

ECOLOGIA

Che cos'è l'ecologia? L'ecologia è una disciplina molto vasta. L'ecologia si basa su dati scientifici e sull'applicazione della statistica. Una volta ottenuti questi dati scientifici è possibile costruire modelli matematici. L' **ecologo** è uno scienziato che osserva e cerca di descrivere e spiegare, e ove possibile, prevedere, gestire e controllare i fenomeni. L'ecologia è lo studio delle interazioni tra gli organismi e tra gli organismi e l'ambiente fisico-chimico in cui vivono. Il termine **ECOLOGIA** venne coniato per la prima volta dal naturalista tedesco Heinrich Haeckel (1869): *"l'ecologia è la scienza comprensiva della relazione dell'organismo con l'ambiente"*. Invece, nel 1953 Tansley conia il termine **ECOSISTEMA**.

Nel secolo scorso l'ecologia si occupava di individui e della relazione di questi individui con i fattori abiotici che possono influenzare la loro vita. Questa parte dell'ecologia prende il nome di **autoecologia**. Con il passare del tempo non si è guardato più soltanto l'individuo, ma la popolazione o la comunità che era influenzata o influenzava quell'ambiente, quindi si è cominciato a parlare di **sinecologia**. La SINECOLOGIA studia il modo con cui organismi costituiscono, popolazioni e comunità, come queste si modificano nel tempo e come interagiscono con la parte abiotica dell'ambiente. Nel XX secolo si osserva la nascita di un'altra disciplina ecologica: l'**ecologia applicata**. L'attenzione si sposta da problematiche locali a problemi planetari o globali.

Che cos'è l'ambiente? L'ambiente è definito come una porzione di spazio che ha le caratteristiche tali per poter contenere vita. In generale la Terra nella sua totalità può essere considerata ambiente dal momento che anche nei deserti (deserto=mancanza di acqua) e sulle calotte polari vivono batteri, crioplancton, licheni ecc. Anche negli abissi marini è possibile la vita, dal momento che sono presenti organismi particolarmente adattati. Un ambiente può essere naturale o artificiale.

Ambienti naturali → sostenuti esclusivamente dall'energia solare.

Ambienti artificiali → sostenuti generalmente dall'energia sussidiaria.

I livelli di organizzazione della vita e dell'ambiente

Parlando di livelli gerarchici e di scale temporali e spaziali, possiamo partire dall'atomo, le molecole complesse, le cellule, i tessuti, gli apparati e gli organi, fino ad arrivare agli organismi via via più complessi. Una **popolazione** è un insieme di organismi appartenenti alla stessa specie, in grado di riprodursi tra loro, che vivono in una determinata area.

Una **comunità** è un insieme di popolazioni diverse che vivono in una certa area. Nella comunità le popolazioni interagiscono tra loro e con l'ambiente fisico.

L'**ecosistema** è l'insieme di tutte le comunità che interagiscono tra loro e con l'ambiente abiotico (non vivente) scambiando con esso flussi di materia e di energia. L'ecosistema quindi è un sistema biologico aperto, con una componente biotica e una abiotica che cambia nello spazio e nel tempo, e il suo funzionamento dipende dal ciclo della materia e dal flusso di energia. Es. la pianta viene mangiata dall'erbivoro, l'erbivoro dal carnivoro e così via. La stessa molecola che era presente nel vegetale di partenza, con la morte degli organismi viene liberata di nuovo nell'ambiente e può essere riutilizzata (riciclo della materia). Un fotone di energia viene trasformato e non ritorna ad essere fotone per essere riutilizzato dalla pianta (flusso unidirezionale di energia). L'ecosistema essendo un sistema aperto è caratterizzato da un input e un output. L'input e l'output sono dati da animali, piante, semi, materia organica, materia inorganica, cioè c'è una continua entrata ed uscita di energia e materia. Gli ecosistemi possono essere naturali o artificiali. Esempi di ecosistemi artificiali sono i campi coltivati, gli stagni agricoli e i serbatoi sbarrati da una diga.

Un ecosistema è sia l'oceano, con le sue caratteristiche e le sue risposte più o meno stabili, sia una pozzanghera con una vita spazialmente limitata e relativamente breve. Ecosistema è tutta la foresta, ma è anche un albero caduto e tutte le comunità sotto o sopra quell'albero.

Gli ecosistemi si distinguono in naturali ed artificiali. Gli ecosistemi naturali sono in grado di autosostenersi partendo da una fonte primaria di energia, cioè l'energia solare. Gli ecosistemi artificiali dipendono sempre dall'energia solare, ma non solo. Infatti non sono in grado di autosostenersi ma hanno bisogno di energia sussidiaria.

La Gaia ipotesi

Nel 1979 Lovelock formulò la **Gaia ipotesi** dove "Gaia" sta per Terra. Uno dei fondamenti dell'ecologia è che l'organismo per vivere nell'ambiente si deve adattare. C'è un'interazione tra le componenti biotiche e abiotiche dell'ambiente e gli organismi stessi. Al contempo l'organismo è in grado di modificare l'ambiente in cui vive. In passato si pensava che soltanto l'ambiente esercitasse una pressione sull'organismo, mentre oggi si sa che non è così, si è capito che c'è una corrispondenza reciproca. Questo è un concetto insito nell'ipotesi Gaia di James Lovelock dove la Terra è considerata un **super ecosistema**. La Gaia ipotesi mostra che l'ambiente abiotico (fattori fisici) controlla l'attività degli organismi e gli organismi controllano l'ambiente abiotico in numerosi modi. È importante che in un organismo ci sia una certa percentuale di capacità con cui l'organismo stesso può adattarsi alle condizioni mutevoli dell'ambiente. È importante che ci sia una certa tolleranza. Gli esseri viventi, infatti, sono in grado di tollerare un certo range di condizioni. Più che di organismi adattati molti ecologi parlano di organismi **abattati** all'ambiente. Si parla di **abattamento** perché un organismo prima di noi si è dovuto adattare a condizioni ambientali che possono essere favorevoli o sfavorevoli e ha selezionato i fattori vincenti che poi ha trasmesso alla progenie che si ritrova già in condizioni favorevoli. La progenie ha beneficiato di questo adattamento e perciò si dice che è abattata. Per capire bene questo concetto dobbiamo far riferimento alla teoria di Darwin secondo cui:

- Gli individui pur appartenendo alla stessa specie non sono tutti uguali. Non essendo tutti uguali variano anche le loro risposte ai fattori ecologici.
- Una parte di variazione presente in ciascun individuo è ereditaria. I caratteri che vengono trasmessi alla progenie ovviamente sono i caratteri vincenti.
- Alcuni individui producono più progenie di altri. Chi produce più progenie ovviamente è quello che ha ereditato il carattere vincente.
- Un individuo riesce a sopravvivere, a riprodursi e lascia discendenti solo in alcuni ambienti, ma non in altri. Questo dipende dalla capacità di adattamento.

Un esempio di adattamento è quello della farfalla biston betularia che può esistere in due forme nera o bianca, è completamente casuale il fatto che alcuni individui possano essere di colore bianco, non diventa più casuale se l'ambiente cambia: prima della rivoluzione industriale i tronchi degli alberi in gran parte dell'Inghilterra erano ricoperti da uno strato di licheni di colore grigio chiaro. Molte specie di insetti, tra cui le falene, vivevano sui licheni ben mimetizzate alla vista dei predatori. Quindi la forma bianca era avvantaggiata. In seguito all'industrializzazione molti dei licheni scomparvero per inquinamento ambientale ed alberi e rocce annerirono a causa dei fumi inquinanti. Così, la percentuale di individui scuri di falena cominciò ad aumentare progressivamente. Ecco perché attualmente abbiamo sia farfalle bianche che nere perché dipende dall'ambiente.

I fattori ecologici

I fattori ecologici sono delle variabili perché cambiano nel tempo e nello spazio. Per fattori ecologici si intendono tutti quei fattori chimici, fisici e biologici che possono influenzare la vita di un organismo vivente almeno in una fase del suo ciclo vitale. Non tutti gli organismi sono ugualmente sensibili ai fattori ecologici. Gli organismi possono cambiare le loro esigenze durante il ciclo vitale e in tal caso cambia il tipo di fattore ecologico che permette (o limita) la sopravvivenza e l'accrescimento. La presenza, la distribuzione e l'abbondanza di un organismo, di una popolazione, o di una comunità dipendono dai fattori ecologici. I fattori vengono distinti in **fattori abiotici** e **fattori biotici**. I fattori abiotici sono fattori non viventi ma che condizionano la vita e sono:

- clima;
- caratteristiche del suolo;
- caratteristiche chimico fisiche delle acque;
- luce;
- temperatura.

I fattori biotici sono tutte le interazioni tra gli organismi che si trovano nello stesso ambiente (commensalismo, mutualismo, parassitismo).

L'insieme dei fattori biotici e abiotici rende ogni ecosistema unico nel suo genere.

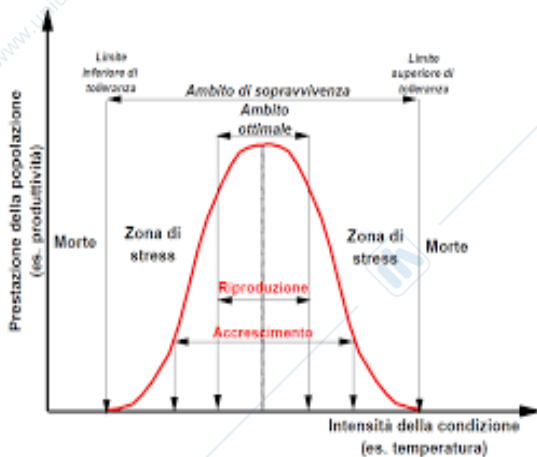
I fattori ecologici abiotici possono essere distinti in:

- **risorse** (es. nutrienti, luce, acqua), fattore ecologico che viene generalmente consumato, cioè ridotto dall'attività dell'organismo.
- **condizioni** (es. temperatura, luce, umidità, pH), fattore chimico o fisico che generalmente va a condizionare i processi (es. metabolismo, riproduzione). Non vengono consumate, ma possono influenzare la velocità con la quale viene consumata una risorsa da parte di un organismo. Ad esempio se io ho la febbre a 40° non avrò lo stesso appetito che ho quando sto bene, quindi la temperatura va a condizionare la velocità con cui consumo la risorsa che in questo caso è il cibo. Ci sono fattori ecologici che possono essere sia risorse che condizioni. Es. I fotoni di luce quando vengono utilizzati dalla pianta per la fotosintesi rappresentano una risorsa. Ma la luce può anche essere una condizione quando si considera il fotoperiodo, che condiziona la fioritura, i periodi riproduttivi, le mute, il nostro ritmo circadiano. L'acqua è risorsa perché viene consumata, ma al contempo è anche una condizione perché condiziona diversi processi come la respirazione, la traspirazione (per le piante) e la sudorazione (per l'uomo).

Ambito di tolleranza e ambito ottimale

Ogni organismo possiede nei confronti dei fattori ecologici un **ambito di tolleranza**. Per ogni fattore ecologico esiste un intervallo di valori che permette la sopravvivenza dell'organismo. Ogni individuo ha il suo ambito di tolleranza per un fattore ecologico che si rappresenta con una curva a campana con un limite minimo e un limite massimo di tolleranza. Tutto lo spazio al di sotto della curva si chiama **ambito di tolleranza**. Al di fuori dell'ambito la specie non esiste.

Quando il fattore ecologico assume valori al di fuori dell'ambito di tolleranza o ai suoi limiti, esso limita la sopravvivenza di quell'organismo e viene definito fattore limitante. Nell'ambito di tolleranza l'organismo sopravvive, si accresce e si riproduce, ma la velocità e l'efficienza con cui un organismo svolge le sue funzioni vitali non è la stessa per tutti i valori del fattore all'interno dell'ambito di tolleranza. Man mano che ci si allontana dal limite minimo e massimo dell'ambito di tolleranza le condizioni saranno via via migliori fino ad arrivare ad un unico valore che si trova all'apice della curva di tolleranza che è l'optimum dove la prestazione (capacità di vivere) della specie è



massima. Vicino ai limiti dell'ambito di tolleranza l'organismo è in uno stato di stress, quindi tutta la sua energia è impiegata per riuscire a sopravvivere in condizioni non ottimali, quindi non riesce a riprodursi. Man mano che ci si allontana dalla zona di stress e ci si avvicina all'optimum più energia può essere utilizzata per accumulare biomassa, cioè per l'accrescimento. Intorno al valore ottimale una parte dell'energia viene utilizzata per la riproduzione, cioè per trasferire alle generazioni successive il patrimonio genetico. L'optimum ecologico è un punto o un piccolo

range di valori ottimali in cui è massima la fitness, cioè la capacità di trasferire il proprio patrimonio genetico. L'ambito di tolleranza di una specie in condizioni sperimentali è diverso rispetto a quello in natura perché in condizioni sperimentali si può analizzare cosa succede per uno o per pochi fattori ecologici, mentre in natura ci sono innumerevoli fattori ecologici che agiscono sullo stesso organismo contemporaneamente. L'ambito di tolleranza non è statico, i fattori ecologici cambiano continuamente anche conseguentemente alle loro interazioni reciproche.

L'adattamento al luogo di appartenenza implica una serie di modificazioni che possono essere comportamentali, strutturali o metaboliche. Se l'organismo è adatto all'ambiente deve sfruttare al massimo le condizioni di quell'ambiente perché solo in questo modo riesce a crescere e a riprodursi. Infatti, se l'organismo è adattato o meno lo si capisce dal fatto che riesce a riprodursi.

La valenza ecologica

L'ampiezza dell'ambito di tolleranza per il fattore ecologico è definita valenza ecologica. La valenza ecologica di un organismo è quindi l'intervallo tra i due estremi minimo e massimo dell'ambito di tolleranza. La valenza ecologica si può considerare facendo riferimento ad un unico fattore o facendo riferimento all'insieme di fattori in un determinato ambiente (spazio ecologico). L'interazione di più fattori può limitare l'ampiezza dell'ambito di tolleranza per altri fattori.

La legge della tolleranza (La legge di Shelford e i fattori limitanti)

Il fattore o i fattori ecologici che sono al di fuori dell'ambito di tolleranza sono **fattori limitanti** in quanto limitano la sopravvivenza dell'organismo. La legge di Shelford dice che il successo di un organismo, di un gruppo di organismi o di una comunità è determinato da quel fattore (o gruppo di fattori) che più si avvicina ai limiti di tolleranza. Il fattore limitante non è il fattore presente in quantità minore, ma è il fattore presente in quantità maggiori o minori rispetto al fabbisogno necessario. Un fattore abiotico presente in eccesso o in difetto può limitare lo sviluppo dell'organismo anche se tutti gli altri fattori sono consoni alla vita dell'organismo. Un fattore ecologico può essere limitante quando vengono superati i limiti di tolleranza impedendo la sopravvivenza, l'accrescimento o la riproduzione. A seconda del tipo di ambiente considerato possono esserci fattori limitanti diversi. Ad esempio nell'ambiente terrestre possono essere limitanti nutrienti, acqua, luce, temperatura, mentre in ambiente acquatico l'acqua non può essere sicuramente limitante per la vita, ma può esserlo l'ossigeno perché l'ossigeno è prodotto dalle piante e nelle acque profonde non ci sono piante. Il ruolo che la pianta svolge in ambiente terrestre in acque molto profonde è affidato ad un'altra tipologia di organismi e cioè il fitoplancton. Man mano

che si scende in profondità diminuisce la luce (c'è estinzione della luce), la temperatura si abbassa, i nutrienti scarseggiano. I corollari della legge di Shelford permettono di spiegare le risposte degli organismi ai fattori limitanti:

1. Popolazioni diverse, anche nello stesso ecosistema, possiedono intervalli di tolleranza diversi per ogni fattore.

2. Gli individui possono presentare ambiti di tolleranza di diversa ampiezza per differenti fattori ecologici.

3. Le popolazioni con valori di tolleranza più ampi sono maggiormente adattabili, pertanto tendono ad essere quelle più diffuse e maggiormente resistenti alle variazioni che possono intervenire nei fattori del loro ecosistema. In base al grado di tolleranza definiamo un organismo **steno-** se ha uno stretto grado di tolleranza o organismo **euri-** se presenta un ampio grado di tolleranza.

Stenofago (mangia pochi cibi)

Eurifago (mangia tutto)

Stenoalini (ambito basso di tolleranza per la salinità)

Euroalini (ambito di tolleranza ampio per la salinità). Noi siamo stenoalini, non moriamo se facciamo un bagno nell'acqua salata.

Stenocio (ecotipi) possono vivere solo nel loro habitat

Euricio può vivere in ambienti diversi.

4. Gli organismi, per periodi limitati ma anche per molti anni, riescono a sopravvivere in condizioni peggiori rispetto a quelle tollerate (alcune funzioni vengono ridotte o addirittura sospese, es. con il letargo gli organismi riescono ad adattarsi alle condizioni avverse rallentando le proprie attività metaboliche quando la temperatura o la radiazione solare diventano un fattore limitante).

5. I limiti di tolleranza, anche nello stesso individuo, cambiano a seconda dello stato di salute dell'individuo. Spesso cambiano anche a seconda dell'età dell'individuo (organismi adulti possono avere limiti più ampi rispetto agli stessi organismi più giovani per alcuni fattori o limiti più ristretti per altri fattori), o per gli individui in fase riproduttiva (semi, uova, embrioni, larve e germogli hanno limiti di tolleranza più ristretti, cioè risultano essere più sensibili alle condizioni ambientali).

La legge del minimo di Liebig

La legge del minimo di Liebig dice che in condizioni di equilibrio stazionario le sostanze indispensabili vicine al minimo necessario tendono a diventare limitanti. Se anche un solo nutriente risulta essere limitante, quel nutriente è limitante anche per gli altri (influenza l'assorbimento di tutti gli altri nutrienti). L'organismo cerca di riuscire a sopravvivere anche quando uno dei fattori è vicino ai limiti di tolleranza o diventa limitante. Alcuni molluschi possono sostituire il calcio con lo stronzio nella costruzione delle loro conchiglie in condizioni di carenza di calcio. La legge di Shelford e la legge del minimo sono valide quando il sistema è più o meno stabile, cioè non ci sono cambiamenti improvvisi. Es. Un lago in una situazione normale, con un gradiente di radiazione solare, una concentrazione di O₂, una salinità, e altri parametri costanti, se viene investito da una tempesta e c'è movimento delle acque, cambiano le condizioni di equilibrio e quindi non è più vera la situazione in cui il fattore più forte è quello limitante.

Lo spazio ecologico e la nicchia ecologica

Legato al discorso risorsa, habitat, ambiente c'è il concetto di **spazio ecologico**. Possiamo associare ciascun fattore ecologico ad una dimensione, e quindi paragonare l'ambiente nel quale vive un organismo a uno **spazio multidimensionale**. Questo spazio che ad ogni fattore ecologico associa una dimensione, prende il nome di

spazio ecologico, cioè quello spazio individuato dall'insieme dei fattori che risultano necessari alla sopravvivenza di un sistema biologico. Lo spazio ecologico è quindi differente dall'habitat. L'**habitat** è il luogo dove la specie vive. Gli organismi che possono vivere in ambienti molto diversi sono definiti **generalisti** (coniglio,riccio,cavallo) e poi ci sono invece gli **specialisti** che sono legati solo a determinati habitat e sono anche quelli un po' più a rischio (panda,koala,dromedario,orso polare). Il ruolo dell'organismo all'interno dell'habitat è definito dal termine di nicchia ecologica. La **nicchia ecologica** rappresenta il ruolo funzionale di un determinato organismo in un ecosistema. Volendo, per semplificare si può dire che l'habitat è l'indirizzo della specie, la nicchie ecologica è la professione della specie. Il concetto di nicchia ecologica si è evoluto nel tempo. La **nicchia eltoniana o di classe I**: la nicchia è la funzione dell'organismo nell'ambiente in cui si trova, il suo rapporto col cibo e con i nemici. Questa definizione però non è molto completa. La definizione che meglio si addice al concetto di nicchia è quella di **Hutchinson**: la nicchia è uno spazio multidimensionale (o ipervolume) in cui un organismo può sopravvivere ed esercitare tutte le sue funzioni. C'è una distinzione da fare perchè ci sono degli ambienti in cui teoricamente io potrei vivere, ma non ci vivo perchè c'è qualcosa che mi impedisce di viverci bene e questo ha portato alla definizione, sempre all'interno della nicchia Hutchinsoniana, di due concetti importanti:

La **nicchia fondamentale** è il massimo ipervolume occupato da una specie in assenza di disturbi e competitori.

La **nicchia realizzata** è la parte di nicchia ecologica fondamentale che un individuo realmente occupa in cui ci sono anche fattori ecologici come la competizione, l'interazione che chiaramente riducono la capacità della specie di vivere in quell'ambiente.

Sia la nicchia fondamentale che quella realizzata non sono statiche ma **dinamiche**, cioè si modificano nel tempo perché i fattori ecologici possono cambiare: un esempio è il clima. Quindi la 'professione' di una specie all'interno di una nicchia può cambiare. La nicchia comprende:

1. Le interazioni dell'organismo con le altre componenti dell'ecosistema e con gli altri organismi.
2. Le risorse che un organismo utilizza (tipo di cibo).
3. L' intervallo di tolleranza di un organismo per i diversi fattori chimico-fisici. Gli organismi euri abbiamo detto che sono avvantaggiati rispetto agli organismi steno.
4. Il ruolo che un organismo gioca nel flusso di energia e nel ciclo della materia. Un ecosistema non è soltanto la somma delle diverse comunità che presiedono lo stesso luogo nello stesso tempo, ma è anche governato da un flusso di energia che è unidirezionale,che attraversa il sistema, e dal ciclo della materia.

La nicchia ecologica può essere **spaziale** se guardiamo lo spazio destinato a un individuo oppure può essere **trofica** se guardiamo quello di cui gli organismi si nutrono, **climatica** se invece analizziamo dove una specie si può spingere in base al clima. Le nicchie climatiche sono importanti non solo per capire dove una specie può vivere ma anche se ci sono condizioni climatiche simili per reintrodurre una specie in un altro territorio dove, o non c'è mai stata, o c'è stata e poi è scomparsa. Un esempio di nicchia spaziale: Coleotteri e Lepidotteri sono parassiti di parti diverse della pianta del mais, quindi non c'è sovrapposizione di nicchie ecologiche. Questo è molto importante perché se ci fosse sovrapposizione gli organismi entrerebbero in competizione e non è semplice entrare in competizione anche perché la competizione può risolversi solo in due modi:

-esclusione competitiva: uno vive e l'altro muore.

-divergenza dei caratteri: che implica mutazioni. Le due nicchie si separano sempre di più in modo da non avere niente più a che fare l'una con l'altra e questo implica che le specie interessate divergeranno sempre di più nei caratteri. Un esempio è quello dei fringuelli di Darwin: tutti i fringuelli che vivono sulle isole Galapagos hanno un solo progenitore che è in Ecuador. Una serie di fringuelli parte dall'Ecuador e va sull'isola e talmente si specializzano, diversificando nicchie trofiche, nicchie spaziali ecc. che alla fine danno origine a tante specie diverse. Un unico progenitore tante specie diverse proprio per la divergenza dei caratteri.

Un esempio di nicchia trofica: uccelli che si cibano di prede catturate in zone differenti dell'albero.

Corporazioni ed equivalenti ecologici

Un altro concetto importante in ecologia è il concetto di **corporazione**. Che cosa sono le corporazioni? Sono un insieme di specie che hanno la stessa nicchia ecologica, con un ruolo funzionale simile, che coesistono in un ecosistema. Es. tutti gli insetti che si nutrono di nettare entrano in competizione ma si specializzano (alcuni prenderanno nettare da alcuni fiori e non da altri, alcuni lo prenderanno di giorno altri di notte, alcuni solo in alcune ore del giorno). Ancora un altro concetto legato alla nicchia è quello di **equivalenti ecologici**. Per equivalenti ecologici si intendono specie con nicchie simili, ma che non entrano mai in competizione perchè vivono in ecosistemi diversi. Es. canguri australiani e bisonti americani.

L'ecosistema come sistema ecologico

L'ecosistema è un sistema ecologico quindi possiamo definirlo al pari dei sistemi in fisica. Che cos'è un sistema? Un sistema è un insieme di elementi che interagiscono fra di loro. Esso è quindi costituito da diverse unità. Per il principio delle proprietà emergenti i sistemi sono un di più rispetto alla semplice somma delle loro componenti. Nel senso che $A+B$ non fa AB ma fa C che non è semplicemente la somma delle due componenti ma C rappresenta un nuovo sistema, diverso dai 2 che lo hanno generato. L'ecosistema è un sistema **dinamico** che si evolve nel tempo, e un **sistema aperto** perché c'è qualcosa che entra nel sistema, viene trasformato e poi fuoriesce. Un ecosistema è formato da un ambiente di entrata AE , un sistema S e un ambiente d'uscita A e quindi ci saranno degli input e output.

- Se l'ambiente d'ingresso è maggiore dell'ambiente d'uscita ($input > output$) il sistema si accresce.
- Se l'ambiente d'ingresso è minore dell'ambiente d'uscita ($input < output$) il sistema decresce.
- Se l'ambiente d'ingresso è uguale all'ambiente d'uscita ($input = output$) il sistema si trova in stato stazionario.

Pensiamo al corpo umano: Se mangio tanto e non mi alleno ingrasso. Se mangio esattamente la stessa quantità di cibo che mi serve che compiere tutte le funzioni corporee il mio peso rimarrà più o meno costante. Se mangio poco dimagrisco.

Gli ecosistemi sono regolati dai principi della termodinamica.

Prima legge: l'energia non può essere né creata né distrutta ma trasformata.

Seconda legge: le trasformazioni energetiche implicano sempre una degradazione dell'energia da una forma concentrata in una dispersa **Come funziona un ecosistema?** Il suo funzionamento è dato dall'energia che segue un flusso unidirezionale passando attraverso fattori biotici e abiotici. E poi c'è il ciclo della materia che è nutrito dal sole perché senza sole non si può riciclare materia. Il flusso di energia è unidirezionale perché l'energia solare viene trasformata e non può essere

riutilizzata. I fotoni sono trasformati in energia chimica dalla fotosintesi con una certa perdita di calore per ogni passaggio da un organismo all'altro dell'ecosistema. La materia organica morta (detrito o necromassa) viene decomposta dagli organismi decompositori con la liberazione dei nutrienti di partenza. L'efficienza di questo riciclo di materia dipende dal tipo di ecosistema, dai fattori ambientali che agiscono sul sistema e dagli input e gli output.

L'ecosistema in quanto superorganismo riesce ad autoregolarsi. **Come si autoregola?** Ci sono due meccanismi che permettono all'ecosistema di autoregolarsi e sono: **feedback e ridondanza**.

Il **feedback** è un meccanismo di retroazione che si ha quando parte delle uscite tornano indietro come entrate. Il feedback può essere positivo o negativo e garantisce l'omeostasi di un sistema che è la capacità di mantenere le condizioni interne costanti anche se le condizioni esterne variano.

• Il **feedback negativo** riporta il sistema nello stato iniziale.

• Il **feedback positivo** agisce da moltiplicatore di un fenomeno. Un esempio è l'effetto serra: più caldo fa per effetto serra, più acqua evapora, più vapore acqueo c'è in atmosfera e quindi più alto sarà l'effetto serra.

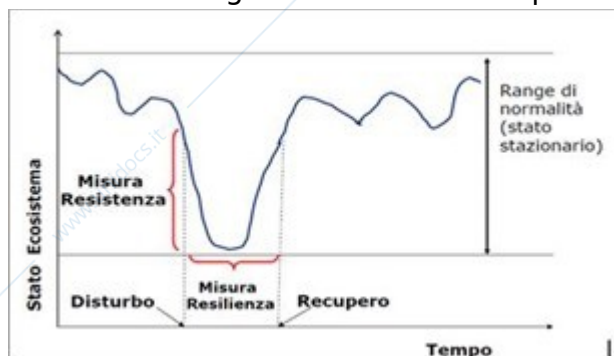
Accanto a questo meccanismo ce n'è un altro che è la **ridondanza** che si riferisce al fatto che più componenti fanno la stessa cosa. Questo è importante perché se una specie viene a mancare ce n'è un'altra che svolge lo stesso ruolo. La ridondanza ci dà informazioni sulla complessità del sistema.

Tutte le funzioni di controllo accrescono la stabilità di un ecosistema. Esistono 3 tipi di stabilità:

• **Resistenza:** è la capacità di un sistema vivente di resistere alle alterazioni ed ai disturbi.

• **Costanza:** è la capacità di un sistema vivente di mantenersi proporzionato in relazione alle risorse disponibili.

• **Resilienza:** è la capacità di un sistema vivente di recuperare rapidamente dopo un disturbo. Un organismo resiliente è poco resistente e viceversa.



Questo è un grafico che riguarda le funzioni di controllo di un ecosistema. Sull'asse delle y mettiamo le funzioni ecosistemiche (ci può essere qualsiasi funzione: fotosintesi, decomposizione ecc) e sull'asse delle x il tempo. Questo grafico mostra il normale andamento del sistema: piccole oscillazioni che però mantengono il sistema in equilibrio, ad un certo punto però possiamo notare che si verifica una

perturbazione e il sistema quindi non si trova più all'equilibrio ma subisce uno sconvolgimento per poi ritornare alla situazione che aveva in precedenza. In questo schema, questa sorta di cono rappresenta sia la resilienza che la resistenza. La resistenza dipende da quanto questa curva scende in basso, chiaramente più il sistema è resistente meno la curva scende. L'ampiezza di questo cono invece ci informa sulla resilienza, più piccolo è più veloce è il ripristino del sistema.

Questi due fenomeni di controllo sono entrambi ugualmente importanti. Per esempio consideriamo due ecosistemi diversi:

-la **macchia mediterranea**: è resiliente e questo è importante perché è sottoposta a siccità, incendi, frane, freddo invernale. Con una perturbazione può essere anche distrutta ma ha la capacità di rigenerarsi di due o tre stagioni.

-la **foresta di conifere**: è resistente a incendi, neve e ghiaccio. Se questi fattori distruggessero una foresta di conifere sarebbe un bel problema perché ci vorrebbero 200 anni per rigenerala.

Lo studio degli ecosistemi può essere affrontato in due modi:

-**studio olistico**: si studia tutto l'ecosistema in generale, guardano i flussi d'ingresso, i flussi d'uscita, le reti alimentari, definite le proprietà emergenti e poi studiate le parti componenti

-**studio meristico**: vengono studiate prima le componenti e poi integrate in un sistema.

La biosfera (la Terra) può essere considerata come un unico ecosistema perché ha le proprietà per poter consentire la vita. Si definisce come unico ecosistema perché è veramente difficile a volte capire dove finisce un ecosistema e dove ne comincia un altro. Il passaggio netto tra un ecosistema e l'altro è raro (per esempio il passaggio dalla prateria alla savana che è un particolare tipo di prateria).

Com'è strutturato un ecosistema? E' formato da un compartimento biotico (vivente) e un compartimento abiotico (componenti chimico-fisiche) che si influenzano a vicenda: l'ambiente modifica gli organismi e a suo volta gli organismi possono modificare l'ambiente.

Cosa s'intende per compartimento abiotico? Comprende l'atmosfera, la litosfera e l'idrosfera che hanno proprietà differenti. Nell'**atmosfera** distinguiamo acqua, vapore acqueo, luce, temperatura, pressione. La **litosfera** è formata da rocce, minerali e suolo. Il suolo è il risultato di processi di degradazione. Nel suolo ci sono gli elementi e i composti organici e inorganici che permettono agli organismi, in primis gli autotrofi, di poter vivere ed espletare le proprie funzioni. L' **idrosfera** è composta da tre tipologie di acque: le acque dolci, le acque salate e le acque salmastre (acque di transizione in cui c'è una condizione di salinità intermedia tra acqua dolce e acqua salata).

Cosa s'intende per compartimento biotico? Si compone di produttori, consumatori e decompositori. Questi organismi sono legati da un ciclo, attraverso di essi si ha il ciclo della materia. Esistono produttori diversi a seconda dell'ecosistema in cui ci troviamo. I produttori sono quegli organismi che utilizzano energia luminosa e la convertono in energia chimica (prima legge della termodinamica), i consumatori sono gli organismi che utilizzano sostanze già sintetizzate e i decompositori sono sempre consumatori che però sfruttano sostanze in decomposizione e decompongono la materia organica.

Dal punto di vista trofico un ecosistema può essere distinto in:

-**strato autotrofo o fascia verde**: comprende organismi che utilizzano energia luminosa per produrre sostanze complesse a partire da sostanze semplici

-**strato eterotrofo o fascia bruna**: è composto da decompositori, cioè da quegli organismi che in seguito alla morte di detriti animali o vegetali lo decompongono.

La materia organica prodotta dagli autotrofi fotosintetici e chemiosintetici è la fonte di energia da cui dipendono gli organismi eterotrofi. I consumatori si dividono in due categorie:

•**Biofagi** sono organismi erbivori e carnivori che mangiano sostanze vive.

•**Saprofagi** sono i decompositori.

In tutti gli ecosistemi, sia terrestri che acquatici, ci devono essere sempre consumatori, produttori e decompositori. Lo scenario può cambiare ma gli attori sono sempre gli stessi. Come sono legati tra di loro questi tre tipi di organismi? Tramite la **catena trofica o catena alimentare** attraverso cui viene trasferita l'energia a tutte le componenti dell'ecosistema. Se guardiamo una catena alimentare, alla base

troviamo i produttori, poi i consumatori che possono essere primari, secondari, terziari e alcune volte anche quaternari. I decompositori dove si posizionano? Se il ruolo dei decompositori è quello di decomporre materia organica è chiaro che deve decomporre quello che arriva da tutti i livelli alimentari della catena, quindi, non possono stare né sopra, né sotto e neanche in mezzo ma devono stare affianco, fuori dalla piramide alimentare. Attraverso la catena alimentare l'energia del sole arriva a tutte le componenti dell'ecosistema, alle piante arriva sottoforma di energia solare, all'uomo arriva sottoforma di cibo. In base al principio della catena trofica possiamo dire che tutti gli organismi morti o vivi sono fonte di cibo per altri organismi. C'è una sequenza di organismi, organizzati come una catena, in cui il precedente viene mangiato da quello successivo che a sua volta viene mangiato da quello successivo ancora e viceversa. Gli autotrofi sono definiti produttori primari. Gli eterotrofi che ricavano energia direttamente dalla biomassa vegetale sono i consumatori primari (erbivori). I carnivori sono consumatori secondari. L'appartenenza ad un livello trofico dipende dalle abitudini alimentari.

Le **catene alimentari** possono essere di due tipi:

- **la catena del pascolo:** (così chiamata perché fu scoperta nella prateria). La fonte primaria di energia è l'energia solare. Le catene alimentari di pascolo partono dalle piante verdi e vanno agli erbivori pascolanti ed ai carnivori e termina col predatore terminale, cioè l'ultimo carnivoro presente nella catena (l'uomo potrebbe essere uno di questi). Che succede alla morte di questi organismi? La pianta forma detrito e così tutti gli altri organismi formeranno detrito. Dove va questo detrito? Va sul substrato, va sul suolo dove trovano i decompositori. Quindi, la catena del pascolo ha inizio dove termina quella del detrito perché il decompositore decompone tutti i protagonisti della catena del pascolo.

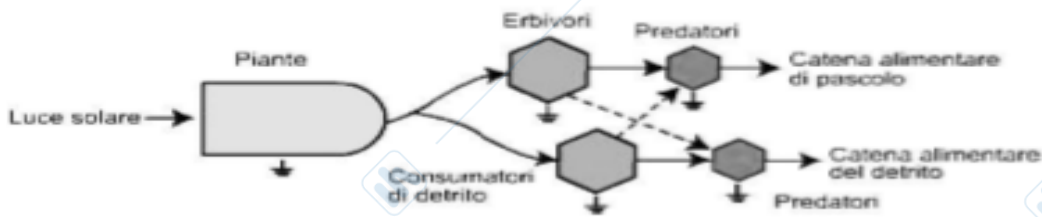
- **la catena del detrito:** (perché fu scoperta sulla foresta). Le catene alimentari di detrito partono dalla sostanza organica morta che viene attaccata da organismi via via diversi fino ad essere completamente decomposta. La catena del detrito comincia quando termina la catena del pascolo.

La catena del pascolo e la catena del detrito insieme formano il ciclo della materia.

La differenza sostanziale tra le due è che: nella catena del pascolo si ha una sottrazione di sostanza organica che viene mangiata nel passaggio dal precedente al successivo e incide sulla produzione energetica. La catena del detrito che passa dalla necromassa ai microrganismi smaltisce sostanza organica quindi restituzione al sistema di sostanze minerali.

Rappresentare in un ecosistema la catena alimentare come se fosse un unico canale non è proprio corretto e infatti si preferisce utilizzare il **modello di flusso energetico a forma di Y** che mostra l'associazione tra la catena di pascolo e quella di detrito. Perché sono associate? Non è che quando muoiono tutti gli organismi allora intervengono i detritivori perché all'altezza del predatore ci può essere un'intersezione alcuni carnivori possono predare erbivori, detritivori. Quindi alcuni carnivori non stanno per conto loro nella catena del pascolo o solo nella catena del detrito, ma queste catene si possono intersecare. Ecco perché si preferisce una rappresentazione a doppio canale in cui ci sono intersezioni tra predatori e prede di entrambe le catene alimentari.

Modello a "Y" di Odum



Anche questa però è una schematizzazione perché in un ecosistema le catene non sono mai separate tra loro ma sono sempre legate in qualche modo (perché i predatori possono avere fonti di cibo diverse) perciò più che di catena alimentare si parla di **reti trofiche**. Il ruolo che hanno le singole specie nella rete dipende moltissimo dalle loro preferenze alimentari, ma anche dalle interazioni che hanno con gli altri organismi. Le specie presenti in una rete trofica possono essere distinte in tre categorie:

- **Specie basali:** sono quelle che vengono sempre predate, non predano. (es. alga)
- **Specie intermedie:** sono predatori delle specie basali e vengono predate dalle specie terminali.
- **Specie terminali:** non sono mai predate, predano solo. Sono definite top predators (leonessa in Africa, tigre nella foresta del Bengala, dipende dall'ecosistema).

Che succede lungo una catena alimentare? Arriva energia solare, passa attraverso i primi protagonisti e poi via via agli altri organismi. Nel passaggio da un livello trofico all'altro si ha una perdita parziale di energia sotto forma di energia solare. L'energia che entra non è mai quella che esce ma si verifica sempre una perdita di energia abbastanza cospicua perché è circa il 90% di energia che viene persa sotto forma di calore quando si passa da un livello trofico all'altro. Chiaramente anche quando il detritivoro attacca la sostanza organica si ha la perdita di energia sotto forma di calore. Raramente nelle reti alimentari vi sono più di 4 o 5 livelli trofici ed il motivo è proprio legato all'energetica, perché se si perde energia ad ogni livello vuol dire che si arriverebbe ad un certo punto in cui c'è energia sufficiente per poter reggere il livello trofico successivo. Quindi, quello che limita la lunghezza delle catene alimentari è proprio l'energia, ecco perché non ci sono infiniti livelli trofici.

Il principio di Helton: Helton è un grande ecologo che teorizzò che c'era una strutturazione delle comunità in base a una dimensione corporea nei rapporti preda-predatore. In genere, il predatore è più grande della preda. Non è però sempre così, ci può essere la caccia di gruppo che aumenta l'efficienza della cattura.

Negli **ecosistemi naturali** attività autotrofe ed eterotrofe tendono a bilanciarsi.

La città può essere considerata come ecosistema, si chiama **ecosistema urbano** però è un po' particolare perché in un ecosistema generalmente la fascia bruna e la fascia verde tendono a bilanciarsi, tanto si produce tanto si consuma. Nella città non è così perché è un **ecosistema eterotrofo** cioè consuma molto e produce poco. Rispetto agli ecosistemi naturali consumano più di quello che producono.

Abbiamo detto che ad ogni passaggio di energia da un livello trofico ad un altro, non tutta l'energia che passa viene assorbita ma c'è una perdita di energia sotto forma di respirazione. Il modo attraverso cui questa energia passa dalla parte bassa della catena fino ad arrivare alle specie terminali si chiama **efficienza ecologica**. Parto ad esempio dai produttori primari, quando l'organismo vegetale incamera energia

sottoforma di energia solare fa fotosintesi ma l'organismo vegetale un po' come l'organismo animale, oltre a fare fotosintesi deve anche respirare, quindi quando considero il bilancio energetico devo considerare quello che l'organismo produce per fotosintesi e quella parte di energia prodotta con la fotosintesi ma che viene dissipata sottoforma di calore. In poche parole distinguiamo la:

- **Fotosintesi netta** che rappresenta quanto carbonio fissa la pianta.

- **Fotosintesi lorda** che comprende fotosintesi + respirazione (che è un processo dissipativo).

Poiché le piante sono i produttori avrò una produzione primaria lorda e una produzione primaria netta. La **produzione primaria lorda** è la quantità di materia organica che viene prodotta per fotosintesi e comprende anche il processo di respirazione, mentre la **produzione primaria netta** è la quantità di materia organica prodotta senza considerare la respirazione.

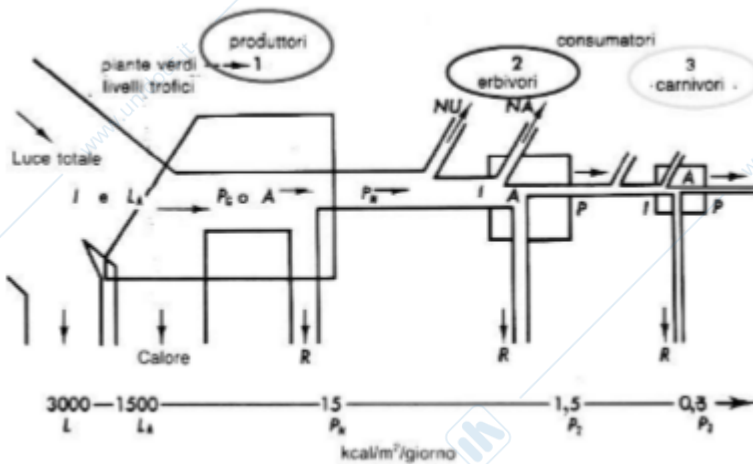


Diagramma del flusso di energia attraverso un ecosistema

In un modello universale che fa riferimento ad un unico livello trofico si individua un input di energia (I); parte di quest'energia viene assimilata (A), un'altra parte viene dissipata (NU: non utilizzata). La parte di energia assimilata che diventa energia chimica contenuta nella biomassa è indicata come P (produzione), mentre un'altra parte

viene persa per respirazione (R). Anche l'energia accumulata in biomassa può avere destini diversi: in parte può essere utilizzata per l'accrescimento, in parte viene escretata e in parte viene accumulata come riserva. Questo secondo schema raffigura il modello universale applicato ad una catena trofica costituita da produttori, consumatori primari e consumatori secondari. Una certa quantità di energia solare entra come input (I). Di quest'energia solare ne viene assorbita solo una certa quantità (L_A), mentre la restante parte viene dispersa. Della parte di energia che viene assorbita, solo una parte viene assimilata (GPP), la parte restante viene dispersa come calore. La GPP è la produzione primaria lorda dell'autotrofo. Di questa quantità, una parte è persa per respirazione (R), un'altra parte diventa NPP (produzione primaria netta) e viene utilizzata per produrre biomassa. Questo discorso riguarda anche le reti trofiche successive.

Entra energia solare nel primo quadrato che indica i produttori. Una grossa quantità di energia solare colpisce gli organismi vegetali per poi essere trasformata da essi in energia chimica. Non tutta questa energia che entra però viene ad essere assorbita dalla piante per fare fotosintesi. Quindi, solo una piccola parte viene assorbita (L_A). Di questa energia però una parte viene persa sottoforma di calore (perché abbiamo detto che nel passaggio da un livello trofico all'altro una parte cospicua di energia viene persa sottoforma di calore) e un'altra parte (GPP) viene utilizzata per effettuare la fotosintesi. Di questa produzione primaria lorda però, una parte viene persa come respirazione e quindi l'energia che passa al livello trofico successivo (consumatori primari= erbivori) è una parte ancora più piccola. Possiamo già notare come si assottiglia l'energia passando da un livello trofico all'altro. Prima di arrivare all'altro livello trofico c'è ancora perdita di energia che è l'energia non utilizzata NU. Quindi, ancora una quantità di energia più piccola passa ai consumatori primari. Qui c'è lo

stesso discorso, una parte di questa energia che entra nel secondo quadrato viene persa sotto forma di calore, un'altra parte per escrezione (E) quindi ancora di più si assottiglia l'energia che passa al terzo livello trofico. Prima di arrivare ai consumatori secondari c'è ancora una piccola perdita di energia non utilizzata e una parte piccolissima quindi passa ai consumatori primari. Anche qui in parte viene persa sotto forma di respirazione e in parte con l'escrezione di feci e urine. Poi ci potrebbero essere anche i consumatori terziari e quaternari, ma non sempre ci sono perché il flusso di energia che alla fine diventa quasi capillare, non è sempre sufficiente (dipende in che ecosistema ci troviamo) per consentire la sopravvivenza di un altro livello trofico. Che cos'è che limita la lunghezza di una catena alimentare? L'efficienza ecologica. La percentuale di energia che viene trasferita ad un livello trofico all'altro si chiama efficienza ecologica. Oltre che una riduzione dell'energia si assiste anche alla riduzione dell'ampiezza dei quadrati che rappresentano la biomassa diretta. Quindi, la biomassa dei produttori, in un ecosistema terrestre, è molto più grande di quella dei consumatori primari che a sua volta è più grande di quella dei consumatori secondari, terziari e così via. Perché succede questo? Perché il livello successivo fonda la sua vita sul livello precedente, quindi se quello precedente fosse più piccolo del successivo non ci sarebbe più cibo per soddisfare le esigenze di quello che viene dopo.

Quindi, la modalità attraverso cui l'energia si trasferisce da un livello trofico all'altro si chiama **efficienza ecologica** e abbiamo tre tipi di efficienza ecologica:

-**efficienza di assimilazione** che rappresenta quanto viene assimilata l'energia che arriva al livello trofico;

-**efficienza di consumo** indica quanto il livello successivo prende dal livello precedente;

-**efficienza di produzione** indica quanta biomassa si forma.

Che cosa succede quando entra energia al livello dei consumatori? Innanzitutto non entra energia solare, ma entra sotto forma di cibo. Quello che è fotosintesi per gli organismi autotrofi, per noi, per gli eterotrofi è ingestione di cibo (I). Ingeriamo una certa quantità di cibo, ma tutta viene utilizzata per formare biomassa? Assolutamente no, perché una parte dei cibi che ingeriamo è energia che non viene utilizzata, un'altra parte viene assimilata, andrà in produzione e formerà biomassa (nuovi tessuti) e una parte viene persa sotto forma di respirazione. L'energia assimilata si divide in produzione (P) ed energia persa per respirazione (R). Il rapporto P/R o B/R (biomassa respirazione) è di grande significato ecologico perché ci dà anche informazioni sull'età dell'organismo perché generalmente gli organismi giovani respirano di meno rispetto a quelli più grandi. Es.. in un bambino tutto il cibo che gli si dà viene assimilato, poiché è piccola la biomassa del bambino, poco viene utilizzato per respirare. Man mano che il bambino diventa adolescente, adulto e poi anziano non incorpora più biomassa, la produzione si ferma, la crescita si ferma quindi P si arresta però aumenta quello che si perde per respirazione. Il rapporto P/R ai diversi livelli trofici indica quanto il sistema si evolve e vediamo che:

- $P/R > 1$ nei sistemi giovani;

- $P/R < 1$ nei sistemi che vanno verso il declino (si respira di più rispetto a quello che si produce);

- $P/R = 1$ nei sistemi all'equilibrio.

In generale, possiamo dire che l'energia assimilata nei giovani viene utilizzata per la crescita esolo in piccola parte dissipata sotto forma di calore. Negli adulti viene utilizzata per la riproduzione.

Che cos'è l'efficienza assimilativa? La percentuale di energia assunta col cibo che può essere effettivamente utilizzata dall'organismo. Ci sono organismi che hanno

elevata capacità di assimilazione, assimilano molto in fretta, altri che invece hanno una bassa capacità di assimilazione.

$$EA = \frac{A}{C} \times 100 \quad A = \text{energia assimilata} \quad C = \text{cibo}$$

Questa efficienza di assimilazione è diversa negli erbivori o nei carnivori. Gli erbivori hanno un'efficienza del 40-50%. L'efficienza del carnivoro è maggiore perché mangia carne, quindi proteine, ha una forma di cibo più sofisticata, ha un'efficienza dell'80%. I decompositori hanno un'efficienza del 100% perché alcuni hanno una digestione extracellulare (non lo digeriscono nel loro corpo ma fuori e poi lo assimilano).

Quello che cambia è la qualità del cibo.

Che cos'è l'efficienza di produzione? E' la percentuale di energia assimilata che viene utilizzata per la produzione di biomassa.

$$EP = \frac{P}{A} \times 100$$

P è la produzione di biomassa ed è la respirazione che va ad influenzare la biomassa. Più respiro meno biomassa formo. In questo caso più che fare una differenza tra erbivori e carnivori si fa una differenza tra ectodermi ed endotermi. Gli endotermi sono quelli che producono calore e quindi regolano la propria temperatura interna a prescindere dalle condizioni esterne. Gli ectotermi non hanno questa capacità (insetti ad esempio), sono termoconformi nel senso che rispecchiano la temperatura esterna. Per produrre calore è necessario che ci sia consumo di energia che viene dal cibo. Gli endotermi hanno un'efficienza di produzione di circa 1-3% rispetto a quella degli ectotermi che è del 10%. Quindi, gli endotermi sprecano più energia per la respirazione.

Che cos'è l'efficienza di consumo? La percentuale di biomassa che dal livello trofico precedente viene utilizzata dagli organismi che si trovano al livello trofico successivo.

$$EC = \frac{\text{produzione vegetale ingerita}}{\text{produzione vegetale totale}} \times 100$$

Foreste: EC=5%

Praterie: EC= 25%

Comunità fitoplanctoniche: EC=50%

A cosa è legato questo incremento? Se l'efficienza di consumo è legata al rapporto tra la produzione vegetale ingerita e quella totale per 100 allora si capisce bene perché nella foresta è bassa, nella prateria è intermedia e nella comunità fitoplanctonica è alta. La produzione vegetale totale comprende non solo le foglie ma anche tronchi, radici. Quindi, degli alberi ad alto fusto soltanto una piccola parte può essere mangiata come foglia, un'altra percentuale è tronco, radice ecc. che solitamente non vengono mangiate quindi nella foresta la produzione ingerita è molto bassa rispetto alla totale. Se passo alla prateria, il prato può essere ingerito completamente anche se c'è una parte che non può essere metabolizzata ma aumenta l'efficienza una quantità maggiore può essere ingerita. Nelle comunità fitoplanctoniche, rispetto alla produzione vegetale totale è il 50% che viene ingerito. L'efficienza di consumo quindi dipende dal tipo di ecosistema che consideriamo e dipende soprattutto da quanta biomassa può essere ingerita dal consumatore rispetto a quella totale che si produce.

L'ultima efficienza ecologica è quella di Lindeman la cui definizione sembrerebbe uguale all'efficienza di consumo ma non è proprio così perché rappresenta la % di **produzione** di biomassa del livello trofico precedente che viene convertita in produzione del livello trofico successivo:

$$EE = P_n / P_{n-1} \times 100$$

L'efficienza ecologica dipende molto dal numero di livelli trofici presi in considerazione e quindi dalla lunghezza della catena alimentare. Ad esempio, prendendo in considerazione un sistema acquatico che è caratterizzato da reti trofiche molto complesse aventi catene alimentari lunghe, il produttore deve produrre maggiormente per fare in modo che ci siano efficienze di partenza più alte per poter arrivare all'ultimo livello trofico. Per questo motivo l'efficienza ecologica nel passaggio produttori-consumatori primari è del 25% circa.

Le piramidi ecologiche

La struttura di un ecosistema può essere rappresentata da una piramide alla cui base poniamo i produttori, poi ci sono i consumatori primari, poi i consumatori secondari. Questo implica che, poiché il livello successivo dipende da quello precedente, il livello precedente come biomassa è più grande rispetto a quello successivo e così via. Ci sono tre tipi di piramidi:

-piramide di biomassa che indica la quantità di biomassa per ogni livello trofico. Solitamente il livello precedente come biomassa è più grande rispetto a quello successivo. Teoricamente è sempre così però ci possono essere dei casi particolari in cui la piramide di biomassa può essere in parte capovolta. In quale tipo di ecosistemi c'è questo paradosso? Negli ecosistemi marini perché i produttori degli ecosistemi marini sono il plancton che avranno una biomassa più piccola rispetto ai pesci che mangiano il plancton, però la velocità con cui si rigenera il plancton è molto elevata per cui anche una biomassa più piccola per la velocità con cui si riproduce può soddisfare le esigenze nutrizionali della biomassa più grande dei consumatori primari. Questo è l'unico caso in cui una piramide di biomassa può essere capovolta.

-piramide di numero che indica il numero di individui ad ogni livello trofico. Anche in questo caso il numero dei produttori è sempre maggiore di quello dei consumatori primari, secondari o terziari. Ma anche in questo caso in alcuni ecosistemi può succedere che la piramide di numero sia in parte capovolta: il livello trofico dei produttori è più piccolo in numero rispetto al livello trofico dei consumatori primari, ma poi la piramide riprende il suo andamento normale. In quali ecosistemi si verifica questo? Nella foresta, perché nella foresta parte della biomassa sta nei tronchi e nelle radici, quindi gli individui con elevata biomassa sono in numero minore perché gli alberi secolari ad esempio saranno in numero minore.



-piramide di energia non può mai essere capovolta nemmeno parzialmente, ha sempre la base più larga rispetto al resto del corpo della piramide perché l'energia di partenza si riduce man mano che si passa da un livello trofico all'altro. C'è una relazione tra biomassa ed energia, generalmente diminuisce l'energia e diminuisce la biomassa.

La biomagnificazione e bioaccumulazione

La **biomagnificazione** è la concentrazione di alcuni elementi chimici e sostanze tossiche che aumenta lungo la catena alimentare. Quindi ci sono piccole quantità alla base e man mano che si sale si arriva a concentrazioni sempre più elevate fino a diventare mortali. **Quali sono le sostanze che causano biomagnificazione?** Gli

inquinanti, ma non tutti gli inquinanti causano biomagnificazione. Le sostanze più pericolose sono:

- radionuclidi (cesio,iodio)
- sostanze di sintesi (pesticidi)
- metalli in traccia (piombo, mercurio) che vengono accumulati e che non vengono utilizzati come cofattori di nessuna reazione biologica.

Prendiamo in considerazione un sistema acquatico con DDT (che oggi è vietato perché è teratogeno), una sostanza non degradabile che viene accumulata nella biomassa. Per legge questo è possibile perché si accumula in piccole quantità che inizialmente non sono dannose. L'acqua entra a far parte degli organismi viventi (zooplancton, pesci di piccole dimensioni, pesci di elevate dimensioni) fino ad arrivare ai livelli trofici superiori, top predator (uccelli che si nutrono di pesci). Passaggio dopo passaggio, questo elemento viene accumulato nella catena alimentare e ai livelli trofici più alti diventa tossico. Un esempio classico è il mercurio che diventa tossico negli uccelli. Nelle uova di questi ultimi, infatti, non si forma un guscio abbastanza resistente e per questo motivo le uova si rompono precocemente per cui l'embrione che non si è formato completamente sarà destinato a morte certa.

C'è una distinzione da fare tra bioaccumulazione e biomagnificazione.

La **biomagnificazione** è l'amplificazione della concentrazione di una sostanza tossica lungo una catena alimentare. La **bioaccumulazione** è ad opera di un singolo organismo. Un organismo può essere ad esempio una quercia che man mano che cresce assume inquinanti dall'acqua, dal suolo, dall'atmosfera e quindi più è elevata la biomassa e più tempo avranno per accumulare queste sostanze. Nella biomagnificazione quindi, il tempo non conta, semplicemente c'è il trasferimento di una sostanza tossica lungo la catena alimentare. Nella bioaccumulazione il tempo conta perché un organismo più piccolo accumula di meno rispetto ad uno più grande. Infatti sarebbe preferibile mangiare pesci grandi solo poche volte al mese. Dove si accumulano queste sostanze? Il DDT e le sostanze di sintesi si accumulano nelle cellule adipose, il tessuto adiposo non viene mai distrutto (tranne con operazioni chirurgiche), le cellule possono solo sgonfiarsi o gonfiarsi. Il piombo si accumula nelle ossa e le ossa aumentano di dimensioni man mano che cresciamo quindi questo vuol dire che il piombo non viene smaltito in alcun modo e quando raggiunge nelle ossa delle concentrazioni tossiche provoca delle patologie che sono mortali. Il mercurio invece si accumula nel tessuto muscolare, anche i muscoli crescono man mano che cresce l'organismo, quindi si accumula fino ad ottenere concentrazioni tossiche.

Processi negli ecosistemi

Quali sono i processi che si verificano negli ecosistemi?

- fotosintesi
- chemiosintesi
- respirazione aerobia
- respirazione anaerobia
- decomposizione
- fermentazione

Alcuni di questi processi liberano energia, altri invece hanno bisogno di acquisirla.

La **fotosintesi** e la **chemiosintesi** (sintesi di composti organici a partire da composti inorganici semplici) hanno bisogno di acquisire energia solare dal sistema. La respirazione, la decomposizione e la fermentazione sono processi esoergonici, nel senso che viene ceduta energia. La **respirazione aerobia** e la **respirazione anaerobia** liberano energia come ATP e dissipano piccole quantità di calore. La **fermentazione** ha come risultato l'ossidazione di composti organici. La

decomposizione rappresenta la degradazione della materia organica morta che consente il compimento del ciclo della materia.

Che differenza c'è tra respirazione e fermentazione?

Innanzitutto la respirazione può essere: aerobia e anaerobia. Nel caso della **respirazione aerobia** alla fine della catena di trasporto degli elettroni c'è l'ossigeno come accettore finale. Nel caso della **respirazione anaerobia** alla fine della catena di trasporto degli elettroni ci sono sostanze inorganiche diverse dall'ossigeno come accettori finali. La **fermentazione** è un processo anaerobico in cui gli accettori di idrogeno sono sostanze organiche.

Dalla fascia verde (che comprende gli organismi autotrofi) dell'ecosistema dipende la vita sul nostro pianeta. L'attività fotosintetica e chemiosintetica è dovuta agli organismi autotrofi. La fotosintesi rappresenta un processo vitale per l'intera biosfera. Grazie alla fotosintesi le piante producono ossigeno e cibo e sottraggono CO_2 che è dannosa per gli esseri viventi.

In atmosfera: 21% di O_2 e 78% di N_2 e 0.03% di CO_2 (300 ppm cioè 300 parti per milione) la concentrazione di CO_2 dovrebbe essere piccolissima, ma oggi ha superato 410 parti per milione: non abbiamo mai respirato aria così satura di CO_2 . Poi ci sono altri gas in traccia come il monossido, che per fortuna è in quantità piccolissime, metano in quantità ancora più piccola ecc.

Nel fare fotosintesi, le piante (ma gli autotrofi in generale) accumulano biomassa che servirà poi agli erbivori che mangiano gli organismi vegetali. Poi il carnivoro mangia l'erbivoro e questa energia presa dalle piante si trasmette in questo modo si trasmette agli altri anelli della catena alimentare, quindi fluisce all'interno dell'ecosistema. La pianta però non è soltanto cibo ma è anche aria. Le piante producono ossigeno, producono cibo, rimuovono CO_2 , sono importanti per la produzione di materie prime: si ricava il legno, si ricavano le fibre tessili e i medicinali, una delle banche di medicine sul nostro pianeta è la foresta pluviale tropicale che ha tantissime specie già classificate e tantissime altre che ancora devono essere scoperte. C'è una considerazione da fare: poiché le piante non sono arrivate sul nostro pianeta contemporaneamente alla nascita della Terra, questo ci fa pensare che l'atmosfera del passato fosse molto diversa da quella attuale. Quel 21% di ossigeno che consente la vita sul nostro pianeta a noi e a tutti gli autotrofi, all'inizio non c'era. C'era la CO_2 in quantità maggiori, poi gli organismi vegetali hanno colonizzato il pianeta terrestre, quindi è aumentata la concentrazione di ossigeno e diminuita quella dell'anidride carbonica. Quindi, si può dire che l'aria preistorica era ricca di altri gas, che sono ancora presenti ma in quantità minori.

La fotosintesi non è l'unico processo con cui viene prodotta energia c'è anche la chemiosintesi che è alla base di quella che chiamiamo produttività primaria dell'ecosistema. La **produttività primaria** è la velocità con cui viene prodotta materia organica a partire da composti inorganici. Abbiamo poi detto che si distingue in netta (al netto della respirazione) e lorda (se comprende anche la respirazione).

Quindi, l'attività di fotosintesi e di chemiosintesi è dovuta agli organismi autotrofi. Ma chi sono gli autotrofi? Ci sono i fotoautotrofi (che utilizzano la luce come fonte primaria di energia) e i chemioautotrofi (che invece utilizzano come fonte di energia, non l'energia luminosa, ma l'energia di composti inorganici: ad es. i solfobatteri o batteri dello zolfo, i batteri dell'azoto).

Esistono due tipi di fotosintesi: **fotosintesi ossigenica e anossigenica**. La fotosintesi ossigenica produce ossigeno e carboidrati. La fotosintesi anossigenica non produce ossigeno, ma produce ugualmente carboidrati. Entrambi i processi organicano perché sono processi di sintesi. La fotosintesi ossigenica è la famosa **fotosintesi**

clorofilliana cioè quella ad opera di piante verdi, alghe, macroalghe, piante acquatiche e cianobatteri. La fotosintesi anossigenica è la **fotosintesi batterica**.

Una piccola frazione di produttività primaria è legata a dei batteri chemioautotrofi che possono essere aerobi e richiedono ossigeno per ossidare composti organici. Un esempio sono i batteri nitrificanti o i solfobatteri. E' ovvio però che la maggior parte di ossigeno sul nostro pianeta è prodotto dai fotoautotrofi di ambienti terrestri. E chi sono? I principali produttori primari sono rappresentati dalle piante vascolari. Un contributo quantitativamente meno importante è quello dato dalle briofite (muschi e licheni). Il muschio per vivere ha bisogno di molta umidità (se c'è caldo non lo troviamo). Se l'aria non è ricca di vapore acqueo, il muschio fa una cosa che si chiama criptobiosi, cioè è come se fosse morto, ma in realtà non lo è basta una pioggia per rinvigorirlo. Il fatto che non sono attivi 12 mesi all'anno è il motivo per il quale la produttività legata alle briofite è ridotta rispetto a quella legata alle piante vascolari. Altri organismi sono alghe e cianobatteri del suolo. Queste sono quindi gli organismi responsabili della produzione di ossigeno sulla terraferma.

In ambiente acquatico sono poche le piante vascolari, prevalgono le alghe verdi, brune e rosse, protisti unicellulari (fitoplancton), cianobatteri e batteri. La produttività degli oceani è in gran parte sostenuta dal plancton.

La luce

In ambiente acquatico la luce è un fattore che limita la fotosintesi. Ma anche in ambiente terrestre se ho una coltre di alberi che blocca la luce sotto sarà buio. Il termine giungla, questo proposito, è un termine indiano che vuol dire foresta nera, fitta e impenetrabile. Quindi, anche in ambiente terrestre, seppure in maniera diversa, si verifica un'attenuazione della luce in linea verticale.

Nell'ambiente acquatico proprio in base alla penetrazione della luce, abbiamo una distribuzione diversa degli organismi. Lungo una colonna d'acqua la luce subisce un processo di estinzione. Dalla superficie la luce man mano si riduce fino alla profondità. Questo comporta il fatto che gli organismi devono adattarsi a questo ambiente luminoso. Gli autotrofi, che si chiamano autotrofi perché si occupano della produzione di sostanza organica a partire dalla luce, chiaramente non possono essere presenti se la luce non c'è. Per questo motivo, c'è una riduzione della componente autotrofa man mano che si scende in profondità, fino ad arrivare alla zona abissale dove non ci saranno autotrofi.

In base alla luce possiamo zonare l'ecosistema marino in tre livelli:

- La **zona eufotica** (fino a 200 m di profondità) che vuol dire zona illuminata.
- La **zona batiale** (da 200 a 500 m di profondità) che è come se fosse una zona intermedia.
- La **zona abissale** (da 1500 a 10.000 m di profondità) che è quella non illuminata.

Questi limiti però riguardano acque che non sono inquinate, è chiaro però che l'inquinamento cambia tutto.

Dove troviamo gli autotrofi? Gli autotrofi li troviamo fin dove troviamo la luce.

Nella zona eufotica si produce ossigeno, perciò qui si trovano la maggior parte dei pesci che sono eterotrofi e hanno bisogno di respirare. Nella zona eufotica la produzione di materia organica prodotta per fotosintesi supera il consumo di materia organica per respirazione ($P > R$). Se faccio riferimento alla comunità, i processi autotrofi prevalgono su quelli eterotrofi. Il limite inferiore della zona eufotica è definito **livello di compensazione** dove la produttività uguaglia la respirazione ($P = R$) perché i processi autotrofi vengono bilanciati da quelli eterotrofi. Nella zona abissale non

essendoci luce non si può fare fotosintesi ($P < R$) i processi eterotrofi superano quelli autotrofi.

Un'altra considerazione da fare è che così come diminuisce la luce lungo la colonna d'acqua, diminuisce anche l'ossigeno che viene prodotto dagli autotrofi. In sintesi: diminuisce la luce → diminuiscono gli autotrofi → diminuisce l'ossigeno.

I processi di decomposizione della sostanza organica dove avvengono? Avvengono in profondità, quindi succede una cosa particolare, sulla parte superiore c'è tanto ossigeno, ma in profondità c'è tanta sostanza organica, che viene prodotta per decomposizione, che è cibo per le piante. Quindi, se le acque di sopra non si mescolassero con le acque di sotto, gli ecosistemi morirebbero perché non ci sarebbe scambio tra ossigeno e nutrienti. In questo modo c'è ossigenazione in tutta la colonna d'acqua e i nutrienti vengono distribuiti in maniera tale che possano vivere questi organismi.

La radiazione lungo la colonna d'acqua non subisce solo una riduzione in quantità, ma anche una riduzione di qualità. E' come se quella massa d'acqua fosse un filtro per alcune radiazioni solari. In poche parole, lo spettro visibile dal rosso al viola subisce un'estinzione parziale: la luce rossa viene assorbita negli stadi superiori della colonna d'acqua, la luce blu penetra più in profondità e la luce verde penetra a maggiore profondità. Questo è il motivo per cui esistono alghe verdi, alghe brune ed alghe rosse. L'alga verde è perché questa foglia assorbe tutti i colori e riflette il verde, l'alga è rossa è perché assorbe tutti i colori e riflette il rosso. Tra i fotoautotrofi che vivono negli ambienti acquatici troviamo:

L'alga verde *Ulva*, vive in acque superficiali, ha pigmenti simili alle piante superiori ed utilizza luce blu e rossa. L'alga bruna *Sargassum* può arrivare ad avere una biomassa di 5 tonnellate per miglio quadrato di superficie. Essa vive fin dove penetra la luce per la fotosintesi. L'alga rossa *Porphyra* che vive in acque profonde e ha pigmenti che permettono l'utilizzazione della luce verde. Le acque che contengono posidonia oceanica (che è una pianta non un'alga) sono quelle più ossigenate. La posidonia non è tanto appetibile perché non è tenera, l'eterotrofo la mangia solo se proprio non c'ha niente altrimenti preferisce altre fonti alimentari. Non viene predata e perciò grandi quantità di questa pianta superiore vanno a formare detrito organico da cui parte poi la catena del detrito. La posidonia forma estese praterie ed è strettamente condizionata dalla presenza della luce. Poi, ci sono i cianobatteri come ad es. l'anabena. I cianobatteri colonizzano un gran numero di habitat (mare, acque dolci, suolo) posseggono clorofilla e producono ossigeno durante la fotosintesi in modo simile alle alghe ed alle piante. Sono noti anche cianobatteri capaci di effettuare una fotosintesi anossigenica facoltativa. Il cianobatterio *Anabaena* riesce a fissare azoto atmosferico grazie al fatto che possiedono cellule più spesse chiamate eterocisti, che sono adibite proprio alla fissazione dell'azoto. L'ultima classe di fotoautotrofi è rappresentata dai batteri fotosintetici che sono anaerobi obbligati (vengono inibiti dall'ossigeno) perciò vivono in acque anossiche ben illuminate. Si trovano al di sotto dello strato di cianobatteri e alghe, in acque anossiche molto profonde con poca disponibilità di luce. Esistono batteri fotosintetici verdi e purpurei che si differenziano per la clorofilla e per i pigmenti accessori presenti.

La produttività primaria

La produttività è la velocità con cui si produce in un certo tempo la biomassa di un livello trofico dell'ecosistema. Esistono diversi tipi di produttività. Con il termine **produttività primaria** ci si riferisce all'accumulo di biomassa da parte di tutti gli organismi autotrofi ovunque essi siano. La produttività primaria di un ecosistema è la velocità alla quale l'energia viene trasformata in sostanza organica. Chi fa produttività

primaria? I fotoautotrofi o i chemioautotrofi che si distinguono per la fonte di energia che utilizzano, ma formano comunque sempre sostanza organica. Viene distinta in:

-**produttività primaria lorda:** velocità totale di fotosintesi (fotosintesi + respirazione).

-**produttività primaria netta:** velocità alla quale la materia organica prodotta viene immagazzinata meno quella utilizzata dal produttore per la respirazione (fotosintesi - la respirazione).

Con il termine **produttività secondaria (o assimilazione)** ci riferiamo non più agli autotrofi ma alla produzione di biomassa degli eterotrofi. Sarebbe l'assimilazione perché gli eterotrofi assimilano, cioè mangiano quello che gli altri già hanno prodotto. Quando la pianta fa fotosintesi, una parte viene utilizzata per produrre biomassa e l'altra per la respirazione. La parte che passa al livello successivo è quella che viene utilizzata per produrre biomassa. Consiste nella velocità di immagazzinamento dell'energia a livello dei consumatori. La produttività secondaria non può essere divisa in lorda e netta (i consumatori utilizzano sostanze già sintetizzate e le trasformano nei loro tessuti).

-**produttività netta della comunità:** rappresenta la velocità di immagazzinamento della materia organica non utilizzata dagli eterotrofi durante un dato arco di tempo.

La produttività è espressa come g di CO₂ assorbita o di O₂ prodotto o g di peso secco ed è riferita all'unità di superficie e all'unità di tempo. Il tempo è importante perché io posso dire che una pianta fotosintetizza 10 e l'altra 100 e allora siamo portati a pensare che quella di 100 sia meglio di quella di 10. Però bisogna comunque riferirci al tempo, perché magari quella che fotosintetizza 10 lo fa in un secondo e quella che fotosintetizza 100 lo fa in un anno. E poi è importante anche l'unità di superficie perché bisogna considerare anche qual è la superficie che fotosintetizza. L'albero ha come superficie fotosintetizzante le foglie, mentre una pianta erbacea è tutta fotosintetizzante.

La produttività primaria di un ecosistema dipende dalla fitomassa e varia da un ecosistema all'altro in funzione:

-stadi della successione ecologica. L'ecosistema se considerato come organismo presenta vari stadi di sviluppo.

-radiazione solare, precipitazioni e temperatura (sono i fattori ecologici che fanno sì che una pianta stia bene o stia male).

-disponibilità di nutrienti e CO₂.

-tipo di vegetazione: le piante erbacee fotosintetizzano in maniera diversa rispetto alle piante arbustive o arboree.

Quali sono le zone più produttive della Terra? Lungo la fascia equatoriale ci sono le zone più produttive della terra. Un po' più in alto c'è la fascia mediterranea dove c'è comunque un'elevata produttività ma non come quella delle foreste. Opposte alla foresta ci sono i deserti caldi e freddi dove le condizioni climatiche cominciano a diventare non idonee per la fotosintesi. In generale possiamo dire che la produttività della foresta è quella più elevata in assoluto, i deserti hanno la produttività più bassa in assoluto, mentre invece la macchia mediterranea si trova ad un livello intermedio in termini di produttività. In acqua invece che succede? E' possibile fare un confronto tra il mare aperto le acque costiere. Nelle acque costiere la produttività è molto più elevata che in mare aperto, perché le acque costiere lambiscono le coste e quindi tutto quello che si produce sulla terraferma, anche i rifiuti, arrivano in acqua. E' chiaro che la maggior parte dei rifiuti sono rifiuti organici, quindi le acque costiere sono più ricche di nutrienti, per questo c'è una produttività maggiore. In mare aperto arrivano lo stesso questi nutrienti, ma è come se fossero diluiti dalla terraferma fino al mare aperto, per cui meno nutrienti= meno biomassa. Una cosa importante è anche la

profondità: nelle zone fino a 20-30mt di profondità la produttività è abbastanza alta, man mano che aumenta la profondità diminuisce la produttività perché si riduce la luce ma anche i nutrienti. Gli ecologi per capire se il mare è molto o poco produttivo, si servono di servizi geoinformatici come ad esempio **Rheticus marine** con cui si è in grado di monitorare in modo continuativo le acque costiere.

Che cosa limita la produttività negli ecosistemi? I principali fattori che influiscono sulla produttività primaria di un ecosistema terrestre sono le **variazioni di temperatura** e la **disponibilità idrica**. Nel deserto la mancanza d'acqua limita la fotosintesi. Nella tundra artica o in alta montagna le basse temperature inibiscono la crescita delle piante. In aperto oceano, la mancanza di nutrienti riduce la capacità di queste aree di utilizzare l'abbondante quantità di luce e acqua. Invece, le foreste tropicali, le barriere coralline, e gli estuari presentano elevati livelli di produttività perché hanno abbondanti rifornimenti di risorse.

A seconda degli ecosistemi considerati la biomassa prodotta è differente.

Come si misura la produttività primaria? Come facciamo a capire se un sistema sta producendo di più o di meno?

Il metodo del raccolto

Il metodo del raccolto è un metodo molto semplice che consiste nella raccolta di biomassa vegetale presente nell'ambiente. Si applica soltanto in ambiente terrestre ed è una misura ponderale diretta e distruttiva. E' una misura diretta perché si basa su una misura di peso in quanto la vegetazione viene tagliata e pesata, è collegata direttamente alla fotosintesi, cioè più pesa una pianta, più biomassa ha. Distruttiva perché per pesare la biomassa devo distruggere, per esempio nel caso di un campo di grano devo arare e pesare tutta la biomassa che questo campo produce. Come si procede nel caso del metodo del raccolto? Si opera un taglio della vegetazione al livello del suolo, quindi la biomassa viene seccata e successivamente pesata. La formula che descrive il metodo del raccolto è:

$$PP = DB + L + C.$$

PP = produttività primaria; DB = differenza del peso secco al tempo 1 e al tempo 2
L = perdita per morte dei tessuti; C = perdita dovuta al consumo da parte degli erbivori. Lo svantaggio di questo metodo è che molte volte si va a sottostimare la produzione perché non si può valutare la perdita dovuta al consumo da parte degli erbivori e quella dovuta alla morte dei tessuti cellulari. Siccome però per vegetazioni lunghe chilometri, io non posso tagliare la vegetazione per chilometri, allora questo metodo si rapporta a superfici più piccole. Viene circoscritta in un'area quadrata la parte di vegetazione di cui si vuole misurare la produttività, si fa seccare la vegetazione e la si pesa. Dopo qualche mese si può riefettuare la stessa procedura nello stesso quadrato, ripesando di nuovo il peso secco della vegetazione ricresciuta nello stesso quadrato, e fare la differenza tra i due momenti dell'anno. Più è grande la superficie di cui si vuole misurare la produttività e più quadrati si tagliano in un campo per fare la distinzione tra la produttività media nei vari mesi. Quindi, questo è un metodo che si usa per capire per esempio durante le stagioni dell'anno quant'è la produttività primaria. Il metodo del raccolto è vantaggioso perché non costa nulla, ma presenta anche dei limiti. Ci sono delle limitazioni:

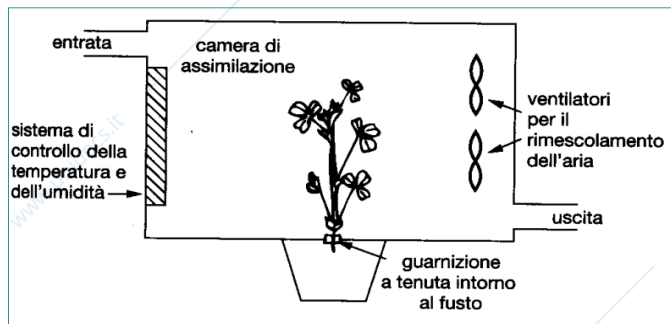
1. Non posso sapere quanta biomassa viene usata dagli erbivori, perché ad esempio l'erbivoro fa un buco nella foglia, quando vado a pesare la foglia, peserò la foglia con un buco e quindi chiaramente la foglia peserà di meno. Quindi, è un po' sottostimata questa biomassa.

2. Un altro punto di sottostima è la biomassa vegetale: io faccio il taglio della vegetazione al livello del suolo però non vado a considerare anche la biomassa radicale. (che a volte è anche maggiore) Quando la pianta accumula biomassa, una parte di biomassa si accumula nella parte epigea (parte superiore), l'altra nella parte ipogea (parte inferiore della pianta).

Il vantaggio quindi è che è costa poco ed è veloce ma lo svantaggio è che con questo metodo viene sottostimata la biomassa prodotta. Perciò, per valutare la biomassa ci sono dei metodi un po' più sofisticati di questo.

Camera di assimilazione

È un metodo che viene utilizzato in ambiente terrestre e non è distruttivo.



Consiste nel porre a piante all'interno di questa camera chiusa in cui c'è un flusso di entrata e un flusso d'uscita e al centro c'è la pianta che viene separata dal suolo. Com'è fatta questa camera? La pianta all'interno è viva, c'è un flusso di entrata, l'aria viene immessa in ingresso e poi viene fatta uscire. Ci sono poi all'interno di

questa camera tutta una serie di ventole che vanno a mescolare l'aria. All'interno della camera c'è un sistema di controllo di umidità e temperatura perché variando questi fattori può aumentare o diminuire la produttività primaria. Quello che si analizza con questo metodo è se l'aria che esce è uguale, come composizione, all'aria che entra. Chiaramente non sarà la stessa perché se la pianta fotosintetizza sottrae CO₂ e produce ossigeno, se la pianta respira produce CO₂ e sottrae ossigeno. Quindi, se in uscita rilevo meno CO₂ di quella che avevo in ingresso vuol dire che la pianta sta facendo fotosintesi, se invece fuori ho più CO₂ rispetto a quella che entra vuol dire che la pianta sta respirando. Si basa sul fatto che un organismo vegetale è capace di modificare l'aria presente in una stanza dove c'è flusso d'aria. L'aria è composta dal 78% di azoto, il 21% di ossigeno e da una piccola quantità di CO₂. Questo metodo non è adatto per estesi territori perché è chiaro che non possono essere confinati nella camera di assimilazione, è adatto solo per una pianta o per poche piante. Ma quando non ho una situazione del genere, ma ho ad esempio un esteso campo di mais di cui voglio misurare la produttività, utilizzo un metodo alternativo che è il **metodo aerodinamico**.

