



Dipartimento di Agraria

- Corso di Laurea *Scienze e Tecnologie Alimentari* (L26) -
- Corso integrato *Agronomia e colture erbacee e arboree industriali* -
- Modulo *Agronomia e colture erbacee industriali* -

Carmelo Santonoceto

RAPPORTI ACQUA-PIANTA

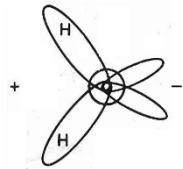
EVAPOTRASPIRAZIONE

RAPPORTI ACQUA-PIANTA

L'acqua è il costituente essenziale di tutti gli esseri viventi. Nei tessuti di piante in piena crescita il suo contenuto può superare il 90%. Tutte le funzioni vitali della pianta come respirazione, fotosintesi, accrescimento e moltiplicazione cellulare, assorbimento radicale, traslocazione e trasformazione degli elementi nutritivi sono influenzate dalla disponibilità idrica. Di tutti i fattori della produzione, l'acqua è quella richiesta in quantità più elevata.

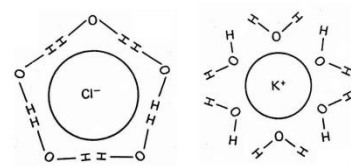
L'acqua è una sostanza con caratteristiche fisiche e chimiche del tutto peculiari che servono a spiegare perché essa è indispensabile per gli organismi viventi.

Tutto parte dal fatto che la molecola d'acqua ha una configurazione spaziale asimmetrica. La molecola d'acqua, infatti, è un dipolo. La natura bipolare dell'acqua spiega perché il lato positivo è attratto da cariche negative e quello negativo è attratto da cariche positive.



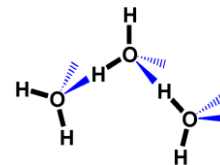
Questo fenomeno consente alle molecole d'acqua di interagire:

- sia con i cationi che con gli anioni, circondandoli con un velo liquido e mantenendoli in soluzione;



- con sostanze solide o aderendo alle loro superfici o insinuandosi per capillarità (es. in particelle di suolo o tra cellule vegetali);

- con altre molecole di acqua, legandosi fortemente le une alle altre mediante *forze di coesione*.



Quest'ultimo è l'aspetto che la differenzia da altri composti dell'idrogeno con peso molecolare simile, distinguendosi da essi per il punto di ebollizione, ma soprattutto per il punto di vaporizzazione nettamente più elevati (questo significa che per separare le molecole d'acqua occorre molta più energia rispetto agli altri composti).

- acqua	H ₂ O	p.m. 18	
	punto di ebollizione		100 °C
	calore latente di vaporizzazione		586 cal g ⁻¹ di acqua (2,45 MJ kg ⁻¹)
- ammoniaca	NH ₃	p.m. 17	
	punto di ebollizione		-33 °C
	calore latente di vaporizzazione		324 cal g ⁻¹ di acqua (1,36 MJ kg ⁻¹)
- idrogeno solforato	H ₂ S	p.m. 34	
	punto di ebollizione		-62 °C
	calore latente di vaporizzazione		132 cal g ⁻¹ di acqua (0,55 MJ kg ⁻¹)

Il calore latente di vaporizzazione così elevato fa in modo che per passare dallo stato liquido a quello di vapore, l'acqua assorbe una notevole quantità di energia, determinando un abbassamento della temperatura (ad esempio intorno alle foglie durante la traspirazione).

Un'altra caratteristica dell'acqua è quella di avere un elevato calore specifico (occorre 1 cal. per far passare 1 g di acqua da 14,5 a 15,5 °C): quindi una notevole capacità di assorbire calore facendo rilevare piccoli aumenti di temperatura. Questo fa sì che quando si verificano considerevoli aumenti di temperatura nell'atmosfera, all'interno della pianta gli incrementi di temperatura sono più ridotti.

La capacità delle molecole d'acqua di *coaderire* le une alle altre e di aderire ad altre sostanze spiega la sua elevata capillarità e la capacità di infiltrarsi nei minuscoli pori delle pareti cellulari

o negli interstizi presenti tra le cellule muovendosi per differenza di potenziale. Questo è il modo con cui l'acqua passa dal terreno all'interno della pianta (imbibizione).

