CAPITOLO

16

L'atmosfera, gli oceani e il clima: il sistema Terra

Nessuna goccia di pioggia cade per caso: ognuna è il punto d'arrivo di un viaggio che attraversa l'oceano, l'aria, il suolo e i viventi.

OBIETTIVI

1. Descrivere la Terra come sistema di sottosistemi collegati da flussi di energia e di materia, e distinguere retroazioni positive e negative.
2. Calcolare la temperatura di una particella d'aria con i gradienti adiabatici secco e saturo, la quota della base delle nubi e le temperature del foehn, e giudicare la stabilità dell'atmosfera.
3. Spiegare il vento geostrofico, la circolazione intorno a cicloni e anticicloni nei due emisferi, le correnti a getto e il ciclo di vita di un ciclone extratropicale; distinguere cicloni tropicali e medicane.
4. Collegare vento, Coriolis e oceano nella spirale di Ekman, nella risalita costiera, nella circolazione termoalina ed ENSO; spiegare l'acidificazione degli oceani.
5. Descrivere i cicli del carbonio (veloce e lento), dell'azoto e del fosforo con i loro serbatoi e flussi, e calcolare la destinazione delle emissioni umane.
6. Spiegare forzanti, retroazioni, sensibilità climatica, modelli e scenari, la differenza fra prevedibilità del tempo e del clima, e il legame fra fonti di energia e cicli.

INDICE DEL CAPITOLO

16.1 La Terra come sistema 2
16.2 La termodinamica dell'aria 3
16.3 Le forze che muovono l'aria 8
16.4 L'oceano e l'atmosfera 14
16.5 I cicli biogeochimici 20
16.6 Il clima, i modelli e l'energia 24

Scienze naturali 5 · Parte IV · La Terra come sistema: tettonica, atmosfera, oceani · versione 1.0
Capitolo 16: L'atmosfera, gli oceani e il clima: il sistema Terra · pagine 435–466 del volume completo · estratto per lo studio

Nella notte fra il 9 e il 10 settembre 2023 un ciclone nato pochi giorni prima sopra la Grecia, dove aveva scaricato in alcune località più di un metro di pioggia, toccò terra in Libia con l'aspetto di un piccolo uragano; le piogge fecero crollare due dighe a monte di Derna e l'onda di piena distrusse interi quartieri. Per capire un evento così servono molte scienze insieme: la fisica dell'aria che sale, la rotazione della Terra che fa girare i venti, il mare caldo che fornì l'energia, il clima che cambia, ma anche la manutenzione delle opere e gli allarmi. In questo capitolo studiamo l'atmosfera, gli oceani e il clima come parti di un unico **sistema Terra**, attraversato da flussi di energia e di materia.

16.1 La Terra come sistema

16.1.1 Sottosistemi, flussi e serbatoi

Un **sistema**, in scienza, è un insieme di parti che si scambiano energia e materia e che si studiano insieme perché il comportamento di ciascuna dipende dalle altre. Il pianeta si può descrivere come l'insieme di cinque sottosistemi: la **geosfera** (le rocce, dal nucleo alla superficie), l'**atmosfera**, l'**idrosfera** (oceani e acque continentali), la **criosfera** (ghiacciai, calotte, ghiaccio marino, suolo gelato) e la **biosfera**. Rispetto alla materia la Terra è quasi un sistema chiuso: la quantità di carbonio, azoto o acqua resta la stessa e cambia solo il serbatoio in cui si trova. Rispetto all'energia è invece un sistema aperto: riceve radiazione dal Sole e ne restituisce allo spazio altrettanta sotto forma di infrarosso; una piccola parte del flusso viene dall'interno, il calore che muove le placche (vedi il capitolo 14).

Per descrivere il sistema si usano due parole chiave. Un **serbatoio** è una parte del sistema in cui una sostanza si accumula, misurata come quantità (per il carbonio, in miliardi di tonnellate). Un **flusso** è la quantità che passa da un serbatoio a un altro nell'unità di tempo. Se i flussi in entrata e in uscita si equivalgono il serbatoio resta costante, anche se la materia che contiene si rinnova continuamente; se si squilibrano, anche di poco, il serbatoio cresce o si svuota.

DA RICORDARE

Richiamo. In *Scienze naturali 1*, cap. 13 e 14, hai studiato la composizione e gli strati dell'atmosfera, il bilancio energetico e l'effetto serra naturale, la pressione e le isobare, i venti e l'effetto di Coriolis, le brezze, la circolazione generale a tre celle, l'umidità e il punto di rugiada, le nubi, le masse d'aria, i fronti e le perturbazioni, i cicloni tropicali, i climi e il riscaldamento globale; nel cap. 15 le correnti marine, la circolazione termoalina ed El Niño. In *Scienze naturali 2*, cap. 15, il ciclo del carbonio in sintesi e quello dell'azoto. Qui non li ripetiamo: li spieghiamo con la fisica e li colleghiamo fra loro.

16.1.2 Retroazioni

Che cosa succede quando qualcosa perturba un sistema? Spesso la risposta di una parte modifica a sua volta la causa iniziale: si parla di **retroazione** (in inglese *feedback*). Una retroazione è **negativa** quando si oppone alla perturbazione e tende a stabilizzare il sistema, come il termostato di una casa o la regolazione della glicemia nel nostro corpo (vedi *Scienze naturali 3*, cap. 16, e *Scienze naturali 4*, cap. 12). È **positiva** quando la amplifica. Nel sistema climatico una superficie che si scalda emette più infrarosso e si raffredda (retroazione negativa); il ghiaccio che fonde lascia superfici più scure, che assorbono più energia (retroazione positiva ghiaccio–albedo).

16.2 La termodinamica dell'aria

16.2.1 La particella d'aria e l'espansione adiabatica

Per capire perché l'aria che sale forma le nubi, i meteorologi immaginano una **particella d'aria**: un volume di aria di qualche decina di metri, abbastanza grande da contenere moltissime molecole e abbastanza piccolo da avere ovunque la stessa temperatura e la stessa umidità. La particella si sposta in verticale senza mescolarsi con l'aria circostante e, poiché l'aria conduce pochissimo il calore, senza scambiare calore con essa: le sue trasformazioni sono **adiabatiche**.

Salendo, la particella trova una pressione minore e si espande. Il **primo principio della termodinamica** ($\Delta U = Q - W$, vedi *Fisica 4*, cap. 1) dice che, se non riceve calore ($Q = 0$), il lavoro W che compie spingendo l'aria intorno è pagato dalla sua energia interna, che diminuisce: la particella si raffredda. Scendendo avviene il contrario: l'aria circostante la comprime, compie lavoro su di essa e la scalda. Per l'aria secca il conto si fa con la fisica: il raffreddamento è uguale all'accelerazione di gravità divisa per il calore specifico dell'aria a pressione costante, $g/c_p \approx (9{,}81\ \text{m/s}^2)/(1005\ \text{J/(kg·K)}) \approx 9{,}8\ \text{K}$ ogni chilometro.

