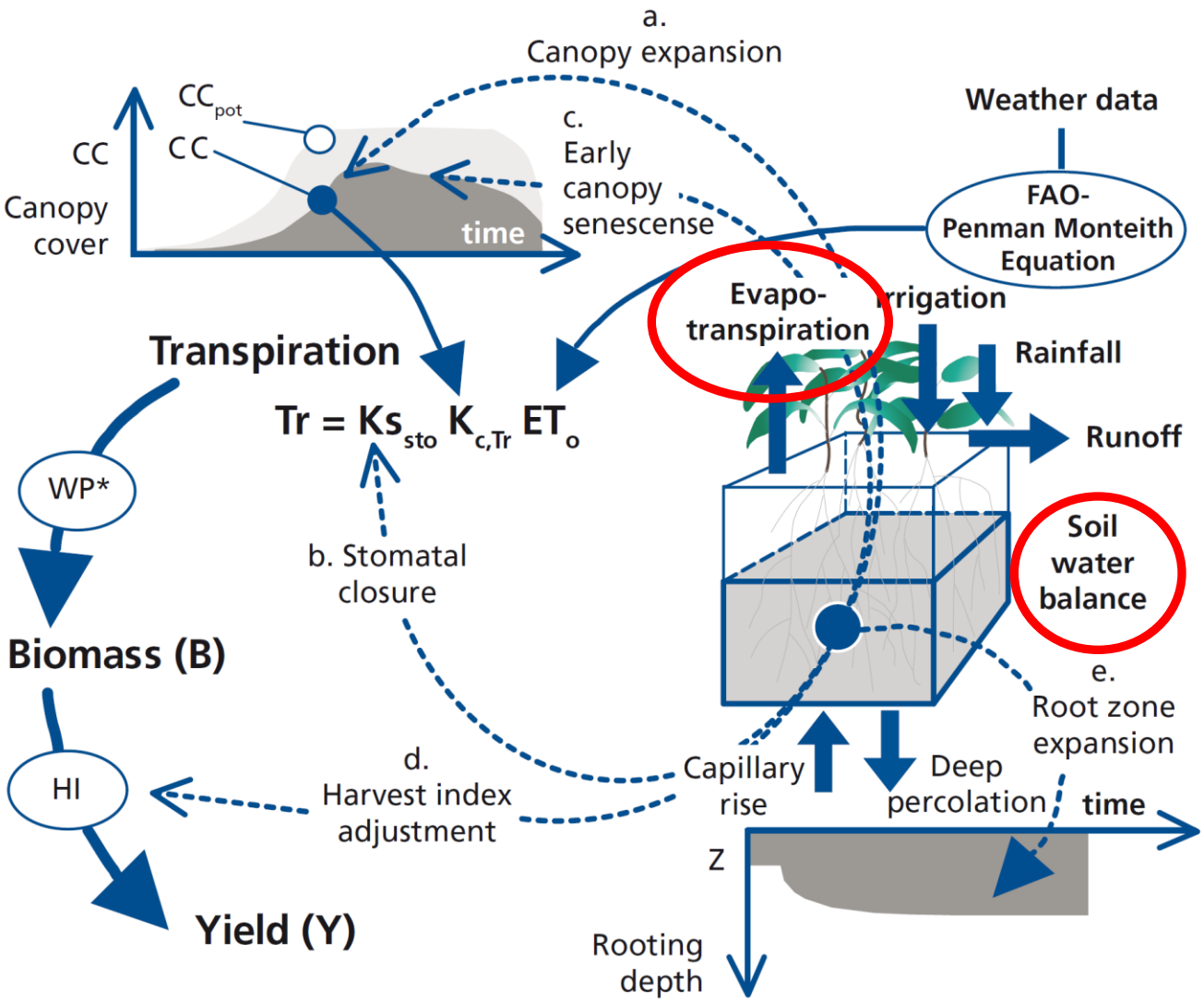
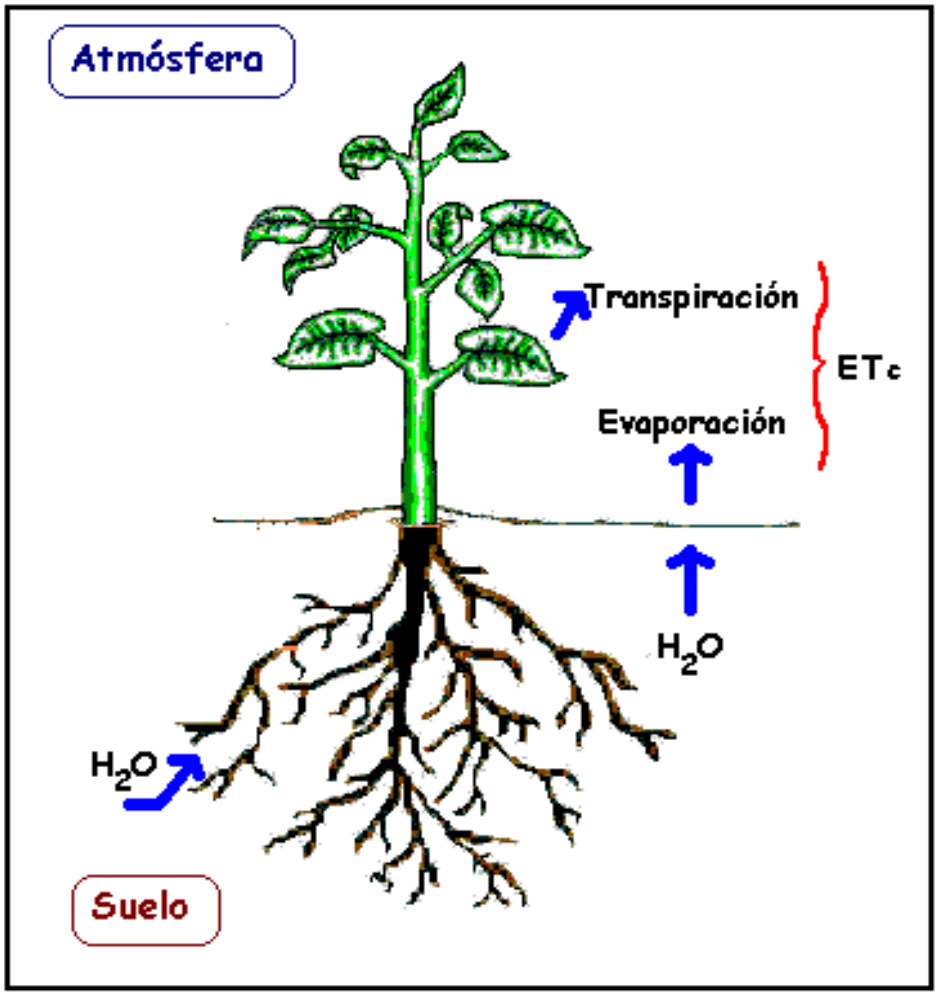
EVAPOTRANSPIRACION

