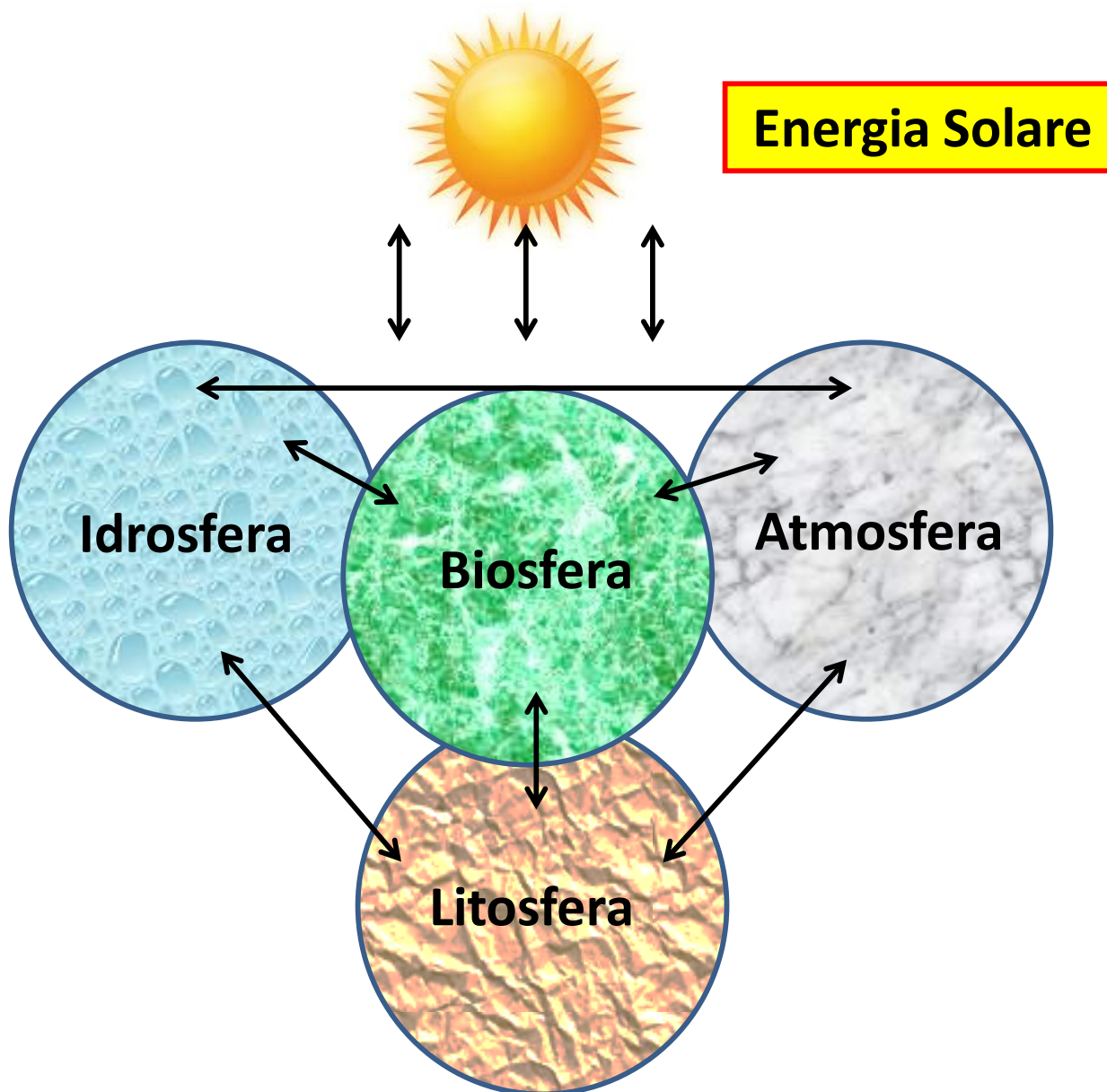


1. Biosfera



1. Biosfera

In sintesi è definita come:

- quella **parte della Terra in cui esiste la vita** e nella quale **organismi viventi e ambiente fisico** sono strettamente **interconnessi** e si evolvono influenzandosi **reciprocamente** (Vernadsky, 1929).
- un sistema termodinamico che **scambia Energia** con l'Esterno e **Materia** solo con l'Interno della Terra (cicli biogeochimici), poiché gli apporti esterni sono quantitativamente limitati (caduta di meteore e meteoriti).

1. Biosfera

Flusso di energia



APERTO, sempre rinnovato,
arriva dal Sole e passa
attraverso tutti i livelli
biologici ed i fattori
ambientali, permettendo la
vita come la conosciamo.

Ciclo della materia



CHIUSO, la quantità di materia
presente sulla Terra è
sostanzialmente stabile, non
soggetta a continue immissioni.
Gli elementi si combinano in
composti che vengono
degradati e ricomposti.

2. Cicli biogeochimici

«percorso seguito da un determinato elemento chimico all'interno dell'Ecosfera, caratterizzato dal passaggio dalla materia inorganica a quella vivente e viceversa».

... dove i **processi biologici** cambiano lo stato di ossidazione (redox) degli elementi influenzandone in maniera significativa la **mobilità** all'interno dei cicli.

L'uomo, a sua volta, è **in grado di condizionare i cicli** con effetti equiparabili a tutti i processi biologici nel loro complesso.

2. Cicli biogeochimici

I cicli degli elementi (**ciclo dei nutrienti**) variano a seconda dei loro serbatoi principali, dei flussi in gioco e delle interazioni con la biosfera.

I **serbatoi globali** (oceani, sedimenti, atmosfera) sono collegati tra loro da **interfacce attraverso le quali si muove la materia**.

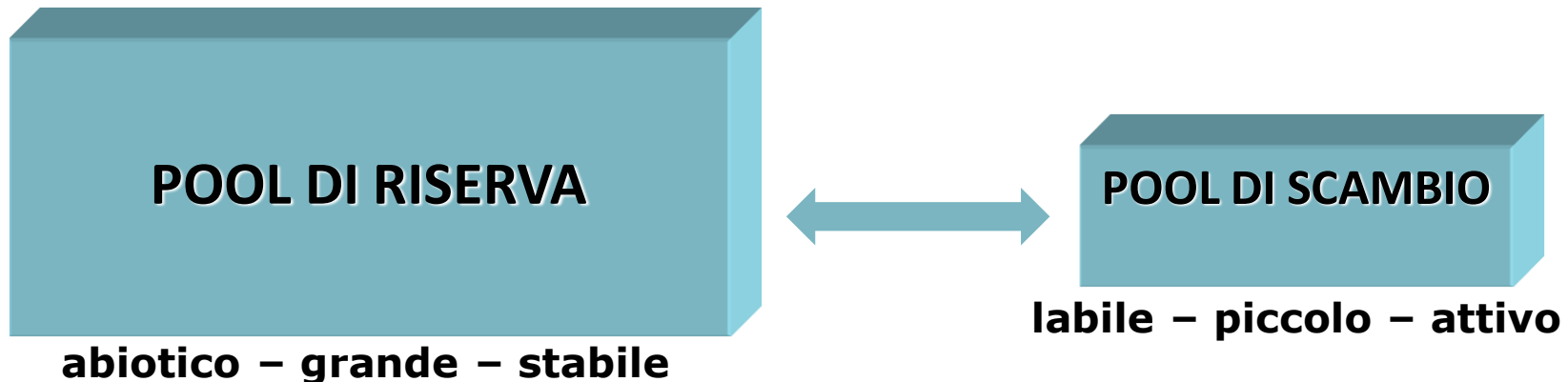
Il moto di una certa sostanza tra 2 serbatoi può essere **reversibile** o **irreversibile**.

