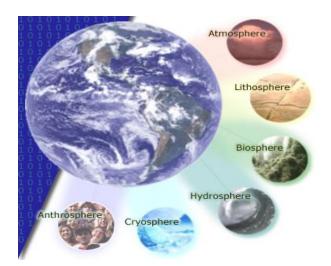
IL SISTEMA TERRA



Il modo di studiare la Terra per la sua unicità nel sistema solare (link su Pianeta Terra) di cui fa parte, ha subito negli ultimi decenni una notevole evoluzione. Si è andata sempre più affermando una visione unificatrice delle varie componenti strutturali e funzionali che il nostro pianeta accoglie. Queste nuove prospettive si sono concretizzate in teorie, principalmente due, che vedono la terra come:

un sistema complesso in evoluzione (link a sito su <u>Sistema Terra</u>), portando all'elaborazione di una nuova scienza, Earth System Science (E.S.S.), cioè Scienza del Sistema Terra, con un approccio multidisciplinare che raccoglie le conoscenze fisiche, chimiche e biologiche dei vari comparti della Terra. Bretherton ha elaborato un modello complesso che interpreta il Sistema Terra secondo la E.S.S., che viene illustrato con un diagramma semplificato. (link a sito su Earth System Science)

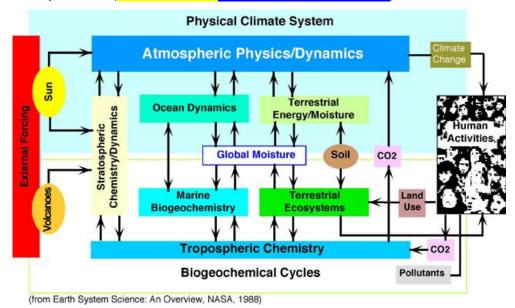


Diagramma semplificato di Bretherton

o addirittura un organismo Ipotesi Gaia

Agli inizi degli anni sessanta il chimico inglese James Lovelock (link a Lovelock), insieme con la biologa americana Lynn Margulis (link a Margulis), concepiscono la terra come unico sistema fisiologico, un'entità viva, e chiamano Gaia questa ipotesi (con una deformazione del termine greco gea=terra). Secondo questa visione gli organismi viventi, il clima, l'ambiente terrestre, sono un tutto integrato, un unico superorganismo in cui l'attività dei viventi modifica gli aspetti fisici e questi a loro volta influiscono sull'evoluzione e sul mantenimento della vita sul pianeta.

Alcuni siti sulla Terra e sul Sistema solare

http://www.astrosurf.com/cosmoweb/index.html http://astrolink.mclink.it/nineplanets/nineplanets.html

I capitoli seguenti sono tratti da:

S.E. MANAHAN - Chimica dell'ambiente. - Ed. Piccin (2000)

* * * * *

LA TERRA E L'UOMO: SCIENZE AMBIENTALI E TECNOLOGIA

1.1. COSA E' UNA SCIENZA AMBIENTALE?

Scienza ambientale è, nel suo più ampio significato, l'insieme di interazioni che avvengono tra gli ambienti terrestre, acquatico, vivente e antropologico. Essa include le leggi emanate dai governi e tutte le discipline, come la chimica, la biologia, l'ecologia, la sociologia, che influenzano o descrivono tali interazioni.

Una definizione possibile di scienza ambientale è: lo studio della terra, dell 'aria, dell 'acqua e degli ambienti viventi e gli effetti della tecnologia su di essi. La scienza ambientale si è evoluta in modo significativo grazie alle ricerche effettuate sui modi e sui luoghi in cui gli organismi viventi compiono i loro cicli vitali. Questo è il campo della **storia naturale**, che in tempi recenti si è evoluta **nell'ecologia**, cioè lo studio dei fattori ambientali che incidono sugli organismi e sul modo in cui essi interagiscono tra di loro.

Nel bene o nel male, la tecnologia ha influito irreversibilmente sull'ambiente in cui tutti gli esseri umani devono vivere. Perciò la tecnologia potrebbe essere considerata strettamente in funzione di come essa incida sull'ambiente e del modo in cui, usata intelligentemente da persone preparate sulla scienza dell'ambiente, possa aiutare piuttosto che danneggiare la Terra, dalla quale tutti gli esseri viventi dipendono per il loro benessere e la loro esistenza.

L'ambiente

Aria, acqua, terra, vita e tecnologia sono fortemente collegate, come mostrato in Figura 1.1. Tradizionalmente la scienza ambientale è divisa tra lo studio dell'atmosfea, dell'idrosfera, della geosfera e della biosfera.

L'atmosfera è il sottile strato di gas che circonda la superficie terrestre. Essa, oltre ad assolvere il suo ruolo di riserva di gas, mitiga la temperatura della Terra, assorbe l'energia e le dannose radiazioni ultraviolette del sole, trasporta l'energia lontano dalle regioni equatoriali e funge, nel ciclo idrologico, da sentiero per i movimenti in fase vapore dell'acqua.

L'idrosfera contiene l'acqua terrestre. Oltre il 97% dell'acqua della Terra si trova negli oceani e la maggior parte dell'acqua dolce è sotto forma di ghiaccio. Perciò, solo una percentuale relativamente bassa dell'acqua totale sulla Terra è realmente coinvolta nei processi terrestri, atmosferici e biologici. Ad esclusione dell'acqua marina, l'acqua che circola nei processi e nei cicli ambientali si trova nell'atmosfera, nel sottosuolo, come acqua di falda e in torrenti, fiumi, laghi, stagni e bacini artificiali, come acqua superficiale.

La **geosfera** è composta dalla terra solida, compreso il suolo che sostiene la vita della maggior parte delle piante. La parte della geosfera che è direttamente coinvolta nei processi ambientali attraverso il contatto con l'atmosfera, l'idrosfera e gli organismi viventi è **la litosfera.** La litosfera varia in spessore da 50 a 100 km. La parte più importante della litosfera, dal punto di vista dell'interazione con le altre "sfere" dell'ambiente, è il sottile strato esterno, chiamato **crosta**, costituito principalmente da minerali più leggeri a base di silicati.

Tutti gli esseri viventi sulla Terra compongono la **biosfera**. Questi organismi e gli aspetti dell'ambiente che li riguardano direttamente sono chiamati i **biotici**; le altre parti dell'ambiente sono **abiotiche**.

In larga misura le forti interazioni tra gli organismi viventi e le varie sfere dell'ambiente abiotico sono meglio descritte dai cicli della materia (**cicli biogeochimici)**, che coinvolgono fenomeni e processi biologici, chimici e geologici.

1.2.CHIMICA E BIOCHIMICA DELL'AMBIENTE

La chimica dell'ambiente include molti differenti aspetti. Può riguardare lo studio di reazioni di Freons nella stratosfera o l'analisi di depositi di PCB nei sedimenti oceanici; essa comprende anche la chimica e la biochimica dei composti organometallici volatili e solubili biosintetizzati dai batteri anaerobici. Si potrebbero dare migliaia di altri esempi di fenomeni chimici ambientali. La **chimica dell'ambiente** può essere definita come *lo studio delle sorgenti, delle reazioni, del trasporto, degli effetti e del destino delle specie chimiche in acqua, suolo e aria e degli effètti della tecnologia su di essi.*

La chimica dell'ambiente non è una nuova disciplina. Un lavoro eccellente è stato fatto in questo campo durante la maggior parte di questo secolo. Fino al 1970 circa, la maggior parte di questo lavoro venne svolto in dipartimenti accademici o da gruppi industriali diversi da quelli principalmente interessati alla chimica. Fu realizzato essenzialmente da persone la cui preparazione di base non era di chimica.

Così, quando furono sintetizzati i pesticidi, i biologi ebbero una conoscenza diretta di alcune delle meno desiderabili conseguenze del loro uso. Quando furono formulati i detersivi, gli ingegneri sanitari rimasero sgomenti nel vedere le vasche di aerazione degli impianti di trattamento delle acque di rifiuto scomparire sotto spessi strati di schiuma, mentre i limnologi si meravigliarono nel vedere dei laghi, in precedenza normali, soffocare sotto l'effetto di cianobatteri maleodoranti.

Nonostante questi effetti ambientali di vecchia data e nonostante altri problemi più recenti e più seri, come quelli derivanti dai rifiuti pericolosi, relativamente pochi chimici vengono a conoscenza, nel corso della loro istruzione, di argomenti inerenti la chimica dell'ambiente.

L'analisi chimica nella chimica dell'ambiente

Una delle maggiori sfide della chimica dell'ambiente è la determinazione della natura e della quantità di specifici inquinanti nell'ambiente. Per questo l'analisi chimica è il primo passo vitale della ricerca in chimica dell'ambiente.

Le difficoltà di analisi per molti inquinanti ambientali possono essere impressionanti. Livelli significativi di un inquinante atmosferico possono essere rappresentati da valori inferiori ad un microgrammo per metro cubo di aria. Per molti inquinanti dell'acqua, una parte per milione in peso (praticamente un milligrammo per litro) è un valore molto elevato. Per alcuni inquinanti si hanno dei livelli significativi, dal punto di vista di danno per l'ambiente,

anche a concentrazioni di poche parti per trilione. Per questi motivi è ovvio che le analisi chimiche utilizzate per lo studio di alcuni sistemi chimici richiedono limiti di rivelabilità molto bassi.

Comunque, chimica dell'ambiente e chimica analitica non sono la stessa cosa, essendo quest'ultima solo una delle tante discipline che sono coinvolte nello studio della chimica dell'ambiente. Un approccio "brutale" al controllo dell'ambiente, che implicherebbe il monitoraggio di ogni nicchia ambientale per ogni possibile inquinante, aumenta la possibilità di lavoro per i chimici e incrementa le vendite della strumentazione chimica, ma è una via disastrosa per valutare e per risolvere i problemi ambientali, degenerando in un vano esercizio di collezione di numeri solo marginalmente utili.

Coloro che sono responsabili della protezione dell'ambiente devono andare oltre questi aspetti. Per consentire alla chimica di dare il massimo contributo per la soluzione dei I problemi ambientali, il chimico deve lavorare verso la comprensione della natura, delle reazioni e dei meccanismi di trasporto delle specie chimiche nell'ambiente. La chimica analitica è una parte fondamentale e cruciale di questo sforzo, ma ciò non significa che sia tutto.

Biochimica dell'ambiente

Gli interessi ultimi dell'ambiente sono quelli della vita stessa. La disciplina che tratta specificamente degli effetti che le varie specie chimiche dell'ambiente hanno sulla vita è la **biochimica dell'ambiente.** Un'area ad essa correlata, la **chimica tossicologica**, è la *chimica delle sostanze tossiche con una particolare enfasi posta sulle loro interazioni con i tessuti biologici e con gli organismi viventi.* Essa, che verrà trattata in dettaglio nel Capitolo 22. studia la natura chimica e le reazioni delle sostanze tossiche e comprende le loro origini, il loro uso e gli aspetti chimici dell'esposizione, del loro destino e del loro smaltimento.

1.3. ACQUA, ARIA, SUOLO, VITA E TECNOLOGIA

Alla luce delle definizioni date sopra, è possibile ora considerare la chimica dell'ambiente dal punto di vista delle interazioni tra acqua, aria, terra, vita e tecnologia evidenziate in Figura 1.1. Queste quattro "sfere" dell'ambiente, e le correlazioni che esistono tra di esse, sono riassunte in questo capitolo.

Acqua ed idrosfera

L'acqua, con l'apparentemente semplice formula chimica H₂O, è una sostanza di importanza vitale in tutte le parti dell'ambiente. Essa copre il 70% circa della superficie della Terra. Si trova in tutte le sfere dell'ambiente, negli oceani, come vasta riserva di acqua marina, sulle terre emerse, come acqua di superficie nei laghi e nei fiumi, nel sottosuolo, come falde idriche, nell'atmosfera come vapore acqueo e nelle calotte polari come ghiaccio. L'acqua è una parte essenziale di tutti i sistemi viventi ed è il mezzo dal quale la vita si è evoluta e in cui esiste.

L'energia e la materia sono trasportate dall'acqua attraverso le varie sfere dell'ambiente. L'acqua scioglie i costituenti solubili dei minerali e li trasporta fino agli oceani o li lascia come depositi minerali ad una certa distanza dalle loro sorgenti; essa trasporta il nutrimento per le piante dal suolo all'interno di esse, attraverso le radici. L'energia solare assorbita nell'evaporazione dell'acqua degli oceani viene trasportata come calore latente e

rilasciata sulla terra emersa. Il rilascio del calore latente fornisce l'energia che trasporta il calore dalle regioni equatoriali verso i poli terrestri causando fortissime tempeste.

L'acqua è ovviamente un argomento fondamentale nelle scienze ambientali.