Metodo aerodinamico (si usa sempre in ambiente terrestre)

Con il metodo aerodinamico si valuta sempre la CO₂ che la pianta produce quando respira e assorbe quando fotosintetizza. Invece di mettere la pianta in un ambiente confinato, la si lascia in campo aperto. Sopra la copertura vegetale e dentro la copertura vegetale si mettono dei sensori che vanno a misurare tutti i fattori ecologici legati alla fotosintesi (sensore della temperatura, sensore della luce, sensore dell'umidità, il solarimetro che misura la radiazione solare ecc.). I campionatori di aria vengono messi a diverse altezze dal suolo, lungo il profilo della vegetazione e anche fuori dalla vegetazione, e tutta l'aria che prelevano, sia all'interno del campo che fuori al campo, va poi trasmessa agli analizzatori di gas ad infrarosso **IRGA** situati in un laboratorio mobile da campo. Questi analizzatori in base alla temperatura dell'aria, al vento, alla luce e ad altri fattori climatici, trasferiscono i dati a dei computer e forniscono una stima della produttività. I misuratori di gas ad infrarosso IRGA (infrared

gas analyzer) sono capaci di misurare la concentrazione di CO₂ perché la CO₂ è un gas che assorbe nell'infrarosso. In questo modo è possibile registrare la CO₂ assorbita o prodotta.

Metodo della clorofilla

La produttività in ambiente terrestre ed acquatico può essere stimata attraverso misure di clorofilla. La clorofilla è una delle prime cose che si deteriorano appena la pianta muore, quindi una pianta che non ha clorofilla non fa fotosintesi perché non capta energia luminosa. Più clorofilla ha, più vuol dire che la biomassa o la fitomassa è fotosinteticamente attiva. A seconda della comunità vegetale che andiamo ad esaminare, la quantità di clorofilla varia tantissimo perché dipende dagli autotrofi. Più autotrofi, più organismi che fanno fotosintesi e quindi più clorofilla. Questo metodo si usa per valutare la produttività in ecosistemi molto ampi. La clorofilla si misura generalmente in g/m².

Metodo della bottiglia chiara e della bottiglia scura

Uno dei metodi più utilizzati per stimare la produttività primaria in ambiente acquatico è il metodo della bottiglia chiara e della bottiglia scura. Si pongono dei campioni d'acqua in due bottiglie, una chiara e l'altra scura. Nella bottiglia chiara misuro la fotosintesi, nella scura misuro la respirazione della comunità perché non si può fare fotosintesi, in quanto la bottiglia è annerita, non c'è luce e la comunità non fotosintetizza. Ho bisogno perciò, di entrambe le bottiglie per capire il contributo degli autotrofi, degli eterotrofi e sommare se voglio calcolare la produttività lorda e sottrarre la scura alla chiara se voglio calcolare la produttività netta.

Metodo satellitare

Attualmente, tutte le stime di produttività primaria sul nostro pianeta si basano sul metodo satellitare. Si utilizza sia per ecosistemi terrestri che acquatici è il metodo satellitare. E' una stima satellitare ed è possibile grazie al fatto che la superficie terrestre è coperta da satelliti geostazionari, ossia satelliti che seguono l'orbita terrestre, che scattano foto in continuazione. Queste immagini sono nel visibile, come facciamo a leggere queste mappe? Le zone più verdi sono quelle più produttive della terra, le zone meno verdi sono quelle meno produttive, le zone blu scure sono gli oceani che non contribuisce con un'eccessiva produttività perché non c'è luce ma anche per la mancanza di nutrienti, le zone giallo-arancione sono le zone desertiche, verso il polo nord e il polo sud le zone bianche sono quelle dove c'è il ghiaccio (non produttività). Queste mappe attuali si muovono in continuazione stagionalmente, annualmente. E questo che cosa indica? Dal punto di vista stagionale c'è una variazione della produttività che è legata al fatto che molte piante non sono sempre verdi ma hanno la loro attività vegetativa massima soltanto in primavera-estate. Questa tipologia di mappe ci dà informazioni su quello che naturalmente avviene sul nostro pianeta alla biomassa vegetale, quindi la mutazione annua, stagionale, mensile. Però se noi facciamo una ricostruzione in base al tempo ci possiamo fare un'idea anche di come sta cambiando la produttività primaria.

Questo metodo si basa sul fatto che dal sole arrivano i raggi solari sottoforma di irradianza che colpisce l'organismo vegetale che incamera l'energia luminosa e riemette una radiazione sottoforma di radianza. In ambiente acquatico: la radiazione luminosa raggiunge la superficie del mare, penetra negli strati superficiali e viene assorbita dal fitoplancton. Questa radiazione va ad eccitare nel compartimento vegetale l'emissione di fluorescenza. La radianza emessa dalle clorofille viene captata da spettrometri presenti sui satelliti. Il satellite poi trasmette queste immagini a terra e l'immagine verrà elaborata con gli algoritmi specifici presenti nei computer.

L'emissione di fluorescenza è uno dei metodi più utilizzati sul nostro pianeta, anche al livello di una singola foglia, per capire lo stato di salute degli organismi vegetali. A seconda delle variazioni di radianza abbiamo un'indicazione sulla produttività di quegli ecosistemi. Solitamente, se l'emissione di fluorescenza è molto elevata il vegetale non sta proprio benissimo perché utilizza l'energia e non la incamera per fare fotosintesi. La fluorescenza emessa quindi viene captata da questi strumenti e tradotta in immagini. Possiamo avere due tipi di immagine: **immagini nel campo del visibile** che dipendono dalla luce riflessa, non sono immagini trasformate (la parte viva è la parte verde) e **immagini nel campo dell'infrarosso** consentono di vedere al buio, il colore che vediamo non è la luce riflessa dall'oggetto ma si tratta di una termoisimmagine, cioè riflette il calore per cui i corpi freddi hanno una riflessione diversa rispetto ai corpi caldi (la parte viva è la parte rossa mentre quella morta è nera). Nell'infrarosso le immagini sono disponibili sia di giorno che di notte perché l'immagine ad infrarosso non si basa su quello che l'occhio umano percepisce, ma si basa su delle misure termiche: la biomassa vivente emette calore, la biomassa morta no.

In generale, la produttività la possiamo misurare o come scambio di CO₂ e ossigeno, o come peso secco. Il peso è un sinonimo di quanta energia luminosa è stata convertita in energia chimica, e quindi in biomassa.

La fotosintesi

Il processo alla base della produttività primaria è la fotosintesi. Perché la fotosintesi è importante per gli esseri viventi? E' un processo vitale per gli esseri viventi perché innesca il flusso di materia e di energia nell'ecosistema. Le piante in questo modo producono cibo per sé stesse e sono fonte di cibo anche per gli organismi che vengono dopo nella catena alimentare, ovvero i consumatori. La pianta grazie alla fotosintesi sottrae dall'atmosfera CO₂ e vapore acqueo, restituisce all'atmosfera ossigeno e produce carboidrati per la produzione di biomassa. Le piante fungono da filtri per gli inquinanti. Si vede subito se nell'atmosfera c'è qualcosa che non va, perché mentre noi ci possiamo muovere tranquillamente, la pianta è un organismo sessile, per cui o trova il sistema per ovviare l'inquinamento o muore. Una foglia può subire inquinamento da piogge acide, da metalli pesanti, da ozono (O₃). Che cos'è il buco dell'ozono? Immaginiamo uno strato di atmosfera terrestre che ci protegge dai raggi solari. Lo strato di ozono (O₃) funge da filtro per le radiazioni ultraviolette. Il buco dell'ozono è il motivo per cui dobbiamo proteggerci dai raggi solari al mare. L'atmosfera terrestre si assottiglia in alcuni punti e questo assottigliamento comporta il fatto che alcuni raggi dannosi (soprattutto gli UV) possano penetrare all'interno della calotta atmosferica e arrivare fino alla terra. Questo non causerebbe problemi se non fosse però che l'UV è teratogeno, rompe il DNA causando delle mutazioni irreversibili sul DNA. Se arriva all'uomo può causare delle patologie anche mortali come i melanomi che sono dei tumori della pelle. In passato gli inquinanti che causano la riduzione dello strato di ozono erano di meno, adesso la cosa è diventata preoccupante perché lo strato si è assottigliato tantissimo.

La fotosintesi non è altro che il processo di organicazione del carbonio all'interno di molecole che contengono carbonio ridotto, come gli zuccheri esosi, che avviene attraverso l'utilizzo dell'energia luminosa. La fotosintesi nel passare da un'era geologica ad un'altra ha modificato l'atmosfera. Prima non vi erano organismi fotosintetizzanti autotrofi, quindi c'era una netta sproporzione tra la quantità di CO₂ e l'O₂. Successivamente con la colonizzazione da parte delle piante delle terre emerse questa percentuale è cambiata in favore dell'ossigeno, a discapito della CO₂,

arrivando fino alle concentrazioni attuali ([CO₂]= 0,03%, [O₂]= 21%). Di pari passo è cambiata la vita presente sul pianeta. In principio vi erano organismi anaerobi unicellulari, poi anaerobi pluricellulari, poi protisti e infine si sono evolute piante, funghi e animali. Vi sono due tipi di fotosintesi: **ossigenica** e **anossigenica**.

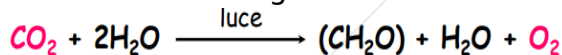
Che differenza c'è tra la fotosintesi ossigenica e anossigenica? La **fotosintesi ossigenica** richiede energia luminosa e libera ossigeno. La **fotosintesi anossigenica** è tipica dell'ambiente acquatico dove c'è poca luce, troppa poca luce per far avvenire quella ossigenica. Avviene ad opera di alcuni batteri. E' importante perché in questi ambienti dove non può avvenire la fotosintesi ossigenica, se non ci fosse questa non ci sarebbe produttività primaria. Sono entrambe importanti. La fotosintesi anossigenica è ritenuta una forma ancestrale, quindi è la prima forma di fotosintesi che è stata rilevata. Possono fare fotosintesi anossigenica batteri verdi sulfurei, batteri rossi sulfurei e batteri rossi non sulfurei. La fotosintesi anossigenica può essere presente in condizioni in cui vi è scarsità di ossigeno ma comunque vi passa la luce, come ad esempio appena al di sopra della zona afotica nella colonna d'acqua, quindi nella zona di transizione tra zona disfotica e la zona afotica. Gli organismi che effettuano la fotosintesi anossigenica possono anche essere anaerobi facoltativi, cioè effettuare di norma la fotosintesi ossigenica e di ricorrere a quella anossigenica in caso di necessità.

La formula generale della fotosintesi anossigenica è:



Anidride carbonica + acido solfidrico che mi dà un carboidrato + vapore acqueo + zolfo elementare. Se al posto dell'acido solfidrico c'è il tiosolfato S₂O₃, invece di avere come prodotto lo zolfo elementare avremo lo ione solfato SO₄. Questi batteri sono caratterizzati da **batterioclorofilla** che è un po' diversa dalla clorofilla normale.

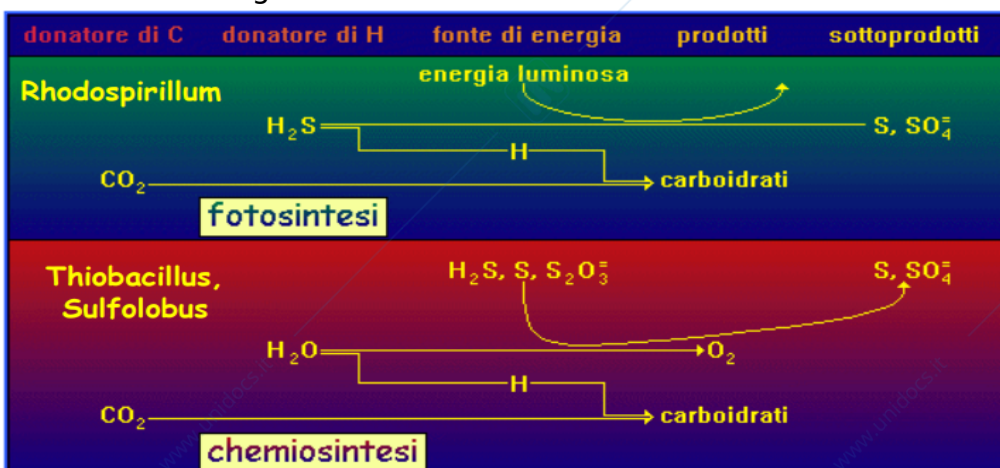
La fotosintesi ossigenica invece:



Quello che cambia è l'accettore di elettroni che nel caso della fotosintesi anossigenica è H₂S o S₂O₃, nel caso della fotosintesi ossigenica è l'acqua. Entrambe hanno bisogno di energia luminosa però una produce l'ossigeno e l'altra no.

La fotosintesi dei batteri è molto più semplice di quella delle piante. I batteri hanno un solo fotosistema (PSB) attaccato alla parete cellulare. Invece, nelle piante superiori la situazione si complica perché abbiamo due fotosistemi, il fotosistema I e II che cooperano tra di loro.

Alla base della produttività primaria oltre alla fotosintesi (ossigenica e anossigenica) troviamo anche la **chemiosintesi**. Alcuni solfobatteri sono in grado di compiere sia fotosintesi anossigenica che chemiosintesi.



Parallelismo tra fotosintesi anossigenica e chemiosintesi:

La fonte di carbonio è sempre la CO₂ però: nella fotosintesi anossigenica reagisce con H₂S e si formano come prodotti di reazione carboidrati e S₂ o SO₄ (dipende dalla fonte iniziale di zolfo). Questi batteri utilizzano energia luminosa. I batteri che fanno chemiosintesi utilizzano sempre CO₂ come fonte di carbonio ma al posto di H₂S hanno H₂O e come prodotto della reazione avranno sempre i carboidrati (perché comunque è una reazione di organizzazione del carbonio). Quello che cambia in questo caso è la fonte di energia, che non è l'energia luminosa, ma l'energia chimica sottoforma di composti inorganici.

Fotosintesi ossigenica

Il processo più importante però è sicuramente la fotosintesi ossigenica perché è responsabile del 21% di ossigeno che si trova nell'atmosfera. Avviene ad opera di piante verdi ed alghe. La fotosintesi ossigenica ha come donatore primario di elettroni l'acqua, con acqua ci riferiamo al vapore acqueo presente in atmosfera. $CO_2 + 2H_2O + \text{luce} \rightarrow (CH_2O) + H_2O + O_2$ si formerà glucosio, acqua, e ossigeno. Gli scambi gassosi di acqua e CO₂ avvengono attraverso gli **stomi**. Gli stomi sono quindi il veicolo di ingresso di CO₂ (quando diciamo ingresso di CO₂ chiaramente intendiamo anche vapore acqueo) e di fuoriuscita dell'ossigeno (quando fuoriesce l'ossigeno fuoriesce anche vapore acqueo). Gli stomi di una pianta non sono aperti tutti nello stesso modo, alcuni sono più aperti, altri sono aperti di meno e altri ancora sono completamente chiusi. Questo vuol dire che una pianta è in grado di regolare lo scambio gassoso. Più una pianta è capace di regolare l'apertura e la chiusura degli stomi più è in grado di limitare le perdite d'acqua. In ambiente arido questo sistema è fondamentale perché se tutti gli stomi fossero contemporaneamente aperti, la pianta morirebbe all'istante perché avrebbe un livello di traspirazione (perdita di acqua dai tessuti fogliari verso l'esterno = equivalente della nostra sudorazione) talmente veloce che seccerebbe in un secondo. Questo è il motivo per cui una pianta non va mai annaffiata di giorno. L'apertura e la chiusura degli stomi regolano quindi sia l'attività di traspirazione che quella di fotosintesi, stabilendo un equilibrio tra le due attività. La pianta può regolare l'apertura o la chiusura degli stomi in tempi diversi della giornata oppure effettuare il patching, ossia l'apertura e chiusura degli stomi in zone alterne. La struttura fondamentale affinché possa avvenire la fotosintesi clorofilliana è il **cloroplasto**, organello che presenta due membrane, una interna, ed una esterna. Internamente il cloroplasto è differenziato in un sistema di membrane dette **tilacoidi**, i tilacoidi sono impilati gli uni sugli altri come tante monete formano i **grana**. Lo spazio in cui sono immersi i grana costituisce lo **stroma**. Fare la distinzione tra tilacoidi impilati e non è importante perché alcune reazioni della fase luminosa avvengono nelle zone appressate dei tilacoidi, altre situazioni si verificano invece nelle zone non appressate. Il fotosistema II è presente nella membrana appressata, mentre il fotosistema I si trova nelle membrane non appressate. La luce che interessa la fotosintesi è quella compresa tra i 400 e i 700 nm (luce PAR radiazione fotosinteticamente attiva). La luce viene assorbita attraverso una serie di pigmenti fotosintetici che comprendono le clorofille (A e B), i carotenoidi e le ficobiline. Nei cianobatteri e nelle alghe marine possono esserci altri pigmenti (clorofilla C). La clorofilla è il pigmento per eccellenza che assorbe la luce, ma non basta perché le clorofille assorbono in specifici punti dello spettro di assorbimento. La funzione dei carotenoidi e delle ficobiline (pigmenti accessori) è quella di ampliare lo spettro di assorbimento. Ogni composto chimico ha un massimo di assorbimento in specifiche zone dello spettro. La fotosintesi ossigenica si divide in una fase luminosa ed una fase

oscura. Nella **fase luminosa** avvengono le reazioni di **trasduzione di energia**, in cui la luce assorbita dai pigmenti viene utilizzata come fonte di energia per rompere le molecole di acqua e per sintetizzare ATP (da ADP) e NADPH (da NADP⁺) che sono le molecole energetiche grazie alle quali potrà avvenire la fase oscura. Quindi, se la fase luminosa non funziona bene, non ci sarà la fase oscura perché non ci sarà l'energia che l'alimenta. La fase luminosa avviene a livello delle membrane tilacoidali, dove sono presenti il PSII, il citocromo b6f, il PSI, e la pompa ATP sintasi. La **fase oscura** avviene nello stroma del cloroplasto con le reazioni di fissazione del carbonio (ciclo di Calvin) in cui il carbonio della CO₂ è organizzato nella gliceraldeide 3-fosfato (G3P). I due fotosistemi PSI e PSII agiscono in sinergia e la loro attività avviene secondo lo schema Z, che rappresenta l'andamento del gradiente di energia. Secondo questo schema il PSII è più in basso rispetto al PSI perché l'energia viene trasferita da punti in cui è maggiore a punti in cui è minore. Il complesso antenna associato al PSII è costituito da pigmenti antenna quali carotenoidi e clorofille associati a proteine. I pigmenti antenna raccolgono l'energia luminosa e la trasferiscono per risonanza dipolo-dipolo al centro di reazione del PSII che è un dimerico di clorofille A. Questo trasferimento di energia è unidirezionale perché avviene secondo un gradiente di energia tale che l'energia non ritorna dal centro di reazione ai pigmenti antenna. Il centro di reazione del PSII è detto P680 perché presenta un picco di assorbimento a 680 nm. Il P680 eccitato cede due elettroni al plastochinone (PQ) nella prima reazione fotochimica di separazione di carica, riducendolo a plastochinolo (PHQ) e ritornando allo stato fondamentale. Gli elettroni persi dal P680 vengono riforniti dalla fotolisi dell'acqua. Dal plastochinolo parte la catena di trasporto di elettroni attraverso reazioni di ossidoriduzione. Gli elettroni attraverso il citocromo b6f e alla plastocianina, giungono al fotosistema I. Il PSI presenta un complesso antenna esterno formato da clorofilla A, B e carotenoidi associati a proteine, che raccoglie l'energia luminosa e la convoglia al centro di reazione, costituito da un dimerico di clorofilla A chiamato P700 perché ha un picco di assorbimento a 700 nm. Quando il P700 viene eccitato avviene la seconda reazione fotochimica di separazione di carica, in cui il P700 cede due elettroni alla ferredossina, la quale li cede alla NADPriduttasi, che riduce NADP⁺ a NADPH. Durante il passaggio di elettroni tra i vari componenti della catena di trasporto fotosintetica più volte vengono immessi dallo stroma al lume tilacoidale dei protoni, che vanno a generare quindi un gradiente elettrochimico attraverso la membrana tilacoidale. Questo gradiente viene sfruttato dal complesso della ATP sintasi per produrre ATP da ADP e gruppi fosfato. Che fine fanno ATP e NADPH? Vanno nella fase oscura che è il ciclo di Calvin-Benson, che è il ciclo C₃ di organizzazione del carbonio. Si parla di ciclo C₃ perché il primo composto che si forma è a tre atomi di carbonio. Questo ciclo consiste di tre passaggi fondamentali. Il primo passaggio consiste in una carbossilazione, le piante C₃ aprono gli stomi ed entra CO₂ che reagisce con ribulosio 1,5bisfosfato (un composto a 5 atomi di C) ed interviene l'enzima Rubisco (ribulosio 1,5-bisfosfato carbossilasi/ossigenasi), formando un intermedio instabile a 6 atomi di carbonio che viene scisso in due molecole di 3PGA (acido 3fosfoglicerico). Si chiama carbossilazione quindi perché viene aggiunto un carbonio al ribulosio. Il secondo passaggio implica una riduzione dell'acido 3-fosfoglicerico a gliceraldeide 3fosfato, in cui viene utilizzato il NADPH della fase luminosa. Una parte di G3P viene indirizzata al metabolismo degli zuccheri, andando a formare saccarosio ed amido, un'altra parte entra nel terzo processo del ciclo C₃ che consiste nella rigenerazione del ribulosio 1,5bisfosfato perché il ciclo possa ricominciare. Durante la fase oscura vengono consumati 3 ATP e 2 NADPH per ogni molecola di CO₂, quindi 9 ATP e 6 NADPH per ogni molecola di G3P prodotta. Per

formare uno zucchero a 6 atomi di C a partire da 3 molecole di CO₂ il ciclo si deve ripetere due volte.

Fotorespirazione

La Rubisco (che è l'enzima più abbondante) ha una duplice natura si può comportare da ossigenasi o da carbossilasi; può sia utilizzare la CO₂ come substrato (ciclo di Calvin), sia ossigeno (ciclo C₂). Il ciclo C₂ è il ciclo del 2-fosfoglicolato, ossia il processo di **fotorespirazione**. La fotorespirazione si distingue dalla respirazione: la fotorespirazione avviene nel cloroplasto e in presenza di luce, invece, la respirazione cellulare avviene nel mitocondrio. Se invece della CO₂, l'accettore degli elettroni nella fotosintesi è l'ossigeno, si formano le specie reattive dell'ossigeno che sono dannose (come l'acqua ossigenata). Quando la Rubisco agisce come ossigenasi non forma due composti a tre atomi di carbonio ma due composti, uno con due atomi di carbonio (2fosfoglicolato) e l'altro con tre atomi di carbonio (3PGA). La fotorespirazione è fondamentale per la pianta per evitare il fenomeno della fotoinibizione. Quando viene prodotto troppo ATP e troppo NADPH una parte di questi viene deviata nel processo di fotorespirazione che può essere considerata una valvola di sfogo dei processi di fotosintesi. In atmosfera l'ossigeno (21%) è molto più concentrato rispetto alla CO₂ (0,03%). Tuttavia l'attività della Rubisco che normalmente prevale è quella carbossilasica perché la CO₂ nella pianta diffonde meglio dell'ossigeno.

Metabolismo C₄

Esistono anche piante con fotosintesi C₄. Quando fa molto caldo o c'è eccessiva quantità di luce, la pianta C₄ funziona meglio della pianta C₃. Un esempio di pianta con fotosintesi C₄ è la pianta di mais che vediamo in estate perché tollera molto bene la siccità, la luce, la temperatura elevata. Queste piante hanno un'anatomia a corona, in cui le cellule del mesofillo circondano come una corona quelle della guaina del fascio. Queste piante sono caratterizzate da due carbossilazioni: la Rubisco fa la carbossilazione secondaria, mentre la carbossilazione primaria avviene ad opera della fosfoenolpiruvato carbossilasi (PEPC). La CO₂ entra sempre grazie agli stomi. Nelle piante C₄ la CO₂ entra come ione bicarbonato e non trova la ribulosio-1,5- bisfosfato, ma trova un altro composto che è il fosoenolpiruvato. Le reazioni di carbossilazione primaria avvengono nelle cellule del mesofillo fogliare, mentre le reazioni di carbossilazione secondaria avvengono nelle cellule della guaina del fascio. La CO₂ viene aggiunta al fosoenolpiruvato (PEP) che è un composto a tre atomi di carbonio, formando un composto a quattro atomi di carbonio, l'**ossalacetato**. L'ossalacetato viene ridotto ad acido malico. L'acido malico passa dalle cellule del mesofillo alle cellule della guaina del fascio dove viene decarbossilato ad opera dell'enzima malico, rilasciando CO₂ e piruvato (a 3C). Il piruvato torna nelle cellule del mesofillo e viene fosforilato dalla piruvato chinasi riformando il fosfoenolpiruvato. La CO₂ liberata dall'enzima malico viene carbossilata dalla rubisco. Quindi, le piante C₄ sono soggette a due carbossilazioni. Nelle piante C₄ la fosfoenolpiruvato carbossilasi non ha assolutamente attitudine con l'ossigeno, quindi quest'enzima è solo carbossilante. Nella guaina del fascio inoltre si viene a creare una concentrazione di CO₂ che favorisce l'attività carbossilasica della Rubisco a discapito dell'attività ossigenasica e quindi si ha una quantità minore di fotorespirazione rispetto alle piante C₃. È importante questo metabolismo per le piante che vivono in ambienti aridi.

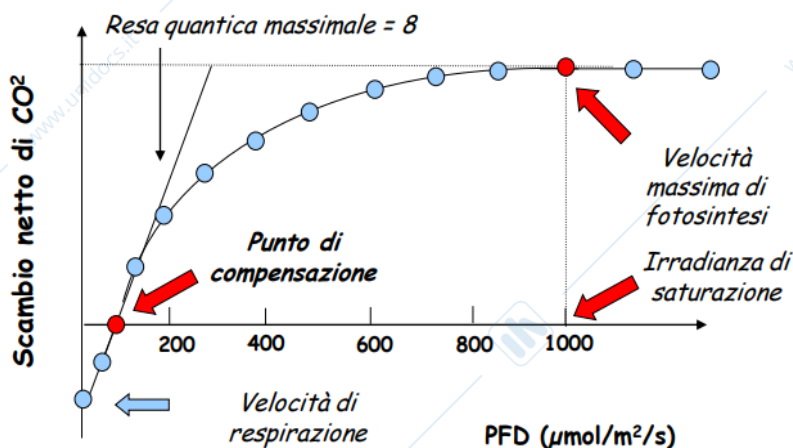
Il metabolismo CAM

In natura esiste un terzo tipo di fotosintesi che dal punto di vista ecologico è più importante, perché dà alle piante la possibilità di vivere nei deserti, in ambienti molto aridi. Si chiama metabolismo CAM, dove CAM sta per metabolismo acido delle

crassulacee (piante grasse), si chiama metabolismo acido perché si forma l'acido malico (per capire se una pianta è CAM o meno si misura la concentrazione di acido malico). È tipico infatti delle piante grasse che hanno un parenchima acquifero molto sviluppato. Gli stomi in queste piante si aprono di notte consentendo di limitare al massimo le perdite di acqua per traspirazione, perché durante la notte vi sono temperature più basse perché nei deserti c'è una forte escursione termica, di giorno ci sono 40° e di notte anche 20° Le. Nelle piante CAM le reazioni chimiche sono identiche a quelle del metabolismo C4. Però c'è una differenza, nelle piante C4 ci sono due carbossilazioni che sono separate spazialmente, cioè avvengono in due tipi di cellule diverse. In questo caso, ci sono sempre due carbossilazioni, ma entrambe avvengono nella stessa cellula: tutto avviene nel mesofillo fogliare. C'è una separazione temporale tra le due carbossilazioni, nel senso che di notte gli stomi si aprono, entra CO₂ e si ha la carbossilazione primaria della fosfoenolpiruvato carbossilasi; di giorno gli stomi si chiudono, la CO₂ viene incamerata durante la notte come acido malico, questo di giorno viene spaccato in CO₂ e piruvato e la CO₂ entra nel ciclo di Calvin, quindi di giorno avviene la seconda carbossilazione. Le **piante CAM obbligate** hanno un metabolismo CAM di tipo costitutivo, nascono CAM e muoiono CAM. Le **piante CAM facoltative** o **inducibili** sono C3 o C4 che quando le condizioni diventano sfavorevoli possono spostarsi ad un metabolismo CAM per poi ritornare al proprio metabolismo quando si sono riprese dallo stress. Le **CAM idling** chiudono gli stomi sia di giorno che di notte e utilizzano la CO₂ interna prodotta per respirazione, che è pochissima rispetto a quella che la pianta potrebbe assumere dall'atmosfera. Le piante CAM idling sono in genere piante CAM facoltative che si vengono a trovare in condizioni di aridità estrema, temperature elevate. Questo tentativo estremo di sopravvivenza che attua la pianta può essere valido solo per uno due mesi, altrimenti la pianta muore perché non essendoci traspirazione la temperatura diventa elevatissima e non vengono liberate tossine. Le piante CAM sono altamente efficienti ma molto lente nella crescita.

La luce e la fotosintesi

Come varia l'attività fotosintetica se aumentiamo la luce? L'attività fotosintetica è strettamente dipendente dall'irradianza.



Questa relazione è descritta da una curva. Sull'asse delle ascisse poniamo la densità di flusso fotonico fotosintetico (PFD), che si misura in micromoli fotoni metroquadrato/secondo. Mentre sull'asse delle y consideriamo lo scambio netto di CO₂ perché consideriamo sia la respirazione che la fotosintesi. La curva non parte mai da zero perché

vorrebbe dire che la pianta è morta, non fa respirazione, invece parte sempre da un valore negativo, dopo lo zero comincia la fotosintesi. Al buio la pianta respira e lo scambio di CO₂ è negativo, poi man mano che aumenta l'irradianza, la **velocità di respirazione** diminuisce e la curva ad un certo punto tocca l'asse delle x e in questo caso lo scambio netto di CO₂ è zero. Si parla di **punto di compensazione** cioè tanta CO₂ viene assorbita quanta CO₂ viene rilasciata, in poche parole la fotosintesi diventa

uguale alla respirazione. Da questo punto in poi la curva comincia a crescere, in maniera quasi proporzionale alla densità di flusso fotonico, fino ad arrivare ad un punto massimo in cui la fotosintesi non aumenta più, nel senso che è stata raggiunta la **massima velocità di fotosintesi** che varia da pianta a pianta, in base al regime luminoso in cui cresce la pianta. Quando ci troviamo in questo punto vuol dire che anche se forniamo alla pianta ancora più luce, la fotosintesi non aumenta più. Questo punto di velocità massima di fotosintesi, se lo proiettiamo sull'asse delle y, rappresenterà **l'irradianza di saturazione** che è quell'irradianza che serve alla pianta per avere la massima fotosintesi. In questa curva quindi ci sono 4 punti importanti da considerare: la velocità di respirazione, il punto di compensazione, la velocità massima di fotosintesi e l'irradianza di saturazione. Questi quattro punti variano a seconda della pianta che stiamo considerando e in base anche al loro metabolismo, perché piante con metabolismo differenti sono abituate a regimi luminosi completamente differenti. Una pianta che è abituata a crescere al sole, avrà ad esempio una velocità massima di fotosintesi più alta rispetto ad una pianta che è abituata a crescere al buio. Un'altra cosa molto importante da notare in questa curva è che c'è una zona che è la **zona di massima linearità**. In questa zona, i punti sono allineati tutti su una retta, in ecologia questa zona costituisce quella che si chiama **resa quantica massimale**. In questa zona c'è una diretta proporzionalità tra la densità di flusso fotonico e lo scambio netto di CO₂. Ad un certo punto questa proporzionalità viene interrotta e questo vuol dire che stiamo dando alla pianta più luce di quanta gliene serve per fare fotosintesi. Però se la pianta non è in grado di smaltire questo eccesso di luce, è come se quella luce diventasse fattore limitante. E' vero che la luce è positiva per la pianta però se ce n'è troppa è come se l'apparato fotosintetico non ce la facesse a smaltire questo eccesso di luce, perché la luce in eccesso non fa fotosintesi, ma viene dissipata termicamente. Tutti i fattori che abbiamo visto in questo grafico cambiano in base al tipo di pianta, quello che non cambia mai, è la resa quantica massimale che per le piante C3-C4 non cambia mai, ha un valore fisso che indica il rapporto 1:1 che c'è tra lo scambio netto di CO₂ e l'irradianza.

La fotoinibizione

Si verifica quando l'apparato fotosintetico assorbe più energia luminosa rispetto a quella che può essere utilizzata nella fotosintesi. In ambiente naturale ciò accade sempre. Come si difendono gli organismi vegetali? Grazie a delle strategie fotoprotettive che mettono in atto. Queste strategie sono di due tipi: **strategie di evitamento o strategie di tolleranza**.

Tra le strategie di evitamento, che evitano proprio che ci sia un eccesso di energia luminosa, troviamo:

- movimento fogliare: le foglie possono muoversi per captare più o meno luce;
- movimento dei cloroplasti: i cloroplasti possono muoversi nella cellula, perché non sono fissi, ma si muovono lungo la parete cellulare per cercare o per evitare la luce;
- peli, cere costituiscono un deterrente per l'eccesso di luce perché è come se facessero da schermo;
- variazione del numero di pigmenti: la pianta può sintetizzare più o meno pigmenti all'occorrenza. Se c'è poca luce c'è maggiore sintesi di pigmenti, perché deve essere presa più luce possibile, quando invece c'è tanta luce, spesso i pigmenti sono minori.

Le strategie di tolleranza sono strategie al livello corporale che vengono messe in atto durante la fase luminosa della fotosintesi e permettono di smaltire l'eccesso di luce o con una dissipazione fotochimica o con una dissipazione termica. E' possibile indagare le strategie di tolleranze attraverso dei fluorimetri che sono degli strumenti che misurano la fluorescenza emessa da parte della clorofilla. Quando la luce colpisce la

foglia, può avere 3 destini: può seguire la via fotochimica (ovvero fa fotosintesi), può essere dissipata come fluorescenza o può essere dissipata come calore. Più la fotosintesi è alta, più sono basse la fluorescenza e l'emissione di calore. Quindi, con la tecnica della fluorescenza è possibile capire se c'è un eccesso di luce al livello dell'apparato fotosintetico. La fotoinibizione si verifica ad elevate irradianze, ma anche ad irradianze moderate. Perché quando le irradianze sono basse però per esempio ci sono basse temperature, la pianta fotosintetizza, ma la fotosintesi è bassissima. Quindi, le irradianze normalmente positive per la pianta, possono diventare negative e causare fotoinibizione, quando un fattore ecologico non è in condizione perfetta, in questo caso la temperatura.

La decomposizione

Nella catena del detrito si svolgono i processi di decomposizione della materia organica.

La decomposizione è la degradazione della materia organica morta dalla quale si ricavano i mattoncini attraverso i quali si può poi ricostruire nuova biomassa. Si parla di riciclo della materia perché gli elementi chimici (sodio, potassio, fosforo ecc.) possono essere riutilizzati più volte per la costruzione della materia organica. Il funzionamento di ogni ecosistema dipende dalla stretta interrelazione che si realizza entro i tre distinti comparti funzionali: il sottosistema dei produttori, quello dei consumatori e quello dei decompositori (esterni alla catena alimentare). Vi devono essere tutti e tre i sottosistemi affinché il flusso di energia ed il riciclo della materia possa procedere, consentendo all'ecosistema non solo di esistere, ma di evolversi e tendere verso l'equilibrio dinamico. La materia organica morta (detrito) può derivare da tutti e tre i sottosistemi perché sia produttori, sia consumatori, sia decompositori alla loro morte rilasciano detrito. Generalmente però quando si parla di **lettiera** (strato superiore del suolo), si tratta di necromassa vegetale dato che è la più abbondante e si degrada più lentamente, consentendo così allo sperimentatore di studiarla e di capire fisicamente come procede il suo processo decompositivo. La lettiera vegetale rispetto a quella animale è molto più abbondante perché i produttori sono di più rispetto ai consumatori.

Chi sono i decompositori? Noi possiamo distinguere:

-I **veri decompositori** che sono funghi e batteri

-I **falsi decompositori** che non sono dei decompositori veri e propri, cioè non possono cambiare la consistenza della materia organica ma contribuiscono alla decomposizione come ad es. i coleotteri, gli insetti del suolo, tutti gli organismi che albergano nel suolo sono importanti per il processo decompositivo.

La decomposizione è stata definita in diversi modi:

Nel 1972 Wetzel la definisce come: sostanza organica appena morta, ovvero insieme di tutte le perdite non predatorie di carbonio di qualsiasi livello trofico che potevano essere autoctone o alloctone, per cui viene prodotto direttamente dal sistema dove avviene la decomposizione, o di origine alloctona se viene prodotto da sistemi vicini e viene trasportato dal vento, dall'acqua, o dal corpo di un organismo che proviene da un ecosistema vicino.

La definizione più completa è quella di Odum che definì la decomposizione come il processo di ossidazione biologica della materia organica morta (detrito), attraverso cui si libera l'energia presente in essa. La decomposizione può avvenire sia in ambiente acquatico, sul fondo o in superficie, che in ambiente terrestre, sul suolo e nel sottosuolo.

La quantità di materia organica morta che giunge al suolo, ovvero la lettiera vegetale dipende:

- dalla produttività di un ecosistema (più è efficiente la fotosintesi, maggiore, di conseguenza, sarà la materia organica morta che raggiunge il suolo ed entra a far parte del riciclo della materia) ed è quindi influenzata dal clima e dal tipo di vegetazione; nella foresta pluviale si ha una maggiore produzione perché i fattori climatici non sono limitanti.
- dal grado di copertura vegetale e quanto essa è stratificata;
- dall'età dell'ecosistema.

I passaggi fondamentali della decomposizione sono: si parte dalla lettiera animale o vegetale (materia organica morta), s'instaura la catena del detrito e si ha:

- la **mineralizzazione**, ovvero trasformazione dalla materia organica a materia inorganica, in particolare di nutrienti prontamente utilizzabili dalle piante (mineralizzazione primaria). E' un processo veloce;

- l'**umificazione**: accumulo e degradazione di materia organica complessa (mineralizzazione secondaria). Non tutta la materia organica arriva al suolo mineralizzata, liberando velocemente i componenti inorganici in essa presenti (mineralizzazione primaria), una parte di essa infatti viene conservata, fornendo la fertilità residua, ovvero va a costituire un pool di riserva che viene mineralizzato nel momento in cui nel sistema la lettiera scarseggia. Nel bioma mediterraneo esiste la stagionalità, quindi si ha maggior produzione di lettiera in autunno nella foresta, quando cadono le foglie, e in estate nella prateria, quando le erbacee seccano. Ci sono quindi periodi dell'anno in cui la materia organica viene prodotta in scarsa quantità, allora in quel caso interviene il pool di riserva della materia organica residua che viene decomposta lentamente. Non tutta la foglia viene degradata velocemente: esiste una parte della materia organica a minore degradabilità che viene definita recalcitrante alla decomposizione, ed è quella che va a costituire il pool di riserva. Tale porzione viene umificata, cioè va a costituire l'**humus** (sostanza organica del suolo a lenta decomposizione), un composto ancora più complesso della materia organica originale, che viene formato in seguito a processi di condensazione. L'humus conferisce fertilità al suolo perché rilascia i nutrienti in maniera molto lenta. L'humus è un composto colloidale amorfo, dalla struttura eterogenea e complessa e richiede organismi specifici per la sua degradazione, che prende il nome di **mineralizzazione secondaria**. Sia la mineralizzazione primaria che quella secondaria avvengono simultaneamente, anche sulla stessa materia organica morta. La mineralizzazione può avvenire:

- in condizioni di aerobiosi con la produzione di componenti inorganici (nutrienti, H₂, NH₄⁺, H₂S, CO₂) che poi possono subire ulteriori processi di ossidazione;
- in condizioni di anaerobiosi, in cui il prodotto principale è rappresentato dal metano, prodotto attraverso processi di metanogenesi.

Quando gli organismi decompositori arrivano sul tappeto forestale, si dice che si instaura una **successione ecologica** nel senso che non è lo stesso organismo che prende la foglia verde e la degrada fino ad arrivare allo scheletro della foglia, o che prende l'animale e lo degrada fino ad arrivare allo scheletro dell'animale, ma è una successione di organismi. Anche in questo caso è possibile distinguere:

- **organismi generalisti**: i batteri che attaccano la matrice organica dopodiché vanno via perché non ci sono più le condizioni trofiche adatte.
- **organismi specialisti**: i funghi decompositori che intervengono successivamente nel processo di degradazione.

I processi di decomposizione

La decomposizione è il risultato di tre processi:

- **lisciviazione**, ossia la rimozione del materiale idrosolubile (dal 5% al 35%) dalla materia organica da parte dell'acqua. In un luogo in cui piove poco la lisciviazione giocherà un ruolo irrisorio, quindi la sua azione dipende sia dal clima, che dalla stagione; a novembre ad esempio, quando le foglie sono appena cadute, la lisciviazione gioca un ruolo fondamentale perché le foglie sono ancora ricche di materiale idrosolubile. In inverno la maggior parte della componente idrosolubile è già stata allontanata, quindi la lisciviazione è minore nonostante le piogge siano ancora presenti;

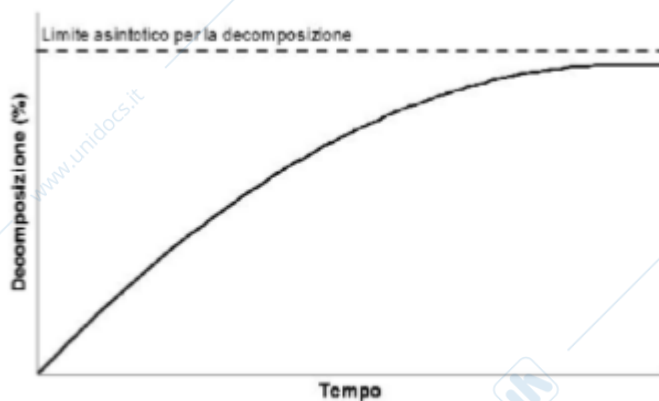
- **frammentazione**, che prevede la riduzione meccanica delle dimensioni della lettiera. La lettiera è soggetta all'attacco da parte dei microrganismi, quali funghi e batteri (microflora e microfauna). Non la modificano chimicamente, ma la sminuzzano riducendola in pezzi più piccoli in maniera tale che gli altri organismi decompositori li possano attaccare più facilmente.

- **catabolismo**, che consiste in una serie di reazioni chimiche attuate dai microrganismi del suolo, cioè batteri e poi funghi, che in qualche modo degradano chimicamente questa sostanza organica. Le reazioni cataboliche possono essere complete, portando direttamente alla formazione di componenti inorganici, o incomplete, portando alla formazione di composti ulteriormente degradabili.

La velocità e l'incidenza dei diversi meccanismi nel processo decompositivo dipendono da un complesso insieme di fattori e dalle loro interazioni.

Modello asintotico per la perdita in peso della lettiera in decomposizione

Numerosi sono i modelli che spiegano il processo decompositivo. Uno dei più semplici è il modello asintotico che valuta la perdita in peso della lettiera in decomposizione in rapporto al tempo.



Questo andamento è rappresentato da una curva esponenziale. Sull'asse delle ascisse indichiamo il tempo, e sull'asse delle ordinate la decomposizione in termini di percentuale. L'equazione di questa curva è: $m.l. = m(1 - e^{-kt/m})$ dove: - m.l. (mass loss) è la perdita di peso in %; - t è il tempo espresso in giorni; k è la velocità di decomposizione, - m rappresenta la massima perdita di peso che quella lettiera può

raggiungere ed è detto anche "**valore limite di decomposizione**" (limite asintotico per la decomposizione). È il punto in cui la perdita di peso sembra arrestarsi, ma in realtà essendo una curva asintotica si avvicina a quel limite ma non lo tocca mai, quindi vuol dire che il processo non è mai completo al 100%. Questo è dovuto al fatto che man mano che l'organismo si decompone, vengono consumate prima le sostanze più appetibili, gli zuccheri semplici, le proteine ecc. e rimangono le sostanze più recalcitranti, cioè resta la lignina, la cellulosa e nel caso del corpo umano le ossa che sono più lentamente degradabili. Quanto più è alto il valore limite di decomposizione, più la materia morta è degradabile. Se i valori limite sono alti, la maggior parte della

lettiera è composta da sostanze semplici e quindi vi sono poche sostanze molto recalcitranti. Un altro parametro importante da considerare, sempre all'interno dell'equazione, è K cioè la velocità di decomposizione. C'è una prima fase in cui la velocità di decomposizione è molto alta, una seconda fase in cui la velocità è intermedia e una terza fase in cui la decomposizione è sempre più lenta fino a fermarsi. Con il passare del tempo la velocità rallenta visto che i componenti più semplici da degradare. Ciò che rimane è via via più recalcitrante, fino a che si arriva ad uno stato stazionario in cui ciò che rimane è la riserva, ciò che diventerà humus. L'humus dà origine ad una degradazione molto lenta.

Quali sono i fattori che regolano la decomposizione?

-clima;

-qualità della lettiera: cioè da che cosa è chimicamente costituita quella lettiera;

-organismi del suolo: tipologia degli organismi che sono presenti nel suolo. La velocità di degradazione della lettiera, oltre al clima e qualità della lettiera è anche influenzata dalla presenza di pedofauna, costituita da microfauna (batteri e funghi decompositori), mesofauna e macrofauna.

Il processo degradativo è facilitato dalla disponibilità di carbonio e nutrienti, infatti, una lettiera è più appetibile quando è costituita da maggiori quantità di N, S, P, sostanze organiche solubili favorendo così l'attacco dei microrganismi. Man mano queste sostanze cominciano a diminuire e nella seconda fase la velocità di decomposizione è regolata dalla velocità di biodegradazione della lignina (una molecola complessa a lenta degradazione). Una lettiera costituita maggiormente da tessuti di sostegno, quali lignina e cellulosa, è meno degradabile, quindi le sostanze lignino-simili influiscono negativamente sulla velocità di decomposizione. La lignina è degradata maggiormente da funghi, in particolare da funghi del marciume bianco che hanno enzimi che usano come cofattore il Mn. Quando arriviamo all'ultima fase è l'accumulo di humus che regola la velocità del processo. Manganese e azoto compaiono su tutta la curva, ma la loro azione cambia lungo il processo degradativo. Il manganese aiuta la sintesi di enzimi degradativi. Quindi, il manganese ha sempre un'azione positiva. L'azoto è un nutriente, quindi migliora la qualità della lettiera nelle prime fasi, ma ad alte concentrazioni può inibire molte famiglie di funghi, compresa quella del marciume bianco; inoltre l'azoto può entrare in reazioni, quale quella di condensazione, e rendere le molecole formatesi ancora più complesse, meno attaccabili dagli organismi decompositori, motivo per cui l'azoto ha un ruolo ambivalente nel processo degradativo, in particolare ha un ruolo positivo nella prima fase mentre un ruolo negativo nelle restanti fasi.

Il clima

Il clima influenza maggiormente le prime due fasi. Come fa il clima ad influenzare la decomposizione?

-agisce sulla temperatura;

-agisce sull'umidità;

-agisce sull'indice di evapotraspirazione. La velocità di degradazione della lettiera è più elevata negli ambienti caldo-umidi che in quelli temperato-freddi ed è negativamente correlata con l'altitudine. Un ambiente caldo umido più esteso della terra è la foresta tropicale. Nelle foreste tropicali si verifica un paradosso ecologico perché le foreste tropicali sono ricche di alberi, per cui hanno la biomassa vegetale più grande al mondo. Se c'è tanta biomassa vegetale viva, vuol dire che c'è anche tanta biomassa vegetale morta, quindi ci vuole anche molto tempo per degradarla, eppure

la foresta tropicale è l'unico punto della Terra in cui la velocità di decomposizione è uguale a quella di produzione. Questo perché le condizioni meteorologiche sono talmente favorevoli per gli organismi decompositori che la sostanza organica viene degradata immediatamente, appena tocca il tappeto forestale. Non ci sono mai momenti in cui questi organismi non lavorano. Perciò, possiamo dire che nella foresta tropicale tanta biomassa si produce quanta biomassa si degrada. Negli ecosistemi freddi, invece, si verifica un accumulo di sostanze organiche sul suolo perché la decomposizione è più lenta, questa sostanza si accumula e infine andrà a formare l'humus.

Qualità della lettiera

Un altro fattore che regola la decomposizione è qualità e la quantità della lettiera. La quantità è quanta materia cade sul tappeto forestale, la qualità dipende dalla composizione della lettiera: per esempio se sono presenti più carboidrati, più lipidi o più sostanze recalcitranti. La qualità rappresenta la decomponibilità del materiale organico e quindi la suscettibilità all'attacco microbico e dipende:

- dalla dimensione delle molecole (più piccole sono e più facilmente vengono degradate);
- dal tipo di legami chimici (il legame semplice si rompe più facilmente rispetto ai doppi o ai tripli legami);
- dalla tossicità (es. alcaloidi e fenoli, questi i microrganismi non possono degradare la lettiera se prima non evolvono meccanismi di detossificazione);
- dalla regolarità della struttura e dalla concentrazione di nutrienti e di lignina. La lettiera vegetale si decompone molto lentamente. Nel giro di 6-7 mesi tutta la materia organica morta del corpo di un granchio viene mineralizzata, invece, nel caso della lettiera vegetale, ci vuole più tempo. Fondamentale è anche il contenuto di nutrienti, se la lettiera è ricca di nutrienti viene degradata velocemente. Se invece è povera di nutrienti, la lettiera non viene degradata perché gli organismi non hanno l'energia (sottoforma di nutrienti) per farlo.

Caratteristiche chimico-fisiche del suolo

Il sito in cui avviene la degradazione è importante non solo per le variazioni climatiche, ma anche per le caratteristiche del suolo, come la **tessitura**, la **permeabilità**, l'**aerazione**, il **pH**, la **temperatura**, la **capacità di scambio cationico**, ecc. Abbiamo detto che sulla lettiera si instaura una vera e propria successione di organismi. La diversità della microflora decompositrice decresce via via che specie meno numerose, ma più specializzate, si impiantano sui residui più resistenti. Nel processo di degradazione intervengono i primi batteri, poi intervengono i funghi che sono specialisti per quanto riguarda la nicchia trofica. Esistono diversi tipi di funghi: ci sono alcuni funghi che intervengono prima nel processo di decomposizione e sono i funghi del marciume bruno, poi intervengono i funghi del marciume bianco che possiedono gli enzimi per degradare la lignina. La macrofauna e la mesofauna intervengono nella frammentazione non trasformano chimicamente la materia organica, la microfauna (cioè protozoi, batteri intervengono nel processo di degradazione chimica della materia organica). Come faccio a capire se si tratta di micro, macro o mesofauna? Si va a misurare. Batteri, funghi, protozoi, nematodi sono grandi pochi micrometri, mentre invece alcuni lombrichi sono lunghi anche 15 cm. Che ruolo hanno la micro, macro e mesofauna nel processo di decomposizione, chi è più importante? Sono tutte e tre importanti, perché a seconda dei tipi di ecosistema prevarrà la micro, la macro o la mesofauna. Generalmente, nei deserti tropicali e nelle foreste tropicali sono più abbondanti meso e macrofauna. Mentre invece quando ci

spostiamo nei deserti freddi la microfauna diventa più importante perché la macrofauna comincia a scomparire. Man mano che ci spostiamo da un clima secco-umido ad un clima freddo, lo sminuzzamento della lettiera diminuisce perché le condizioni diventano meno idonei e quindi meno organismi partecipano alla decomposizione. Contemporaneamente si accumula materia organica al suolo.

Metodi di studio

Come si studia la decomposizione? Ci sono metodi di campo e di laboratorio. Il metodo maggiormente utilizzato è quello delle **"litterbags"** (sacchetti di lettiera). Si raccoglie la lettiera (la parte superiore del suolo) e si conserva all'interno di sacchetti che sono costituiti da materiale non facilmente degradabile (non contenente azoto, non interferisce con il processo decompositivo); la scelta delle maglie è molto accurata, in quanto deve trattarsi di maglie che consentano ai frammenti di lettiera nella parte finale del processo decompositivo di non essere persi e allo stesso tempo maglie abbastanza grandi da non bloccare l'ingresso della mesofauna e la macrofauna. Raccolta la lettiera, questa viene pesata in quantità ben precise e messa in sacchetti, al cui interno vi sono delle etichette che riportano il peso segnato in precedenza e poi si va a pesarli ad intervalli regolari (dopo una settimana, un mese, un anno), vengono ripresi tali sacchetti e pesati, facendo una differenza tra il peso iniziale e quello trovato al momento della ripresa e si ha, così, una percentuale del peso rimanente (non del peso perso e infatti la curva non è asintotica, ma è una curva che parte dall'alto e poi diminuisce sempre di più).

La luce

La luce agisce come risorsa perché può essere utilizzata dagli organismi fotoautotrofi per la fotosintesi, ma agisce anche come condizione perché influenza alcuni processi particolari, come la fioritura, la gemmazione, la muta, la deposizione o la schiusa delle uova. Tutti questi sono processi che dipendono dal fotoperiodo. Tutti gli ambienti sia terrestri che acquatici sono dominati dalla radiazione solare che comprende:

- l' **ultravioletto**;
- il **visibile**;
- l' **infrarosso**.

Lo spettro del visibile è fondamentale per il processo di fotosintesi. L'ultravioletto per noi è molto dannoso e infatti viene assorbito dallo strato di ozono. La radiazione dell'infrarosso è assorbita dalla CO_2 e dal vapore acqueo. La superficie terrestre, così come tutti gli organismi viventi, assorbe la luce e la riemette sotto forma di energia termica (quindi di radiazioni nell'infrarosso). Quando un organismo assorbe radiazione infrarossa si riscalda, mentre quando emette radiazione infrarossa si raffredda. La radiazione infrarossa è il mezzo più importante con cui piante, animali e la superficie terrestre scambiano calore. Se la terra non emettesse radiazione infrarossa verso lo spazio, sarebbe molto più calda di quanto lo è realmente. Quando attraversa l'atmosfera, la radiazione solare subisce delle modifiche di tipo quantitativo e qualitativo. Non tutta la quantità di radiazione solare giunge sulla Terra, solo il 51%. Parte della radiazione viene riflessa dalle nuvole, parte viene assorbita dalle nuvole e indirizzata alla terra e parte viene riflessa dalla terra. La luce visibile rappresenta solo una piccola porzione dello spettro elettromagnetico compresa tra le lunghezze d'onda di 380 e 760 nm. Le radiazioni utili per la fotosintesi (PAR) sono quelle aventi lunghezza d'onda comprese tra 380 e 700 nm, ovvero le radiazioni incluse nello spettro del visibile.

Perché le foglie sono verdi? Le foglie appaiono verdi perché la clorofilla assorbe la maggior parte delle radiazioni visibili e riflette il verde. La clorofilla a e b hanno un

picco massimo di assorbimento per il rosso e il blu. Nelle piante però oltre alla clorofilla ci sono anche altri pigmenti accessori (ficocianine, ficoeritrine, carotenoidi etc), quindi osservando lo spettro di assorbimento di una pianta si avrà un grafico in cui i vari picchi di assorbimento si sovrappongono nelle zone del rosso e del blu, questo per garantire una maggiore efficienza energetica: la pianta deve cercare di utilizzare tutto ciò che ha a disposizione, e quindi cerca di coprire tutto lo spettro della radiazione solare possibile. L'irradianza durante le ore del giorno varia. A queste variazioni corrisponde un cambiamento della risposta da parte della velocità di fotosintesi. La quantità di luce varia anche in base alla stagionalità, d'estate c'è una quantità maggiore di luce rispetto all'inverno e questo dipende dall'inclinazione dell'asse terrestre rispetto ai raggi solari.

All'interno di una copertura vegetale la luce diretta che penetra contiene buone percentuali di radiazioni rosse ed infrarosse e poco ultravioletto.

Qual è il comportamento della luce in una copertura vegetale? Quando la luce attraversa una copertura vegetale subisce una modificazione sia nella quantità che nella qualità. Per quanto riguarda la quantità: la luce è maggiore nella parte superiore, mentre man mano che si scende verso gli strati inferiori diminuisce la quantità di luce, questo perché la luce viene intercettata dal fogliame dello strato superiore. L'intercettazione dipende da:

- numero di foglie;
- inclinazione e orientamento delle foglie: le foglie possono disporsi verticalmente e orizzontalmente ed in base a come sono disposte, l'intercettazione della luce cambia completamente.
- dai cambiamenti spettrali della luce nel passaggio attraverso la vegetazione;
- dalla riflessione da parte della vegetazione;
- dall'altezza del sole.

Il comportamento della radiazione durante la stagione: durante l'estate, quando la copertura vegetale è importante e significativa, arriva pochissima luce nella parte inferiore. In inverno, invece, quando non ci sono le foglie arriva una maggiore quantità di luce negli strati più bassi.

Quanto più è complessa la struttura spaziale della comunità tanto più è complesso il bilancio luminoso al suo interno. Un parametro importante che aiuta a definire qual è in un sistema la massima intercettazione della luce, è l'**indice LAI**, ovvero l'**Indice di Area Fogliare** che definisce l'area fogliare in grado di intercettare la luce come il rapporto tra superficie delle foglie e la superficie del terreno su cui esse incidono.

$$LAI = \frac{\text{superficie delle foglie}}{\text{superficie del terreno su cui incide}}$$

Questo indice regola fortemente la produttività. All'aumentare del LAI aumenta la produttività, perché l'area fogliare è l'area fotosintetizzante. Finché non si arriva ad un valore ottimale di LAI e a quel punto crolla la produttività per via di un fattore di ombreggiamento. Se aumenta l'area fogliare, una maggiore quantità di luce viene assorbita dalle foglie apicali, quindi meno luce sarà disponibile per le parti inferiori che non fotosintetizzano con la stessa efficienza delle foglie apicali perché sono limitate dalla quantità di luce e quindi cominciano ad avere un bilancio fotosintesi-respirazione che non è più positivo ma è a favore della respirazione. Foglie con superficie di assorbimento maggiore hanno indice LAI maggiore, ma se le foglie aumentano in numero e si vanno a sovrapporre il LAI tende a non aumentare più, perché le foglie superiori adombrano quelle inferiori. Il valore di LAI ottimale dipende molto dal tipo di comunità, dall'inclinazione, dalla densità delle foglie, dall'inclinazione dei raggi solari, etc.

Come si misura l'indice di area fogliare? Per una foresta è molto difficile misurare tutta la superficie fogliare. Ci sono degli strumenti che permettono di fare una stima dell'area fogliare. Per una coltura agraria, ad esempio una coltura di mais, è molto più semplice: si prendono le foglie una per una.

La legge che regola il comportamento della luce negli strati di una copertura vegetale è:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-KA}$$

-I/I₀ è la frazione di luce penetrata

-K è il coefficiente di estinzione

-A è l'area fogliare che intercetta la luce

L'inclinazione della foglia influenza la penetrazione della luce all'interno della copertura vegetale. Se una foglia è disposta verticalmente la radiazione solare non viene intercettata dalle foglie se non in minima parte, il resto arriverà alla superficie del suolo. Il coefficiente di estinzione della luce sarà piccolo, perché poca luce è stata assorbita. Se l'inclinazione della foglia aumenta, aumenta l'intercettazione e il coefficiente di estinzione diventa sempre più alto. Le piante planofile hanno foglie inclinate in modo da ricevere e assorbire una grande quantità di luce, con un coefficiente di estinzione k della luce molto alto. A parità di LAI una comunità erettofila ha un coefficiente di estinzione più piccolo rispetto ad una comunità planofila. Se le foglie sono erettofile, l'assorbimento della luce è minore, e il coefficiente di estinzione della luce è basso. L'orientamento delle foglie, in alcuni casi, è casuale, in altri casi sono le piante a far muovere le foglie seguendo la radiazione luminosa (eliotropismi). Molte piante che hanno movimenti diaeliotropici possono compiere anche movimenti paraeliotropici quando la radiazione luminosa diventa eccessiva.

La radiazione solare influenza:

-Temperatura;

-Metabolismo (velocità di fotosintesi);

-Perdita d'acqua (velocità di evaporazione e traspirazione);

-segnale ambientale (fotoperiodo).

Il **fotoperiodo** si riferisce alla durata delle ore di luce che varia in modo regolare con le stagioni. Il fotoperiodo determina la fioritura, la fruttificazione, negli animali influenza la maturazione delle gonadi.

In base ai fenomeni di fioritura le piante si distinguono in Longidiurne Neotrodiurne Brevidiurne.

Molti organismi sono in grado di controllare la quantità di radiazione solare diretta che colpisce la loro superficie intervenendo sul loro bilancio energetico. Come si difendono le piante da questo eccesso di energia luminosa? Le piante hanno evoluto una serie di strategie protettive distinte in strategie di tolleranza e di evitamento.

-movimento delle foglie:

- movimenti eliotropici:

In alcune piante le foglie seguono il corso del sole durante il giorno modificando il loro orientamento in modo tale da mantenersi sempre perpendicolari alla radiazione incidente **foglie diaeliotropiche**.

Alcune piante evitano l'esposizione diretta alla luce solare mantenendo le foglie sempre parallele alla radiazione incidente intercettando così meno luce **foglie paraeliotropiche**.

Molte piante che hanno movimenti diaeliotropici possono compiere anche movimenti paraeliotropici quando la radiazione luminosa diventa eccessiva.

-movimento dei cloroplasti: a basse irradianze, quando il carico luminoso non è eccessivo, i cloroplasti sono disposti in maniera da ottimizzare l'intercettazione della

luce: si trovano orizzontalmente rispetto ai raggi solari. Quando il carico radioattivo è eccessivo, si dispongono parallelamente ai raggi solari, in questo modo limitano l'assorbimento solare.

-peli, cere: ci sono alcune pinte che modificano le foglie in spine e questo consente di limitare la superficie di assorbimento, la presenza di peli e cere che consentono la stessa cosa.

-variazioni nel numero di pigmenti.

Oltre ai meccanismi di evitamento legati al movimento delle foglie, alla presenza delle cuticole e alla variazione dell'attività dei pigmenti fotosintetici ci sono anche fenomeni di dissipazione (quenching) termica e fotochimica.

Sempre nell'ambito degli adattamenti fisiologici alla luce è possibile distinguere:

-**piante eliofile o di sole** evolute in habitat soleggiati che sono caratterizzate da:

1. alta velocità di fotosintesi e respirazione
2. attività più elevata della RUBISCO
3. alta frequenza di stomi questo consente una maggiore diffusione di CO₂ dall'esterno verso la rubisco.
4. potenziamento dei componenti dell'apparato fotosintetico implicati nelle reazioni fotochimiche (centri di reazione, citocromi).

- **piante sciafile o di ombra** tipiche di habitat ombreggiati e caratterizzate da:

1. bassa velocità di fotosintesi e respirazione
2. attività più bassa della RUBISCO
3. cloroplasti più grandi
4. maggiore contenuto di clorofilla perché essendo abituati a vivere a bassa intensità luminosa, devono catturare più luce.
5. potenziamento dei componenti dell'apparato fotosintetico implicati nella cattura della luce
6. soggette alla fotoinibizione.

Ci sono anche degli adattamenti morfologici in base all'esposizione luminosa: nell'ambito di una stessa pianta possono coesistere sia **foglie di luce** che **foglie di ombra**. La morfologia delle foglie può cambiare in risposta ai livelli di luce ai quali le foglie si sono sviluppate. Le foglie di ombra sono meno spesse ed hanno una superficie fogliare più ampia rispetto a quelle di sole.

Luce ed ecosistemi acquatici

Negli ecosistemi acquatici la radiazione luminosa varia con la profondità non solo quantitativamente ma anche qualitativamente. La quantità di luce nel corpo idrico varia in funzione della profondità, man mano che ci spostiamo verso le zone più profonde la quantità di luce diminuisce. E' possibile distinguere:

-**zona eufotica:** è compresa tra la superficie del corpo idrico e la profondità alla quale perviene l'1% della radiazione incidente (~150 m).

-**zona disfotica:** si estende dal limite inferiore della zona eufotica fino alla profondità alla quale la quantità di luce è sufficiente per la visione degli animali (~500 m).

-**zona afotica:** dal limite inferiore della zona disfotica al fondo degli oceani. E' dominata dall'oscurità e non avviene la fotosintesi.

La penetrazione della luce dipende dalla posizione del sole. La quantità di luce che riesce a penetrare nel corpo idrico è in funzione anche della diffusione.

L'UV viene intercettato negli strati superficiali dell'acqua, la stessa cosa anche l'infrarosso che viene assorbito fino a pochissimi metri di profondità. Il rosso viene bloccato negli strati superficiali, in profondità riescono ad arrivare la componente verde e blu. Questa selezione dell'assorbimento delle componenti del visibile influisce sulla distribuzione degli organismi fotosintetici:

alghe verdi (che hanno clorofilla a) alghe azzurre e fitoplancton
alghe brune (che hanno clorofilla a e c)
alghe rosse (che hanno le ficobiline).

Strumenti per misurare l'irradianza

L'irradianza è la quantità di energia radiante proveniente dal Sole, ricevuta per unità di superficie nell'unità di tempo. Esistono due strumenti di misura: il **piranometro** e l'**albedometro**. Il piranometro consente di misurare la radiazione solare totale che arriva sulla superficie del suolo. E' fatto da un sensore rivolto verso l'alto e una cappa con un pennino. Si possono inserire dei filtri e decidere di valutare le varie lunghezze d'onda di interesse. L'albedometro è un particolare piranometro con due sensori, uno rivolto verso il cielo per la misura della radiazione globale ed uno rivolto verso il terreno, che misura l'albedo, ovvero l'energia solare riflessa dal suolo verso lo spazio.

Come si misura la PAR? Le misure più diffuse sono quelle che valutano l'irradianza quantica nella PAR come numero di fotoni (quanti di luce) incidenti sull'unità di superficie nell'unità di tempo. Le misure sono effettuate attraverso un sensore quantico costituito da una cellula fotoelettrica con filtri che rimuovono la radiazione al di sopra di 700 nm e al di sotto dei 400 nm. L'irradianza quantica viene espressa in einstein (E) per unità di superficie nell'unità di tempo e $1 E = 1 \text{ mole di fotoni}$.

17/10/2019

LA TEMPERATURA

La temperatura, così come del resto anche l'irradianza o l'abbondanza delle precipitazioni, varia in funzione della latitudine e risente dell'altitudine, della continentalità e di condizioni microclimatiche particolari che dipendono dalla morfologia e dalla struttura della superficie terrestre. Il suo aumento o la sua diminuzione dipendono dai fattori determinanti del clima, dai moti del pianeta, dalle radiazioni solari e dalla morfologia del territorio. Le isoterme sono linee che dividono la superficie terrestre in regioni caratterizzate dalle stesse condizioni climatiche.

- **Latitudine:** nella fascia equatoriale la temperatura rimane pressoché costante per l'arco di tutto l'anno: l'escursione termica annuale è più bassa di quella giornaliera. Verso latitudini più alte si hanno delle differenze stagionali, che possono essere più o meno marcate sia per l'irradianza, sia per la temperatura. La stagionalità è legata ai moti del pianeta.

- **Irradianza:** la temperatura è strettamente associata alla radiazione solare che colpisce la superficie terrestre. All'equatore le radiazioni solari arrivano in maniera perpendicolare alla superficie terrestre per tutto l'anno. Questo implica che all'equatore, su una superficie più ristretta, incide la stessa quantità di radiazione solare che ai poli inciderebbe su una superficie molto più ampia, perché ai poli i raggi arrivano in maniera obliqua. Di conseguenza, all'equatore fa più caldo rispetto ai poli.

- **Altitudine:** con l'aumentare dell'altitudine, se l'aria è secca c'è una riduzione di temperatura di 1°C ogni 100 m, se invece l'aria è umida si avrà una riduzione di 0,6°C. La temperatura cambia anche lungo tutta quanta la colonna dell'atmosfera.

Ai limiti superiori della troposfera (10 km) si ha una temperatura intorno ai -50/-60°C. Nella stratosfera (10-25 km) la temperatura resta più o meno costante per poi subire un incremento nella mesosfera (25-50 km) fino a -5/0°C. Al limite superiore della mesosfera (50-80 km) vi è di nuovo una riduzione fino a -120°C. Nella termosfera (80-500 km) si registra un nuovo incremento fino ad alcune centinaia di gradi sopra lo zero.

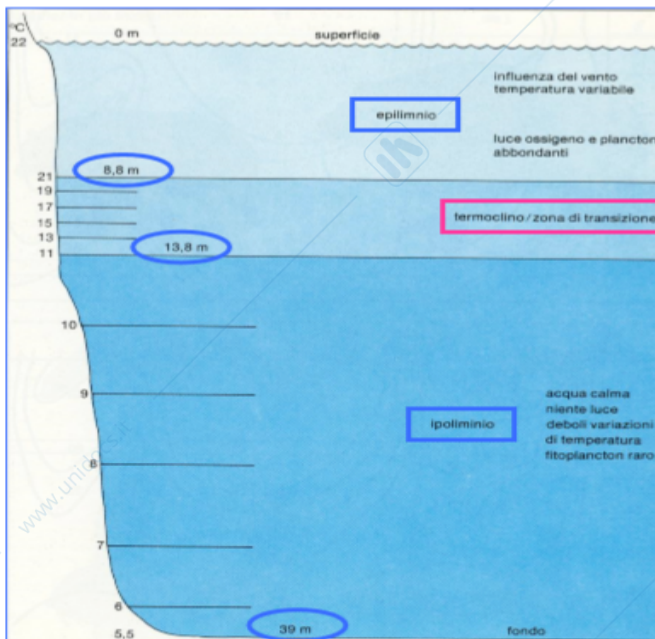
La dipendenza della temperatura dalla latitudine e dall'altitudine, comporta una zonazione altitudinale e latitudinale sia delle piante che degli animali. All'equatore ci sta la foresta tropicale, man mano che ci spostiamo verso latitudini più elevate la vegetazione cambia (foreste decidue, conifere fino ad arrivare ad estese di ghiaccio). Quest'associazione differente prende nome di **biomi**. I biomi non sono altro che ambienti caratterizzati da peculiari condizioni climatiche e caratterizzati da associazioni vegetali ed animali peculiari.

I fattori che influenzano la temperatura all'interno di una copertura vegetale sono:

- La densità della chioma: più è folta e meno energia riesce ad arrivare allo strato basale, quindi in prossimità del suolo.
- Le caratteristiche della specie
- La disposizione delle foglie
- L'altezza.

Come varia invece la temperatura in ambiente acquatico? In un lago, ma anche nel mare, osserviamo una stratificazione termica. Individuiamo: **una zona superficiale** (epilimnio) in stretto contatto con l'ambiente esterno (qui la temperatura varia poco in funzione della profondità); **un termoclino o zona di transizione**, dove

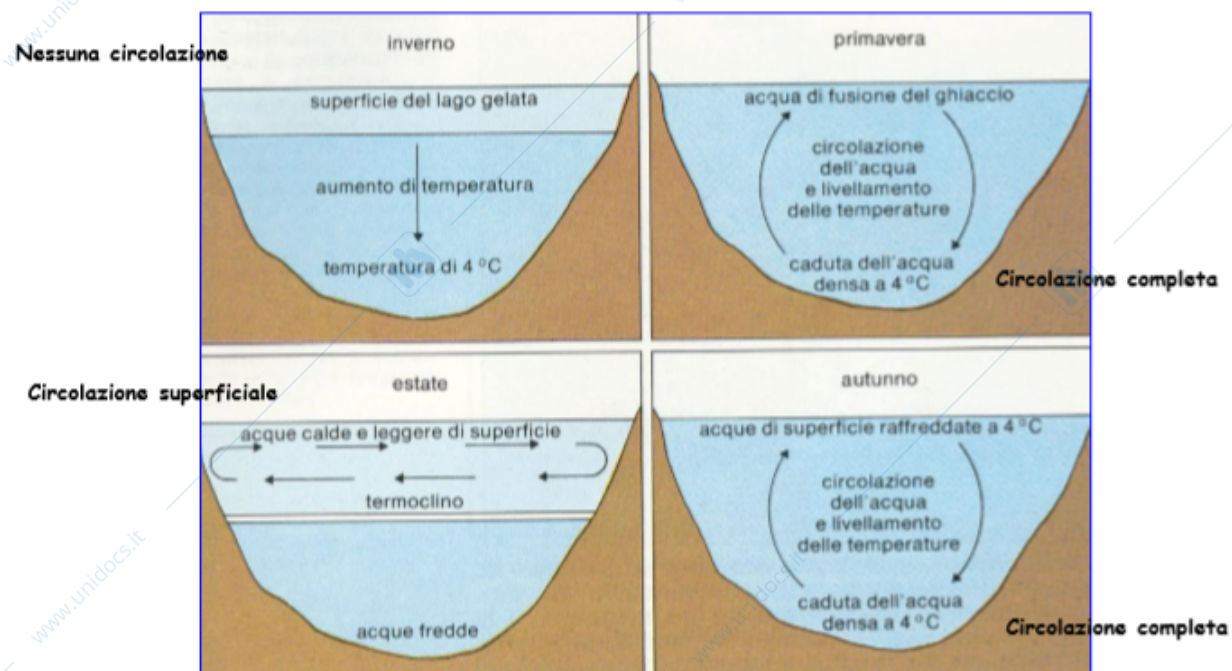
la temperatura diminuisce notevolmente con la profondità e poi abbiamo la **zona a temperatura o ipolimnio**. Questa schematizzazione si riscontra in estate.



In funzione della circolazione delle acque interne nei laghi, possiamo classificare i laghi in:

- **Oligomittici** con rara completa circolazione (laghi tropicali);
- **Monomittici freddi**, con completa circolazione soltanto estiva (laghi polari e alpini);
- **Dimittici** con completa circolazione primaverile e autunnale (laghi temperati);
- **Monomittici caldi** con completa circolazione soltanto invernale (laghi sub-tropicali);
- **Polimittici** con frequente circolazione completa

Cosa vuol dire circolazione delle acque?



L'immagine sovrastante rappresenta uno schema del ciclo termico annuale per le varie stagioni in un lago dimittico.

Un tipico lago profondo della zona temperata in [estate](#) avrà nell'epilimnio una temperatura alta e acque poco dense, che galleggiano sullo strato ipolimnico più denso e freddo, separate da un sottile strato metalimnico. Questo profilo di densità, determinato dalla differente temperatura, impedisce alle acque dei vari strati di mescolarsi fra loro (stratificazione termica), limitando gli scambi di sostanze disciolte e particellate. In [inverno](#), invece, si ha una stratificazione inversa in quanto lo strato superficiale si gela e lo strato sottostante è a 4 gradi (massima densità). In superficie il ghiaccio, avendo una densità minore dell'acqua, galleggia.

Tra le due situazioni sopra descritte intercorrono tipicamente due fasi dette di piena circolazione (olomissi), in [primavera](#) e in [autunno](#), in cui tutta la colonna d'acqua si trova a 4 °C, e nelle quali scompare la stratificazione termica, in queste condizioni il vento può innescare un rimescolamento completo delle acque. **Il rimescolamento è fondamentale** perché in profondità, dove non arriva luce, avviene la decomposizione, la quale degrada la sostanza organica e ha bisogno di ossigeno (in carenza di ossigeno dalla decomposizione si potrebbero produrre sostanze tossiche per gli organismi). In superficie, la moria dei pesci dipende proprio da un consumo elevato di ossigeno da parte delle alghe, la stessa cosa accadrebbe anche in profondità se le acque della zona profonda non fossero continuamente ossigenate. Con il riciclo delle acque si ha un'ossigenazione delle acque profonde e una risalita di nutrienti verso lo strato superficiale (dove avviene la fotosintesi).

QUESTO ACCADE NEI LAGHI DIMITTICI, OVVERO QUANDO LA CIRCOLAZIONE COMPLETA AVVIENE DUE VOLTE ALL' ANNO.

TEMPERATURA E ORGANISMI

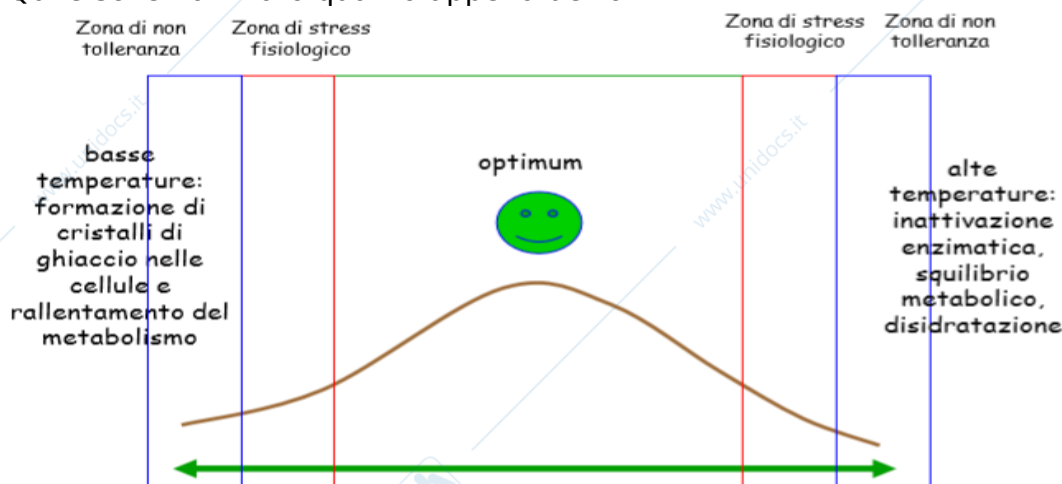
La temperatura condiziona la disposizione degli organismi nei diversi habitat (come abbiamo già detto) e regola i loro processi metabolici. In quanto: • influenza catalisi enzimatica (aumentando la temperatura aumenta l'attività dell'enzima) e • regola i processi di traspirazione. Quando abbiamo caldo sudiamo perché in questo modo l'organismo dissipa calore (termoregolazione) e la stessa cosa la fanno le piante che

traspirano (per evitare il surriscaldamento della lamina fogliare le piante perdono acqua per traspirazione attraverso gli stomi).

Per ogni fattore ecologico esiste un **ambito di tolleranza** all'interno del quale l'organismo vive e all'interno del quale l'intensità del fattore ecologico influenza un determinato processo. Ad esempio, per il processo riproduttivo, l'intervallo di temperatura richiesto dall'organismo per quel determinato fattore ecologico è ridotto rispetto ad esempio all'intervallo di temperatura all'interno del quale gli organismi possono vivere.

Ciascun essere vivente presenta quindi **un optimum di temperatura, di disponibilità di acqua e di suolo** e al di fuori di questo scappa o non sopravvive.

Qui è schematizzato quanto appena detto:



Abbiamo però un limite inferiore e uno superiore di tolleranza e a seconda dell'ampiezza dell'ambito di tolleranza gli organismi, nel caso della temperatura, si dividono in: **stenotermi** (che tollerano ristretti intervalli di temperatura) ed **euritermi** (che tollerano ampi intervalli di temperatura).