2. Cicli biogeochimici

Serbatoi globali (*reservoir* o *pool*)

pool di riserva è abiotico, grande e stabile, dove l'elemento non è subito disponibile e gli scambi con l'ambiente sono **poco attivi**. Può essere **gassoso** o **sedimentario**.

pool di scambio, labile, di dimensioni ridotte, in cui l'elemento è immediatamente disponibile per gli organismi e gli scambi sono molto più attivi.



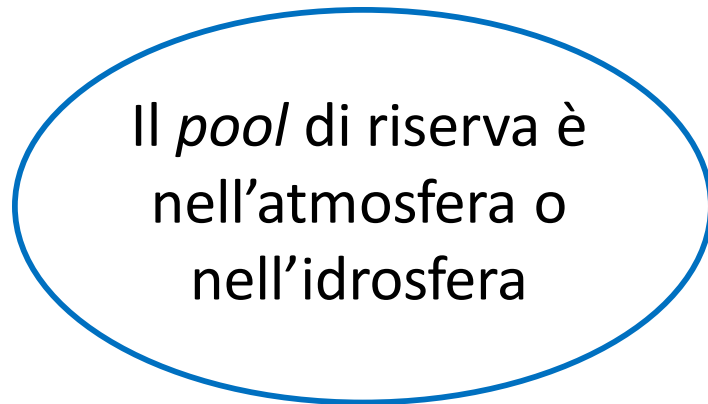
2. Cicli biogeochimici

pool di riserva:



Tipo gassoso

Tipo sedimentario



Es. Ciclo dell'Azoto

Es. Ciclo del Fosforo

2. Cicli biogeochimici

Azoto

7

N

14.001

Fosforo

15

P

30.974

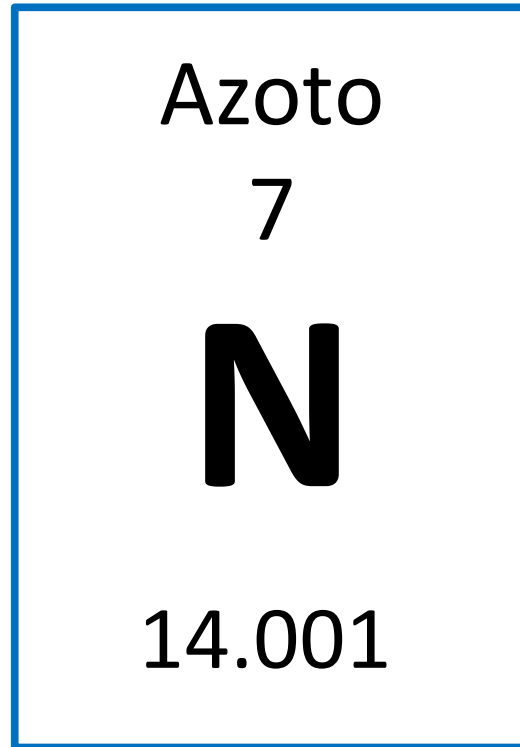
Carbonio

6

C

12.011

2.1 Ciclo dell'Azoto



2.1 Ciclo dell'Azoto

L'**azoto** (N_2) è l'elemento più abbondante presente nell'**atmosfera** (circa 78%). Se come gas non è respirabile molti dei **composti** in cui è presente sono **indispensabili per i viventi** (aminoacidi, proteine, DNA, RNA, ATP etc.).

Assieme a carbonio (C) e fosforo (P) costituisce i mattoni essenziali per la costruzione di strutture organiche fondamentali come le **proteine**.

Inoltre, l'**azoto** è un **elemento nutritivo essenziale e limitante** per le piante e gli organismi marini autotrofi.

2.1 Ciclo dell'Azoto

Il ciclo dell'azoto è un **ciclo biogeochimico** che si svolge tra **suolo, atmosfera e biosfera**, ma viene definito **gassoso** perché il deposito maggiore di azoto è l'**atmosfera**.

La gran parte degli organismi viventi **non può utilizzarlo direttamente, deve prima essere fissato da organismi specializzati** o tramite processi di tipo industriale.

2.1 Ciclo dell'Azoto

Il ciclo dell'azoto consiste in una serie di **reazioni di ossidazione e di riduzione** dell'azoto e di alcuni suoi composti.

Quasi tutte queste reazioni avvengono per azione degli **organismi viventi** (piante verdi, alghe, batteri, funghi) che forniscono l'energia per produrre molte reazioni e/o sostanze che accelerano le reazioni (enzimi).

Il ciclo è pertanto un'**interazione molto stretta tra organismi viventi e ambiente fisico**, il benessere dell'uno dipende dall'altro.

Nel ciclo dell'azoto, l'**azoto elementare** esiste quasi esclusivamente nell'aria. L'atmosfera è infatti costituita per il 78% in volume di N_2 e costituisce un inesauribile serbatoio di questo elemento essenziale.

2.1 Ciclo dell'Azoto

Le forme principali di azoto e i comparti prevalenti sono:

N_2 = azoto elementare (atmosfera)

NH_4^+ = ione ammonio (pedosfera e idrosfera)

NH_3 = ammoniaca (pedosfera e idrosfera)

NO_2^- = ione nitrito (pedosfera e idrosfera)

NO_3^- = ione nitrato (pedosfera e idrosfera)

N organico (biosfera, pedosfera, idrosfera)

2.1 Ciclo dell'Azoto

Le principali reazioni che regolano il ciclo dell'azoto sono:

Azoto-fissazione = batteri

Assimilazione e biosintesi = (piante e animali)

Decomposizione = (batteri e funghi)

Nitrificazione = (batteri)

Ammonificazione = (batteri)

Denitrificazione = (batteri)

1. Azoto-fissazione 1/4

L'**azoto-fissazione** è il processo attraverso il quale l'**azoto molecolare** (N_2) presente in atmosfera viene convertito in **ione ammonio** (NH_4^+) o **ammoniaca** (NH_3).

La chiave della bio-fissazione è l'enzima *nitrogenasi* che catalizza la scissione della molecola N_2 in due atomi (N) ed è molto dispendiosa in termini energetici poiché molta energia è richiesta per rompere il triplo legame.



1. Azoto-fissazione 2/4

La reazione è operata dai **batteri diazotrofi** dei generi *Clostridium* e *Azotobacter*, batteri (in simbiosi azotofissatrice) dei generi *Frankia* e 6 generi di **batteri rizobiali**: *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium*, *Azorhizobium* e *Allorhizobium*.

Grande importanza rivestono poi i **cianobatteri** dei generi *Anabaena*, *Nostoc*, *Calothrix* (aerobi), *Oscillatoria* e *Plectonema* (anaerobi).

1. Azoto-fissazione 3/4

Anche se una buona parte del processo viene **svolta da microorganismi** sia marini che, soprattutto, terrestri **e, in minima parte anche per via inorganica** attraverso fenomeni ionizzanti (radiazione cosmiche o i **fulmini**)...