Aria ed atmosfera

L'atmosfera è un mantello protettivo che alimenta la vita sulla Terra e la protegge dall'ambiente ostile dello spazio. Essa è la sorgente di biossido di carbonio per la fotosintesi delle piante e di ossigeno per la respirazione. Fornisce l'azoto che i batteri fissatori di azoto e le industrie che producono ammoniaca utilizzano per produrre azoto chimicamente legato, una componente essenziale delle molecole vitali. Come parte fondamentale del ciclo idrologico (Capitolo 2, Figura 2.1), l'atmosfera trasporta l'acqua dagli oceani alla terra emersa, agendo così da condensatore in un grande distillatore solare. L'atmosfera inoltre ha una funzione protettiva per la vita, perché assorbe le radiazioni ultraviolette più dannose provenienti dal soie e stabilizza la temperatura della Terra.

La **scienza dell'atmosfera** tratta dei movimenti di masse di aria nell'atmosfera, del bilancio termico atmosferico, della composizione chimica e delle reazioni dell'atmosfera.

II suolo

La geosfera, o Terra solida è quella parte della Terra sulla quale vivono gli esseri umani e dalla quale essi prendono la maggior parte del loro cibo, dei minerali e dei combustibili. La Terra è divisa in strati che comprendono il nucleo interno, solido e ricco di ferro, il nucleo più esterno, fuso, il mantello e la crosta. La scienza dell'ambiente si interessa principalmente della **litosfera**, che è costituita dal mantello più esterno e dalla **crosta**. Quest'ultima è lo strato più esterno della Terra, l'unico accessibile agli esseri umani. Essa è estremamente sottile, se paragonata al diametro terrestre, e varia tra i 5 e i 40 Km di spessore.

La geologia è la scienza della geosfera. Come tale si riferisce principalmente alla parte minerale della crosta terrestre. Essa, però, deve considerare anche l'acqua, coinvolta nella erosione delle rocce e nella formazione dei minerali, l'atmosfera e il clima, che hanno profondi effetti sulla geosfera e sullo scambio di energia e materia con essa, e i sistemi viventi, che esistono in larga misura sulla geosfera e quindi hanno significativi effetti su di essa. La scienza geologica utilizza la chimica per spiegare la natura e il comportamento dei materiali geologici, la fisica per spiegare il loro comportamento meccanico e la biologia per spiegare le mutue interazioni tra geosfera e biosfera. Anche la tecnologia moderna, per la capacità ad esempio di spostare massicce quantità di polveri e rocce, ha una profonda influenza sulla geosfera.

La parte più importante della geosfera, per la vita sulla Terra, è il **suolo**, formato dall'azione di erosione disintegrativa dei processi fisici, geochimica e biologici sulle rocce. Sul suolo crescono le piante e, virtualmente, tutti gli organismi terrestri dipendono da esso per la loro esistenza. La produttività del suolo è fortemente influenzata dalle condizioni ambientali e dagli eventuali inquinanti presenti.

La vita

La biologia è la scienza della vita. Essa è basata sulle specie chimiche sintetizzate biologicamente, molte delle quali esistono come grandi molecole, chiamate *macromolecole*. In quanto esseri viventi, l'interesse ultimo degli uomini nei confronti del loro ambiente è la sua

interazione con la vita. Perciò la biologia è una componente chiave della scienza e della chimica dell'ambiente.

Studiare la biologia dal punto di vista delle cellule e delle macromolecole significa considerarla a livello microscopico. All'altro lato della scala, gli scienziati dell'ambiente possono guardare alla biosfera dal punto di vista delle popolazioni delle diverse specie, che interagiscono l'una con l'altra in una comunità biologica. Come già discusso brevemente l'ecologia è lo studio dei fattori ambientali che influiscono sugli organismi e del modo in cui gli organismi interagiscono con questi fattori e tra di loro.

La tecnologia

La tecnologia tratta dei modi in cui gli uomini lavorano con i materiali e l'energia. Nell'era moderna la tecnologia è, fondamentalmente, il prodotto dell'ingegneria, basata su principi scientifici. Questa scienza riguarda la scoperta, la spiegazione e lo sviluppo di teorie che si riferiscono ai correlati fenomeni naturali che riguardano l'energia, la materia, il tempo e lo spazio. L'ingegneria fornisce programmi e *mezzi* per raggiungere obiettivi pratici e specifici, basandosi sui principi fondamentali della scienza. La tecnologia utilizza questi programmi per ottenere gli obiettivi desiderati.

E' essenziale considerare tecnologia, ingegneria ed attività industriali nello studio della scienza dell'ambiente, a causa della loro enorme influenza su di esso. Gli uomini useranno la tecnologia per procurarsi cibo, difesa e beni di cui hanno bisogno per il loro benessere e la loro sopravvivenza. La sfida è adoperare la tecnologia tenendo conto dell'ambiente e dell'ecologia, in modo da trame reciproco vantaggio, piuttosto che danno.

La tecnologia, applicata correttamente, può risultare enormemente positiva per la salvaguardia dell'ambiente. La più scontata delle sue applicazioni è il controllo dell'inquinamento dell'acqua e dell'aria. Poiché le misure effettuate alla fine di un processo ("end of pipe") hanno lo scopo di controllare l'inquinamento prodotto nell'aria e nell'acqua, sarebbe meglio utilizzare la tecnologia per il controllo del processo produttivo mentre questo si svolge, in modo da prevenire la formazione degli inquinanti.

La tecnologia dovrà essere sempre più utilizzata per sviluppare processi altamente efficienti di conversione di energia, di sfruttamento di risorse energetiche rinnovabili e di conversione di materiali grezzi in prodotti finiti, con la minima generazione di rifiuti pericolosi come sottoprodotti. Nel settore dei trasporti l'applicazione corretta della tecnologia, in aree quali il trasporto su treni ad alta velocità, può aumentare enormemente la rapidità, l'efficienza energetica e la sicurezza dei *mezzi* per lo spostamento di persone e beni.

Fino a pochissimo tempo fa, i progressi tecnologici venivano raggiunti senza tenere conto, nella maggior parte dei casi, dell'impatto ambientale. Attualmente la maggior sfida tecnologica consiste nel riconciliare la tecnologia con gli effetti che essa ha sull'ambiente. La sopravvivenza della specie umana e del pianeta che la ospita richiede adesso che l'interazione tra scienza e tecnologia includa la protezione dell'ambiente.

1.4. ECOLOGIA

L'ecologia è la scienza che tratta delle relazioni tra gli organismi viventi e il loro ambiente fisico. E' possibile avvicinarsi all'ecologia dal punto di vista dell'ambiente e delle domande che esso pone agli organismi che vivono in esso o da quello degli organismi e del modo in cui essi si adattano alle loro condizioni ambientali. Un ecosistema consiste nell'insieme degli organismi mutuamente interagenti e dell'ambiente in cui vengono

scambiati materiali in modo essenzialmente ciclico. Un ecosistema possiede componenti fisiche, chimiche e biologiche, insieme a fonti energetiche e percorsi di scambio di energia e materiali. L'ambiente in cui vive un particolare organismo è chiamato **habitat**. Il ruolo di un organismo in un habitat è detto la sua **nicchia**.

Per lo studio dell'ecologia, spesso conviene suddividere l'ambiente in quattro vaste categorie. L'ambiente terrestre è caratterizzato dalla terra emersa e consta di biomi, come pascoli, savane, deserti o uno dei molti tipi di foreste. L'ambiente delle acque dolci può essere ulteriormente suddiviso in habitat di acque ferme o lentici (laghi, bacini artificiali) e habitat di acque in movimento o lotici (torrenti, fiumi). L'ambiente marino è caratterizzato da acqua marina e può essere in generale suddiviso nelle acque poco profonde della piattaforma continentale, che compongono la zona neritica, e nelle acque più profonde, che costituiscono la regione oceanica. Un ambiente in cui due o più generi di organismi vivono insieme, a loro mutuo beneficio, è detto ambiente simbiotico.

Per la descrizione di un ecosistema è molto importante il fattore **popolazione**, che consiste in un gruppo di organismi specifici che occupano uno specifico habitat. Le popolazioni possono essere stabili o possono crescere esponenzialmente quando si verifica una **esplosione demografica**. Un'esplosione che sia il risultato di un incontrollabile esaurimento di risorse, accumulazione di rifiuti e azioni predatorie, culmina in un brusco declino chiamato **crollo demografico**. **Il comportamento** riguardo alle gerarchie, alla territorialità, allo stress sociale e ai modelli di alimentazione, gioca un ruolo importante nel determinare il destino delle popolazioni.

Le suddivisioni principali della moderna ecologia sono l'ecologia degli ecosistemi, che vede gli ecosistemi come vaste unità, e l'ecologia demografica, che cerca di spiegare il comportamento di un ecosistema attraverso le proprietà delle unità individuali che lo compongono. In pratica questi due approcci normalmente si fondono. L'ecologia descrittiva descrive i tipi e la natura degli organismi e del loro ambiente, evidenziando le strutture degli ecosistemi, le elettività, le dispersioni e le strutture delle popolazioni. L'ecologia funzionale spiega come funziona un ecosistema, compreso il modo in cui la popolazione risponde alle alterazioni dell'ambiente, e come materia ed energia si muovano attraverso l'ecosistema.

La comprensione dell'ecologia è essenziale nelle moderne società industriali, affinché vi sia compatibilità con la salvaguardia ed il miglioramento dell'ambiente. Il ramo dell'ecologia che si occupa della previsione dell'impatto di tecnologia e sviluppo sugli ecosistemi e che fornisce le informazioni in modo che queste attività abbiano il minimo effetto negativo, può essere chiamato **ecologia applicata.**

1.5. ENERGIA E CICLI ENERGETICI

I cicli biogeochimici, e virtualmente tutti i processi che avvengono sulla Terra, sono azionati dall'energia proveniente dal sole.

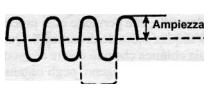
Il **sole** praticamente emette radiazioni come un corpo nero, avendo una temperatura superficiale effettiva di 5.780 K (temperatura assoluta, in cui le unità sono le stesse della scala Celsius, ma con lo zero allo zero assoluto). Il sole trasmette energia alla Terra sotto forma di radiazione elettromagnetica (vedere sotto) con un massimo nel flusso di energia intorno ai 500 nanometri, cioè nella regione dello spettro del visibile. Una superficie di un metro quadro perpendicolare alla direzione del flusso solare, alla sommità dell'atmosfera, riceve energia pari a 1.340 watts, sufficiente, ad esempio, a far funzionare un ferro da stiro; questo è detto **flusso solare**.

L'energia nei sistemi naturali viene trasferita come **calore**, che è la forma di energia che fluisce tra due corpi come risultato di una differenza di temperatura, oppure come **lavoro**, che è il trasferimento di energia che non dipende da differenze di temperatura. Questi trasferimenti sono governati dalle leggi della **termodinamica**. La **prima legge della termodinamica** stabilisce che, anche se l'energia può essere trasferita o trasformata, essa viene conservata e non persa. L'energia chimica presente nel cibo ingerito, viene trasformata attraverso processi metabolici in lavoro o calore che possono essere utilizzati dagli organismi, ma globalmente non c'è una perdita o un acquisto netto di energia. La **seconda legge della termodinamica** descrive la tendenza al disordine nei sistemi naturali. Essa dimostra come ogni volta che l'energia viene trasformata, una parte ne venga dissipata, nel senso che non viene utilizzata come lavoro. Così, per esempio, solo una frazione dell'energia che un organismo ricava dal cibo metabolizzato, può essere convertita in lavoro; il resto è dissipato come calore.

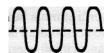
Luce e radiazioni elettromagnetiche

Le radiazioni elettromagnetiche, in particolare la luce, sono di massima importanza nel considerare l'energia nei sistemi ambientali. Perciò bisogna sottolineare i seguenti punti correlati ad esse:

• L'energia può essere trasportata attraverso lo spazio alla velocità della luce, e, uguale a 3,00 x IO⁸ metri al secondo (m/s) nel vuoto, come **radiazione elettromagnetica**, che include luce visibile, radiazioni ultraviolette ed infrarosse, microonde, onde radio, raggi gamma e raggi X.



Lunghezza d'onda più corta, frequenza più alta



Lunghezza d'onda

La radiazione elettromagnetica ha un **carattere ondulatorio.** Le onde si muovono alla velocità della luce, e, ed hanno **lunghezza d'onda (\lambda),** ampiezza, e **frequenza** (ν , in greco "nu") caratteristiche, come illustrato sotto:

 La lunghezza d'onda è la distanza richiesta perché l'onda compia un ciclo completo e la frequenza è il numero di cicli per unità di tempo. Queste grandezze sono correlate dalla seguente equazione:

$$\lambda \nu = c$$

dove v è espressa in cicli al secondo (s⁻¹, un'unità chiamata **hertz**, **Hz)** e Λ è espressa in metri (m);

• Oltre a comportarsi come onde, le radiazioni elettromagnetiche hanno anche carattere di particelle. La doppia natura corpuscolare/ondulatoria delle radiazioni elettromagnetiche è alla base della **teoria quantistica** delle radiazioni elettromagnetiche, che stabilisce che l'energia radiante può essere assorbita o emessa solo in pacchetti discreti chiamati **quanti o fotoni.** L'energia, E, di ogni fotone è data da:

$$E = hv$$

dove h è la costante di Planck, 6,63x10⁻³⁴ Js (joule x secondi).

