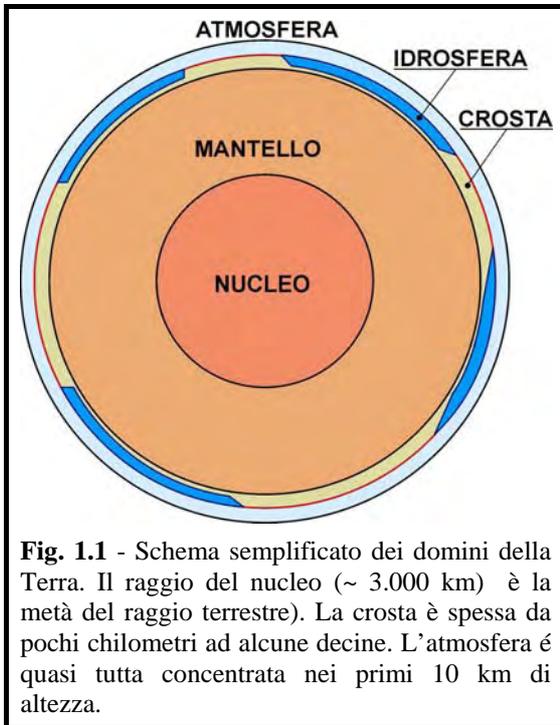


# 1 - COMPOSIZIONE CHIMICA DELLA TERRA

## 1.1 - Di che cosa è fatta la Terra

La Terra (**fig. 1.1**) può essere suddivisa nel seguente modo:



**biosfera**, insieme di tutti gli organismi viventi sulla Terra;  
**atmosfera**, involucro gassoso della Terra;  
**idrosfera**, insieme delle acque superficiali (mari, fiumi, laghi, nubi,...) e sotterranee (falde acquifere, umidità del suolo, acque ipogee,...);  
**litosfera**, involucro rigido della Terra (crosta e porzione superficiale del mantello superiore);  
**astenosfera**, costituisce gran parte del mantello superiore (fino ad un massimo di 250 km di profondità);  
**mantello inferiore e nucleo**, le parti più profonde della Terra, quelle meno conosciute.

Usando una terminologia cara ai naturalisti di un tempo, astenosfera, litosfera, idrosfera a atmosfera costituiscono il **dominio minerale**, mentre la biosfera è il **dominio vivente**; più modernamente **ambiente fisico** e **ambiente biologico** rispettivamente. È un modello a sfere concentriche, in cui si succedono una serie di "strati" fra loro interdipendenti, ispirato da certe visioni medioevali del mondo, protese a raffigurare una grande struttura unitaria, una sorta di architettura dell'Universo.

Conosciamo abbastanza bene la biosfera, l'atmosfera, l'idrosfera e la parte più superficiale della litosfera (poco delle sue porzioni profonde). Sappiamo nulla direttamente della astenosfera,

ma è possibile formulare ipotesi attendibili. Le supposizioni sulla composizione delle porzioni più profonde della Terra vanno considerate con molta cautela. *Ciò che conosciamo e che possiamo conoscere del nostro pianeta è sempre più approssimativo e difficile dalla superficie verso il centro.* Qual è lo stato attuale delle conoscenze? Per rispondere a tale domanda è necessario conoscere un po' di *chimica* (**scheda 1.1**).

## 1.2 - Elementi della biosfera, dell'atmosfera e dell'idrosfera

Le sostanze elementari (specie atomiche) più diffuse nei viventi, animali e vegetali, di qualunque dimensione, acquatici o terrestri, sono rappresentati nella **tab. 1.1**. Esse partecipano alla formazione della materia vivente per il 97 % in massa circa. Quali costituenti fondamentali del corpo degli organismi, sono detti **elementi primari plastici**; essi hanno numero atomico minore di 10, tanto che l'atomo più pesante, l'ossigeno ( $M \sim 16$ ) è uno dei più leggeri tra quelli elencati in **tab. 1.6**. Il restante 3 % è costituito da più di venti elementi, i più importanti dei quali con numero atomico compreso fra 10 e 20 (**scheda 1.2**). Gli elementi pesanti nella materia vivente sono scarsi.

elemento	simbolo	numero atomico (Z)	massa atomica relativa (M)
ossigeno	O	8	15,99
carbonio	C	6	12,01
idrogeno	H	1	1,01
azoto	N	7	14,01

**Tab. 1.1** - Elementi primari plastici.

L'atmosfera, escludendo l'acqua in essa contenuta (umidità, nebbia, nuvole, pioggia, grandine, neve) ed eventuali sostanze inquinanti, è costituita dagli elementi riportati in **tab. 1.2**; i valori tengono conto anche degli elementi che compongono l'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ; ~ 0,03 %) ed il metano ( $\text{CH}_4$ ; ~ 0,0002 %). È difficile stabilire i limiti dell'atmosfera; il suo strato più basso (*troposfera*) compenetra parte delle altre sfere (litosfera, idrosfera e biosfera). L'aria si mescola con le acque superficiali, si insinua nelle minuscole discontinuità del suolo, entra nella materia vivente a tutti i livelli della sua organizzazione.

elemento	simbolo	numero atomico (Z)	massa atomica relativa (M)	% in volume
azoto	N	7	14,01	<b>78,08</b>
ossigeno	O	8	15,99	<b>20,97</b>
argon	Ar	18	39,95	<b>0,93</b>
carbonio	C	6	12,01	<b>0,017</b>
neon	Ne	10	20,18	<b>0,002</b>
elio	He	2	4,00	<b>0,0005</b>
idrogeno	H	1	1,01	<b>0,0002</b>
kripton	Kr	36	83,80	<b>0,0001</b>
xenon	Xe	54	131,30	<b>0,000009</b>

Tab. 1.2 - Gli elementi dell'atmosfera.

a stratificarsi; le più pesanti (azoto e ossigeno) sono in prossimità della superficie, quelle più leggere (idrogeno), al di sopra (tab. 1.3). La situazione è più evidente dall'osservazione della fig. 1.3, dove viene illustrata l'abbondanza dei gas più comuni in funzione dell'altezza e dove si osserva che il più leggero costituisce quasi interamente l'atmosfera oltre i 130 km di altezza. Le molecole più pesanti sono quelle dell'anidride carbonica e dell'acqua, ma in quantità così ridotte (0,03 % e 0,2 % rispettivamente) che non sono rappresentate nel diagramma. Salendo di quota l'argo diventa molto rarefatto, fino a diventare assente fra i 60 e 80 km di altezza, mentre compare l'elio che diventa il gas più importante con l'idrogeno. In linea di massima il comportamento fisico dell'atmosfera obbedisce alle classiche leggi della termodinamica (scheda 1.3).

La troposfera, parte dell'atmosfera che si innalza a non più di una decina di chilometri di altezza, contiene il 70 ÷ 80 % della massa totale dell'aria; in essa avvengono la circolazione dell'aria (fondamentale per il tempo atmosferico in tutto il globo) e una parte importante dei processi legati ai viventi. Ha un spessore sottile, meno della cinquecentesima parte del raggio terrestre, come una pellicola inferiore al millimetro che avvolge una sfera di un metro di diametro. All'aumentare della altitudine la pressione dell'aria diminuisce (fig. 1.2); l'aria si fa più rarefatta, fino a diventare quasi inesistente, senza che sia possibile stabilire un confine.

Le molecole dei diversi gas che compongono l'atmosfera, in funzione della loro massa, tendono

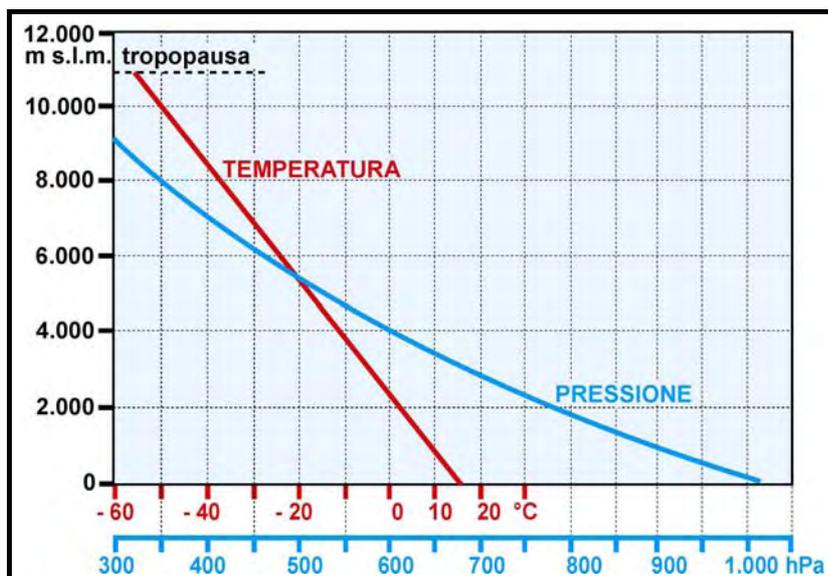


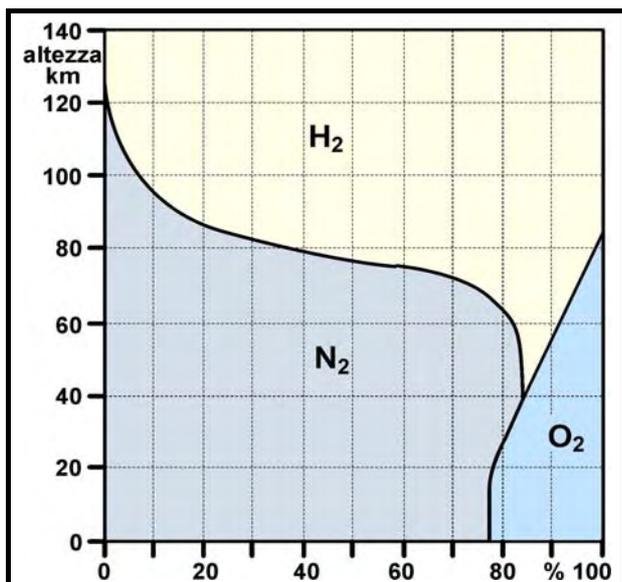
Fig. 1.2 - Andamento della pressione atmosferica [hPa] e della temperatura dell'aria [°C] in funzione dell'altitudine [m s.l.m.].

Altezza (km)	pressione mm Hg	A [%]	N <sub>2</sub> [%]	H <sub>2</sub> O [%]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	H <sub>2</sub> [%]	He [%]
140	0,0040	-	0,01	-	-	-	99,63	0,36
120	0,0052	-	0,19	-	-	-	99,35	0,46
100	0,0067	-	2,97	0,05	0,11	-	96,31	0,56
80	0,0123	-	32,39	0,17	1,86	-	65,11	0,47
60	0,0935	0,03	81,33	0,15	7,70	-	10,69	0,10
40	1,94	0,22	86,43	0,06	12,61	-	0,67	0,01
20	40,99	0,59	81,24	0,02	18,10	0,01	0,04	-
15	89,66	0,77	79,52	0,01	19,66	0,02	0,02	-
10	168,00	0,94	78,02	0,01	20,99	0,03	0,01	-
5	405,00	0,94	77,89	0,18	20,95	0,03	0,01	-
suolo	760,00	0,93	78,08	0,20	20,75	0,03	0,01	-

Tab. 1.3 - Composizione dell'atmosfera alle varie altitudini. Sono espresse le percentuali in volume (rispetto al totale) relative ai diversi gas.

L'acqua pura è costituita dall'89 % in peso di ossigeno e dell'11 % in peso di idrogeno, ma in essa sono presenti altre sostanze, comunque in percentuali quasi sempre molto piccole. La maggior parte della superficie della Terra (3/4) è coperta dall'acqua (fig. 1.4). La temperatura dell'aria, a livello del suolo, è tale da consentire l'esistenza dell'acqua contemporaneamente nei tre stati: *solido* (il ghiaccio e la neve sulle montagne e sui poli), *liquido* (mari,

laghi e fiumi) e *gassoso* (l'umidità contenuta nell'atmosfera). Questa speciale condizione, rispetto agli altri pianeti del Sistema Solare (e forse rispetto ad altri satelliti di altri sistemi stellari dell'Universo), è la ragione della vita.



**Fig. 1.3** - Composizione dell'atmosfera alle varie altezze. % (rispetto al totale) in volume relative ai gas più importanti: **azoto (N<sub>2</sub>)**, **ossigeno (O<sub>2</sub>)** e **idrogeno (H<sub>2</sub>)**. Tutti gli altri citati nelle **tabb. 1.2 e 1.3** sono in quantità trascurabili per essere rappresentati.

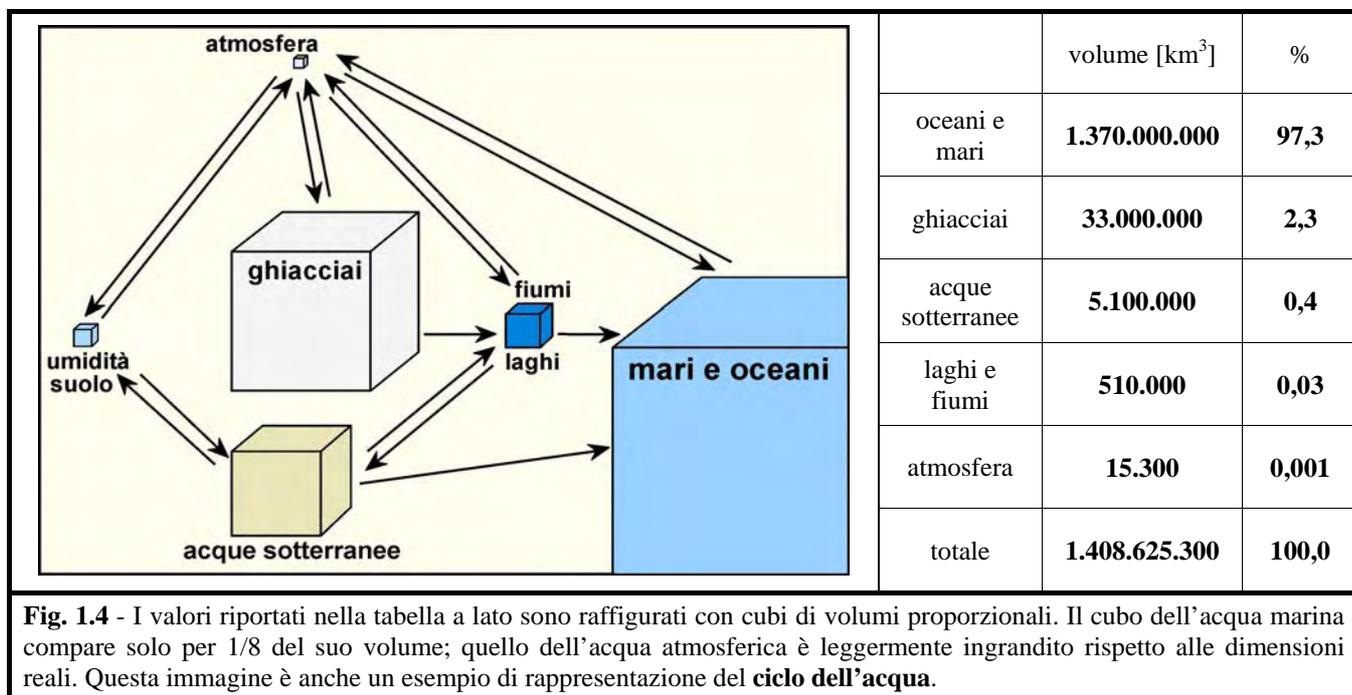
Il diverso irraggiamento solare, maggiore all'equatore e minore ai poli, determina squilibri termici tali da provocare grandi spostamenti di masse d'aria che sono all'origine della successione degli eventi meteorologici nel tempo e nello spazio. In questi processi è ancora protagonista l'acqua, coinvolta in un grande ciclo che ne permette la distribuzione sulle terre emerse, consentendo l'alimentazione dei ghiacciai, dei fiumi, dei laghi.