... la maggiore fonte planetaria di azoto-fissazione, però, è rappresentata dai processi di **tipo industriale** per la produzione di **fertilizzanti** per uso agricolo.



1. Azoto-fissazione 4/4



La produzione di **fertilizzanti** di sintesi ha permesso uno sviluppo incredibile dell'**agricoltura intensiva**.



L'immissione di enormi quantità di azoto nell'idrosfera tramite il dilavamento dei suoli agricoli può causare fenomeni di **eutrofizzazione**.

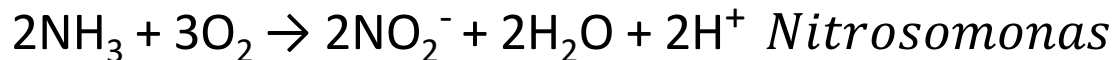
2. Nitrificazione 1/2

L'azoto rientra nell'ambiente in parecchi modi. La via più ovvia è attraverso la **decomposizione di organismi morti** ad opera di funghi e batteri, rilasciando **ammoniaca e ioni ammonio**.

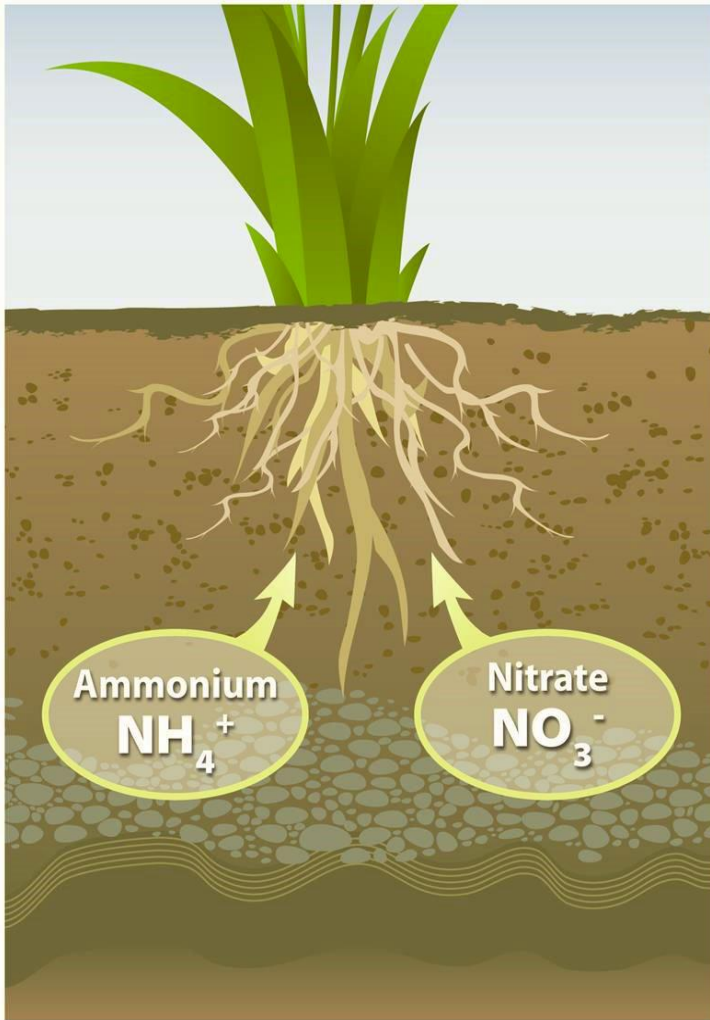
Tali composti ridotti possono essere utilizzati per la **formazione di nitrati** con un processo chiamato nitrificazione in cui si distinguono:

- **batteri nitrificatori**, che trasformano l'ammoniaca in **nitriti (NO₂⁻)**
- **batteri nitratatori**, che, a loro volta, ossidano i nitriti a **nitrati (NO₃⁻)**

Batteri appartenenti ai generi *Nitrosomonas*, *Nitrocystis*, *Nitrospira* convertono lo ione ammonio e l'ammoniaca in nitrito e il nitrito in nitrato **(nitratazione)**:



2. Nitrificazione 2/2



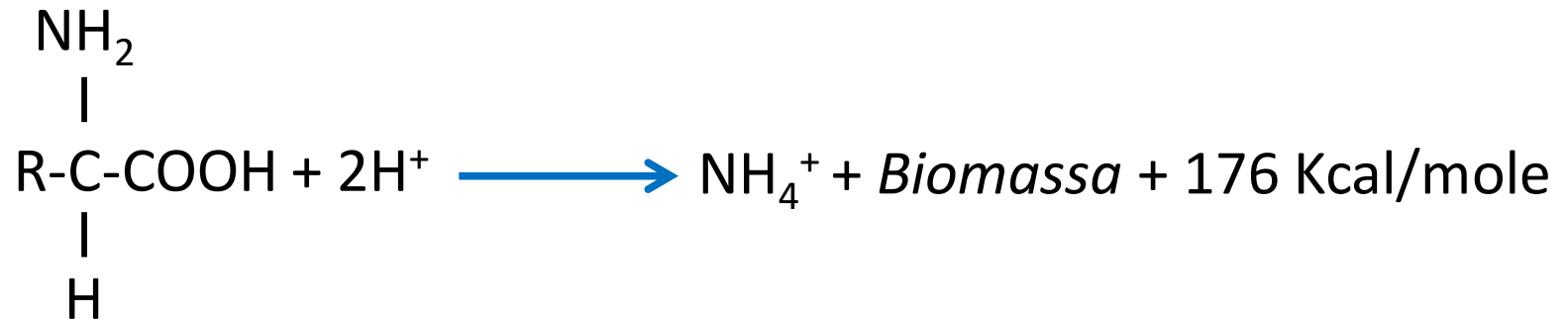
Assorbimento radicale di NH_4^+ e NO_3^- da parte delle piante.

Preferenzialmente assimilano NO_3^- perché NH_4^+ ha una **mobilità inferiore** a causa della carica positiva che lo «intrappola» nelle particelle di argilla caricate negativamente.

Dopo la morte delle piante la **decomposizione della sostanza organica** rimette in circolo NH_4^+ (**AMMONIFICAZIONE**).

3. Ammonificazione

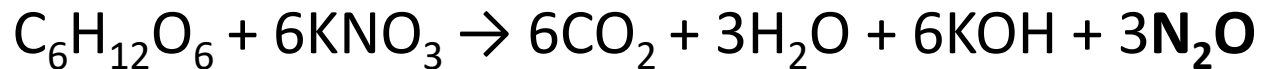
Nella **degradazione** dei composti azotati organici (proteine) porta alla **formazione di NH₄⁺**:



Una parte di NH₄⁺ prodotto viene incorporato nelle nuove cellule per quanto necessita alla crescita mentre l'eccesso viene rilasciato come NH₄⁺ (*Deaminazione*).

