



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE E AMBIENTALI  
PRODUZIONE, TERRITORIO, AGROENERGIA

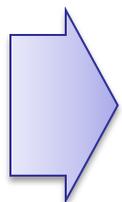
# EVAPOTRASPIRAZIONE

Marco Acutis

Corso di studi in Produzione e Protezione delle Piante e dei Sistemi del Verde

# L'evapotraspirazione

**EVAPOTRASPIRAZIONE** = CONSUMI IDRICI DI UNA COLTURA



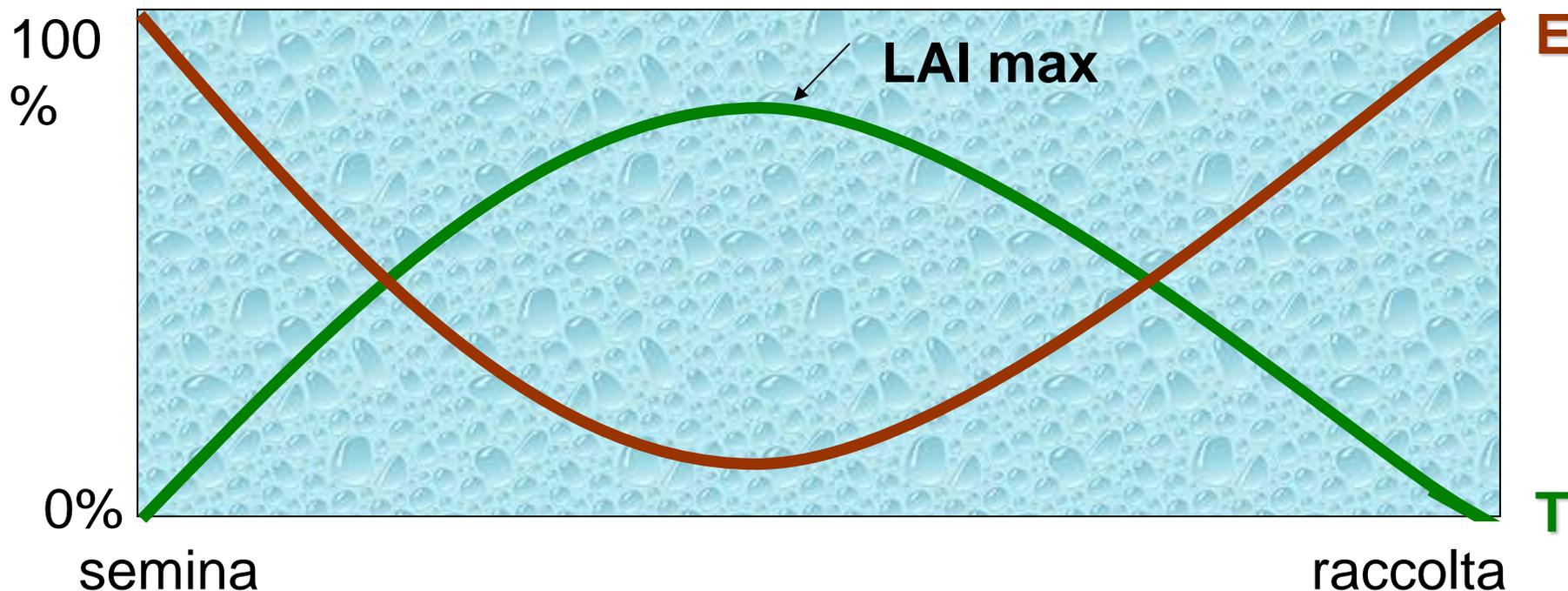
**EVAPORAZIONE DAL SUOLO**

(max in assenza di coltura e nelle prime fasi)

+

**TRASPIRAZIONE**

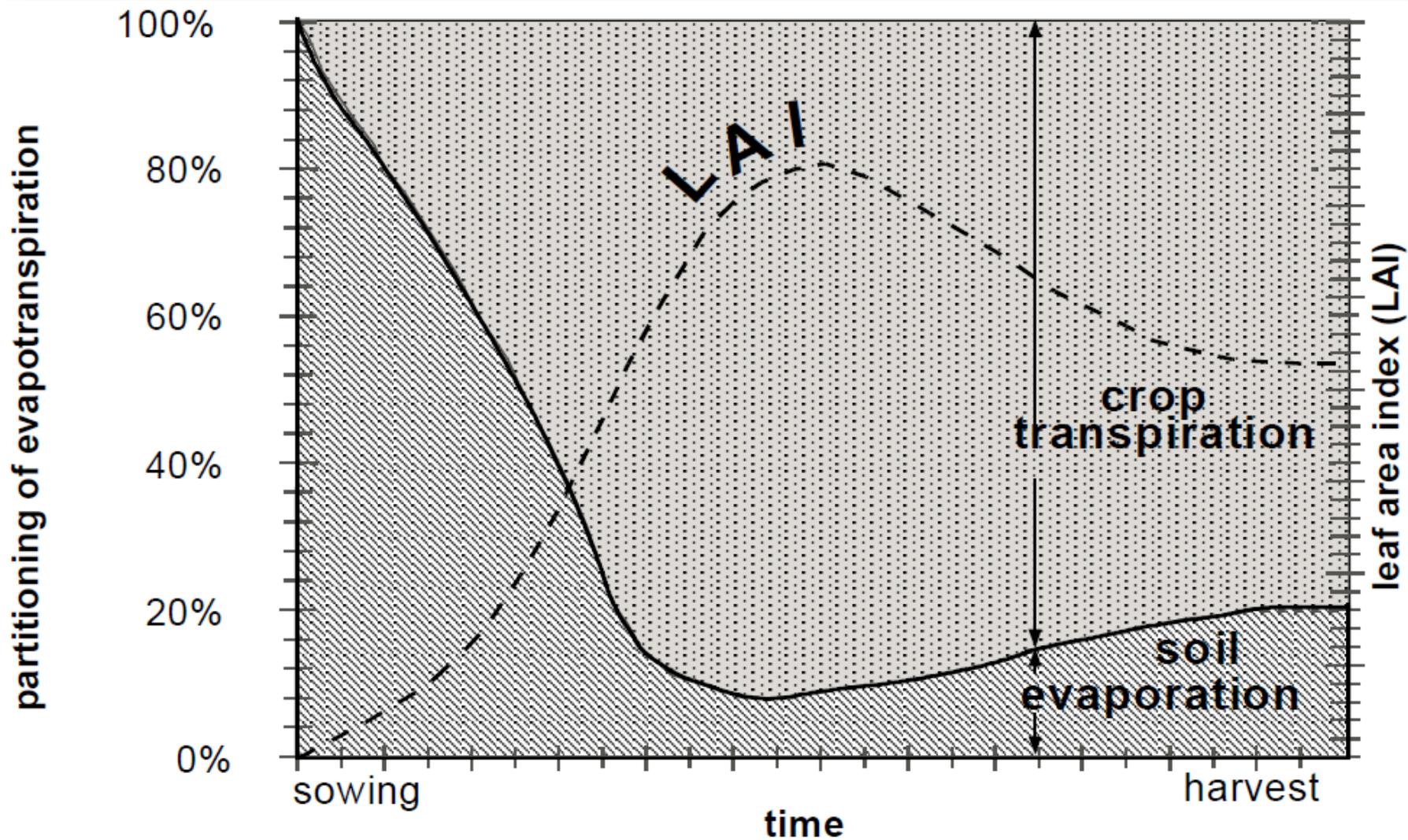
(max quando LAI è massimo)



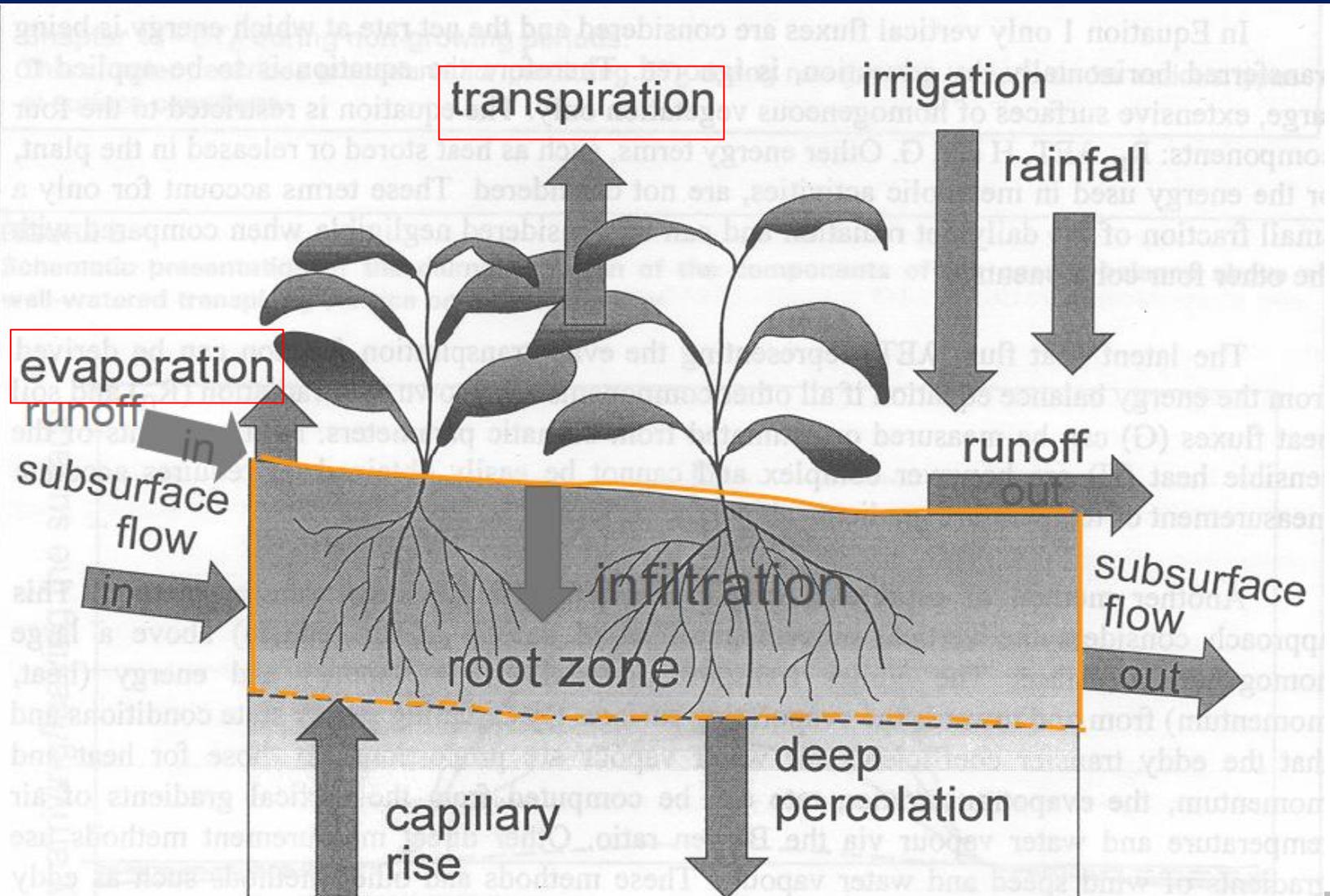
E = evaporazione; T = traspirazione



# L'evapotraspirazione

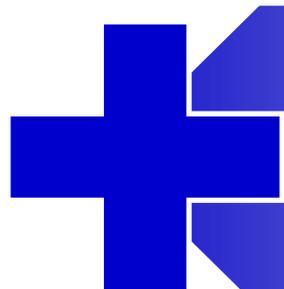


# L'evapotraspirazione: bilancio idrico



# L'evapotraspirazione: bilancio idrico

- L'ET è la voce negativa principale del BILANCIO IDRICO



## POSITIVI

- PIOGGIA
- IRRIGAZIONE
- RUSCELLAMENTO
- RISALITA CAPILLARE (FALDA)



## NEGATIVI

- EVAPOTRASPIRAZIONE
- RUSCELLAMENTO SUPERFICIALE (max in terreni argillosi e in pendio)
- INFILTRAZIONE NEGLI STRATI PROFONDI (max nei terreni sabbiosi in piano)