L'acqua costituisce la frazione principale degli organismi (**tab. 1.4**) e costituisce il mezzo fondamentale dei liquidi di trasporto in natura (sangue, linfa delle piante, soluzioni nutritive presenti nel suolo a disposizione delle radici). L'acqua è il solvente per eccellenza (col tempo quasi tutte le sostanze presenti in natura si sciolgono in essa).

### 1.3 - Elementi della litosfera e della Terra profonda

Le analisi chimiche, effettuate da diversi decenni su un elevato numero di campioni di materiali della litosfera provenienti un po' da tutto il globo (raccolgendo frammenti della

superficie o di pozzi e di miniere molto profonde o di materiali espulsi dai vulcani,... e, più recentemente, anche dai fondali oceanici, abissi compresi) hanno permesso, con buona approssimazione, di determinare gli elementi più abbondanti della litosfera (**tab. 1.5**), quasi tutti mediamente più "pesanti" rispetto a quelli delle altre "sfere".



**Fig. 1.4** - I valori riportati nella tabella a lato sono raffigurati con cubi di volumi proporzionali. Il cubo dell'acqua marina compare solo per 1/8 del suo volume; quello dell'acqua atmosferica è leggermente ingrandito rispetto alle dimensioni reali. Questa immagine è anche un esempio di rappresentazione del **ciclo dell'acqua**.

L'ossigeno e il silicio rappresentano insieme i 3/4 del peso totale e quasi il 95 % del volume. Gli altri elementi sono distinti in tre gruppi fondamentali: alluminio/ferro (sempre presenti ed abbondanti), calcio/sodio/potassio/magnesio (quasi sempre presenti e, salvo qualche caso, quasi mai abbondanti) e quello di tutti gli altri elementi (molto rari, talvolta presenti in tracce, eccezionalmente in quantità apprezzabili). Considerando maggiori profondità della Terra, le conoscenze diminuiscono. Ciò che sappiamo sui materiali profondi, sotto la crosta, non è il risultato di indagini dirette, ma basato su prove indirette e su modelli compatibili con esse. Fenomeni di origine profonda possono infatti essere registrati in superficie.

Vegetali		Animali		Uomo	
seme di girasole	5	ratto	65	corpo umano	65
chicco di	70	aringa	67	ossa	22
frutto di ananas	87	gallina	74	cervello	74
pomodoro	95	rana	78	muscolo	77
		aragosta	79	rene	81
		lombrico	80	sangue	84
		medusa	96		

**Tab. 1.4** - Percentuali dell'acqua rispetto al peso di alcuni organismi o di parti di essi.

Non vi sono valide ragioni per negare che tutto il mantello sia costituito dagli stessi elementi della litosfera, ma non è ancora possibile indicare le percentuali in peso o in volume delle singole specie atomiche, come sopra visto per le altre sfere. Possiamo ipotizzare percentuali minori dell'insieme silicio/ossigeno e una maggiore presenza degli elementi più pesanti; il ferro, per esempio, dovrebbe essere in percentuale crescente con la profondità. D'altra parte sappiamo che in una miscela di materiali, i più leggeri tendono a "galleggiare" sugli altri che migrano, per gravità, verso il basso. L'ipotesi che i materiali del mantello siano costituiti da elementi più pe-

santi in funzione della profondità è coerente con le caratteristiche fisico-meccaniche che tali materiali debbono avere per rendere ragione delle modalità con le quali si propagano le onde sismiche. Si ipotizza che le composizioni chimiche qualitative dei materiali della crosta e del mantello siano simili; con la profondità cambia la composizione quantitativa a vantaggio degli elementi più pesanti. Al di sotto dei 2.900 km, nel nucleo, tutto cambia repentinamente tanto che la densità dei materiali quasi raddoppia (oltre 10 kg/dm<sup>3</sup>), fino a più di 13 kg/dm<sup>3</sup> nel nucleo interno. Si pensa ad una composizione in elementi in grado di rendere ragione di simili densità, pur con tutte le cautele del caso, dato che il centro della Terra è in condizioni di pressione e temperatura poco note e molto diverse da quelle che conosciamo, sulle quali fondiamo le nostre conoscenze di fisica e di chimica.

È possibile che il nucleo terrestre sia composto di ferro con piccole quantità di altri minerali. Il ferro è un elemento comune nel Sistema Solare, è il più abbondante nella Terra dopo l'ossigeno, il silicio e l'alluminio e ha una densità vicina al valore desunto dallo studio della propagazione delle onde sismiche. Le meteoriti metalliche sono composte di ferro con un po' di nichel e anche nel Sole si trova del ferro. Esso è stato sottoposto in laboratorio a pressioni molto grandi e i risultati di questi esperimenti non danno motivo per escludere che, insieme al nichel, possa essere il principale elemento costituente il nucleo. Secondo un'altra ipotesi, meno accettata, il nucleo non sarebbe chimicamente molto diverso dal mantello, ma il materiale, sottoposto a straordinarie pressioni, vi raggiungerebbe un'alta densità e si comporterebbe come un metallo.

elemento	simbolo	numero atomico (Z)	massa atomica relativa (M)	% in peso	% in volume
ossigeno	O	8	15,99	46,6	93,8
silicio	Si	14	55,85	27,7	0,9
alluminio	Al	13	26,98	8,1	0,5
ferro	Fe	26	55,85	5,0	0,4
calcio	Ca	20	40,08	3,6	1,0
sodio	Na	11	22,99	2,8	1,3
potassio	K	19	39,10	2,6	1,8
magnesio	Mg	24	24,31	2,1	0,3
tutti gli altri	-	-	-	1,5	0,9
totali	-	-	-	100	100

**Tab. 1.5** - Gli elementi della litosfera.

## 1.4 - Una breve sintesi

Riassumendo quanto sopra sulla composizione in elementi delle diverse "sfere" della Terra, si possono trarre le seguenti conclusioni:

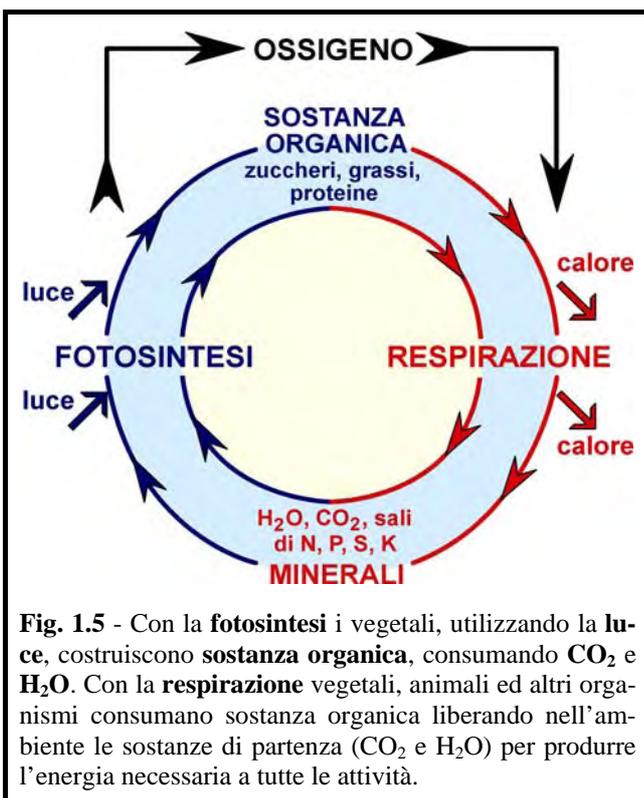
- l'ossigeno, considerando l'insieme di tutte le sfere e ad eccezione del nucleo, è l'elemento più abbondante ed è sempre accompagnato da uno o più elementi caratteristici;
- il **nucleo** sembra costituito da **ferro** e da una minore quantità di **nichel**; questa sfera può essere indicata con il termine **nife** (dai simboli chimici **Ni** e **Fe**);
- il **mantello profondo** sembra costituito dagli elementi più pesanti fra quelli presenti nella crosta; l'ossigeno è forse ancora l'elemento più abbondante, accompagnato dal **silicio**; il ferro sembra in maggiore percentuale rispetto alla crosta e crescente con la profondità; altro elemento più abbondante rispetto alla crosta è il **magnesio**; questa sfera è indicata con il termine **sima** (dal simbolo chimico **Si** e dalle iniziali del **magnesio**);
- la **litosfera** (comprensiva della crosta e del mantello superiore) è dominata dalla prevalenza dell'ossigeno e dal silicio; il silicio è l'elemento caratterizzante il dominio minerale; il ferro, pur essendo il quarto elemento, è meno importante; diminuisce il magnesio ed aumenta l'**alluminio**; questa sfera è indicata con il termine **sial** (dai simboli chimici **Si** ed **Al**);

- l'**idrosfera** è anch'essa dominata dall'ossigeno, ma questa volta l'elemento caratteristico è l'**idrogeno**, raro sulla Terra, ma il più abbondante nell'Universo;
- nell'**atmosfera** l'**ossigeno**, pur essendo l'elemento più importante per i processi fisici, chimici e biologici di cui è responsabile, perde il primato dell'abbondanza a favore dell'**azoto**, importante nel regno vivente e decisamente meno rilevante in quello minerale;
- anche nella **biosfera** l'**ossigeno** è abbondante, insieme all'idrogeno e all'azoto; ma l'elemento più caratteristico è il **carbonio** che, per contrasto, è fra i più rari e meno disponibili nel dominio minerale.

La denominazione delle sfere del dominio minerale in nife, sima e sial tiene conto della composizione chimica dei materiali che le costituiscono e ricalcano il modello di costituzione della Terra proposto da SUESS nel 1885. Successivamente furono proposte altre teorie, basate su nuove conoscenze; tuttavia si è descritto il modello di Suess perché più semplice ed in grado di associare meglio l'abbondanza degli elementi fondamentali in funzione della profondità. È necessario sottolineare che gli elementi che caratterizzano le varie sfere del nostro pianeta non costituiscono quasi mai sostanze pure, ma combinazioni di atomi diversi a formare composti e miscugli (**scheda 1.4**) e con continue trasformazioni chimiche che sono alla base dei cicli degli elementi stessi.

## 1.5 - Sostanze organiche ed inorganiche: il ciclo del carbonio

Non si conoscono validi motivi per pensare che la composizione chimica della litosfera di oltre tre miliardi di anni fa fosse diversa dalla attuale (**tab. 1.5**). Allora, secondo le teorie più accreditate, ebbe origine la vita. I primi semplici organismi avevano a disposizione, come oggi, tanta acqua (ossigeno e idrogeno), moltissimo silicio, molto alluminio e ferro e una discreta abbondanza di calcio, sodio, potassio e magnesio. Si potrebbe quindi supporre che la composizione chimica dei viventi (biosfera) preveda gli elementi appena citati. In realtà, come abbiamo appena visto, il 97 % in peso degli organismi viventi è composto da quattro elementi: ossigeno, idrogeno, carbonio e azoto (**tab. 1.1**). Che i primi due siano abbondanti non ci stupisce in quanto l'acqua costituisce una percentuale variabile dal 60 al 90 % del peso degli organismi (**tab. 1.4**). Ma i quattro succitati elementi e soprattutto l'azoto ed il carbonio rimangono predominanti in un vivente anche quando ad esso è sottratta tutta l'acqua. Eppure carbonio e azoto sono elementi rari sulla crosta tanto che, insieme ad una novantina di altri (**tab. 1.5**), costituiscono appena l'1,5 % in peso della litosfera. Sembrerebbe che, sull'insieme dei complessi e non ancora ben chiariti processi di formazione della vita, il carbonio, per le sue caratteristiche speciali (leggerezza e possibilità di formazione di un elevatissimo numero di composti con altri elementi), "sia stato scelto" come l'elemento cardine di tutta l'evoluzione successiva, a dispetto del silicio che, sebbene così abbondante nell'ambiente, compare soltanto come accidentale negli organismi.



**Fig. 1.5** - Con la **fotosintesi** i vegetali, utilizzando la **luce**, costruiscono **sostanza organica**, consumando **CO<sub>2</sub>** e **H<sub>2</sub>O**. Con la **respirazione** vegetali, animali ed altri organismi consumano sostanza organica liberando nell'ambiente le sostanze di partenza (**CO<sub>2</sub>** e **H<sub>2</sub>O**) per produrre l'energia necessaria a tutte le attività.

La *chimica organica* è la scienza che studia le sostanze composte contenenti carbonio. Tutte le sostanze che ci circondano possono essere suddivise in due grandi categorie: **composti organici** (contenenti carbonio, escluse poche eccezioni come  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ ) e **composti inorganici** (che non lo contengono). I primi sono legati ai viventi (biosfera) e quasi sempre combustibili; i secondi appartengono al dominio minerale (l'ambiente fisico), quasi mai combustibili. Gran parte dei materiali che ci circondano sono costituiti da sostanze organiche come tutti i manufatti in legno, i tessuti, il cuoio, le pelli, le materie plastiche e i prodotti combustibili (il petrolio e il carbone hanno ancestrali origini organogene), i cibi,.... La ringhiera metallica, i mattoni e le mattonelle, i piatti di ceramica, il vetro dei bicchieri,.... sono invece esempi di sostanze inorganiche. Quali sono i processi naturali che rendono interdipendenti il regno organico e quello inorganico, il regno vivente (l'ambiente biologico) e quello minerale (l'ambiente fisico)? A questo quesito, semplificando molto, si può rispondere citando due processi biologici fondamentali: la **fotosintesi** e la **respirazione**.