4. Denitrificazione

Riduzione di nitrati e nitriti e produzione finale di monossido di azoto (NO), ossido di diazoto (**N₂O**) e azoto molecolare (N₂) **completano il ciclo dell'azoto:**

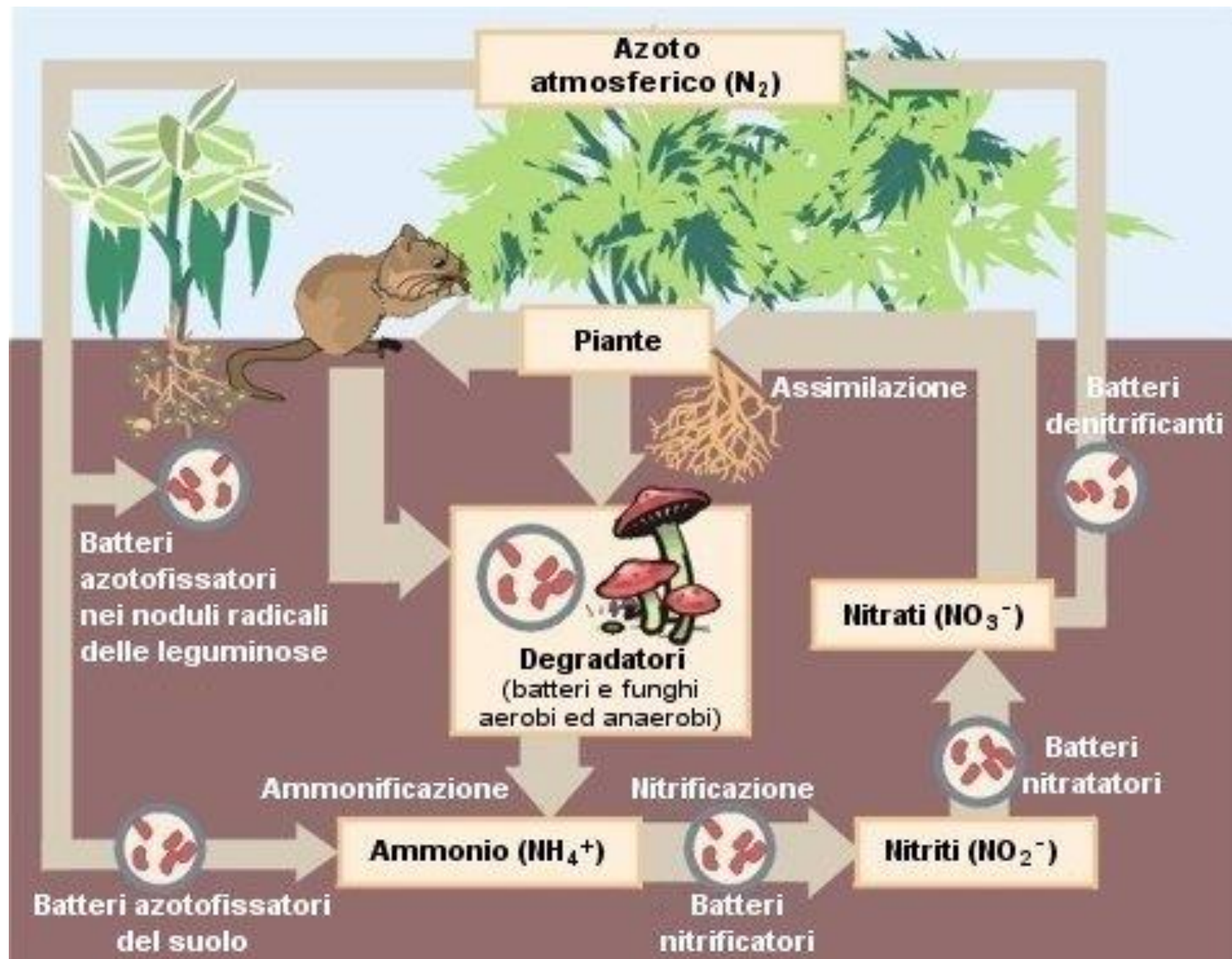


Batteri anaerobi eterotrofi facoltativi (come *Paracoccus denitrificans* e varie specie di *Pseudomonas*) utilizzano la sostanza organica come elettrone-donatore (si ossida).

4. Denitrificazione

L'ossido di diazoto (N_2O) è un **potente gas serra**, più efficace del CO_2 .

È sostanzialmente inerte nella troposfera, ma nella stratosfera reagisce con l'ossigeno monoatomico ($\text{O}\bullet$) e produce monossido di azoto (NO) che innesca la **distruzione catalitica dell'ozono** (O_3).

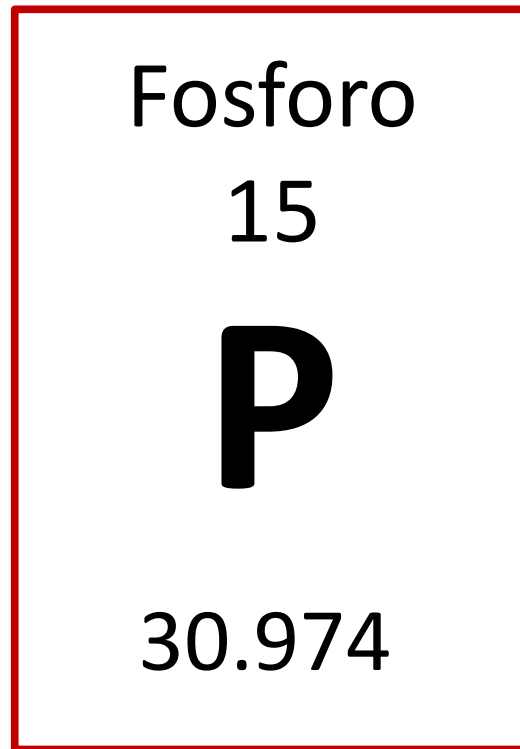


Ciclo dell'Azoto

Reazioni chimiche


- **AZOTO-FISSAZIONE** è il processo attraverso il quale l'**azoto molecolare** (N_2) presente in atmosfera viene convertito in **ammonio** (NH_4^+) o **ammoniaca** (NH_3).
- **NITRIFICAZIONE** è una reazione svolta da alcuni microorganismi capaci di ossidare lo **ione ammonio** (NH_4^+) in **nitrito** (NO_2^-) e il nitrito in **nitrate** (NO_3^-).
- **AMMONIFICAZIONE** è il processo di conversione dell'azoto organico (es. aminoacidi) in NH_4^+ . Questo processo è caratteristico della **decomposizione della sostanza organica**.
- **DENITRIFICAZIONE** indica la riduzione di **nitriti e nitrati** in composti gassosi: **azoto molecolare** (N_2), **ossido di diazoto** (N_2O) e monossido di azoto (NO).