La temperatura influenza la distribuzione degli organismi sulla superficie terrestre, i quali **si sono adattati** anche ad ambienti estremi (poli e deserti). Ogni bioma è caratterizzato da una specifica vegetazione e una specifica fauna: al polo nord non troveremo mai un cammello come nel deserto non troveremo mai un orso polare.

La maggior parte degli organismi è attiva entro un intervallo di temperatura compreso tra 0 e 50 °C.

Ci sono però alcune eccezioni:

1. Batteri in acque termali, fino a 90°C
2. Alcune specie di cianofitiche sopravvivono sui 70-73 °C
3. *Cyanidium caldarium* ha il suo optimum a 56 °C
4. molluschi come *Hydrobia ulvae* vivono in ambienti a 60°C

In base alle relazioni con la temperatura, gli organismi vengono suddivisi in **OMEOTERMI E ETERTERMI**. Gli omeotermi sono gli organismi che mantengono costante la temperatura a differenza degli eterotermi che hanno una temperatura corporea variabile. Questa differenza però non soddisfa completamente i biologi ed ecologici perché ci sono alcuni omeotermi che riducono la temperatura corporea

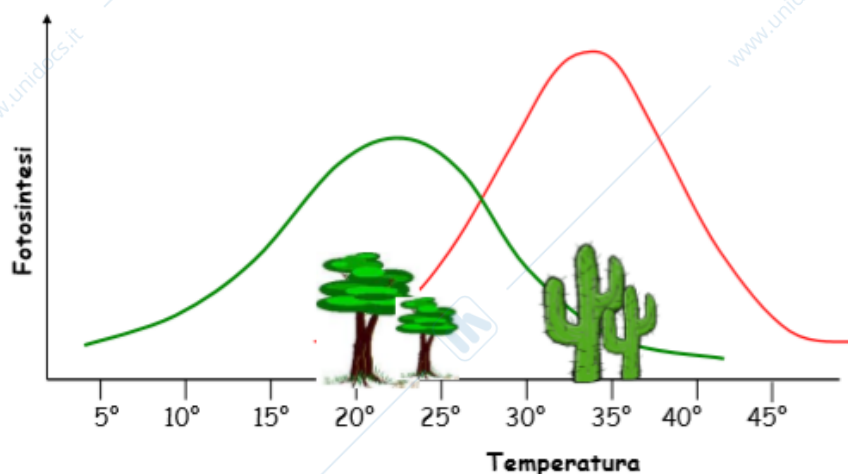
(ibernazione) ed alcuni eterotermi che variano di pochissimo la temperatura corporea (pesci antartici). È stata quindi coniata una nuova terminologia per indicare la capacità di un organismo di regolare la temperatura corporea: **endotermi** (che regolano la temperatura producendo calore nel proprio corpo) e **esotermi** (che ricorrono a sorgenti di calore esterne, ad esempio le lucertole che durante le ore del giorno si espongono al sole per riscaldarsi ed effettuare le loro attività).

Abbiamo detto che la temperatura influenza il metabolismo cellulare e questa relazione è indicata dal parametro Q_{10} . Questo parametro è uguale al rapporto tra la velocità di un processo ad una data temperatura (R_t) e la velocità che caratterizzerebbe tale processo ad una temperatura più bassa di $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Q_{10} = R_t / R_{t-10}$$

LE PIANTE E LA TEMPERATURA

Ogni specie ha un suo optimum di temperatura per un determinato processo metabolico. Prendiamo in considerazione il caso della fotosintesi.



Come possiamo osservare anche nell'immagine sovrastante, alcune piante (le C3) hanno un optimum di temperatura per la fotosintesi a 20 gradi (piante C3). All'aumentare della temperatura, la fotosintesi diminuisce perché aumenta in quel caso la fotorespirazione. Ci sono altre piante, invece, che hanno un optimum di temperatura

per valori più elevati, ad esempio le piante C4, che presentano una temperatura ottimale di 35-40 gradi.

La temperatura ottimale per la fotosintesi varia per le diverse specie in relazione all'habitat. Le piante del deserto sono piante adattate a vivere in ambienti caldi, per cui il loro optimum di temperatura è spostato verso temperature superiori, mentre piante in ambienti più freddi hanno un optimum di temperatura spostato per temperature più basse.

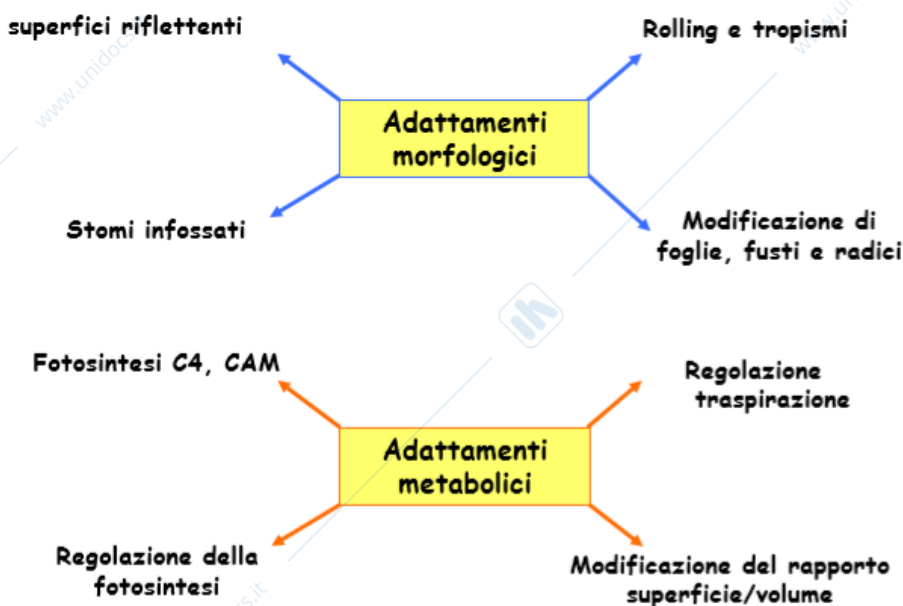
ADATTAMENTI DELLE PIANTE AD ALTE E BASSE TEMPERATURE.

Anche nel caso della temperatura le piante adottano **strategie di adattamento di tipo morfologico e metabolico** o strategie di evitamento.

- **Gli adattamenti di tipo morfologico** sono ad esempio la presenza di cuticole, la presenza di peli riflettenti, i movimenti eliotropici, la capacità di rolling, la presenza di dimorfismo fogliare stagionale, la presenza di stomi più evidenti o infossati, o alterazioni che riguardano le radici, le foglie e il fusto. Osservando due varietà di *Encelia farinosa*, una di tipo selvatico, che ha i peli che riflettono la luce solare in eccesso, l'altra di tipo mutante, senza peli, mentre nel tipo selvatico c'è un andamento stagionale della fotosintesi, nel tipo mutante non si notano i cambiamenti stagionali. La temperatura di una pianta cambia in relazione alla disposizione delle foglie verticale o orizzontale. Le piante possono variare l'incidenza che le radiazioni solari hanno sulle foglie attraverso i movimenti eliotropici di foglie e rami e l'arrotolamento delle foglie.

- **Da un punto di vista metabolico**, le piante possono adottare metabolismi diversi, cioè C4, C3 o CAM, meccanismi di fotoprotezione o ancora modulare la traspirazione. Molto spesso gli adattamenti morfologici e metabolici sono copresenti nella stessa pianta, come accade nelle piante xerofite, le quali hanno sia degli adattamenti che riguardano il tipo di fotosintesi (sono per lo più C4 o CAM) che adattamenti che riguardano le foglie e il fusto fotosintetizzante. Il portamento delle specie xerofite è importante perché avendo fusti disposti verticalmente, ricevono poca luce, soprattutto durante le ore più calde, evitando così il surriscaldamento.

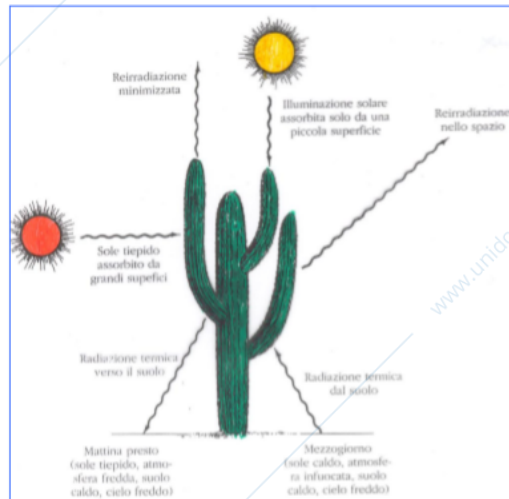
- Importanti sono i **meccanismi di evitamento** come la perdita delle foglie nelle caducifoglie e l'arresto del metabolismo nella stagione fredda.



Adattamenti morfologici in due tipologie di piante. Da una parte abbiamo il lauro con foglie riflettenti che riflettono maggiormente i raggi solari (la quantità di energia che riesce ad essere assorbita dalla foglia è minore); e dall' altre le piante grasse che hanno invece peli, i quali sono fondamentali per bilanciare il bilancio termico della pianta (evitando che il seme o la foglia si surriscaldi) e per ridurre la perdita di acqua.

Il fusto succulento è un adattamento delle piante di ambienti aridi dove si raggiungono durante il giorno temperature molto elevate

Piante del deserto: adattamenti morfologici e metabolici



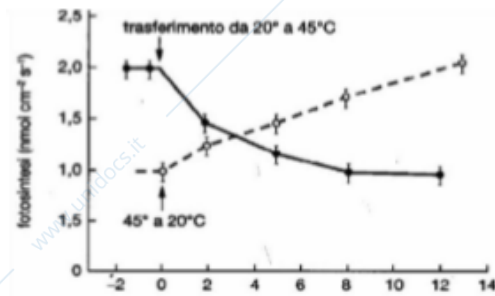
Le piante del deserto hanno per lo più un metabolismo di tipo CAM che può essere considerato un adattamento all'aridità

ACCLIMATAZIONE NELLE PIANTE

Negli ambienti caratterizzati da pronunciate variazioni stagionali della temperatura le piante che rimangono attive per tutto l'anno hanno la capacità di acclimatarsi alle alte o basse temperature. **L'acclimatazione non è altro che un riarrangiamento dei processi metabolici che consentono alla pianta di adattarsi alle nuove condizioni vitali.** Ad esempio, la stessa pianta fatta crescere a 23 gradi ha una risposta per la fotosintesi diversa a quella che la stessa pianta mostra se viene fatta crescere ad una temperatura inferiore. Ciò che cambia è l'optimum di temperatura per la fotosintesi. Se faccio crescere una pianta in grado di acclimatarsi ad elevate temperature, a temperature superiori l'optimum di temperatura si sposta verso valori superiori. Quindi se per esempio la pianta è cresciuta a 23 gradi, il suo optimum di temperatura si ha a 30 gradi. Se la faccio crescere a temperature superiore (30-40 gradi) l'optimum di temperatura si sposta per temperature vicine alla temperatura di crescita. Quindi la pianta è capace di acclimatarsi e aggiustare il suo metabolismo fotosintetico in funzione della temperatura di crescita, perché cambia il corredo enzimatico collegato alla fotosintesi (possono formarsi isoenzimi più tolleranti alle temperature) e si potenziano determinate proteine (ad esempio i trasportatori della

catena di trasporto degli elettroni). **Si hanno sostanzialmente dei riarrangianti della pianta che le consentono di vivere bene nelle nuove condizioni.**

Una delle specie che ha la capacità di acclimatarsi è l'oleandro, il quale cambia in maniera repentina la propria attività metabolica di conseguenza alla temperatura. In particolare, nel grafico sottostante, è stato fatto un esperimento prendendo delle piante di oleandro e facendole crescere a 20°C e a 45°C. Quelle cresciute a 20°C sono state portate ad una temperatura di 45°C (linea continua) e quelle cresciute a 45°C sono state portate a 20°C (linea tratteggiata). Il cambiamento dell'attività fotosintetica, quindi l'acclimatazione, è velocissimo.



L' optimum di temperatura varia in funzione della stagione. *Larrea divaricata* mostra una sfasatura stagionale dell'optimum che si sposta in modo da corrispondere alle temperature prevalenti (in estate le foglie presenteranno un optimum di temperatura per la fotosintesi più elevato rispetto quello che presenteranno in inverno e questo perché le foglie si adattano alla temperatura dell'ambiente).

La capacità di alcune piante di incrementare la resistenza al gelo viene detta **acquisizione della rusticità** (acclimatazione alle basse temperature). Un esempio è rappresentato dall'abete rosso i cui aghi hanno come limite inferiore dell'ambito di tolleranza -7°C in estate e -38 °C in inverno. Perché la pianta acquisti la rusticità invernale è necessario che venga esposta gradualmente alle temperature via via più fredde. In primavera, quando la temperatura aumenta, la pianta fuoriesce dalla rusticità. Se dopo di ciò dovesse venire una gelata improvvisa è ovvio che, in questo caso, la pianta non è in grado di affrontarla e muore.

La temperatura può essere stimolo per le molte specie che germinano solo se esposte, per un determinato intervallo di tempo, a basse temperature. Questo fenomeno è definito **vernalizzazione** e lo si utilizza anche in agricoltura per facilitare la germinazione dei semi.

GLI ANIMALI E LA TEMPERATURA

OMETERMIA ED ETERTERMIA

Negli animali esistono due principali tipi di adattamento alle variazioni di temperatura: l'**eterotermia** (invertebrati e vertebrati inferiori) in cui la temperatura corporea segue con poche differenze quella esterna e l'**omeotermia** (mammiferi e uccelli) in cui la temperatura corporea viene mantenuta elevata e pressoché costante, indipendentemente dall'ambiente esterno. **Gli omeotermi adottano l'endotermia** (calore dall'interno) ossia producono calore corporeo con il loro metabolismo; **gli**

eterotermi o pecilotermi adottano l'ectotermia, ossia assorbono principalmente calore dall'esterno.

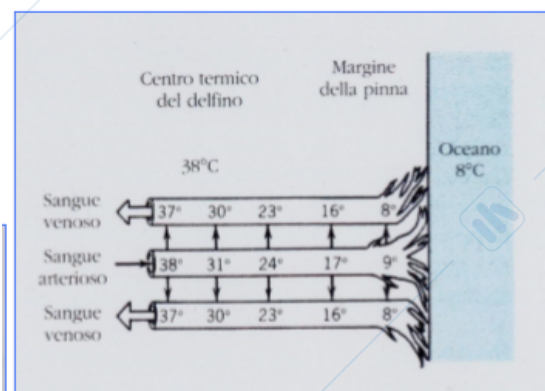
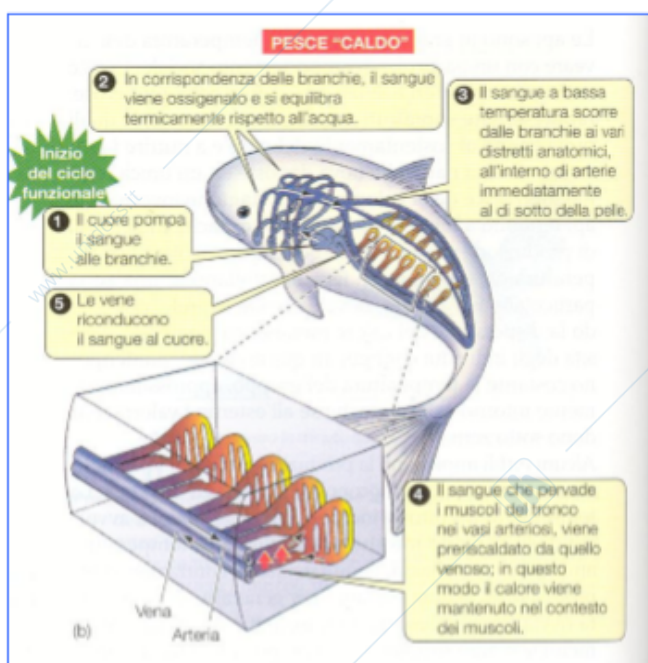
Gli omeotermi hanno dei sistemi di termoregolazione complessi a livello encefalico che in risposta a variazioni di temperatura del sangue riescono a produrre ormoni termogenici. Essi hanno in genere un metabolismo molto attivo e ossidano glucosio e altre molecole nei processi respiratori per la produzione di calore. Essi inoltre regolano la dissipazione termica con la variazione del rapporto superficie/peso corporeo; in questo è rilevante anche la grandezza e la lunghezza delle appendici corporee. Ci sono delle regole attraverso le quali si riesce a capire quale è il grado di dissipazione termica degli organismi omeotermi (regola di Bergman, regola di Allen e regola di Gloger). Le attività metaboliche degli omeotermi si mantengono costanti e rispondono in modo diverso a seconda se la temperatura esterna è alta o bassa. Quando la temperatura esterna è alta fanno in modo di ridurre il calore metabolico e di dissipare il calore corporeo grazie al controllo della vasodilatazione periferica, in modo da non surriscaldarsi. Inoltre regolano la traspirazione a seconda della temperatura esterna.

Per impedire la dispersione di calore nel caso di temperature basse molti animali hanno la **pelliccia** o il **piumaggio**. In molti mammiferi vi è la presenza di tessuto adiposo localizzato in parti specifiche del corpo, per esempio il collo. La marmotta è in grado di bruciare il tessuto adiposo bruno situato attorno al collo, alla testa e al torace per la produzione di calore. Il piumaggio e la pelliccia possono essere più chiari o più scuri, più spessi o meno spessi, a seconda delle stagioni. Alcuni animali riflettono le radiazioni solari con delle **penne** o **delle pellicce chiare**, mentre alcuni uccelli assorbono calore con delle **penne scure**. Quando l'isolamento termico non è sufficiente a garantire il mantenimento della temperatura corporea, ci possono essere degli altri meccanismi che entrano in gioco, per esempio i **brividi**. I brividi non sono altro che attività involontarie della muscolatura utilizzate per scopo di termoregolazione. In molte specie viene utilizzata **l'evaporazione** per abbassare la temperatura corporea. L'omeotermia, da un lato garantisce la sopravvivenza di questi organismi anche laddove le condizioni di temperatura sono variabili e oscillano e non sono ottimali, dall'altro, per mantenere costante la temperatura corporea, gli omeotermi sprecano una gran quantità di energia.

Al contrario gli eterotermi hanno la temperatura corporea che dipende dalla temperatura esterna e dei livelli metabolici non costanti, cioè a temperature elevate hanno dei processi metabolici più veloci rispetto a quello che succede alle basse temperature, dove ci sono dei rallentamenti, e addirittura può essere raggiunto lo zero ecologico, quindi possono sospendere completamente le loro attività. Quindi gli eterotermi possono vivere in maniera ottimale solamente in condizioni di temperatura che non siano estremamente limitanti e che siano abbastanza costanti. Le lucertole di giorno si espongono alla luce solare quando questa non è eccessivamente forte, quindi all'alba e al tramonto. Nelle ore più calde della giornata cercano riparo in zone calde ma ombreggiate. La notte cercano riparo in tane per difendersi dal freddo. Stagionalmente gli organismi eterotermi possono arrestare o rallentare le loro attività quando la temperatura diventa troppo alta o troppo bassa, entrando rispettivamente in **estivazione** o in **ibernazione**. Questo rallentamento dell'attività metabolica può essere obbligatorio (diapausa) o facoltativo (quiescenza). Gli organismi eterotermi possono spostare il loro punto di congelamento producendo delle sostanze nel plasma, come ad esempio il glicerolo, o glicerina (ad esempio gli insetti), o producendo trimetilamina (come accade nel caso del merluzzo del Labrador). Altri possono

abbassare il proprio punto di congelamento attraverso una disidratazione progressiva. L'eterotermia implica ampie variazioni nelle attività metaboliche, ma gli eterotermi sono in grado di sopravvivere anche a livelli di temperature estremi sospendendo le proprie attività. In natura vi sono degli omeotermi che utilizzano delle strategie normalmente tipiche degli eterotermi, come per esempio quella di bloccare o di rallentare la propria attività metabolica (es. **il letargo** è tipico anche di molti mammiferi i quali sono omeotermi). Alcuni eterotermi inoltre sono in grado di regolare, seppur limitatamente, la propria temperatura corporea. Lepidotteri e imenotteri di grandi dimensioni, facendo vibrare i muscoli del volo prima di volare, inducono un riscaldamento corporeo. I muscoli natatori di molti pesci grossi, vengono mantenuti ad una temperatura piuttosto costante grazie ad una particolare disposizione delle arterie. Generalmente le vene che contengono sangue più freddo sono disposte all'esterno e le arterie che contengono sangue caldo sono posizionate internamente. Questa disposizione anatomica dei vasi sanguigni è presente anche in molti altri animali che vivono in ambienti particolarmente freddi, per esempio negli ambienti artici. Le appendici o quelle parti del corpo che sono a contatto diretto con l'ambiente più freddo, sono generalmente mantenute ad una temperatura più bassa del resto del corpo per evitare una eccessiva dissipazione termica in un ambiente in cui la temperatura è già un fattore limitante.

Negli uccelli e nei mammiferi artici vi è un meccanismo che permette di evitare la dissipazione termica in un ambiente con temperature basse. Questo meccanismo, che prende il nome di **circolazione in controcorrente**, consiste nello scambio di calore in controcorrente tra il sangue caldo che scorre nelle arterie e il sangue freddo che scorre nelle vene e porta ad un abbassamento della temperatura nelle appendici, che presentano una temperatura che va tra 0-5°C. Mentre il resto del corpo di questi animali ha una temperatura intorno ai 36-38°C, le appendici del caribù, ad esempio, hanno una temperatura di 9°C, perché questo animale cammina sul ghiaccio.



REGOLA DI BERGMANN



La regola di Bergmann stabilisce una relazione tra temperatura e rapporto superficie/volume per i vertebrati omeotermi. Un animale omeotermo più grosso perde relativamente meno calore di uno più piccolo ed è avvantaggiato in ambiente freddo. È la superficie che disperde calore e negli omeotermi è il peso a produrre calore. Quindi, aumentando la mole, aumenta di più la parte che produce calore rispetto a quella che disperde calore. Un esempio è l'orso polare che ha dimensioni molto grandi e vive ai poli, mentre l'orso marsicano è più piccolo e vive sull'Appennino, quindi in condizioni di temperatura meno limitanti. Questa regola non è sempre valida, ha un certo numero di eccezioni (caribù, renne e alcuni uccelli), anche a causa di altri fattori ecologici, la competizione e la predazione.

REGOLA DI ALLEN



Volpe artica

Volpe europea

Volpe del deserto

Corollario della regola di Bergman è la regola di Allen, la quale fa riferimento alle appendici. Essa afferma che gli organismi con appendici più lunghe hanno una maggiore dissipazione termica e quindi vivono meglio in luoghi più caldi. Un esempio classico è la volpe: la volpe artica ha delle orecchie piccole, collo piccolo, ridotta lunghezza degli arti perché non ha bisogno di disperdere molto calore ma lo deve trattenere; la volpe del deserto, invece, ha bisogno di disperdere calore e pertanto le sue appendici sono più lunghe. La stessa cosa vale per le lepri.

REGOLA DI GLOGER

Un'altra regola è quella di Gloger, la quale fa riferimento al colore della pelliccia o del piumaggio. Essa afferma che i colori più chiari sono favoriti sia in ambienti più freddi, sia nelle stagioni fredde, rispetto a quelli scuri che sono propri di ambienti più caldi e stagioni calde. Molti ritengono che il colore più chiaro dell'orso, della volpe o di altri animali sia legato all'ambiente, in quanto gli animali devono confondersi con l'ambiente circostante quindi il colore è più chiaro nel caso dell'artico e più scuro nel caso delle praterie o degli ambienti più caldi del deserto. Tale teoria però non è

accolta dalla maggior parte degli ecologi in quanto risultano esserci innumerevoli specie che sono eccezioni a tale ipotesi.

IL CLIMA

Per definire il clima di una regione si guardano una serie di:

- 1) **FATTORI:** temperatura, moti del pianeta, forma e struttura terrestre
- 2) **ELEMENTI:** temperatura, precipitazioni, umidità, pressione, venti.

Per molti versi elementi e fattori non sono differenti, in realtà un po' di differenza c'è, poiché se noi guardiamo cosa definisco come fattori, i fattori sono la **radiazione solare** (abbiamo visto che la radiazione solare quando colpisce gli ecosistemi non la colpisce allo stesso modo, una parte viene riflessa, una assorbita, una dissipata sotto forma di calore e così via. Molti di quello che arriva sul nostro pianeta dipende da come è costituita l'atmosfera, poiché l'atmosfera è caratterizzata da gas, alcuni dei quali assorbono l'infrarosso, altri invece riflettono, e poi ci sono le piante che, invece, assorbono la radiazione che viene dal sole e ne fanno un'altra forma di energia). Ancora come fattori del clima ci sono i **moti del pianeta**, il pianeta terra si muove lungo il proprio asse e lungo un'orbita intorno al sole. Il movimento della terra su se stessa determina il giorno e la notte, e sulla rotazione ellittica intorno al sole determina le stagioni. Il clima è influenzato, quindi, dai moti del pianeta che determinano la stagionalità e dalla radiazione solare (sicuramente che arriva, perché quando arriva la radiazione solare non arriva sempre perpendicolare. I punti della terra dove arriva perpendicolare sono i punti equatoriali. Ai poli, invece, non arriva proprio perpendicolare, ma inclinata).

Un altro fattore che influenza molto il clima è **la forma e la struttura della superficie terrestre**, se andiamo sulla montagna questa avrà un clima diverso da quello della pianura.

Il fattore può agire sia da solo (basta un fattore per distinguere un clima da un altro), sia ad un insieme di variabili.

LE ZONE CLIMATICHE

Se un fattore o elemento agisce di più rispetto ad un altro, avremo un clima caratterizzante piuttosto che un altro. In base alla maggiore importanza che hanno alcuni elementi e alcuni fattori, **nel 1973 l'ecologo Walter divise il nostro pianeta in 9 zone climatiche**. In queste 9 zone il clima è distinguibile da una zona all'altra.

Quali sono queste zone climatiche? Generalmente si rappresentano con colori diversi, ad ogni colore corrisponde una zona climatica. È importante ricordare che il clima determina una particolare vegetazione, per cui spesso volte quando uno va a classificare una zona climatica, guarda anche la vegetazione che c'è in quella zona (guarda gli autotrofi e non eterotrofi, poiché sono i primi che si portano dietro i secondi).

Il nostro bioma è quello mediterraneo (la parte rossa) e se osserviamo bene notiamo che oltre che nel bacino del mediterraneo lo troviamo in una piccola parte

dell'Australia, del Cile, della California e dell'Africa. Quindi il nostro clima, che noi chiamiamo mediterraneo, in realtà è molto di più del bacino del mediterraneo.

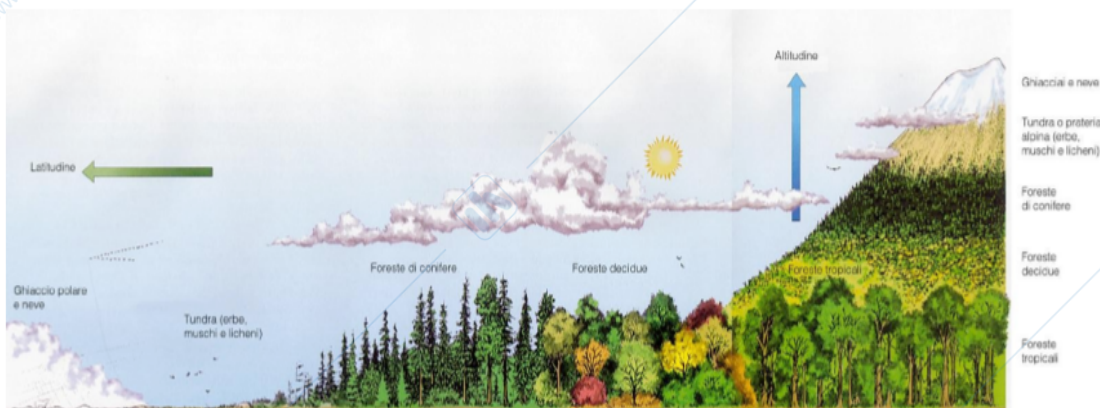
Abbiamo detto che Walter classifica le zone climatiche in 9 blocchi:

- **Zona equatoriale:** la temperatura è sempre intorno ai 25-27 °C, una zona abbastanza stabile, tanto è vero che la zona equatoriale è la zona dove non ci sono alternanze stagionali. È sempre giorno, le ore di luce sono molto maggiori di quelle del buio. Le precipitazioni sono distribuite lungo tutto l'anno, quindi se abbiamo tanta luce e abbiamo una temperatura idonea con precipitazioni distribuite tutto l'anno abbiamo il massimo del rigoglio vegetativo di queste zone (tanto è vero che nella zona equatoriale troviamo la foresta tropicale pluviale, che risulta essere il bioma più produttivo della terra).
- **Zona tropicale:** comincia ad esserci la stagionalità. Quindi zero stagionalità sull'equatore, man mano che ci spostiamo verso su e verso giù nei punti poco distanti dall'equatore, abbiamo la zona tropicale in cui comincia una lieve stagionalità, tanto è vero che possiamo distinguere una stagione invernale secca e una estiva umida.
- **Zona subtropicale arida:** ci spostiamo ancora di una piccola fettina dall'equatore (verso il basso e verso l'alto). Le precipitazioni cominciano ad essere scarse, temperature elevate durante il giorno che scendono repentinamente durante la notte. Man mano che ci allontaniamo dall'equatore la stagionalità diventa sempre più marcata.
- **Zona di transizione:** ancora più su e giù. Questa è la nostra zona, in cui il clima è mite: le estati sono secche e gli inverni sono piovosi e sporadicamente interessati da gelate.
- **Zone temperate:** qui cominciamo ad avere una stagionalità che non è più un'alternanza estate e inverno, il clima comincia ad essere un pochino più non favorevole alla crescita delle piante perché dalla zona temperata arriviamo alla zona tropicale artica e antartica (dipende dove ci muoviamo).
- **Zona polare artica:** parliamo di inverni lunghi, freddi e bui. La stagionalità diventa molto marcata e il clima non risulta essere idoneo alla crescita di organismi vegetali che però crescono e sono di un certo tipo e specialmente nella zona polare artica e antartica le precipitazioni sono scarse perché la pioggia viene intrappolata sotto forma di ghiaccio e non si sceglie mai. La coltre di ghiaccio che si scioglie d'estate è soltanto superficiale, ma resta km e km di ghiaccio nel sottosuolo che non si sciolgono mai (sono ghiacci eterni, quelli che troviamo sull'Everest, sulla cordiera delle Ande etc.). L'inverno, quindi, comincia ad essere lungo freddo e buio e l'estate piccola e umida. La loro estate equivale a 5-6-7 °C nostri.

Ci sono poi altre classificazioni meno precise, ad esempio quella di Robbin del 1969. Lui divideva il clima semplicemente in base alla disponibilità idrica e in base al freddo. In base a questa classificazione abbiamo solo: **PLUVIOBIOCLIMI** (che hanno come determinante l'assenza e presenza di piogge) e **TERMOBIOCLIMI** (che hanno come determinante la condizione di basse o alte temperature). Secondo questa classificazione possiamo spaccare l'Italia esattamente in due parti, da Roma in su e da Roma in giù. Da Roma in su c'è la regione padana e la produttività può essere limitata dalle basse temperature. Mentre, invece, per quanto riguarda la nostra regione, quella mediterranea, il determinante maggiore sono le piogge. Quindi in breve, possiamo dire che, nella zona mediterranea la produttività è limitata in estate (stagione molto secca), mentre al nord Italia il limite della produttività sono le basse temperature.

In base alla temperatura possiamo distinguere le zone della terra in differenti **biomi**. **Il bioma è un complesso degli ecosistemi di una particolare area geografica del pianeta definiti in base al tipo di vegetazione dominante.** Alla caratterizzazione di un bioma concorrono vari fattori, quali latitudine, altitudine, precipitazioni, ritmi stagionali, temperatura e clima. I due emisferi risultano essere opposti rispetto alle condizioni climatiche. Ad esempio, l'inverno boreale corrisponde all'alta stagione estiva in quello australe e viceversa. I biomi si distribuiscono secondo un **gradiente latitudinale** in risposta al clima. Dall'equatore ai poli si individuano tanti biomi quante sono le zone climatiche che si susseguono.

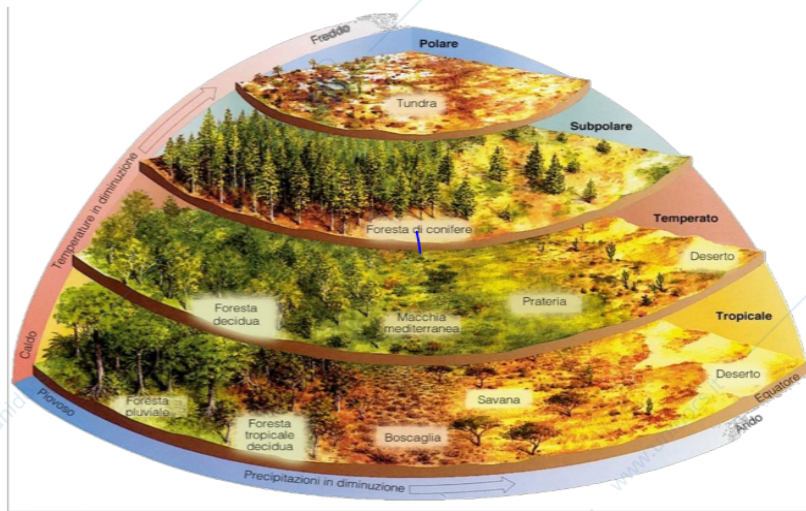
I biomi si distribuiscono anche secondo un **gradiente altitudinale**. Nel clima temperato, sulla cima di una montagna alta si possono trovare ghiacciai perenni, seguiti sul versante dalla tundra, dalla foresta di conifere e infine dalla foresta decidua. Altri fattori che influenzano la conformazione dei biomi sono i **gradienti di pioggia e di temperatura**. Si crea un gradiente vegetazionale con la diminuzione della pioggia: foreste mesofitiche, foreste decidue, praterie e deserti. Nella tundra e nel deserto, la quantità di caduta di acqua annuale è la stessa, però, le condizioni di temperatura e di umidità sono diverse. Nella tundra c'è bassa temperatura e l'acqua è tutta intrappolata come ghiaccio, ma l'umidità è alta. Nel deserto, invece, oltre ad essere assente l'acqua, l'umidità è quasi nulla. Il deficit di saturazione nel deserto è molto più alto rispetto a quello della tundra, in quanto l'aria è più secca. In entrambi i casi però, non ci sono condizioni che permettono una grande espansione delle popolazioni. Le popolazioni presenti in questi tipi di biomi estremi, sono ridotte in numero e sono generalmente caratterizzate da individui di grossa mole. Inoltre, un ruolo importante è assunto dal grado di **idratazione del suolo**. Per un suolo fertile c'è bisogno sia di aria che di acqua: troppa acqua genera anossia nelle radici, mentre poca acqua non favorisce l'approvvigionamento idrico da parte della pianta, che andrà incontro ad appassimento. Il suolo non risulta essere fertile in ogni punto della Terra, ma la vegetazione è in grado di adattarsi a quasi ogni particolare tipo di suolo. In un suolo impregnato d'acqua prevale la formazione di acquitrini e praterie palustri; un suolo umido favorisce una vegetazione pluristratificata (dalla superficie fino a 50 m); in un suolo secco prevalgono arbusti e praterie; in suoli eccessivamente aridi si esce fuori dagli ambiti di tolleranza delle specie vegetali.



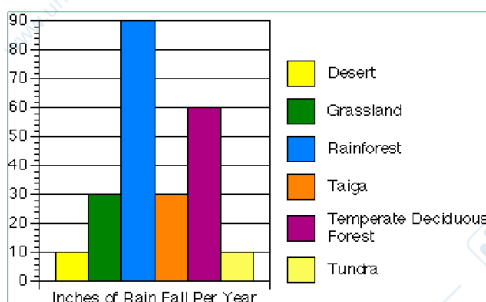
Quindi abbiamo capito che per definire i biomi ci sono 3 differenti situazioni: cambia il grado di idratazione del suolo, c'è un gradiente di diminuzione

delle piogge, c'è un gradiente di diminuzione della temperatura e lungo questi 3 gradienti si vanno a stanziare le componenti vegetali che costituiscono un bioma piuttosto che un altro.

Questa è la situazione del nostro pianeta:



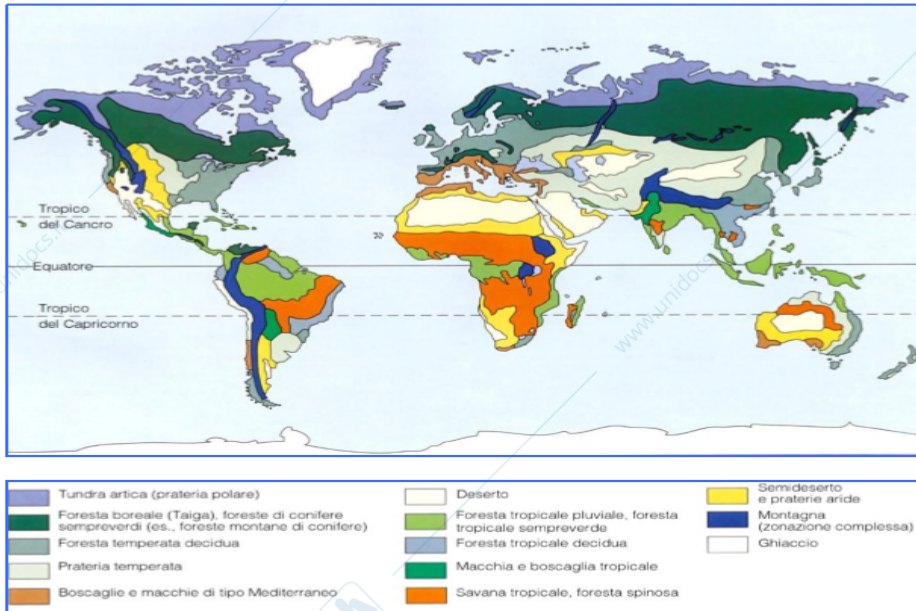
Nella zona equatoriale abbiamo il massimo della produttività con un clima caldo piovoso. Quando ci si sposta lungo questo gradiente (freccia in basso blu, da sinistra a destra) e la pioggia comincia a diminuire, si arriva ad un altro estremo. Si passa per tanti biomi quante sono le fasce climatiche e si arriva ad un gradiente arido. Se io invece parto da un gradiente piovoso caldo e vado verso il polo nord o verso il polo sud, che succede? Che il caldo diviene man mano temperato e poi freddo. Questi sono gli estremi, da un lato l'ambiente arido e dall'altro la zona fredda. Quindi i biomi si distribuiscono secondo un gradiente latitudinale, abbiamo tante fasce, tante fasce in risposta al clima. **E dove sono i biomi più diversificati?** Chiaramente non le zone estreme (polo sud o polo nord o zone desertiche) ma in quelle intermedie dove c'è una situazione in cui a volte prepondera più l'acqua, a volte prepondera più l'alta o bassa temperatura, però sono condizioni tali che permettono una vegetazione abbastanza florida.



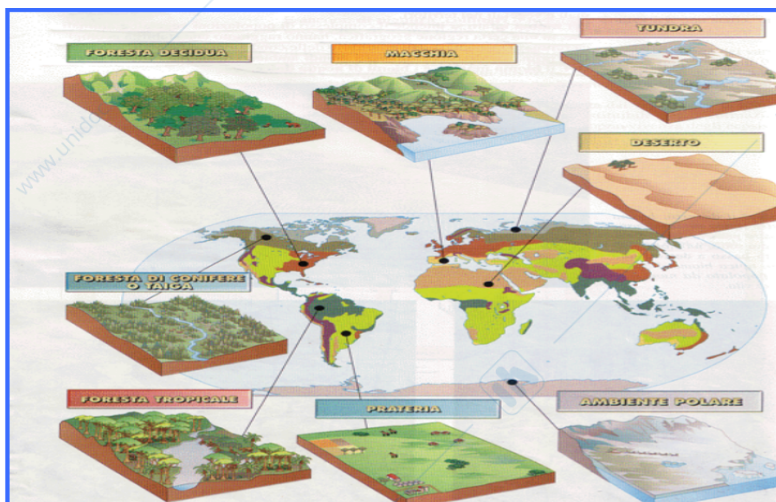
Questo è invece un grafico che ci mostra la distribuzione delle piogge nei diversi biomi che vedremo. Guardiamo un attimo la parte gialla. Da una parte abbiamo la tundra artica (polo nord), dall'altra parte, invece, abbiamo il deserto. Se guardo la pioggia che cade è uguale, però nel deserto caldo la pioggia evapora immediatamente (abbiamo una precipitazione che è bassissima, 300 mm di pioggia all'anno); nel deserto freddo, invece, seppure c'è il ghiaccio, quel ghiaccio non è un ghiaccio che può risultare un organismo vegetale per accrescersi perché, chiaramente, è un ghiaccio eterno che non si scioglie mai. Quindi sono definiti deserti proprio perché da

una parte la pioggia è bloccata sotto forma di ghiaccio e dall' altra non c'è proprio, ma sempre deserto è. L' accezione di deserto in ecologia è un luogo impervio dove non è facile la crescita di un organismo perché c'è un fattore fortemente limitante, in questo caso il fattore fortemente limitante è l'acqua allo stato utilizzabile da parte dell'organismo.

BIOMI



Tanti biomi quante sono le fasce climatiche.



Cominciamo dal **bioma taiga**. È un bioma molto specifico, dove possiamo notare distese enormi di conifere. C'è un motivo per cui nella taiga ci sono solo conifere? Certo, perché è la specie che più si adatta a quel tipo di clima. Se scendo un po' più giù, c'è un altro **bioma** che si chiama **foresta decidua**. La particolarità di questa foresta è che perde completamente le foglie durante l'inverno (foresta fantasma) e rifiorisce in primavera. Scendendo ancora più giù abbiamo la **foresta tropicale**, molto

diversa dalla precedente in quanto la vegetazione è rigogliosa. Ancora più in basso (America meridionale) ci sono le **grandi praterie**. Un tipo particolare di prateria è la savana. In una prateria possiamo notare una estesa distesa di erbe basse e tantissimi pascoli. Andando verso l'Africa ci ritroviamo nel **deserto del Sahara**, dove non c'è vegetazione e possiamo notare pochi arbusti sparsi. Dal continente africano, spostandoci verso nord possiamo notare, invece, la **macchia mediterranea** (pineti e arbusteti). Ci restano due ambienti estremi: **tundra artica** e **ambiente polare**, che sono confinanti (infatti molto spesso i libri di ecologia non fanno distinzione) però non sono proprio uguali poiché nella tundra l'uomo c'è ancora, nell'ambiente polare no. Nella tundra l'unica vegetazione presente sono le erbe basse, muschi e licheni, che crescono nei mesi più caldi, dopo il disgelo, sul terreno imbevuto d'acqua. A nord della tundra, abbiamo la contrapposizione del deserto: l'ambiente polare. Negli ambienti polari troviamo gli orsi, animali che vanno in letargo. Ma perché gli orsi vanno in letargo? Perché per quanto l'orso sia un omeoterma, pensiamo a quanto poco dovrebbe mangiare o quanto poco dovrebbe muoversi per vivere a quelle temperature così basse. Il movimento a temperature bassissime costa molta più fatica perché ci vuole più calore metabolico, dovrebbe quindi mangiare molto di più, ma dov'è il cibo d'inverno quando è tutto coperto da neve e non c'è vegetazione?

PASSIAMO ORA AD ANALIZZARE OGNUNO DI QUESTI BIOMI.

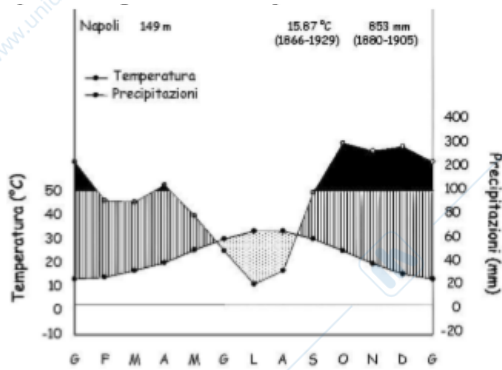
LE PRATERIE



Si presenta come una grande distesa di erba dove ci sono pascoli di grossi erbivori. Se dovessimo dare una definizione di prateria dovremmo dire che sono biomi caratterizzati da alternanza di inverni freddi ed estati calde e secche con precipitazioni che sono irregolari. Questa irregolarità di precipitazioni consente, in certi momenti

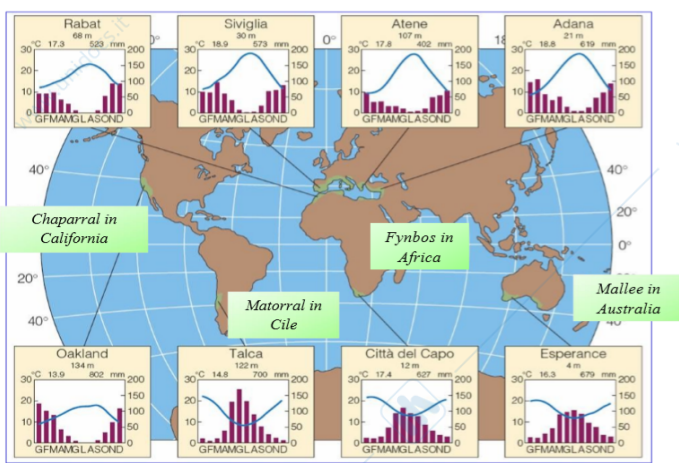
dell'anno, la crescita di erbe alte anche fino a due metri (**prateria alta**, quando le piogge sono più abbondanti); quando le piogge sono più scarse crescono erbe basse o comunque non più alte di 30 cm (**prateria bassa**). Quali sono le particolarità della prateria e dove sono diffuse? Queste vaste aree sono diffuse nelle zone dell'America settentrionale, in Russia (praterie con inverni molto rigidi), mentre nell'emisfero australe vi sono le pampas dell'Argentina e dell'Uruguay (inverno rigido ma non paragonabile a quello russo). Ciò che accomuna tutte le praterie sono gli incendi molto frequenti perché la vegetazione è infiammabile, è infiammabile specialmente quando il clima è secco e c'è una radiazione solare molto forte. I frequenti incendi e il pascolo del bestiame sono i fattori che determinano una **vegetazione prevalentemente erbacea**. Sono abbondanti soprattutto le graminacee.

Esistono poi dei diagrammi, i famosi "**Climogrammi di Walter**" (immagine sovrastante). Questi diagrammi sono caratterizzati da 3 assi. Un asse delle X dove ci sono i mesi dell'anno, e due assi delle Y (uno a destra e uno sinistra. Quello a sinistra ci riporta la temperatura, quello a destra i mm di pioggia). Quindi questi diagrammi mettono in relazione i mesi dell'anno con quanta pioggia cade e quanta temperatura c'è in quei mesi precisi. Se per esempio prendiamo in considerazione giugno vediamo, dal diagramma, che ha 60 mm di pioggia e una temperatura di circa 15 gradi. Se invece vado a dicembre, questo mese sarà caratterizzato da una pioggia intorno ai 20



mm e una temperatura intorno ai -15 gradi. Questi diagrammi, quindi, sono importanti perché ci permettono, anche se noi non conosciamo la zona che stiamo studiando, di distinguere un bioma dall'altro. Perché se dal diagramma osservassimo che in inverno ci sono -20 gradi, questo dettaglio ci consentirebbe di escludere che il bioma considerato sia una foresta, poiché temperature così basse in questo luogo impedirebbero la crescita della vegetazione e quindi altro che super vegetazione che abbiamo.

Quindi questi climogrammi sono importanti perché guardandoli si può capire se il bioma considerato è un bioma tropicale, un deserto, una prateria e così via.



Facendo riferimento all'immagine sovrastante, se guardo i diagrammi che sono sopra l'equatore avranno un certo ritmo stagionale, se guardo quelli che stanno sotto vediamo come è invertito. Quindi diciamo che nel nostro emisfero, anche per quanto riguarda le praterie, le piovosità più elevate si concentrano nei mesi maggio, giugno, luglio (nei mesi nostri estivi). Se vado invece nell'emisfero australe (che sta giù) è il contrario. L'alternanza è la stessa, ma abbiamo temperature più alte quando noi, nel nostro emisfero, le abbiamo più basse.

ADATTAMENTI DELLE PRATERIE. Incendi regolari, siccità periodiche e pascolo eccessivo producono una vegetazione prettamente graminacee, dove la maggior parte delle biomassa è negli organi di riserva. In questo modo, con una vegetazione molto bassa, la pianta si protegge non solo dal gelo invernale ma cresce velocemente dopo che l'erbivoro ha pascolato. Inoltre, in ambienti come le praterie ci sono molte specie erbacee che si chiamano **pirofite**. Queste specie sono capaci di crescere rapidamente (a rapida generazione) dopo il passaggio del fuoco. Sono specie resilienti che vengono perturbate dal fuoco, distrutte ma sono in grado dopo uno, due o tre anni di tornare come erano prima.

SAVANA

Un tipo particolare di prateria è la **savana**. Perché? Perché mentre la prateria è caratterizzata da una vegetazione prettamente erbacea, in una savana è facile trovare anche piante ad alto fusto, come ad esempio il baobab.



Qual è la differenza tra la savana e la prateria in senso stretto? La savana presenta un clima molto più caldo, anche se la vegetazione spesse volte è la stessa.

Tale bioma può essere determinato da: condizioni climatiche; condizioni del suolo (il suolo della savana è particolare, di colore rosso); incendi periodici, da cui deriva il **fenomeno della savanizzazione**, ovvero la distruzione della foresta per favorire il pascolo. Perché c'è la necessità di distruggere la foresta per far spazio ai pascoli? Perché la richiesta di cibo sta crescendo, il pascolo serve perché da questo si ricava carne, latte ma anche indumenti, come le pellicce. Una volta, però, che la foresta è diventata savana, non può ritornare foresta. La temperatura della savana è più calda di quella della prateria, specialmente durante l'inverno. Anche in questo bioma troviamo pascoli di grandi erbivori. In molte savane il suolo è ricco di ossido di ferro, in tal modo viene impedita la crescita delle piante alte, mentre viene favorita quella dei cespugli che hanno radici superficiali (questo perché l'ossido di ferro sul suolo forma uno strato impenetrabile per la radice impedendo alla pianta di accrescersi).

La produttività di questo bioma è limitata dall'acqua, abbiamo zone in cui non c'è proprio acqua e in queste zone qui c'è un clima molto secco, per cui qui c'è rischio di incendi.

Adattamenti savana.

Animali e vegetali sono in grado di fronteggiare grossi periodi di aridità.

▫ **Alberi(Baobab)con fusto rigonfio di acqua come riserva.** Il fusto però non è sempre rigonfio, durante la stagione delle piogge è sottile, quindi possiamo dire che il fusto di questi alberi funge da cisterna, che si riempie e si svuota a seconda della disponibilità di acqua.

▫ **Piccoli mammiferi dotati di reni molto efficienti per trattenere acqua** (fanno poca pipì). Spesso qui gli animali hanno un tipo di vita notturna, specialmente nei periodi più caldi, poiché in questo modo sono riparati non solo dai predatori ma anche dall'eccesso di calore.

▫ **Caccia al tramonto.** Questo accade per una questione di visività (chiaramente un predatore è più forte quando la preda non lo vede) o per evitare di sprecare molta energia, in quanto la temperatura è più bassa. Spesso diventano mortali per le prede le zone con molti corsi d'acqua, dove il predatore si può accostare e fare gli agguati.

▫ **Termiti in grado di costruire nidi dotati di canali di aerazione.**

In questo bioma troviamo le giraffe, che sono molto ghiotte di acacia. L'acacia però presenta spine coriacee che sono un deterrente contro la predazione, quindi come fa la giraffa a cibarsi? **Siamo in presenza di un esempio di coevoluzione:** la preda (in questo caso l'acacia) per difendersi dal predatore ha evoluto una serie di difese strutturali, ma al contempo il predatore, nel corso degli anni, ha evoluto una serie di strategie adattative per mangiare comunque la preda. E cos'ha la giraffa di particolare che non hanno gli altri erbivori? Il palato. Il palato della giraffa è completamente diverso rispetto al palato di un altro erbivoro, perché ha delle piastre ossee che sono delle presse che schiacciano tutto e questo consente al palato di non essere bucato.

Quindi la giraffa ingerisce una grande quantità di spine, le mastica, ma non gli fanno assolutamente nulla. La coevoluzione consente alla giraffa e all'acacia di non estinguersi.

MACCHIA MEDITERRANEA

Bioma sempreverde, le piante della macchia mediterranea fanno la fotosintesi tutto l'anno (ovviamente d'estate questa attività è limitata per il clima troppo secco). Il clima presenta estati secche e calde ed inverni miti in cui si concentrano le precipitazioni. Per area mediterranea non si intende solo la zona vicina al Mar Mediterraneo; tale bioma esiste anche in altre parti del globo terrestre con nomi differenti (**Chaparral** in California, **Matorral** in Cile, **Fynbos** in Africa, **Mallee** in Australia). Le stagioni della macchia mediterranea sono sempre le stesse, ma sono invertite da un emisfero all'altro (quando è estate nell'emisfero boreale è inverno in quello australe).

La composizione vegetazionale della macchia mediterranea è dominata dalle sclerofille. Le sclerofille sono specie sempreverdi che presentano una foglia coriacea caratterizzata da tessuti sclerenchimatici adattate a resistere alle alte temperature estive. Molte specie della macchia presentano foglie e fusti con spiccata tomentosità (sono vellutate perché ricoperte da una fitta peluria). La Smilax aspera (stracciabraghe) ha foglie che presentano spine ai lati (stracciabraghe perché solitamente questa specie si trova dove potano i contadini, dove si attacca ai vestiti e strappa tutto). Il ginepro e il corbezzolo sono piante coriacee con foglie resistenti, cuticola spessa e cerosa, tessuto a palizzata pluristratificato (questo tessuto serve a combattere l'eccessiva secchezza della stagione estiva). Un'altra specie vegetativa tipica della macchia mediterranea è l'oleandro (pianta velenosa perché secerne fenoli che sono deterrenti per la predazione). L'oleandro ha una particolarità: gli stomi sono presenti solo sotto la foglia, per evitare l'eccessiva perdita di acqua per traspirazione. Altre caratteristiche delle piante di ambiente mediterraneo sono foglie molto piccole con dimorfismo stagionale. Cosa vuol dire? Che queste piante hanno doppia forma, hanno foglie che d'estate sono di un tipo e d'inverno di un altro e spesso volte sono coperte da una fitta coltre di peli (che è un deterrente per un eccesso di irradiazione, ma è anche un deterrente quando ad esempio la temperatura è troppo alta o bassa. Se la temperatura è bassa, i peli fungono da isolanti facendo sì che la foglia non si raffreddi tanto. Se invece la temperatura spesso volte è troppo calda, la coltre di peli impedisce all'eccesso di irradiazione di colpire la foglia).

FORESTA PLUVIALE

La foresta pluviale è tipica delle regioni equatoriali, dove vi sono elevate e costanti precipitazioni annue (Amazzoni, Congo e Sud-Est Asiatico). In questo bioma l'umidità eccessiva rende il clima molto pesante, sulle foglie inizia la decomposizione quando sono ancora attaccate all'albero. Questo clima caldo-umido è favorevole per le piante ma anche per i decompositori, che decompongono la sostanza organica ed è l'unico bioma in cui la produttività eguaglia la decomposizione (si produce tanta biomassa quanta biomassa viene poi consumata, questo è il motivo per cui abbiamo questo fiorire di vegetazione). È costituita da foreste fitte, nere ed impenetrabili (giungla). È caratterizzata inoltre da buio totale e assenza totale di vento (l'unico rumore che

sentiamo è quello degli animali che non possono vedersi e comunicano tra loro con segnali sonori).

Sono presenti piante di diverse altezze e la comunicazione tra "un piano superiore" ed "uno inferiore" è consentita dalle liane (un tipo di vegetazione che collega tra loro i vari piani della foresta e che permette agli animali di muoversi)

La foresta pluviale è il bioma più produttivo della terra, dovuto anche al fatto del paradosso della decomposizione (si produce tanta biomassa quanta biomassa viene poi consumata).

Qual è il clima? Temperatura sempre intorno ai 25 gradi (temperatura ottimale per la crescita degli organismi) e piovosità in tutti i mesi.

ADATTAMENTI:

▢ **Biodiversità elevata** (numero di specie elevatissimo)

▢ **Epifitismo**. Col termine epifite si intendono una serie di piante che vivono su altre piante, che usano normalmente come sostegno ma non per procurarsi il nutrimento. Sono piante epifite le felci, i muschi, i licheni ed altri organismi sessili che non crescono sul terreno ma vivono prevalentemente sui tronchi o sui rami degli alberi, soprattutto nelle foreste tropicali e subtropicali dove la vegetazione è tanto densa e fitta che impedisce alla luce solare di raggiungerne gli strati più bassi, che restano perennemente in ombra. In questi habitat gli alberi, per poter usufruire della luce solare, si sviluppano in altezza e questa caratteristica viene sfruttata dalle piante epifite che possono così raggiungere lo stesso scopo. Questo obiettivo viene raggiunto utilizzando i tronchi altissimi o i rami delle piante ospiti come sostegno al quale si ancorano mediante radici adesive o aggrappanti. In questo modo, pur se viventi in un ecosistema così fitto ed ombreggiato, le piante epifite riescono a captare l'energia solare sufficiente allo svolgimento della necessaria attività fotosintetica; inoltre quasi tutte le piante epifite, anche se con modalità differenti, sono in grado di assorbire e conservare l'acqua piovana. Tra le epifite ricordiamo le orchidee, caratterizzate da un fenomeno definito **caulifloria** (i fiori non sorgono alle ascelle dei rami, ma sull'apice del fusto. In questo modo possono essere visti dagli animali che devono mediare il passaggio del polline).

▢ Scimmie che hanno caratteristiche particolari che le consentono di poter svolgere vita aerea. Spesse volte nei piani intermedi della foresta abbiamo animali che non scendono mai a terra perché altrimenti a terra sarebbero predati.

▢ **Mimetismo**. I predatori, come ad esempio i serpenti strangolatori, riescono a mimetizzarsi tra le piante in cui vivono, uccidono la preda soffocandola e poi la mangiano intera.



Se si guarda una giungla dall'alto riusciamo a vedere solo un corso d'acqua, se invece la vediamo da un'altra prospettiva (come nella foto sovrastante) riusciamo a vedere i diversi piani o stratificazioni della foresta. Dal basso verso l'alto abbiamo: lo strato arboreo emergente, strato arboreo inferiore, strato arbustivo, volta arborea e sottobosco. In questi "piani del grattacielo" vivono diverse specie ed ognuna di questa ha un proprio "condominio". Le specie che vivono ai piani superiori non scendono mai a terra perché ogni animale ha la propria nicchia. Sulle cime degli alberi si possono ritrovare le arpie. La volta forestale è lo strato più particolare. Lì si trovano le **scimmie urlatrici**, che non scendono dagli alberi per evitare i predatori, i **pangolini**, che presentano delle code sviluppate con le quali si aggrappano agli alberi, e i **pappagalli**, che presentano le piume timoniere molto lunghe che fungono da bilanciere, ma hanno ali molto tozze, perché devono evitare di urtare gli alberi. Sul suolo vivono le pitte formichiere e i tapiri.

FORESTA DECIDUA (TEMPERATA)

Mentre la foresta tropicale ha una vegetazione verde tutto l'anno, la foresta temperata è dominata da piante decidue, che perdono le foglie durante l'inverno e le riacquistano in primavera, quali querce, castagne, olmi, noci, betulle, carpini, ontani, tigli, frassini, etc. Mentre nella foresta pluviale la temperatura è sempre intorno ai 25 gradi, qui invece scende di parecchio (anche a zero gradi). Anche in questo caso spacciamo la nostra superficie terrestre in 2 parti, abbiamo le foreste temperate che sono nell'emisfero nostro che hanno un ritmo stagionale diverso rispetto a quelle che sono nell'emisfero australe. In ogni caso, è un bioma diffuso in America settentrionale (Canada), Nord Europa e Asia orientale (Cina).

In primavera, il suolo della foresta si ricopre di fiori, poiché la luce riesce a penetrare tra i rami di alberi e arbusti ancora spogli di foglie.

ADATTAMENTI: La vegetazione è strutturata in più strati, in genere 4 con un diverso grado di luminosità: strato arboreo alto (20-30m), strato arboreo basso (5-10m), strato arbustivo (1-2m) e strato erbaceo (a livello del suolo). La stratificazione della vegetazione consente agli animali la spartizione di tutte le nicchie disponibili. Le nicchie ecologiche sono tantissime, poiché maggiore è la complessità della foresta maggiore è il numero di specie animali che può ospitare. La foresta temperata, nella classifica della biodiversità, si trova al secondo posto, subito dopo la foresta pluviale. In questo bioma troviamo animali che vanno in letargo.

TAIGA O FORESTA BOREALE

La taiga (foresta boreale) è un bioma tipicamente monospecifico. Il clima è caratterizzato da inverni molto lunghi e rigidi, mentre le estati sono brevi e secche. Sono presenti poche specie (bassa richness), ma gli individui che popolano le specie sono tanti (alta evenness). Ci sono molti organismi vegetali epifiti, in questo caso non cercano umidità ma protezione dal freddo. Questo bioma è caratteristico dell'emisfero boreale, in particolare delle regioni settentrionali di Europa, America e Asia. La maggior parte delle piante hanno un portamento a piramide, in questo modo la neve non si deposita sui rami superiori. Le specie arboree più diffuse sono le conifere: i pini, gli abeti ed i larici, le cui foglie aghiformi e la chioma piramidale consentono di sopportare le intense nevicate. Gli adattamenti di piante ed animali implicano la resistenza a temperature molto basse e all'estrema secchezza dell'aria. Tra gli adattamenti tipici delle piante vi è la sclerofillia. Le conifere modificano la foglia a forma di ago, sono coperte da una spessa cuticola, hanno uno scarso tenore idrico e possiedono stomi infossati per limitare la perdita di acqua nei periodi secchi ed evitare

danni alla foglia durante il gelo. La taiga ospita mammiferi grossi (orsi, alci, renne), in quanto la mole corporea aiuta a superare gli inverni rigidi (-20°C), e piccoli (linci, zibellini). Tra gli uccelli sono comuni crocieri e nocciolaie. Alcuni animali vanno in ibernazione (orso) o producono glicerolo nelle cellule per abbassare il punto di congelamento (vespe). Ci sono anche fenomeni di mimetismo e animali che fanno la muta invernale con un sottopelo più corto.

TUNDRA ARTICA O ANTARTICA



La tundra si estende su vasti territori ed è caratterizzata da un suolo saturo d'acqua, che ghiacciando d'inverno, provoca la sofferenza della biomassa epigea. Al di sotto del suolo si trova il **permafrost**, uno strato di terreno perennemente ghiacciato che non permette il drenaggio dell'acqua. In estate il ghiaccio superficiale si scioglie, ma in modo non uniforme. In questo modo si formano acquitrini sparsi sul territorio, corrispondenti a zone in cui molti animali vanno a nidificare. Le specie presenti sono poche e si tratta di ecotipi, specie adattate a queste condizioni particolari.

La tundra non si trova solo all'estremo nord, ma anche in alcune zone caratterizzate da catene montuose molto alte (gradiente altitudinale dei biomi). La ritroviamo in diverse zone del mondo e sconfinata verso il circolo polare artico, dove abbiamo precipitazioni che diventano subito ghiaccio e temperature che scendono fino a -30 gradi.

La tundra artica durante l'inverno è completamente ricoperta da ghiaccio. Durante l'estate, invece, è caratterizzata da muschi e giunchi che crescono intorno agli acquitrini, mentre nelle zone più asciutte si possono ritrovare licheni, arbusti nani sempreverdi e specie erbacee aventi una struttura a "cuscinetto", che consente la resistenza al vento e la limitazione della dispersione del calore, dal momento che tali zone sono abbattute da forti venti che possono superare i 150 km/h . **ADATTAMENTI:** gli animali sono di grossa mole, subiscono la muta e vanno in letargo; hanno spesso arti modificati per correre sulla neve e sul ghiaccio, ad esempio, Gulo gulo (wolverine), top predator della tundra.

DESERTO CALDO

Il deserto caldo è caratterizzato da scarse ed irregolari precipitazioni (meno di 250 mm all'anno). Nel deserto caldo il fattore limitante è **l'assenza di acqua (pluviobioclimi)**. Sono presenti a tutte le latitudini. Presentano estati molto calde ed inverni tiepidi. I deserti coprono circa 50 milioni di km^2 , circa $1/3$ delle terre emerse. È povero o privo di vegetazione a causa dei forti venti, delle forti escursioni termiche e della rapida evaporazione. I deserti sono dominati da arbusti annui con apparati radicali superficiali ed estesi e metabolismo CAM. Le xerofite effimere trascorrono la stagione secca sotto forma di semi, che dopo le piogge germinano e si accrescono. I

semi, dunque, devono avere un'elevata capacità di sopravvivenza, talvolta sono in grado di rimanere vitali per anni. Inoltre, alcune piante hanno una fotosintesi sotterranea, operata da pigmenti fotosintetici presente nei rizomi radicali. Per quanto riguarda gli animali, **diversi sono gli adattamenti**: essi vanno in **estivazione** cioè sospendono le loro attività nei periodi più caldi; prediligono **attività notturne**, nelle ore più fresche e vivono in tane profonde ed umide; sono ricoperti da una **spessa cuticola (rettili) o da un esoscheletro (insetti) che limita le perdite d'acqua per traspirazione.**

DESERTO POLARE

Nei deserti freddi e polari il fattore limitante principale è la temperatura (termobioclimi). Hanno estati fredde ed inverni molto rigidi. I deserti polari in particolare sono caratterizzati da temperature estive ed invernali sempre molto basse. I deserti polari si trovano in Artide e nell'Antartide. Le poche specie vegetali presenti nella stagione favorevole sono per lo più muschi o basse piante erbacee che presentano habitus "a cuscino" per adattarsi a forti venti polari. Le specie che popolano questi ambienti estremi presentano speciali adattamenti per fronteggiare il freddo, quali spesso tessuto adiposo. Anche se molto diversi dal punto di vista evolutivo, gli animali della tundra e del deserto freddo hanno subito evoluzione convergente sviluppando una forma simile. Per combattere il freddo, hanno messo in atto gli stessi adattamenti.

L'acqua come fattore ecologico

L'acqua è un fattore ecologico che può essere considerato sia **come risorsa**, quando viene assunta dall'organismo per mantenere costante il suo bilancio idrico, sia **come condizione**, in quanto come umidità regola molti processi, quali, ad esempio, la traspirazione.

L'acqua è un componente inorganico importante della biosfera e costituisce circa il 70-80% del corpo di ciascun organismo. È presente in 3 stati fisici differenti: solida, liquida e gassosa, che danno all'acqua proprietà completamente differenti. **Noi quale tipo di acqua utilizziamo?** Difficile dirlo, chiaramente beviamo acqua allo stato liquido, però l'acqua che è presente in atmosfera allo stato gassoso (vapore acqueo) è fondamentale per l'essere umano e in generale per tutti gli organismi, poiché regola i ritmi di traspirazione, di sudorazione e a livello globale regola tutti i fenomeni di assorbimento, rifrazione e riflessione della luce.

Perché ha un'enorme importanza biologica? Perché la vita nasce in acqua e nessun organismo può rimanere in condizioni attive in assenza di acqua (si può stare senza mangiare per 15-20 giorni, ma senza bere non si può stare, si muore quasi subito poiché la maggior parte dei processi metabolici avviene in soluzione acquosa). L'acqua per le sue specifiche proprietà è considerata il **solvente per antonomasia**. Queste proprietà sono:

- Si trova allo stato liquido in ampi intervalli di temperatura.
- Possiede **elevata capacità termica** (rapporto fra il calore scambiato tra il corpo e l'ambiente e la variazione di temperatura che ne consegue)
- Possiede **elevato calore di vaporizzazione** (per passare dallo stato liquido allo stato gassoso occorre un'elevata temperatura (100 gradi)).

- **Quando solidifica, aumenta di volume**
- Ha una forte **coesione e tensione superficiale** (le molecole d' acqua creano un velo all'intercapedine tra acqua e aria e questo permette a molti animali di camminare sull' acqua)

Anche se l'acqua è il composto più abbondante presente sul nostro pianeta, dobbiamo comunque tenere presente che solo una piccola percentuale è presente sotto forma di acqua dolce, poiché la maggior parte è salata (circa il 97% è oceano). Il 3% di acqua dolce si divide in: $\frac{1}{4}$ (acque di fiumi, laghi e torrenti) e $\frac{3}{4}$ (acqua bloccata nelle calotte polari). L' acqua a cui si fa riferimento quando pensiamo all' approvvigionamento idrico da parte dell'uomo è l'acqua di falda acquifera (acqua sotterranea). In atmosfera, l'acqua si trova prevalentemente in forma di vapore (0,001%). Anche se costituisce solo una piccola percentuale, il vapore acqueo in atmosfera è però fondamentale per 2 motivi: perché è un gas ad effetto serra (insieme alla CO₂ contribuisce al riscaldamento globale dell'atmosfera) e perché da questo dipende la vita degli organismi sul nostro pianeta (il vapore acqueo entra attraverso gli stomi regolando la fotosintesi). Questa piccola quantità di vapore acqueo in aria è presente in differenti tipologie, prima di vederle facciamo una differenza tra acqua pura e acqua dolce. Le acque pure sono quelle ricche di elementi chimici.

Abbiamo detto che il vapore acqueo in atmosfera è importante perché regola i processi di assorbimento, rifrazione e riflessione della luce. Che succede quando arriva la radiazione solare a livello dell'atmosfera? Una parte viene riflessa dai gas che sono presenti a livello dell'atmosfera stessa; un'altra parte, invece, arriva al suolo e di questa che arriva al suolo (circa il 51%) soltanto l'1% è utilizzato per i processi di fotosintesi. **Il vapor acqueo presente in atmosfera**, assorbendo radiazioni e attraverso fenomeni di rifrazione e di riflessione, **influenza il bilancio energetico del nostro pianeta**.

Il contenuto di vapor d'acqua dell'aria può essere descritto da:

- 1. Umidità assoluta** (vapore d' acqua presente in atmosfera e si misura in g/kg o g/m³ di aria)
- 2. Umidità relativa** (definita come il rapporto tra la quantità di vapore acqueo contenuto in una massa d'aria e la quantità massima di vapore acqueo che la stessa massa d'aria riesca a contenere nelle stesse condizioni di temperatura e pressione)
- 3. Deficit di saturazione**, che rappresenta la differenza tra la pressione di vapore di saturazione e quella presente realmente nell'aria, a una determinata temperatura. Di conseguenza, se nell'ambiente l'umidità relativa è bassa, il deficit di saturazione, a parità di temperatura, sarà elevato.

La disponibilità di acqua presente sulla superficie terrestre dipende essenzialmente dalle precipitazioni che, a loro volta, dipendono dalla geografia, dalla morfologia dell'area considerata, dallo spostamento delle grandi masse di aria e dalla temperatura. Dunque, la distribuzione delle precipitazioni condiziona il tipo di organismi animali e vegetali che si possono ritrovare in una determinata area.

In base alla quantità di acqua che necessitano, si distinguono:

- **organismi idrofil** che vivono totalmente immersi in acqua, ad esempio fitoplancton marino o le piante acquatiche che frangono le correnti con una forma particolare del corpo;
- **organismi igrofil** che vivono in ambienti particolarmente umidi, dove non c' è traspirazione poiché c'è il deficit che è pari a zero;
- **organismi mesofil** che sono in grado di vivere in ambienti in cui vi è un'alternanza di precipitazioni e di stagioni;

- **organismi xerofili** che vivono in ambienti in cui le precipitazioni costituiscono un fattore limitante per quasi l'intero anno, ovvero vi è scarsa quantità di acqua. Molti organismi xerofili li abbiamo anche alle nostre latitudini, poiché in estate, specialmente in alcune zone della macchia mediterranea, raggiungiamo temperature molto elevate.

Quindi, dicevamo, l'acqua è risorsa e condizione. È una condizione perché regola la traspirazione e conseguentemente regola anche la distribuzione della vegetazione, che si distribuisce lungo la fascia equatoriale perché non abbiamo problemi di mancanza d'acqua. Man mano che ci allontaniamo dalla fascia equatoriale, la limitata disponibilità idrica fa sì che la produttività si abbassi sempre di più.

Ogni organismo, ovunque esso viva, deve controllare il proprio bilancio idrico (ossia introdurre tanta acqua quanta ne perdono) e ovviamente, ognuno di questi, lo fa in un modo diverso poiché un organismo xerofilo si trova a combattere in condizione estreme, un mesofilo ha problemi solo in alcuni momenti dell'anno, un idrofilo si trova ad affrontare altri tipi di problemi ma non di certo quello dell'umidità dato che è immerso in acqua. E che cosa succede? Che quanto più bassa è l'umidità relativa e quanto maggiore è il deficit di saturazione, più elevata è la traspirazione (quindi il passaggio di acqua dall'interno dell'organismo verso l'esterno).

Come fanno piante ed animali a regolare il bilancio idrico? C'è una differenza sostanziale tra i due tipi di organismi, in quanto la pianta è sedentaria, mentre invece l'animale è in grado di muoversi e dunque di spostarsi da un determinato luogo se le condizioni idriche non sono buone.

Come regola un animale il bilancio idrico? Può contare sui fenomeni di: (i processi che seguono sono finalizzati alla perdita d'acqua da parte dell'organismo)

- *Traspirazione*, che dipende dal tipo di animale poiché un conto è se consideriamo un animale a sangue freddo (ad esempio un rettile), un altro conto è se consideriamo un mammifero.
- *Evaporazione*
- *Respirazione* (anuri ed urodeli hanno la capacità di respirare attraverso la pelle)
- *Escrezione* (urina e feci).

Come regola una pianta il bilancio idrico? Può contare sui fenomeni di: (i processi che seguono sono finalizzati alla perdita d'acqua da parte dell'organismo)

- *Traspirazione*
- *Evaporazione*
- *Respirazione*

Come fanno invece ad approvvigionarsi l'acqua?

Gli animali lo fanno tramite:

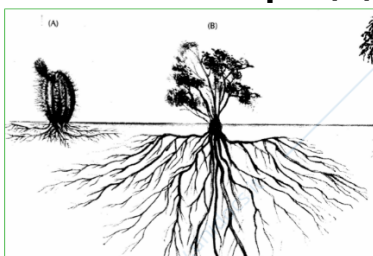
- *Ingestione diretta* (bevendo)
- *Cibo* (tramite cibi ricchi di acqua e Sali minerali)
- *Assorbimento tegumentale*. Alcuni animali, ad esempio gli anuri hanno una pelle che traspira
- *Acqua metabolica* (ossidazione di acidi grassi). Alcuni animali del deserto sono specializzati ad usare l'acqua metabolica perché in questo modo limitano al massimo le perdite di acqua laddove l'acqua costituisce un tesoro per questi animali.

Le piante, invece, assorbono acqua *attraverso le radici* o tramite *l'apertura degli stomi*. Affinché però la pianta assorba acqua dal suolo si deve creare una forza di suzione, altrimenti l'acqua non verrà mai assorbita. Ci deve essere qualcosa che tira l'acqua attraverso i tessuti della pianta e lo fa la radice al fusto, dal fusto alla foglia, dalla foglia all'atmosfera, e questo qualcosa sono i potenziali idrici. Affinché la pianta possa assorbire acqua dal suolo si deve creare un gradiente terreno-pianta-atmosfera associato a diversi potenziali idrici di queste 3 componenti e precisamente: il potenziale idrico del suolo è più elevato rispetto a quello del tronco, che a sua volta è più elevato rispetto a quello della biomassa fogliare, che a sua volta è più elevato di quello dell'atmosfera. Quindi l'acqua viene trasportata da un potenziale più alto ad uno più basso e si crea un gradiente di flusso dalla radice verso la superficie fogliare. Ricordiamo che la pianta non assorbe solo acqua ma anche nutrienti trasportati dal floema. Il flusso d'acqua dal suolo all'atmosfera è importante perché regola il bilancio idrico della pianta stessa ed è possibile solo grazie all'instaurarsi di potenziali idrici (questo è fondamentale, perché se il suolo ha un potenziale idrico più basso rispetto quello della pianta, questa non riesce a prendere l'acqua dal terreno). Maggiore sarà l'evapotraspirazione e maggiore sarà il raffreddamento della pianta.

Il passaggio del vapore acqueo dall'ambiente interno all'ambiente esterno degli organismi è regolato dalla cuticola delle foglie e dalla pelle o l'esoscheletro degli animali. Nelle piante il passaggio avviene attraverso l'apertura degli stomi, nell'uomo e in altri animali attraverso la pelle, e negli insetti? Gli insetti hanno uno scheletro di chitina che impedisce il passaggio di aria dal corpo interno verso l'esterno, quindi come avviene lo scambio di aria? Avviene grazie a delle interruzioni presenti sullo scheletro chitinoso (spiracoli).

Ricorda: la pianta non va annaffiata in piena luce solare perché impazzisce, dato che non capisce che deve chiudere gli stomi per il troppo caldo. Nel momento in cui riceve acqua nel suolo pensa di poter aprire tutto quello che ha a disposizione non essendo in carenza idrica. Per cui apre gli stomi violentemente e si crea un flusso di vapore talmente violento, dalla base all'altezza, che brucia completamente le foglie. Ci accorgiamo solo 24 ore dopo che è tutto bruciato poiché il fenomeno ci impiega tempo per avvenire e accade perché la pianta non regola più. Nel gradiente naturale la pianta, invece, sa benissimo quando aprire e chiudere gli stomi perché riceve input non soltanto da quanta acqua c'è nel suolo ma anche quanto c'è in atmosfera, e più l'atmosfera è meno ricca di vapore acqueo e più c'è questo gradiente. Quindi si può dire che l'input viene dall'atmosfera, dalla traspirazione, più la pianta traspira più deve recuperare il bilancio idrico prendendo l'acqua dal suolo, meno traspira meno ha esigenza di prendere acqua.

Confronto tra una pianta in un suolo povero di acqua (B) e una pianta in un suolo ricco di acqua (A):



Possiamo notare dall'immagine sovrastante che, a seconda se il suolo sia ricco o povero di acqua, varia la ripartizione tra radice e foglia. **Quando ho un suolo ricco di acqua**, la pianta può permettersi di dividere i fotosintati in radici e biomassa epigea; **al contrario, quando l'acqua rappresenta invece un fattore limitante**, la pianta preferisce fissare i fotosintati nella biomassa radicale poiché servirà più biomassa radicale per prendere quanta più acqua possibile.