16.2.2 Gradiente secco e gradiente saturo

Finché la particella non è satura si raffredda dunque di circa 9,8 °C/km: è il **gradiente adiabatico secco**. Quando la sua temperatura scende fino al punto di rugiada, il vapore comincia a condensare e la nube si forma; la quota a cui accade è il **livello di condensazione**. Da lì in su ogni grammo di vapore che condensa libera il proprio calore latente (circa 2,5 kJ/g), che compensa in parte il lavoro di espansione: la particella satura si raffredda più lentamente, secondo il **gradiente adiabatico saturo**. Questo non è un numero fisso: vale circa 4 °C/km nell'aria calda e umida dei bassi strati, dove c'è molto vapore da condensare, e si avvicina al gradiente secco in alta quota e nell'aria molto fredda, dove il vapore è quasi esaurito; nei calcoli si usa spesso un valore fra 5 e 7 °C/km.

Entrambi i gradienti descrivono una particella che *si muove*. Non vanno confusi con il **gradiente termico ambientale** (il gradiente termico verticale di *Scienze naturali 1*), cioè con il modo in cui varia con la quota la temperatura dell'aria ferma intorno alla particella, misurato con i palloni sonda. In media vale 6,5 °C/km (il valore dell'atmosfera standard, vedi *Scienze naturali 1*, cap. 13), ma cambia da un giorno all'altro e da un luogo all'altro.

Una stima del livello di condensazione si ricava dalla differenza fra la temperatura dell'aria al suolo, T, e il suo punto di rugiada, T_d. Salendo, la temperatura della particella cala di circa 9,8 °C/km, ma anche il suo punto di rugiada scende un poco, di circa 1,8 °C/km, perché il vapore si rarefà con la pressione: le due temperature si avvicinano di circa 8 °C ogni chilometro, cioè di 1 °C ogni 125 m.

$$z_\mathrm{base} \approx 125\ \mathrm{m} \times (T - T_\mathrm{d})$$

IN SINTESI

Gradienti verticali di temperatura

- particella non satura (adiabatico secco): ≈ 9,8 °C/km, sia in salita (raffreddamento) sia in discesa (riscaldamento);
- particella satura (adiabatico saturo): ≈ 4–7 °C/km, minore perché il vapore che condensa libera calore latente;
- aria circostante (ambientale): in media 6,5 °C/km, ma variabile; si misura, non si calcola;
- base delle nubi cumuliformi: $z \approx 125\ \mathrm{m} \times (T - T_\mathrm{d})$ sopra il punto di partenza.

16.2.3 Stabilità e instabilità

Se una particella spinta verso l'alto si trova più fredda, quindi più densa, dell'aria che la circonda, ricade alla quota di partenza: l'atmosfera è **stabile**. Se invece si trova più calda, continua a salire da sola, come una mongolfiera: l'atmosfera è **instabile**. La regola si legge confrontando i gradienti. Quando il gradiente ambientale è minore del gradiente saturo, ogni particella sposta-

ta si ritrova più fredda dell'ambiente: l'aria è assolutamente stabile, e un'inversione termica (vedi *Scienze naturali 1*, cap. 13) è il caso estremo. Quando è maggiore del gradiente secco, l'aria è assolutamente instabile, una condizione rara che si osserva sopra un suolo rovente. Il caso più frequente e più interessante sta in mezzo: l'**instabilità condizionata**, in cui l'aria è stabile per una particella secca ma instabile per una satura.

La Figura 16.1 mostra una calda giornata estiva in pianura. Al suolo l'aria ha 28 °C e un punto di rugiada di 20 °C. Una particella sollevata, per esempio dal riscaldamento del suolo o da un rilievo, si raffredda di 9,8 °C/km e a 1000 m, il suo livello di condensazione, ha circa 18 °C, meno dell'aria circostante: se la spinta cessasse, ricadrebbe. Da lì in su però la nube si forma e la particella si raffredda di meno; a circa 2,5 km diventa più calda dell'ambiente e da quel momento sale da sola, accelerando, fino a quasi 11 km, dove la sua temperatura torna a eguagliare quella dell'aria intorno. È la storia di un **cumulonembo**: la sua base piatta segna il livello di condensazione, la sua sommità, spesso allargata a incudine sotto la tropopausa, il livello di equilibrio.

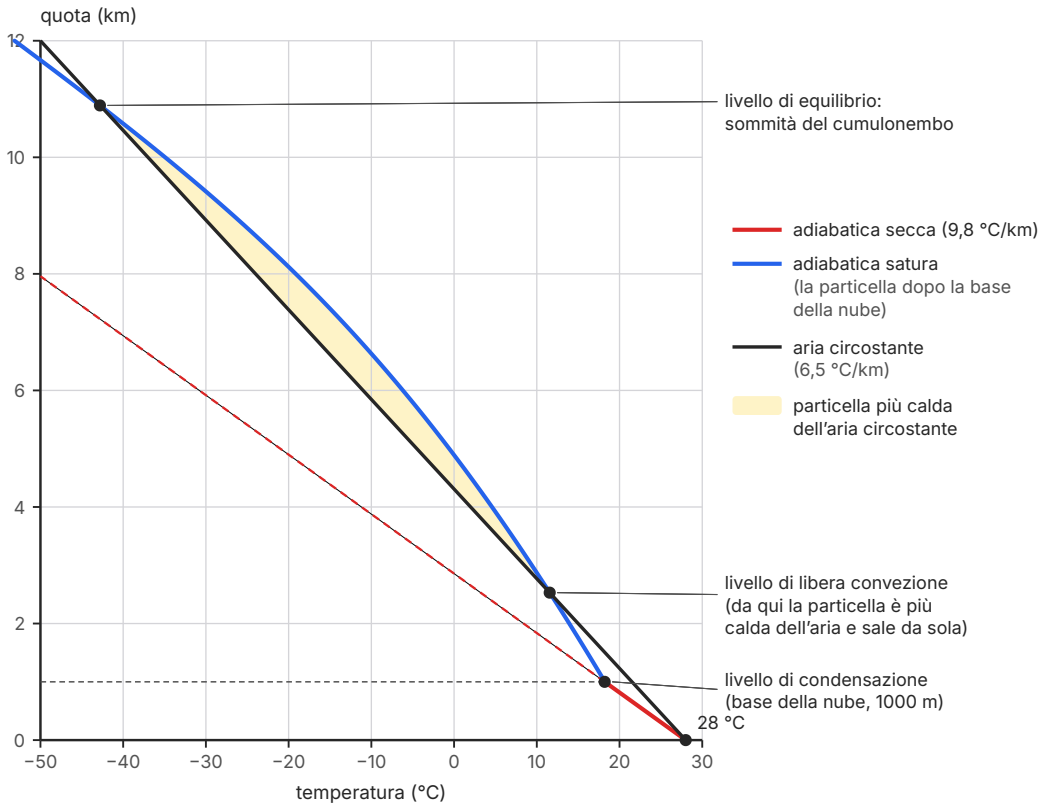


Figura 16.1 Temperatura in funzione della quota per una particella d'aria che parte dal suolo a 28 °C con punto di rugiada di 20 °C (giornata estiva in pianura), confrontata con un ambiente ipotetico che si raffredda di 6,5 °C/km. La curva della particella è calcolata: fino al livello di condensazione (1000 m) con il gradiente adiabatico secco, oltre con il gradiente adiabatico saturo, ricavato a ogni quota dalla temperatura e dalla pressione. Dove la particella è più calda dell'ambiente (zona colorata) sale da sola: è l'instabilità condizionata che alimenta i temporali.

