



Dipartimento di Agraria

- Corso di Laurea Magistrale in *Scienze e Tecnologie Agraria* (LM 69) -
- Corso *Gestione agronomica delle risorse idriche*

Carmelo Santonoceto

EVAPOTRASPIRAZIONE

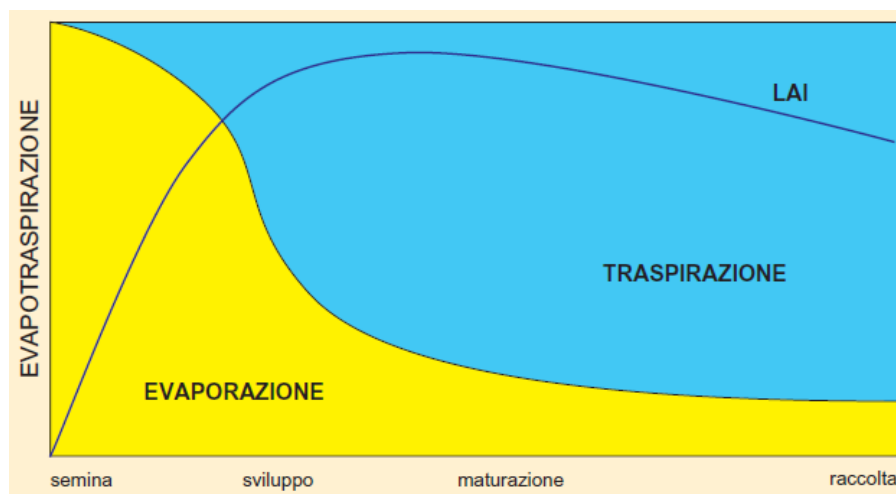
BOZZA SOGGETTA A
NOTEVOLI MODIFICHE

EVAPOTRASPIRAZIONE (ET)

Le piante, attraverso le radici, assorbono acqua dal suolo e la trasmettono sotto forma liquida agli apparati fogliari. Dal mesofillo fogliare l'acqua passa dallo stato liquido a quello di vapore, diffondendosi nell'atmosfera attraverso le aperture stomatiche. Questo fenomeno si indica con il termine di *traspirazione* (T). Allo stesso tempo il suolo perde acqua per *evaporazione* diretta (E). La somma della quantità d'acqua persa dal suolo per evaporazione e dalle piante per traspirazione costituisce il fenomeno dell'*evapotraspirazione* (ET).

In una coltura, l'evaporazione dipende anche dal grado di copertura della vegetazione presente e dalla quantità d'acqua disponibile.

A suolo nudo, o nelle prime fasi di sviluppo della coltura, l'evaporazione sarà più elevata rispetto a quando il terreno è coperto dalle piante. Inizialmente, quindi, l'evaporazione sarà la componente principale dell'evapotraspirazione, per poi progressivamente diventarne una frazione modesta.



Rapporto tra evaporazione e traspirazione in relazione all'indice di area fogliare (LAI) della coltura.

Poiché l'acqua costituzionale è irrilevante rispetto a quella evapotraspirata si può affermare che l'evapotraspirazione corrisponde al *consumo idrico* della coltura. La conoscenza di ET può riuscire, pertanto, molto utile al fine di stimare la quantità di acqua da restituire alle piante di interesse agrario con l'irrigazione. Diversi sono i metodi per misurare o stimare l'evapotraspirazione sia attraverso la determinazione diretta con metodi basati sul bilancio idrico del suolo; sia indirettamente mediante dei modelli empirici che tengono conto delle variazioni di alcuni parametri climatici.

Metodi diretti

L'equazione del bilancio idrico è uno strumento estremamente versatile utilizzato negli studi idrologici e nella programmazione e gestione delle risorse idriche per scopi irrigui.

Il metodo consiste nello stimare le variazioni della riserva idrica del suolo misurando o stimando le voci in entrata (apporti idrici al netto delle perdite) e quelle in uscita (ad esempio l'evapotraspirazione delle colture).