- Indispensabile conoscerla per
  - adattabilità delle colture a diversi ambienti
  - programmazione irrigua
  - stime di produttività a scala territoriale



# L'evapotraspirazione: unità di misura

- Si esprime in quantità di **acqua** per unità di **superficie** per unità di **tempo**
- Generalmente in **mm giorno<sup>-1</sup>**, **mm anno<sup>-1</sup>**

Sapendo che:

**1 mm**

**=**

**1 L m<sup>-2</sup>**

**=**

**10 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>**

(1 L = 1 dm<sup>3</sup>)

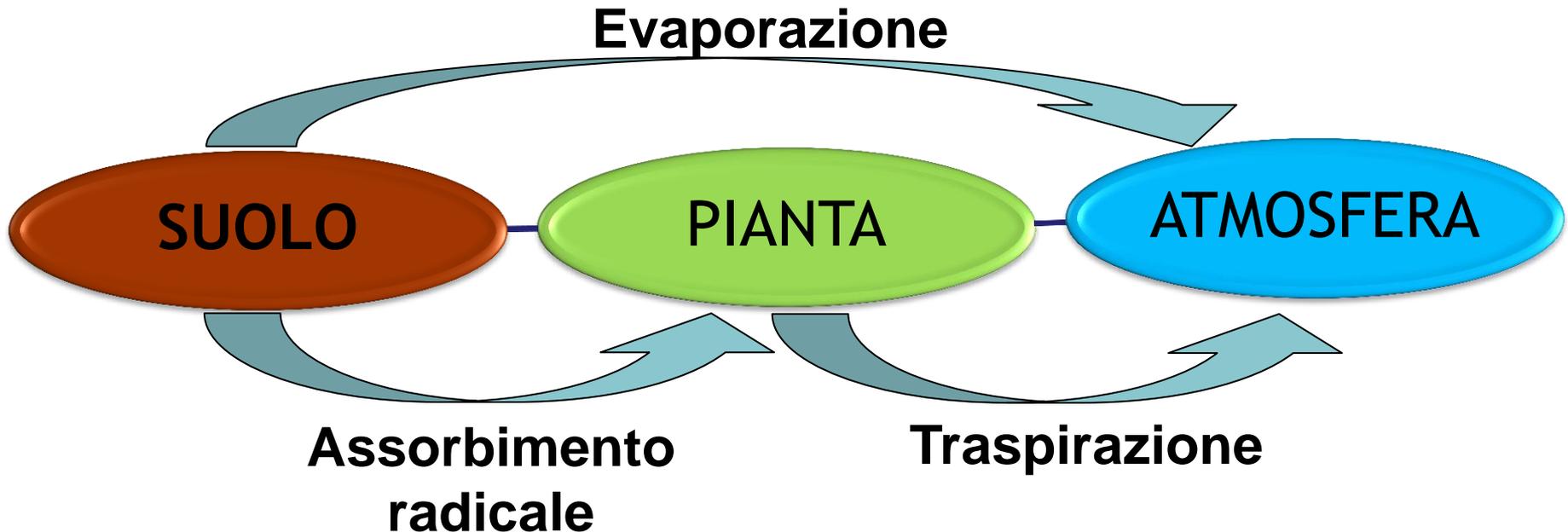
1 mm / m<sup>2</sup> = 0.01 dm x 10 dm x 10 dm = 1 dm<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>

1 L \* 10.000 m<sup>2</sup> = 10.000 L ha<sup>-1</sup>



# L'evapotraspirazione: sistema suolo-pianta-atmosfera

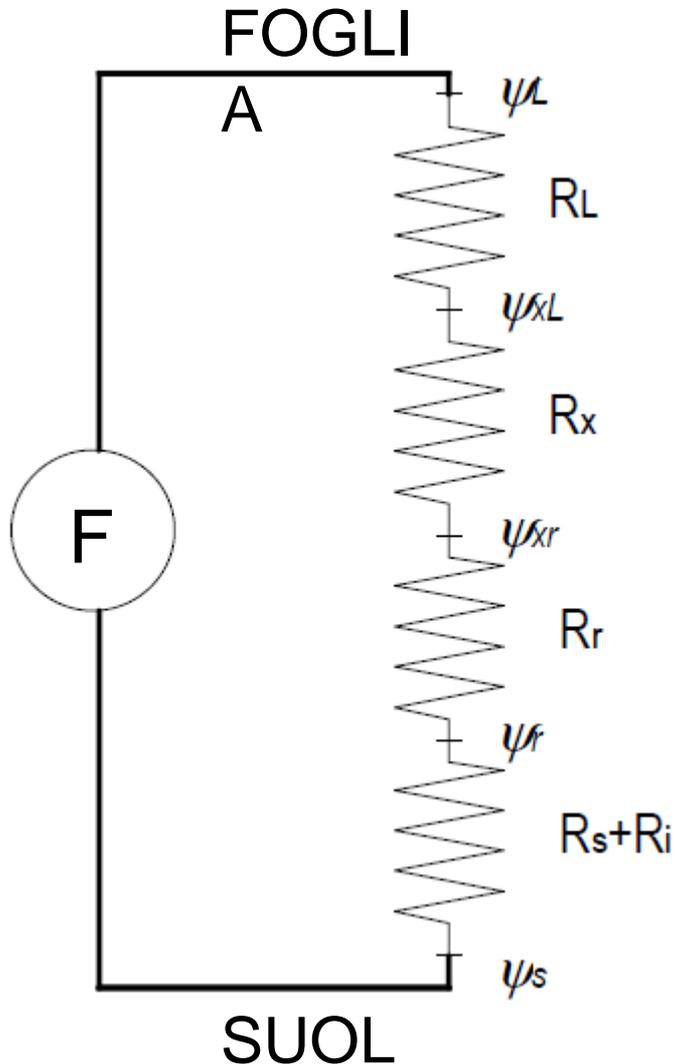
- l'Evapotraspirazione è una componente del flusso idrico nel sistema



- Come tutti i flussi (movimento di materiale attraverso un sistema), anche l'ET è regolata dalla legge generale del trasporto (analogo alla legge di Ohm):

$$F_{1 \rightarrow 2} = \Psi_2 - \Psi_1 / \text{Resistenza}$$

# L'evapotraspirazione: sistema suolo-pianta-atmosfera



- $F$  = flusso (idrico)
- $\psi_s$  = potenziale suolo
- $\psi_r$  = potenziale radice
- $\psi_{xr}$  = potenziale radice-xilema
- $\psi_{xL}$  = potenziale xilema-foglia
- $\psi_L$  = potenziale foglia
- $R_s$  = resistenza del suolo
- $R_i$  = resistenza interfaccia suolo-radice
- $R_r$  = resistenza endodermica radici
- $R_x$  = resistenza xilema e stelo
- $R_L$  = resistenza idraulica foglia

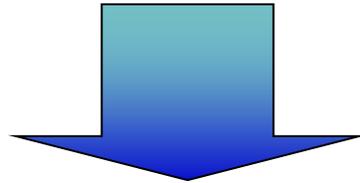
In condizioni di buona disponibilità idrica le resistenze più influenti sono  $R_L$  e  $R_r$ ; le resistenze del suolo e dell'interfaccia suolo-radice sono ininfluenti in suoli umidi, ma diventano importanti quando il suolo incomincia ad asciugarsi.

$$F = (\psi_L - \psi_s) / (R_L + R_r)$$

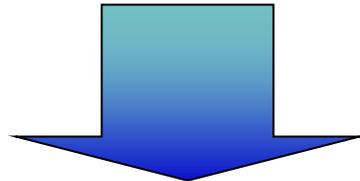
## Il potenziale idrico

---

# IL POTENZIALE IDRICO E': LA FORZA CON CUI L'ACQUA E' TRATTENUTA



LA PRESSIONE (negativa, o SUZIONE) CHE SERVE PER  
ALLONTANARE L'ACQUA



L'ACQUA si muove da un punto con  $\Psi$  più alto (MENO  
NEGATIVO: es  $-20$ ) ad uno con  $\Psi$  più basso (PIU'  
NEGATIVO: es  $-100$ )

# Le differenze di potenziale sono il motore del flusso evapotraspirativo

$$\Psi_{\text{aria}} = - 400 \sim - 500 \text{ bar}$$



$$\Psi_{\text{foglia}} = - 10 \sim - 20 \text{ bar}$$

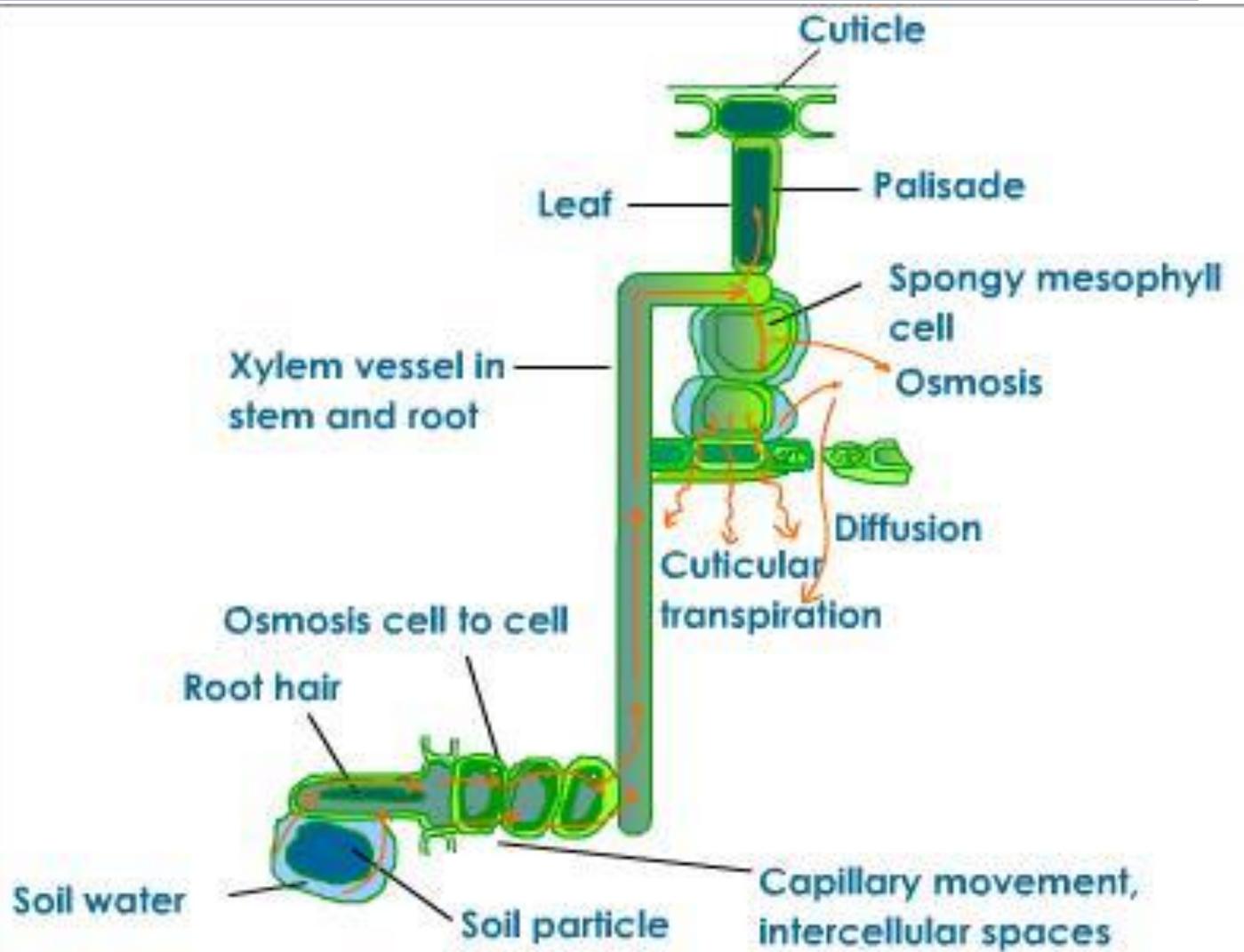


$$\Psi_{\text{suolo}} = - 0.3 \sim - 15 \text{ bar}$$



# Il potenziale idrico

UR (%)	$\Psi_{\text{atm}}$ (bar)
100	0
99	-14
95	-70
50	-930



# Strategie della pianta per ridurre il flusso idrico

---

Ricordando che

IL FLUSSO E' REGOLATO DALLA LEGGE GENERALE  
DEL TRASPORTO

$$F_{1 \rightarrow 2} = \Psi_2 - \Psi_1 / R$$



Per ridurre il flusso:

1. Riduce la differenza di potenziale ( $\Psi_2 - \Psi_1$ )
2. Aumenta le resistenze (R)

Con differenti strategie

# Strategie della pianta per ridurre il flusso idrico

## ADATTAMENTO DELLE PIANTE ALLA DOMANDA EVAPOTRAPIRATIVA

### **AUMENTO DEL FLUSSO IN INGRESSO:** assorbimento radicale

- aumento **potere assorbente** delle radici (abbassamento potenziale radicale) **VELOCE**
- aumento della **superficie assorbente** delle radici (sviluppo apparati radicali) **LENTO**

### **RIDUZIONE DEL FLUSSO IN USCITA:** traspirazione

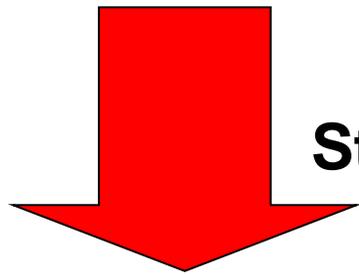
- aumento della resistenza verso l'atmosfera
  - con **variazioni morfologiche** (peli, cuticola,...) **LENTO**
  - con **chiusura stomatica** **VELOCE**
- riducendo la differenza  $\Psi_{\text{aria}} - \Psi_{\text{foglia}}$ , abbassando il  $\Psi_{\text{foglia}}$  con una **aumento della concentrazione osmotica** **VELOCE**





# Strategie della pianta per ridurre il flusso idrico

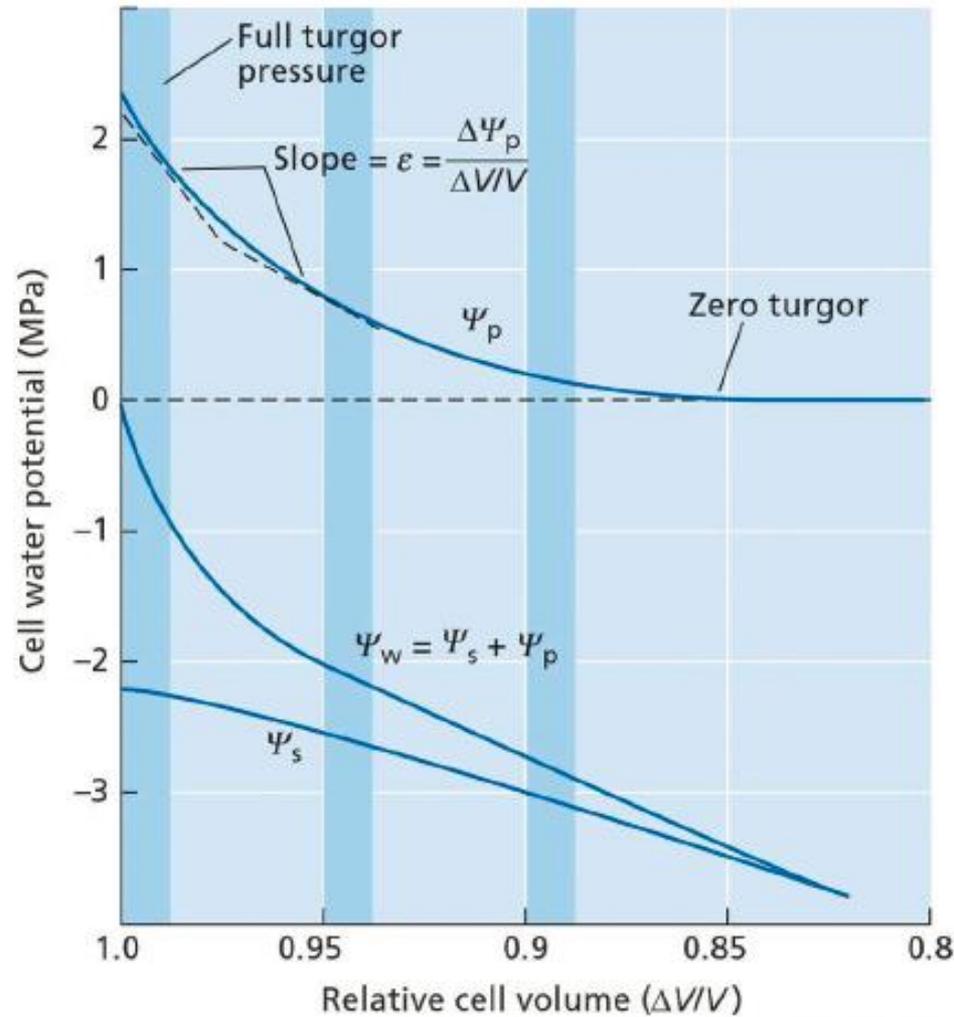
La pianta riduce il potenziale osmotico (aumenta la negatività del potenziale es. da **-15 a -20 bar**) aumentando l'ingresso nelle cellule di  $K^+$  (pompe protoniche).



**Stress idrico**

Oltre un certo limite (specifico: -15 ~ -20 bar) si abbassa anche  $\Psi_p \Rightarrow$  perdita di turgore e appassimento.

$\Psi_p$  si avvicina a zero con perdite di volume di appena il 10-15%



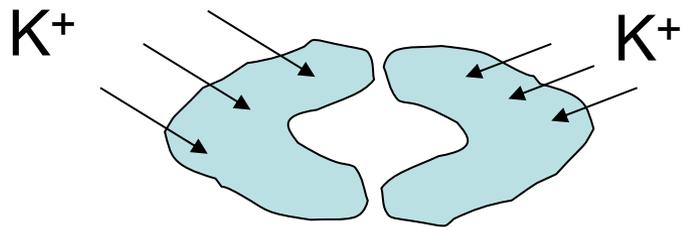
PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 3.10 © 2002 Sinauer Associates, Inc.



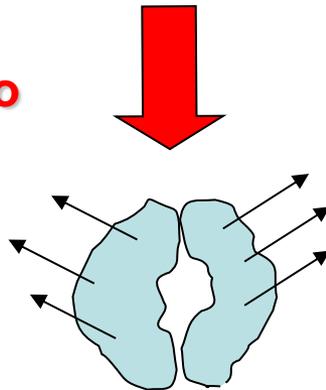
# Strategie della pianta per ridurre il flusso idrico

- MECCANISMO STOMATICO

- riducendo l'apertura stomatica, aumenta la resistenza (vedi legge di Ohm)
- cellule guardia meno turgide  $\Rightarrow$  stomi più chiusi



Stress idrico



1. Aumenta  $[K^+]$
2. Diminuisce  $\Psi$  (più negativo es. **-20 bar**)
3. Aumenta flusso in ingresso nelle c.guardia
4. Aumenta turgore
5. Aumenta apertura

1. Diminuisce  $[K^+]$
2. Aumenta  $\Psi$  (meno negativo es. **-10 bar**)
3. Aumenta flusso in uscita dalle c. guardia
4. Diminuisce turgore
5. Diminuisce apertura

# L'Evapotraspirazione

## DEFINIZIONI

$ET_{\max}$  o  $ET_c$  (crop) = EVAPOTRASPIRAZIONE MASSIMA DELLA COLTURA (in assenza di fattori limitanti)

$ET_r$  (reale) o  $ET_a$  (actual) o  $ET_e$  (effettiva) = ET della coltura in esame nelle condizioni reali ( è sempre  $\leq$  ET max)

$ET_0$  (zero) o  $ET_p$  (Potenziale) o  $ET_r$  (reference) = ET di riferimento (di un prato di festuca alto 12 cm, cresciuto senza fattori limitanti)

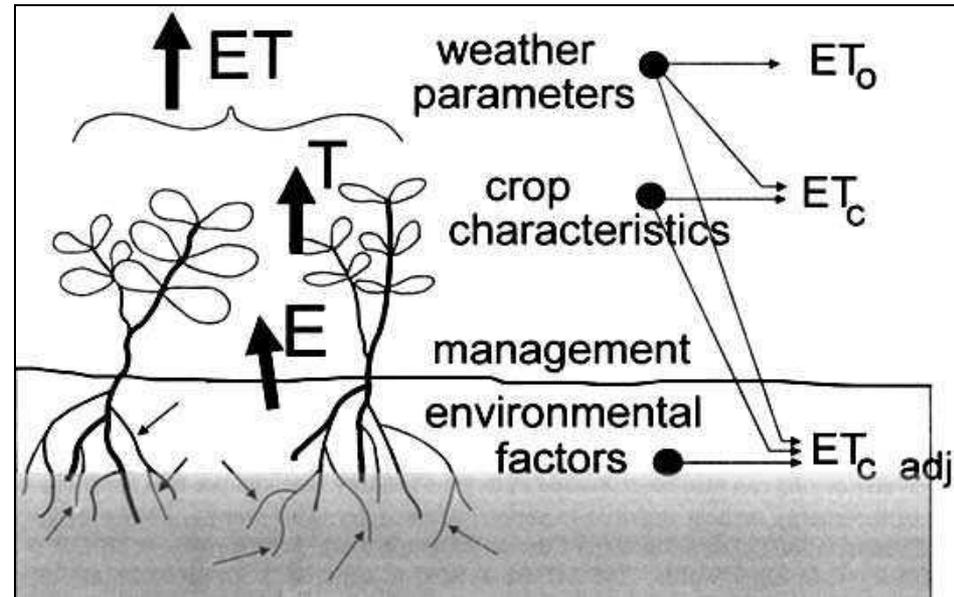
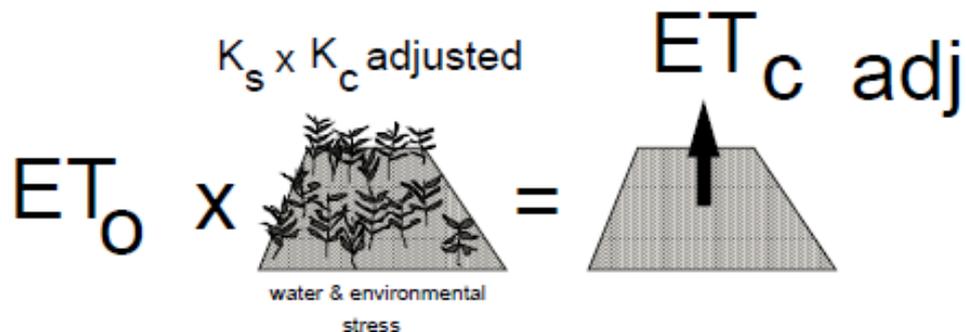
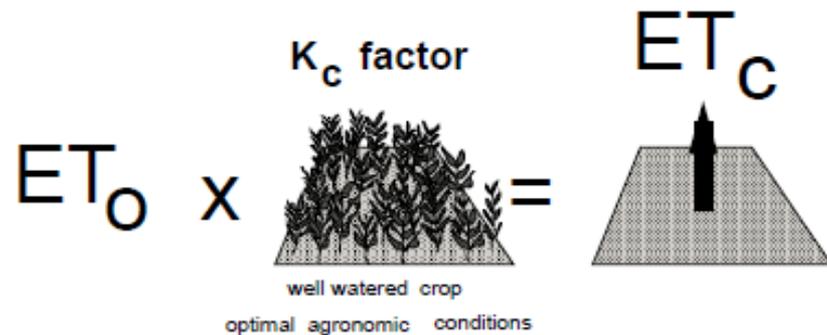
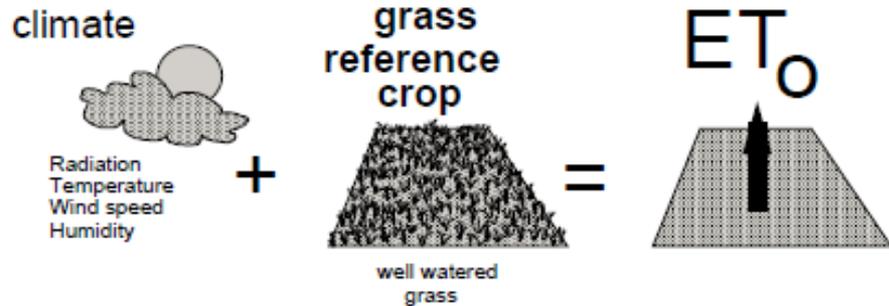
**i** LA TERMINOLOGIA "EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO" RISULTA PIU' IMPIEGATA E PIU' COERENTE CON LA LETTERATURA INTERNAZIONALE; QUI VIENE UTILIZZATA LA TERMINOLOGIA ITALIANA "POTENZIALE"

$$ET_{\max} = ET_0 \times Kc$$

$Kc$  = coefficiente colturale (rapporto tra l'ET della nostra coltura e quella del prato di riferimento)