I temporali sono quindi il segno di un'atmosfera instabile. La corrente ascendente di un cumulonembo può superare i 10 m/s; le goccioline trasportate oltre lo zero termico diventano ghiaccio, si scontrano, si caricano elettricamente e producono i fulmini. Se i venti cambiano direzione e intensità con la quota, la corrente ascendente si separa da quella discendente e il temporale può durare ore, organizzandosi in una **supercella** con una corrente ascendente in rotazione: sono le supercelle a produrre la grandine più grossa e, a volte, i tornado, anche in Pianura Padana.

16.2.4 Il foehn

La stessa fisica spiega il **foehn**, il vento caldo e secco che scende dalle Alpi (vedi *Scienze naturali 1*, cap. 14). Quando una corrente da sud è costretta a superare la catena, l'aria sale lungo il versante italiano raffreddandosi prima con il gradiente secco e poi, oltre il livello di condensazione, con quello saturo: si formano nubi e piogge persistenti (lo *stau*), e l'aria perde gran parte del suo vapore. Sul versante opposto scende ormai non satura e si riscalda per compressione di 9,8 °C/km lungo tutto il dislivello. Il bilancio è asimmetrico: si è raffreddata «lentamente» per un tratto della salita e si scalda «in fretta» per tutta la discesa (Figura 16.2).

ESEMPIO SVOLTO

Il foehn attraverso le Alpi

Problema. Aria a 300 m di quota, a 16,0 °C e con punto di rugiada di 8,0 °C, viene spinta da un vento di sud contro una cresta alpina alta 3000 m e scende poi in una valle svizzera a 500 m. Usa 9,8 °C/km per l'aria non satura e 5,0 °C/km per l'aria satura. Trova la temperatura sulla cresta e nella valle, e confrontala con quella che avrebbe a 500 m sul versante italiano.

Soluzione. Livello di condensazione: 125 m × (16,0 − 8,0) = 1000 m sopra il punto di partenza, cioè a 1300 m. Da 300 a 1300 m (1,0 km) la particella non è satura: 16,0 °C − 9,8 °C/km × 1,0 km = 6,2 °C. Da 1300 a 3000 m (1,7 km) è satura: 6,2 °C − 5,0 °C/km × 1,7 km = 6,2 − 8,5 = −2,3 °C sulla cresta. In discesa, da 3000 a 500 m (2,5 km), non è più satura: −2,3 °C + 9,8 °C/km × 2,5 km = −2,3 + 24,5 = 22,2 °C.

A 500 m sul versante italiano l'aria in salita aveva invece 16,0 − 9,8 × 0,2 ≈ 14,0 °C: alla stessa quota il foehn è più caldo di circa 8 °C. L'energia non viene dal nulla: è il calore latente liberato dal vapore che si è condensato e che è caduto come pioggia sul versante sopravento. Per questo il foehn è anche secco: ha perso acqua. Non si scalda perché «scende verso il Sole» o per attrito, ma per compressione adiabatica.

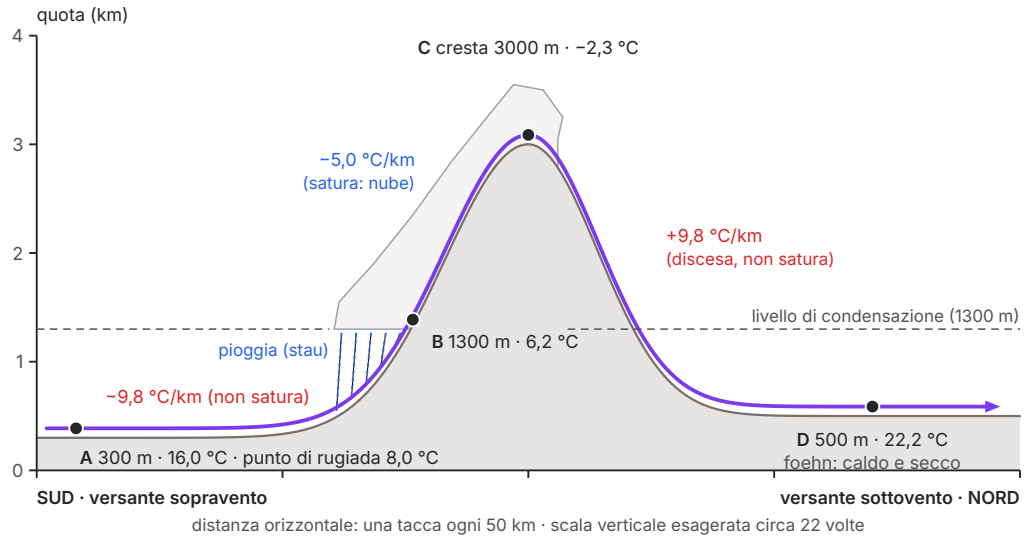


Figura 16.2 Sezione schematica di una catena alpina attraversata da un vento di sud, con le temperature della particella calcolate nell'esempio svolto: in salita 9,8 °C/km fino al livello di condensazione (1300 m), poi 5,0 °C/km nella nube; in discesa, non satura, l'aria si riscalda di 9,8 °C/km e arriva in valle come foehn. Rilievo idealizzato, scala verticale esagerata.

16.3 Le forze che muovono l'aria

16.3.1 Gradiente di pressione, Coriolis, attrito

Il vento è aria in movimento orizzontale, e come ogni corpo si muove secondo le forze che agiscono su di esso. La prima è la **forza del gradiente di pressione**: dove la pressione cambia da un punto all'altro, l'aria è spinta dalle alte verso le basse pressioni, perpendicolarmente alle isobare, con un'intensità tanto maggiore quanto più le isobare sono fitte. Su scala di centinaia di chilometri conta la rotazione terrestre: per chi osserva da terra un corpo in moto libero sembra deviare, perché il sistema di riferimento ruota. È l'**effetto di Coriolis**, apparente, descritto in fisica da un'accelerazione di intensità $2\Omega v \sin\varphi$ (Ω velocità angolare della Terra, v velocità del corpo, φ latitudine). La deviazione è verso destra nell'emisfero boreale, verso sinistra in quello australe; è nulla all'equatore, dove $\sin\varphi = 0$, e massima ai poli; cresce con la velocità e agisce sempre perpendicolarmente al moto, quindi ne cambia la direzione ma non la rapidità. Vicino al suolo, infine, l'**attrito** con il terreno, gli alberi e gli edifici frena l'aria.

ERRORE FREQUENTE

«L'acqua del lavandino gira in un verso nell'emisfero boreale e nel verso opposto in quello australe.» No: la deviazione di Coriolis è proporzionale alla velocità angolare della Terra, circa 7,3 × 10^{-5} rad/s, ed è del tutto trascurabile per un moto che dura pochi secondi e si estende per pochi centimetri. Il verso del vortice dipende dalla forma del lavandino e dai movimenti rimasti nell'acqua. Coriolis conta per i moti che durano ore e si estendono per centinaia di chilometri: i venti, le correnti, i cicloni.

