

## 2. I cicli biogeochimici

Le strutture biologiche degli organismi viventi devono essere fabbricate a partire da elementi e composti chimici presenti nell'ambiente terrestre la cui disponibilità è limitata.

Per questo motivo i materiali che formano la massa corporea degli esseri viventi, a mano a mano che questi muoiono, devono essere smantellati e rimessi in circolazione per consentire la "costruzione" di nuovi individui (lo stesso accade per i rifiuti espulsi nell'ambiente dagli organismi nel corso della loro esistenza).

Gli atomi degli elementi che formano le complesse molecole biologiche rimangono sempre gli stessi: non si creano e non si distruggono. Un atomo di carbonio appartenente a una molecola di amido (per esempio, di un filo d'erba) può finire, il giorno dopo, in una proteina del muscolo di un cavallo per poi far parte, più tardi, di una molecola di diossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ) sospesa nell'aria. Si calcola che una molecola di diossido di carbonio rimanga nell'atmosfera (mediamente) per circa 300 anni, prima di essere catturata di nuovo da una pianta.

I costituenti chimici della materia, insomma, sono soggetti a trasformazioni cicliche, i cosiddetti **cicli biogeochimici**, che li fanno passare continuamente dal mondo vivente (bio) a quello inorganico non vivente (geo) e viceversa.

I più importanti cicli biogeochimici sono quelli del *carbonio*, dell'*ossigeno*, dell'*azoto* e del *fosforo*.

Tutti questi cicli, in particolare quelli del carbonio e dell'ossigeno, si intrecciano con un altro fondamentale ciclo, il *ciclo dell'acqua* o *ciclo idrologico*, che oltre a rivestire una vitale importanza biologica è uno dei principali fattori di regolazione climatica e di modellamento del paesaggio della Terra.

Fig. 1.  
Distribuzione del carbonio nei principali serbatoi naturali.