# L'Evapotraspirazione



# Evapotraspirazione Potenziale

Si preferisce partire da una domanda climatica dell'atmosfera a un sistema terreno-pianta, a cui il sistema risponde con un'effettiva evapotraspirazione di acqua. La domanda climatica si chiama:

## EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE

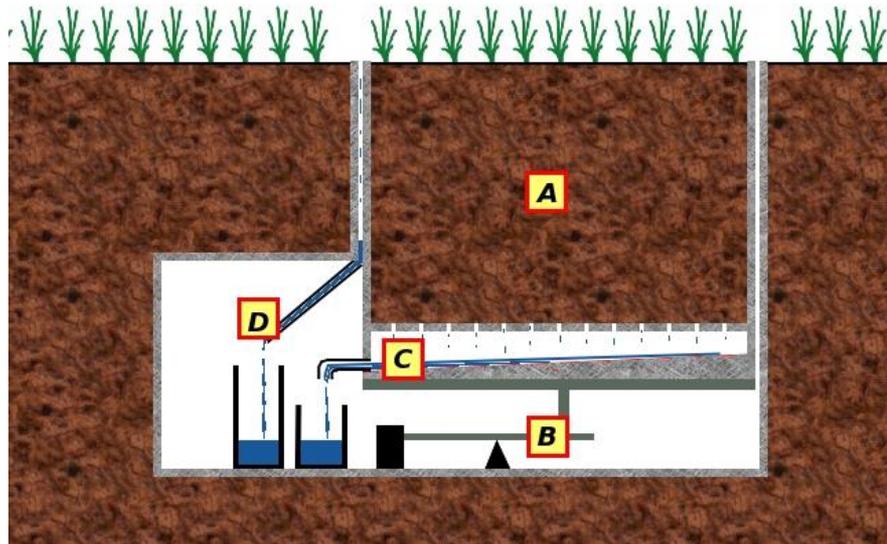
Per definirla si fa riferimento a una situazione specifica, standard:

- prato uniforme di *Festuca arundinacea* (copre il terreno per gran parte dell'anno in diversi climi, vegeta bene sia a alte sia a basse T)
- in condizioni di rifornimento idrico ottimale
- tenuto a un'altezza tra 7 e 14 cm
- sufficientemente esteso da evitare effetto oasi
- esente da fitopatie



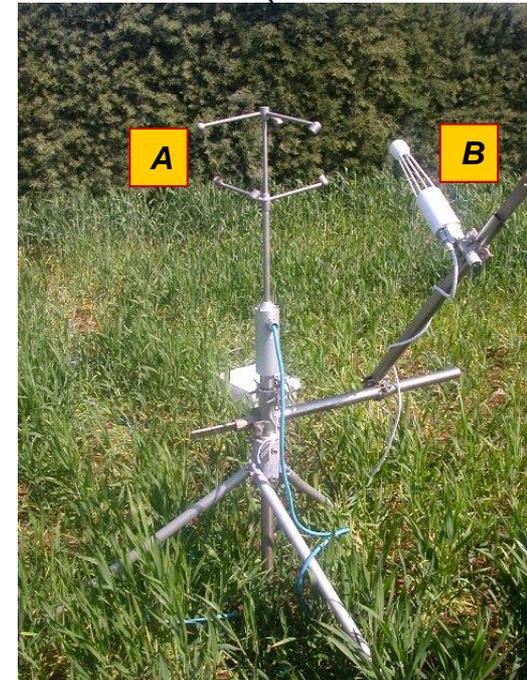
# Evapotraspirazione Potenziale

**Può essere direttamente misurata** in lisimetri a pesata, dove in un cassone cresce la coltura di riferimento e viene pesato con frequenza giornaliera; è difficile e oneroso, limitato ad alcuni centri di ricerca. Oppure con bilancio idrico (tecniche recenti: eddy covariance)



**Stazione eddy covariance:**

- A) Anemometro ultrasuoni
- B) Gas analyser



**Modello schematico di un lisimetro a pesata**

- A) Terreno in studio
- B) Bascula a quadrante
- C) Raccolta dell'acqua di drenaggio
- D) Raccolta dell'acqua di ruscellamento

**Può essere stimata a partire dai dati climatici:** dipende infatti principalmente dalla radiazione netta (apporto di energia per l'evaporazione dell'acqua) e dal gradiente di pressione di vapore tra foglia e ambiente (umidità relativa e vento)

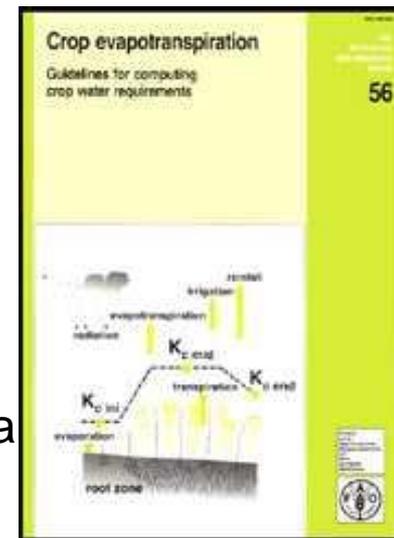
# Evapotraspirazione Potenziale

Formule per stimarla:

- **Penman-Monteith:** tiene conto di tutti i fattori di cui sopra su base fisica, è tra le più precise. Richiede: **Radiazione netta** (ricavabile da quella globale), **Tmax** e **Tmin**, **URmax** e **URmin**, **velocità del vento**, **flusso di calore nel suolo** (stimabile da altre grandezze o trascurabile su scala di 3-5 giorni). Occorrono quindi stazioni meteo complete, poco diffuse.

Altre formule:

- **Hargreaves:** richiede **Tmax** e **Tmin**;
- **Priestley-Taylor:** richiede **radiazione globale**, **UR** e **T°** ;
- **Blaney-Criddle:** che usa la **T°** , **UR** e **Vento**;
- **Thornthwaite:** che usa la **T° media mensile**; è molto apprezzata dai climatologi, ma quasi inutile per gli agronomi.



Ci sono almeno un centinaio di formule, tutte con validità più o meno locale

Quaderno FAO56

<http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf>



# Evapotraspirazione Potenziale

Metodo	Variabili meteorologiche						
	Temperatura	Umidità Relativa	Velocità vento	Eliofania	Radiazione	Evaporazione	Ambiente
Blaney-Criddle	x	o	o	o			o
Penman-Monteith	x	x	x	x	(x)		x
Hargreaves	x				o		
Priestley-Taylor	x	x			x		x
Thornthwaite	x						
Radiazione	x	o	o	x	(x)		o
Evaporimetro		o	o			x	x

x Misurato

(x) Se disponibile, non essenziale

o Stimato



## Penman – Monteith

$$ET_0 = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a / r_a)}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)}$$

$\Delta$  = pendenza della relazione VPD vs.  $T^\circ$  ( $\text{kPa } ^\circ \text{C}^{-1}$ ).

$R_n$  = radiazione netta ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$G$  = flusso di calore nel suolo ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$\rho_a$  = densità media dell'aria ( $\text{kg m}^{-3}$ )

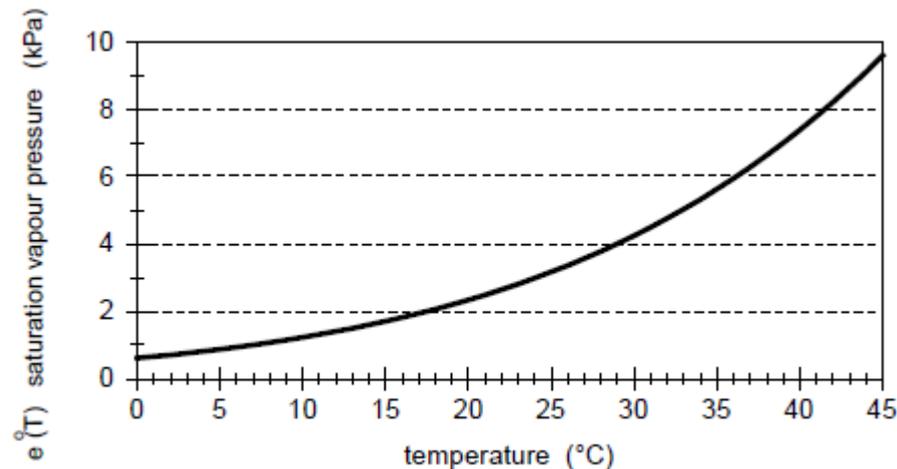
$c_p$  = calore specifico dell'aria ( $\text{MJ kg}^{-1} ^\circ \text{C}^{-1}$ )

$e_s - e_a$  = VPD dell'aria ( $\text{kPa}$ )

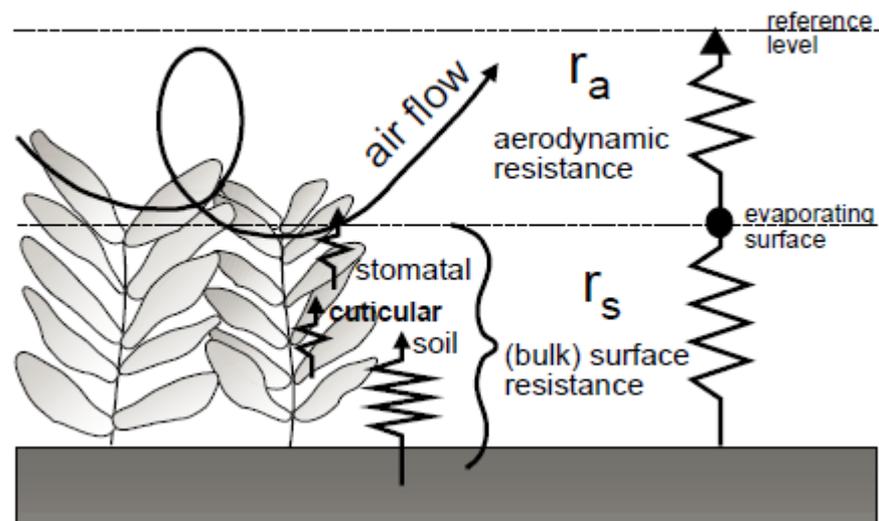
$\gamma$  = costante psicrometrica ( $\text{kPa } ^\circ \text{C}^{-1}$ ).

$r_a$  = resistenza aerodinamica ( $\text{s m}^{-1}$ )

$r_s$  = resistenza superficiale (r stomatica + r cuticolare + r del suolo) ( $\text{s m}^{-1}$ )



Simplified representation of the (bulk) surface and aerodynamic resistances for water vapour flow



Rappresenta lo standard internazionale di riferimento per questi studi. Serve quindi per la validazione di altre formule.

# HARGREAVES

$$ET_0 = 0.0023 * (T_{med} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} * Rad$$

Rad = Radiazione extraterrestre in mm/giorno

Radiazione extraterrestre  
(mm/giorno):

mese	Latitudine		
	40° N	39° N	38° N
GEN	6.4	6.7	6.9
FEB	8.6	8.8	9.0
MAR	11.4	11.6	11.8
APR	14.3	14.4	14.5
MAG	16.4	16.4	16.4
GIU	17.3	17.3	17.2
LUG	16.7	16.7	16.7
AGO	15.2	15.2	15.3
SET	12.5	12.7	12.8
OTT	9.6	9.8	10.0
NOV	7.0	7.3	7.5
DIC	5.7	5.9	6.1



# Evapotraspirazione Potenziale: radiazione extraterrestre

## Formula per il calcolo della Ra:

$$R_a = \frac{24 (60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

MJ m<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>

- $R_a$  extraterrestrial radiation [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>],  
 $G_{sc}$  solar constant = 0.0820 MJ m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>,  
 $d_r$  inverse relative distance Earth-Sun  
 $\omega_s$  sunset hour angle [rad],  
 $\varphi$  latitude [rad]  
 $\delta$  solar declination [rad].