Dall'equazione precedente, si può vedere che l'energia di un fotone è tanto maggiore quanto maggiore è la frequenza dell'onda ad esso associata (e quanto minore è la lunghezza d'onda).

Flusso di energia e fotosintesi nei sistemi viventi

Mentre i materiali vengono riciclati attraverso gli ecosistemi, il flusso di energia utile può essere visto essenzialmente come un processo a senso unico. L'energia solare incidente può essere considerata come energia ad alta forza, perché può far avvenire utili reazioni, la più importante delle quali, nei sistemi viventi, è la fotosintesi.

Come mostrato in Figura 1.2, l'energia solare catturata dalle piante verdi stimola la clorofilla, che permette quei processi metabolici che producono i carboidrati da acqua e biossido di carbonio. Questi carboidrati sono dei magazzini di energia chimica che può essere convertita in calore e lavoro dalle reazioni metaboliche, con l'ossigeno, negli organismi. Alla fine la maggior parte dell'energia è convertita in calore a bassa forza, che eventualmente viene reirradiato da parte della Terra come radiazione infrarossa.

Uso dell'energia

Durante gli ultimi due secoli l'impatto umano sull'uso e la conversione dell'energia è stato enorme ed ha avuto come risultato molti di quei problemi che ora il genere umano deve affrontare. Questo periodo di tempo ha visto un processo di transizione dall'uso pressoché esclusivo dell'energia catturata con la fotosintesi e utilizzata come biomassa (il cibo per la forza muscolare, il legno per il calore), all'uso di combustibili fossili per circa il 90% e dell'energia nucleare per il 5% circa di tutta l'energia impiegata commercialmente.

Il consumo di combustibili fossili è diviso principalmente tra petrolio, gas naturale e carbone. Queste fonti di energia sono limitate e il loro potenziale di inquinamento è elevato. L'estrazione di carbone e petrolio è distruttiva dal punto di vista dell'ambiente; la combustione di carbone ad alto contenuto di zolfo rilascia biossido di zolfo acido nell'atmosfera e tutti i combustibili fossili producono biossido di carbonio, un gas responsabile dell'effetto serra. Perciò sarà necessario muoversi verso l'uso di sorgenti di energia alternativa, in particolare verso quelle rinnovabili.

Tra queste la più importante è l'energia solare e la biomassa dovrà tornare ad essere usata come fonte di energia. L'energia nucleare, con i moderni reattori sicuri ed efficienti, sta avendo una crescente attenzione come sorgente di energia affidabile e non dannosa per l'ambiente. Lo studio dello sfruttamento dell'energia è cruciale nelle scienze ambientali.

1.6. IMPATTO UMANO E INQUINAMENTO

Le esigenze di una popolazione in crescita, insieme al desiderio della maggior parte delle persone di uno standard di vita più elevato, hanno portato ad un livello di inquinamento su scala mondiale.

L'inquinamento dell'ambiente può essere suddiviso in inquinamento dell'acqua, inquinamento dell'aria ed inquinamento del suolo. Queste tre aree sono tutte collegate tra loro.

Per esempio, alcuni gas immessi nell'atmosfera possono essere convertiti in acidi forti attraverso processi chimici atmosferici, quindi ricadere sulla terra come piogge acide ed inquinare l'acqua abbassandone il pH. I rifiuti pericolosi, laddove impropriamente scaricati,

possono permeare nell'acqua di falda, che può essere immessa come acqua inquinata nei fiumi.

Alcune definizioni riguardo l'inquinamento

In alcuni casi l'inquinamento si presenta come un fenomeno chiaro ed evidente a tutti, mentre in altri risulta più nascosto. I residui dei solventi organo-clorurati tossici, rilasciati nelle riserve d'acqua dai depositi di rifiuti chimici pericolosi, sono inquinanti da ogni punto di vista.

Invece la musica rock amplificata fino ad un valore di decibel molto elevato, per mezzo del miracolo, a volte discutibile, della moderna elettronica, è piacevole per alcune persone, mentre per altre rappresenta una forma ben definita di inquinamento da rumore.

Spesso sono il luogo e il momento che determinano che cosa possa essere chiamato inquinante. I fosfati, che gli operatori di un impianto di trattamento delle acque di rifiuto devono rimuovere dalle acque di scarico, sono chimicamente gli stessi che un agricoltore, a poche miglia di distanza, deve comprare, a costi elevati, come fertilizzanti. La maggior parte degli inquinanti, in pratica, sono risorse trasformate in rifiuti; dal momento in cui le risorse cominceranno a diventare sempre più scarse e costose, la pressione economica obbligherà automaticamente alla ricerca di soluzioni per molti dei problemi dell'inquinamento.

Una definizione ragionevole di **inquinante** è quella di una sostanza presente in concentrazione maggiore rispetto a quella naturale, come risultato dell'attività umana, che ha un netto effetto dannoso sull'ambiente o su qualcosa di valore in esso. Le sostanze **contaminanti**, che non sono classificate come inquinanti a meno che non abbiano qualche effetto dannoso, comportano delle deviazioni dalla normale composizione dell'ambiente.

Ogni inquinante ha origine da una sorgente. La sorgente è particolarmente importante perché generalmente è il luogo più logico per eliminare l'inquinamento. Dopo che un inquinante è stato rilasciato da una sorgente, esso può agire su di un recettore.

Il **recettore** è qualsiasi cosa su cui l'inquinante ha effetto. Sono recettori gli esseri umani, a cui bruciano gli occhi per colpa degli ossidanti presenti nell'atmosfera. Le piccole trote, che possono morire in acqua, in seguito all'esposizione al dieldrin, sono sempre recettori. Eventualmente, se l'inquinante ha vita lunga, può essere immagazzinato in un **sink** (pozzo), un deposito a lungo termine, in cui esso resterà per molto tempo, anche se non necessariamente per sempre. Così un muro di calcare può essere un sink per l'acido solforico proveniente dall'atmosfera, a causa della reazione:

$$CaCO_3 + H_2SO_4 -> CaSO_4 + H_2O + CO_2$$
 (1.6.1)

che fissa il solfato come parte della composizione del muro.

Inquinamento delle acque

Nel corso della storia, la qualità dell'acqua da bere è stata un fattore determinante per il benessere degli esseri umani. Intere città sono state decimate da malattie trasmesse con l'acqua di rete. L'acqua malsana inquinata, proveniente da sorgenti naturali, ha causato grandi sofferenze alle persone costrette a berla o ad usarla per l'irrigazione. Anche se nei paesi industrializzati il problema delle malattie trasmesse dall'acqua è sotto controllo, queste malattie sono prevalenti nei paesi più poveri, specialmente dove l'esplosione demografica ha portato all'abuso delle sorgenti disponibili, sia per ottenere acqua da bere che per trattare le acque di scarico.

Attualmente, le sostanze chimiche tossiche rappresentano la maggior minaccia per la sicurezza delle scorte d'acqua nei paesi industrializzati.

Fin dalla II Guerra Mondiale c'è stata un'enorme crescita nella produzione e nell'uso di sostanze chimiche sintetiche. Molte di esse hanno contaminato le riserve di acqua. Due esempi possono essere il deflusso di insetticidi ed erbi-cidi dalle terre agricole e gli scarichi industriali nelle acque di superficie. Un altro serio problema è rappresentato dalla minaccia alle acque di falda da parte di discariche, rifiuti interrati, bacini di stoccaggio, vasche di trattamento ed altre strutture.

E' chiaro che l'inquinamento dell'acqua dovrebbe essere di interesse per ogni cittadino. Individuare le fonti, le interazioni e gli effetti degli inquinanti dell'acqua è essenziale per il controllo dell'inquinamento, in modo sicuro da un punto di vista ambientale ed economicamente accettabile. Soprattutto, la comprensione dell'inquinamento idrico e il suo controllo dipendono da una conoscenza di base della scienza dell'ambiente acquatico.

Inquinamento dell'aria

Gli inquinanti inorganici dell'aria sono costituiti da un gran numero di sostanze. Molti composti liquidi e solidi possono diventare contaminanti parti-colati dell'atmosfera. Un'altra importante classe di inquinanti inorganici dell'aria comprende gli ossidi di carbonio, zolfo e azoto. Il monossido di carbonio è un gas molto tossico, che risulta fatale anche in dosi relativamente basse. Il biossido di carbonio è un costituente naturale ed essenziale dell'atmosfera ed è richiesto dalle piante per la fotosintesi. Tuttavia CO_2 può risultare l'inquinante atmosferico più mortale di tutti, poiché è un potenziale gas serra che potrebbe causare un devastante riscaldamento globale. Gli ossidi di zolfo e di azoto possono formare acidi, dando luogo a precipitazioni acide. Ammoniaca, cloruro e solfuro di idrogeno sono pure inquinanti dell'aria.

Un certo numero di inquinanti inorganici gassosi entra nell'atmosfera in seguito alle attività umane. Quelli immessi in grandi quantità sono il monossido di carbonio (CO), il biossido di zolfo (SO₂), l'ossido di azoto (NO) ed il biossido di azoto (NO₂). Altri inquinanti inorganici gassosi includono l'ammoniaca (NH₃), l'ossido nitroso (N₂O), il solfuro di idrogeno (H₂S), il doro elementare (Cl₂), il cloruro di idrogeno (HCl) ed il fluoruro di idrogeno (HF). Quantità sostanziali di questi gas, derivanti dalle attività umane, vengono immesse nell'atmosfera ogni anno. Globalmente le emissioni in atmosfera di monossido di carbonio e di ossidi di zolfo e di azoto variano da una ad alcune centinaia di milioni di tonnellate annue.

Gli inquinanti organici sono comuni inquinanti dell'atmosfera che possono avere un forte effetto sulla qualità dell'aria. Questi inquinanti possono provenire sia da fonti naturali che artificiali. In alcuni casi contaminanti originati da entrambi i tipi di sorgenti possono interagire tra loro, per produrre un effetto inquinante. Questo avviene, per esempio, quando i terpeni, prodotti dagli alberi di limone e dalle conifere, interagiscono con gli ossidi di azoto, prodotti dalle automobili, dando luogo allo smog fotochimico.

Gli effetti degli inquinanti organici nell'atmosfera possono dividersi in due categorie principali. La prima consiste negli **effetti diretti**, come il cancro causato dall'esposizione al vinil cloruro. La seconda è la formazione di **inquinanti secondari**, specialmente lo smog fotochimico. Nel caso degli idrocarburi inquinanti la seconda categoria è la più importante. In alcune situazioni localizzate, come ad esempio nei posti di lavoro, gli effetti diretti degli inquinanti organici dell'aria possono essere ugualmente importanti.

Alcuni inquinanti atmosferici, in particolare quelli che possono portare ad un riscaldamento globale irreversibile o alla distruzione dello strato protettivo di ozono, sono in quantità tali da poter minacciare l'intera vita sulla terra.

Inquinamento della geosfera e rifiuti pericolosi

Il tipo di inquinante che più seriamente può contaminare la geosfera, in particolare il suolo, e costituito dai rifiuti pericolosi. Una definizione semplice di **rifiuto pericoloso** è quella di una sostanza potenzialmente rischiosa che è stata scaricata, abbandonata, dimenticata, rilasciata o designata come rifiuto, e che può interagire con altre sostanze, determinando una minaccia. Più semplicemente, un rifiuto pericoloso è un materiale che è stato lasciato in un luogo in cui se ne può venire a contatto e che può risultare dannoso.

Anche se gli esseri umani sono stati esposti a sostanze pericolose, come i nocivi gas vulcanici, fin dalla preistoria, la moderna era industriale ha visto la nascita di problemi, riguardo ai rifiuti pericolosi, che minacciano realmente l'ambiente e il genere umano.

1.7. TECNOLOGIA: I PROBLEMI CHE PONE E LE SOLUZIONI CHE OFFRE

La moderna tecnologia ha fornito i mezzi per una massiccia alterazione dell'ambiente e per il suo inquinamento. Tuttavia essa, applicata in modo intelligente ed unitamente ad una buona conoscenza delle problematiche dell'ambiente, può anche fornire i mezzi per trattare i problemi dell'inquinamento e della degradazione dell'ambiente.

Alcuni dei modi principali in cui la moderna tecnologia ha contribuito all'alterazione dell'ambiente e al suo inquinamento, sono i seguenti:

- Le abitudini agricole che hanno portato a coltivazioni intensive della terra, prosciugamento delle paludi, irrigazioni di terre aride ed uso di erbicidi ed insetticidi;
- 2. L'enorme produzione industriale che porta ad un vasto consumo di materiali grezzi e forma grandi quantità di inquinanti atmosferici, idrici e rifiuti pericolosi, come sottoprodotti:
- 3. L'estrazione e la produzione di minerali ed altri materiali grezzi, con il conseguente inquinamento e la distruzione dell'ambiente;
- 4. La produzione e l'uso di energia con gli effetti sull'ambiente che includono la distruzione di suolo in seguito a coltivazioni a ciclo aperto previo sbancamento, l'inquinamento idrico in seguito all'immissione di acque saline provenienti dalle industrie petrolifere e l'emissione di inquinanti atmosferici, come il biossido di zolfo, causa di piogge acide;
- 5. Le moderne abitudini nei trasporti, in particolare su automobile, che comportano la distruzione della superficie del suolo per la costruzione di strade, l'emissione di inquinanti nell'aria e un aumento della domanda di fonti di combustibili fossili.

