

Una breve spiegazione della risalita dell'acqua negli alberi

Nelle piante superiori si sono sviluppati particolari tessuti di conduzione: strutture attraverso le quali l'acqua raggiunge le foglie dove sono sintetizzate le sostanze organiche e le distribuisce a tutte le parti della pianta. Anche nelle piante non vascolari il trasporto avviene nei due sensi, ma i tessuti di conduzione sono meno differenziati. Negli alberi ad alto fusto, come ad esempio le sequoie, l'acqua deve percorrere distanze che possono raggiungere anche diverse decine di metri (50 m per le sequoie in Europa; anche oltre 100 m in quelle americane).



albero di sequoia gigante

Nelle piante non sono presenti strutture che spingono l'acqua fino alle foglie dei rami più alti ma processi chimico fisici diversi agiscono sinergicamente per la risalita dell'acqua e comunque ricollegabili alle sue caratteristiche polari. Come vedremo, è grazie alle caratteristiche polari delle molecole d'acqua che è possibile il trasporto delle sostanze dalle foglie alle radici e dalle radici alle foglie.

- **osmosi:** l'acqua del terreno passa per osmosi all'interno dei peli radicali attraverso la membrana costituita dalle cellule epidermiche. I peli radicali, assumendo dal terreno soluzioni di ioni inorganici e di piccole molecole di sali minerali, permettono l'instaurarsi di un gradiente di concentrazione tra l'esterno (soluzioni poco concentrate nel terreno) e l'interno della pianta (soluzioni molto concentrate nelle cellule). Si genera così la cosiddetta "pressione radicale" che può essere sufficiente a spingere l'acqua fino ad altezze maggiori di quanto permetta la capillarità, ma che non è certo in grado di farle raggiungere le sommità di grossi alberi o dei lunghi steli delle piante rampicanti. Infatti, la pressione richiesta in questi casi è notevolmente più elevata di quella sviluppata per osmosi, e nemmeno l'aspirazione può dare ragione del fenomeno: anche se in qualche modo si potesse produrre il vuoto spinto all'interno dell'albero, una colonna d'acqua non potrebbe superare i 10 metri circa.
- **capillarità:** se si considerano i minuscoli diametri dei vasi xilematici in cui scorrono acqua e sali minerali, è chiaro che la risalita capillare, unitamente alla pressione radicale, può svolgere un ruolo importante potenziando l'ascesa della linfa. In particolare, le caratteristiche polari delle molecole di cellulosa, costituente principale delle pareti cellulari delle piante, rendono questa sostanza altamente idrofila e in grado, quindi, di instaurare forze di adesione particolarmente intense con le molecole d'acqua.

Tuttavia, anche prendendo in considerazione la capillarità e la pressione radicale non si riesce a spiegare la risalita delle molecole d'acqua fino a quote considerevoli. Però, si può trovare un nuovo elemento di aiuto alla comprensione del fenomeno in questione se si considera che più del 90 per cento dell'acqua assorbita da una pianta viene persa per traspirazione, eliminata attraverso le foglie. Ora, in questo processo che sembrerebbe uno spreco di energia e di acqua, vi è un diretto collegamento con la risalita della linfa grezza, in quanto, perdendo acqua per traspirazione dalle foglie, si genera nei tubicini rigidi dello xilema la necessaria depressione che appunto aspira linfa grezza verso l'alto.

- **pressione negativa:** la depressione esercitata per evaporazione ovviamente dipende dalla natura e dimensione della chioma, dall'intensità del calore solare e della traspirazione;

eliminando gli attriti, si calcola che rimane una depressione di circa 15 atmosfere, tale da consentire la risalita della linfa grezza fino agli oltre 100 metri delle sequoie. Dal punto di vista energetico, l'energia necessaria per la risalita della linfa è fornita dal sole, che scaldando le foglie porta l'acqua dallo stato di liquido a quello di vapore permettendo così la traspirazione.

Pressione radicale, capillarità e traspirazione cooperano sinergicamente alla salita dell'acqua fino alle foglie: le prime due spingono dal basso, la traspirazione tira dall'alto. Dalle radici che forniscono costantemente nuova soluzione salina fino ai germogli apicali, la pianta è quindi percorsa da un flusso continuo di acqua che, attraverso la traspirazione, si disperde nell'ambiente. Questo fenomeno ha delle dimensioni sorprendenti ma che permettono di dare ragione della risalita della linfa: un modesto albero di betulla traspira più di trecento litri d'acqua al giorno, molta più di quella che evaporerebbe dal suolo nudo; così anche una semplice pianta di grano, che pesa meno di mezzo chilo al momento del raccolto, ha assunto, trasportato e liberato nell'atmosfera quasi due quintali di acqua durante la sua vita.