Tools per il calcolo della Ra <http://www.sipeaa.it/GSRadWeb/>



# Evapotraspirazione Potenziale: radiazione extraterrestre

## Fattori di conversione per l'evapotraspirazione

Table 1 summarizes the units used to express the evapotranspiration rate and the conversion factors.

TABLE 1  
Conversion factors for evapotranspiration

	depth	volume per unit area		energy per unit area <sup>a</sup>
	mm day <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup>	l s <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>
1 mm day <sup>-1</sup>	1	10	0.116	2.45
1 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup>	0.1	1	0.012	0.245
1 l s <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup>	8.640	86.40	1	21.17
1 MJ m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	0.408	4.082 <sup>b</sup>	0.047	1

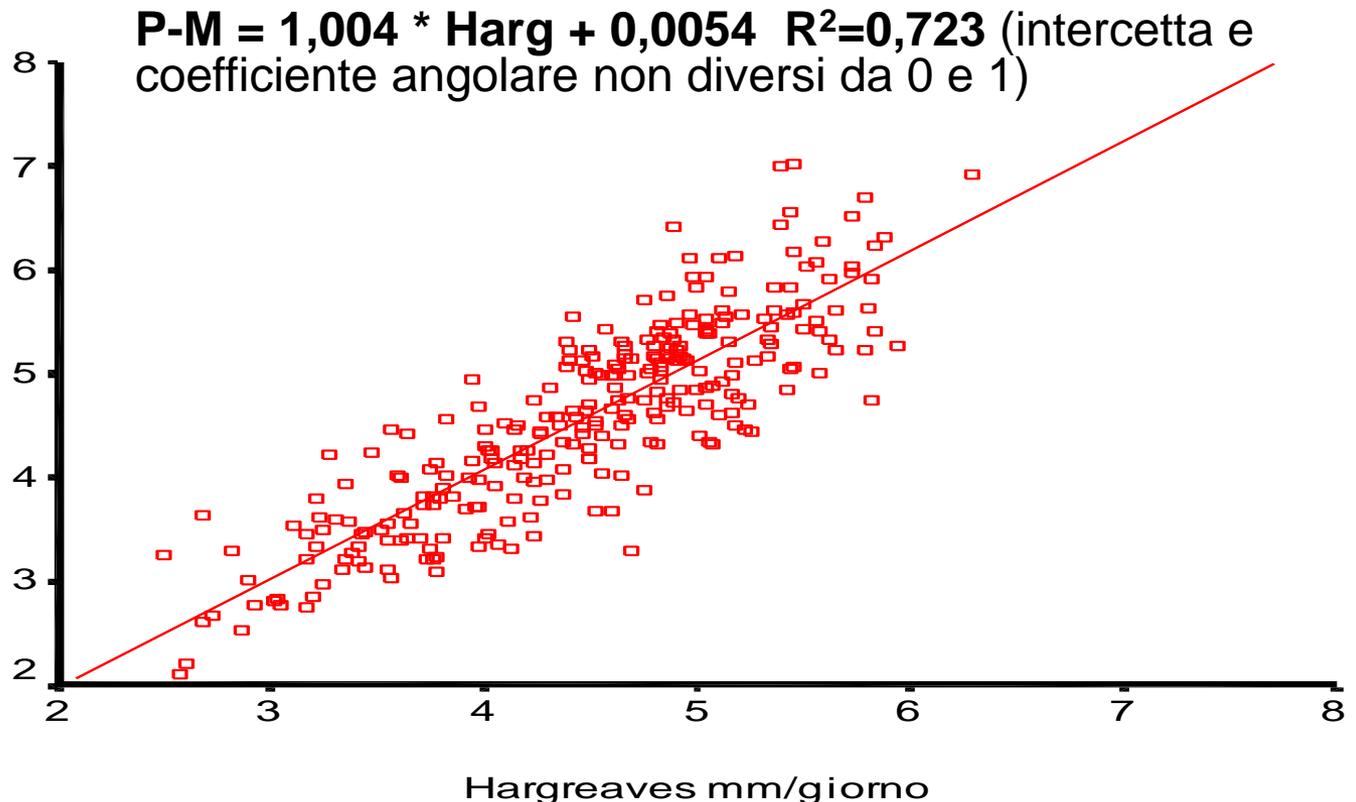
<sup>a</sup> For water with a density of 1 000 kg m<sup>-3</sup> and at 20°C.



# Evapotraspirazione Potenziale

## Penman-Monteith vs Hargreaves: dati decadali Campania

Al test T per dati appaiati, le stime risultano differenti ( $P < 0,0005$ ) ma la differenza media è di 1,3 mm decade, solo 8 decadi superano 10 mm di differenza



# Evapotraspirazione Potenziale

- Blaney-Criddle

$$ET_0 = k [ p (0.46 T + 8) ] -2 \quad (mm d^{-1})$$

T = temperatura media mensile (° C)

p = è la media mensile della durata astronomica del giorno (N), espressa come % sul totale delle ore diurne dell'anno (pari a 4380 = 12\*365)

$$p = \frac{N}{4380} 100$$

k = fattore di correzione basato sull'umidità relativa minima, sul rapporto tra la durata effettiva e la durata teorica (astronomica) dell'insolazione, e sulla velocità del vento nelle ore diurne.

Lat N	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Lat S	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù
50°	8,5	10,1	11,8	13,8	15,4	16,3	15,9	14,5	12,7	10,8	9,1	8,1
48°	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16,0	15,6	14,3	12,6	10,9	9,3	8,3
46°	9,1	10,4	11,9	13,5	14,9	15,7	15,4	14,2	12,6	10,9	9,5	8,7
44°	9,3	10,5	11,9	13,4	14,7	15,4	15,2	14,0	12,6	11,0	9,7	8,9
42°	9,4	10,6	11,9	13,4	14,6	15,2	14,9	13,9	12,6	11,1	9,8	9,1
40°	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,3
35°	10,1	11,0	11,9	13,1	14,0	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
30°	10,4	11,1	12,0	12,9	13,6	14,0	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
25°	10,7	11,3	12,0	12,7	13,3	13,7	13,5	13,0	12,3	11,6	10,9	10,6
20°	11,0	11,5	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
15°	11,3	11,6	12,0	12,5	12,8	13,0	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
10°	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5
5°	11,8	11,9	12,0	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,1	12,0	11,9	11,8
0°	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

$u_{rmin}$  minimo dell'umidità relativa

$r_i$  rapporto tra la durata effettiva e la durata teorica dell'insolazione

$v_v$  velocità del vento nelle ore diurne

$v_v$ [m s <sup>-1</sup> ]	$u_{rmin}$			$r_i$
	bassa <20%	media = 20+50%	alta >50%	
bassa (0+2)	1,29	1,13	0,93	bassa ( $\cong$ 0,45)
media (2+5)	1,47	1,25	1,00	
alta (5+8)	1,62	1,38	1,12	
bassa (0+2)	1,43	1,26	1,06	media ( $\cong$ 0,70)
media (2+5)	1,66	1,43	1,14	
alta (5+8)	1,90	1,56	1,24	
bassa (0+2)	1,60	1,43	1,15	alta ( $\cong$ 0,90)
media (2+5)	1,82	1,57	1,25	
alta (5+8)	2,06	1,75	1,36	

# Evapotraspirazione Potenziale

- **Priestley-Taylor**

$$ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \frac{(R_n - G)}{\lambda} \quad (mm \, d^{-1})$$

$R_n$  = radiazione netta ( $MJ \, m^{-2} \, d^{-1}$ )

$G$  = flusso di calore nel suolo ( $MJ \, m^{-2} \, d^{-1}$ )

$\Delta$  = pendenza curva pressione  $(4098 e_a)(T+237.3)^{-2}$  ( $kPa \, ^\circ \, C^{-1}$ )

$e_a$  = pressione vapore assoluta

$T$  = temperatura dell'aria

$\gamma$  = costante psicrometrica ( $kPa \, ^\circ \, C^{-1}$ )

$\lambda$  = calore latente di vaporizzazione ( $MJ \, kg^{-1}$ )

- **Metodo della radiazione**

$$ET_0 = c(WR_s) \quad (mm \, d^{-1})$$

$W$  = fattore proporzionalità tra temperatura media e altitudine della zona

$R_s$  = radiazione globale media del periodo considerato ( $mm \, d^{-1}$ )

$c$  = coefficiente di correzione che tiene conto dell'umidità relativa minima, dell'eliofania relativa, della velocità del vento nelle ore notturne.



# Evapotraspirazione Potenziale

- Thornthwaite

$$ET_0 = 16.2 b_i \left( \frac{10 T_i}{I} \right)^a \quad (mm d^{-1})$$

$b_i$  = parametro che dipende dal numero medio di ore di insolazione giornaliera e dal numero di giorni nel mese  $i$ .

$$a = 0.5 + 0.016 I$$

$T_i$  = temperatura medi mensile

$I$  = indice termico annuale

$$I = \sum_{i=1,12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

**TABLE 5.9** Mean Possible Hours of Bright Sunshine Expressed in Units of 30 Days of 12 Hours Each

NORTH LAT.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUNE	JULY	AUG.	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.
0°	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
10°	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20°	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
30°	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35°	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40°	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45°	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50°	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Source: Gray [1973]. Reproduced by permission of the National Research Council of Canada.



# Evapotraspirazione Potenziale: altre tecniche di stima

Si possono usare evaporimetri: dispositivi con acqua che evapora e che viene misurata; ve ne sono di tipo diverso, funzionano tutti abbastanza bene perché l'evaporazione è condizionata dagli stessi fattori che condizionano quelli della coltura. I più usati sono:

- **Classe A**, cilindro di 1,2 m di diametro, 25,4 cm di altezza e 0.8 cm di spessore poggiato su una pedana a 10 cm dal suolo. Superficie acqua mantenuta a 50-75 mm dal bordo.
- **Colorado**: quadrato, di 92 cm di lato e profonda 46 cm, interrato con l'acqua a livello suolo
- **Piche**: una provetta rovesciata, chiusa con carta da filtro e posto al riparo dalla radiazione. Costa poco e in rapporto ai costi va bene (utile a livello aziendale)
- **Atmometro di Bellani**: recipiente cilindrico graduato, alto 30 cm che alimenta, per mezzo di un tubo di suzione, una superficie evaporante (disco di ceramica porosa). Il dispositivo viene disposto a 120 cm dal piano di campagna
  - Tutti gli evaporimetri hanno bisogno di coefficienti correttivi (UR, vento) per dare un valore di ETP



# Evapotraspirazione Potenziale

- Evaporimetro

$$ET_0 = k_e E \quad (mm \ d^{-1})$$

$E$  = tasso di evaporazione dall'evaporimetro ( $mm \ d^{-1}$ )

$k_e$  = coefficiente di vasca (rapporto ET festuca/Evaporazione), può dare indicazioni sui fattori di resistenza della pianta rispetto all'evaporazione dal pelo libero dell'acqua. Più è basso e più predominano i fattori di resistenza della pianta al flusso

