

Il Foundation Programme dell'Università di Torino. Disegno, contenuti, obiettivi

a cura di

Carla MARELLO e Lorenza OPERTI



«QuadRi»
Quaderni di RiCOGNIZIONI

UN APPROCCIO SISTEMICO ALLE SCIENZE NATURALI

Giuseppina CERRATO, *Mauro* FANELLI, *Matteo* LEONE, *Anna* PERAZZONE,
Marco Davide TONON

ABSTRACT • The present teaching course is aimed at summarizing some fundamental ideas of the Natural Sciences by organizing them in a complex conceptual network, flexible and expendable in a future university career, regardless of the specific course of study the students intend to access.

Natural Sciences consider components, relations and phenomena that characterize the Earth, our hosting planet, and they do it from multiple perspectives that involve a vast spatial and temporal scale, spanning from the atomic components, that form the crystals of minerals or those that make up the macromolecules and the cells of living organisms, to the great forms of both landscape and ecosystems that together constitute the thin layer of our planet in which life is present. Natural Sciences also consider Earth in depth, starting from the hot center to reach up to the highest layers of our atmosphere. Earth has a history of 4.6 billion years and chemists, physicists, biologists and geologists are trying to reconstruct it using different tools and methods.

It is this complexity that we want to emphasize, certainly not dwelling on the details, but proposing fundamental concepts of the various disciplines involved and integrating them as much as possible through a systemic vision.

All the facts being studied in the Natural Sciences are thus conceivable as complex systems and, at the same time, components of wider systems that influence and are influenced by them as well. The properties of macro and megascopic structures depend on one hand on microscopic structures and, on the other, influence them: it is from this continuous intertwining of different organisational levels that the complexity within them emerges and it is important to learn to juggle all the tasks.

For all the above reasons, the different levels of organization will be taken into consideration, emphasizing the passages from one level to the next and, above all, highlighting the links and the relationships among them.

KEYWORDS • Chemistry; Earth Sciences; Foundation Programme; Natural Sciences; Physics; Systems Biology; Trans-disciplinarity.

1. I sistemi naturali

1.1 La complessità dei sistemi naturali

La realtà in cui viviamo e che possiamo osservare ogni giorno è multiforme, ricca di innumerevoli interdipendenze, costituita da un continuo flusso di processi che noi siamo in grado di cogliere e conoscere solo parzialmente (Cini, 1994). In ognuno di noi è radicata l'idea che la realtà coincida con ciò che “naturalmente” percepiamo, senza tener presente che noi costruiamo il nostro mondo da un punto di vista particolare che è contemporaneamente naturale (che riguarda gli aspetti naturali dell'ambiente che ci circonda) e culturale (ovvero legata alla dimensione sociale in cui viviamo).

Operiamo sempre una scelta tra ciò che è per noi è significativo e ciò che è trascurabile. L'idea che ci costruiamo del mondo che ci circonda dipende non solo dai “fatti” o da ciò che siamo in grado di cogliere attraverso i nostri sensi (o dagli strumenti in grado di amplificarli), ma anche dal sistema socio-culturale nel quale viviamo e dai nostri modi di pensare e di valutare. In tal senso si potrebbe affermare che la costruzione della conoscenza scientifica è influenzata e, a sua volta, influenza l'evoluzione culturale dei modi di pensare il mondo. Dovremmo considerare che esistono diversi livelli di complessità e di interazione: la complessità dei sistemi naturali e il nostro modo di conoscere ed esplorare la realtà che è in continua trasformazione (Maturana, Varela, 1987).

L'indagine dei sistemi naturali non può, quindi, prescindere dall'osservatore e dal contesto ambientale di cui esso è parte: tutti i concetti scientifici con cui cerchiamo di spiegare i fenomeni naturali, in realtà, sono il frutto di questa indissolubile relazione.

Anche nell'ambito della ricerca scientifica i punti di vista stanno cambiando e, grazie allo sviluppo di ricerche inter e cross-disciplinari, è sempre più evidente che i sistemi naturali sono costituiti da livelli organizzativi interagenti, ricchi di relazioni casuali non lineari, che rendono impossibile tracciare confini netti tra processi e componenti a scale spaziali e temporali molto diverse (Funtowicz, 2001). La scienza riduzionista è stata posta attualmente in crisi dalla scienza post-normale, che considera l'indissolubile legame tra la complessità dei sistemi naturali e l'inclusione della nostra specie all'interno di tali sistemi.

1.2 Approcci integranti alle Scienze Naturali

La costruzione di conoscenza sistemica in ambito naturalistico si deve avvalere di molteplici approcci che devono essere coinvolti simultaneamente nei processi di insegnamento/apprendimento (Angelotti et al., 2009; Colucci et al. 2013).

Gli aspetti descrittivi, tipici di un approccio strutturale, permettono di definire ogni oggetto naturale o ogni individuo come diversi, unici e, allo stesso tempo, scoprire gli elementi di affinità che contraddistinguono la materia nel suo complesso. Alla base di questo approccio alla realtà vi sono le forme e le strutture e la domanda da porsi è: “come è fatto questo oggetto di studio e da cosa è composto?”.

Le diversità e l'unicità che emergono attraverso un approccio strutturale sono ulteriormente evidenziate dall'approccio funzionale. Esso investiga i processi che, attraverso

continui flussi di energia e materia, generano e contraddistinguono i diversi viventi o oggetti naturali. È questo il campo delle trasformazioni e la domanda da porsi è: “come funziona e in cosa o chi si trasforma?”.

Anche l’approccio temporale si occupa di processi trasformativi dinamici, studiandoli però nel loro divenire soprattutto attraverso una visione di tipo diacronico, rispondendo alle domande: “in che modo si trasforma? Quanto tempo durano i processi?”. Ogni componente naturale è il risultato di una sinergia di processi che lo hanno ‘messo in forma’ e che lo trasformano continuamente in modo più o meno evidente. Molti processi, i cui effetti si sommano o si contrastano o si integrano, avvengono simultaneamente, altri si susseguono in sequenze temporali ben precise. Chi studia la storia geologica del pianeta e della vita su di esso, per esempio, tenta di ricostruire i possibili scenari di una vicenda unica che si è snodata nel corso di quasi cinque miliardi di anni.

Infine, attraverso un approccio sistemico si mettono in evidenza gli innumerevoli legami di una fitta rete che sostiene ogni forma di vita presente e passata, pertanto la domanda chiave è: “con chi e con cosa entra in relazione l’oggetto del mio studio?”. Il pianeta di cui siamo parte è un sistema complesso, costituito da molteplici componenti in relazione fra loro e concepibili a loro volta come sub-sistemi gerarchicamente organizzati in ordini di inclusione dimensionali. Da un punto di vista epistemologico, molte discipline nel campo delle Scienze Naturali si sono fondate su di uno specifico approccio che spesso è stato o è ancora utilizzato in modo quasi esclusivo. L’approccio strutturale caratterizza per esempio, l’anatomia o la petrografia, quello funzionale la fisiologia dei viventi o la geodinamica, quello temporale è tipico della biologia evolutiva o della geocronologia e quello sistemico dell’ecologia o della tettonica globale. Altri settori delle Scienze Naturali sono, invece, caratterizzati da un’integrazione di molteplici approcci, come la filogenesi che si avvale simultaneamente di approcci più descrittivi (strutturale e funzionale) al fine di ricostruire i legami evolutivi (approccio temporale).