Questo discorso sul rapporto tra pianta ed acqua ci fa comprendere perché alcune specie di piante sono diffuse a delle latitudini mentre altre sono diffuse in altre. Generalmente, dal punto di vista metabolico, abbiamo imparato che le piante appartengono a differenti classi di metabolismo (metabolismo del carbonio si intende). A seconda del tipo di metabolismo ricordiamo l'esistenza delle **piante C3, C4 e CAM**. Al di là delle variazioni biochimiche legate alla fissazione del carbonio, è importante considerare che queste tre tipologie di specie hanno una relazione differente di efficienza di uso dell'acqua. Le piante CAM, vivendo nel deserto, riescono ad ottimizzare al massimo l'efficienza di uso dell'acqua (quella poca acqua che hanno la sfruttano al 100%). Sul podio quindi mettiamo, al primo posto le piante CAM, al secondo le C4 e all'ultimo le C3 (che soffrono di più i climi aridi e questo perché in queste piante l'efficienza di uso dell'acqua è più bassa). Ma cos'è questa efficienza? Quando la pianta apre gli stomi entra CO₂ e fuoriesce ossigeno e vapore acqueo e teoricamente più CO₂ dovrebbe entrare e meno acqua dovrebbe uscire (compromesso tra la vita e la morte). **L'efficienza di uso dell'acqua non è altro che un rapporto tra la fotosintesi (la CO₂ che viene assorbita) e la traspirazione (vapore acqueo che viene rilasciato) e sarà tanto maggiore quanto maggiore è il numeratore.** Una pianta che ha un'ottima efficienza d'uso dell'acqua quando apre gli stomi fa entrare quanta più CO₂ possibile ma fa uscire quanto meno possibile vapore acqueo. A questo punto, chi è più forte da questo punto di vista? Le piante CAM che aprono gli stomi durante la notte, quando la differenza di pressione di vapore (umidità relativa) è più elevata e il deficit è inferiore. La traspirazione nelle piante CAM è allora ridotta, per questo si trovano nel deserto. Che cosa comporta che la traspirazione sia bassa? Che l'efficienza d'uso dell'acqua è elevata.

Torniamo al discorso degli organismi idrofili, xerofili, mesofili e idrofili.

Nell'immagine sottostante ritroviamo il **gradiente di disponibilità idrica** (presente in qualsiasi ambiente che consideriamo). In ambienti aridi o caratterizzati da accentuata siccità stagionale sono presenti le xerofite; in ambienti con buona disponibilità idrica le mesofite e in ambienti ricchi d'acqua le idrofite. Gli organismi idrofili, invece, sono quelli che vivono in ambiente acquatico. La sopravvivenza in questo ambiente è garantita dall'idromorfismo, gli organismi idrofili sviluppano una forma del corpo (affusolata) che gli garantisce di muoversi rapidamente in ambiente acquatico. Questa forma affusolata è tipica di tutti gli organismi idrofili, quindi sia i pesci che i mammiferi (foche e delfini).



Come fanno i pesci a muoversi in acqua? Grazie alla **vescica natatoria**, la quale risulta essere una camera d'aria che viene riempita d'aria e permette il movimento dei pesci verso l'alto e verso il basso lungo la colonna d'acqua. A questo ovviamente si unisce la spinta data dalle pinne caudali e pettorali. Un pesce che nuota a testa in giù ha problemi alla vescica natatoria, la qual influisce anche l'equilibrio. Un pesce invece privo di vescica natatoria non galleggia. Lo squalo, invece, al posto della vescica natatoria ha il fegato che percorre tutto il corpo e che risulta essere ricco di squalene. È proprio lo squalene che garantisce a questi grandi predatori di muoversi dritti lungo la colonna d'acqua. Le alghe invece come fanno? Alcune piante brune vivono in ambiente acquatico e per approvvigionare acqua utilizzano specifici espedienti: conservano l'acqua all'interno di tessuti ricchi d'acqua.

C'è un problema però legato agli organismi che vivono in acqua: l'ossigeno e le sostanze nutritive assorbiti dagli organismi acquatici sono disciolti in acqua. La quantità di ossigeno disciolta in acqua non è sempre la stessa, dipende dalla temperatura e dalla salinità. Generalmente più l'acqua è salata e meno ossigeno sarà disciolto, quindi le acque dolci sono più ossigenate rispetto le acque marine.

Come fanno quindi gli organismi acquatici a prendere l'ossigeno?

Consideriamo ad esempio le **idrofite**, piante sommerse o parzialmente emergenti. Cosa hanno di particolare queste particolari specie vegetali? Prestano una differente morfologia fogliare, le foglie che sporgono all'esterno dell'acqua hanno una forma diversa rispetto le foglie che sono sott'acqua e questo perché un conto è mantenersi in aria e un altro mantenersi sott'acqua (qui non c'è bisogno dei tessuti di sostegno poiché abbiamo la spinta di Archimede. I tessuti di sostegno, invece, devono essere molto sviluppati nelle piante che vivono al di fuori dell'acqua). Le idrofite hanno quindi gli stomi sulla pagina fogliare superiore a contatto con l'aria che facilita lo scambio gassoso all'intercapedine foglia-atmosfera. Le foglie sott'acqua delle idrofite hanno una forma schiacciata perché devono vincere la forza dell'acqua. Qual è la struttura interna di un'idrofita? Ha pochissimo parenchima di sostegno, quello che serve è il canale aerifero (i fori) che la pianta utilizza come serbatoi di aria. Le mangrovie (idrofite di ambiente tropicale) hanno una particolarità: **geotropismo negativo**, la crescita della radice è orientata verso l'alto (le piante che sviluppano la radice verso il basso e il germoglio verso l'alto hanno invece geotropismo positivo garantito dagli statoliti). Sulle radici di queste piante sono presenti dei cromatofori che consentono alla pianta di respirare.

Come fanno quindi gli organismi acquatici a prendere i nutrienti? Le sostanze nutritive, negli organismi acquatici, sono più concentrate all'interno dei tessuti rispetto all'esterno. Tutti gli organismi, quindi, per mangiare e trasferire una sostanza

che è meno concentrata all' esterno e trasferirla all' interno, cosa devono fare? Devono assorbirla contro gradiente, in poche parole la sostanza migra da dove ce ne sta di meno a dove ce ne sta di più. Questo è il problema fondamentale degli organismi che vivono in ambiente acquatico: gli ioni diffondono attraverso le membrane da zone ad alta concentrazione a zone a bassa concentrazione tendendo all' equilibrio (un po' come i vasi comunicanti). Quindi cosa succede? Che anche l'acqua si muove attraverso queste membrane e la tendenza di una soluzione di attrarre l'acqua si chiama **potenziale osmotico** (non possiamo prescindere da questo potenziale se consideriamo un organismo che vive in acqua salata o dolce). Il potenziale osmotico dell'acqua di mare è alto e questo significa che gli organismi tendono a prendere sali e a perdere acqua; in acqua dolce, invece, gli organismi tendono ad acquistare acqua e perdere sali.

In acque dolci la pianta ha delle specifiche strutture (gli idropodi) che limitano la perdita di sale; **in acqua salata, invece, alcune piante** eliminano sali in eccesso dalle radici. Una specie di mangrovia *Conocarpus erecta*, possiede ghiandole specializzate nelle foglie che hanno la funzione di eliminare i sali, i quali si depositano sulla superficie esterna della lamina fogliare.

I pesci d' acqua dolce hanno branchie che assorbono gli ioni selettivamente e reni che trattengono Sali e li riconvogliano nel sangue circolatorio, hanno un ciclo attraverso il quale cercano di perdere la minor quantità di Sali possibile (hanno quindi fluidi corporei iperosmotici).

Di contro, **i pesci di acqua salata** che tendono a perdere acqua hanno fluidi iposmotici. Per questo motivo un pesce d' acqua dolce non può vivere in acqua salata e viceversa. In acqua salata:

- I pesci ossei hanno branchie e reni che eliminano attivamente ioni e bevono acqua per ripristinare quella perduta.
- Gli SQUALI trattengono l'urea e fanno così salire la concentrazione ionica del sangue al livello dell'acqua marina.
- Uccelli e rettili marini hanno organi regolatori aggiuntivi detti "ghiandole del sale", situati vicino agli occhi o alle vie nasali.

Gli organismi xerofili (sia vegetali che animali) sono organismi che riescono a vivere in ambienti aridi tollerando e/o evitando condizioni di siccità, ma come fanno? Nei modi più diversi.

Guardiamo prima le piante. Abbiamo 3 classi di piante xerofite:

- **Xerofite effimere.** Piante che eludono il disseccamento vivendo per la maggior parte della loro vita sotto forma di seme, il quale germoglierà solo se le condizioni sono idonee a far crescere la pianta. Queste tipologie di piante fioriscono in primavera dopo sufficienti piogge invernali.
- **Xerofite aridocaducifoglie,** che perdono le foglie o tutta la parte epigea nella stagione secca, durante la quale vivono in uno stato di dormienza (alcune graminacee). Mettono foglie soltanto durante la stagione umida o quando il periodo è favorevole per la fotosintesi. In questo caso non abbiamo specializzazioni morfologiche o fisiologiche (riduzione della perdita di acqua o il potenziamento dell'assorbimento dal suolo), semplicemente le foglie vengono perse e poi riacquistate quando le condizioni sono favorevoli. Un esempio di xerofita aridocaducifolia è "la spina di gesù cristo" o ocotilla che vive nei deserti del sudovest americano e nel Messico
- **Xerofite succulente,** che accumulano acqua in un parenchima specifico detto acquifero che può essere nelle foglie o nei fusti (questo consente alla pianta di

sopravvivere anche quando l'acqua costituisce un fattore limitante al 100%). Il parenchima acquifero perde acqua lentamente grazie alla presenza di strati impermeabili costituiti da cutine e cere

Particolare tipo di piante sono quelle che non sono xerofite ma hanno lo **xeromorfismo fogliare**. In ambiente mediterraneo abbiamo molte piante che hanno organi xerofici (in questo caso la foglia) per eludere il disseccamento. Com'è fatto un organo xerofita? Presenta caratteristiche particolari, ne elenchiamo 3 (le principali):

- 1) Gli stomi sono presenti non sulla pagina superiore ma su quella inferiore e quindi non hanno contatto diretto con la radiazione solare e con il calore
- 2) L'epidermide è ricca di peli per cercare di perdere quanto meno acqua possibile.
- 3) La consistenza, sono foglie dure che si piegano ma non si spezzano perché sono ricche di tessuto di sostegno che serve a perdere quanto meno acqua possibile.

Com'è fatta una pianta che ha xeromorfismo fogliare?



L'immagine sovrastante rappresenta la foglia di **Nerium Oleander**. Lo stoma è circondato da peli, la cuticola è spessa e l'epidermide è pluristratificata. Gli stomi sono infossati in cripte stomatiche ricche di peli che consentono la minor perdita di umidità possibile.

Altri adattamenti xeromorfici li ritroviamo negli aghi di pini.



L'immagine sovrastante rappresenta il **pinus canariensis**: pianta xeromorfa sempreverde di climi ad inverno freddo. Gli aghi di Pinus canariensis mostrano adattamenti all'aridità: 1. speciale morfologia degli stomi 2. tessuti sclerenchimatici ipodermici.

Un altro adattamento xeromorfico lo ritroviamo nel mais che accartocchia la foglia su se stessa, la quale da distesa diventa un tubo. In questo tubo il vapore acqueo viene trattenuto il più possibile e la pianta limita la superficie traspirante. L'accartocciamento è reso possibile dalla presenza di cellule bulliformi che si aprono e si chiudono a seconda della quantità di vapore acqueo presente in natura. In ambienti molto secchi la foglia si chiude per limitare al massimo la traspirazione e per creare un microambiente ricco di vapore acqueo. Quando l'ambiente diviene favorevole alla fotosintesi e alla crescita della pianta la foglia si distende. Le cellule bulliformi hanno

quindi la capacità di muoversi, tipo fisarmonica, e le piante usano questo espediente per la sopravvivenza.

Altre piante, come *Ruscus aculeatus* e *Opuntia*, hanno invece foglie a spine. La foglia è ridotta ad una squama che molte volte non sintetizza neppure, poiché l'attività fotosintetica, in questo caso, è legata al tronco e non alle foglie e questo succede per evitare un' evaporazione elevata.

L' apparato radicale delle piante del deserto può essere di diverso tipo. Può essere superficiale, e questo serve per prendere quanta più acqua possibile durante la brevissima stagione di piogge. Altre piante hanno un apparato molto esteso e altre ancora hanno radici lunghe km che pescano addirittura nelle falde freatiche e quindi in questo modo ovviano alla mancanza di acqua.

In ambienti veramente molto aridi si ha la cosiddetta **evoluzione convergente**. Abbiamo piante, ad esempio le cactacee, fogliacee, esteracee, che sono piante completamente diverse che si evolvono in ambienti differenti, però hanno una particolarità: avere una forma simile. Questa tipologia di forma simile si chiama evoluzione convergente: sono piante totalmente diverse ma con una stessa forma, perché negli ambienti in cui vivono è questa che consente loro la capacità di superare la stagione avversa (è un po' come abbiamo visto per il delfino e il pesce. Anche se uno è un mammifero e l'altro un osteitto, vivendo in ambiente acquatico, entrambi hanno l'esigenza di avere una struttura fisica molto simile per essere idrodinamici).

Che succede invece agli animali? Gli animali hanno una serie di adattamenti per evitare la disidratazione.

Difese contro la disidratazione:

1. Evitare perdite d'acqua al livello della pelle, degli organi respiratori ed escretori
2. Migrare non appena il clima igrico diviene sfavorevole (quando la quantità di vapore acqueo non è sufficiente)
3. Prelevare acqua dall'ambiente esterno
4. Adattare il metabolismo alla sintesi dell'acqua

Altri animali che vivono in ambienti aridi hanno una sinergia di adattamenti: morfologici, fisiologici e comportamentali che conferiscono loro una marcia in più nei climi aridi. Ad esempio, gli animali dei climi aridi, tendenzialmente rettili, hanno:

- Ispessimenti dei tegumenti
- Strati cerosi impermeabilizzanti
- Emissioni di urine e feci povere di acqua
- Scavo di rifugi a varie profondità nel suolo
- Limitazione della vita attiva alle ore notturne

Esempi particolari:

Il DROMEDARIO:



1. ricava acqua dall'ossidazione dei grassi.
2. Può ridurre la sua escrezione urinaria.
3. Se mangia vegetali freschi può restare 60 giorni senza bere acqua, se invece mangia vegetali secchi può resistere per due settimane.
4. Può limitare la traspirazione potendo sopportare un incremento della temperatura corporea di ben 6,2 °C. Ciò gli consente di economizzare fino a 5 litri al giorno di acqua.
5. Può perdere una quantità di acqua pari al 30% del suo peso (altri mammiferi non tollerano una perdita del 20%)

Altri animali, come ad esempio le formiche del deserto, hanno delle larve, che, come accade nel cammello, utilizzano il metabolismo degli acidi grassi per ricavare acqua. La loro emolinfa ha una concentrazione proteica molto alta che determina un aumento della pressione osmotica limitando l'evaporazione dell'acqua. Altri animali ancora, come il ratto canguro, accumulano acqua nelle vie respiratorie e anche loro utilizzano il metabolismo degli acidi grassi per ricavare acqua.

In ambienti terrestri o con ridotta disponibilità idrica, N viene eliminato come:

Urea nei mammiferi

Acido urico in rettili e uccelli



non è tossico, precipita in forme insolubili e consente un grande risparmio di acqua

IL SUOLO

Il suolo è un corpo tridimensionale continuamente variabile nel tempo e nello spazio. È un sistema eterogeneo e polifasico caratterizzato da parametri chimici, fisici e biologici. È un corpo altamente variabile, cosa vuol dire? Se preleviamo un campione di suolo da determinata aiuola, da un prato o da una qualsiasi foresta e analizziamo le caratteristiche biologiche e chimico-fisiche queste avranno dei determinati valori. Se campioniamo la stessa quantità di suolo anche a 1-2 metri di distanza dal punto precedente, e misuriamo gli stessi parametri, ci troviamo dei valori completamente opposti. La stessa cosa accade se campioniamo una stessa quantità di suolo dopo un determinato intervallo di tempo. **Quindi possiamo affermare che il suolo è un corpo altamente variabile.**

Come si origina?

Il processo che comporta la formazione del suolo è detto **pedogenesi** e avviene a partire dall'interazione di molti fattori, tra cui: **clima, organismi, rilievo, tempo e substrato.**

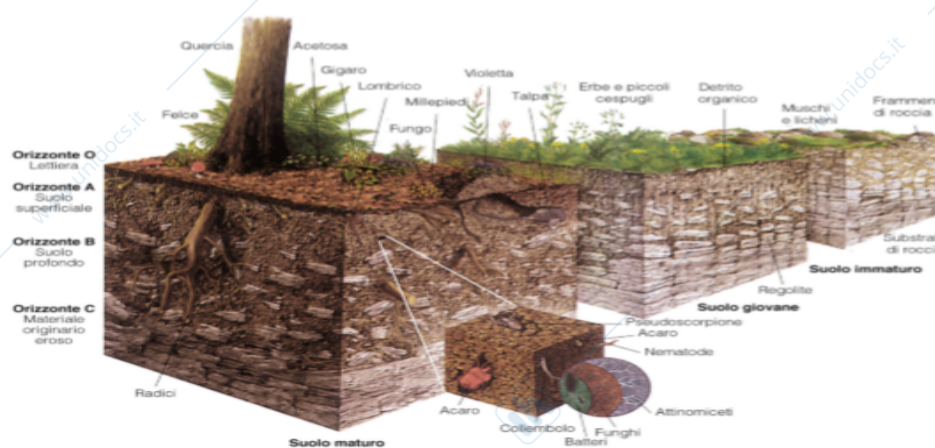
- **Substrato.** Tutto dipende dal terreno di partenza. Nel nostro territorio, Napoli e provincia, i substrati che danno origine al suolo sono in vicinanza del Vesuvio (dove il substrato di partenza è rappresentato da grossi blocchi neri di lava) o nella zona dei campi flegrei (qui il substrato di origine è di colore giallo). Se pensiamo alla costiera amalfitana o a Capri il substrato è ancora diverso, qui abbiamo grossi blocchi di carbonato di calcio (di calcare). Il substrato di origine, quindi, sulla base della sua composizione chimica, è il principale responsabile della formazione del suolo. Come si procede? Immaginiamo una lastra di substrato esposta a delle intemperie, sarà quindi soggetta a variazioni di temperatura e ad un'eventuale disponibilità di precipitazioni. Ogni volta che piove si creano fratture all'interno del substrato, all'interno delle quali può anche rimanere bloccata l'acqua (l'acqua di precipitazione ha un pH di 5,6, è leggermente acida per la presenza di acido carbonico. In aria, il pH può avere un valore ancora più basso in presenza di biossido di azoto e di zolfo che, reagendo con l'acqua di precipitazione, formano rispettivamente acido nitrico e solforico). L'acqua che resterà bloccata all'interno delle micro-fessure, attraverso il suo valore di pH, farà sì che, alcuni minerali bloccati all'interno del substrato, vengono messi in soluzione modificando la composizione del substrato di origine. Inoltre, l'acqua che viene trattenuta all'interno delle fessure, in seguito ai cambiamenti di temperatura, può andare incontro ad una solidificazione (gelo e disgelo). Quando la temperatura è particolarmente bassa, intorno agli zero gradi, l'acqua ghiaccia e quando lo fa passa dallo stato liquido a quello solido aumentando di volume. Questo comporta un disgrego del substrato. Anche la facilità allo sgretolamento influenza il processo di pedogenesi.
- **Il clima.** Le condizioni climatiche giocano un ruolo importante nel processo di pedogenesi. Bisogna precisare che anche l'inclinazione del substrato è importante, a parità di quantità di substrato e di condizioni climatiche un substrato pianeggiante raccoglierà l'acqua di precipitazione e sarà esposto all'irradiazione in maniera diversa rispetto ad un substrato differente.
- **Organismi.** A questo punto, essendoci acqua e minerali, questo substrato può divenire un ambiente ospitale per organismi poco complessi. Gli organismi che possono, per primi, attecchire al substrato sono i **licheni**, considerati organismi pionieri. I licheni sono organismi autotrofi simbiotici e sono costituiti da alga e fungo. Il lichene è vincente perché possiede sia la componente autotrofa (alga) che quella eterotrofa (fungo). Il fungo sviluppa lunghi filamenti (le ife) grazie ai quali continua l'operazione di disgregazione in concomitanza a quella che fa il clima e in più assorbe nutrienti (che vengono rilasciati dalla disgregazione della roccia) e li trasferisce alla porzione autotrofa, che avrà una disponibilità di nutrienti sicuramente più elevata. A questo punto l'attività fotosintetica dell'alga sarà più elevata. Inoltre il fungo protegge l'alga da un'esposizione alla luce troppo intensa. Nel loro insieme i licheni producono delle sostanze, gli acidi lichenici, che, in quanto tali, una volta che vengono riversati nel substrato, si scompongono nel gruppo H⁺ e R⁻. I protoni liberati aumentano la disgregazione del substrato. Per fare un esempio pratico consideriamo la lava presente tra il monte Somma e il Vesuvio. Questa lava risale all'esplosione del 1944 e il suo colore grigio dipende proprio dalla presenza dei licheni. Sono trascorsi 70 anni da quella esplosione e su quel terreno ci sono ancora i licheni, diciamo questo per renderci conto di quanto tempo necessita la pedogenesi per avvenire. Sulla lava per adesso abbiamo la comunità pioniera (licheni, muschi e poche ginestre), ma se osserviamo l'altro versante del Vesuvio possiamo notare la vegetazione che tra 2000-3000 anni, a parità di condizioni climatiche, vedremo

anche sulla lava. Quella che è ora solo una comunità pioniera verrà trasformata, negli anni, in specie erbacee e arbustive e infine in comunità finale (climax) che risulta essere la comunità in equilibrio con le condizioni climatiche.

Proprio per la lentezza con cui avviene la pedogenesi, si dice oggi che **il suolo è una risorsa esaurita**. La pedogenesi non si ferma mai, poiché cambiando le condizioni climatiche ed altri fattori, si forma sempre nuovo suolo; però la formazione di quest'ultimo avviene molto più lentamente rispetto al suo consumo da parte dell'uomo. Si consuma suolo ogni volta che trasformiamo una foresta in un campo agricolo, in una strada o in un'industria.

I licheni sono quindi gli organismi pionieri, primi organismi che riescono ad insediarsi sul substrato. Sappiamo che gli organismi completano ad un certo punto il loro ciclo vitale e la necromassa derivante (che si forma quando il lichene muore) si andrà ad accumulare sul substrato. A questo punto cominciamo a parlare di **neo-suolo**. Perché? La differenza tra roccia o substrato e suolo è proprio la presenza di sostanze organiche. Ogni volta che quindi parliamo di substrato è solo il minerale, mentre nel suolo c'è anche sicuramente la componente organica. Una volta che la necromassa si è introdotta, si ha la possibilità di poter osservare, a livello del neo-suolo, anche i decompositori. I decompositori sono batteri eterotrofi che, degradando la sostanza organica, restituiscono nutrienti che potranno essere poi assorbiti dagli autotrofi. A questo punto, siccome la disponibilità di nutrienti è maggiore, c'è la possibilità che si formino organismi più complessi dei licheni. Si formeranno dapprima i muschi, poi le piante erbacee, quelle arboree fino ad arrivare alla foresta (a questo punto si è formato il suolo).

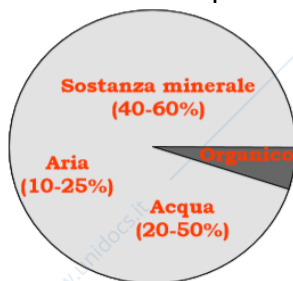
- Il **tempo** agisce sulla formazione del suolo in due modi: 1) Nel corso della pedogenesi possono variare i valori dei singoli fattori. 2) Estensione del periodo pedogenetico.



Una volta che abbiamo un suolo maturo se immaginiamo di scavare in profondità possiamo riconoscere **3 orizzonti: A, B e C**. Vi ricordo che la lettiera (necromassa che si forma sul suolo) non è suolo. Sotto questa necromassa osserviamo il primo orizzonte (orizzonte A o superficiale) in cui è molto abbondante la componente organica che deriva dalla decomposizione parziale della lettiera sovrastante. Se le condizioni ambientali generali non sono favorevoli la necromassa non viene convertita direttamente in minerali ma si passa attraverso un prodotto parziale della decomposizione (humus). L'humus è ancora sostanza organica che si accumula a livello dell'orizzonte A e sarà decomposto in minerali solo quando le condizioni

climatiche lo consentiranno. In questo caso si parla di mineralizzazione secondaria. L'orizzonte A è anche definito eluviale perché è il primo orizzonte che viene attraversato dall'acqua di precipitazione, la quale penetra nel suolo portando con sé tutti i nutrienti che incontra nel suo percorso. Eluviale significa proprio questo, orizzonte che perde nutrienti che si vanno ad accumulare a livello dell'orizzonte B (illuviale). L'orizzonte B differisce da quello A per una diminuzione della sostanza organica e per un aumento dei nutrienti che derivano non solo dall'orizzonte sovrastante, ma anche dalla continua trasformazione del substrato pedogenetico. Infine abbiamo l'orizzonte C caratterizzato da materiale originario eroso. I suoli possono essere di vario colore: rossi, verdi, gialli e questo dipende dalla prevalenza di certi minerali piuttosto che altri. La composizione mineralogica del suolo intorno al Vesuvio è molto ricca anche di magnesio, potassio, etc e questo consente al suolo di essere fertile. Allo stesso tempo, però, sono presenti anche elementi come il nichel, il piombo etc che non sono nutrienti ma anzi, sono elementi, che anche in piccole concentrazioni, possono arrecare danno a qualsiasi organismo. Ragioniamo su questo aspetto perché il nichel, il piombo etc sono detti anche inquinanti. Il termine inquinante viene generalmente pensato come una sostanza derivante dalla comunità antropica, ma come vediamo, non è necessariamente così poiché alcuni suoli sono ricchi di nichel e piombo perché è la roccia stessa ad essere ricca di questi elementi.

Il suolo è un sistema trifasico e questo significa che se abbiamo un campione di suolo dobbiamo sapere che questo è costituito da una fase liquida, una solida e una gassosa. Il campione di suolo è costituito per circa il **50% dalla fase solida** e il **restante 50%** è suddiviso pressoché ugualmente **tra la fase liquida e quella gassosa**. Se consideriamo solo la fase solida dobbiamo precisare che circa il 90-95% di questa è costituita dalla componente minerale, mentre solo il 10-15% dalla componente organica (humus). Gli spazi compresi tra i minerali o sostanze organiche (pori) sono occupati o dall'aria o dall'acqua. I pori, dunque, sono quegli spazi in cui la fase solida e liquida entrano in competizione.



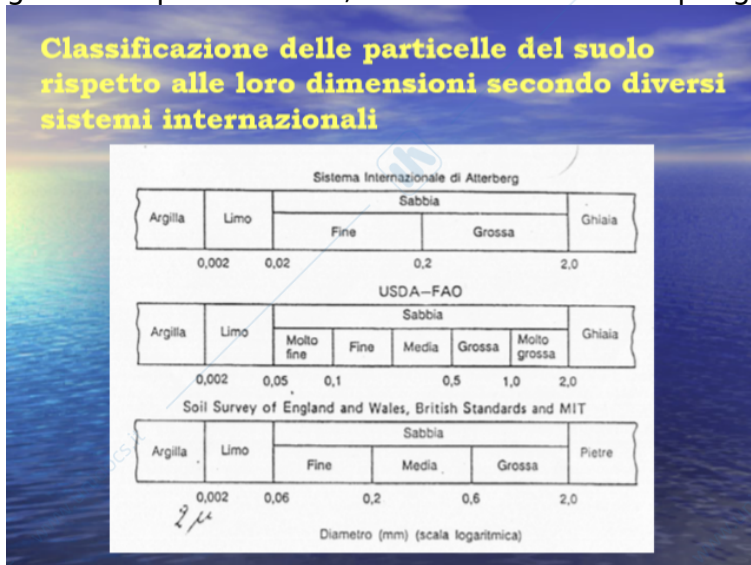
LA FASE SOLIDA DEL SUOLO

La componente solida del suolo, dicevamo, è costituita da:

- Componente minerale
- Composti organici
- Biomassa
- Necromassa

La componente minerale si separa, rispetto alle dimensioni delle particelle, in 2 grossi blocchi: **terra fine** (costituito da particelle con dimensioni minori di 2 mm, fanno parte di questo blocco argilla, limo e sabbia) e lo **scheletro** (costituito da particelle con dimensioni superiori ai 2 mm, fanno parte di questo gruppo pietre, ghiaia, sassi e ciottoli).

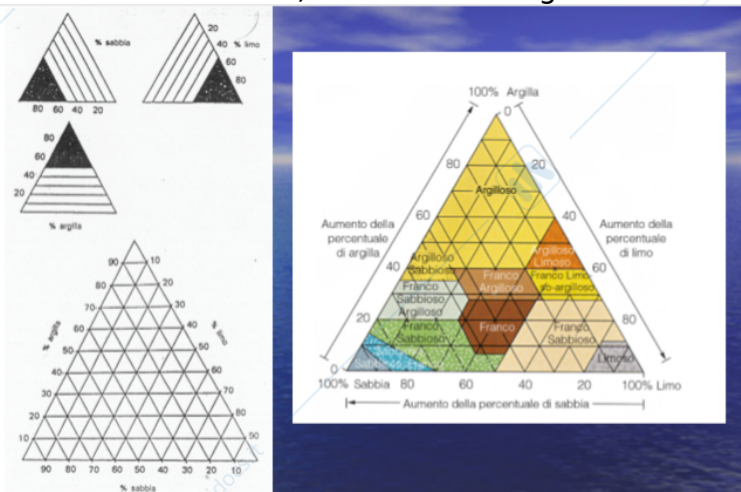
Ai biologi interessa la terrafine, mentre a chi si occupa di geologia interessa prevalentemente lo scheletro. Ricorda che: la sabbia è costituita da particelle più grandi di quelle di limo, che a loro volta sono più grandi di quelle dell'argilla.



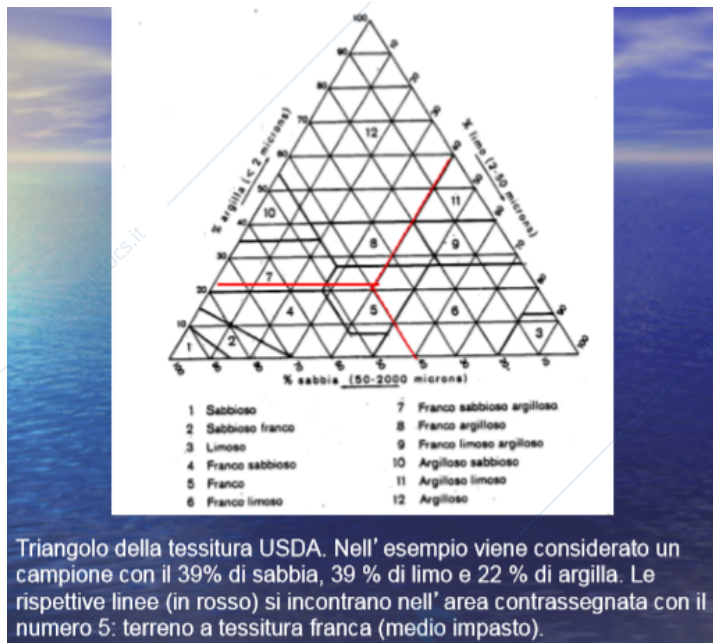
L'immagine sovrastante mostra che, a seconda del sistema di misura considerato, varia la classificazione dei diversi tipi di sabbia e varia la dimensione a cui fare riferimento per distinguere le diverse componenti della terrafine.

Le varie particelle possono avere, inoltre, forme diverse: colonnare, prismatica, lamellare o granulare, tutto dipende dalla modalità a cui va incontro il disgregamento della roccia.

La terrafine va a definire **la tessitura del suolo**, la quale deriva dal contenuto percentuale delle 3 porzioni della terrafine stessa (sabbia, limo e argilla). **Come si calcola la tessitura?** con una serie di setacciatori diversi. Immaginiamo di avere un'aliquota di suolo che mettiamo all'interno di un setaccio con una maglia di diametro di 1 mm: tutto ciò che resta su sarà lo scheletro, tutto ciò che passa sarà terraferma. Se mettiamo setacci successivi sotto, a diversa dimensione a seconda del sistema di classificazione che utilizziamo, separiamo la sabbia dal limo e dall'argilla. Quindi dopo non facciamo altro che pesare la quantità di suolo rimasta in un setaccio e negli altri andando a definire il peso di ciascun componente. Cosa ce ne facciamo di questi dati? Immaginiamo di avere un campione di suolo con 39% di sabbia, 39% di limo e 22% di argilla (percentuali dei componenti di terrafine dell'aliquota di suolo che abbiamo considerato). Si usa un triangolo tessiturale:



Com'è fatto un triangolo tessiturale? Da come possiamo vedere nell'immagine sovrastante, su ogni lato viene riportata la percentuale delle 3 componenti. In particolare: sul lato sinistro è presente la percentuale dell'argilla e notiamo che lo 0% è presente sul vertice in basso e il 100% sul vertice in alto; sul lato destro, invece, è presente la percentuale di limo, ma, in questo caso, lo 0% è presente sul vertice in alto e il 100% sul vertice in basso; sul lato di base del triangolo si ha, invece, la percentuale di sabbia.



Se riportiamo sul triangolo di tessitura i dati ottenuti precedentemente dall'analisi dell'aliquota di suolo possiamo definire il tipo di suolo che abbiamo analizzato in base alla classe in cui rientra (sabbioso, sabbioso franco, limoso, franco sabbioso etc). Con il 39% di sabbia, 39% di limo e 22% di argilla si ottiene una tessitura franca, la quale risulta essere caratterizzata quasi ugualmente dalle tre porzioni. Un suolo sabbioso, è, invece costituito, per il 90% da sabbia e il restante 10% da limo e argilla.

È importante definire la tessitura perché da questa dipende la fertilità del suolo, che a sua volta dipende da quanto è rappresentata la fase liquida e la fase gassosa. **Un terreno sabbioso trattiene meno acqua rispetto un terreno argilloso**, per quale motivo? Un terreno sabbioso è caratterizzato soprattutto da sabbia, la quale presenta dimensioni maggiori rispetto al limo e all'argilla. Presentando dimensioni maggiori presenta anche pori maggiori. Le dimensioni del poro sono importanti poiché sono gli spazi nei quali l'acqua e l'aria entrano in competizione. Quando i pori sono grandi le particelle del suolo non riescono a trattenere l'acqua di precipitazione che quindi viene persa (percola). A questo punto, pori grandi saranno pieni di aria. Ed è per questo motivo che un terreno sabbioso trattiene poca acqua. Al contrario, in un terreno argilloso, i pori, molto piccoli, trattengono l'acqua. **Sarà fertile un terreno argilloso?** No, perché manca l'aria e di conseguenza l'ossigeno che è fondamentale per le piante. Un terreno sabbioso, al contrario, è fertile poiché in questo caso i pori sono ricchi di aria e l'ossigeno non rappresenta un fattore limitante.

Il suolo franco che ha un mix di sabbia, limo e argilla rappresenta la condizione massima di fertilità poiché ha pori che trattengono acqua e pori che trattengono aria.

Abbiamo detto, in precedenza, che la presenza di humus a livello del suolo garantisce elevata disponibilità di nutrienti e fertilità, perché? Perché l'humus è costituito da un

anello benzenico e altri elementi e composti che viene a poco a poco degradato restituendo i minerali che erano presenti nella idromassa. Ma ha anche un altro valore, poiché l'anello benzenico ha una carica negativa che gira continuamente sull'anello benzenico stesso. Questa carica negativa complessa i cationi (potassio, il magnesio, il calcio, l'ammonio). Tutti i cationi, che sono macronutrienti, vengono trattenuti dall'humus. La stessa funzione ce l'ha l'argilla, la quale risulta costituita da un atomo di silicio e quattro atomi di ossigeno che espongono una carica negativa. Quindi, pur essendo componenti differenti, humus e argilla sono accumulati dal fatto che entrambi espongono carica negativa attirando i cationi. Questi cationi legati sono potenzialmente assorbibili. La pianta come fa ad utilizzarli? Produce, attraverso le radici, degli essudati (acidi organici) e li libera nel suolo. A livello del suolo, questi acidi, vengono scomposti in H^+ e R^- . Lo ione H^+ ha una forza molto maggiore rispetto quella del potassio e del magnesio, e quindi scalza il catione monovalente (ad esempio il potassio o magnesio). A questo punto quel catione, non avendo altro posto dove legarsi, va in acqua e la pianta assorbendola fa entrare al suo interno anche i cationi. Quindi, sia l'humus che l'argilla complessano tutta una serie di ioni positivi che possono essere assorbiti dalla pianta dopo che questa ha liberato acidi nel suolo. I suoli, però, oltre a presentare potassio magnesio calcio, hanno anche tutta un'altra serie di cationi (ad esempio piombo, ferro, nichel) che fino a quando sono legati all'humus e all'Argilla non danno alcun tipo di problema agli organismi. Quando questi organismi possono subire delle conseguenze dalla contaminazione di metalli? Quando questi diventano disponibili e quindi utilizzabili. Questo può succedere? Certo che sì, ma non grazie alla sola attività delle radici perché le radici cambiano leggermente il pH e limitatamente alla rizosfera (porzione di suolo a diretto contatto con la radice). A questo punto dobbiamo considerare quanto detto prima: l'acidità del suolo è dovuta agli ossidi di azoto e zolfo. Questi ossidi, che sono particolarmente abbondanti in ambiente urbano, fanno sì che il pH della pioggia sia molto più acido del 5.6 (soprattutto al nord Europa). Quando l'acqua che arriva al suolo è così acida aumenta la concentrazione degli ioni H^+ nel suolo tale da non staccare solo i monovalenti e bivalenti (cosa che anche la pianta fa) ma anche i trivalenti. Quando il pH è molto basso e quindi la concentrazione degli ioni H^+ molto alta, anche i cationi trivalenti più forti si staccano dall'anello benzenico divenendo così disponibili a livello del suolo. Qual è il danno? Una volta che il Nichel, il piombo e il ferro vengono liberati, rompono i ponti disolfuro di una proteina, cambiando la sua struttura secondaria. Questo comporta una modifica delle sue proprietà e, se la proteina in questione è un'enzima, il danno è maggiore.

L'importanza della sostanza organica.

Abbiamo detto che la componente che determina la sostanza organica del suolo è prevalentemente la lettiera, quindi la copertura vegetale. La copertura vegetale influenza la qualità della lettiera e quindi la qualità e la quantità della sostanza organica che può essere nel suolo.

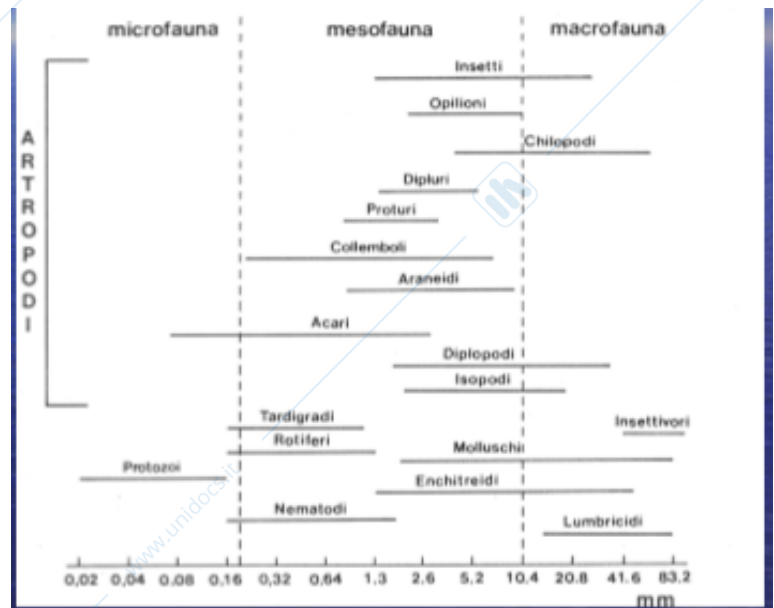
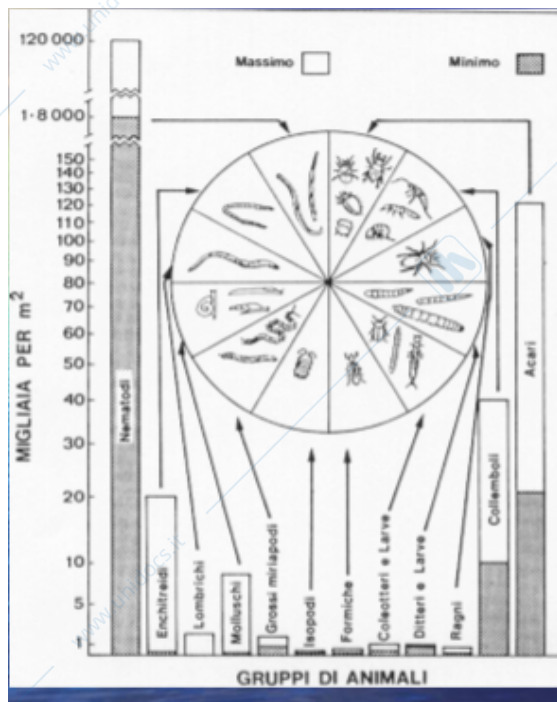


Come possiamo vedere dall'immagine sovrastante, se andiamo in una pineta sotto di questa possiamo osservare un sottobosco molto largo (a confronto di quello che si vede in un castagneto ad esempio) perché l'ago di pino è costituito da carboidrati molto particolari e il pH del suolo è molto acido. Molti degli organismi non sono acidofili (non preferiscono il pH basso) e quindi la biodiversità del sottobosco dipende molto dalla specie dominante (dove per dominante non si intende quella più abbondante in numero di organismi ma quella più abbondante o in biomassa o in caratterizzanti). In questo caso la pineta è una comunità e il nome di questa comunità è pineta non perché il pino per unità di superficie è presente in maggior numero di individui ma per la sua biomassa, che risulta più elevata rispetto quella di una qualsiasi altra specie vegetale; ma, ancor di più, è quella caratterizzante perché grazie alla forma della chioma del pino può arrivare una certa quantità e qualità di luce (quindi l'umidità relativa al di sotto della chioma del pino sarà di un certo tipo, il pH a livello del suolo sarà di un certo tipo, etc). Il pino quindi caratterizza quell'ambiente, sia per quanto riguarda i fattori biotici che quelli abiotici, perciò alla comunità si dà il nome di pino.

Che tipi di organismi abbiamo nel suolo? Il suolo è il comparto ambientale a più elevata biodiversità, poiché all'interno di questo vivono organismi che si differenziano:

- Per trofia. Abbiamo i fotoautotrofi (presenti nella parte più superficiale), i chemioeterotrofi (in grado di ricavare energia ossidando composti organici), i saprofiti (decompositori) etc.
- In funzione della richiesta di ossigeno (aerobi e anaerobi)
- In funzione dello sviluppo evolutivo: procarioti (batteri, attinomiceti e cianobatteri) ed eucarioti
- Per dimensione. Gli organismi presenti nel suolo possono essere distinti in base alle loro dimensioni: **microflora e microfauna**: batteri, funghi, nematodi, protozoi, rotiferi; **mesofauna**: acari, termiti, collemboli (da 100 micron a 2 mm)
 - **macrofauna**: elminti (da 2 mm a 20 mm)
 - **megafauna**: alcuni elminti e molluschi.

Per ogni grammo di suolo ci sono migliaia di specie:



Importante per la qualità della lettiera è il rapporto carbonio-azoto e il pH di questo. Se il rapporto carbonio-azoto è elevato, il processo di decomposizione non è veloce.

Il pH del suolo è legato alla concentrazione degli H^+ e degli OH^- della soluzione acquosa del suolo. Continuamente c'è uno scambio con questa soluzione acquosa da parte della frazione colloidale. I suoli si possono classificare in base al pH della soluzione acquosa in:

- peracidi ($pH < 5,4$)
- acidi ($5,4 < pH < 5,9$)
- subacidi ($6 < pH < 6,7$)
- neutri ($6,8 < pH < 7,2$)
- subalcalini ($7,3 < pH < 8,1$)
- alcalini ($8,2 < pH < 8,8$)
- peralcalini ($pH > 8,8$)

Il pH del suolo dipende:

- dalla quantità e dal tipo di piogge (le piogge sono di per sé leggermente acide);
- dalla tessitura, in quanto i suoli sabbiosi presentano una maggiore acidità rispetto a quelli argillosi. Ciò dipende dalla diversa capacità della sabbia e dell'argilla di trattenere cationi e anioni;
- dal tipo di vegetazione. Ad esempio le conifere vivono in ambienti acidi e acidificano l'ambiente nel quale si trovano;
- natura del substrato di origine.

Un suolo generalmente tende ad opporsi alle alterazioni di pH grazie alla frazione colloidale. Le radici delle piante sono danneggiate per un pH inferiore a 3 e per un pH superiore a 9. Il pH condiziona la disponibilità dei nutrienti e l'assorbimento radicale. Generalmente per pH bassi è prevalente l'assorbimento dei cationi, invece per pH alti è prevalente l'assorbimento degli anioni. Il fosforo è maggiormente disponibile per le piante ad un pH intorno alla neutralità, ma la stessa cosa vale anche per molti altri nutrienti. Le variazioni di pH possono portare alla liberazione di elementi tossici, in particolare i metalli pesanti. Il pH, inoltre, va a determinare la tipologia di piante e microrganismi che vivono in un suolo: esistono piante e microrganismi basofili, acidofili e neutrofilo (gli organismi acidofili sono quelli meno diffusi). I funghi prediligono un ambiente acido. **Il pH influenza molto la biodisponibilità.**

LA FASE LIQUIDA DEL SUOLO

La fase liquida del suolo comprende l'acqua e le sostanze in essa disciolte. La quantità di acqua presente nel suolo dipende dalle precipitazioni, che sono la fonte essenziale di acqua, dall'altezza della falda acquifera, dalla pendenza del suolo e dalla tessitura. L'acqua presente nella fase liquida può essere distinta in **acqua gravitazionale**, **acqua capillare** e **acqua igroscopica**. Questa distinzione è fatta in base a quanto fortemente l'acqua viene trattenuta dalle particelle del suolo. Più forte è il legame che trattiene l'acqua alle particelle del suolo, più forza e più energia devono spendere le piante e i microrganismi per poterla utilizzare. **L'acqua gravitazionale** fa parte dell'acqua non utilizzabile ed è l'acqua che non viene trattenuta affatto dal suolo, ma scende velocemente in falda. Questo tipo di acqua si trova nei macropori, che hanno un diametro maggiore di $0.8 \mu\text{m}$. **L'acqua igroscopica**, è anch'essa non utilizzabile, perché è legata fortemente alle particelle del suolo. L'acqua capillare presente nei pori inferiori a $0.2 \mu\text{m}$ è un tipo di acqua non utilizzabile, mentre **l'acqua** utilizzabile è quella **capillare** presente in pori con un diametro compreso tra $0.2 \mu\text{m}$ e $0.8 \mu\text{m}$. Per valutare se in un suolo è presente dell'acqua utilizzabile ci sono dei parametri da misurare. La capacità idrica di ritenzione o capacità di campo indica quanta acqua viene trattenuta dal suolo contro la forza di gravità (acqua igroscopica -- acqua capillare). Un suolo che perde tutta l'acqua utilizzabile raggiunge il punto di avvizzimento, cioè le piante non hanno a disposizione acqua per poter sopravvivere.

In laboratorio abbiamo 2 modi di individuare la quantità di acqua in un suolo: la capacità idrica massimale e il tenore idrico. La capacità idrica massimale ci da il contenuto d' acqua in un suolo a saturazione e quindi quando tutti i pori sono pieni di acqua (questo è un valore fisso per quel campione, non può cambiare). Il tenore idrico, invece, ci da la quantità di acqua di suolo in un determinato momento e questo può variare poiché è ovvio che se faccio la misurazione dopo un periodo di piogge il valore ottenuto sarà sicuramente più alto rispetto ad un valore misurato durante un periodo di siccità. Il tenore idrico tiene quindi conto della variabilità momentanea del contenuto di acqua, mentre la capacità idrica massimale ci dice qual è la massima quantità di acqua che può essere trattenuta da quel suolo.

LA FASE GASSOSA DEL SUOLO

La fase gassosa del suolo tiene sicuramente conto della composizione dell'aria. Ricordiamo che l'aria risulta essere caratterizzata per il **78,09% da azoto** (N_2), per il **20,9% da ossigeno** (O_2), per lo **0,93% dall' argon** (Ar) e per lo **0,04% da anidride carbonica** (CO_2). È importante questo discorso perché l'acqua e l'aria scambiano continuamente gas. La fase gassosa tiene conto quindi della composizione dell'aria, fatta eccezione della CO_2 perché man mano che ci spostiamo nel profilo del suolo la luce diviene un fattore limitante e in quanto tale l'attività fotosintetica è fortemente limitata. Quindi, nel suolo, non essendoci organismi che effettuano la fotosintesi, l'anidride carbonica non viene sottratta (fatta eccezione per i chemioautotrofi). La CO_2 presente a livello del suolo, derivante dai processi di respirazione e decomposizione, raggiunge una percentuale molto elevata (l'1%).

È importante precisare che l'ammonio non è un composto tossico poiché in molti casi la nitrificazione (processo che trasforma l' ammonio in nitrato) non avviene, perché se le condizioni di pH o la temperatura non sono in un certo modo e se non c'è ossigeno la nitrificazione non può avvenire. In questi casi l' unica fonte di azoto per la pianta è l' ammonio. Assorbire ammonio per una pianta vuol dire investire ATP perché deve formare gli essudati, liberarli nel suolo, scambio cationico, assorbimento. Una volta assorbito l'ammonio viene direttamente assimilato (assorbire e assimilare sono due cose differenti) negli amminoacidi. Quando invece la pianta assorbe nitrato (NO_3^-) (e

questo succede nella stragrande maggioranza dei casi), essendo questo carico negativamente lo assorbe direttamente per differenza di potenziale idrico (perché avendo una carica negativa non viene trattenuto dall'humus e dall' argilla). Quindi il nitrato, così come il solfato e il fosfato, è già disciolto nella fase liquida e quindi, in questo caso, la pianta non deve produrre essudati per procacciarsi azoto. Il nitrato (forma ossidata) una volta che viene assorbito viene ridotto ad ammonio grazie all' uso dell'ATP (riduzione assimilativa). La pianta, quindi, spende ATP sia se ricava l'azoto dall' ammonio (in questo caso durante l'assorbimento), sia se lo ricava dal nitrato (in questo caso per ridurre il nitrato prima dell'assimilazione).

TEMPERATURA DEL SUOLO

La temperatura del suolo condiziona la diffusione dei gas e diminuisce con la profondità, perché il suolo viene considerato un isolante termico. La temperatura dipende fortemente dalle caratteristiche del suolo, per esempio la presenza di copertura vegetale (che influenza la quantità di radiazione solare che raggiunge il suolo), il colore del suolo, la tessitura, la struttura del suolo, la presenza o l'assenza di acqua (perché cambia la conducibilità termica). La temperatura del suolo influenza la velocità delle attività metaboliche degli abitanti del suolo (una maggiore temperatura è associata ad una maggiore attività), la crescita delle piante (ogni pianta anche per quanto riguarda l'apparato radicale ha il suo range ottimale di temperature) e i processi che avvengono nel suolo.

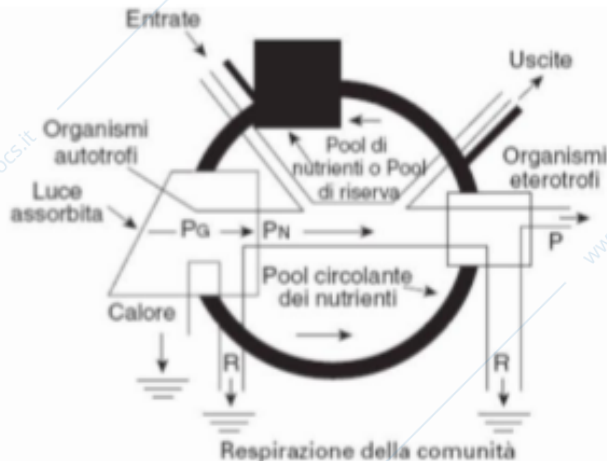
CICLI BIOGEOCHIMICI

Affronteremo oggi il ciclo del carbonio, fondamentale per la sopravvivenza.

Prima di dire cosa succede al ciclo del carbonio, come dovrebbe essere e come invece non lo è più, facciamo una premessa sul perché si studiano i cicli biogeochimici.

Perché il ciclo biogeochimico è importante? Si compone di tre parole: bio, geo e chimico.

Consideriamo un'ecosistema, il flusso di energia (sotto forma di cibo) passa dal comparto più grande (quello dei produttori) al comparto degli organismi eterotrofi. Se non c'è energia un ecosistema non può esistere. Questa energia per gli autotrofi viene direttamente dal sole, per gli eterotrofi viene dal cibo che loro ingeriscono.



L'immagine sovrastante rappresenta un ciclo biogeochimico, che si chiama così perché c'è una parte bio (biologica), una geologica (passa attraverso i comparti atmosfera, idrosfera, litosfera) e chimica perché implica reazioni chimiche che avvengono attraverso i vari comparti. In ogni ciclo biogeochimico un elemento chimico si trasforma: passa da una forma organica ad una inorganica e così via. Il ciclo biogeochimico è sovrapposto al flusso energetico: per generare materia (questo ciclo genera materia) occorre energia. Ancora una volta torna il discorso che l'energia luminosa è il motore dei nostri ecosistemi, il motore della terra intesa come super ecosistema. Non si può riciclare materia senza spesa energetica.

Ogni ciclo biogeochimico rappresenta un elemento e ognuno di questi possiede una parte scambiabile (**pool di scambio** o comparto di scambio) e una di riserva (**pool di riserva**). Quindi ogni ciclo è costituito da un pool di scambio (quello che passa, l'elemento in forma disponibile che può essere preso dagli organismi e che attraversa i comparti dei produttori, consumatori) e un pool di riserva (in poche parole l'elemento nella forma non utilizzabile per gli organismi).

I cicli biogeochimici che studieremo saranno: quello del carbonio, del fosforo, dell'azoto, dell'acqua, dell'ossigeno e dello zolfo.

I cicli biogeochimici, quindi, scambiano energia e materia con l'ecosistema. Il sole è il motore, si avvia il ciclo biogeochimico e quest'energia serve per poi riciclare materia.

Perché questi cicli sono importanti? Perché tutte le forme di vita richiedono elementi chimici che devono essere forniti in quantità adeguate (se un elemento è presente al di sopra o al di sotto del limite indispensabile si limita la vita dell'organismo stesso). Gli elementi chimici sono presenti e circolano nella biosfera (insieme agli organismi viventi), compiendo percorsi ciclici. Il movimento di questi

elementi dal comparto biotico a quello abiotico (quindi dagli organismi viventi alla litosfera, idrosfera ecc) si chiama ciclo dei nutrienti. Il ciclo dei nutrienti è un ciclo che ci permette di avere alla fine, con il processo di decomposizione, un'altra volta quell'elemento in maniera che la pianta (autotrofo) può assumerlo e ricominciare il ciclo.

Tutti i cicli biogeochimici che faremo consistono in due grandi blocchi di processi: **i processi assimilativi** (l'elemento viene assimilato nella biomassa passando dalla forma inorganica a quella organica (organizzazione) e **i processi dissimilativi** (quelli che restituiscono gli elementi all'ambiente fisico).

Esempio di ciclo biogeochimico. C'è un input dall'atmosfera (per esempio carbonio, CO₂). Il carbonio viene preso dalle piante che lo organicano, una parte di questo carbonio viene utilizzato per formare biomassa delle piante, una parte della biomassa viene consumata dagli eterotrofi che a sua volta vengono mangiati da altri eterotrofi e quindi questo carbonio passa attraverso i vari compartimenti della biosfera. Alla morte delle piante e degli animali c'è la decomposizione e quindi il carbonio bloccato nelle piante e negli animali arriva al suolo e viene decomposto. A questo punto il ciclo ricomincia. In questo caso appena descritto il carbonio (sotto forma di CO₂) viene prelevato dall'atmosfera (componente abiotica del ciclo); un'altra parte di elementi viene spesso fuori, invece, da un'alterazione meteorica (per esempio se c'è un fulmine che rompe una roccia si libera carbonio).

I cicli biogeochimici, come abbiamo già detto in precedenza, si muovono attraverso il compartimento biotico e abiotico. Quando si muovono attraverso il compartimento abiotico (suolo, acqua, sedimenti, aria) parliamo di **ciclo esterno** perché gli elementi si spostano da un compartimento abiotico all'altro. Quando invece l'elemento si sposta all'interno della biomassa vivente dell'ecosistema e quindi nel comparto biotico (biomassa dei vegetali, consumatori primari e secondari ecc) io parlo di **ciclo interno**. Quindi ogni ciclo biogeochimico è come se fosse un doppio ciclo accoppiato: abbiamo un ciclo interno attraverso il comparto biotico e uno interno attraverso il comparto abiotico.

Ogni ciclo biogeochimico ha delle grandezze che lo caratterizzano. Queste sono:

- **Il flusso.** Un flusso è la quantità di elemento che si sposta da un comparto all'altro (sia biotico che abiotico). Per esempio possiamo parlare di flusso di carbonio dall'ambiente vivente all'acqua, flusso di azoto dal comparto dei produttori al comparto dei consumatori.
- **Tempo di residenza,** cioè quanto tempo risiede un elemento in un comparto. È chiaro che questo tempo aumenta quanto maggiore è la quantità di elemento in quel comparto. Esempio: la parte più grande di carbonio è nella litosfera (rocce carbonatiche), quindi il tempo di residenza del carbonio nella litosfera è molto grande rispetto il tempo di residenza dello stesso elemento nell'atmosfera (dove di carbonio ce n'è poco).
- **Comparto (pool) di riserva e comparto (pool) labile.** Ogni ciclo biogeochimico ha un comparto di riserva che è più ampio, stabile e non biologico (il carbonio, azoto, fosforo ecc sono presenti nel comparto di riserva in maniera non biologica) e un comparto più piccolo, il comparto labile (quello circolante), che rappresenta il modo in cui l'elemento viene scambiato attraverso la biomassa. In base a queste due caratteristiche (comparto di riserva e comparto labile) raggruppiamo i cicli biogeochimici in 2 grandi categorie: **i cicli di tipo gassoso** e **i cicli di tipo sedimentario**. Per capire se un ciclo è di tipo gassoso o di tipo sedimentario guardo il comparto di riserva. Se il comparto di riserva di quell'elemento è in atmosfera o in acqua allora il

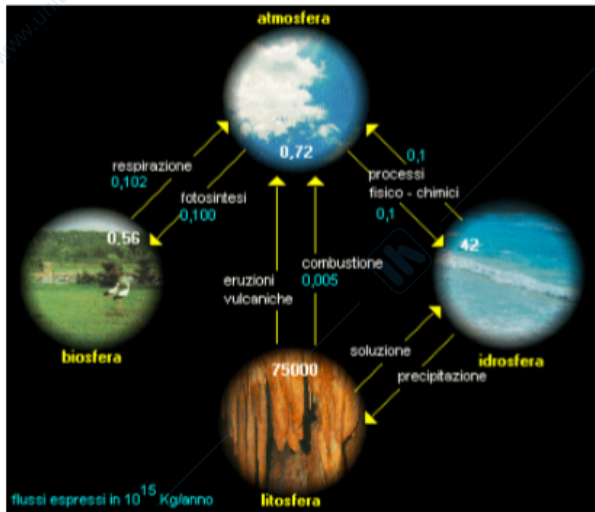
ciclo sarà gassoso (i cicli dell'azoto e dell'acqua sono gassosi. L'azoto presente in atmosfera rappresenta il 70%). Invece, al contrario, gli elementi che hanno il comparto di riserva nella crosta terrestre sono cicli sedimentari (è sedimentario ad esempio il ciclo dello zolfo contenuto nella roccia e quello del fosforo). Il carbonio, invece, lo abbiamo come pool di riserva nelle rocce sedimentarie (quindi in base alla classificazione fatta dovrebbe essere sedimentario), ma in questa forma non è utilizzabile (l'animale o il vegetale non magia roccia). La forma scambiabile del carbonio è la CO₂ (atmosfera) e per questo possiamo definire il suo ciclo come gassoso, definito in questo modo non per il pool di riserva poiché sappiamo che la quantità di carbonio (CO₂) presente in atmosfera non è elevata. Un tempo questa quantità era pari a 300 parti per milioni, adesso abbiamo superato i 400 parti per milioni. **Il ciclo del carbonio è quindi sedimentario se guardo il pool di riserva, ma se guardo la forma scambiabile posso definirlo anche gassoso.** A livello globale il ciclo del C il ciclo dell'H₂O sono i cicli biogeochimici più importanti poiché C è l'elemento base per la vita e l'H₂O è essenziale per ogni essere vivente. Entrambi i cicli sono caratterizzati da pool di riserva atmosferici piccoli (il carbonio 0,003% e il vapore acqueo 0,001%) ma molto attivi e vulnerabili alle perturbazioni causate dall'uomo.

CICLO DEL CARBONIO

Il ciclo del carbonio è un ciclo molto complesso che presenta le seguenti caratteristiche:

- **È un ciclo sedimentario** (in quanto contenuto per la maggior parte nelle rocce) ma se guardo la forma scambiabile può essere definito anche gassoso.
- **Ha una riserva atmosferica molto piccola (0,004%)** rispetto la riserva nelle rocce. Poiché la riserva atmosferica è piccola, il tempo di residenza di quel composto, in quel comparto, è il più piccolo in assoluto. Per questo motivo, per sostituire la quantità di CO₂ presente in atmosfera ci vogliono solo 3 anni, mentre invece per sostituire la quantità di carbonio nelle rocce ci vogliono miliardi e miliardi di anni (risorse non rinnovabili) poiché nelle rocce abbiamo tantissimo carbonio.

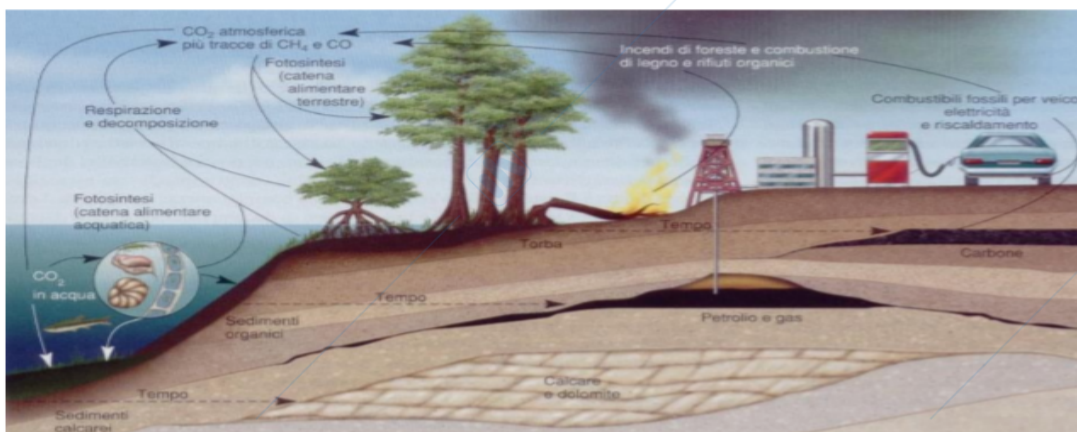
In idrosfera il carbonio è presente sotto forma di bicarbonati (perché la CO₂ in atmosfera è in equilibrio con l'acqua) e carbonati in quantità 60 volte superiore a quella atmosferica. Ma la maggiore riserva di carbonio si trova nelle rocce sedimentarie della litosfera (carbonati, petrolio carbone).



Facciamo riferimento all'immagine sovrastante. Se guardo biosfera e atmosfera sono collegati da doppia freccia e questo vuol dire che una parte di carbonio dalla biosfera va in atmosfera e viceversa. Accade questo perché attraverso i processi di fotosintesi e respirazione avviene uno scambio di carbonio dal comparto aria al comparto biologico (quindi c'è doppia freccia). Se guardo, invece, litosfera e atmosfera ho singola freccia poiché il carbonio dalla litosfera va verso l'atmosfera (con le eruzioni vulcaniche ad esempio) e non viceversa. Per quanto riguarda il comparto idrosfera-atmosfera notiamo che anche qui c'è la doppia freccia poiché una parte di carbonio dall'idrosfera va in atmosfera e viceversa, e come è possibile questa cosa? Perché ci sono una serie di processi chimico-fisici, governati dalla natura, che mediano questo scambio. Infine, guardiamo il comparto litosfera (roccia) e idrosfera (acqua) e osserviamo che anche in questo caso la freccia è doppia. In questo caso non ci sono processi biologici ma chimico-fisici: il carbonio passa dalla litosfera all'idrosfera per processi di soluzione (l'acqua è il solvente per antonomasia e con il tempo cadendo sempre allo stesso posto è chiaro che porta via anche materiale), nel caso opposto invece, e cioè dall'idrosfera alla litosfera, passa attraverso processi di precipitazione.

Detto questo guardiamo cosa succede nella biosfera, parliamo quindi del ciclo interno del carbonio.

L'immagine sottostante rappresenta il ciclo globale del carbonio.



la CO₂ atmosferica è la "fonte" di C del ciclo

il C passa nell'ecosistema attraverso la fotosintesi e viene immagazzinato nei viventi: **Organizzazione**

Il C intrappolato nei viventi, alla loro morte, viene liberato al suolo: **Mineralizzazione**

Per descrivere il ciclo globale del carbonio parto dall'atmosfera, dove è presente in quantità ridottissime. La CO₂ atmosferica è quindi la fonte del ciclo e, attraverso i venti, passa per il processo di fotosintesi. Una volta che il carbonio è incamerato dalla pianta, questa diventa veicolo di cibo per gli organismi che vengono dopo, passa quindi attraverso la catena alimentare. Alla morte della pianta e a quella di tutti gli organismi questo carbonio verrà degradato dal processo di decomposizione, si libereranno nutrienti e un'altra volta il carbonio torna in atmosfera. Una parte di questo carbonio, però, non è soggetto ad una veloce decomposizione ma ad una lenta decomposizione, per cui rimarrà stoccato nel suolo o nei sedimenti come humus. Un'altra parte ancora di carbonio andrà ad rimpinguare i magazzini del sottosuolo o delle profondità oceaniche che sono torba, carbone, petrolio e gas naturale.

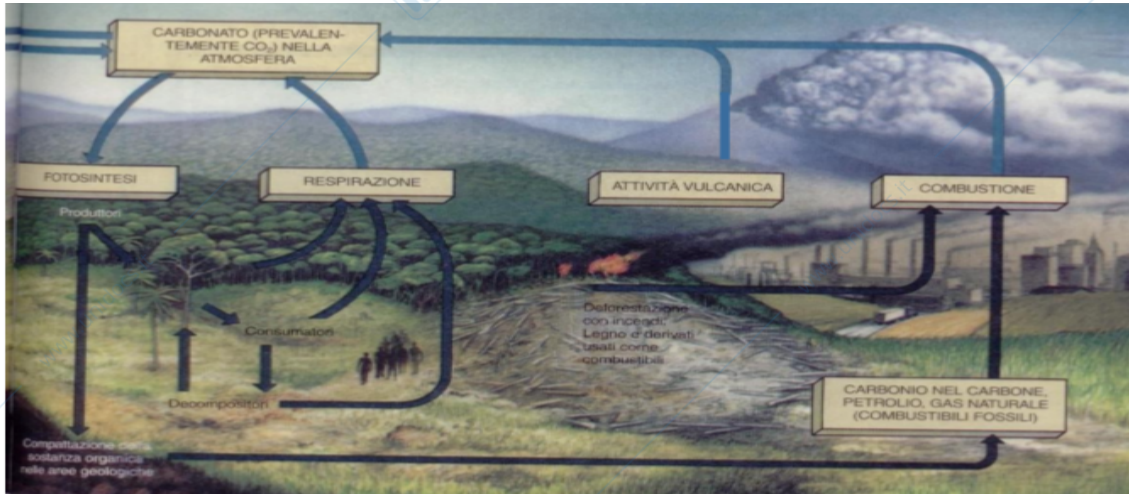
Quali sono invece i meccanismi che rilasciano carbonio in atmosfera?

- La respirazione della pianta;
- la decomposizione.
- gli incendi (sia naturali che di origine antropica. Se l'incendio è doloso è ovvio che la quantità di CO₂ rilasciata è maggiore di quella assorbita)

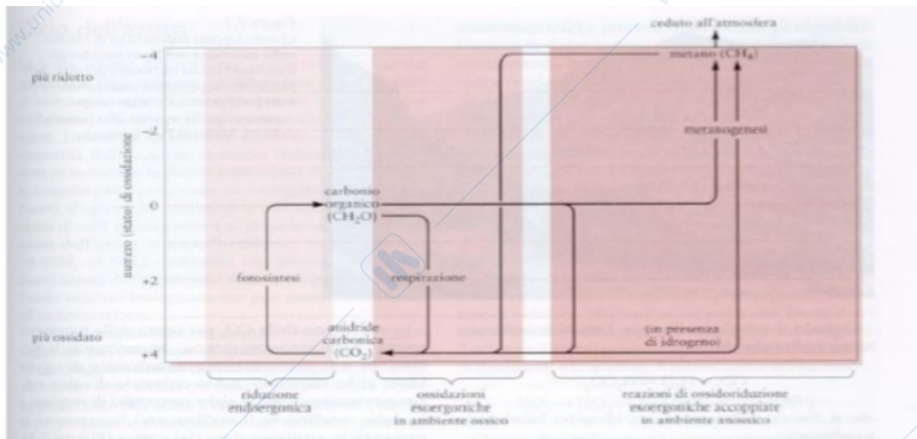
La CO₂ così come viene presa dagli organismi terrestri, viene presa anche dagli organismi acquatici.

Il carbonio è presente in forma gassosa chiaramente sotto forma di CO₂, però ci sono anche altre forme gassose del carbonio: il monossido di C (mortale per l'uomo, ma in atmosfera è presente in concentrazioni ridottissime) e il metano (CH₄). Quindi le forme gassose di carbonio sono: la CO₂, CO e il metano.

CICLO DEL CARBONIO IN AMBIENTE TERRESTRE



CO₂ in atmosfera. Quali sono i processi che assorbono l'anidride carbonica dall'atmosfera? La fotosintesi, che permette al carbonio di arrivare ai produttori e poi c'è il ciclo della materia fino alla decomposizione e un'altra volta nutrienti. Quali sono invece i processi che rilasciano CO₂? I processi che rilasciano sono: la respirazione; la decomposizione; le attività vulcaniche e la combustione. Se guardiamo il ciclo interno del carbonio (quello attraverso gli organismi) abbiamo reazioni, abbiamo detto, assimilative e dissimilative. Nelle assimilative l'elemento viene ad essere incorporato nella biomassa, nelle dissimilative l'elemento dalla biomassa viene un'altra volta liberato in atmosfera.



L'immagine sovrastante rappresenta il ciclo del carbonio, il quale passa da uno stato di ossidazione +4 (quindi più ossidato) a uno stato di ossidazione più ridotto.

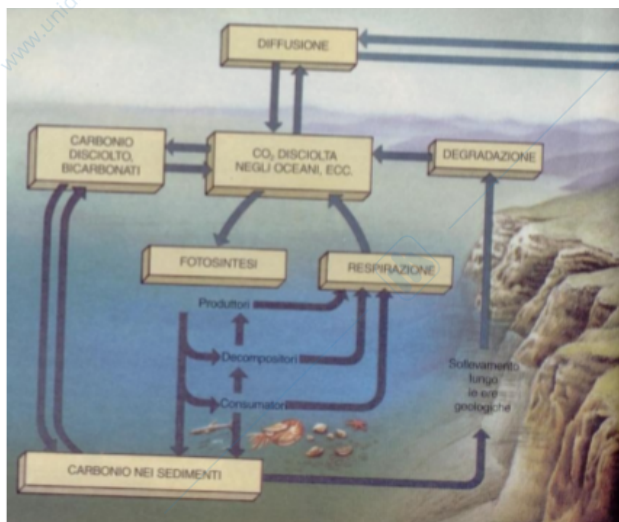
Partiamo dalla CO_2 , nella quale il carbonio è presente nello stato di ossidazione +4. Quando l'anidride carbonica viene assorbita dalla pianta attraverso la fotosintesi, viene ridotta perché passa dallo stato di ossidazione +4 a quello 0, si forma quindi glucosio. Che fine fa questo glucosio? Il glucosio è il substrato della respirazione, il carbonio quindi viene riossidato poiché dalla respirazione si ottiene nuovamente CO_2 e ossigeno. In questo "giochetto" di fotosintesi e respirazione, il carbonio viene ridotto-ossidato-ridotto-ossidato e tutto questo sempre all'interno dell'organismo vegetale (processi assimilativi). Il carbonio organico presente sotto forma di zucchero, però, può essere anche il substrato di un altro processo, quello di metanogenesi (altrimenti come si forma il metano in atmosfera?). Attraverso il processo di metanogenesi si forma metano e questo, da altri batteri metanogeni, viene trasformato nuovamente in CO_2 (e quindi riossidato).

In ambiente terrestre quindi, **la situazione del carbonio presente è governata dalla fotosintesi e dalla respirazione** poiché questi processi, variando con il giorno e la notte, con le stagioni e con la latitudine, che cosa fanno? Impongono delle differenze della quantità di carbonio in atmosfera che sono giornaliere, stagionali e latitudinali.

Se ci viene posta la domanda: "parliamo della differenza latitudinale della CO_2 in atmosfera" dobbiamo dire che poiché la quantità di CO_2 presente in atmosfera è dovuta ai processi di fotosintesi e respirazione, è chiaro che se io ho più fotosintesi avrò meno carbonio in atmosfera, se invece in atmosfera ho più CO_2 vuol dire che la pianta ha respirato. Ma la CO_2 è più presente all'equatore o ai poli? Ai poli, perché nei poli c'è poca fotosintesi (perché non ci sono piante). La CO_2 è presente in quantità minore all'equatore (come abbiamo appena visto), durante il giorno (perché di giorno che avviene la fotosintesi) e durante l'estate (poiché è in questo periodo che, in presenza maggiore di luce, avviene più fotosintesi). Di conseguenza abbiamo quindi delle variazioni che sono latitudinali, giornaliere e stagionali.

Dal 1999 al 2008 abbiamo avuto un incremento di CO_2 in atmosfera.

CICLO DEL CARBONIO IN AMBIENTE ACQUATICO



Come si muove il ciclo del carbonio in ambiente acquatico? il carbonio dall'atmosfera diffonde, per diffusione, in acqua e arriva disciolto negli organismi. Qua un'altra volta la stessa cosa: produttori, consumatori primari e secondari, decompositori e quindi chiaramente il carbonio passa attraverso le catene alimentari. Però c'è una particolarità: **la CO₂ atmosferica è in equilibrio con la CO₂ disciolta in acqua** (doppia freccia). A sua volta, questa CO₂ disciolta in acqua, per una serie di reazioni chimiche, forma lo ione bicarbonato, la cui reazione è a sua volta reversibile. **Quindi CO₂ atmosferica + acqua ⇌ ione bicarbonato**, il quale costituisce la riserva di carbonio per gli organismi acquatici. L'anidride carbonica, quindi, arriva agli organismi acquatici, sotto forma di ioni bicarbonato. Questo equilibrio è fondamentale poiché rappresenta la **capacità tampone degli oceani**. Quando la quantità di CO₂ in atmosfera è molto elevata, l'oceano ne incamera una gran parte ma fin ad un certo punto, perché che succede quando tamponiamo qualcosa e il tampone non tampona più? Che non tampona più nulla e la capacità tampone è finita, si è esaurita. Quindi ora non c'è più il discorso più anidride carbonica atmosferica più lo prende, l'oceano non ne può prendere più per cui lo restituisce all'atmosfera. **La capacità tampone degli oceani è esaurita, in alcune zone del mondo è completamente esausta.**

Questo è quello che succede in ambiente acquatico:



Quindi, più anidride carbonica arriva in acqua, più H⁺ abbiamo e più le acque sono acide.

Molti organismi acquatici hanno uno scheletro carbonatico e se l'acqua è acida questo scheletro si deteriora, si distrugge. Questo è quello che sta succedendo a molti coralli che stanno perdendo questo scheletro carbonatico, stanno sbiancando e si stanno distruggendo (il famoso fenomeno dello sbiancamento dei coralli della barriera corallina). I coralli sono gli organismi acquatici che più stanno subendo l'effetto della modificazione ambientale in ambiente acquatico dovuta al cambiamento climatico.

Così come abbiamo visto sulla terraferma che c'è una differenza di temperatura dovuta al polo nord, polo sud, al giorno e alla notte, e alla stagionalità, anche in ambiente acquatico vale. In ambiente acquatico, generalmente, nelle zone polari fredde, c'è più CO₂ sia perché non c'è nessuno che la leva (non ci sono piante e dunque fotosintesi) e sia per una questione legata alla temperatura. Nelle acque polari fredde la formazione di ghiaccio fa aumentare la salinità dell'acqua e le masse d'acqua

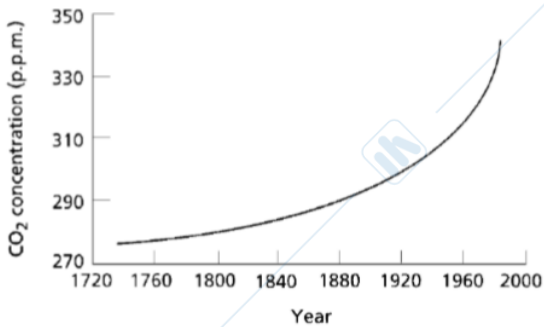
superficiali ricche di CO₂ sprofondano. All' equatore, invece, è diverso perché fa caldo. In queste zone l'acqua si riscalda e risale. Per cui il giochino è questo: all' equatore abbiamo anidride carbonica negli strati superficiali della colonna d' acqua, mentre invece al polo nord e al polo sud abbiamo la CO₂ negli strati profondi (quando diciamo profondo non intendiamo 1-2 metri, ma 30-40. Maggiore è la profondità e maggiore è la quantità di CO₂ intrappolata in queste colonne di ghiaccio). Anche in ambiente acquatico, dunque, c'è un ciclo dovuto alla temperatura così come in ambiente terrestre.

ALTERAZIONI DEL CICLO DEL CARBONIO

Fino agli anni 50-60 circa, gli scienziati non credevano che ci potesse essere un'inferenza così forte da parte dell'attività umana sul ciclo del carbonio. In quegli anni sono state impiantate delle centraline di monitoraggio per la CO₂ al polo sud e alle Hawaii e grazie a queste, nel tempo, è stato possibile osservare un forte incremento di CO₂ nell'atmosfera e questi cambiamenti sono dovuti alla deforestazione e, in modo particolare, alla combustione dei combustibili fossili. L' uomo ha spostato il carbonio da un pool stabile ad un pool labile (il carbonio è stato prelevato dai grandi giacimenti di carbon fossile e petrolio per essere utilizzato come combustibile e una volta che questo brucia va in atmosfera. Quindi dal pool stabile il carbonio è stato spostato al pool labile dove può essere veicolo di scambio tra gli ecosistemi).