16.3.2 Il vento geostrofico

In quota, sopra il primo chilometro circa, l'attrito è trascurabile. Una massa d'aria che parte verso la bassa pressione viene deviata da Coriolis finché le due forze, gradiente di pressione e Coriolis, si bilanciano: allora il vento soffia **parallelo alle isobare**, con velocità costante (Figura 16.3a). È il **vento geostrofico**. Nell'emisfero boreale la bassa pressione resta alla sua sinistra, e questa è la ragione fisica della legge di Buys-Ballot che hai studiato nel primo anno. Più le isobare sono fitte, più forte è il vento: sulle carte meteorologiche in quota la loro distanza si legge direttamente come velocità.

Al suolo l'attrito rallenta il vento; più lento, il vento è deviato meno da Coriolis, e il bilancio delle tre forze lo fa soffiare obliquamente alle isobare, con un angolo di 10–45° verso la bassa pressione (Figura 16.3b). Intorno a una bassa pressione, l'aria al suolo ruota e insieme **converge** verso il centro, dove è costretta a salire: un **ciclone** porta nubi e piogge. Intorno a un'alta pressione l'aria ruota e **diverge**, alimentata dall'aria che scende dall'alto e si riscalda: un **anticiclone** porta cielo sereno. I versi di rotazione sono opposti nei due emisferi (Figura 16.4): un ciclone gira in senso antiorario nell'emisfero boreale e in senso orario in quello australe.

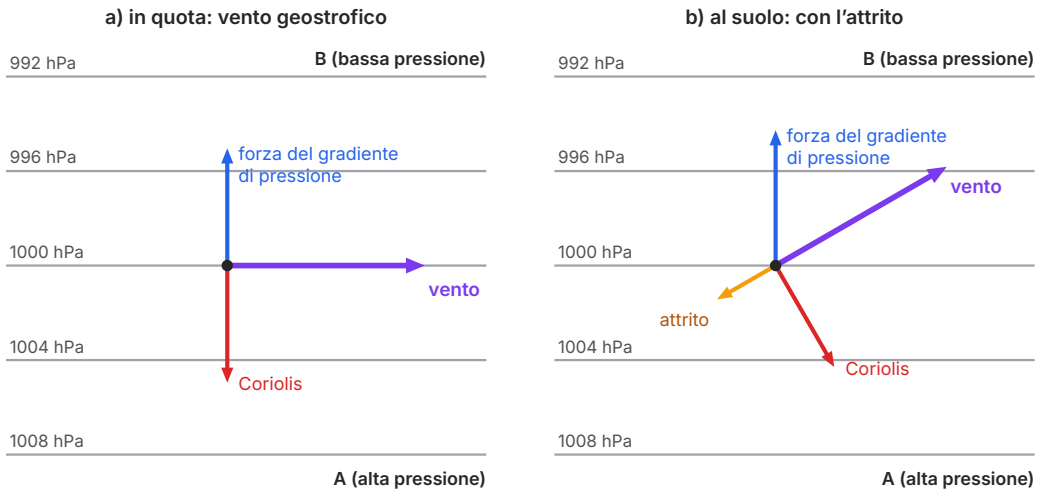


Figura 16.3 Le forze sulla particella d'aria (punto nero) nell'emisfero boreale. a) In quota la forza del gradiente di pressione, diretta verso la bassa pressione, è bilanciata dall'effetto di Coriolis, che agisce a destra del moto: il vento geostrofico soffia parallelo alle isobare, con la bassa pressione a sinistra. b) Al suolo l'attrito, opposto al moto, rallenta il vento; la somma delle tre forze è nulla quando il vento attraversa le isobare verso la bassa pressione (qui con un angolo di 30°).

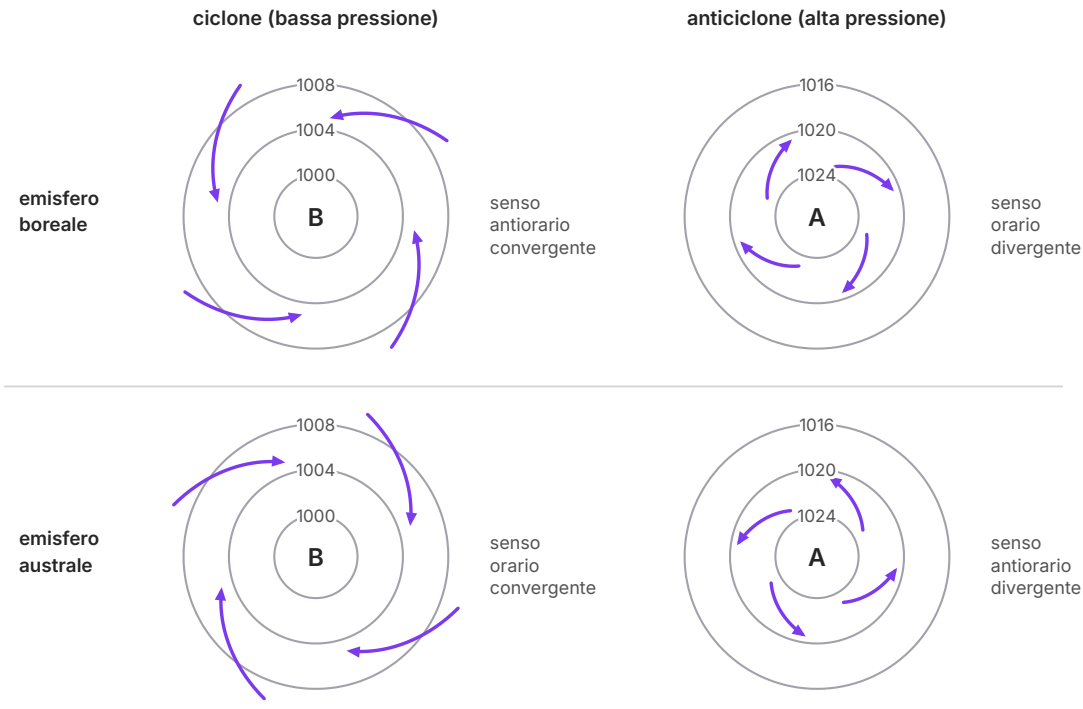


Figura 16.4 Circolazione dei venti al suolo intorno a un ciclone e a un anticiclone nei due emisferi. L'aria converge spiraleggiando verso il centro dei cicloni e diverge da quello degli anticicloni; i versi di rotazione si invertono passando da un emisfero all'altro.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Il vento geostrofico in numeri. Il bilancio fra la forza del gradiente di pressione e l'effetto di Coriolis dà la velocità del vento geostrofico:

$$v_g = \frac{\Delta p}{\rho f \Delta n} \quad \text{con} \quad f = 2\Omega \sin \varphi$$

dove Δp è la differenza di pressione fra due isobare distanti Δn, ρ la densità dell'aria e f il parametro di Coriolis ($\Omega = 7{,}29 \times 10^{-5}$ rad/s). **Esempio.** A 45° di latitudine, a circa 1 km di quota ($\rho \approx 1{,}1$ kg/m^3), due isobare che differiscono di 4 hPa = 400 Pa distano 300 km. Allora $f = 2 \times 7{,}29 \times 10^{-5} \times \sin 45° \approx 1{,}03 \times 10^{-4}$ s^{-1} e $v_g = 400 / (1{,}1 \times 1{,}03 \times 10^{-4} \times 3{,}0 \times 10^5) \approx 12$ m/s, circa 42 km/h. A parità di isobare, a 30° di latitudine il vento sarebbe più forte (circa 17 m/s), perché Coriolis è più debole; all'equatore, dove $f = 0$, il bilancio geostrofico non esiste: è uno dei motivi per cui lì non si formano cicloni.