Mauricio Ortiz L.
Lab. Relación Suelo-Agua-Planta
Centro de Estudios Avanzados en Fruticultura (CEAF)


a.
Canopy expansion
CC
Canopy cover
CC pot
CC
time
c.
Early canopy senescense
Weather data
FAO-Penman Monteith Equation
Evapo-transpiration
Irrigation
Rainfall
Runoff
Transpiration
Tr = Ks sto K c,Tr ET o
WP*
Biomass (B)
b. Stomatal closure
Soil water balance
e.
Root zone expansion
HI
d.
Harvest index adjustment
Capillary rise
Deep percolation
time
Z
Yield (Y)
Rooting depth

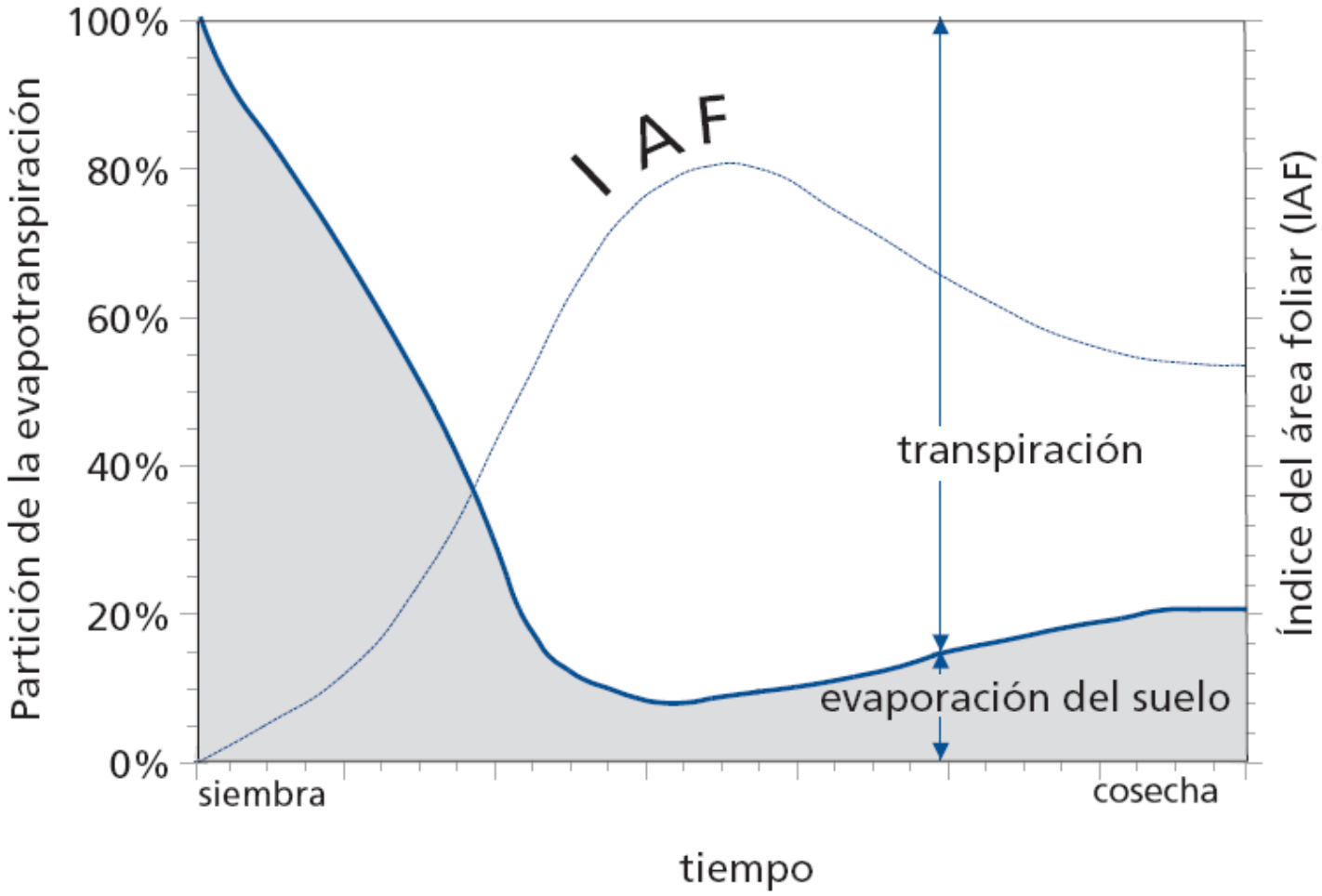
FAO 66

Calculo de ET para los cultivos



Evapotranspiración

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no es fácil distinguir entre ambos procesos.



Evaporación

- Es el proceso mediante el cual el agua liquida es convertida en vapor de agua (vaporización).

- Para el cambio de estado de liquido a vapor se requiere energía, esta la provee la **radiación solar** y en menor medida la **temperatura**.

- La fuerza necesaria para remover el vapor de agua desde la superficie evaporante es la **diferencia de presión de vapor** entre la superficie evaporante y la atmósfera alrededor de ella.

- El reemplazo del aire saturado por aire seco depende en gran medida de la **velocidad del viento**.

Evapotranspiración de referencia (ET_0)

- Es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia.

- La superficie de referencia es un prado que crece activamente, de 0,12m de altura, una resistencia fija de 70 s/m, un albedo de 0,23 y sin limitaciones de agua.

- El concepto de ET_0 fue introducido para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, del desarrollo del cultivo y de las practicas de manejo.

- ET_0 depende exclusivamente de parámetros climáticos, por lo que expresa el poder de evaporación de la atmósfera en una localidad específica y época del año.