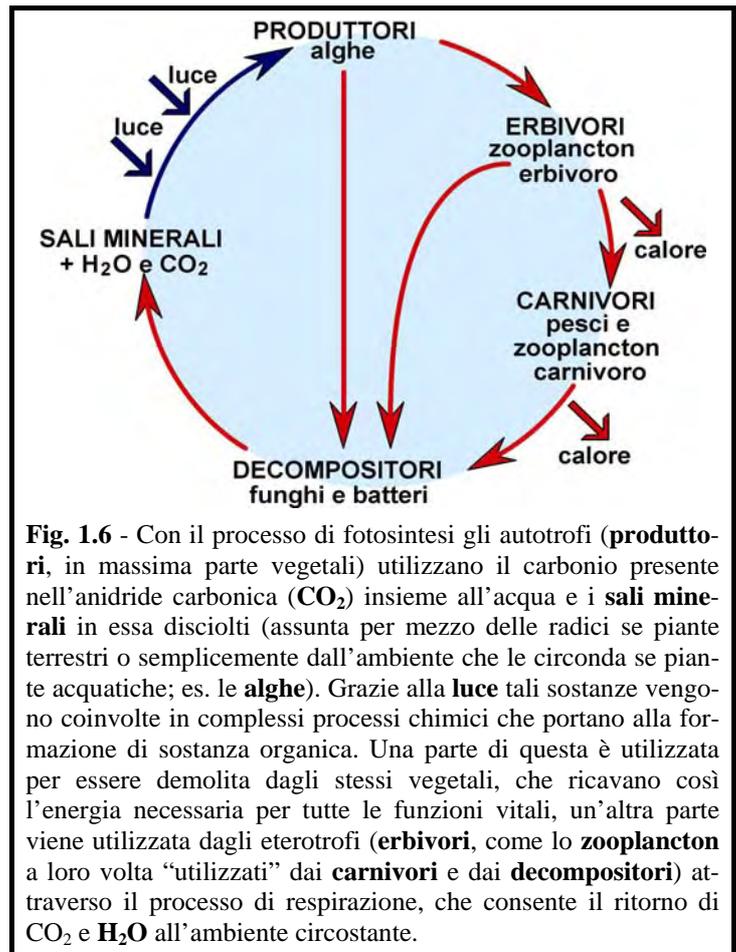
Un organismo vegetale è in grado di svolgere un processo chimico formidabile, difficilmente attuabile dall'uomo nei più attrezzati dei laboratori; è in grado di costrui-

re complesse sostanze organiche (zuccheri, grassi, proteine,...) utilizzando, come materie prime, semplici composti inorganici come l'*anidride carbonica* ( $\text{CO}_2$ , presente come gas nell'aria e nelle acque), *acqua* ( $\text{H}_2\text{O}$ , nel terreno, fiumi, laghi, mari,...) e *sali minerali* (sciolti nell'acqua e contenenti azoto e minori quantità di fosforo, calcio, sodio,...). Per far ciò un vegetale ha bisogno di energia ed utilizza, grazie alla clorofilla, quella più disponibile: la *luce solare*. Questo processo, che come prodotto di scarto produce *ossigeno* che va ad arricchire l'ambiente circostante, è la *fotosintesi* (**fig. 1.5**). In tal modo i vegetali crescono e si riproducono; attraverso la fotosintesi si "costruiscono" la materia di cui essi stessi sono costituiti. I vegetali sono detti **autotrofi** (dal greco *trophe* = nutrizione; **autosufficienti**) oppure **produttori**. La fotosintesi consente alla materia di passare dallo stato inorganico a quello organico (*organizzazione*). Fino ai primi decenni del secolo scorso si pensava che le sostanze organiche potessero essere costruite solo dagli organismi e non potessero essere sintetizzabili artificialmente o formarsi spontaneamente dal regno inorganico, ma un interessante esperimento dimostrò il contrario, aprendo nuove prospettive nella ricerca sull'origine della vita (**scheda 1.5**).

Un organismo animale deve utilizzare, come fonte di accrescimento, sostanza organica "già costruita". È un **consumatore**: deve cibarsi direttamente di vegetali se erbivoro, di animali se carnivoro; oppure è un **decompositore** (vermi, insetti, funghi, batteri,...), cioè un consumatore che utilizza, come fonte di cibo, detriti o rifiuti organici, spoglie di altri organismi o loro residui. I consumatori sono anche detti **eterotrofi**, non in grado di autoprodursi sostanza organica. In questo caso gran parte del materiale organico utilizzato come cibo viene "distrutto", con consumo di ossigeno e produzione di scarti come acqua e anidride carbonica, secondo un processo contrario a quello della fotosintesi (**fig. 1.5**) e denominato **respirazione**, esclusivo negli eterotrofi e presente anche negli autotrofi e utilizzato allo scopo di ottenere energia per tutte le attività metaboliche. La respirazione è il processo che permette alla materia di passare dallo stato organico a quello inorganico (*mineralizzazione*). Se con la fotosintesi avviene la trasformazione da sostanze inorganiche semplici a sostanze organiche complesse (con consumo di energia e produzione di ossigeno), con la respirazione avviene l'opposto e si viene così a chiudere il ciclo regno organico - regno minerale. La **fig. 1.6** illustra un esempio caratteristico di un ambiente acquatico.

Il **ciclo del carbonio** è molto importante per lo studio degli ambienti naturali; prendiamo come esempio un piccolo lago (o uno stagno). Le acque sono popolate da tanti organismi fra i quali numerosissimi e piccolissimi esseri, la maggior parte dei quali visibili solo al microscopio; sono incapaci di compiere veri e propri spostamenti e rimangono più o meno "sospesi" nel mezzo acquatico circostante. L'insieme di quei piccolissimi esseri costituisce il **plancton**. Una parte di quegli organismi (**fitoplancton**) è costituita da autotrofi; essi si accrescono e si riproducono utilizzando l'acqua del lago e l'anidride carbonica e i sali in essa disciolti, sfruttando l'energia della luce solare che riesce a penetrare per qualche metro di profondità. Il fitoplancton costituisce un vero e proprio "pascolo" a disposizione dello **zooplancton** (plancton animale) che ottiene quindi materia ed energia per mezzo unicamente della respirazione. Il plancton costituisce cibo per altri organismi di maggiori dimensioni come i piccoli pesci. Questi, a loro volta, sono prede di pesci più grandi e così via fino agli uccelli acquatici ed altri predatori, uomo compreso (**fig. 1.6**). Abbiamo appena descritto una **catena alimentare**, dove il primo anello (o livello trofico) comprende gli autotrofi (i produttori come il fitoplancton), il secondo anello comprende gli erbivori (i consumatori primari come lo zooplancton), il terzo i carnivori (i consumatori secondari come i piccoli pesci), e così via.... Un luccio, un martin pescatore, una lontra, l'uomo, per esempio, si trovano agli ultimi livelli trofici.

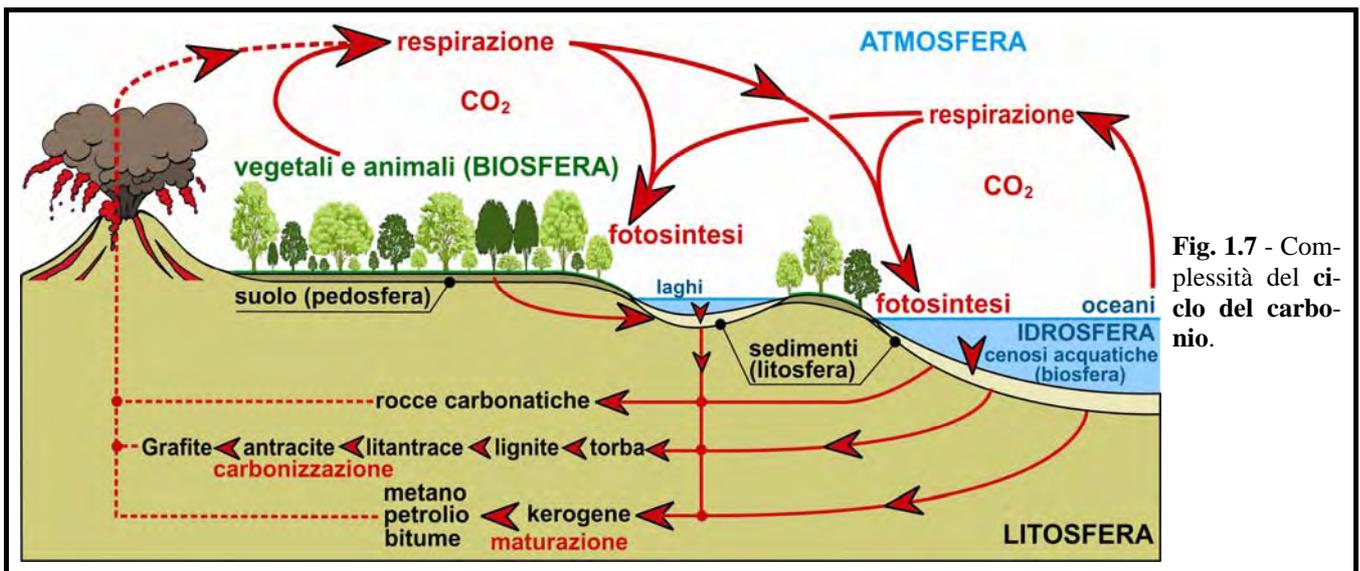
Mentre i produttori trasformano sostanza inorganica in organica (ma consumandone una parte), i consumatori demoliscono quest'ultima esclusivamente consumandola e producendo scorie costituite da composti inorganici



(acqua, anidride carbonica,...) e da residui organici (come gli escrementi) che vengono dispersi nell'ambiente circostante a costituire "cibo" per microrganismi (per lo più batteri e funghi decompositori) che completano la demolizione (con la respirazione) fino a riottenere semplici composti inorganici, cioè nuovamente quei sali minerali a disposizione dei produttori. I processi biologici appena esaminati sono comuni anche ad altri ambienti acquatici come i mari e i fiumi ed analoghi a quelli degli ambienti terrestri (come per esempio un bosco); essi sono materia di studio dell'**ecologia**; tale termine deriva dal greco "oikos", che significa "casa" o "posto per vivere". Letteralmente l'ecologia è lo studio degli organismi "nella loro casa" o meglio la disciplina che studia le interazioni reciproche tra l'ambiente e gli organismi.

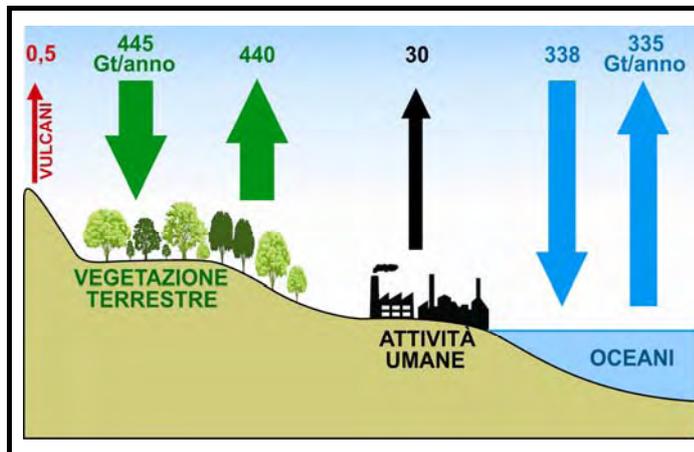
Le considerazioni sopra espresse hanno carattere molto generale. In realtà il ciclo del carbonio è molto più complesso e caratterizzato da diversi sottocicli che coinvolgono gli ambienti terrestri e quelli acquatici, andando ad interessare la litosfera, la biosfera, l'idrosfera e l'atmosfera. Parte del carbonio entra a far parte delle rocce sedimentarie carbonatiche nei sedimenti dei laghi e dei mari oppure va a costituire la materia organica coinvolta nei processi di carbonizzazione e di trasformazione in petrolio e derivati (**fig. 1.7**).

Una parte della massa organica, dopo la morte degli organismi, può precipitare sul fondale oceanico, venire sepolta e qui trasformarsi (in assenza di ossigeno) in combustibili fossili. Questi restano nella litosfera per molto tempo e rappresentano una frazione di carbonio sottratta al ciclo biologico ed immessa nel ciclo geologico. Sono rocce caratterizzate da abbondanza di materia organica, derivata dall'accumulo di resti di organismi viventi in condizioni di scarsa ossigenazione. In queste condizioni, la materia organica non viene ossidata e può essere seppellita con il graduale accumulo dei sedimenti, dando origine ad una massa amorfa definita kerogene. Con l'aumentare della profondità di seppellimento, l'aumento della temperatura (oltre 100 °C) provoca la progressiva "rottura" (cracking) dei legami molecolari del kerogene, che si trasforma in composti più semplici: gli idrocarburi che si originano secondo la successione solidi (bitume), liquidi (petrolio), gassosi (con molecole sempre più semplici, fino al metano).



**Fig. 1.7** - Complessità del ciclo del carbonio.

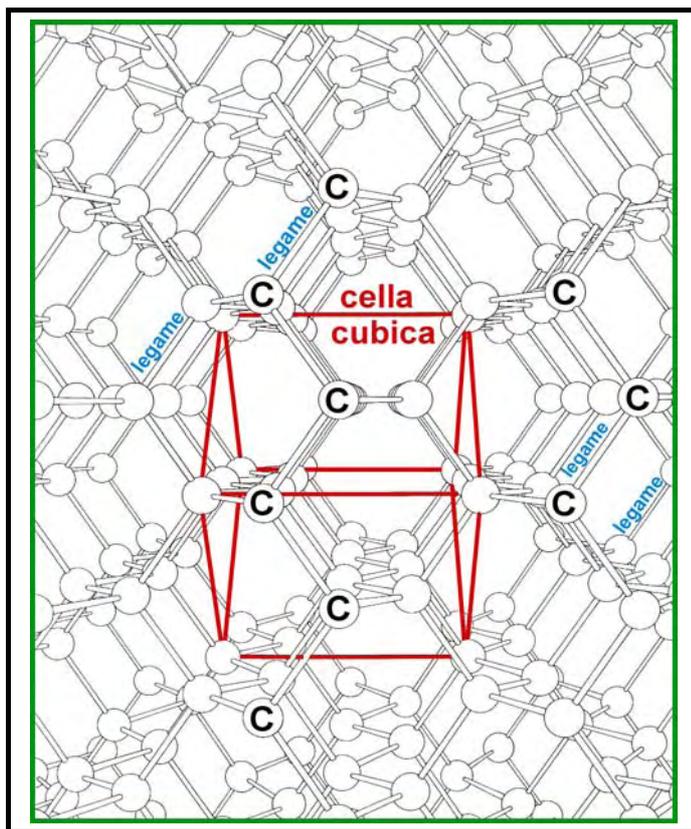
L'atmosfera può essere arricchita di CO<sub>2</sub> con le emissioni vulcaniche e con quelle di origine antropica che, consumando combustibili fossili (petrolio, carbone, gas) rimettono in ciclo del carbonio che era stato, in tempi geologici, inglobato nel sottosuolo, andando così ad alterare il bilancio complessivo del ciclo stesso. Si possono effettuare alcuni calcoli, sebbene in termini generale ed approssimativi. Sommando le emissioni dovute alla respirazione dalle comunità viventi terrestri, acquatiche e vulcaniche (rispettivamente frecce verso l'alto verdi, azzurre e rosse in **fig. 1.8**) si ottiene un valore molto vicino a quello della somma delle quantità di CO<sub>2</sub> immagazzinate come materia organica attraverso la fotosintesi (frecce rivolte verso il basso nella succitata **fig. 1.8**). Ciò dimostra un equilibrio nel ciclo del carbonio. A questo punto occorre considerare anche le emissioni dovute alle attività antropiche (freccia nera rivolta verso l'alto) dovute prevalentemente al consumo dei combustibili fossili. Il 40 % circa delle emissioni umane di CO<sub>2</sub> vengono assorbite prevalentemente da vegetazione ed oceani. Ciò che resta rimane in atmosfera. La conseguenza è che la CO<sub>2</sub> atmosferica è attualmente al livello più alto mai raggiunto negli ultimi 15 ÷ 20 milioni di anni. L'incremento dovuto alle attività umane negli ultimi 120 anni è paragonabile a quelli che, in natura, avvengono nell'arco di migliaia ed anche decine di migliaia di anni. Tale situazione sembra all'origine dei recenti mutamenti climatici ormai riconosciuti da quasi tutta la comunità scientifica.