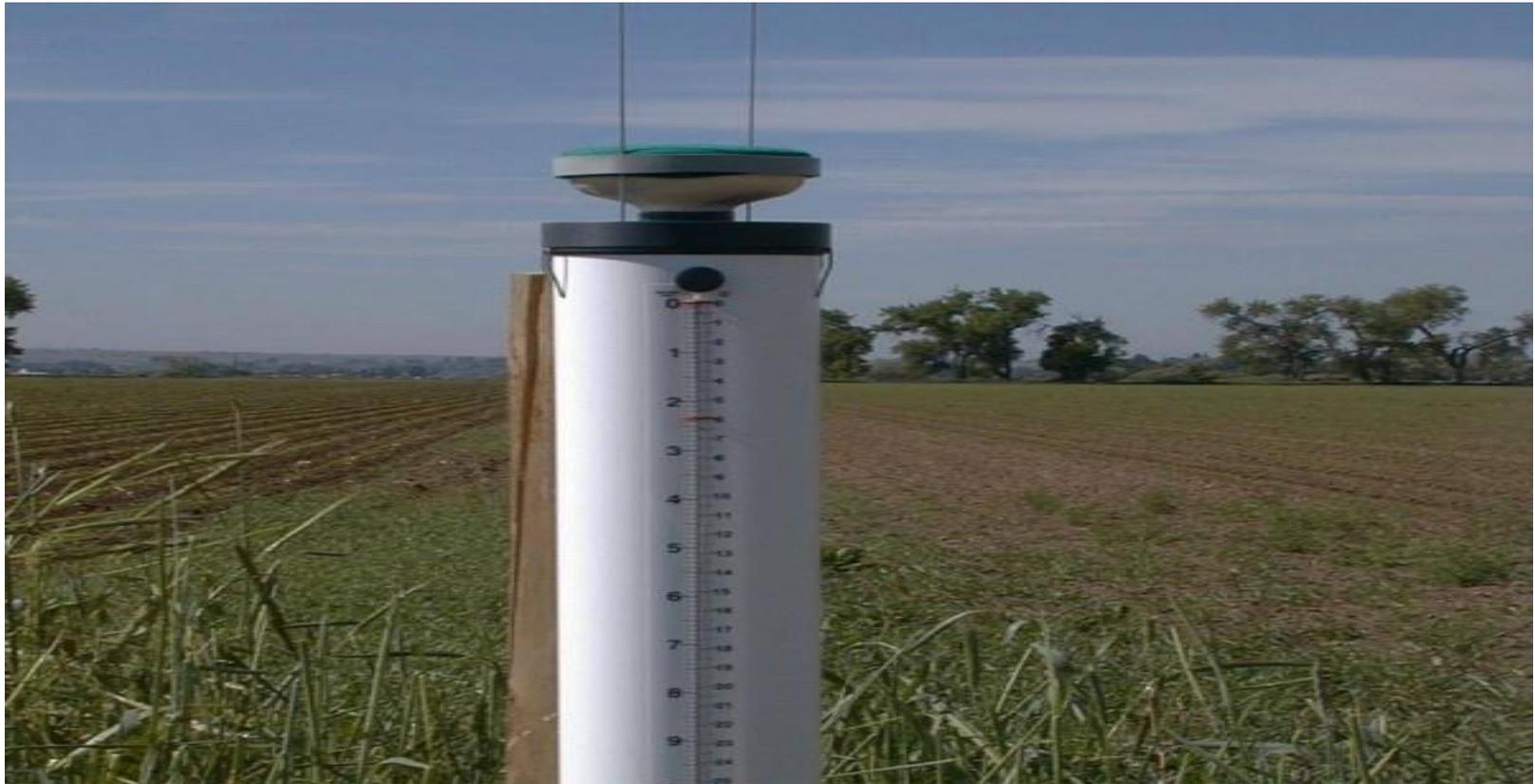
**.7 — Coefficienti  $K_p$  per la stima della  $ET_0$  partendo da  $E$ , misurata su evaporimetro classe A (Doorenbos and Pruitt)<sup>1</sup>**

velocità vento (m/sec)	estensione della copertura vegetale (m)	umidità relativa media (%)		
		< 40	40-70	> 70
< 2 (movimento foglie)	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,70	0,80	0,85
2-5 (movimento ramoscelli)	10	0,60	0,70	0,75
	100	0,65	0,75	0,80
5-8 (polvere, movimento rami)	10	0,55	0,60	0,65
	100	0,60	0,65	0,70
> 8 (movimento alberelli)	10	0,45	0,55	0,60
	100	0,50	0,60	0,65

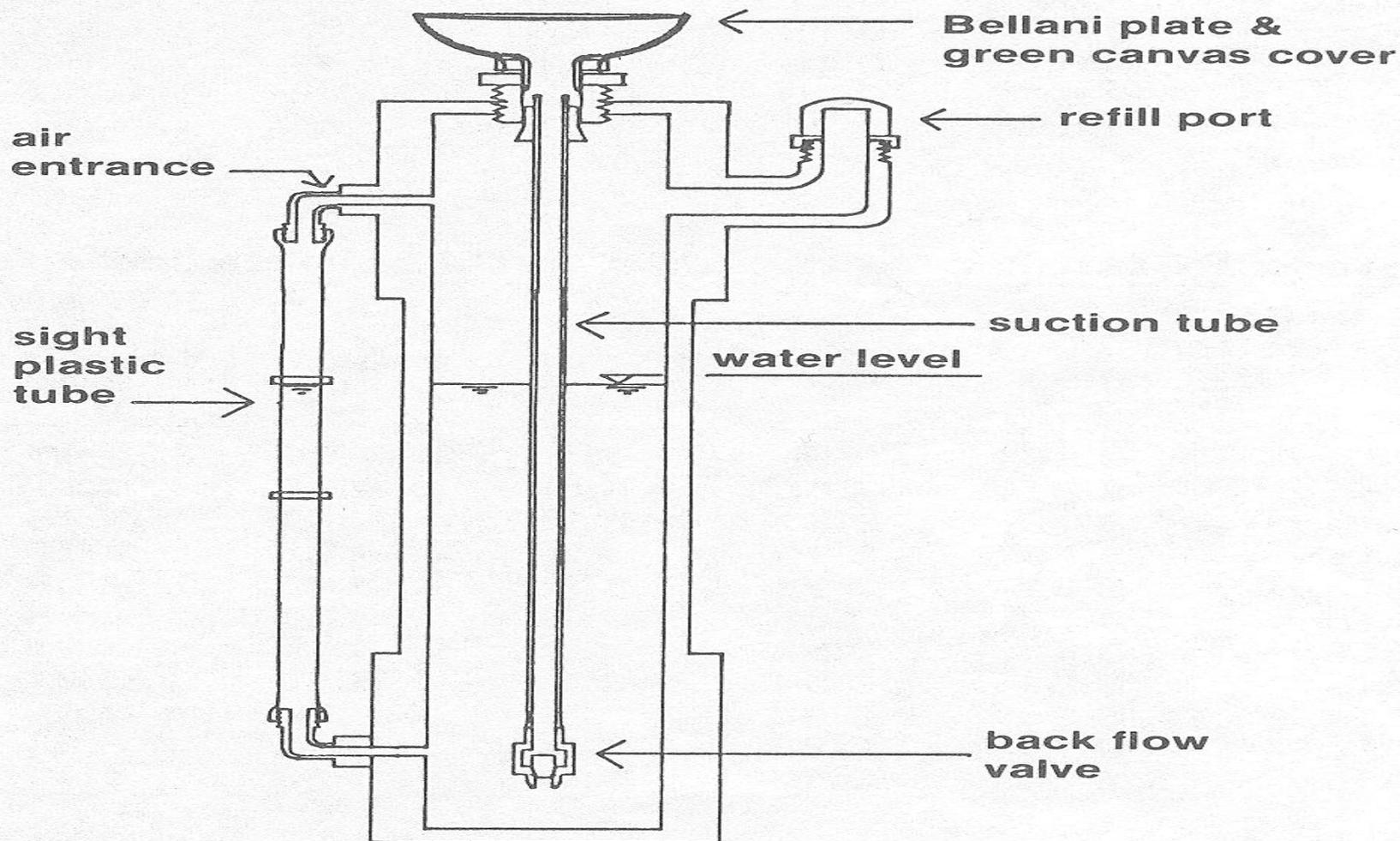
<sup>1</sup> Se l'evaporimetro è posto in area ristretta circondata da piante alte (es. mais), i coefficienti vanno cresciuti del 30% in clima secco e ventoso e del 5-10% in assenza di vento e con clima umido.

# Evapotraspirazione Potenziale

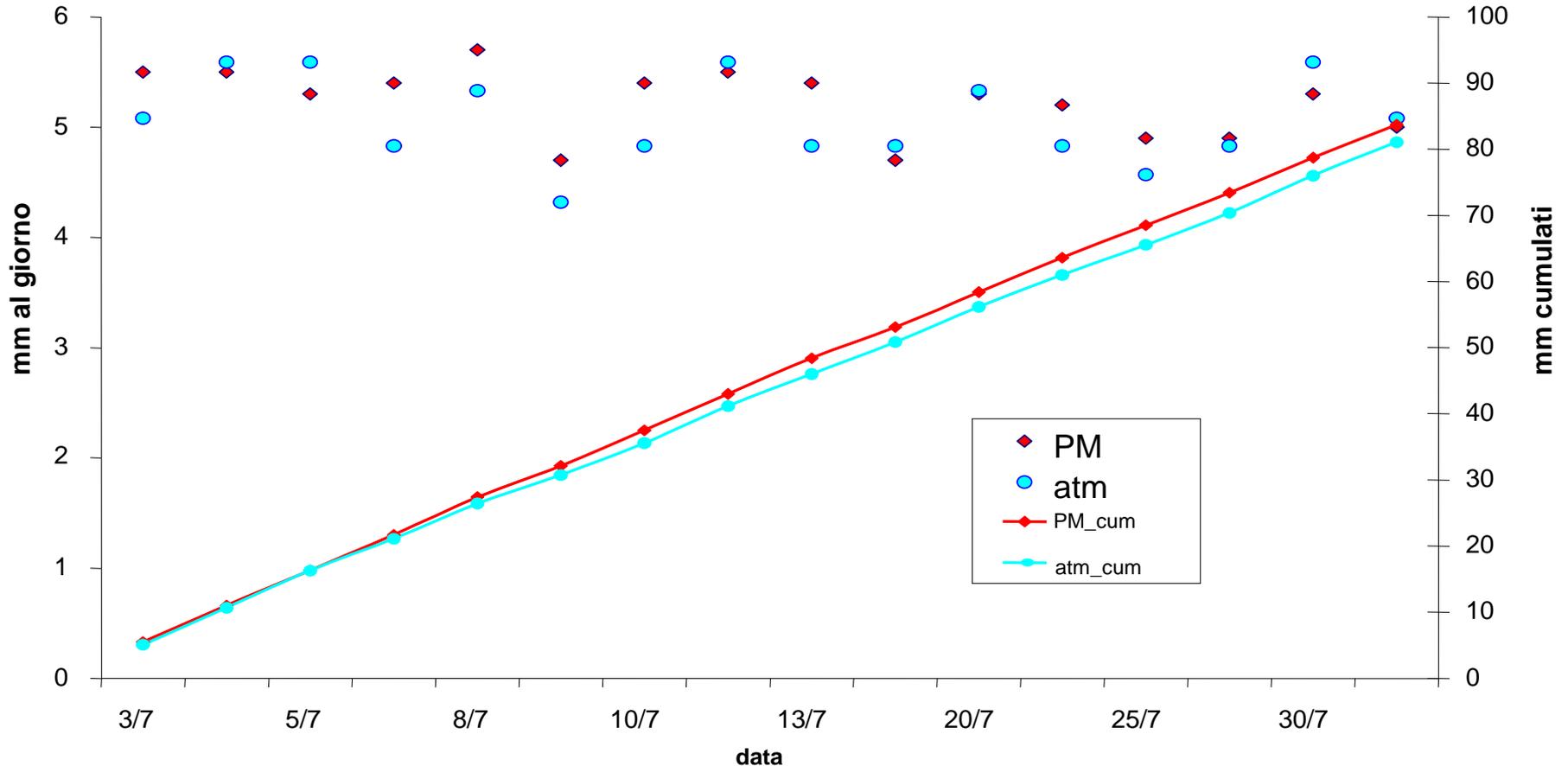
## ATMOMETRO di Bellani



# Evapotraspirazione Potenziale



# Evapotraspirazione Potenziale



ET da atmometro vs. ET da Penman-Monteith



# Evapotraspirazione Massima

A una certa evapotraspirazione potenziale corrisponde un'evapotraspirazione reale da parte della coltura. Se la coltura è nelle stesse ottimali condizioni viste per l'ETP, e l'unica limitazione alle perdite di acqua è lo sviluppo della coltura stessa (che ad es. non ricopre completamente il terreno), si parla di **EVAPOTRASPIRAZIONE MASSIMA**.

