CAPITOLO

9

L'apparato respiratorio

Ogni giorno migliaia di litri d'aria entrano nei tuoi polmoni: ne trattieni un po' di ossigeno e restituisci all'aria il carbonio del tuo pane.

OBIETTIVI

1. Descrivere l'anatomia delle vie aeree, dei polmoni e degli alveoli, collegando la struttura alla funzione.
2. Spiegare la meccanica della ventilazione con la legge di Boyle e leggere uno spirogramma.
3. Usare le pressioni parziali per prevedere il verso degli scambi gassosi nei polmoni e nei tessuti.
4. Interpretare la curva di dissociazione dell'emoglobina, l'effetto Bohr e il trasporto della CO_2.
5. Spiegare il controllo chimico del respiro e l'adattamento alla quota.
6. Riconoscere i rischi di fumo, monossido di carbonio, particolato e asma, e i comportamenti che proteggono l'apparato respiratorio.

INDICE DEL CAPITOLO

9.1 Respirare: dall'aria alle cellule 2
9.2 Le vie respiratorie e i polmoni 3
9.3 La ventilazione polmonare 7
9.4 Gli scambi gassosi 11
9.5 Il trasporto dei gas nel sangue 13
9.6 Il controllo del respiro e la salute 16

Scienze naturali 4 · Parte IV · Il corpo umano: nutrizione, scambi e difesa · versione 1.0
Capitolo 9: L'apparato respiratorio · pagine 229–250 del volume completo · estratto per lo studio

Mentre leggi questa riga respiri senza pensarci, circa una volta ogni quattro secondi. Puoi trattenere il fiato, ma dopo poco un impulso irresistibile ti costringe a riprendere: non lo comanda la mancanza di ossigeno, come si potrebbe credere, ma l'accumulo di anidride carbonica. In questo capitolo seguirai l'aria dal naso fino agli alveoli, vedrai come la legge di un gas spiega ogni inspirazione, come l'emoglobina carica e scarica l'ossigeno proprio dove serve e perché fumo, smog e monossido di carbonio colpiscono questo apparato in modo così diretto.

9.1 Respirare: dall'aria alle cellule

Nel linguaggio comune «respirare» significa far entrare e uscire l'aria dai polmoni. In biologia la parola indica una catena di quattro processi, che portano l'ossigeno dall'atmosfera ai mitocondri e riportano fuori l'anidride carbonica:

- la **ventilazione polmonare**, il ricambio dell'aria nei polmoni con inspirazione ed espirazione;
- gli **scambi gassosi** fra aria degli alveoli e sangue, e fra sangue e tessuti, che avvengono per diffusione;
- il **trasporto dei gas** nel sangue, affidato in gran parte ai globuli rossi;
- la **respirazione cellulare**, che nei mitocondri usa l'ossigeno per ossidare le sostanze nutritive e produce ATP, acqua e anidride carbonica.

> **DA RICORDARE**
>
> **Richiamo.** In *Scienze naturali 2*, cap. 5, hai studiato l'equazione complessiva della respirazione cellulare, $C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O$, e nel cap. 4 dello stesso volume la *diffusione*, che porta le molecole da dove sono più concentrate a dove lo sono meno senza consumo di energia. L'apparato respiratorio, con la ventilazione e la diffusione, rifornisce di ossigeno quella reazione e ne smaltisce l'anidride carbonica. Le sue tappe chimiche le studierai il prossimo anno.

L'apparato respiratorio si occupa dei primi due processi; il terzo è condiviso con il sangue e la circolazione (vedi cap. 10). Se un anello cede, come nell'avvelenamento da monossido di carbonio, le cellule restano senza ossigeno anche se i polmoni lavorano bene.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Lavoisier: respirare è bruciare lentamente

Antoine-Laurent Lavoisier (1743–1794), che aveva chiarito il ruolo dell'ossigeno nella combustione, si chiese se la respirazione fosse un fenomeno dello stesso tipo. Fra il 1782 e il 1783, con il matematico Pierre-Simon Laplace, chiuse una cavia in un calorimetro a ghiaccio: dal ghiaccio fuso si risaliva al calore prodotto. Misurarono anche l'anidride carbonica emessa e confrontarono i risultati con la combustione del carbone: a parità di anidride carbonica, il calore era simile. La respirazione, conclusero, è una combustione lenta e senza fiamma. Lavoisier la collocava nei polmoni; oggi sappiamo che avviene nei mitocondri di tutte le cellule. Fu ghigliottinato nel 1794, durante il Terrore, come appaltatore delle imposte: un collegamento fra la rivoluzione chimica e la Rivoluzione francese che studi in Storia.

9.2 Le vie respiratorie e i polmoni

L'aria raggiunge i polmoni attraverso le **vie aeree**, superiori (cavità nasali, faringe, laringe) e inferiori (trachea, bronchi, bronchioli). Oltre a trasportarla, le vie aeree la puliscono, la riscaldano e la umidificano prima che arrivi alle delicate superfici di scambio.

9.2.1 Le vie aeree superiori

Le **cavità nasali** sono rivestite da una mucosa ricca di vasi che cede calore e vapore all'aria; tre lamine ossee ricurve sulle pareti laterali, le *conche nasali*, aumentano la superficie di contatto, mentre peli e muco trattengono polvere e microrganismi.

L'aria passa poi nella **faringe**, un condotto muscolare comune alle vie respiratorie e digerenti, che in basso si apre davanti nella laringe e dietro nell'esofago (Figura 9.1). Durante la deglutizione la laringe si solleva e l'**epiglottide**, una lamina di cartilagine elastica, si abbassa sul suo ingresso, mentre il palato molle chiude la via verso il naso: il cibo prende così la strada dell'esofago (vedi cap. 8).

La **laringe** è sostenuta da cartilagini; la più grande, la tiroidea, forma il «pomo d'Adamo». All'interno, due pieghe della mucosa, le **corde vocali**, lasciano fra loro una fessura, la glottide. Quando l'aria espirata le attraversa mentre sono avvicinate e tese, vibrano e producono la voce: è la **fonazione**. Più le corde sono tese e corte, più il suono è acuto: nella pubertà la laringe cresce e la voce dei ragazzi si abbassa. Il suono, un'onda di pressione come vedrai in Fisica, è poi modulato dalle cavità di risonanza e articolato da lingua, labbra e denti.

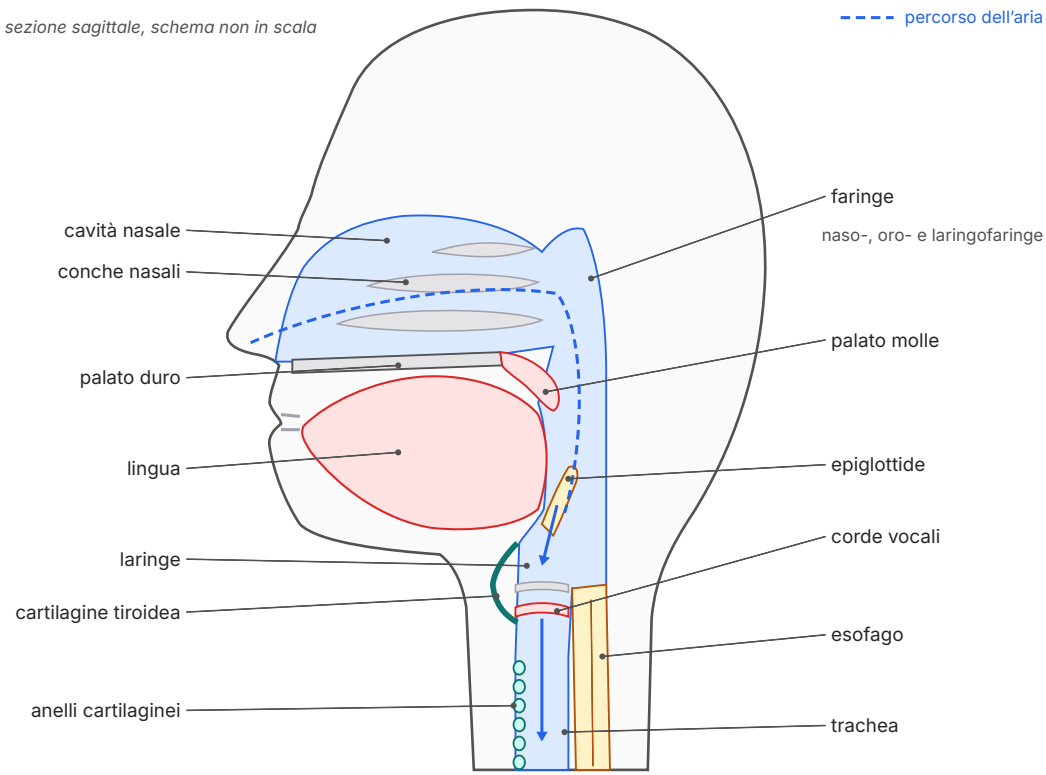


Figura 9.1 Le vie aeree superiori in sezione sagittale (schema non in scala). L'aria entra dalle narici, attraversa le cavità nasali con le conche, scende nella faringe e passa nella laringe e nella trachea, che stanno davanti all'esofago. L'epiglottide chiude l'ingresso della laringe durante la deglutizione.

9.2.2 Trachea, bronchi e bronchioli

La **trachea**, lunga circa 12 cm, scende davanti all'esofago e contiene 16–20 **anelli di cartilagine a C**, aperti all'indietro: la cartilagine tiene il condotto sempre aperto, e la parete posteriore, di muscolo liscio e connettivo, lascia spazio all'esofago quando il boccone lo dilata. Dalla trachea ai bronchi più piccoli la mucosa è un epitelio pseudostratificato ciliato con cellule che secernono muco (*Scienze naturali 3*, cap. 14). Il muco intrappola polveri e batteri, le ciglia lo spingono verso la faringe, dove viene deglutito o espulso con la tosse: è la **clearance mucociliare**, un nastro trasportatore sempre in funzione.

I due **bronchi principali** entrano nei polmoni all'*ilo*, insieme ai vasi. Il destro è più corto, più largo e più verticale del sinistro: per questo un corpo estraneo inalato finisce più spesso a destra. Nei polmoni i bronchi si ramificano una ventina di volte, con calibro sempre minore, fino ai **bronchioli**, larghi meno di un millimetro, privi di cartilagine e ricchi di muscolo liscio. La contrazione di questo muscolo restringe i bronchioli: è ciò che accade nella crisi d'asma.

9.2.3 I polmoni e le pleure

I **polmoni** occupano la cavità toracica ai lati del mediastino, lo spazio centrale con il cuore, i grandi vasi, la trachea e l'esofago. La base appoggia sul **diaframma**, il muscolo a cupola che separa torace e addome; l'apice sale fin sopra la clavicola. I due polmoni non sono uguali (Figura 9.2): il **destro** ha **tre lobi** (superiore, medio, inferiore), il **sinistro** ne ha **due** ed è un po' più piccolo, perché il cuore, spostato a sinistra, vi lascia un'impronta, l'incisura cardiaca.

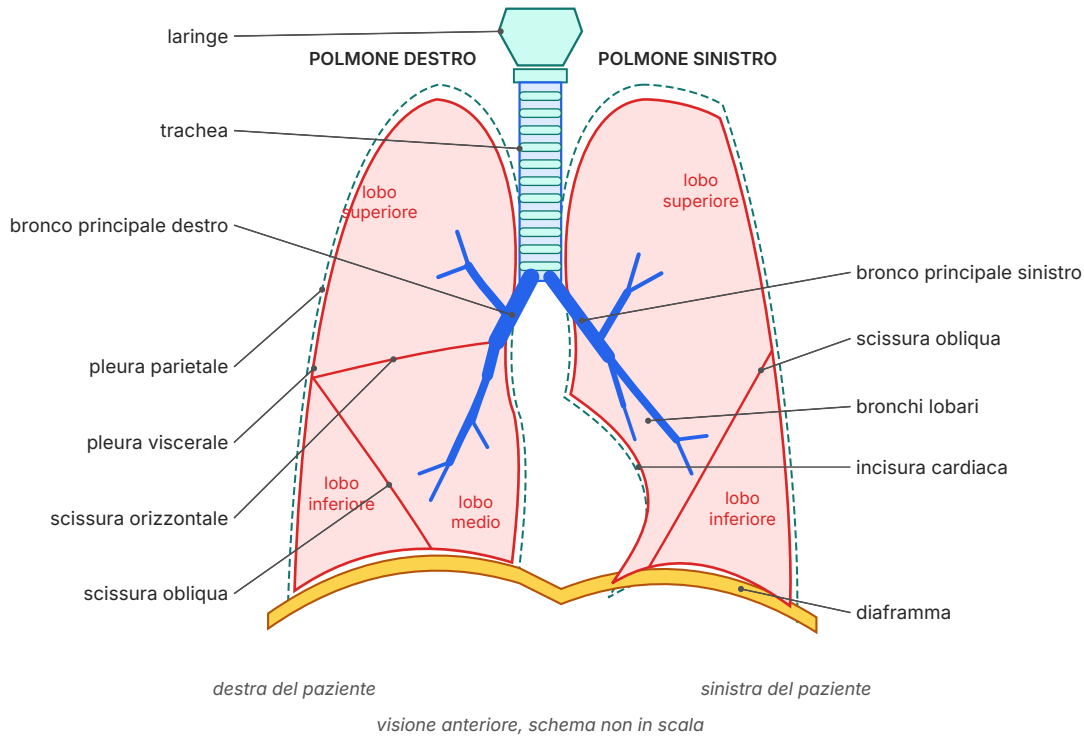


Figura 9.2 Trachea, bronchi e polmoni in visione anteriore (schema non in scala): la destra del paziente è a sinistra di chi guarda. Il polmone destro ha tre lobi, il sinistro due, con l'incisura cardiaca. Il bronco principale destro è più corto e più verticale del sinistro. La linea tratteggiata indica la pleura parietale; la pleura viscerale riveste la superficie del polmone.

Ogni polmone è avvolto dalla **pleura**, una membrana a due foglietti: la *viscerale* aderisce al polmone, la *parietale* riveste la parete del torace e il diaframma. Fra i due c'è un velo di liquido che riduce l'attrito e, come una goccia d'acqua fra due vetrini, li tiene uniti: il polmone è costretto a seguire la parete toracica quando si espande. Se entra aria fra i foglietti (**pneumotorace**), l'adesione si perde e il polmone, elastico, si affloscia.

9.2.4 Gli alveoli e la membrana respiratoria

I bronchioli più sottili sboccano in grappoli di minuscole sacche, gli **alveoli polmonari** (dal latino *alveolus*, «piccola cavità»; Figura 9.3). Ogni alveolo misura circa due decimi di millimetro, ma sono alcune centinaia di milioni, con una superficie complessiva di decine di metri quadrati (i manuali di fisiologia indicano spesso circa 70 m^2). Ognuno è avvolto da capillari, in cui arriva sangue povero di ossigeno dall'arteria polmonare e da cui riparte sangue ossigenato verso le vene polmonari.

La parete dell'alveolo è formata soprattutto dai **pneumociti di tipo I**, cellule pavimentose sottilissime. Fra questi i **pneumociti di tipo II** producono il **surfattante**, una miscela di fosfolipidi e proteine che si stende sul velo di liquido interno dell'alveolo e ne abbassa la tensione superficiale, impedendo agli alveoli di collassare a ogni espirazione. Nei neonati molto prematuri il surfattante può essere ancora insufficiente, una delle cause più comuni di difficoltà respiratoria alla nascita. I **macrofagi alveolari** fagocitano infine le particelle e i microbi sfuggiti alla clearance mucociliare.

Per passare dall'aria al sangue i gas attraversano la **membrana respiratoria**: pneumocita di tipo I, membrane basali fuse dell'alveolo e del capillare, endotelio del capillare. In tutto circa mezzo micrometro, duecento volte meno di un foglio di carta.

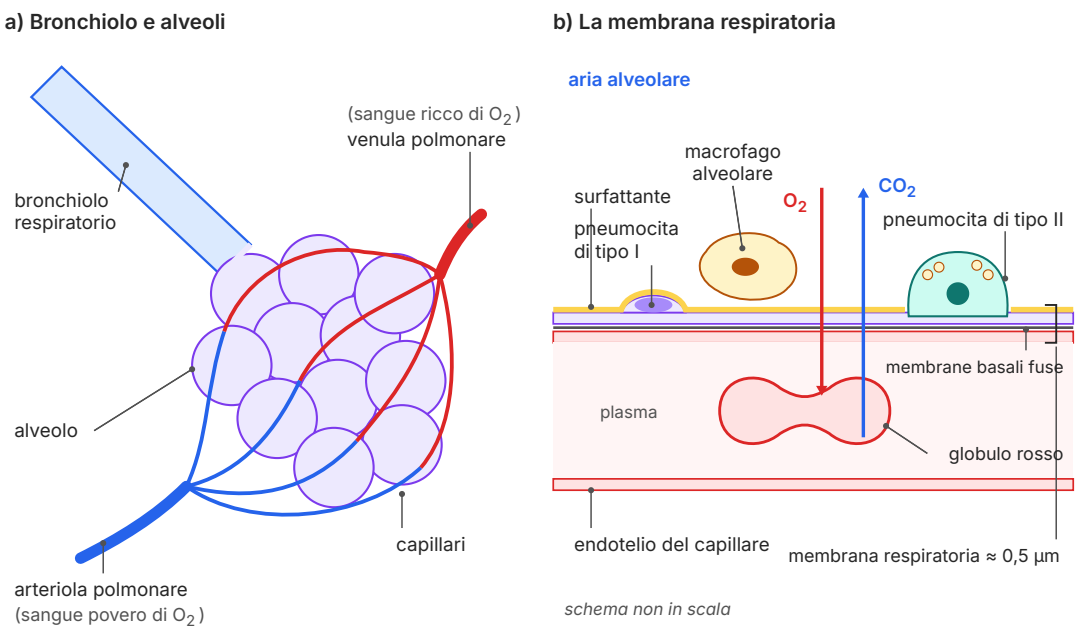


Figura 9.3 a) Un bronchiolo respiratorio termina in un gruppo di alveoli avvolti dai capillari: il sangue vi arriva povero di ossigeno da un'arteriola polmonare e ne esce ricco di ossigeno verso una venula polmonare. b) La parete fra aria alveolare e sangue: pneumociti di tipo I e II, surfattante, membrane basali fuse ed endotelio formano la membrana respiratoria, attraverso cui l'O_2 entra nel sangue e la CO_2 ne esce (schema non in scala).

9.3 La ventilazione polmonare

9.3.1 Perché l'aria entra ed esce

I polmoni non hanno muscoli propri: si gonfiano e si sgonfiano perché cambia il volume della gabbia toracica che li contiene. Il legame fra volume e pressione è dato dalla **legge di Boyle**: per una quantità fissa di gas a temperatura costante, la pressione è inversamente proporzionale al volume.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Se il volume aumenta, le molecole urtano meno spesso le pareti e la pressione diminuisce. L'aria si sposta spontaneamente da dove la pressione è maggiore a dove è minore. Ne segue la regola di tutta la meccanica respiratoria: **l'aria entra quando la pressione negli alveoli scende sotto quella atmosferica, ed esce quando la supera**. Bastano differenze di pochi mmHg (1 mmHg = 133,3 Pa).

ESEMPIO SVOLTO

Quanto basta per far entrare l'aria

Problema. Alla fine di un'espirazione tranquilla i polmoni contengono 3,00 L di aria a 760 mmHg. All'inizio dell'inspirazione il torace si espande e, prima che entri altra aria, il volume diventa 3,01 L. Quale pressione avrebbe l'aria alveolare, a temperatura costante?

Soluzione. $P_2 = P_1 \cdot V_1 / V_2 = 760\ \text{mmHg} \times 3{,}00\ \text{L} / 3{,}01\ \text{L} = 757\ \text{mmHg}$.

Commento. Un aumento di volume di appena lo 0,3 % abbassa la pressione alveolare di circa 2,5 mmHg: basta perché l'aria cominci a entrare, finché le due pressioni tornano uguali.

9.3.2 I muscoli del respiro

Il muscolo principale dell'inspirazione è il diaframma (Figura 9.4): quando si contrae, comandato dai nervi frenici, la cupola si abbassa e la cavità toracica si allunga verso il basso. Insieme, i **muscoli intercostali esterni** sollevano coste e sterno e allargano il torace in avanti e di lato. I polmoni, uniti alla parete dalle pleure, si espandono; la pressione alveolare scende e l'aria entra. L'**inspirazione è quindi sempre attiva**.

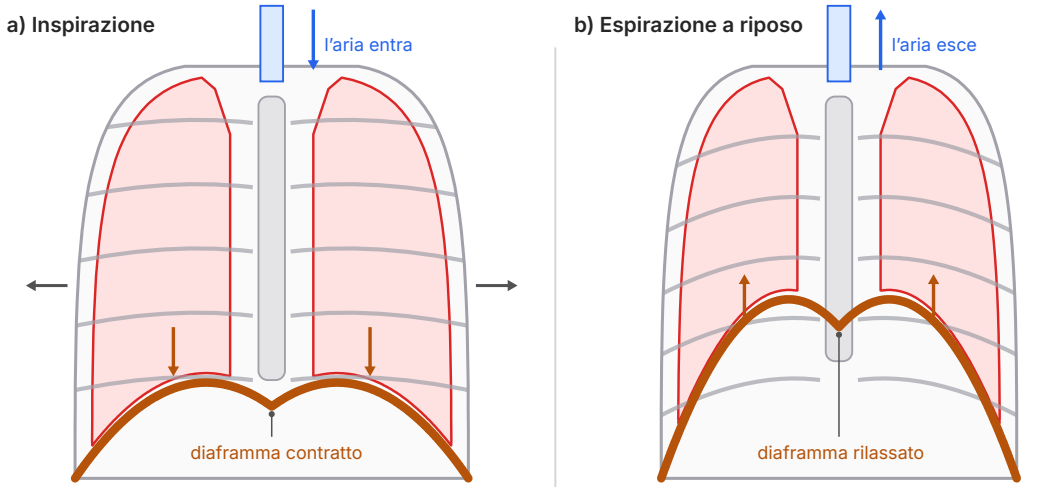


Figura 9.4 La meccanica respiratoria in visione anteriore (schema non in scala). a) Nell'inspirazione il diaframma si contrae e si abbassa e gli intercostali esterni sollevano le coste: il volume del torace e dei polmoni aumenta. b) Nell'espirazione a riposo i muscoli si rilasciano: il diaframma risale a cupola e il ritorno elastico dei polmoni ne riduce il volume.

A riposo l'**espirazione è passiva**: quando i muscoli si rilasciano, i polmoni, ricchi di fibre elastiche, e la parete toracica tornano alla posizione di partenza come un elastico lasciato andare; la pressione alveolare sale di poco sopra quella atmosferica e l'aria esce. Nello sforzo, nel canto o quando si soffia con forza l'espirazione diventa attiva: i **muscoli intercostali interni** abbassano le coste e gli addominali spingono i visceri contro il diaframma.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> **«Nell'inspirazione l'aria spinge e gonfia i polmoni».** L'aria non spinge: è il torace che si allarga e abbassa la pressione negli alveoli, e l'aria esterna, a pressione più alta, entra. I polmoni si espandono perché seguono la parete toracica, e l'aria entra di conseguenza: con un pneumotorace la parete si muove ancora, ma il polmone staccato non si riempie.

9.3.3 Volumi e capacità polmonari

Lo **spirometro** misura i volumi di aria che entrano ed escono dai polmoni; la loro registrazione nel tempo è lo **spirogramma** (Figura 9.5). I valori dipendono da sesso, età, statura e allenamen-

to; quelli seguenti sono indicativi per un giovane adulto maschio (nella donna sono in media minori).

- Il **volume corrente** è l'aria che entra ed esce in un respiro tranquillo: circa 0,5 L.
- Il **volume di riserva inspiratoria** è l'aria che si può ancora inspirare, con il massimo sforzo, dopo un'inspirazione normale: circa 3,1 L.
- Il **volume di riserva espiratoria** è l'aria che si può ancora espellere dopo un'espirazione normale: circa 1,2 L.
- Il **volume residuo**, circa 1,2 L, resta nei polmoni anche dopo l'espirazione più forzata. Lo spirometro non può misurarlo, perché quest'aria non esce mai.

La somma di volume corrente e volumi di riserva è la **capacità vitale**, la massima quantità di aria espirabile dopo un'inspirazione massima: circa 4,8 L. Con il volume residuo si ottiene la capacità polmonare totale, circa 6,0 L.

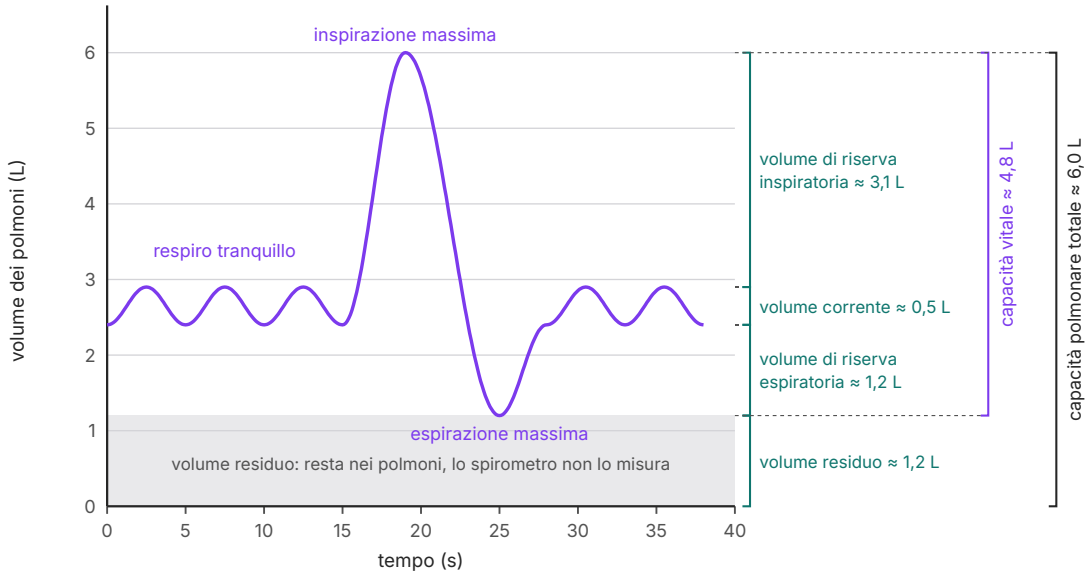


Figura 9.5 Spirogramma calcolato con valori indicativi per un giovane adulto maschio: tre respiri tranquilli, un'inspirazione massima, un'espirazione massima e di nuovo respiri tranquilli (12 atti al minuto, volume corrente 0,5 L). Il volume residuo, in grigio, non esce dai polmoni e non compare nella misura dello spirometro.

A riposo un adulto compie circa 12–20 atti respiratori al minuto. Frequenza per volume corrente dà la **ventilazione al minuto**: con 12 atti di 0,5 L, 6 L/min, che in uno sforzo intenso possono superare i 100 L/min. Non tutta quest'aria arriva agli alveoli: circa 0,15 L di ogni respiro restano nelle vie aeree, dove non avvengono scambi, lo **spazio morto anatomico**. Conta la **ventilazione alveolare**, l'aria che raggiunge davvero gli alveoli in un minuto.

IN SINTESI

legge di Boyle (T e quantità di gas costanti): $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$

ventilazione al minuto = frequenza respiratoria × volume corrente

ventilazione alveolare = frequenza respiratoria × (volume corrente − spazio morto)

capacità vitale = riserva inspiratoria + volume corrente + riserva espiratoria

pressione parziale di un gas = frazione del gas nella miscela × pressione totale

ESEMPIO SVOLTO

Respirare in fretta non è respirare meglio

Problema. Una ragazza a riposo respira 12 volte al minuto con un volume corrente di 0,50 L; lo spazio morto è 0,15 L. Calcola la ventilazione al minuto e quella alveolare. Come cambiano se, agitata, respira 24 volte al minuto con atti di 0,25 L?

Soluzione. A riposo: 12 /min × 0,50 L = 6,0 L/min; alveolare 12 /min × (0,50 − 0,15) L = 4,2 L/min. Respiro rapido: 24 /min × 0,25 L = 6,0 L/min, uguale; alveolare 24 /min × (0,25 − 0,15) L = 2,4 L/min.

Commento. Entra la stessa aria, ma agli alveoli ne arriva poco più della metà, perché ogni atto spreca 0,15 L nello spazio morto. Per aumentare gli scambi, un respiro più profondo vale più di uno più frequente.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

La capacità vitale con uno spirometro a bottiglia

Obiettivo. Misurare la propria capacità vitale e confrontare i valori della classe.

Materiale. Una bottiglia di plastica da 5 L graduata ogni 0,25 L (versandovi volumi noti d'acqua con un cilindro graduato); una bacinella; un tubo di gomma di circa 60 cm; un boccaglio monouso per ogni studente; acqua; disinfettante per superfici.

Procedimento. 1) Riempi la bottiglia d'acqua e capovolgila nella bacinella piena per metà, tenendo chiusa l'imboccatura finché è sott'acqua. 2) Infila il tubo nella bottiglia dal basso e applica all'altra estremità il tuo boccaglio. 3) Dopo un'inspirazione massima, espira nel tubo tutta l'aria che puoi, fino in fondo. 4) Leggi il volume d'acqua spostata: è la tua capacità vitale. 5) Ripeti tre volte e tieni il valore maggiore. 6) Raccogli i dati della classe insieme alla sola statura e costruisci un grafico.

Sicurezza. Ognuno usa solo il proprio boccaglio, che poi si getta; il tubo si disinfetta. Si soffia soltanto, senza mai aspirare dal tubo. Fra una prova e l'altra si respira normalmente; chi avverte capogiri si siede, chi ha asma fa da sperimentatore senza soffiare.

Risultato atteso. Valori di qualche litro, in genere maggiori negli studenti più alti, un po' sottostimati perché parte dell'aria resta nel tubo.

Domande. 1) Perché questo metodo non misura il volume residuo? 2) Che relazione mostra il grafico fra statura e capacità vitale? 3) Quali fonti di errore puoi ridurre, e come?

9.4 Gli scambi gassosi

9.4.1 Le pressioni parziali

Nei polmoni e nei tessuti ossigeno e anidride carbonica si muovono per **diffusione**. Per descrivere quanto un gas «spinge» a diffondere si usa la **pressione parziale**, la pressione che quel gas eserciterebbe se occupasse da solo tutto il volume della miscela (*Scienze naturali 3*, cap. 2): si ottiene moltiplicando la frazione del gas per la pressione totale, e si scrive PO_2, PCO_2. Anche un gas disciolto nel plasma ha una pressione parziale, quella del gas con cui il liquido sarebbe in equilibrio. La regola è semplice: **ogni gas diffonde da dove la sua pressione parziale è maggiore a dove è minore**, indipendentemente dagli altri.

ESEMPIO SVOLTO

La pressione parziale dell'ossigeno, al mare e in montagna

Problema. L'aria secca contiene il 20,95 % di ossigeno in volume. Calcola la $P\mathrm{O}_2$ al livello del mare (760 mmHg) e a circa 3500 m di quota, dove nell'atmosfera standard la pressione è circa 493 mmHg.

Soluzione. Al mare: 0,2095 × 760 mmHg = 159 mmHg. A 3500 m: 0,2095 × 493 mmHg = 103 mmHg.

Commento. In montagna la percentuale di ossigeno è la stessa; è minore la pressione totale, e con essa la $P\mathrm{O}_2$ che spinge l'ossigeno nel sangue.

L'aria degli alveoli non è uguale a quella esterna: si satura di vapore acqueo, si mescola con l'aria rimasta dall'espirazione precedente e cede di continuo ossigeno al sangue, ricevendone anidride carbonica. Negli alveoli la $P\mathrm{O}_2$ è perciò circa 100 mmHg e la $P\mathrm{CO}_2$ circa 40 mmHg (Figura 9.6).

9.4.2 Nei polmoni e nei tessuti

Il sangue che arriva ai capillari polmonari, attraverso il cuore destro e l'arteria polmonare, ha $P\mathrm{O}_2 \approx 40$ mmHg e $P\mathrm{CO}_2 \approx 46$ mmHg. L'ossigeno diffonde dall'alveolo al sangue (da 100 a 40 mmHg), l'anidride carbonica dal sangue all'alveolo (da 46 a 40 mmHg). In meno di un secondo, il tempo che un globulo rosso impiega a percorrere il capillare, il sangue raggiunge i valori alveolari; torna al cuore sinistro con $P\mathrm{O}_2 \approx 100$ e $P\mathrm{CO}_2 \approx 40$ mmHg e viene distribuito al corpo.

Nei capillari dei tessuti accade l'inverso. Le cellule consumano ossigeno e producono anidride carbonica, quindi intorno a loro la $P\mathrm{O}_2$ è bassa (circa 40 mmHg o meno, molto meno nei muscoli in attività) e la $P\mathrm{CO}_2$ alta (circa 46 mmHg o più): l'ossigeno passa dal sangue ai tessuti, l'anidride carbonica dai tessuti al sangue.

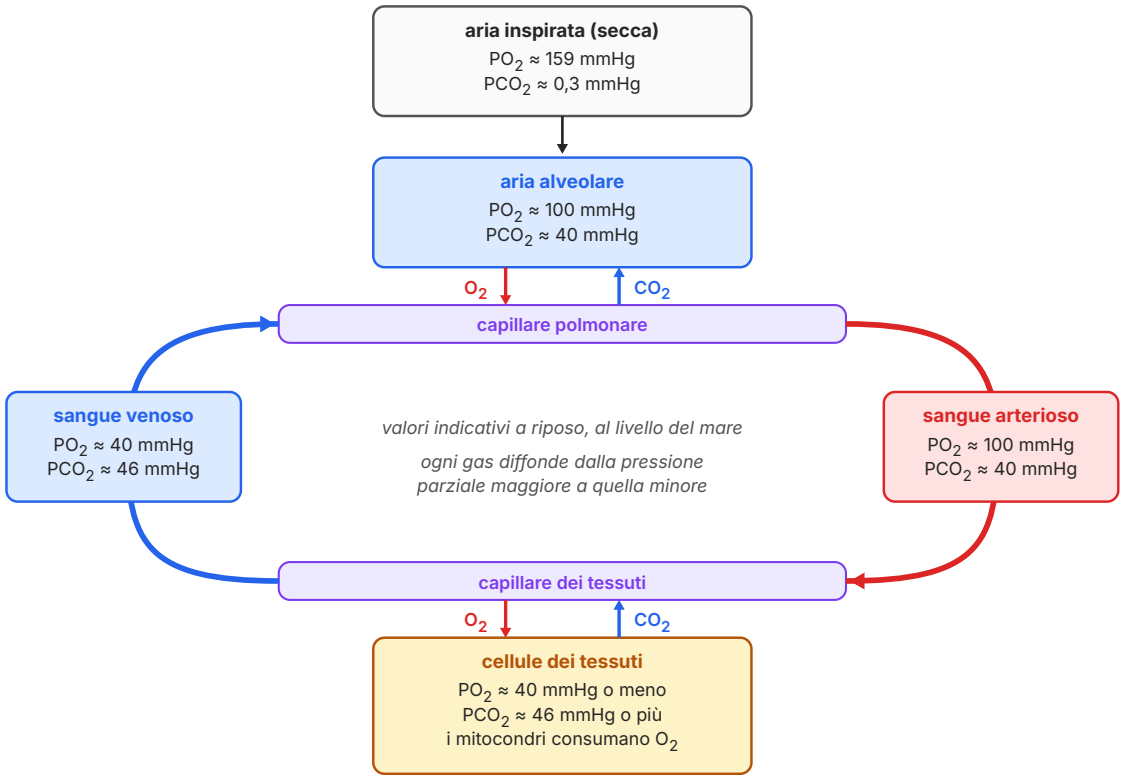


Figura 9.6 Le pressioni parziali di O_2 e CO_2 lungo il percorso dei gas (valori indicativi a riposo, al livello del mare; il cuore non è disegnato). In ogni punto il gas diffonde verso la pressione parziale minore: l'ossigeno dagli alveoli al sangue e dal sangue ai tessuti, l'anidride carbonica in senso opposto.

La diffusione attraverso la membrana respiratoria è tanto più rapida quanto più grandi sono la superficie e la differenza di pressione parziale, e quanto più piccolo è lo spessore. L'enfisema riduce la superficie, l'edema polmonare (liquido negli alveoli) aumenta lo spessore, l'alta quota riduce la differenza di pressione.