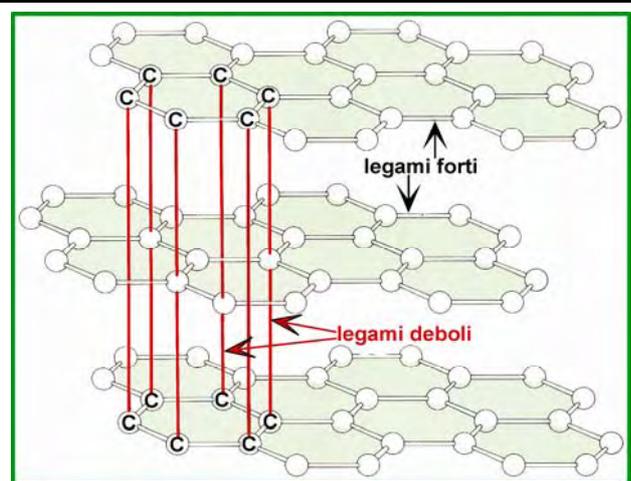
**Fig. 1.8** - Rappresentazione, molto schematica, delle quantità di CO<sub>2</sub> in gioco nel ciclo del carbonio. Valori espressi in gigatonnellate (10<sup>9</sup> tonnellate) per anno [Gt/anno]. Le frecce rivolte verso il basso rappresentano le quantità “fissate” prevalentemente sotto forma di materia organica tramite la fotosintesi, sia dai vegetali terrestri (freccie verdi), sia da quelli acquatici (freccie azzurre). Con le frecce dello stesso colore sono rappresentate le quantità che ritornano all’atmosfera prevalentemente con i processi di respirazione dei viventi. La quantità di CO<sub>2</sub> liberata con le eruzioni vulcaniche è poco rilevante, ma influenza il ciclo del carbonio su scala dei tempi geologici. Attualmente e nel prossimo futuro, molto più importanti sono le emissioni dovute alle attività umane.

## 1.6 - Il carbonio inorganico

A rigore il termine “organico” non definisce più con esattezza un confine della materia, essendo una eredità dei tempi in cui, fino al 1850, si credeva che i composti organici potessero essere sintetizzati esclusivamente dagli organismi. Oggi è invece possibile ottenere numerosi composti del carbonio per via sintetica, in laboratorio, senza l’intervento di organismi. Tuttavia la distinzione tra natura organica ed inorganica appare ancora molto utile e comoda per la classificazione dei fenomeni naturali.



**Fig. 1.9** - Il reticolo cristallino del diamante è costituito unicamente da **atomi di carbonio (C)** distribuiti in una struttura che si ripete all’infinito. Ogni atomo è legato a quelli vicini con forti **legami** uguali in tutte le direzioni. Questa distribuzione spiega la notevole durezza di tale materiale. La **cella cubica** interna al reticolo rappresenta la simmetria base con la quale gli atomi sono disposti nello spazio. Nella figura appaiono quasi 100 atomi; ne occorrerebbero quasi 10<sup>23</sup> per un diamante del peso di un grammo.



**Fig. 1.10** - La **grafite**, come il diamante, è costituita unicamente da **carbonio**, ma la simmetria della disposizione degli atomi (C) nello spazio è diversa. Nella grafite sono legati con forza solo su piani di forma esagonale; all’interno di essi la grafite è più dura del diamante, ma fra essi la distanza è maggiore e le forze più deboli. La grafite infatti si può facilmente sfaldare lungo piani paralleli.

Se il carbonio fosse un elemento esclusivamente legato al vivente non potrebbe esistere in un mondo privo di vita. Invece questo elemento, seppure relativamente raro, era presente sulla Terra in tempi precedenti l’origine della vita, affinché questa potesse averlo disponibile per la sintesi organica. Sembra una sorta di circolo vizioso; tuttavia la presenza di carbonio inorganico (CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> soprattutto), presente del resto nell’atmosfera di alcuni pianeti del Sistema Solare privi di vita, è ammessa in un’atmosfera terrestre primordiale priva di ossigeno. La

prima metà di questo secolo ha visto il fiorire di studi fondamentali sull'origine della vita dalla materia inorganica: hanno fatto storia le teorie di OPARIN e le esperienze di MILLER e (scheda 1.5).

Il **diamante** è un elemento nativo ed è un altro esempio di carbonio inorganico. Tale forma del carbonio allo stato elementare è costituita da atomi fra loro legati a formare un complesso reticolo (in **fig. 1.9**). Il diamante è molto duro (è il principale degli abrasivi), trasparente e incolore ed è molto apprezzato come pietra preziosa. La **grafite** è un altro esempio di carbonio allo stato elementare ma l'origine è diversa; è cioè organogena (di derivazione dei carboni fossili; **fig. 1.7**). La **fig. 1.10** mostra una disposizione di atomi differente rispetto al diamante, da cui deriva la notevole facilità con la quale tale materiale può essere sfaldato "sfogliandosi" lungo piani in direzioni preferenziali. Si tratta di un esempio di **polimorfismo**; il diamante e la grafite sono due sostanze elementari costituite unicamente da carbonio (uguale composizione chimica), ma il primo è inorganico con una simmetria di distribuzione degli atomi nello spazio molto diversa dalla seconda che è invece di origine organica. Ciò conferisce alle due sostanze caratteristiche così diverse che, nella scala di MOHS (la scala di durezza dei materiali), la grafite si trova al primo posto e il diamante all'ultimo.

## 1.7 - Il quarto elemento della biosfera: l'azoto

Anche l'azoto è un elemento che si presenta in stato sia inorganico che organico. Nel primo caso si trova come sostanza elementare nell'atmosfera di cui costituisce oltre i 3/4 in volume (**tab. 1.3** e **fig. 1.3**); oppure si trova combinato con l'idrogeno ( $\text{NH}_4^+$  da cui derivano i **sali di ammonio**) a formare l'ammoniaca o all'idrogeno e all'ossigeno a formare l'acido nitroso ( $\text{HNO}_2$  da cui derivano i **sali nitriti**) e l'acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ , cioè una forma più ossidata, più ricca di ossigeno, da cui derivano i **sali nitrati**). L'azoto, allo stato organico, è un elemento essenziale degli aminoacidi; di questi se ne conoscono una ventina di specie; essi, unendosi fra loro a formare lunghe e complicate catene, danno origine alle **proteine**. Queste sono presenti in tutti gli organismi come costituenti essenziali in tutte le cellule viventi; compongono la parte principale della pelle, dei muscoli, dei tendini, dei nervi e del sangue, formano gli enzimi, gli anticorpi e numerosi ormoni. L'azoto minerale (inorganico) si trova sciolto nell'acqua del terreno e con essa viene assorbito dalle piante per mezzo delle radici per essere trasportato alle parti verdi, dove viene soggetto a trasformazioni chimiche per essere introdotto come costituente nell'intelaiatura di carbonio dei composti organici edificati grazie alla fotosintesi. In questo modo i vegetali si costruiscono gli aminoacidi poi utilizzati per la sintesi proteica.

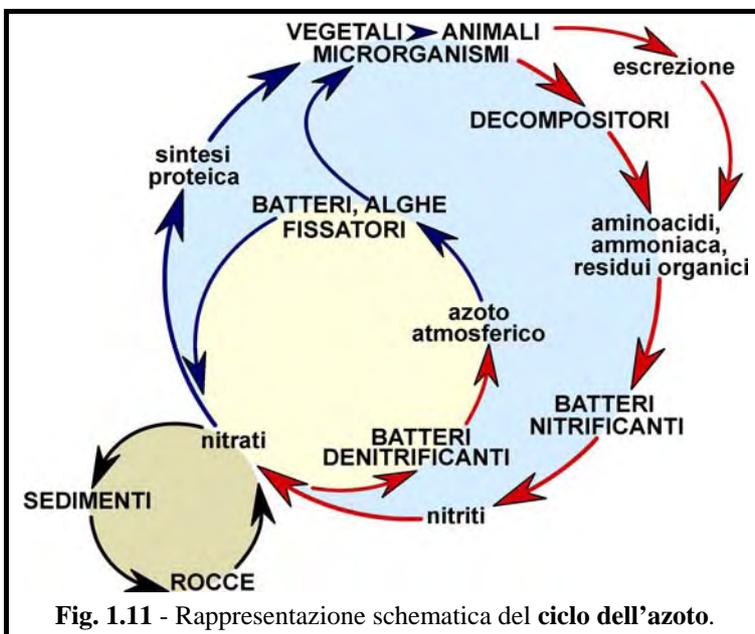


Fig. 1.11 - Rappresentazione schematica del ciclo dell'azoto.

L'azoto, una volta organicato (dallo stato minerale a quello organico; **fig. 1.11**) in tessuti vegetali, va a costituire tessuti animali dei consumatori primari (erbivori) e dei livelli trofici superiori (predatori). Sia come spoglie vegetali (foglie, rami secchi) e animali (carogne), sia come escrementi o altri residui, torna al terreno ancora nello stato organico come azoto proteico. Esso è il nutrimento dei detritivori (vermi, insetti e loro larve, molluschi,...) che viene quindi triturato e sminuzzato in particelle più piccole e più facilmente aggredibili dai detritivori microscopici, soprattutto batteri e funghi, che a loro volta producono, come rifiuti, azoto in forma ammoniacale. Questo è il processo di "ammonificazione" ed è il primo passaggio della mineralizzazione dell'azoto stesso. I sali di ammonio sono già utilizzati dalle piante, oppure vengono ossidati a formare sali contenenti ossigeno da nitrito-batteri e nitrato-batteri rispettivamente

come nitriti e nitrati, a disposizione dei vegetali, chiudendo così il ciclo (**fig. 1.11**).

Le radici delle Leguminose presentano tubercoli contenenti batteri (*Rizobium leguminosarum*) che utilizzano direttamente l'azoto allo stato elementare presente nell'aria tra i pori del terreno. In questo modo le Leguminose sfruttano questa fonte dipendendo in misura minore dall'azoto minerale. Tale associazione tra i due organismi è una *simbiosi*, grazie alla quale ciascuno dei due trae vantaggio dalla convivenza con l'altro; il *Rizobium*, in cambio dei sali minerali, ottiene sostanza organica che la pianta produce con la fotosintesi; quando questa muore le sue spoglie cadono sul terreno e vengono mineralizzate con conseguente incremento di azoto minerale nelle

acque che umidificano il suolo. La fissazione atmosferica dell'azoto è operata anche da altri organismi (tra cui certe alghe azzurre). L'arricchimento di azoto proveniente dall'atmosfera è compensato da un processo inverso (denitrificazione microbica), dovuto ad altri batteri che riescono ad ottenere energia, per i loro processi vitali, direttamente dai nitrati producendo azoto elementare che ritorna, come gas, nell'atmosfera. In questo modo si ha nuovamente chiusura del ciclo, nel rispetto di un bilancio in equilibrio (fig. 1.11).

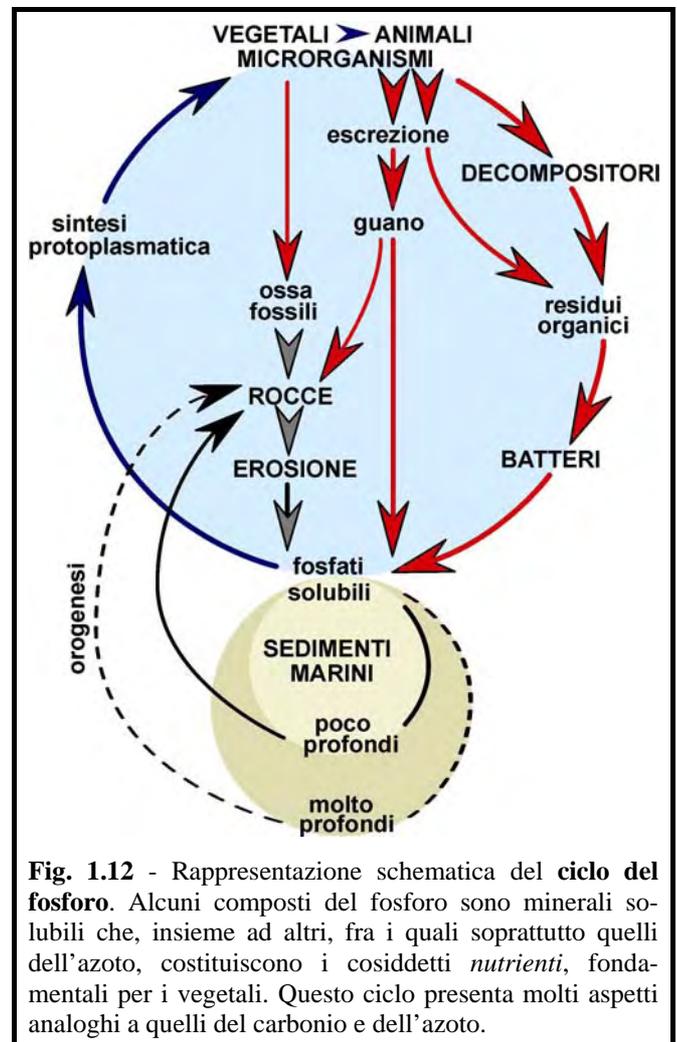
Tale equilibrio può essere alterato a seguito di immissioni di notevoli quantità di azoto minerale nei diversi ambienti da parte dell'uomo. Una causa è la fissazione industriale, ma più importante è l'uso dei concimi usati in agricoltura. Questi sono generalmente miscele di sali di elementi fondamentali della biosfera (azoto, fosforo e potassio), già presenti in natura nelle acque dei terreni o degli ambienti acquatici; essi vengono utilizzati dai vegetali e pertanto vengono anche denominati **nutrienti**. Cospargere i terreni di sali minerali e innaffiare significa fornire ai vegetali coltivati una maggior quantità di materia prima a disposizione del processo di fotosintesi e quindi una maggior crescita delle piante (maggiore produzione agricola). Ma l'utilizzo eccessivo di concimi può alterare l'equilibrio a cui si è prima accennato, con conseguenze negative per l'ambiente; fra queste l'**eutrofizzazione**, che interessa un po' tutti gli ambienti, soprattutto quelli acquatici (scheda 1.6).