2.2 Ciclo del Fosforo



2.2 Ciclo del Fosforo

Il **Fosforo (P)** è un **elemento raro** nella biosfera ma è anche **essenziale** nella chimica della vita:

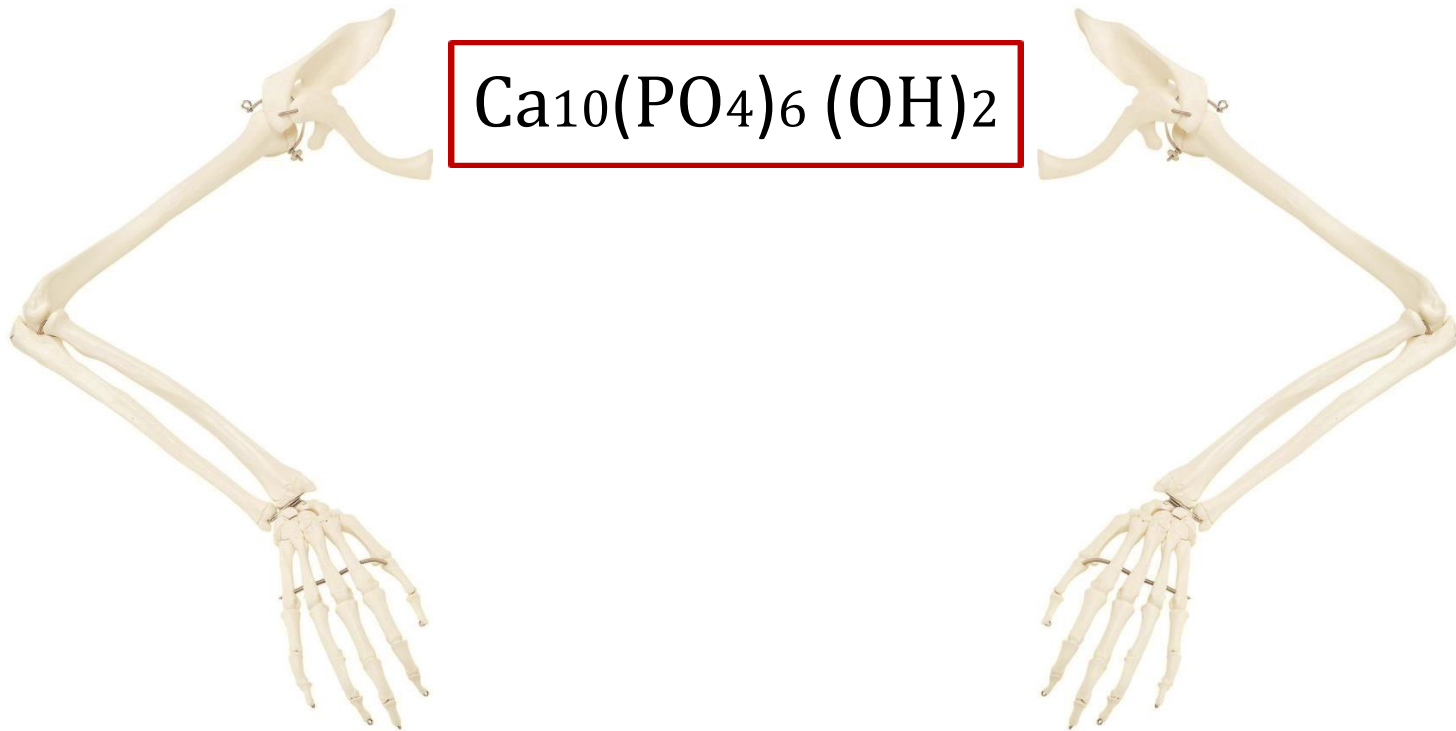


Mezzo per il
trasferimento di energia
(ATP e ADP)

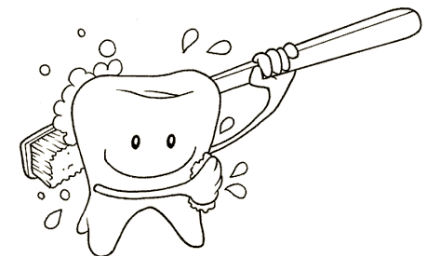
Componente delle
membrane biologiche
e del DNA

Fa parte dei **legami fosfodiesterici** che legano i nucleotidi nelle catene di DNA e RNA mentre il **ciclo dell'ADP/ATP** fornisce l'energia necessaria alla sintesi di molecole organiche complesse.

2.2 Ciclo del Fosforo



Il fosforo è relativamente abbondante nei vertebrati perché è un costituente dell'**idrossiapatite** che costituisce quasi il 60% delle ossa ed il 70% dei denti.



2.2 Ciclo del Fosforo

Il **ciclo biogeochimico** avviene tra **litosfera, idrosfera e biosfera** e non implica nessuna fase gassosa, anzi trovandosi per lo più allo stato solido, soprattutto **idrosfera e biosfera** sono coinvolte.

È pertanto un **ciclo** di tipo **sedimentario** poiché il **pool di riserva** è costituito quasi esclusivamente da **rocce fosfatiche**:

- solo quando riemergono per eventi geologici, il fosforo può entrare in circolazione per azione erosiva atmosferica o per solubilizzazione dei fosfati.



2.2 Ciclo del Fosforo

Immagazzinato in gran parte nelle **apatiti cristali**:



dove $X = \text{F}$ nelle **fluoroapatiti**, OH nelle **idrossiapatiti**, Cl nelle **cloroapatiti**.

L'alterazione delle apatiti rilascia fosfati solubili (PO_4^{-3}) che possono, in tal forma, essere assimilati dagli organismi vegetali dato che il **P** come elemento è generalmente un **nutriente limitante**.

2.2 Ciclo del Fosforo

Tuttavia, solo una piccola frazione di ione PO_4^{-3} è disponibile nel suolo; **disponibilità** che inoltre varia anche a seconda del **pH**.

- **“in forma solubile”**, se presente come ione fosfato nella soluzione del suolo;
- **“*pool* labile”**, se come ione fosfato viene trattenuto sui colloidi del suolo in equilibrio con le acque interstiziali;
- **“*pool* di riserva”**, se presente in forma insolubile e solo molto lentamente può essere rilasciato nel “*pool* labile” (Es. Apatiti, fosfati di ferro e di alluminio e composti organici del fosforo).

2.2 Ciclo del Fosforo

A seconda del pH del suolo, il P può essere più o meno disponibile:

- **pH acido (< 3-5):** composti insolubili con Fe ed Al
- **pH neutro:** maggiore disponibilità e si idrolizzano facilmente
- **pH basico:** composti insolubili con Ca.

A **pH > 5** la solubilità di questi fosfati aumenta e raggiunge il massimo a **pH 6.5**.

2.2 Ciclo del Fosforo

- Il **P** presente nel **suolo** deriva dalla **degradazione di rocce fosfatiche** (es. *apatite* $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 (\text{X})_2$);
- Nel suolo forma **ioni fosfato (PO_4^{-3})**, molto stabili, sedimenta e può venir reso **disponibile per gli organismi viventi da diversi funghi e batteri** che lo trasformano nella sua **forma più solubile**, lo «organicano».
- Parte del PO_4^{-3} presente nel terreno viene **dilavata dalle piogge e portata al mare** dove viene utilizzata parzialmente da alghe e organismi marini. Parte del PO_4^{-3} che arriva al mare ritorna alla terra come escrementi o sedimenta nella zona litorale o nel mare.

2.2 Ciclo del Fosforo

Negli ambienti marini e terrestri il **riciclo dell'elemento avviene molto rapidamente grazie alla degradazione** della sostanza organica da parte dei batteri.

Non esistono per il fosforo processi simili all'azoto-fissazione che mobilizzino l'elemento né input sostanziali dall'atmosfera.