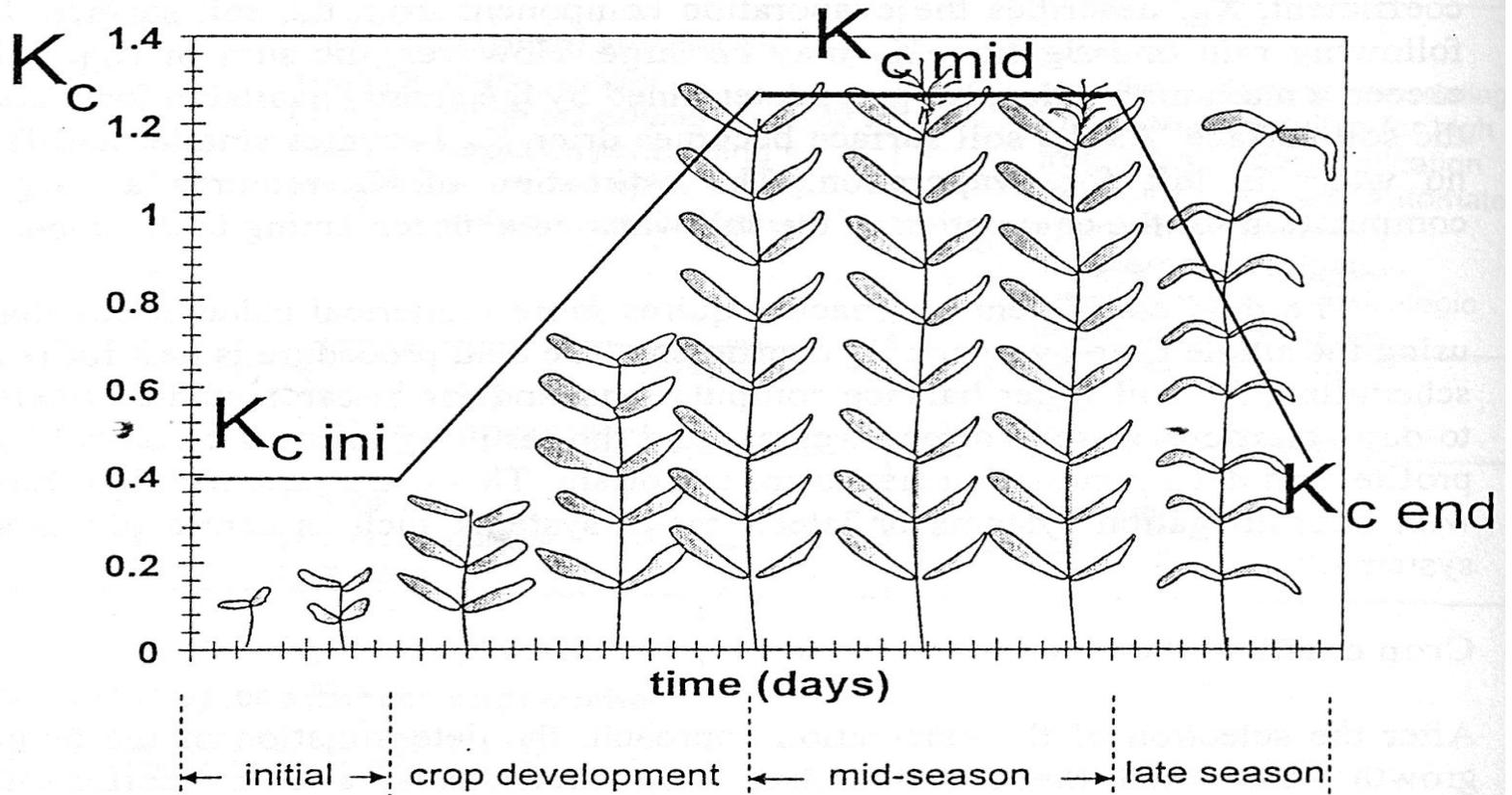
All'evapotraspirazione massima la coltura è in condizioni fisiologiche ottimali, max produzione di s.s. Non sempre però in questa condizione si ottiene il massimo del prodotto desiderato e allora si parla di **EVAPOTRASPIRAZIONE MASSIMA AGRONOMICA**, per la quale si ottiene il massimo del prodotto voluto (es bietola a ETM produce troppe foglie e i fittoni non hanno il max contenuto di saccarosio)

Per calcolare l'evapotraspirazione massima sono disponibili i coefficienti colturali  $K_c$ , che moltiplicati per l'ETP danno una stima dell'ETM. Essi variano in funzione della coltura e dello stadio di sviluppo della stessa. In linea di massima dipendono dal LAI della coltura.



# Coefficiente colturale ( $K_c$ )

Generalized crop coefficient curve for the single crop coefficient approach



# Coefficiente colturale (Kc)

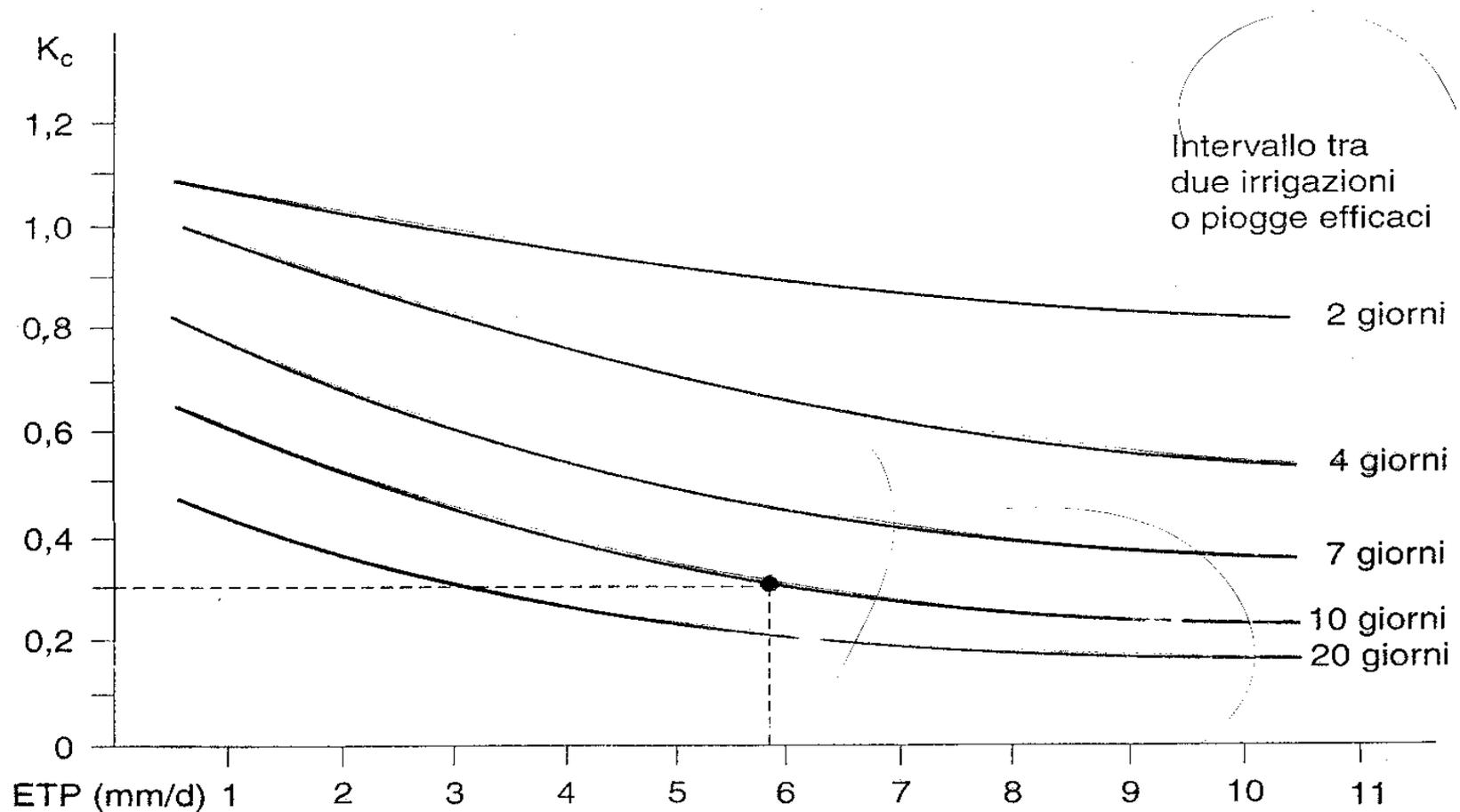
---

Si riconoscono 4 stadi:

- 1) **iniziale**: germinazione, emergenza, sviluppo fino a LAI di circa 1  $Kc=0,3$
- 2) **di copertura**: da LAI 1 a LAI 3 (copertura completa del suolo) il Kc cresce linearmente da 0,3 a 1
- 3) **di pieno sviluppo**  $kc= 1 - 1,2$  (fioritura)
- 4) **di maturazione**, formazione di semi e frutti; la senescenza della pianta riduce la traspirazione da 1 si scende fino a 0,5 - 0,3  
(dipende dalle condizioni della pianta al momento della raccolta)



# Coefficiente culturale per terreno nudo $Kc_{ini}$



# K<sub>c</sub> per zone subumide (UR<sub>min</sub> =45%, Vento =2 m/s)

Table 12 continued

Crop	K <sub>c</sub> ini <sup>1</sup>	K <sub>c</sub> mid	K <sub>c</sub> end	Maximum Crop Height (h) (m)
<b>e. Legumes (<i>Leguminosae</i>)</b>	<b>0.4</b>	<b>1.15</b>	<b>0.55</b>	
Beans, green	0.5	1.05 <sup>2</sup>	0.90	0.4
Beans, dry and Pulses	0.4	1.15 <sup>2</sup>	0.35	0.4
Chick pea		1.00	0.35	0.4
Fababean (broad bean) – Fresh	0.5	1.15 <sup>2</sup>	1.10	0.8
– Dry/Seed	0.5	1.15 <sup>2</sup>	0.30	0.8
Grabanzo	0.4	1.15	0.35	0.8
Green Gram and Cowpeas		1.05	0.60-0.35 <sup>6</sup>	0.4
Groundnut (Peanut)		1.15	0.60	0.4
Lentil		1.10	0.30	0.5
Peas – Fresh	0.5	1.15 <sup>2</sup>	1.10	0.5
– Dry/Seed		1.15	0.30	0.5
Soybeans		1.15	0.50	0.5-1.0
<b>f. Perennial Vegetables (with winter dormancy and initially bare or mulched soil)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>0.80</b>	
Artichokes	0.5	1.00	0.95	0.7
Asparagus	0.5	0.95 <sup>7</sup>	0.30	0.2-0.8
Mint	0.60	1.15	1.10	0.6-0.8
Strawberries	0.40	0.85	0.75	0.2
<b>g. Fibre Crops</b>	<b>0.35</b>			
Cotton		1.15-1.20	0.70-0.50	1.2-1.5
Flax		1.10	0.25	1.2
Sisal <sup>8</sup>		0.4-0.7	0.4-0.7	1.5
<b>h. Oil Crops</b>	<b>0.35</b>	<b>1.15</b>	<b>0.35</b>	
Castorbean ( <i>Ricinus</i> )		1.15	0.55	0.3
Rapeseed, Canola		1.0-1.15 <sup>9</sup>	0.35	0.6
Safflower		1.0-1.15 <sup>9</sup>	0.25	0.8
Sesame		1.10	0.25	1.0
Sunflower		1.0-1.15 <sup>9</sup>	0.35	2.0
<b>i. Cereals</b>	<b>0.3</b>	<b>1.15</b>	<b>0.4</b>	
Barley		1.15	0.25	1
Oats		1.15	0.25	1
Spring Wheat		1.15	0.25-0.4 <sup>10</sup>	1
Winter Wheat - with frozen soils	0.4	1.15	0.25-0.4 <sup>10</sup>	1
– with non-frozen soils	0.7	1.15	0.25-0.4 <sup>10</sup>	
Maize, Field (grain) ( <i>field corn</i> )		1.20	0.60, 0.35 <sup>11</sup>	2
Maize, Sweet ( <i>sweet corn</i> )		1.15	1.05 <sup>12</sup>	1.5
Millet		1.00	0.30	1.5
Sorghum – grain		1.00-1.10	0.55	1-2
– sweet		1.20	1.05	2-4
Rice	1.05	1.20	0.90-0.60	1



Tab. 2.8 — Coefficienti culturali ( $K_c$ ) per alcune colture erbacee in diverso stadio di sviluppo ed in differenti condizioni climatiche (Doorenbos and Pruitt, mod.)