L'acqua evapora continuamente dalla superficie delle foglie esposte all'aria attraverso particolari aperture: gli stomi. Questo fenomeno, chiamato traspirazione, viene regolato dalla maggiore o minore apertura degli stomi stessi: se sono aperti l'acqua lascia la foglia in forma di vapore; se sono chiusi, l'acqua rimane trattenuta al suo interno e si evitano perdite eccessive di liquido. A causa dell'elevatissima coesione interna, l'evaporazione delle molecole d'acqua dalla foglia realizza, con la traspirazione, una situazione di squilibrio e di "tensione" che si traduce in una forza diretta verso l'alto che aspira l'acqua nella parte alta del sistema vascolare, vincendo la forza di gravità. Così il flusso d'acqua, trascinato dalle molecole che stanno evaporando, scorre senza frammentarsi dalla base dell'albero alla chioma.

L'acqua resiste a questa tensione come un elastico teso che si deforma ma non si rompe a causa della fitta rete di legami idrogeno che la mantiene coesa. Il mantenimento di una colonna continua di liquido è fondamentale per la sopravvivenza della pianta: un'interruzione dovuta, per esempio, alla presenza di bolle che ostruissero il passaggio, provocherebbe la separazione in due spezzoni della colonna stessa con la parte inferiore che non potrebbe più essere richiamata verso la chioma. La struttura altamente interconnessa dei vasi xilematici (garantisce la possibilità di trovare percorsi alternativi in caso di interruzione), il piccolo diametro dei tubicini che li compongono ed una sostanziale impermeabilità delle pareti dei tubicini che non lascia disperdere l'acqua nei tessuti vegetali, impediscono perdite di acqua e di pressione lungo il percorso, costituendo le raffinate difese che le piante hanno sviluppato evolutivamente per impedire la formazione di tali bolle ed i loro effetti.

The drinking bird

L'efficacia della forza motrice prodotta dall'evaporazione dalle foglie, può essere compresa prendendo ad esempio un grazioso giocattolo scientifico: *the drinking bird*, che mostra "visivamente" la conversione di energia termica in energia meccanica.

Il picchio bevitore è formato da due ampole di vetro separate che costituiscono la testa (sfera piccola) e la parte inferiore (corpo) del picchio. La testa è collegata al corpo da un tubetto di vetro che però termina nell'ampolla inferiore sotto il livello di un liquido colorato ad elevata tensione di vapore (basso punto di ebollizione). Poiché nelle due sfere è fatto il vuoto, il liquido è in equilibrio con il suo



vapore.

Il becco del picchio, oltre ad assolvere una funzione decorativa, è costituito da materiale assorbente che quando è bagnato con acqua si raffredda durante la sua successiva evaporazione. L'evaporazione fornisce la differenza di temperatura fra la testa e la coda necessaria per fare funzionare questo giocattolo che è in sostanza un **motore termico** che utilizza una differenza di temperatura per convertire energia termica in energia cinetica e sviluppare un lavoro meccanico.

Il ciclo termodinamico di questo giocattolo nel suo stato iniziale è il picchio con la testa bagnata animato da una piccola oscillazione rotatoria attorno al sostegno al quale è imperniato.

Dopo che un bicchiere d'acqua è stato posizionato in modo che il becco si bagni, si rilascia il picchio che prende ad oscillare. Intanto, via via che l'acqua evapora dalla testa, questa si raffredda rispetto alla temperatura del corpo e il liquido colorato, attraverso il tubicino interno, risale spostando gradualmente il centro di gravità in modo da far inclinare il picchio in avanti, finché il becco s'immerge nuovamente nel bicchiere pieno d'acqua (così, il capo bagnato si mantiene a temperatura inferiore a quella del corpo). A questo punto il baricentro si sposta nuovamente verso la parte inferiore, il picchio si rialza ed il ciclo riprende...

Quanto esposto riassume il funzionamento del picchio che, può essere meglio compreso seguendo le fasi che regolano il suo ciclo termodinamico:

1. l'acqua raccolta da un materiale assorbente che copre la testa evapora (distribuzione di Maxwell-Boltzmann);
2. l'evaporazione abbassa la temperatura della testa costituita da un'ampolla di vetro (calore di vaporizzazione);
3. l'abbassamento di temperatura comporta che una parte del vapore del liquido contenuto nella testa condensa;
4. la condensazione del vapore produce una riduzione della pressione nella testa di vetro (legge dei gas ideali);
5. la differenza di pressione fra la testa e la base fa sì che il liquido contenuto nella base sia spinto verso l'alto;
6. appena il liquido fluisce nella testa, questa diventa sufficientemente pesante da spostare il baricentro; le oscillazioni aumentano e il picchio si ribalta;
7. quando l'uccello è ribaltato, parte del liquido si sposta verso la coda riportando il picchio nella sua posizione verticale.