Quando la riserva idrica del suolo scende al di sotto di un determinato valore limite è opportuno reintegrare le perdite tramite un intervento irriguo. Per un qualsiasi intervallo di tempo l'equazione del bilancio idrico assume la seguente forma:

ET_e - evapotraspirazione
 P - precipitazioni
 R - ruscellamento
 ΔW - variazione cont. idrico suolo
 I - irrigazione
 D - percolazione
 A_f - apporti di falda

$$ET_a = I + P + A_f - D - R \pm \Delta W$$

dove i termini, tutti espressi in mm nel tempo considerato, sono:

ET_a acqua persa per evaporazione e traspirazione

I acqua di irrigazione

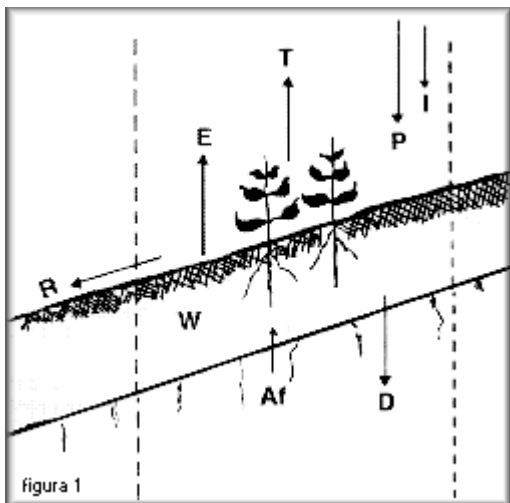
P precipitazioni piovose

A_f apporto idrico della falda o di eventuali infiltrazioni di fiumi, canali, ecc.

ΔW variazione del contenuto idrico dello strato di terreno interessato al bilancio

D acqua persa per percolazione o drenaggio

R acqua persa per ruscellamento



Nella **figura** è riportata una schematizzazione delle componenti del bilancio idrico di un terreno ricoperto di vegetazione. L'equazione può essere applicata a qualsiasi scala spaziale ed il bilancio può quindi riguardare un bacino idrologico di centinaia di km² oppure un piccolo appezzamento coltivato. In teoria, l'equazione del bilancio idrico può essere impostata una volta che siano note le caratteristiche idrologiche del terreno, la profondità della falda freatica, il suo spessore e le proprietà di flusso dell'acquifero.

Nella pratica, invece, la sua applicazione risulta non sempre agevole per la difficoltà di determinazione delle perdite per ruscellamento e percolazione. I dati che permettono di definire le proprietà dell'acquifero (spessore, potenza, ecc.) e la sua dinamica (ricarica, emungimento, abbassamento, ecc.) sono, infatti, spesso carenti se non del tutto assenti. Inoltre, al crescere della scala spaziale di applicazione, l'estrema variabilità che caratterizza i suoli in termini di granulometria, stratificazione, porosità e spessore rendono la stima sempre più imprecisa.

In linea generale la precisione della previsione dipende essenzialmente dalla precisione con cui sono misurati o stimati i termini noti del bilancio. I principali problemi che si incontrano nella determinazione del bilancio idrico al fine di valutare tempi e quantità dell'intervento irriguo sono collegati essenzialmente a misura o stima dell'umidità del terreno; influenza dell'intervallo tra i rilievi; indeterminazione dello strato di suolo soggetto alle variazioni idriche; determinazione delle perdite per ruscellamento o percolazione; determinazione dell'apporto idrico di falda e della efficienza delle piogge.

Metodi indiretti

La stima dei consumi idrici attraverso i metodi indiretti risulta alquanto complessa considerando che il concetto di ET, così come espresso in precedenza, risulta soggetto ad una estrema variabilità dovuta ai seguenti fattori:

- **Colturali**

- ✓ *Specie e varietà*: specie varietà diverse, a parità di condizioni, consumano quantitativi di acqua differenti;
- ✓ *Stadio di crescita della coltura*: una coltura nella fase di massimo accrescimento consuma molta più acqua rispetto alla stessa coltura allo stadio di giovane plantula;
- ✓ *Investimento unitario o fittezza (n. di piante m²)*: all'aumentare del numero di piante per metro quadrato, aumentano i consumi idrici.

- **Pedologici**

- ✓ *Contenuto di umidità del terreno*: maggiore è il contenuto idrico del suolo, maggiore sarà, a parità di stadio di sviluppo, il consumo idrico di una coltura. Man mano che l'acqua nel suolo diminuisce, le piante riducono il loro consumo, mettendo in atto dei meccanismi di risparmio idrico attraverso la chiusura parziale o totale degli stomi.

- **Climatici**

- ✓ *Intensità di radiazione e, quindi, temperatura; tenore di umidità relativa e ventosità* determinano una notevole variabilità del livello di evapotraspirazione di una coltura.

A seguito della discontinuità determinata dai suddetti fattori, è stata ipotizzata una condizione standard in grado di rimuovere le cause di variabilità dovute ai fattori vegetazionali e a quelli pedologici. Si è giunti così al concetto di evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET₀).

Evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET₀)

ET₀ è la quantità d'acqua (mm) evapotraspirata, in un determinato intervallo di tempo, da una superficie interamente coperta da una coltura ideale di *Festuca arundinacea* con caratteristiche standard: fitta, bassa, uniforme, in piena attività vegetativa, posta in condizioni di rifornimento idrico del terreno ottimali.

La coltura, inoltre, deve essere allevata in condizioni tali che: la qualità dell'acqua, le caratteristiche del terreno, la disponibilità di elementi nutritivi, attacchi di patogeni e insetti non limitino la produzione

Da questa definizione si può intuire che alcune cause di variabilità sono state standardizzate.

- La *Festuca arundinacea* è stata convenzionalmente scelta come specie di riferimento. In tal modo viene eliminata la variabilità, in termini di evapotraspirazione, dovuta alle differenti specie.

- Questo prato ideale di *Festuca* deve essere fitto, basso, uniforme in modo da coprire completamente il terreno senza lasciare alcuno spazio vuoto in esso, eliminando così la variabilità causata da un diverso numero di piante per unità di superficie.

- Deve, inoltre, essere in piena attività vegetativa in modo da rimuovere la variabilità determinata dal diverso stadio di accrescimento in cui si trova la coltura.

- Il terreno deve essere costantemente tenuto in condizioni di rifornimento idrico ottimali così da evitare la variabilità dovuta alle fluttuazioni di contenuto idrico che si verificano in esso.

È evidente che l'unica fonte di variabilità rimangono i fattori climatici, per cui si può affermare che l'evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET₀) è una misura del potere evaporante dell'atmosfera: essa può essere immaginata come la "domanda" evapotraspirativa dell'ambiente imposta, in un dato momento o periodo, dalle condizioni meteorologiche

(radiazione, temperatura, vento e umidità relativa), ad un prato di *Festuca arundinacea* allevato nelle condizioni precedentemente descritte.

Ma come fare a risalire al consumo idrico delle altre colture partendo da quello della *Festuca*? ET_0 rappresenta per convenzione il “riferimento” per poter stimare i consumi idrici di tutte le altre colture, in qualunque condizione ambientale e a qualunque stadio vegetativo esse si trovino, attraverso degli opportuni coefficienti colturali (K_c) che descriveremo dopo aver esposto alcuni metodi indiretti di stima di ET_0 .

Metodi empirici per la stima di ET_0

In precedenza abbiamo definito ET_0 come la “domanda” evapotraspirativa dell’ambiente imposta alla coltura di riferimento dalle condizioni meteorologiche (radiazione, temperatura, vento e umidità relativa). Partendo da questo presupposto, diversi ricercatori, dopo lunghe osservazioni delle relazioni esistenti tra evapotraspirazione di riferimento e elementi del clima, hanno messo a punto dei modelli matematici in grado di stimare ET_0 partendo dalla misurazione o dalla stima di uno o più elementi del clima.

Metodo	Temperatura	RH	Vento	Eliofania relativa	Radiazione globale	Radiazione netta	Radiazione astron.	Evaporato
Thornthwaite	X							
Blaney-Criddle	X	(X)	(X)	(X)			X	
Radiazione solare	X	(X)	(X)	(**)	X			
Hargreaves	X						X	
Turc	X	(*)		(**)	X			
Penman	X	X	X	X		(X)		
Evaporimetro		(X)	(X)					X

Metodi empirici di relazione tra l’evapotraspirazione misurata ed uno o più fattori del clima

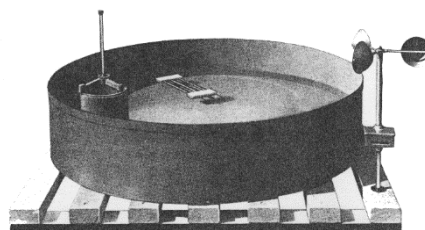
X = Valori misurati (*) = per umidità inferiore al 50%

(X) = Valori stimati (**) = in assenza del dato della radiazione globale

Di seguito si riportano alcune nozioni relative ai metodi trattati nelle esercitazioni svolte durante il Corso. Si rimanda ad esse e al materiale didattico fornito dal docente per maggiori dettagli e per gli esempi di applicazioni pratiche.

- Vasca evaporimetrica

Un metodo particolarmente pratico per la stima di ET_0 è quello della vasca evaporimetrica (o evaporimetro). Con tale strumento è possibile misurare il tasso di evaporazione. Esso è costituito da una vasca contenente acqua. Il più noto è l’evaporimetro di Classe A: una vasca in acciaio, circolare, con diametro di 122 cm; profonda 25,4 cm; posta su una pedana di legno alta 15 cm. La superficie libera dell’acqua deve essere mantenuta tra i 5,0 e i 7,5 cm dal bordo (in genere si ripristina il livello una volta al giorno). È provvista di un pozzetto di calma nel quale si rileva quotidianamente l’abbassamento del livello per mezzo di una vite micrometrica o di un sensore elettrico. Il dispositivo può essere posizionato su un prato di graminacee o su terreno nudo.



L'evaporimetro fornisce la misura dell'evaporazione (E_v) attraverso la quale è possibile ottenere anche una stima dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 mediante degli appropriati coefficienti di correzione (K_p) i cui valori variano in funzione della estensione della copertura vegetale, ovvero del terreno spoglio (sopravvento rispetto alla zona di riferimento); dell'umidità relativa calcolata come media del valore massimo e minimo; e della velocità del vento valutata come valore medio giornaliero..

$$ET_0 = E_v \times K_p \quad \text{in cui:}$$

E_v = mm di acqua evaporata dalla vasca

K_p = coefficiente di correzione.

La tabella fornisce i valori da attribuire al coefficiente K_p in rapporto ai parametri prima citati.



Class A pan	Case A: Pan placed in short green cropped area				Case B: Pan placed in dry fallow area			
	RH mean (%) →	low < 40	medium 40 - 70	high > 70	RH mean (%) →	low < 40	medium 40 - 70	high > 70
Wind speed (m s ⁻¹)	Windward side distance of green crop (m)				Windward side distance of dry fallow (m)			
Light	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
	1000	.75	.85	.85	1000	.5	.6	.7
Moderate	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
	1000	.7	.8	.8	1000	.45	.55	.6
Strong	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
	1000	.65	.7	.75	1000	.4	.45	.55
Very strong	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
	1000	.55	.6	.65	1000	.35	.4	.45

Pan coefficients (K_p) for Class A pan for different pan siting and environment and different levels of mean relative humidity and wind speed (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24)

- Il metodo di Turc

Uno dei modelli più noti è quello di Turc. Nella sua versione semplificata consente di calcolare ET_0 media mensile basandosi sulla relazione esistente fra quest'ultima ed alcuni elementi climatici quali T media e radiazione globale media (radiazione diretta + diffusa):

$$ET_0 \text{ (mm mese}^{-1}\text{)} = \frac{C \times T}{(T + 15)} \times (Rg + 50)$$

in cui:

T = temperatura media del mese considerato

Rg = Radiazione globale media del mese considerato espressa in $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$

C = coefficiente pari a 0.37 per febbraio e 0.40 per i restanti mesi

- Il metodo di Thornthwaite

La Formula empirica di Thornthwaite (1948) è basata sulla relazione esponenziale esistente tra l' ET_0 e la temperatura media mensile

$$ET_0 \text{ (mm mese}^{-1}\text{)} = 16 \times \left(\frac{10 \times T}{I} \right)^a \times l$$

ET_0 = evapotraspirazione mensile (cm) calcolata in un mese di 30 giorni ed insolazione 12 ore su 24

T = temperatura media mensile in °C

I = Indice Annuo di Calore, ottenuto dalla somma di 12 indici (i) mensili correlati alla temperatura media del mese considerato secondo la formula

$$i = (T/5)^{1,514}$$

a = parametro relativo al clima del luogo, correlato all'Indice Termico Annuale I attraverso il polinomio

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,493$$

l = fattore di correzione il cui valore dipende dalla latitudine e dal periodo dell'anno. Questo fattore tiene conto del numero dei giorni del mese e del numero reale di ore di insolazione nei giorni dello stesso mese secondo la formula:

$$l = N/12 \times d/30 \text{ in cui:}$$

N = numero massimo delle ore di insolazione (da tabella)

d = numero dei giorni nel mese

- Il metodo di Blaney e Criddle

Anche il metodo di *Blaney e Criddle* basa essenzialmente la stima della evapotraspirazione potenziale di riferimento sui valori di temperatura misurati nel bacino ma introduce anche la valutazione del numero di ore di insolazione. Il metodo consente di valutare l' ET_0 su base mensile, ma esprimendola in millimetri al giorno ($mm d^{-1}$) ed assume la forma:

$$ET_0 \text{ (mm } d^{-1}\text{)} = a + b \times p \times (0,46 \times T + 8,13)$$

Dove:

T è la temperatura media del mese considerato (°C);

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

$$p = N/4380 \times 100$$

N (media mensile della durata astronomica del giorno in ore.

a e b sono dei coefficienti di correzione (adimensionali) il cui valore viene attribuito sulla base di stime basate sul valore minimo di umidità relativa, al rapporto tra la durata effettiva e la durata teorica dell'insolazione ed alla velocità del vento nelle ore diurne.

- Il metodo di Hargreaves

L'equazione è funzione della temperatura e fornisce un'espressione per la valutazione dell' ET di reference crop:

$$ET_0 \text{ (mm d}^{-1}\text{)} = 0,0023 \times R_a \times (T + 17,8) \times \Delta T^{0,5}$$

ET_0 = evapotraspirazione potenziale di riferimento (mm d⁻¹);

R_a = altezza di evaporazione equivalente alla radiazione astronomica per il sito ed il giorno di interesse (mm d⁻¹): (0.408 R_a per R_a espressa in MJ m⁻² d⁻¹); ($R_a/58,6$ per R_a espressa in cal cm⁻² d⁻¹);

ΔT = escursione termica giornaliera ($T_{max}-T_{min}$) (°C);

T = temperatura media dell'aria (°C) nel giorno considerato.

La stessa formula può essere utilizzata con riferimento alla scala mensile, calcolando il valore di ET_0 nel giorno medio del mese e moltiplicandolo per i giorni effettivi del mese stesso. In questo caso, però, il fattore ΔT è rappresentato dalla differenza tra la media delle temperature massime e la media delle temperature minime del mese considerato (°C).

- Il metodo FAO Penman-Monteith

La FAO ha riunito un panel di esperti che ha definito degli standard oggi universalmente accettati.

Nella pubblicazione prodotta dal comitato (Allen et al. 1998) si fa la distinzione tra *reference crop evapotranspiration* ET_0 , *crop evapotranspiration under standard conditions* ET_c e *crop evapotranspiration under non standard conditions* ET_a .

ET_0 è un parametro climatico che esprime la capacità dell'atmosfera di permettere l'evaporazione.

Il concetto di *evapotraspirazione di riferimento* nasce dall'esigenza di definire oggettivamente questo potere evaporativo dell'atmosfera, a prescindere dall'uso del suolo sottostante.

La definizione della superficie di riferimento è la seguente: *A hypothetical reference crop with an assumed uniform crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of 70 s m⁻¹ and an albedo of 0.23, actively growing and adequately watered.* Questa corrisponde ad una superficie estesa d'erba di altezza uniforme, nella fase di crescita, che nasconde completamente il terreno ed adeguatamente irrigata.

Il metodo raccomandato per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 è quello di *Penman-Monteith*.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma (900 / T_k) U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)}$$

ET_0 = evapotraspirazione di riferimento (mm d⁻¹)

Δ = pendenza della curva che esprime la tensione di vapore saturo in funzione della temperatura (kPa °C⁻¹)

R_n = radiazione netta (MJ m⁻² d⁻¹)

T_k = temperatura assoluta media a 2 m dal suolo (°K)

U_2 = velocità del vento a 2 m dal suolo (m s⁻¹)

G = flusso di calore dal suolo (MJ m⁻² d⁻¹)

$e_a - e_d$ = deficit di pressione di vapore dell'aria (kPa)

γ = costante psicrometrica (kPa °C⁻¹)

ET₀ può essere calcolata per differenti intervalli temporali (orario, giornaliero, decadico, o mensile). La selezione dell'intervallo temporale dipende dallo scopo per cui viene calcolata ET₀, dall'accuratezza richiesta, e dalla scala temporale cui sono disponibili i dati.

Per il calcolo giornaliero sono quindi necessarie misure quotidiane di radiazione solare, temperatura massima e minima, umidità dell'aria massima e minima, e velocità del vento. Questi dati sono comunemente misurati dalle stazioni agro-meteorologiche e vengono elaborati come descritto nelle equazioni successive.

La pressione di vapore saturo (e_a) in funzione della temperatura dell'aria T (°C) è espressa dalla formula:

$$e_a = 0.6108 e^{\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)}$$

La pressione di vapore effettiva (e_d) si calcola a partire dai valori dell'umidità relativa applicando una semplice proporzione:

$$e_d = e_a \times \frac{RH}{100}$$

Il valore di Δ è calcolato in funzione della temperatura:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \right]}{(T+237.3)^2}$$

dove la temperatura T (°C) che compare nella formula è la media giornaliera.

Il valore di R_n è calcolato come differenza tra la radiazione netta a onda corta R_{ns} e la radiazione netta a onda lunga R_{nl}:

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

La radiazione netta può essere misurata mediante idonea strumentazione. In assenza di misure, può essere stimata con il seguente procedimento. La radiazione R_{ns} è calcolata in funzione della radiazione solare R_s con la formula:

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

dove α è il coefficiente di riflessione della superficie che per una coltura erbacea di riferimento è pari a 0.23.

La radiazione R_{nl} può essere determinata con l'espressione:

$$R_{nl} = (0,1 + 0,9 n/N) (0.34 - 0.14\sqrt{e_d}) (\sigma \times T_k^4)$$

dove:

n/N = eliofanìa relativa;

σ = 4,903x10⁻⁹;

e_d = tensione di vapore effettiva;

T_k = temperatura assoluta.

Il flusso G di calore dal suolo può essere assunto uguale a zero nel caso si calcoli l'evapotraspirazione di riferimento su base giornaliera. Per periodi più lunghi, è determinato con la seguente espressione:

$$G = 0,14(T_i + T_{i-1})$$

dove:

T_i = temperatura media nel periodo considerato

T_{i-1} = temperatura media nel periodo precedente

Il valore della costante psicrometrica γ si calcola applicando la seguente relazione:

$$\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda}$$

dove

P è la pressione atmosferica, calcolabile in funzione della quota z (m) sul livello del mare mediante l'espressione:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26}$$

λ = calore latente di vaporizzazione in funzione della temperatura ottenuto con l'espressione:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3}) T$$

dove T è la temperatura (°C) media.

La velocità del vento ($m s^{-1}$) va misurata a 2 metri di altezza. Qualora venisse misurata ad un'altezza differente (z), il valore deve essere convertito mediante l'espressione:

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

Il coefficiente colturale (K_c)

Adottando i metodi precedentemente esaminati, si perviene ad una stima dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0), che rappresenta il valore base per la stima dei fabbisogni idrici di tutte le colture agrarie. A tale scopo bisogna adottare un coefficiente di correzione dell' ET_0 definito come coefficiente colturale (K_c), specifico per ogni coltura e diverso per ogni suo stadio vegetativo.

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad \text{dove:}$$

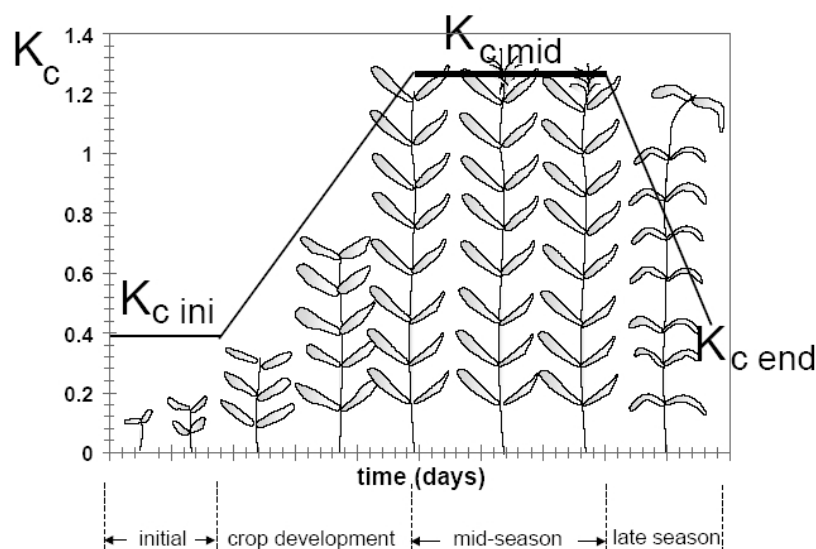
ET_c = Evapotraspirazione potenziale di una data coltura ad un determinato stadio vegetativo. ET_c , così come affermato per ET_0 , può essere considerata come la "domanda" evapotraspirativa dell'ambiente imposta in un dato momento o periodo, e, stavolta, durante una determinata fase del ciclo biologico, dalle condizioni meteorologiche (radiazione, temperatura, vento e umidità relativa), ad una specifica coltura (es. girasole, colza, mais, ecc.).

Poiché ET_c aumenta all'aumentare della superficie fogliare traspirante, cioè con l'accrescimento della coltura, il K_c aumenta dall'inizio del ciclo colturale fino a quando questa raggiunge il massimo sviluppo; successivamente, durante la fase finale di maturazione, il K_c comincia a diminuire in seguito all'ingiallimento e caduta delle foglie.

I coefficienti colturali, stabiliti dalla FAO, sono stati determinati sperimentalmente come rapporto ET_c/ET_0 per le diverse colture e sono stati modificati in funzione delle caratteristiche ambientali.

Il procedimento per la determinazione del K_c nelle colture erbacee consiste nel suddividere il ciclo biologico di ciascuna coltura in quattro fasi:

- ✓ *Fase iniziale*: inizia dalla semina fino al momento in cui la coltura non ricopre circa il 10% del terreno. In questo stadio il K_c è dell'ordine di 0,3 – 0,4.
- ✓ *Fase di crescita*: dalla fine della fase precedente fino al raggiungimento della quasi totale copertura del suolo da parte della coltura. I valori di K_c sono crescenti fino a circa 0,8 – 1.
- ✓ *Fase di pieno sviluppo*: la copertura è al suo massimo e la coltura è in pieno rigoglio vegetativo. I K_c in genere si stabilizzano su valori superiori a 1 ($ET_c > ET_0$).
- ✓ *Fase di maturazione*: dalla fine della fase precedente, progredisce con la senescenza del fogliame fino alla completa maturazione. I coefficienti colturali decrescono finendo a 0,3 – 0,5 a maturazione piena.



Generalized crop coefficient curve for the single crop coefficient approach

Table 18

Crop Coefficients (kc)

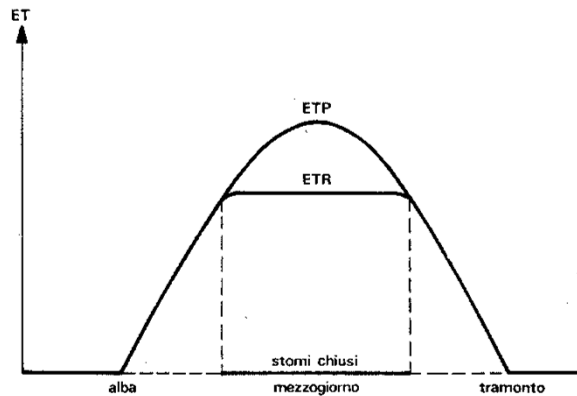
CROP	Crop Development stages				Total growing period
	Initial	Crop development	Mid-season	At harvest	
Banana					
tropical	0.4 -0.5	0.7 -0.85	1.0 -1.1	0.75-0.85	0.7 -0.8
subtropical	0.5 -0.65	0.8 -0.9	1.0 -1.2	1.0 -1.15	0.85-0.95
Bean					
green	0.3 -0.4	0.65-0.75	0.95-1.05	0.85-0.95	0.85-0.9
dry	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.25-0.3	0.7 -0.8
Cabbage	0.4 -0.5	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.8 -0.95	0.7 -0.8
Cotton	0.4 -0.5	0.7 -0.8	1.05-1.25	0.65-0.7	0.8 -0.9
Grape	0.35-0.55	0.6 -0.8	0.7 -0.9	0.55-0.7	0.55-0.75
Groundnut	0.4 -0.5	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.55-0.6	0.75-0.8
Maize					
sweet	0.3 -0.5	0.7 -0.9	1.05-1.2	0.95-1.1	0.8 -0.95
grain	0.3 -0.5*	0.7 -0.85*	1.05-1.2*	0.55-0.6*	0.75-0.9*
Onion					
dry	0.4 -0.6	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.75-0.85	0.8 -0.9
green	0.4 -0.6	0.6 -0.75	0.95-1.05	0.95-1.05	0.65-0.8
Pea, fresh	0.4 -0.5	0.7 -0.85	1.05-1.2	0.95-1.1	0.8 -0.95
Pepper, fresh	0.3 -0.4	0.6 -0.75	0.95-1.1	0.8 -0.9	0.7 -0.8
Potato	0.4 -0.5	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.7 -0.75	0.75-0.9
Rice	1.1 -1.15	1.1 -1.5	1.1 -1.3	0.95-1.05	1.05-1.2
Safflower	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.2 -0.25	0.65-0.7
Sorghum	0.3 -0.4	0.7 -0.75	1.0 -1.15	0.5 -0.55	0.75-0.85
Soybean	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.0 -1.15	0.4 -0.5	0.75-0.9
Sugarbeet	0.4 -0.5	0.75-0.85	1.05-1.2	0.6 -0.7	0.8 -0.9
Sugarcane	0.4 -0.5	0.7 -1.0	1.0 -1.3	0.5 -0.6	0.85-1.05
Sunflower	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.35-0.45	0.75-0.85
Tobacco	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.0 -1.2	0.75-0.85	0.85-0.95
Tomato	0.4 -0.5	0.7 -0.8	1.05-1.25	0.6 -0.65	0.75-0.9
Watermelon	0.4 -0.5	0.7 -0.8	0.95-1.05	0.65-0.75	0.75-0.85
Wheat	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.2 -0.25	0.8 -0.9
Alfalfa	0.3 -0.4			1.05-1.2	0.85-1.05
Citrus					
clean weeding					0.65-0.75
no weed control					0.85-0.9
Olive					0.4 -0.6

First figure : Under high humidity (RHmin >70%) and low wind (U <5 m/sec).
 Second figure: Under low humidity (RHmin <20%) and strong wind (>5 m/sec).

Evapotraspirazione reale

Da quanto detto in precedenza ET_c è rappresentata la *domanda* d'acqua imposta dall'ambiente alla coltura. A questa *domanda* fa riscontro l'*offerta* di acqua da parte della coltura all'atmosfera: offerta che eguaglia la domanda solo nel caso di copertura completa del terreno e di abbondante disponibilità idrica e che, in caso contrario, è inferiore.

L'acqua realmente perduta da una superficie per evaporazione e per traspirazione costituisce l'*evapotraspirazione reale* (ET_a). ET_a è, al massimo, uguale a ET_c , spesso ne è inferiore. Infatti, il suolo, nel caso che l'acqua scarseggi, vede diminuita grandemente la sua capacità evaporante, in quanto il fronte bagnato si ritira negli strati sottosuperficiali dove l'evaporazione avviene con un ritmo molto ridotto. Da parte loro i vegetali, se l'acqua è in difetto e la richiesta evaporante dell'atmosfera è elevata, reagiscono con un meccanismo di difesa: chiudendo gli stomi. Così facendo, se da una parte determinano la riduzione di ET_a , dall'altra limitano gli scambi di CO_2 tra atmosfera e apparato assimilatore: ciò evidentemente è negativo ai fini della fotosintesi, dell'assimilazione e della resa.



Pertanto la massima attività assimilatoria di un vegetale si ha quando $ET_a = ET_c$; ogni volta che $ET_a < ET_c$ la fotosintesi viene ad essere rallentata.

Per trarre il miglior profitto dall'acqua è opportuno, quindi, fare in modo a che ET_a sia uguale o quanto più prossimo a ET_c , così da ridurre il tempo di chiusura degli stomi. Si può tentare di realizzare questo obiettivo cercando di incrementare ET_a e/o di ridurre ET_c .

Incrementare ET_a significa aumentare la disponibilità idrica per la coltura:

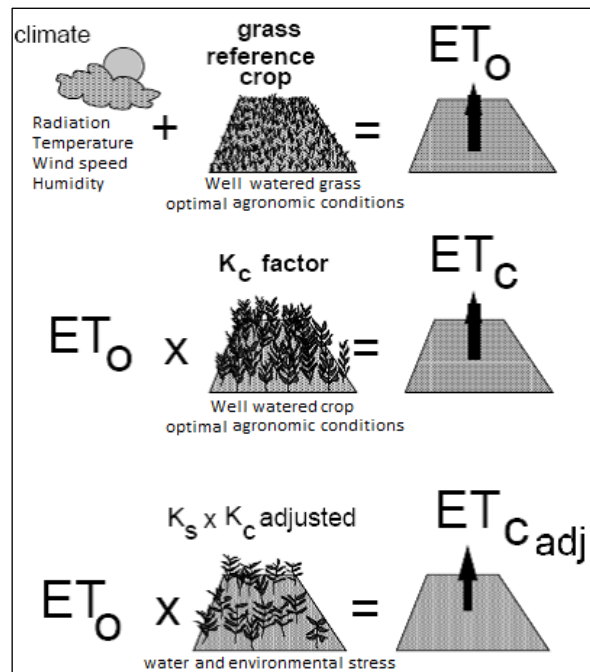
- ✓ intervenendo con l'irrigazione;
- ✓ favorendo la capacità di accumulo dell'acqua nel terreno attraverso lavorazioni profonde eseguite prima della stagione piovosa;
- ✓ riducendo le perdite di acqua dal terreno con lavorazioni superficiali (sarchiature) in grado di limitare l'evaporazione dal terreno e di eliminare le erbe infestanti che competono con la coltura per l'acqua;

- ✓ apportando sostanza organica che, trasformandosi in humus, aumenta notevolmente la capacità di ritenzione idrica del suolo.

Ridurre ET_c significa diminuire l'apporto d'energia a livello delle foglie.

Questo risultato può essere perseguito in vario modo:

- ✓ riducendo la radiazione eccessiva mediante delle reti ombreggianti;



- ✓ aumentando l'umidità relativa dell'aria mediante appositi impianti di irrigazione con i quali l'acqua viene nebulizzata al di sopra delle colture (irrigazione nebulizzante);
- ✓ frenando i movimenti d'aria con l'adozione di frangivento che, in caso di frangivento vivi, contribuiscono alla riduzione di ET_c anche incrementando l'umidità dell'aria attraverso la traspirazione.

I primi due interventi, a causa del loro costo elevato, vengono adoperati solo per colture da alto reddito (floricole, orticole o frutticole), mentre l'uso dei frangivento è sempre consigliato in qualunque situazione.

ET_a è, pertanto, l'evapotraspirazione di una coltura in condizioni spesso differenti da quelle standard; viene calcolata avvalendosi di un *coefficiente di stress* (K_s) del quale parleremo dopo aver affrontato l'argomento relativo ai rapporti acqua-terreno.