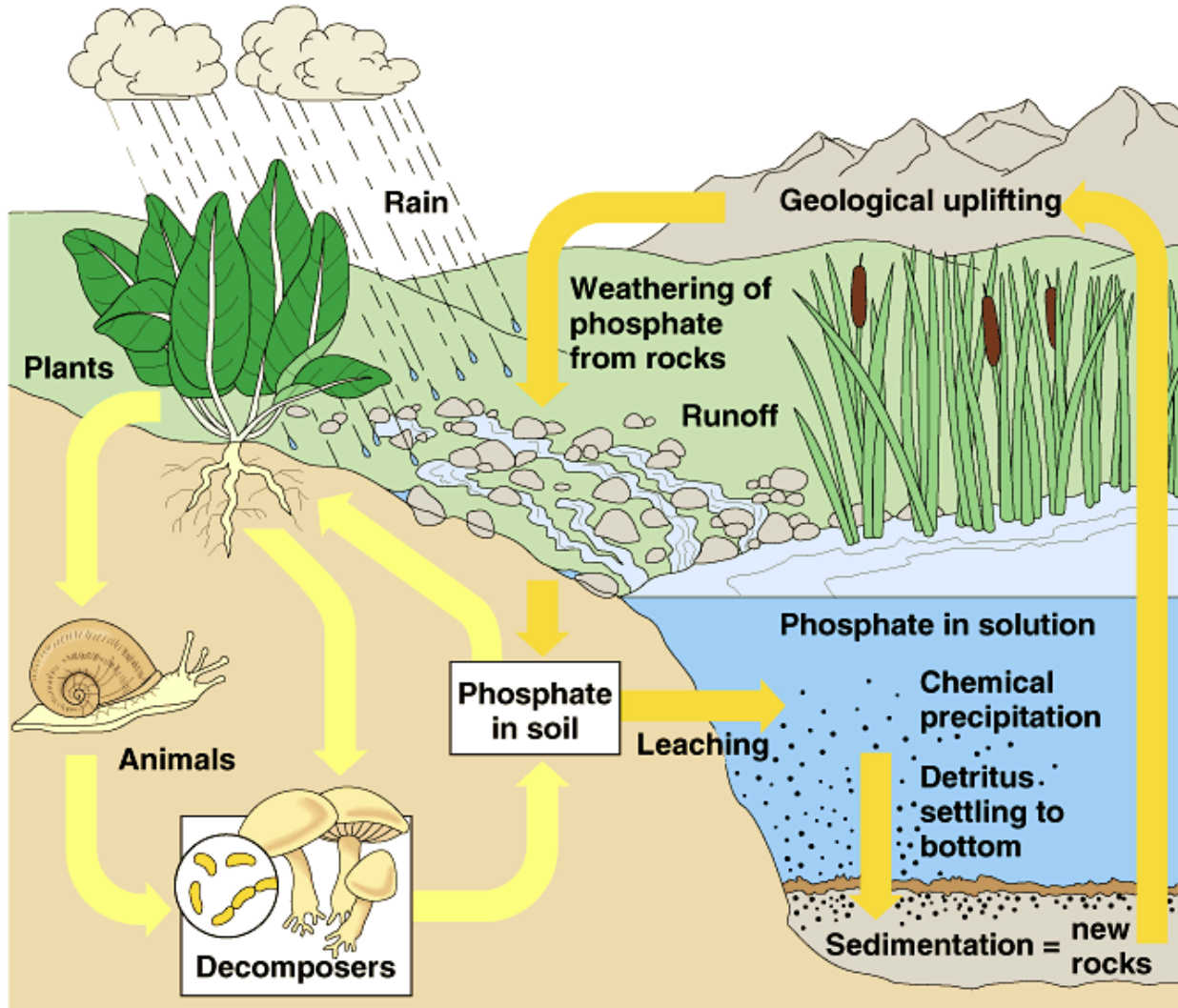
La perdita di fosforo può essere compensata solo dagli apporti provenienti dall'**alterazione dei minerali...**

2.2 Ciclo del Fosforo

...oppure dall'uomo tramite l'uso dei **fertilizzanti** e gli scarichi di **reflui** non trattati.

Un eccessivo apporto di nutrienti, in particolare fosfati, in un ambiente acquatico viene indicato con il termine **eutrofizzazione**.

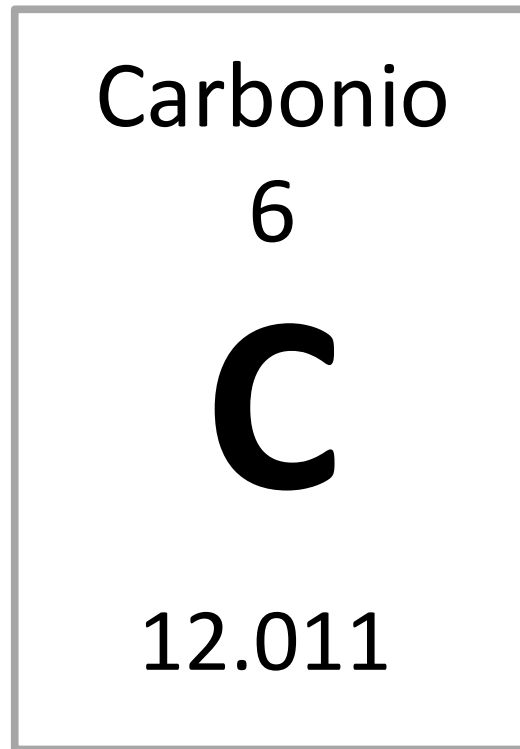
2.2 Ciclo del Fosforo



Può rimanere **intrappolato nei sedimenti** per tempi molto lunghi.

Carenza di P sia in **ecosistemi terrestri** che specialmente **marini** poiché limita la fotosintesi e la produttività primaria.

2.3 Ciclo del Carbonio



2.3 Ciclo del Carbonio

L'elemento carbonio (C) è uno dei componenti essenziali della materia vivente:

- costituisce buona parte della massa solida degli organismi vegetali ed animali;
- si trova combinato con l'ossigeno sotto forma di biossido di carbonio, uno dei minori ma cruciali costituenti dell'atmosfera terrestre;
- parte del carbonio è **disciolto nelle acque** superficiali e nelle falde sotterranee in forma di HCO_3^- o di $\text{CO}_2(\text{aq})$ molecolare
- si trova anche nelle rocce come carbonati di Ca e Mg.

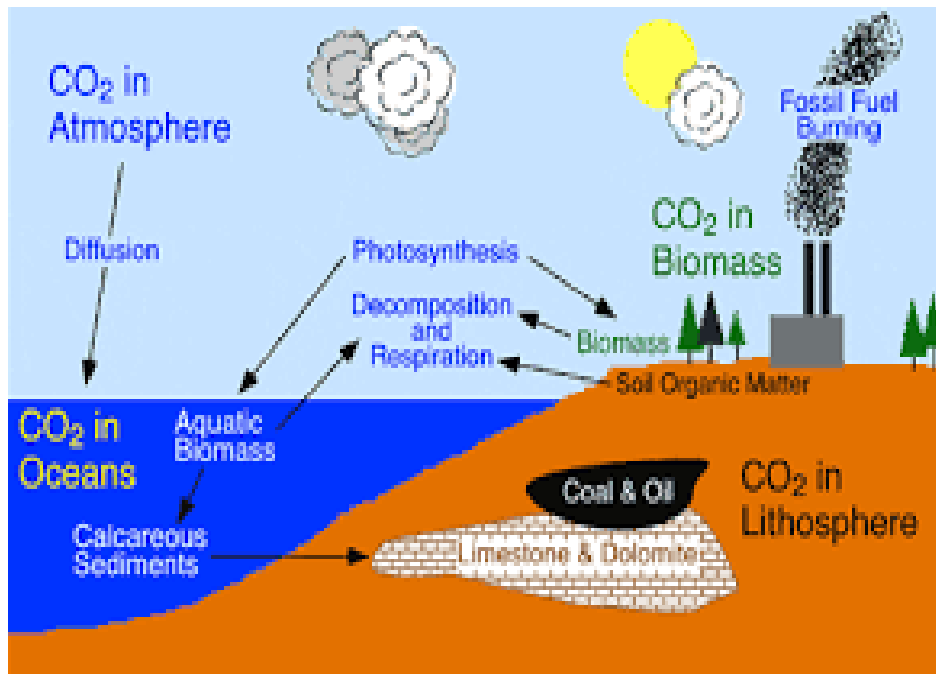
2.3 Ciclo del Carbonio

Opera su **diverse scale temporali** e coinvolge atmosfera, idrosfera, litosfera e biosfera.

- Su **scala temporale biologica** (breve, 10^2 - 10^3 anni), riciclo dei nutrienti e un deposito temporaneo di sostanza organica (oceano-atmosfera-organismi vivi e morti).
- Su **scala temporale geologica** (lunga, 10^7 anni) il C è rilasciato nell'oceano in seguito al degrado di rocce carbonatiche (es. i calcari). Il C ritorna a questa riserva con la deposizione di sedimenti.

2.3 Ciclo del Carbonio

Questa separazione è stata fortemente alterata dalla **combustione dei combustibili fossili** che rilascia CO_2 in atmosfera aumentando così la capacità termica dell'atmosfera (**effetto serra**).

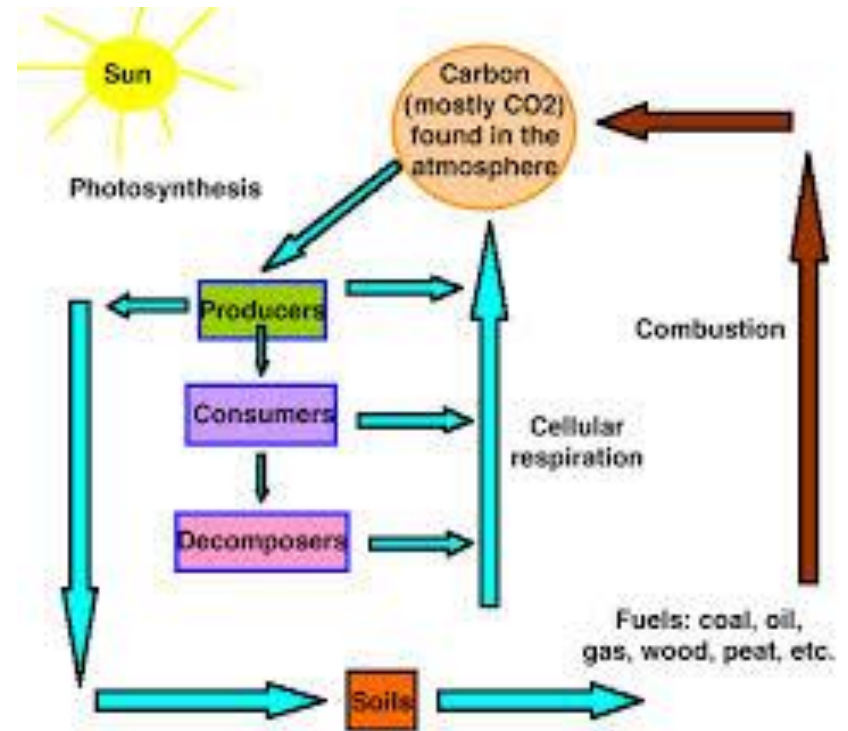
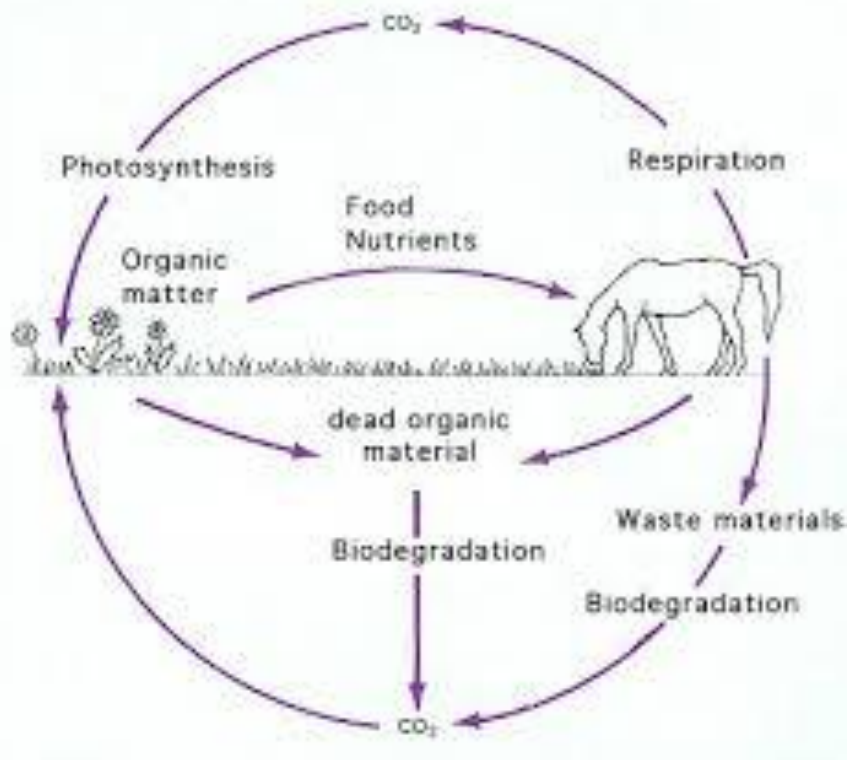


Il *pool* di riserva è gassoso poiché rappresentato dagli **oceani**, anche se, in buona parte, si conserva anche negli strati profondi della **litosfera** (combustibili fossili e sedimenti carboniosi).

A close-up photograph of several bright green leaves, likely from a tree or shrub, with a white rectangular text box overlaid in the center. The leaves are in sharp focus, showing their veins and texture. The background is a soft, out-of-focus light blue and green, suggesting a bright, sunny day.

CICLO BIOLÓGICO DEL CARBONIO

CICLO BIOLÓGICO DEL CARBONIO



Fotosintesi clorofilliana

Processo biochimico attraverso il quale gli **organismi fotoautotrofi** sono in grado di sintetizzare composti organici a **partire dall'acqua e dal biossido di carbonio**, utilizzando come fonte di energia la **radiazione solare** compresa nello spettro della luce visibile (~400-750 nm):



Per mezzo della fotosintesi la CO₂ viene sequestrata dall'atmosfera e fissata nella biomassa vegetale.

Respirazione aerobica

Il processo inverso alla fotosintesi è la **respirazione aerobica**:



È una **reazione di combustione**, ovvero una redox esotermica che comporta l'**ossidazione del carbonio** (il **combustibile**) e la **riduzione dell'ossigeno** (il **comburente**) con formazione di **CO₂, H₂O e calore**.

La respirazione permette agli **organismi eterotrofi** di ricavare energia consumando la sostanza organica prodotta dagli **organismi autotrofi**.