16.3.3 Correnti a getto e onde di Rossby

La circolazione generale a tre celle (vedi *Scienze naturali 1*, cap. 13) descrive bene le medie, ma non il tempo di un giorno qualsiasi. Fra le celle, alle medie latitudini, l'aria polare fredda e l'aria subtropicale calda si fronteggiano lungo il **fronte polare**, e la differenza di temperatura fra le due produce in quota una forte differenza di pressione. Ne nascono le **correnti a getto**: fasce strette di vento occidentale fortissimo, a circa 9–12 km di quota, larghe qualche centinaio di chilometri e lunghe migliaia, con velocità che superano spesso i 200 km/h. Se ne riconoscono due per emisfero: la **corrente a getto polare**, sopra il fronte polare, e la **corrente a getto subtropicale**, più alta e più regolare, al margine della cella di Hadley.

La corrente a getto polare forma ampie ondulazioni intorno al pianeta, di solito da quattro a sei, le **onde di Rossby**, dal meteorologo svedese Carl-Gustaf Rossby che ne spiegò la dinamica alla fine degli anni Trenta. Nelle *saccature*, rivolte verso l'equatore, l'aria fredda scende verso sud; nei *promontori*, rivolti verso il polo, l'aria calda risale. Le onde si spostano lentamente verso est trascinando le perturbazioni; quando un'ansa si ferma per giorni o settimane si ha un **blocco**, che può prolungare un'ondata di calore, una siccità o una serie di piogge.

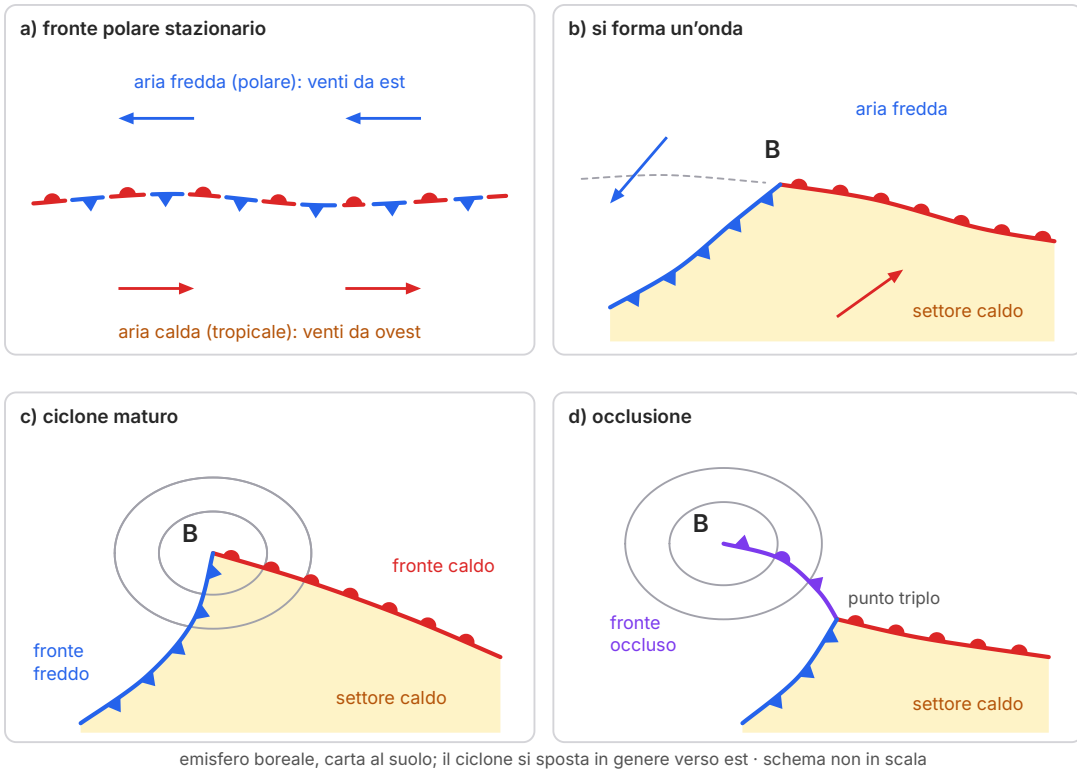
16.3.4 Il ciclo di vita di un ciclone extratropicale

Le perturbazioni delle medie latitudini sono i **cicloni extratropicali**, che hai conosciuto nel primo anno. Il modello che ne descrive la nascita e la morte fu costruito intorno al 1920 dai meteorologi della **scuola di Bergen**, in Norvegia, guidati da Vilhelm Bjerknes: nel 1919 suo figlio Jacob descrisse la struttura dei cicloni con i fronti caldo e freddo, e nel 1922, con Halvor Solberg, ne ricostruì il ciclo di vita. La formazione di un ciclone si chiama **ciclogenesi** (Figura 16.5):

1. **fronte polare stazionario.** Aria fredda e aria calda scorrono in versi opposti ai due lati del fronte;
2. **onda.** Una piccola perturbazione, spesso legata a una saccatura in quota, deforma il fronte: l'aria calda avanza verso nord a est del vertice dell'onda, l'aria fredda verso sud a ovest. Al vertice la pressione cala: nasce il ciclone, con un fronte caldo davanti e un fronte freddo dietro;
3. **ciclone maturo.** In due o tre giorni la pressione al centro scende ancora, i venti si rinforzano e fra i due fronti si apre il *settore caldo*;
4. **occlusione.** Il fronte freddo, più veloce, raggiunge il fronte caldo e solleva l'aria del settore caldo: si forma un fronte occluso. Separato dalla sua fonte di aria calda e umida, il ciclone si riempie e si esaurisce.

Il motore del ciclone è la differenza di temperatura fra le masse d'aria, e il ciclone trasporta calore verso il polo. Il Mediterraneo ha le sue ciclogenesi: la più frequente è quella del **Golfo di Genova**, dove una corrente di aria fredda da nord-ovest, deviata e rallentata dalle Alpi, favori-

sce la formazione di una bassa pressione sottovento alla catena; altre basse pressioni si formano a sud dell'Atlante e nello Ionio.



emisfero boreale, carta al suolo; il ciclone si sposta in genere verso est · schema non in scala

Figura 16.5 Il ciclo di vita di un ciclone extratropicale secondo il modello della scuola di Bergen, con i simboli dei fronti: freddo (triangoli blu, rivolti verso l'aria calda), caldo (semicerchi rossi, rivolti verso l'aria fredda), occluso (triangoli e semicerchi alternati, viola) e stazionario (simboli alternati sui due lati). In giallo il settore caldo; le linee grigie sono isobare. Emisfero boreale, schema non in scala.

16.3.5 Cicloni tropicali e medicane

I **cicloni tropicali** hanno un motore diverso: non le differenze fra masse d'aria, ma il **calore latente**. Si formano sopra mari con temperatura superficiale di almeno 26 °C circa, fra 5° e 20° di latitudine: non all'equatore, perché lì la deviazione di Coriolis è nulla e l'aria che converge non può avviare un vortice. L'aria caldo-umida converge verso un centro di bassa pressione, sale in anelli di cumulonembi e condensa, liberando enormi quantità di calore; l'aria scaldata sale ancora più in fretta, la pressione al suolo cala e richiama nuova aria umida. È una retroazione positiva, che si interrompe sui mari freddi o sulla terraferma. Al centro c'è l'**occhio**, dove l'aria scende e il cielo è quasi sereno, circondato dal **muro dell'occhio**, con le nubi più alte e i venti più violenti. La **scala Saffir-Simpson** ne misura l'intensità dalla categoria 1 (venti sostenuti da 119 km/h) alla 5 (oltre 252 km/h).

Nel Mediterraneo, più piccolo e più fresco degli oceani tropicali, non si formano veri uragani, ma alcune volte all'anno si osservano cicloni che nella fase più intensa ne assumono l'aspetto: occhio quasi privo di nubi, bande temporalesche a spirale, nucleo caldo. Sono i **medicane** (da *Mediterranean hurricane*), cicloni di origine extratropicale che si alimentano anche del calore del mare. Il caso più grave documentato è la tempesta **Daniel**: dopo le alluvioni in Grecia, Bulgaria e Turchia divenne un medicane alla fine dell'8 settembre 2023 e nella notte fra il 9 e il 10 toccò terra in Libia, vicino a Bengasi. Nella notte fra il 10 e l'11 sul bacino di Derna caddero circa 200 mm di pioggia, le due dighe a monte della città cedettero e le vittime furono, secondo le stime, fra 5000 e 15 000 (fonte: ECMWF, *Newsletter* n. 179, 2024). Il disastro fu insieme meteorologico e umano: dighe vecchie e poco curate, nessun sistema di allerta efficace.

16.3.6 Eventi estremi e attribuzione

La scienza dell'**attribuzione** confronta, con molte simulazioni, il clima attuale con un clima ipotetico senza l'influenza umana, e calcola quanto un tipo di evento è diventato più probabile o più intenso. L'IPCC esprime la fiducia con termini precisi: *virtually certain* (praticamente certo, 99–100 %), *very likely* (molto probabile, 90–100 %), *likely* (probabile, 66–100 %). Nell'AR6 (2021) giudica praticamente certo che dagli anni Cinquanta le ondate di calore siano diventate più frequenti e intense sulla maggior parte delle terre emerse; per i cicloni tropicali considera probabile un aumento della quota dei più intensi (categorie 3–5), mentre la fiducia su una variazione del loro numero totale è bassa.

16.4 L'oceano e l'atmosfera

16.4.1 Il vento muove il mare: la spirale di Ekman

Il vento che soffia sul mare trascina per attrito lo strato superficiale; anche l'acqua in movimento subisce la deviazione di Coriolis. Il risultato, spiegato nel 1905 dall'oceanografo svedese Vagn Walfrid Ekman, è sorprendente: nell'emisfero boreale la corrente in superficie scorre a circa 45° a destra del vento; ogni strato trascina quello sottostante, più lentamente e deviato ancora più a destra, e la direzione della corrente ruota con la profondità disegnando la **spirale di Ekman**, che si esaurisce entro un centinaio di metri. Sommando il movimento di tutto lo strato, l'acqua è spostata in media **a 90° rispetto al vento**, a destra nell'emisfero boreale e a sinistra in quello australe: è il **trasporto di Ekman**. Nei grandi vortici subtropicali il trasporto di Ekman accumula acqua verso il centro, sopraelevato di circa un metro, e questa «collina» d'acqua mantiene la circolazione.

16.4.2 La risalita delle acque profonde

Lungo le coste del Perù soffiano venti da sud-est, paralleli alla costa; nell'emisfero australe il trasporto di Ekman sposta l'acqua superficiale a sinistra del vento, cioè verso il largo. Per sosti-

tuirla risale acqua dalle profondità: è la **risalita costiera** (in inglese *upwelling*). L'acqua profonda è fredda e ricca di nitrati e fosfati, liberati dalla decomposizione degli organismi che vi sono sprofondati; arrivata alla luce, alimenta un'esplosione di fitoplancton e quindi di tutta la catena alimentare. Per questo le aree di risalita (Perù, California, Namibia) ospitano alcune delle pesche più ricche del mondo: un esempio di interrelazione fra atmosfera, idrosfera e biosfera.

16.4.3 La circolazione termoalina

Sotto lo strato superficiale l'acqua si muove per differenze di densità, che dipendono dalla temperatura e dalla salinità: è la circolazione termoalina (vedi *Scienze naturali 1*, cap. 15). L'acqua di mare più densa si forma in pochi luoghi: nei mari della Groenlandia, della Norvegia e del Labrador, dove l'acqua salata portata dalla Corrente del Golfo si raffredda in inverno, e intorno all'Antartide, soprattutto nel mare di Weddell, dove il ghiaccio marino che si forma lascia nell'acqua il sale e la rende ancora più densa. Queste acque sprofondano e scorrono lungo i fondali verso gli altri oceani, dove risalgono lentamente. Nell'Atlantico questa circolazione si chiama **AMOC** (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*, circolazione di ribaltamento meridionale atlantica): in superficie porta acqua calda verso nord, in profondità acqua fredda verso sud, e trasporta così verso le alte latitudini una grande quantità di calore.

Il «nastro trasportatore» globale della Figura 16.6 è una **semplificazione** utile per la didattica: in realtà le acque profonde si mescolano, seguono molti percorsi, e la circolazione dipende in gran parte anche dai venti, soprattutto intorno all'Antartide. L'IPCC (AR6, 2021) ritiene molto probabile che l'AMOC si indebolisca nel corso del XXI secolo in tutti gli scenari, ma ha una fiducia bassa sull'entità di questo indebolimento e una fiducia media che non subisca un collasso brusco prima del 2100.

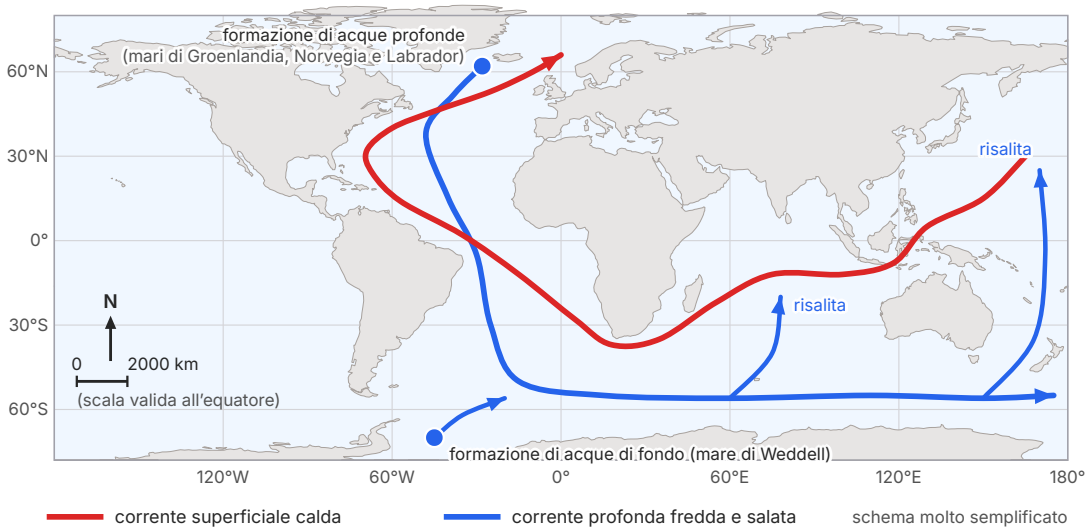


Figura 16.6 La circolazione termoalina globale rappresentata come un «nastro trasportatore»: acque superficiali calde (rosso) e acque profonde fredde e salate (blu), che si formano nei mari a nord dell'Atlantico e intorno all'Antartide e risalgono negli oceani Indiano e Pacifico. Schema molto semplificato: i percorsi reali sono molti e intrecciati. Linee di costa da Natural Earth (dominio pubblico), proiezione equirettangolare.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Una circolazione termoalina in una vaschetta

Obiettivo. Osservare come l'acqua più fredda o più salata sprofondi e scorra sul fondo, e confrontare l'effetto della temperatura con quello della salinità.

