CAPITOLO

9

L'evoluzione: da Darwin a oggi

«Da un inizio così semplice infinite forme, bellissime e meravigliosissime, si sono evolute e si stanno evolvendo.» — C. Darwin, L'origine delle specie (1859), ultime parole del libro (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Descrivere le idee sull'origine delle specie prima di Darwin: fissismo, catastrofismo, attualismo e la teoria di Lamarck.
2. Ricostruire come il viaggio del *Beagle*, Malthus e la selezione artificiale portarono Darwin alla teoria della selezione naturale.
3. Spiegare la selezione naturale, la fitness e la selezione sessuale, evitando gli errori più comuni.
4. Riconoscere le prove dell'evoluzione e distinguere organi omologhi, analoghi e vestigiali.
5. Interpretare esempi di evoluzione osservata, come il melanismo industriale e l'antibiotico-resistenza.
6. Spiegare come la sintesi moderna ha unito Darwin e Mendel, e che cosa significa «teoria» in scienza.

INDICE DEL CAPITOLO

9.1 Prima di Darwin: le specie cambiano? 2
9.2 Darwin e il viaggio del Beagle 4
9.3 La selezione naturale 6
9.4 Le prove dell'evoluzione 9
9.5 L'evoluzione sotto i nostri occhi 12
9.6 Dalla teoria di Darwin alla sintesi moderna 14

Scienze naturali 2 · Parte II · Ereditarietà ed evoluzione · versione 1.0
Capitolo 9: L'evoluzione: da Darwin a oggi · pagine 197–216 del volume completo · estratto per lo studio

Nel 1835 un giovane naturalista inglese sbarcò su alcune isole vulcaniche, aride e isolate nell'Oceano Pacifico. Vi trovò tartarughe giganti, iguane che si tuffavano in mare e piccoli uccelli bruni dal becco ora sottile, ora massiccio. Il naturalista era Charles Darwin, le isole erano le Galápagos, e le domande che si portò a casa lo occuparono per oltre vent'anni.

Nel Capitolo 1 abbiamo visto che gli adattamenti dei viventi sono il risultato dell'evoluzione; nei capitoli di genetica abbiamo imparato come si trasmettono i caratteri. Ora mettiamo insieme i due fili: le idee prima di Darwin, il suo ragionamento, le prove dell'evoluzione, alcuni casi osservabili oggi e l'unione, nel Novecento, fra la teoria di Darwin e la genetica di Mendel.

9.1 Prima di Darwin: le specie cambiano?

9.1.1 Specie immutabili

Fino al Settecento quasi tutti i naturalisti europei ritenevano che le specie fossero state create così come sono e che non cambiassero nel tempo. Questa concezione si chiama **fissismo**; quando si accompagna all'idea di una creazione separata di ciascuna specie, raccontata nei testi religiosi, si parla di creazionismo. Lo svedese Linneo, che nel *Systema Naturae* (1735) ordinò migliaia di piante e di animali con un sistema di nomi usato ancora oggi (Capitolo 11), pensava di descrivere un ordine fissato una volta per sempre. Qualcuno però dubitava: il francese Buffon ipotizzò che la Terra fosse molto più antica di quanto si credesse e che le specie potessero modificarsi.

9.1.2 I fossili e le catastrofi

Un problema difficile da ignorare erano i **fossili**, resti o tracce di organismi del passato conservati nelle rocce (come si formano lo vedremo nel Capitolo 10). Alla fine del Settecento il francese Georges Cuvier, fondatore dell'anatomia comparata, confrontò le ossa dei mammut con quelle degli elefanti attuali e dimostrò che si trattava di specie diverse: le specie, dunque, possono estinguersi. Notò anche che strati di roccia diversi contengono fossili diversi, tanto più simili alle specie attuali quanto più gli strati sono recenti. Cuvier però restava fissista, e spiegava questa successione con il **catastrofismo**: catastrofi improvvise, come grandi inondazioni, avrebbero sterminato le specie di una regione, sostituite poi da altre giunte da fuori.

9.1.3 Il tempo profondo

Una visione opposta veniva dalla geologia. Lo scozzese James Hutton, alla fine del Settecento, e l'inglese Charles Lyell, con i *Principles of Geology* (1830–1833), sostennero che la Terra è stata modellata dagli stessi processi lenti che vediamo oggi all'opera: erosione, deposizione dei sedi-

menti, eruzioni. È il principio dell'**attualismo** (o uniformismo): «il presente è la chiave del passato». In *Scienze naturali 1* hai visto come i fiumi scavano le valli e depositano strati di sedimenti: se questi processi sono lenti e gli strati sono spessi centinaia di metri, la Terra deve essere antichissima. Questo enorme intervallo è detto **tempo profondo**.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto tempo per un pacco di strati?

Problema: in un mare poco profondo si depositano in media 0,1 mm di sedimenti all'anno (valore di esempio: la velocità reale varia molto da un ambiente all'altro). Quanto tempo occorre per accumulare 600 m di strati?

Soluzione. 600 m = 600 000 mm; il tempo è il rapporto fra spessore e velocità:

$$t = 600\,000 \text{ mm} : 0{,}1 \text{ mm/anno} = 6\,000\,000 \text{ anni}$$

Risposta: circa 6 milioni di anni. Ragionamenti come questo convinsero Darwin che la Terra aveva avuto tutto il tempo necessario per cambiamenti lenti e graduali dei viventi.

9.1.4 Lamarck, la prima teoria dell'evoluzione

La prima teoria completa del cambiamento delle specie fu proposta dal francese Jean-Baptiste de Lamarck nella *Philosophie zoologique* (1809). Per Lamarck le specie si trasformano lentamente, e gli organismi più complessi derivano da organismi più semplici. Il meccanismo si basava su due principi:

1. **uso e disuso**: un organo usato molto si sviluppa, un organo poco usato si indebolisce;
2. **ereditarietà dei caratteri acquisiti**: le modificazioni acquisite nel corso della vita si trasmettono ai figli.

Così, per Lamarck, le giraffe ancestrali, allungando il collo per raggiungere le foglie più alte, lo avrebbero allungato un poco e avrebbero trasmesso l'allungamento ai figli. Oggi sappiamo che questo meccanismo non funziona: i muscoli che un atleta sviluppa con l'allenamento non passano ai figli. Alla fine dell'Ottocento il tedesco August Weismann distinse le cellule da cui si formano i gameti, le sole che trasmettono i caratteri, da tutte le altre cellule del corpo; e tagliò la coda a topi di diverse generazioni successive, i cui figli nascevano sempre con la coda normale.

Lamarck resta però il primo ad aver sostenuto con argomenti scientifici che le specie cambiano nel tempo e che l'ambiente vi ha un ruolo; e l'ereditarietà dei caratteri acquisiti era accettata da quasi tutti i naturalisti dell'epoca, Darwin compreso.

9.2 Darwin e il viaggio del *Beagle*

Darwin non partì con una teoria da dimostrare, ma con la curiosità di un naturalista. La teoria nacque dopo, mettendo insieme le osservazioni del viaggio, la geologia di Lyell, un saggio di economia e l'esperienza degli allevatori.

9.2.1 Un naturalista intorno al mondo

Charles Darwin nacque in Inghilterra nel 1809. Dopo aver abbandonato gli studi di medicina si laureò a Cambridge, ma la sua passione erano la geologia e le collezioni naturalistiche. Nel 1831, a ventidue anni, si imbarcò sul *Beagle*, una nave della marina britannica comandata da Robert FitzRoy e incaricata di rilevare le coste del Sud America.