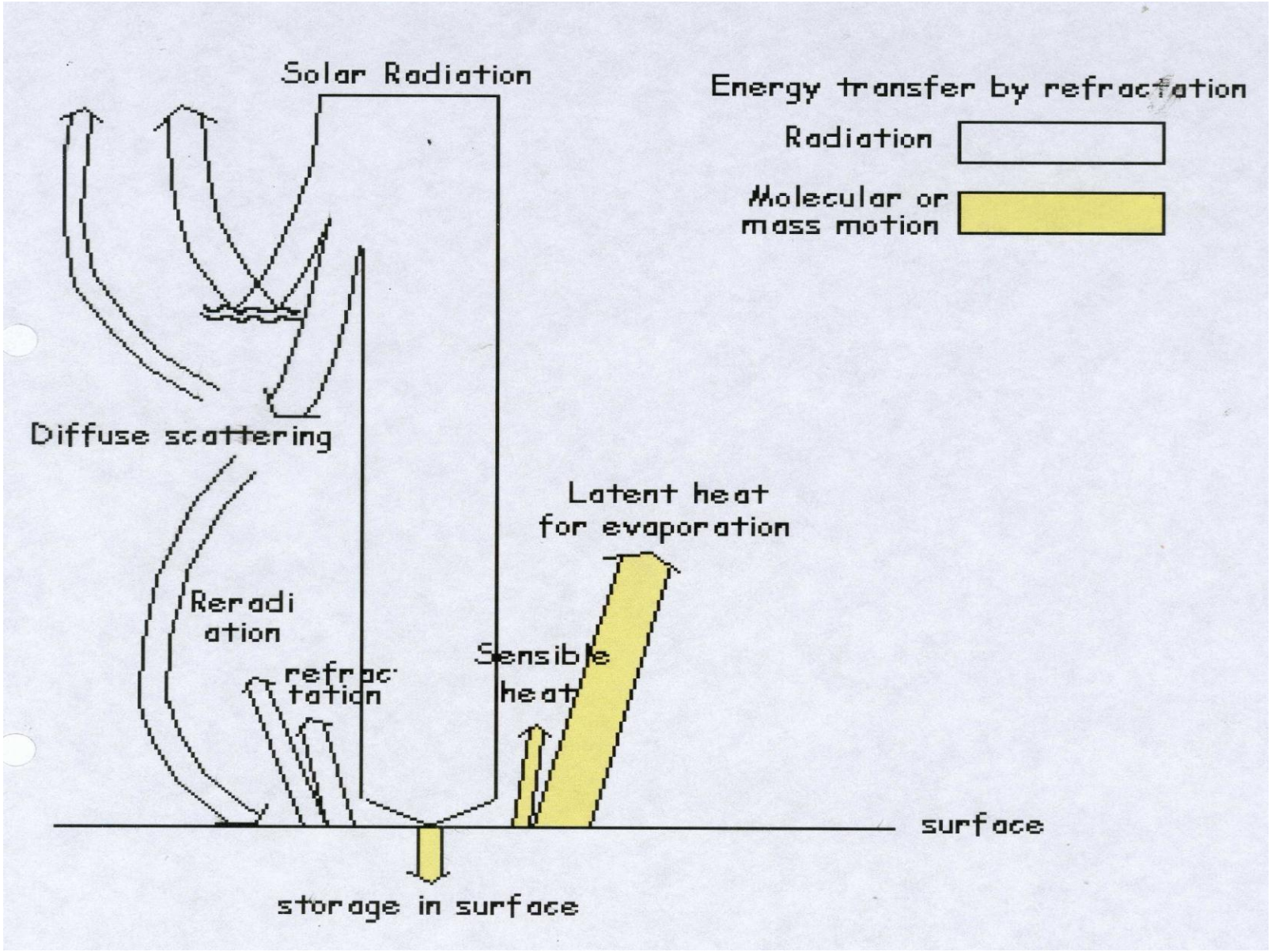
Métodos de calculo de la Evapotranspiración de referencia a partir de información climática

- Temperatura: Hargraves, Blaney-Criddle, Thornthwaite

- Radiación: FAO-Radiación

- Temperatura y radiación: Priestley-Taylor, Jensen-Haise

- Temperatura, radiación, HR y velocidad del viento: Penman, Penman-Monteith


Solar Radiation
Energy transfer by refractation
Radiation
Molecular or mass motion
Diffuse scattering
Latent heat for evaporation
Reradi ation
refrac tation
Sensible heat
surface
storage in surface

Balance de energía

- La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante.

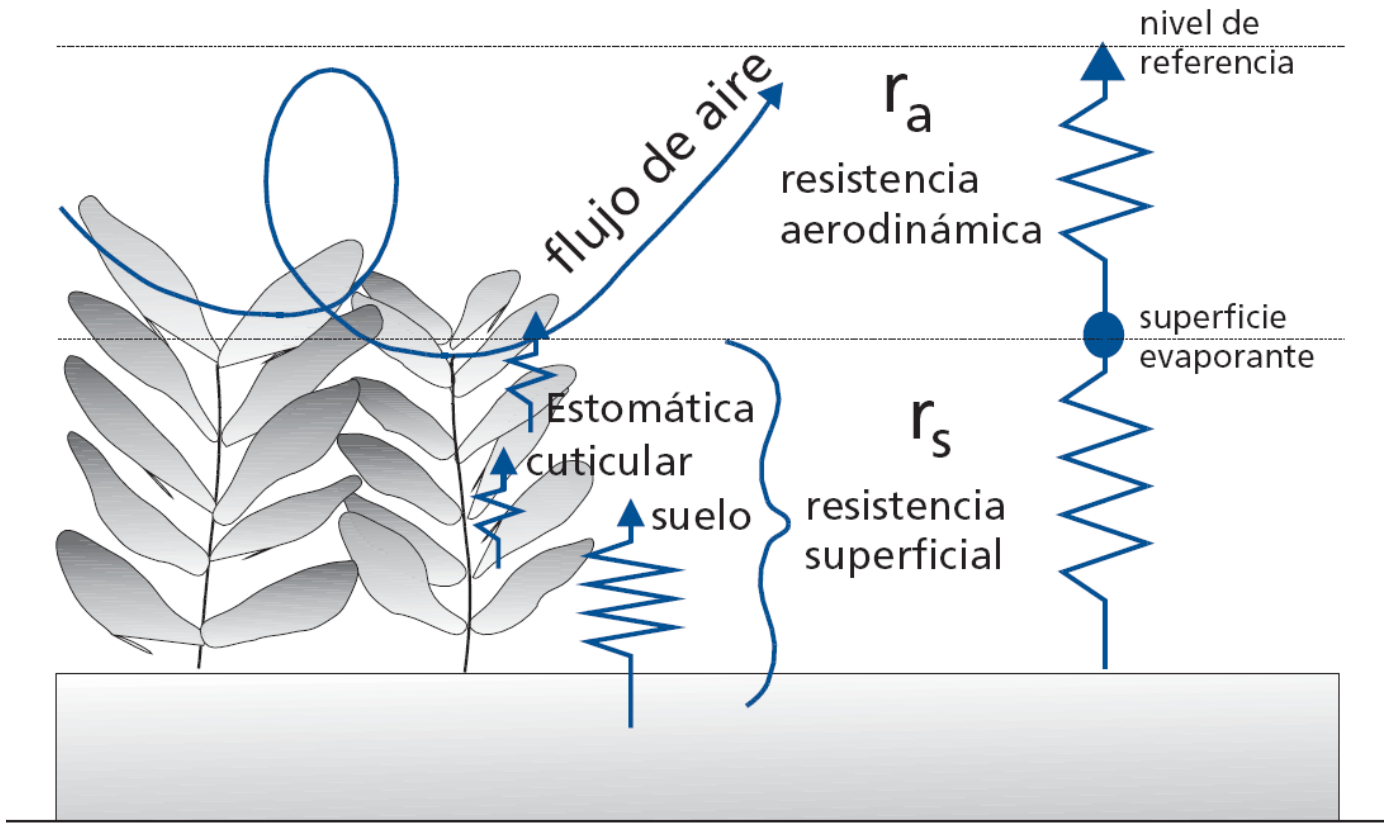
- El proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible.