9.5 Il trasporto dei gas nel sangue

9.5.1 L'emoglobina e l'ossigeno

L'ossigeno è poco solubile in acqua: circa il 98,5 % dell'ossigeno del sangue viaggia legato all'**emoglobina** dei globuli rossi, solo l'1,5 % è disciolto nel plasma. In *Scienze naturali 3*, cap. 12, l'hai incontrata come esempio di struttura quaternaria: quattro catene, due α e due β, ognuna con un **gruppo eme**, un anello organico con al centro uno ione Fe^{2+}. Ogni eme lega in modo re-

versibile una molecola di O_2: una molecola di emoglobina ne trasporta al massimo quattro, formando l'ossiemoglobina, rosso vivo; l'emoglobina che ha ceduto l'ossigeno è rosso scuro.

La percentuale dei siti occupati dall'ossigeno è la **saturazione**; riportata in funzione della PO_2 dà la **curva di dissociazione dell'emoglobina**, che ha la forma di una S (Figura 9.7). La forma dipende dalla collaborazione fra le subunità: quando una lega l'ossigeno, la molecola cambia leggermente forma e le altre lo legano più facilmente; quando una lo cede, anche le altre lo cedono più facilmente.

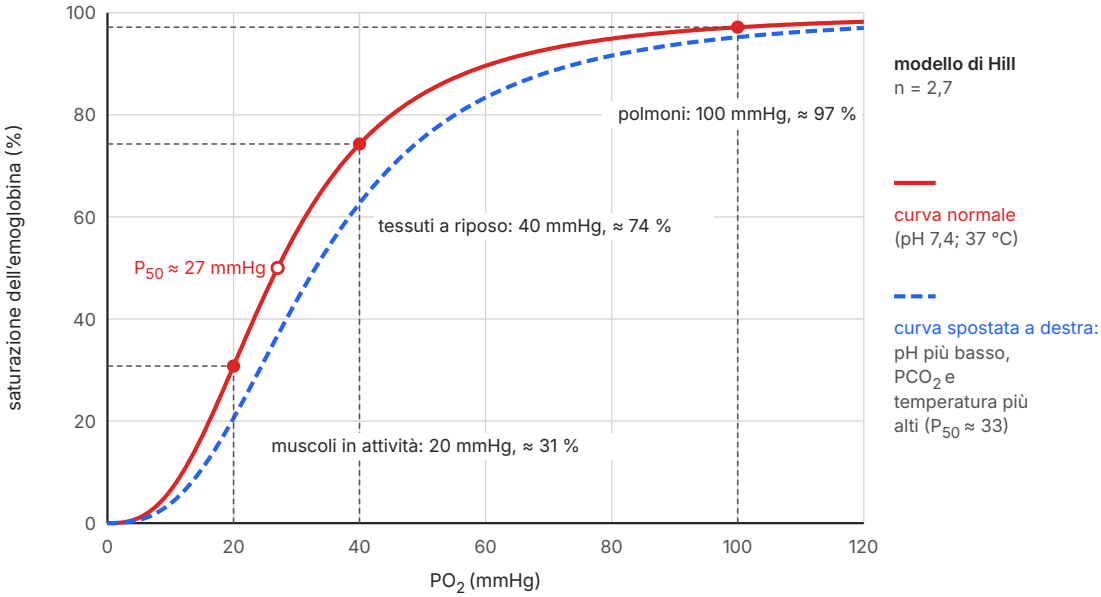


Figura 9.7 Curva di dissociazione dell'emoglobina, calcolata con il modello di Hill ($S = P^n/(P_{50}{}^n + P^n)$, n = 2,7, P_{50} = 27 mmHg). Nei polmoni l'emoglobina è quasi satura; nei tessuti a riposo ne cede circa un quarto, nei muscoli in attività molto di più. La curva tratteggiata, spostata a destra (valore illustrativo P_{50} = 33 mmHg), mostra lo spostamento dovuto all'effetto Bohr e alla temperatura.

La forma a S ha due vantaggi. In alto la curva è quasi piatta: a 100 mmHg la saturazione è circa 97 %, e anche se la PO_2 scende a 60 mmHg, per esempio in montagna, resta intorno al 90 %; è un margine di sicurezza. Nella parte centrale è ripida: fra 40 e 20 mmHg, valori tipici dei tessuti, un piccolo calo di PO_2 fa cedere molto ossigeno. A riposo il sangue che lascia i tessuti è ancora saturo per circa tre quarti, una riserva pronta per lo sforzo.

9.5.2 L'effetto Bohr e il monossido di carbonio

L'affinità dell'emoglobina per l'ossigeno non è fissa. Quando il pH diminuisce o aumenta la PCO_2, l'emoglobina lega l'ossigeno meno saldamente: la curva si sposta a destra e, alla stessa PO_2, la saturazione è minore. È l'**effetto Bohr**, dal fisiologo danese Christian Bohr: ioni H^+ e CO_2

si legano alla globina e ne modificano la forma (il pH è l'argomento del cap. 5). Un aumento della temperatura sposta la curva nello stesso senso. Le tre condizioni si presentano insieme nei muscoli in attività, che producono CO_2, acidi e calore: lì l'emoglobina cede ancora più ossigeno.

Il **monossido di carbonio** (CO), un gas incolore e inodore prodotto dalle combustioni incomplete, si lega allo stesso ferro dell'eme con un'affinità circa 200 volte maggiore di quella dell'ossigeno: i siti occupati dal CO non trasportano più ossigeno, e anche piccole concentrazioni respirate a lungo sottraggono molta emoglobina. Il legame è però reversibile: nell'equilibrio $Hb(O_2)_4 + 4\ CO \rightleftarrows Hb(CO)_4 + 4\ O_2$ un eccesso di ossigeno sposta la reazione a sinistra (principio di Le Châtelier, vedi cap. 4). Per questo in ospedale le persone intossicate respirano ossigeno ad alta concentrazione.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Il monossido di carbonio in casa. Le intossicazioni da CO avvengono soprattutto al chiuso: caldaie e scaldabagni difettosi o con lo scarico ostruito, stufe e bracieri in stanze non aerate, motori accesi in un garage chiuso. Il gas non si vede e non ha odore, e i primi sintomi (mal di testa, nausea, capogiri, sonnolenza) possono colpire più persone nello stesso locale. Si prevengono con la manutenzione degli impianti, l'aerazione e i rilevatori di CO; se si sospetta un'intossicazione si esce all'aria aperta e si chiama il 112.

9.5.3 Il trasporto dell'anidride carbonica

L'anidride carbonica viaggia nel sangue in tre forme (valori indicativi): circa il 7 % disciolta nel plasma; circa il 23 % legata ai gruppi amminici della globina, come carbamminoemoglobina, senza competere con l'ossigeno per il ferro; circa il 70 % come **ione idrogenocarbonato** HCO_3^- (bicarbonato), prodotto nei globuli rossi grazie all'enzima **anidrasi carbonica**, che accelera enormemente la reazione:

$$CO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + HCO_3^-$$

Nei tessuti, dove la CO_2 è abbondante, gli equilibri si spostano a destra: HCO_3^- esce dal globulo rosso nel plasma in cambio di uno ione Cl^- (lo *scambio dei cloruri*), e gli ioni H^+ si legano all'emoglobina, che li tampona e intanto cede più ossigeno: è l'effetto Bohr visto dall'altra parte. Nei polmoni, dove la CO_2 diffonde negli alveoli, gli equilibri si spostano a sinistra e la CO_2 liberata viene espirata.

Questo equilibrio è anche il principale tampone del sangue, che mantiene il pH fra circa 7,35 e 7,45 (vedi cap. 5). Se la ventilazione è insufficiente la CO_2 si accumula e il pH scende (acidosi respiratoria); se si iperventila la CO_2 cala troppo e il pH sale (alcalosi respiratoria), con capogiri e formicolii. I reni regolano invece la quantità di HCO_3^- (vedi cap. 12).

ERRORE FREQUENTE

«L'anidride carbonica viaggia sull'emoglobina come l'ossigeno». L'emoglobina ne trasporta solo circa un quarto, e la lega alla globina, non al ferro; circa il 70 % viaggia nel plasma come ione idrogenocarbonato. E il sangue venoso non è blu ma rosso scuro: le vene appaiono bluastre per il modo in cui la pelle assorbe e diffonde la luce.

9.6 Il controllo del respiro e la salute

9.6.1 I centri respiratori e i chemocettori

Il ritmo del respiro nasce nel tronco encefalico (vedi cap. 14). I **centri respiratori** del **bulbo** (midollo allungato) inviano a ogni ciclo una scarica di impulsi che, lungo i nervi frenici e intercostali, fa contrarre i muscoli inspiratori; quando la scarica cessa, segue l'espirazione passiva. Gruppi di neuroni del **ponte** regolano il passaggio fra le due fasi. Il ritmo è automatico; la corteccia può modificarlo, quando parliamo o tratteniamo il fiato, ma non sospenderlo a lungo.

Frequenza e profondità del respiro si adattano ai bisogni grazie ai **chemocettori**:

- i **chemocettori centrali**, nel bulbo, rispondono agli ioni H^+ del liquido cerebrospinale. La CO_2 del sangue vi diffonde facilmente e, reagendo con l'acqua, ne abbassa il pH: in pratica questi recettori «misurano» la PCO_2;
- i **chemocettori periferici**, nei glomi carotidei (alla biforcazione delle carotidi) e aortici (sull'arco dell'aorta), rispondono a CO_2 e H^+ e sono gli unici sensibili alla diminuzione dell'ossigeno, ma solo quando la PO_2 arteriosa scende molto, sotto circa 60 mmHg.

Ne segue un fatto sorprendente: al livello del mare **lo stimolo principale a respirare è l'anidride carbonica, non la mancanza di ossigeno**. Un piccolo aumento della PCO_2 arteriosa basta ad aumentare nettamente la ventilazione, mentre la PO_2, grazie alla parte piatta della curva dell'emoglobina, può calare parecchio senza effetti sulla saturazione. È un circuito a *feedback negativo* (*Scienze naturali 3*, cap. 14): più CO_2 → più ventilazione → la CO_2 torna al valore di riferimento.

ERRORE FREQUENTE

«Quando tratteniamo il fiato ci manca l'ossigeno, e per questo dobbiamo respirare». L'impulso a riprendere fiato è dovuto soprattutto all'aumento della CO_2. Per questo è pericoloso iperventilare prima di un'immersione in apnea: la CO_2 si abbassa, lo stimolo a respirare arriva in ritardo e l'ossigeno può scendere tanto da far perdere conoscenza sott'acqua senza preavviso.

9.6.2 Respirare in alta quota

Salendo di quota la PO_2 dell'aria diminuisce, e con essa quella degli alveoli e del sangue. Quando la PO_2 arteriosa cala abbastanza, i chemocettori periferici aumentano la ventilazione: in alta montagna si respira più a fondo e più spesso anche a riposo. Poi comincia l'**acclimatamento**: i reni, sensibili alla scarsità di ossigeno, liberano più eritropoietina (EPO), un ormone che stimola il midollo osseo a produrre globuli rossi, e nel giro di settimane il sangue trasporta più emoglobina (vedi cap. 10 e 12). Una salita troppo rapida può causare il mal di montagna acuto, che si previene salendo gradualmente.

9.6.3 La salute dell'apparato respiratorio

Le vie aeree sono a contatto diretto con l'ambiente: ogni giorno vi passano migliaia di litri d'aria. L'**asma** è un'infiammazione cronica delle vie aeree in cui alcuni stimoli (allergeni, infezioni, aria fredda, sforzo, fumo) provocano la contrazione del muscolo liscio dei bronchioli, il gonfiore della mucosa e la produzione di muco: compaiono fiato corto, sibili e tosse. È frequente anche fra i giovani e, curata con le terapie indicate dal medico, consente una vita normale e lo sport.

Il **particolato atmosferico** è formato da particelle sospese nell'aria (traffico, riscaldamento, industria, fonti naturali); PM_{10} e $PM_{2,5}$ indicano le frazioni con diametro inferiore a 10 e a 2,5 µm. Più le particelle sono piccole, più sfuggono ai filtri del naso e alla clearance mucociliare e arrivano fino agli alveoli; l'esposizione prolungata è associata a malattie respiratorie e cardiovascolari (Agenda 2030, obiettivi 3 e 11). Infine, quando un boccone ostruisce la laringe e la persona non riesce a tossire né a parlare, le manovre di disostruzione, fra cui la manovra di Heimlich, salvano la vita: si imparano in un corso di primo soccorso, e intanto si chiama il 112.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Il fumo di tabacco. Il *catrame* del fumo contiene molte sostanze cancerogene, fra cui idrocarburi policiclici aromatici come il benzo[a]pirene (vedi cap. 7); la *nicotina* provoca dipendenza; il *monossido di carbonio* sottrae emoglobina al trasporto dell'ossigeno. Il fumo paralizza e poi distrugge le ciglia dell'epitelio bronchiale: il muco ristagna e compare la tosse del fumatore. Con gli anni l'infiammazione cronica porta alla **broncopneumopatia cronica ostruttiva** (BPCO), che unisce bronchite cronica ed enfisema e riduce in modo permanente il passaggio dell'aria e la superficie di scambio; il fumo è anche la principale causa del tumore del polmone. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (scheda informativa sul tabacco, 2026) il tabacco uccide ogni anno nel mondo più di 7 milioni di persone, fra cui oltre 1,6 milioni di non fumatori esposti al fumo passivo. Smettere conviene a ogni età, anche con l'aiuto dei centri antifumo del Servizio sanitario nazionale.

SINTESI

- La respirazione comprende la **ventilazione polmonare**, gli **scambi gassosi** per diffusione, il **trasporto dei gas** nel sangue e la **respirazione cellulare** nei mitocondri.
- Le vie aeree superiori (cavità nasali, faringe, laringe) filtrano, riscaldano e umidificano l'aria; l'**epiglottide** chiude la laringe nella deglutizione; le **corde vocali** producono la voce.
- La **trachea**, sostenuta da anelli di cartilagine a C, si divide nei bronchi; l'epitelio ciliato con il muco pulisce le vie aeree (clearance mucociliare). I **bronchioli** non hanno cartilagine e hanno muscolo liscio.
- Il polmone destro ha **tre lobi**, il sinistro **due** e l'incisura cardiaca; le **pleure** fanno aderire i polmoni alla parete toracica.
- Gli **alveoli**, centinaia di milioni, offrono una superficie di decine di m^2; i pneumociti di tipo I formano la parete, quelli di tipo II producono il **surfattante**; la **membrana respiratoria** è spessa circa 0,5 µm.
- Per la **legge di Boyle** l'aumento del volume toracico abbassa la pressione alveolare: l'aria entra. L'**inspirazione** (diaframma, intercostali esterni) è attiva; l'**espirazione** a riposo è passiva, per ritorno elastico.
- Volumi indicativi: volume corrente ≈ 0,5 L, capacità vitale ≈ 4,8 L, volume residuo ≈ 1,2 L. Ventilazione al minuto = frequenza × volume corrente; lo **spazio morto** (≈ 0,15 L) non partecipa agli scambi.
- Ogni gas diffonde verso la **pressione parziale** minore: PO_2 159 mmHg nell'aria secca, ≈ 100 negli alveoli, ≈ 40 nel sangue venoso; PCO_2 ≈ 40 negli alveoli, ≈ 46 nel sangue venoso.
- L'**emoglobina** (4 eme con Fe^{2+}, 4 O_2) trasporta circa il 98,5 % dell'ossigeno; la sua curva di dissociazione è a S. L'**effetto Bohr** (pH più basso, più CO_2), insieme alla temperatura più alta, favorisce la cessione di O_2 ai tessuti. Il CO si lega all'eme circa 200 volte più saldamente dell'O_2.
- La CO_2 viaggia per circa il 70 % come HCO_3^-, prodotto dall'**anidrasi carbonica** nei globuli rossi, per circa il 23 % legata alla globina e per circa il 7 % disciolta.
- I **centri respiratori** del bulbo e del ponte generano il ritmo; i **chemocettori** centrali e periferici lo regolano. Al livello del mare lo stimolo principale è la CO_2; in quota l'ipossia stimola ventilazione ed EPO.
- Fumo (BPCO, tumore del polmone, CO), asma, particolato e monossido di carbonio sono i principali rischi per l'apparato respiratorio; si prevengono con scelte personali e collettive.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quanti lobi ha il polmone destro?
   - **A.** uno
   - **B.** due
   - **C.** tre
   - **D.** quattro

2. ● Quale struttura impedisce al cibo di entrare nella laringe durante la deglutizione?
   - **A.** l'epiglottide
   - **B.** le corde vocali
   - **C.** la cartilagine tiroidea
   - **D.** le conche nasali

3. ● Il surfattante è prodotto:
   - **A.** dai macrofagi alveolari
   - **B.** dalle cellule caliciformi della trachea
   - **C.** dai pneumociti di tipo I
   - **D.** dai pneumociti di tipo II

4. ●● In un respiro tranquillo, l'espirazione:
   - **A.** è passiva, dovuta al ritorno elastico di polmoni e torace
   - **B.** è dovuta alla contrazione del diaframma
   - **C.** richiede la contrazione dei muscoli intercostali interni
   - **D.** avviene perché la pressione alveolare scende sotto quella atmosferica

5. ● Nell'emoglobina l'ossigeno si lega:
   - **A.** ai gruppi amminici della globina
   - **B.** allo ione Fe^{2+} del gruppo eme
   - **C.** allo ione Fe^{3+} del gruppo eme
   - **D.** allo ione HCO_3^-

6. ●● La maggior parte dell'anidride carbonica è trasportata nel sangue:
   - **A.** disciolta come gas nel plasma
   - **B.** legata al ferro dell'emoglobina
   - **C.** come ione HCO_3^- nel plasma
   - **D.** legata all'albumina

7. ●● Quale di queste condizioni sposta la curva di dissociazione dell'emoglobina verso destra?
   A. un aumento del pH
   B. una diminuzione della temperatura
   C. una diminuzione della PCO_2
   D. un aumento della PCO_2

8. ●● Al livello del mare, il principale stimolo chimico che regola la ventilazione è:
   A. la diminuzione della PO_2 percepita dai chemocettori centrali
   B. l'aumento della PCO_2 del sangue, percepito soprattutto dai chemocettori centrali
   C. la diminuzione della PO_2 percepita dalla corteccia cerebrale
   D. l'aumento della temperatura corporea

9. ●●● Una persona respira 30 volte al minuto con un volume corrente di 0,20 L; lo spazio morto è 0,15 L. La sua ventilazione alveolare è:
   A. 6,0 L/min
   B. 4,5 L/min
   C. 1,5 L/min
   D. 0,05 L/min

Vero o falso

10. ● Il polmone sinistro è diviso in tre lobi.