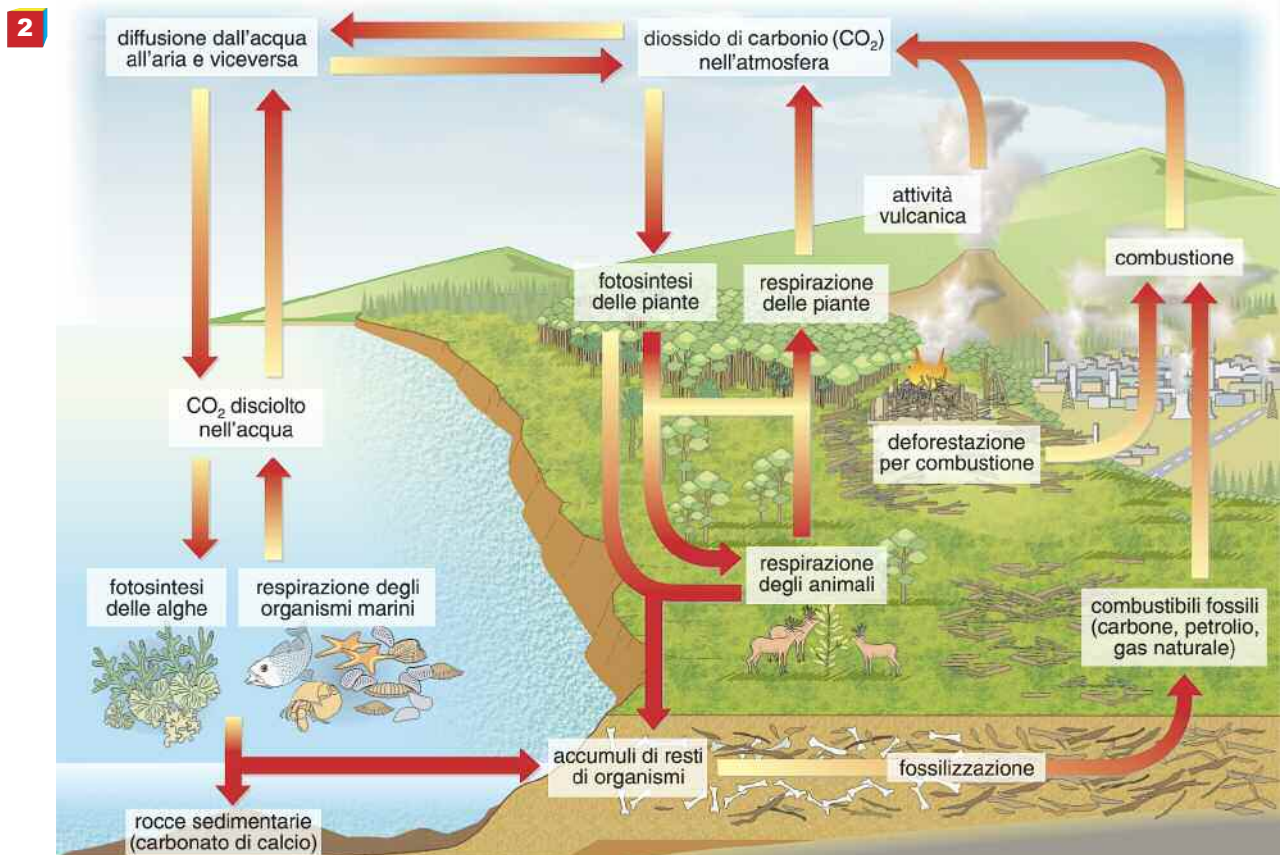


### IL CICLO DEL CARBONIO

#### Il ciclo del carbonio

L'unica fonte di carbonio utilizzabile dai vegetali è l'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) o diossido di carbonio, presente in parte nell'atmosfera e in parte molto maggiore disciolta nelle acque degli oceani (fig. 1).

Nella fotosintesi operata da piante, alghe e fitoplancton, la  $\text{CO}_2$  viene prelevata dall'ambiente (fig. 2) e con l'intervento dell'energia luminosa viene fatta combinare con atomi di idrogeno provenienti dall'acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (gli atomi di ossigeno dell'acqua si liberano, invece, nell'aria come molecole di ossigeno,  $\text{O}_2$ ): in questo modo, il carbonio viene "fissato", cioè incorporato in composti organici (biomolecole).



In seguito alla scomposizione delle biomolecole, compiuta attraverso il processo metabolico della *respirazione aerobica* (in presenza di ossigeno), operato da animali, piante e molti organismi decompositori, si riottengono i prodotti di partenza, cioè acqua e  $\text{CO}_2$ , che vengono restituiti all'ambiente.

Parte del carbonio contenuto nella  $\text{CO}_2$  disciolta nelle acque si sottrae temporaneamente al ciclo di questo elemento, in quanto viene incorporato nei gusci o negli scheletri di certi organismi marini come carbonato di calcio insolubile; i resti di questi organismi si accumulano come sedimenti, che danno origine a vasti depositi di rocce calcaree: queste ultime possono essere trascinate in profondità nel mantello terrestre, dove passano allo stato fuso nei magmi, trasformandosi in  $\text{CO}_2$  che, nelle eruzioni vulcaniche, viene di nuovo restituita all'atmosfera, rientrando a far parte del ciclo del carbonio.

Altre imponenti quantità di carbonio incorporate nei resti di antichi organismi marini e di piante sono rimasti sepolti in grandi ammassi che, nel corso dei tempi geologici, hanno subito processi di fossilizzazione, trasformandosi appunto in giacimenti di combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturale): in seguito alla loro combustione per opera dell'uomo, enormi quantità di  $\text{CO}_2$  vengono immesse nell'atmosfera, causando il conseguente aumento della concentrazione di questo gas, che è all'origine dell'"effetto serra".

Un'altra fonte di immissione di  $\text{CO}_2$  nell'atmosfera è rappresentata dagli incendi della vegetazione, dovuti a cause naturali, ma più spesso appiccati dall'uomo a scopi di deforestazione.

Il diossido di carbonio è infine presente anche nelle emissioni gassose prodotte dai vulcani, che rappresentano una delle fonti di alimentazione del serbatoio atmosferico di questo gas.

## Il ciclo dell'ossigeno

Il ciclo dell'ossigeno, come abbiamo visto, è strettamente intrecciato con il ciclo del carbonio.

L'ossigeno viene prodotto dalle piante nel corso della fotosintesi (staccandolo dalle molecole d'acqua) e si accumula nei "serbatoi" dell'atmosfera, di cui costituisce circa il 21% in volume, e delle acque marine (in cui si trova disciolto), da dove viene prelevato dagli animali e dalle piante stesse che lo utilizzano nella respirazione.

L'ossigeno ritorna poi nell'ambiente incorporato nelle molecole di acqua che si formano nel processo respiratorio.

## Il ciclo dell'azoto

L'**azoto**, elemento indispensabile per la costruzione degli amminoacidi, delle proteine e degli acidi nucleici, è il principale componente dell'atmosfera (ne costituisce circa il 78% in volume), dove è presente come molecole biatomiche ( $\text{N}_2$ ); tuttavia, né le piante né gli animali sono in grado di utilizzarlo in questa forma gassosa, perché i due atomi di azoto della molecola sono uniti da un triplo legame molto stabile ( $\text{N}\equiv\text{N}$ ) che, come vedremo, solo certi batteri riescono a spezzare.

Affinché l'azoto atmosferico diventi assimilabile per le piante e possa così entrare nelle reti alimentari, deve essere "fissato", cioè trasformato in composti inorganici solubili in acqua, precisamente in sali di ammonio ( $\text{NH}_4^+$ , che deriva dall'ammoniaca,  $\text{NH}_3$ ) e in nitrati,  $\text{NO}_3^-$ ; è solo in questa forma di **sali azotati** che l'azoto è biologicamente utilizzabile dalle piante.

La fissazione dell'azoto può avvenire in natura in seguito a:

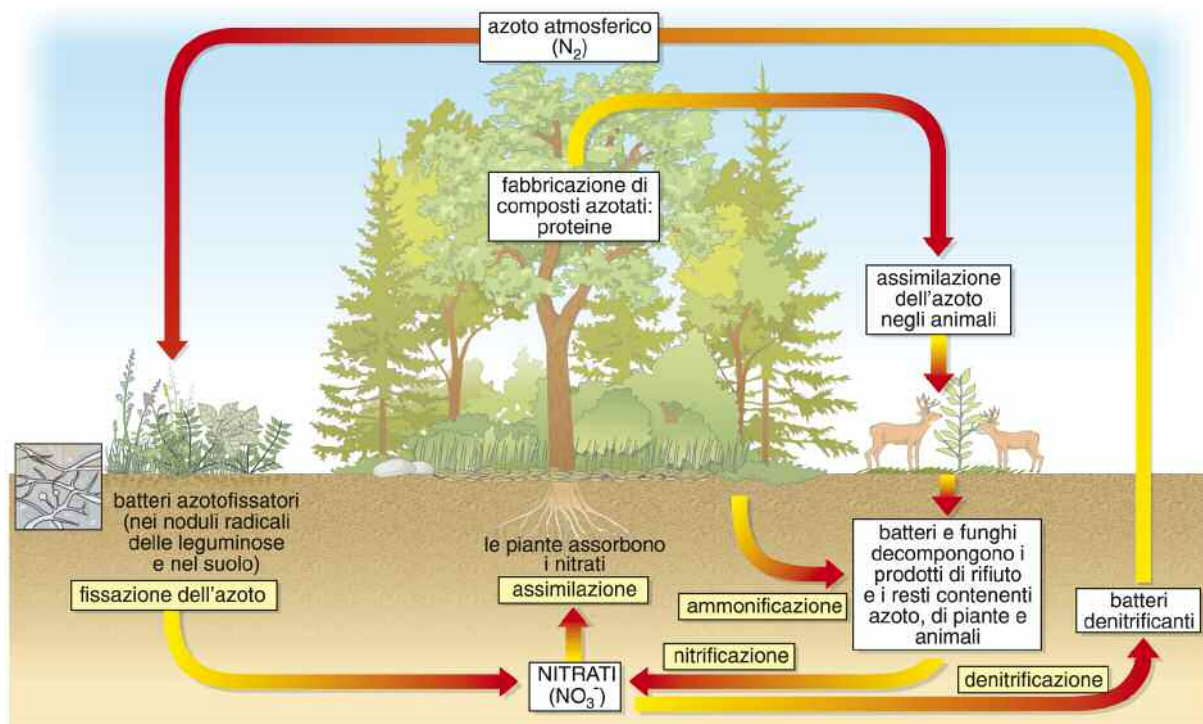
- reazioni chimiche nell'atmosfera, in particolare per azione dei fulmini, che producono ossidi di azoto i quali a contatto dell'acqua delle precipitazioni si trasformano in acido nitrico che, raggiunto il suolo, dà luogo alla formazione di nitrati;
- trasformazioni biochimiche a opera di batteri specializzati, detti *azotofissatori*, che vivono nel terreno e a cui si deve la maggior parte dell'azoto fissato contenuto nel suolo.

Va poi considerata una terza via di immissione, artificiale, di sali azotati nell'ambiente, praticata dall'uomo attraverso la *fissazione industriale di azoto* che permette di produrre fertilizzanti azotati, largamente impiegati in agricoltura.

La restituzione all'atmosfera, come  $N_2$ , dell'azoto fissato avviene per opera di un altro gruppo di batteri detti *denitrificanti*. Gli ecosistemi terrestri sono soggetti a perdite parziali di sali di azoto per dilavamento a opera dell'acqua che si infila nel suolo: queste perdite costituiscono tuttavia un apporto di azoto per gli ecosistemi acquatici (dei fiumi, dei laghi e delle coste marine).

Consideriamo ora i principali processi che intervengono nel ciclo dell'azoto (fig. 3): *fissazione* (biologica), *ammonificazione*, *nitrificazione*, *assimilazione* e *denitrificazione*.

## IL CICLO DELL'AZOTO



**FISSAZIONE DELL'AZOTO.** È praticata da alcune specie di batteri, detti **azotobatteri**, che grazie all'azione di enzimi (*nitrogenasi*) trasformano l'azoto gassoso ( $N_2$ ) in ammoniaca ( $NH_3$ ) la quale, nel mezzo acquoso del loro citoplasma, passa in soluzione formando **ioni ammonio** ( $NH_4^+$ ).

Alcuni azotobatteri (come *Acetobacter*) vivono *liberi nel suolo*. Altri (come *Rhizobium*) vivono in simbiosi mutualistica nelle radici delle leguminose (per esempio, trifoglio, erba medica, legumi, soia), in formazioni dette *noduli radicali*: la pianta assume direttamente ioni ammonio nei propri tessuti e fornisce in cambio ai batteri zuccheri e altri composti organici necessari al loro metabolismo. È per questa ragione che le leguminose hanno una grande importanza ecologica e agricola, poiché arricchiscono il terreno di azoto (concimazione naturale).

Negli ecosistemi acquatici l'attività di "azotofissatori" è svolta da cianobatteri.

Si è stimato che l'insieme degli azotobatteri presenti nella biosfera arrivi a fissare ogni anno l'equivalente di circa 200 milioni di tonnellate di azoto (circa due volte e mezzo rispetto alla quantità di fertilizzanti azotati impiegati dall'uomo).

**AMMONIFICAZIONE.** Rappresenta un altro processo attraverso cui sono resi disponibili nel terreno **ioni ammonio**. Il materiale di partenza è costituito dai resti vegetali e animali e dai prodotti di rifiuto animali (feci, urina): questi sono decomposti da batteri e funghi del suolo che ne estraggono le proteine e gli amminoacidi necessari per la propria crescita espellendo ioni ammonio che sono di nuovo riutilizzabili dalle piante. In questo modo è operato un efficiente riciclaggio.