Se dal punto di vista scientifico è riconosciuta pari importanza e dignità a questi diversi modi di guardare alla realtà che hanno contribuito storicamente a costruire e ad accrescere conoscenze specifiche in campo naturalistico, dal punto di vista educativo e didattico non si è ancora riusciti a dare la giusta importanza all’utilizzo simultaneo dei diversi approcci che favorirebbe l’apprendimento di un sapere più integrato e coerente. Lo studente, non avendo chiaro il contesto di riferimento delle discipline scientifiche e neanche la cornice epistemologica entro la quale si è sviluppata una certa conoscenza si trova di fronte ad uno scenario frammentato e costellato da una mole di nozioni che slegate tra loro, rendono difficile la costruzione di un’immagine mentale complessiva e articolata dell’oggetto di studio. In questo modo il risultato è che, sovente, le conoscenze scientifiche apprese a scuola si sviluppano su un binario parallelo rispetto alle conoscenze di senso comune che vengono invece utilizzate nella quotidianità come chiave di lettura per capire e interpretare ciò che ci circonda.

L’insegnamento proposto all’interno del *Foundation Programme* dell’Università di Torino parte da tali considerazioni e coerentemente si sviluppa cercando di offrire agli studenti una visione diversa e più integrata dei concetti chimici, fisici, biologici e geologici che stanno alla base delle Scienze Naturali normalmente affrontate a livello di scuola secondaria.

2. La materia

2.1 Come è fatta la materia

Non ci sarebbe nulla di strano se ti chiedessimo, prima di iniziare la lettura di questo capitolo, di prendere una matita dall'astuccio, sia perché è abitudine di ogni buon lettore avere sempre una matita a portata di mano, sia perché è un oggetto molto comune. Se invece ti chiedessimo di avere a portata di mano un diamante, potresti avere più difficoltà nel reperirlo; il diamante è estremamente raro. Eppure la matita, o per meglio dire, ciò che davvero ci interessa della matita e cioè la sua mina (la grafite) e il diamante, sono entrambi materiali costituiti esclusivamente da atomi di carbonio. Cosa rende questi due materiali così diversi?

Per rispondere a questa domanda occorre guardare oltre alla composizione dei due materiali, dobbiamo, cioè, osservare la disposizione tridimensionale degli atomi e come questi interagiscono tra loro: mentre nel diamante ogni atomo è connesso ad altri 4 atomi di carbonio mediante legami tutti uguali, nella grafite gli atomi sono disposti in strati di anelli esagonali e i legami sono di diverso tipo.

I legami chimici, come abbiamo visto, svolgono un ruolo fondamentale nella struttura, e dunque nelle caratteristiche fisiche e chimiche della materia. I principali tipi di legame sono (i) intramolecolari, ovvero agiscono tra due o più atomi all'interno di una molecola, oppure (ii) intermolecolari, perchè agiscono tra le molecole.

2.2 La classificazione della materia

La materia molto raramente è costituita da sostanze pure: essa è invece per lo più costituita da miscugli o miscele di sostanze (acqua, alcool, sale da cucina, glucosio, ecc.). Il termine miscela si usa nel caso in cui nell'insieme siano coinvolte delle sostanze in fase fluida; il termine miscuglio è preferito nel caso in cui almeno una delle sostanze coinvolte è allo stato solido.

All'osservazione i miscugli possono apparire: eterogenei, quando presentano caratteristiche macroscopicamente differenti in punti diversi; omogenei, quando presentano identiche proprietà macroscopiche in ogni punto.

Una miscela eterogenea può essere scomposta nei suoi componenti omogenei mediante tecniche di perturbazione meccanica (fisica): decantazione, filtrazione, separazione magnetica, centrifugazione.

Le miscele omogenee possono a loro volta essere costituite da soluzioni o sostanze pure: la soluzione è una miscela omogenea di una o più sostanze in fase liquida o solida o aeriforme, una sostanza pura è un sistema omogeneo con composizione e proprietà definite e costanti.

Una soluzione può essere scomposta in sostanze pure mediante perturbazioni dello stato di aggregazione (dette anche trasformazioni fisiche o passaggi di stato): ad esempio con le tecniche di cristallizzazione, distillazione, fusione, cromatografia.

Le sostanze pure possono essere costituite da composti o elementi. I composti sono combinazioni di uno o più elementi legati tra di loro per formare una molecola (cloruro di

sodio, biossido di carbonio, acqua, silice); gli elementi sono sostanze composte da atomi dello stesso elemento chimico (ossigeno, mercurio, idrogeno, zinco). Un composto può essere suddiviso in elementi mediante trasformazioni chimiche (ovvero, le reazioni chimiche): decomposizione, elettrolisi, ecc..

2.3 Trasformazioni fisiche della materia

Quasi tutte le sostanze, a seconda delle condizioni di pressione e temperatura, possono trovarsi nei tre stati di aggregazione: solido, liquido e aeriforme. Nella maggior parte dei casi con l'aumento della temperatura le sostanze passano progressivamente dallo stato solido a quello aeriforme.

I passaggi di stato rappresentano una trasformazione di tipo fisico, in quanto a variare non è la composizione chimica ma lo stato fisico della sostanza. Tali processi sono reversibili.

Riscaldando una sostanza solida cristallina la sua temperatura cresce fino a un certo valore che rappresenta la temperatura di fusione, alla quale la sostanza inizia a fondere. La temperatura rimane costante per tutta la durata della fusione, dopodichè, continuando a somministrare calore, riprende a crescere. Il fenomeno è reversibile, cioè, sottraendo calore ad una sostanza fusa, la sua temperatura continua a scendere fino a raggiungere la temperatura di solidificazione; a questo punto la temperatura diminuisce fino a che tutta la sostanza è solidificata, dopodichè la temperatura continua a diminuire.

2.4 Trasformazioni chimiche della materia

Quando, a seguito di una trasformazione, si formano sostanze diverse, per aspetto e caratteristiche, da quella di partenza, si dice che è avvenuta una trasformazione, o reazione, chimica. In una reazione le sostanze di partenza sono dette reagenti, le sostanze ottenute prodotti.

Sono esempi di trasformazione chimica l'arrugginimento di un pezzo di ferro all'aria, la combustione di un pezzo di legno, l'imbrunimento di una fetta di mela lasciata all'aria, la fotosintesi clorofilliana, ecc.

Per comprendere le reazioni chimiche è innanzitutto importante conoscere il linguaggio chimico, fatto di simboli, formule ed equazioni. È poi importante tenere presente due fondamentali leggi: la legge della conservazione della massa e la legge della conservazione della carica. Sulla base di queste due leggi le equazioni che rappresentano le reazioni chimiche devono rispettare i rapporti di quantità tra reagenti e prodotti utilizzando la stechiometria.