- Es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía. La energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo.

BALANCE DE ENERGÍA

$$\mathbf{Rn = H + LE + G\ (cal\ cm^{-2}\ min^{-1})}$$

Rn = radiación neta
H = flujo de calor sensible
LE = flujo de calor latente
G = flujo de calor que ingresa al suelo


nivel de
referencia
flujo de aire
r_a
resistencia
aerodinámica
superficie
evaporante
Estomática
cuticular
suelo
r_s
resistencia
superficial

Estimación de ET_0

Método combinado (Penman)

$$ET_0 = c\,[\omega\, Rn + (1 - \omega)\, f(u)\,(e_s - e_a)]$$

Radiación — Aerodinámico

Donde, ET_0 = ET de referencia (mm día^{-1}).
ω = factor relacionado a la temperatura.
Rn = radiación neta (mm/ día).
f(u) = función relacionada a la velocidad del viento.
(e_a - e) = diferencia entre la presión de vapor a saturación a la temperatura media del aire y la presión de vapor actual del aire (mb).
c = factor de ajuste para compensar las condiciones climáticas del día y de la noche.

Evapotranspiración de referencia (ET_0)

- El método de Penman-Monteith es recomendado por FAO como el método para estimar la ET_0.

- Este ha sido seleccionado porque se aproxima mucho a la ET_0 de un prado en la localidad evaluada, se basa en la física y incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos.

Método de Penman-Monteith

$$\lambda ET = \frac{\Delta\left(R_n - G\right) + \rho_a c_p \dfrac{\left(e_s - e_a\right)}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \dfrac{r_s}{r_a}\right)}$$

Rn	:	radiación neta
G	:	flujo de calor que ingresa al suelo
$(e_s - e_a)$	:	déficit de presión de vapor del aire
ρ_a	:	densidad media del aire a presión constante
c_p	:	calor especifico del aire
Δ	:	pendiente de la relación presión de vapor/T°
γ	:	constante psicrométrica
r_s	:	resistencia de superficie (bulk)
r_a	:	resistencia aerodinámica

Datos climáticos necesarios para calcular la Evapotranspiración según el método de Penman-Monteith

- Radiación solar
- Temperatura del aire
- Humedad atmosférica
- Velocidad del viento

Unidades

- La tasa de evapotranspiración normalmente se expresa como mm/tiempo.

- Si 1mm=0,001m y 1ha=10.000m^2, la pérdida de 1mm corresponde a 10m^3 de agua/hectárea.

  o sea 1 mm/día = 10 m^3/ha día

- También puede ser expresada como energía recibida por unidad de área. La energía se refiere a la energía o calor necesario para evaporar agua libre

  ⟶ Calor de Vaporización.

- El calor de vaporización es función de la temperatura.

- Ejemplo:
- a 20°C el calor de vaporización es de 2,45 MJ kg^{-1}

- Es decir, 2,45 MJ son necesarios para evaporar 1 kg ó 0,001 m^3 de agua.

- 2,45 MJ m^{-2} permiten vaporizar 0,001 m ó 1 mm de agua

	Altura	Volumen por unidad de area		Energía por unidad de area
	mm/día	$m^3\ ha^{-1}\ día^{-1}$	$l\ s^{-1}\ ha^{-1}$	$MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$
1 mm $día^{-1}$	1	10	0,116	2,45
1 $m^3 ha^{-1} día^{-1}$	0,1	1	0,012	0,245
1 l $s^{-1} ha^{-1}$	8,640	86,40	1	21,17
1 MJ $m^{-2} día^{-1}$	0,408	4,082	0,047	1

Método de Evapotranspiración de bandeja (ET_0)

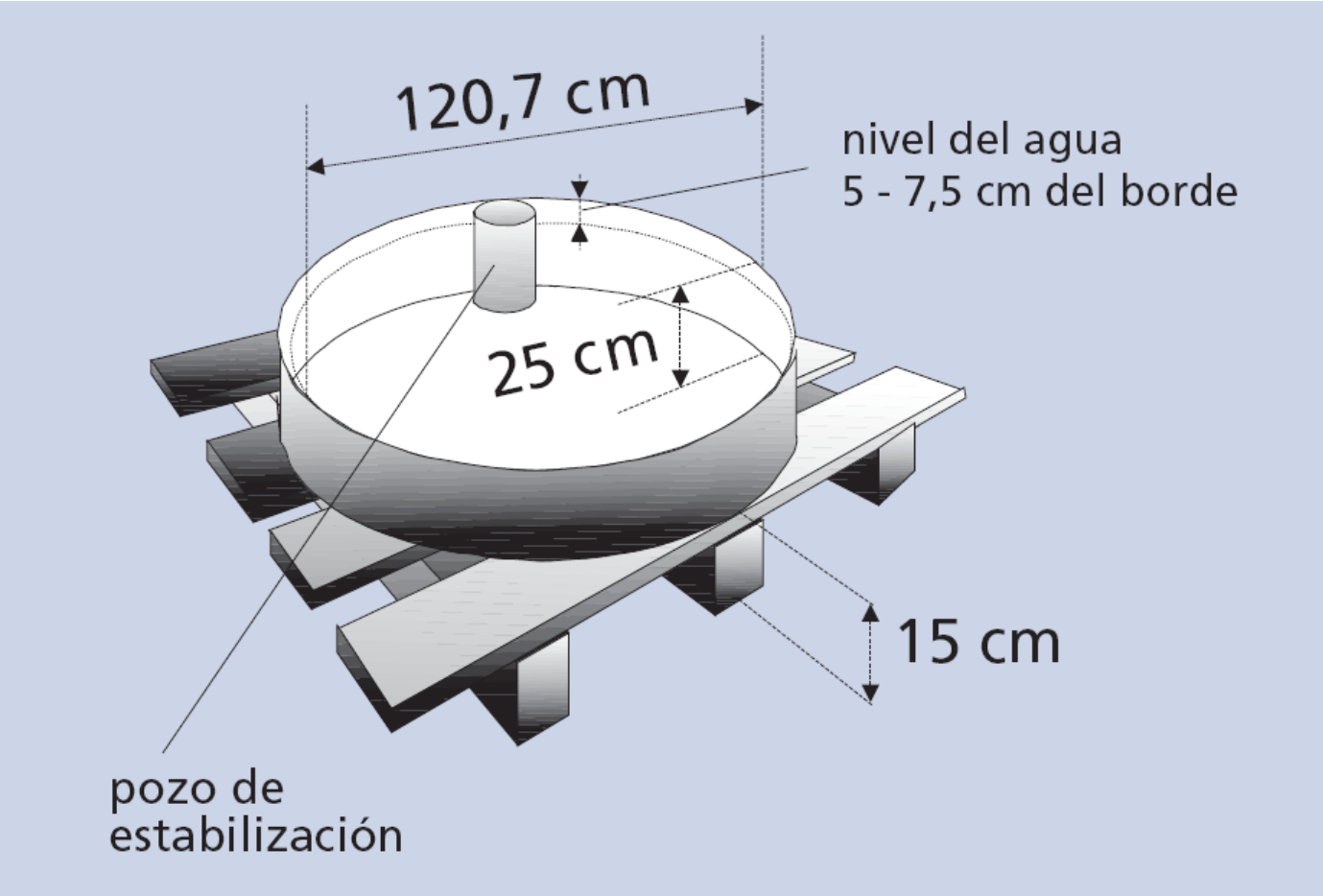
- Es la tasa de evaporación de una bandeja llena de agua.

- El diámetro es de1,21m y la profundidad es de 0,254m.

- Se llena hasta 5 a 7,5 cm bajo el borde.

- Se mide por el descenso del nivel de agua durante un periodo de tiempo (mm/día).

Bandeja tipo A



- La bandeja entrega una medición del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad en la evaporación de una superficie abierta de agua.

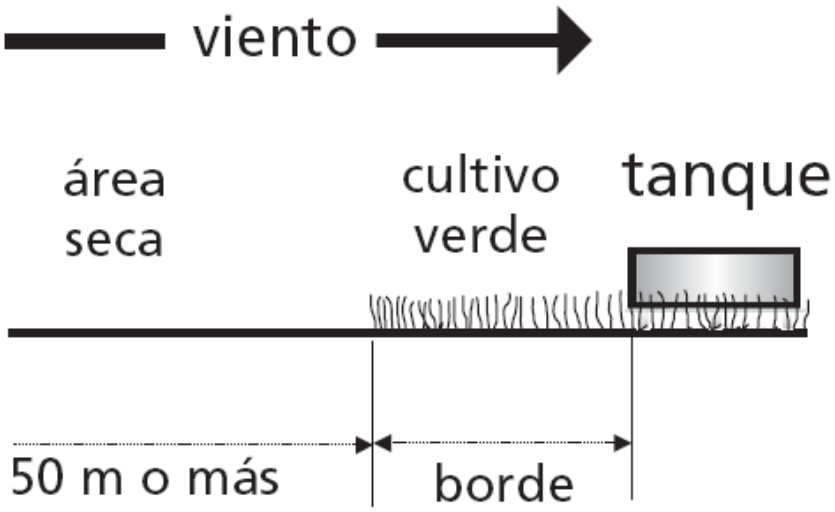
- Sin embargo este valor difiere de la evapotranspiración de cultivo por varios factores (albedo, almacenaje de calor en la bandeja, T°, turbulencia y humedad en la superficie, etc.).

- Este valor es corregido por un coeficiente de bandeja (k_p). Este depende del tipo de bandeja, cobertura y las condiciones de viento y humedad.

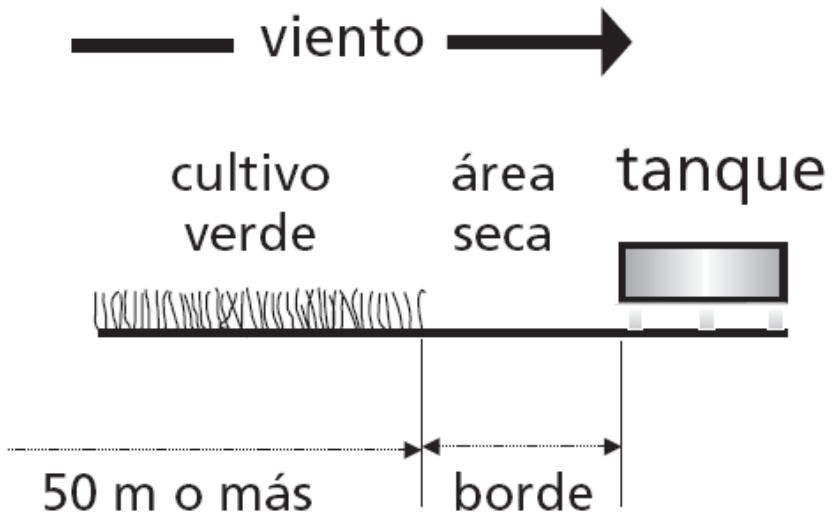
- Además considera si la bandeja se encuentra sobre césped o sobre suelo descubierto.

$$ET_0 = E_{ban} * k_p$$

Caso A


viento
área seca
cultivo verde
tanque
50 m o más
borde

Caso B


viento
cultivo verde
área seca
tanque
50 m o más
borde

Coeficientes del tanque evaporímetro (Kp) 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		Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada				Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo			
HR media		baja	media	alta		baja	media	alta	
		< 40	40-70	> 70		< 40	40-70	> 70	
Velocidad del viento (m s^{-1})	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	

Class A pan with green fetch	$K_p = 0.108 - 0.0286\ u_2 + 0.0422\ \ln(FET) + 0.1434\ \ln(RH_{mean}) - 0.000631\ [\ln(FET)]^2\ \ln(RH_{mean})$
Class A pan with dry fetch	$K_p = 0.61 + 0.00341\ RH_{mean} - 0.000162\ u_2\ RH_{mean} - 0.00000959\ u_2\ FET + 0.00327\ u_2\ \ln(FET) - 0.00289\ u_2\ \ln(86.4\ u_2) - 0.0106\ \ln(86.4\ u_2)\ln(FET) + 0.00063\ [\ln(FET)]^2 \ln(86.4\ u_2)$
Colorado sunken pan with green	$K_p = 0.87 + 0.119\ \ln(FET) - 0.0157[\ln(86.4\ u_2)]^2\ \ln(RH_{mean}) - 0.000053\ \ln(86.4 u_2)\ln(FET) RH_{mean}$
Colorado sunken pan with dry fetch	$K_p = 1.145 - 0.080\ u_2 + 0.000903(u_2)^2 \ln(RH_{mean}) - 0.0964\ \ln(FET) + 0.0031\ u_2\ \ln(FET) + 0.0015[\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean})$
Coefficients and parameters	K_p pan coefficient [] u_2 average daily wind speed at 2 m height (m s^{-1}) RH_{mean} average daily relative humidity [%] = $(RH_{max} + RH_{min})/2$ FET fetch, or distance of the identified surface type (grass or short green agricultural crop for case A, dry crop or bare soil for case B upwind of the evaporation pan)
Range for variables	1 m ≤ FET ≤ 1000 m (these limits must be observed) 30% ≤ RH_{mean} ≤ 84% 1 m s^{-1} ≤ u_2 ≤ 8 m s^{-1}

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVOS

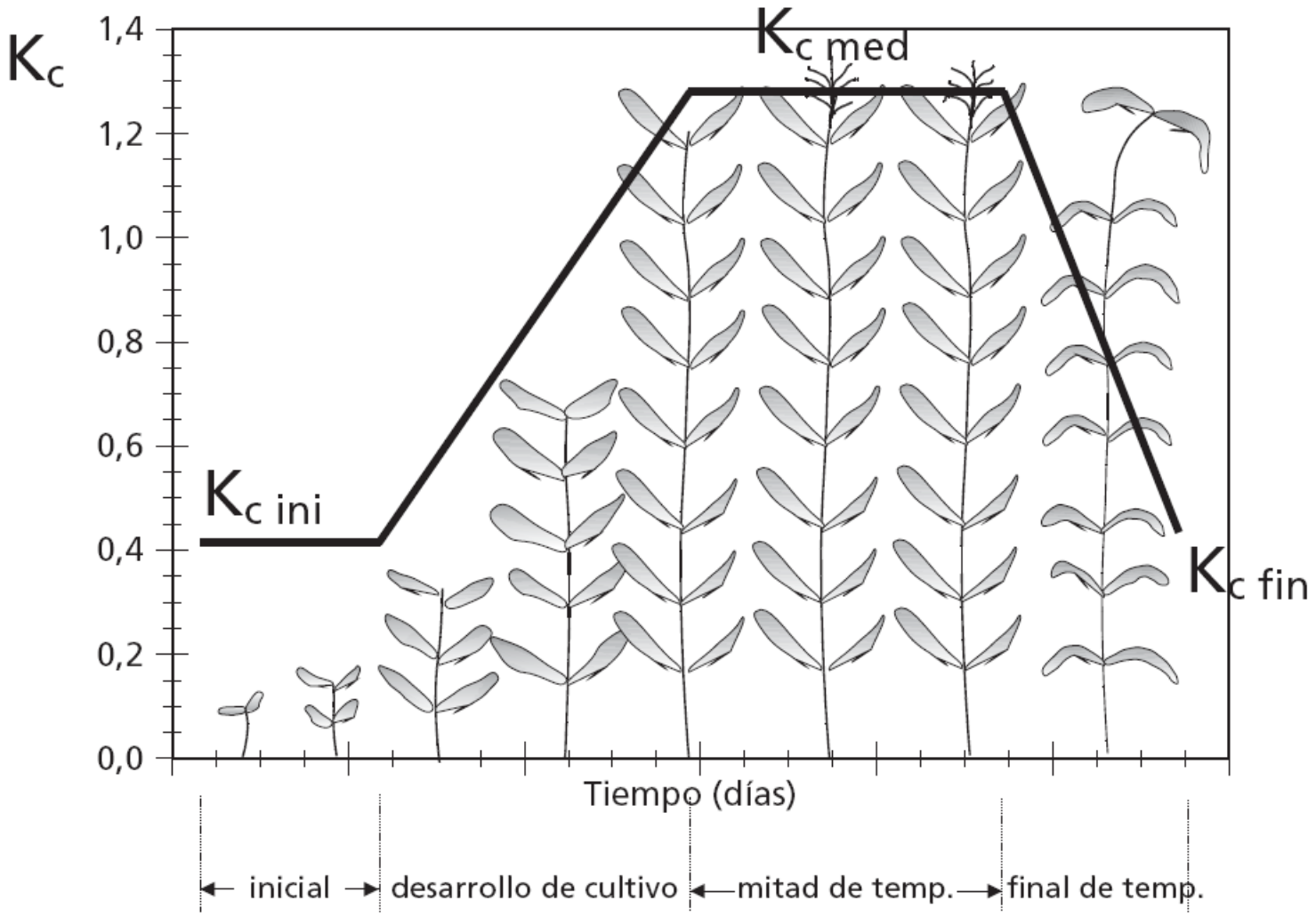
La evapotranspiración de cultivos se obtiene de:

$$ET_c = ET_0 * k_c$$

Donde

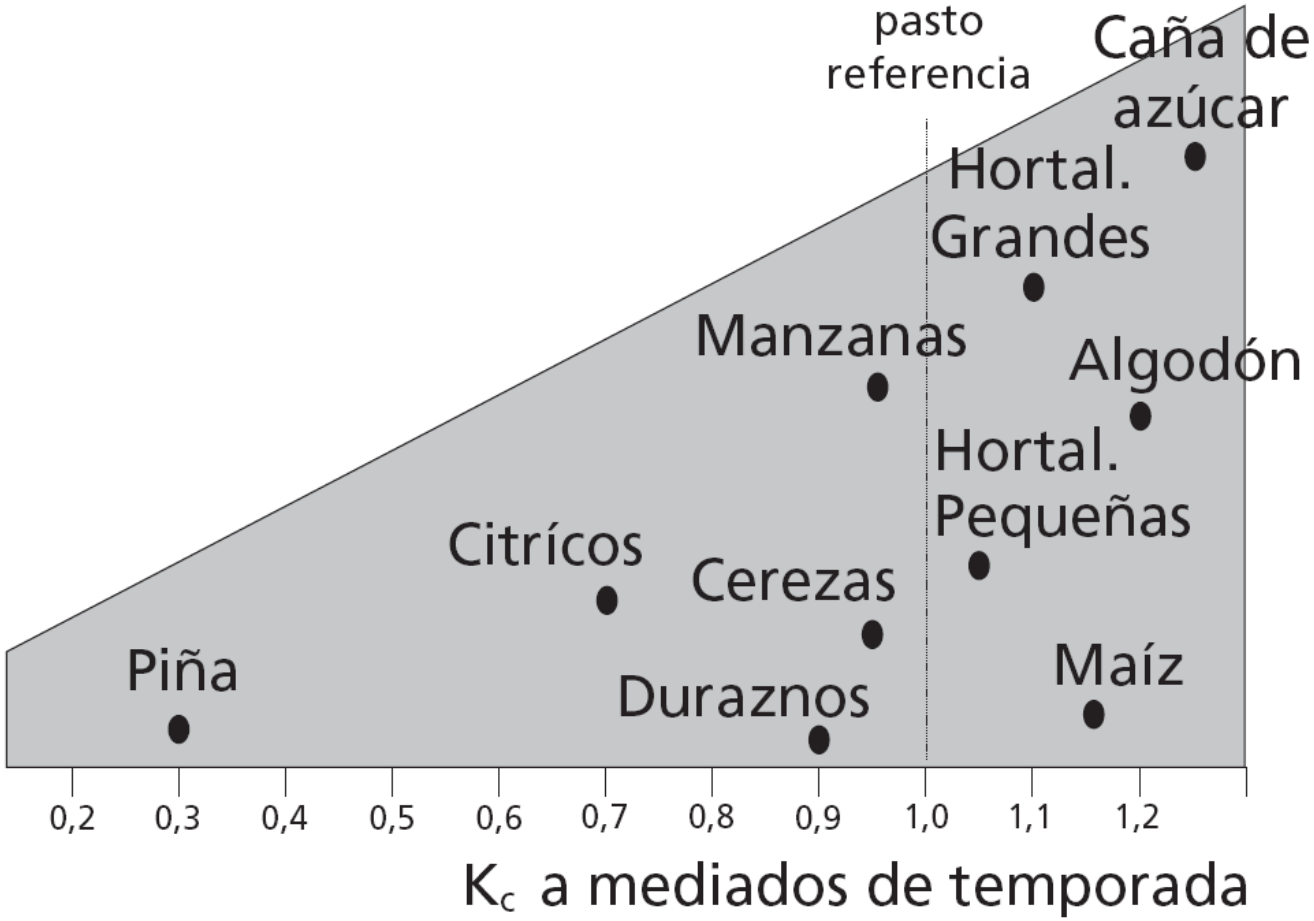
ET_0: evapotraspiración de referencia

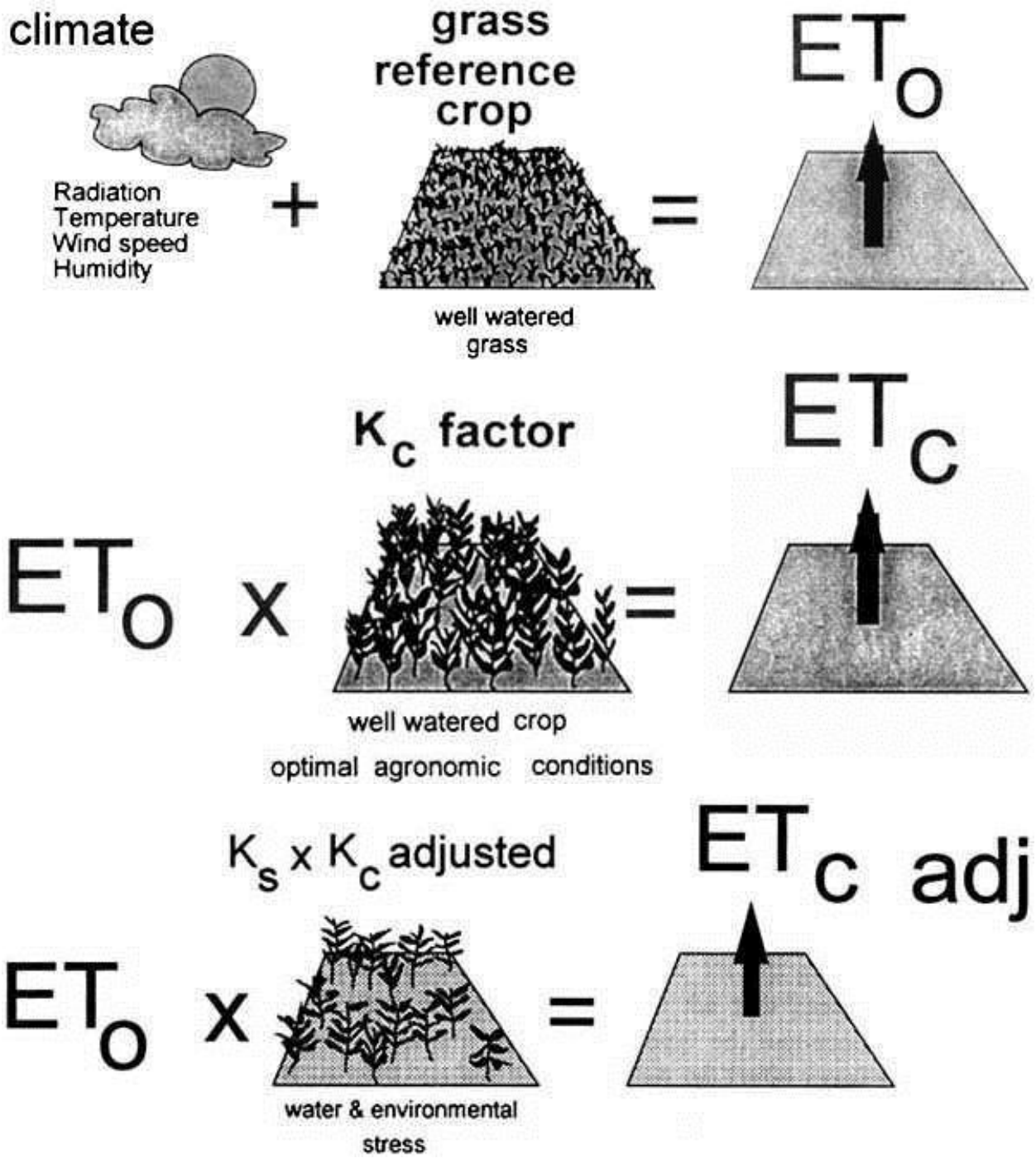
K_c: coeficiente de cultivo

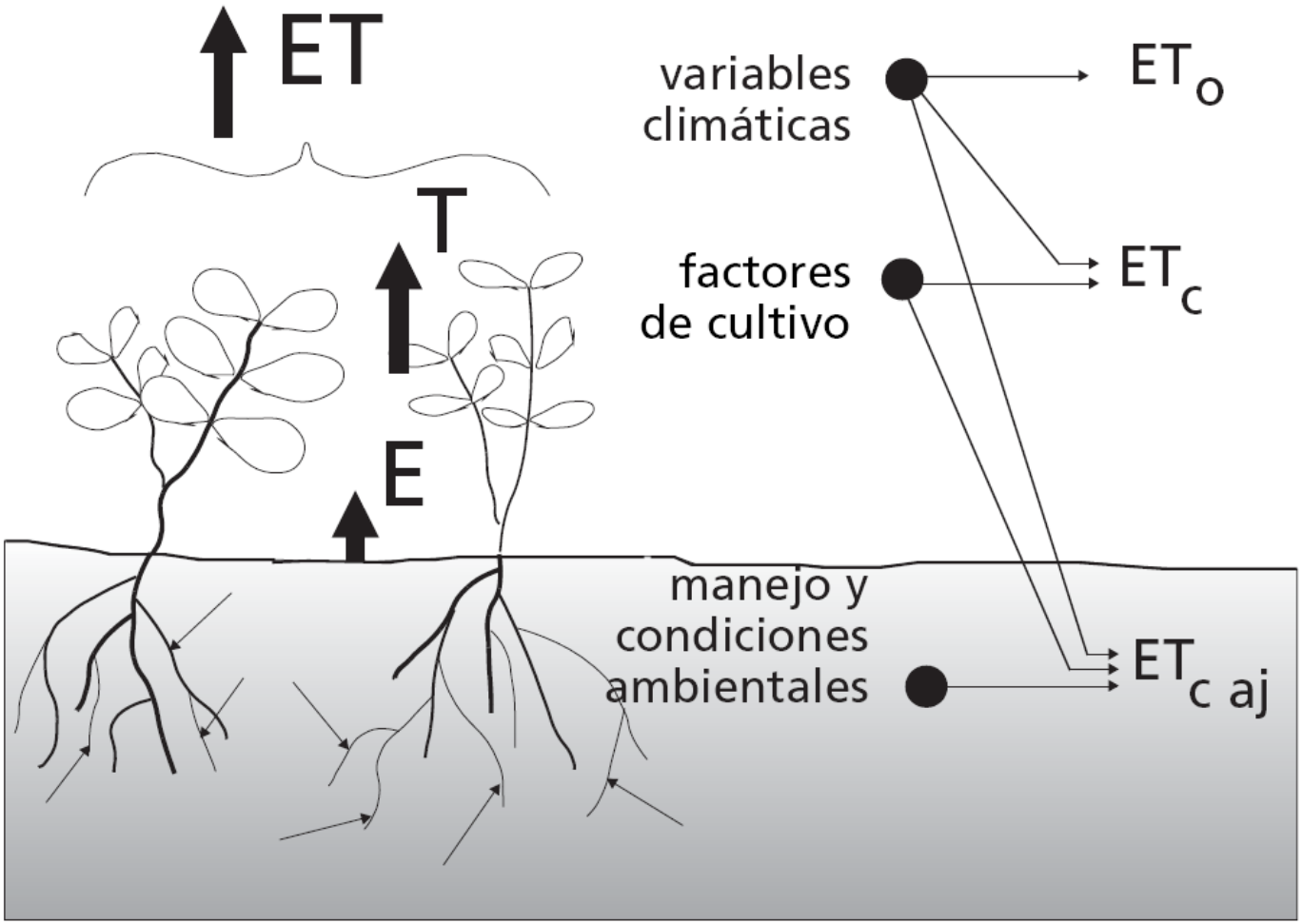

Kc
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
Kc med
Kc ini
Kc fin
Tiempo (días)
inicial
desarrollo de cultivo
mitad de temp.
final de temp.

0-20%

70-80%


pasto
referencia
Caña de
azúcar
Hortal.
Grandes
Manzanas
Algodón
Hortal.
Pequeñas
Citrícos
Cerezas
Piña
Duraznos
Maíz
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
K_c a mediados de temporada


climate
Radiation
Temperature
Wind speed
Humidity
+
grass
reference
crop
well watered
grass
=
ETO
ETO x
Kc factor
well watered crop
optimal agronomic conditions
=
ETc
Ks x Kc adjusted
ETO x
water & environmental
stress
=
ETc adj


ET
T
E
variables
climáticas
factores
de cultivo
manejo y
condiciones
ambientales
ET o
ET c
ET c aj

Relación de Bowen

$$Rn = H + LE + G \text{ (cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}\text{)}$$

$$\frac{Rn}{LE} = \frac{H}{LE} + \frac{G}{LE} + \frac{LE}{LE}$$

$$LE = \frac{(Rn - G)}{(1 + H / LE)}$$

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{k_H \rho_a c_a (dTa / dz)}{k_w \rho_a (de_a / dz)}$$

$$LE = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta)}$$

Ejercicios

- Ejemplo:

Se midió la temperatura y la presión de vapor a dos alturas, z_1= 3m y z_2= 4m, sobre un cultivo de maíz y se obtuvo los siguientes resultados:

- T^o_{z1}= 21ºC
- T^o_{z2}= 20ºC
- e_{z1}= 2,07 kPa
- e_{z2}= 1,8 kPa
- Rn= 600 W m^{-2} y G= 100 W m^{-2}
- γ = 0,067 kPa K^{-1} a 20ºC y Pa= 101 kPa

$$\beta = \frac{\gamma(T_2 - T_1)}{(e_{z2} - e_{z1})} = 0{,}067 kPa \cdot K^{-1} \frac{(293K - 294K)}{(1{,}8kPa - 2{,}07kPa)} = 0{,}248$$

$$LE = \frac{(R_n - G)}{(1-\beta)} = \frac{(600W \cdot m^{-2} - 100W \cdot m^{-2})}{(1+0{,}248)} = 401W \cdot m^{-2}$$