**NITRIFICAZIONE.** Un gruppo di batteri **nitrificanti** (*Nitrosomonas*) trasforma gli ioni ammonio in ioni *nitrito* ( $\text{NO}_2^-$ ), che non fanno a tempo ad accumularsi perché un altro gruppo (*Nitrobacter*) provvede a ossidarli a ioni *nitrate* ( $\text{NO}_3^-$ ), la forma in cui le piante assumono dal terreno la maggior parte dell'azoto necessario.

**ASSIMILAZIONE.** Gli ioni ammonio e gli ioni nitrate assorbiti dalle radici delle piante sono assimilati e utilizzati per la biosintesi di amminoacidi e proteine. Le piante sono la sola fonte di azoto diretta o indiretta per tutti gli animali lungo le catene alimentari.

**DENITRIFICAZIONE.** È il processo che chiude il ciclo dell'azoto, grazie all'azione di un gruppo di batteri detti **denitrificanti** che operano nel terreno in assenza di ossigeno, trasformando i nitrati in azoto molecolare che ritorna nell'atmosfera (con questa reazione ricavano l'ossigeno necessario per la propria respirazione).

L'azoto, tra tutti i nutrienti essenziali per le piante, è quello che maggiormente *tende a scarseggiare*. Una tra le cause principali è legata alla elevata solubilità dei sali di ammonio e dei nitrati che, come in precedenza accennato, li rende facilmente allontanabili per dilavamento ad opera delle precipitazioni, con conseguente accumulo negli ecosistemi acquatici (in particolare quelli lacustri).

Nei terreni agricoli le perdite di azoto sono rilevanti sia perché il suolo è più esposto al dilavamento, sia perché una parte dell'azoto viene continuamente sottratta ai terreni con le piante stesse quando si effettua il raccolto. Per questo motivo si impiegano ingenti quantità di fertilizzanti azotati. L'eccesso di questi composti, insieme a quello dei fosfati (anch'essi usati abbondantemente come fertilizzanti) si riversa per dilavamento nei corsi d'acqua e si accumula nei laghi causando un tipo di inquinamento noto come *eutrofizzazione* che causa un anomalo sviluppo di alghe: come conseguenza si determina un'intensificazione dei processi di decomposizione, che comportano un forte consumo di ossigeno che ha come effetto la drastica riduzione o la morte di molte specie dell'ecosistema lacustre.

## Il ciclo del fosforo

Il fosforo è un elemento essenziale per tutti gli organismi in quanto entra nella composizione dei nucleotidi degli acidi nucleici, dell'ATP, dei fosfolipidi delle membrane cellulari; inoltre è un costituente delle ossa e dei denti. La sua utilizzazione biologica avviene in forma di ioni fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ ).

Il principale serbatoio del fosforo è costituito dalle rocce fosfatiche, di origine sedimentaria, dove è presente come sali fosfati (in particolare di calcio). Il fosforo che si trova nel suolo deriva dall'erosione di queste rocce (fig. 4). Le piante assorbono gli ioni fosfato in soluzione nel terreno e lo incorporano nei loro tessuti in forma di composti organici, che passano alla catena dei consumatori e infine ai decompositori che restituiscono all'ambiente ioni fosfato rendendoli nuovamente disponibili per le piante.

Una frazione dei fosfati, tuttavia, in seguito al dilavamento a opera delle piogge, finisce continuamente nei corsi d'acqua e quindi nei laghi e nel mare: qui in parte è incorporata negli ecosistemi acquatici, in parte si deposita in forma insolubile nei sedimenti, destinati a trasformarsi lentamente in rocce fosfatiche. Quando, nel corso di lunghe vicende, gli strati geologici contenenti queste rocce in seguito a sollevamento verranno riportati in superficie e di nuovo esposti all'erosione, i fosfati potranno ritornare in circolo negli ecosistemi terrestri. Questo *ciclo geochimico* è molto lento, per cui la quantità di ioni fosfato disponibile per gli organismi vegetali è sempre relativamente bassa e rappresenta un fattore limitante per la loro crescita. Il progressivo esaurimento delle miniere di fosfati costituirà un grave problema per l'agricoltura del futuro.

### IL CICLO DEL FOSFORO

4