Nonostante tutti i problemi che comporta, la tecnologia basata sulle solide fondamenta della scienza dell'ambiente può essere efficacemente utilizzata per risolvere i problemi dell'ambiente.

Un esempio importante è offerto dalla riorganizzazione dei processi industriali basilari, volta a minimizzare sia il consumo di materiali grezzi e di energia che la produzione di rifiuti. Consideriamo il generico processo di produzione di Figura 1.3. Con un'appropriata pianificazione l'accettabilità ambientale di esso può essere enormemente aumentata.

In alcuni casi i materiali grezzi e le fonti energetiche possono essere scelti in modo da minimizzare l'impatto ambientale. Se il processo coinvolge la produzione di sostanze chimiche, si potrebbero modificare completamente le reazioni utilizzate, in modo da rendere l'intera operazione ambientalmente accettabile.

I materiali grezzi e le acque potrebbero essere riciclati il più possibile. I mezzi tecnologici più facilmente accessibili potrebbero essere impiegati per minimizzare le emissioni gassose, liquide e di rifiuti solidi.

Vi sono molti modi in cui la tecnologia può essere applicata per minimizzare l'impatto ambientale. Tra questi vi sono i seguenti:

- L'uso di modernissimi sistemi di controllo computerizzati per raggiungere l'efficienza energetica ottimale, la massima utilizzazione di materiali grezzi e la minima produzione di sottoprodotti inquinanti;
- L'uso di materiali che minimizzino i problemi di inquinamento; per esempio materiali termoresistenti, che rendono possibile l'uso di alte temperature per processi termici efficienti;
- L'applicazione di processi e materiali che consentano il massimo riciclaggio di materiali e la minima produzione di sottoprodotti di scarico; per esempio, avanzati processi a membrana per il trattamento delle acque di scarico per riciclare l'acqua;
- L'applicazione di biotecnologie avanzate, quali il trattamento biologico dei rifiuti;
- L'uso dei migliori catalizzatori per sintesi efficienti;
- L'uso dei laser per strumenti di precisione e processi per minimizzare la produzione di rifiuti.

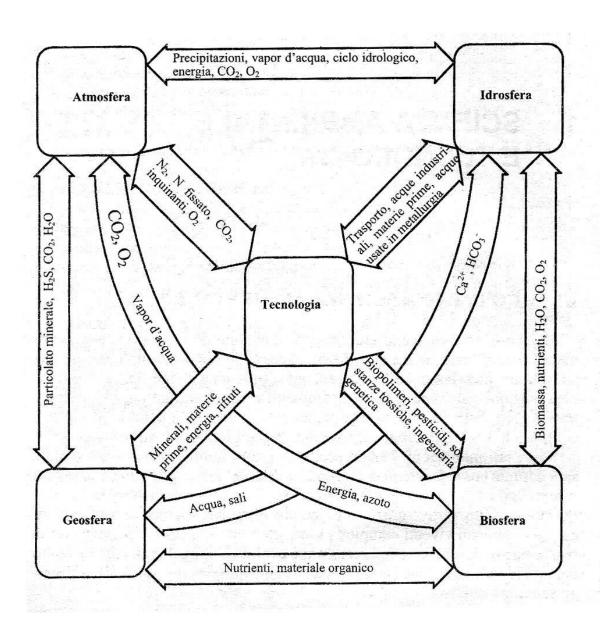


Figura 1.1. Illustrazione delle relazioni tra gli ambienti aria, acqua e suolo, tra essi e i sistemi viventi ed il rapporto con la tecnologia.

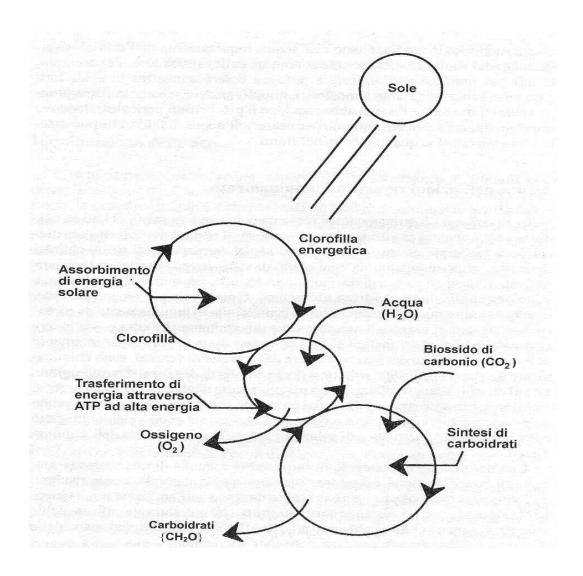
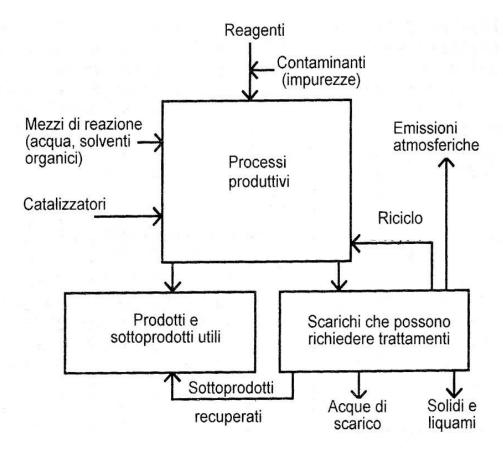


Figura 1.2. Conversione e trasferimento dell'energia tramite la fotosintesi.



Figur a 1.3. Un processo produttivo considerato dal punto di vista della minimizzazione dell'impatto ambientale.

CHIMICA DELL'AMBIENTE E CICLI CHIMICI

2.1. CHIMICA DELL'AMBIENTE

La chimica dell'ambiente è stata definita come lo studio delle sorgenti, delle reazioni, del trasporto, degli effetti e del destino delle specie chimiche in acqua, suolo e aria e degli effetti della tecnologia su di essi. Questo capitolo introduce la chimica dell'ambiente e la delinea sulle basi delle definizioni date prima. I rimanenti capitoli del libro riguardano specifiche aree della chimica dell'ambiente. Una delle strade più significative per studiare la chimica dell'ambiente è attraverso i cicli di elementi e materiali. Alcuni dei più significativi di questi sono mostrati nel Paragrafo 2.6 di questo capitolo.

La chimica acquatica è la branca della chimica dell'ambiente che si occupa dei fenomeni chimici in acqua. In larga misura la chimica acquatica riguarda i fenomeni chimici che avvengono nelle "acque naturali", cioè acque di torrenti, laghi, oceani, falde acquifere ed altri posti in cui l'acqua è esposta abbastanza liberamente ad atmosfera, suolo, roccia e sistemi viventi. La chimica acquatica è introdotta nel Paragrafo 2.2 di questo capitolo.

Come si evince dal nome, la **chimica atmosferica** si occupa dei fenomeni chimici che avvengono nell'atmosfera. Per capire questi processi è necessario, come prima cosa, avere una conoscenza di base di struttura e composizione dell'atmosfera. Questo capitolo introduce anche gli unici e importanti concetti della chimica dell'atmosfera, in particolare la fotochimica. Le reazioni fotochimiche avvengono quando le radiazioni elettromagnetiche del sole forniscono energia alle molecole dei gas, formando specie reattive che iniziano quelle reazioni a catena che in gran parte determinano i fenomeni chimici atmosferici chiave.

Le attività umane hanno un effetto così profondo sull'ambiente che è utile invocare una quinta sfera dell'ambiente, chiamata "antroposfera". Molti di questi effetti sono dovuti alla produzione industriale, all'utilizzazione delle risorse, all'utilizzazione dell'energia e ai rifiuti pericolosi.

2.2. L'ACQUA: QUALITÀ, QUANTITÀ E CHIMICA

Questo paragrafo descrive le caratteristiche fondamentali e specifiche dell'acqua e la chimica ambientale dell'acqua.

Qualità e quantità di acqua disponibile sono stati fattori essenziali nel determinare le condizioni di vita dell'uomo nel corso dei secoli. Intere civiltà sono scomparse a causa della carenza d'acqua dovuta a cambiamenti climatici. Nei climi temperati le fluttuazioni nel regime delle precipitazioni sono ancora oggi causa di problemi. Le devastanti siccità degli anni '80, in Africa hanno determinato catastrofiche diminuzioni di raccolti e conseguenti carestie. Nel 1993, le eccezionali alluvioni lungo i fiumi Missouri e Mississippi hanno causato inondazioni, recando danni su vasta scala.

In passato milioni di persone sono morte a causa di epidemie, come quelle del colera e del tifo, che si diffondono attraverso l'acqua inquinata. Alcune di queste malattie sono ancora causa di grave stato di indigenza nei paesi meno sviluppati.

I danni dovuti alle alluvioni sono stati in parte limitati, grazie ad ambiziosi programmi che hanno visto la costruzione di dighe e di argini, ma questo tipo di interventi ha avuto, in alcune aree, effetti collaterali indesiderati come l'inondazione dei terreni agricoli da parte dei bacini artificiali e l'esistenza di dighe pericolose che potrebbero franare. Alcuni degli effetti

avversi dell'alluvione del fiume Missouri/Mississippi del 1993, a cui si è precedentemente accennato, furono aggravati dalla presenza degli argini destinati a creare una protezione dalle alluvioni di più piccola portata. Contenere grossi flussi di acqua, con gli argini, in alcuni punti, causa l'innalzamento del livello dell'acqua in altri punti del fiume, più a monte rispetto a dove si sarebbe dovuto avere l'innalzamento del livello delle acque.

Globalmente i problemi relativi a quantità e qualità di acqua disponibile permangono e, per alcuni aspetti, divengono più gravi. Questi problemi riguardano l'aumento dell'uso di acqua dovuto all'incremento della popolazione, la contaminazione dell'acqua potabile causata dall'abbandono incontrollato di rifiuti pericolosi e la distruzione del patrimonio naturale dovuta all'inquinamento delle acque.

La chimica acquatica deve prendere in considerazione l'acqua sotterranea e l'acqua di fiumi, laghi, estuari e oceani, così come i fenomeni che determinano la circolazione e la distribuzione delle specie chimiche nelle acque naturali. Lo studio relativo alla chimica delle acque richiede alcune conoscenze preliminari sulle fonti, il trasporto, le caratteristiche e la composizione delle acque. L'ambiente in cui vengono a trovarsi le acque naturali influenza notevolmente le specie e le reazioni chimiche che si svolgono in esse. La chimica dell'acqua esposta all'atmosfera è nettamente diversa dalla chimica dell'acqua che si trova sul fondo dei laghi. I microrganismi hanno un ruolo importante nel determinare la composizione chimica dell'acqua. Nel discutere la chimica dell'acqua, quindi, è necessario prendere in considerazione i molteplici fattori di importanza generale che la influenzano.

Lo studio delle acque è conosciuto come **idrologia**, suddivisa in due discipline. La **limnologia** è il settore della scienza che si occupa delle caratteristiche delle acque dolci, incluse le proprietà biologiche così come le caratteristiche chimiche e fisiche. **L'oceanografia** è la scienza che si occupa degli oceani e delle loro caratteristiche chimiche e fisiche. La chimica e la fisica dei vasti oceani della Terra sono tipiche, a causa dell'alto contenuto di sale, dell'enorme profondità e di altre caratteristiche degli oceani.

Fonti e usi dell'acqua: il ciclo idrologico

La riserva d'acqua mondiale è distribuita nelle cinque parti del **ciclo idrologico** (vedi **Figura 2.1**). Gran parte dell'acqua si trova negli oceani. Un'altra frazione è presente nell'atmosfera come vapore d'acqua (nuvole). Parte dell'acqua si trova allo stato solido, come ghiaccio e neve, nelle zone innevate, nei ghiacciai e nelle calotte polari. L'acqua superficiale si trova nei laghi, nei corsi d'acqua e nei bacini artificiali. L'acqua sotterranea si trova in acquiferi sotterranei (corpi rocciosi permeabili capaci di convogliare quantità di acqua sotterranea verso pozzi e sorgenti).

C'è una forte connessione tra *idrosfera*, dove si trova l'acqua, e la *litosfera*, o terra; le attività umane influenzano entrambe. Per esempio, la trasformazione di zone selvatiche, quali foreste o praterie, in zone agricole e la stessa intensificazione dell'agricoltura comportano una riduzione del manto della vegetazione, causando diminuzione della **traspirazione** (la perdita di vapore d'acqua dalle piante) ed influenzando, così, il microclima. Ne risultano l'incremento del deflusso superficiale di acqua e dell'erosione, dovuti alla pioggia, ed un accumulo di fango nei corpi d'acqua. Il ciclo dei nutrienti può essere accelerato, portando all'arricchimento di nutrienti nelle acque di superficie. Queste cose possono, una dopo l'altra, influenzare profondamente le caratteristiche chimiche e biologiche dei corpi d'acqua.