11. ● Gli anelli di cartilagine della trachea sono aperti nella parte posteriore, rivolta verso l'esofago.

12. ●● Durante l'inspirazione la pressione negli alveoli diventa maggiore di quella atmosferica.

13. ● Il volume residuo si può misurare con un comune spirometro.

14. ●● Il monossido di carbonio si lega all'emoglobina più debolmente dell'ossigeno, ma in quantità maggiore.

15. ●● A parità di PO_2, nei muscoli in attività l'emoglobina cede più ossigeno che nei muscoli a riposo.

Applicare

16. ● Uno studente a riposo compie 15 atti respiratori al minuto con un volume corrente di 0,45 L. Calcola la sua ventilazione polmonare al minuto e il volume di aria che respira in un'ora.

17. ● Una studentessa ha un volume di riserva inspiratoria di 2,2 L, un volume corrente di 0,45 L, un volume di riserva espiratoria di 0,85 L e un volume residuo di 1,1 L. Calcola la sua capacità vitale e la sua capacità polmonare totale.

18. ●● Nelle vie aeree l'aria inspirata si satura di vapore acqueo, che a 37 °C ha una pressione parziale di 47 mmHg. Calcola la PO_2 dell'aria umidificata nella trachea al livello del mare (pressione totale 760 mmHg, ossigeno 20,95 % dei gas secchi) e confrontala con quella dell'aria secca esterna.

19. ●● A 4800 m di quota, all'incirca l'altezza del Monte Bianco, la pressione dell'atmosfera standard è circa 416 mmHg. Calcola la PO_2 dell'aria secca e di quanto per cento è minore di quella al livello del mare.

20. ●● In un modello di polmone a campana, l'aria contenuta nella campana occupa 2,00 L alla pressione di 760 mmHg. Tirando la membrana di gomma che fa da fondo, il volume diventa 2,10 L, a temperatura costante. Calcola la nuova pressione e spiega che cosa accade ai palloncini collegati all'esterno con un tubo.

21. ●●● Un litro di sangue con l'emoglobina saturata al 100 % trasporta circa 200 mL di O_2 legato all'emoglobina. Usa i valori della Figura 9.7 (97 % nei polmoni, 74 % nei tessuti a riposo) per calcolare quanti millilitri di O_2 cede ai tessuti ogni litro di sangue; poi calcola l'ossigeno ceduto in un minuto se il cuore pompa 5,0 L di sangue al minuto.

22. ●●● Scrivi le reazioni con cui la CO_2 diventa HCO_3^- nei globuli rossi, indicando l'enzima. Poi spiega in quale verso si spostano gli equilibri nei capillari dei tessuti e in quelli dei polmoni, e perché.

Leggere dati e figure

23. ● Osserva lo spirogramma della Figura 9.5. a) Quanti atti respiratori tranquilli compaiono nei primi 15 s, e qual è la frequenza respiratoria al minuto? b) Qual è il volume dei polmoni alla fine di un'espirazione tranquilla? c) Perché il tracciato non scende mai sotto 1,2 L?

24. ●● Osserva la curva continua della Figura 9.7. a) Qual è la saturazione a una PO_2 di 60 mmHg? b) Di quanti punti percentuali diminuisce la saturazione quando la PO_2 passa da 100 a 60 mmHg, e di quanti quando passa da 60 a 20 mmHg? c) Spiega il significato di questa differenza per una persona in montagna e per un muscolo che lavora.

25. ●● Nella Figura 9.6, individua le due superfici attraverso cui avvengono gli scambi di gas e per ciascuna indica, con i valori di pressione parziale, il verso della diffusione di O_2 e di CO_2. Perché la differenza di pressione parziale della CO_2 fra sangue venoso e alveoli è molto minore di quella dell'O_2?

26. ●●● Una studentessa ha misurato su sé stessa frequenza respiratoria e volume corrente in tre condizioni (dati di esempio): a riposo 14 atti/min e 0,50 L; camminando 20 atti/min e 1,0 L; correndo 36 atti/min e 2,0 L. Calcola la ventilazione al minuto e la ventilazione alveolare in ciascuna condizione (spazio morto 0,15 L). Quale grandezza contribuisce di più all'aumento della ventilazione alveolare, la frequenza o il volume corrente?

Indagare e argomentare

27. ●● Progetta un esperimento controllato per verificare se, dopo un minuto di esercizio fisico, l'aria espirata contiene più CO_2 che a riposo, usando una soluzione di blu di bromotimolo (che vira dal blu al giallo quando il pH scende) e una cannuccia. Indica l'ipotesi, la variabile indipendente, la variabile dipendente e come misurarla, le variabili da controllare, il controllo e le norme di sicurezza.

28. ●● Lavoisier concluse che la respirazione è «una combustione lenta». Spiega che cosa hanno in comune respirazione cellulare e combustione del carbone e in che cosa differiscono; poi indica che cosa del suo modello è stato confermato e che cosa corretto.

29. ●●● Usando i concetti del capitolo, spiega come il fumo di sigaretta danneggia la respirazione a tre livelli diversi: la pulizia delle vie aeree, la superficie degli scambi e il trasporto dell'ossigeno nel sangue. Concludi con un argomento a favore del divieto di fumo nei luoghi chiusi.

PER APPROFONDIRE

- [TOR] G. J. Tortora, B. Derrickson, *Principles of Anatomy and Physiology*: il capitolo sull'apparato respiratorio, con anatomia delle vie aeree, meccanica, volumi polmonari e trasporto dei gas.
- [SIL] D. U. Silverthorn, *Human Physiology: An Integrated Approach*: i capitoli sulla meccanica respiratoria e sugli scambi e il trasporto dei gas, con un'ottima trattazione delle pressioni parziali e del controllo del respiro.
- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: il capitolo sugli scambi gassosi negli animali, per confrontare i polmoni dei mammiferi con branchie, trachee e polmoni degli uccelli.

Glossario del capitolo

Alveoli polmonari
Minuscole sacche terminali delle vie aeree, avvolte dai capillari, in cui avvengono gli scambi gassosi.

Anidrasi carbonica
Enzima dei globuli rossi che catalizza la reazione $CO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2CO_3$, da cui si forma lo ione idrogenocarbonato.

Bronchioli
Ramificazioni più sottili dell'albero bronchiale, prive di cartilagine e ricche di muscolo liscio, che terminano negli alveoli.

Capacità vitale
Massimo volume d'aria espirabile dopo un'inspirazione massima: somma di volume corrente e volumi di riserva inspiratoria ed espiratoria.

Chemocettori
Recettori sensibili alla composizione chimica dei liquidi corporei; quelli centrali (bulbo) e periferici (glomi carotidei e aortici) regolano la ventilazione.

Clearance mucociliare
Pulizia delle vie aeree: il muco trattiene particelle e microbi, le ciglia dell'epitelio lo spingono verso la faringe.

Corde vocali
Pieghe della mucosa della laringe che, vibrando al passaggio dell'aria espirata, producono il suono della voce.

Diaframma
Muscolo a cupola che separa torace e addome; contraendosi si abbassa ed è il principale muscolo dell'inspirazione.

Effetto Bohr
Diminuzione dell'affinità dell'emoglobina per l'ossigeno quando il pH scende o aumenta la PCO_2; la curva di dissociazione si sposta a destra.

Emoglobina
Proteina dei globuli rossi formata da quattro catene, ciascuna con un gruppo eme con Fe^{2+}, che lega in modo reversibile fino a quattro molecole di O_2.

Epiglottide
Lamina di cartilagine elastica che, durante la deglutizione, si abbassa sull'ingresso della laringe e indirizza il cibo nell'esofago.

Laringe
Tratto delle vie aeree fra faringe e trachea, sostenuto da cartilagini, che contiene le corde vocali ed è l'organo della fonazione.

Legge di Boyle
Per una quantità fissa di gas a temperatura costante la pressione è inversamente proporzionale al volume: $P_1V_1 = P_2V_2$.

Membrana respiratoria
Barriera di circa 0,5 µm fra aria alveolare e sangue: pneumocita di tipo I, membrane basali fuse, endotelio del capillare.

Pleura
Membrana sierosa a due foglietti (viscerale sul polmone, parietale sulla parete toracica) con un velo di liquido che li fa aderire.

Spazio morto anatomico
Volume delle vie aeree (circa 0,15 L) in cui l'aria non partecipa agli scambi gassosi.

Surfattante
Miscela di fosfolipidi e proteine prodotta dai pneumociti di tipo II che riduce la tensione superficiale del liquido alveolare e impedisce il collasso degli alveoli.

Trachea
Condotto di circa 12 cm, sostenuto da anelli di cartilagine a C aperti all'indietro, che porta l'aria dalla laringe ai bronchi principali.

Ventilazione polmonare
Ricambio dell'aria nei polmoni attraverso inspirazione ed espirazione; la ventilazione al minuto è il prodotto di frequenza respiratoria e volume corrente.

Volume corrente
Volume d'aria che entra ed esce in un atto respiratorio tranquillo, circa 0,5 L nell'adulto.