## 1.8 - Il fosforo

Il fosforo può essere ritenuto il principale fra gli elementi oligodinamici (scheda 1.2). Negli organismi esso è presente in una quantità circa dieci volte inferiore a quella dell'azoto; esso è il più importante dopo i quattro elementi plastici. Entra nella composizione degli acidi nucleici (presenti nel nucleo delle cellule a costituire la materia fondamentale del patrimonio genetico) e in molte sostanze grasse. Allo stato minerale è più abbondante dell'azoto, principalmente sotto forma di fosfato di calcio (fosforiti) che ha formula  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . Tuttavia, quasi sempre, i sali del fosforo sciolti nelle acque dolci (laghi, fiumi, nel terreno,...) e nei mari, sono in quantità decisamente inferiori rispetto ai sali di azoto (in fig. 1.12 è riportato il ciclo). Molte delle sostanze in natura (costituenti gli organismi o i loro resti) e di quelle di rifiuto prodotte dall'uomo (soprattutto scarichi cloacali e molti di quelli industriali) sono organiche, cioè composte dal carbonio con idrogeno e ossigeno soprattutto, una discreta quantità di azoto, più piccole quantità di altri elementi, fra i quali il fosforo.

Quando sostanze organiche giungono in acqua (o sul suolo di un sottobosco), queste vengono "demolite", sia per processi ossidativi puramente chimici, sia per processi biologici dovuti soprattutto a microrganismi. Il risultato è sempre più o meno lo stesso: la sostanza organica viene demolita con consumo di ossigeno e produzione di composti inorganici molto semplici, quali anidride carbonica e, fra gli altri, sali di azoto e di fosforo. Questi ultimi sono sali nutritivi che vengono successivamente utilizzati dalle piante acquatiche (o dagli alberi) per crescere. Scaricare sostanze organiche in acqua vuol dire, in ultima analisi, concimare le alghe, così come un albero può essere concimato con il letame. Ma un albero può anche essere concimato direttamente con sali di azoto e di fosforo così come fiumi, laghi e mari possono essere "concimati" direttamente dai sali nutritivi provenienti dal dilavamento, da parte delle piogge, dei terreni agrari molto concimati.

Se si escludono le sostanze inquinanti in quanto tossiche, perché veleni poco degradabili che uccidono gli organismi, quasi tutte quelle prodotte come rifiuti dall'uomo possono essere considerate concimi sia direttamente



(come i sali di azoto e di fosforo), sia indirettamente (le sostanze organiche destinate, col tempo, a trasformarsi nei sali nutritivi).

L'eccessiva produzione di sostanze organiche e di sali nutritivi (o **nutrienti**) determina, negli ambienti acquatici, una forte produzione algale al primo anello della catena alimentare e quindi un rapido incremento della produttività che apparentemente sembra produrre effetti benefici, quali l'aumento della produttività ittica, ma successivamente manifestazioni deleterie. Queste si manifestano come crisi anossiche sui fondali a causa del forte consumo di ossigeno ad opera dei decompositori che vivono alle spese dei detriti derivati dalla massiccia produzione algale. Si tratta del succitato processo di **eutrofizzazione**, consistente in una condizione di eccessivo incremento di ricchezza di sostanze nutritive in un ambiente (**scheda 1.6**). Altre conseguenze di questo fenomeno sono la diminuzione della trasparenza delle acque, lo sviluppo anormale di certe specie che talvolta possono risultare anche tossiche, ecc...

Molti dei concimi in commercio sono bilanciati, contengono cioè quantità dei vari elementi in dovute proporzioni. Concettualmente la crescita di una pianta o di un'alga è limitata dalla carenza di un qualunque elemento essenziale, indipendentemente dalla quantità totale dei sali nutritivi. Questa è la *legge del minimo* di LIEBIG (1940): *la velocità di crescita di un organismo vegetale o delle popolazioni di organismi vegetali presenti in un determinato ambiente, dipende da quell'elemento che è presente nella minima quantità in rapporto alla richiesta e alla disponibilità*; esso viene indicato come **elemento limitante**. Fra i principali sali nutritivi presenti negli ambienti acquatici (ed anche in quelli terrestri), quasi sempre l'elemento limitante è il fosforo. Esso viene quindi normalmente ritenuto rappresentativo della totalità delle sostanze nutritive presenti in un ambiente. Quindi, per esempio, si può rappresentare il carico complessivo di sostanze nutritive (organiche e minerali) che giunge ad un lago con l'equivalente carico di fosforo; oppure sullo stesso lago si può determinare il livello di eutrofizzazione in base del valore medio di concentrazione di fosforo (quantità per unità di volume). Questo spiega l'insieme dei tentativi per produrre detersivi con minori quantità di fosfati.

Il lago Maggiore è alimentato dalle acque raccolte da un territorio di ~ 6.600 km<sup>2</sup>, dove quasi 700.000 abitanti vivono, lavorano e producono rifiuti corrispondenti a ~ 900 tonnellate di composti del fosforo in un anno, di cui almeno la metà giunge al lago; in esso giungono anche circa 65 tonnellate di composti del fosforo dovuto alla cessione naturale dei terreni. Il carico complessivo è quindi stimabile in ~ 500 tonnellate all'anno che determinerebbe una concentrazione media di fosforo totale di 25 mg/m<sup>3</sup> nelle acque del lago, il cui volume è quasi 38 km<sup>3</sup>. Con calcoli analoghi è stato stimato, per il mare Adriatico, un carico, dal bacino padano e dalle regioni che vi si affacciano (ex Jugoslavia compresa), pari a un valore compreso fra 50.000 e 100.000 tonnellate all'anno di fosforo. Per riportare le attuali condizioni di ipertrofia dell'Adriatico a quelle di un mare con qualità delle acque accettabile, il carico di fosforo (quasi tutto dovuto alle attività umane) andrebbe ridotto del 90 %.

## **SCHEDA 1.1 - Un po' di chimica: atomi ed elementi**

Tutte le sostanze che costituiscono l'Universo definiscono la materia; tutto quanto ci circonda, e noi stessi, è materia; essa è costituita da **atomi**, particelle di massa e volume estremamente piccoli; esistono poco più di cento specie diverse di atomi, formati a loro volta da particelle elementari molto più piccole. Ogni atomo è costituito da un **nucleo** centrale (un aggregato di **protoni** e **neutroni**) intorno al quale si trovano gli **elettroni**, in numero uguale a quello dei protoni.

Il protone è una particella con massa pari a  $1,67 \cdot 10^{-24}$  g (meno di due milionesimi di milionesimo di milionesimo di grammo) e con una piccola carica elettrica positiva ( $e^+$ ). Il neutrone è una particella con massa quasi identica a quella del protone, ma elettricamente neutro (privo di carica). L'elettrone ha una massa ancora più ridotta (quasi 2.000 volte più piccola delle precedenti) e con carica elettrica uguale a quella del protone, ma di segno negativo ( $e^-$ ). Le differenze fra gli atomi sono date dal diverso numero di particelle che li compongono.

L'**ossigeno** (simbolo **O**) è una sostanza costituita da atomi che hanno un nucleo con 8 protoni e 8 neutroni, circondato da una "nuvola" di 8 elettroni. La carica complessiva è quindi:  $8e^+ + 8e^- = 0$  (complessivamente neutro perché le otto cariche positive bilanciano esattamente le otto cariche negative). Se si vuole avere una idea delle dimensioni degli atomi di ossigeno si deve pensare che ne occorrerebbero circa 100.000.000 per formare una fila lunga un centimetro; ne occorrerebbero quasi  $4 \cdot 10^{22}$  (decine di migliaia di miliardi di miliardi) per formare una massa di appena 1 g. Se si potesse ingrandire un atomo di ossigeno fino a far diventare il nucleo grande come una pallone da calcio, gli elettroni (delle dimensioni di nocchie) viaggerebbero intorno passando da pochi metri fino a centinaia di metri di distanza; ciò perché l'atomo non è un "edificio" compatto, ma è costituito da molto spazio vuoto.

Non tutti gli atomi di ossigeno sono composti nel modo descritto. Su 100.000 atomi, 99.759 hanno nucleo formato da 8 protoni e 8 neutroni, in tutto con 16 particelle nucleari (**O<sup>16</sup>**); 37 hanno nucleo formato da 8 protoni e 9 neutroni (**O<sup>17</sup>**) e 204 da 8 protoni e 10 neutroni (**O<sup>18</sup>**). Questi atomi di ossigeno hanno tutti le stesse proprietà chimiche, ma una massa leggermente diversa; essi sono gli **isotopi** dell'ossigeno (uguale numero di protoni ma uno o due neutroni di differenza).

**Tab. 1.6** - Elenco degli elementi conosciuti, con indicazione dello stato fisico alla temperatura di 25 °C ed alla pressione di 1 atm (**S** = solido; **L** = liquido; **G** = gas) e del simbolo. **Z** = numero atomico. **M** = massa atomica relativa. **Tf** = temperatura di fusione [°C]. **Te** = temperatura di ebollizione [°C]. **EI** = energia di prima ionizzazione [kJ/mole]. **EN** = elettronegatività secondo PAULING. **D** = densità [g/mL]. **NO** = numero di ossidazione. **CE** = configurazione elettronica.

Elemento		Z	M	Tf	Te	EI	EN	D	NO	CE
Afnio (S)	Hf	72	178,49	2.233	4.602	642	1,30	13,3	+4	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>
Alluminio (S)	Al	13	26,9815	660	2.519	578	1,61	2,70	+3	(Ne) 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>
Americio (S)	Am	95	243	1.176	2.011	579	1,30	13,7	+3 +4 +5 +6	(Rn) 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>
Antimonio (S)	Sb	51	121,75	631	1.587	834	2,05	6,68	±3 +5	(Kr) 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup>
Argento (S)	Ag	47	107,868	963	2.162	731	1,93	10,5	+1	(Kr) 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>
Argon (G)	Ar	18	39,948	- 189	- 186	1.521	-	1,78·10 <sup>-3</sup>	-	(Ne) 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>
Arsenico (S)	As	33	74,9216	817	-	947	2,18	5,73	±3 +5	(Ar) 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>
Astato (S)	At	85	210	302	337	930	2,20	-	±1 +3 +5 +7	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup>
Attinio (S)	Ac	89	227	1.051	3.159	499	1,10	10,10	+3	(Rn) 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
Azoto (G)	N	7	14,0067	- 210	- 196	1.402	3,04	1,25·10 <sup>-3</sup>	+2 ±3 +4 +5	(He) 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>
Bario (S)	Ba	56	137,34	727	1.897	503	0,89	3,59	+2	(Xe) 6s <sup>2</sup>
Berillio (S)	Be	4	9,0122	1.288	2.471	899	1,57	1,85	+2	(He) 2s <sup>2</sup>
Berkelio (S)	Bk	97	249	1.050	-	601	1,30	14,8	+3 +4	(Rn) 5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>
Bismuto (S)	Bi	83	208,980	271	1.560	703	2,02	9,8	+3 +5	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>
Boro (S)	B	5	10,811	2.300	3.650	801	2,04	2,47	+3	(He) 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>
Bohrio (S)	Bh	107	260	-	-	660	-	-	-	(Rn) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>5</sup> 7s <sup>2</sup>
Bromo (L)	Br	35	79,904	-7	59	1.140	2,96	3,12	±1 +3 +5	(Ar) 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>
Cadmio (S)	Cd	48	112,40	321	765	868	1,69	8,65	+2	(Kr) 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>
Calcio (S)	Ca	20	40,08	842	1.484	590	1,00	1,55	+2	(Ar) 4s <sup>2</sup>
Californio (S)	Cf	98	251	1.060	-	608	1,30	-	+3	(Rn) 5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>
Carbonio (S)	C	6	12,0112	3.550	-	1.086	2,55	2,26	+2 ±4	(He) 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>
Cerio (S)	Ce	58	140,12	798	3.424	528	1,12	6,77	+3 +4	(Xe) 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>
Cesio (S)	Cs	55	132,905	28	669	376	0,79	1,87	+1	(Xe) 6s <sup>1</sup>
Cloro (G)	Cl	17	35,453	- 101	- 35	1.251	3,16	3,21	+1 +3 +5 +7	(Ne) 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>
Cobalto (S)	Co	27	58,9332	1.495	2.927	758	1,88	8,80	+2 +1	(Ar) 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>
Cromo (S)	Cr	24	51,996	1.907	2.672	653	1,66	2,19	+2 +3 +6	(Ar) 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>
Curio (S)	Cm	96	247	1.345	-	581	1,30	13,5	+3	(Rn) 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
Darmastadio(S)	Ds	110	271	-	-	-	-	-	-	-
Disprozio (S)	Dy	66	162,50	1.409	2.567	572	1,22	8,53	+3	(Xe) 4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>
Dubnio (S)	Db	105	262	-	-	640	-	-	-	(Rn) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup>
Einsteinio (S)	Es	99	254	860	-	619	1,30	15,1	+3	(Rn) 5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup>
Elio (G)	He	2	4,0026	- 272	- 269	2.372	-	1,8·10 <sup>-4</sup>	-	1s <sup>2</sup>
Erbio (S)	Er	68	167,26	1.522	2.868	589	1,24	9,05	+3	(Xe) 4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup>
Europio (S)	Eu	63	151,96	822	1.597	547	-	5,24	+2 +3	(Xe) 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>
Fermio (S)	Fm	100	253	1.527	-	627	1,30	-	+3	(Rn) 5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup>
Ferro (S)	Fe	26	55,847	1.535	2.861	759	1,83	7,86	+2 +3	(Ar) 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>
Fluoro (G)	F	9	18,9984	- 220	- 188	1.681	3,98	1,70·10 <sup>-3</sup>	-1	(He) 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>
Fosforo (S)	P	15	30,9738	44	280	1.012	2,19	1,82	±3 +5	(Ne) 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>
Francio (S)	Fr	87	223	27	677	380	0,70	1,00	+1	(Rn) 7s <sup>1</sup>
Gadolinio (S)	Gd	64	157,25	1.311	3.273	592	1,20	7,89	+3	(Xe) 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>
Gallio (S)	Ga	31	69,72	30	2.204	579	1,81	5,91	+3	(Ar) 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>
Germanio (S)	Ge	32	72,59	937	2.830	762	2,01	5,32	+2 +4	(Ar) 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>
Hassio (S)	Hs	108	265	-	-	750	-	-	-	(Rn) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>
Idrogeno (G)	H	1	1,00797	- 259	- 253	1.312	2,20	1,00·10 <sup>-5</sup>	±1	1s <sup>1</sup>
Indio (S)	In	49	114,82	157	2.072	558	1,78	7,31	+3	(Kr) 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>
Iodio (S)	I	53	126,904	114	184	1.008	2,66	4,93	±1 +5 +7	(Kr) 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>
Iridio (S)	Ir	77	192,2	2.446	4.550	878	2,20	22,5	+3 +4	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>
Itterbio (S)	Yb	70	173,04	824	1.427	603	1,10	6,98	+2 +3	(Xe) 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>
Ittrio (S)	Y	39	88,905	1.523	3.345	616	1,22	4,47	+5	(Kr) 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>
Kriptone (G)	Kr	36	83,80	-157	-152	1.351	3,00	3,75·10 <sup>-5</sup>	-	(Ar) 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>
Lantanio (S)	La	57	138,91	920	1.454	538	1,10	6,17	+3	(Xe) 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>
Laurenzio (S)	Lw	103	257	-	-	-	1,30	-	+3	(Rn) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
Litio (S)	Li	3	6,939	181	1.342	513	0,98	0,55	+1	(He) 2s <sup>1</sup>
Lutezio (S)	Lu	71	174,97	1.656	3.315	524	1,27	9,84	+3	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>
Magnesio (S)	Mg	12	24,312	650	1.090	738	1,31	1,74	+2	(Ne) 3s <sup>2</sup>