L'acqua utilizzata dagli uomini è prevalentemente acqua dolce superficiale o sotterranea. Nelle regioni aride una piccola frazione della riserva d'acqua proviene dagli oceani, una fonte che probabilmente diventerà sempre più importante col diminuire delle

scorte di acqua dolce. In alcune aree possono essere utilizzate le acque sotterranee o salmastre.

Negli Stati Uniti continentali le precipitazioni portano in media 1,48x10¹³ litri di acqua al giorno, in media 76 cm all'anno. Di questa quantità, circa 1,02x IO¹³ litri al giorno, o 53 cm all'anno, vengono persi per evaporazione e traspirazione. Ne deriva che la quantità d'acqua teoricamente disponibile per l'uso è pari a 4,6x IO¹² litri al giorno, corrispondenti a soli 23 cm per anno. Attualmente negli Stati Uniti vengono utilizzati 1,6x10¹² litri al giorno di acqua, corrispondenti ad 8 cm della media annuale delle precipitazioni. Questa quantità è circa dieci volte quella utilizzata all'inizio di questo secolo (1,66x IO¹¹ litri al giorno). Ancora più sorprendente è l'aumento dell'uso di acqua per individuo, che è passato da circa 40 litri al giorno, nel 1900, a circa 600 litri al giorno attuali. Gran parte di questo aumento è spiegabile dall'intenso sfruttamento dell'acqua, dovuto alle attività agricole ed industriali, ognuna delle quali è responsabile dello sfruttamento di circa il 46% del totale, mentre il rimanente 8% è consumato per usi civili.

Il problema più importante relativo alla disponibilità di acqua è la sua distribuzione non uniforme rispetto allo spazio ed al tempo. Come è mostrato in **Figura 2.2**, le precipitazioni sul territorio degli Stati Uniti continentali si distribuiscono in modo irregolare. Questo costituisce un problema, perché le popolazioni nelle aree con poche precipitazioni spesso utilizzano più acqua di quelle che si trovano nelle regioni con maggiore abbondanza di piogge.

La rapida crescita della popolazione, nella maggior parte delle zone aride degli Stati Uniti sud-occidentali, durante le ultime quattro decadi, ha ulteriormente aggravato il problema. Il problema della penuria d'acqua sta diventando, in questi stati, più acuto in quanto vi si trovano sei tra le undici città più popolose degli USA (Los Angeles, Houston, Dallas, San Diego, Phoenix e San Antonio). Altre zone con problemi sono: la Florida, dove l'eccessivo sviluppo dell'area costiera minaccia il Lago Okeechobee; il Nordest, che è tormentato dal deterioramento dei sistemi idrici, e gli High Plains, una stretta e lunga lingua di territorio dal Texas al Nebraska, dove la domanda di acqua per irrigazione dall'acquifero dell'Ogalla sta abbassando la falda freatica, senza speranza di ripristino del livello iniziale. Questi problemi sono minori, ad ogni modo, rispetto a quelli che si hanno in alcune parti dell'Africa, dove la penuria d'acqua contribuisce a determinare condizioni che danno luogo a carestie.

Le proprietà dell'acqua, una sostanza unica

L'acqua ha un certo numero di proprietà uniche, essenziali per la vita, molte delle quali sono dovute alla abilità con la quale è in grado di formare legami idrogeno. Queste caratteristiche sono elencate nella Tabella 2.1.

Tabella 2.1. Importanti proprietà dell'acqua.

PROPRIETA'	EFFETTI	
	Trasporto dei nutrienti e delle sostanze di	
Eccellente solvente	scarto, svolgimento dei processi biologici	
	in mezzo acquoso	
Costante dielettrica più alta rispetto a	Alta solubilità delle sostanze ioniche e	
qualsiasi altro liquido	loro ionizzazione in soluzione	
Tensione superficiale più alta rispetto a	Controllo dei fattori fisiologici; determina	
qualsiasi altro liquido	la forma della goccia e regola i fenomeni	

	superficiali		
Trasparenza al visibile e alla frazione a più alta lunghezza d'onda dell'ultravioletto	Trasparenza, rende possibile alla luce, richiesta per la fotosintesi, di raggiungere notevoli profondità nei corpi d'acqua		
Massima densità a 4°C	Galleggiamento del ghiaccio; circolazione verticale ristretta nei corpi d'acqua stratificati		
Calore di evaporazione più alto rispetto a qualsiasi altro materiale	Possibilità di trasferimento del calore e di molecole acquose tra i corpi d'acqua e l'atmosfera		
Calore latente di fusione più alto di qualsiasi altro liquido, tranne l'ammoniaca	Temperatura stabilizzata al punto di congelamento dell'acqua		
Capacità termica più alta rispetto a qualsiasi altro liquido, tranne l'ammoniaca	Stabilizzazione della temperatura degli organismi e di alcune regioni della Terra		

L'acqua è un solvente eccellente per molti materiali, per questo motivo è il mezzo fondamentale per il trasporto dei nutrienti e dei prodotti di scarto nei processi vitali.

La costante dielettrica dell'acqua è estremamente elevata rispetto quella di altri liquidi; questo ha dei notevoli effetti sulle sue proprietà di solvente, tali che la maggior parte dei materiali ionici è dissociata in acqua.

Se si esclude l'ammoniaca liquida, l'acqua ha il più elevato calore specifico di qualsiasi liquido o solido, pari a 1 calxg⁻¹x°C⁻¹. A causa di questo elevato calore specifico, una grande quantità di calore è necessaria per aumentare apprezzabilmente la temperatura di una massa di acqua, quindi un corpo d'acqua ha un effetto stabilizzante sulla temperatura delle regioni geografiche circostanti. Questa proprietà, inoltre, previene ampi e repentini cambiamenti di temperatura nei grandi corpi d'acqua, proteggendo, in tal modo, gli organismi acquatici dallo shock di variazioni brusche di temperatura.

Anche l'elevato calore di evaporazione dell'acqua (585 calxg⁻¹ a 20°C) ha, allo stesso modo, un effetto stabilizzante sui corpi d'acqua e sulla temperatura delle regioni circostanti. Questo influenza anche il trasferimento di calore e vapore di acqua tra i corpi d'acqua e l'atmosfera.

L'acqua ha la sua densità massima a 4°C, una temperatura superiore al suo punto di congelamento. La favorevole conseguenza di questo fatto è che il ghiaccio galleggia, cosicché raramente un intero corpo d'acqua ghiaccia completamente. Allo stesso modo, le modalità di circolazione in verticale dell'acqua nei laghi, un fattore determinante nella chimica e nella biologia dei corpi d'acqua, sono ampiamente governate da questa relazione temperatura-densità, propria unicamente dell'acqua.

Le caratteristiche dei corpi d'acqua

Le condizioni fisiche di un corpo d'acqua influenzano notevolmente i processi chimici e biologici che vi avvengono. Le **acque superficiali** si raccolgono principalmente nei corsi d'acqua, nei laghi e nei bacini artificiali. Le **paludi** sono aree allagate in cui l'acqua è sufficientemente poco profonda da permettere la crescita di piante con radici profonde. Gli **estuari** costituiscono un altro tipo di corpo d'acqua, formato da insenature dell'oceano nelle quali confluiscono i corsi d'acqua. La mescolanza di acqua dolce ed acqua salata produce negli estuari, delle condizioni chimiche e biologiche uniche. Gli estuari sono il luogo di riproduzione di molte forme di vita marine e sono, quindi, molto importanti per la loro conservazione.

La particolare relazione temperatura-densità, propria dell'acqua, dà luogo alla formazione di strati distinti nei corpi d'acqua ferma, come si può vedere nella **Figura 2.3**. Durante l'estate uno strato superficiale **(epilimnio)** è riscaldato dalla radiazione solare e, a causa della sua minore densità, galleggia sopra lo strato che si trova sul fondo, o **ipolimnio**. Questo fenomeno è chiamato **stratificazione termica**.

Quando esiste una differenza di temperatura apprezzabile tra due strati di acqua, questi non si mescolano ma si comportano indipendentemente ed hanno proprietà chimiche e biologiche notevolmente diverse. L'epilimnio, che è esposto alla luce, può mostrare un grande sviluppo algale. Come risultato dell'esposizione all'atmosfera e durante le ore del giorno, a causa della attività fotosintetica delle alghe, l'epilimnio contiene un livello di ossigeno disciolto relativamente più alto e generalmente è aerobico. Nell'ipolimnio l'attività batterica ed il materiale organico biodegradabile possono essere la causa dello stato anaerobico dell'acqua. Di conseguenza nell'ipolimnio tendono ad essere predominanti le specie chimiche nelle loro forme ridotte.

Il piano di separazione, lo strato tra epilimnio ed ipolimnio, è chiamato **termoclino**. Durante l'autunno, quando l'epilimnio si raffredda, si arriva ad un punto in cui la temperatura dell'epilimnio raggiunge quella dell'ipolimnio. La scomparsa della stratificazione termica fa sì che l'intero corpo d'acqua si comporti come una unità idrologica; il mescolamento dell'acqua che ne risulta è noto come **overturn** (inversione). L'overturn si verifica normalmente anche in primavera. Durante l'overturn le caratteristiche chimiche e biologiche del corpo d'acqua diventano molto più uniformi, e ne possono derivare un certo numero di cambiamenti chimici, fisici e biologici. L'attività biologica può aumentare grazie al mescolamento dei nutrienti. I cambiamenti nella composizione delle acque durante l'overturn possono causare danni ai processi di trattamento delle acque.

La vita acquatica

Gli organismi viventi (biota) in un ecosistema acquatico possono essere classificati come autotrofi o eterotrofi. Il biota autotrofo utilizza l'energia solare o l'energia chimica per fissare gli elementi, dal semplice materiale inorganico, nelle complesse molecole biologiche che compongono gli organismi viventi. Le alghe sono dei tipici organismi acquatici autotrofi. Generalmente CO2, NO₃ e H₂PO₄-/HPO₄²⁻ sono fonti rispettivamente di C, N e P per gli organismi autotrofi. Gli organismi che utilizzano la luce solare per sintetizzare materia organica da materia inorganica sono chiamati **produttori.**

Gli organismi **eterotrofi** utilizzano come fonte di energia e come materiale grezzo per la sintesi della propria biomassa le molecole organiche prodotte dagli organismi autotrofi. I **decompositori** (o **riduttori)** sono un sottogruppo degli organismi eterotrofi, costituito principalmente da batteri e funghi; questi terminano il processo di degradazione del materiale biologico in quei composti semplici che erano stati originariamente fissati dagli organismi autotrofi.

La capacità di un corpo d'acqua di produrre materiale vivente è detta **produttività**. La produttività è il risultato di una combinazione di fattori chimici e fisici. Le acque con bassa produttività sono preferibili per l'approvvigionamento idrico o per le attività sportive in acqua. Una produttività relativamente elevata è invece necessaria per sostenere la presenza dei pesci. Una produttività eccessiva può condurre ad un soffocamento dei vegetali e può causare problemi di cattivo odore. La crescita delle alghe può diventare estremamente elevata nelle acque molto produttive, con il risultato che la concomitante decomposizione delle alghe morte determina una riduzione dell'ossigeno disciolto nell'acqua a valori molto bassi. Questo insieme di condizioni è comunemente chiamato **eutrofizzazione**.

Le forme di vita più complesse rispetto ad alghe e batteri (i pesci, per esempio) rappresentano una frazione della biomassa comparativamente piccola nella maggior parte dei sistemi acquatici. L'influenza di queste forme di vita superiore, sulla chimica acquatica, è minima. Ad ogni modo, la vita acquatica è fortemente influenzata dai fattori chimici e fisici dei corpi d'acqua nei quali si sviluppa. *Temperatura, trasparenza* e *turbolenza* sono le tre proprietà fisiche che maggiormente influenzano la vita acquatica. Ad una temperatura dell'acqua molto bassa corrisponde una altrettanto bassa attività biologica, mentre una temperatura molto elevata è fatale per la maggioranza degli organismi. La trasparenza delle acque è particolarmente importante per la crescita delle alghe. La turbolenza è un fattore importante per i processi di mescolamento e trasporto in acqua. Alcuni piccoli organismi (plancton) dipendono, per la propria mobilità, dalle correnti d'acqua.

L'ossigeno disciolto (DO), è frequentemente una sostanza chiave nel determinare il grado di diffusione ed il tipo di vita in un corpo d'acqua. Una deficienza di ossigeno è fatale per molti animali acquatici, come i pesci. La presenza di ossigeno può essere altrettanto fatale per molti tipi di batteri anaerobici.