È inoltre importante ricordare che le reazioni chimiche possono essere divise in due grandi categorie: quelle che liberano energia (esotermiche) e quelle che richiedono energia (endotermiche).

3. L'energia

3.1 Che cos'è l'energia

Abbiamo visto come ogni reazione chimica sia accompagnata da una variazione di energia. Ma che cos'è l'energia? A questa domanda non è affatto facile dare una risposta, tanto che il premio Nobel per la fisica 1965 Richard Feynman disse: "È importante tenere presente che nella fisica odierna noi non abbiamo cognizione di ciò che l'energia è". Ciononostante sappiamo che è una grandezza fisica importante e che gode di alcune proprietà.

1- L'energia si trova in un gran numero di forme diverse, rappresentabili mediante formule. Ad esempio ogni molecola possiede due tipi di energia: l'energia cinetica, legata al suo movimento nello spazio, e l'energia potenziale, dovuta alla disposizione degli atomi nella sua struttura.

2- L'energia si può trasformare da una forma all'altra, che possiamo usare nella forma che più ci serve. Osservando il movimento del pendolo ideale notiamo che c'è una continua conversione di due diverse forme di energia: da energia potenziale gravitazionale, quando il pendolo è fermo e alle estremità della sua oscillazione, in energia cinetica, quando il pendolo si muove alla massima velocità al centro dell'oscillazione, e viceversa.

3- L'energia si conserva: vi è una certa quantità, chiamata appunto "energia", che non cambia mai attraverso i molteplici mutamenti della natura. Non è sempre facile verificare la validità di questo principio di conservazione dell'energia in quanto, durante le trasformazioni da una forma all'altra, parte dell'energia può abbandonare, o essere introdotta, nel sistema.

3.2 Calore e temperatura

L'energia termica corrisponde allo stato di agitazione delle particelle di un sistema. A livello macroscopico, la proprietà fisica che esprime tale stato di agitazione è detta temperatura. La temperatura è, quindi, uno dei parametri che descrivono lo stato di un sistema.

Una grandezza fisica che talvolta è confusa con la temperatura o con l'energia termica è il calore: infatti, a differenza della temperatura, che descrive lo stato di un sistema, il calore è un parametro che descrive le interazioni tra sistemi. Più precisamente, il calore è un processo di trasferimento di energia. È la differenza di temperatura tra due sistemi che determina se si verifica, oppure no, un trasferimento di calore.

Se due oggetti con la stessa temperatura sono messi a contatto, non c'è un passaggio netto di calore, cioè sono in equilibrio termico. Se invece due oggetti con diversa temperatura sono messi a contatto, tendono a raggiungere la stessa temperatura e dunque l'equilibrio termico.

3.3 Legge della calorimetria

Temperatura e calore, come abbiamo detto, sono due grandezze fisiche diverse tra loro, ma sono imparentate da una legge detta legge della calorimetria: la quantità di calore

che un oggetto può cedere o assorbire dall'ambiente esterno dipende da: massa (m), tipo di sostanza (c), temperatura iniziale (T_i), temperatura finale (T_f).

Se la temperatura iniziale è maggiore della temperatura finale, la quantità di calore ceduta Q , è legata alle grandezze sopra citate da una relazione di proporzionalità di questo tipo:

$$Q_{\text{ceduto}} = c m (T_i - T_f)$$

Se la temperatura iniziale è minore della temperatura finale, la quantità di calore assorbita è legata alle grandezze sopra citate da una relazione di proporzionalità di questo tipo:

$$Q_{\text{assorbito}} = c m (T_f - T_i)$$

Tali relazioni esprimono il fatto che la quantità di calore assorbita o ceduta aumenta proporzionalmente alla massa dell'oggetto e alla differenza di temperatura che si realizza, con una costante di proporzionalità che è data proprio dal calore specifico della sostanza di cui è costituito l'oggetto.

3.4 La termodinamica

La termodinamica è quella parte della Scienza che studia i trasferimenti di energia da un luogo ad un altro e da una forma ad un'altra. Alla base della termodinamica vi sono due concetti, il calore e il lavoro, che esprimono due modi attraverso i quali può avvenire uno scambio di energia tra due sistemi.

Se l'energia scambiata tra due sistemi è provocata da una differenza di temperatura tra i due sistemi, allora, come abbiamo già visto, parliamo di calore, Q .

Se, invece, l'energia scambiata tra due sistemi avviene attraverso l'azione di una forza che produce uno spostamento, allora parliamo di lavoro, L .

Le leggi più importanti della termodinamica sono sintetizzabili in un certo numero di principi.

Il cosiddetto principio zero della termodinamica, altro non è che il già discusso principio di equilibrio termico, in base al quale quando due sistemi sono ciascuno in equilibrio con un terzo sistema, i primi due sistemi sono in equilibrio termico tra loro.

Il primo principio della termodinamica è una generalizzazione del principio di conservazione dell'energia e afferma che la variazione di energia interna di un sistema è uguale alla differenza delle quantità di calore e lavoro forniti al sistema.

$$\begin{aligned} \Delta E &= Q_b - Q_a \\ \Delta E &= L_b - L_a \end{aligned}$$

Il secondo principio della termodinamica afferma che il calore ad una data temperatura non può essere convertito interamente in lavoro, ovvero il calore non può passare spontaneamente da regioni più fredde a regioni più calde.

4. I sistemi viventi

4.1 Le tre necessità dei viventi

I viventi sono dei sistemi aperti costituiti da componenti a loro volta interpretabili come sistemi gerarchicamente organizzati, dal micro al macro: cellula, tessuto, organi, sistemi di organi (apparati), organismo pluricellulare nella sua interezza. Al di là della struttura cellulare, che certo è un elemento che a livello micro accomuna tutti (ogni vivente è costituito da una o più cellule), la diversità di forme di vita è davvero incredibile. Per capire cosa accomuna davvero tutti gli organismi non dobbiamo guardare l'aspetto e le funzioni ma riflettere su quelle che sono le "necessità" che condividono tutti (Arcà, 2009).

Prima necessità: tutti i sistemi viventi fanno entrare nei loro corpi materia e energia, che trasformano e utilizzano per diverse funzioni; qualcosa trattengono al loro interno, qualcosa riversano nell'ambiente perché inutile o dannoso. Nutrizione e respirazione sono esempi di funzioni fondamentali legate a questa necessità che può essere esplicata in modi diversissimi. Sono funzioni che avvengono in tutto l'arco della vita senza modificare in modo permanente l'individuo.

Seconda necessità: tutti i viventi da quando nascono a quando muoiono devono anche saper raccogliere informazioni dall'ambiente esterno e dal loro ambiente interno, elaborarle e, attraverso comportamenti, rispondere agli stimoli ricevuti. Non c'è bisogno di avere organi di senso e sistema nervoso: anche i microrganismi e le piante devono poter "accorgersi" di ciò che succede nell'ambiente in cui sono inseriti. I segnali percepiti dalle forme viventi sono diversi, ognuno si accorge di ciò che gli è utile. Diversi sono pure i sistemi di elaborazione delle risposte e i comportamenti (interni e esterni) messi in atto.

Terza necessità: ogni sistema vivente cambia giorno dopo giorno, si trasforma in modo irreversibile pur rimanendo sempre sé stesso. Talvolta le trasformazioni avvengono in modo lento e graduale, in altri casi sono quasi improvvise e modificano in modo considerevole l'aspetto dell'organismo e addirittura il suo modo di assolvere alle prime due necessità. Nell'arco della vita ciascuno acquisisce la capacità di riprodursi. La durata della vita può variare molto a seconda della specie, da poche ore a centinaia di anni, ma la morte è l'evento finale a cui tutti gli organismi sono destinati.

4.2 Eucarioti e procarioti

Eucarioti (unicellulari e pluricellulari) e procarioti (i batteri costituiti da una sola cellula), pur essendo organismi molto diversi, condividono alcune strutture cellulari fondamentali, come la membrana cellulare, il citoplasma, alcuni organuli e il materiale genetico.

La cellula procariote è però generalmente più piccola (1-10 micron) e contenente un minor numero di organuli, possiede la parete cellulare (come le cellule eucariote vegetali), non possiede il nucleo e il materiale genetico è a contatto con il citoplasma occupando una regione specifica chiamata nucleoide. Inoltre la cellula procariote ha forme poco diversificate, in genere a sferette, cocchi, bastoncelli o archetti. Nella cellula eucariote il materiale genetico è separato dal citoplasma ed è contenuto nel nucleo e la parete cellulare

è presente solo nel caso delle cellule vegetali. La forma delle cellule eucariote, che nel corpo di un organismo pluricellulare si specializzano, è molto varia, come varie possono essere le dimensioni, tra 10 e 100 micron.

4.3 Le strutture cellulari

Come abbiamo visto, le cellule condividono alcune strutture fondamentali. Indichiamo di seguito le principali.

Il citoplasma è la matrice fluida, ad elevato contenuto d'acqua, nel quale sono immersi gli organelli e le molecole in soluzione. Nel citoplasma avvengono buona parte delle reazioni metaboliche come glicolisi, biosintesi di nucleotidi e aminoacidi.

Il nucleo contiene la maggior parte delle molecole di DNA presente nella cellula eucariotica. La molecola di DNA costituisce l'archivio genetico, ovvero l'informazione interna al sistema vivente, è costituita due filamenti di acidi nucleici avvolti a doppia elica.

Nel mitocondrio avviene buona parte del processo della respirazione cellulare in cui le molecole dei nutrienti vengono ossidate per ricavare ATP: la forma di energia chimica potenziale più usata nel metabolismo cellulare.

Il cloroplasto è l'organulo che svolge la fotosintesi clorofilliana, si trova quindi solo in alcune cellule vegetali, in particolare nelle parti verdi delle piante, perchè nel cloroplasto è contenuto il pigmento verde della clorofilla.

I ribosomi sono spesso associati ad altri organuli (mitocondri, cloroplasti, reticolo endoplasmatico). La loro funzione è la sintesi, a partire da una catena di RNA messaggero (mRNA), delle proteine.

4.4 Il trasporto di membrana

La membrana plasmatica rappresenta il confine del sistema che separa il citoplasma dall'ambiente circostante. È formata da un doppio strato di fosfolipidi attraversato, parzialmente o integralmente da proteine. È attraverso la membrana che avvengono i flussi di materia, energia e informazioni.

La materia entra nella cellula mediante trasporto passivo quando le molecole diffondono seguendo il gradiente di concentrazione: da dove sono più concentrate verso dove lo sono meno. Questo tipo di trasporto non prevede dispendio di energia.

Quando invece una cellula è costretta a consumare energia (ATP) per far entrare o uscire molecole (spesso andando contro il gradiente di concentrazione) si parla di trasporto attivo.

4.5 Respirazione e fotosintesi

La respirazione cellulare è un processo metabolico attraverso cui le sostanze organiche cariche di energia chimica potenziale, vengono ossidate e degradate in molecole più semplici e inorganiche: H_2O e CO_2 . All'interno della cellula l'ossigeno ossida le sostanze organiche dei nutrienti mediante reazioni catalizzate da enzimi, liberando una forma di energia chimica potenziale indispensabile alla cellula: la molecola dell'ATP.

Gli organismi autotrofi, come le piante e alcuni unicellulari, non prelevano la materia organica dall'esterno, ma la producono a partire da composti semplici inorganici.

In particolare negli organismi fotosintetici è l'energia luminosa che permette di assemblare gli atomi di carbonio, idrogeno e ossigeno dell'anidride carbonica e dell'acqua per costruire, mediante una complessa sequenza di reazioni chimiche catalizzate da enzimi, molecole organiche complesse (nutrienti). I nutrienti saranno successivamente utilizzati sia per la costruzione del corpo della pianta, sia come combustibile nel processo della respirazione cellulare.

4.6 I flussi di informazioni

Per relazionarsi con l'ambiente in cui sono inseriti gli organismi devono poterlo percepire. Gli animali sono organismi che in modo più evidente rispondono ai segnali attraverso il movimento o comportamenti manifesti che gli consentono di adeguarsi opportunamente alle condizioni ambientali. Ma anche gli organismi unicellulari, i funghi e i vegetali percepiscono l'ambiente e si adeguano non meno efficacemente. Lo scambio di informazioni, veicolate sempre da forme di energia o di materia, avviene ai differenti livelli della complessità biologica: all'interno del sistema cellulare, fra cellula e cellula, fra le diverse parti di un organismo, fra i diversi organismi di una stessa specie o di specie diverse e fra questi e l'ambiente abiotico in cui sono inseriti. I diversi livelli, come ormai abbiamo chiarito, sono integrati e la complessità dei circuiti di informazione è davvero enorme. Strutture, organi e apparati diversi lavorano per monitorare l'ambiente esterno e rispondere agli stimoli mediante attività elettrica e chimica.

5. I sistemi abiotici

5.1 Le rocce e i loro costituenti

Gli atomi della materia, disposti secondo regole che conferiscono proprietà fisiche e chimiche tipiche di ciò che i geologi definiscono "minerali", rappresentano il più piccolo sistema abiotico che trattiamo in questo contesto.

La maggior parte dei minerali sono costituiti da materia inorganica, sia quelli prodotti per cristallizzazione di un magma o per precipitazione chimica di un soluto, sia prodotti da attività metaboliche di organismi viventi in quanto resti di gusci o scheletri interni ed esterni. Certa materia organica però, se sfugge alla decomposizione ed è trasformata da processi geologici, è riconducibile ai combustibili fossili o a particolari sostanze mineralizzate come l'ambra.

Il processo che porta alla formazione di un minerale cristallino è detto cristallizzazione: un fenomeno che comporta l'accrescimento di un solido a partire da un gas o da una soluzione i cui ioni si riuniscono nei rapporti chimici appropriati secondo una precisa configurazione.

Le rocce sono definibili come aggregati solidi di uno o più minerali presenti in natura. Anche per questa definizione le eccezioni non mancano. Alcune rocce sono, infatti, costituite da materiali non classificabili come minerali cristallini, come ad esempio l'ossidiana

e la pomice che sono formate da materiale vetroso (amorfo) o come la già citata ambra (resina fossile) o il carbone e il petrolio.

L'aspetto macroscopico delle rocce è determinato in parte dalla composizione mineralogica (cioè dalla percentuale relativa dei minerali costituenti) e, in parte, dalla tessitura cioè dalle dimensioni e dalle forme dei granuli e dei cristalli e dal modo in cui essi risultano aggregati (disposti cioè secondo strutture ben definite o in modo caotico).

A loro volta composizione e tessitura sono influenzate dall'origine geologica della roccia stessa, cioè da dove e da come si è formata.

5.2 Principali tipi di minerali

Le strutture formate da atomi di silicio e ossigeno sono molto diffuse nella crosta terrestre e costituiscono una varietà di minerali noti con il termine di silicati. Queste strutture hanno come caratteristica comune quella di contenere gruppi tetraedrici SiO_4^{4-} . I tetraedri possono essere isolati (legati soltanto a cationi), o possono legarsi ad altri tetraedri, formando anelli, catene singole, catene doppie, strati o reticoli tridimensionali.

La calcite (CaCO_3) è uno dei minerali più abbondanti nella crosta terrestre ed è il principale costituente di un gruppo di rocce note come calcari, conosciuti nel loro insieme come carbonati.

I minerali del gruppo degli ossidi sono per definizione composti in cui l'ossigeno è legato ad atomi o cationi di altri elementi. La maggior parte di questi minerali presenta legami ionici e la loro struttura varia a seconda del catione metallico.

Il gruppo dei solfuri include i composti dello ione solfuro (S^{2-}), legato a cationi metallici.

L'unità costruttiva di tutti i solfati è lo ione solfato (SO_4^{2-}). La sua struttura è quella di un tetraedro con un atomo di zolfo al centro, circondato da quattro ioni ossidi (O^{2-}). Uno dei minerali più abbondanti di questo gruppo è il gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

6. I processi geologici

6.1 Il processo magmatico

Le rocce magmatiche devono il nome alla loro origine: il raffreddamento del magma che può avvenire al di fuori della crosta terrestre o in profondità, determina la formazione di rocce differenti. I vulcani sono i principali produttori di rocce magmatiche effusive, i plutoni sono i principali produttori di rocce magmatiche intrusive.

Quando il magma solidifica all'interno della crosta terrestre (plutoni), le rocce originate sono tutte costituite da minerali ben cristallizzati. Nelle rocce magmatiche intrusive i minerali cristallizzano perché il raffreddamento del magma all'interno della crosta terrestre avviene lentamente e i cristalli hanno tempo a sufficienza e condizioni di temperatura e pressione ottimali per accrescere.

Quando il magma solidifica a contatto con la superficie della crosta terrestre, le rocce che vengono originate sono caratterizzate da una massa omogenea, priva di cristalli o con

piccoli cristalli isolati in una matrice di fondo. Questo accade perché il raffreddamento del magma avviene in maniera veloce, i gas vengono liberati velocemente e i cristalli non hanno tempo di accrescersi. Tali rocce prendono il nome di rocce magmatiche effusive e, in questo caso, i cristalli sono isolati e, spesso, poco visibili.

6.2 Il processo sedimentario

Il processo sedimentario è dovuto all'erosione di rocce preesistenti, poi trasportate e sedimentate. L'erosione è provocata, in gran parte, dagli agenti atmosferici e consiste nella frammentazione di roccia preesistente e successivo allontanamento dei frammenti (degradazione fisica) oppure nella dissoluzione dei minerali ad opera dell'acqua che agisce da solvente o dell'ossigeno che ossida i minerali (alterazione chimica). Una volta erose, le particelle vengono trasportate per azione di acqua liquida, ghiaccio e vento, e allontanate dalla roccia madre come detriti in sospensione di dimensioni variabili (a seconda dell'energia posseduta dall'agente di trasporto in quel momento) o come sali disciolti in soluzione acquosa. Quando l'agente di trasporto non possiede più l'energia necessaria a muovere il materiale, si verifica la sedimentazione e il luogo in cui viene depositato il materiale viene definito ambiente sedimentario.

Ci sono tre tipi fondamentali di ambiente sedimentario che differiscono per posizione geografica e caratteristiche ambientali: continentale, posto sulla terra emersa (fiumi, laghi, pianure, deserti, ghiacciai); costiero, posto sulle coste marine (spiagge, delta e piani tidali) e marino, posto in mari più o meno profondi (fondali).

6.3 Il processo metamorfico

Il processo metamorfico è dovuto alla ricristallizzazione allo stato solido di rocce preesistenti, sotto l'azione di alte pressioni e temperature.

Le rocce magmatiche e sedimentarie, sottoposte a temperature e pressioni elevate all'interno della crosta terrestre, possono subire profonde modificazioni. Il processo di trasformazione allo stato solido di minerali ad opera di temperatura e pressione produce la terza grande classe di rocce: le rocce metamorfiche.

Le condizioni di temperatura e pressione necessarie al metamorfismo si verificano esclusivamente in profondità, all'interno della crosta terrestre. Esistono due principali tipi di metamorfismo: regionale, quando a seguito di particolari movimenti tettonici compressivi le rocce vengono esposte ad elevate pressioni formando strutture a pieghe e avendo un aspetto scistoso; di contatto, quando le rocce intorno ad una massa incandescente di magma subiscono trasformazioni chimico-fisiche dovute al calore.

6.4 Le strutture geologiche

I processi magmatici effusivi causano, a seconda del tipo di eruzione, edifici vulcanici differenti: le dorsali e i tavolati basaltici (che rappresentano vulcani lineari) sono generati da eruzioni effusive con fuoriuscita di magma fluido; i vulcani a scudo (vulcani centrali con cratere circolare); gli stratovulcani, generati da alternanza di eruzioni esplosive ed

effusive e i coni di cenere, generati da eruzioni esplosive con fuoriuscita di ceneri e lapilli.

I processi magmatici intrusivi possono essere riconosciuti nelle strutture riconducibili a plutoni, antiche camere magmatiche solidificate e poi, successivamente, emerse in superficie a seguito di movimenti tettonici compressivi.

I processi sedimentari sono spesso riconoscibili in natura grazie alla presenza di corpi tabulari definiti, chiamati strati, che sono stati depositi l'uno sull'altro dando luogo alla stratificazione. Ogni strato rappresenta una successiva deposizione di sedimento, questo permette di determinare i rapporti cronologici delle rocce sedimentarie in accordo con il principio di sovrapposizione secondo cui ogni strato è più vecchio di quello soprastante ma è più giovane di quello sottostante. Quando il materiale sedimentario è rappresentato da sostanze legate all'attività metabolica di organismi viventi, si formano strutture sedimentarie di origine organogena.

I processi metamorfici sono riconoscibili in natura dalle pieghe e dai piani di scistosità che testimoniano processi di trasformazione delle rocce avvenute in profondità dove temperatura e pressione sono elevate.

7. Ecosistemi

7.1 Struttura degli ecosistemi

I sistemi abiotici e quelli viventi sono in relazione tra loro e costituiscono sistemi ecologici: gli ecosistemi. Un ecosistema è l'unità che emerge dall'insieme e dalle relazioni fra tutti gli organismi che vivono entro certi confini naturali e di tutti i fattori abiotici con cui interagiscono. Un ecosistema può comprendere un'area vasta, come una foresta o un deserto, o un'area molto limitata, come una piccola pozza d'acqua, ma a qualunque scala dimensionale ci riferiamo, le attività metaboliche degli organismi viventi trasferiscono materia ed energia ai sistemi abiotici e viceversa: si instaurano cioè flussi di materia e di energia tra le varie componenti dell'ecosistema.

L'ecosistema, come ogni sistema, ha un'organizzazione strutturale. Le componenti che lo caratterizzano sono riconducibili al biotopo e alla biocenosi. Il biotopo è l'insieme di tutti i fattori abiotici, fisici e chimici, che caratterizzano quella determinata porzione di atmosfera, idrosfera e litosfera. La biocenosi, o comunità biotica, è l'insieme di tutti gli organismi autotrofi ed eterotrofi che vivono e interagiscono nel biotopo. In base alla principale fonte di nutrimento e di energia, la biocenosi viene categorizzata in differenti livelli trofici: produttori primari, consumatori primari, consumatori secondari, consumatori terziari.

7.2 Flusso di energia e ciclo dei nutrienti

Gli organismi autotrofi convertono l'energia luminosa in energia chimica potenziale delle molecole organiche. Queste passano da un livello trofico al successivo grazie alle relazioni trofiche rappresentate dalla catena alimentare. Quando le molecole organiche vengono utilizzate come combustibile nei processi di respirazione cellulare, circa un 60% della loro energia chimica potenziale non viene convertita nell'energia delle molecole di

ATP, bensì in calore e quindi dissipata dall'organismo e poi dall'intero ecosistema. Inoltre, poiché determinate parti degli organismi non vengono predate dal livello trofico successivo ma vanno invece a nutrire gli organismi detritivori e decompositori, un'altra parte dell'energia chimica potenziale dei nutrienti viene progressivamente persa lungo la catena alimentare: il flusso di energia che l'attraversa si riduce progressivamente. Questo il motivo per il quale in un ecosistema l'energia che arriva ad un determinato livello trofico è circa 1/10 di quella che arrivava al livello trofico precedente. L'assottigliarsi del flusso di energia lungo la catena alimentare fa sì che quantitativamente gli organismi che rientrano nei diversi livelli trofici progressivamente diminuiscono dai produttori ai consumatori di vario livello.

In linea del tutto teorica, per quanto riguarda la materia, gli ecosistemi possono invece considerarsi autosufficienti, in quanto essa è sottoposta ad una ciclizzazione continua: la fotosintesi converte le molecole inorganiche del biossido di carbonio e di acqua in molecole organiche; queste si trasferiscono da un livello all'altro della catena alimentare, ma in parte costituiscono materia di scarto che va ad alimentare i decompositori.

Il processo di decomposizione (ovvero l'attività metabolica dei decompositori che si nutrono e respirano) chiude il ciclo della materia nel senso che, una volta decomposta, la materia torna ad essere inorganica e disponibile per i produttori (CO₂, H₂O e sali minerali). In realtà gli scambi di materia da un sistema ecologico ad un altro sono molto frequenti. È però vero che gli ambienti naturali, non alterati da impatti di tipo antropico, possono essere relativamente autosufficienti per quanto riguarda la materia.

8. Le relazioni ecosistemiche

8.1 Relazioni tra componenti biotiche

All'interno di una biocenosi le relazioni possono essere sia intraspecifiche, se gli organismi appartengono alla stessa specie, sia interspecifiche, se appartengono a specie diverse.

In tutti i casi gli organismi che si relazionano possono instaurare forme di competizione quando entrambi necessitano di una risorsa disponibile in quantità limitata (ad esempio il cibo, il territorio, la luce, il partner), o di cooperazione quando almeno una delle due specie trae vantaggi dalla relazione senza arrecare danno all'altra.

Le relazioni di competizione che avvengono per i nutrienti sono le relazioni trofiche e comprendono i rapporti di predazione ed erbivoria tra specie diverse. Questo tipo di relazioni è quello su cui si basa la catena alimentare vista nel precedente paragrafo.

Le relazioni interspecifiche di cooperazione, cioè quando almeno una delle due specie trae vantaggi dalla relazione senza arrecare danno all'altra, sono rappresentate ad esempio dal mutualismo quando entrambe le specie traggono beneficio, e dal commensalismo quando una specie trae beneficio e l'altra non riceve né danno né beneficio.

8.2 Relazioni tra componenti abiotiche

Tra le componenti abiotiche dell'ecosistema, si verificano interazioni che producono cambiamenti chimici e fisici. Parlando del processo sedimentario, abbiamo visto come agenti atmosferici quali acqua, vento e ghiaccio possono erodere la roccia preesistente, disgregarla e trasportarla anche molto lontano rispetto al luogo di origine, ma vi sono anche altri processi, sempre ad opera degli agenti atmosferici, responsabili di alterazione della roccia che operano a diversa scala dimensionale e temporale rispetto all'erosione.

La degradazione meteorica è l'insieme dei processi attraverso i quali le rocce vengono demolite dagli agenti atmosferici, e si verifica quando i minerali che le costituiscono reagiscono con l'aria e con l'acqua. Con queste reazioni chimiche alcuni minerali si disciolgono, mentre altri si combinano con l'acqua o con i gas atmosferici per formare nuovi composti chimici.

La dissoluzione e precipitazione dei carbonati presenti nelle rocce carbonatiche ad opera dell'acqua ne è un esempio: lo ione carbonato (CO_3^{2-}) del calcare (carbonato di calcio CaCO_3) a contatto con l'acqua viene solubilizzato e asportato. Le grotte carsiche sono un evidente risultato macroscopico di questo fenomeno.

Un altro esempio di interazione tra componenti abiotiche è quello che si verifica durante le eruzioni vulcaniche, quando il magma in risalita interagisce con le rocce incassanti e i gas vulcanici si liberano nell'atmosfera.

8.3 Relazioni tra componenti biotiche e abiotiche

Tra le componenti biotiche e abiotiche esistono relazioni da molto semplici a molto complesse che nel tempo hanno portato a meccanismi di evoluzione adattativa nel comparto biotico e modificazioni chimiche e fisiche nel comparto abiotico. Per comprendere questo tipo di relazioni, proviamo a pensare a quello che succede agli organismi al variare delle condizioni ambientali. Se le variazioni avvengono entro un certo intervallo di tempo, l'organismo modifica temporaneamente comportamenti e funzionamenti interni, si verificano dunque processi di acclimatazione. Un esempio di questo processo è rappresentato dalle piante, in grado di percepire il progressivo abbassamento delle temperature e la riduzione delle ore di luce durante la giornata e reagire di conseguenza, rallentando le attività metaboliche per risparmiare energia e materia al fine di superare la stagione sfavorevole.

Alcuni animali affrontano i periodi di condizioni ambientali sfavorevoli riducendo al minimo le attività metaboliche.

L'acclimatazione è un adattamento degli organismi alla variazione delle condizioni ambientali che funziona esclusivamente entro un certo intervallo di variazione, oltre il quale l'organismo non riesce a sopportare la variazione e va in "tilt".

In risposta alle variazioni ambientali lente e graduali, oppure più o meno rapide ma non transitorie, è l'intera popolazione che di generazione in generazione si trasforma adattandosi ad un ambiente che cambia nel tempo. L'adattamento evolutivo tende cioè a "fissare" caratteristiche all'interno della popolazione che ne favoriscono la "fitness" rispetto ad un determinato ambiente. Grazie ad un processo che C. Darwin chiamò "sele-

zione naturale” gli individui di una popolazione che si riproducono maggiormente sono quelli che posseggono caratteristiche di buon adattamento alle condizioni ambientali. Quelle caratteristiche verranno perciò ereditate con maggior probabilità di generazione in generazione.

In questo modo la popolazione tenderà a trasformarsi nel tempo adattandosi ad un ambiente anch'esso in continua evoluzione.

9. Il sistema Terra

9.1 La tettonica delle placche

La litosfera non costituisce un involucro continuo, ma è frammentata in circa una dozzina di grandi placche in movimento e una gran quantità di placche più piccole. Le placche possono essere di diversa natura (continentale o oceanica) e si muovono, l'una rispetto all'altra, in diversi modi (divergente, convergente, trascorrente). Le placche possono essere riconosciute collocando geograficamente su di un planisfero quelle che sono alcune strutture geologiche e fenomeni connessi come: le catene montuose, i vulcani centrali, le dorsali, le fosse oceaniche e gli ipocentri di terremoti. A seconda del tipo di placca (oceanica o continentale) e del tipo di margine (divergente, convergente o trasforme) si possono verificare, in tempi geologici, strutture e fenomeni che caratterizzano il sistema Terra.

9.2 Il clima

Le quattro sfere (atmosfera, idrosfera, litosfera e biosfera) interagiscono tra loro facendo funzionare l'intero sistema Terra come un sistema aperto, in cui l'energia proviene dal Sole (energia luminosa) e dalle profondità (energia geotermica); la materia, in quantità irrilevante rispetto a quella che circola all'interno del sistema, dallo spazio (meteore e meteoriti). Un esempio delle interazioni che si instaurano tra le sfere a scala globale è il clima, che rappresenta l'insieme dei cambiamenti atmosferici, riguardanti fattori come la temperatura, l'umidità e la pressione osservati nell'arco di alcuni decenni in una particolare zona della superficie terrestre. Il clima coinvolge tutte le componenti del sistema Terra e per descrivere come questo si comporta nello spazio e nel tempo occorre considerare le interazioni tra le quattro sfere.

9.3 Il ciclo del carbonio

Attraverso i cicli biogeochimici la materia (in forma di elementi o composti chimici) circola tra atmosfera, idrosfera, litosfera e biosfera. Le quattro sfere possono dunque essere considerate come serbatoi geochimici e biochimici collegati da flussi che trasportano la materia da un serbatoio a un altro. Gli atomi di carbonio passano continuamente da un organismo all'altro, all'atmosfera, idrosfera e litosfera; l'insieme dei possibili percorsi di un atomo di carbonio prende il nome di ciclo del carbonio.

Analizzando il ciclo del carbonio, componente fondamentale della materia vivente,

è importante tenere presente che opera su due differenti scale temporali: una geologica (lunga, dell'ordine di milioni di anni) e una biologica (breve, dell'ordine degli anni, mesi o giorni) su scala planetaria. È importante anche ricordare che raramente il ciclo biogeochimico di un elemento può essere considerato separatamente dal ciclo di altri elementi, in quanto il processo prevede trasformazioni chimiche che uniscono cicli di diversi elementi (es. il carbonio è connesso con il ciclo dell'acqua, delle rocce, dell'ossigeno e del calcio). Inoltre le sfere non sono "isolate" ma si compenetrano una dentro l'altra, sia a livello macroscopico, sia a livello microscopico.

Lo ione bicarbonato, in presenza di ioni calcio forma il carbonato di calcio (CaCO_3) che, essendo poco solubile, precipita chimicamente e si sedimenta sul fondo oceanico come sostanza solida: ecco un primo passaggio del carbonio da idrosfera (oceano) a litosfera (sedimento e roccia carbonatica). Il flusso inverso, tra litosfera e idrosfera, è il responsabile della gran quantità di carbonio presente negli oceani, sotto forma di ioni HCO_3^- e Ca^{++} disciolti, e si verifica con la dissoluzione delle rocce carbonatiche ad opera delle acque superficiali e di precipitazione, acidificate dalla CO_2 .

Sempre negli oceani come nelle terre emerse, avvengono altri trasferimenti: tra idrosfera e biosfera o tra atmosfera e biosfera mediante i processi di *fotosintesi* degli organismi autotrofi che a partire dalla CO_2 incorporano nelle loro cellule e tessuti i composti organici del carbonio (glucidi, lipidi e proteine), o attraverso la formazione di scheletri interni ed esterni trasformano i carbonati disciolti in carbonato di calcio (es. scheletro dei coralli o delle alghe, gusci dei molluschi o dei crostacei, ecc). Una volta all'interno degli organismi, il carbonio può seguire vie più o meno complesse a seconda dell'ingresso o meno nella rete trofica e della sua complessità.

Il carbonio può essere liberato direttamente in atmosfera mediante la respirazione cellulare degli autotrofi o degli eterotrofi, oppure come già detto essere incorporato attraverso la fotosintesi nei tessuti vegetali e destinato ad entrare nella rete alimentare, dove potrà essere trattenuto per un tempo variabile a seconda del livello trofico a cui si troverà e della durata del ciclo di vita degli organismi. Se le parti organiche dei viventi andranno incontro a processi di *decomposizione* da parte dei microorganismi, il carbonio ritornerà più o meno velocemente in atmosfera come CO_2 ; se, invece, andranno incontro a processi di *fossilizzazione*, il carbonio diventerà parte della litosfera. La materia organica fossilizzata si concentrerà nei giacimenti petroliferi, di gas metano e di carbone, mentre il carbonato di calcio degli scheletri e dei gusci sedimenterà formando rocce bioclastiche di origine organogena. Un'altra piccola parte di materia costituente i vegetali o parti di essi può essere ossidata direttamente dagli *incendi* delle foreste e in altre combustioni, rientrando direttamente in atmosfera senza entrare nel flusso della rete trofica.

Gli oceani sono anche in grado di trasferire carbonio sotto forma di CO_2 verso l'atmosfera, mediante *scambi gassosi* nell'interfaccia aria-acqua. Questo processo dipende da diversi fattori, tra cui la temperatura dell'aria e delle acque marine, la composizione chimica di queste, la velocità del vento che favorisce lo scambio di questo gas e il metabolismo degli organismi marini.

Per quanto riguarda gli scambi tra litosfera e atmosfera o idrosfera, il carbonio contenuto nelle rocce carbonatiche della crosta terrestre (che rappresenta il più grande serbatoio sulla Terra) attraverso la *tettonica delle placche* viene riportato in superficie

dalla formazione dei rilievi (*orogenesi*) o dal *vulcanismo*. In tempi geologici (cioè di milioni di anni) le rocce carbonatiche tornano ad emergere in superficie e sono soggette all'alterazione superficiale degli agenti atmosferici, disciogliendosi in acqua (*dissoluzione*) e liberando CO₂ (*degassamento*). Tali rocce, invece, se sono trascinate in zone profonde fondendo producono magmi, la cui risalita in superficie comporta eruzioni vulcaniche con emissione di gas vulcanici contenenti CO₂.

9.4 I limiti del pianeta

Che succederebbe se una enorme sfera di vetro intrappolasse la città in cui abitiamo? Probabilmente scopriremmo presto quanto siamo dipendenti dalla natura e dalle sue risorse distribuite in modo non uniforme sul pianeta. La cupola trasparente trasformerebbe in sostanza un sistema aperto e, quindi, attraversato da flussi di materia ed energia, in un sistema chiuso, alimentato sì dall'energia solare, ma totalmente isolato per quanto attiene la materia sia in ingresso (input) sia in uscita (output). Non è difficile capire che in questo modo la città soccomberebbe nel giro di poco tempo, sia perché incapace di produrre al proprio interno tutto ciò che serve al sostentamento dei propri abitanti, sia perché sommersa e avvelenata dai propri rifiuti. A differenza degli ecosistemi naturali, ecologicamente produttivi e capaci di riciclare i nutrienti, i sistemi fortemente antropizzati, gli agglomerati urbani, non sono affatto autosufficienti: gli input e output di materia che quotidianamente permettono ad un ecosistema urbano di funzionare sono molto consistenti e possono interessare zone della Terra anche molto distanti. Basta pensare a ciò che acquistiamo ogni giorno e alla provenienza di certe materie prime.

Riflettere su ciò permette di comprendere cosa significa **sostenibilità ambientale**. La Terra, a differenza di una città, è un sistema fondamentalmente chiuso ovvero alimentato da un flusso di energia (il nostro Sole) ma privo di input e output di materia. Di fatto il pianeta si trova all'interno di una sfera trasparente rappresentata dalla nostra atmosfera. Questo significa che i cicli di materia all'interno del sistema si devono chiudere e che non possiamo permetterci né di alterarli né di consumare risorse senza concedere loro il tempo di rinnovarsi. Il nostro pianeta ha dimensioni ben maggiori di una città intrappolata all'interno di sfera di vetro ed è per questo che faticiamo a comprendere i limiti del sistema che ci ospita. Gli effetti del nostro stile di vita sono dislocati nello spazio e differiti nel tempo. Inoltre vi sono ancora zone del pianeta non antropizzate o abitate da popoli con stili di vita decisamente più sostenibili di quello che può essere facilmente immaginato pensando alla vita in città. La consapevolezza di vivere all'interno di un sistema chiuso e limitato è però necessaria per arrivare a riorientare i nostri stili di vita verso modelli più sostenibili ed equi (Bertolino, Perazzone, 2005).

BIBLIOGRAFIA

Angelotti M., Perazzone A., Tonon M.D., Bertolino F. (2009). *Educating the educators – primary teacher education*. In Gray D., Colucci-Gray L. & Camino E. (a cura di), *Science, Society and*

- Sustainability. Education and Empowerment for an Uncertain World*. New York: Routledge, pp. 154-187.
- Arcà, M. (2009). *Insegnare Biologia*. Calci (PI): Naturalmente Scienza.
- Cini, M. (1994). *Un paradiso perduto*. Milano: Feltrinelli.
- Carpignano R., Cerrato G., Lanfranco D., Pera T. (2013). *La ChimicaMaestra - Didattica della Chimica per futuri maestri*. Verbania-Intra: Editore Il Baobab - l'albero della ricerca.
- Bertolino F., Perazzone A. (2005). *La città sottovetro... Ecologia, etica, educazione alla sostenibilità*, in E. Falchetti e S. Caravita (a cura di), *Per una ecologia dell'educazione ambientale*. Torino: Edizione Scholé Futuro, pp. 217-225.
- Colucci-Gray L., Perazzone A., Dodman M., Camino E. (2013). *Science education for sustainability, epistemological reflections and educational practices: from natural sciences to trans-disciplinarity*, in «Cultural Studies of Science Education», 8 (1), pp. 127-183.
- Funtowicz, S.O. (2001). *Post-normal science. Science and governance under conditions of complexity*, in Tallacchini M., Doubleday R. (Eds.), *Science Policy and the Law: Relationships Among Institutions, Experts, and The Public*, in «Notizie di Politeia», vol. XVII, 62, pp. 77-85.
- Maturana H., Varela F. (1987). *L'albero della conoscenza*. Milano: Garzanti.

GIUSEPPINA CERRATO • Giuseppina Cerrato holds a degree in Chemistry and is Associate Professor of Inorganic Chemistry at the Department of Chemistry, University of Turin. She teaches Chemistry and Didactics of Sciences, with particular attention to the teacher education in the primary school. She is a member of (i) the Teaching Division of the Italian Chemical Society, (ii) the Research Group in the Teaching of Sciences, University of Turin, and President of the Regional Section of the SCI (Società Chimica Italiana) for the 2020-2022 period.

E-MAIL • giuseppina.cerrato@unito.it

MAURO FANELLI • Mauro Fanelli holds a degree in Environmental Biology. As a Research Fellow in the Department of Chemistry of the University of Turin, he dealt with research projects which promote proper nutrition education in school and preschool age.

E-MAIL • mailto:fanemau@gmail.com

MATTEO LEONE • Matteo Leone holds a degree in Physics and is Full Professor of Didactics and History of Physics at the Department of Philosophy and Education Sciences, University of Turin. He teaches history of physics in 1800s and 1900s and physics education at the primary level. He is currently President of the Master degree in Primary Education and Director of the Museum of Physics at the University of Turin.

E-MAIL • matteo.leone@unito.it

LAURA PERAZZONE • Anna Perazzone holds a degree in Natural Sciences. She is a researcher in the Department Life Sciences and Systems Biology, University of Turin. A

member of the Inter-University Research Centre I.R.I.S. (Interdisciplinary Research Institute on Sustainability), she deals with Science Education and training of school teachers, particularly in the field of life sciences, environmental education and education for sustainable development.

E-MAIL • anna.perazzone@unito.it

MARCO DAVIDE TONON • Marco Davide Tonon is a researcher from the Department of Earth Sciences at the University of Turin and, until 2021 November, was director of I.R.I.S. (Interdisciplinary Research Institute on Sustainability). His main area of teaching and research is teaching Earth sciences and sustainability education. He teaches courses and supervises laboratories for the degree course in Primary education and for the Master's degree of Natural Systems Sciences at the University of Turin.

E-MAIL • marco.tonon@unito.it