$$401J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \times 3600s \cdot h^{-1} / (2{,}45 \cdot 10^6 J \cdot kg^{-1}) = 0{,}59mm \cdot h^{-1}$$

1. Determine las necesidades de agua para cada una de las fases del período vegetativo de una variedad de maíz, sembrada el 10 de octubre en Santiago y cuya información fenológica es:

Fase fenológica	Duración (días)	Kc (promedio de la fase)
Fase inicial	20	0,6
Fase de crecimiento activo	40	0,8
Fase de pleno desarrollo	50	1,5
Fase de maduración	30	0,7
TOTAL	140	

Los datos evaporimétricos y los coeficientes kp determinados de acuerdo a las condiciones climáticas son:

	S	O	N	D	E	F	M
Ev (mm)	2,3	4,0	4,5	6,7	7,0	6,0	4,0
Kp	0,8	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

Exprese los resultados en m^3/ha (considere que 1 mm = 10 m^3/ha)

2. De acuerdo a los datos presentados, calcule el número de riegos y las fechas de riego (grafique). Considere que la temporada de riego comienza en septiembre y el cultivo se cosecha el 15 de enero.

CC = 30%
PMP = 18%
Da = 1,4 g cm^{-3}
UR = 50%
Profundidad de raíces 50 cm

ETc Septiembre: 4 mm/día
ETc Octubre: 5 mm/día
ETc Noviembre: 6 mm/día
ETc Diciembre: 3 mm/día
ETc Enero: 0

Un cultivo de trigo en floración crece en un suelo franco con una profundidad de arraigamiento de 95 cm. El contenido de humedad del suelo a CC y PMP es de 0,3 g·g y 0,15 g·g-1, respectivamente. La Da del suelo es 1,2 g cm-3. La evapotranspiración promedio diaria para un cultivo de trigo en floración es de 5 mm día-1. a) Si el contenido actual de humedad es de 0,3 cm3 cm-3 desde la superficie hasta una profundidad de 120 cm ¿En cuantos días se regará el cultivo?

b) Si el UR es de 40% ¿En cuantos días se volverá a regar el cultivo?

c) Haga un gráfico altura de agua v/s tiempo en que aparezcan los riegos de a y b.