La domanda biochimica di ossigeno, BOD, è un altro importante parametro di qualità dell'acqua. Si riferisce alla quantità di ossigeno utilizzata quando il materiale organico presente in un certo volume d'acqua è degradato biologicamente. Un corpo d'acqua con una elevata domanda di ossigeno biochimico e senza mezzi per un rifornimento rapido di ossigeno, ovviamente non può sostenere organismi che richiedono ossigeno.

Il biossido di carbonio è prodotto dai processi di respirazione nell'acqua e nei sedimenti, e può anche entrare in acqua dall'atmosfera. Il biossido di carbonio è richiesto dalle alghe, nel processo di fotosintesi, per la produzione di biomassa e in alcuni casi è un fattore limitante per la loro crescita. Elevati livelli di biossido di carbonio in acqua, prodotti dalla degradazione del materiale organico, possono essere causa di una eccessiva crescita algale e quindi di una eccessiva produttività.

Il livello dei nutrienti in acqua frequentemente determina la sua produttività. Le forme di vita vegetale acquatiche richiedono un adeguato rifornimento di carbonio (CO₂), azoto (nitrato), fosforo (ortofosfato) ed elementi in tracce come il ferro. In molti casi il fosforo è un nutriente limitante ed è generalmente controllato con lo scopo di limitare una eccessiva produttività.

La salinità dell'acqua ugualmente determina il tipo di forme di vita presenti. Le acque di irrigazione possono innalzare pericolosamente il livello di salinità di un corpo d'acqua. La vita marina ovviamente richiede, o comunque tollera, l'acqua salata, mentre molti organismi di acqua dolce sono intolleranti ai sali.

Chimica acquatica

I fenomeni chimici dell'ambiente acquatico coinvolgono processi familiari ai chimici come reazioni acido-base, di precipitazione, ossidoriduzioni e complessazioni. Anche se molti fenomeni di chimica acquatica sono discussi in genere da un punto di vista termodinamico (equilibrio), è importante tenere presente che le cinetiche - velocità di reazione - sono molto importanti nella chimica acquatica come pure i processi biologici. Per esempio, durante la fotosintesi delle alghe il pH può aumentare a causa del consumo di CO2, che viene convertito in HCO3 per poi trasformarsi nello ione CO32, che reagisce a sua volta con il Ca2+ presente in acqua e precipita come CaCO3.

I fenomeni **acido-base** in acqua coinvolgono accettori e donatori di ioni idrogeno. Molte specie in acqua si comportano come acidi, rilasciando ioni H⁺, altre si comportano come basi accettando ioni H⁺ e le molecole di acqua stessa si comportano in entrambi i modi.

Un'importante specie chimica che in acqua ha un equilibrio acido-base è lo ione bicarbonato, HCO₃, che può comportarsi sia da base che da acido:

$$HCO_3^- \iff CO_3^{2-} + H^+ \tag{2.2.1}$$

$$HCO_3^- + H^+ \hookrightarrow CO_2(aq) + H_2O$$
 (2.2.2)

Gli ioni metallici in ambiente acquoso si legano con le molecole di acqua, per questo sono detti **idrati.** Un esempio tipico di uno ione metallico idrato è lo ione calcio in soluzione, $Ca(H_2O)_6^{2+}$ Alcune altre specie presenti in acqua si legano con gli ioni metallici più fortemente dell'acqua. Per esempio, uno o più ioni cianuro possono legarsi con il ferro(II) in soluzione:

$$Fe(H_2O)_6^{2+} + CN^- = FeCN(H_2O)_5^+ + H_2O$$
 (2.2.3)

Questo fenomeno è chiamato complessazione e le specie che si legano con lo ione metallico sono dette **leganti**; nell'esempio precedente il legante era il CN¯ ed il prodotto, in cui si ha il legame ione metallico-legante, è detto **complesso o ione complesso.** Un caso particolare di complessazione è la chelazione, in cui due o più siti di un legante sono legati ad uno ione metallico.

Per molte specie in acqua si hanno reazioni di ossido riduzione. Queste reazioni di solito avvengono grazie a batteri. In ambiente anaerobico tendono a predominare specie riducenti. Un esempio è illustrato in **Figura 2.4**: la riduzione dello ione solfato ad H₂S, per azione microbica su materiale organico indicato come [CH₂O].

Nella chimica acquatica sono particolarmente importanti le interazioni con altre fasi, ivi compresi gli equilibri cinetici e termodinamici della dissoluzione e dello sviluppo dei gas. Esempi sono la dissoluzione dell'ossigeno dall'atmosfera in acqua e lo sviluppo di anidride carbonica dall'acqua, dopo che essa è stata prodotta dal metabolismo batterico. Sono importanti la precipitazione e la dissoluzione dei solidi; un esempio è la dissoluzione di carbonato di calcio, in seguito alla dissoluzione in acqua di anidride carbonica:

$$CaCO_3(s) + CO_2(aq) + H_2O = Ca^{2+} + 2 HCO_3$$
 (2.2.4)

Le particelle colloidali molto piccole sono importanti specie in acqua. I colloidi di dimensioni di un micrometro o meno sono stabilizzati in acqua come sospensioni, a causa della loro attrazione per le molecole d'acqua e della loro carica elettrica. Una delle loro caratteristiche più importanti è l'enorme sviluppo superficiale rispetto al volume.

Lo scambio delle specie chimiche tra soluzione acquosa e fase solida o colloidale serve a rimuovere o ad addizionare soluti all'acqua. Per esempio, la presenza di sedimenti ricchi di materiale organico favorisce la solubilizzazione di sostanze organiche poco solubili. I processi di scambio ionico consentono di scambiare soluti ionici, in particolare i cationi, tra acqua e sedimenti.

2.3. ATMOSFERA E CHIMICA ATMOSFERICA

L'atmosfera è formata da sottili strati di miscele di gas che ricoprono la superficie della Terra. L'aria atmosferica è formata per il 78,1% in volume da azoto, per il 21,0% da ossigeno, per lo 0,9% da argon e per lo 0,03% da biossido di carbonio, senza considerare l'acqua. Normalmente l'aria contiene 1-3% in volume di vapor d'acqua. Inoltre l'aria contiene una grande varietà di gas a livello di tracce, al di sotto dello 0,002%. Questi gas comprendono: neon, elio, metano, kripton, monossido d'azoto, idrogeno, xenon, anidride solforosa, ozono, biossido d'azoto, ammoniaca e monossido di carbonio.

In base alla temperatura l'atmosfera è divisa in diversi strati. Tra questi i più significativi sono: la troposfera, che si estende in altezza dalla superficie della terra fino a circa 11 Km, e la stratosfera, che va da 11 Km a 50 Km circa. L'intervallo di temperature della troposfera va da una media di 15° C al livello del mare a una media di -56° C al suo confine più alto. La temperatura media della stratosfera aumenta da -56° C, valore che ha al suo confine con la troposfera, fino a -2° C, al suo confine più alto. L'aumento di temperatura nella stratosfera è dovuto all'assorbimento da parte dell'ozono (O_3) delle radiazioni ultraviolette del sole.

Le **reazioni fotochimiche** sono la caratteristica più importante della chimica atmosferica; esse sono attivate dall'assorbimento di fotoni, hv, da parte delle molecole. (L'energia, E, di un fotone di una radiazione ultravioletta o visibile è data dall'equazione, E = hv, dove h e la costante di Planck e v è la frequenza della radiazione, inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda. La radiazione ultravioletta ha una frequenza più alta della radiazione visibile, è più energetica ed è maggiormente in grado di spezzare i legami chimici nelle molecole che la assorbono). Una delle reazioni fotochimiche più significative è quella responsabile della presenza di ozono nella stratosfera (vedi di seguito); questa reazione ha inizio quando O_2 assorbe radiazioni ultraviolette altamente energetiche nel range di lunghezze d'onda di 135-176 nanometri (nm) e nel range di 240-260 nm:

$$hv > O + O$$
 (2.3.1)

L'ossigeno atomico prodotto dalla dissociazione fotochimica dell' O_2 reagisce con l'ossigeno molecolare producendo ozono, O_3 ,

$$O + O_2 + M \iff O_3 + M \tag{2.3.2}$$

dove M è un terzo corpo, come ad esempio una molecola di N_2 , che assorbe l'eccesso di energia dalla reazione. L'ozono formato assorbe in maniera efficace le radiazioni ultraviolette nel range di lunghezze d'onda 220-330 nm, ed è causa dell'aumento di temperatura osservato nella stratosfera. L'ozono funziona come un filtro, in grado di bloccare le radiazioni ultraviolette dei raggi solari. Se queste radiazioni raggiungessero la superficie della Terra, esse causerebbero cancro della pelle ed altri danni agli organismi viventi.

Ossidanti gassosi nell'atmosfera

Gli ossidi di carbonio, zolfo e azoto sono importanti costituenti dell'atmosfera e sono inquinanti a livelli di concentrazione più elevati. Tra questi il più abbondante è il biossido di carbonio, CO₂. Esso è un costituente atmosferico naturale, ed è necessario

per la crescita delle piante. Inoltre il livello del biossido di carbonio nell'atmosfera, che ora è dell'ordine di 350 parti per milione (ppm) in volume, sta aumentando di un ppm all'anno. L'aumento della CO₂ atmosferica potrebbe causare un riscaldamento generale dell'atmosfera, "effetto serra", con conseguenze potenzialmente molto serie per l'intera atmosfera e per la vita sulla terra. Sebbene non costituisca una minaccia a livello globale, il monossido di carbonio, CO, può essere una seria minaccia per la salute poiché impedisce al sangue di trasportare ossigeno ai tessuti del corpo.

I due ossidi d'azoto più importanti, tra gli inquinanti dell'aria, sono il monossido d'azoto, NO, e il biossido d'azoto, NO $_2$, rappresentati collettivamente come "NO $_X$ ". Questi generalmente sono immessi nell'atmosfera come NO e i processi fotochimici in atmosfera convertono NO in NO $_2$. Ulteriori reazioni poi, possono portare alla formazione di sali di nitrato corrosivi o acido nitrico, HNO $_3$.

Il biossido di azoto è particolarmente significativo nella chimica atmosferica a causa della sua dissociazione fotochimica, dovuta alla radiazione con lunghezza d'onda minore di 430 nm, che produce O atomico altamente reattivo. Questo è il primo passo nella formazione di smog fotochimico (vedi in seguito). Il biossido di zolfo, SO_2 , è il prodotto di reazione della combustione di combustibili contenenti zolfo, come il carbone, che ha un alto contenuto di zolfo. In atmosfera una parte di questo biossido di zolfo è convertito in acido solforico, H_2SO_4 , che normalmente è il principale responsabile delle piogge acide.

Idrocarburi e smog fotochimico

Nell'atmosfera l'idrocarburo più abbondante è il metano, CH₄, rilasciato da sorgenti sotterranee, come i gas naturali, e prodotto dalla fermentazione di materiale organico. Il metano è uno degli idrocarburi meno reattivi tra quelli presenti nell'atmosfera e viene prodotto da sorgenti diffuse, cosicché è minima la sua partecipazione nelle reazioni fotochimiche che producono inquinanti.

I più importanti idrocarburi atmosferici inquinanti sono quelli emessi dai gas di scarico delle automobili. In presenza di NO, in condizioni di inversione termica, di bassa umidità e sotto l'azione delle radiazioni solari, questi idrocarburi producono **smog fotochimico**, che si manifesta con la presenza di materiale particolato, che diminuisce la visibilità, di ossidanti, come l'ozono, e di specie organiche nocive, come le aldeidi.

Materiale particolato

In atmosfera si trovano comunemente sia **particelle** costituite da aggregati di poche molecole che particelle di polvere visibili ad occhio nudo. Alcune particelle atmosferiche, come sali marini formati dall'evaporazione di acqua da goccioline di spray marino, sono naturali e spesso benefici costituenti dell'atmosfera. Particelle molto piccole, chiamate **nuclei di condensazione**, servono da corpo su cui si condensa il vapor acqueo atmosferico e sono essenziali per la formazione di precipitazioni.

Le particelle di dimensioni colloidali presenti in atmosfera sono chiamate aerosol; quelle formate dalla disgregazione di grandi masse di materiale sono note come aerosol di dispersione, mentre le particelle formate da reazioni chimiche in fase gassosa sono aerosol di condensazione. Queste ultime sono generalmente le più piccole. Le particelle più piccole sono in generale le più dannose perché hanno una maggiore tendenza a diffrangere la luce e sono quelle di dimensioni respirabili (tendenza ad essere inalate nei polmoni).

Buona parte del materiale particolato minerale presente in una atmosfera inquinata è in forma di ossidi e altri composti, prodotti dalla combustione di combustibili fossili ad alto contenuto di ceneri. Particelle più piccole di **ceneri leggere (fly ash)** passano attraverso le cappe delle fornaci e sono convogliate efficientemente in un sistema di abbattimento. Tuttavia, parte delle ceneri leggere sfuggono all'azione di abbattimento e sono immesse nell'atmosfera. Sfortunatamente le ceneri leggere così rilasciate solitamente sono formate dalle particelle più piccole, che producono i maggiori danni alla salute umana ed alle piante e che compromettono maggiormente la visibilità.