coltura	umidità relativa minima (%)			
	> 70		< 20	
	velocità vento (m/sec)			
	0-5	5-8	0-5	5-8
barbabietola z.	1,05-0,90	1,10-0,95	1,15-1,00	1,20-1,00
carciofo	0,95-0,90	0,95-0,90	1,00-0,95	1,05-0,10
carota	1,00-0,70	1,05-0,75	1,10-0,80	1,15-0,85
cavoli vari	0,95-0,80	1,00-0,85	1,05-0,90	1,10-0,95
cipolla	0,95-0,75	0,95-0,75	1,05-0,80	1,10-0,85
erba medica	1,05-0,50-0,85	—	1,15-0,40-0,95	1,25-0,30-1,05
fagiolo	1,05-0,30	1,10-0,30	1,15-0,25	1,20-0,25
girasole	1,05-0,40	1,10-0,40	1,15-0,35	1,20-0,35
lattuga	0,95-0,90	0,95-0,90	1,00-0,90	1,05-1,00
mais	1,05-0,55	1,10-0,55	1,15-0,60	1,20-0,60
melanzana	0,95-0,80	1,00-0,85	1,05-0,85	1,10-0,90
melone	0,95-0,65	0,95-0,65	1,00-0,75	1,05-0,75
pascolo	1,05-0,55-0,95	—	1,10-0,50-1,00	1,15-0,50-1,05
patata	1,05-0,70	1,10-0,70	1,15-0,75	1,20-0,75
peperone	0,95-0,80	1,00-0,85	1,05-0,85	1,10-0,90
pisello	1,05-0,95	1,10-1,00	1,15-1,05	1,20-1,10
pomodoro	1,00-0,45	1,05-0,45	1,10-0,45	1,15-0,45
prato di graminacee	1,05-0,60-0,80	—	1,10-0,55-0,90	1,15-0,50-1,00
prato misto	1,05-0,55-1,00	—	1,15-0,55-1,05	1,20-0,55-1,10
soia	1,00-0,45	1,05-0,45	1,10-0,45	1,15-0,45
sorgo	1,00-0,50	1,05-0,50	1,10-0,55	1,15-0,55

Due numeri: il 1° interessa il periodo che va dal ricoprimento del terreno all'inizio della maturazione; il 2° interessa la fase finale della coltura; per piante che producono organi vegetativi (es. bietola) od a produzione scalare (es. pomodoro) la seconda fase è molto più breve della prima.

Tre numeri: il 1° interessa la fase precedente lo sfalcio o il pascolamento; il 2° la fase seguente; il 3° è il  $K_c$  medio della coltura.



# Evapotraspirazione reale

---

Non sempre la pianta si trova in condizioni ottimali. Ogni allontanamento dall'optimum comporta una riduzione della traspirazione rispetto a quella massima. Si parla di **EVAPOTRASPIRAZIONE REALE**, che è la quantità d'acqua persa da un sistema terreno - coltura in un momento specifico .

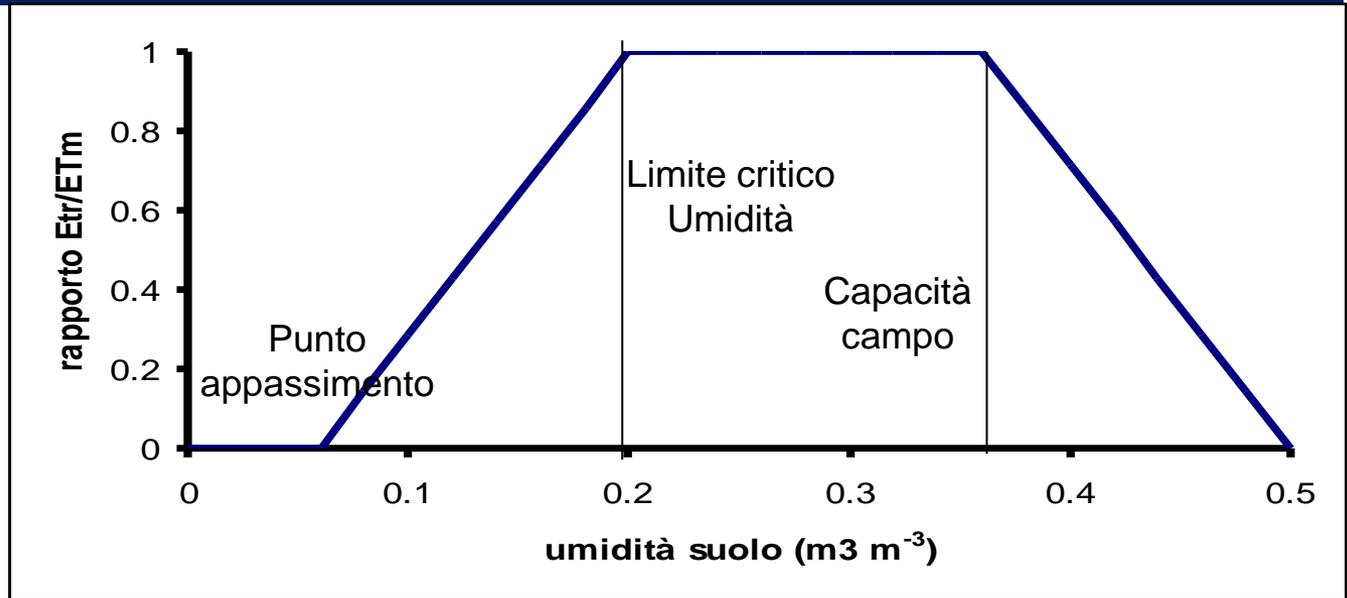
La principale limitazione è la disponibilità di acqua nel suolo: se è scarsa, la pianta riduce la traspirazione fino a cessarla e appassire, se è eccessiva anche, per carenza di ossigeno necessario agli apparati radicali.

Secondariamente, dipende dalle condizioni fitosanitarie



# Evapotraspirazione Reale

Determinazione della riduzione di assorbimento di acqua dovuto a carenza idrica nel suolo



## ➤ 1° livello

Al di sotto di un limite critico la pianta riduce la traspirazione linearmente, fino a 0 al punto di appassimento

## ➤ 2° livello:

il limite critico dipende dal rapporto tra  $E_{Tm}$  e Evap. Caratteristica della coltura: se l' $E_{Tm}$  è alta il limite critico è spostato verso umidità maggiori e viceversa se l' $E_{Tm}$  è bassa

## ➤ 3° livello:

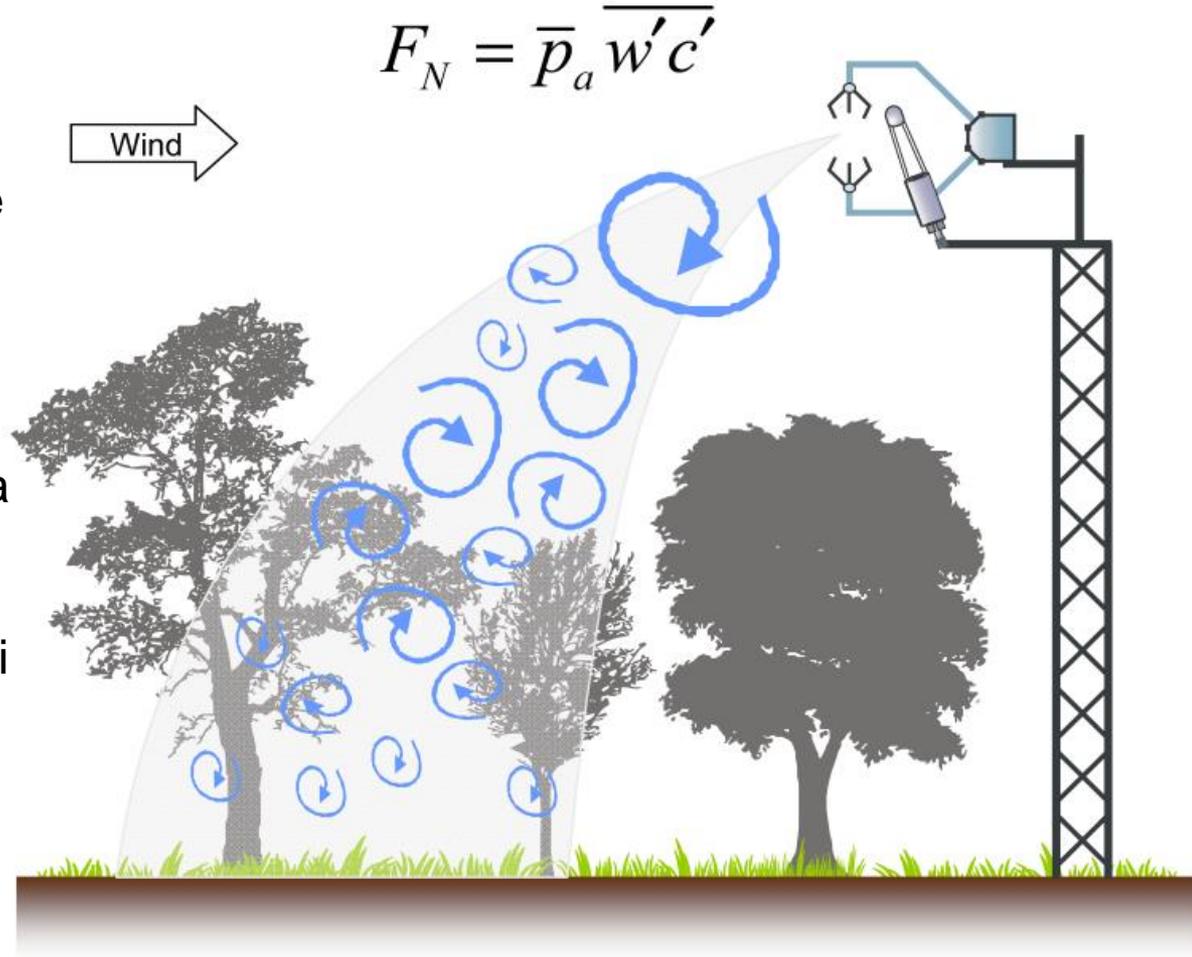
La quantità di acqua assorbibile dalle radici dipende dal flusso idrico che il terreno consente ponendo un potenziale radicale fisso



# Evapotraspirazione Reale

## •EDDY COVARIANCE:

Piccole parcelle d'aria in moto turbolento al di sopra della superficie della coltura trasportano con sé calore, quantità di moto e gas (vapore acqueo e altri gas). La densità media di flusso di una di queste quantità in un certo tempo è il prodotto tra la velocità verticale del vento e la densità della quantità stessa nell'aria. Questo flusso sarà non nullo solo se le fluttuazioni di velocità e densità sono correlate tra loro. Il segno della correlazione specificherà se il flusso è da o verso la superficie.



# Domande

1. -Cosa si intende per evapotraspirazione e che ruolo ricopre nel bilancio idrico colturale.
2. - Quali sono i vantaggi di conoscere la quantità di acqua persa per evapotraspirazione da parte di una coltura?
3. - In che unità di misura si può esprimere l'evapotraspirazione di una coltura? Definirne valori di riferimento.
4. - Descrivere con quale meccanismo l'acqua si muove dal suolo verso la pianta, e quindi dalla pianta verso l'atmosfera.
5. - Valori orientativi del potenziale idrico di suolo, pianta ed atmosfera.
6. - Descrivere le strategie di adattamento delle piante alla domanda evapotraspirativa.
7. - Descrivere il "meccanismo osmotico" utilizzato dai vegetali per regolare il flusso idrico.
8. - Definire cosa si intende per evapotraspirazione di riferimento, ed indicarne dei valori orientativi.
9. - definire cosa si intende per evapotraspirazione reale di una coltura e definirne dei valori orientativi per una coltura in pieno sviluppo nel mese di Luglio.
10. - Il coefficiente colturale: definizione, variazione con la fenologia colturale e valori orientativi.
11. - Metodi di misura e metodi di stima dell'evapotraspirazione di riferimento
12. - Cosa si intende e a cosa serve un evaporimetro?
13. - Cosa si intende per evapotraspirazione agronomica?
14. - Descrivere la riduzione dell'assorbimento di acqua dovuto a carenza o eccesso idrico nel suolo.