Materiali. Una vaschetta trasparente rettangolare (almeno 30 cm di lunghezza), acqua di rubinetto a temperatura ambiente, cubetti di ghiaccio preparati con acqua colorata con colorante alimentare blu, acqua calda colorata di rosso, sale da cucina, un bicchiere, un cucchiaio, un termometro, lo smartphone per fotografare a intervalli regolari.

Procedimento. 1) Riempite la vaschetta di acqua a temperatura ambiente e lasciatela ferma per qualche minuto. 2) Appoggiate un cubetto di ghiaccio blu a un'estremità, sul pelo dell'acqua, e osservate per 5 minuti. 3) Versate lentamente un po' di acqua calda rossa all'estremità opposta, con il cucchiaio appoggiato alla superficie. 4) Svuotate e riempite di nuovo la vaschetta; versate con cautela su un'estremità un bicchiere di acqua a temperatura ambiente in cui avete sciolto due cucchiai di sale e qualche goccia di colorante blu. 5) Fotografate ogni 30 secondi e misurate la temperatura in superficie e sul fondo alle due estremità.

Sicurezza. Usate acqua calda da rubinetto o riscaldata dall'insegnante, mai bollente; asciugate subito l'acqua versata sul pavimento; non assaggiate le soluzioni.

Risultati attesi. L'acqua blu del ghiaccio che fonde scende in sottili filamenti e si allarga sul fondo; l'acqua rossa resta in superficie e scorre verso l'altra estremità: si forma una cella di circolazione. L'acqua salata scende anche se ha la stessa temperatura dell'acqua circostante: la densità dipende da entrambe le grandezze.

Domande. a) Quale zona della vaschetta rappresenta i mari della Groenlandia, e quale l'oceano tropicale? b) Che cosa cambierebbe aggiungendo acqua dolce fredda sopra l'acqua salata? Collega la risposta alla fusione dei ghiacci della Groenlandia. c) Perché in questo modello manca il ruolo dei venti, e che cosa rappresenterebbe un ventilatore puntato sulla superficie?

16.4.4 El Niño–Oscillazione meridionale

In condizioni normali, nel Pacifico equatoriale gli alisei spingono l'acqua superficiale calda verso l'Indonesia e l'Australia, dove si accumula uno strato caldo spesso; lungo il Sudamerica risale acqua fredda. Il **termoclino**, il passaggio fra acqua calda superficiale e acqua fredda profonda, è quindi profondo a ovest e vicino alla superficie a est. Sopra l'acqua calda occidentale l'aria sale e dà piogge abbondanti, in quota scorre verso est, scende sul Pacifico orientale freddo e torna verso ovest al suolo come aliseo: è la **circolazione di Walker**, chiamata così nel 1969 da Jacob Bjerknes in onore di Gilbert Walker, che all'inizio del Novecento aveva scoperto l'altalena di pressione fra Pacifico e Oceano Indiano, l'**oscillazione meridionale** (Figura 16.7).

Bjerknes capì che oceano e atmosfera si sostengono a vicenda. Se gli alisei si indeboliscono, l'acqua calda rifluisce verso est, il termoclino si appiattisce, la risalita fredda lungo il Perù si ar-

resta; il Pacifico orientale si scalda, la differenza di temperatura fra ovest ed est diminuisce, e gli alisei si indeboliscono ancora: è una retroazione positiva. Il risultato è **El Niño**. Il processo opposto, con alisei più forti del normale e un Pacifico orientale più freddo, si chiama **La Niña**. L'intero fenomeno accoppiato oceano–atmosfera è detto **ENSO** (*El Niño–Southern Oscillation*) e si ripete in modo irregolare ogni 2–7 anni.

Per seguirlo la NOAA usa l'**indice oceanico Niño** (ONI): la media su tre mesi dell'anomalia di temperatura superficiale del mare nella regione Niño 3.4 (5° N–5° S, 170° O–120° O), cioè la sua differenza dal valore medio di un trentennio di riferimento. Si parla di El Niño quando l'indice resta pari o superiore a +0,5 °C per almeno cinque trimestri consecutivi, di La Niña quando resta pari o inferiore a −0,5 °C. Le conseguenze, dette **teleconnessioni**, raggiungono regioni lontanissime: durante El Niño piogge e alluvioni sulle coste del Perù e dell'Ecuador, siccità e incendi in Indonesia e in Australia, inverni più miti nel nord-ovest del Nordamerica; e, poiché l'oceano cede calore all'atmosfera, gli anni di El Niño intenso tendono a essere fra i più caldi a scala globale.