2.4. GEOSFERA E SUOLO

La geosfera, o Terra emersa, è quella parte della Terra sulla quale vivono gli uomini e dalla quale essi ottengono la maggior parte dei loro alimenti, dei minerali e dei carburanti. Una volta si credeva che la Terra avesse una capacità pressoché illimitata di tamponare le perturbazioni causate dall'uomo, ora si sa che la geosfera è fragile e soggetta a danni causati dalle attività umane, come l'attività estrattiva mineraria, le piogge acide, l'erosione, dovuta alla pratica di agricoltura marginale, e l'eliminazione di rifiuti pericolosi. Dovrebbe essere facile capire che la preservazione della geosfera in una forma adatta alla presenza dell'uomo è una delle più grandi sfide per l'umanità.

Suolo

Il suolo è costituito da una grande varietà di materiale, che compone lo strato più superficiale della crosta terrestre e sul quale crescono le piante. Oltre ai solidi, il suolo contiene anche aria e acqua. I solidi del suolo in media sono formati per circa il 95 % da materiale minerale e per il 5 % da materiale organico, ma tali proporzioni possono variare ampiamente. I suoli sono formati dall'erosione (disgregazione fisica e chimica) delle rocce madri, come risultato di processi interattivi geologici, idrologici e biologici.

Il suolo è poroso e risulta stratificato, verticalmente, in **orizzonti** per azione dell'acqua, di organismi e di processi erosivi. Il suolo è un sistema aperto, soggetto a scambi continui di materiale ed energia con atmosfera, idrosfera e biosfera. La parte più attiva e importante del suolo è lo **strato superficiale del suolo**, lo strato nel quale le piante mettono radici e in cui avvengono le maggiori attività biologiche.

2.5. LA BIOSFERA

La biosfera è il nome dato a quella parte dell'ambiente costituita da organismi e materiale biologico vivente. Virtualmente tutta la biosfera è contenuta nella geosfera e nell'idrosfera, nel sottilissimo strato in cui entrambe queste sfere ambientali entrano in contatto con l'atmosfera. Vi sono anche delle particolari forme di vita alle profondità estreme degli oceani, ma si è comunque ancora relativamente vicini all'atmosfera.

La biosfera influenza fortemente le altre parti dell'ambiente e ne è, a sua volta, influenzata. Si pensa che alcuni organismi siano stati responsabili della trasformazione dell'atmosfera della Terra, originariamente riducente, in un'atmosfera ricca di ossigeno, attraverso un processo che ha portato anche alla formazione di massicci depositi di minerali ossidati, come ad esempio il ferro nei depositi di Fe₂O₃.

Attraverso la fotosintesi, alcuni organismi rimuovono la CO₂ dall'atmosfera, riducendo così l'incontrollato aumento della temperatura della superficie terrestre

dovuto all'effetto serra. Gli organismi hanno un forte effetto sui corpi d'acqua, producendo la biomassa necessaria per la vita e facendo da intermediari nelle reazioni di ossido-riduzione. Sono anche coinvolti nei processi di erosione che disgregano le rocce nella geosfera e convertono il materiale solido roccioso in suolo. I licheni, costituiti da combinazioni simbiotiche (mutuamente vantaggiose) di alghe e funghi, si attaccano fortemente alle rocce; essi secernono delle specie chimiche che lentamente disciolgono la superficie delle rocce e vi trattengono l'umidità che ne favorisce l'erosione.

L'aspetto più importante della biosfera è la fotosintesi delle piante, che fissa il carbonio dalla CO_2 dell'atmosfera e l'energia solare (hv), sotto forma di biomasse ad alto contenuto energetico,

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow{hv} \{CH_2O\} + O_2(g)$$
 (2.5.1)

In questo modo piante e alghe si comportano da organismi autotrofi, che utilizzano l'energia solare o chimica per fissare gli elementi da materiali semplici, inorganici e non viventi, in complesse molecole costituenti gli organismi viventi. Il processo opposto, la biodegradazione, decompone la biomassa sia in presenza di ossigeno (respirazione aerobica),

$$\{CH_2O\} + O_2(g) \rightarrow CO_2 + H_2O$$
 (2.5.2)

che in assenza di ossigeno (respirazione anaerobica),

$$2\{CH_20\}$$
 -» $CO_2(g) + CH_4(g)$ (2.5.3)

Sia la biodegradazione aerobica che quella anaerobica eliminano la biomassa e riportano il biossido di carbonio nell'atmosfera. L'ultima reazione rappresenta la fonte principale di metano atmosferico. I resti non degradati di questi processi vanno a costituire il materiale organico presente nei sedimenti acquatici e nei suoli ed hanno un importante effetto su queste parti solide. Il carbonio, che originariamente era stato fissato tramite fotosintesi, forma la base di tutti i combustibili fossili presenti nella geosfera.

C'è una forte connessione tra la biosfera e l'antroposfera. Gli esseri umani dipendono dalla biosfera per il cibo, i combustibili e i materiali grezzi. L'influenza che gli esseri umani hanno sulla biosfera continua a modificarla drasticamente.

I fertilizzanti, i pesticidi e le attività agricole hanno enormemente aumentato la produzione di biomassa, cereali e cibo. La distruzione dell'habitat porta all'estinzione di un vasto numero di specie, in alcuni casi ancora prima che vengano scoperte. Grandi cambiamenti nelle caratteristiche degli organismi sono causati dalla bioingegneria, insieme alla tecnologia di manipolazione del DNA e alle tecniche più vecchie di selezione ed ibridazione delle specie, e ci si aspetta che queste comporteranno, nel futuro, delle alterazioni ancora più impressionanti.

E' responsabilità del genere umano far sì che questi cambiamenti avvengano in modo intelligente e in modo da proteggere e nutrire la biosfera.

Tabella 2.2. Scambio di materiali tra le possibili sfere dell'ambiente

Da A	Atmosfera	Idrosfera	Biosfera	Geosfera	Antroposfera
Atmosfera		H ₂ O	02	H ₂ S, partic.	SO ₂ ,CO ₂
Idrosfera	H ₂ O	-	{CH ₂ 0}	Soluti minerali	Inquinanti delle acque
Biosfera	O ₂ , CO ₂	H ₂ O	-	Nutrienti minerali	Fertilizzanti
Geosfera	H ₂ O	H ₂ O	Materiale organico		Rifiuti pericolosi
Antroposfera	O ₂ , N ₂	H ₂ O	Alimenti	Minerali	-

2.6. LA MATERIA E I SUOI CICLI

I cicli della materia (Figura 2.5), spesso basati sui cicli degli elementi, sono della massima importanza per l'ambiente. Questi cicli sono qui sintetizzati e sono ulteriormente trattati nei capitoli successivi. I cicli geochimici globali possono essere trattati dal punto di vista di diversi serbatoi, come gli oceani, i sedimenti e l'atmosfera, collegati tra loro da interfacce, attraverso le quali la materia si muove continuamente. Il moto di un particolare tipo di materia tra due particolari serbatoi può essere reversibile o irreversibile. Il flusso di materia varia enormemente al variare dei componenti della materia, all'interno di uno specifico serbatoio.

I cicli di materia dovrebbero avvenire anche in assenza di vita sulla Terra, ma in realtà sono fortemente influenzati dalle forme di vita, in particolare dalle piante e dai microrganismi. Gli organismi partecipano ai **cicli biogeochimici** che descrivono i cicli della materia, in particolare dei nutrienti di vegetali e animali, attraverso gli ecosistemi. Come parte del ciclo del carbonio, il carbonio atmosferico, CO₂, viene fissato come biomassa e, come parte del ciclo dell'azoto, N₂ atmosferico è fissato nel materiale organico. Il processo inverso è la **mineralizzazione**, in cui elementi legati biologicamente vengono riportati allo stato inorganico. I cicli biogeochimici sono, in ultimo, alimentati dall'energia solare e ben regolati e governati dall'energia consumata dagli organismi. In un certo senso, il ciclo idrologico alimentato dall'energia solare (Figura 2.1) si comporta come un nastro trasportatore infinito, in grado di muovere, attraverso gli ecosistemi, i materiali essenziali per la vita.

La Figura 2.5 mostra un generico ciclo, con le cinque sfere o serbatoi in cui la materia può essere contenuta. Come abbiamo visto all'inizio del capitolo, l'attività umana ha ora una tale influenza sui cicli della materia che è utile riferirsi alla "antroposfera" come a un serbatoio di materia, insieme alle altre "sfere" dell'ambiente. Prendendo la Figura 2.5 come modello, è possibile risalire ad ognuno dei noti cicli degli elementi. Nella tabella 2.2 sono sintetizzate alcune delle numerose possibilità di scambio della materia.

Cicli endogeni ed esogeni

I cicli della materia si possono suddividere in **cicli endogeni**, che comprendono principalmente rocce del sottosuolo di vario tipo, e **cicli esogeni**, che avvengono essenzialmente sulla superficie della Terra ed hanno in generecomponenti dell'atmosfera. I due tipi di cicli sono ampiamente illustrati in Figura 2.6. In generale sedimenti e suolo si possono considerare come equamente ripartiti tra i due cicli e costituiscono l'interfaccia principale tra essi.

La maggior parte dei cicli biogeochimici può essere descritta in termini di **cicli elementari,** in cui sono coinvolti gli **elementi nutritivi,** come carbonio, azoto, ossigeno, fosforo e zolfo. Molti di questi sono cicli esogeni, in cui l'elemento in questione *realizza* parte del ciclo stesso nell'atmosfera (O₂ per l'ossigeno, N₂ per l'azoto, CO₂ per il carbonio). Gli altri, in particolare il ciclo del fosforo, non possiedono componenti gassose e sono endogeni. Tutti i cicli di sedimentazione coinvolgono **soluzioni saline o soluzioni del suolo** che contengono sostanze rilasciate da minerali erosi; queste sostanze si possono depositare come formazioni minerali oppure possono essere assorbite dagli organismi come nutrienti.

Ciclo del carbonio

Figura 2.7. Questo ciclo mostra che il carbonio può essere presente come CO_2 gassosa atmosferica, costituente una porzione relativamente piccola del carbonio totale ma molto significativa. Parte del carbonio è disciolto nelle acque superficiali e nelle falde sotterranee in forma di HCO_3 o di $CO_2(aq)$ molecolare. Una grande quantità di carbonio è presente nei minerali, in particolare nei carbonati di calcio e magnesio come $CaCO_3$. La fotosintesi fissa il carbonio inorganico come carbonio biologico, rappresentato come $\{CH_2O\}$, che è un costituente delle molecole degli esseri viventi. Un'altra frazione di carbonio è fissata come petrolio e gas naturale, con grosse quantità di kerogene idrocarbonaceo (materiale organico contenuto nell'olio di scisto), carbone e lignite, rappresentati come C_xH_{2x} . Processi manifatturieri vengono usati per convertire gli idrocarburi in composti xenobiotici, con gruppi funzionali contenenti alogeni, ossigeno, azoto, fosforo o zolfo. Sebbene questi composti rappresentino una piccola parte del carbonio totale presente nell'ambiente, essi sono particolarmente importanti a causa dei loro effetti chimico tossicologici.

Un aspetto importante nel ciclo del carbonio è che, attraverso l'energia solare, il carbonio viene trasferito in sistemi biologici e infine nella geosfera e nell'antroposfera in forma di carbon fossile e di combustibile fossile. Il carbonio organico o biologico, {CH₂O}, è contenuto in molecole ricche di energia, che possono reagire con molecole di ossigeno, O₂, per riformare il biossido di carbonio e produrre energia. In un organismo ciò può avvenire biochimicamente attraverso la respirazione aerobica, come mostrato nell'equazione 2.5.2, oppure può avvenire attraverso una combustione, come quando viene bruciato del carbone o del combustibile fossile.

Nel ciclo del carbonio sono fortemente coinvolti microrganismi mediatori in cruciali reazioni biochimiche trattate in seguito in questo paragrafo. Le alghe fotosintetiche sono la componente fissatrice del carbonio predominante in acqua; quando esse consumano CO₂ il pH dell'acqua sale, favorendo la precipitazione di CaCO₃ e di CaCO₃MgCÒ₃. Il carbonio organico fissato dai microrganismi viene

trasformato da processi biogeochimici in petrolio fossile, kerogene, carbone e lignite. Il carbonio organico delle biomasse, del petrolio e delle sorgenti xenobiotiche viene degradato da microrganismi e riportato in atmosfera come CO₂.

Gli idrocarburi come quelli contenuti nel petrolio grezzo, e alcuni idrocarburi ottenuti per sintesi, vengono degradati da microrganismi. Questo è un meccanismo importante nell'eliminazione degli idrocarburi inquinanti, come quelli che sono stati immessi accidentalmente in acqua o sul suolo. La biodegradazione può anche essere usata nel trattamento dei rifiuti pericolosi, in cui siano presenti composti contenenti carbonio.