Continua tab. 1.6

Segue tab. 1.6

Elemento		Z	M	Tf	Te	EI	EN	D	NO	CE
Manganese (S)	Mn	25	54,9380	1.244	2.061	717	1,55	7,43	+2 +3 +4 +6 +7	(Ar) 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>
Meitnerio (S)	Mt	109	268	-	-	840	-	-	-	(Rn) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>
Mendelevio (S)	Md	101	200,59	827	-	637	1,30	-	+2 +3	(Rn) 5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup>
Mercurio (S)	Hg	80	256	- 39	357	1.007	1,90	13,6	+1 +2	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>
Molibdeno (S)	Mo	42	95,94	2.617	4.639	685	2,16	10,20	+1 +2 +3 +4 +5 +6	(Kr) 4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup>
Neodimio (S)	Nd	60	144,24	1.010	3.074	530	1,14	7,00	+3	(Xe) 4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>
Neon (G)	Ne	10	20,183	- 249	- 246	2.081	-	9,0·10 <sup>-4</sup>	-	(He) 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>
Nettunio (S)	Np	93	237	640	3.902	597	1,36	20,4	+3 +4 +5 +6	(Rn) 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
Nichel (S)	Ni	28	58,71	1.455	2.913	737	1,91	8,90	+2 +3	(Ar) 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>
Niobio (S)	Nb	41	92,906	2.468	4.742	664	1,60	8,57	+3 +5	(Kr) 4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup>
Nobelio (S)	No	102	254	-	-	642	1,30	-	+2 +3	(Rn) 5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup>
Olmio (S)	Ho	67	164,930	1.470	2.720	581	1,23	8,80	+3	(Xe) 4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>
Oro (S)	Au	79	196,967	1.064	2.856	890	2,54	19,3	+1 +3	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>
Osmio (S)	Os	76	190,2	3.033	5.027	839	2,20	22,6	+2 +3 +4 +6 +8	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>
Ossigeno (G)	O	8	15,9994	- 219	- 183	1.314	3,44	1,43·10 <sup>-3</sup>	- 2	(He) 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>
Palladio (S)	Pd	46	106,4	1.553	2.963	805	2,20	12,0	+2 +4	(Kr) 4d <sup>10</sup>
Piombo (S)	Pb	82	207,19	328	1.740	716	2,33	11,4	+2 +4	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>
Platino (S)	Pt	78	195,09	1.768	3.827	868	2,28	21,4	+2 +4	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup>
Plutonio (S)	Pu	94	242	641	3.228	585	1,28	19,7	+3 +4 +5 +6	(Rn) 5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>
Polonio (S)	Po	84	210	254	962	812	2,00	9,2	+2 +4 +6	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>
Potassio (S)	K	19	39,102	63	760	419	0,82	0,86	+1	(Ar) 4s <sup>1</sup>
Praseodimio(S)	Pr	59	140,907	931	3.520	523	1,13	6,77	+3	(Xe) 4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>
Promezio (S)	Pm	61	145	1.080	2.457	523	-	7,22	+3	(Xe) 4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>
Protoattinio (S)	Pa	91	231	1.572	3.756	568	1,50	15,4	+4 +5	(Rn) 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
Radio (S)	Ra	88	226	700	1.140	509	0,90	5,00	+2	(Rn) 7s <sup>2</sup>
Radon (G)	Rn	86	22	- 71	- 62	1.037	-	9,72·10 <sup>-3</sup>	-	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>
Rame (S)	Cu	29	63,546	1.084	2.567	745	1,90	8,96	+1 +2	(Ar) 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>
Renio (S)	Re	75	186,2	3.186	5.627	760	1,90	21,0	+4 +6 +7	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>
Rodio (S)	Rh	45	102,905	1.966	3.695	720	2,28	12,4	+3	(Kr) 4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup>
Roentgenio (S)	Rg	111	272	-	-	-	-	-	-	-
Rubidio (S)	Rb	37	85,47	39	686	403	0,82	1,53	+1	(Kr) 5s <sup>1</sup>
Rutenio (S)	Ru	44	101,07	2.334	4.150	711	2,20	12,5	+2 +3 +4 +5 +6 +7	(Kr) 4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup>
Rutherfordio(S)	Rf	104	261	2.673	6.073	409	-	-	+4	(Rn) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>
Samario (S)	Sm	62	150,35	1.072	1.778	543	1,17	7,54	+2 +3	(Xe) 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>
Scandio (S)	Sc	21	44,956	1.541	2.836	631	1,36	2,99	+3	(Ar) 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>
Seaborgio (S)	Sg	106	263	-	-	730	-	-	-	(Rn) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup>
Selenio (S)	Se	34	78,96	221	685	941	2,55	4,81	- 2 +4 +6	(Ar) 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>
Silicio (S)	Si	14	28,086	1.414	3.280	786	1,90	2,33	+2 ±4	(Ne) 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>
Sodio (S)	Na	11	22,9898	98	883	496	0,93	0,97	+1	(Ne) 3s <sup>1</sup>
Stagno (S)	Sn	50	118,69	232	2.602	709	1,96	729	+2 +4	(Kr) 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>
Stronzio (S)	Sr	38	87,62	777	1.384	549	0,95	2,60	+2	(Kr) 5s <sup>2</sup>
Tallio (S)	Tl	81	204,37	304	1.473	589	2,04	11,8	+1 +3	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup>
Tantalio (S)	Ta	73	180,948	3.017	5.425	761	1,50	16,7	+5	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>
Tecnezio (S)	Tc	43	99	2.157	4.265	702	1,90	11,50	+4 +5 +6 +7	(Kr) 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>
Tellurio (S)	Te	52	127,60	450	988	869	2,10	6,24	- 2 +4 +6	(Kr) 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup>
Terbio (S)	Tb	65	158,924	1.356	3.230	564	1,20	8,27	+3	(Xe) 4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>
Titanio (S)	Ti	22	47,90	1.668	3.287	658	1,54	4,55	+2 +3 +4	(Ar) 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>
Torio (S)	Th	90	232,038	1.750	4.788	587	1,30	11,7	+4	(Rn) 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>
Tullio (S)	Tm	69	168,934	1.545	1.950	596	1,25	9,33	+2 +3	(Xe) 4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup>
Tungsteno (S)	W	74	183,85	3.422	5.655	770	2,36	19,3	+2 +3 +4 +5 +6	(Xe) 4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>
Uranio (S)	U	92	238,03	1.135	4.131	584	1,38	19,0	+3 +4 +5 +6	(Rn) 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
Vanadio (S)	V	23	50,942	1.910	3.407	651	1,63	6,11	+2 +3 +4 +5	(Ar) 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>
Xenon (G)	Xe	54	131,30	- 112	- 107	1.170	2,60	5,90·10 <sup>-3</sup>	-	(Kr) 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>
Zinco (S)	Zn	30	65,37	420	907	906	1,65	2,14	+2	(Ar) 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>
Zirconio (S)	Zr	40	91,22	1.852	4.409	660	1,33	6,49	+4	(Kr) 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>
Zolfo (S)	S	16	32,064	115	445	1.000	2,58	2,09	- 2 +4 +6	(Ne) 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>

Il **carbonio** (simbolo **C**) è una sostanza costituita da un nucleo di 6 protoni e 6 neutroni (quindi 12 particelle nucleari) circondato da 6 elettroni. L'atomo di carbonio è quindi leggermente più piccolo di quello di ossigeno. Gli isotopi del carbonio sono **C<sup>12</sup>** (molto abbondante) e i rarissimi **C<sup>13</sup>** (6 protoni + 7 neutroni) e **C<sup>14</sup>** (6 protoni + 8 neutroni). Il **silicio** (simbolo **Si**) è

costituito da atomi più pesanti con nucleo di 14 protoni + 14 neutroni (28 particelle nucleari e quindi una massa più che doppia rispetto al carbonio). Il **ferro (Fe)** è ancora più pesante, con 26 protoni nel nucleo (ed un numero leggermente superiore di neutroni), ma fra i più pesanti in assoluto troviamo delle sostanze con nuclei costituiti anche da un centinaio di protoni. L'atomo più leggero è quello dell'**idrogeno (H)**. Il suo isotopo più diffuso (*protio*) ha un nucleo formato da un solo protone ( $H^1$ ) intorno al quale orbita un elettrone; esso è 5.000 più abbondante dell'isotopo *deuterio* con un protone e un neutrone ( $H^2$ ); un terzo isotopo ( $H^3$ : 1 protone + 2 neutroni) è ancora più raro.

Abbiamo descritto alcuni esempi di atomi; per tutti gli altri si rimanda alla **tab. 1.6** dove è riportato l'elenco alfabetico, delle specie atomiche conosciute. Per distinguere queste ultime si fa riferimento ad alcune definizioni della chimica:

- **numero atomico** (simbolo **Z**); numero di protoni presenti nel nucleo;
- **numero di massa** (simbolo **A**); numero di protoni e neutroni nel nucleo; in molti casi A è doppio di Z come per esempio negli isotopi  $O^{16}$  e  $C^{12}$ ; in altri casi A è più del doppio di Z come per esempio negli isotopi  $O^{17}$  e  $C^{14}$  o in nuclei di atomi molto pesanti dove i neutroni sono in numero superiore ai protoni; in ogni caso la differenza  $A - Z$  è il numero di neutroni;
- **massa atomica relativa** (simbolo **M**); numero che esprime quante volte la massa di un determinato atomo è più grande di quella dell'isotopo dell'idrogeno protio, assunto come unità (essendo costituito da un nucleo di un solo protone); per esempio l'atomo dell'alluminio ha massa pari a quasi 27 volte quella del protio, il mercurio oltre 200 volte.

Nella tabella si osserva che la massa atomica dell'idrogeno anziché essere 1 (perché dovrebbe pesare una volta se stesso), risulta diverso anche se molto prossimo (1,00797); ciò è dovuto alla presenza degli isotopi deuterio e trizio, con massa atomica circa doppia e tripla di quella del protio, che influenzano il valore medio dell'idrogeno. La massa atomica permette anche di calcolare quella di un qualunque atomo semplicemente conoscendo la massa del protio, assunta come riferimento; questa è praticamente quella del protone e vale  $\sim 1,67 \cdot 10^{-24}$  g; quindi moltiplicando questo valore per M per un determinato tipo di atomo, si ottiene la sua massa. Quando una porzione omogenea di materia è costituita da atomi tutti dello stesso tipo, essa costituisce una *sostanza allo stato elementare*, cioè un **elemento** (una goccia di mercurio, un pezzo di ferro puro, il diamante costituito esclusivamente da carbonio, il contenuto di una bombola di ossigeno,...).

### SCHEDA 1.2 - Classificazione degli elementi dei viventi

Oltre agli elementi plastici occorre ricordare gli **elementi secondari indispensabili** (anche detti **oligodinamici**) che partecipano, come i precedenti, alla formazione delle strutture viventi, ma in quantità molto più limitata ( $\sim 2,5$  % in peso; **tab. 1.7**). Lo zolfo presente in molte proteine e il fosforo nel nucleo delle cellule; il magnesio è un costituente fondamentale della clorofilla; calcio, sodio potassio e cloro rappresentano la componente minerale negli organismi. Sempre presenti, ma in piccole tracce (meno dello 0,5 % in peso) in tutti gli organismi e necessari per molte funzioni vitali, sono gli **elementi rari indispensabili** (**tab. 1.8**). Il ferro è contenuto nell'emoglobina del sangue per il trasporto dell'ossigeno (come il rame nei Molluschi); lo iodio è presente in un ormone prodotto dalla ghiandola tiroidea; il rame e lo zinco sono regolatori di funzioni vitali forse in tutti i viventi. Bisogna ricordare infine gli **elementi rari speciali** (vanadio, boro silicio, bario, stronzio, manganese e cobalto), che non sono presenti in tutti gli organismi, ma che sono fondamentali in qualche caso (come per esempio il silicio nei "gusci" delle alghe diatomee) e gli **elementi accidentali**, che si riscontrano nella materia vivente solo accidentalmente (piombo, titanio,...), forse non necessari.

elemento	simbolo	numero atomico (Z)	massa atomica relativa (M)	elemento	simbolo	numero atomico (Z)	massa atomica relativa (M)
fosforo	<b>P</b>	15	30,97	ferro	<b>Fe</b>	26	55,85
zolfo	<b>S</b>	16	32,06	rame	<b>Cu</b>	29	63,55
sodio	<b>Na</b>	11	22,99	zinco	<b>Zn</b>	30	65,37
potassio	<b>K</b>	19	39,10	iodio	<b>I</b>	53	129,90
calcio	<b>Ca</b>	20	40,08	fluoro	<b>F</b>	9	18,99
cloro	<b>Cl</b>	17	35,45	bromo	<b>Br</b>	35	79,90
magnesio	<b>Mg</b>	12	34,31	<b>Tab. 1.8 - Elementi rari indispensabili.</b>			
<b>Tab. 1.7 - Elementi secondari indispensabili.</b>							

### SCHEDA 1.3 - Un po' di termodinamica: il gas aria

La **pressione** è una **forza per unità di superficie** [ $N/cm^2$ ]. Nei **fluidi (liquidi e gas)** la pressione in un dato punto è la stessa in tutte le direzioni. Ad una certa profondità la pressione esercitata su un sommozzatore, indipendentemente dalla direzione (verso il basso o l'alto, lateralmente), è sempre la stessa (legge di PASCAL, 1650). Essa aumenta con la profondità in conseguenza dell'incremento di peso dell'acqua (una atmosfera ogni 10 metri). Si può immaginare che il sommozzatore sopporta il peso della colonna d'acqua che lo sovrasta (**figg. 1.13 e 1.14**).