Le torri di monitoraggio di CO₂, dal 1958 (anno in cui furono installate per la prima volta) ad oggi, campionano CO₂ non ogni ora, ma addirittura ogni secondo. Abbiamo detto che grazie a queste si è reso evidente l'aumento di CO₂ in atmosfera, ma da quanto tempo questo fenomeno sta avvenendo? Campioni di aria in carote di ghiaccio raccolte in Groenlandia, hanno dimostrato che l'incremento procede dall'inizio del 1700 (anno della rivoluzione industriale). Perché il carotaggio di ghiaccio ci può dare un'idea di quanta CO₂ c'è? Ricordiamo quanto detto precedentemente: ai poli la CO₂ è nella parte basse della colonna d' acqua. Se si analizza la colonna ghiacciata, così come i geologi analizzano i fossili, si può capire, tagliando a fette questa carota di ghiaccio e guardando la CO₂ imprigionata, l'epoca della carota. Chiaramente, è ovvio che se io prendo una carota lunga km la parte distale è il ghiaccio che si è formato tempo prima. Quindi si va a datare quella porzione di carota di ghiaccio, si misura quanta CO₂ c'è in quella determinata porzione e la quantità di anidride carbonica presente in quella quantità sarà chiaramente quella equivalente all' epoca della datazione del pezzo di carota. È un po' come si fa con i fossili. Da questo gli scienziati desunsero che l'incremento procede dal 1700 (anno della rivoluzione industriale). Ma perché dal 1700? In passato c'era una quantità maggiore di CO₂ e una inferiore di ossigeno perché pochi organismi avevano colonizzato le terre emerse. Con la grande ossigenazione le piante dal mare passano alle terre emerse, per cui è ovvio che la CO₂ dall' atmosfera viene sequestrata ed è diminuita sempre di più. L' ago della bilancia quindi sono sempre stati gli organismi vegetali, che da quando si sono impiantati sulla terraferma hanno sempre più contribuito a diminuire la concentrazione di anidride carbonica presente in atmosfera. Ora però sta succedendo che **il polmone della terra, la foresta tropicale, sta venendo disboscata** perché serve spazio per le coltivazioni dato che la popolazione umana sta crescendo ad un ritmo esponenziale. Alla deforestazione (cambio d' uso del territorio perché la foresta viene adibita al pascolo o all' agricoltura per le riserve alimentari) si è unito anche un **maggior utilizzo del carbon fossile** da parte dell'uomo che ha incrementato, contemporaneamente, la CO₂ presente in atmosfera. La quantità di anidride carbonica presente in atmosfera oggi è uguale a 417-418 parti per milioni (questa quantità non potrà mai più diminuire, ma si può solo assestare o aumentare).

Il grafico seguente mette in evidenza come è variata la quantità di CO₂ in atmosfera nel corso degli anni:



Questo incremento di CO₂ in atmosfera è però positivo per la pianta, è come dire ho più cibo per la pianta. Però il discorso è che, in questo caso, non guardo l'ecosistema in toto, ma lo guardo solo dal punto di vista del vegetale. Se la pianta forma più biomassa, c'è un discorso legato al fatto che questa biomassa dove va, che tipo di biomassa è, ma riesce poi la pianta ad accrescersi in modo proporzionale all'incremento di CO₂? Ma non abbiamo studiato la legge del minimo che diceva che se c'è troppo è peggio (quindi un eccesso di qualcosa può causare qualcos'altro di negativo)? Questo vale per tutti, la CO₂ in eccesso blocca la fotosintesi perché c'è un meccanismo di regolazione anche per le piante. All'inizio l'incremento di CO₂ è favorito dalla pianta, però arriviamo ad un punto in cui i prodotti di reazione vanno ad inibire la fotosintesi stessa (meccanismo di feedback negativo), per cui non sempre l'incremento dell'anidride carbonica è positiva, altrimenti nessuno si preoccuperebbe che c'è più CO₂ anche perché se c'è più CO₂ l'ossigeno è sempre più alto.

CONSEGUENZE DELL' INCREMENTO DI CO₂ IN ATMOSFERA

La CO₂, insieme ad altri gas, è un gas ad **effetto serra**. L'aumento della concentrazione di CO₂, per le sue proprietà chimico-fisiche, si porta dietro un incremento di temperatura e \square più CO₂ c'è, più la temperatura è elevata in atmosfera e questo rappresenta un problema per gli organismi perché ognuno di questo ha un ambito di tolleranza. Per cui se si verifica un incremento di temperatura l'organismo può fare due cose: o sposta il proprio ambito di tolleranza (e quindi vive) o muore perché non riesce più ad adattarsi.

È questo il problema del cambiamento climatico: gli organismi non riescono più ad adattarsi ad un cambiamento così veloce. In un normale momento di evoluzione queste nuove condizioni potrebbero far scaturire organismi più resistenti o migliori, ma il tempo è troppo breve, l'organismo in 2 anni non ce la fa ad adattarsi e quindi o cambia drasticamente o muore. Se tutto rimane così com'è, molti modelli previsionali, nella peggiore delle ipotesi ci hanno detto che l'incremento di temperatura nel 2050 sarà addirittura di +1,5 gradi e questo comporterà estati ancora più secche e inverni ancora più freddi.

L'effetto serra è un fenomeno naturale che è sempre esistito (non è la modificazione antropica!!!) che è stato però esacerbato dall'incremento di CO₂ e altri gas. L'effetto serra è un fenomeno naturale perché se non ci fosse saremmo come Venere e come Marte poiché il suo ruolo è quello di intrappolare il calore vicino alla terra. Se non avessimo l'effetto serra avremmo anche sul nostro pianeta temperature gelide come quelle di Marte e la vita sarebbe impossibile. Il problema, oggi, sta nel fatto che l'effetto serra è troppo per l'incremento di CO₂ e altri gas, è quindi un'enfatizzazione del fenomeno naturale. Il cambiamento climatico e quindi

l'incremento di temperatura nel tempo, è un' esacerbare un fenomeno che è di per sé naturale.

Quali sono i gas naturali coinvolti nell' effetto serra? Il metano, il vapore acqueo e la CO₂.

A questi gas naturali, attualmente, si sommano i contributi dell'attività antropica, che sono: la CO₂ prodotta per combustioni non naturali, il metano e il protossido.

QUALI SONO LE CONSEGUENZE DELL' EFFETTO SERRA? Il riscaldamento globale del nostro pianeta.

Si chiama effetto serra perché lo possiamo osservare guardando anche quello che succede in una serra. Che succede in una serra? Una serra è trasparente ed entrano i raggi del sole. La componente che ci interessa per l'effetto serra è la radiazione infrarossa (un organismo quando assorbe infrarosso si riscalda, quando lo emette si raffredda). In una serra entrano i raggi solari e **l'infrarosso vicino** che colpisce tutto quello c'è e che viene riemesso come **infrarosso lontano**. Quindi l'infrarosso vicino entra all' interno della serra, colpisce i vegetali e il suolo e viene riemesso dalle superfici come infrarosso lontano, il quale non esce dalla serra ma viene bloccato e rimesso a terra. Questa è la dinamica dell'effetto serra e per questo motivo la temperatura al suo interno è più calda rispetto a quella esterna. Se tutto questo lo rapportiamo al nostro pianeta, succede che dal sole arrivano chiaramente le radiazioni elettromagnetiche (che sono quelle che ci interessano). L' infrarosso vicino attraversa la coltre atmosferica, colpisce la terra la quale assorbe l'infrarosso, si riscalda e riemette l'infrarosso vicino come infrarosso lontano il quale non esce ma viene bloccato dai gas serra.



RICORDA BENE: Il gas serra è **trasparente all' infrarosso vicino** che lascia passare e **blocca l'infrarosso lontano**.

QUALI SONO LE CONGUENZE DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO?

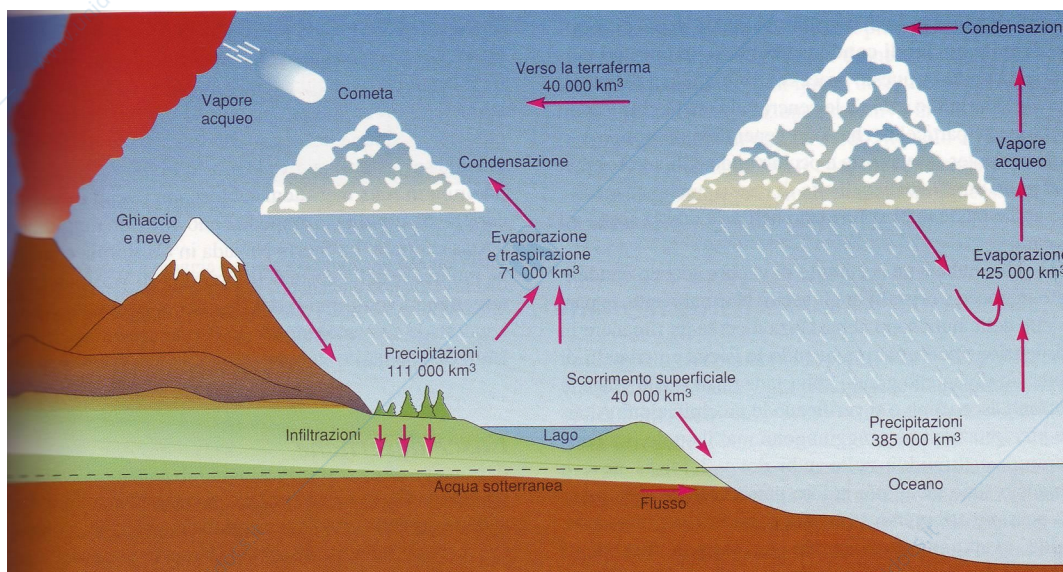
- **Scioglimento della calotte polari.** Questo comporta l'innalzamento del livello dell'acqua in prossimità delle zone costiera e una diminuzione, in alcune zone, della salinità in quanto le calotte polari sono fatte di acqua dolce.
- **Viene falsato il ciclo biogeochimico dell'acqua,** per cui è chiaro che non si hanno più i normali meccanismi di evaporazione, condensazione etc.

- Nelle acque dei mari **non c'è più l'effetto tampone** degli oceani, per cui c'è l'acidificazione degli oceani. Questo comporta lo sbiancamento dei coralli e la loro distruzione.
- **Viene modificato il ciclo vitale delle piante e degli animali.**

IL CICLO DELL'ACQUA

Il ciclo dell'acqua, insieme a quello del carbonio hanno pool di riserva molto piccoli e sono vulnerabili dinanzi alle perturbazioni indotte dall'uomo. L'acqua è sia una risorsa, sia una condizione: risorsa in quanto richiesta nella fotosintesi, ed è assunta dagli organismi per mantenere il bilancio idrico; condizione in quanto come umidità regola molti processi come la traspirazione (se c'è molta umidità l'organismo traspira di meno, se c'è poca umidità traspira di più). L'acqua è un ciclo gassoso perché il pool di riserva è negli oceani: il 97% dell'acqua si trova negli oceani sotto forma di acqua salata e solo il 3% è acqua dolce. I $\frac{3}{4}$ di questo 3% sono rappresentati dal ghiaccio (acqua non utilizzabile); mentre l'altro $\frac{1}{4}$ è rappresentato da laghi, fiumi, acqua sotterranee. Inoltre, il 0.001% dell'acqua è presente come vapore atmosferico, che va a regolare il bilancio termico del pianeta, cioè il vapore acqueo influenza molto l'assorbimento delle radiazioni e la formazione delle nuvole; mentre, l'acqua liquida e il ghiaccio influenzano la radiazione solare incidente condizionando riflessione, rifrazione e assorbimento (la rifrazione sul ghiaccio o in acqua liquida è diversa rispetto a quella che si ha in ambiente terrestre. Ad esempio, quando la luce solare arriva sul ghiaccio, essa viene rifratta in tutte le direzioni, a differenza della terra ferma, dove la radiazione arriva dall'alto). La vita sulla terra dipende dal ciclo dell'H₂O, infatti essa si trasforma continuamente e passa da un comparto della biosfera all'altro attraverso processi di: evaporazione, deflusso, fusione del ghiaccio, precipitazione, condensazione, quindi, l'acqua passa continuamente dallo stato liquido, al gassoso, al solido. Dunque, in questo ciclo non sono implicati direttamente gli organismi, ma essi utilizzano le 3 forme di acqua (di più quella liquida).

CICLO IDROLOGICO DELL'ACQUA



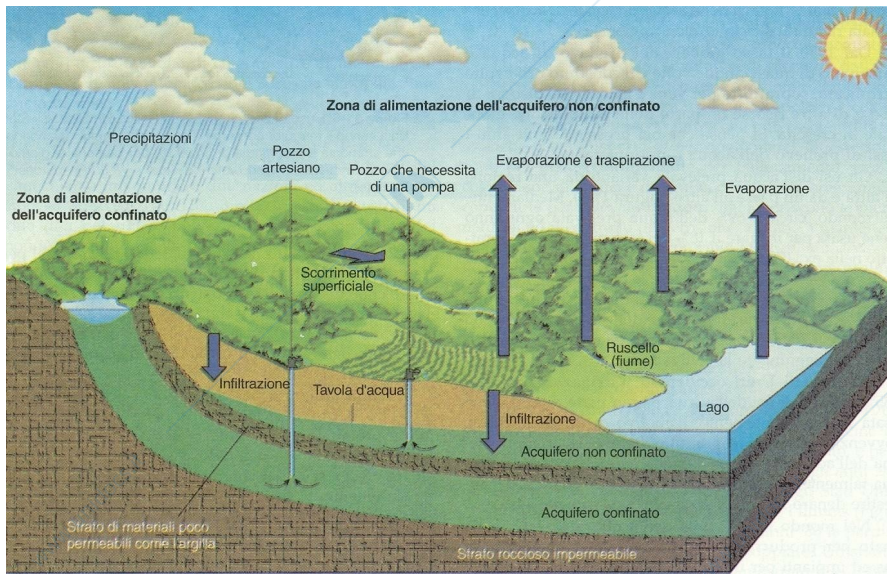
**Precipitazione = Evaporazione & Traspirazione (da parte di animali e piante)
= Condensazione = Precipitazione = infiltrazione & percolazione**

H₂O evapora dai corpi idrici e dalle terre emerse per poi salire nella colonna d'aria e la temperatura cambia, cioè si abbassa, per cui l'evaporazione dà il flusso dell'acqua verso l'alto. Successivamente, le nuvole si caricano di vapore acqueo, per cui condensano e questo comporta le precipitazioni, cioè l'acqua precipita sia sulle terre emerse, sia nei corpi idrici: precipitando sulle terre emerse, l'acqua viene assorbita dal suolo nudo, dalle rocce e viene fatta defluire; invece, nel momento in cui l'acqua precipita nei corpi idrici (oceano), essa arricchisce semplicemente la riserva idrica di questi corpi. Tuttavia, accade anche che l'acqua che non viene captata dalle piante o dal suolo può, per percolamento, infiltrarsi nel suolo (sempre se si tratta di un suolo non impermeabile) e può accumularsi nelle falde acquifere oppure defluire come acqua sotterranea sempre verso i giacimenti. Dunque, l'acqua si muove costantemente attraverso tutti i comparti ecologici ed è mossa da due forme d'energia: energia solare che tira l'acqua verso l'alto, cioè l'acqua viene condensata in vapore grazie all'energia solare; mentre, l'altra forma energetica è la forza di gravità, che consente all'acqua condensata di precipitare.

Cosa succede all'acqua che si infiltra nel sottosuolo? La quantità di H₂O che arriva nel sottosuolo dipende dalla quantità delle precipitazioni e dalla composizione del suolo, cioè se è argilloso, sabbioso: il primo trattiene acqua ed il secondo no. Quando l'acqua arriva nel sottosuolo e passa attraverso i vari strati del suolo, essa viene infiltrata, cioè il suolo agisce come filtro per l'acqua che arriva dalle precipitazioni. Dunque, l'acqua che attraversa il suolo si impoverisce di ossigeno e si arricchisce di tutto ciò che si trova nel suolo, cioè minerali ma anche inquinanti, quindi l'acqua dilava il suolo, per cui gli inquinanti vengono trasportati negli strati più profondi del suolo e percolati verso le falde acquifere. L'acqua, quindi, si impoverisce di ossigeno ma si arricchisce dei costituenti del suolo o delle rocce che essa attraversa e anche di CO₂, quindi può accadere che i composti solubili del suolo (tipo carbonati) vengono portati via dall'acqua e trasportati sempre verso le falde acquifere, per cui durante il passaggio attraverso la roccia, H₂O cambia composizione ed è proprio per tale motivo che esistono diverse tipologie di acqua a seconda della sorgente.

Le più grandi riserve di acqua sotterranea sono nelle falde acquifere, strati sotterranei porosi, spesso calcarei, sabbiosi o ghiaiosi, delimitati da rocce

impermeabili o da argilla.



Guardando l'immagine si nota che quando l'acqua arriva al suolo possono verificarsi diversi fenomeni: se il suolo non è capace di assorbire H₂O, essa può essere trasportata per scorrimento superficiale verso fiumi, laghi per poi evaporare; mentre un'altra parte di acqua evapora direttamente perché non ha il tempo di percolare il suolo (caso ad esempio del deserto); un'altra parte di acqua, invece, a seconda delle caratteristiche del sottosuolo, può infiltrarsi ed andare a costituire le tavole d'acqua, che sono delle riserve d'acqua sotterranee, cioè le falde acquifere. Quest'ultime, dal punto di vista geologico, sono costituite in modo tale che l'acqua viene ad essere bloccata proprio perché sotto la falda acquifera c'è uno strato di roccia argilloso (strato di materiali poco permeabili come l'argilla). In realtà ci sono due tipi di falda: acquifero non confinato (superficiale) e falda acquifera confinata (profonda): la prima è in comunicazione con l'ambiente esterno, mentre la seconda è una falda confinata tra due strati impermeabili di roccia, cioè si trova tra lo strato di materiali poco permeabili come l'argilla e lo strato roccioso impermeabile. L'acquifero confinato è quello che viene utilizzato per l'alimentazione umana, al quale si attinge attraverso i pozzi artesiani; l'acquifero non confinato, invece, non viene utilizzato con tale scopo perché, essendo collegato con l'ambiente esterno, risulta più suscettibile all'inquinamento.

ENERGETICA DEL CICLO IDROLOGICO CONSIDERATO A DOPPIO FLUSSO

Il ciclo dell'acqua è a doppio flusso dal punto di vista energetico: un flusso ascendente guidato dall'energia solare; ed un flusso discendente guidato dalla forza di gravità che riporta l'acqua nei bacini idrici e sul suolo. Tuttavia, nei bacini idrici l'acqua che evapora è di più rispetto a quella che torna, mentre al suolo l'acqua che evapora è di meno rispetto a quella che torna.

Dimensioni delle riserve e Tempi di turnover dell'acqua: il ciclo dell'acqua è di tipo gassoso con pool di riserva nell'oceano ed il tempo di turnover (di rinnovamento) nell'oceano è più alto (37.000 anni). Infatti, maggiore è la quantità dell'elemento chimico in un comparto e maggiore sarà il tempo impiegato per rinnovare l'elemento all'interno del comparto e, in questo caso, poiché il ciclo è gassoso e la maggior parte di H₂O si trova nell'oceano, allora il tempo di rinnovamento è molto alto. Invece, se si considera come riserva d'acqua il vapore atmosferico e non l'oceano, allora il tempo di

turnover è di appena 9 giorni; per i fiumi è di 12-20 giorni, per le acque sotterranee è di 300 anni e per i ghiacci polari è di 16.000 anni.

Flussi idrici in un ecosistema terrestre

Immaginiamo l'ecosistema terrestre considerando il suolo ed una pianta: l'acqua precipita, per cui una parte viene intercettata dalla chioma ed un'altra parte d'acqua arriva direttamente al suolo, cioè viene intercettata dalle radici, le quali la assorbono. Tuttavia, l'acqua che non viene intercettata dalle radici, ad esempio perché è troppa, si infiltra nel suolo oppure, per fenomeni di scorrimento superficiale, arriva verso i corpi idrici. **Quindi, cosa accade all'acqua nell'ecosistema terrestre?** Una parte viene intercettata, una parte percola nel suolo a seconda della tipologia di suolo considerata, un'altra parte ancora defluisce per scorrimento superficiale, sempre a seconda della tipologia di suolo, direttamente verso fiumi, laghi, corpi idrici. Tuttavia, se l'acqua che defluisce è tanta, allora essa si porta dietro tutto ciò che incontra, soprattutto le sostanze nutritive, quindi, in tal caso l'acqua impoverisce il suolo. Un fenomeno particolare che si verifica quando l'acqua cade all'interno dell'ecosistema terrestre è che l'acqua che scende sull'albero è come se dilavasse la chioma dell'albero, per cui tutto il particolato atmosferico lo troviamo alla base del tronco e attraverso questo fenomeno, alle pendici del tronco dell'albero, si accumulano inquinanti, cioè metalli pesanti presenti, prima, sulle foglie ed in atmosfera. Col il passare del tempo, la concentrazione di questi metalli può crescere fino a diventare altamente tossica. Infine, ricordiamo sempre che la capacità di un suolo di trattenere H₂O dipende dalla sua tessitura: argilloso > limoso > sabbioso. Tuttavia, l'uomo, lavorando il suolo può cambiare le sue caratteristiche: un suolo coltivato è un suolo più compatto e questo espone il suolo a dei rischi dovuti al fatto che l'acqua non riesce a percolare all'interno del suolo, ma viene ad essere dilavato superficialmente e questo riduce le riserve idriche presenti nel sottosuolo: infatti, più acqua defluisce, meno acqua penetra nel suolo e di conseguenza la riserva idrica sotterranea, ossia la falda acquifera non viene arricchita.

UN BILANCIO PREOCCUPANTE: come il ciclo del carbonio, anche quello dell'H₂O sta iniziando ad essere influenzato su scala globale dalle attività umane. Ogni anno sulle terre emerse arrivano circa 111.000 Km³ di acqua con le precipitazioni che rappresentano il solo rifornimento idrico, ma attualmente il prelievo dell'acqua da parte dell'uomo è di oltre 5000 km³ l'anno: di questi il 23% è sfruttato per produrre energia, il 69% per l'irrigazione e l'8% per uso domestico. Attualmente, 1/3 della popolazione mondiale è soggetta ad una limitata disponibilità idrica e si prevede un raddoppio nel prossimo secolo con possibili eventi catastrofici, almeno che il cambiamento climatico non venga bloccato attraverso la riduzione delle emissioni antropiche. Inoltre è stato previsto che i cambiamenti climatici ridurranno ulteriormente la disponibilità idrica in molte regioni aride e semiaride, generando gravi ripercussioni sull'ecosistema e sull'uomo.

FATTORI DI INQUINAMENTO DELL'ACQUA

- ⊗ **Agenti patogeni.** Un indicatore della qualità delle acque è il numero di *batteri coliformi* presenti in un campione di 100 ml d'acqua. Per l'acqua potabile si deve avere assenza di coliformi, per quella di balneazione l'EPA indica 200, mentre la legislazione italiana ne consente fino a 100 fecali (2000 totali)
- ⊗ **Rifiuti biodegradabili.** Un indicatore della qualità dell'acqua è il BOD.
- ⊗ **Sostanze chimiche idrosolubili inorganiche.** Possono rendere l'acqua non potabile, abbassano la produzione dei raccolti, danneggiano gli impianti industriali
- ⊗ **Nutrienti inorganici.** Nitrati, fosfati e solfati che determinano problemi di eutrofizzazione culturale
- ⊗ **Sostanze chimiche organiche.** Petrolio, gasolio, pesticidi, detersivi, solventi, etc. Sono altamente nocivi per la vita acquatica e per l'uomo
- ⊗ **Sedimenti e particolato.** Particelle insolubili sospese, derivante dai processi di erosione del suolo. Determinano riduzione della fotosintesi, trasportano sostanze tossiche immettendole nelle reti trofiche
- ⊗ **Isotopi radioattivi idrosolubili**
- ⊗ **Riscaldamento dell'acqua.**
- ⊗ **Introduzione di specie estranee**

CLICO DELL'AZOTO (N)

Ricordiamo che i cicli si dividono in:

1) **Cicli di tipo gassoso**, con un pool di riserva in atmosfera o nell'idrosfera (ciclo dell'azoto, ciclo dell'acqua); anche il ciclo del carbonio può essere gassoso se consideriamo la CO₂ come pool di scambio.

2) **Cicli di tipo sedimentario** in cui la riserva è la litosfera (ciclo dello zolfo e ciclo del fosforo e del carbonio considerando il pool di riserva).

Il ciclo dell'azoto è di tipo gassoso in quanto il suo pool di riserva si trova in atmosfera (78%). L'AZOTO è il nutriente, insieme al fosforo, più richiesto da tutti gli organismi viventi, basti pensare alle proteine, e diviene spesso il fattore limitante, cioè l'elemento presente in minore quantità rispetto al fabbisogno dell'organismo.

***Organismi fotosintetici assimilano azoto solo sotto forma di ammonio o nitrati;**

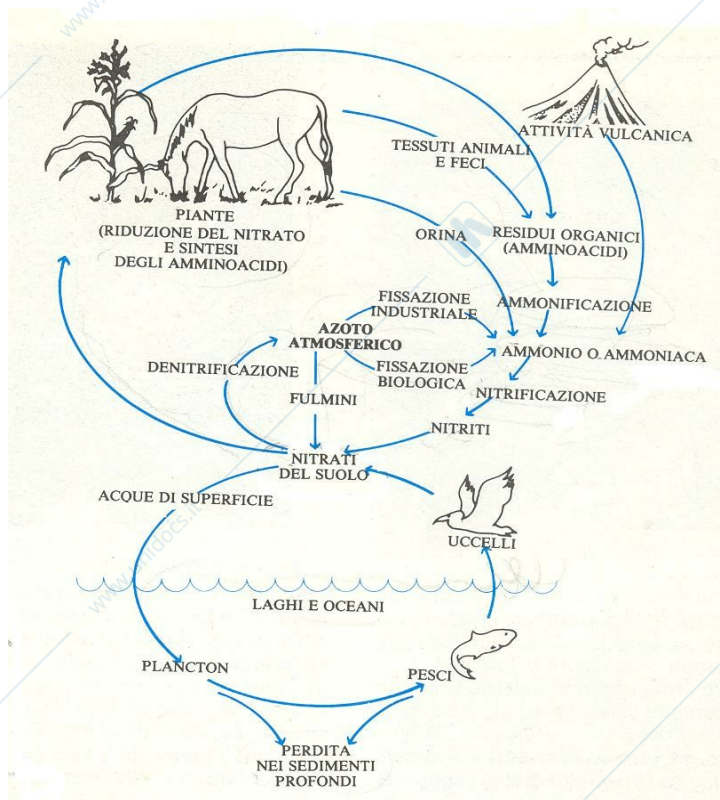
***Animali assimilano azoto organico come proteine e aminoacidi;**

***Microrganismi decompongono e mineralizzano il materiale organico, liberando CO₂ e NH₃.**

PRINCIPALI RISERVE DI AZOTO NELL'ATMOSFERA E NEI SISTEMI ACQUATICI E TERRESTRI

il ciclo dell'azoto è il più complesso dei cicli gassosi

Riserva	Tonnellate	% del Totale
Biosfera	2.8×10^{11}	0.0002
Idrosfera	2.3×10^{13}	0.014
Atmosfera	3.86×10^{15}	2.3
Geosfera	1.636×10^{17}	97.7
-crosta	$0.13 - 1.4 \times 10^{16}$	0.78-8.4
- suolo e sedimenti	$0.35 - 4.0 \times 10^{15}$	0.21-2.4
- mantello e nucleo	1.6×10^{17}	95.6



CICLO GLOBALE DELL'AZOTO: il tempo di turnover del ciclo globale è di 10 alla 7 anni, mentre per il ciclo interno è di centinaia di anni; Per le terre emerse il tempo di residenza dell'azoto nella biosfera è 615 anni. In generale, l'azoto viene preso dall'atmosfera, viene assorbito dagli organismi, per poi essere rilasciato nuovamente nell'atmosfera. Questo indica che il ciclo comprende processi assimilativi (l'elemento viene trasferito alla biomassa) e processi dissimilativi (l'elemento torna al comparto atmosferico). L'azoto atmosferico N_2 è la forma di azoto più abbondante sul nostro pianeta ed è inerte in quanto i due elementi N sono collegati mediante triplo legame covalente, un legame altamente energetico ed occorre una spesa energetica enorme per poterlo rompere. Questa forma N_2 , per la

presenza del triplo legame è una forma inerte ed altamente stabile, per cui N_2 atmosferico non reagisce, non è reattivo.

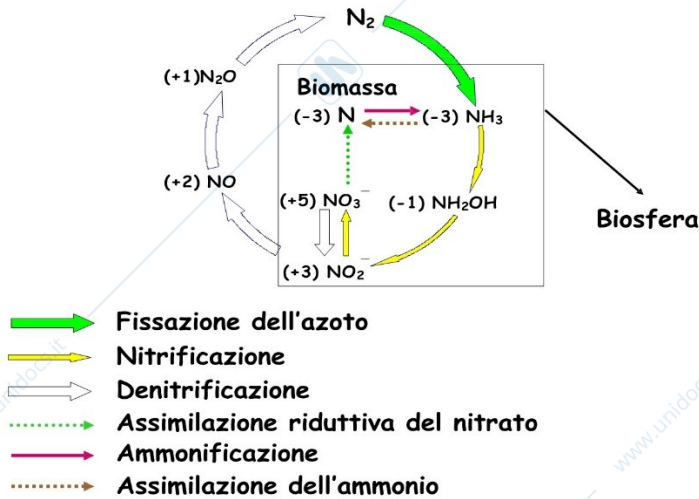
FISSAZIONE: processo attraverso cui l'azoto atmosferico viene trasferito dall'atmosfera alla biosfera (organismi viventi).

DENITRIFICAZIONE: processo attraverso cui l'azoto è trasferito dalla biosfera all'atmosfera. Dunque, la quantità di azoto presente in atmosfera, 78%, è un bilancio tra quello che viene fissato e quello che viene denitrificato. Se questo bilancio non funziona, allora la quantità di N_2 non è più di 78% e si creano anche forme intermedie di azoto, i diossidi di azoto, i quali hanno una forte ripercussione per quanto riguarda forme di inquinamento atmosferico.

VISIONE GENERALE DEL CICLO DELL'AZOTO

RICORDA: L'ossidazione e la riduzione sono processi chimici complementari che comportano una perdita di elettroni (**ossidazione**) da parte di un reagente e un corrispondente acquisto di elettroni (**riduzione**) da parte di un altro: i due processi devono quindi aver luogo contemporaneamente e in quantità corrispondenti.

Rappresentazione schematica del ciclo dell'azoto



Il processo fondamentale che libera N₂ dall'atmosfera, rendendolo disponibile per la biosfera è la **FISSAZIONE**, il cui prodotto finale è NH₃ (ammoniaca), la quale reagirà con l'acqua, nel suolo, formando NH₄⁺ (ione ammonio). A questo punto, l'azoto si trova in forma di NH₃ oppure NH₄⁺: l'ammonio può essere assorbito direttamente dalle piante ed entrare nella catena alimentare per poi essere riciclato e sottoposto al processo di decomposizione oppure subisce il processo di **NITRIFICAZIONE** con la produzione di NO₂⁻ (ione nitrito) e NO₃⁻ (ione nitrato). A questo punto l'azoto si trova in forma di NO₃⁻ ed il processo dissimilativo attraverso cui l'azoto ritorna all'atmosfera si chiama **DENITRIFICAZIONE**: il nitrato viene riconvertito in ione nitrito e quest'ultimo, invece, ad ossido nitrico (NO), poi a protossido (N₂O) ed infine questo viene convertito in N₂ ed il ciclo si chiude. Tuttavia, lo ione nitrato può avere due destini diversi: può essere substrato per la reazione di denitrificazione, che ridà l'azoto atmosferico N₂ e chiude il ciclo; oppure può essere substrato anche per un altro tipo di processo chiamato **ASSIMILAZIONE RIDUTTIVA DEL NITRATO**, cioè lo ione nitrato viene ridotto a NH, la forma attraverso cui l'azoto viene attaccato allo scheletro carbonioso del cheto-acido per formare gli aminoacidi. Attraverso quest'ultimo processo lo ione nitrato viene incorporato nella biomassa: l'azoto della biomassa è quello delle proteine. Dopo che gli animali hanno assimilato l'azoto ed in seguito alla loro morte, il detrito organico arriva al suolo e tale detrito viene attaccato dai decompositori, per cui quell'N presente nella biomassa viene degradato e così si forma nuovamente NH₃, attraverso il processo di **DECOMPOSIZIONE o AMMONIFICAZIONE**. Bisogna anche ricordare che l'azoto sotto forma di NH₃ o NH₄⁺ può essere anche assimilato attraverso il processo di **ASSIMILAZIONE DELL'AMMONIO** (senza riduzione perché non è presente l'ossigeno in ammoniaca o ammonio).

Vediamo ora i vari passaggi del ciclo:

FISSAZIONE ATMOSFERICA DELL'AZOTO (processo anaerobico)

Processo attraverso cui l'azoto molecolare gassoso viene ridotto a NH₃ ed incorporato in composti organici (da N₂ a NH₃) ed i batteri che fissano l'azoto possono essere simbiotici e liberi. La fissazione può avvenire attraverso 3 processi, di cui due sono naturali ed uno è chimico:

1. **FISSAZIONE INDUSTRIALE:** fissazione ad opera dell'uomo, chiamato processo di Haber-Bosch. ($N_2 + 3 H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$) questo processo richiede un'energia molto alta per rompere il triplo legame dell'azoto, elevati costi e produce molto inquinamento; nonostante quest'ultimo motivo, la fissazione industriale viene utilizzata perché l'azoto è fortemente limitante negli ecosistemi, per cui occorre produrlo, cioè l'azoto prodotto in modo naturale è troppo poco per soddisfare il fabbisogno dell'ecosistema. Questa fissazione è stata messa a punto nel 1914, richiede alta T°C e pressione. L'azoto così prodotto viene impiegato in agricoltura come fertilizzante.

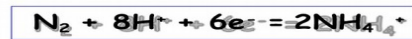
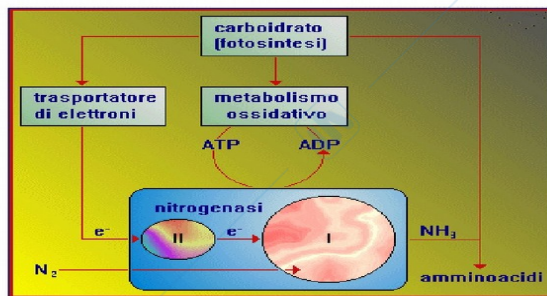
2. **FISSAZIONE ATMOSFERICA:** piccole quantità di N possono venire fissate dai fulmini ed essere trasportate sulla terra dalla pioggia (lampi e fulmini possono avere una scarica energetica tale da rompere il triplo legame di N₂). Tuttavia, la % di tale fissazione è bassa.

3. **FISSAZIONE BIOLOGICA (quella vista nel ciclo globale):** tipo di fissazione predominante che avviene ad opera degli organismi viventi. NH₃ che arriva al suolo, infatti è frutto della fissazione biologica, ma anche della decomposizione (ammonificazione). La fissazione biologica richiede grosse quantità d'energia e produce un arricchimento naturale del suolo; viene effettuata da alcuni batteri che vivono in forma libera o in simbiosi e dai cianobatteri. Le quantità di N₂ che vengono fissate dagli organismi dipendono dai fattori ecologici perché l'organismo, per fissare N₂ ha bisogno di condizioni ottimali di temperatura, umidità e così via.

Dunque, i batteri azotofissatori possono vivere sia liberi (azotobacter, clostridium con attività di fissazione bassa proprio perché la spesa energetica è maggiore) che in simbiosi (anabaena, rhizobium con attività più elevata grazie alla simbiosi), molti generi sono eterotrofi, altri autotrofi. I batteri autotrofi (Rhodospirillum) presentano un tipo primitivo di fotosintesi, ricavando sia il carbonio che l'azoto dall'aria. Fra i batteri che vivono in simbiosi, i più importanti e specializzati appartengono al genere Rhizobium; essi formano noduli radicali in molte specie di leguminose. Un esempio di simbiosi si può avere con una felce ed alcuni azotofissatori presenti nelle foglie e tale simbiosi induce un duplice beneficio: il beneficio che la pianta ricava dal batterio è la fissazione dell'azoto poiché la pianta non è in grado di prendere N₂, ma assorbe l'azoto sotto forma di nitrato o ammonio dal suolo; mentre il vantaggio del batterio è quello di ricavare nutrienti dalla pianta che produce fotosintati, prodotti finali della fotosintesi (amido e saccarosio).

Il ciclo dell'azoto - Fissazione

Tutti i microorganismi capaci di fissare l'azoto sono provvisti di un sistema enzimatico denominato nitrogenasi.



La nitrogenasi è formata da due componenti proteiche (componente I e componente II)

Fe-proteina o azotoligasi-riduttasi

Fe-Mo-proteina

Condizioni per il funzionamento dell'enzima:

Fe e Mo per la sintesi dell'enzima, **ATP** per energia, **e⁻** per la riduzione di N
temperature compatibili con la crescita di **batteri**
assenza di ossigeno che inattiva irreversibilmente l'enzima

MECCANISMI DI PROTEZIONE DELLA NITROGENASI DALL'OSSIGENO

Dato che la nitrogenasi è inattivata dall'ossigeno, essa è diffusa nei batteri anaerobi obbligati, cioè batteri che non necessitano di O₂ per sopravvivere, ma, al contrario, la presenza di ossigeno nel loro habitat ne inibisce la crescita. Tuttavia, i batteri anaerobi possono essere anche facoltativi, cioè batteri per i quali non è indispensabile l'ossigeno per la loro crescita ma che può essere utilizzato se è presente; di conseguenza i batteri facoltativi che possiedono la nitrogenasi mettono in atto dei meccanismi per eliminare quel poco di ossigeno che potrebbe inibire l'enzima, ad esempio realizzano artifici metabolici come respirare tantissimo per abbassare la concentrazione cellulare di ossigeno ed aumentare quella di CO₂. Invece, in alcuni cianobatteri che vivono in colonie filamentose la fissazione avviene solo in speciali cellule (eterocisti) che non producono ossigeno e sono rivestite da una spessa parete impermeabile ai gas.

Caso particolare: batteri simbiotici delle leguminose (genere *Rhizobium*) che formano noduli radicali. Il batterio infetta la radice delle leguminose, piante che prendono N₂ dall'atmosfera grazie alla simbiosi con questi batteri del genere *Rhizobium*, per cui si parla di fissazione simbiotica obbligata perché il batterio non può vivere senza la pianta e viceversa. Quando il batterio infetta la radice delle leguminose, la pianta reagisce all'infezione formando delle strutture chiamate noduli radicali ed è proprio in questi noduli che i batteri trasformano N₂ in NH₃. Nei tubercoli radicali la concentrazione dell'ossigeno è mantenuta bassa perché c'è una proteina che lega l'ossigeno, la leghemoglobina, quindi sottrae l'ossigeno dal mezzo di reazione favorendo la fissazione in assenza di O₂. Dunque, in sintesi, nei noduli radicali i batteri del genere *Rhizobium* trasformano N₂ in NH₃. Essa nell'acqua del suolo forma ioni NH₄⁺ assorbiti dalle radici delle piante. Le specie azoto-fissatrici vengono sostituite da altre specie man mano che il substrato si arricchisce di azoto.

* INFINE, l'azoto, grazie alla fissazione è diventato NH₃, che reagisce con l'acqua, nel suolo, formando ione ammonio NH₄⁺. Bisogna, però, ricordare che tale ammonio non deriva solo dalla fissazione ma deriva anche dal processo di decomposizione della sostanza organica, quindi dobbiamo spiegare la quantità di azoto che deriva dai decompositori, ossia l'ammonificazione.

AMMONIFICAZIONE (decomposizione che libera azoto)

Processo mediante il quale l'azoto incorporato nelle proteine, negli amminoacidi viene restituito, attraverso il processo di decomposizione, in forma ammoniacale, cioè in forma di ammonio perché l'ammoniaca reagisce sempre con l'acqua. Quindi, l'azoto è presente nel suolo sotto forma di composti organici complessi (proteine, AA), i quali vengono rapidamente scissi in composti più semplici dai decompositori che vivono nel suolo, attraverso proteolisi aerobica. Questi decompositori sono batteri saprofiti e funghi che degradano la sostanza organica utilizzando proteine e AA come substrati nutritivi e liberano l'azoto sotto forma di NH_3 . NH_3 nel suolo si combina con H^+ per formare NH_4^+ . Ora questo NH_4^+ diventa substrato per il processo di nitrificazione.

NITRIFICAZIONE = processo aerobico

Processo mediante cui alcune specie di batteri (autotrofi chemiosintetici) del suolo ossidano l'ammonio a nitrito NO_2^- ed un altro genere di batteri è in grado di ossidare il nitrito a nitrato NO_3^- .

- In particolare, la classe batterica nitrosomonas OSSIDA l' NH_3 , in presenza di ossigeno, in ione nitrito NO_2^- con liberazione d'energia. **$2\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 = 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$ (+ liberazione d'energia).**
- Invece, i batteri microbacter OSSIDANO il nitrito in nitrato, sempre con rilascio d'energia. **$2\text{NO}_2^- + \text{O}_2 = 2\text{NO}_3^-$ (+ rilascio d'energia).**

Dunque, alla fine del processo, l'azoto sotto forma di NH_3 o NH_4^+ viene trasformato in NO_3^- , cioè nitrato. Si tratta di un processo AEROBICO perché le reazioni di ossidazione richiedono ossigeno, per cui la nitrificazione è inibita da basse concentrazioni di ossigeno (a differenza della fissazione che avviene in ASSENZA TOTALE DI OSSIGENO), ma anche da pH acido. La reazione complessiva della nitrificazione è la seguente: **$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 = \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ (+ rilascio d'energia).** Tuttavia, in carenza di O_2 , un'ossidazione parziale di NH_4^+ porta alla formazione di intermedi del ciclo dell'azoto: monossido di azoto NO che causa lo smog fotochimico; protossido di azoto N₂O e quest'ultimo è molto dannoso in atmosfera perché è il gas serra più potente al mondo (molto più forte di CO₂ e vapore acqueo) ma è presente in quantità basse; diossido di azoto NO₂ anch'esso pericoloso perché interviene in un altro tipo di inquinamento, ossia le piogge acide.

Alla fine del processo di nitrificazione l'azoto si trova in forma di NO_3^- , nitrato che deve essere assimilato. Ricordiamo che il nitrato può essere assimilato o subire denitrificazione.

ASSIMILAZIONE

Nel caso del nitrato si parla di assimilazione riduttiva perché esso si trova nella forma ossidata, quindi deve essere ridotto prima di essere assimilato; nel caso dell'ammonio, invece si parla soltanto di assimilazione in quanto si trova nella forma già ridotta. L'ammonio ed il nitrato sono le 2 forme d'azoto che vengono assimilate, cioè utilizzate dagli organismi per formare proteine, per costruire biomassa. Lo ione nitrato è la forma principale di azoto per gli organismi vegetali in quanto lo ione ammonio, generalmente è meno disponibile nel suolo perché viene utilizzato dai microrganismi per la nitrificazione (ma anche per altri motivi citati più avanti).

- Se la pianta assimila NO_3^- , questo viene prima ridotto nuovamente ad ammonio con liberazione d'energia, cioè il nitrato è ridotto a NH_4^+ , la forma di azoto che viene attaccata allo scheletro carbonioso del chetoacido per formare AA. Questa tappa prende il nome di **AMINAZIONE**.
- Se l'azoto è presente già sotto forma di ammonio, allora non c'è bisogno di riduzione e viene così direttamente assimilato per produrre AA attraverso

reazioni di **TRANSAMMINAZIONE**. Dagli aminoacidi prodotti mediante aminazione di un chetoacido vengono formati gli altri aminoacidi per transaminazione.

Se la pianta assimila azoto sotto forma di NO_3^- la spesa energetica è maggiore, proprio perché esso deve essere prima ridotto. DOPO ESSERE STATO ASSIMILATO, L'AZOTO E' INCORPORATO NELLA BIOMASSA VEGETALE. Tuttavia, può capitare che i microrganismi chemiosintetici del suolo entrano in competizione con le radici delle piante per quanto concerne l'assorbimento di NO_3^- e NH_4^+ perché questi organismi per il loro metabolismo utilizzano composti inorganici, di conseguenza si verifica il processo di immobilizzazione, cioè i microrganismi, durante la decomposizione, trattengono azoto nella biomassa per averlo come riserva e questo processo di immobilizzazione può rallentare il turnover dell'azoto.

LE PIANTE PREFERISCONO ASSIMILARE L'AZOTO SOTTO FORMA DI NO_3^- ANCHE SE LA SPESA ENERGETICA E' MAGGIORE. Ma perché le piante utilizzano prevalentemente l'azoto nitrico e non l'ammoniacale? Per tre motivi diversi:

1. **Il nitrato ha una maggiore mobilità in quanto l'ammonio è bloccato dalle particelle di argilla:** quest'ultima è formata da un insieme di cariche negative sulla superficie, per cui l'ammonio, essendo carico positivamente, viene attirato dalle cariche negative e di conseguenza è meno mobile di NO_3^- .
2. **Per compensare la minore mobilità dell'ammonio le piante dovrebbero investire molta più energia per la crescita delle radici:** poiché l'ammonio è fissato all'argilla, per prendere l'ammonio dal suolo le piante dovrebbero formare più biomassa radicale e questo comporterebbe ulteriore spesa energetica.
3. **L'ammonio è tossico già a basse concentrazioni.**

DENITRIFICAZIONE²⁴ processo anaerobico

Processo mediante il quale l'azoto viene restituito all'atmosfera: l'azoto presente sotto forma di nitrato ritorna all'atmosfera come N_2 in forma gassosa. Si tratta di un processo ANAEROBIO perché la reazione NON è di ossidazione, bensì di RIDUZIONE, per cui avviene in assenza di ossigeno. Dunque, in condizioni anaerobiche, il nitrato è spesso ridotto a forme volatili di N (N_2 e N_2O) che così ritornano nell'atmosfera e la reazione di riduzione, catalizzata dal complesso enzimatico **nitrato riduttasi**, avviene con liberazione di energia. Tuttavia, nel caso in cui le condizioni per il processo non sono ottimali perché ad esempio il suolo è acido o perché non c'è carenza di ossigeno, allora anche in questo caso si formano composti intermedi come il protossido di azoto. Inoltre, la restituzione dell'azoto in atmosfera è in minima parte legata a fenomeni di volatilizzazione dell'azoto ammoniacale: questo accade nel caso di intensi incendi che determinano il processo di volatilizzazione, quindi bruciando la sostanza organica, questi incendi fanno passare, senza l'aiuto dei batteri, l'azoto bloccato nelle proteine ad azoto volatile (in tal caso le temperature devono essere superiori a 250 gradi). I batteri implicati sono anaerobi gram +, eubatteri chemioautotrofi, eubatteri gram -.

- **FISSAZIONE □ PROCESSO ANAEROBICO**
- **NITRIFICAZIONE □ PROCESSO AEROBICO**
- **DENITRIFICAZIONE □ PROCESSO ANAEROBICO.**

L'UOMO ED IL CICLO DELL'AZOTO

Le attività antropiche alterano il ciclo dell'azoto: basti pensare ai processi di combustione ad opera di automobili ed industrie che liberano una grande quantità, in atmosfera, di monossido di azoto, protossido di azoto ed ammoniaca, per cui alle quantità naturali si sommano quelle antropiche; basti pensare anche agli incendi delle foreste e delle praterie e l'uso di legna da ardere che emettono più di 40 milioni di tonnellate di azoto all'anno, in atmosfera; o all'uso dei fertilizzanti azotati che vengono dati in eccesso agli ecosistemi, e che con le piogge determinano un inquinamento dei corpi idrici. Bisogna ricordare che un aumento di azoto in atmosfera NON come N₂ ma un aumento dei suoi composti può causare danno:

- In troposfera NO catalizza la formazione di smog fotochimico
- In troposfera N₂O è responsabile dell'effetto serra perché ha un potenziale di riscaldamento superiore alla CO₂ ed al vapore acqueo
- Tutti gli ossidi di azoto, indicati come NO_x reagiscono con l'acqua e possono causare le piogge acide, sempre in troposfera.
- In stratosfera il NO₂ catalizza reazioni che distruggono l'ozono O₃, che protegge la Terra dai raggi UV: catalizza la reazione di scissione di O₃ in O₂ + radicale ossigeno. L'ozono presente nella stratosfera è buono perché protegge la terra dai raggi UV, ma se si trova nella troposfera allora è ozono cattivo, cioè è un inquinante secondario, Si parla quindi di ozono negativo e positivo.
- L'aumento dell'immissione di nitrati al suolo come fertilizzanti, dilavati poi in acqua, determinano il fenomeno di eutrofizzazione.

***TROPOSFERA:** è lo strato più basso dell'atmosfera terrestre quello in cui siamo immersi, dove i vari gas hanno la più alta concentrazione. Il suo spessore varia da circa 10 km sopra ai poli a 20 km in prossimità dell'equatore

***STRATOSFERA:** La **stratosfera** è il secondo dei cinque strati in cui è convenzionalmente suddivisa l'**atmosfera** (**troposfera**, **stratosfera**, **mesosfera**, **termosfera** e **esosfera**).

SMOG FOTOCHIMICO: fenomeno generato dalla radiazione solare che, avendo alta energia, va a rompere i legami delle molecole stabili presenti in atmosfera. Lo smog fotochimico, quindi, è un inquinante secondario che si origina a partire da più inquinanti primari: accade che gli ossidi di azoto reagiscono con i composti volatili del carbonio, dando origine ad una serie di reazioni in atmosfera, causando una vera e propria nebbia di colore giallo-arancio-marrone e NON grigio scuro, quindi si tratta di uno smog diverso da quello dovuto al fumo, il quale si evince con una nebbia grigio scura. **Ma come si forma questo smog fotochimico?** I raggi UV danno l'energia necessaria affinché il diossido di azoto possa scindersi in monossido d'azoto ed ossigeno atomico. Quest'ultimo reagisce con l'ossigeno molecolare per formare l'ozono O₃; il diossido di azoto può anche reagire con ossigeno atomico ed idrocarburi per formare **perossiacetile ed aldeidi**, i quali aumentano lo smog fotochimico; ancora, il diossido di azoto reagisce con il vapore acqueo formando **acido nitrico**, che aumenta anch'esso lo smog fotochimico. Dunque, lo smog fotochimico è un inquinante secondario che si forma mediante reazioni di tanti inquinanti primari in atmosfera, grazie ai raggi UV che provengono dal sole. L'unico modo per bloccare questo smog è costruire dei giardini in modo tale che le piante assorbono lo smog, riducendolo per l'uomo.

Ripetizione:

CICLO DELL' AZOTO

Effetti tossici dell'azoto nelle diverse zone dell'atmosfera:

- In troposfera (zona più vicina alla terra) il protossido di azoto è un gas ad effetto serra come la CO₂ e il vapore acqueo.
- In troposfera il monossido di azoto catalizza la formazione dello smog fotochimico
- In troposfera gli ossidi di azoto reagiscono con il vapore acqueo presente in atmosfera dando origine a piogge acide
- In stratosfera (sarebbe un po' più in alto) il biossido di azoto catalizza la reazione di distruzione dello strato di ozono

In acqua, invece, l'aumento di immissione dei nitrati (NO₃⁻, i quali risultano essere la forma disponibile per le piante), causa il fenomeno dell'eutrofizzazione.

Lo **smog fotochimico** è un inquinante secondario dovuto alla reazione chimica di trasformazione di inquinanti primari presenti nell'aria quali gli ossidi di azoto. Lo smog fotochimico non è quello di colore scuro che vediamo nelle grandi città, ma appare di colore giallo-arancio-marrone poiché è causato dall'energia solare che rompe le molecole di inquinante primario presenti in atmosfera. Le radiazioni solari danno quindi l'energia necessaria affinché il biossido di azoto possa scindersi in monossido e ossigeno atomico, il quale reagisce con l'ossigeno molecolare che respiriamo e forma la molecola O₃ di ozono che va a rimpinguare lo smog fotochimico. Inoltre, il biossido di azoto col'ossigeno atomico e gli idrocarburi forma le unità di idrossiacetile e le aldeidi (come la formaldeide) che comunque vanno a rimpinguare lo smog. Infine, il biossido di azoto reagendo con il vapore acqueo dà origine all'acido nitrico che anch'esso alimenta lo smog fotochimico. Quindi lo smog fotochimico è un inquinante secondario che si forma dalla reazione di tanti inquinanti primari presenti in atmosfera (acido nitrico, unità di idrossiacetile, aldeidi e ozono) ed è una miscela molto pericolosa poiché è dannoso sia per gli organismi animali che vegetali. L'unico modo per bloccare questo smog nelle città è costruire giardini urbani affinché le piante possano assorbire lo smog e quindi ridurlo in atmosfera.

CICLO DEL FOSFORO

Il **ciclo del Fosforo** è un ciclo sedimentario poiché il pool di riserva è nelle rocce sedimentarie. Rispetto al ciclo del carbonio e dello zolfo non implica forme gassose, trasformazioni microbiche e cambiamenti nello stato di ossidazione. Il fosfato presente nel suolo deriva dalla reazione meteorica di rocce come l'apatite che ha il fosfato bloccato nei reticoli della roccia stessa. Come fa il suolo a rompere la roccia e far uscire il fosfato? Ci sono fenomeni sia di erosione (ciclo esterno) che biologici. Spesse volte succede che gli essudati radicali producono acidi che in qualche modo riescono a rompere la roccia e liberare fosfato.

Il Fosforo è un **elemento importante** perché è un costituente del DNA, delle membrane plasmatiche e della molecola di ATP.

Il fosforo è importante per l'uomo perché:

- È il componente di ossa e denti (se non c'è fosforo i denti si sfaldano)
- È importante per molte funzioni cerebrali
- Favorisce l'assorbimento di calcio. Senza fosforo il calcio non si assorbe.
- Favorisce anche l'assorbimento di vitamina D
- Facilita la contrazione muscolare

IL CICLO

È un **ciclo semplice**, simile a quello del carbonio, dal momento che non vi sono trasformazioni microbiche, quindi non vi è un ciclo interno. Le piante assorbono fosforo sotto forma di fosfato (PO_4^{3-}) che passa nella catena alimentare e poi, subisce decomposizione. Una volta avvenuta la decomposizione, il fosforo si dirige velocemente nell'acqua, dove le sue concentrazioni sono basse dal momento che il ciclo avviene rapidamente o, talvolta, viene accumulato nei sedimenti. La maggior parte del fosforo viene depositato nelle rocce, che costituiscono un pool di riserva. Dall'alterazione dell'apatite non viene immessa nel ciclo una quantità sufficiente di fosforo e quindi, la decomposizione assume un'importanza centrale: tutto è basato sul riciclo della materia organica.

Il fosforo **talvolta** costituisce un **fattore limitante** e ciò è dovuto alla sua scarsa mobilità e al fatto che è disponibile per le piante solo quando nell'ambiente il pH è circa neutro. Affinché avvenga la liberazione di fosforo dalla materia organica, è necessario l'intervento di complessi enzimatici specifici, quali fosfatasi che vengono liberate dalle radici di alcune piante o da interazioni specifiche, micorrize, ovvero funghi in associazione simbiotica con le radici delle piante. Negli ambienti agricoli il fosforo viene somministrato all'ecosistema sotto forma di fertilizzanti e da qui può confluire anche nei fiumi.

Il fosforo passa sempre da una **forma organica (PO)** ad una **inorganica (Pi)**. La forma inorganica è rilasciata solo come fosfato dopo decomposizione; quella organica, invece, è il fosforo contenuto nelle grandi molecole biologiche (ATP e DNA).

Il fosforo presenta diversi stati di ossidazione: +5, +3, 0, -2 (raro) e -3. Lo stato di ossidazione -3, analogo a quello dell'azoto nell'ammoniaca, è rappresentato dalla **fosfina PH₃**, mentre il -2 dalla **difosfina PH₂PH₂**.

La fosfina e la difosfina sono forme molto rare che esistono in luoghi anaerobi, dove non c'è una decomposizione completa della sostanza organica. Quando la materia organica viene attaccata in carenza di ossigeno la decomposizione (che porta alla formazione di fosfato) non va avanti del tutto e si formano dei composti intermedi, che sono la fosfina e la difosfina. Questi composti non vengono utilizzati dagli organismi ma sono particolari perché danno origine ad un fenomeno particolare: infiammandosi danno origine al fuoco senza fiamma.

FOSFORO E SUOLO

Quasi tutto il P presente nel suolo deriva dall'alterazione di minerali e solo una piccola parte è disponibile per la comunità biotica. Nel suolo è importante il ciclo del fosforo a partire dalla decomposizione, ma si hanno quantità disponibili di fosforo anche dall'escrezione da parte degli animali. Le micorrize (associazione tra il fungo e la radici di alcune piante) hanno grande importanza nell'assorbimento di fosforo perché le ife fungine attaccandosi intorno alla radice della pianta aumentano la superficie di assorbimento della radice.

La disponibilità di fosforo è influenzata dal pH del mezzo e dalla scarsa mobilità di questo elemento

Il fosforo è disponibile a valori di pH del suolo intorno alla neutralità

pH acido → il fosfato forma composti insolubili con *Fe* e *Al*

pH basico → il fosfato forma composti insolubili con il *Ca*

L'UOMO E IL CICLO DEL FOSFORO

L'uomo ha effetti diretti sul ciclo del fosforo estraendo questo elemento da rocce ricche di fosfati per produrre fertilizzanti per l'agricoltura. Se la quantità di nutrienti fornita al suolo è eccessiva, questi, per dilavazione, possono confluire nei fiumi comportando problemi di **eutrofizzazione**.

L'eutrofizzazione è un evento naturale che si origina in aree abbondanti di nutrienti e ciò comporta un sovrasviluppo di produttori primari nel sistema acquatico e quindi, un cambiamento dell'ambiente, creando uno squilibrio nella catena alimentare. In particolare, tale evento si sviluppa in acque poco profonde e con scarso scambio, quali laghi, mari chiusi (Adriatico), etc. dove può avvenire la formazione di manti algali al di sotto dei quali si sviluppano condizioni di anossia e assenza di luce. Anche la decomposizione diventa di tipo anossica, con produzione di CH_4 , che risultando tossico per gli organismi produce ancora un maggiore squilibrio nell'ecosistema.

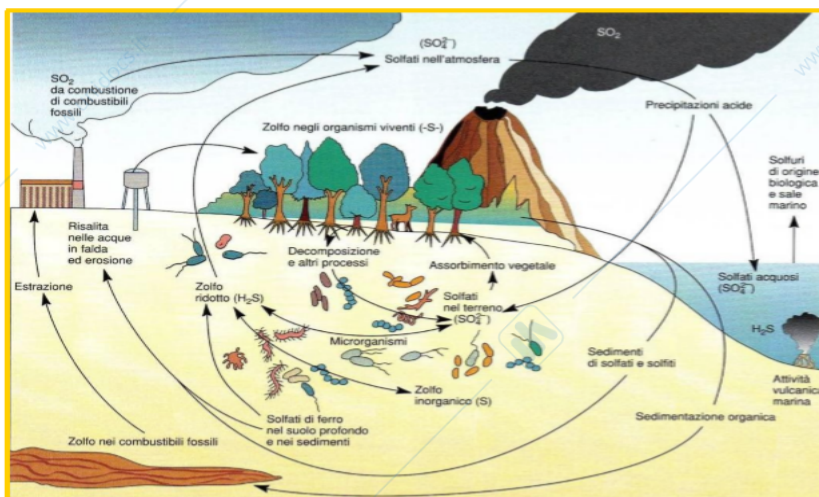
CICLO DELL ZOLFO

Lo zolfo, come l'azoto, è un componente importante della materia organica; tuttavia, contrariamente all'azoto, la quantità di zolfo presente nella biosfera è molto bassa. Il ciclo dello zolfo è un **ciclo di tipo sedimentario**, ovvero il pool di riserva è nelle rocce o in acqua; un'elevata quantità di zolfo vi si ritrova disciolta negli oceani.

Lo zolfo è presente in atmosfera (sotto forma di acido solfidrico H_2S , anidride solforosa SO_2 , dimetil-solfuro DMS e acido solforico H_2SO_4) suolo ed acqua. A questi composti naturali si uniscono le immissioni antropiche.

Nel ciclo dello zolfo possiamo evidenziare tre compartimenti: atmosfera, zona aerobica (sul suolo) e zona anaerobica (nel sottosuolo). In questo caso, in effetti, i processi di produzione sono separati da quelli di decomposizione.

IL CICLO



Lo S è presente in rocce, suoli ed acque. Incorporato negli organismi, compie un ciclo attraverso gli ecosistemi. La combustione di combustibili fossili determina un aumento di composti atmosferici dello S che possono causare piogge acide.

Le piante verdi assorbono lo zolfo sotto forma di solfato (SO_4^{2-}) e lo incorporano in alcuni amminoacidi e proteine sotto forma di ioni solfidrici mediante una riduzione assimilativa.

Lo ione SO_4^{2-} deve essere ridotto prima di essere incorporato in molecole organiche come-SH



La riduzione del solfato è un processo fortemente endoergonico



La riduzione assimilativa dei solfati a solfuri e la successiva sintesi degli aminoacidi solforati è operata dagli organismi vegetali. Il primo composto organico che si forma è la cisteina

Lo zolfo organico entra nelle catene del pascolo e del detrito



Nella catena del detrito i decompositori degradano le proteine ad aminoacidi, dai quali lo zolfo viene liberato come acido solfidrico (H_2S) e ossidato poi a solfato.

Abbiamo quindi immissioni naturali e antropiche dello zolfo, ma spesso volte accade che in atmosfera sono presenti più gas inquinanti che naturali proprio perché aumentando la popolazione c'è necessità di bruciare più combustibili fossili e così si causa uno sbilanciamento dei composti dello zolfo in atmosfera.

C'è un ciclo tra lo zolfo immobilizzato in forma organica (proteine e aminoacidi) e lo zolfo in forma inorganica (come solfato, anidride solforosa o acido solfidrico che viene immesso al suolo come termine di processo di decomposizione). Nel ciclo dello zolfo abbiamo quindi due grandi fasi: una gassosa e una sedimentaria. I maggiori apporti dell'attività umana al ciclo dello zolfo sono dovuti proprio alle industrie.

Abbiamo detto che, in ambiente terrestre, lo zolfo arriva agli organismi vegetali, poi passa agli animali e quant'altro. C'è analogamente un altro ciclo in ambiente acquatico (è chiaro che qui invece delle piante abbiamo le alghe o il plancton). Il solfato, anche in ambiente acquatico, viene preso dagli organismi vegetali, passa attraverso la catena alimentare e alla fine anch'esso verrà decomposto.

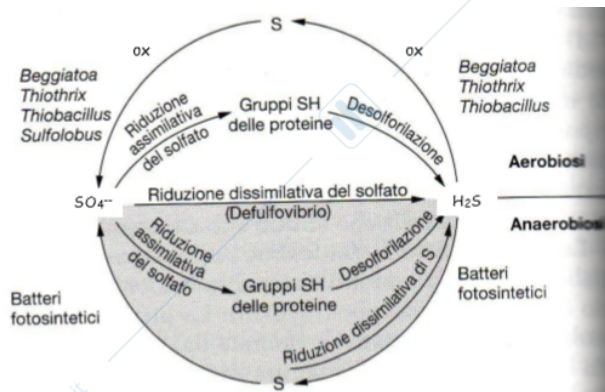
Un composto particolare dello zolfo, che viene prodotto a livello del fitoplancton, è il **dimetilsolfuro (DMS)** che ha il classico odore di salsedine. Quando facciamo una passeggiata sulla battigia, specialmente quando il mare è molto agitato, si sente quell'odore di mare molto caratteristico, quello è il dimetilsolfuro prodotto dagli organismi acquatici.

Abbiamo detto che le piante assumono zolfo come solfato (SO_4^{2-}) che viene incamerato, organico e si formano gli aminoacidi e da questi le proteine. Il solfato, per essere trasformato in -SH, che si attacca poi allo scheletro del chetoacido analogamente all' -NH dell' azoto, deve fare un processo definito **assimilazione riduttiva**. Quindi il solfato arriva al suolo, viene prelevato dalle piante e affinché dallo zolfo si formino aminoacidi e proteine il solfato deve essere ridotto a solfuro tramite un processo definito assimilazione riduttiva.

[SOLFATO \rightleftharpoons SOLFURO \rightleftharpoons AMMINOACIDI \rightleftharpoons PROTEINE]. Alla morte degli organismi autotrofi ed eterotrofi si verifica invece un processo **dissimilativo**, che dalle proteine porta di nuovo alla formazione di solfato e quindi: **PROTEINE \rightleftharpoons AMMINOACIDI \rightleftharpoons SOLFURI \rightleftharpoons SOLFATI**. Il processo di dissimilazione viene fatto dagli organismi decompositori (i batteri decompositori). Succede quindi che i batteri decompositori attaccano le proteine, le quali subiranno un processo di

desolforilazione. Le proteine vengono desolforilate in amminoacidi e il prodotto terminale della decomposizione è l'acido solfidrico (H₂S).

TRASFORMAZIONI MICROBICHE DELLO ZOLFO



Facciamo riferimento all'immagine sovrastante. Il cerchio in figura possiamo dividerlo in 2 parti: abbiamo la parte aerobia di sopra e quella anaerobia di sotto. Questo ciclo inizia mettendo i due punti fondamentali che sono l'acido solfidrico (H₂S) e lo ione solfato (SO₄²⁻). I batteri aerobi dello zolfo sono i **batteri aerobi chemiosintetici** (microorganismi autotrofi in grado di trasformare le reazioni inorganiche per produrre sostanze organiche ed energia chimica). Questi batteri, in aerobiosi, sia in ambiente acquatico che terrestre, possono ossidare l'H₂S prima a S, poi a SO₄²⁻. Il solfato viene poi assimilato, quindi **riduzione assimilativa** del solfato, si formano i gruppi SH delle proteine e poi, tramite il processo di decomposizione, i gruppi SH vengono desolforilati e si forma un'altra volta l'H₂S. I batteri aerobi sono: tiobacillus, sulfolobulus, tiotrix.

Questa è la parte aerobia del ciclo.

Andiamo ora nella seconda parte del cerchio, **la parte anaerobia**. In questa parte del cerchio ritroviamo i batteri anaerobi fotosintetici, i quali effettuano fotosintesi anossigenica: $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{O} + \text{S}_2$.

In questi batteri anaerobi l'acido solfidrico H₂S viene ossidato a zolfo elementare e poi a solfato. A questo punto a livello del suolo abbiamo una grande quantità di solfato, il quale può essere utilizzato sia da organismi aerobi che anaerobi. Anche in questa seconda parte del cerchio vediamo che il solfato viene ridotto nei gruppi SH delle proteine e per desolforilazione questi gruppi SH vengono convertiti in H₂S. Quindi in entrambe le parti del cerchio, sia quella aerobia che quella anaerobia, lo zolfo può essere sia ridotto che ossidato.

Inoltre, vi sono processi particolari, quali la **riduzione disassimilativa** del solfato ad opera di Defulfovibrio, che riduce SO₄²⁻ direttamente ad H₂S; generalmente, tale processo avviene in ambienti acquatici, non particolarmente profondi, ricchi di materia organica, ed in carenza di ossigeno.

Quali sono le forme gassose dello zolfo in atmosfera? Oltre l'SO₂ e l'H₂S abbiamo:

- **DMS** = dimetilsolfuro, prodotto tantissimo negli oceani da parte dei batteri e del fitoplancton poiché questo composto ha una funzione aggregante nei confronti delle particelle di vapore acqueo presenti nell'atmosfera, aiuta quindi la formazione di nubi e la conseguente schermatura dell'atmosfera dalla radiazione solare entrante.
- **DMDS** = dimetildisolfuro
- **CS₂** = solfuro di carbonio

- Il **solfato di carbonile**, molto abbondante in atmosfera che può essere sia di origine naturale che antropica. Quello di origine antropica è molto tossico e persiste in atmosfera dove crea uno strato tra l'atmosfera e il sole ed aumenta l'albedo. Cosa vuol dire? Prendiamo in considerazione un qualsiasi oggetto. Quando arriva la luce dal sole questa arriva perpendicolare, quindi intacca la superficie. La parte che non riesce ad essere intercettata dalla superficie arriva al suolo che la rimette in atmosfera. L'albedo è quella parte che va ad intaccare e viene riemessa in atmosfera. Quindi si può dire che c'è una luce diretta e una riflessa (l'albedo). Il solfato di carbonile altera l'albedo in atmosfera, cioè la luce passa, intacca e poi c'è questo strato di solfato di carbonile che chiaramente riceve la radiazione che deriva dalla superficie terrestre.

INQUINAMENTO DA ZOLFO

Può succedere che con elevate emissioni antropiche si liberano in atmosfera grandi quantità di zolfo, triossidi di azoto e il metano. Una volta che questo zolfo arriva in atmosfera può ricadere sulla terra sotto forma di piogge acide, le quali avranno un effetto sia diretto (bruciando le foglie) che indiretto (perché vanno al suolo, distruggono gli organismi decompositori e bloccano quindi anche la decomposizione).

Alcuni suoli incamerando H₂O₂ si acidificano progressivamente, e in alcuni casi questo comporta la liberazione di una grande quantità di ioni e di metalli pesanti tossici per le piante. Per esempio l'alluminio, catione trivalente, è generalmente bloccato (chelato) nel suolo da altri composti. La pioggia acida in qualche modo può rompere questi composti e liberare l'alluminio che è molto tossico per le piante perché non interviene in nessuna reazione dell'organismo.

L'immissione di zolfo in atmosfera avviene ad opera delle industrie e del traffico veicolare, che immettono zolfo sotto forma di SO₂. Quando gli ossidi di zolfo arrivano in atmosfera reagiscono sempre con il vapore acqueo e si forma l'acido solfidrico che una volta al suolo è ovvio che poi viene scisso in SO₄²⁻ e H⁺ che acidificano il suolo.

Il suolo basico, però, in qualche modo tampona la pioggia acida. Però ci sono anche suoli acidi, in questo caso la pioggia acida lo rende ancora più acido e questo comporta la distruzione delle radici.

Come si forma la pioggia acida?

Le piogge acide sono dovute all'abbassamento del pH (acidificazione) delle precipitazioni, la causa di tale acidificazione viene essenzialmente imputata ad un aumento dell'anidride carbonica, degli ossidi di zolfo (SO_x) e, in parte minore, degli ossidi d'azoto (NO_x), i cui valori possono innalzarsi in atmosfera sia per cause naturali che per effetto delle attività umane; Il processo che porta alla formazione delle piogge acide inizia dalla liberazione in atmosfera di anidride solforosa (SO₂) e biossido di azoto (NO₂); Tali prodotti di combustione vengono convertiti in acido solforico e acido nitrico. L'acido solforico e l'acido nitrico, in concomitanza con un'aumentata concentrazione di acido carbonico dovuta all'aumento di anidride carbonica, acidificano le precipitazioni abbassandone il pH. Questi acidi che si formano cadono a mare e sulla terra ferma e causano estese morie di organismi sia autotrofi che eterotrofi.

Le piogge acide ed il loro progressivo intensificarsi ha delle conseguenze devastanti, non solo per la nostra salute ma anche per la sopravvivenza dell'ecosistema stesso.

I DANNI ALLA SALUTE UMANA. La pioggia acida va ad intaccare e alzare i livelli di tossicità degli alimenti che vengono coltivati: questo ha effetti gravi sulla nostra salute, che possono manifestarsi con patologie circolatorie, problemi respiratori ma anche con forme tumorali, specialmente ai polmoni.

DANNI ALL' AMBIENTE. Naturalmente, anche l'ambiente naturale è esposto ad un alto rischio per via dell'intensificarsi della pioggia acida: questa infatti va ad **intaccare la crescita e le capacità riproduttive delle piante**, riducendole drasticamente.

I DANNI ALLE STRUTTURE. La pioggia acida provoca, a lungo andare, anche gravi danni alle strutture: **l'acido solforico tende infatti a corrodere i materiale accelerandone il decadimento.** Questo vale per la maggior parte dei materiali utilizzati per la costruzione di edifici, compreso il cemento armato.

EFFETTI FITOTOSSICI DELLA SO₂:

Danno acuto: Esposizioni brevi ad elevate concentrazioni. Deriva dalla rapida plasmolisi delle cellule del tessuto a palizzata e lacunoso. Porta a **NECROSI**. Danno **IRREVERSIBILE**.

Danno cronico: Esposizioni per lunghi periodi a concentrazioni moderatamente alte. Porta decremento della produttività, senescenza precoce e **CLOROSI**. Può essere **REVERSIBILE**.

Danno non visibile: Esposizioni a concentrazioni inquinanti relativamente basse. Porta decremento della produttività.



Lolium perenne

ECOLOGIA DELLE POPOLAZIONI



Abbiamo visto come l'organismo si rapporta a vari fattori ecologici, adesso vedremo come l'organismo forma le popolazioni.

L'immagine sovrastante raffigura una popolazione di pinguini. **Una popolazione** è un gruppo di individui di una stessa specie che occupano una data area nel medesimo momento. È importante considerare un medesimo momento perché nel momento in cui vado a considerare una popolazione e faccio il conto degli individui all'istante X, dopo un anno che vedo quella popolazione il conto X potrebbe essere cambiato poiché quella popolazione potrebbe essere aumentata o diminuita. Quindi è importante rapportare la popolazione al momento in cui viene fatto il censimento degli individui che fanno parte di quella popolazione.

Principali caratteristiche di una popolazione:

- **DISPERSIONE SPAZIALE:** distribuzione della popolazione nell'ambiente
- **DIMENSIONE o ABBONDANZA:** numero di individui che compongono la popolazione
- **DISTRIBUZIONE PER ETÀ:** n° o % di individui che compongono le classi di età

Queste tre caratteristiche ci permettono di fornire la carta di identità di una qualsiasi popolazione e quindi capire se una popolazione è ben insediata nel suo ambiente, se c'è una corrispondenza biunivoca, se è ben adattata o se è a rischio di estinzione.

Un habitat è il luogo dove vive una specie. Per le popolazioni questo discorso è un po' più complicato perché ci sono momenti dell'anno in cui la popolazione si sposta: gli individui nascono in un certo tipo di habitat ma si muovono da questo ad esempio per cercare cibo, per poi ritornare, in alcuni casi, nell' habitat di appartenenza. Quindi, se una popolazione nell' arco di vita si muove tantissimo in un territorio, qual è l'habitat di questa popolazione? Quando parliamo di popolazione, infatti, non parliamo di habitat ma di un insieme di habitat. **Si dice che una popolazione occupa un'areale, ha un'areale di distribuzione.** I confini di questo areale dipendono dalle condizioni di temperatura e dalla presenza di condizioni idonee per una determinata specie.

La popolazione quindi è un insieme di una stessa specie che convive simultaneamente in un'area geografica ed ecologica (areale).

La distribuzione di una popolazione include tutte le aree che i suoi membri occupano durante il loro ciclo biologico.

Facciamo un esempio. Come si fa a definire l'habitat degli uccelli migratori? È impossibile, poiché dobbiamo tenere conto di tutta la rotta migratoria di questi animali. L'immagine seguente mostra una vasta area geografica (America settentrionale e America latina) e gli uccelli migratori *Pluvialis dominica* e *Dendroica fusca*. Per poter definire l'habitat di queste specie devo tener conto di dove migrano e dove vanno a rifugiarsi e questo mi aumenta la reale distribuzione. La reale distribuzione tiene quindi conto di diverse aree, le quali non sono occupate sedentariamente poiché queste aree possono essere a volte occupate e a volte no. Quindi possiamo dire che l'areale è un puzzle di aree occupate e non occupate che tiene conto delle esigenze della popolazione presa in considerazione.



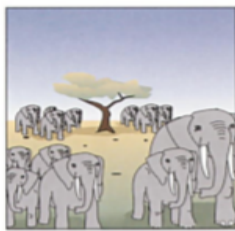
L'immagine sottostante mette in evidenza l'areale di una specie vegetale: l'acero da zucchero. Questo areale è ben definito da diversi fattori ecologici: si interrompe ad est per l'Oceano Atlantico e ad ovest per le basse precipitazioni. A nord è limitato dalle basse temperature invernali ed a sud dalle estati calde.



Spesso capita che, in diverse zone del mondo, abbiamo specie simili e si creano delle condizioni acciò esistano i così detti **ecotipi**. Un ecotipo o razza ecologica è una popolazione di organismi che è adattata localmente. Gli ecotipi sono quindi delle popolazioni differenziate dal punto di vista genetico e sono accumulate da un habitat specifico. Un esempio di ecotipo è l'ulivo.

LA DISPERSIONE SPAZIALE

Dispersione spaziale: come può essere distribuita una popolazione in una certa area. La distribuzione di una popolazione può essere raggruppata (o aggregata), uniforme o casuale.



Raggruppata



Uniforme

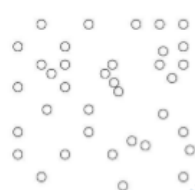
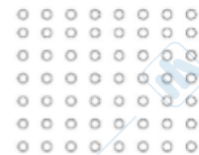


Casuale

Nell'immagine sovrastante vediamo diverse popolazioni e notiamo come queste siano disposte diversamente nello spazio. Per la popolazione degli elefanti vediamo come questi formano gruppetti sparsi, c'è quindi qualcosa che spinge queste popolazioni ad aggregarsi in qualche modo. La popolazione degli elefanti non è distribuita uniformemente ma in maniera aggregata. Facendo riferimento alla foto centrale, vediamo come la popolazione degli arbusti invece è disposta come i scacchi di una scacchiera. Nella terza foto invece la distribuzione è totalmente casuale, ci sono quindi forze per cui la popolazione si distribuisce in maniera casuale.

L'allontanamento degli animali avviene tramite i movimenti degli organismi, che possono essere **attivi** (movimento degli animali) o **passivi** (tramite pioggia, vento etc). **La distribuzione è generalmente associata alla presenza o assenza di risorse, o alla territorialità.**

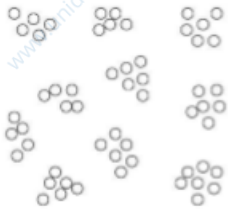
La distribuzione uniforme si origina da **interazioni dirette tra gli individui** ed il mantenimento di una distanza minima tra ciascun individuo determina una spaziatura uniforme (es. colonie di uccelli marini, piante). Le sule difendono il territorio che si trova alla distanza alla quale arriva il loro becco per proteggere la loro prole



La distribuzione casuale è dovuta al fatto che gli individui, **in assenza di attrazioni e antagonismi**, non hanno necessariamente una territorialità. E' più legata alle risorse che al territorio. Le piante, ad esempio, si dispongono in base alla disponibilità idrica.

La competizione per le risorse e l'antagonismo diretto sono i due modi attraverso cui gli organismi si **isolano**, occupando l'ambiente secondo distribuzioni casuali o uniformi. Vertebrati e invertebrati superiori svolgono le proprie attività in un'area chiamata **home range**. Se quest'area risulta protetta, essa prende il nome di **territorio**. **Isolamento, territorialità e aggregazione** sono legati alle risorse che più scarseggiano, dunque sono importanti per quelle specie che sfruttano l'energia residua dell'ecosistema, quindi le specie terminali, gli organismi che hanno nicchie ecologiche altamente specializzate (specialisti) e gli organismi che vivono in ambienti estremi.). In alcuni animali, l'isolamento e la territorialità sono presenti soltanto in alcune fasi del loro ciclo vitale o riproduttivo. Il rinoceronte bianco difende la propria "arena" nella quale non possono entrare altri maschi riproduttivamente attivi soltanto nel suo periodo riproduttivo; il puma è territoriale nel periodo invernale, quando le risorse sono scarse; il leone marino difende il proprio harem durante gli accoppiamenti.