Le radici sono ricoperte di numerosi microscopici peli radicali, sottili estroflessioni delle cellule dell'epidermide. L'acqua penetra nei peli radicali attraverso il meccanismo appena descritto definito imbibizione.

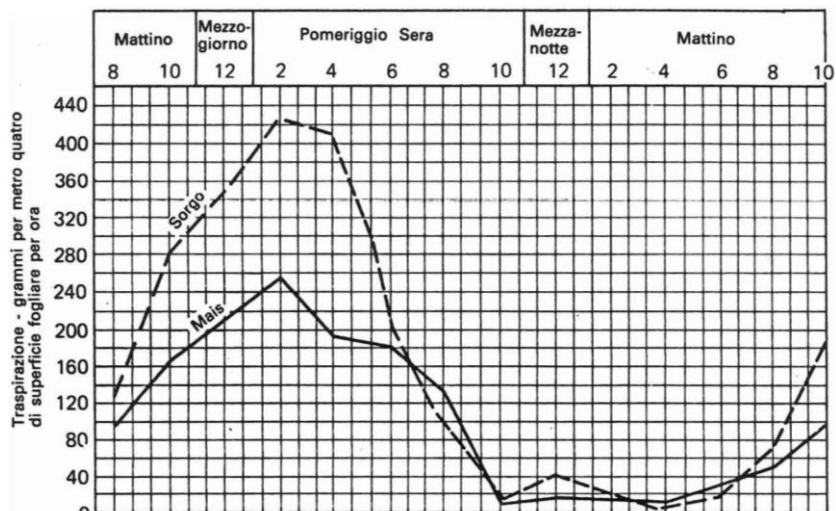
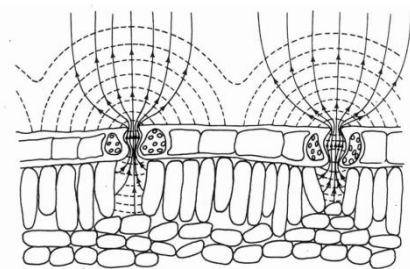
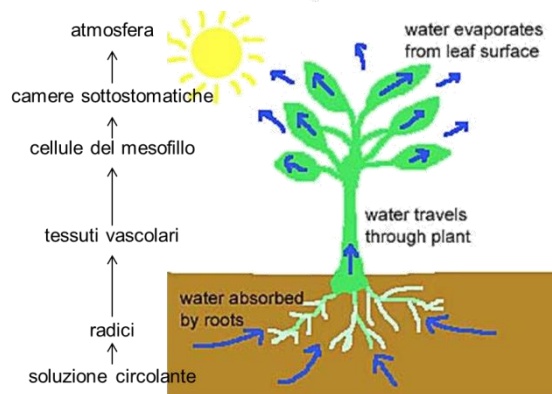
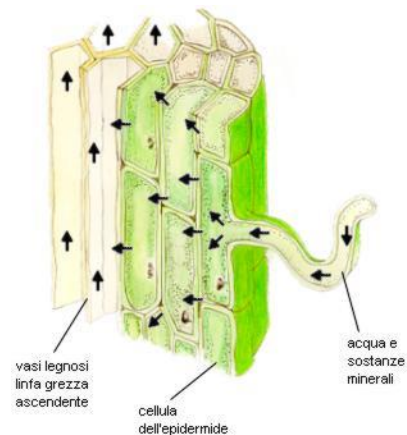
La linfa grezza dal pelo radicale attraversa, per gradiente osmotico, le cellule dell'epidermide e quelle della corteccia fino a raggiungere i vasi legnosi.

Attraverso lo xilema, la linfa sale in alto lungo il fusto fino alle foglie. Questo flusso di acqua verso l'alto è chiamato *corrente di traspirazione*. Condizione essenziale è che la colonna d'acqua all'interno dei vasi non si interrompa. Questa capacità è conferita all'acqua dalla sua forza di coesione, nonostante le tensioni e la forza di gravità cui è sottoposta all'interno dei vasi.

L'acqua, attraverso una fitta rete di fasci vascolari collegati ai vasi legnosi, si insinua tra le cellule del mesofillo delle foglie e da qui, grazie alle sue proprietà di adesione e capillarità, giunge alle camere sottostomatiche e da queste evapora, attraverso le aperture stomatiche, nell'atmosfera.

La differenza di potenziale nel continuum suolo-pianta-atmosfera è, quindi, la forza che guida il trasporto dell'acqua attraverso la pianta: il flusso seguirà la direzione dal suolo ($\psi_{\text{suolo}} = -0,01 \div -0,15 \text{ MPa}$) verso l'atmosfera ($\psi_{\text{atm}} = -50 \div -100 \text{ MPa}$), passando attraverso la pianta.

La velocità di traspirazione da una foglia presenta in genere un ciclo giornaliero. In una tipica giornata estiva, vi è un rapido aumento di traspirazione durante le ore del mattino ed un massimo è raggiunto nel primo pomeriggio. Successivamente segue una progressiva diminuzione fino a ridursi a valori molto bassi o nulli durante la notte.



Quando l'acqua traspirata dalle foglie supera quella assorbita dalle radici (bilancio idrico negativo) si verificano fenomeni di *deficit idrico*.

Deficit idrici moderati sono inevitabili durante il giorno.

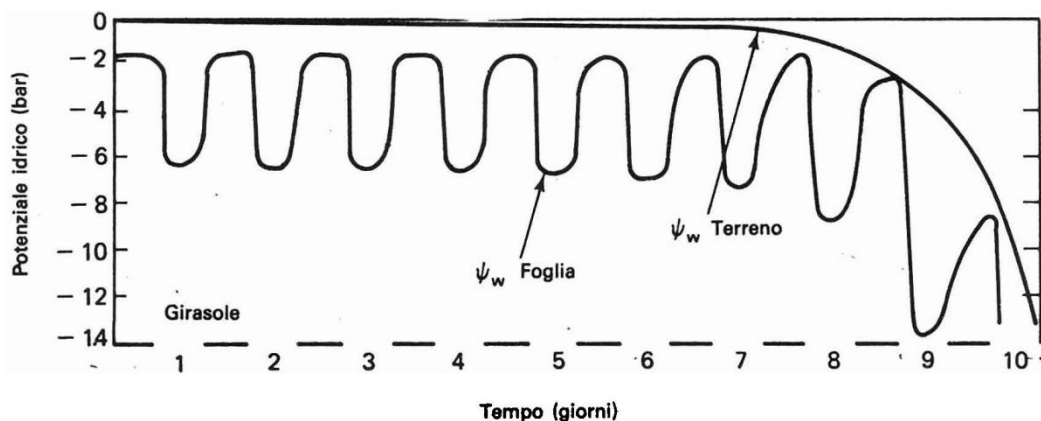
Da una parte perché il contenuto idrico del suolo può essere moderato. Dall'altra parte, anche se il terreno è ben rifornito di acqua, nelle ore più calde della giornata, la pianta non riesce a soddisfare la richiesta dell'atmosfera.

In queste condizioni non estreme, la pianta ristabilisce l'equilibrio idrico durante la notte rimettendo il suo potenziale idrico in equilibrio con quello del terreno.

Le variazioni prima descritte hanno, quindi, un andamento del potenziale idrico della pianta fluttuante giornalmente con un minimo a fine giornata e un massimo all'alba.

Quando, però, impoverendosi di acqua, giorno dopo giorno, il potenziale idrico del terreno scende sotto una certa soglia, il vegetale ha sempre più difficoltà ad estrarre acqua dal suolo. Nel momento in cui iniziano a verificarsi alterazioni metaboliche determinate dalla deficienza d'acqua, si parla di *stress idrico*.

Oltre un certo limite, la pianta non è più in grado di abbassare il proprio potenziale idrico al di sotto di quello del suolo. Questo punto critico (in cui la pianta cessa ogni assorbimento) corrisponde al *punto di appassimento permanente* ($\psi = -15$ bar).



Rappresentazione schematica dei cambiamenti di potenziale idrico della foglia (ψ_w foglia) e del terreno (ψ_w terreno) in una pianta di girasole cresciuta inizialmente in un terreno umido (ψ_w terreno = 0). Il ψ_w della foglia durante il giorno si riduce a seguito della traspirazione, di notte ristabilisce l'equilibrio col ψ_w del terreno. Quando quest'ultimo diminuisce, al ridursi del contenuto idrico del terreno, la pianta è costretta ad abbassare ulteriormente il proprio ψ_w per poter sottrarre acqua al terreno, fino ad arrivare alla linea tratteggiata ($\psi_w = -14$ bar) punto in cui è prossima ad appassire in quanto non riesce più ad estrarre acqua.

Vediamo ora quali sono le funzioni svolte dall'acqua nei vegetali durante questo percorso.

- È *reagente nella sintesi fotosintetica e in tutti i processi idrolitici*. L'acqua è il reagente in molte reazioni metaboliche che avvengono nella pianta di cui regola e presiede i più importanti fenomeni vitali. Nella fotosintesi l'atomo di idrogeno della molecola d'acqua è incorporato nei composti organici mentre gli atomi di ossigeno vengono liberati nell'atmosfera.

- *Regola la moltiplicazione e l'espansione cellulare*. L'acqua impartisce turgore alle cellule che crescono e quindi, oltre a far assumere loro una determinata, forma e dimensione ne permette la moltiplicazione. Inturgidendo le cellule, determina la consistenza, l'aspetto e le dimensioni proprie della pianta. In queste condizioni fornisce sostegno meccanico ai tessuti non lignificati.

- È *solvente delle sostanze nutritive del terreno permettendone l'assorbimento*. Come già detto in precedenza, l'acqua è dotata di un elevato potere solvente. Grazie alla sua natura bipolare, forma un velo liquido intorno a cationi e anioni mantenendoli in soluzione. Per questo motivo nel terreno è considerata un fondamentale agente di apprestamento in quanto la soluzione

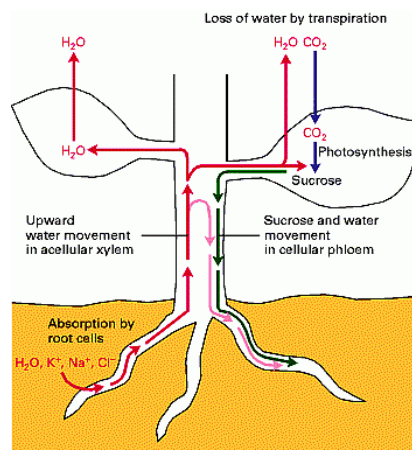
circolante veicola e mette a disposizione gli elementi minerali permettendone l'assorbimento da parte delle radici nella forma utilizzata dalle piante.

- È veicolo degli elementi nutritivi e dei prodotti metabolici sintetizzati all'interno delle piante. Una volta penetrata all'interno della pianta consente il trasporto degli elementi minerali attraverso i vasi xilematici fino alle foglie e, da queste ultime, veicola i prodotti elaborati dalla pianta fino agli organi di riserva.

- Azione termoregolatrice. Una volta avvenuti tutti i suddetti passaggi, la maggior parte dell'acqua assorbita dalla pianta viene traspirata nell'atmosfera, svolgendo un'ultima fondamentale funzione: quella

termoregolatrice, in quanto il passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore assorbe energia determinando un abbassamento della temperatura dell'atmosfera intorno alle foglie. Se non fosse per l'effetto di raffreddamento determinato dalla traspirazione, le foglie fortemente riscaldate correrebbero il rischio di danneggiamento dei loro tessuti arrivando fino alla morte per eccesso di calore

Ma quanta acqua contiene la pianta? Il contenuto idrico all'interno dei tessuti varia moltissimo: esso può superare il 90% negli organi in piena attività vegetativa e scendere sotto il 10% nei semi o nelle gemme dormienti. L'acqua che entra nella costituzione della pianta e viene fissata nella sostanza organica, chiamata acqua costituzionale, è solo una piccolissima parte dell'acqua assorbita dall'apparato radicale (circa 1 – 1,5%): il 99% di questa viene eliminata nell'atmosfera sotto forma di vapore durante il processo di traspirazione.



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).

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, quindi, molto utile al fine di stimare la quantità di acqua da restituire alle piante di interesse agrario con l'irrigazione. Questa stima risulta, però, alquanto complessa considerando il concetto di ET così come sopra espresso, in quanto esso risulta soggetto ad una estrema variabilità dovuta ai seguenti fattori:

- Vegetazionali

- ✓ **Specie e varietà:** specie varietà diverse, a parità di condizioni, consumano quantitativi di acqua differenti;
- ✓ **Stadio di sviluppo della coltura:** una coltura nella fase di massimo sviluppo consuma molta più acqua rispetto alla stessa coltura allo stadio di giovane plantula;
- ✓ **Investimento unitario (n. di piante m⁻²):** 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:*

- ✓ Il livello di evapotraspirazione di una coltura varia al variare dell'intensità di *radiazione*, e quindi della *temperatura* dell'aria; del tenore di *umidità relativa* e della *ventosità*.