Il ciclo dell'azoto

Come mostrato in **Figura 2.8**, l'azoto è presente in maniera predominante in tutte le sfere dell'ambiente. L'atmosfera è costituita per il 78 % in volume di azoto elementare, N_2 , e costituisce un inesauribile serbatoio di questo elemento essenziale. L'azoto, sebbene sia presente nella biomassa in quantità minore rispetto al carbonio o all'ossigeno, è un costituente essenziale delle proteine. La molecola N_2 è molto stabile, cosicché rompere la molecola in atomi, che possano essere incorporati in forme chimiche organiche o inorganiche di azoto, è lo stadio limitante del ciclo dell'azoto. Ciò avviene attraverso processi altamente energetici, con scariche elettriche che producono ossidi d'azoto. L'azoto elementare viene anche incorporato nella forma chimica in cui è già legato, o **fissato**, da processi biochimici mediati da microrganismi.

L'azoto biologico viene mineralizzato nella forma inorganica durante la decomposizione della biomassa. Grandi quantità di azoto sono fissate sinteticamente, in condizioni di alte temperature ed alta pressione, secondo la seguente reazione:

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$$
 (2.6.1)

La produzione di N_2 e N_2 O gassosi da parte di microrganismi e l'immissione di questi gas in atmosfera completano il ciclo dell'azoto, attraverso un processo chiamato **denitrificazione.** Il ciclo dell'azoto è trattato dal punto di vista dei processi microbici nel Paragrafo 6.11.

Il ciclo dell'ossigeno

Il **ciclo dell'ossigeno** è illustrato in **Figura 9.11**. Esso comprende l'interscambio dell'ossigeno tra la forma elementare dell'O₂ gassoso, contenuto in un enorme serbatoio, l'atmosfera, e l'O chimicamente legato in CO₂, H₂O e materiale organico. Inoltre è fortemente legato ad altri cicli elementari, in particolare al ciclo del carbonio. L'ossigeno elementare diviene ossigeno chimicamente legato attraverso numerosi processi con energie variabili, in particolare la combustione e i meccanismi metabolici degli organismi. Esso viene rilasciato dalla fotosintesi. Questo elemento si combina prontamente e ossida altre specie, come il carbonio, nella respirazione aerobica (Equazione 2.5.2), o come carbonio e idrogeno, nella combustione di combustibili fossili come il metano:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$
 (2.6.2)

L'ossigeno elementare ossida anche sostanze inorganiche come il ferro(II) nei minerali:

$$4\text{FeO} + \text{O}_2 -> 2\text{Fe}_2\text{O}_3$$
 (2.6.3)

Un aspetto particolarmente importante del ciclo dell'ossigeno riguarda l'ozono stratosferico, O₃. Una concentrazione relativamente piccola di ozono nella stratosfera filtra e non lascia passare radiazioni ultraviolette nell'intervallo di lunghezza d'onda tra 220 nm e 330 nm, proteggendo così la vita sulla Terra dagli effetti altamente dannosi di queste radiazioni.

Il ciclo dell'ossigeno si completa quando l'ossigeno elementare ritorna nell'atmosfera. L'unica via importante attraverso la quale ciò avviene è la fotosintesi, mediata dalle piante. La principale reazione della fotosintesi è riportata nella Equazione 2.5.1.

Il ciclo del fosforo

Il ciclo del fosforo, **Figura 2.9**, è cruciale perché il fosforo è solitamente il nutriente limitante negli ecosistemi. Non ci sono forme gassose comuni e stabili del fosforo, così il ciclo del fosforo è endogeno. Nella geosfera il fosforo è largamente contenuto in minerali poco solubili, come depositi di idrossiapatite, un sale di calcio, che costituiscono i maggiori serbatoi di fosfato dell'ambiente. Il fosforo solubile proveniente dai minerali di fosfati e da altre fonti, come i fertilizzanti, è utilizzato dalle piante e incorporato negli acidi nucleici, che costituiscono il materiale genetico degli organismi. La mineralizzazione delle biomasse attraverso il decadimento microbico restituisce il fosforo alla soluzione salina, dalla quale può precipitare come minerale.

L'antroposfera è un importante serbatoio di fosforo nell'ambiente. Grandi quantità di fosfati sono estratti da minerali per essere utilizzati come fertilizzanti, prodotti chimici industriali e additivi per cibi. Il fosforo è un costituente di molti composti estremamente tossici, specialmente i pesticidi organofosfati e i velenosi gas nervini, usati in campo militare.

Il ciclo dello zolfo

Il ciclo dello zolfo, illustrato in **Figura 2.10**, è relativamente complesso per il fatto che coinvolge un certo numero di specie gassose, minerali poco solubili ed alcune specie in soluzione. E' collegato al ciclo dell'ossigeno perché lo zolfo si combina con l'ossigeno per formare il biossido di zolfo gassoso, SO₂, un inquinante atmosferico, e lo ione solfato solubile. Tra le specie significative, coinvolte nel ciclo dello zolfo, vi sono il solfuro di idrogeno gassoso, H₂S; i solfuri minerali, come il PbS; l'acido solforico, H₂SO₄, principale costituente delle piogge acide; lo zolfo biologicamente legato nelle proteine solforate.

Poiché interessa l'inquinamento, la parte più significativa del ciclo dello zolfo \dot{e} la presenza dell'inquinante SO₂ e deH'H₂SO₄ nell'atmosfera. Il primo \dot{e} un gas alquanto tossico, sviluppato nella combustione dei combustibili fossili contenenti zolfo. Il maggior effetto dannoso prodotto dal biossido di zolfo in atmosfera \dot{e} dovuto alla sua tendenza ad ossidarsi, producendo acido solforico. Questa specie \dot{e} responsabile delle precipitazioni acide, "piogge acide".

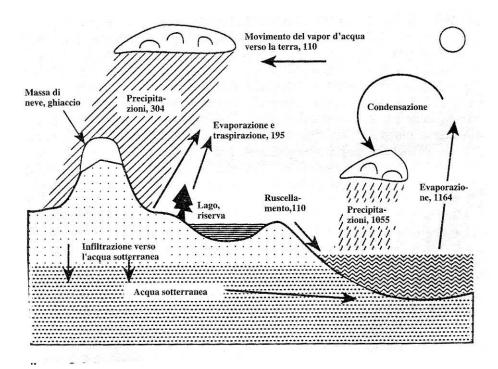


Figura 2.1. Il ciclo dell'acqua, quantità di acqua in trilioni di litri al giorno.

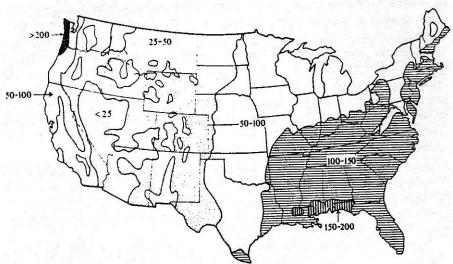


Figura 2.2. Distribuzione delle precipitazioni negli Stati Uniti continentali. È mostrata la media annuale delle precipitazioni in centimetri.

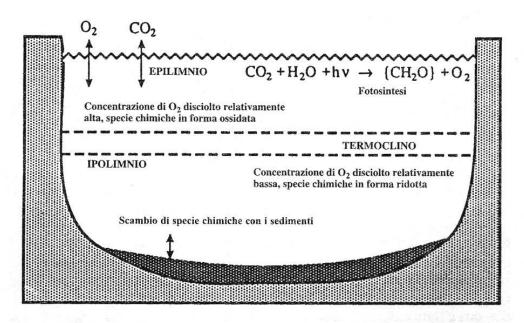


Figura 2.3. Stratificazione di un lago.

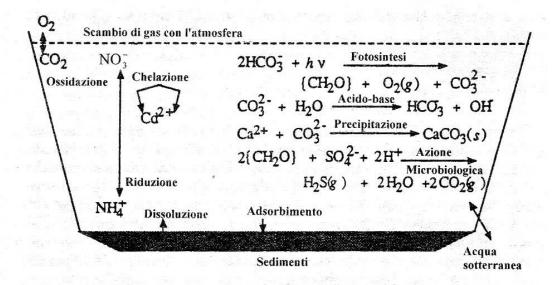


Figura 2.4. I più importanti processi di chimica acquatica.

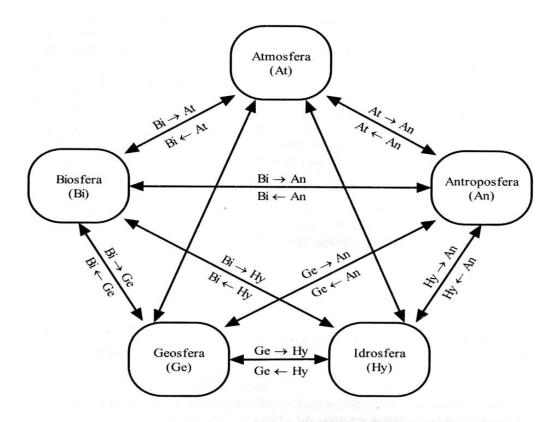


Figura 2.5. Ciclo generale che mostra lo scambio di materia tra l'atmosfera, la biosfera, l'antroposfera, la geosfera e l'idrosfera.

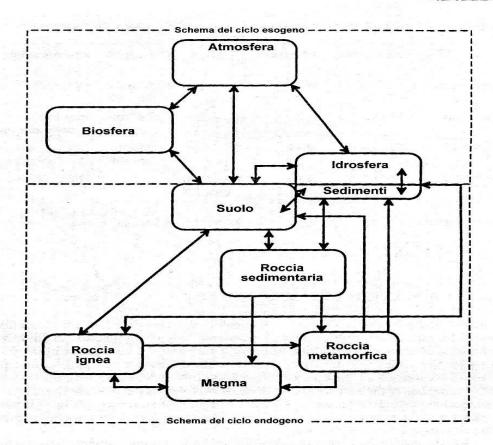


Figura 2.6. Schema generale dei cicli endogeni ed esogeni.

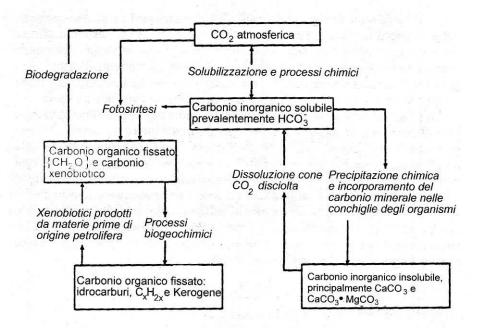


Figura 2.7. Il ciclo del carbonio. Il carbonio minerale è trattenuto in un serbatoio di calcare, CaCO₃, dal quale potrebbe filtrare in una soluzione minerale come ione bicarbonato solubilizzato, HCO₃⁻ che si forma quando la CO₂(aq) disciolta reagisce con il CaCO₃. In atmosfera il carbonio è presente come biossido di carbonio, CO₂. Il biossido di carbonio atmosferico è fissato, come materiale organico, attraverso la fotosintesi e il carbonio organico viene rilasciato sotto forma di CO₂, attraverso la degradazione del materiale organico dovuta all'azione microbica

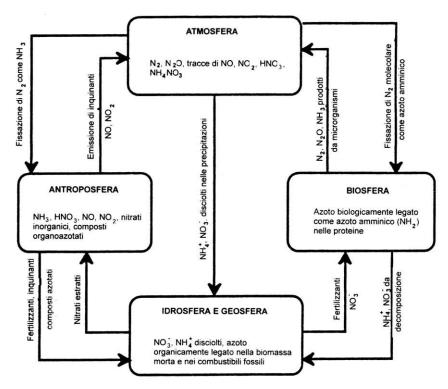


Figura 2.8. Il ciclo dell'azoto.

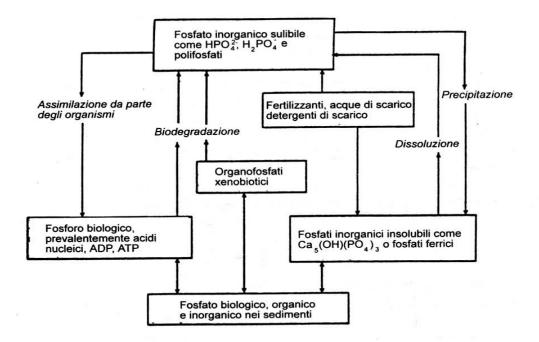


Figura 2.9. Il ciclo del fosforo

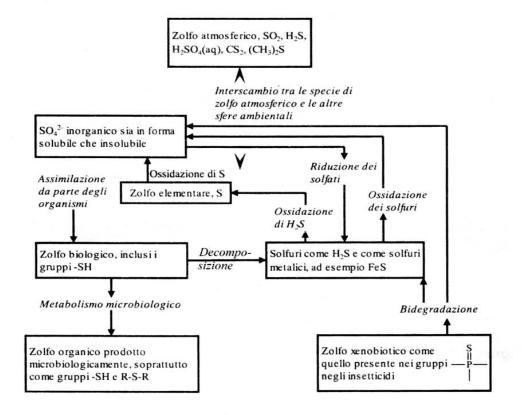


Figura 2.10. Il ciclo dello zolfo.