Il viaggio durò quasi cinque anni, dal dicembre 1831 all'ottobre 1836, e fece il giro del mondo (Figura 9.1). Darwin passò gran parte del tempo a terra, raccogliendo animali, piante, rocce e fossili. Con sé aveva il primo volume dei *Principles* di Lyell: vide conchiglie marine sulle Ande e gli effetti di un terremoto in Cile, e si convinse che la crosta terrestre cambia lentamente e di continuo. In Patagonia trovò fossili di grandi mammiferi estinti che somigliavano ad armadilli e bradipi ancora viventi in Sud America. Perché le specie estinte di un continente somigliano a quelle che oggi lo abitano?

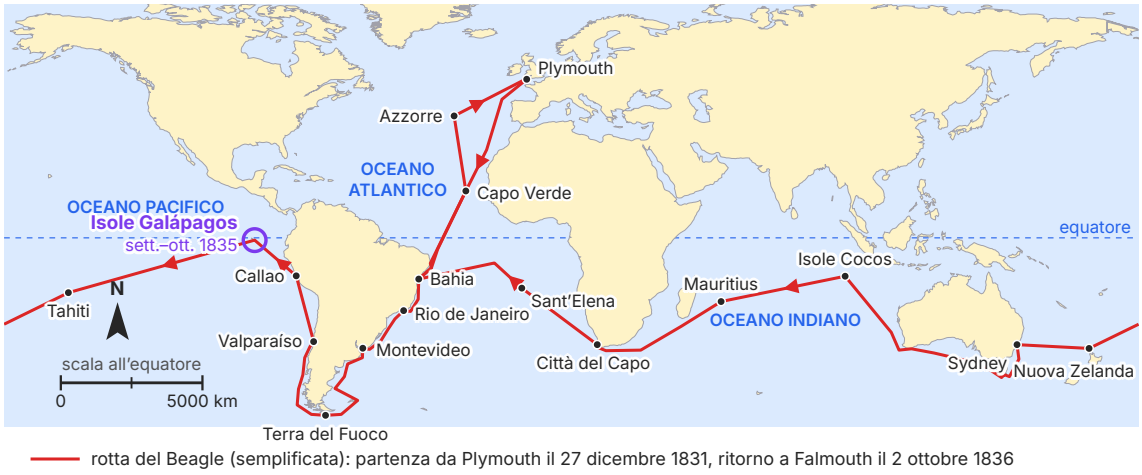


Figura 9.1 Il viaggio del *Beagle* (1831–1836), con le tappe principali. Rotta semplificata, che non mostra i numerosi rilievi costieri in Sud America; proiezione equirettangolare (la scala è valida all'equatore).

9.2.2 Le Galápagos

Nel settembre 1835 il *Beagle* raggiunse le Galápagos, un arcipelago vulcanico sull'equatore a circa 1000 km dall'Ecuador, e vi restò circa cinque settimane. Il vicegovernatore raccontò a Darwin che si poteva riconoscere da quale isola provenisse una tartaruga gigante osservando la forma del carapace. Al ritorno in Inghilterra, nel 1837, l'ornitologo John Gould gli spiegò che i piccoli uccelli raccolti erano un gruppo di specie di fringuelli imparentate fra loro, con becchi diversi, e che i tordi beffeggiatori di isole diverse appartenevano a specie diverse.

Le specie delle Galápagos somigliavano a quelle del Sud America, pur essendo diverse. Perché isole vulcaniche giovani, con clima e suolo diversi da quelli del continente, avrebbero dovuto ospitare specie create «apposta» così simili a quelle sudamericane? L'ipotesi più semplice era un'altra: pochi antenati giunti dal continente si erano modificati in modo diverso su ciascuna isola.

COLLEGAMENTI

Geografia ed Educazione civica · Le Galápagos oggi. L'arcipelago appartiene all'Ecuador ed è in gran parte un parco nazionale; nel 1978 è stato fra i primi siti iscritti nella Lista del Patrimonio mondiale dell'UNESCO. Le specie che vivono solo lì sono minacciate soprattutto da animali introdotti dall'uomo, come capre e ratti. Proteggerle è uno degli obiettivi dell'Agenda 2030 (obiettivo 15, «Vita sulla Terra»).

9.2.3 Malthus e gli allevatori

Nel 1838 Darwin lesse il *Saggio sul principio di popolazione* dell'economista Thomas Malthus (1798). Malthus sosteneva che la popolazione umana, se nulla la frena, tende a raddoppiare a intervalli regolari, mentre le risorse crescono molto più lentamente. Darwin applicò l'idea a tutti i viventi: ogni specie produce molti più figli di quanti potranno sopravvivere (una quercia produce migliaia di ghiande, una rana migliaia di uova), e ne segue una continua competizione per le risorse, che Darwin chiamò **lotta per l'esistenza**.

L'altra fonte di ispirazione furono gli allevatori, che Darwin studiò allevando lui stesso piccioni. Scegliendo per molte generazioni come riproduttori gli individui con i caratteri desiderati, l'uomo ha ottenuto dal lupo centinaia di razze di cane e, da una sola specie di cavolo selvatico, *Brassica oleracea*, ortaggi diversissimi (Tabella 9.1). È la **selezione artificiale**: a ogni generazione i caratteri scelti diventano più frequenti e più marcati.

Tabella 9.1 Gli ortaggi ottenuti per selezione artificiale da *Brassica oleracea* e la parte della pianta che gli agricoltori hanno selezionato.

Varietà	Parte selezionata
cavolo cappuccio	la gemma terminale, con foglie grandi e serrate
cavolini di Bruxelles	le gemme laterali lungo il fusto
cavolfiore e broccolo	l'infiorescenza, raccolta prima della fioritura
cavolo rapa	il fusto, ingrossato alla base
cavolo riccio e cavolo nero	le foglie

9.2.4 Darwin, Wallace e *L'origine delle specie*

Darwin raccolse prove per vent'anni prima di pubblicare. Nel 1858 ricevette dall'arcipelago malese un breve saggio del naturalista Alfred Russel Wallace che conteneva, in sostanza, la stessa teoria. Il 1° luglio 1858 i lavori dei due furono presentati insieme alla Linnean Society di Londra, e il 24 novembre 1859 uscì il libro di Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* («L'origine delle specie per mezzo della selezione naturale»).

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Le parole di Darwin. Nella prima edizione dell'*Origine* la parola *evolution* non compare mai, e il verbo *evolved* («evoluto») solo una volta, come ultima parola del libro (la citiamo all'inizio di questo capitolo). L'espressione «sopravvivenza del più adatto» non è di Darwin ma del filosofo Herbert Spencer: Darwin la adottò nelle edizioni successive. Wallace, dal canto suo, non rivendicò mai la priorità e intitolò un suo libro *Darwinism* (1889).

9.3 La selezione naturale

9.3.1 Il ragionamento di Darwin

La teoria di Darwin si può riassumere in alcune osservazioni e in una conclusione (Figura 9.2).

1. **Variabilità.** Gli individui di una stessa specie non sono identici: differiscono per dimensioni, colore, forma, comportamento.
2. **Ereditarietà.** Molte di queste differenze si trasmettono dai genitori ai figli.
3. **Sovrapproduzione.** Nascono più individui di quanti l'ambiente possa mantenere: di qui la lotta per l'esistenza.
4. **Sopravvivenza e riproduzione differenziale.** Gli individui con caratteri più vantaggiosi in quell'ambiente hanno, in media, più probabilità di sopravvivere e di lasciare figli.

5. **Accumulo degli adattamenti.** Generazione dopo generazione, i caratteri vantaggiosi diventano più frequenti e la popolazione cambia.

Darwin chiamò questo processo **selezione naturale**, per analogia con quella artificiale: qui a «scegliere» è l'ambiente, con i predatori, il clima, le malattie, la scarsità di cibo. Nel capitolo IV dell'*Origine* scrisse: «*This preservation of favourable variations and the rejection of injurious variations, I call Natural Selection*», cioè «Questa conservazione delle variazioni favorevoli e questo scarto delle variazioni dannose, io lo chiamo selezione naturale» (traduzione della redazione).

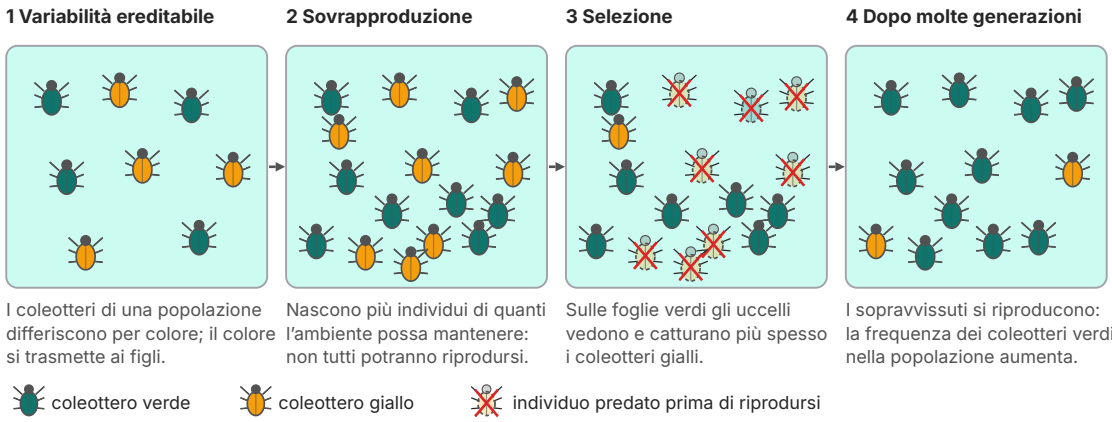


Figura 9.2 I passaggi della selezione naturale in una popolazione di coleotteri che vive sulle foglie (schema). La variabilità esiste prima della selezione: il colore verde non compare «perché serve», ma i coleotteri verdi hanno più probabilità di sopravvivere e di riprodursi.

IN SINTESI

Selezione naturale = variabilità ereditabile + sovrapproduzione + sopravvivenza e riproduzione differenziale. Risultato: in molte generazioni aumenta nella popolazione la frequenza dei caratteri vantaggiosi in quell'ambiente.

Due aspetti sono fondamentali. Primo: le variazioni compaiono *per caso* rispetto ai bisogni dell'organismo, mentre la selezione *non* è casuale, perché favorisce in modo sistematico certi caratteri in un certo ambiente. Secondo: la selezione agisce sugli individui, ma a cambiare è la *popolazione*. Un singolo coleottero non diventa verde; è la proporzione dei coleotteri verdi che aumenta.

9.3.2 Fitness e adattamento

Per la selezione naturale il successo si misura in figli. La **fitness** di un individuo è il suo contributo alla generazione successiva: il numero di discendenti che sopravvivono e si riproducono a loro volta. Un animale fortissimo che non si riproduce ha fitness zero. Un carattere che aumen-

ta la fitness e si è diffuso per selezione naturale è un adattamento (Capitolo 1), come il colore mimetico di un insetto o il becco robusto di un fringuello che mangia semi duri. Poiché l'ambiente cambia, un carattere vantaggioso oggi può diventare svantaggioso domani.

ERRORE FREQUENTE

«Gli animali si adattano perché ne hanno bisogno». No. Un organismo non può produrre le variazioni che gli servirebbero: le variazioni compaiono indipendentemente dal bisogno, e la selezione «sceglie» fra quelle che già esistono. Per lo stesso motivo l'evoluzione non ha uno scopo e non tende al «progresso»: premia ciò che funziona nel presente.

«Sopravvive il più forte». Anche questo è sbagliato. Contano la sopravvivenza *e* la riproduzione, e il carattere vantaggioso può essere qualunque cosa: la resistenza a una malattia o alla siccità, un colore che rende meno visibili.

ESEMPIO SVOLTO

Quanti figli sopravvivono?

Problema: una femmina di merluzzo depone moltissime uova; supponi che nel corso della vita ne deponga in tutto 4 milioni e che la popolazione resti stabile. Quanti suoi figli, in media, arrivano a riprodursi? Che percentuale delle uova rappresentano?

Soluzione. In una popolazione stabile ogni coppia di genitori è sostituita, in media, da due figli che a loro volta si riproducono:

$$2 : 4\,000\,000 = 0{,}000\,000\,5 = 0{,}000\,05\ \%$$

Risposta: in media 2 figli, lo 0,000 05 % delle uova. Tutti gli altri muoiono prima di riprodursi: basta una piccola differenza nella probabilità di sopravvivere per decidere quali caratteri passeranno alla generazione successiva.

9.3.3 La selezione sessuale

Alcuni caratteri sembrano svantaggiosi: la coda enorme del pavone maschio lo rende più visibile ai predatori e più lento nella fuga. Darwin li spiegò con la **selezione sessuale**, che favorisce i caratteri che aumentano il successo nell'accoppiamento: le pavonesse scelgono più spesso i maschi con la coda più ricca di «occhi», e i cervi maschi combattono con i palchi per l'accesso alle femmine. Un carattere può diffondersi anche se riduce la sopravvivenza, purché aumenti il numero di figli.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Simulare la selezione naturale

Materiali: un cartoncino A3 verde e uno a fiori colorati; 100 dischetti di carta verdi e 100 rossi (fatti con una perforatrice); pinzette; cronometro.

Procedura. (1) Spargi sul cartoncino verde 50 dischetti verdi e 50 rossi. (2) Un compagno, il «predatore», raccoglie con le pinzette, uno alla volta, più dischetti possibile in 20 secondi. (3) Conta i sopravvissuti di ciascun colore e aggiungi, per ognuno, un dischetto dello stesso colore (la «riproduzione»). (4) Ripeti per 4 generazioni registrando le percentuali dei due colori; poi ripeti tutto sul cartoncino a fiori.

Risultato atteso e domande. Sul fondo verde la percentuale dei dischetti verdi aumenta a ogni generazione; sul fondo variopinto la differenza è minore. Quale variabile hai cambiato fra le due prove? In che cosa il modello è diverso da una vera popolazione? (Da dove vengono le varianti, e chi decide quante ne nascono?)

9.4 Le prove dell'evoluzione

Le prove dell'evoluzione vengono da campi molto diversi, e la loro forza sta nel fatto che concordano: ciascuna conferma, in modo indipendente, che le specie attuali discendono, modificandosi, da antenati comuni.

9.4.1 I fossili e le forme di transizione

Negli strati di roccia i fossili non sono disposti a caso: pesci fossili compaiono in strati più antichi di quelli con i primi anfibi, e questi in strati più antichi di quelli con i primi mammiferi, mai il contrario. Particolarmente importanti sono le **forme di transizione**, fossili che presentano insieme caratteri di due gruppi diversi. Nel 1861, in una cava di calcare della Baviera, fu scoperto *Archaeopteryx*, vissuto circa 150 milioni di anni fa: aveva penne e ali come un uccello, ma anche denti, artigli sulle dita delle ali e una lunga coda ossea, come i piccoli dinosauri carnivori. Nel 2004, nell'Artico canadese, fu trovato *Tiktaalik*, un pesce di circa 375 milioni di anni fa con un collo mobile e pinne dalle ossa robuste, parente stretto dei primi vertebrati a quattro zampe. I paleontologi lo avevano cercato apposta in rocce di quell'età formate in acque basse: una previsione della teoria, confermata.

9.4.2 L'anatomia comparata

Confrontiamo il braccio dell'uomo, la zampa anteriore del gatto, la pinna della balena e l'ala del pipistrello (Figura 9.3). Le funzioni sono diversissime, ma lo schema è lo stesso: un osso nel braccio (omero), due nell'avambraccio (radio e ulna), le piccole ossa del polso (carpo) e cinque raggi di metacarpali e falangi. È l'arto **pentadattilo**, comune a tutti i vertebrati terrestri e ai loro

discendenti tornati in acqua. Strutture simili per costruzione e posizione perché ereditate da un antenato comune, anche se oggi svolgono funzioni diverse, si chiamano **organi omologhi**.

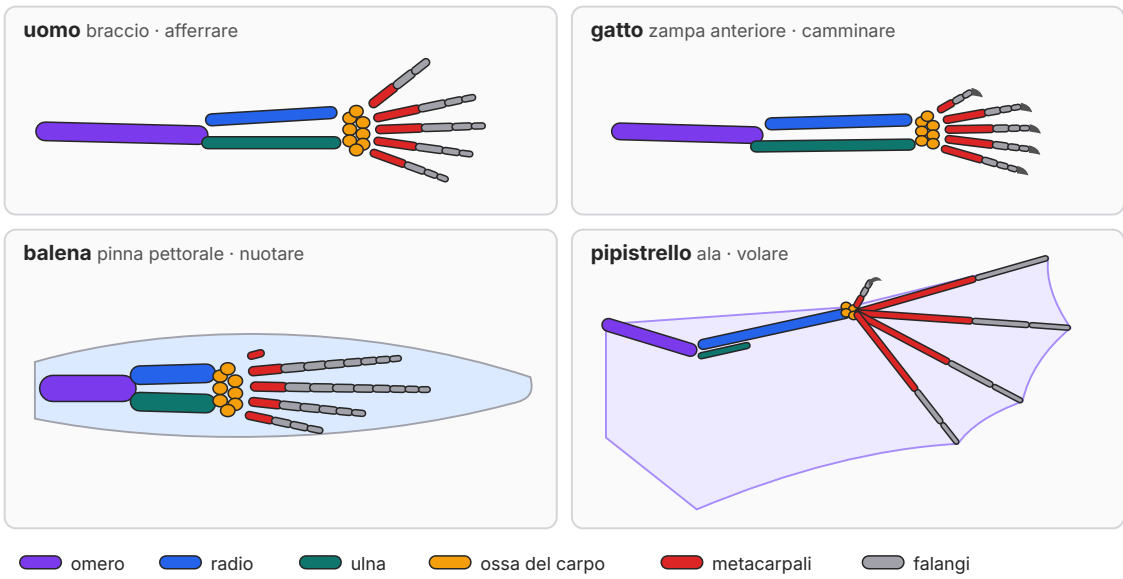


Figura 9.3 L'arto pentadattilo, un esempio di organi omologhi: le ossa corrispondenti hanno lo stesso colore. Nella balena le dita sono racchiuse nella pinna e hanno molte falangi; nel pipistrello metacarpali e falangi di quattro dita sono lunghissimi e sostengono la membrana dell'ala. Schema non in scala; il numero delle falangi varia da specie a specie.

Al contrario, l'ala di un uccello e quella di un insetto servono entrambe a volare, ma sono costruite in modo del tutto diverso (Figura 9.4): la prima ha uno scheletro di ossa e una superficie di penne, la seconda è una sottile lamina di cuticola, senza ossa. Sono **organi analoghi**: stessa funzione, ma struttura e origine diverse, non ereditate da un antenato comune (ne riparleremo a proposito dell'evoluzione convergente, nel Capitolo 10).

Gli **organi vestigiali**, infine, sono strutture ridotte che in una specie hanno perso la funzione originaria o ne hanno una secondaria, mentre in specie affini sono sviluppate e funzionanti. Le balene hanno piccole ossa che corrispondono al bacino dei mammiferi terrestri, senza zampe posteriori da sostenere; il kiwi della Nuova Zelanda ha ali minuscole, nascoste sotto le piume; noi abbiamo il coccige, formato da poche vertebre saldate che corrispondono alla coda di altri primati. Vestigiale non vuol dire «del tutto inutile» (le ossa del bacino delle balene sostengono alcuni muscoli), ma la presenza di queste strutture si spiega solo con la storia evolutiva della specie.

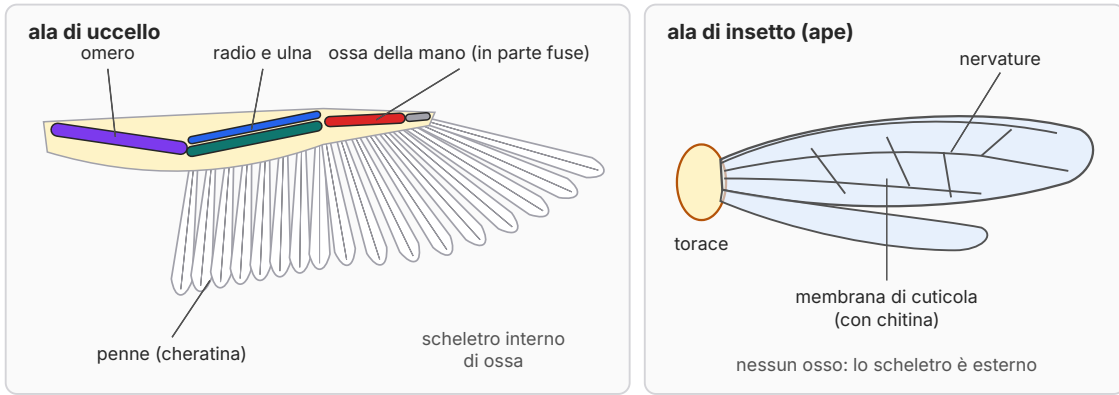


Figura 9.4 Organi analoghi: l'ala di un uccello e l'ala di un insetto servono entrambe al volo, ma la prima è sostenuta da ossa (stessi colori della Figura 9.3) e coperta di penne, la seconda è una lamina di cuticola rinforzata da nervature. Schema non in scala.

9.4.3 L'embriologia comparata

L'**embriologia comparata** confronta lo sviluppo degli embrioni. In uno stadio precoce gli embrioni di tutti i vertebrati, uomo compreso, hanno una serie di tasche faringee nella regione del collo e una coda: nei pesci da quelle tasche si sviluppano le branchie, in noi parti della gola e dell'orecchio. Queste somiglianze indicano una discendenza comune. Non vale invece la «legge» proposta nell'Ottocento da Ernst Haeckel, secondo cui ogni embrione ripercorrerebbe le forme adulte dei suoi antenati: l'embrione umano non è mai un pesce in miniatura. Gli embrioni si somigliano perché condividono le prime tappe di un programma di sviluppo ereditato, poi modificato in ciascun gruppo.

9.4.4 La biogeografia

La **biogeografia** studia la distribuzione geografica dei viventi. Le specie delle isole oceaniche somigliano a quelle del continente più vicino, non a quelle di isole lontane con un clima simile: le specie delle Galápagos somigliano a quelle sudamericane, quelle delle isole di Capo Verde a specie africane. L'Australia, isolata da decine di milioni di anni, ospita soprattutto mammiferi marsupiali (canguri, koala, vombati), che lì si sono diversificati occupando i ruoli svolti altrove dai mammiferi placentati.

9.4.5 Le prove molecolari

Tutti i viventi conservano l'informazione ereditaria nel DNA e usano lo stesso sistema per tradurla in proteine (lo studierai nel secondo biennio): un'unità profonda che si spiega con un'origine comune. Inoltre le specie che l'anatomia e i fossili indicano come parenti stretti hanno

DNA e proteine dalle sequenze molto simili, e le differenze aumentano con la distanza evolutiva. Le parentele ricostruite con metodi indipendenti coincidono in larga parte.

Tutte queste prove portano alla stessa immagine: non una scala, con le specie disposte dalla più semplice alla più complessa, ma un cespuglio, i cui rami si separano da antenati comuni, si ramificano ancora e in gran parte finiscono con un'estinzione (Figura 9.5). Già nel 1837 Darwin disegnò in un taccuino un piccolo albero ramificato, e l'unica figura dell'*Origine* è un diagramma ramificato.

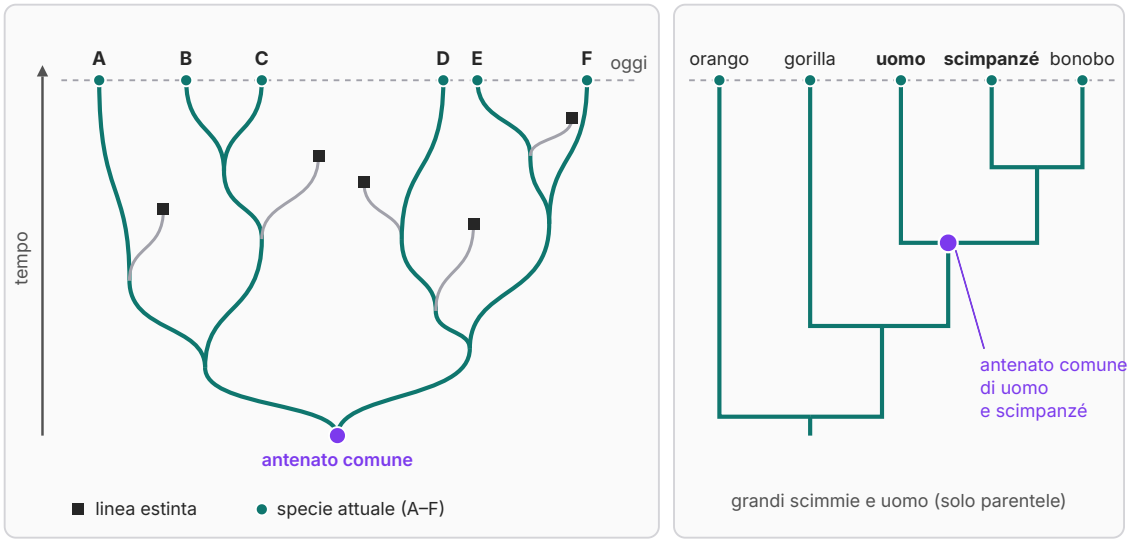


Figura 9.5 A sinistra: l'evoluzione come un cespuglio ramificato (schema generico). Ogni ramo che si divide rappresenta la separazione di due linee da un antenato comune; molte linee si estinguono. A destra: le parentele fra l'uomo e le grandi scimmie attuali secondo le prove anatomiche e molecolari (schema senza scala dei tempi).

ERRORE FREQUENTE

«L'uomo discende dalla scimmia». No: l'uomo non discende da nessuna delle scimmie che vivono oggi. Uomo e scimpanzé hanno un antenato comune, vissuto alcuni milioni di anni fa, da cui sono derivate due linee evolutive distinte, che hanno avuto lo stesso tempo per evolversi. Allo stesso modo tu e tuo cugino non discendete l'uno dall'altro, ma da nonni comuni. Della storia evolutiva della nostra specie parleremo nel Capitolo 10.

9.5 L'evoluzione sotto i nostri occhi

Darwin pensava che la selezione naturale fosse troppo lenta per essere osservata nel corso di una vita umana. Quando però l'ambiente cambia rapidamente e le generazioni si susseguono in fretta, possiamo vederla all'opera.

9.5.1 La falena delle betulle

La falena delle betulle (*Biston betularia*) passa il giorno ferma sui tronchi degli alberi. La sua forma comune, chiara e punteggiata (forma *typica*), si confonde con i tronchi coperti di licheni chiari. Una forma quasi interamente scura (forma *carbonaria*), dovuta a un allele di un solo gene, fu segnalata per la prima volta vicino a Manchester nel 1848. Nella seconda metà dell'Ottocento, nelle regioni industriali inglesi, la fuliggine uccise i licheni e annerì i tronchi, e la forma scura vi divenne rapidamente la più comune, mentre in campagna restava rara (Figura 9.6). Il fenomeno, osservato anche in altre falene, è detto **melanismo industriale**.

Lo spiega la selezione naturale operata dagli uccelli: sui tronchi anneriti le falene chiare erano più visibili e venivano mangiate più spesso, sui tronchi con licheni accadeva il contrario. Dopo le leggi contro l'inquinamento dell'aria approvate nel Regno Unito dal 1956, i licheni sono ricomparsi e la forma chiara è tornata a prevalere: la selezione ha cambiato direzione insieme all'ambiente.

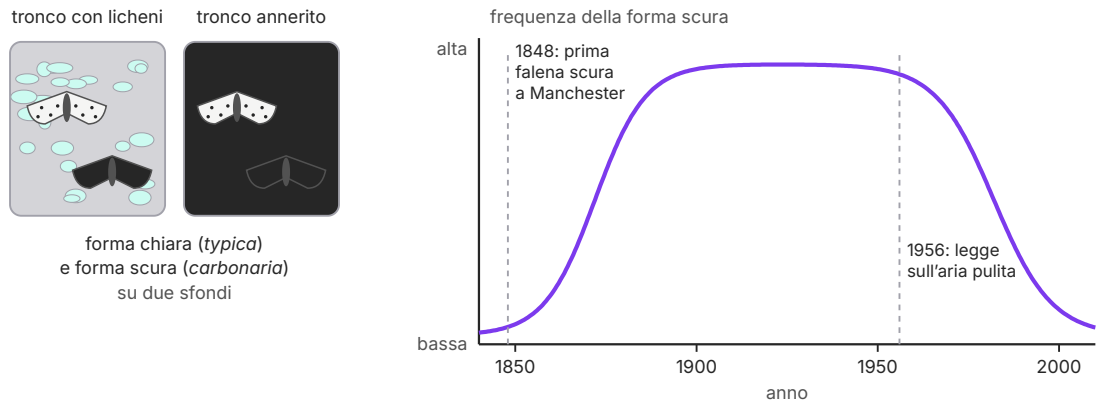


Figura 9.6 Melanismo industriale nella falena delle betulle. A sinistra: le due forme su un tronco coperto di licheni e su un tronco annerito dalla fuliggine (schema). A destra: andamento qualitativo della frequenza della forma scura nelle aree industriali dell'Inghilterra, ricostruito dalle descrizioni storiche; non sono riportati dati misurati.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Le falene di Kettlewell. Negli anni Cinquanta il biologo britannico Bernard Kettlewell liberò falene chiare e scure, marcate con un puntino di vernice, in un bosco inquinato e in uno pulito, e poi ne ricatturò quante poteva: nel bosco inquinato ritrovò in proporzione più falene scure, in quello pulito più chiare. Il suo metodo fu criticato, per esempio perché le falene venivano liberate di giorno e in gran numero. Tra il 2001 e il 2007 il genetista Michael Majerus ripeté l'esperimento con più cura, osservando direttamente gli uccelli, e confermò il ruolo della predazione.

9.5.2 I batteri resistenti agli antibiotici

Nel 1928 Alexander Fleming scoprì la penicillina, il primo antibiotico (Capitolo 12). Gli antibiotici uccidono i batteri o ne bloccano la crescita e hanno salvato milioni di vite; ma presto comparvero ceppi resistenti. L'**antibiotico-resistenza** è la capacità di alcuni batteri di sopravvivere a un antibiotico che uccide gli altri batteri della stessa specie. In una grande popolazione di batteri ci sono quasi sempre alcune cellule che, per mutazioni casuali o per geni ricevuti da altri batteri, resistono all'antibiotico. L'antibiotico non crea la resistenza: uccide le cellule sensibili e lascia moltiplicare quelle resistenti. Lo stesso accade con gli insetti: pochi anni dopo l'introduzione del DDT, negli anni Quaranta, comparvero mosche e zanzare resistenti.

ESEMPIO SVOLTO

Come nasce una popolazione resistente

Problema: in un'infezione ci sono 10^9 batteri, e in media 1 su 10^7 è resistente a un antibiotico, che uccide tutti i sensibili. Quanti resistenti restano? Se si dividono ogni 30 minuti e nulla li ostacola, quanti saranno dopo 6 ore?

Soluzione. Resistenti iniziali: $10^9 : 10^7 = 10^2 = 100$. In 6 ore ci sono 12 periodi di 30 minuti, e a ogni periodo il numero raddoppia:

$$N = 100 \times 2^{12} = 100 \times 4096 = 409\,600 \approx 4 \times 10^5$$

Risposta: 100 batteri resistenti, che in 6 ore diventano circa 400 000, tutti resistenti. Nell'organismo il sistema immunitario contrasta questa crescita, ma se i resistenti passano ad altre persone l'antibiotico non funziona più nemmeno per loro.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Usare bene gli antibiotici. L'Organizzazione mondiale della sanità considera la resistenza agli antibiotici una delle principali minacce per la salute globale. Per rallentarla: prendere antibiotici solo se prescritti dal medico, alla dose e per la durata indicate; non usarli contro raffreddore e influenza, causati da virus, sui quali non hanno effetto; non conservare gli avanzi per «la prossima volta». Ogni uso inutile seleziona batteri resistenti.

9.6 Dalla teoria di Darwin alla sintesi moderna

9.6.1 Il problema dell'ereditarietà

La teoria di Darwin aveva un punto debole: nessuno sapeva come si trasmettessero i caratteri. Si pensava che i caratteri dei genitori si mescolassero nei figli come due vernici; ma allora, obiettò nel 1867 l'ingegnere britannico Fleeming Jenkin, una variazione vantaggiosa comparsa

in un solo individuo si «diluirebbe» a ogni generazione, prima che la selezione possa favorirla. La risposta esisteva già: nel 1866 Mendel aveva dimostrato che i caratteri si trasmettono come unità distinte, che non si mescolano (Capitolo 7). Darwin però non conobbe mai il suo lavoro, riscoperto nel 1900.

9.6.2 La sintesi moderna

Fra gli anni Trenta e Quaranta del Novecento genetisti, naturalisti e paleontologi unificarono i due filoni. Ronald Fisher, J. B. S. Haldane e Sewall Wright mostrarono come la selezione agisce sugli alleli mendeliani in una popolazione; Theodosius Dobzhansky, Ernst Mayr e altri applicarono queste idee alle popolazioni naturali. Nacque così la **sintesi moderna** (o teoria sintetica dell'evoluzione):

- le nuove variazioni nascono dalle **mutazioni**, che creano nuovi alleli (Capitolo 8), e dalla **ricombinazione** degli alleli nella meiosi e nella fecondazione (Capitolo 6);
- l'unità che evolve è la **popolazione**: evolvere significa cambiare, di generazione in generazione, la frequenza degli alleli nella popolazione;
- la **selezione naturale** è il principale fattore che produce adattamenti, ma anche il caso e le migrazioni cambiano le frequenze degli alleli (Capitolo 10);
- accumulandosi, questi cambiamenti portano alla formazione di nuove specie e, in tempi lunghissimi, ai grandi cambiamenti documentati dai fossili.

9.6.3 Che cosa vuol dire «teoria»

Nel linguaggio quotidiano «teoria» vuol dire spesso «supposizione», come in «è solo una teoria». In scienza il significato è un altro: una supposizione da verificare è un'ipotesi, mentre una **teoria scientifica** è una spiegazione ampia di un insieme di fenomeni, sostenuta da moltissime prove indipendenti e capace di fare previsioni controllabili. La teoria cellulare (Capitolo 1) e la teoria atomica di Dalton, che hai studiato in *Scienze naturali 1*, sono teorie in questo senso.

La teoria dell'evoluzione ha superato più di un secolo e mezzo di verifiche: ha previsto dove cercare fossili come *Tiktaalik* e ha trovato conferma nella genetica di Mendel e nel DNA, che Darwin non conosceva. Gli scienziati discutono ancora molti dettagli, per esempio quanto conti la selezione rispetto al caso o a che ritmo cambino le specie; ma che i viventi si siano evoluti da antenati comuni è uno dei risultati più solidi di tutta la scienza.

SINTESI

- Fino al Settecento prevaleva il **fissismo**: specie immutabili. Cuvier dimostrò l'estinzione, ma la spiegò con il **catastrofismo**; Hutton e Lyell, con l'**attualismo**, mostrarono che la Terra è antichissima (tempo profondo).
- Lamarck (1809) propose la prima teoria evolutiva coerente, basata su uso e disuso ed **ereditarietà dei caratteri acquisiti**; quest'ultima è stata smentita (Weismann), ma resta il merito di aver affermato che le specie cambiano.
- Nel viaggio del *Beagle* (1831–1836) Darwin osservò fossili sudamericani e specie delle Galápagos simili a quelle del continente ma diverse da isola a isola.
- Malthus suggerì a Darwin la **lotta per l'esistenza**; la **selezione artificiale** degli allevatori gli mostrò quanto può cambiare una specie. Darwin e Wallace presentarono la teoria nel 1858; l'*Origine delle specie* uscì il 24 novembre 1859.
- **Selezione naturale**: variabilità ereditabile, sovrapproduzione, sopravvivenza e riproduzione differenziale, accumulo di adattamenti. Le variazioni sono casuali rispetto ai bisogni, la selezione no.
- La **fitness** è il successo riproduttivo; «più adatto» non vuol dire «più forte». La **selezione sessuale** favorisce i caratteri che aumentano il successo nell'accoppiamento.
- Prove dell'evoluzione: fossili e **forme di transizione** (*Archaeopteryx*, *Tiktaalik*), organi **omologhi**, **analoghi** e **vestigiali**, embriologia comparata, **biogeografia**, somiglianze molecolari.
- L'evoluzione è un cespuglio ramificato, non una scala: uomo e scimpanzé hanno un antenato comune.
- Esempi osservati: il **melanismo industriale** di *Biston betularia*, l'**antibiotico-resistenza** dei batteri, la resistenza degli insetti agli insetticidi.
- La **sintesi moderna** (anni 1930–1940) unì Darwin e Mendel: le mutazioni e la ricombinazione producono variabilità, la popolazione evolve cambiando le frequenze degli alleli. Una **teoria scientifica** non è una supposizione, ma una spiegazione ampiamente verificata.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Chi sostenne che le specie si estinguono, ma restò fissista spiegando la successione dei fossili con una serie di catastrofi?

   A. Lyell
   B. Lamarck
   C. Cuvier
   D. Darwin

2. ● Il principio dell'attualismo di Hutton e Lyell afferma che:

   A. le specie attuali sono immutabili

   B. i processi geologici del passato sono gli stessi che agiscono oggi

   C. la Terra è stata modellata da catastrofi improvvise

   D. i fossili sono resti di specie ancora viventi

3. ● Secondo Lamarck, il collo lungo delle giraffe si spiega:

   A. con lo sforzo di allungarlo, trasmesso poi ai figli

   B. con una mutazione casuale favorita dalla selezione

   C. con la selezione artificiale

   D. con una catastrofe che eliminò le giraffe dal collo corto

4. ●● La lettura di Malthus suggerì a Darwin soprattutto l'idea:

   A. dell'ereditarietà dei caratteri acquisiti

   B. della selezione sessuale

   C. dell'antenato comune

   D. della sovrapproduzione e della lotta per l'esistenza

5. ● Quale coppia contiene organi omologhi?

   A. ala di pipistrello e braccio dell'uomo

   B. ala di farfalla e ala di passero

   C. ala di ape e ala di pipistrello

   D. pinna di pesce e zampa di insetto

6. ●● In biologia la fitness di un individuo indica:

   A. la sua forza fisica

   B. la sua durata della vita

   C. il numero dei suoi discendenti che sopravvivono e si riproducono

   D. la sua capacità di procurarsi il cibo

7. ●● Un antibiotico usato per molto tempo diventa meno efficace perché:

   A. i batteri si abituano all'antibiotico durante la cura

   B. l'antibiotico fa comparire in ogni batterio la mutazione che serve

   C. il sistema immunitario smette di funzionare

   D. l'antibiotico seleziona i batteri resistenti, già presenti, che si moltiplicano

8. ●● Quale di queste affermazioni sulla sintesi moderna è corretta?

   A. unisce la selezione naturale e la genetica mendeliana

   B. sostituisce la selezione naturale con l'ereditarietà dei caratteri acquisiti

   C. afferma che a evolvere sono i singoli individui

   D. fu formulata da Darwin nel 1859

9. ●●● Le ossa del bacino della balena, senza zampe posteriori da sostenere, sono un esempio di:
   A. organo analogo
   B. organo vestigiale
   C. forma di transizione
   D. selezione sessuale

Vero o falso

10. ● Darwin e Wallace giunsero indipendentemente alla teoria della selezione naturale.

11. ● Nella selezione naturale, le variazioni compaiono perché l'organismo ne ha bisogno.

12. ● L'ala di un uccello e l'ala di un insetto sono organi omologhi.

13. ●● A evolversi, nel senso darwiniano, sono le popolazioni e non i singoli individui.

14. ●● Darwin conosceva le leggi di Mendel e le usò nell'*Origine delle specie*.

15. ●●● Un carattere che riduce la probabilità di sopravvivere può diffondersi in una popolazione, se aumenta il numero di figli.

Applicare

16. ● Una rana depone in tutta la vita circa 8000 uova. Se la popolazione è stabile, quanti suoi figli, in media, arrivano a riprodursi? Esprimi il risultato anche come percentuale delle uova.

17. ●● In un lago si depositano in media 0,5 mm di sedimenti all'anno. Quanti anni sono necessari per accumulare 25 m di sedimenti? (Supponi che la velocità resti costante.)

18. ● Classifica ciascuna coppia come organi omologhi o organi analoghi: (a) zampa anteriore del cavallo e braccio dell'uomo; (b) ala di libellula e ala di rondine; (c) pinna pettorale del delfino e ala del pipistrello; (d) occhio del polpo e occhio dell'uomo, costruiti in modo diverso e derivati da strutture embrionali diverse.

19. ● Abbina ciascun ortaggio alla parte di *Brassica oleracea* selezionata: cavolo rapa, cavolini di Bruxelles, cavolfiore, cavolo nero. Parti: fusto, gemme laterali, foglie, infiorescenza.

20. ●● Malthus ipotizzò che una popolazione, se nulla la frena, raddoppi ogni 25 anni, mentre la quantità di cibo cresce ogni 25 anni di una quantità fissa. Una popolazione di 1 milione di persone ha cibo sufficiente per 1 milione; ogni 25 anni il cibo aumenta di quanto basta per 1 milione di persone in più. Dopo 100 anni, quante persone ci sarebbero e per quante ci sarebbe cibo?

21. ●● In un esperimento di cattura e ricattura (dati di esempio) si liberano in un bosco inquinato 200 falene chiare e 200 falene scure, marcate. Il giorno dopo se ne ricatturano 18 chiare e 42 scure. Calcola la percentuale di ricattura di ciascuna forma. Quale forma è favorita in quel bosco?

22. ●●● In un'infezione ci sono 5×10^8 batteri, e 1 batterio su 10^6 è resistente a un antibiotico. Dopo la prima dose sopravvivono solo i resistenti, che si dividono ogni 20 minuti. Quanti batteri resistenti ci sono subito dopo la dose? Quanti dopo 4 ore, se nulla li ostacola? Dopo quanto tempo supererebbero 10^6?

Leggere dati e figure

23. ● Osserva la Figura 9.1. (a) In quale oceano si trovano le Galápagos? (b) Il *Beagle* fece il giro del mondo procedendo verso est o verso ovest? (c) Quale continente costeggiò più a lungo? (d) In quale porto concluse il viaggio?

24. ●● Osserva la Figura 9.3. (a) Quali ossa sono state più allungate nell'ala del pipistrello? (b) Quali ossa sono più corte e più larghe nella pinna della balena rispetto al braccio dell'uomo? (c) Perché questi arti, pur avendo funzioni diverse, sono considerati omologhi?

25. ●●● Osserva la Figura 9.5. (a) Nello schema di sinistra, quante linee si sono estinte? Quante specie sono attuali? (b) Nello schema di destra, qual è la specie attuale più strettamente imparentata con lo scimpanzé? E con l'uomo? (c) Usando la figura, spiega perché l'affermazione «l'uomo discende dallo scimpanzé» è sbagliata.

Indagare e argomentare

26. ●● Progetta un esperimento controllato per verificare se gli uccelli di un parco catturano più spesso i bruchi di colore contrastante con lo sfondo. Puoi usare finti bruchi di plastilina, verdi e marroni, disposti su foglie verdi. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, le variabili da tenere costanti e il controllo.

27. ●● Un amico ha l'influenza e vuole prendere gli antibiotici avanzati da una cura precedente. Spiegagli perché è inutile per lui e dannoso per tutti, usando i concetti di virus, batterio e selezione naturale.

28. ●●● I pesci che vivono da molte generazioni in grotte completamente buie hanno spesso occhi ridotti o assenti. Spiega questo fatto prima come lo avrebbe spiegato Lamarck, poi secondo la teoria moderna dell'evoluzione. Quale delle due spiegazioni è accettata oggi, e quale osservazione (per esempio di Weismann) contraddice l'altra?

PER APPROFONDIRE

- [DAR] C. Darwin, *On the Origin of Species* (1859): i capitoli III e IV (lotta per l'esistenza e selezione naturale) si leggono ancora oggi con profitto; esistono traduzioni italiane.
- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: il capitolo sulla «discendenza con modificazione», con le prove dell'evoluzione e i casi di selezione osservata.
- [GOU] S. J. Gould, *Wonderful Life*: la storia della vita come cespuglio ramificato, raccontata a partire dai fossili di Burgess.
- [SAD] D. Sadava et al., *Life: The Science of Biology*: la storia del pensiero evoluzionistico e la sintesi moderna.

Glossario del capitolo

Antibiotico-resistenza
Capacità di alcuni batteri di sopravvivere a un antibiotico che uccide gli altri batteri della stessa specie; si diffonde per selezione naturale.

Attualismo
Principio della geologia (Hutton, Lyell) secondo cui la Terra è stata modellata dagli stessi processi lenti che agiscono oggi; detto anche uniformismo.

Biogeografia
Studio della distribuzione geografica dei viventi; fornisce prove dell'evoluzione.

Catastrofismo
Teoria di Cuvier secondo cui la successione dei fossili si spiega con catastrofi improvvise che sterminarono le specie di intere regioni.

Ereditarietà dei caratteri acquisiti
Idea di Lamarck secondo cui le modificazioni acquisite durante la vita si trasmettono ai figli; è stata smentita.

Fissismo
Concezione secondo cui le specie sono immutabili e sono sempre state come sono oggi.

Fitness
Successo riproduttivo di un individuo: il suo contributo di discendenti fertili alla generazione successiva.

Forma di transizione
Fossile con caratteri intermedi fra due gruppi di organismi, come *Archaeopteryx* o *Tiktaalik*.

Fossile
Resto o traccia di un organismo del passato conservato nelle rocce.

Lotta per l'esistenza
Competizione per le risorse che deriva dal fatto che nascono più individui di quanti l'ambiente possa mantenere.

Melanismo industriale
Aumento della frequenza delle forme scure di una specie in ambienti anneriti dall'inquinamento, come nella falena *Biston betularia*.

Organi analoghi
Strutture con la stessa funzione ma con struttura e origine diverse, non ereditate da un antenato comune (ala di uccello e ala di insetto).

Organi omologhi
Strutture con la stessa costruzione di base, ereditata da un antenato comune, anche se hanno funzioni diverse (braccio dell'uomo e ala del pipistrello).

Organo vestigiale
Struttura ridotta che ha perso la funzione originaria o ne svolge una secondaria, sviluppata invece in specie affini.

Selezione artificiale
Scelta da parte dell'uomo degli individui che si riproducono, per ottenere razze e varietà con i caratteri desiderati.

Selezione naturale
Processo per cui gli individui con caratteri ereditabili più vantaggiosi in un ambiente sopravvivono e si riproducono di più, e quei caratteri diventano più frequenti nella popolazione.

Selezione sessuale
Forma di selezione che favorisce i caratteri che aumentano il successo nell'accoppiamento, anche a scapito della sopravvivenza.

Sintesi moderna
Teoria dell'evoluzione elaborata negli anni 1930–1940, che unisce la selezione naturale di Darwin e la genetica di Mendel.

Teoria scientifica
Spiegazione ampia di un insieme di fenomeni, sostenuta da molte prove indipendenti e capace di fare previsioni controllabili.

Soluzioni

1. C. Cuvier dimostrò l'estinzione (mammut) ma restò fissista, spiegando la successione dei fossili con il catastrofismo.

2. B. L'attualismo: i processi che hanno modellato la Terra in passato sono quelli che vediamo agire oggi.

3. A. Uso e disuso più ereditarietà dei caratteri acquisiti.

4. D. Malthus mostrò che le popolazioni crescono più delle risorse: ne seguono sovrapproduzione e lotta per l'esistenza.

5. A. Stesso schema osseo (arto pentadattilo) ereditato da un antenato comune; le altre coppie sono analoghe o non corrispondenti.

6. C. La fitness è il successo riproduttivo.

7. D. La resistenza esiste già in pochi batteri; l'antibiotico elimina i sensibili e i resistenti si moltiplicano.

8. A. La sintesi moderna (anni 1930–1940) unisce selezione naturale e genetica di Mendel; evolvono le popolazioni.

9. B. Organo vestigiale: ridotto, senza la funzione originaria (sostegno delle zampe posteriori), presente perché ereditato.

10. V. Wallace inviò a Darwin nel 1858 un saggio con la stessa teoria; i due lavori furono presentati insieme.

11. F. Le variazioni compaiono per caso rispetto ai bisogni; la selezione favorisce quelle che già esistono e risultano vantaggiose.

12. F. Sono organi analoghi: stessa funzione, struttura e origine diverse (ossa e penne contro una lamina di cuticola).

13. V. La selezione agisce sugli individui, ma cambia la composizione della popolazione.

14. F. Darwin non conobbe mai il lavoro di Mendel (1866), riscoperto nel 1900; l'unione delle due teorie è la sintesi moderna.

15. V. È il caso della selezione sessuale (la coda del pavone): conta il numero di figli, non solo la sopravvivenza.

16. Popolazione stabile: in media 2 figli arrivano a riprodursi. 2 : 8000 = 0,000 25 = 0,025 % delle uova (1 su 4000).

17. 25 m = 25 000 mm; 25 000 mm : 0,5 mm/anno = 50 000 anni.

18. (a) omologhi (arto pentadattilo); (b) analoghi (insetto e uccello); (c) omologhi: entrambi sono arti anteriori di mammiferi con le stesse ossa, anche se la funzione è diversa; (d) analoghi: stessa funzione, costruzione e origine diverse.

19. Cavolo rapa → fusto; cavolini di Bruxelles → gemme laterali; cavolfiore → infiorescenza; cavolo nero → foglie.

20. Popolazione: 1 → 2 → 4 → 8 → 16 milioni (4 raddoppi, $2^4 = 16$). Cibo: 1 → 2 → 3 → 4 → 5 milioni di persone. Dopo 100 anni: 16 milioni di persone e cibo per 5 milioni; per Malthus la crescita sarebbe quindi frenata molto prima.

21. Chiare: 18 : 200 = 0,09 = 9 %; scure: 42 : 200 = 0,21 = 21 %. Le falene scure sono ricatturate in proporzione più che doppia (21 : 9 ≈ 2,3): nel bosco inquinato sono favorite, perché meno visibili ai predatori sui tronchi anneriti.

22. Resistenti dopo la dose: $5 \times 10^8 : 10^6 = 500$. In 4 ore ci sono 12 periodi di 20 minuti: $500 \times 2^{12} = 500 \times 4096 = 2\,048\,000 \approx 2{,}0 \times 10^6$. Per superare 10^6 servono $2^n > 2000$, cioè n = 11 raddoppi ($2^{11} = 2048$; con 10 raddoppi si arriva a 512 000): 11 × 20 min = 220 min = 3 h 40 min.

23. (a) Nell'Oceano Pacifico, sull'equatore, a ovest del Sud America. (b) Verso ovest: Atlantico, Sud America, Pacifico, Australia, Oceano Indiano, Afri-

ca. (c) Il Sud America. (d) A Falmouth, in Inghilterra (ottobre 1836).

24. (a) I metacarpali e le falangi di quattro dita (e il radio, lungo). (b) Omero, radio e ulna. (c) Hanno le stesse ossa nella stessa posizione (omero; radio e ulna; carpo; metacarpali e falangi di cinque raggi), ereditate da un antenato comune; la funzione diversa è il risultato di adattamenti diversi.

25. (a) 5 linee estinte (i quadratini) e 6 specie attuali (A–F). (b) Con lo scimpanzé, il bonobo; con l'uomo, scimpanzé e bonobo, che condividono con lui l'antenato comune più recente. (c) Uomo e scimpanzé stanno su due rami diversi che partono dallo stesso nodo, l'antenato comune; nessuno dei due si trova sul ramo che porta all'altro, ed entrambi si sono evoluti per lo stesso tempo.

26. Traccia: variabile indipendente: colore dei bruchi (verde o marrone); variabile dipendente: numero o percentuale di bruchi con segni di becco dopo un tempo stabilito (per esempio 48 ore); variabili costanti: forma e dimensioni dei bruchi, numero (per esempio 50 per colore), tipo di foglie, altezza, zona del parco, durata; i bruchi dei due colori vanno mescolati a caso. Controllo: un gruppo di bruchi dei due colori protetti con una rete dagli uccelli, per verificare che i segni siano dovuti ai becchi. Ripetere l'esperimento in luoghi diversi.

27. Traccia: l'influenza è causata da un virus; gli antibiotici agiscono sui batteri e non hanno effetto sui virus, quindi non lo guariscono. Prenderli senza bisogno espone però i batteri che vivono nel suo corpo all'antibiotico: i pochi batteri resistenti sopravvivono e si moltiplicano (selezione naturale), e possono passare ad altre persone. Così l'antibiotico diventa meno efficace quando servirà davvero, a lui e agli altri. Gli antibiotici vanno presi solo su prescrizione, alla dose e per la durata indicate.

28. Traccia: Lamarck: non usando gli occhi al buio, ogni pesce li avrebbe indeboliti e avrebbe trasmesso ai figli l'indebolimento (uso e disuso, ereditarietà dei caratteri acquisiti). Teoria moderna: nella popolazione compaiono per caso mutazioni che riducono gli occhi; al buio non sono svantaggiose (o lo sono meno della spesa di energia per costruire occhi inutili), quindi non vengono eliminate dalla selezione, o sono addirittura favorite, e in molte generazioni diventano frequenti. È accettata la seconda: le modificazioni acquisite dal corpo non passano ai gameti, come mostrò Weismann tagliando la coda ai topi per generazioni senza che i figli nascessero con la coda più corta.