Esistono specie che non prediligono l'isolamento, ma preferiscono **una distribuzione aggregata**, in cui gli individui sono aggregati in gruppi discreti. **Questo è dovuto** sia alle risorse, sia alla struttura gerarchica di alcune specie (gli uccelli che vivono in gruppi) e sia al fatto che spesso la prole non è in grado di allontanarsi dal proprio genitore (ad esempio, non sempre i semi sono portati lontano dalla pianta madre). **Non sempre il fatto di vivere in associazioni può dare vantaggi** perché c'è maggiore competizione per cibo e spazio, c'è più diffusione delle malattie e c'è l'uccisione, in alcuni casi, della prole di organismi dello stesso gruppo.



Il grado di aggregazione generalmente incide sull'accrescimento della popolazione. Per il **principio di Allee**, esso cambia da specie a specie e in base alle condizioni. Per questo motivo, sia il sovraffollamento, sia il sotto affollamento, possono essere deleteri e limitanti (suicidio di massa dei lemmings).

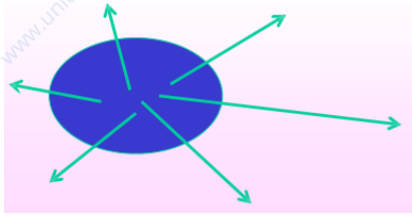
Le aggregazioni aumentano le probabilità di sopravvivenza delle popolazioni (principio di Allee) poiché conferiscono:

- Una difesa dai predatori
- Un aumento della capacità di trovare le risorse
- Una migliore capacità riproduttiva e di difesa della prole

Condizioni necessarie all'aggregazione:

- Grande disponibilità di fonti energetiche (nutrienti, pascolo, prede)
- Concentrazione delle risorse in spazi circoscritti perché se la risorsa è concentrata in una vasta area geografica ognuno se ne va per conto suo e non si aggrega più.

Un tipo particolare di aggregazione è noto come **RIPARO**. Il riparo è tipico di grossi gruppi di animali socialmente organizzati. Essi stabiliscono una sede centrale da cui si disperdono ed a cui tornano regolarmente per soddisfare le loro necessità. Un po' come i nostri animali domestici; se noi lasciamo un gatto domestico libero in una casa di campagna, questo esce anche dalla casa, ma stiamo pur certi che quando avrà fame per lui sarà molto più semplice tornare all'interno piuttosto che andare a caccia di lucertole o quello che trovano (quindi quello è il suo riparo). Un'altra forma di riparo sono le tane. Animali che hanno la tana sono ad esempio i lupacchiotti, i ricci, gli orsacchiotti, la marmotta etc. Per queste specie la tana vale specialmente per gli adulti poiché i cuccioli restano al riparo non avendo l'età per affrontare il mondo esterno.



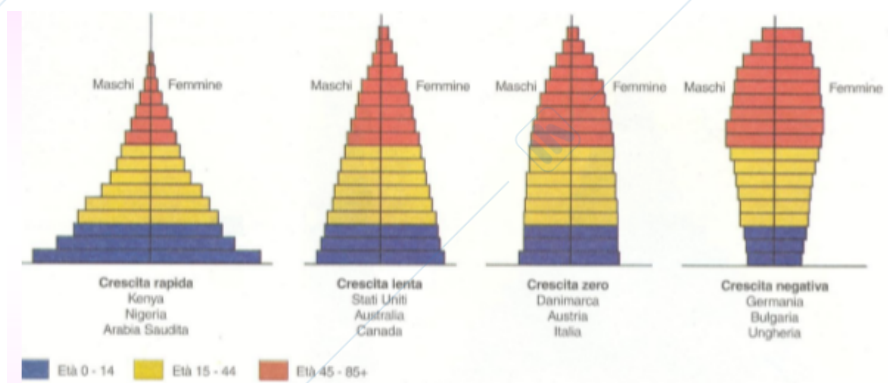
Vediamo ora la seconda caratteristica di una popolazione:

LA DISTRIBUZIONE PER ETÀ DI UNA POPOLAZIONE.

Generalmente è possibile distinguere classi di età e vedere percentualmente il numero di individui che ci sono per ciascuna classe. Le classi da prendere in considerazione sono: pre-riproduttiva, riproduttiva e post-riproduttiva. E' possibile rappresentare questa distribuzione per età con delle piramidi. Le popolazioni in rapida espansione hanno più individui giovani e quindi le piramidi avranno una base larga. Le popolazioni stazionarie hanno una distribuzione più uniforme, non vi è una grande differenza tra la base e la punta della piramide. Le popolazioni in declino hanno più individui vecchi e quindi la base della piramide è meno ampia.

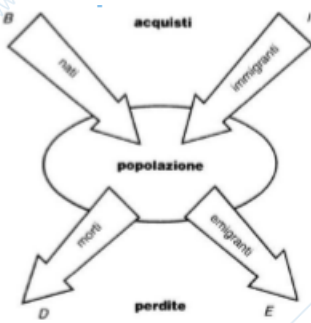


Generalmente ogni piramide di età può essere divisa, da un asse divisorio, in 2 parti, considerando la parte dei maschi e la parte delle femmine. Quindi in ogni popolazione abbiamo diverse fasce di età e chiaramente diverso sesso (maschi e femmine). La base della piramide ci dice quanto la popolazione è in rapida espansione. Facendo riferimento all'immagine seguente, possiamo osservare che, per quanto riguarda Arabia Saudita, Nigeria e Guatemala la crescita è in **rapida espansione** (vediamo la base come è larga). Se invece mi sposto verso Stati Uniti la **crescita è lenta** (base più stretta). In Austria, Italia e Danimarca la base è uguale nel primo e secondo step e questo indica che la **crescita è zero**. In Germania, Bulgaria e Ungheria la **crescita è negativa** poiché la base è più stretta e quindi gli individui che possono procreare sono ancora meno. Crescita zero e crescita negativa sono popolazioni che non promettono niente di buono in quanto espansione.



La terza caratteristica di una popolazione è:

L'ABBONDANZA



Abbondanza o dimensione di una popolazione: il numero di individui di una popolazione. Le variazioni che influiscono sulla dinamica delle popolazioni sono principalmente la natalità, la mortalità, l'immigrazione e l'emigrazione. Quindi, in virtù delle "entrate" (natalità e immigrazione) e "uscite" (emigrazione e mortalità) la popolazione avrà un certo numero.

La popolazione è estremamente dinamica e l'uomo può controllare le popolazioni, questo è quello che attivamente accade. Spesse volte si riducono le popolazioni nocive, come quelle degli insetti, e si aumentano le popolazioni di specie che sono utili ai fabbisogni umani.

La densità di popolazione, quindi, non è costante ma è come un ago della bilancia che oscilla intorno un posizione di equilibrio: ci sono fattori che lo spostano verso l'aumento e fattori che lo spostano verso il declino. **Il potenziale biotico di una popolazione** si può definire come la capacità di una popolazione di crescere se nessun fattore ne limita la crescita; in natura questo non esiste perché c'è sempre qualcosa che limita la crescita di popolazione, altrimenti saremo sempre in sovrappopolamento. L'uomo non si può considerare proprio uguale agli altri organismi del pianeta perché se un animale in natura contrae una malattia spesso volte è spacciato perché è più suscettibile all'attacco dei predatori. Se è invece l'uomo a contrarre una malattia, grave o meno grave che sia, ci sono, nella maggior parte dei casi, delle cure che gli migliorano la vita.

Tra i fattori che determinano un aumento della densità di popolazione ci sono:

- La luce favorevole
- La temperatura favorevole
- Ambiente chimico favorevole (ambiente ottimale dei nutrienti chimici)

I fattori che invece fanno decrescere la popolazione sono:

- Luce troppa o troppo poca
- Temperatura troppo alta o troppo bassa
- Ambiente chimico non favorevole

I fattori biotici (quelli che non dipendono dall'ambiente abiotico ma solo dall'interazione tra gli organismi della popolazione) **che fanno crescere la popolazione sono:**

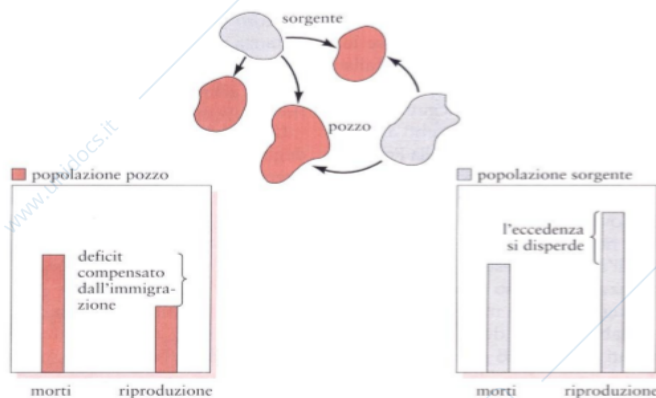
- Tasso riproduttivo elevato
- Nicchia generalizzata e non specializzata. Facciamo un esempio: tra una popolazione di cavalli e una popolazione di koala la più avvantaggiata, se si distrugge l'habitat, è quella dei cavalli perché il cavallo è molto più generalista (se il suo habitat viene distrutto può andare in altre parti e riprodursi).
- Approvvigionamento di cibo adeguati
- Habitat appropriato
- Adattamento alla competizione per le risorse
- Adattamento al mimetismo o alla difesa dei predatori
- Resistenza alle malattie e ai parassiti
- Capacità di migrazione e di sopravvivenza in habitat diversi
- Adattabilità ai cambiamenti ambientali

CONCETTO DI METAPOPOLAZIONE

Abbiamo detto che **una popolazione** è l'insieme di individui di una stessa specie che occupano simultaneamente uno stesso luogo in uno stesso tempo. Una popolazione particolare è la **metapopolazione**, costituita da sub-popolazioni, della stesse specie, separate tra loro da barriere fisiche o ecologiche ma comunque connesse le une alle altre. Queste sub-popolazioni sono connesse tra loro da flussi migratori poiché ciascun individuo può muoversi da una popolazione ad un'altra.

All'interno di ciascuna sub-popolazione (chiazza) gli individui nascono, migrano e muoiono, per cui le chiazze non hanno mai sempre lo stesso numero di individui. Quindi, la dinamica di ciascuna chiazza è mantenuta da natalità, mortalità e migrazioni, mentre invece tra due chiazze diverse sono i flussi migratori che fanno la differenza. Spesso capita che quando una chiazza è più affollata, gli individui di questa chiazza si spostano verso chiazze più affollate per avere più risorse.

Ogni metapopolazione persiste nel tempo attraverso fenomeni di migrazione: quando le risorse di una popolazione si esauriscono, alcuni individui da una zona migrano in un'altra e viceversa. In virtù di questo equilibrio sussiste la metapopolazione. Nella metapopolazione c'è il **modello a pozzo-sorgente** che spiega come la metapopolazione riesce a mantenersi in vita. Questo modello prevede che ci sono **popolazioni pozzo** e **popolazioni sorgente**. Le popolazioni sorgente hanno un eccesso di organismi (sono più affollate) che si disperdono e che vanno nella popolazione pozzo dove ci sono meno organismi che si riproducono. Quindi in tutte le metapopolazioni abbiamo pozzo e sorgente e generalmente è la sorgente che lascia la chiazza più affollata per spostarsi nella popolazione pozzo meno affollata che si compensa con l'immigrazione. Es: La cinciarella (*Parus caeruleus*) presenta popolazioni sorgente nei boschi di roverella e popolazioni pozzo nei boschi di leccio. Quando i boschi di leccio cominceranno ad avere tanti rami le popolazioni si sposteranno nuovamente nella roverella e così via.



DINAMICA DI CRESCITA DELLE POPOLAZIONI

Abbiamo detto che per fare la carta di identità di una popolazione servono la distribuzione spaziale, la distribuzione per età e il numero di individui. La dinamica di crescita delle popolazioni fa parte sempre del terzo blocco (numero di individui).

I fattori che determinano la dinamica di una popolazione (e cioè il fatto che un popolazione non è mai stazionaria, ma si muove nel tempo) **sono:**

- Il valore adattativo (capacità di in una popolazione di attarsi),
- Il successo riproduttivo (fitness)
- La persistenza (quante volte un organismo che fa tanti figli è capace di fare tanti figli. Nel senso che se una popolazione procrea tanto e lo fa soltanto in un

anno e poi per dieci anni non procrea più, non è persistente. La persistenza è quando una popolazione procrea molto e lo fa per lunghi intervalli di tempo perché questo assicura che quella popolazione crescerà tantissimo e quindi avrà più successo adattativo).

Invece, i fattori di crescita o decremento sono:

- Migrazione,
- Densità di popolazione
- Natalità
- Mortalità
- Sopravvivenza

Quindi nella dinamica di popolazione rientrano sia le caratteristiche genetiche che i fattori di crescita veri e propri.

Fattori di crescita o decremento di popolazioni: MIGRAZIONE

La migrazione è un movimento direzionale di massa di un grande numero di individui di una specie da una località ad un'altra e questo dipende dalla disponibilità delle risorse, dal clima, se hanno o meno riparo etc.

Nella maggior parte degli uccelli canori migratori, i maschi arrivano sul territorio di nidificazione prima delle femmine e devolvono gran parte del loro tempo a far notare la loro presenza nel territorio con forti suoni. Molti uccelli, pesci e rettili hanno testa, corpo particolari appendici da poter ostentare per intimidire gli intrusi.

Fattori di crescita o decremento di popolazioni: DENSITÀ

La densità di una popolazione è la dimensione della popolazione in relazione all'unità di spazio:

$$\frac{\text{n° di individui o biomassa}}{\text{unità di superficie (m, ha, ecc.)}}$$

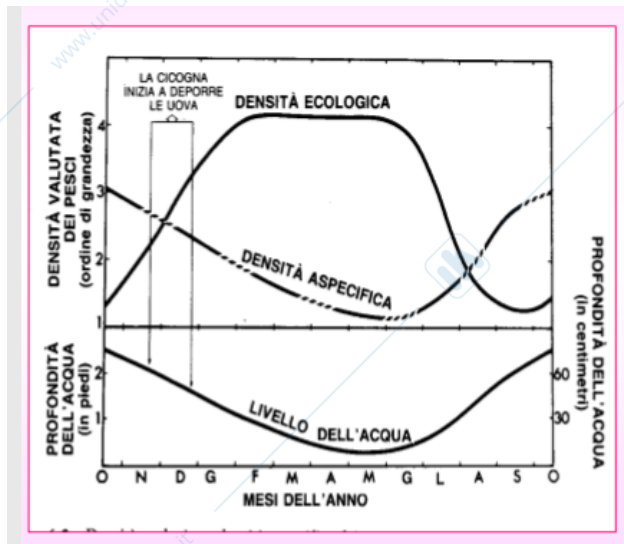
$$\frac{\text{n° di individui o biomassa}}{\text{unità di volume (m}^3\text{)}}$$

Si distinguono due tipologie di densità:

- **Densità aspecifica** = numero o biomassa per unità di area totale.
- **Densità specifica o ecologica** = numero o biomassa per unità di habitat (area o volume disponibile per la colonizzazione da parte della popolazione). Questa è la densità che ci interessa.

Esempio: consideriamo l'aula dove seguiamo le lezioni. L'aula può essere colonizzata, quindi se io faccio numero di individui (per esempio noi studenti) per unità di superficie io prendo tutta l'aula però se io dico che ci sono posti in cui ragazzi non ci sono è vero, perché dove sta il professore non c'è lo studente (gli studenti colonizzano dove ci sono le sedie). Quindi, volendo fare un paragone c'è un'area totale che è tutta l'aula ma effettivamente gli studenti non occupano tutta l'area ma occupano solo i posti destinati agli studenti e quindi un'area più piccola rispetto a tutta l'area della stanza (numero per unità di area totale). Ma la realtà che noi troviamo durante una lezione (densità specifica o ecologica) è il numero di individui per unità colonizzabile poiché è certo che lo studente non si siede a terra.

Densità ecologica e densità aspecifica dei pesci in rapporto ai mesi dell'anno.



Facciamo riferimento al grafico accanto. Se considero i diversi mesi dell'anno ho una situazione, all'interno dell'ambiente che sto considerando, in cui il livello dell'acqua scende. Il livello dell'acqua è massimo nei mesi ottobre-novembre-dicembre-gennaio e, per qualche motivo scende nel periodo febbraio-marzo-aprile. Gli organismi potenzialmente potrebbero colonizzare tutta l'acqua, ma quando il livello dell'acqua scende, si addensano solo nei punti in cui l'acqua c'è ancora. Questo significa che, se in inverno il livello dell'acqua scende, il numero di pesci per area totale diminuisce, perché diminuisce il numero di pozze d'acqua e quindi avremo un addensamento di

popolazione nelle poche zone di acqua disponibili, dunque la densità ecologica aumenta.

Spesse volte i predatori nidificano proprio quando la densità ecologica aumenta, questo è il caso della cicogna che depone le uova proprio quando le pozze d'acqua si riducono ed è più facile per la cicogna cacciare in quelle poche pozze d'acqua i tanti pesci che devono per forza vivere lì dentro perché altrimenti muoiono.

Fattori di crescita o decremento di popolazioni: NATALITÀ

La natalità è la capacità di una popolazione di accrescersi per produzione di nuovi individui. Anche in questo caso facciamo la distinzione tra la natalità aspecifica e natalità specifica o ecologica. **La natalità aspecifica** viene espressa come rapporto fra numero di individui prodotti ed unità di tempo. **La natalità specifica o ecologica** è invece indicata come il rapporto fra il numero di nati per unità di tempo per unità di popolazione. Considerare quanti individui nascono per unità di popolazione è molto importante. Facciamo un esempio: se ho una popolazione che produce 1000 individui, io dico che quella popolazione produce 1000 individui senza dare nessun'altra informazione. Con una seconda definizione dico invece che una popolazione produce 1000 individui in 100 anni e un'altra 1000 individui in 5. Chiaramente la popolazione che cresce di più è quella che produce 1000 individui in 5 anni. Da questo capiamo come è importante l'unità di popolazione, perché la prima definizione è troppo generica.

Nel caso degli individui che nascono possiamo avere:

- **Una natalità massima teorica:** produzione di individui quando le condizioni dell'habitat non sono limitanti. Questo valore è costante per ogni popolazione.
- **Una natalità ecologica o realizzata:** nascita di individui in condizioni reali.

Una popolazione potrebbe avere moltissimi individui che potenzialmente potrebbero nascere, bisogna però fare una distinzione da quelli che realmente nascono.

Chiaramente una popolazione per crescere deve avere un numero di individui che nasce maggiore di quelli che muoiono, altrimenti si ha tasso di crescita zero.

Fattori di crescita o decremento di popolazioni: MORTALITÀ

Mortalità: morte di individui in una popolazione. Anche in questo caso faccio la differenza tra:

MORTALITÀ ASPECIFICA

n° di individui morti

unità di tempo

MORTALITÀ SPECIFICA

n° di individui morti

unità di popolazione totale

È esattamente lo stesso discorso che abbiamo fatto per la natalità.

Come per la natalità, anche per la mortalità definiamo:

Minimo teorico di mortalità

n° di morti in condizioni non limitanti (è una K). In condizioni ideali si muore di vecchiaia

Mortalità ecologica o realizzata

perdita di individui in una data condizione ambientale (non K)

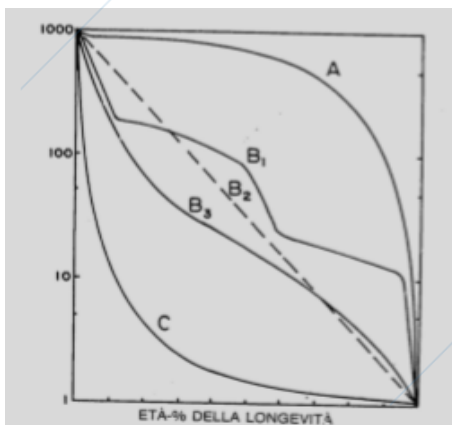
Spesso non si parla di popolazione come quanti morti, ma si parla di popolazione come quanti ne sopravvivono, quindi **il tasso di mortalità m** ha un suo reciproco che è il **tasso di sopravvivenza 1/m**. Generalmente si considera il tasso di sopravvivenza. Le tabelle di vita, che vengono costruite in base al tasso di sopravvivenza, forniscono un quadro completo di quanto una popolazione può sopravvivere e quanti numeri di nati e di morti ha.

Questa è una tipica tabella di sopravvivenza della pecora di montagna (Ovis d. dalli):

Età (in anni)	Età come deviazione percentuale dell'età media	N° di individui su mille nati che muoiono in un dato intervallo di età	N° di individui su mille nati che sopravvivono all'inizio di un dato intervallo di età	Probabilità di morte per mille individui vivi all'inizio di un dato intervallo di età	Vita media degli individui che raggiungono un dato intervallo di età (anni)
x	x'	d_x	l_x	$1000q_x$	e_x
0 - 0,5	-100	54	1000	54,0	7,06
0,5- 1	- 93,0	145	946	153,0	-
1 - 2	- 85,9	12	801	15,0	7,7
2 - 3	- 71,8	13	789	16,5	6,8
3 - 4	- 57,7	12	776	15,5	5,9
4 - 5	- 43,5	30	764	39,3	5,0
5 - 6	- 29,5	46	734	62,6	4,2
6 - 7	- 15,4	48	688	69,9	3,4
7 - 8	- 1,1	69	640	108,0	2,6
8 - 9	+ 13,0	132	571	231,0	1,9
9 - 10	+ 27,0	187	439	426,0	1,3
10 - 11	+ 41,0	156	252	619,0	0,9
11 - 12	+ 55,0	90	96	937,0	0,6
12 - 13	+ 69,0	3	6	500,0	1,2
13 - 14	+ 84,0	3	3	1000	0,7

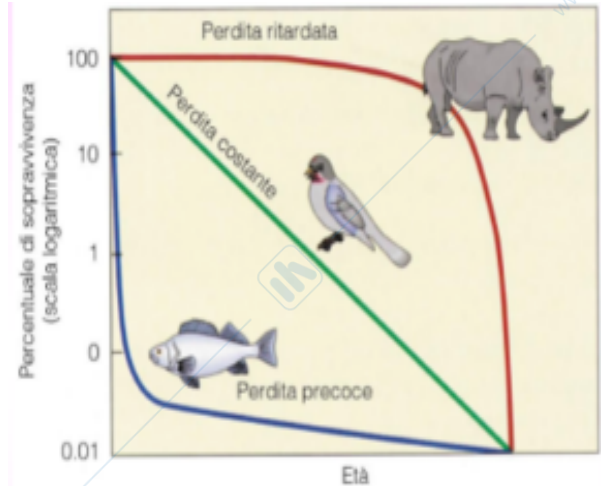
Le tabelle di vita servono per ricavare le **CURVE DI SOPRAVVIVENZA**.

Facciamo riferimento all' immagine accanto. **Come si costruisce una curva di sopravvivenza?** Sull' asse delle x poniamo l' età della specie e su quello dello y la percentuale di sopravvivenza 1/m in scala logaritmica. La scala logaritmica mi da la possibilità di confrontare popolazioni che hanno tantissimi individui e quelle che ne hanno pochissimi.



Le curve di sopravvivenza sono di 3 tipi:

- **PERDITA RITARDATA:** Curva di sopravvivenza convessa per popolazioni del TIPO I (es. rinoceronte). C'è un'elevata sopravvivenza fino ad una certa età, poi inizia la mortalità in maniera molto consistente. Questo è dovuto al fatto che queste popolazioni hanno molte cure parentali e quindi aspettano che il cucciolo diventi adulto, gli insegnano a cacciare e a sopravvivere affinché possa avere molte chance di sopravvivenza.
- **PERDITA COSTANTE:** Curva di sopravvivenza per popolazioni del TIPO II (es. piccione). Tali uccelli hanno un tasso di mortalità abbastanza costante a tutte le età e questo è dovuto sempre alle cure parentali.
- **PERDITA PRECOCE:** Curva di sopravvivenza concava per popolazioni del TIPO III (es. pesci). In tali popolazioni la sopravvivenza è molto bassa nelle prime fasi di vita. Queste popolazioni non hanno cure parentali, ecco perché sono spesso associate ad un tipo di fecondazione esterna (in questo caso la femmina rilascia molte uova in acqua che verranno poi fecondate, non tutte, dal maschio che passerà). Per la mancanza di cure parentali le chance di sopravvivenza sono molto basse.



La curva di tipo III è tipica di pesci, di protisti e di popolazioni che non curano molto i figli però ne fanno tanti. Per questo motivo la densità di popolazione di queste popolazioni è molto elevata: ad esempio la femmina del pesce pagliaccio depone, in una sola volta, anche più di 3000 uova a differenza del mammifero che, nella maggior parte dei casi, fa un cucciolo alla volta.

La maggior parte delle popolazioni animali e protisti hanno curve di sopravvivenza del tipo II e del tipo III

Le curve di sopravvivenza non devono essere assolutamente confuse **CON LE CURVE DI ACCRESCIMENTO.**

Ora vediamo come varia l'accrescimento di una popolazione nel tempo. **Le curve di accrescimento sono di 2 tipi.** Prima di parlare di curve di accrescimento dobbiamo fare una premessa: una popolazione è un'entità in continuo cambiamento. Anche quando l'ecosistema apparentemente non si modifica, abbiamo una popolazione che è un'entità dinamica. È dinamica perché ci sono i nati, i morti, immigrati e emigranti. In natura quindi la dimensione di una popolazione subisce delle fluttuazioni perché cambia il cibo, le interazioni (il rapporto tra i vari individui), lo spazio etc. Generalmente, il cambiamento di una popolazione è dettato da **fattori densità dipendenti** e **fattori densità indipendenti**, cioè **una popolazione può crescere o in una maniera che si definisce densità dipendente o in una che si definisce densità indipendente.**

Quando consideriamo i fattori densità dipendenti consideriamo i fattori che dipendono dalle interazioni tra gli organismi: la predazione, il parassitismo e la competizione per lo spazio e per il cibo. Mentre invece, abbiamo un'altra serie di fattori (caldo, freddo, la siccità, le eruzioni vulcaniche) che non sono legati alle interazioni tra gli individui ma hanno un effetto densità indipendente.

Non sempre i fattori densità dipendenti e indipendenti hanno lo stesso peso su una popolazione. Generalmente, negli ecosistemi semplici soggetti a forti perturbazioni

(ecosistemi non stabili), prevalgono i fattori densità indipendenti nella dinamica di una popolazione e quindi fuoco, eruzioni vulcaniche, temporali etc. Quando l'ecosistema cambia in continuazione le popolazioni seguono un tipo di accrescimento che si chiama accrescimento esponenziale.



La curva mostrata in figura accanto può essere definita in 3 modi diversi: **curva densità indipendente**, **curva j** (perché ha la forma di una j) o **curva esponenziale** (poiché descritta da un'equazione esponenziale).

Come si descrive questa curva? Sull'asse delle x poniamo il tempo poiché voglio vedere come quella popolazione sta cambiando nel tempo; sull'asse delle y, invece, mettiamo il numero di popolazione. L'equazione che descrive questa dinamica è:

$$dN/dt = rN$$

dN/dt è il numero di popolazione che cambia nel tempo (è una derivata); r è una costante detta tasso intrinseco di accrescimento della popolazione in condizioni ottimali (tasso di natalità- tasso di mortalità. Ovviamente affinché una popolazione cresca il tasso di natalità deve essere maggiore di quello di mortalità, se i due tassi sono uguali la costante è uguale a zero) e N è uguale al numero di individui all'istante t .

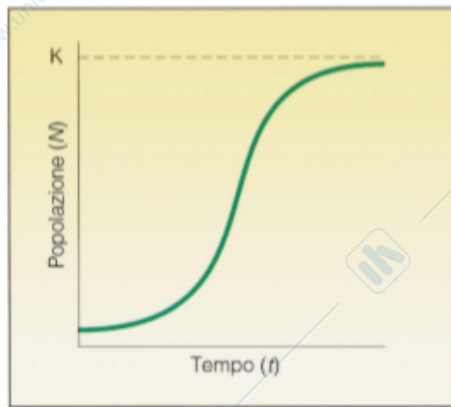
Questa crescita qui, come possiamo vedere anche dal grafico, è esponenziale poiché va verso l'infinito, non finisce mai, **è una crescita in cui la popolazione cresce a dismisura**. Ma questo è possibile che avvenga in natura? Queste popolazioni a crescita esponenziale ci sono però non si ha mai una crescita infinita perché ad un certo punto della crescita verrà a mancare qualche risorsa e la popolazione crollerà a zero. La popolazione crolla a zero quando avviene **una resistenza ambientale** (fattore abiotico non favorevole).

Questa curva a crescita esponenziale è tipica di alcuni insetti, come gli scarafaggi.



La figura a lato mostra una cucina lasciata sporca dopo l'estate. La riproduzione offre a molti organismi il potenziale per espandere le loro popolazioni in modo esplosivo. Gli scarafaggi presenti nella cucina in figura potrebbero aver raggiunto questa densità in poche generazioni. Una singola femmina di scarafaggio può depositare ottanta uova ogni sei mesi. In questi casi l'unica soluzione è la fiamma ossidrica.

Quando si verifica in natura una crescita esponenziale? Le popolazioni possono subire una crescita esponenziale quando vengono introdotte o quando colonizzano habitat precedentemente non occupati dove trovano condizioni ambientali favorevoli. Ma nessuna popolazione reale può mantenere una crescita esponenziale per un tempo prolungato, l'ambiente infatti esercita una pressione negativa. In natura, quindi, i fattori ecologici limitanti e le interazioni tra i diversi organismi portano la popolazione ad autoregolarsi. **Di conseguenza non abbiamo curve esponenziali, ma curve logistiche.**



(b) Crescita logistica

La figura accanto mostra una curva logistica, definita anche come **curva densità dipendente** (perché dipende dalla densità di popolazione) o **curva S** (perché ha la forma di una S).

La situazione in questo caso è più complessa di quella precedente poiché questa curva, se vediamo, non è altro che una curva esponenziale che non crolla a zero ma si assesta intorno ad un valore di equilibrio. Sull'asse delle x poniamo il tempo e su quello delle y la densità di popolazione. L'equazione della curva è:

$$\frac{dN}{dt} = rN (1 - N/K)$$

Come possiamo notare, questa equazione, che descrive una curva logistica, è uguale all'equazione che descrive invece una curva esponenziale, però c'è un fattore in più $(1 - N/K)$ dove N indica il n° di organismi nella popolazione all'istante t e K , invece, è l'asintoto superiore di questa curva, cioè è il numero massimo di individui che quella popolazione può contenere in base all'habitat, **K esprime quindi la capacità massima portante dell'habitat.**

Nella realtà, quindi, la curva di accrescimento non è esponenziale, o meglio è esponenziale per pochissimo tempo perché poi diventa logistica. Il valore k è un numero che ci dice la capacità massima di organismi presenti all'interno di quella popolazione in base alle risorse dell'habitat che viene mantenuto dalla densità di popolazione. Cioè questo k è mantenuto o da un abbassamento di natalità o da un aumento di mortalità.

Se aumenta la mortalità la curva scende un po' al di sotto dell'asintoto, se aumenta la natalità, invece, sale al di sopra dell'asintoto. Se viene superata la capacità portante, l'individuo è morto e quella curva avrà un andamento a zero, cioè crollerà a zero (la popolazione non è più in grado di esistere). Se viene superata la capacità portante dell'habitat, la popolazione è destinata al crollo istantaneo. Quindi k in questa curva è la capacità portante, il numero massimo di organismi che un habitat può contenere. Dal punto di vista matematico, **la curva esponenziale in verde è descritta dall'equazione $dN/dt = rN$; l'asintoto, invece, da $(1 - N/K)$.** Il k non deve essere superato e può essere regolato con l'autoregolazione. Generalmente tutte le popolazioni hanno una crescita di tipo logistico, perché in qualche modo l'ecosistema bilanciato tende a mantenere la popolazione all'interno dell'habitat che la può contenere. Non ha senso aumentare la popolazione se le risorse non ci sono.

$K = \text{max capacità portante}$

N/K rappresenta la competizione intraspecifica

$$\frac{dN}{dt} = rN (1 - N/K)$$

$N/K < 1$ aumento della popolazione

$N/K = 1$ stabilizzazione della popolazione

$N/K > 1$ diminuzione della popolazione

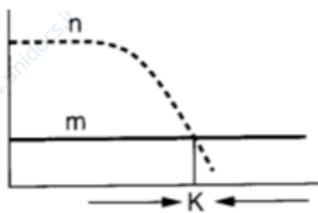
Nella curva logistica ho quindi 2 fasi:

- **Prima fase (fase esponenziale):** tempo che occorre perché la popolazione cominci a riprodursi in tempi e modi favorevoli

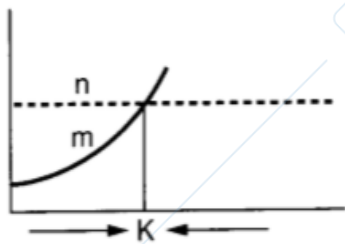
- **Seconda fase (fase logistica):** tempo necessario per avere la reazione al sovrappopolamento attraverso la variazione dei tassi di natalità e di mortalità raggiungendo così una crescita stabile (K).

Ci sono 3 casi che regolano la densità di popolazione:

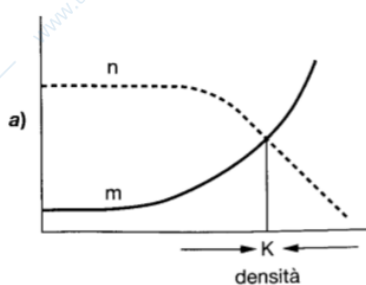
1. Se la popolazione cresce troppo mantengo costante la mortalità e riduco la natalità, in questo modo mantengo la popolazione intorno al k



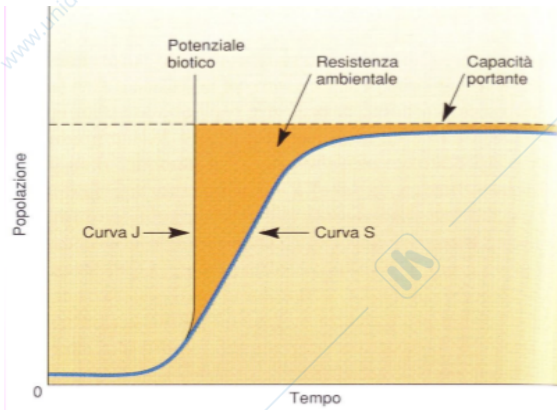
2. Nel secondo caso è la natalità ad essere costante. Se però la natalità resta costante, devo per forza aumentare la mortalità perché è l'unico mezzo che non mi consente di sfiorare. In questo caso, quindi, il k è mantenuto da un aumento di mortalità.



3. Nel terzo caso unisco le due cose: aumento di mortalità e riduzione di natalità, la cui intersezione mi dà il k.



Vediamo ora il paragone tra la curva J e la curva S. La ripida curva J rappresenta una crescita teorica illimitata. La curva S rappresenta una crescita di popolazione che si stabilizza in funzione della resistenza ambientale (spazio arancione che si interpone tra le due curve). La capacità portante, ricordiamo, consente alla popolazione di raggiungere l'equilibrio.



SINTESI DI QUANTO APPENA DETTO:

<p>Ipotesi della crescita</p> <p>Prevalgono fattori di controllo di tipo biotico</p> <ul style="list-style-type: none"> Competizione interspecifica Competizione intraspecifica Predazione Parassitismo patologie 	<p>DENSITA' DIPENDENTE</p> $\frac{dN}{dt} = rN (1 - N/K)$	<p>RISORSE</p>
<p>Ipotesi della crescita</p> <p>INDIPENDENTE</p> <p>Prevalgono fattori di controllo di tipo abiotico</p> <ul style="list-style-type: none"> Stagionalità - risorse dipendenti da Inondazioni Fuoco Inpatto antropico 	<p>DENSITA'</p> $dN/dt = rN$	

DENSITÀ E TASSI DI NATALITÀ E MORTALITÀ

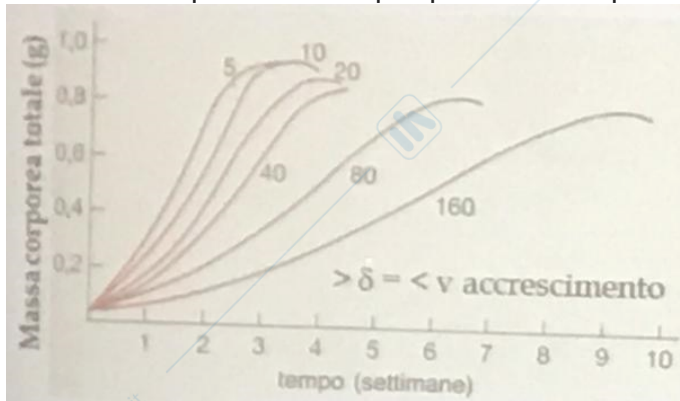
Perché il sovraffollamento causa la morte degli organismi? Perché quando si è in un luogo molto affollato, capita che c'è più transizione di malattie perché non essendoci aria aperta il veicolo è molto più semplice. Spesso capita che per malattie il sovraffollamento causi una decimazione della popolazione. Quanto più una popolazione è affollata le risorse più sono ridotte, quindi chiaramente aumenta il tasso di mortalità e questo è il motivo per cui una popolazione in sovraffollamento è una popolazione che non sta bene da un punto di vista ecologico. Questo è un esempio di come un'elevata densità di popolazione può causare la morte della popolazione stessa.

Altro esempio: un ghepardo che uccide un antilope. Se si eliminano i predatori che controllano gli erbivori, la popolazione di erbivori cresce. Ma questo non è un beneficio per l'ecosistema, perché la popolazione di erbivori crescerà talmente tanto da essere sovrappopolata e la sovrappopolazione causa uno scarseggio delle risorse e al contempo può determinare la morte della popolazione stessa. Quindi se non c'è un controllo di popolazione, come nel caso del preda-predatore, la popolazione preda aumenta ma l'aumento, in questo caso, non è assolutamente favorevole.

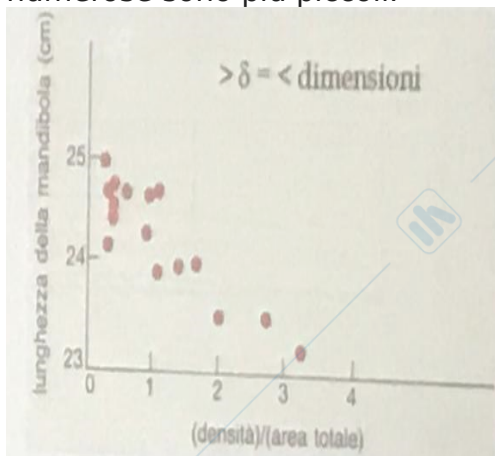
ACCRESCIMENTO DIPENDENTE DALLA DENSITÀ

La velocità di accrescimento, spesse volte, è inversamente proporzionale alla densità. Spesso capita che gli individui di una popolazione affollata siano più piccoli degli individui delle popolazioni meno affollate.

Esempio: come si fa a capire la velocità di accrescimento della rana tigrina o della renna? Nel caso della rana tigrina si va a vedere la densità: aumentando la densità si abbassa la velocità di accrescimento (gli individui più grandi sono quelli meno numerosi e quelli invece più piccoli sono più numerosi)



La stessa cosa vale per la renna, per capire quanto una renna è grande si guarda o la lunghezza delle corna oppure si guarda la mandibola. Nella renna si osserva che a mandibole più lunghe corrisponde densità più bassa, quindi individui di popolazioni più numerose sono più piccoli.

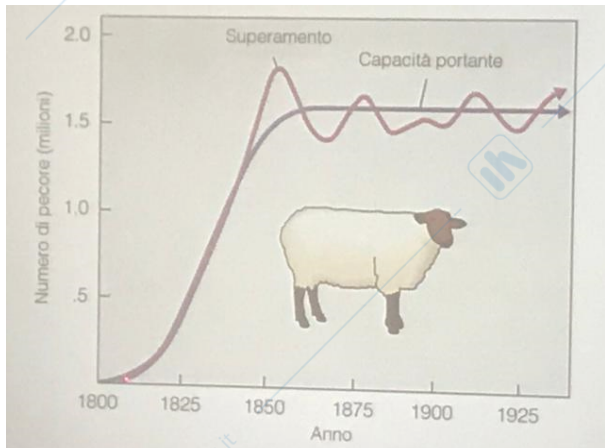


Noi siamo, teoricamente, individui che dovrebbero avere non una crescita esponenziale ma sigmoide. Però, sta succedendo che, per il progresso della tecnologia, questa curva non riesce ad essere sigmoide ma è esponenziale e lo è dal 2000 in poi, da quando si è avuta un'esplosione demografica che sta continuando. Che cosa è legato come discorso alla curva j ? Il fatto che queste curve non possono essere mantenute in un'ecosistema per molto tempo, perché prima o poi le risorse finiscono. Siamo arrivati in un punto in cui non sappiamo cosa avverrà dopo la popolazione umana perché le risorse stanno rapidamente esaurendo (e non parliamo solo di cibo, ma anche dei combustibili fossili). Quindi c'è questo grosso problema in cui la popolazione umana che dovrebbe essere regolata non si autoregola più, non raggiunge k ma arriva a livelli esponenziali. A questo punto quello succederà qui non lo sappiamo: o può evolvere verso una curva sigmoide (ma sarà molto difficile perché per evolvere verso la curva sigmoide si dovrebbe giovare sui tassi di natalità e di mortalità e mica uno può uccidere la gente in massa per evitare il sovrappopolamento) oppure potrebbe verificarsi un crollo catastrofico (questo è il problema che preoccupa tantissimo chi fa gli studi demografici).

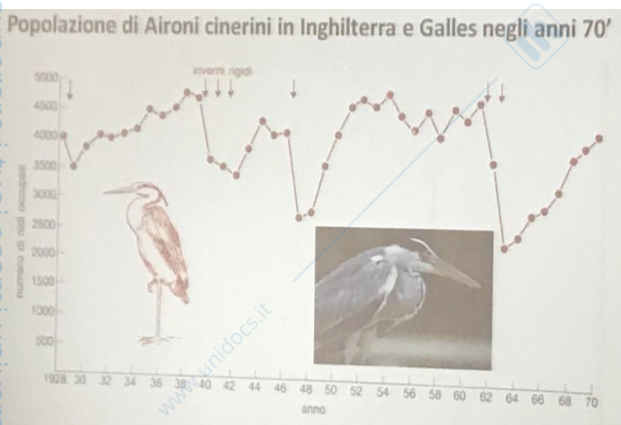
Nel tempo l'andamento della popolazione potrebbe essere differente. **Abbiamo tre differenti tipologie di fluttuazioni di popolazioni.** Abbiamo una:

- **Fluttuazione ciclica.**

Esempio di fluttuazione ciclica: introduzione delle pecore in Tasmania nel 1800 perché le pecore della Tasmania sono ottime non soltanto per il cibo, ma anche per il pelo. Che cosa successe? Successe che quest'inizio di sovrappopolamento provocò un superamento della capacità portante dell'habitat, che però per fortuna venne arginato da piccole oscillazioni, per cui la popolazione si assestò già nel 1925 a 1,6 milioni di pecore. Quindi quest'introduzione ex-novo in Tasmania non ebbe risvolti, ma non sempre è così perché spesso volte succede che quando viene introdotto un nuovo



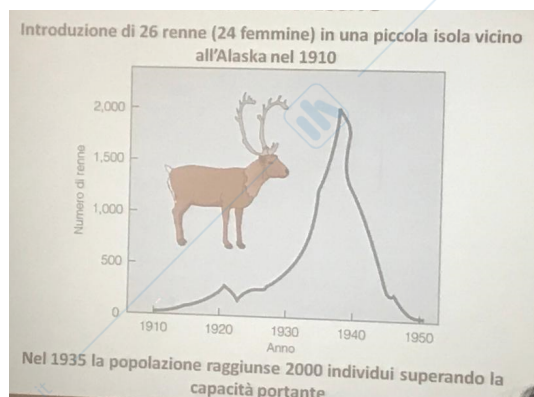
animale in un'ecosistema si ha un andamento prima esponenziale che non riesce a raggiungere la capacità portante per cui si ha poi un crollo della popolazione. È chiaro che in questo caso la popolazione si estingue e questo vuol dire che l'introduzione non è andata bene. Bisogna fare attenzione quando si introducono organismi ex-novo in un ambiente. Non è facile ripopolare un ambiente in cui l'organismo si è estinto perché è chiaro che le condizioni dell'habitat sono cambiate e ne è difficile popolare un ambiente che non è mai stato popolato da una popolazione di animali che vogliamo introdurre.



Gli andamenti ciclici sono molto diffusi nelle popolazioni di uccelli. Consideriamo la popolazione di Aironi cinerini in Inghilterra. L'andamento ciclico (quindi la popolazione che prima aumenta, poi si abbassa, poi aumenta e poi si abbassa di nuovo) è dovuto alle migrazioni e ad un declino della popolazione durante l'inverno rigido, periodo in cui le condizioni sono avverse per la riproduzione e per la vita dell'animale. Questo periodo invernale non è però preoccupante perché è ciclico, è stagionato diciamo.

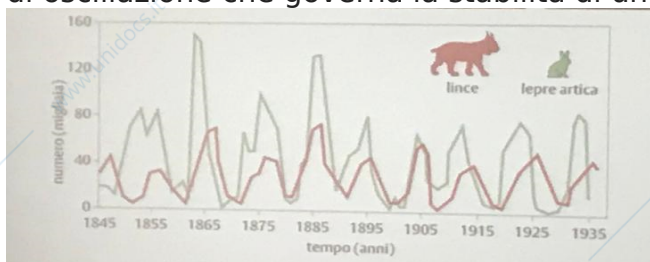
- **Fluttuazioni stabili** che si mantengono intorno la capacità portante (ricordiamo che la capacità portante non è un singolo valore. Spesso la capacità portante viene mantenuta con piccole oscillazioni al di sopra e al di sotto del valore k)
- **Fluttuazione esplosiva.** Si ha una crescita, superamento della capacità portante, non si riesce a mantenere l'equilibrio e per questo la popolazione ha un crollo catastrofico. Spesse volte questi andamenti esplosivi sono causati dall'uomo, che ha la pretesa, spesse volte senza studiare la situazione, di mettere in un ecosistema una specie scomparsa, quindi una specie che non era mai stata prima in quell'ecosistema. Chiaramente è ovvio che è difficile per una specie

che non è mai stata presente avere un andamento di tipo sigmoide, perché spesso volte accadrà che l'andamento sia prima esponenziale e poi si avrà un crollo.



DINAMICA PREDA-PREDATORE

Un'altra interazione molto particolare è il rapporto che c'è tra preda e predatore. Questo rapporto per la prima volta fu studiato con le linci e le lepri. Degli studiosi osservarono i comportamenti e le fluttuazioni di popolazione di linci e lepri e scoprirono che queste oscillazioni sono cicliche. Guardiamo la lince che è rossa e la lepre che è verde: inizialmente il ciclo sembra sfalsato, perché se c'è la lince non c'è la lepre perché la lince è preda della lepre. Però, quando passa del tempo le popolazioni si autoregolano, sono più sfalsate e non sono opposte però in ogni caso abbiamo un picco di predatore quando c'è un picco di preda e viceversa. Per quale motivo? Perché la popolazione preda-predatore tende ad autoregolarsi e in qualche modo l'interazione è positiva anche se con la predazione uno dei due animali ammazza l'altro. E perché questo? Perché in questo modo la popolazione della lepre non crea esplosioni demografiche che condurrebbero poi la curva j ad avere un brusco crollo. Per cui si dice che le due popolazioni si autoregolano tra loro. Questo è un'importante tipologia di oscillazione che governa la stabilità di un ecosistema.



In una popolazione è possibile avere due diverse tipologie adattive: **strategia R o opportunistica** e **strategia K o di equilibrio**. Che cosa significa popolazione R e popolazione K? Hanno delle caratteristiche opposte tra di loro. Vediamo quali sono: innanzitutto, sia R che K, dipendono dalle risorse.

La strategia R è una strategia opportunistica, tipica di piante erbacee, di animali che hanno la particolarità di avere tanti figli, quindi sono resilienti ma poco resistenti. Ricordiamo che la resilienza è la capacità di un sistema di reagire ad un disturbo e di tornare allo stato precedente della perturbazione e di farlo anche velocemente.

Opposta alla strategia R c'è un'altra strategia, quella di equilibrio (strategia K). In questo caso le specie sono resistenti, tipico delle specie arboree e di animali top

predator al vertice della catena alimentare. Questa strategia è tipica delle specie che fanno pochi figli ma che hanno cure parentali ed è tipica di ecosistemi molto stabili (in questo caso le specie resistono ma non sono resilienti. Hanno quindi la capacità di resistere al disturbo).

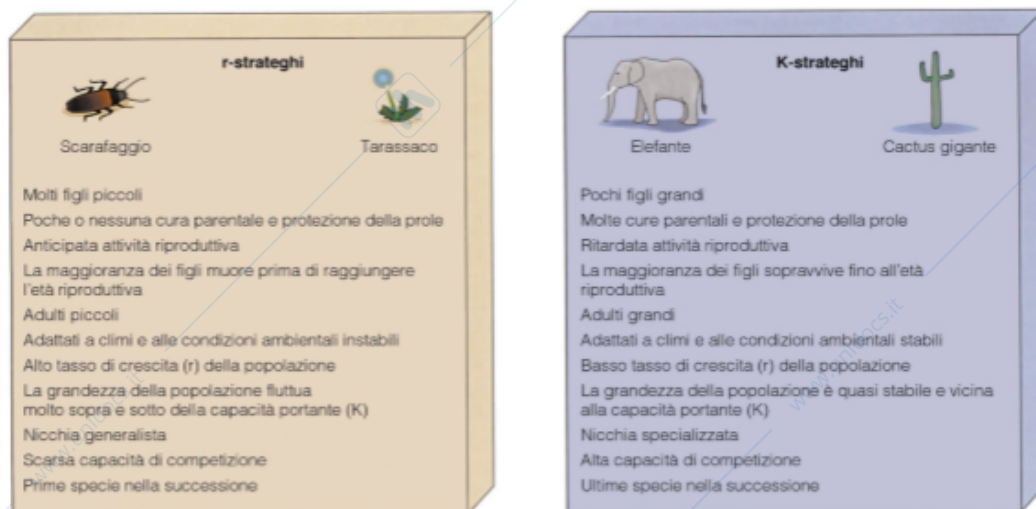
Le specie opportuniste o popolazioni r-strateghe:

- Vivono in ambienti soggetti a perturbazioni ricorrenti e/o imprevedibili
- Sono soggette a mortalità di tipo catastrofico: la popolazione è ridotta al di sotto della capacità portante
- Presentano elevata capacità colonizzatrice e questo è fondamentale. Questo lo vediamo specialmente nei sistemi perturbati (dopo inondazioni, fulmini, lampi, incendi) dove il suolo nudo viene colonizzato specialmente dalle specie che crescono e si riproducono velocemente (specie opportuniste). In questa colonizzazione hanno un tipo di accrescimento di tipo j, poi la curva j si può evolvere in curva sigmoide.

Le strategie, invece, di una popolazione di equilibrio sono:

- Situazioni ambientali più costanti e/o prevedibili dove viene premiata la resistenza e non la resilienza come nei casi precedenti.
- Le popolazioni possono raggiungere densità vicine alla capacità portante dell'habitat (numero K)

Questa è una classifica di tutte le strategie delle popolazioni R e K:



LE INTERAZIONI ECOLOGICHE

Le interazioni ecologiche sono di due tipi: esistono le **interazioni interspecifiche** (interazioni all'interno della stessa specie) e **interazioni intraspecifiche** (tra 2 specie differenti).

Le interazioni tra specie (interazioni interspecifiche) possono essere classificate come:

▢ **Interazioni consumatore-risorsa** (Predatore-preda erbivoro-pianta parassita-ospite)

▢ **Competizione**

▢ **Mutualismo**, dove c'è un'interazione positiva. I due che contraggono l'interazione traggono entrambi benefici, uno prende una cosa dall'altro e viceversa.

Ognuna di queste 3 interazioni può avere delle accezioni, nel senso che l'effetto che una specie può avere sulla crescita demografica e sul benessere di un'altra specie può essere negativo (-), positivo (+) o neutro (0).

Ci sono: interazioni che sono positive per uno e negative per l'altra; interazioni negative-negative e interazioni positive-positive. Vediamo quali sono:

- **La predazione:** negativa per la preda e positiva per il predatore
- **Parassitismo:** negativo per l'ospite e positivo per il parassita
- **La competizione:** negativa per entrambi, perché quando c'è competizione vuol dire che la risorsa non è sufficiente e quindi chiaramente quella risorsa o va divisa o una delle due parti contraenti deve andarsene perché l'altro è più forte.
- **Proto-cooperazione mutualismo:** le interazioni sono positive per entrambe le popolazioni.
- **Commensalismo** (qualcuno che siede alla nostra tavola) che è positiva per la specie che siede alla nostra tavola e non è negativa e ne nulla per l'altra.

TABELLA 4.1 • ANALISI DI ALCUNI DEI PRINCIPALI TIPI DI INTERAZIONE TRA DUE POPOLAZIONI APPARTENENTI A SPECIE DIVERSE

Tipo di interazione	Popolazioni		Natura dell'interazione
	A	B	
Competizione da uso di risorse comuni e limitate	-	-	La popolazione A danneggia B e viceversa utilizzando le stesse risorse, disponibili in quantità limitate
Competizione con mutua inibizione	-	-	La popolazione A inibisce attivamente B e viceversa
Predazione	+	-	Il predatore A attacca, uccide e divora la preda B
Parassitismo (inclusi i parassitoidi, gli erbivori e gli altri fitofagi)	+	-	Il parassita A vive in associazione più o meno stretta con l'ospite B, danneggiandolo e ricavandone nutrimento senza causarne necessariamente la morte
Antibiosi e allelopatia	+	-	Una popolazione A produce sostanze dannose per un'altra popolazione B, con cui compete
Amensalismo	0	-	La popolazione B è inibita, mentre le conseguenze su A non sono apprezzabili
Neutralismo	0	0	L'associazione di A con B non ha conseguenze apprezzabili per entrambe le popolazioni
Commensalismo	+	0	Il commensale A trae vantaggio (cibo), senza arrecare danno a B
Inquilinismo	+	0	L'inquilino A trae vantaggio (spazio), senza arrecare danno a B
Simbiosi mutualistica facoltativa	+	+	Interazione favorevole sia ad A che a B, non necessaria per la loro sopravvivenza
Simbiosi mutualistica obbligatoria	+	+	Interazione favorevole sia ad A che a B, necessaria per la loro sopravvivenza

Adesso andiamo a vedere che cosa sono queste interazioni o cosa fanno sulla crescita di popolazione.

L'ecosistema nel tempo si modifica, per cui le interazioni negative possono diventare meno negative nel tempo, oppure interazioni positive potrebbero sfociare verso interazioni negative. Ovviamente è l'ambiente che ci dice come evolvere la situazione, perché se l'ambiente ha tante risorse non c'è necessità che si cambino le interazioni; però se l'ambiente comincia ad avere risorse che scarseggiano chiaramente due organismi non in competizione potrebbero entrare in competizione. Non sempre però l'interazione positiva è favorita, come non sempre quella negativa è favorita, dipende dalla dinamica dell'ambiente.

Cominciamo con la prima interazione:

PREDAZIONE

La predazione coinvolge una preda e un predatore che possono essere di diverse tipologie. La predazione si manifesta quando un essere vivente "predatore" uccide un altro di specie diversa "preda" per cibarsene.

I predatori si distinguono in veri e falsi predatori, qual è la differenza?

Veri predatori (carnivori) \square uccidono sempre la loro preda immediatamente dopo averla attaccata, consumano alcune o molte prede nel corso della loro vita

Falsi predatori o pascolatori (erbivori) \square Non uccidono sempre la loro preda e ne consumano soltanto una parte, attaccano alcune o molte prede nel corso della loro vita. I pascolatori sono gli ungulati, i bovini, gli insetti fitofagi e i roditori.

Nella predazione hanno più alta probabilità di soccombere (perché più vulnerabili):

1. individui giovani
2. individui privi di territorio
3. individui malati
4. individui vecchi

Il predatore, quindi, di tutta la popolazione prende gli individui più deboli. **Se considero la predazione a livello di individuo posso dire che è positiva per il predatore e negativa per la preda** perché la preda muore e il predatore vive; ma se salgo un po' più su della scala gerarchica e **considero la predazione non più a livello di individuo ma a livello di popolazione, l'interazione positiva-negativa si trasforma in positiva-positiva** e questo perché con la morte della preda la sua popolazione resta al di sotto della capacità portante dell'habitat. Se non ci fosse la predazione la popolazione della preda avrebbe un'esplosione demografica con conseguente crollo. La predazione quindi è considerata positiva-positiva per le popolazioni che tendono ad autoregolarsi. **Se la predazione non ci fosse è ovvio che, in un'ecosistema poco regolato, si rischiano esplosioni demografiche.**

Questo è quello che successe in Australia, che essendo un'isola, ha una speciazione a sé stante, tanto è vero che i marsupiali e alcune specie di mammiferi sono solo in Australia. In Australia furono introdotti conigli (per scopi alimentari) in una zona dove non c'erao predatori per cui cominciarono a crescere a dismisura e si ebbe un'esplosione demografica che distrusse le distese di erba, per cui l'uomo, successivamente, dovette introdurre un agente patogeno per debellare il coniglio. Sempre in Australia, fu introdotta anche la pianta del fico d'India per scopi alimentari. Questa pianta si trovò talmente bene in Australia da soppiantare totalmente le specie vecchie e quindi successe che, anche in questo caso, l'uomo dovette introdurre un agente patogeno per andare a distruggere la popolazione di opuntiae (fico d'India) e questo agente patogeno fu una farfalla che mangiò le foglie della pianta stessa. **Introdurre quindi una specie in un habitat non è una cosa semplice**, perché il presupposto è questo: se l'animale è scomparso dal suo habitat di appartenenza è perché c'è stato qualche problema ed è ovvio che se l'animale è scomparso il suo habitat di appartenenza non è più lo stesso da quando lui non c'è più. Posso pensare di introdurre una specie in un habitat solo se vedo che le condizioni dell'habitat di 20/30 anni fa (quando è scomparsa la specie) sono uguali a quelle di adesso, ma se la situazione è cambiata, è ovvio che faccio solo danno (come è successo in Australia).

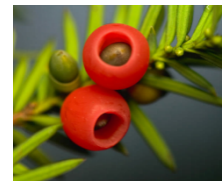
Il comportamento predatorio può andare dall'inseguimento attivo alla filtrazione (la balena preda ingerisce grandi quantità d'acqua che vengono filtrate dai fanoni presenti a livello della bocca). Il concetto fondamentale però è sempre questo: non è che la preda aspetta che il predatore la mangi, né il predatore ha 'il cocco bello e preparato' (come si dice a Napoli) ma c'è il predatore che cerca di prendere la preda perché altrimenti non mangia e la preda che cerca di sfuggire al predatore perché altrimenti muore. Nel corso dell'evoluzione si è verificata una "escalation" dei meccanismi di offesa-difesa da parte di predatore-preda. I predatori quindi hanno sviluppato adattamenti per inseguire, catturare e consumare particolari specie di prede (artigli, denti aguzzi) e le prede sfuggono alla predazione evitando di essere identificate, usando difese chimiche, strutturali e comportamentali (esempio mimetismo o camouflage).

Ci sono diversi meccanismi che i predatori usano per catturare la preda ad esempio l'arma offensiva del leone sono gli artigli perché grazie a questi blocca la preda e la uccide con un morso alla carotide.

Quando la "preda" è una pianta ed il "predatore" è un animale che si nutre della pianta (erbivoro), la loro interazione è definita **ERBIVORIA**. Le piante hanno evoluto numerose difese strutturali (spine, cortecce, organi ipogei) e chimiche per distogliere gli erbivori. Le difese chimiche comprendono fattori che influenzano la qualità nutrizionale e la digeribilità di parti della pianta, nonché composti secondari (effetti tossici).

Alcune piante particolari e pericolose sono:

- **Atropa belladonna**, amanita muscaria e **digitalis purpurea** che sono allucinogene e possono anche uccidere. Venivano spesso usate come medicina ma ancora oggi molte medicine hanno, ad esempio, l'atropina.
- Un altro albero molto particolare e pericoloso è il **taxus baccata** o albero della morte. L'unica parte non velenosa della pianta è la parte rossa (arillo) che viene predata da alcuni uccelli, i quali ingoiano l'arillo e poi espellono con le feci il seme determinando la disseminazione zoocora della specie in varie parti del loro percorso di migrazione.



Le classi di sostanze chimiche che una pianta può utilizzare per la propria difesa comprendono gli alcaloidi (tossici, diffusi nelle radici, nelle foglie e nei frutti delle Angiosperme) le ammine (maleodoranti e allucinogene, diffuse nei fiori), gli amminoacidi non proteici (tossici, diffusi nei semi delle leguminose), glicosidi cianogenetici (tossici, diffusi nei frutti e nelle foglie) e glucosinolati (acri e amari, presenti soprattutto nelle crocifere). Tuttavia molti erbivori hanno escogitato meccanismi per detossificare le sostanze secondarie delle piante. Alcune piante possono accumulare sostanze diverse a seconda della stagione e a seconda del predatore. Le foglie di Pteridium aquilinum (la felce aquilina che si trova vicino ai castagneti) nel periodo primaverile accumulano soprattutto acido cianidrico (HCN), mentre nel periodo estivoautunnale accumulano tannino.

Una forma di predazione particolare è rappresentata dalle piante carnivore (Heliamphora Drosera Nepenthes Dionaea). Le **piante carnivore** (dette talvolta **piante insettivore**) sono piante che intrappolano e consumano protozoi ed animali, specialmente insetti ed altri artropodi, al fine di ottenere i nutrienti essenziali per la loro crescita. Questa singolare caratteristica è il risultato di un adattamento a degli ambienti in cui il suolo per la forte acidità, è povero o privo di nutrienti e in particolar modo d'azoto, che viene così integrato dalla pianta attraverso la digestione delle proteine animali.

L'erbivoria però non è sempre dannosa per la pianta perché può determinare una modificazione della distribuzione dei prodotti della fotosintesi e mantenere un giusto rapporto radici/germogli, dipende da quale parte della pianta viene attaccata e dal suo stadio di sviluppo.

Un' interazione negativa-negativa è la:

COMPETIZIONE

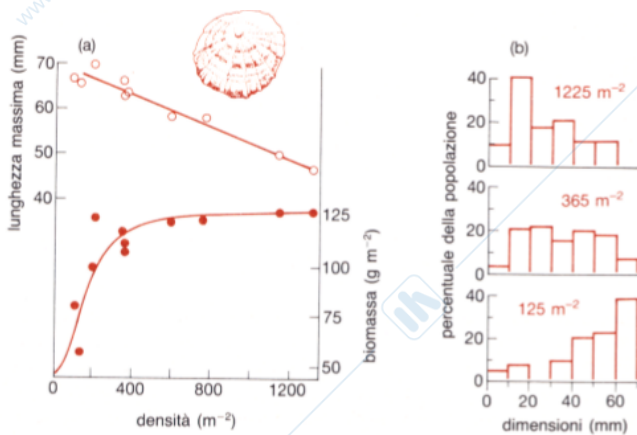
Quando due organismi vanno in competizione? Quando lottano entrambi per una risorsa che non è disponibile in quantità adeguate per entrambi. Quindi se non abbiamo abbastanza risorse, si instaura questo tipo di interazione negativa-negativa per entrambi i contraenti che causa inibizione reciproca per le due popolazioni. **Cosa**

vuol dire inibizione reciproca? Le quantità delle risorse non sono adeguate per entrambi (per esempio il cibo o la luce non sono abbastanza) e si ha un'inibizione reciproca, ovvero entrambe le popolazioni risultano, se riescono a sopravvivere entrambe, ridotte in numero. Competizione e predazione sono le uniche due interazioni che abbassano la capacità portante dell'habitat. La competizione può essere intraspecifica e interspecifica.

COMPETIZIONE INTRASPECIFICA

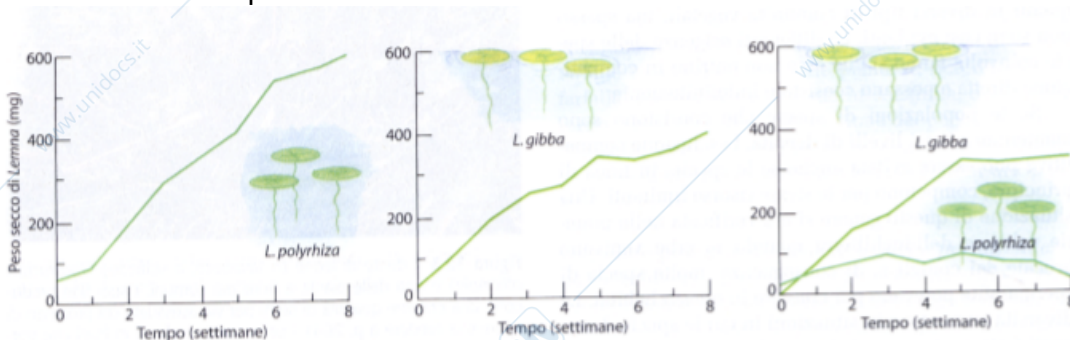
Avviene all'interno della stessa specie ed è un fattore importante nelle popolazioni che tendono ad auto-regolarsi. **Scaturisce da una esigenza comune di ottenere una risorsa limitata.** Essa provoca una diminuzione della sopravvivenza, dell'accrescimento e della riproduzione negli individui interessati.

ESEMPIO: competizione intraspecifica della patella. Osservando i grafici sottostanti noto che le dimensioni degli individui decrescono all'aumentare della densità di popolazione: man mano che la densità di popolazione aumenta la lunghezza massima del guscio di patella decresce e questo dipende dalla disponibilità di risorse limitate.



COMPETIZIONE INTERSPECIFICA: ALTRI ESEMPI

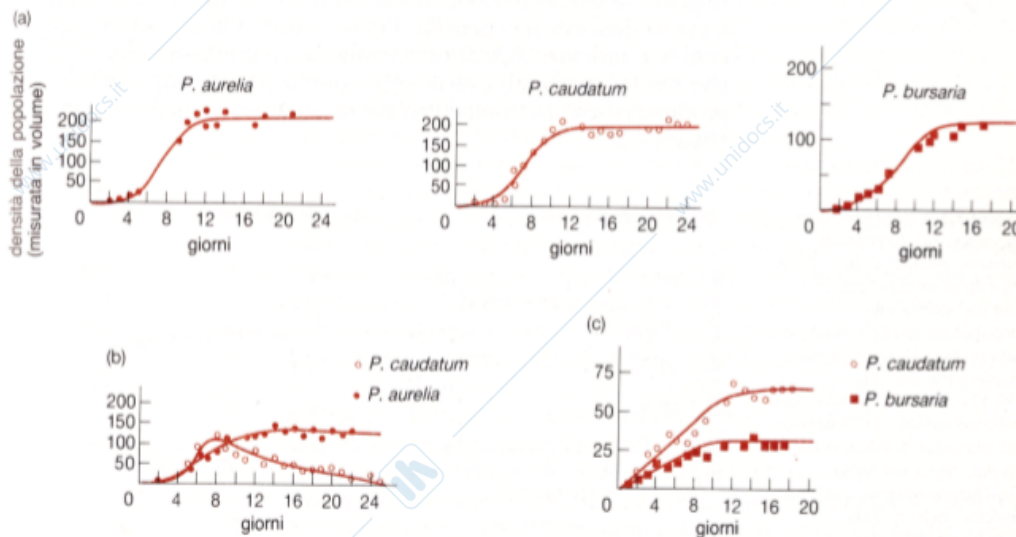
Avviene tra due specie diverse



Facciamo riferimento all'immagine sovrastante e consideriamo 2 specie diverse di Lemna o "lenticchia d'acqua" (*Lemna polyrhiza* e *Lemna gibba*) e vediamo cosa succede: c'è una popolazione A e una B (ognuna con la sua specifica dinamica di crescita). Come faccio a capire che la popolazione sta crescendo? Chiaramente lo vedo dalla curva che cresce. La popolazione A (primo grafico partendo da sinistra) cresce da sola; la popolazione B (grafico al centro) cresce tranquillamente da sola però il ritmo di crescita è più basso rispetto quello della popolazione A. Cosa succede se le due popolazioni di Lemna vengono messe insieme? Se vengono messe insieme succede che la *Lemna polyrhiza* muore mentre la *Lemna gibba* riesce a sopravvivere ma con un tasso di popolazione un po' più basso rispetto quello precedente. Accade questo

perché evidentemente le due specie entrano in competizione, non riescono a dividersi egualmente le risorse e la più forte prevale su quella più debole, per cui si risolve questa competizione con l'esclusione di una delle due popolazioni. In questo caso vince la Gibba rispetto la polyrhiza anche se è la polyrhiza la più forte quando è isolata. Da questo deduciamo che quando due popolazioni vengono messe insieme non sempre, come in questo caso, quella che ha ritmo più veloce prevale. È la gibba a vincere sull'altra per una questione di adattamento alla colonna d'acqua, perché la polyrhiza non occupa un posto superficiale ma una situazione intermedia nella colonna; mentre invece la lemna gibba occupa, lungo la colonna d'acqua, le parti superiori risultando vincente nella competizione per la luce rispetto l'altra specie.

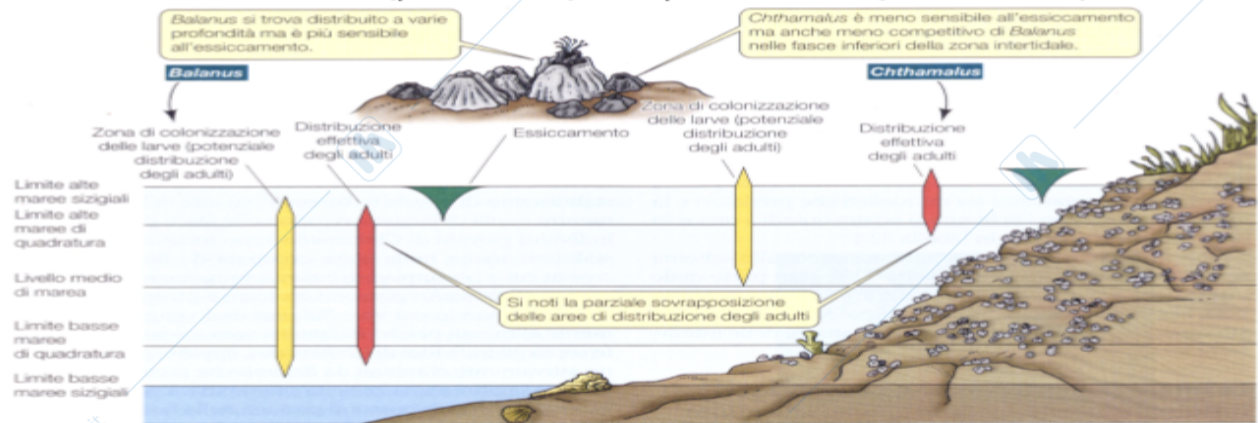
Altro esempio di competizione interspecifica tra diversi tipi di paramecio:



Facciamo riferimento all'immagine sovrastante e consideriamo 3 specie diverse di Paramecio (*P. aurelia*; *P. caudatum* e *P. bursaria*). Ogni specie ha un ritmo di crescita a se stante, quindi se stanno separati ognuno ha un ritmo di crescita di popolazione e precisamente aurelia e caudatum sono simili (circa 200 individui dopo 24 giorni), bursaria un po' di meno. Che succede se combino tra loro le diverse popolazioni? Combino prima l'aurelia e il caudatum e succede che l'aurelia vive (vincente) e l'altra specie muore (perdente). Se invece mischio il caudatum con il bursaria vediamo che entrambe le specie vivono allo stesso tempo (coesistenza) però essendoci risorsa limitata si abbassa tantissimo la capacità portante dell'habitat. Ma ci può sorgere spontanea una domanda: perché il caudatum con il bursaria vive e con l'aurelia muore? Il caudatum quando vive insieme al bursaria rimane in sospensione mentre il bursaria sta sul fondo, quindi hanno la nicchia trofica separata. Da questo deduciamo che due popolazioni possono coesistere se le nicchie ecologiche sono separate. Se la nicchia trofica è la stessa si entra in competizione e questa può essere risolta con l'estinzione di una delle due popolazioni.

Altro esempio di competizione interspecifica. Nel determinare il luogo in cui una specie si stabilisce sono importanti sia i fattori biotici (predazione) che quelli abiotici (essiccazione). Gli "attori" in questo caso sono due specie di Balanus (i denti di cane, quelli che stanno sulle cozze): il *Balanus vero* e proprio e il *chthamalus* molto simile dal punto di vista morfologico. I balani utilizzano lo stesso tipo di risorsa, ma alcune specie sono più sensibili all'essiccamento rispetto ad altre (il

balanus vero e proprio è più sensibile), quindi si dispongono in posti diversi a seconda della loro sensibilità all'essiccamento in modo da poter condividere la stessa risorsa.



Cosa può succedere quando due popolazioni entrano in competizione?

Possono verificarsi due casi: o la coesistenza o l'esclusione competitiva (praticamente succede che i due organismi che entrano in competizione non possono vivere nello stesso ambiente, per cui uno se ne va).

Un principio importante in ecologia è il **principio di Gauss** che dice che non è possibile la coesistenza di due specie che occupino la stessa nicchia ecologica. Ad esempio la tigre e il leone sono top predator, però non vanno in competizione perché sono equivalenti ecologici, cioè svolgono lo stesso ruolo ma in 2 ecosistemi diversi perché parliamo di foresta tropicale per la tigre e di siberia e savana per il leone.

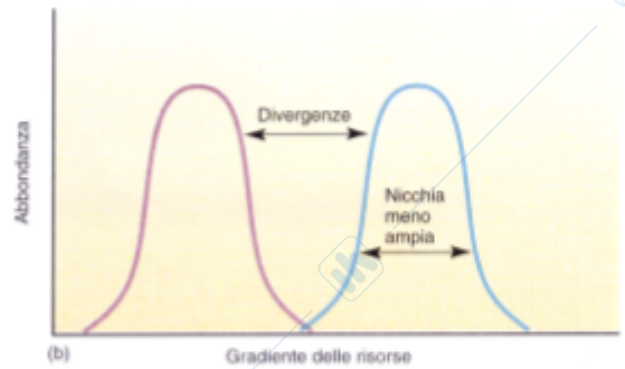
Quindi non è possibile la coesistenza di due specie che occupano la stessa nicchie ecologica.

Dimostrazione grafica del principio di gauss:



La competizione determina la suddivisione delle risorse e la specializzazione di nicchia. La competizione interviene quando le nicchie di due specie si sovrappongono lungo un gradiente (area condivisa in arancione). Gli individui che occupano questa parte di nicchia hanno meno successo riproduttivo.

La competizione determina la suddivisione delle risorse e una maggiore specializzazione di nicchia che ne riduce l'ampiezza. **Non è possibile quindi che due popolazioni occupino la stessa nicchia ecologica, se lo fanno le nicchie devono essere separate. Per nicchia ecologica intendo nicchia trofica, climatica, comportamentale etc.**



Il restringimento della nicchia ecologica per lungo tempo ha la potenzialità di separare le specie. Se la competizione per una certa risorsa permane per un tempo molto lungo si hanno degli adattamenti legati allo sviluppo di caratteri specifici che possono diventare delle modificazioni geneticamente acquisite. Questo può portare alla **speciazione (processo evolutivo grazie al quale si formano nuove specie da quelle preesistenti. Le nuove specie formatesi non sono interfeconde tra loro)**.



Un esempio di speciazione sono i fringuelli di Darwin. Una piccola popolazione di fringuelli dal continente dell'Equador ha colonizzato l'arcipelago delle Galapagos. Le diverse condizioni ecologiche insulari hanno provocato variazioni nelle abitudini alimentari delle popolazioni di fringuelli che si sono evoluti in specie diverse, quindi unico progenitore che ha dato origine a tanti fringuelli differenti. È possibile notare la separazione di nicchia osservando la forma del becco, il quale risulta essere un indicatore per la fonte di cibo di questi animali.

SIMBIOSI

Nella simbiosi le specie vivono insieme beneficiando di questa unione al punto che la vita di una specie dipende da quella dell'altra. La simbiosi, diversamente dal predatore, è sempre positiva.

Un tipo particolare di simbiosi è il **MUTUALISMO** in cui non si possono scindere i due contraenti. La relazione mutualistica è talmente stretta che spesso volte accade che i due organismi sono talmente mescolati da originare un organismo completamente diverso. Anche in questo caso vale il principio delle proprietà emergenti: $A+B \neq C$.

I mutualismi si classificano in 3 grandi categorie:

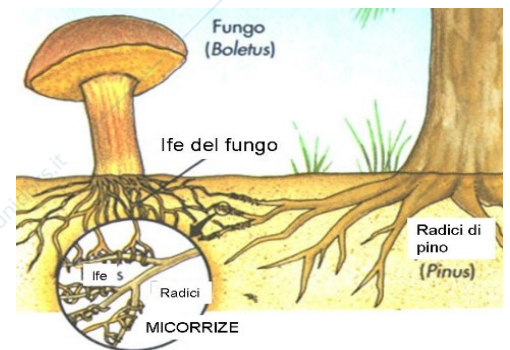
- **Mutualismi trofici:** unione di due partner che stanno insieme per reciproco interesse poiché ognuno prende risorse dall'altro, di conseguenza è un'interazione biunivoca positiva. Esempi di questo tipo di mutualismo sono le micorrize, i licheni, tubercoli o noduli radicali, termiti e flagellati intestinali.
- **Mutualismi difensivi:** si hanno quando una delle due specie trova una protezione nell'altra specie. Un esempio è quello delle formiche *Pseudomyrmex* sp. e l'acacia perché la presenza delle formiche sembra fornire protezione da altri insetti nocivi e trova d'altra parte nell'acacia il cibo (nettarii) e la possibilità di nidificare nelle spine della pianta. Un altro esempio sono le formiche che proteggono gli afidi dai predatori, mentre le afidi secernono la melata (liquido zuccherino) di cui si cibano le formiche
- **Mutualismi dispersivi:** riguarda il rapporto pianta-animale, e riguarda la dispersione dei semi o l'impollinazione.

Il mutualismo più diffuso in natura è quello trofico. Nel mutualismo trofico è importante la risorsa perché un partner prende risorsa da un altro partner. Generalmente, questo tipo di mutualismo coinvolge un autotrofo ed un eterotrofo.