La Terra è circondata da uno strato di aria alto 800 km (anche se la maggior parte è concentrata nei primi dieci). La superficie terrestre è paragonabile al fondo di un fluido (l'atmosfera) che esercita una pressione; essa si rende evidente con lo schiacciamento di un barattolo di latta ermeticamente chiuso mentre viene gradualmente svuotato. Una migliore indicazione della pressione atmosferica si ottiene riempiendo un lungo tubo di vetro con mercurio e rovesciando in una bacinella anch'essa contenente mercurio (fig. 1.15); una parte del liquido esce dal tubo e si forma un dislivello fra le superfici del mercurio nella bacinella e nel tubo. Sulla superficie del mercurio nella bacinella, l'aria esercita una pressione capace di equilibrare il peso del liquido nel tubo, il cui piccolo spazio sovrastante è vuoto. La pressione dell'aria si misura con un dispositivo simile a quello raffigurato in fig. 1.15 (barometro a mercurio) e vale il peso della colonna di mercurio diviso per la superficie della sezione del tubo. Un altro barometro (fig. 1.16) si basa sullo schiacciamento di un piccolo contenitore vuoto che si deforma (si schiaccia come la latta) in funzione della pressio-

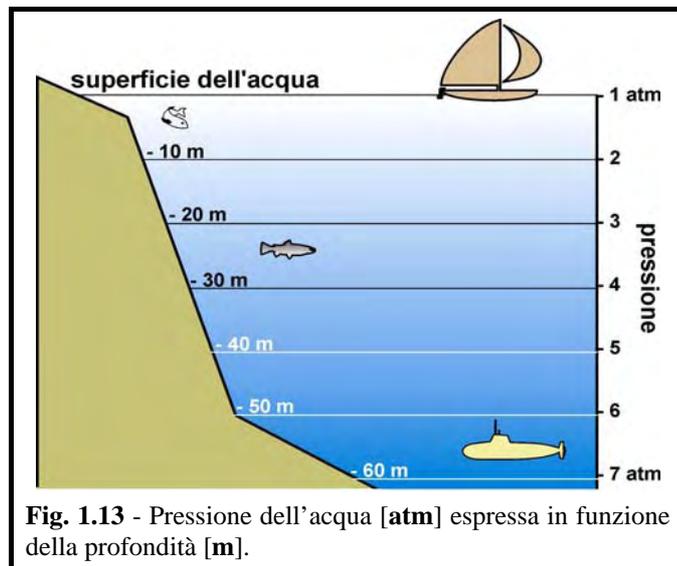


Fig. 1.13 - Pressione dell'acqua [atm] espressa in funzione della profondità [m].

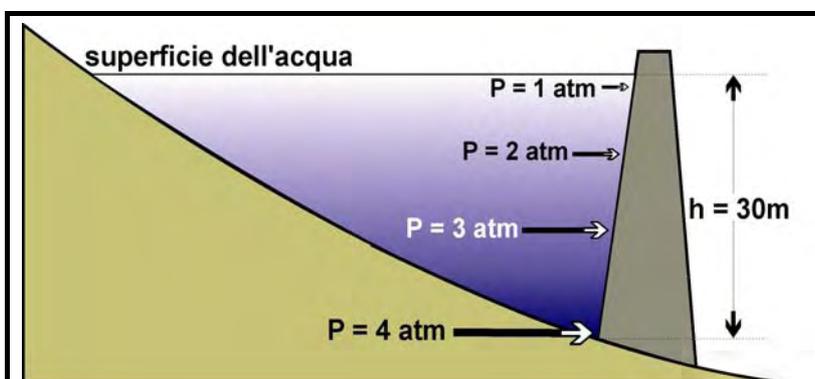


Fig. 1.14 - Alla base di una diga alta 30 m la pressione esercitata dall'acqua accumulata nel bacino artificiale è di circa 4 atm, cioè oltre 40 N/cm<sup>2</sup>, una forza pari al peso di 40 m<sup>3</sup> di acqua per metro quadrato. Questo ragionamento vale per altitudini prossime a quella del mare; infatti occorre tenere conto che salendo di quota diminuisce la pressione dell'aria (in ragione di 0,01 atm ogni 100 m di quota in più; fig. 1.2).

ne atmosferica; la deformazione è trasmessa ad un ago che segna le variazioni.

La pressione atmosferica varia con il tempo meteorologico (diminuisce con il brutto tempo e viceversa) e con l'altitudine (salendo di quota diminuisce il peso dell'aria sovrastante). Si definisce **atmosfera standard [atm]** la pressione che equilibra una colonna di mercurio alta 760 mm, a 0 °C (la temperatura modifica le condizioni fisiche del gas) e al livello del mare (la forza di gravità, che pure varia con l'altitudine, può cambiare il peso dell'aria sovrastante), corrispondente ad un valore di **10,14 N/cm<sup>2</sup>** (il peso di poco più di un litro d'acqua su una superficie di 1 cm<sup>2</sup>). La pressione si può quindi misurare in atmosfere o in millimetri di mercurio (**mm Hg** o **Torr**, in onore di E. TORRICELLI inventore, nel 1644, del barometro). Altra unità di misura è il **millibar (mb)**; 1 atm standard corrisponde a circa 1.013 mb.

Dal punto di vista dimensionale, la pressione **P** è una **forza per unità di superficie [N/m<sup>2</sup>]**. Il Newton [N] è l'unità di misura fondamentale della forza; essa è quella che, applicata ad un corpo di massa  $m = 1$  kg, produce una accelerazione  $a = 1$  m/s<sup>2</sup>. La stessa massa precipita, sulla superficie della Terra, con una accelerazione  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>; quindi il suo peso è  $P = 9,81$  N (quello di un litro d'acqua, cioè di 1 dm<sup>3</sup>). L'azione di una forza (F) pari ad 1 N su una superficie (S) di 1 m<sup>2</sup> è l'unità di misura fondamentale della pressione, detta **Pascal [Pa]**. È una unità piuttosto piccola; più frequentemente si utilizza un suo multiplo cento volte più grande [**hPa**]. Il seguente schema di equivalenze riassume le principali unità di misura:

$$P_{\text{standard}} = 10,13 \text{ N/cm}^2 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar} (1.013 \text{ mbar}) = 101.300 \text{ Pa} (1.013 \text{ hPa}) = 760 \text{ mm (Hg)}$$

La pressione dell'aria può variare fino ad un 5 ÷ 10 % in più o in meno a seconda del tempo meteorologico ed in maggior misura con l'altitudine (fig. 1.2). Per esempio da 1.013 hPa presso il livello marino può scendere a valori intorno a 900 hPa a 1.000 m di quota; a 3.000 m di altitudine la pressione atmosferica scende a circa 700 hPa; salendo ancora di quota l'aria si fa sempre più rarefatta e fredda e la pressione scende a valori intorno alla metà (500 ÷ 550 hPa) a 5.000 m (tanto che anche la respirazione diventa difficoltosa).

La misura della pressione dell'aria richiede l'uso di un barometro, strumento che può essere collocato in qualunque luogo, all'aperto o al chiuso di una stanza. Infatti non esiste differenza tra la pressione esterna e quella all'interno degli edifici. Lo strumento più semplice ed economico è il barometro aneroidale (fig. 1.16). È economico e facile da usare, ma deve essere opportunamente tarato ed è poco preciso. Più precisi sono i barometri a mercurio, ma piuttosto costosi e di lettura più

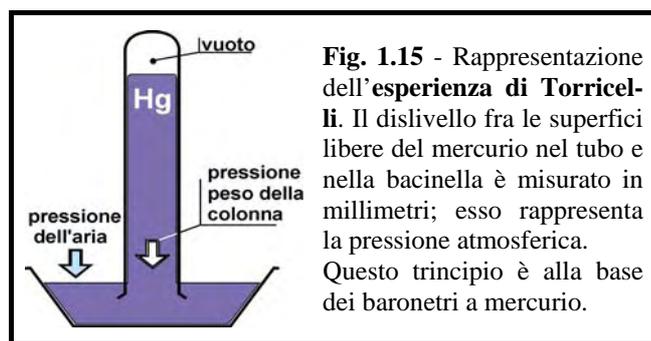
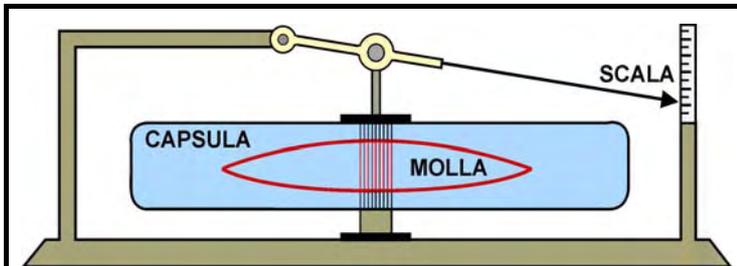


Fig. 1.15 - Rappresentazione dell'esperienza di Torricelli. Il dislivello fra le superfici libere del mercurio nel tubo e nella bacinella è misurato in millimetri; esso rappresenta la pressione atmosferica. Questo principio è alla base dei barometri a mercurio.

complessa. I più indicati sono i barometri analogici, muniti di display che indicano direttamente il valore di pressione in hPa e talora illustrano anche un grafico con l'andamento della pressione nelle ultime 24 ore. La pressione misurata è quella del sito ove è collocato lo strumento; in base alle precedenti considerazioni, essa non dipende solo dalle condizioni meteorologiche (che sono quelle che interessano), ma anche dall'altitudine (fig. 1.2). Il dato corretto deve tenere conto del fattore altitudinale, altrimenti non sarebbe possibile il confronto con le misure effettuate nello stesso momento presso altre località. La misura della pressione "reale" deve quindi essere corretta al corrispondente valore riferito al livello del mare. Ciò significa, molto grossolanamente che, al valore misurato con il barometro, occorre aggiungere:

- 1 hPa per 9 m di quota fino a 500 m s.l.m.;
- 1 hPa per 8,5 m di quota da 500 a 1.000 m s.l.m.;
- 1 hPa per 8 m di quota sopra i 1.000 m s.l.m.



**Fig. 1.16** - Schema di **barometro aneroido** con una capsula metallica il cui interno è vuoto con una molla per compensare parzialmente la pressione esterna; in funzione di questa la capsula si deforma facendo muovere l'ago su una scala graduata. Tale strumento è molto diffuso ed economico, spesso appeso alle pareti delle case. Sullo stesso principio si basa l'altimetro, strumento per misurare l'altitudine: all'aumentare della quota diminuisce lo spessore di aria sovrastante e quindi la pressione atmosferica.

Per esempio, se misuriamo una pressione pari a 980 hPa presso una determinata località situata all'altitudine di 450 m s.l.m., occorre aggiungere  $450:9 = 50$  hPa. Pertanto la pressione ridotta al livello marino diventa  $980 + 50 = 1.030$  hPa ed è questo il dato di cui tenere conto; esso è significativamente superiore al valore standard di 1.013 hPa, quindi da considerare una "alta pressione", probabilmente rappresentativa di una condizione meteorologica di "tempo buono".

Una proprietà caratteristica dei gas è la loro grande comprimibilità. Questa è espressa dalla legge di BOYLE (1662): *a temperatura costante una data quantità di gas occupa un volume inversamente proporzionale alla pressione esercitata su di esso*. In altri termini in un sistema in cui la temperatura non cambia, raddoppiando la pressione il volume occupato dal gas si dimezza. Oppure il fluido si può dilatare fino ad occupare un volume tre volte superiore se la pressione viene ridotta ad un terzo. In realtà non sempre i gas si comportano esattamente come previsto dalla legge di Boyle; tuttavia, per i nostri scopi, possiamo ritenere *l'aria come un gas facilmente comprimibile o dilatabile in stretta relazione con la pressione*.

Altra proprietà dei gas è la capacità di variare il volume in funzione della temperatura (legge di CHARLES, 1787). Se la pressione non cambia l'aria è libera di dilatarsi con l'aumento della temperatura e viceversa. In modo analogo, se il volume non cambia, la pressione dell'aria aumenta con la temperatura e viceversa. Altri fisici (DALTON, 1801; AVOGADRO, 1810) studiarono la termodinamica dei fluidi e formularono modelli matematici in grado di spiegare molti fenomeni naturali.

**Pressione, volume, temperatura** sono le principali variabili per la descrizione dello stato fisico dell'aria che compone l'atmosfera e sono fra loro legate dalle classiche equazioni della fisica termodinamica, a loro volta influenzate dal comportamento dell'acqua presente come gas nella atmosfera. Una massa d'aria che gravita su un porzione di terra molto riscaldata dal sole può dilatarsi (per l'aumento del volume con la temperatura), diventare più leggera e salire in alto; essa pesa quindi di meno comportando anche una diminuzione di pressione; ma salendo di quota, per il diminuire della temperatura, si raffredda e l'umidità presente condensa dando origine alla formazione di nubi e a rovesci temporaleschi. È un esempio a dimostrazione dell'utilità dello studio della termodinamica per una buona interpretazione dei fenomeni atmosferici.

## SCHEDE 1.4 - Sostanze elementari e composte, miscugli

La **sostanza elementare** è una porzione di materia costituita da un solo elemento, cioè da atomi della stessa specie (tutti con uguale numero atomico). Conosciamo un centinaio di elementi diversi (tab. 1.6), ma abbiamo a che fare con un numero immensamente più grande di sostanze diverse, ciascuna con peculiari caratteristiche fisiche e chimiche. Possiamo fare un esempio; se usassimo solo le lettere dell'alfabeto per esprimerci, saremmo molto limitati perché potremmo utilizzare soltanto una ventina di simboli, assolutamente insufficienti; nel linguaggio comune sono rari i concetti rappresentati da una sola lettera. Combinando insieme in vario modo i simboli dell'alfabeto è possibile ottenere, in teoria, un numero infinito di parole, ciascuna delle quali utile per illustrare un concetto (un oggetto, un'azione, uno stato,...). Combinando insieme delle parole si possono ottenere delle espressioni (frasi) che sono alla base del nostro linguaggio.

Anche la chimica usa un linguaggio, le cui regole condizionano le modalità con le quali i simboli degli elementi possono essere tra loro "uniti" per ottenere "parole". Le sostanze elementari sono rare in natura, come in un libro sono poco frequenti le parole costituite da una sola lettera. Noti sono i casi in cui determinati elementi si trovano allo stato puro, si tratta più frequentemente di metalli che vengono indicati con il termine **elementi nativi**. Sono esempi il *platino* (giacimenti in URSS, in Sudafrica e in Canada), l'*oro* (Alaska, California), il *rame*, l'*argento*, il *ferro*, ecc... Vi sono anche i metalloidi come il *carbonio* (per esempio nella forma del diamante che viene estratto in Australia, Brasile, Africa, Africa Australe) e lo *zolfo* (di cui giacimenti si trovano anche in Sicilia).

Combinando elementi diversi (cioè atomi con diverso numero atomico) è teoricamente possibile ottenere un numero infinito di combinazioni. Il **composto** (o **sostanza composta**) è la *combinazione di due o più elementi*. Tralasciamo le modalità con

le quali specie atomiche diverse si uniscono fra loro; facciamo alcuni esempi utilizzando le **formule chimiche**; esse sono combinazioni di simboli degli elementi così come le lettere dell'alfabeto possono essere combinate per formare le parole. Con le formule chimiche si possono costruire "equazioni" per illustrare dei fenomeni (allo stesso modo con cui si usano le parole per costruire delle frasi) secondo regole di una speciale "grammatica della chimica". L'acqua è una sostanza composta da ossigeno (**O**) ed idrogeno (**H**); la sua formula chimica è **H<sub>2</sub>O**; il numero 2 è un indice di H; ciò significa che per ogni atomo di ossigeno vi sono due atomi di idrogeno, oppure che gli ultimi sono sempre in numero doppio rispetto ai primi. La formula chimica di un composto indica da quali elementi è formato (con i simboli) e, con indici numerici, in quali proporzioni (come numeri di atomi) stanno tra loro. Sapendo che l'ossigeno ha numero di massa atomica circa 16 volte superiore a quella dell'idrogeno (**tab. 1.6**), il peso totale del primo sarà, nell'acqua, 8 volte superiore a quello dell'idrogeno (dato che il numero degli atomi di idrogeno è doppio); quindi la percentuale del peso di ossigeno nell'acqua è circa  $[8:(8+1)] \cdot 100 = 89\%$  coincidente con il valore che abbiamo indicato precedentemente.