Respirazione aerobica



Nei **suoli** la respirazione eterotrofa è operata dagli **organismi decompositori** (batteri, funghi e invertebrati) che si nutrono del detrito organico. Il rilascio di CO_2 da parte dei suoli viene indicato con il termine «respirazione dei suoli».

Decomposizione anaerobica e fossilizzazione

Il **bilancio fra fotosintesi e respirazione** si chiuderebbe in pareggio se non intervenissero i processi di:

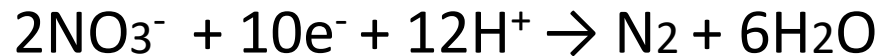
- **Decomposizione (o Respirazione) anaerobica**
- **Fossilizzazione** della sostanza organica

Questi processi **sottraggono la sostanza organica** ai processi ossidativi.

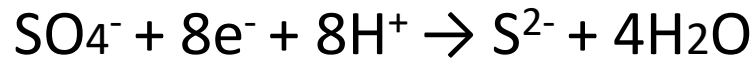
Respirazione anaerobica

L'agente ossidante (elettron-accettore) che sostituisce l'ossigeno nella reazione redox di **riduzione del carbonio** può essere di diverso tipo, a seconda del metabolismo batterico:

Denitrificazione



Solfato-riduzione



Metanogenesi



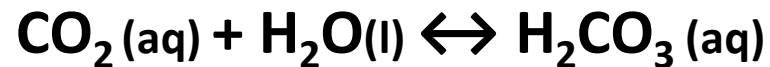


CICLO GEOCHIMICO DEL CARBONIO

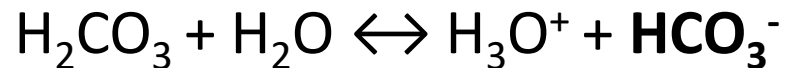


1. Formazione dell' Acido Carbonico

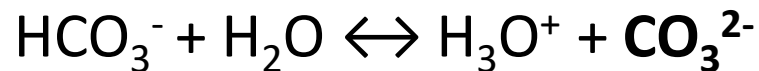
1. L'**anidride carbonica** (P atm) è moderatamente solubile in acqua, dove forma una soluzione discretamente acida, grazie alla formazione di **acido carbonico**, un acido debole:



L'acido carbonico si dissocia in ioni idronio e **bicarbonato**:

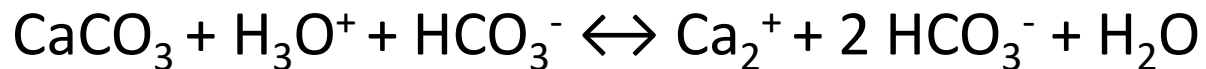


Lo ione bicarbonato subisce una seconda dissociazione per formare ione idronio e ione **carbonato**:



2. Alterazione delle rocce carbonatiche e silicatiche

2. Gli ioni idronio (H_3O^+) e bicarbonato (HCO_3^-) (derivanti dalla dissociazione dell'acido carbonico) alterano i **carbonati** (**dissoluzione dei carbonati**)



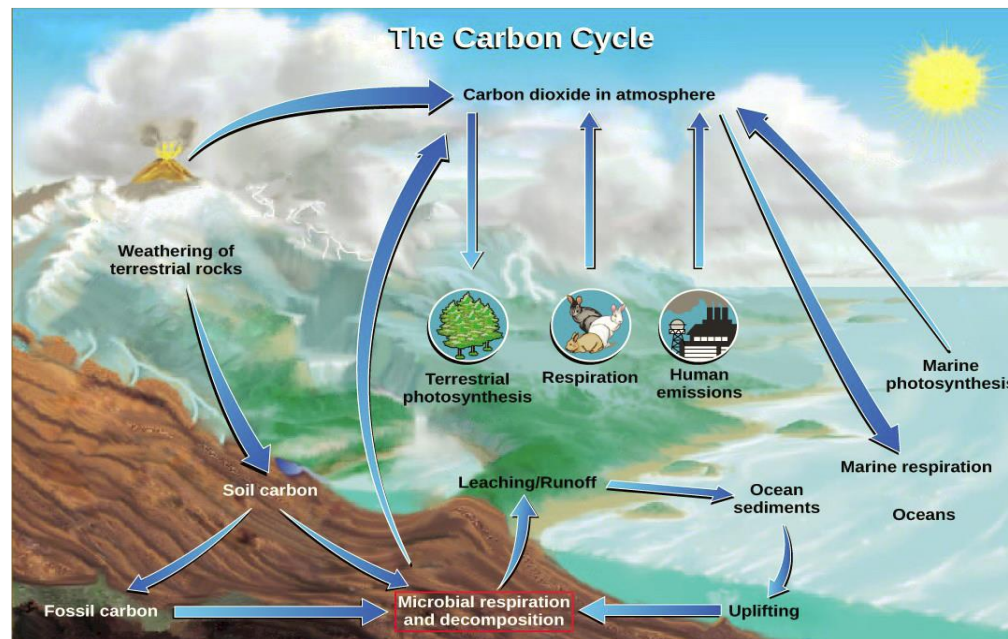
Per i **silicati**, una tipica reazione di alterazione è subita dall'ortoclasio, un silicato ricco di potassio (rocce ignee):



L'alterazione dei silicati origina materiali argillosi e silice (illite, clorite, caolinite, montmorillonite, laterite, bauxite).

3. Dissoluzione dei carbonati

3. Gli ioni Ca^{2+} e CO_3^{2-} (formati dalla dissoluzione dei carbonati) e gli ioni K^+ e la SiO_2 (prodotti dall'alterazione dei silicati) diventano parte del **carico disciolto** nelle acque superficiali e possono muoversi verso l'oceano.



4. Deposizione dei carbonati

4. La **precipitazione** (o sedimentazione) del **carbonato di calcio** avviene soprattutto negli oceani:



e può essere **diretta** oppure **mediata da organismi viventi**

Avviene per **precipitazione chimica**, quando il prodotto di solubilità degli ioni calcio e carbonato raggiunge la saturazione.

Accelerato da diversi organismi marini (molluschi, plancton) che costruiscono il proprio scheletro o guscio con calcite o aragonite (**bio-mineralizzazione**).



CICLO GEOCHIMICO DEL CARBONIO

In sintesi:

1. La **CO₂** presente in atmosfera si **solubilizza** nell'acqua piovana con formazione dell'acido carbonico (H₂CO₃).
2. L' **H₂CO₃** altera i minerali **carbonatici** e **silicatici liberando ioni** bicarbonato, ioni calcio e ioni silice che passano in soluzione.
3. Questi soluti vengono **trasportati** dai fiumi fino **agli oceani** dove gli organismi li incorporano in **gusci e scheletri**, formando **CaCO₃** e liberando **CO₂**.



Conclusione

Il **mare** gioca un ruolo principale nel **sequestro di carbonio** (*pool* di riserva) ed è un **tampone del CO₂** atmosferica (equilibrio).

Tuttavia, il continuo incremento dell'uso di combustibili fossili associato ad un minor sequestro di questo gas da parte della cintura verde del nostro Pianeta può causare un continuo innalzamento del CO₂ nell'atmosfera (gas serra), non più tamponata da mari e oceani, che contribuirà ad aumentare il riscaldamento globale.