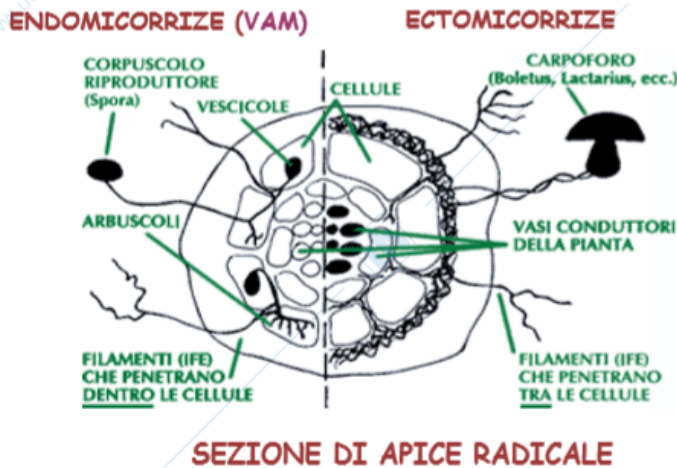


Un esempio di mutualismo trofico sono i **licheni**. I licheni non sono organismi a parte, ma sono un'unione tra due organismi differenti (fungo e alga). Nel lichene l'alga (autotrofo) fornisce fotosintati al fungo (eterotrofo), che trae acqua e sali minerali dal terreno.

Un altro esempio di mutualismo trofico sono le **micorrize**: fungo+ radici. La radice beneficia del fungo perché il fungo con le sue ife allarga la superficie di assorbimento della radice. Al contempo la pianta fornisce ai funghi simbiotici carboidrati semplici prodotti con la fotosintesi (essudati radicali) indispensabili al loro metabolismo. Ricordiamo che le micorrize sono fondamentali per l'assorbimento dell'azoto e del fosforo, perché aumentando la superficie di assorbimento radicale fanno in modo che alcuni elementi (come il fosforo) che sono al di sotto del suolo possano essere in qualche modo intercettati dalla specie.



Abbiamo 2 diverse specie di micorrize: le **endomycorrize** e le **ectomycorrize**. Le endomycorrize sono le associazioni in cui l'ifa fungina pesca all'interno della cellula della radice; mentre invece le ectomycorrize sono quelle micorrize che si formano quando le ife fungine circondano la radice. Le endomycorrize all'interno della cellula formano una vescicola.



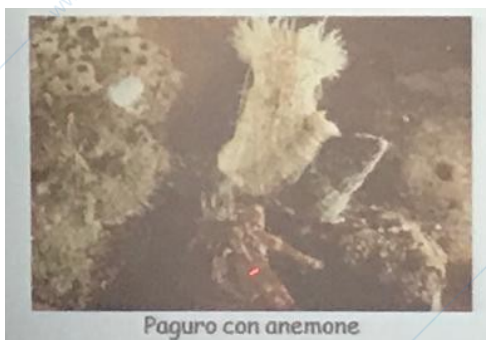
Il sistema per assorbire l'azoto e in particolar modo il fosforo dipende dalla tipologia di pianta che contrae l'associazione.

L'altro tipo di mutualismo è quello difensivo, quindi un partner che difende l'altro partner. Esempio di mutualismo difensivo: le formiche proteggono gli afidi (insetti verdi piccolini) dai predatori, ma hanno un tornaconto perché gli afidi secernono un liquido zuccherino (la melata) che le formiche apprezzano molto.

Alcuni esempi di mutualismi difensivi:



Pesce pagliaccio tra i tentacoli di attinia. L'attinia ha tentacoli orticanti ma il pesce è immune a questi, per cui mangia lì dentro e a sua volta, essendo protetto dai tentacoli di attinia, non viene predato.



Paguro con anemone. In questo caso l'anemone è sopra il paguro (lo maschera in qualche modo) e così lui può agire indisturbato dietro agli scogli e tentare di prendere la preda che passa per di lì ignara.

Spesso capita che quando uno vede sotto la nube di una medusa tanti pesci pensa che sia la medusa a mangiare i pesci, invece è tutto il contrario.

I mutualismi dispersivi, invece, sono fondamentali negli ecosistemi poiché garantiscono la dispersione dei semi quando ad esempio non c'è vento. La dispersione può essere a carico dell'acqua, dell'aria e degli animali.

Beneficio per piante	Beneficio per animali	Esempi
Dispersione del polline	Gli animali si cibano di polline o nettare	Gran parte delle piante sviluppa fiori di colore appariscente
Dispersione dei semi	Gli animali si cibano dei tessuti carnosi che circondano i semi	Conifere come ginepro e tasso
Dispersione di polline e semi	Gli animali si cibano di polline e frutti	Gran parte degli alberi tropicali e dei cespugli presenti a diverse latitudini

Ogni specie ha il proprio mutualismo dispersivo. Le piante che effettuano questo mutualismo possono presentare diversi adattamenti a seconda se la dispersione è solo di semi, di polline o di semi e polline. Se si tratta solo di dispersione di polline le piante hanno fiori molto grandi, appariscenti e colorati per attrarre gli animali. Gli animali si cibano del polline o del nettare e in compenso ne facilitano la dispersione. Se si tratta di dispersione dei semi, soprattutto per le conifere come il ginepro e il tasso, ci sono frutti molto appariscenti. L'animale si ciba dell'involucro carnoso del seme e in compenso facilita la dispersione del seme. Talvolta ci possono essere sia dispersioni di polline che di seme nella stessa pianta e questo avviene soprattutto nella foresta tropicale.

Abbiamo detto che un tipo particolare di simbiosi è il mutualismo, ma un tipo particolare di simbiosi è anche la **protocooperazione**. La PROTOCOOPERAZIONE è un'interazione positiva-positiva in cui le due specie si avvantaggiano l'un l'altra, ma non sono essenziali per la sopravvivenza reciproca. Che differenza c'è tra la simbiosi normale e la protocooperazione? La simbiosi normale è una simbiosi meno stretta del mutualismo ma più stretta della protocooperazione. ESEMPLI: Un gambero che rimuove i parassiti dal corpo di una murena; uccelli che si cibano di parassiti di antilopi.

PARASSITISMO

Il parassitismo = particolare tipo di rapporto preda-predatore. Il predatore (parassita) vive a spesa di una preda (ospite) per un periodo di tempo più o meno lungo. È un'interazione positiva-negativa come la predazione poiché è positiva per il predatore e negativa per l'ospite, però ha una modalità di svolgimento totalmente diversa. Nel rapporto parassita-ospite il predatore può uccidere o meno o evolversi o meno con l'ospite, è quindi un'interazione molto più complessa della predazione. Ci sono diversi tipi di parassitismo, un esempio è il Cuculo, che non è assemblabile ad un parassitismo tipo zecca-cane poiché il Cuculo è noto al più per la sua peculiare caratteristica del **parassitismo di cova (creptoparassitismo)**; una forma particolare di parassitismo che si verifica quando una femmina depone le sue uova nel nido di una coppia di uccelli della stessa specie o di una specie differente. Il Cuculo quindi è a tutti gli effetti un **uccello parassita** che non costruisce il suo nido ma utilizza quello di altri volatili, soprattutto passeriformi. La femmina di Cuculo una volta individuato il nido dei malcapitati (e inconsapevoli) genitori adottivi aspetta che questi depongano le uova e alla prima occasione si introduce nel nido. A questo punto

elimina una delle uova presenti, depone il suo uovo e vola via. L'uovo del Cuculo si schiude in un tempo nettamente **inferiore** rispetto a quelli del passeriforme (circa 12 giorni grazie alla incubazione interna dell'uovo) e appena il pulcino viene alla luce, seguendo un istinto insito nei suoi geni, si sbarazza delle altre uova presenti nel nido non ancora schiuse. I genitori adottivi vengono ingannati da questo comportamento e nutrono il cuculo come se fosse un proprio nidiaceo per 2-3 settimane fino all'involo.

Possiamo avere diversi tipi di parassiti: **endoparassiti** (che vivono all'interno dell'ospite, come ad esempio la tenia. In questo caso, vivendo all'interno del corpo dell'ospite, contraggono con questo un'associazione molto stretta e se muore l'ospite muore anche il parassita) ed **ectoparassiti** (ectofagi, all'esterno dell'organismo ospite. Es. la zecca).

Nel caso dell'endoparassitismo è come se il parassita e l'ospite si evolvessero insieme perché se l'ospite muore il parassita, vivendo al suo interno, deve andarsene e se non riesce muore con lui. Per cui i due organismi evolvono un equilibrio che passa attraverso una stretta specificità, infatti quando si parla di endoparassitismo si parla anche di specificità dell'ospite, cioè l'ospite spesso volte è solo per un tipo di parassita.

Possiamo avere due tipi di endoparassitismo: **microparassiti** e **macroparassiti**. I microparassiti si moltiplicano direttamente all'interno dell'ospite propagandosi copiosamente all'interno; i macro, invece, sono ancora più pericolosi perché si accrescono e si moltiplicano nel loro ospite producendo stadi infestanti o infettivi che vengono liberati dall'ospite per andare ad infettare nuovi ospiti. Esempio di macroparassiti: la **malaria**. Il **veicolo** della malaria è la zanzara e il suo responsabile la zanzara infettata dal plasmodio. Come si trasmette la malaria? La zanzara femmina punge un uomo infettato e ingerisce il sangue che contiene i gametociti del Plasmodium. Il plasmodio si sviluppa all'interno della zanzara. La zanzara punge un uomo e gli inietta gli sporozoi del Plasmodium. I parassiti invadono i globuli rossi causando la malaria e rendendo la persona infetta un nuovo "serbatoio di infezione".

Altro tipo di parassitismo è il **controllo esterno** che è la forma più sofisticata di parassitismo che esiste attualmente sulla terra. Si è venuti a conoscenza del controllo esterno osservando lo strano caso del grillo "nuotatore". I grilli non nuotano, ma se infettati dal verme parassita *Spinochordodes tellinii*, sono spinti a farlo. Dopo essere cresciuto dentro il corpo del grillo, il verme costringerà la sua vittima a gettarsi inspiegabilmente in acqua, successivamente esso emergerà dal corpo ed entrerà nella fase acquatica del suo ciclo vitale. È definito controllo esterno perché il parassita fa fare ciò che vuole al suo ospite e lo istiga ad un comportamento diverso rispetto quelli che ha normalmente.

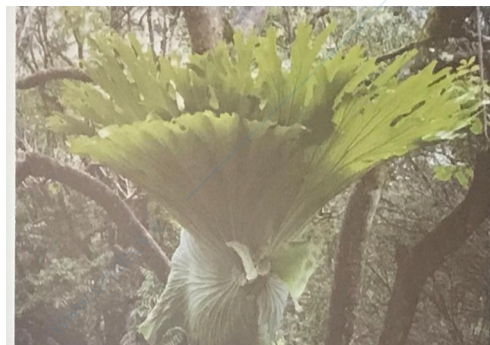
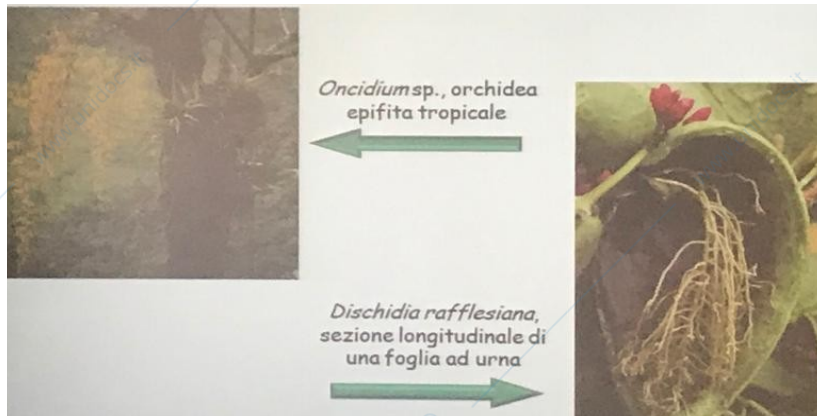
Altro esempio di controllo esterno: una vespa catturata da un fungo parassita (*Ophiocordyceps cononoti*) del Brasile. Una volta infettato il corpo ospite, il fungo arriva al cervello e spinge l'insetto ad ancorarsi verso luoghi stabili dove può crescerci e moltiplicarsi. Il fungo rilascia delle spore capaci di infettare altri insetti sani che si avvicinano.

Può un parassita che cambia il comportamento di un topo alterare anche il modo di agire dell'uomo?

Certo che sì, perché se il parassita arriva al cervello di un topo o di un grillo è capace di arrivare anche al cervello dell'uomo. Il protozoo *Toxoplasma gondii* si riproduce in felini e roditori. Quando infetta i topi, esso arriva nel cervello delle vittime rendendole più temerarie e meno spaventate dai gatti. Il gatto, nutrendosi del roditore infetto, può reinfettarsi con il protozoo.

Alcuni virus neurotropi, realmente esistenti, come **la rabbia**, possono rappresentare un pericolo. La rabbia si trasmette con il morso. Entrato nel corpo, il virus si sposta direttamente nel cervello e spinge l'infettato a mordere altre persone a sua volta. Ancora oggi nella maggior parte delle zone del mondo la rabbia non è un virus che si può debellare e i soggetti particolarmente a rischio sono i veterinari o chi lavora con i pipistrelli poiché questi sono uno dei veicoli principali della rabbia. I virus neurotropi sono quindi i più pericolosi perché sono imprevedibili. C'è chi dice che la nostra curva di crescita esponenziale che dovrebbe essere sigmoide potrebbe avere un crollo dovuto proprio a questi virus perché questi sono particolarmente diffusi nelle sovrappopolazioni (meno condizioni igieniche sanitarie, meno controlli etc).

Anche le piante vengono parassitate. Epifite: piante parassite dello spazio. Esse si ancorano ad altre piante mediante radici adesive lucifunghe.



L'immagine accanto mostra una specie di pianta che si dispone ad acquasantiera intorno agli alberi. Queste specie sono parassite dello spazio perché si hanno nelle parti più alte dell'albero per cercare più luce. Questo è un tipo di parassita che però non fa male perché non distrugge l'albero.

Altro tipo di interazione:

IL COMMENSALISMO

Il commensalismo è un tipo semplice di interazione positiva, in cui una specie trae vantaggio e l'altra non è influenzata. Questa interazione è comune tra i piccoli organismi mobili e quelli sessili più grandi. Ad esempio in un sistema acquatico, le tane dei vermi e molluschi sono occupate da ospiti vari (pesci, anellidi marini, crostacei) che si cibano dei residui alimentari dell'ospite e usano il suo habitat come riparo, ma che non hanno su di esso alcuna azione. In questa interazione non obbligatoria una specie approfitta del nutrimento o degli scarti dell'altra. Un esempio di commensalismo sono le bufaghe (uccelli) che mangiano gli insetti che sono presenti all'interno delle orecchie dell'antilope. Questo potrebbe essere un caso di proto-cooperazione però attenzione perché inizia così però può succedere che becca

oggi e becca domani e alla fine si mangia anche l'orecchio dell'animale. Altro esempio di commensalismo sono gli uccelli che camminano seguendo il branco di elefanti. Che differenza c'è tra proto-cooperazione e commensalismo? La differenza è sottile però c'è, perché la proto-cooperazione è un' interazione +/+, mentre il commensalismo è +/0.

Gli organismi commensali sono meno specifici verso l'ospite rispetto ai parassiti, ma alcuni si associano solo con una specie. A volte il commensalismo può sfociare in parassitismo.

Vediamo un esempio di epifitismo che sfocia in parassitismo. Le epifite normalmente non danneggiano l'ospite, però può succedere che crescono in maniera talmente furiosa da causare addirittura la morte dell'ospite. Questo è quello che succede nella foresta tropicale quando abbiamo di fronte la specie "fico strangolatore". Cosa fa questa specie? Si arrampica intorno al tronco dell'albero e lo fa morire. Il fico si attorciglia intorno al tronco per usarlo come "ascensore" per salire "ai piani alti" della foresta e prendere la luce. In questo movimento cresce sempre fino a stritolare l'altro partner.

MECCANISMI DI DIFESA DELLE PREDE OVVERO ADATTAMENTI ALLA PREDAZIONE

Abbiamo detto che la predazione necessita di un tipo di controllo +/- se parliamo di un individuo e +/+ se guardo la popolazione. **Tra preda e predatore si instaura una "coevoluzione"**: si evolve la preda, si evolve il predatore; quindi c'è un' escalation dei sistemi di difesa-offesa. Questa teoria della coevoluzione fu formulata per la prima volta nel 1973 da un biologo e fu chiamata "ipotesi della regina rossa". La regina rossa è uno dei personaggi chiave di Alice nel paese delle meraviglie e ancora di più nell'altro libro successivo "Alice attraversa lo specchio". Quest' ipotesi della regina rossa, su cui poi gli ecologi e gli zoologi hanno formulato tutte le teorie evoluzionistiche originano proprio da un passo del libro "Alice attraversa lo specchio". C'è un punto del libro in cui Alice chiede alla regina rossa: "perché nonostante io corra il mondo intorno a me rimane fermo?" e la regina risponde dicendo "qui devi correre due volte più veloce per rimanere nello stesso posto". Da questo scambio di battute tra Alice e la regina rossa è stata formulata una delle teorie più accreditate e importanti per quanto riguarda la biologia. Traduciamola in termini biologici: la preda deve evolvere mezzi per sfuggire al predatore e conseguentemente la preda deve continuare a correre per rimanere dov' era. Quest' ipotesi della regina rossa prevede un'interazione organismo-organismo che preme, da un punto di vista evolutivo, sugli organismi stessi (preda e predatore). Oltre l'ipotesi della regina Giovanna ne esiste anche un'altra (la teoria dell' evoluzione di Darwin) che dice: l'animale si adatta all' ambiente e lo modifica, a sua volta l'ambiente modifica l' animale (teoria ancora tutt' ora valida). Abbiamo quindi due tipologie per considerare come e perché un animale, una popolazione o un individuo si adatta al proprio ambiente. Da una parte c'è l'ipotesi che tiene conto dell' interazione fattori abiotici-organismo (nell' uno e nell' altro senso) e dall' altra c'è l' ipotesi della regina rossa che tiene conto dell' interazione organismo-organismo.



Facciamo riferimento all'immagine sovrastante. In basso a destra ho una raganella che assume lo stesso colore della foglia e in basso a sinistra ho un nudobranchio che spicca su un tappeto di coralli (due casi completamente opposti). Caso sopra: amantide religiosa. L'amantide è all'interno di un fiore di ciclamino e in questo caso va un po' ad imitare il picciolo del fiore. Questi sono tre sistemi diversi attraverso cui la preda cerca in qualche modo di sfuggire al predatore, a volte ci riesce e a volte no. Gli adattamenti più frequenti e diffusi contro la predazione sono riconducibili a differenti strategie: **criptismo**; **aposematismo** e **mimetismo**. Facendo sempre riferimento all'immagine sovrastante non vedo nessun caso di mimetismo, c'è sicuramente aposematismo e criptismo. L'aposematismo è quando un animale non appetibile (tossico) avverte il predatore che è tossico; in questo caso quindi la preda vuole essere riconosciuta e non si nasconde perché sta dicendo al predatore "se in questo momento mi mangi muori". Nell'immagine sovrastante è il nudobranchio a rappresentare un esempio di aposematismo. La raganella che imita il substrato è invece un esempio di criptismo e più nello specifico è un esempio di omocromia (stesso colore). Il caso dell'amantide è sempre criptismo ma è un'omorfia (viene imitata la forma, in parte del fiore).

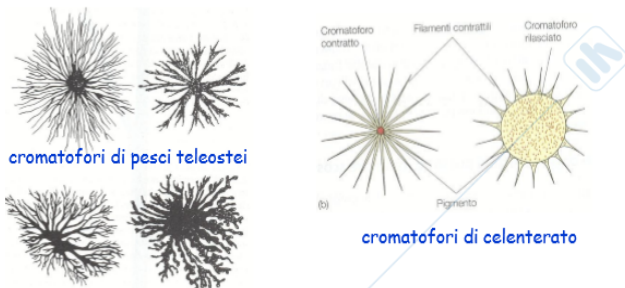
CRIPTISMO

Indica la presenza, in una specie, di particolari caratteristiche genetiche, comportamentali e morfologiche che la rendono difficilmente individuabile da parte di potenziali predatori (omocromia, omorfia, mascheramento).

OMOCROMIA = imitazione del colore del substrato (raganella)

OMORFIA = imitazione della forma del substrato (amantide)

Il criptismo quindi è quando l'animale scriptandosi va in qualche modo a confondersi con il substrato dove si trova. In questo modo la preda si nasconde dal predatore.



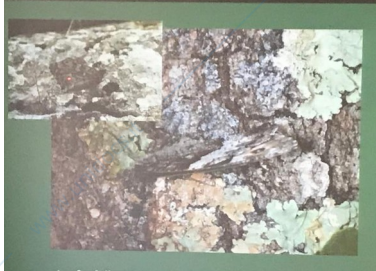
La colorazione verde di molti insetti dipende dalla presenza di pigmenti vegetali. In altri casi (cavallette), i pigmenti sono sintetizzati dall'organismo. In molti pesci, molluschi cefalopodi, crostacei, anfibi e rettili, i pigmenti sono contenuti in cellule specializzate dette **CROMATOFORI**. Il cambiamento di colore dell'animale è istantaneo. I cromatofori presentano al centro

il pigmento di colore e sono molto simili alle cellule nervose in quanto si contraggono e si dilatano ripetutamente. Nel fare questo fanno uscire il colore e lo riassorbono.



Un altro esempio particolare è il cavalluccio tropicale (*Hippocampus bargibanti*). In questo caso abbiamo esempi di omocromia e omorfia perché il cavalluccio assume lo stesso colore e la stessa forma del corallo.

Altro esempio è la farfalla *Hipparchia fagi* (immagine sottostante)

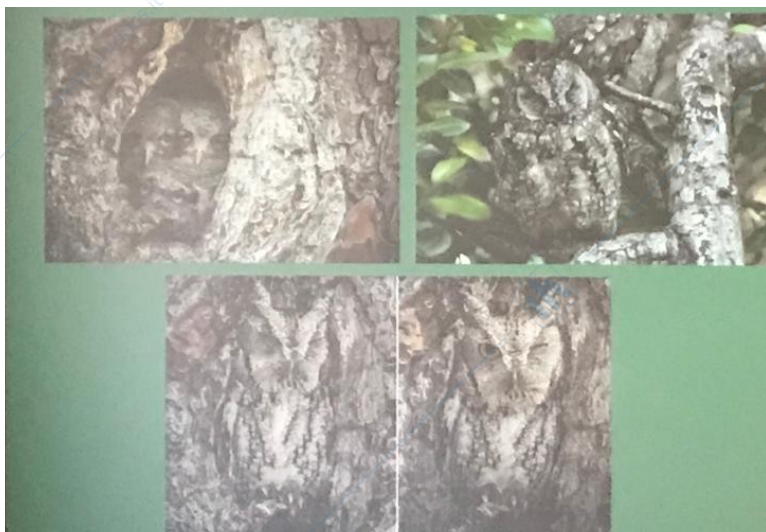


Ancora altri esempi di omorfia (immagine sottostante). In questo caso abbiamo che alcune farfalle imitano le foglie (foglie secche di quercia o di altre piante)



La farfalla *Kallima inachus* che imita una foglia

La farfalla *Gastropacha quercifolia* che imita una foglia secca di quercia



L'immagine di lato a sinistra mostra un esempio di criptismo incredibile. Il gufo è predatore in alcuni ecosistemi e in altri occupa una posizione intermedia nella catena alimentare. Nel caso in cui occupa una posizione intermedia il criptismo per difendersi è fondamentale. Il criptismo del gufo si manifesta nelle sue penne che riprendono il colore del tronco dell'albero dove sono collocati.

In molti casi il mimetismo criptico dipende dalla capacità dell'animale di realizzare cambiamenti di colorazione. I cambiamenti di colorazione possono realizzarsi istantaneamente o gradatamente e possono essere:

- **correlati con il ciclo vitale**

- **correlati con l'alternarsi giorno-notte** (assumono di giorno una colorazione e di notte un'altra per non essere visibili)

- **correlati con le stagioni**

Molte farfalle notturne presentano:

Allo stadio larvale □ somiglianza con foglie e rametti della pianta su cui soggiornano e di cui si nutrono (omorfia)

Allo stadio di pupa □ colorazione del substrato (omocromia)

Allo stadio adulto □ colorazione della corteccia degli alberi su cui posano durante il giorno

Quindi le farfalle cambiano il proprio tipo di mimetismo criptico a seconda dello stadio di crescita.

Altri casi come la farfalla:

Molte specie di molluschi, crostacei e pesci, sono trasparenti allo stadio larvale, e variamente pigmentati da adulti



il mollusco *Aplysia punctata*, cambia colore dalle acque profonde a quelle superficiali e a seconda dei colori delle diverse specie di alghe con cui convive

Nel caso del polpo invece lo stadio larvale è trasparente perché è quello più suscettibile alla predazione, quando sarà grande invece svilupperà cromatofori e quindi cambierà colore a seconda del substrato (le tecniche cambiano). Le popolazioni di polpo sono resilienti ma non resistenti.

Cambiamenti stagionali di colore:

La colorazione di alcune specie cambia anche in base alla stagionalità, oltre che dal giorno e la notte. Esempi di specie che cambiano colore a seconda della stagione sono l'ermellino, la mustela erminia e la sogliola. Cosa può spiegare la muta da parte degli animali? Innanzitutto le condizioni ambientali, perché spesso volte le condizioni ambientali caldo-freddo fanno sì che l'ermellino cresca una pelliccia bianca sotto quella nera estiva, con il tempo la pelliccia scura si consuma e resta solo quella bianca. La lepre invece fa più mute all'anno a seconda dello stimolo ambientale del fotoperiodo. Gli stimoli quindi sono vari, ma comunque il risultato è sempre lo stesso (cambiamenti della pelliccia in questo caso, che aiutano l'animale un po' ad isolarlo dal freddo o dal caldo, ma anche a non essere riconosciuti dal predatore).

I cambiamenti di colore possono essere morfologici o fisiologici. Quando è morfologico è lento, sono tipici di specie che non sono veloci nei movimenti e che spesso volte sono attaccate al substrato. I cambiamenti di tipo fisiologico sono invece rapidi e reversibili (es. polpo. Quando tocchiamo un polpo questo sentendosi

minacciato cambia colore istantaneamente, quando non si sente più minacciato reverte il colore a quello che era prima. Questi cambiamenti fisiologici sono quindi reversibili in quanto appena termina la situazione di disagio il polpo torna al colore di non pericolo, si verificano quindi più volte durante la vita dell'animale).

Una particolarità di alcuni animali è **L'EFFETTO PETER PAN**. L'effetto Peter Pan o effetto dell'ombra opposta è un adattamento molto diffuso, spesso associato all'omocromia, che consiste nello sfruttare il fenomeno per cui un corpo che venga illuminato intensamente appare più chiaro dalla parte illuminata e più scuro dalla parte opposta, in ombra. In molti bruchi e numerosi vertebrati l'ombra viene minimizzata mediante una colorazione più chiara della parte ventrale e più scura di quella dorsale.



L'effetto Peter Pan è tipico di molti pesci ed alcuni uccelli (sgombro; tonno; pesce spada e pinguino).

Facciamo un esempio. Se guardo un pesce dall'alto io guardo praticamente verso il fondo, quindi il pesce lo vedo scuro sopra e bianco sotto; se guardo invece dal basso verso l'alto vedrò la luce del sole per cui la parte bianca del corpo si confonde con la luce che viene da sopra. Questo è quindi un effetto per mascherarsi in qualche modo ed è tipico dei grandi nuotatori.

Nella figura sottostante è invece messo in evidenza il camouflage. Il **camouflage** è una tecnica di mimetizzazione nella quale l'animale assume esternamente il colore dell'ambiente che lo circonda per rendersi invisibile agli occhi dei predatori. L'animale imitando i colori dell'ambiente si rende invisibile e del tutto integrato. Ad un occhio disattento può sfuggire la sua presenza



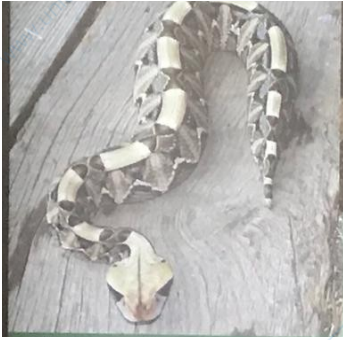
COLORAZIONI DISRUPTIVE:



In questo caso il mantello è interrotto da striature verticali e longitudinali che, interrompendo la continuità del mantello, è come se criptassero l'animale nel suo sottobosco. N.B. Di solito le strisce corrono trasversalmente nelle specie che vivono in

luoghi ghiaiosi e longitudinalmente in quelle che frequentano luoghi erbosi.

SOMATOLISI:



In questo caso il mantello è spezzato perché spezzando il mantello l'animale si nasconde meglio. La vipera del Gabon è l'esempio più studiato di somatolisi. Quando questo animale si snoda nel sottobosco non si capisce dove sono gli occhi e questa è la cosa più importante perché l'animale confonde la preda che non capisce dove è la testa che è quella che attacca.

MASCHERAMENTO:



Si verifica quando un animale viene mascherato da un altro animale. Esempi: paguro con attinie o granchio e patella con carapace e conchiglia nascosti da alga.

MASCHERE OCULARI:



Queste macchie presenti sul corpo confondono il predatore perché non capisce se l'occhio è quello piccolo o quello grande. Chiaramente occhio grande animale più grande.

APOSEMATISMO:

Le prede potenziali che abbiano acquisito una qualche forma di difesa contro i predatori traggono vantaggio dall'avvertirli di tali difese con segnali appropriati quali colorazioni vistose e contrastanti. La colorazione aposematica (o livrea ammonitrice) è un esempio di difesa degli organismi inappetibili (incommestibili) contro i predatori. Grazie alla colorazione aposematica, le prede vengono riconosciute come inappetibili dai predatori. Un esempio è la larva di farfalla ninfalide della Malesia, la quale larva brucia su specie di Passiflora contenenti alcaloidi.

MIMETISMO:

Imitazione a scopo protettivo di un organismo da parte di un altro di specie diversa. Può essere di 3 tipi diversi:

1. **MIMETISMO BATESIANO:** imitazione di un modello inappetibile per i predatori da parte di mimi appetibili, spesso filogeneticamente lontani (molto diffuso). Ad esempio un dittero o un lepidottero sono animali non pericolosi e fungono da mimi, ossia imitano la forma del corpo della vespa (pericolosa e presa come modello) affinché il predatore li scambi per una vespa e così non vengono predati. Un altro esempio è dato dai ditteri che imitano i modelli di imenotteri aculeati.

Esempio congiunto di Aposematismo, mimetismo e criptismo in due farfalle: il monarca (*Danaus plexippus*) e *Limenitis archippus*. L'adulto appetibile di *Limenitis archippus* imita la colorazione aposematica dell'adulto inappetibile del monarca. Inoltre, il bruco della farfalla monarca è anch'esso inappetibile e aposematico; il bruco di *Limenitis archippus* è mascherato come un escremento di uccello.

2. **MIMETISMO MULLERIANO:** un modello inappetibile imita un altro modello sempre inappetibile e ciò risulta vantaggioso perché le prede vengono tutte evitate dai predatori, cioè il predatore sperimenta una sola specie per imparare ad evitare tutte le altre. Se più specie si somigliano al punto da essere confuse dai predatori, diminuirà il tributo pagato da ciascuna di esse alla predazione. Un esempio è dato da due specie di serpente corallo, entrambe inappetibili ed uno imita l'altro, per cui, il predatore predando o l'uno o l'altro va sempre incontro ad intossicazione o morte; di conseguenza, nel corso della vita, il predatore sperimenta un solo serpente corallo evitando la predazione di altri serpenti simili in forma e dimensione. Questo mimetismo è molto diffuso.
3. **MIMETISMO MERTESIANO:** questo mimetismo vale soltanto per i serpenti corallo e si chiama mertensiano dal nome dell'erpetologo R. Mertens che per primo condusse ricerche sui serpenti corallo. Egli scoprì che esistono 2 diverse specie di serpenti corallo: elapidi (mortalità) e colubridi (non mortali). In questo tipo di mimetismo i serpenti corallo coinvolti sono 3: un modello che è moderatamente velenoso, quindi può provocare o meno la morte del predatore; e due mimi, di cui uno è mortale e l'altro appetibile. Nel mertesiano accade che il mimo mortale e quello appetibile imitano il serpente moderatamente velenoso. Quindi possiamo dire che la generazione successiva di predatori impara ad evitare le prede.

ALTRI ADATTAMENTI ALLA PREDAZIONE

- 1) **COLORAZIONI FLASH:** la preda presenta una forte colorazione tanto da spaventare il predatore, ad esempio le falene, quando si sentono minacciate aprono le ali mostrando colori sgargianti, quindi abbagliano il predatore.
- 2) **FALSI OCCHI:** alcune farfalle come *Agila Tau* presentano delle macchie sulle ali che vengono scambiate per occhi dal predatore, il quale, quindi, pensa di avere di fronte una testa molto più grande. Quindi, la preda distoglie l'attenzione del predatore dalla sua vera testa, facendogli anche credere di trovarsi di fronte ad una preda molto più grande.
- 3) **ATTEGGIAMENTO TERRIFICO:** il bruco del lepidottero sfingide esibisce l'aspetto di un serpente, cioè somiglia alla testa triangolare di una vipera. Questo bruco, quando si sente minacciato dall'insetto predatore, si rovescia e punta la testa verso il predatore, somigliando così ad una vipera perché, rovesciandosi espone delle macchie presenti sull'addome. In questo caso si ha

anche l'effetto peter-pan in quanto l'addome del bruco è scuro e la parte opposta è chiara. L'atteggiamento terrifico si riscontra anche nel gatto attraverso l'esposizione di orecchie abbassate, schiena e pelo irto. Un altro esempio è dato dal rospo comune che assume grandi dimensioni gonfiandosi per scoraggiare il predatore.

- 4) **CORAZZE PROTETTIVE:** alcune prede presentano delle vere e proprie armature protettive per difendersi dai predatori, basti pensare al carapace di *Chelonia midas* (testuggine) o all'Armadillo che possiede una tipica corazza sul dorso.
- 5) **TANATOSI:** è un comportamento messo in atto da alcuni animali, che implica l'irrigidimento totale del corpo in seguito ad una situazione di pericolo o come semplice reazione da contatto, al fine di simulare uno stato di morte. In genere si tratta di un comportamento difensivo: l'animale finge di essere morto, come ultima risorsa, quando il **predatore** gli impedisce ogni altra via di fuga. Con tale atteggiamento la preda scoraggia il predatore: molti animali infatti non mangiano cadaveri la cui carne potrebbe essere in putrefazione, risultando tossica. Il predatore quindi, si allontana, e la preda scappa velocemente al sicuro. Questa difesa è tipica dell'Opossum, marsupiale americano.

INQUINAMENTO

Gli organismi animali e vegetali possono essere utilizzati, dall'uomo, come sentinelle per captare il grado di inquinamento che c'è nell'ecosistema. Le sentinelle dell'inquinamento, infatti, avvertono del pericolo quando esso si manifesta ed è visibile nell'ecosistema oppure avvertono del pericolo perché esse stesse sono le prime ad essere esposte al pericolo, per cui mostrano dei segni visibili. Nell'ecosistema è importante avere le sentinelle perché spesso volte l'aria, l'acqua, il suolo, cioè tutte le matrici biologiche sono inquinate e hanno un grado di inquinamento che non è sempre visibile e non sempre si può risolvere. Il monitoraggio, infatti, serve proprio a capire a che stato di inquinamento si trova l'aria, l'acqua, il suolo e tutte le matrici inorganiche che costituiscono l'ecosistema. L'inquinante è una sostanza che altera l'equilibrio all'interno di un ecosistema. Non si deve confondere il concetto di inquinante con il concetto di tossicità. Non necessariamente si può osservare un effetto tossico in seguito ad esposizione all'inquinante, e l'inquinante non è riferito ad una sola categoria di organismi (ad esempio i vegetali). Un ecosistema è costituito da una componente vivente e da una non vivente e c'è relazione tra le due componenti. L'ecosistema si trova in una situazione apparentemente stabile, cioè i cambiamenti avvengono lentamente. Quando all'interno di un ecosistema è inserita una sostanza che altera lo stato di equilibrio, questa sostanza si definisce inquinante. L'inquinante non è necessariamente una sostanza che non esiste nell'ecosistema, può essere anche una sostanza che normalmente è presente nell'ecosistema, ma quando supera certi valori di concentrazione può esercitare un effetto negativo sulla componente vivente dell'ecosistema considerato. Le sostanze inquinanti più comuni sono la CO₂, i solfati, i fosfati, il petrolio, i metalli pesanti, i pesticidi, i composti di sintesi, etc. I composti di sintesi e i pesticidi rappresentano inquinanti che sono esterni all'ecosistema, e non possono essere degradati da enzimi. Questi ultimi, quindi, anche in concentrazioni basse possono causare effetti negativi nell'ecosistema. Gli inquinanti possono essere immessi in qualsiasi comparto ambientale: idrosfera,

atmosfera, litosfera e biosfera. Una volta che gli inquinanti vengono immessi in un certo comparto, questi possono reagire con composti presenti in quel determinato comparto. Si definiscono inquinanti primari quelli che vengono immessi nel comparto, e inquinanti secondari, gli inquinanti prodotti dalla reazione degli inquinanti primari con alcune molecole presenti nel comparto (ad esempio possono reagire con il vapore acqueo). Esempi di inquinanti primari: SO₂, CO₂, gas di scarico etc. Esempi di inquinanti secondari: l'ozono (O₃)

ARIA

L'aria è il compartimento ambientale in cui vengono immesse numerose specie chimiche inquinanti, le quali vengono trasportate a breve o a lunga distanza e depositate sul terreno, sulla vegetazione, in acqua. Nelle aree urbane ed industriali le immissioni d'inquinanti raggiungono valori elevati compromettendo la qualità dell'aria (inquinamento antropico), per cui è importante il monitoraggio dell'aria. Monitorare la qualità dell'aria significa misurare la quantità di inquinanti emessi in aria dalle varie attività umane e dalle caratteristiche geografiche, climatiche e meteorologiche che caratterizzano il territorio e tale monitoraggio serve per una gestione della qualità dell'aria in modo da raggiungere il "rispetto dei limiti" (un esempio di rispetto dei limiti è la zona ZTL, zona a traffico limitato per ridurre l'emissione di inquinanti). La qualità dell'aria può essere monitorata attraverso diversi indici:

- 1) Dati di inquinamento, come presenza di rifiuti nell'area urbana;
- 2) Effetti sugli organismi;
- 3) Effetti sugli ecosistemi.

L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO, quindi determina una serie di conseguenze, una serie di risposte nell'organismo che riguardano: modificazioni al livello morfologico, biochimico e fisiologico (danno visibile); accumulo di sostanze inquinanti nei tessuti perché alcuni organismi tollerano sostanze inquinanti, ma li accumulano (l'uomo non è tra questi); inoltre, le forme di inquinamento più forti sono quelle che causano deterioramento dell'ecosistema e queste forme di inquinamento si manifestano, col tempo, con la variazione della composizione faunistica e floristica di un dato ambiente. Ad esempio in quell'ambiente hanno vissuto alcuni tipi di popolazioni, che dopo 4 o 5 anni non vi sono più e ciò vuol dire che l'ambiente è cambiato e vanno via marcatori di salubrità ambientale come le api e ciò fa capire che l'ambiente sta cambiando in modo non positivo. Dunque, per capire se nell'aria ci sono forme di inquinamento si tiene conto di queste caratteristiche.

FONTI DI EMISSIONE DEGLI INQUINANTI: Le fonti di emissione degli inquinanti possono essere fonti antropiche e fonti naturali. Tra le fonti naturali ci sono gli incendi e le eruzioni vulcaniche. Tra le fonti antropiche ci sono le industrie, le automobili e tutti quei processi che prevedono l'utilizzo di combustibili fossili e che emettono in atmosfera una serie di composti che contengono molecole che possono dare effetti negativi sugli organismi. Gli inquinanti possono essere emessi in un certo comparto ambientale e manifestare l'effetto nelle immediate vicinanze delle fonti di emissione oppure possono spostarsi, raggiungere altre zone e manifestare l'effetto lontano dal luogo di emissione. Questo dipende dalla forma chimica sotto cui l'inquinante viene emesso (se è solubile, se è in forma gassosa o se è sotto forma di particolato). Gli inquinanti emessi in forma gassosa sono molto leggeri e seguono il movimento delle masse d'aria, spostandosi velocemente dal luogo di emissione. In questo caso si parla di inquinamento diffuso. Si ha un inquinamento localizzato se si parla di particolato (PM_{2.5}, PM₅ e PM₁₀). PM sta per particolato e i numeri si riferiscono al diametro delle

particelle (espresso in micron). Il particolato sottile (PM2.5) può essere subito inalato dagli animali (dà problemi alle prime vie dell'apparato respiratorio) e facilmente assorbito dalle piante (attraverso gli stomi), mentre il particolato grossolano non viene assorbito direttamente e si sposta poco. Quando viene emesso particolato grossolano, generalmente, si deposita in prossimità del luogo di emissione. Se si emettono sostanze nell'aria, queste possono depositarsi per gravità (deposizioni secche) o mediante precipitazioni (deposizioni umide). Una volta arrivati al suolo possono percolare dalle acque di precipitazione e arrivare alle falde o volatilizzare e ritornare all'aria. Quindi una volta che, anche un solo comparto ambientale viene alterato, dal punto di vista chimico, le conseguenze si possono manifestare anche in tutti gli altri comparti (organismi compresi).

MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA² METODO

Partendo da un campione d'aria bisogna considerare le concentrazioni degli inquinanti più pericolosi ma anche delle polveri, infatti esiste un tipo di inquinamento legato al particolato dell'aria ed uno relativo ai microrganismi patogeni, a sostanze tossiche. Il monitoraggio della qualità dell'aria prevede due modalità di analisi e rilevamento e nessuna prevale sull'altra, anzi si preferisce utilizzare entrambe le tipologie per avere un miglior monitoraggio. **Abbiamo la modalità STRUMENTALE**, che si serve di particolari strumenti che indicano esattamente la concentrazione di tutti gli inquinanti presenti in atmosfera, ossia di metalli pesanti, di polveri; e **modalità BIOLOGICA**, ossia un tipo di monitoraggio legato all'organismo, il quale funge da sentinella e a differenza dello strumento, l'organismo esposto associa alla concentrazione di inquinante determinata con metodo strumentale, l'effetto di quella concentrazione di inquinante sull'organismo. Proprio per quest'ultimo motivo si preferisce accoppiare i due metodi e così possiamo determinare ad esempio, cosa succede all'organismo se si supera la quantità di piombo di circa 10 volte rispetto al limite di legge.

MONITORAGGIO STRUTTURALE (metodo fisico-chimico): monitoraggio delle sostanze chimiche viene effettuato tramite centraline collocate in punti strategici delle città. Le centraline rilevano costantemente (ogni minuto) i livelli di concentrazione degli inquinanti più nocivi (SO₂, CO, O₃) fornendo le informazioni in tempo reale. Lo svantaggio delle centraline risiede nel fatto che esse sono molto costose e sono molto poche all'interno di un'unica città rispetto all'aria che circola, quindi non sempre le centraline funzionano correttamente, per i costi, per mantenerle, perché fanno riferimento a un numero ristretto di inquinanti, perché danno informazioni raccolte in determinati punti specifici e non danno un quadro generale dell'inquinamento. E' necessario, quindi, ampliare il numero di osservazioni affiancando il monitoraggio strumentale a un monitoraggio biologico. Il monitoraggio biologico ha a sua volta degli svantaggi perché si dovrebbe conoscere, di quello che è presente in aria, quanto l'organismo monitore riesce ad assorbire. I vantaggi però, consistono nel fatto che si possono aumentare i punti di osservazione e, attraverso altri tipi di analisi, valutare gli effetti sulla biologia dell'organismo accumulatore. Per quanto concerne il monitoraggio strumentale, un esempio è dato dalla Centralina ARPA (Agenzia Regionale Protezione Ambiente). All'interno di queste centraline, non proprio a contatto con il suolo, vi sono una serie di sensoristiche particolari per captare l'inquinante, sensori per la temperatura, radiazione incidente, CO₂, per O₃ e così via. Al di sopra delle centraline possono essere collocate anche delle stazioni micrometeorologica che utilizzano il piranometro, cioè uno strumento che misura la radiazione incidente in W/m². Dunque, grazie a queste centraline possiamo dedurre se la qualità dell'aria è accettabile, inquinata, molto inquinata, parzialmente inquinata e così via e il vantaggio

delle centraline è che danno informazioni in tempo. Le misure effettuate dalle centraline si riferiscono di solito: ad un numero limitato di inquinanti, a pochissimi siti dell'aria in esame, a periodi brevi di misura.

MONITORAGGIO BIOLOGICO (biomonitoraggio): in questo tipo di monitoraggio gli organismi fungono da sentinelle, l'organismo esposto associa alla concentrazione di inquinante determinata con metodo strumentale, l'effetto di quella concentrazione di inquinante sull'organismo stesso. Gli indicatori, che nel caso di monitoraggio biologico sono organismi animali e vegetali, vengono utilizzati in molti campi: economico, medico, ambientale. Un indicatore è un segnale che consente di interpretare un fenomeno complesso, in cui sono presenti molte variabili, ma anche una misura che permette di capire, "a che punto si è" o "quanto si è distanti" dall'obiettivo (ad esempio se guardiamo la concentrazione di agenti tossici nell'indicatore, possiamo capire, se l'indicatore muore, a che dose di tossicità è morto; oppure, se sopravvive, possiamo rilevare a che dose di sostanza tossica iniziano ad insorgere i danni). Come detto prima, il biomonitoraggio non deve essere considerato alternativo, ma complementare al monitoraggio strumentale, infatti gli indicatori biologici, rispetto agli strumenti, danno altre informazioni: danni visibili, accumulo di inquinanti nei tessuti, effetti sui processi metabolici. Esistono due tipologie di sentinelle: il **bioindicatore** è un "organismo che indica", il **bioaccumulatore** è un "organismo che accumula".

BIOINDICATORE [≠] organismo vivente che indica se l'inquinante è presente o meno, quindi se è sensibile all'inquinante può morire. Quindi, i bioindicatori sono organismi, la cui presenza o assenza in un habitat, può far supporre (ma non è qualcosa di certo) che ci sia o non ci sia un determinato inquinante. Ad esempio i licheni, ampiamente utilizzati come bioindicatori dell'inquinamento dell'aria, possono vivere, e generalmente vivono, sulle cortecce degli alberi. Se sulle cortecce degli alberi di un certo ambiente (ad esempio una città) non si ritrova neanche un lichene, allora con molta probabilità si può affermare che quell'ambiente presenta degli inquinanti. Bisogna ad ogni modo considerare che i licheni non vivono ovunque, ma vivono in ambienti che possiedono un certo clima. Se la città presa in considerazione possiede un clima non favorevole per i licheni, il motivo per cui i licheni non sono presenti in quella città non è riferibile all'inquinamento, ma al clima. Questo discorso vale per tutti i bioindicatori, ed è necessario ricordare che i bioindicatori devono essere valutati tenendo conto di tutti questi altri fattori che li influenzano. Buoni bioindicatori sono le api che segnalano l'inquinamento da pesticidi mediante alta mortalità e accumulo di inquinanti nei tessuti (ricorda che il bioaccumulo NON è la biomagnificazione).

BIOACCUMULATORE [≠] organismo vivente che accumula l'inquinante nel tessuto ma non muore. A questo punto si può utilizzare la sua biomassa facendo determinazioni chimiche e cercando di valutare la concentrazione dell'inquinante. (Questo non si può fare con il bioindicatore). Un esempio di bioaccumulatore sono le cozze, sentinelle del bioaccumulo di piombo, per cui, molte volte, analizzando il tessuto delle cozze si può risalire al grado di inquinamento ambientale.

Gli organismi vegetali, più di quelli animali, vengono utilizzati come bioindicatori e bioaccumulatori, soprattutto perché sono sessili. In particolare, gli organismi vegetali vengono utilizzati come

- 1) **INDICATORI DI REAZIONE:** reagisce all'inquinante per elevata sensibilità verso esso, mostrando sintomi chiari e specifici già a basse concentrazioni. Es, muschi e licheni

- 2) **INDICATORI DI PRESENZA:** si trovano solo se NON c'è inquinamento, quindi la loro distribuzione spaziale è funzione del grado di inquinamento.
- 3) **ACCUMULATORI:** mostra elevata tolleranza al metallo pesante o altro inquinante, quindi accumulano inquinanti senza evidenti sintomi.

ACCUMULATORI

Organismi tolleranti che accumulano nei propri tessuti sostanze presenti nell'area senza mostrare danni = l'accumulatore NON muore. La concentrazione di un dato inquinante, misurata nell'organismo, fornisce una stima della deposizione dell'inquinante sulla foglia, tronco o radice che sia e molti accumulatori, poiché non muoiono ma vivono per tanti anni, permettono di fornire la memoria storica della quantità di inquinamento presente. ES: per biomonitorare la qualità dell'aria a Napoli si utilizza il leccio che ha foglie con emivita di 3\4 anni, per cui se si campiona una foglia che ha emivita di un anno, si ottiene l'accumulo dell'inquinante in quell'anno; se si campiona quella con emivita di 2 anni si ottiene l'accumulo dell'inquinante che si perpetra per due anni di continuo e così via; di conseguenza si ottiene la memoria storica di quello che succede all'inquinamento.

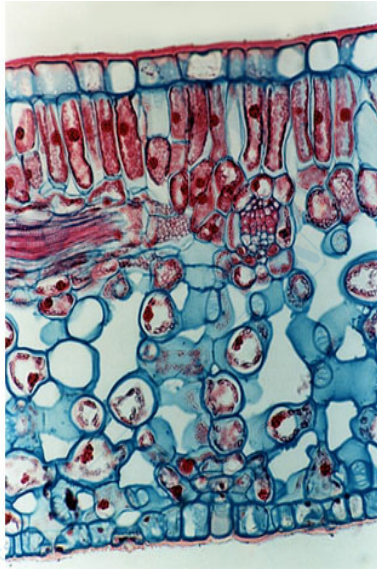
Dunque, il biomonitoraggio valuta la qualità dell'aria mediante lo studio dell'accumulo di contaminanti negli organismi. Esso può essere:

1. **ATTIVO:** i biomonitori vengono collocati nell'ambiente da esaminare (ad esempio si collocano piante strategiche che accumulano in varie zone della città di Napoli);
2. **PASSIVO:** si utilizzano organismi presenti sull'area studiare (ad esempio la quercia è un bioaccumulatore, per cui si fanno prelievi di foglie di quercia in tutta Napoli e si associa la quantità di inquinante presente nelle foglie al sito di campionamento, che può essere centro storico, vomero etc).

Quindi, la differenza consiste nel fatto che nel biomonitoraggio attivo i biomonitori devono essere portati e collocati dal ricercatore. Gli organismi più utilizzati sono licheni, muschi, piante vascolari. In particolare, i licheni sono buoni bioindicatori, di cui alcuni sono indicatori di reazione ed altri sono accumulatori, perché si tratta di organismi in grado di subire variazioni facilmente rilevabili e quantificabili delle loro condizioni naturali. Tuttavia, il lichene non può essere utilizzato tutto l'anno in quanto si trova in zone altamente umide, per cui non sono sempre esposti in maniera ubiquitaria dal momento che il bioindicatore deve essere distribuito in maniera uniforme sul territorio.

INQUINAMENTO ATMOSFERICO E PIANTE

Alcune forme di inquinamento che interessano sia l'atmosfera, sia il suolo sono: IPA, ossia gli idrocarburi policiclici aromatici, metalli pesanti, piogge acide, ozono O₃, SO₂. Ma come prende la pianta l'inquinante? La contaminazione da agenti inquinanti può raggiungere i tessuti vegetali delle piante terrestri per via diretta attraverso l'aria (stomi) o indiretta attraverso il suolo (assorbimento radicale). Gli inquinanti in fase gassosa possono accumularsi nella foglia per passaggio attraverso gli stomi o per diffusione passiva attraverso la cuticola e le foglie sono l'organo più esposto e vulnerabile all'azione degli inquinanti dell'aria in quanto sede degli scambi gassosi.



□ sezione trasversale di una foglia, cioè mesofillo, dove si distingue il tessuto a palizzata (sopra) e lacunoso (sotto), che costituiscono il parenchima fotosintetico. L'inquinante, entrato attraverso gli stomi, si scioglie nel liquido intercellulare che permea le pareti delle cellule del mesofillo. Quindi a questo punto l'inquinante si può accumulare in concentrazioni tossiche nel mesofillo. **Ma come fa il bioindicatore a non morire?** La quantità tossica del metallo va ad accumularsi in zone non vitali per quell'organismo; invece, per gli indicatori che muoiono, accade che l'inquinante favorisce la formazione delle specie ROS che vanno a distruggere tutte le membrane cellulari.

METALLI PESANTI E LE PIANTE: la contaminazione da metalli pesanti è un problema ambientale a livello mondiale poiché riguarda non solo la vegetazione, ma anche fauna selvatica ed esseri umani. I termine metallo pesante, si riferisce a tutti gli elementi chimici metallici che hanno una densità relativamente alta (superiore a 5,0 g/cm³) e risultano tossici anche a basse concentrazioni. Risulta importante ricordare che:

- I metalli pesanti, appartengono ai cosiddetti "elementi in traccia", presenti nei suoli e nelle rocce della crosta terrestre in concentrazioni inferiori allo 0,1%;
- L'inquinamento da metallo pesante, è strettamente legato alle attività industriali e di combustione;
- I metalli pesanti non si degradano ma tendono ad accumularsi nell'ambiente provocando il fenomeno della "BIOACCUMULAZIONE".

I metalli pesanti possono entrare nei tessuti delle piante per via diretta (aria) ed indiretta (suolo), ma non entrano tutti allo stesso modo perché bisogna tener conto anche della valenza del metallo. Questi metalli provocano degli effetti tossici sui processi metabolici (che non sono letali per il bioaccumulatore in quanto esso non muore), che variano in funzione di:

- 1) Tipo di pianta: perché se la pianta è un accumulatore può resistere all'effetto tossico
- 2)Stadio di sviluppo: l'individuo giovane è più delicato rispetto all'adulto
- 3)Metallo coinvolto: non tutti i metalli hanno la stessa tossicità

Quindi, una volta penetrato, il metallo può accumularsi in vari tessuti vegetali, determinando effetti diversi; principalmente, si accumula nella foglia, nel fusto o nella radice. In particolare, nella foglia, i metalli pesanti danneggiano il sistema delle membrane fotosintetiche e le proteine ad esse associate. Particolarmente sensibile al danno da accumulo di metalli pesanti è la catena di trasporto degli elettroni.

Ricordiamo che alcune forme di inquinamento che interessano sia l'atmosfera, sia il suolo sono: IPA, ossia gli idrocarburi policiclici aromatici, metalli pesanti, piogge acide (inquinante secondario che si forma in troposfera ad opera di ossidi di azoto e ossidi di zolfo), ozono O₃ cattivo in troposfera, SO₂. La contaminazione da agenti inquinanti può raggiungere i tessuti vegetali delle piante terrestri per via diretta attraverso l'aria (stomi) o indiretta attraverso il suolo (assorbimento radicale). Quando l'inquinante

entra in contatto con la pianta superiore si possono verificare due situazioni diverse, cioè si distinguono due vie attraverso cui entrano gli inquinanti atmosferici ☐

1. **ADsorbimento:** è un assorbimento superficiale, per cui vi è accumulo di inquinante sulla superficie della foglia
2. **ABsorbimento:** accumulo dell'inquinante nei tessuti vegetali

Cosa succede quando, poi, l'inquinante è entrato nella pianta? Gli inquinanti attraversano gli stomi, penetrano nelle foglie e si sciolgono nel liquido intercellulare che circonda le pareti del mesofillo (visto nella

RICORDIAMO SEMPRE CHE BISOGNA DISTINGUERE IL BIOACCUMULO DALLA BIOMAGNIFICAZIONE ☐ il **bioaccumulo** si riferisce al singolo organismo, cioè indica l'aumento di concentrazione di un inquinante in un singolo organismo nel tempo, quindi è funzione sia del tempo sia dell'esposizione all'inquinante (più l'organismo è esposto all'inquinante e più esso cresce, maggiore sarà l'accumulo dell'inquinante nel tessuto). La **biomagnificazione**, invece, riguarda l'incremento della concentrazione dell'inquinante attraverso la catena alimentare, per cui la sostanza tossica può essere innocua per gli individui che si trovano alla base della piramide ecologica, ma può diventare letale per coloro che si trovano al vertice come i top predators.

INQUINAMENTO DA METALLI PESANTI E FOTOSINTESI

Come già detto, i metalli pesanti possono entrare nelle piante per adsorbimento, assorbimento (via diretta) o per via indiretta attraverso il suolo e, in ogni caso, entrano all'interno delle cellule. Vediamo ora cosa provocano in particolare alcuni di questi metalli ☐

- **Pb, Ni (piombo e nikel):** inibiscono l'attività del trasporto elettronico fotosintetico dal PSII al PSI
- **Cd (cadmio):** agisce nella fase oscura della fotosintesi, per cui inibisce la sintesi della clorofilla e la conduttanza stomatica, ossia il processo attraverso cui gli stomi conducono gli scambi gassosi, per cui bloccando la conduttanza non entra CO₂ e vapore acqueo e non esce vapore acqueo ed O₂. Bloccando la conduttanza si blocca, quindi, il processo di traspirazione ma si aumenta anche la temperatura fogliare a livelli tali da far saltare il sistema di aereazione della pianta. Quest'ultimo caso è importante proprio perché la pianta è eteroterma (temperatura corporea dipende dall'ambiente esterno), per cui bloccando la conduttanza la pianta non riesce più a regolare la temperatura.
- **Cu (rame):** provoca perossidazione dei lipidi di membrana e distrugge la clorofilla.
- **Hg (mercurio):** inibisce gli enzimi della fase luminosa ed oscura della fotosintesi come plastocianina e ferrodossina; Hg biomagnifica anche.

Come si fa a capire se un organismo vegetale sta accumulando metallo pesante? Facendo un'analisi al microscopio elettronico, sulla superficie di una foglia di leccio, ad esempio, si notano dei tricomi stellati (peli) che intrappolano particolati. I tricomi stellati appaiono in maniera differente se la foglia è inquinata o meno, per cui dalla forma dei tricomi stellati si può capire se la foglia è inquinata o meno.

CASO STUDIO: Valutazione del contenuto di metalli pesanti in foglie di Leccio in 5 diversi siti urbani di Napoli

Questo è un esempio di biomonitoraggio passivo perché come biomonitori sono stati utilizzati organismi già presenti sull'area da studiare. Il campionamento di leccio è

stato effettuato in 5 zone diverse, ossia Orto Botanico, Piazza Carlo III, Bosco di Capodimonte, Via Miano, Giardini Iolanda per identificare il grado di inquinamento da metalli pesanti. L'analisi è stata effettuata sulle foglie considerando il cambiamento della forma, parametri che riguardano la fotosintesi, caratteristiche fogliari intrinseche della specie ed infine, la quantità di metallo presente nel tessuto. Le zone campionate sono state suddivise in strade e parchi urbani: nei parchi i metalli pesanti sono più bassi rispetto alle strade ovviamente ma per identificare davvero il grado di inquinamento è stata fatta la differenza, su ogni foglia, dell'assorbimento e dell'adsorbimento. Per fare ciò le foglie sono state lavate e così facendo si abbassa la quantità del metallo e ciò accade sia nelle strade, sia nei parchi perché si tratta di metallo accumulato sulla superficie; tuttavia, nelle foglie lavate vi è anche una quantità di inquinante presente all'interno del tessuto. Tutte le aree più inquinate sono soggette ad un abbassamento delle caratteristiche fogliari perché la fotosintesi non funziona alla massima efficienza in quanto l'ATP ed il NADPH non sono utilizzati per produrre carboidrato ma per produrre enzimi che vanno a contrastare i metalli pesanti, per cui il leccio è un organismo K-stratega, sceglie di resistere. Inoltre, è stato dimostrato che se il metallo pesante danneggia l'apparato fotosintetico, senza distruggerlo, vi è un incremento di clorofilla e carotenoidi anziché esserci una riduzione. **Ma come mai i pigmenti sono di più in luoghi inquinati?** Questo fenomeno non è casuale, ma davvero accade, per cui i pigmenti aumentano nel leccio, con l'aumentare del grado di inquinamento, aumentano quindi nelle zone più inquinate di Napoli. Questo fenomeno accade semplicemente perché l'inquinante, quando non danneggia il tessuto fotosintetico, ma rimane sulla superficie della foglia fa sì che la pianta si comporti come una foglia d'ombra, cioè la pianta è ombreggiata dal particolato atmosferico, per cui produce più pigmenti fotosintetici per ottimizzare la poca luce che arriva a causa del pulviscolo che fa da ombra. Dunque, la foglia del leccio, quando è molto inquinata a livello superficiale mette in atto un meccanismo di evitazione dell'ombra.

INQUINAMENTO DOVUTO A PIOGGE ACIDE.

La pioggia acida è un inquinante secondario che si forma in troposfera a partire da ossidi di azoto e zolfo che si combinano con il vapore acqueo atmosferico e formano acidi forti, ossia acido nitrico ed acido solforico. Questo tipo di inquinamento è molto frequente in Svezia, in Norvegia dove fa molto freddo anche perché i ritmi di crescita delle piante sono molto lenti. Le piogge acide possono avere effetti diretti come compromissione degli scambi gassosi, quindi della fotosintesi e poi declino della produttività come conseguenza (l'effetto diretto, quindi, si ha quando la pioggia acida cade direttamente sul tessuto vegetale e lo brucia); viceversa, l'effetto indiretto si ha quando la pioggia cade sul suolo e lo acidifica. In tal caso, l'abbassamento del pH mobilita l'alluminio del suolo con gravi intossicazioni per fauna e flora.

CONTAMINAZIONE DA ANIDRIDE SOLFOROSA SO₂ (assorbimento per via stomatica).

Effetti Fitotossici della SO₂

Danno acuto: Esposizioni brevi ad elevate concentrazioni. Deriva dalla rapida plasmolisi delle cellule del tessuto a palizzata e lacunoso. Porta a NECROSI. Danno IRREVERSIBILE.

Danno cronico: Esposizioni per lunghi periodi a concentrazioni moderatamente alte. Porta decremento della produttività, senescenza precoce e CLOROSI. Può essere REVERSIBILE.

Danno non visibile: Esposizioni a concentrazioni inquinanti relativamente basse. Porta decremento della produttività.



Lolium perenne

Ma quando la SO₂ è pericolosa anche per l'uomo? 1ppb di SO₂ può trovarsi nelle zone remote, non inquinate; nelle aree rurali, cioè quelle adibite al pascolo e all'agricoltura vi è un massimo di 30 ppb di SO₂; nelle aree contaminate, dove si trova l'uomo, la SO₂ può assumere valori da 30-200 ppb, quantità deleterie. Tra gli effetti più noti vi è la clorosi (accentuata se vi è anche O₃) e riduzione dell'accrescimento radicale che causa cambiamenti nell'allocazione del carbonio.

O₃ troposferico - ozono cattivo

Per formare l'O₃ troposferico c'è bisogno dell'energia luminosa per rompere il legame del diossido di azoto, presente in atmosfera come inquinante o come prodotto del ciclo dell'azoto. Come si forma O₃ troposferico □

1. NO₂ viene scisso dalla radiazione solare in monossido ed ossigeno atomico.



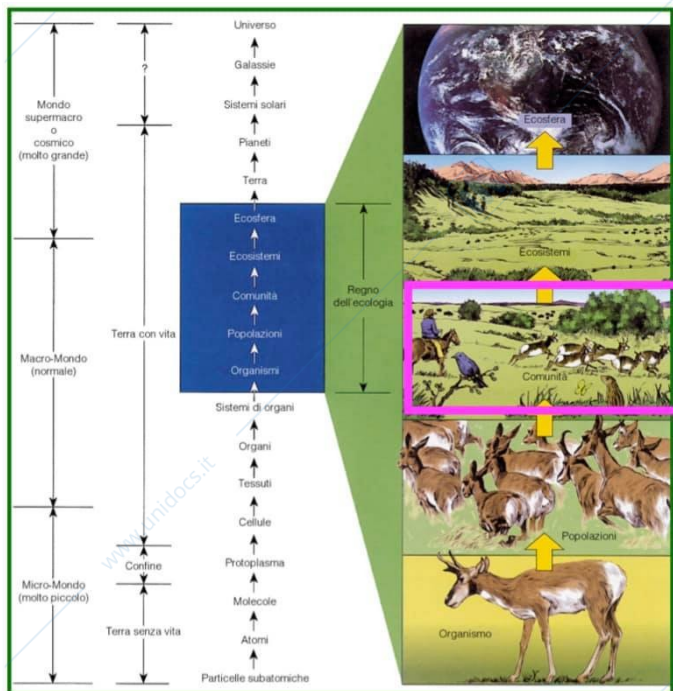
2. Ossigeno atomico reagisce istantaneamente con l'ossigeno atmosferico formando l'ozono. $\text{O} + \text{O}_2 = \text{O}_3$.

3. L'ozono reagisce con il monossido di azoto NO (prodotto di degradazione incompleta del processo di nitrificazione e denitrificazione) distruggendosi subito e riformando il diossido di azoto, che ripercorre il ciclo e l'ossigeno che serve a reiterare, ripetere il ciclo di formazione dell'ozono. $\text{O}_3 + \text{NO} = \text{NO}_2 + \text{O}_2$.



ES: la pianta di tabacco è stata trattata con ozono alla concentrazione di 70 ppb (0,14 mg/m³) per 7 ore al giorno per un periodo di due settimane. La foglia inizia a deteriorarsi e l'azione fitotossica coinvolge la clorofilla e gli enzimi del ciclo di riduzione del carbonio nella fotosintesi.

LE COMUNITA'



Una volta fatte le popolazioni, saliamo ancora di più la scala gerarchica e ci occupiamo delle comunità. Come disegniamo una comunità? Nella slide vediamo che questa comunità si trova in un bosco, il bosco è monospecifico e cioè c'è una sola specie però se guardiamo attentamente ci accorgiamo che è una comunità perché abbiamo vari tipi di piante e anche a terra ci sono muschi e licheni e c'è del prato e quindi abbiamo diverse specie: specie di prato, muschi, licheni e alberi ad alto fusto e quindi la possiamo definire come comunità in senso ecologico. Nella scala gerarchica ci troviamo in posizione superiore alle popolazioni e quindi in ecologia una comunità è **un insieme delle popolazioni di diverse specie che si trovano in uno stesso luogo in uno**

stesso tempo. È importante specificare nello stesso luogo e nello stesso tempo perché se guardo una comunità nel corso del tempo e degli anni potrei non avere la stessa composizione di specie che ho all'inizio. Prendiamo in considerazione, ad esempio, due comunità differenti: ci troviamo al mare in presenza di un litorale sabbioso e uno roccioso. Poiché l'habitat è diverso (roccioso e sabbioso) si istaurano comunità differenti, abbiamo gli stessi parametri ecologici, stessi individui (produttori, consumatori, decompositori ecc.) però saranno diversi perché si sono adattati al luogo dove sono cresciuti. Risorse nutritive e condizioni ambientali differenti determinano l'istaurarsi di comunità differenti. Se guardo le comunità terrestri è la stessa cosa perché ci sono comunità terrestri che sono tra le più complesse (foresta tropicale) del nostro pianeta perché abbiamo visto che la foresta è pluristratificata.

Che cosa influenza una comunità? Poiché la comunità è un insieme di popolazioni, tutto ciò che influenza le singole popolazioni influenza anche la comunità. Abbiamo visto che nelle popolazioni a parte i fattori abiotici, ci sono dei fattori biotici che regolano la curva sigmoide. Tra questi fattori ricordiamo **il mutualismo, la predazione, la competizione e il parassitismo.** Queste 4 interazioni sono quelle che dettano legge per le popolazioni e quindi vanno ad influenzare anche le comunità.

La comunità è più complessa della popolazione. Sono 2 le tipologie di proprietà che caratterizzano una comunità: **proprietà emergenti e proprietà fondamentali**. La proprietà emergente è definita come 1 in più della somma delle parti e cioè **$a+b$ non è uguale a $b+a$** ma è uguale a **c** e quindi queste proprietà designano una comunità complessa, le proprietà emergenti sono di più rispetto alla somma delle proprietà componenti e sono: **la fisionomia, la ricchezza, l'abbondanza relativa** (è diverso da dire abbondanza), **diversità di specie, gilde di specie.**

La fisionomia è l'aspetto esteriore, vado a guardare gli occhi, le labbra, il modo di sorridere -> la fisionomia che viene fuori è un di più rispetto alla somma delle caratteristiche del viso che hanno composto il viso stesso, la fisionomia è l'aspetto

estriore della vegetazione. Quando osservo la fisionomia di una comunità vado a vedere l'aspetto esteriore della vegetazione dominante ossia quella presente in maggior numero in quella comunità.

La ricchezza in specie: una comunità è ricca in specie se ci sono tante specie che appartengono a quella data comunità, questo parametro non basta perché in realtà più che il numero di specie io devo vedere quanti organismi ha quella stessa specie e cioè vado a vedere l'abbondanza relativa.

L'abbondanza relativa è data dal numero di individui di quella data specie rispetto al totale degli individui di quella comunità perché è questo parametro che mi dice se una specie è rara o meno.

La diversità di specie è la combinazione tra ricchezza ed abbondanza e quindi io non posso capire se una comunità A è diversa da una comunità B se non considero prima la ricchezza in specie e poi l'abbondanza relativa

Gilde di specie sono gruppi di specie simili che hanno nicchie simili, un esempio sono le piante CAM.

Le proprietà emergenti più caratterizzanti sono ricchezza, diversità e abbondanza relativa. Queste 3 proprietà sono collegate e precisamente la diversità è la somma della ricchezza in specie + l'abbondanza relativa (n° di individui per specie). Capire come sono distribuiti gli individui per specie è importante perché designa se una specie è rara all'interno di una comunità. Quando io devo vedere come le comunità differiscono tra loro io devo considerare sia la ricchezza che l'abbondanza relativa e quindi devo considerare il numero complessivo di specie e poi come sono distribuite nella comunità ovvero la loro **uniformità o evenness**. L'uniformità è la distribuzione equilibrata degli organismi all'interno della comunità.



Community 1
A: 25% B: 25% C: 25% D: 25%



Community 2
A: 80% B: 5% C: 5% D: 10%

COMUNITA' A

N° specie = 4

COMUNITA' B

N° specie = 4

Le 2 comunità hanno la stessa ricchezza in specie, ma la distribuzione delle specie non è uniforme nella comunità

Per valutare la diversità della comunità ho due modi: guardo **gli indici di diversità** oppure mi riferisco a **curve che si chiamano diversità-dominanza**. Gli indici di diversità tengono conto di 2 caratteristiche importanti ossia l'abbondanza relativa e la ricchezza in specie; le curve diversità-dominanza, invece, mettono in relazione la diversità di una comunità con l'individuo dominante e cioè quello che domina di più e che acquisisce lo stato dominante a spese di altri individui. Una

specie si dice dominante quando prevale all'interno della comunità, la specie dominante non è sempre quindi quella più abbondante ma è una specie che in qualche modo acquisisce questo stato di dominanza perché magari vince la selezione naturale, spesso volte i predatori sono dominanti.

Il primo indice che vedremo per capire se una comunità A differisce da una comunità B è l'indice di ricchezza in specie che viene denominato $d = S/N$ dove s è il numero di specie mentre n è il numero totale degli individui di tutte le specie. Questo indice è compreso tra 0 e 1 quindi se l'indice cresce, cresce anche il numero di specie rispetto al numero degli individui, se S/N è uguale a 1 avremo che c'è almeno un individuo per ogni specie. Spesse volte non si utilizza l'indice in questa forma ma si utilizza un'altra tipologia che è **l'indice di Margalef** che è $d = (S-1)/\log N$. Il log di N non è casuale ma serve in qualche modo a dare lo stesso peso a specie che hanno individui diversi all'interno, nel senso che se io ho una specie che ha 100mila individui e un'altra specie che invece ha 10 individui chiaramente se non considero il log non posso metterli insieme. Una cosa importante di questi indici è che dipendono dalla dimensione del campione e cioè se il campione è grande la diversità sarà maggiore mentre se il campione è piccolo la diversità sarà minore e quindi non posso paragonare comunità molto estese con comunità più piccole, prima di usare questo indice devo andare a normalizzare il mio campo d'azione e cioè devo prendere la stessa estensione per poter utilizzare l'indice, se voglio valutare un bosco e un prato vado a prendere 1km^2 di bosco e 1km^2 di prato, se non faccio in questo modo l'indice non lo posso utilizzare o meglio lo posso utilizzare ma devo stare attenta a quello che dico. Se dico diversità posso sapere solo quante specie sono presenti, se prendo in considerazione la comunità A e la comunità B capisco che è una comunità perché ci sono 4 specie, anche la comunità 2 ha 4 specie. Le due comunità sono diverse, se io mi calcolo l'indice di ricchezza in specie vediamo che sia in A che in B ci sono 4 specie diverse ma le comunità sono diverse tra loro e quindi l'indice di ricchezza in specie mi da il numero di specie ma non mi dice come queste specie sono distribuite dentro la comunità perché nella comunità A ogni specie è rappresentata dal 25% e abbiamo 5 individui per ogni specie, nella comunità B la ricchezza in specie è la stessa ma se guardo come sono distribuite qui c'è una specie dominante e cioè quella presenta in maggior quantità (80%), abbiamo poi il 5% di una specie e il 5% di un'altra specie e il 10% di un'altra specie e quindi la ripartizione non è equa e quindi le comunità hanno la stessa ricchezza in specie ma la distribuzione non è uniforme, l'evenness non è uguale. Possiamo fare un altro esempio e cioè se io ho una comunità A e una comunità B e la comunità A ha 10 specie e 100 individui e la comunità B ha 10 specie e 100 individui apparentemente sono le stesse perché la ricchezza in specie è la stessa, ma come sono le specie all'interno della

comunità? Nella comunità A potrei avere 91 individui che appartengono alla specie 1 e poi potrei avere altri 9 individui che appartengono a specie diverse e in questo caso ho **la minima uguaglianza e la massima dominanza**, sono dominanti gli individui della specie 1 mentre gli altri sono poco rappresentati. Nella comunità B potrei avere che per ogni specie ho 10 individui e quindi in questa comunità c'è una **perfetta uguaglianza e nessuna dominanza**. Le due comunità sono diverse ed in natura non esistono comunità così ma diciamo che esiste una via di mezzo. Allora devo trovare un indice che oltre a dirmi la ricchezza in specie mi dica anche come sono distribuiti gli organismi all'interno della specie stessa e a tal proposito **Simpson** del 1949 si chiese, per definire la diversità, qual è la probabilità che individui presi a caso facciamo parte della stessa specie e formulò un indice, p_i (abbondanza relativa delle specie nella comunità).

INDICI DI DIVERSITA'

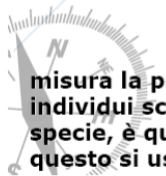
INDICE DI SIMPSON

Specie comuni

$$\lambda = \sum p_i^2$$

sommatoria dei quadrati delle abbondanze relative delle specie nella comunità

$$1 - \lambda = 1 - (\sum p_i^2)$$



misura la probabilità che una qualsiasi coppia di individui scelti a caso appartenga alla stessa specie, è quindi un indice di **DOMINANZA**, per questo si usa il suo complementare

Σ = sommatoria

P_i = n° di individui della specie i rispetto al totale di tutte le specie

λ varia tra 0 e 1; $\lambda = 1$ se c'è una sola specie. Se > ricchezza e uniformità, si avvicina a 0

aumenta ricchezza e uniformità. LE FORMULE BISOGNA SAPERLE. Questo indice ci dice **non solo quanto è ricca la comunità in specie ma anche come sono distribuite le specie all'interno di quella comunità**. Se c'è più evenness quella comunità è più forte ed è meno suscettibile a catastrofi, questo indice non dipende

Specie rare

INDICE DI SHANNON



Grado di equipartizione degli individui nelle specie

$$H = - \sum_i p_i \log p_i$$

P_i = probabilità di importanza per ciascuna specie = n_i/N
 n_i = dimensione di ciascuna specie (numero, biomassa, ecc.)
 N = dimensione totale della comunità

A parità di numero di specie, il valore dell'indice cresce al crescere dell'eterogeneità; a parità di eterogeneità cresce al crescere del numero di specie

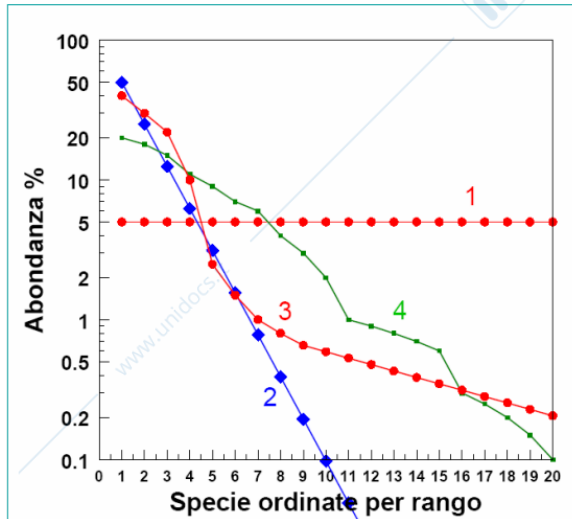
dipende dalla dimensione del campione

Quel p_i è una frequenza ed è uguale a n_i / N . Certe volte più che usare un indice di diversità si preferisce usare il suo complementare e cioè **$1 - \lambda = 1 - (\sum p_i^2)$** e questo è l'indice di dominanza. λ varia da 0 e 1, se λ è 1 significa che c'è 1 sola specie, se λ si avvicina a 0

dalla grandezza del campione e possiamo usarlo per qualsiasi superficie. Anche qui c'è un punto perché l'indice di Simpson non ci dice se la specie è rara oppure no, per capire se una specie è rara oppure no dobbiamo usare l'indice di **Shannon** che identifica il grado di ripartizione degli individui dentro le specie ed è la formula presente nell'immagine sovrastante. Questo indice dipende dalla grandezza del campione e se il numero di specie è uguale l'indice cresce se cresce l'eterogeneità, se l'eterogeneità è uguale l'indice

crece al crescere del numero di specie. Generalmente per capire se in una comunità c'è una specie rara o comune si applicano tutti e tre contemporaneamente. Esistono tantissimi indici di diversità non solo questi, noi studiamo questi perché sono quelli più importanti. Questo indice va da 0 a infinito perché abbiamo il logaritmo e il grado di ripartizione è più basso se è 0 e aumenta quando si va verso infinito.