Ora, facciamo qualche calcolo*: il calore latente di evaporazione dell'acqua (liberato dalla testa bagnata del picchio) è $2.25 \cdot 10^{10}$ erg per grammo: questa è l'energia che viene assorbita dall'ambiente per far evaporare l'acqua sulla testa del picchio. Ora, il rendimento, R , di un **motore termico ideale** è dato dalla relazione:

$$R = (T_2 - T_1)/T_2$$

Dove T_2 è la temperatura dell'ambiente (in Kelvin) e T_1 è la temperatura (inferiore, in Kelvin) della testa del picchio.

Il rendimento di un motore ideale è il massimo teoricamente raggiungibile e quindi, nel caso del nostro giocattolo, il calcolo con la formula sopra riportata fornisce un risultato in eccesso; tuttavia, è utile per ottenere un risultato pratico anche se approssimato. Supponiamo che la temperatura ambiente sia 27°C e la differenza di temperatura fra la testa del picchio e l'ambiente sia 3°C , allora in Kelvin si ha $T_2 = 300\text{K}$ e $T_2 - T_1 = 3\text{K}$; con ciò si ha un rendimento pari a 0.01: il nostro giocattolo è un motore termico con un rendimento approssimativamente del 1%

Abbiamo ricordato che per evaporare 1g di acqua occorrono $2.25 \cdot 10^{10}$ erg, il nostro giocattolo - essendo un motore termico - potrà eventualmente anche essere collegato ad un meccanismo in grado di utilizzare questa energia, ottenuta dal flusso di calore dall'ambiente alla testa del picchio, con un rendimento del 1% , ovverosia disporrà di $2.25 \cdot 10^8$ erg.

Ora, per sollevare 1g di acqua di 1 cm, occorre fare un lavoro contro la forza di gravità paria a $L = 1g \times 981\text{cm/s}^2 = 1000$ erg circa. Siccome abbiamo a disposizione $2.25 \cdot 10^8$ erg, possiamo sollevare 1 g di acqua di $2.25 \cdot 10^5$ cm = 2 km.

Questo risultato è in eccesso in quanto il nostro giocattolo non è un motore termico ideale (sebbene sia a combustione esterna non lavora fra due uniche temperature ed ha vari elementi di attrito); tuttavia, anche riducendo il rendimento di un fattore 10, permette di giustificare ampiamente che l'evaporazione dell'acqua in una pianta è in grado di fornire energia per sollevare la linfa sicuramente all'altezza delle sequoie.

Si noti che il picchio continuerà a bagnare il becco anche senza una sorgente d'acqua, finché il becco è bagnato o comunque esiste una differenza di temperatura fra la testa ed il corpo (questa differenza di temperatura può essere prodotta anche senza il raffreddamento nella testa - per esempio, una sorgente di calore direttamente collegata all'ampolla inferiore creerà la necessaria differenza di temperatura).

*George Gamow - Biografia della Fisica, EST Mondadori 1963

Questionario sulla prima parte

1. Leggi il brano ed evidenzia le parole chiave.
2. Costruisci una mappa concettuale che colleghi queste parole chiave.
3. Quali sono i processi chimico fisici che concorrono alla risalita dell'acqua dalle radici fino alla chioma?
4. Da che cosa è determinata la pressione osmotica?
5. Quali effetti produce?
6. Quale sostanza idrofila instaura forze adesive con le molecole di acqua ?
7. Quali effetti produce questa interazione?
8. Quale caratteristica delle molecole di acqua determina l sia le forze coesive che adesive?
9. Che cosa causa una depressione all'interno della linfa?
10. Quali sono gli effetti della depressione ?

Questionario su. "The drinking bird"

1. Leggi attentamente la seconda parte e rispondi alle seguenti domande.
2. Perché nell'evaporazione dell'acqua c'è un abbassamento di temperatura?
3. Quali sono le grandezze fisiche coinvolte nelle varie fasi termodinamiche? Quali sono le rispettive unità di misura?
4. Con quale scopo l'autore presenta questo esperimento? C'è un collegamento con la lettura precedente?