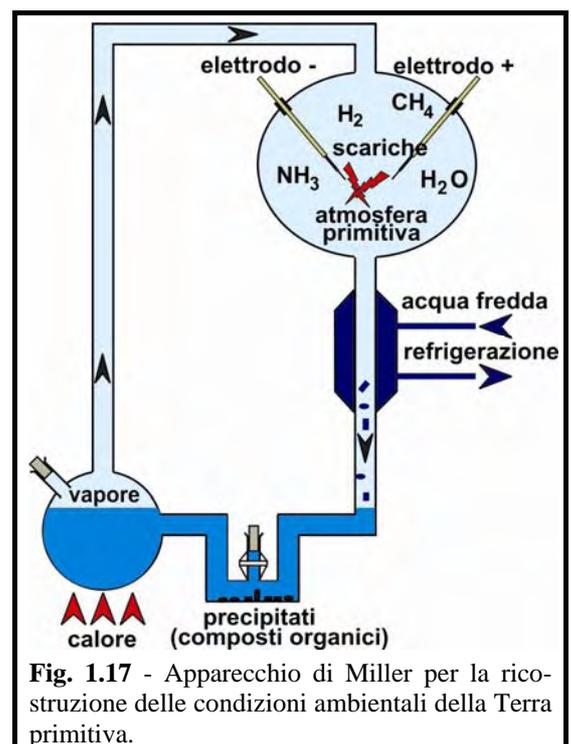
Le formule chimiche possono darci molte indicazioni sulle sostanze composte. Il cloruro di sodio (il sale da cucina) ha formula **NaCl**. Esso è perciò costituito da cloro (**Cl**) e sodio (**Na**) in uguali proporzioni, ma l'atomo di cloro è più grande ( $M = 35,45$ ) rispetto a quello di sodio ( $M = 22,99$ ); infatti il nucleo del primo ha 17 protoni + 17 neutroni, mentre l'altro ha un nucleo con 22 particelle nucleari in tutto. La somma delle due masse atomiche vale 58,44, di conseguenza il peso percentuale del cloro rispetto al totale è  $(35,45:58,44) \cdot 100 = 61\%$ ; il restante 39% in peso è dovuto al sodio. **CH<sub>2</sub>O** è la formula dello zucchero costituito da un ugual numero di atomi di carbonio ( $M = 12,01$ ) e di ossigeno ( $M = 15,99$ ) e da un numero doppio di atomi di idrogeno ( $M = 1,01$ ). La somma delle masse atomiche è  $12,01+15,99+(1,01 \cdot 2) = 30,02$ ; la percentuale in peso del carbonio è  $(12,01:30,02) \cdot 100 = 27,7\%$ ; quella dell'ossigeno è  $(15,99:30,02) \cdot 100 = 53,3\%$ , mentre quella dell'idrogeno si ottiene con la differenza  $100-(27,7+53,3) = 19,0\%$ .

Le operazioni che abbiamo appena eseguito sono esempi di calcoli stechiometrici. La *stechiometria* è la scienza del calcolo in chimica e fu introdotta nella seconda metà del '700 da LAVOISIER; essa si avvale della matematica e della fisica, con le quali si posero le basi per una interpretazione quantitativa della chimica, facendo compiere notevoli progressi nello studio delle trasformazioni della materia. Per esempio la silice, una sostanza composta molto comune nel regno minerale e costituente fondamentale del vetro (**SiO<sub>2</sub>**), è costituita da ossigeno per il 53% in peso e per il 47% da silicio. L'anidride carbonica ha formula **CO<sub>2</sub>**, il metano ha formula **CH<sub>4</sub>**, l'anidride solforosa (di cui si sente spesso parlare per gli effetti inquinanti) ha formula **SO<sub>2</sub>**. Ma vi sono sostanze con formule più complicate come quelle dell'acido solforico (**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**) dove per ogni atomo di zolfo ve ne sono due di idrogeno e 4 di ossigeno, del carbonato di calcio (**CaCO<sub>3</sub>**), costituente fondamentale del calcare o quella del bicarbonato di sodio (**NaHCO<sub>3</sub>**), costituito da quattro specie atomiche diverse. Tutte formule che sono ancora ben lontane dal rappresentare il massimo della complessità.

Se le sostanze allo stato elementare in natura sono rare, quelle composte "pure" sono poco frequenti. L'acqua, per esempio, è una sostanza che non si trova mai allo stato puro (ad eccezione dell'acqua distillata ottenuta artificialmente); in essa sono sempre sciolte altre sostanze. Nella quasi totalità dei casi la materia si presenta sempre come **miscugli** di sostanze diverse (elementi o composti). L'aria è una miscela di gas; la silice contiene quasi sempre delle impurezze, talvolta in piccolissime quantità, ma in grado di conferirle colorazioni particolari; la carta che compone le pagine di questo libro è prevalentemente costituita da una sostanza molto complessa, la cellulosa, unitamente a numerosi altri composti. Un frammento di materia qualsiasi, pur di aspetto omogeneo, quando sottoposto ad una analisi chimica, quasi sempre, risulta costituito da un insieme di due o più sostanze, a loro volta frequentemente composte e raramente elementari.

### SCHEDE 1.5 - L'esperienza di MILLER

Presso l'Università di Chicago, nel 1930, il premio Nobel per la chimica, H.C. UREY, sulla base delle ipotesi di OPARIN, formulate 25 anni prima, studiava le teorie sulla formazione del Sistema Solare e sull'atmosfera che avvolgeva la Terra primitiva. Un suo studente, S.L. MILLER simulò tale atmosfera in laboratorio, ricreando, in una ampolla, le condizioni che precedettero l'origine della vita (~ 3,5 miliardi di anni fa). Il ricercatore introdusse nell'ampolla sotto vuoto (**fig. 1.17**) metano, ammoniaca ed idrogeno e la collegò, tramite un tubo, ad un pallone nel quale fece bollire dell'acqua. Si sviluppava così vapore caldo che raggiungeva l'ampolla, mescolandosi con gli altri composti. Venne così ricostruita l'atmosfera primitiva, calda e riducente (al contrario di quella attuale che, contenendo ossigeno, è detta "ossidante"). Con un paio di elettrodi si producevano scariche per "imitare" i fulmini che dovevano coinvolgere l'atmosfera primitiva che, essendo calda e molto umida, era probabilmente teatro di numerosi e violenti temporali. Con un sistema di refrigerazione veniva provocata la condensazione del vapore "imitando" le piogge che, in quell'epoca, colmarono d'acqua le depressioni, dando origine agli oceani. Miller volle verificare se, in simili condizioni, potevano formarsi spontaneamente nuove sostanze, come conseguenza di processi all'interno dell'ampolla, gli stessi forse dell'atmosfera primitiva. Se nuove sostanze si formarono in quelle condizioni,



esse dovevano raccogliersi nei mari primordiali; ciò significa che, nell'apparecchio di Miller, al fondo dell'ansa ad "U" (**fig. 1.17**), avrebbero dovuto raccogliersi precipitati di composti formati nell'ampolla. Dopo una settimana Miller esaminò il liquido dell'ansa e verificò la presenza di composti organici fra i quali aminoacidi (componenti fondamentali delle proteine). Nel 1963 Miller pubblicò sulla rivista "Scienze" un articolo intitolato *Produzione di aminoacidi in condizioni che avrebbero potuto essere quelle della Terra primitiva*, con il quale divenne famoso in tutto il mondo. Con l'esperienza di Miller si ha la prova che la formazione spontanea di molecole organiche complesse al di fuori della vita, in condizioni analoghe a quelle della Terra primitiva, non era solo possibile, ma probabile.

## **SCHEDA 1.6 - Eutrofizzazione**

Consideriamo un ipotetico lago, relativamente profondo; le acque sono trasparenti e la luce solare vi penetra fino ad oltre 30 m. Le concentrazioni dei nutrienti (principalmente sali dell'azoto e del fosforo) sono modeste; la produzione di materia organica nella stagione calda (ad opera soprattutto del fitoplancton) non è eccessiva e la quantità di ossigeno per la sua decomposizione è inferiore a quella totale presente nelle acque profonde. Si è ben lontani da condizioni di deficit di ossigeno ed il pesce non è abbondante. Un lago di questo genere probabilmente è "giovane" come genesi e, per il fatto di essere poco produttivo e povero di vita vegetale e animale, viene indicato con il termine *oligotrofico*.

Con il passare del tempo (decenni, secoli o millenni) le acque incanalate o di ruscellamento portano al nostro ipotetico lago sali nutritivi asportati dai terreni circostanti. In occasione di piene, gli immissari trasportano argille, limi e sabbie che decantano sui fondali. Le foglie portate dal vento, gli insetti catturati dai pesci, gli escrementi degli uccelli acquatici, contribuiscono all'ingresso di nuova materia al lago. Quando nuovo materiale giunge al letto di un fiume, viene immediatamente rimosso dalla corrente e trascinato a valle. Diversa è la situazione dei laghi; le acque non vengono ricambiate facilmente come nei fiumi; nella migliore delle ipotesi i tempi necessari al ricambio totale possono essere anche di alcuni anni. Nel lago Maggiore, per esempio, è risultato che dopo 25 anni permane ancora il 20 % dell'acqua originaria. La conseguenza è che tutto ciò che arriva al lago ne diventa automaticamente parte, sedimentando o entrando nei cicli biologici.

Col passare del tempo il nostro ipotetico lago diventa meno profondo per i processi di sedimentazione e più produttivo per l'apporto di nutrienti dai territori circostanti. La vita è più abbondante, maggiore è la "fioritura" del plancton nella stagione calda. Il materiale organico prodotto costituisce una massa notevole, ma l'ossigeno è ancora sufficiente per la sua totale decomposizione, senza che si verifichino situazioni di deficit. Le acque, per la presenza di maggiori quantità di plancton, sono meno trasparenti ma, presso le rive, è ancora possibile scorgere il fondo oltre i due metri di profondità. La produzione di pesci è buona. Un lago di questo tipo viene considerato "maturo" come età e, per la maggior produttività, viene indicato con il termine *mesotrofico*.

Ma l'evoluzione non si ferma qui perché, col passare del tempo, dai territori circostanti arriva altro materiale che tende a riempire sempre di più il lago e ad aumentarne la produttività (per l'apporto di altri nutrienti). In queste condizioni, sia per il diminuito volume delle acque profonde (minore riserva di ossigeno), sia per l'eccessiva mole di sostanza organica prodotta nella stagione calda (che richiede troppo ossigeno per essere consumata integralmente), cominciano ad instaurarsi situazioni di deficit di ossigeno presso il fondo. Il quadro generale è quello di un lago molto produttivo (abbondante la fauna ittica) con grande sviluppo di plancton, di alghe superiori e di canneto che ingombrano le rive. Vi è assenza di ossigeno presso i fondali in estate e i sedimenti sono fetidi perché formati in un ambiente anossico e ricco di ammoniaca e di acido solfidrico. Un lago di questo tipo è "vecchio" e viene indicato con il termine *eutrofico*.

Oligotrofia, mesotrofia, eutrofia sono gli stadi trofici attraverso i quali un lago passa dalle sue condizioni giovanili a quelle di vecchiaia. Si assiste cioè ad un graduale processo di *eutrofizzazione* naturale durante la "maturazione" del lago, che porta alla sua estinzione, alla formazione di uno stagno, poi di palude che può definitivamente colmarsi a pianura. Questo processo, che inizia dalla genesi del lago e che si conclude a livello di palude e pianura, si attua, in natura, in tempi lunghissimi, di secoli, di millenni o di decine di migliaia di anni, a seconda del tipo morfologico del bacino lacustre. I sedimenti che si accumulano nel lago oligotrofico sono, per la maggior parte, costituiti da detriti minerali (sabbia ed argilla, più frequentemente di colore chiaro). Nei laghi eutrofici oltre alla componente minerale si accumulano sui fondali maggiori quantità di materiali organici (di colore scuro) che non vengono decomposti in conseguenza della scarsità di ossigeno presso il fondo.

Quando il lago eutrofico si colma definitivamente si forma una **torbiera**, uno spazio pianeggiante costituito prevalentemente (o totalmente) da **torba**, che è quindi materiale organico sedimentato in ambiente eutrofico. Questo materiale (la cui composizione media è C = 50 ÷ 60 %, H = 4 ÷ 7 % e O = 25 ÷ 35 %) si presenta come una massa spugnosa bruna o nera, ricca d'acqua (90 %), composta da un feltro di resti vegetali più o meno decomposti, talvolta riconoscibili anche ad occhio nudo. La torba, che può essere definita un tipo di **carbone fossile**, viene usata in agricoltura per conferire caratteristiche particolari ai terreni oppure, tra gli altri usi, può venire seccata ed usata come combustibile povero. Industrialmente è di scarso valore e viene usata come combustibile in loco quando si tratta di grandi giacimenti di facile sfruttamento (come il bacino di Mosca). In rari casi viene utilizzata come combustibile per la produzione di gas d'aria o gas d'acqua, oppure viene sottoposta a distillazione per ricavarne catrame, carbone e gas. In Italia le più estese torbiere si trovano in Toscana, a Torre del Lago.

Il processo di eutrofizzazione naturale (comune anche ai laghi costieri ed in ambienti più francamente marini) può avvenire nel modo prima descritto a condizione che il territorio circostante sia poco o nulla antropizzato. Le attività delle popolazioni umane, infatti, comportano la produzione di materiali di rifiuto che, comunque vengano eliminati, giungono, più o meno trasformati, al lago. Fra essi una buona porzione può essere rappresentata da nutrienti soprattutto di origine organica derivati

dalle attività domestiche ed immessi attraverso scarichi cloacali. Pensiamo inoltre alle notevoli quantità di concimi che, dai terreni agrari, giungono a concimare anche il lago. Le acque lacustri, spesso, sono sottoposte ad una forte pressione turistica, il che vuol dire una ulteriore produzione di prodotti di rifiuto e la loro eliminazione diretta nelle acque. La conseguenza di tutto ciò è l'ulteriore apporto di altri nutrienti ai cicli biologici dei laghi. Questa azione di "fertilizzazione" si traduce in una accelerazione di processi i quali, in condizioni naturali, avverrebbero pur sempre, ma entro archi di tempo assai più ampi. In altri termini le attività economico - produttive determinano una notevole accelerazione dei processi di eutrofizzazione dei laghi facendoli "invecchiare" precocemente. Il caso dell'eutrofizzazione del mare Adriatico, che può essere considerato una sorta di grande lago poco profondo, è esemplificativo (**fig. 1.18**).



**Fig. 1.18** - L'eccessiva proliferazione di alghe è una delle conseguenze più evidenti dell'eutrofizzazione nei laghi e nei piccoli bacini marini. A sinistra si osserva, presso la superficie dell'Adriatico, una vasta area letteralmente invasa dalla mucillagine. Tali fenomeni si possono osservare anche presso le coste come nel caso del porto di Grignano (a destra) in provincia di Trieste