Soluzioni

1. C. Il polmone destro ha tre lobi (superiore, medio, inferiore), separati da una scissura orizzontale e una obliqua.

2. A. L'epiglottide si abbassa sull'ingresso della laringe mentre la laringe si solleva.

3. D. Il surfattante è secreto dai pneumociti di tipo II; i tipo I formano la parete sottile per gli scambi.

4. A. A riposo l'espirazione è passiva: diaframma e intercostali si rilasciano e il ritorno elastico riduce il volume, cosicché la pressione alveolare sale sopra quella atmosferica.

5. B. Ogni gruppo eme contiene uno ione Fe^{2+}, che lega una molecola di O_2.

6. C. Circa il 70 % della CO_2 viaggia come HCO_3^- nel plasma, circa il 23 % legata alla globina (non al ferro), circa il 7 % disciolta.

7. D. L'aumento della PCO_2, come la diminuzione del pH, riduce l'affinità per l'O_2 (effetto Bohr); anche l'aumento della temperatura sposta la curva a destra. A, B e C la spostano a sinistra.

8. B. La CO_2 abbassa il pH del liquido cerebrospinale, rilevato dai chemocettori centrali del bulbo; l'O_2 agisce solo sui chemocettori periferici e solo per cali importanti.

9. C. Ventilazione alveolare = 30 /min × (0,20 − 0,15) L = 30 × 0,05 L = 1,5 L/min (la ventilazione al minuto sarebbe 6,0 L/min).

10. F. Il polmone sinistro ha due lobi; tre lobi ha il destro.

11. V. Gli anelli a C sono aperti all'indietro, dove la parete è chiusa da muscolo liscio e connettivo, a contatto con l'esofago.

12. F. Nell'inspirazione la pressione alveolare scende di poco *sotto* quella atmosferica, ed è per questo che l'aria entra.

13. F. Il volume residuo non esce mai dai polmoni, quindi lo spirometro non può misurarlo; si misura con metodi indiretti.

14. F. Il CO si lega all'emoglobina circa 200 volte *più* saldamente dell'ossigeno, e per questo anche piccole concentrazioni sono pericolose.

15. V. Nei muscoli in attività pH più basso, più CO_2 e temperatura più alta spostano la curva a destra (effetto Bohr e temperatura): a parità di PO_2 la saturazione è minore e l'emoglobina cede più ossigeno.

16. Ventilazione al minuto = 15 /min × 0,45 L = 6,8 L/min (6,75). In un'ora: 6,75 L/min × 60 min = 405 L ≈ $4{,}1 \times 10^2$ L.

17. Capacità vitale = 2,2 + 0,45 + 0,85 = 3,5 L. Capacità polmonare totale = 3,5 + 1,1 = 4,6 L.

18. Pressione dei gas secchi = 760 − 47 = 713 mmHg; PO_2 = 0,2095 × 713 mmHg = 149 mmHg, contro 0,2095 × 760 = 159 mmHg dell'aria secca: il vapore acqueo «diluisce» l'ossigeno e ne abbassa la pressione parziale di circa 10 mmHg.

19. PO_2 = 0,2095 × 416 mmHg = 87,2 mmHg ≈ 87 mmHg. Al livello del mare 159 mmHg: la diminuzione è (159,2 − 87,2)/159,2 = 45 % circa (la stessa percentuale della pressione totale, 1 − 416/760 = 45 %).

20. P_2 = 760 mmHg × 2,00 L / 2,10 L = 724 mmHg. La pressione nella campana scende sotto quella atmosferica: l'aria esterna entra attraverso il tubo nei palloncini, che si gonfiano, come i polmoni nell'inspirazione.

21. Per litro: 200 mL × 0,97 = 194 mL nei polmoni; 200 mL × 0,74 = 148 mL nei tessuti; ceduti 194 − 148 = 46 mL di O_2 per litro (con i valori non arrotondati del modello, 200 × (0,972 − 0,743) = 46 mL). In un minuto: 46 mL/L × 5,0 L/min = 230 mL/min ≈ $2{,}3 \times 10^2$ mL/min, un valore vicino al consumo di ossigeno a riposo di un adulto.

22. $CO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + HCO_3^-$, catalizzata dall'anidrasi carbonica (primo passaggio). Nei tessuti la CO_2 è abbondante (PCO_2 alta): gli equilibri si spostano a destra, HCO_3^- passa nel plasma (in cambio di Cl^-) e H^+ si lega all'emoglobina. Nei polmoni la CO_2 diffonde negli alveoli e la sua concentrazione nel sangue diminuisce: gli equilibri si spostano a sinistra (principio di Le Châtelier, cap. 4), HCO_3^- rientra nei globuli rossi e libera CO_2, che viene espirata.

23. a) Tre atti in 15 s, cioè uno ogni 5 s: 12 atti al minuto. b) Circa 2,4 L (volume di riserva espiratoria + volume residuo). c) Perché anche con l'espirazione massima nei polmoni resta il volume residuo, circa 1,2 L: gli alveoli e le vie aeree non si svuotano mai del tutto.

24. a) Circa 90 % (89,6 % nel modello). b) Da 100 a 60 mmHg la saturazione scende da circa 97 % a circa 90 %: circa 8 punti (97,2 − 89,6); da 60 a 20 mmHg scende da circa 90 % a circa 31 %: circa 59 punti. c) Nella parte alta, piatta, la saturazione resta alta anche se la PO_2 alveolare cala (in montagna, nelle malattie lievi): margine di sicurezza. Nella parte ripida, a PO_2 tipiche dei tessuti, piccoli cali fanno cedere molto ossigeno: un muscolo che lavora e consuma O_2 ne riceve di più.

25. Alveolo → capillare polmonare: O_2 da 100 a 40 mmHg (entra nel sangue); CO_2 da 46 a 40 mmHg (esce verso l'alveolo). Capillare dei tessuti → cellule: O_2 da 100 a ≈ 40 mmHg o meno (entra nelle cellule); CO_2 da ≈ 46 o più a 40 mmHg (entra nel sangue). La differenza per la CO_2 (6 mmHg) è molto minore di quella per l'O_2 (60 mmHg), ma basta perché la CO_2 è molto più solubile e diffonde molto più facilmente attraverso la membrana respiratoria.

26. Riposo: 14 × 0,50 = 7,0 L/min; alveolare 14 × 0,35 = 4,9 L/min. Camminata: 20 × 1,0 = 20 L/min; alveolare 20 × 0,85 = 17 L/min. Corsa: 36 × 2,0 = 72 L/min; alveolare 36 × 1,85 = 67 L/min. Dal riposo alla corsa la frequenza cresce di circa 2,6 volte (36/14), il volume corrente di 4 volte (2,0/0,50), e la frazione utile di ogni atto passa dal 70 % (0,35/0,50) al 93 % (1,85/2,0): contribuisce di più l'aumento del volume corrente.

27. *Traccia di risposta.* Ipotesi: dopo l'esercizio l'aria espirata contiene più CO_2, quindi fa virare più in fretta l'indicatore. Variabile indipendente: riposo / dopo un minuto di esercizio (per esempio saltelli sul posto). Variabile dipendente: tempo necessario perché un volume fisso (per esempio 20 mL) di soluzione diluita di blu di bromotimolo, uguale in tutte le provette, diventi giallo soffiandovi dentro con una cannuccia. Variabili da controllare: volume e concentrazione dell'indicatore, temperatura, modo di soffiare (un'espirazione normale alla volta, contando le espirazioni), stessa persona per le due condizioni, prove ripetute su più studenti. Controllo: una provetta di indicatore in cui non si soffia (resta blu), per confronto del colore. Sicurezza: ognuno usa la propria cannuccia e *soffia soltanto, senza mai aspirare*; occhiali; si interrompe l'esercizio in caso di malessere; la soluzione diluita si smaltisce come indicato dal docente. Risultato atteso: viraggio più rapido dopo l'esercizio, perché la produzione di CO_2 e la ventilazione sono aumentate.

28. *Traccia di risposta.* In comune: entrambe consumano O_2, ossidano composti del carbonio, producono CO_2 e H_2O e liberano energia; a parità di sostanza ossidata l'energia totale è la stessa. Differenze: la respirazione avviene a 37 °C, senza fiamma, in molte tappe catalizzate da enzimi, e conserva una parte dell'energia nell'ATP invece di liberarla tutta come calore. Confermato: il bilancio di O_2, CO_2 ed energia, e l'aumento del consumo di O_2 con il lavoro e la digestione. Corretto: la sede, che non sono i polmoni ma i mitocondri di tutte le cellule; i polmoni servono solo agli scambi gassosi.

29. *Traccia di risposta.* Pulizia: il fumo paralizza e distrugge le ciglia, il muco ristagna, aumentano tosse, infezioni e infiammazione (bronchite cronica). Scambi: l'infiammazione cronica distrugge le pareti degli alveoli (enfisema, BPCO): la superficie di scambio diminuisce in modo permanente, e la diffusione dell'O_2, che dipende dalla superficie, si riduce. Trasporto: il CO del fumo si lega all'eme circa 200 volte più saldamente dell'O_2 e sottrae emoglobina al trasporto. Inoltre il catrame contiene cancerogeni (tumore del polmone). Argomento: il fumo passivo espone ai danni anche chi non fuma (oltre

1,6 milioni di morti l'anno secondo l'OMS, 2026); il divieto nei luoghi chiusi protegge la salute di tutti, in particolare di bambini, lavoratori e persone con asma.