CURVE RANGO-ABBONDANZA o DOMINANZA-DIVERSITÀ



Linea 1: ipotetica comunità di 20 specie tutte con la stessa abbondanza (5%)

Linea 2: comunità in cui una specie ha una abbondanza pari alla metà di quella della specie che la precede

Linea 3, 4: andamenti più realistici nelle comunità naturali

↓
Maggiore complessità nella differenziazione di nicchia

Questi indici vengono utilizzati per costruire delle curve che sono **curve rango-abbondanza**. Una curva rango-abbondanza è una curva dove troviamo sull'asse delle y l'abbondanza relativa % mentre sull'asse delle x mettiamo le specie ordinate per rango, il rango è una misura che ordina le specie da quella più comune a quella più

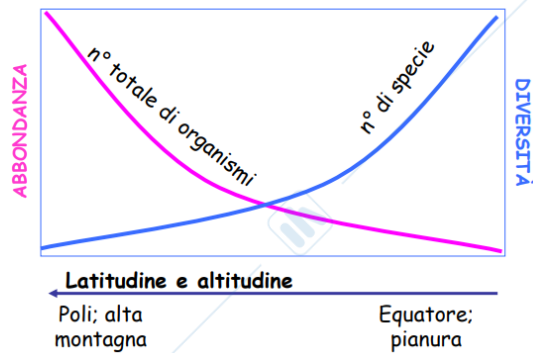
rara. In base agli indici visti prima si possono costruire queste curve e avere comunità che sono differenti tra loro per quanto riguarda l'abbondanza e il rango. Ogni linea presenta dei pallini e questi rappresentano le specie all'interno della comunità. Se guardo la linea 1 la distribuzione di questi individui all'interno delle specie è sempre 5% e quindi qua dentro non c'è nessuna specie rara perché ho sempre il 5% degli individui per ogni specie. La comunità 2 ha una specie in rango 10 mentre un'altra ha rango 1, ovviamente la specie più rara sarà quella che avrà rango 10 perché ha un'abbondanza dello 0.1% mentre la specie 1 ha il 50% di abbondanza. Le curve 1 e 2 non si trovano quasi mai nelle comunità biologiche ma si possono trovare solo in comunità artificiali (es. l'acquario), quelle che si trovano nella comunità naturali sono le curve 3 e 4 dette anche curve a bastone spezzato perché sono molto discontinue in cui troviamo una specie in minoranza, una in maggioranza a seconda dell'habitat. Le linee 3 e 4 sono quelle più realistiche della comunità e ci indicano anche la maggiore complessità di una comunità naturale, più la linea è spezzata e più si hanno nicchie ecologiche a disposizione per comunità differenti e la possiamo trovare le specie rare, maggiore è il rango e maggiore è la probabilità di trovare specie rare, più basso è il rango e più la specie è ordinaria.

Proprietà fondamentali della comunità : produttività primaria, abbondanza, stabilità, struttura, diversità e complessità.

Vediamo come sono collegate l'abbondanza e la diversità. Prima l'abbondanza era a livello di singola specie, quando invece consideriamo l'abbondanza e la diversità come proprietà fondamentali (per diversità intendo biodiversità che vedremo tra poco), l'abbondanza è il numero totale degli organismi che sono presenti in una comunità (es. quella comunità ha 200mila organismi senza parlare di specie). La diversità è la misura del numero di specie, nicchie ecologiche e le variazioni genetiche presenti.

In una comunità come sono legate l'abbondanza e la diversità (parlando sempre di proprietà fondamentali)?

L'abbondanza di una specie è spesso inversamente correlata alla diversità della comunità



comunità con un elevato numero di specie spesso hanno pochi organismi di ciascuna specie

Se io guardo un gradiente dalla pianura alla montagna, dall'equatore verso i poli vedrò che la diversità di specie si riduce. Man mano che mi allontano dall'equatore mi allontano delle condizioni ideali di crescita delle piante, di conseguenza il numero di

specie diminuisce però aumenta il numero totale degli organismi per specie: la ricchezza in specie si abbassa e quelle poche specie hanno tanti organismi perché questi ultimi sono in grado di adattarsi. Se andiamo al polo nord non avrò tutte le specie di insetti della foresta tropicale, avrò pochissime specie di insetti e molti organismi per quelle poche specie che riescono a superare la selezione naturale, questo perché magari presentano meccanismi che consentono loro di vivere a



temperature estreme, aumenta quindi l'abbondanza relativa per le poche specie rimaste.

Gli ecologi per capire se una comunità è complessa guardano la catena alimentare, più complessa è la rete trofica e più è complessa la comunità. Una comunità con elevata diversità può non essere complessa se ci sono reti trofiche molto semplici.

Per avere una comunità complessa devo avere tantissimi autotrofi, eterotrofi (consumatori primari,

secondari, terziari) e decompositori che si intersecano tra loro con le loro abitudini alimentari. La complessità è data dall'aumento di diversità più l'aumento dei livelli trofici.

Non è giusto dire che una comunità diversa è anche una comunità complessa perché non è detto che sia sempre vero.

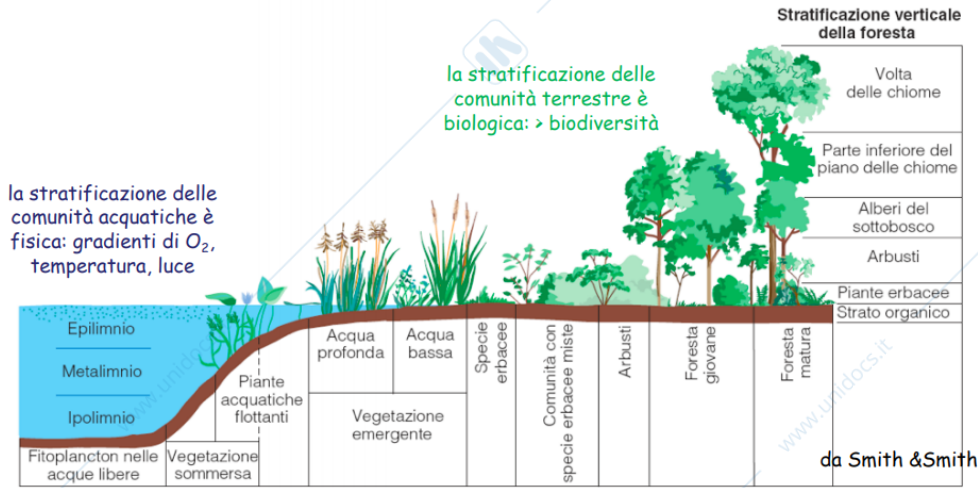
La barriera corallina è una delle comunità più complesse perché ci sono tante interazioni trofiche che rendono la comunità complessa. Se noi abbiamo solo una interazione se quella viene a mancare si interrompe il flusso di energia tra produttori e consumatori o tra consumatore primario e secondario.

Una comunità è caratterizzata anche dal parametro della **stabilità**, la stabilità è di 3 tipi e abbiamo la resistenza, resilienza e persistenza. La resistenza è la capacità di resistere ad un disturbo, la resilienza è la capacità di recuperare dopo un disturbo mentre invece la persistenza è la capacità di mantenere stabile una condizione nonostante possa cambiare lo status esterno. Quindi una comunità è stabile in virtù di queste caratteristiche che possono essere contemporaneamente presenti oppure può essere preponderante una rispetto ad un'altra. Ora andiamo ad esaminare la **struttura**, quando dico che una comunità è strutturata vuol dire che è disposta in un certo modo nello spazio, la struttura della comunità può cambiare nel tempo e nello spazio. Se una comunità è strutturata in un certo modo niente vieta che se succede un incendio o un terremoto quella comunità cambia completamente

struttura, e quindi cosa fa? Resiste? Persiste? Risale? Per saperlo bisogna capire che stabilità è associata a quella comunità, in ogni caso per **struttura** noi intendiamo la stratificazione ovvero come si dispongono le comunità in un piano verticale, la **zonazione** ossia la variazione della struttura sul piano orizzontale e la **periodicità** e cioè l'insieme dei cambiamenti della comunità nel corso delle stagioni. Generalmente

per quanto riguarda la periodicità il clima umido e stagionalmente secco favoriscono la vegetazione più florida (il clima umido è presente nella foresta tropicale).

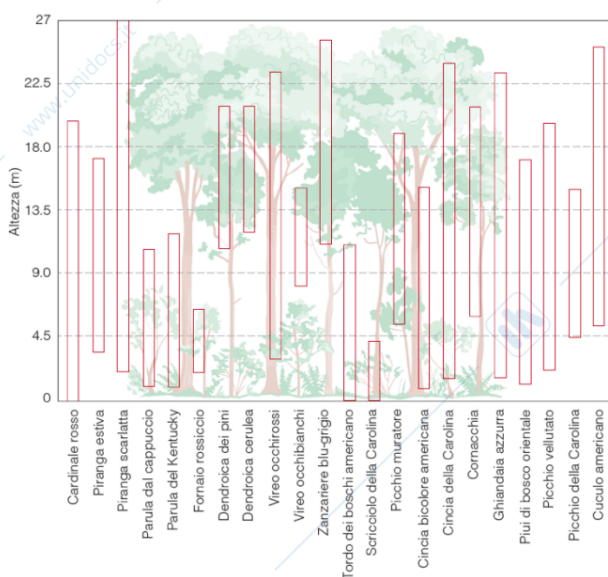
Per capire di cosa stiamo parlando andiamo a guardare questo transetto, un transetto è quando si passa da un ecosistema



terrestre a uno salmastro e a uno acquatico.

La stratificazione la vedo sul piano verticale che ha erbacee, arbusti, sottobosco, piano delle chiome e volta delle chiome. Se guardo una comunità acquatica anche in questo caso sotto ho l'Ipolimnio, Metalimnio e poi Epilimnio e anche qui vi è una stratificazione verticale delle comunità acquatiche. La differenza in queste due stratificazioni è che nella stratificazione della comunità acquatica i fattori che prevalgono e che dettano quella stratificazione sono abiotici e abbiamo più che altro ossigeno, nutrienti, temperatura e luce. Nel caso dell'ambiente terrestre quelli che dettano la disposizione delle specie arboree è la biodiversità e cioè sono interazioni biotiche.

STRATIFICAZIONE DELLA FAUNA ORNITICA



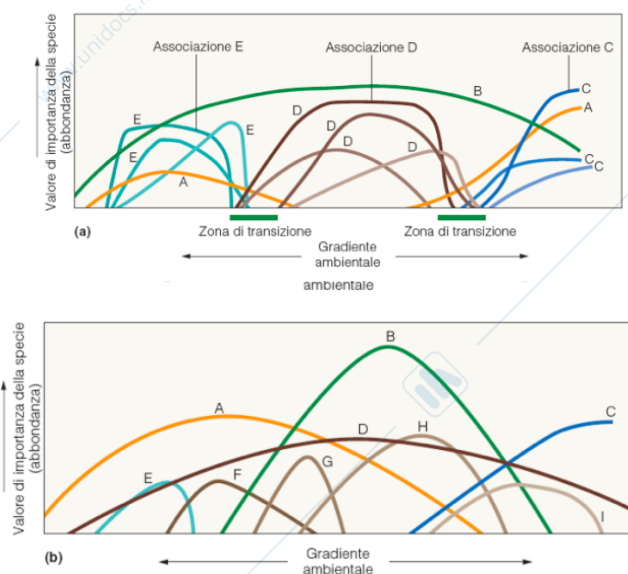
Un altro esempio è la disposizione della fauna ornitica nel Tennessee. Le barre si riferiscono all'area di distribuzione di questi uccelli sul piano verticale, se cambio stagione però c'è anche una periodicità che cambia. Spesse volte abbiamo la distribuzione di un uccello che si sovrappone con un'altra e quindi questo ci fa pensare che non c'è competizione perché altrimenti non potrebbero coesistere.

Un altro esempio è la variazione della struttura della comunità con la topografia (la topografia è legata al territorio). Dalla cima della montagna alla collina e poi al fondo valle c'è un forte incremento topografico. Quando scendiamo secondo questo gradiente si ha un aumento di diversità perché la temperatura è più

favorevole e poi perché spesso volte le derrate alimentari si accumulano verso il fondo valle e quindi qui ci sono condizioni più idonee per istaurare comunità più complesse infatti se guardiamo l'indice di Shannon, dalla cima della collina fino alla base nelle varie specie, cambia. Quando si ha la transizione tra i diversi strati si parla di zonazione e cioè parliamo di distribuzione sul piano orizzontale. Parliamo sempre di zonazione però cambiando luogo ci troviamo nella palude salmastra e avremo l'interazione della specie vegetale, topografia e zone soggette a maree. Quando c'è una marea una zona può essere sommersa e poi subito dopo la marea è demersa e le specie che si trovano dentro hanno sicuramente una marcia in più perché devono adattarsi ad inondazione e a periodi di siccità quando l'acqua non c'è. Anche in virtù della topografia che può cambiare, cambia la comunità vegetale, generalmente parliamo di comunità resilienti.

Una volta che abbiamo capito le comunità diverse e tutte una serie di caratteristiche, c'è un'altra cosa da tenere in conto e cioè spesso non è facile capire quando una comunità A si interrompe e inizia una comunità B perché questa situazione qui in natura non è mai netta ma abbiamo una situazione del genere, vi è una zona di transizione e queste comunità si chiamano comunità in transizione e cioè un habitat va lentamente in un altro habitat. Quando si parla di limiti di comunità si parla di **ecotoni** (deriva dal greco e significa tagliare l'ecosistema in 2 parti), alcuni ecotoni sono molto distinguibili, nell'immagine notiamo il prato e la comunità arborea, spesso volte però gli ecotoni non sono così definiti. L'ecotono è una zona di transizione tra due comunità adiacenti, queste comunità possono essere definite comunità aperte

Visione discreta di Clements



Visione individualista di Gleason

o chiuse, dipende dai confini. Se i confini sono distinti parliamo di **comunità aperte** e specie di comunità aperte riescono a varcare questi confini. Le comunità chiuse sono separate in modo netto da quelle adiacenti e quindi gli ecotoni sono abbastanza netti. Lungo l'ecotono si instaura **un effetto margine** e cioè il numero di specie nelle comunità dell'ecotono hanno densità maggiore rispetto alle comunità adiacenti e quindi lungo la linea dell'ecotono, e cioè nella zona di transizione, spesso vi è un maggior numero di specie e questo è dovuto all'instaurarsi di domini particolari e alle relazioni. Di domini particolari perché se attraverso una zona A e una zona B quella parte di transizione avrà proprietà che sono intermedie tra A e B, può anche succedere che nelle zone di transizione ci siano interazioni più strette tra le specie. Facendo riferimento al grafico mostrato sopra, vediamo che nella zona di transizione abbiamo comunità che escono e comunità che entrano però contestualmente vi è la coesistenza di diverse comunità. In questo grafico ci sono anche 2 nozioni importanti, ci sono le nozioni di Clements e Gleason per quanto riguarda le comunità. Secondo la visione discreta di Clements i raggruppamenti di specie hanno limiti di distribuzione e abbondanze simili e cioè abbiamo che gruppi simili sono vicini tra loro, associazione E-D e C hanno ambiti di tolleranza abbastanza simili, invece le specie A e la specie B



ECOTONO

hanno ambiti di tolleranza più grandi e quindi si distribuiscono lungo tutta la zona. Contrapposta a questa visione di Clemens c'è quella di Gleason che è la visione individualista che diceva che non esistono raggruppamenti di specie lungo le comunità e quindi c'è una sistemazione casuale e questi picchi di specie sono picchi di abbondanza senza ordine e la situazione varia a seconda del tipo di habitat che occupano le varie specie.

In tutte le comunità esistono specie che si chiamano **chiave di volta** che hanno un'importanza molto più grande rispetto al numero di individui che li caratterizzano, spesso le specie chiave di volta sono i predatori terminali e cioè quelli più a rischio di estinzione. I top predator sono le specie chiave di volta, lo squalo, il leone, l'aquila, il diavolo della Tasmania ne sono un esempio -> hanno tutti una caratteristica comune e cioè predano ma non sono predati tranne che dall'uomo. Le specie chiave di volta sono importanti in un ecosistema perché possono controllare l'intera comunità. **Se sparisce una specie chiave di volta tutta la comunità viene perturbata, anche i vegetali che non c'entrano niente con i top predator.** Per capire l'importanza delle specie chiave di volta nel 1911 fu fatto uno studio sulla lontra del Pacifico che è un forte mangiatore di crostacei. Si uccisero molte lontre marine perché la pelliccia si poteva vendere e perché mangiando molti crostacei abbatterono la pesca, ma ne vennero abbattute troppe e la specie, nel 1915, fu a rischio di estinzione. Un gruppo di ecologi si rese conto che, contemporaneamente alla diminuzione del numero di lontre, si ebbe anche una diminuzione del numero di alghe, di pesci, di foche, di aquile e uccelli in generale. Si fece quindi uno studio su tutta la catena alimentare per capire come l'uccisione della lontra potesse compromettere anche la fauna aviaria. Le lontre hanno influenzato così tanto perché la loro fonte di cibo sono i ricci di mare che a loro volta mangiano le fanerogame e le alghe brune. Se tolgo di mezzo il riccio di mare l'alga comincia a sovrappopolare, d'altra parte se distruggo la lontra che mangia il riccio di mare, è il riccio di mare che inizia a sovrappopolare e sovrappopolando distrugge le alghe brune.

Eliminando le lontre ci saranno quindi tantissimi ricci, i quali mangiano le alghe brune. Se le alghe brune spariscono non ci sono più rifugi per molti pesci e quindi questi devono emigrare. Se i pesci spariscono anche i predatori dei pesci sono costretti ad emigrare e quindi capiamo come muovendo un unico animale, che è la specie chiave di volta, tutta la comunità subirà un danno.

Questo controllo in ecologia si chiama controllo **top-down** perché va dall'alto verso il basso lungo la comunità. A questo controllo viene contrapposto il controllo **bottom-up** e cioè dalla base verso la superficie della catena alimentare, le specie chiave di volta sono quelle al vertice della catena alimentare. Un altro esempio è lo squalo martello che è anch'esso una specie chiave di volta a rischio e quando furono abbattuti la popolazione di razze cominciò a proliferare e proliferando le razze che mangiavano tutti i fondali, anche in questo caso vi furono delle variazioni. In altre comunità dove lo squalo martello non era stato eliminato c'era una perfetta ripartizione di specie.

Biodiversità. Questo termine fu coniato da Rosen nel 1985 durante la conferenza sulla diversità biologica a Washington DC. La biodiversità è la bibbia degli ecologi e con questo termine intendiamo la varietà di forme di vita presenti sul nostro pianeta. Rappresenta la varietà tra gli organismi viventi e in questa diversità è inclusa non solo la diversità di specie, ma anche la diversità a livello di ecosistemi. **Abbiamo 3 distinti livelli di biodiversità:**

- **Diversità genetica** e cioè il numero di frequenze geniche di diversi geni presenti all'interno di una specie;
- **Diversità di specie** e cioè quante specie diverse ci sono all'interno di un ecosistema;
- **Diversità ecologica** e cioè quanti tipi di ecosistemi diversi ci sono nel nostro pianeta.

La diversità ecosistemica è la diversità nel contesto ecologico e cioè intendiamo le nicchie ecologiche esistenti -> un ecosistema è tanto biodiverso quanto sono gli habitat. La diversità ecologica si è sviluppata in milioni di anni di evoluzione e quindi se questa diversità viene persa non è possibile recuperarla, se un ecosistema viene distrutto non può più essere ripristinato come una volta e un esempio è la foresta tropicale che molte volte viene bruciata e adibita a pascoli. Abbiamo poi una biodiversità alimentare che deriva da quella vegetale e cioè dagli habitat diversi, un mantenimento delle frequenze geniche nei cibi è una ricchezza nell'uomo. Più l'ambiente è biodiverso e più ci sono tantissimi derrate alimentari e tante sostanze utili anche nella farmacologia, come per esempio il salice bianco usato per tosse e raffreddore. La biodiversità è importante dal punto di vista ecologico (perché ci sono le specie chiave di volta); ha importanza estetica-ricreativa e poi ha importanza scientifica e cioè molte specie sono specie chiave di volta e una volta che si sono estinte possono provocare vari danni. L'hot-spots della biodiversità sono regioni geografiche con più biodiversità al mondo e sono quelle che vanno conservate e tra queste regioni geografiche c'è la macchia mediterranea e c'è l'Italia e quindi noi abbiamo luoghi dove c'è un patrimonio ecologico ricco di biodiversità.

BIODIVERSITÀ

Il termine biodiversità fu coniato da Walter G. Rosen nel 1985 durante la Conferenza Nazionale sulla Diversità Biologica (Washington DC). La biodiversità è la varietà di forme di vita presenti sulla Terra.

Esistono tre livelli di biodiversità:

- **Diversità ecologica:** numero ed estensione dei tipi di habitat/ecosistemi;
- **Diversità di specie:** numero e frequenze di specie all'interno di un ecosistema;
- **Diversità genetica:** numero e frequenze geniche all'interno di una specie.

La diversità ecologica è detta anche diversità ecologica, è quella fondamentale che comprende habitat, ecosistemi, nicchie, reti trofiche. Questa diversità è quella più difficile da mantenere perché una volta che l'ecosistema viene distrutto non c'è possibilità di reintegrarlo.

Perché è importante la biodiversità:

- mantenimento della variabilità, adattamento genetico (binding) e stabilità ecologica;
- è fonte di materie prime, quali il legno, i tessuti, ma soprattutto medicine;
- la maggior parte della biodiversità è mantenuta dalle "keystone species" (specie

Il valore della biodiversità

- diretto** - risorse biologiche
(*alimentazione, legname, medicinali*)
- indiretto** - servizi agli ecosistemi
- integrità biologica
- intrinseco** - ricreativo
- culturale
- estetico
- spirituale



chiave di volta), le quali sono le più esposte a estinzione;
- importanza estetico-creativa;
- importanza scientifica.

Biodiversity Hotspots of the World



Quali sono gli hot-spot

quelle

spots della biodiversità?

Per hot-intendiamo zone ad altissima biodiversità, nell'immagine sono rosse. Sono zone che hanno

tantissime specie endemiche e sono classificati come sistemi a rischio perché hanno la perdita del 70% degli habitat originari. Quindi per designare un hotspot ci vuole una enorme ricchezza, cioè un elevato numero di specie all'interno di un ambiente/habitat. Nel 1988 Myers teorizzò 25 hotspot fino poi ad arrivare a 34 nell'ambito del mediterraneo, ma questi stanno aumentando sempre di più perché la perdita degli habitat è sempre più forte.

La biodiversità attualmente è in forte pericolo perché:

- alterazione degli habitat tramite frammentazione, semplificazione (foresta che viene tagliata) e conversione;
- riduzione dell'areale di distribuzione (animali che vanno via dai loro habitat per il cambiamento climatico e quindi migrano in una zona più favorevole);
- caccia indiscriminata (in Africa cacciano elefanti e rinoceronti);
- introduzione di specie esotiche, non inteso per le specie che migrano ma l'uomo compra queste specie e poi lo lascia libero o scappa;
- inquinamento.

Come si conserva la biodiversità: adottando misure di conservazione **in situ** o **ex situ**. In situ tramite riserve terrestri e marine: in queste riserve non si può accedere, quindi non possono entrare scafi per scaricare e non si può entrare per cacciare. Un altro modo sono i Parchi Nazionali (dello Stelvio, del Vesuvio, ...). La conservazione extra situ invece prevede che si prenda dal sito di origine l'animale o la specie in estinzione, si costruiscono banche semi oppure si conservano tramite la crioconservazione (vengono conservate per 20-30-40 anni), anche se quest'ultima non è legale perché non posso imbalsamare un batterio o un animale per tutto questo tempo. L'altro metodo sono acquari, zoo e giardini botanici, nei quali si cerca di costruire l'ambiente ideale per quella specie.

LA SUCCESSIONE ECOLOGICA

È lo sviluppo dell'ecosistema, nel senso che l'ecosistema attraverso uno stadio di giovinezza, uno di maturità e uno di vecchiaia. Prima di attraversare questi stadi, gli organismi (animali o vegetali) cambiano nel tempo, cioè si succedono nel tempo. Quindi quando parliamo di successione intendiamo la successione delle specie vegetali e animali che nel tempo si alternano e passano da quando l'ecosistema era giovane a quando l'ecosistema è maturo. L'ecosistema, al pari di un organismo, attraversa tutti gli stadi dell'evoluzione (che nel caso umano può essere di decenni,

nel caso dell'ecosistema 100-200-300 anni). Da questo deduciamo che la successione ecologica può essere studiata in termini diacronici (tempi lunghi) o in tempi più brevi, cioè valutazioni sincroniche. La successione ecologica in termini di sviluppo dell'ecosistema vuol dire che l'ecosistema cambia gradualmente nella struttura e nella composizione della vegetazione. **La successione ecologica è uno sviluppo graduale nel tempo che si attua nella struttura e nella composizione della comunità operata da forze interne alla vegetazione nel tempo.** Questo concetto presuppone che la comunità vegetale è dinamica e non statica e ha un dinamismo sia spaziale che temporale: temporale perché nel tempo si succedono diverse comunità vegetali; spaziale perché a seconda dei luoghi dove ci troviamo la comunità può essere dinamica. Esistono anche altri due postulati: 1) le comunità sono transitorie, non esiste comunità che parte dall'inizio dell'ecosistema e arriva alla fine dell'ecosistema, ma verranno via via sostituite nel tempo;

2) conseguente al num 1: ogni comunità lascia spazio e tempo a quella successiva. In una successione ecologica, le comunità vegetali modificano l'ambiente fisico. Le specie si avvicendano l'un l'altro: in che modo la specie B riesce a succedere la specie A e secondo quale meccanismo la specie A muore e lascia il posto alla specie B. C'è un breve periodo in cui coesistono contemporaneamente, man mano che si va avanti poi una specie scompare e una appare.

In una successione ecologica nello sviluppo di un ecosistema si verificano dei cambiamenti nel tempo:

- 1) distribuzione dell'energia \Rightarrow man mano che l'ecosistema nasce, cresce e matura cambieranno nel tempo i rapporti energetici tra produttività e respirazione, cioè cambia il rapporto autotrofia/eterotrofia che c'è nei vari componenti dell'ecosistema;
- 2) processi ecosistemici \Rightarrow respirazione, fotosintesi, decomposizione, ...;
- 3) composizione delle specie \Rightarrow man mano che la specie cambia avrà diverse esigenze (ad esempio qualcuna ha più bisogno del rapporto biomassa/produzione, un'altra ne avrà bisogno in minor quantità).

Se la successione non è bloccata da forze esterne va avanti fino allo stadio di maturità, ma questo in natura spesso non accade perché può essere bloccata da un incendio, un temporale, ... e quindi si frena il normale evolversi degli eventi.

Distinguiamo due differenti tipi di successione:

- **Successione autogena o autogenerata:** cambiamenti di successione sono determinati da interazioni interne alla comunità. Una successione autogena può instaurarsi su una colata lavica o su un campo abbandonato o su una pozza d'acqua. Se io lascio stare una colata lavica per 10-20-40-100 anni su questa prima si instaurano degli organismi, poi altri, fino a costituire un bosco (ad esempio il caso del Vesuvio, una parte di alberi sono stati piantati dall'uomo, ma altri sono il frutto della successione ecologica attraverso gli anni di un territorio che è stato lasciato così)
- **Successione allogena o generata dall'esterno:** viene generata da un evento stocastico, quindi o una tempesta o il fuoco. I cambiamenti successionali quindi sono determinati da forze esterne alla comunità.

Per fare un esempio, chiameremo successione primaria la colata lavica (substrato mai colonizzato precedentemente) e con successione secondaria intendiamo un suolo già formato che è stato, per quale forza, incendiato o inondato. Quindi la successione

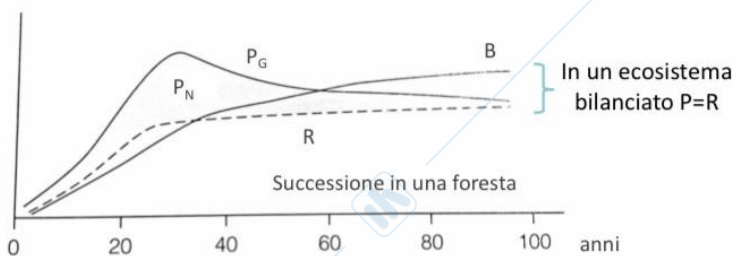
autogena è primaria, mentre quella allogena è secondaria perché il substrato già c'è. Notiamo che, considerando il tempo, esso sarà maggiore nella successione primaria perché in questo caso il suolo non c'è proprio e bisogna costruirlo, mentre in una successione secondaria il suolo già c'è.

BIOENERGETICA DELLA SUCCESSIONE ECOLOGICA: abbiamo detto che durante una successione ecologica cambia l'energetica, con questo termine intendiamo che cambiano i rapporti di produzione e consumo (o respirazione), quindi cambia anche la biomassa che viene accumulata.

La successione autogena può iniziare in due diversi modi:

- **$P < R$** (produzione minore delle respirazione): abbiamo una successione eterotrofa perché gli eterotrofi sono i primi colonizzatori del substrato (ad es. batteri)
- **$P > R$** (produzione maggiore della respirazione): abbiamo una successione autotrofa perché i primi colonizzatori sono le piante.

Con il procedere della successione il rapporto Biomassa/Produzione (**B/P**) **aumenta**, mentre quello Respirazione/Biomassa (**R/B**) **diminuisce**



Una successione in una foresta: sull'asse x ci sono gli anni, quindi da 0 a 100 anni ho i rapporti R/B che si muovono; su y ho l'evolversi della successione, quindi i valori di R e P.

Ricordiamo che la produzione lorda è data da $P+R$, mentre la produzione netta è soltanto la produzione vera e propria, senza respirazione, quindi eliminiamo gli eterotrofi. Nel grafico vediamo come variano la respirazione, la produzione netta e la produzione lorda man mano che la successione va avanti. Le caratteristiche che variano sono queste perché stiamo parlando di specie vegetali, e non di specie erbacee o degli arbusti. Per riportare questo discorso al mondo nostro, consideriamo un neonato e un adulto: i bambini hanno un metabolismo più accelerato, mentre l'adulto compie varie attività, quindi quello che mangia lo utilizza per mantenere le funzioni corporee o fisiologiche della respirazione; man mano che cresciamo il metabolismo rallenta sempre più, cioè la respirazione aumenta e la produzione si riduce. Nella foresta capita la stessa cosa: man mano che andiamo avanti con la crescita la produzione aumenta di più; quando poi la produzione finisce aumenta la respirazione perché si riproduce biomassa, e per mantenere biomassa occorre respirazione, mentre diminuisce la produzione. Infatti nel grafico notiamo che man mano che aumentiamo gli anni di evoluzione del sistema, la produzione netta e lorda aumentano, fino ad arrivare a 60-80 anni (sistema maturo) in cui questa produzione comincia a scendere; al contempo la respirazione, che all'inizio era bassa, aumenta e poi rimane costante, senza scendere (come invece fa la produzione) perché deve mantenere biomassa che comincia anch'essa a crescere. In un sistema bilanciato avremmo che inizialmente $P > R$ o $P < R$, ma quando arriviamo alla maturità del sistema, indipendentemente da dove siamo partiti, arriverò in un punto in cui $P=R$ □ questo succede perché uno si abbassa e uno continua a crescere, cioè i processi di produzione eguagliano i processi di consumo di quell'ecosistema e la biomassa aumenta. In un sistema che attraversa vari stadi la biomassa aumenta

dall'inizio della nascita del sistema fino alla morte, questo in termini pratici vuol dire che la biomassa dei vegetali, quando l'ecosistema è giovane è più piccola rispetto alla biomassa degli stadi intermedi, che a sua volta è più piccola rispetto alla biomassa dei sistemi a maturità. Se ad esempio una successione inizia con un prato, la sua biomassa non sarà uguale alla biomassa di una foresta, la quale rappresenta lo stadio finale.

All'inizio la successione è sempre sbilanciata ($P < R$ o $P > R$), ma quando tende verso la fine avrà sempre il rapporto $P=R$, cioè il rapporto $P/B=1$. (P/B è un indice di come il sistema si sta evolvendo)

Ricorda: se aumenta R aumenta la biomassa, esse camminano di pari passo.

La chiamiamo successione autotrofa perché le piante colonizzano il substrato e $P > R$. Domanda: in caso di successione eterotrofa i primi colonizzatori sono gli eterotrofi, ma non abbiamo già visto un processo in cui la biomassa/il detrito veniva colonizzata dagli eterotrofi? LA DECOMPOSIZIONE È UN ESEMPIO DI SUCCESSIONE ETERTROFA □ perché la foglia viene prima attaccata dai batteri generalisti e poi man mano lasciano il posto ai batteri specialisti, quali funghi del marciume nero e funghi del marciume bianco.

La differenza sostanziale tra la successione autotrofa ed eterotrofa sta in come viene moltiplicato il substrato:

- nella successione autotrofa un habitat che non scompare non viene degradato, ma modifica nel tempo la composizione di specie (dal prato alla prateria, poi alla foresta). Questo habitat viene modificato dalla vegetazione che via via si susseguono lungo un gradiente temporale molto lungo. Infatti la scala temporale della successione autotrofa è di secoli
- nella successione eterotrofa o degradativa l'habitat scompare completamente perché si tratta di una foglia, la quale cade sul tappeto forestale e subisce il processo di decomposizione, il cui fine è la distruzione totale della sostanza organica e la fuoriuscita dal detrito organico di elementi chimici di base. Si realizza su scale temporali più brevi, mesi o anni.

Facendo un esempio di successione eterotrofa, vediamo la carcassa di una balena spiaggiata: la chiamiamo successione perché si instaurano via via organismi differenti. I primi ad attaccare la carcassa sono gli spazzini (scavengers), cioè squali, granchi (e un altro animale che non ho capito il nome) che cominciano a mangiare la carne morta; il secondo stadio è quello degli opportunisti, i quali hanno un ampio range di tolleranza quindi mangiano tutto e hanno nicchie trofiche generaliste; il terzo stadio è quello solfofilo, i batteri producono acido solfidrico che trasformano la sostanza organica cioè si inseriscono nella parte di ossa rimasta e mangiano quello rimasto. Ma il processo non finisce qui perché questi animali non mangiano le ossa, quindi abbiamo altri protagonisti che sono i vermi o coralli, i quali riducono l'osso ad essere dei tanti sassolini che verranno poi degradati dopo tanti anni.

Ritorniamo alla bioenergetica: mettiamo a confronto ecosistemi giovani e ecosistemi maturi. Guardando l'energia che entra nei due ecosistemi: lo spessore/l'ampiezza è la stessa, ciò che cambia è COME L'ENERGIA VIENE RIPARTITA.

- in un ecosistema giovane la maggior parte di energia va nell'accrescimento (formazione di nuovo tessuto), quindi produzione, mentre una piccola parte va nella respirazione: la biomassa che si forma è poca perché la produzione è veloce ma non è tantissima, la respirazione è poca perché deve mantenere stabile la biomassa;

- in un ecosistema maturo la produzione si abbassa, cioè l'accrescimento si riduce, aumenta invece la respirazione per mantenere la biomassa che sarà molta. (C'è un'analogia con le efficienze ecologiche).

Qual è la dinamica di aumento di biomassa: la successione ecologica segue un percorso temporale ben definito, all'inizio è piccola e poi pian piano aumenta fino ad arrivare ad uno stadio finale. Se essa non viene interrotta da forze esterne, arriva allo stadio finale; se viene interrotta da forze esterne, quali stocastiche, fulmini, lampi, inondazioni, terremoti, fuoco, la successione si blocca ad uno stadio e torna indietro.

- 1) STADIO DEI COLONIZZATORI (stadio degli scavengers nella balena) detto STADIO PIONIERI: sono i muschi e i licheni (nel caso della balena erano gli squali);
- 2) STADI SERALI: piante erbacee e arbustive che si susseguono l'un l'altra, sono comunità transitorie (pini, cespugli);
- 3) STADIO STAZIONARIO O CLIMAX: comunità finale stabile (comunità K-strateghe), ad esempio la foresta, che persiste fino a grosse perturbazioni perché la comunità è in equilibrio con se stessa, cioè in equilibrio con i fattori ecologici.

Domanda: il climax si raggiunge sempre? Non è detto, dipende da quello che accade nel corso del tempo, perché molte volte per un evento stocastico la successione potrebbe tornare indietro.

La successione può avere diversi andamenti a seconda di dove parte: generalmente si individuano tre principali tipi di sere, tre tipi di comunità serali.

- **XEROSERE:** xeros vuol dire arido. Sono quelle in cui una successione ecologica inizia su una superficie rocciosa, l'ambiente è una roccia e non il suolo, quindi è inospitale con forti escursioni termiche, infatti si tratta di organismi resilienti che devono abituarsi a condizioni che cambiano in continuazione. I primi colonizzatori sono i muschi e i licheni. Questa situazione può durare anche centinaia di anni perché il lichene e il muschio devono "bucare" la roccia e costruire le prime tasche di suolo;
- **MESOSERE:** il suolo già c'è ed è profondo, quindi saltiamo lo stadio della chetogenesi che è già avvenuta. Abbiamo vegetazione dominata da specie erbacee, poi arbusti e poi la vegetazione arborea che è quella che porterà al climax. Sono più veloci delle xerosere e delle idrosere;
- **HYDROSERE:** hydro vuol dire ambienti dove l'acqua non è limitata. Iniziano sulle sponde dei laghi, quindi non ci sono muschi e licheni, ma sfagni che lasciano il posto ad altri muschi, specie erbacee, arbustive ed infine arboree.

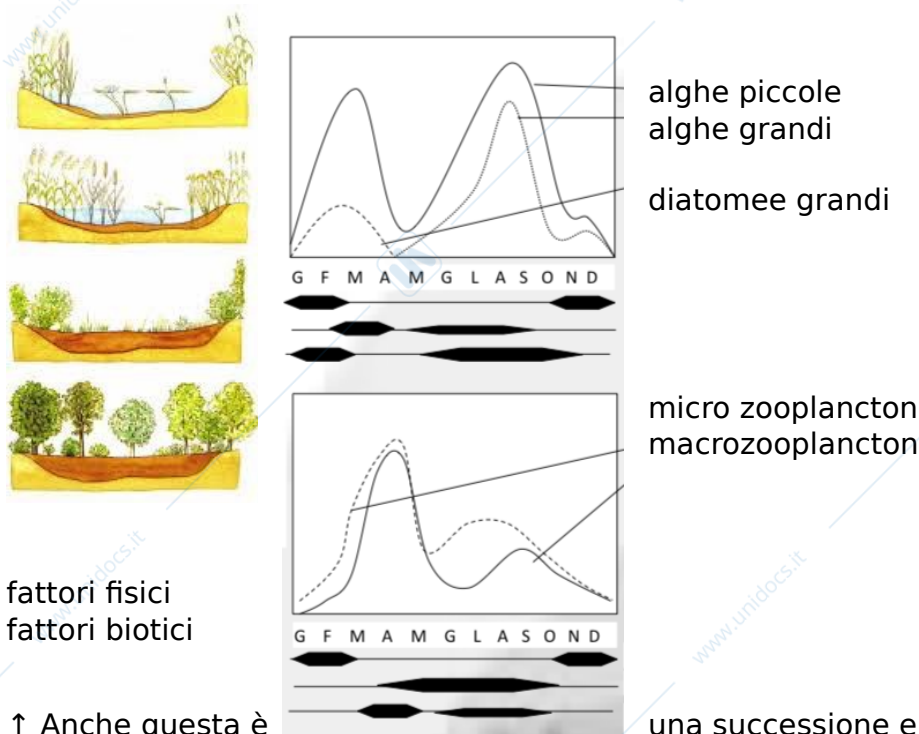
SUCCESSIONE ECOLOGICA NEI LAGHI (IDROSERA):

1) *le specie vegetali (stagni) colonizzano i bordi;
(si riduce la superficie occupata dall'acqua e il lago diventa palude)*

2,3) *al procedere della sedimentazione lo specchio di acqua si riduce in profondità ed estensione;
(la palude diventa torbiera)*

4) *nella fascia retrostante si sviluppano specie arbustive, poi arboree.*

(↑ questo succede quando un lago viene lasciato senza acqua, come un campo diventa foresta se viene abbandonato a se stesso)



fattori fisici
fattori biotici

↑ Anche questa è una successione e ci troviamo nel caso di una xerose, cioè in ambiente acquatico. Però in questo caso non ci riferiamo ad un substrato in particolare, ma ad un organismo in particolare, IL PLANCTON. Questo plancton è lungo la colonna d'acqua e non ha una precisa successione temporale, ma ha diatomee grandi, alghe piccole e alghe grandi che coesistono contemporaneamente, senza che esista una successione. Questo succede perché in ambiente marino le condizioni che cambiano così velocemente da un momento all'altro non fanno sì che si abbiano comunità ordinate nel tempo, quindi esse riescono a coesistere perché influiscono fattori fisici sulle diatomee e sulle alghe piccole in alcuni mesi dell'anno, in altri mesi dell'anno influisce la predazione e in altri mesi dell'anno influisce la mancanza dei nutrienti. In questo caso non abbiamo mai un climax, ma un **PLAGGIOCLIMAX**.

Un'altra particolarità sono gli **ambienti intertidali**, cioè che difendono le maree, per cui la zona del litorale. In questo ambiente intertidale troviamo l'organismo che è abituato ad essere soffocato dall'acqua e ad essere a secco (dipende dalla marea), quindi ha una marcia in più per sopravvivere. Lungo queste zone abbiamo organismi che riescono a cambiare repentinamente nel tempo: nei primi stadi della successione abbiamo specie che resistono al disseccamento; poi cambiando la vegetazione avremo specie intermedie, cioè i vari tipi di alghe, fino ad arrivare agli stadi finali.

Che cosa succede quando la comunità 1 lascia spazio alla comunità 2? Cioè **secondo quale criterio passo da uno stato pioniero ad uno stadio serale ad uno stadio climax**. Sono stati fondati su tre modelli di successione ecologica nel 1977 da Connell e Slatyer, due ecologi. Questi modelli intervengono sempre nelle successioni, non c'è un modello più importante rispetto all'altro, ma anche in questo caso dipende in quale ecosistema ci troviamo.

- 1) **FACILITAZIONE**: le specie transitorie si insediano se le specie precedenti (le pioniere) hanno preparato il substrato, quindi queste specie transitorie modificano il substrato e facilitano l'ingresso della compagine alle comunità che si susseguiranno;

- 2) **TOLLERANZA:** le specie transitorie si insediano indipendentemente da quello che fanno le pioniere, perché esse sono più capaci di utilizzare le risorse;
- 3) **INIBIZIONE:** le specie pioniere ostacolano o impediscono l'insediamento di altre specie, questo succede quando i nutrienti sono limitanti (esempio le specie del deserto).

Ricorda: successione ecologica ovvero dinamica di comunità

IL CLIMAX

È un concetto complesso, cioè si tratta di una comunità stabile, ma nel corso del tempo si sono avute diverse teorie, vediamo tre:

- Clements 1916 = **visione olistica** (monovisione), **monoclimax:** la successione arriva ad uno stadio finale che viene ad essere favorito dal clima regionale del luogo dove si instaura la comunità; il climax può essere paragonato ad un organismo quindi nasce, cresce e muore.

- Gleason 1926 = **visione individualistica:** la successione non è regolare, non si può prevedere, per cui non esiste uno stadio di climax, ma la formazione di una comunità stabile è casuale.

[Nella lezione precedente delle comunità si è già parlato di Clements e Gleason, andare a vedere in che argomento e paragonarli a questi]

- Tansley 1939 = **visione policlimax:** esistono tante comunità climax aperte perché queste comunità dipendono dalle condizioni ambientali del luogo; dato che posso avere luoghi differenti, anche le comunità che si trovano in quel luogo danno origine a diversi climax. [Questo invece è lo studioso che ha coniato il termine ecosistema nella prima lezione]

Questa è la teoria che noi moderni accettiamo, cioè il climax è un mosaico di climax diversificati.

Il climax nell'energetica $P=R$, quindi la comunità climax si autoconserva, resta in equilibrio con se stessa e con l'ambiente fisico, perché è caratterizzata da organismi altamente specializzati (organismi K-strategi), che in qualche modo riescono a utilizzare in maniera ottimale le risorse. Nella teoria del policlimax, in una determinata regione, io distinguo **un climax regionale** o climatico e **più climax edafici** o locali: il climax regionale dipende dal clima generale della regione (ad es. Italia); il climax edafico dipende dalla topografia e dal clima locale.

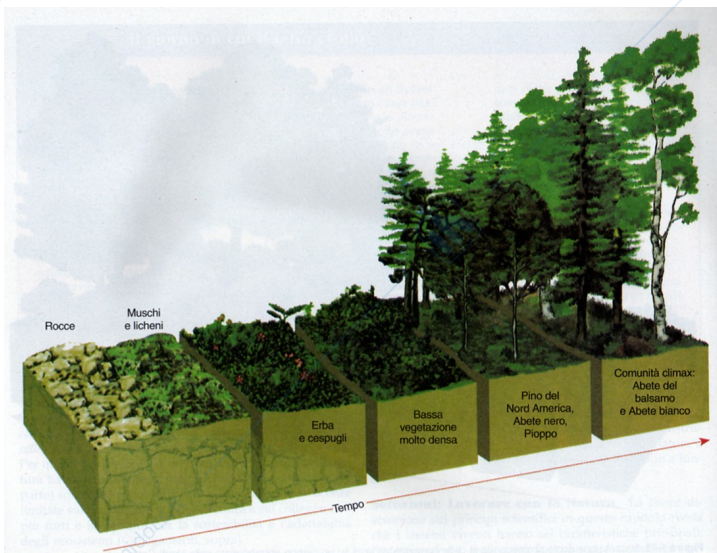
Cosa succede quando una comunità non si trova né in uno stadio di climax regionale né in uno stato di climax edafico? Si dice che si trova in un climax mantenuto dall'uomo che si chiama climax da disturbo o disclimax, o subclimax antropogenico: l'uomo determina la comunità stabile di quel posto; esempi sono il pascolo e gli agrosistemi. Se un agrosistema lo lasciamo senza diserbanti, senza cura da parte dell'uomo, dopo 7-8 mesi questo sarà pieno di erbacce e si distrugge. Allo stesso modo il pascolo viene mantenuto basso dall'uomo che falcia l'erba, in modo tale che quando crescono arbusti e alberi nel corso degli anni avremo animali che si cibano.

Un esempio di climax edafico: in una stessa zona abbiamo foresta di sequoia attaccata ad una foresta pigmea di sequoie = hanno lo stesso clima ma da una parte ho alberi alti anche 40 metri e dall'altra alberi alti 3 metri (pigmea). Questo succede perché è il substrato che cambia pur essendo nello stesso clima, da una parte ho un

suolo acido, dall'altra ho un suolo di argilla il quale è uno scudo alla penetrazione delle radici facendo in modo che le foreste di sequoie non attecchiscano ma le foreste di alberi più piccoli si.

Quando passiamo da uno stadio pioniere ad uno stadio serale a quello di climax riconosciamo tre fasi, una giovanile, una intermedia e una matura. Se mettiamo su un grafico (non c'è grafico nelle slide, ma penso sia quello all'inizio della bioenergetica) l'età della successione biologica e i processi di produzione e respirazione vediamo che: quando la produzione eguaglia la respirazione siamo ad uno stato maturo. Cosa succede alla successione biologica: la respirazione aumenta, la biomassa aumenta, alla fine avremo $P=R$, quindi siamo nello stadio stabile in cui ci sono condizioni ottimali delle risorse; la crescita del sistema si arresta, arriva ad uno stato stazionario e ho tantissimo accumulo di sostanza organica al suolo, quindi il suolo diventa strutturato, cioè comincia a diventare maturo. Questo stadio stazionario rimane fino a quando qualcuno o qualcosa non interviene a mutare questo stadio stazionario (uomo o qualsiasi evento stocastico).

Fino ad ora abbiamo visto la successione autogena e allogena, la successione autotrofa ed eterotrofa, ora facciamo una terza distinzione:



- **successione primaria:** partiamo da una roccia nuda, quindi comunità pioniere; muschi e licheni; passiamo agli stadi serali; arriviamo allo stadio di climax. HO SUBSTRATI DIVERSI Le specie che si susseguono quindi sono muschi e licheni, poi specie erbacee r-strateghe e poi specie arboree k-strateghe.

- **successione secondaria:** non ho substrato, ma ho un suolo. Parto da un sito precedentemente occupato, avrò specie erbacee, arbustive e poi arboree. Quindi salto il primo stadio, la successione secondaria sarà più veloce della successione primaria. Le specie che si susseguono sono direttamente specie erbacee r-strateghe e poi specie arboree k-strateghe.



Alla domanda “differenza tra successione primaria e secondaria” si risponde così: la primaria ha inizio su un substrato mai colonizzato precedentemente, come la colata lavica, la secondaria ha inizio su un suolo precedentemente occupato, ad esempio un campo abbandonato.

Devo considerare un altro processo che è la PEDOGENESI, perché contestualmente alla successione primaria (che parte da roccia nuda) si ha nel suolo il processo di pedogenesi, ovvero formazione del suolo. Questi due non sono sinonimi, uno avviene nel suolo (ipogeo), l'altro nello stato ipogeo (in cima), ma avvengono di pari passo.

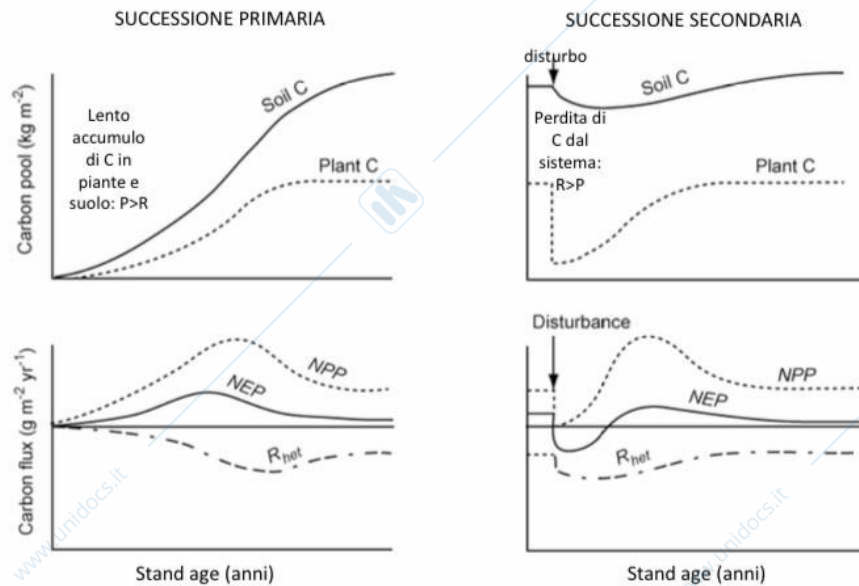
Durante la dinamica successionale le specie si susseguono l'un l'altra, generalmente le prime specie sono r-strategie e poi queste lasciano il posto alle k-strategie. Domanda d'esame: perché? Risposta: perché le r-strategie sono legate a una tipologia di popolazione che è diversa dalle k, le r sono soggette a crolli catastrofici e crescita esponenziale, quindi in un ecosistema instabile (roccia nuda) è caratterizzata da specie pioniere. Le specie r poi vengono sostituite da specie k perché hanno una strategia evolutiva di popolazione vincente in un ecosistema stabile.

Se la r ha dispersione da seme: all'improvviso arriva un'eruzione vulcanica, mi distrugge il suolo, questo diventa roccia e non posso fare niente con i semi che sono sepolti. Passo quindi ad una situazione in cui ci sono altri semi, cioè altre piante disperse che colonizzano il territorio. Quindi dispersione di semi e dispersione da semi sono importanti per le specie r-strategie. Anche semi con lunga vita sono importanti per queste specie perché posso avere 8-9 mesi in cui non c'è pioggia e quindi il seme non germina. Queste sono le caratteristiche con bassa capacità di competizione che rendono una specie r-vincente in substrati all'inizio della successione ecologica. Man mano che vado avanti la k-strategia è più vincente perché ho tassi di crescita medio-bassi e alta capacità competitiva per la luce (che le r non hanno perché non gli arriva la luce e non possono fare fotosintesi).

Non succede mai che ci sono solo specie r o solo specie k, ma abbiamo uno stadio in cui coesistono le due specie. Nello stato di ecosistema non ci deve essere competizione, le nicchie ecologiche devono essere separate. In ambiente marino prima gli organismi colonizzatori sono quelli che hanno strutture rizoidali (il rizoide di un'alga è simile a quello che hanno muschi e licheni), queste poi cedono il passo a diverse tipologie di alghe, macroalghe e poi piante superiori fino ad arrivare a Talassa (angiosperma acquatica).

Cosa succede al ciclo del carbonio nelle successioni ecologiche?

BILANCIO DI CARBONIO NELLE SUCCESSIONI



NEP = produttività netta ecosistemica; NPP= produttività primaria netta; R_{het} = respirazione eterotrofa

Vediamo prima la quantità di carbonio (grafico sopra) e poi il flusso del carbonio (grafico sotto)

SUCCESIONE PRIMARIA (autogena): all'inizio ho un lento pool di carbonio, nel suolo e nelle piante. Negli stadi intermedi il carbonio cresce nel sistema e nella pianta, cresce la biomassa e al contempo cresce la quantità di carbonio nel suolo. Arriva al terzo stadio, le piante cessano la crescita, la biomassa si accumula nella specie (k), nel suolo il pool di carbonio raggiunge il massimo. Quindi in uno stadio di climax la crescita del sistema cessa e al suolo si incamera sostanza organica che raggiunge il massimo livello.

Come si muove il flusso del carbonio? Nel ciclo del carbonio c'è un bilancio tra fotosintesi primaria netta NPP e la respirazione delle piante e del sistema. Se io considero il bilancio della comunità (tutti i processi di produzione del sistema al netto dei processi di respirazione del sistema) devo andare a vedere il valore di NEP, cioè il valore di produttività netta (NPP - respirazione eterotrofa). All'inizio il flusso del carbonio si muove lentamente ma tende ad aumentare, al contempo tende ad aumentare anche NPP, perché la respirazione da parte delle piante è piccola. Passa del tempo e arriviamo agli stadi intermedi, in cui la produzione del sistema (biomassa delle piante) aumenta, ma al contempo aumenta anche la respirazione, al netto NPP aumenta. Quando arrivo agli stadi finali la produzione si abbassa, aumenta la biomassa, per cui mi serve molta respirazione per mantenere la biomassa, quindi avrò una produttività netta ecosistemica NEP che tende a zero, condizione in cui $P=R$.

SUCCESIONE SECONDARIA (allogena): generalmente abbiamo un disturbo. Nei primi stadi ho una perdita di carbonio dal sistema perché può arrivare un incendio catastrofico che brucia tutta la biomassa, quindi posso avere che la respirazione diventa maggiore della produzione. Andando avanti con gli stadi la situazione si porta ad un livello per cui comincia ad aumentare il carbonio al suolo, il sistema comincia a riprendersi e comincia ad aumentare il carbonio nelle piante. Arrivo allo stadio terminale in cui ho massimo accumulo di sostanza organica al suolo e massimo accumulo di carbonio nelle piante.

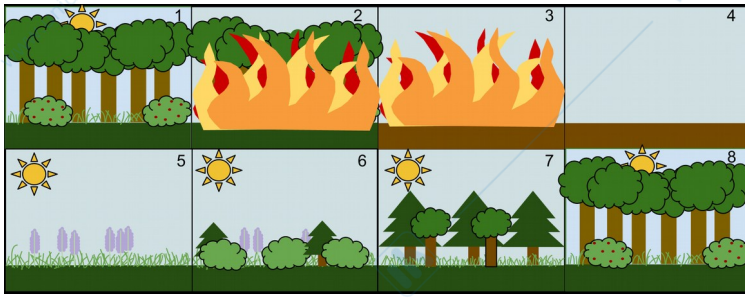
Guardiamo al flusso del carbonio: essendoci un disturbo, i flussi del carbonio vengono persi dal sistema perché il fuoco brucia tutto. Dopo il fuoco, avrò un incremento di produttività primaria netta perché gli organismi vegetali agiscono sul substrato che, essendo stato bruciato, ha molta sostanza vegetale carbonizzata (elevata quantità di nutrienti). Aumenta anche la respirazione per cui la produttività primaria netta (bilancio tra NPP e R_{et} cioè respirazione eterotrofa) comincia a declinare, perché negli stadi finali NPP si abbassa, aumenta la respirazione eterotrofa, e al netto $NPP - R_{et}$ ci darà un NEP che quasi tende a 0. (consiglio di studiare da Odum l'interpretazione di questo grafico)

Un tipo particolare di successione ecologica allogena e secondaria è la **SUCCESSIONE CICLICA**, cioè una successione dovuta a input esterni, ovvero il fuoco. Gli input esterni, oltre al fuoco, possono essere anche fertilizzanti, tempeste, inquinamento antropico, cioè qualcosa che va a perturbare il sistema e va ad alterare il corso normale della successione ecologica. Se questi disturbi si verificano ad intervalli regolari si dice che la successione è ciclica. Considero un campo abbandonato: questo campo da specie erbacee produrrà specie arbustive, poi alberi, ad un certo punto scoppia l'incendio, gli alberi vengono distrutti, il suolo è nudo, sarà soggetto ad agenti atmosferici, il suolo nudo verrà colonizzato da specie erbacee, arbustive e poi arboree; dopo 10 anni avrò di nuovo il fuoco e inizia di nuovo il ciclo. Questo accade nel parco di Yellowstone in cui il fuoco è naturale oppure un altro esempio è la fertilizzazione di un campo condotta per molti anni.

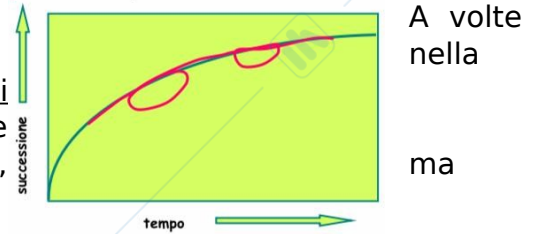
IL FUOCO INDUCE UNA SUCCESSIONE ALLOGENA e lo può fare perché è un fattore ecologico evolutivo: evolutivo perché l'uomo herectus già lo usava; importante fattore ecologico perché alcune foreste vengono rigenerate proprio grazie al fuoco spontaneo. Ad esempio considero una pigna o tutti gli alberi presenti nella taiga: quando brucio la pigna essa si apre e la resina rilascia i semi; quindi immaginiamo come aprire una pigna se non ci fosse fuoco.

Quando si ha un incendio, se questo è *intenso* determina la **combustione della vegetazione**, quindi gran parte della biomassa vegetale viene ad essere carbonizzata. Il residuo della biomassa vegetale bruciata sono le ceneri bianche o scure, le quali sono molto fertili quindi **l'effetto immediato del fuoco** è un suolo completamente senza vegetazione, ma ricco di nutrienti su cui le specie r (erbacee, graminacee o leguminose, in particolare le leguminose perché riescono ad assorbire azoto dall'atmosfera) possono colonizzare. **L'effetto a lungo termine del fuoco** è la successione ecologica: se ho un territorio percorso dal fuoco questo non è omogeneo in tutti i punti, ma il fuoco che avanza dipende dalla vegetazione che trova, dal suolo, dal tipo di combustibile, ecc... Quindi a lungo termine il fuoco può bruciare alcune zolle di terra e altre no: nelle zone che brucia il suolo, questo sarà nudo ed esposto a cambiamenti vegetazionali e avremo una successione ecologica secondaria; laddove invece il fuoco non ha bruciato, la successione va avanti nel suo tempo stabilito. Otterremo dei puzzle che costituiscono un vero e proprio mosaico che si chiama CAMBIAMENTO SUCCESSIONALE DOVUTO AL MOSAICO DEL FUOCO ↓.

bosco - fuoco - zero - specie erbacee - arboree



successione ecologica si possono verificare anelli di regressione: scoppia un incendio, vegetazione viene bruciata, la successione ecologica non prosegue, indietreggia.



Nelle successioni cicliche spesso si verifica un fenomeno di autosuccessione, cioè alla fine della successione la vegetazione finale sarà uguale a quella di partenza che è stata bruciata.

Per quanto riguarda gli animali:

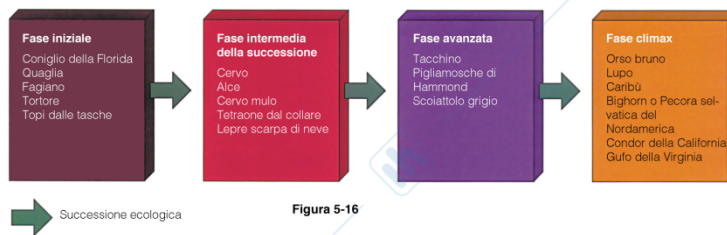
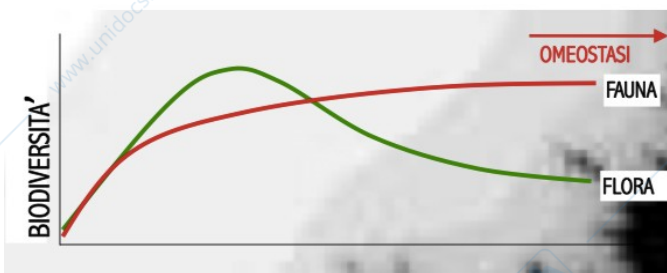


Figura 5-16

all'inizio ho specie erbacee quindi l'animale presente sarà l'ovino, il bovino, il roditore; successivamente questi richiamano i carnivori; poi posso avere ad esempio i picchi quando ho specie arboree; l'uomo è messo al di

fuori perché può essere presente in qualsiasi stadio.

Come cambia la biodiversità:



la biodiversità vegetale (verde) all'inizio aumenta, quando arriviamo verso gli stadi finali le specie vegetali diminuiscono in biodiversità. Questo succede perché negli stadi di climax ho l'effetto di esclusione competitiva, per cui la specie che sopravvive è quella che si adatta meglio, cioè le r-strategie

lasciano il posto alle k-strategie. Per quanto riguarda la biodiversità faunistica essa aumenta sempre e diventa stabile negli stadi finali. Questo succede perché aumenta la complessità strutturale dell'habitat, cioè la foresta ha una struttura, una nicchia, più complessa rispetto ad un prato, quindi ospita più specie, tra le quali si possono instaurare anche interazioni.

nella successione autotrofa un habitat che non scompare, non viene degradato, ma modifica nel tempo la composizione di specie (dal prato alla prateria, poi alla foresta). Questo habitat viene modificato dalla vegetazione che via via si sussegue lungo un gradiente temporale molto lungo. Infatti la scala temporale della successione autotrofa per secoli.

IL FUOCO.

Il fuoco è un fattore ecologico abiotico e, al pari di tutti gli altri fattori ecologici, è anche un fattore evolutivo. I segni che indicano che una determinata zona è stata interessata da incendi sono: resti di cenere, carboncini e biomassa vegetale solo parzialmente bruciata. I primi ritrovamenti di incendi risalgono al Mesozoico, a 150 milioni di anni fa. Molto estesi sono stati gli incendi che risalgono a 65 milioni di anni fa, tra il Cenozoico e il Terziario, alla fine dell'era dei rettili. Molti ritengono che gli incendi che hanno caratterizzato quest'era abbiano causato la riduzione di un certo tipo di vegetazione, quindi un disequilibrio delle catene alimentari, oltre che cambiamenti riguardanti il suolo e il clima (in quanto c'è stata liberazione di gas ad effetto serra e di polveri), causando così la scomparsa dei grandi rettili. Anche per l'uomo il fuoco può essere considerato un elemento importante nell'evoluzione: molti scienziati ritengono che la capacità di utilizzare il fuoco per cuocere il cibo e per cacciare abbia segnato un passaggio importante per l'evoluzione dell'intelletto umano, perché l'uomo ha cominciato a non avere più paura di questo elemento e ha dovuto ragionare per poterlo utilizzare. L'uomo non solo ha utilizzato il fuoco come strumento per la caccia e per cuocere il cibo, ma lo ha cominciato ad usare per gestire il territorio, bruciando la terra per coltivare, per far crescere le erbe per il nutrimento dei propri animali domestici o per poter costruire capanne. In Europa, sono in particolare i paesi che affacciano sul Mediterraneo ad avere un'incidenza maggiore del fenomeno degli incendi. C'è stato un notevole incremento del numero di incendi nel decennio che va dal 1990 al 2000. Gli incendi sono aumentati di 5 volte nell'area mediterranea, di 9 volte per l'Italia, di 8 volte in Grecia e sono raddoppiati in Spagna. In Italia, la Campania è tra le regioni con il numero di incendi più elevato, ma non è quella che ha la superficie percorsa dal fuoco maggiore (Sicilia). Questo vuol dire che ci sono stati tanti incendi rilevati, ma tutti di piccole dimensioni.

GLI INCENDI E LA BIOSFERA

Gli organismi che subiscono maggiormente l'azione del fuoco, sono le piante perché non hanno capacità di fuga, per cui il fuoco è un fattore evolutivo importante soprattutto per quanto riguarda la vegetazione. Alcuni tipi di vegetazione devono la loro esistenza e la loro sopravvivenza proprio al ripetersi di incendi. Alcuni biomi sono fortemente dipendenti dal ripetersi periodico degli incendi perché grazie alla combustione si ha una mineralizzazione rapida della biomassa vivente, con la liberazione di composti inorganici.

- **Nelle foreste boreali di conifere**, che si trovano verso il nord Europa (es. penisola Scandinava), c'è una lenta mineralizzazione primaria, mentre prevale l'umificazione. Le foreste boreali si mantengono, in maniera naturale, proprio grazie al ripetersi di incendi con un intervallo che è compreso tra i 40 e i 100 anni. Infatti con il fuoco, viene liberata velocemente la componente inorganica, che altrimenti sarebbe bloccata

nell'humus, quindi, viene velocizzato un processo che, per le condizioni climatiche specifiche e per il tipo di lettiera, sarebbe molto più lento.

- **La macchia mediterranea e la brughiera** sono biomi mantenuti nelle prime fasi evolutive dal ripetersi di incendi. Questo processo prende il nome di successione regressiva. Gli incendi servono per mantenere uno specifico tipo di vegetazione, che nella sua evoluzione normale tenderebbe a diventare una foresta di *Quercus ilex*.

- **Le praterie** sono dei biomi ad elevata biodiversità, soprattutto floristica, in cui prevalgono le erbacee. La prateria è mantenuta dal ripetersi di incendi annuali o biennali. Con il ripetersi di incendi, infatti, l'evoluzione del sistema si blocca alle fasi iniziali, quindi le erbacee non vengono sostituite da arbusti e poi da alberi.

- **La savana** è costituita da erbacee o da arbusti, e generalmente circonda le foreste. La savana si è originata dalle foreste pluviali attraverso degli incendi che si susseguono dal Pleistocene ad oggi, nel processo che viene chiamato savanizzazione, e viene mantenuta da incendi frequenti (annuali-biennali), in cui le erbacee bruciano molto velocemente. Siccome le foreste sono circondate dalla savana, può capitare che durante l'incendio venga bruciato anche un pezzo di foresta, facendo avanzare la savana rispetto alla foresta. Le foreste, essendo circondate dalla savana, vengono isolate geneticamente da tutto il resto (elemento che indica perché il fuoco può essere un fattore ecologico ed evolutivo).

CAUSE DEGLI INCENDI

Cause di incendi naturali sono fulmini, eruzioni vulcaniche, autocombustione della materia organica in condizioni microclimatiche specifiche (elevata temperatura o bassa umidità). Le cause naturali di incendi sono solo responsabili dell'1% degli incendi. Per il resto, gli incendi sono di origine antropica (88%). C'è una distinzione tra cause volontarie e cause involontarie. Le cause involontarie (23%) sono dovute ad esempio, a mozziconi di sigaretta, carboncini dopo il picnic, ecc. Le cause volontarie (65%) sono legate alla gestione del territorio, per esempio urbanizzazione, conversione di aree naturali in campi agricoli oppure in pascoli, pratiche colturali (si bruciano le stoppie dopo il raccolto). Accanto a queste utilizzazioni c'è l'"industria degli incendi". Molti operai, pagati per l'avvistamento e lo spegnimento del fuoco, appiccano il fuoco per poterlo poi spegnere e quindi essere pagati. Ci sono anche cause ignote di incendi (11%), comunque attribuibili all'uomo.

CARATTERISTICHE DEGLI INCENDI

1. **NUMERO DI INCENDI:** Il maggior numero di incendi si verifica nel periodo arido. Tuttavia si hanno dei picchi anche in altri due periodi dell'anno: in primavera e in autunno. In primavera si ha la ripresa vegetativa, quindi c'è un incremento del combustibile. In autunno c'è la caduta delle foglie e quindi anche in questo caso aumenta il combustibile. Per valutare il regime del fuoco, si devono prendere in considerazione l'intensità, la frequenza e la stagione. Questi parametri sono interconnessi gli uni agli altri.
2. **INTENSITA' DELL'INCENDIO:** è la potenza termica del fronte del fuoco ed è data da: $E = C \cdot M \cdot B$ C = calore sviluppato dal fronte del fuoco, specifico per ciascun combustibile; M = quantità di combustibile disponibile; B = velocità con la quale il fuoco si propaga (dipende molto dal vento e dalle condizioni climatiche).
3. **FREQUENZA:** è l'inverso dell'intervallo che intercorre tra un incendio e quello successivo (maggiore è la frequenza, minore è l'intervallo che intercorre tra un incendio e quello successivo). L'intensità è collegata con la frequenza degli

incendi. Infatti se ci sono incendi molto ravvicinati da un punto di vista temporale, la quantità di combustibile che si ha a disposizione è scarsa, e di conseguenza l'intensità diventa sicuramente minore. La frequenza sarà maggiore quanto maggiore è la velocità di accumulo di combustibile (produttività).

4. **STAGIONE:** periodo dell'anno in cui si verifica l'incendio.
5. **SUPERFICIE MEDIA DELL'INCENDIO:** si può verificare un numero elevato di incendi, ma che hanno riguardato una superficie molto piccola, e quindi gli effetti non sono espliciti tanto sul suolo, quanto in atmosfera perché intervengono maggiormente come emissioni.

TIPOLOGIE DI INCENDI

A seconda dell'altezza della vegetazione interessata dagli incendi alcuni autori distinguono gli incendi in: incendi di superficie, incendi di cima e incendi di suolo.

- **Gli incendi di superficie** sono quelli che si sviluppano più vicino al suolo, e generalmente non hanno un'elevata intensità. Interessano le erbacee, la lettiera, la necromassa e il sottobosco.
- **Gli incendi di cima** si propagano da una chioma all'altra attraverso il vento; interessano le foreste, e in alcuni casi la macchia mediterranea (solo quando è macchia alta, cioè costituita da alberelli). Producono un'elevata quantità di calore e si espandono rapidamente.
- **Gli incendi più pericolosi sono gli incendi di suolo.** Gli incendi di suolo, infatti, non si sviluppano solo in superficie, ma interessano anche gli organi ipogei, quindi le radici. Ci sono molte piante che anche se vengono danneggiate molto nella parte epigea, possono riprendersi rapidamente dopo il passaggio del fuoco. Se vengono distrutti gli organi ipogei la pianta non può ricrescere. Il fuoco di suolo è più difficile da avvistare perché non fa tanta fiamma, è perlopiù fumo. La diffusione di questo tipo di incendio è molto bassa. Secondo altri autori la classificazione degli incendi va fatta esclusivamente prendendo in considerazione l'intensità, distinguendo gli incendi in incendi "a corona" (violenti) e incendi di suolo, e poi tutta una gamma di tipologia intermedie tra questi due estremi.

EFFETTI DEGLI INCENDI

Gli effetti del fuoco si possono distinguere in: effetti immediati, effetti a breve termine e effetti a lungo termine.

- **Gli effetti a breve termine e quelli immediati** sono una diretta conseguenza dell'incendio, perché cambia la flora e la fauna che vanno a ricrescere e a ripopolare quell'area che è stata interessata dal fuoco (cambiamenti nella successione). La successione ecologica è l'evoluzione dell'ecosistema, quindi delle comunità vegetali e animali che sono presenti nel sistema. Un altro effetto immediato è l'aumento della disponibilità di nutrienti. La combustione nella maggior parte dei casi non è mai completa. Una combustione completa si ha nelle prime fasi di un incendio, cioè nella fase di fiamma. Inizialmente, infatti, c'è combustibile ed ossigeno, di conseguenza la combustione porta alla liberazione di CO₂ e composti inorganici. Man mano che la combustione continua si ha la fase di fumo, in cui l'ossigeno diventa più carente, e di conseguenza le combustioni sono meno complete (si libera materia organica solo parzialmente combusta, metano e monossido di carbonio in atmosfera). Il carbone è materia organica solo parzialmente combusta. Quindi dopo l'incendio c'è una grossa quantità di substrato che i microrganismi possono attaccare per mineralizzare e

decomporre. Per capire quanto un incendio sia stato intenso, lo si può fare osservando le ceneri. Se si ha la prevalenza delle ceneri bianche, la combustione è stata più spinta; mentre se si ha il prevalere di ceneri scure, la combustione non è stata del tutto completa.

- **Gli effetti a lungo termine** riguardano i caratteri evolutivi di piante e animali. Dove si ha il ripetersi di questo fattore di disturbo, le piante e gli animali cercano o di proteggersi (capacità di fuga per gli animali, cortecce più resistenti nel caso delle piante) o di trarre vantaggio dal passaggio del fuoco. Un effetto a lungo termine è un cambiamento che riguarda il paesaggio, venendosi a creare il mosaico del fuoco. In un'area anche abbastanza piccola si creano delle patches (aree che sono state interessate da un incendio un mese prima, delle aree che sono state interessate da un incendio un anno prima, e delle aree che non vengono percorse dal fuoco da più anni) in cui le popolazioni si trovano in stadi successionali differenti.

EFFETTI DEL FUOCO SULLA VEGETAZIONE

Gli effetti di un incendio sulla vegetazione dipendono dall'intensità del fuoco e dalla resistenza e dalla resilienza delle comunità che si prendono in considerazione. È importante anche considerare la stagione e l'età della vegetazione. Se gli incendi vanno ad interessare un sistema nel momento in cui c'è la ripresa del ciclo vegetativo (primavera), ci saranno dei forti danni; se invece la vegetazione è inattiva (inverno) i danni saranno minori. Le piante più giovani sono meno resistenti al passaggio del fuoco. Le piante, a seconda di come reagiscono agli incendi, possono essere distinte in pirofite attive e pirofite passive.

- **Le pirofite passive** hanno evoluto delle difese specifiche: una corteccia particolarmente resistente (*Quercus suber*), olii o sostanze minerali ignifughe nel loro legno che alzano il punto di ebollizione (*Atriplex*, *atreplice*), o ancora la presenza di organi ipogei molto sviluppati, quali rizomi o polloni (*Orchis*, *Smilax*), che anche quando l'incendio distrugge la parte epigea garantiscono la sopravvivenza di quella pianta.

- **Le pirofite attive** riescono a trarre vantaggio dal passaggio del fuoco. *Myrtus communis* ricresce velocemente dopo il fuoco, sfruttando quell'abbondanza di nutrienti che è presente nelle ceneri depositate sul suolo. Nel momento in cui c'è il passaggio del fuoco, si ha anche la riduzione della competizione, perché chi sopravvive ha minore competizione con gli altri e non deve dividere con loro le risorse nutritive. Ci possono essere delle specie che dipendono dal fuoco per la loro riproduzione da seme. Importante per la germinazione di molti semi è la quantità di luce che arriva sulla superficie del suolo. La macchia mediterranea è in alcuni punti molto fitta, quindi la quantità di radiazione solare che raggiunge normalmente il suolo è scarsa. Dopo il passaggio del fuoco c'è una maggior quantità di radiazione che riesce ad arrivare ai semi sul suolo. In alcune specie, come il cisto, il tegumento dei semi viene rotto dalla combustione. Ciò consente l'imbibizione del seme e la germinazione. In altre specie il fuoco riesce a favorire la dispersione dei semi, come accade nel pino. Le pigne hanno un'abbondante resina che chiude i pinoli all'interno di essa. Il calore del fuoco, fa sciogliere la resina, e ciò consente la dispersione dei semi. Il *Pinus contorta*, in alcune aree, dipende unicamente dal passaggio del fuoco per la dispersione del proprio seme.

EFFETTI DEL FUOCO SUL SUOLO

- **Liberazione e perdita di nutrienti:** si può avere un arricchimento di composti inorganici grazie alla deposizione delle ceneri. Le ceneri possono essere però facilmente portate via per fenomeni di lisciviazione o di erosione. I fenomeni di erosione e lisciviazione sono più forti dopo l'incendio, perché non c'è la vegetazione che con le radici mantiene il suolo in modo stabile. La lisciviazione e l'erosione dipendono anche dal tipo di elemento preso in considerazione. Ogni elemento ha una sua mobilità nel comparto suolo. Ad esempio il sodio e il potassio, vengono persi con maggiore facilità rispetto ad elementi come il calcio o il fosforo. Si possono registrare anche delle perdite nel contenuto totale dei nutrienti, dovute non solo alla complessazione con altre sostanze del suolo, ma anche alla volatilizzazione di elementi, quali azoto, fosforo e zolfo, che volatilizzano a temperature relativamente basse. Gli elementi che volatilizzano, però, ricadono abbastanza velocemente in aree limitrofe a dove c'è stato l'incendio. Ciò può avvenire tramite deposizioni secche o deposizioni umide.

- **pH:** dopo l'incendio si constata solitamente un innalzamento del pH per la demolizione termica degli acidi organici derivanti dal processo di umificazione e per l'accumulo di ceneri alcaline. Questa variazione però avviene solo nello strato più superficiale di terreno. Procedendo in profondità diviene meno sensibile il divario rispetto alla zona non percorsa dal fuoco. Con il passare del tempo, solitamente di alcuni mesi, mentre nello strato più superficiale non vi sono variazioni, in quello più profondo si constata un leggero aumento del pH per la percolazione dei prodotti di combustione trasportati dalle acque piovane. L'effetto alcalinizzante dell'incendio è però transitorio poiché solitamente, sia per l'attività biologica sia per l'effetto delle precipitazioni, si torna ai valori iniziali. Pur non essendo possibile stabilire una regola generale per descrivere i tempi di ripristino, a causa della variazione spazio-temporale dell'attività microbica del terreno e delle precipitazioni, normalmente in un anno si torna alla situazione originaria.

- **Aumento della componente organica:** se non c'è combustione completa, aumenta la componente organica del suolo. Il suolo non è abituato a incrementi forti di temperatura, quindi se c'è un incendio violento, l'humus subisce processi di ricondensazione, dando luogo a **humus piromorfico**, ancora più recalcitrante. Di conseguenza la mineralizzazione secondaria diventa ancora più lenta. La materia organica rilasciata dal fuoco sarà attaccata dai microrganismi, il cui incremento dell'attività dovuto al fuoco può durare anche per 20 anni. La quantità di CO₂ emessa da questi microrganismi definisce le emissioni biogeniche, che si vanno a sovrapporre alle emissioni causate dal fuoco stesso.

- **Temperatura:** Se si verifica un incendio intenso, sulla superficie la temperatura raggiunge i 700°C. A 2,5 cm di profondità 150°C, mentre a 5 cm di profondità 50°C. Quest'ultimo valore è simile alla temperatura che si registra alla stessa profondità dopo un incendio moderato o leggero. Per quanto riguarda la temperatura, quello che cambia è soprattutto ciò che succede dopo l'incendio. Infatti, essendo ridotta o scomparsa la vegetazione presente in quell'area, le escursioni termiche sono maggiori, perché la radiazione solare non viene più captata dalla vegetazione (ciò è importante soprattutto nella tundra).

- **Tenore idrico:** l'incendio può cambiare l'idrologia del suolo. Quando c'è un incendio, soprattutto negli strati di lettiera, c'è una volatilizzazione di componenti idrofobiche. Queste componenti ricadono poi in aree vicine e formano strati idrorepellenti, in cui l'acqua non percola e le piante non ricrescono. Lo spessore dello strato idrorepellente dipende dal tipo di suolo e dal tipo di lettiera.

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari