CAPITOLO

15

Gli ecosistemi: energia e materia

In un bosco nulla si spreca: soltanto l'energia se ne va, e il Sole ogni mattina la restituisce.

OBIETTIVI

1. Distinguere fattori biotici e abiotici e leggere una curva di tolleranza; distinguere habitat e nicchia ecologica.
2. Riconoscere produttori, consumatori, detritivori e decompositori in una catena e in una rete alimentare.
3. Applicare la regola del 10 % e interpretare le piramidi dell'energia, della biomassa e dei numeri.
4. Descrivere il ciclo del carbonio e spiegare perché l'energia scorre mentre la materia circola.
5. Spiegare bioaccumulo e biomagnificazione e studiare sul campo un piccolo ecosistema.

INDICE DEL CAPITOLO

15.1 L'ecologia e l'ambiente 2
15.2 Il flusso dell'energia: chi mangia chi 5
15.3 Le piramidi ecologiche e la produttività 8
15.4 Il ciclo del carbonio 12
15.5 Bioaccumulo e biomagnificazione 14
15.6 Sul campo: studiare un ecosistema vicino a scuola 16

Scienze naturali 2 · Parte IV · Organismi e ambiente · versione 1.0
Capitolo 15: Gli ecosistemi: energia e materia · pagine 337–358 del volume completo · estratto per lo studio

Un faggio dell'Appennino, in una giornata di giugno, cattura la luce con migliaia di foglie. Un bruco ne rosicchia una, una cinciallegra cattura il bruco e lo porta al nido; in autunno le foglie cadono e, sotto la lettiera, funghi e lombrichi le trasformano lentamente in terriccio. Nessuno di questi organismi vive da solo: ciascuno dipende dagli altri e dall'ambiente fisico che lo circonda, cioè dalla luce, dall'acqua, dal suolo, dalla temperatura.

Nella Parte III abbiamo descritto i viventi gruppo per gruppo. Ora li guardiamo insieme, al lavoro dentro un ecosistema. Ci chiederemo da dove viene l'energia che li fa vivere e dove va a finire, perché i grandi predatori sono sempre pochi, come gli stessi atomi di carbonio passano dall'aria alle foglie, agli animali, al suolo e di nuovo all'aria. Vedremo infine che lungo le catene alimentari possono viaggiare anche sostanze pericolose, e come si studia un ecosistema con le proprie mani, a pochi passi da scuola.

15.1 L'ecologia e l'ambiente

15.1.1 Che cosa studia l'ecologia

L'**ecologia** è la scienza che studia le relazioni degli organismi fra loro e con il loro ambiente. Il nome fu proposto nel 1866 dal biologo tedesco Ernst Haeckel, a partire dal greco *oîkos*, «casa», e *lógos*, «discorso»: l'ecologia è, letteralmente, lo studio della casa dei viventi.

Nel Capitolo 1 hai incontrato i livelli di organizzazione della vita. L'ecologia si occupa di quelli più alti. Studia l'**individuo** nel suo ambiente (quanto caldo sopporta un capriolo?), la **popolazione** (quanti caprioli vivono in un bosco, e come cambia il loro numero?), la **comunità** (quali specie convivono nel bosco, e come interagiscono?), l'**ecosistema**, cioè la comunità insieme all'ambiente fisico, e infine i grandi ambienti della Terra caratterizzati da un clima e da una vegetazione tipici, i **biomi**, fino alla **biosfera**. In questo capitolo lavoriamo soprattutto a livello di ecosistema; popolazioni, comunità e biomi saranno il tema del Capitolo 16.

Un ecosistema non ha confini netti: può essere grande come una foresta o piccolo come uno stagno, una pozza fra gli scogli, un tronco che marcisce. Lo definisce chi lo studia, scegliendo una porzione di natura in cui gli scambi interni di materia ed energia sono più intensi di quelli con l'esterno.

15.1.2 Fattori biotici e abiotici

Ogni organismo è influenzato da due tipi di fattori ambientali. I **fattori biotici** sono gli altri esseri viventi: le prede e i predatori, i concorrenti per lo stesso cibo, i parassiti, i compagni della stessa specie. I **fattori abiotici** sono le caratteristiche fisiche e chimiche dell'ambiente:

- la **luce**, fonte di energia per la fotosintesi; nei boschi fitti e nelle acque profonde è spesso scarsa;
- la **temperatura**, da cui dipende la velocità delle reazioni cellulari catalizzate dagli enzimi (Capitolo 5);
- l'**acqua**, la sua disponibilità e, negli ambienti acquatici, la quantità di ossigeno disciolto e di sali (salinità);
- il **suolo**, con la sua tessitura, l'acqua che trattiene, i sali minerali e la sostanza organica che contiene;
- il **vento**, le pendenze e l'esposizione al sole di un versante, che cambiano il microclima.

COLLEGAMENTI

Il suolo, dove geologia e biologia si incontrano. In *Scienze naturali 1* hai visto che il suolo nasce dalla degradazione delle rocce ed è un miscuglio di frammenti minerali, argille, acqua, aria e humus. Ora puoi leggerlo con gli occhi del biologo: l'humus è sostanza organica prodotta dai decompositori, le radici e i lombrichi lo rimescolano e lo arieggiano, e i batteri liberano i sali minerali che le piante assorbono. Il suolo è insieme un fattore abiotico e il prodotto di un'intensa attività biologica: per formarne pochi centimetri possono servire secoli, mentre per perderlo bastano un'alluvione o una colata di cemento.

15.1.3 Fattori limitanti e intervallo di tolleranza

Ogni specie sopravvive soltanto entro certi valori di ciascun fattore abiotico. Se misuriamo l'attività, la crescita o l'abbondanza degli individui al variare, per esempio, della temperatura, otteniamo una curva a campana (Figura 15.1). Al centro c'è l'**intervallo ottimale**, dove gli individui crescono e si riproducono meglio. Ai lati ci sono le zone di **stress**, dove la specie sopravvive ma con difficoltà: cresce poco e si riproduce meno. Oltre i **limiti di tolleranza** la specie non può vivere. L'insieme dei valori compresi fra i due limiti è l'**intervallo di tolleranza** della specie per quel fattore.

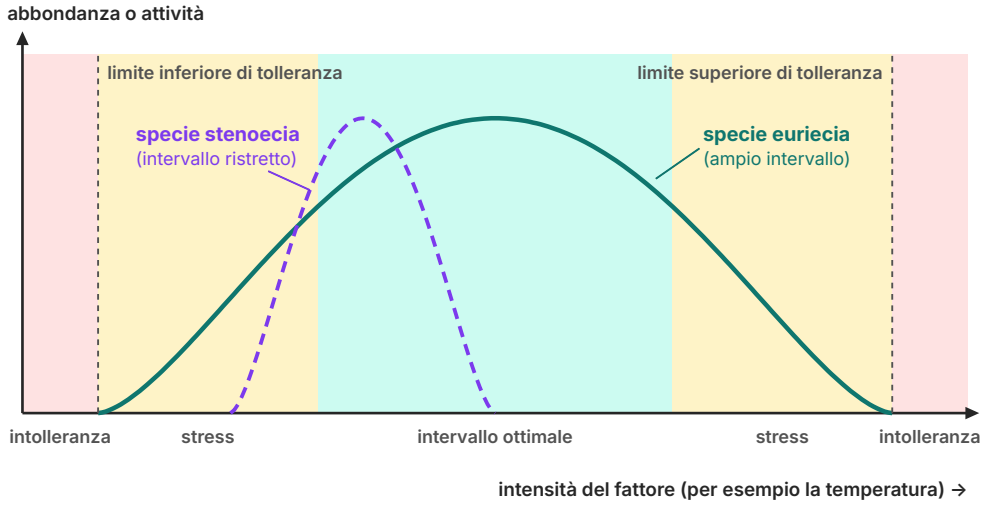


Figura 15.1 Curva di tolleranza per un fattore abiotico (schema qualitativo, senza valori numerici). Le fasce colorate si riferiscono alla specie euriecia (curva continua); la specie stenoecia (curva tratteggiata) ha un intervallo di tolleranza molto più ristretto.

Le specie con un intervallo di tolleranza ampio si dicono **euriecie** (dal greco *eurýs*, «largo»); quelle con un intervallo ristretto, **stenoecie** (*stenós*, «stretto»). La trota fario, per esempio, vive soltanto in acque fresche e ben ossigenate, mentre la carpa sopporta acque più calde e più povere di ossigeno. Le specie molto sensibili si usano come **bioindicatori**: i licheni, che hai incontrato nel Capitolo 12, scompaiono dai tronchi dove l'aria è inquinata, e la loro presenza o assenza racconta la qualità dell'aria meglio di una singola misura.

Nel Capitolo 5 hai chiamato *fattore limitante* quello che frena la fotosintesi quando è scarso. Lo stesso concetto vale per un intero organismo: la crescita di una popolazione è limitata dal fattore che si trova più lontano dai valori ottimali, anche se tutti gli altri sono favorevoli. Un prato può avere luce, calore e sali in abbondanza, ma in un'estate senza pioggia è l'acqua a decidere quanto cresce. Il principio fu formulato nell'Ottocento per le piante coltivate, dove l'aggiunta di un concime serve solo se manca proprio quel nutriente (la «legge del minimo», legata al nome del chimico tedesco Justus von Liebig).

15.1.4 Habitat e nicchia ecologica

L'**habitat** di una specie è il luogo in cui vive, descritto dalle sue caratteristiche: il sottobosco di una faggeta, il fondale fangoso di un lago, la corteccia di un albero. La **nicchia ecologica** è invece il ruolo che la specie svolge nell'ecosistema: che cosa mangia e da chi è mangiata, in quali ore è attiva, entro quali valori dei fattori abiotici vive, di quali risorse ha bisogno per riprodur-

si. Nello stesso bosco l'allocco e lo sparviere condividono l'habitat, ma non la nicchia: l'allocco caccia di notte soprattutto piccoli mammiferi, lo sparviere caccia di giorno soprattutto piccoli uccelli.

> **DA RICORDARE**
> Si dice spesso che l'habitat è l'**indirizzo** di una specie e la nicchia ecologica è il suo **mestiere**. Molte specie possono avere lo stesso indirizzo; due specie che cercassero di fare a lungo lo stesso mestiere nello stesso luogo entrerebbero in una competizione molto dura, come vedrai nel Capitolo 16.

15.2 Il flusso dell'energia: chi mangia chi

15.2.1 Produttori, consumatori, decompositori

Quasi tutta l'energia che fa funzionare gli ecosistemi arriva dal Sole. Gli autotrofi fotosintetici (Capitolo 5), cioè piante, alghe e cianobatteri, la catturano e la immagazzinano come energia chimica nelle molecole organiche che costruiscono a partire da CO_2, acqua e sali minerali. In un ecosistema sono i **produttori**: producono la materia organica di cui vivono tutti gli altri. Solo una piccola parte della luce che colpisce una foglia, in genere intorno all'1 %, finisce immagazzinata nella sostanza organica: il resto viene riflesso, attraversa la foglia o si disperde come calore.

I **consumatori** sono eterotrofi che si nutrono di altri organismi viventi. I **consumatori primari** sono gli erbivori, che mangiano i produttori (il capriolo, il bruco, il ghiro). I **consumatori secondari** mangiano i consumatori primari (la cinciallegra che cattura i bruchi, la volpe che caccia i topi). I **consumatori terziari** si nutrono dei consumatori secondari (lo sparviere che caccia la cinciallegra). Un animale che si nutre sia di vegetali sia di animali, come la volpe, il cinghiale o l'essere umano, è un **onnivoro**, e può occupare più livelli a seconda di che cosa mangia.

C'è poi un gruppo di organismi senza i quali l'ecosistema si soffocherebbe sotto i propri rifiuti. I **detritivori**, come lombrichi, porcellini di terra, millepiedi e molte larve di insetti, ingeriscono foglie morte, resti ed escrementi e li frammentano. I **decompositori**, cioè funghi e batteri, completano il lavoro: liberano enzimi digestivi all'esterno delle proprie cellule, demoliscono la materia organica morta e ne assorbono i prodotti. Con la loro respirazione restituiscono all'ambiente CO_2, acqua e sali minerali, che i produttori possono usare di nuovo.

15.2.2 Catene e reti alimentari

Una **catena alimentare** è una sequenza di organismi in cui ciascuno è il cibo del successivo. In una faggeta dell'Appennino, per esempio: **faggio → bruco → cinciallegra → sparviere**.

Le frecce vanno dall'organismo mangiato a quello che lo mangia, cioè nella direzione in cui passano la materia e l'energia. Ogni posizione della catena è un **livello trofico** (dal greco *trophé*, «nutrimento»): il primo livello è quello dei produttori, il secondo quello dei consumatori primari, e così via.

In natura, però, quasi nessun organismo mangia una sola specie, e quasi nessuno è mangiato da una sola specie. Le faggiole, i semi del faggio, nutrono topi selvatici, ghiri e cinghiali; i topi sono cacciati dalla volpe e dall'allocco; il lupo preda caprioli e cinghiali. Le catene si intrecciano e formano una **rete alimentare** (Figura 15.2). Una rete con molti collegamenti è più stabile di una catena isolata: se una preda diventa scarsa, il predatore può ripiegare su un'altra. Per questo la scomparsa di una specie non resta mai un fatto isolato, ma si propaga, in modo spesso difficile da prevedere, a molte altre.

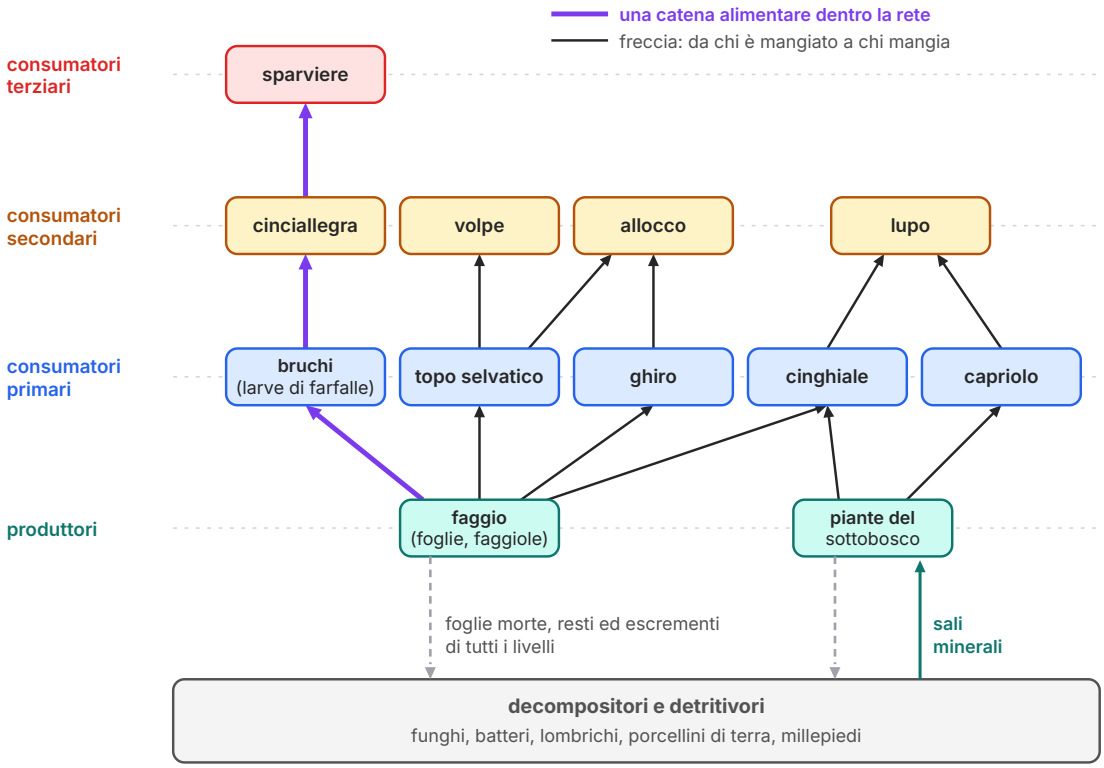


Figura 15.2 Una rete alimentare semplificata di una faggeta dell'Appennino centrale. Le frecce vanno da chi è mangiato a chi mangia; in viola, una delle catene alimentari che compongono la rete. Molti collegamenti reali sono omessi: la volpe, per esempio, mangia anche frutti e insetti, e il cinghiale anche radici e invertebrati del suolo.

ERRORE FREQUENTE

«La freccia vuol dire "mangia"». In una catena alimentare la freccia indica dove va l'energia: «faggio → bruco» si legge «il faggio è mangiato dal bruco». Disegnare le frecce al contrario è l'errore più comune negli esercizi.

«I decompositori sono l'ultimo anello della catena». I decompositori non stanno in cima alla catena: ricevono foglie morte, cadaveri ed escrementi da *tutti* i livelli trofici, produttori compresi, e restituiscono i sali minerali ai produttori.

15.2.3 L'energia scorre, la materia circola

Seguiamo l'energia e la materia attraverso l'ecosistema (Figura 15.3). Il cibo che passa da un livello trofico al successivo trasporta insieme materia (le molecole organiche) ed energia (quella chimica contenuta in quelle molecole). Ma il destino delle due è diverso.

A ogni passaggio una parte dell'energia viene usata dagli organismi per vivere, cioè per muoversi, mantenere la temperatura del corpo, costruire molecole, e alla fine si disperde nell'ambiente come **calore**, che nessun vivente può riutilizzare. Anche i decompositori, demolendo la materia morta, liberano calore. L'energia attraversa quindi l'ecosistema **in una sola direzione**: entra come luce, esce come calore, e l'ecosistema sopravvive solo perché il Sole continua a rifornirlo.

La materia, invece, non si perde: gli atomi di carbonio, ossigeno, azoto, fosforo passano dai produttori ai consumatori, da tutti ai decompositori, e da questi tornano all'ambiente in forma inorganica, pronti per essere assorbiti di nuovo dai produttori. La materia **circola**. La Terra è un sistema che scambia energia con lo spazio, ma quasi nessuna materia: gli atomi di cui siamo fatti sono stati, nel tempo, parte di innumerevoli altri organismi.

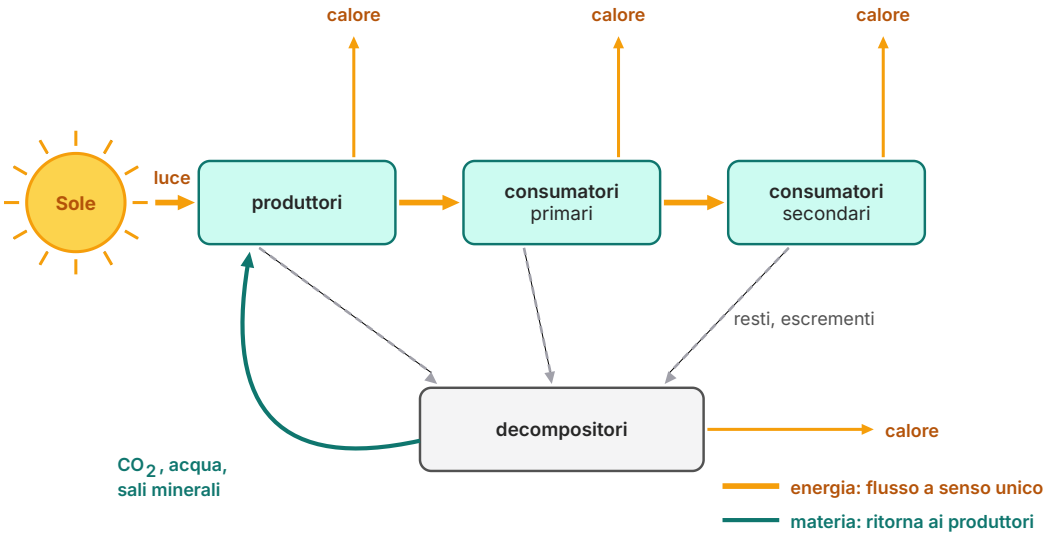


Figura 15.3 Flusso dell'energia e ciclo della materia in un ecosistema (schema). Le frecce gialle orizzontali sono il cibo, che porta insieme energia e materia; a ogni livello una parte dell'energia esce come calore. I decompositori restituiscono ai produttori la materia in forma inorganica.

IN SINTESI

L'energia scorre, la materia circola. L'energia entra negli ecosistemi come luce, passa da un livello trofico all'altro come energia chimica e ne esce come calore: non si ricicla. La materia passa dall'ambiente ai viventi e torna all'ambiente grazie ai decompositori: si ricicla di continuo.

15.3 Le piramidi ecologiche e la produttività

15.3.1 La regola del 10 %

Quanta dell'energia contenuta in un livello trofico arriva al livello successivo? Molto poca. Un capriolo non mangia tutte le piante del bosco; delle piante che mangia, una parte non viene digerita ed è eliminata con gli escrementi; di quella assimilata, la maggior parte si consuma nella respirazione cellulare per vivere e si disperde come calore. Soltanto ciò che resta diventa nuovo corpo del capriolo, cioè carne, ossa, pelo, ed è disponibile per un lupo.

Le prime misure di questo tipo furono fatte all'inizio degli anni Quaranta del Novecento dall'ecologo statunitense Raymond Lindeman, in un piccolo lago del Minnesota. Oggi sappiamo che l'efficienza del passaggio da un livello trofico al successivo varia molto da un ecosistema

all'altro, di solito fra il 5 e il 20 %. Come regola media si usa la **regola del 10 %**: *ogni livello trofico riceve circa un decimo dell'energia del livello precedente*. È più bassa, per esempio, quando i consumatori sono uccelli o mammiferi, che spendono molta energia per mantenere costante la temperatura del corpo.

$$\text{efficienza di trasferimento} = \frac{\text{energia nel livello successivo}}{\text{energia nel livello precedente}} \times 100$$

ESEMPIO SVOLTO

Quanta energia arriva in cima?

Problema: in un prato i produttori immagazzinano ogni anno 20 000 kJ di energia chimica per metro quadrato. Applicando la regola del 10 %, quanta energia arriva ai consumatori primari, secondari e terziari? Quale frazione dell'energia dei produttori raggiunge i consumatori terziari?

Soluzione. A ogni passaggio si moltiplica per 0,1: consumatori primari 20 000 × 0,1 = 2 000 kJ; secondari 2 000 × 0,1 = 200 kJ; terziari 200 × 0,1 = 20 kJ (sempre per metro quadrato e per anno). La frazione che arriva al quarto livello è 0,1 × 0,1 × 0,1 = 0,001, cioè lo 0,1 %.

Risposta: 2 000 kJ, 200 kJ e 20 kJ per m^2 all'anno; ai consumatori terziari arriva un millesimo dell'energia dei produttori. È per questo che le catene alimentari raramente superano i quattro o cinque livelli: oltre, l'energia disponibile non basta a mantenere una popolazione.

15.3.2 Tre tipi di piramide

Se rappresentiamo ogni livello trofico con un rettangolo, la cui larghezza indica una quantità, e li impiliamo partendo dai produttori, otteniamo una **piramide ecologica** (Figura 15.4). Se ne costruiscono di tre tipi.

- La **piramide dell'energia** rappresenta l'energia che entra in ciascun livello in un certo tempo (per esempio in kJ per m^2 all'anno). Per la regola del 10 % si restringe sempre verso l'alto.
- La **piramide della biomassa** rappresenta la **biomassa**, cioè la massa complessiva degli organismi di ciascun livello presenti in un certo momento (per esempio in grammi di sostanza secca per m^2).
- La **piramide dei numeri** rappresenta il numero di individui di ciascun livello.

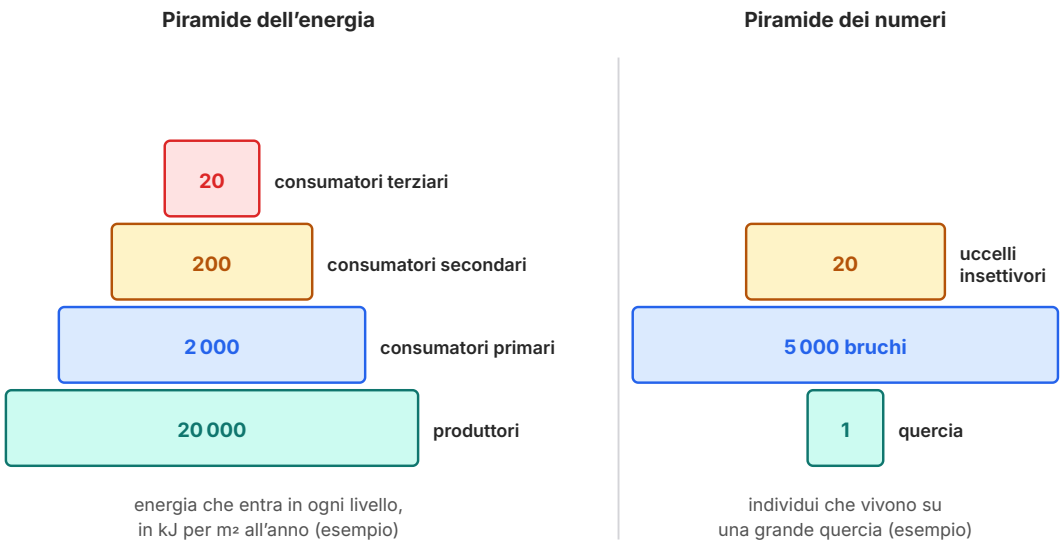


Figura 15.4 Piramidi ecologiche (valori di esempio, larghezze in scala logaritmica). A sinistra, la piramide dell'energia: ogni livello riceve un decimo dell'energia del precedente, e la piramide si restringe sempre verso l'alto. A destra, la piramide dei numeri degli organismi che vivono su una grande quercia: un solo produttore sostiene migliaia di consumatori, e la base è più stretta del livello sopra.

Le piramidi dei numeri e della biomassa di solito hanno la base larga, ma non sempre. Una sola grande quercia può nutrire migliaia di bruchi: la piramide dei numeri ha allora la base più stretta del livello superiore. Nel mare, in un dato momento, la biomassa del fitoplancton può essere minore di quella dello zooplancton che se ne nutre: le alghe microscopiche vengono mangiate in fretta, ma si riproducono altrettanto in fretta, e nel corso dell'anno producono molta più materia di quanta ne sia presente in ogni istante. La piramide della biomassa misurata in un giorno risulta così rovesciata.

ERRORE FREQUENTE

«Anche la piramide dell'energia può essere rovesciata». No. Le piramidi dei numeri e della biomassa contano ciò che c'è in un momento e possono rovesciarsi; la piramide dell'energia misura ciò che passa da un livello all'altro in un intervallo di tempo, e nessun livello può ricevere più energia di quanta ne abbia il livello da cui la prende. La piramide dell'energia non è mai rovesciata.

15.3.3 La produttività primaria

La quantità di energia luminosa che i produttori di un ecosistema trasformano in energia chimica, in un certo tempo e su una certa superficie, si chiama **produttività primaria**. Una parte di questa energia viene consumata dai produttori stessi con la respirazione; ciò che resta, la produttività primaria *netta*, è la nuova biomassa vegetale disponibile per tutti i consumatori dell'ecosistema.

La produttività dipende dai fattori limitanti: luce, temperatura, acqua e sali minerali (Tabella 15.1). Le foreste pluviali tropicali, calde e piovose tutto l'anno, le paludi e gli estuari, ricchi di sali portati dai fiumi, e le barriere coralline hanno le produttività più alte per metro quadrato. I deserti, dove manca l'acqua, e la tundra, dove fa freddo e la stagione utile è breve, sono poco produttivi. L'oceano aperto, lontano dalle coste, è povero di sali minerali e ha una produttività bassa per metro quadrato; ma, poiché copre una superficie enorme, nel complesso fornisce una parte molto grande della produzione di tutta la biosfera.

Tabella 15.1 Confronto qualitativo della produttività primaria netta per metro quadrato e del fattore che più spesso la limita.

Ecosistema	Produttività per m^2	Fattore limitante principale
foresta pluviale tropicale	molto alta	—
paludi ed estuari	molto alta	—
foresta temperata decidua (faggeta)	alta	temperatura in inverno
prateria, campo coltivato	media	acqua, sali minerali
oceano aperto	bassa	sali minerali
tundra	bassa	temperatura
deserto	molto bassa	acqua

COLLEGAMENTI

Mangiare più in basso nella catena. L'essere umano è onnivoro: quando mangia pane, legumi o verdura è un consumatore primario, quando mangia carne di animali nutriti con cereali è un consumatore secondario. Per la regola del 10 %, la stessa superficie coltivata nutre molte più persone se i suoi prodotti sono mangiati direttamente invece di passare prima attraverso un animale da allevamento. È uno dei motivi per cui l'Agenda 2030 delle Nazioni Unite, con l'obiettivo 12 (consumo e produzione responsabili), invita a ridurre gli sprechi e a scegliere diete più sostenibili. Non significa che la carne sia «sbagliata»: significa che ogni scelta alimentare ha un costo in energia e in suolo che si può calcolare.

15.4 Il ciclo del carbonio

Se l'energia scorre, la materia deve circolare: altrimenti gli elementi necessari alla vita si esaurirebbero in poco tempo. I percorsi che un elemento compie fra i viventi e l'ambiente non vivente (atmosfera, acque, suolo, rocce) si chiamano **cicli biogeochimici**: «bio» perché passano attraverso gli organismi, «geo» perché passano attraverso la Terra. Qui ne studiamo uno, il più legato alla fotosintesi e alla respirazione cellulare: il ciclo del carbonio. Lo studio dettagliato dei cicli biogeochimici ti aspetta nell'ultimo anno del liceo.

Il carbonio è l'elemento che forma lo scheletro di tutte le molecole organiche (Capitolo 2). Nell'ambiente si trova soprattutto come CO_2 nell'atmosfera e disciolta nelle acque, come carbonati nelle rocce calcaree e nei gusci, e come carbonio organico nei viventi, nei loro resti e nei combustibili fossili (Figura 15.5).

- Con la **fotosintesi** piante, alghe e cianobatteri prelevano CO_2 dall'aria o dall'acqua e la trasformano in zuccheri e nelle altre molecole organiche.
- Con l'**alimentazione** il carbonio organico passa ai consumatori.
- Con la **respirazione cellulare** di tutti gli organismi, produttori compresi, una parte del carbonio organico torna all'atmosfera come CO_2.
- Con la **decomposizione** i decompositori demoliscono foglie morte, resti ed escrementi e, respirando, liberano CO_2.
- Fra l'atmosfera e l'**oceano** c'è uno scambio continuo: la CO_2 si scioglie nell'acqua e in parte ne esce. Molti organismi marini usano il carbonio disciolto per costruire gusci e scheletri di carbonato di calcio, che alla loro morte si depositano sul fondo e, in milioni di anni, formano rocce calcaree.
- In particolari condizioni, per esempio nelle paludi povere di ossigeno, i resti organici non vengono decomposti del tutto: sepolti dai sedimenti, in milioni di anni si trasformano in **combustibili fossili**, cioè carbone, petrolio e gas naturale. Gran parte del carbone si è formata dalle foreste di felci arboree ed equiseti giganti del Carbonifero (Capitolo 13).

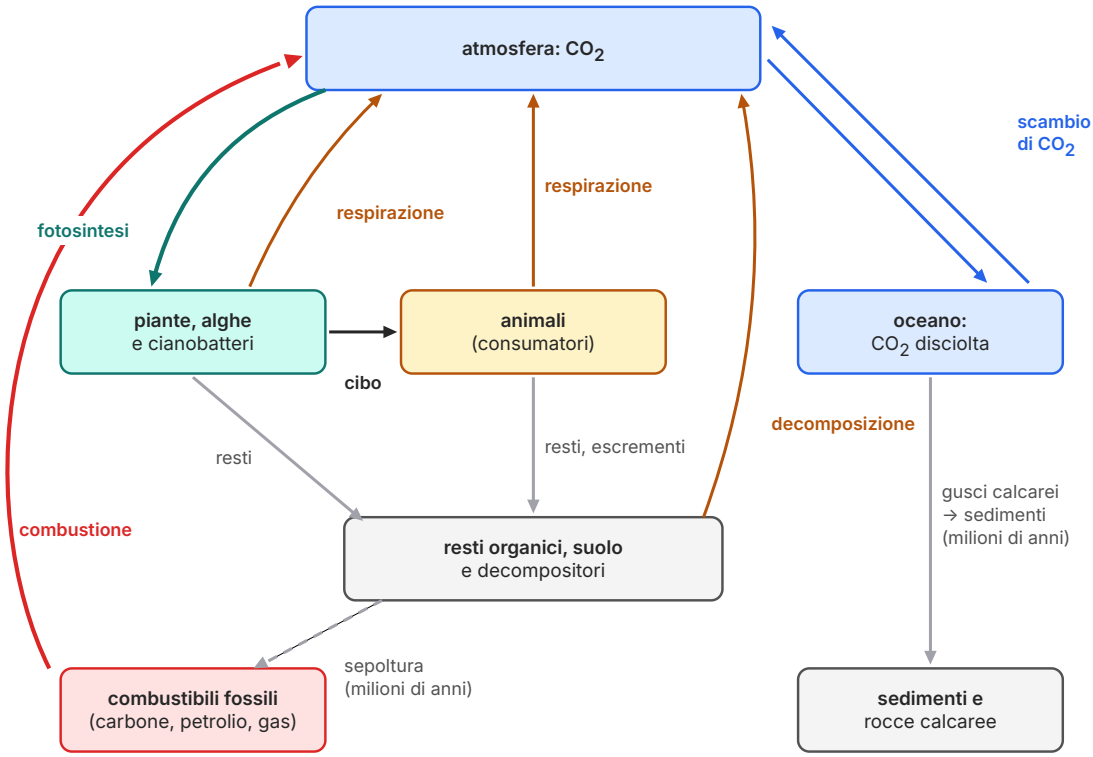


Figura 15.5 Il ciclo del carbonio (schema non in scala, senza valori numerici). In verde il prelievo con la fotosintesi; in arancio i ritorni all'atmosfera con la respirazione, compresa quella dei decompositori (decomposizione); in rosso la combustione dei combustibili fossili; le frecce grigie indicano i passaggi verso i resti organici e i percorsi lenti, che richiedono milioni di anni.

Per milioni di anni i flussi che prelevano carbonio dall'atmosfera e quelli che ve lo restituiscono si sono quasi bilanciati. Bruciando carbone, petrolio e gas, e abbattendo foreste, l'umanità riporta invece nell'aria in pochi decenni carbonio che era rimasto sepolto per milioni di anni. In *Scienze naturali 1* hai studiato la **curva di Keeling**, che mostra la crescita della CO_2 atmosferica dal 1958, e il suo legame con l'effetto serra. Ora puoi spiegare anche le piccole oscillazioni annuali della curva: durante la primavera e l'estate dell'emisfero boreale, dove si trova gran parte delle terre emerse e delle foreste, la fotosintesi preleva più CO_2 di quanta ne restituiscano la respirazione e la decomposizione, e la concentrazione cala; in autunno e in inverno accade il contrario.

Anche il **ciclo dell'acqua**, che hai studiato in *Scienze naturali 1*, passa attraverso i viventi: le piante assorbono acqua dal suolo con le radici e ne cedono grandi quantità all'atmosfera attraverso gli stomi delle foglie (la traspirazione). Sopra una foresta pluviale, buona parte della pioggia che cade viene da acqua già passata attraverso le piante.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Il ciclo dell'azoto

L'azoto è indispensabile per costruire proteine e acidi nucleici, e l'aria ne contiene moltissimo: circa il 78 % del suo volume è azoto molecolare, N_2. Eppure né le piante né gli animali sanno usarlo in questa forma, perché i due atomi della molecola sono legati in modo molto stabile. Il ciclo dell'azoto dipende quasi interamente dai batteri.

- **Fissazione dell'azoto.** Alcuni batteri trasformano l'N_2 dell'aria in ammonio (NH_4^+). Fra questi ci sono molti cianobatteri e i batteri del genere *Rhizobium*, che vivono nei noduli delle radici delle leguminose (fagiolo, pisello, trifoglio): per questo i contadini alternavano i cereali con le leguminose, che arricchiscono il terreno.
- **Nitrificazione.** Altri batteri del suolo trasformano l'ammonio in nitriti (NO_2^-) e poi in nitrati (NO_3^-), la forma che le piante assorbono più facilmente con le radici.
- **Dalle piante agli animali e ritorno.** Le piante usano i nitrati per costruire le proprie molecole; l'azoto passa agli animali con il cibo. I decompositori, demolendo resti ed escrementi, liberano di nuovo ammonio.
- **Denitrificazione.** Nei suoli poveri di ossigeno, per esempio quelli saturi d'acqua, altri batteri trasformano i nitrati in N_2, che torna all'atmosfera e chiude il ciclo.

Dall'inizio del Novecento l'industria sa fissare l'azoto dell'aria con un processo chimico (il processo Haber-Bosch) e produrre fertilizzanti in enormi quantità. Hanno permesso di sfamare miliardi di persone; ma i nitrati in eccesso, dilavati dai campi, arrivano nei fiumi, nei laghi e nel mare, dove fanno proliferare le alghe; quando queste muoiono, la loro decomposizione consuma l'ossigeno dell'acqua (eutrofizzazione).

15.5 Bioaccumulo e biomagnificazione

Lungo le catene alimentari non viaggiano soltanto energia e nutrienti. Alcune sostanze tossiche hanno tre caratteristiche pericolose insieme: sono **persistenti**, cioè si degradano molto lentamente; sono **solubili nei grassi** e non nell'acqua; e l'organismo le elimina con difficoltà. Una sostanza di questo tipo, assorbita con il cibo o dall'ambiente, si accumula nei tessuti di un individuo nel corso della sua vita: è il **bioaccumulo**.

Ora consideriamo una catena alimentare. Un pesce mangia, nella sua vita, una grande quantità di zooplancton, e trattiene nel proprio grasso quasi tutta la sostanza tossica contenuta in quelle prede; un uccello che si nutre di pesci fa lo stesso con i pesci. Poiché la biomassa diminuisce a ogni livello mentre la sostanza tossica resta, la sua concentrazione nei tessuti aumenta passando da un livello trofico al successivo: è la **biomagnificazione** (Figura 15.6). I predatori al vertice delle catene, come i rapaci, i grandi pesci predatori, i delfini, e anche l'essere umano, sono i più esposti.

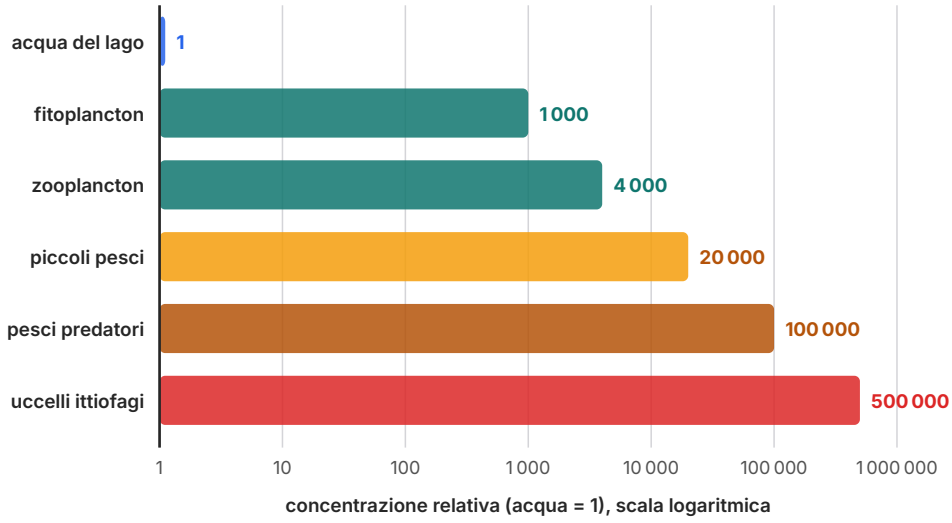


Figura 15.6 Biomagnificazione di una sostanza persistente in un lago (valori illustrativi di esempio). La concentrazione è espressa rispetto a quella nell'acqua, posta uguale a 1; l'asse orizzontale è in scala logaritmica: ogni tacca vale dieci volte la precedente.

Il caso più famoso è quello del **DDT**, un insetticida usato in grandi quantità dagli anni Quaranta del Novecento contro le zanzare che trasmettono la malaria e contro gli insetti dannosi per i raccolti. Si scoprì che si concentrava nei rapaci e negli uccelli che si nutrono di pesci, come il falco pellegrino: le femmine deponevano uova dal guscio troppo sottile, che si rompevano durante la cova, e in molte regioni queste specie diminuirono drasticamente. Dopo i divieti degli anni Settanta, in molti Paesi le loro popolazioni si sono riprese. Oggi la Convenzione di Stoccolma del 2001 limita l'uso del DDT al controllo delle zanzare portatrici di malaria, dove non esistono alternative efficaci.

Un altro esempio è il **mercurio**. A Minamata, in Giappone, una fabbrica scaricò in mare per decenni, fino agli anni Sessanta, composti di mercurio, che si concentrarono nei pesci e nei molluschi. Gli abitanti che se ne nutrivano subirono gravi danni al sistema nervoso: dal 1956 la malattia fu riconosciuta e prese il nome della città.

COLLEGAMENTI

Primavera silenziosa. Nel 1962 la biologa statunitense Rachel Carson pubblicò *Silent Spring* («Primavera silenziosa»), un libro che descriveva gli effetti degli insetticidi sugli uccelli e sugli ecosistemi. Il libro suscitò un ampio dibattito pubblico e contribuì alla nascita del movimento ambientalista moderno e alle leggi che, negli anni successivi, limitarono l'uso del DDT.

Il pesce e la salute. Il pesce è un alimento prezioso, ma il mercurio si accumula soprattutto nei predatori grandi e longevi, come pesce spada, tonno e squali. Per questo le autorità sanitarie europee e italiane danno indicazioni specifiche sul consumo di queste specie, in particolare alle donne in gravidanza e ai bambini piccoli: è un'applicazione diretta della biomagnificazione.

ESEMPIO SVOLTO

Seguire una sostanza lungo la catena

Problema: in un lago una sostanza persistente ha nel fitoplancton una concentrazione di 0,05 mg per kg. Supponiamo che a ogni passaggio di livello trofico la concentrazione diventi 10 volte maggiore. Quanto vale nei pesci predatori, che sono consumatori terziari? (Catena: fitoplancton → zooplancton → piccoli pesci → pesci predatori.)

Soluzione. Dal fitoplancton (primo livello) ai pesci predatori (quarto livello) ci sono tre passaggi. Zooplancton: 0,05 × 10 = 0,5 mg/kg; piccoli pesci: 0,5 × 10 = 5 mg/kg; pesci predatori: 5 × 10 = 50 mg/kg.

Risposta: 50 mg/kg, cioè 10 × 10 × 10 = 1 000 volte la concentrazione nel fitoplancton. Notate il confronto con l'energia: lungo la stessa catena l'energia si riduce di circa 10 volte a ogni passaggio, la concentrazione della sostanza persistente aumenta.

15.6 Sul campo: studiare un ecosistema vicino a scuola

Non serve una foresta tropicale per fare ecologia. Un'aiuola, un prato, il margine di un campo, il bordo di uno stagno o anche un vecchio muro coperto di muschi sono ecosistemi in miniatura. Gli ecologi li studiano con un metodo semplice: poiché non si può contare ogni organismo di un prato, si contano quelli presenti in alcune piccole aree di superficie nota, i **quadrati di campionamento**, scelte in modo casuale, e si stimano i valori di tutta l'area. Più quadrati si usano, più la stima è affidabile.

ESPERIENZA DI LABORATORIO · SUL CAMPO

Analisi di un ecosistema vicino a scuola

Obiettivo: descrivere i fattori abiotici, gli organismi e una rete alimentare di un piccolo ecosistema, confrontando due zone con condizioni diverse (per esempio al sole e all'ombra, oppure un prato calpestato e uno no).

Materiale: quattro picchetti e 4 m di spago per delimitare un quadrato di 1 m × 1 m; termometro (meglio se con sonda per il suolo); un luxmetro o un'app che misura la luce; cartine indicatrici per il pH del suolo; lente d'ingrandimento, contenitori trasparenti, pinzette morbide; guide al riconoscimento di piante e invertebrati; quaderno, matita, fotocamera.

Procedimento. (1) In ciascuna zona delimitate almeno tre quadrati, scelti a caso (per esempio lanciando un oggetto alle spalle). (2) In ogni quadrato misurate la temperatura dell'aria a 1 m di altezza e quella del suolo a 5 cm di profondità, l'intensità della luce al livello del terreno, l'umidità del suolo (al tatto: secco, umido, bagnato) e il pH. (3) Elencate le specie vegetali e contate gli individui di due o tre specie facili da riconoscere. (4) Cercate gli animali sulle piante, sul terreno e sotto la lettiera; osservateli con la lente, fotografateli e rimetteteli dove li avete trovati. (5) Annotate i segni indiretti: foglie rosicchiate, tane, escrementi, funghi sulla lettiera.

Sicurezza e rispetto: lavorate con i guanti e lavatevi le mani alla fine; non toccate funghi, piante sconosciute o animali che possono pungere; segnalate le allergie all'insegnante; in zone con erba alta proteggete le gambe e controllate di non avere zecche. Non raccogliete specie protette e lasciate il luogo come l'avete trovato.

Elaborazione e domande. (a) Riportate i dati in una tabella e calcolate per ogni zona la media dei fattori abiotici e la densità di ciascuna specie contata. (b) Le due zone differiscono di più nei fattori abiotici o nelle specie presenti? Quale fattore abiotico potrebbe spiegare le differenze? (c) Costruite una rete alimentare con gli organismi osservati, indicando produttori, consumatori e decompositori o detritivori. (d) Che cosa vi manca per affermare che è proprio quel fattore a causare le differenze?

ESEMPIO SVOLTO

Stimare quante piante ci sono in un prato

Problema: in un prato di 400 m^2 una classe conta le piante di trifoglio in cinque quadrati di 1 m^2 scelti a caso, trovando 12, 8, 15, 10 e 10 individui. Stima la densità del trifoglio e il numero di piante in tutto il prato.

Soluzione. Densità media = (12 + 8 + 15 + 10 + 10) : 5 = 55 : 5 = 11 piante per m^2. Numero stimato = 11 piante/m^2 × 400 m^2 = 4 400 piante.

Risposta: circa 11 piante per m^2, circa 4 400 piante nel prato. È una stima: con altri cinque quadrati il risultato sarebbe un po' diverso, e i valori dei singoli quadrati (da 8 a 15) mostrano quanto conta usarne più di uno.

SINTESI

- L'**ecologia** (Haeckel, 1866) studia le relazioni degli organismi fra loro e con l'ambiente, dall'individuo alla popolazione, alla comunità, all'ecosistema, al bioma, alla biosfera.
- Ogni organismo dipende da **fattori biotici** (gli altri viventi) e **abiotici** (luce, temperatura, acqua, suolo…); per ciascun fattore ha un **intervallo di tolleranza**, con un intervallo ottimale e zone di stress. Il fattore più lontano dall'ottimo è limitante.
- L'**habitat** è il luogo in cui una specie vive; la **nicchia ecologica** è il suo ruolo nell'ecosistema.
- I **produttori** autotrofi catturano l'energia del Sole; i **consumatori** primari, secondari e terziari se ne nutrono; **detritivori** e **decompositori** demoliscono la materia morta di tutti i livelli e restituiscono i sali minerali.
- Le **catene alimentari** si intrecciano in **reti alimentari**; le frecce vanno da chi è mangiato a chi mangia. Ogni posizione è un **livello trofico**.
- L'energia scorre in una sola direzione ed esce come calore; la materia circola.
- Da un livello trofico al successivo passa in media circa il **10 %** dell'energia (di solito fra il 5 e il 20 %): per questo le catene hanno pochi livelli.
- La **piramide dell'energia** non è mai rovesciata; quelle dei numeri e della biomassa possono esserlo.
- La **produttività primaria** è massima dove luce, calore, acqua e sali abbondano (foreste pluviali, paludi, estuari) e minima nei deserti e nella tundra.
- Nel **ciclo del carbonio** la fotosintesi preleva CO_2; respirazione, decomposizione e combustione la restituiscono; oceani, rocce e combustibili fossili sono grandi riserve.
- Le sostanze persistenti e solubili nei grassi si accumulano negli organismi (**bioaccumulo**) e si concentrano salendo lungo le catene (**biomagnificazione**): DDT e mercurio ne sono esempi.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il termine «ecologia» fu introdotto nel 1866 da:
   - **A.** Ernst Haeckel
   - **B.** Charles Darwin
   - **C.** Gregor Mendel
   - **D.** Carlo Linneo

2. ● Quale dei seguenti è un fattore abiotico?
   - **A.** i funghi del suolo
   - **B.** la competizione fra due specie
   - **C.** la quantità di luce
   - **D.** i parassiti di una pianta

3. ● In una rete alimentare il lombrico è:
   - **A.** un produttore
   - **B.** un detritivoro
   - **C.** un consumatore terziario
   - **D.** un autotrofo

4. ● La nicchia ecologica di una specie è:
   - **A.** il luogo in cui vive
   - **B.** l'insieme delle specie dell'ecosistema
   - **C.** il numero di individui per metro quadrato
   - **D.** il suo ruolo nell'ecosistema: che cosa mangia, quando è attiva, di quali condizioni e risorse ha bisogno

5. ●● In un ecosistema i produttori immagazzinano 30 000 kJ. Secondo la regola del 10 %, ai consumatori secondari arrivano circa:
   - **A.** 30 kJ
   - **B.** 300 kJ
   - **C.** 3 000 kJ
   - **D.** 27 000 kJ

6. ●● Quale piramide ecologica non può mai essere rovesciata?
   - **A.** la piramide dell'energia
   - **B.** la piramide dei numeri
   - **C.** la piramide della biomassa
   - **D.** tutte e tre possono essere rovesciate

7. ●● Quale processo restituisce carbonio all'atmosfera?
   - **A.** la fotosintesi
   - **B.** la formazione dei gusci calcarei
   - **C.** la sepoltura dei resti organici
   - **D.** la respirazione cellulare

8. ●●● La biomagnificazione riguarda soprattutto sostanze:
   A. solubili in acqua ed eliminate rapidamente
   B. che si degradano in pochi giorni
   C. persistenti, solubili nei grassi e difficili da eliminare
   D. presenti soltanto nei produttori

9. ● Quale ecosistema ha la produttività primaria più alta per metro quadrato?
   A. il deserto
   B. la foresta pluviale tropicale
   C. l'oceano aperto
   D. la tundra

Vero o falso

10. ● L'energia, come la materia, circola continuamente fra produttori, consumatori e decompositori.

11. ● Habitat e nicchia ecologica sono due nomi diversi per lo stesso concetto.

12. ●● Un organismo onnivoro può occupare più di un livello trofico.

13. ●● In un ambiente marino la biomassa del fitoplancton presente in un certo momento può essere minore di quella dello zooplancton.

14. ●● Le piante liberano CO_2 soltanto di notte, quando non fanno la fotosintesi.

Applicare

15. ● Nella catena faggio → bruco → cinciallegra → sparviere indica il livello trofico e il ruolo (produttore, consumatore primario, secondario, terziario) di ciascun organismo. In quale gruppo collochi un fungo che demolisce le foglie cadute del faggio?

16. ● In un prato i produttori immagazzinano ogni anno 40 000 kJ per m^2. Applicando la regola del 10 %, calcola l'energia che arriva ai consumatori primari, secondari e terziari.

17. ●● In un lago il fitoplancton produce in un anno 8 500 kJ per m^2 e lo zooplancton ne incorpora nel proprio corpo 1 020 kJ. Calcola l'efficienza di trasferimento. Il valore rientra nell'intervallo tipico?

18. ●● Supponendo che anche la biomassa si riduca al 10 % a ogni passaggio, quanti kilogrammi di piante servono per produrre 1 kg di un rapace che è consumatore terziario?

19. ●●● Un campo produce cereali che contengono 20 000 MJ di energia alimentare. Se i cereali sono dati ai bovini e le persone mangiano la carne, quanta energia alimentare resta disponibile per le persone, con un'efficienza del 10 %? Quante volte più persone si potrebbero nutrire mangiando direttamente i cereali?

20. ●●● Una sostanza persistente ha nel fitoplancton di un lago una concentrazione di 0,04 mg/kg e a ogni passaggio di livello trofico la concentrazione diventa 8 volte maggiore. Calcola la concentrazione nello zooplancton, nei piccoli pesci e nel luccio, che si nutre dei piccoli pesci. Di quante volte è aumentata in tutto?

21. ●● In un prato di 300 m^2 si contano le piante di tarassaco in sei quadrati di 1 m^2, trovando 4, 7, 3, 5, 6 e 5 individui. Stima la densità del tarassaco e il numero di piante nell'intero prato.

Leggere dati e figure

22. ● Osserva la Figura 15.2. Quali animali si nutrono del topo selvatico? Quanti livelli trofici ha la catena più lunga della rete? Se i ghiri scomparissero, quale predatore ne risentirebbe di più, e che cosa potrebbe succedere ai topi selvatici?

23. ●● Osserva la Figura 15.1. Che cosa distingue la specie euriecia da quella stenoecia? Se il valore del fattore si spostasse verso il limite superiore di tolleranza della specie euriecia, quale delle due specie scomparirebbe per prima? Che cosa accade agli individui della specie euriecia nelle zone di stress?

Tabella 15.2 Dati di campo (esempio): medie di tre quadrati di 1 m^2 per zona, misurate nella stessa mattina di maggio.

Grandezza	Zona A: sotto un gruppo di tigli	Zona B: prato aperto
luce al suolo (lux)	4 000	60 000
temperatura del suolo (°C)	15	22
umidità del suolo	umido	secco
pH del suolo	6,5	6,5
specie di piante	5	13

24. ●●● Una classe ha raccolto i dati della Tabella 15.2 in due zone dello stesso giardino. Quali fattori abiotici differiscono di più fra le due zone? Quale potrebbe spiegare il diverso numero di specie di piante? Perché questi dati da soli non bastano a dimostrare che sia proprio quel fattore la causa?

25. ●●● Osserva la Figura 15.6. Di quante volte aumenta la concentrazione passando dai piccoli pesci agli uccelli ittiofagi? E dall'acqua ai pesci predatori? Perché si è scelto un asse in scala logaritmica?

Indagare e argomentare

26. ●●● Progetta un esperimento controllato per stabilire se le foglie cadute si decompongono più in fretta in un suolo umido o in un suolo secco. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, le variabili da mantenere costanti, il controllo e il numero di ripetizioni.

27. ●● Spiega perché in una rete alimentare raramente si trovano più di quattro o cinque livelli trofici, e perché i grandi predatori sono sempre poco numerosi.

28. ●●● Un compagno sostiene: «Le piante producono ossigeno e gli animali producono CO_2: quindi sono solo gli animali a restituire carbonio all'aria». Correggi l'affermazione usando il ciclo del carbonio, e spiega che cosa accadrebbe al carbonio dell'ecosistema se i decompositori scomparissero.

Approfondimento

29. ● I batteri del genere *Rhizobium*, che vivono nei noduli delle radici delle leguminose:

A. trasformano l'azoto atmosferico N_2 in ammonio, che la pianta può usare

B. trasformano i nitrati in N_2

C. producono metano

D. demoliscono la cellulosa del legno

PER APPROFONDIRE

- [ODU] E. P. Odum, *Fundamentals of Ecology*: il testo che ha fatto dell'ecosistema il concetto centrale dell'ecologia; i capitoli sul flusso di energia e sui cicli biogeochimici.
- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: i capitoli sugli ecosistemi, con le misure di produttività ed efficienza trofica in ambienti diversi.
- [WIL] E. O. Wilson, *The Diversity of Life*: un grande naturalista racconta come le specie di un ecosistema dipendono le une dalle altre.

Glossario del capitolo

Bioaccumulo
Accumulo nei tessuti di un organismo, nel corso della sua vita, di una sostanza persistente che l'organismo non riesce a eliminare.

Biomagnificazione
Aumento della concentrazione di una sostanza persistente nei tessuti degli organismi a ogni livello trofico successivo.

Biomassa
Massa complessiva degli organismi di un livello trofico o di un ecosistema presenti in un certo momento.

Catena alimentare
Sequenza di organismi in cui ciascuno è il cibo del successivo; le frecce vanno da chi è mangiato a chi mangia.

Ciclo biogeochimico
Percorso di un elemento chimico fra i viventi e l'ambiente non vivente (atmosfera, acque, suolo, rocce).

Consumatore
Organismo eterotrofo che si nutre di altri organismi viventi; può essere primario (erbivoro), secondario o terziario.

Decompositore
Fungo o batterio che demolisce la materia organica morta con enzimi liberati all'esterno, restituendo all'ambiente sostanze inorganiche.

Detritivoro
Animale che si nutre di materia organica morta e la frammenta: lombrichi, porcellini di terra, millepiedi.

Ecologia
Scienza che studia le relazioni degli organismi fra loro e con l'ambiente in cui vivono.

Fattore abiotico
Caratteristica fisica o chimica dell'ambiente che influenza gli organismi: luce, temperatura, acqua, suolo, salinità.

Fattore biotico
Influenza esercitata su un organismo dagli altri viventi: prede, predatori, concorrenti, parassiti.

Habitat
Il luogo in cui vive una specie, descritto dalle sue caratteristiche ambientali.

Intervallo di tolleranza
Insieme dei valori di un fattore ambientale entro cui una specie può sopravvivere; comprende un intervallo ottimale e zone di stress.

Livello trofico
Posizione di un organismo in una catena alimentare: produttori, consumatori primari, secondari, terziari.

Nicchia ecologica
Il ruolo di una specie nell'ecosistema: che cosa mangia e da chi è mangiata, quando è attiva, di quali condizioni e risorse ha bisogno.

Onnivoro
Consumatore che si nutre sia di vegetali sia di animali, e può quindi occupare più livelli trofici.

Piramide ecologica
Rappresentazione dei livelli trofici come rettangoli sovrapposti, larghi in proporzione al numero di individui, alla biomassa o all'energia.

Produttività primaria
Quantità di energia luminosa che i produttori trasformano in energia chimica in un certo tempo e su una certa superficie.

Produttore
Organismo autotrofo (pianta, alga, cianobatterio) che produce la materia organica da cui dipendono tutti gli altri membri dell'ecosistema.

Rete alimentare
Insieme delle catene alimentari di un ecosistema, intrecciate fra loro.

Soluzioni

1. A. Ernst Haeckel, nel 1866, dal greco *oîkos* («casa») e *lógos*.

2. C. La luce è un fattore fisico; funghi, competizione e parassiti sono fattori biotici.

3. B. Il lombrico ingerisce foglie morte e resti organici e li frammenta: è un detritivoro.

4. D. La A descrive l'habitat; la C è la densità di una popolazione.

5. B. 30 000 × 0,1 = 3 000 kJ ai consumatori primari; 3 000 × 0,1 = 300 kJ ai secondari.

6. A. Nessun livello può ricevere più energia di quella del livello da cui la prende; numeri e biomassa invece si misurano in un istante e possono dare piramidi rovesciate.

7. D. La respirazione cellulare libera CO_2; gli altri tre processi sottraggono carbonio all'atmosfera.

8. C. Solo una sostanza che resta a lungo nell'organismo, nel grasso, può accumularsi e passare da un livello al successivo.

9. B. Luce, calore e acqua abbondano tutto l'anno; nel deserto manca l'acqua, nella tundra fa freddo, nell'oceano aperto scarseggiano i sali minerali.

10. Falso. La materia circola, l'energia no: attraversa l'ecosistema in una sola direzione ed esce come calore.

11. Falso. L'habitat è il luogo in cui la specie vive; la nicchia ecologica è il suo ruolo (che cosa mangia, quando è attiva, di quali condizioni ha bisogno).

12. Vero. Per esempio una volpe è consumatore primario quando mangia frutti e secondario quando mangia un topo.

13. Vero. Il fitoplancton è mangiato in fretta ma si riproduce in fretta: la piramide della biomassa misurata in un istante può risultare rovesciata.

14. Falso. Le piante respirano giorno e notte; di giorno, alla luce, la fotosintesi di solito preleva più CO_2 di quanta la respirazione ne liberi, e il bilancio è un assorbimento.

15. Faggio: 1° livello, produttore; bruco: 2° livello, consumatore primario; cinciallegra: 3° livello, consumatore secondario; sparviere: 4° livello, consumatore terziario. Il fungo è un decompositore: riceve materia morta da tutti i livelli e non occupa un posto fisso nella catena.

16. Consumatori primari 40 000 × 0,1 = 4 000 kJ/m²; secondari 400 kJ/m²; terziari 40 kJ/m² (all'anno).

17. Efficienza = 1 020 / 8 500 × 100 = 12 %. Sì, rientra nell'intervallo tipico dal 5 al 20 %.

18. Dalle piante al rapace terziario ci sono tre passaggi: 1 kg / (0,1 × 0,1 × 0,1) = 1 000 kg di piante.

19. Con la carne: 20 000 × 0,1 = 2 000 MJ. Mangiando i cereali le persone dispongono di 20 000 MJ: 20 000 / 2 000 = 10 volte più persone (a parità di fabbisogno).

20. Zooplancton 0,04 × 8 = 0,32 mg/kg; piccoli pesci 0,32 × 8 = 2,56 ≈ 2,6 mg/kg; luccio 2,56 × 8 = 20,48 ≈ 20 mg/kg. In tutto 8 × 8 × 8 = 512 volte, circa 500.

21. Densità media = (4 + 7 + 3 + 5 + 6 + 5) : 6 = 30 : 6 = 5,0 piante/m²; stima = 5,0 × 300 = 1 500 piante circa.

22. Il topo selvatico è mangiato dalla volpe e dall'allocco. La catena più lunga ha quattro livelli (faggio → bruco → cinciallegra → sparviere). Senza ghiri l'allocco perderebbe una preda e dovrebbe cacciare più topi: la popolazione dei topi potrebbe diminuire; d'altra parte i topi avrebbero più faggiole a disposizione, perché non le dividerebbero più con i ghiri. L'effetto netto non si può prevedere con certezza: è proprio ciò che rende complesse le reti alimentari.

23. La specie euriecia ha un intervallo di tolleranza molto più ampio; la stenoecia sopporta solo un intervallo ristretto, spostato verso valori più bassi. Avvicinandosi al limite superiore della specie eurie-

cia, la stenoecia sarebbe già scomparsa da tempo (il suo limite superiore è molto più basso). Nelle zone di stress gli individui della specie euriecia sopravvivono, ma crescono poco e si riproducono meno.

24. Differiscono molto la luce (circa 15 volte di più nel prato) e la temperatura del suolo (7 °C in più nel prato), e l'umidità; il pH è uguale. La luce è il candidato più probabile a spiegare le poche specie sotto i tigli (poche piante tollerano l'ombra), ma luce, temperatura e umidità variano insieme e i dati sono stati raccolti una sola volta: per stabilire la causa servirebbe un esperimento controllato, che cambi un solo fattore lasciando costanti gli altri, con più ripetizioni.

25. Da 20 000 a 500 000: 25 volte. Dall'acqua (1) ai pesci predatori (100 000): 100 000 volte. I valori vanno da 1 a 500 000, cioè coprono quasi sei ordini di grandezza: in scala lineare le prime barre sarebbero invisibili.

26. Traccia: sacchetti di rete a maglie fini con la stessa massa (per esempio 10 g) di foglie secche della stessa specie, sepolti in vasi con lo stesso suolo. Variabile indipendente: umidità del suolo (annaffiato regolarmente o lasciato asciutto). Variabile dipendente: massa delle foglie (essiccate) dopo, per esempio, 6 settimane, o percentuale di massa persa. Da mantenere costanti: specie e massa delle foglie, tipo e quantità di suolo, temperatura, luce, durata. Controllo: sacchetti in suolo sterilizzato o un sacchetto non sepolto, per misurare la perdita di massa senza decompositori. Almeno 3–5 sacchetti per condizione, e confronto delle medie.

27. Traccia: a ogni passaggio arriva al livello successivo circa il 10 % dell'energia; dopo quattro passaggi resta circa un decimillesimo dell'energia dei produttori, troppo poca per mantenere una popolazione di un ulteriore livello. Anche i grandi predatori al vertice ricevono pochissima energia: possono esserci soltanto pochi individui, ciascuno con un territorio di caccia molto ampio.

28. Traccia: anche le piante respirano, giorno e notte, e liberano CO_2; i decompositori, demolendo resti ed escrementi, restituiscono all'aria gran parte del carbonio organico; a questi si aggiungono la combustione e lo scambio con l'oceano. Senza decompositori il carbonio resterebbe bloccato nelle foglie morte e nei cadaveri, che si accumulerebbero; la CO_2 a disposizione della fotosintesi diminuirebbe, e con esso, nel tempo, la produttività dell'ecosistema.

29. A. *Rhizobium* fissa l'azoto atmosferico; la B descrive la denitrificazione.