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 (ET_0).

Evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET_0)

ET_0 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.

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

- La *Festuca arundinacea* è stata convenzionalmente scelta come coltura 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.

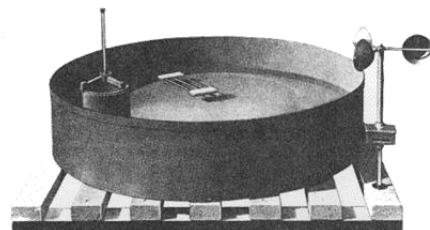
È evidente che l'unica fonte di variabilità rimangono i fattori climatici, per cui si può affermare che ET_0 è una misura del potere evaporante dell'atmosfera: essa può essere immaginata come la "domanda" evapotraspirativa dell'ambiente imposta, in un dato momento o periodo, dalle condizioni meteorologiche (radiazione, temperatura, vento e umidità relativa), ad un prato di *Festuca arundinacea*.

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 semplici metodi di stima di ET_0 .

Stima di ET_0

- Vasca evaporimetrica

Un metodo più 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 (circolare, 1,21m in diametro, profondo 0,255m, in acciaio inossidabile, col fondo sopraelevato di 0,15m dal suolo), mostrato in figura.



L'evaporimetro fornisce la misura dell'evaporazione (E_v) attraverso la quale è possibile ottenere anche una stima dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 attraverso degli

appropriati coefficienti di correzione (K_p) il cui valore, in ambiente mediterraneo, oscilla tra 0,75 e 0,80.

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

$E_v = \text{mm di acqua evaporata dalla vasca}$

$K_p = \text{coefficiente di correzione.}$

- Il metodo di Turc

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 delle espressioni matematiche in grado di stimare ET_0 partendo dalla misurazione di uno o più elementi del clima. Uno dei modelli più noti è quello di Turc, nella cui formula sono presi in considerazione i valori della temperatura media e quelli della radiazione globale:

$$ET_0 \text{ (mm mese}^{-1}\text{)} = \frac{0.40 \times t_{med}}{(T_{med} + 15)} \times (Rg + 50) \quad \text{in cui:}$$

$T_{med} = \text{temperatura media del mese considerato}$

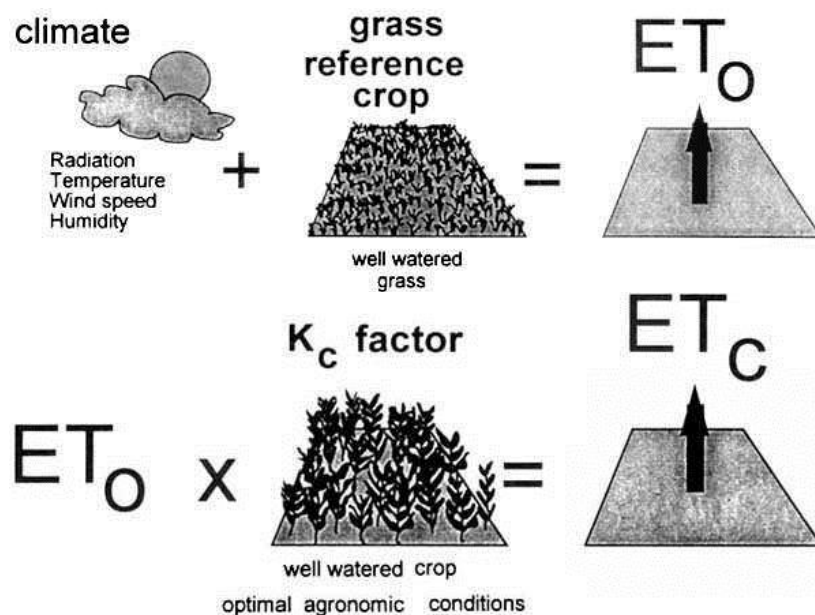
$Rg = \text{Radiazione globale espressa in calorie cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$

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.

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

$ET_c = \text{Evapotraspirazione potenziale di una data coltura ad un determinato stadio vegetativo.}$

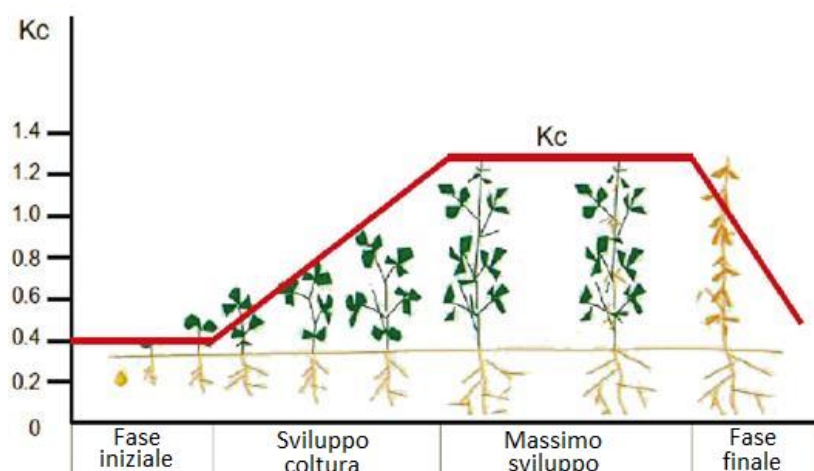


ET_c, così come affermato per ET₀, può essere considerata come la “domanda” evapotraspirativa dell’ambiente imposta- in un dato momento o periodo, e, stavolta, durante una determinata fase del ciclo biologico- dalle condizioni meteorologiche (radiazione, temperatura, vento e umidità relativa), ad una 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 presso alcuni Istituti di Ricerca 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 > ET₀).
- ✓ *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.



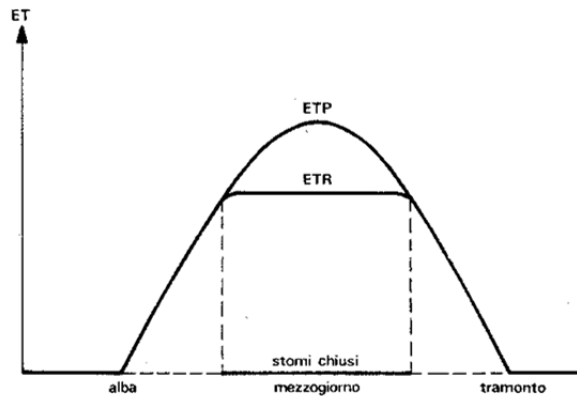
Fasi di sviluppo della coltura					
COLTURE	Iniziale	Crescita	Metà stagione	Raccolta	Intero periodo di crescita
Fagiolo verde	0.35	0.70	1.00	0.90	0.87
Fagiolo secco	0.35	0.75	1.10	0.27	0.75
Cavolfiore	0.45	0.75	1.00	0.90	0.75
Cotone	0.45	0.75	1.15	0.67	0.85
Mais (granello)	0.40	0.77	1.12	0.57	0.82
Pisello (verde)	0.45	0.77	1.12	0.98	0.87
Peperone	0.35	0.67	0.98	0.85	0.75
Patata	0.45	0.75	1.12	0.77	0.82
Cartamo	0.35	0.75	1.12	0.22	0.67
Sorgo	0.35	0.72	1.08	0.52	0.80
Soia	0.35	0.75	1.07	0.45	0.82
Barbabietola	0.45	0.80	1.12	0.65	0.85
Girasole	0.35	0.75	1.12	0.40	0.80
Tabacco	0.35	0.75	1.10	0.80	0.90
Pomodoro	0.45	0.75	1.15	0.62	0.82
Anguria	0.45	0.75	1.00	0.70	0.80
Erba medica	0.35	–	–	1.12	0.95

Coefficienti colturali (K_c) di alcune colture erbacee. Fonte: J. Doorenbos e A.H. Kassam.

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_r). ET_r 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_r , dall'altra limitano gli scambi di CO_2 tra atmosfera e apparato assimilatore: ciò evidentemente è negativo ai fini della fotosintesi e dell'assimilazione.



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

Per trarre il miglior profitto dall'acqua è opportuno, quindi, fare in modo a che ET_r 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_r e/o di ridurre ET_c .

Incrementare ET_r significa aumentare la disponibilità idrica per la coltura:

- ✓ intervenendo con l'irrigazione;
- ✓ favorendo la capacità di immagazzinamento 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.