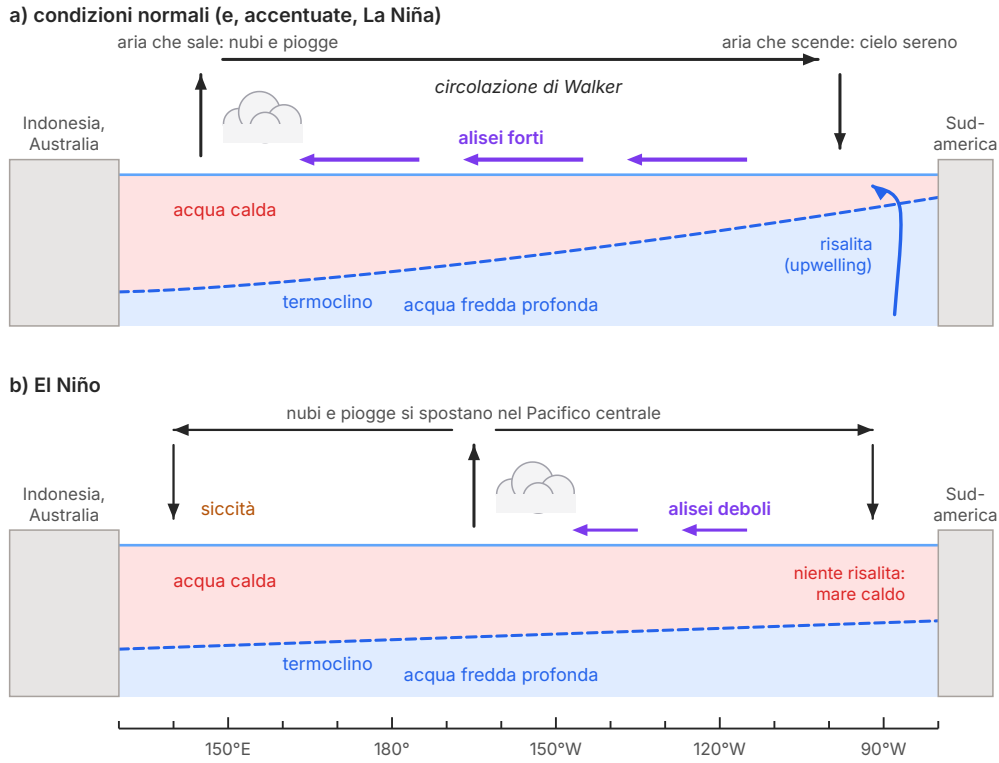


Figura 16.7 Sezione schematica del Pacifico equatoriale (scala non lineare; profondità e quote molto esagerate). a) In condizioni normali gli alisei accumulano acqua calda a ovest; il termoclino è profondo a ovest e superficiale a est, dove l'acqua fredda risale; sopra l'oceano si chiude la circolazione di Walker. Durante La Niña queste condizioni si accentuano. b) Durante El Niño gli alisei si indeboliscono, l'acqua calda si estende verso est, il termoclino si appiattisce, la risalita si arresta e la zona delle piogge si sposta nel Pacifico centrale.

ERRORE FREQUENTE

«El Niño è causato dal riscaldamento globale.» No: ENSO è una variabilità naturale del sistema oceano–atmosfera, documentata da secoli nelle cronache dei pescatori peruviani e da migliaia di anni negli archivi naturali, come i coralli e i sedimenti. Il riscaldamento globale si sovrappone a ENSO e ne può modificare le conseguenze; ma un anno di El Niño più caldo degli altri non dimostra da solo un cambiamento del clima, e un anno di La Niña più fresco non lo smentisce: per il clima contano le tendenze di lungo periodo, al netto delle oscillazioni.

16.4.5 L'oceano come serbatoio di calore e di CO_2

L'oceano ha una capacità termica enorme: secondo l'IPCC ha assorbito circa il 90 % dell'energia in eccesso accumulata dal sistema climatico negli ultimi decenni, attenuando il riscaldamento

dell'aria. Assorbe anche circa un quarto del CO_2 emesso dalle attività umane, con una conseguenza chimica: l'acidificazione degli oceani, che hai incontrato in *Scienze naturali 4*, cap. 4. Il CO_2 disciolto reagisce con l'acqua secondo gli equilibri che hai studiato in *Scienze naturali 4*, cap. 3 e 4:

$$CO_2(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows H_2CO_3(aq) \rightleftarrows H^+(aq) + HCO_3^-(aq)$$

$$H^+(aq) + CO_3^{2-}(aq) \rightleftarrows HCO_3^-(aq)$$

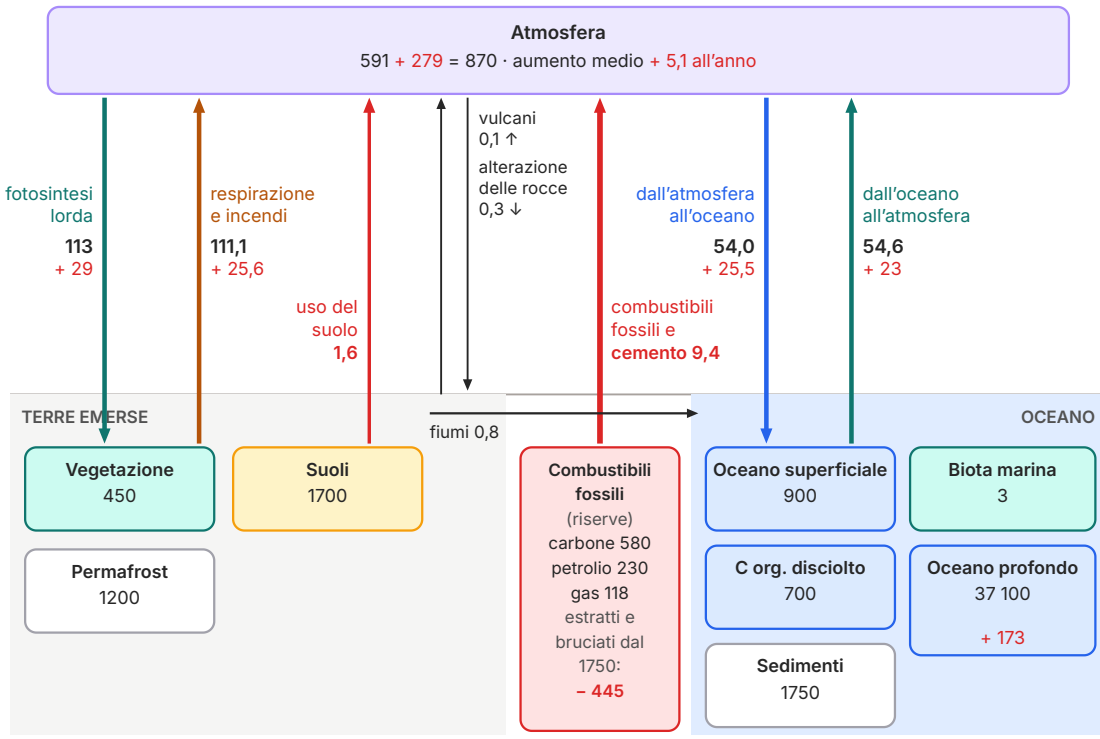
Gli ioni H^+ liberati abbassano il pH e, combinandosi con gli ioni carbonato, ne riducono la concentrazione. Gli ioni carbonato sono proprio quelli che coralli, molluschi e molte alghe planctoniche usano per costruire gusci e scheletri di $CaCO_3$: con meno carbonato disponibile, costruirli costa più energia, e nelle acque più fredde e profonde i gusci tendono a sciogliersi. Dall'epoca preindustriale il pH medio delle acque superficiali è sceso di circa 0,1 unità, da circa 8,2 a circa 8,1 (fonte: NOAA); in scala logaritmica significa che la concentrazione di H^+ è aumentata di un fattore $10^{0,1} \approx 1{,}26$, cioè di circa un quarto. L'oceano resta basico: «acidificazione» indica la direzione del cambiamento, non che il mare diventi acido.

16.5 I cicli biogeochimici

Nel secondo anno hai incontrato il ciclo del carbonio come schema e quello dell'azoto in un approfondimento; ora li studiamo come flussi fra i sottosistemi, misurati con i numeri.

16.5.1 Il ciclo del carbonio: la parte veloce

Il ciclo veloce passa attraverso i viventi e si misura in anni o decenni (Figura 16.8). Ogni anno la fotosintesi delle piante terrestri sottrae all'atmosfera più di cento miliardi di tonnellate di carbonio (petagrammi, PgC): è la **produzione primaria lorda**, con le reazioni del capitolo 11. Circa la metà torna subito all'aria con la respirazione delle piante stesse, e ciò che resta, la produzione primaria netta del capitolo 11, è restituito quasi per intero dalla respirazione degli altri viventi e dagli incendi, con le vie metaboliche del capitolo 9. Lo scambio di CO_2 fra atmosfera e oceano è dello stesso ordine di grandezza. Prima dell'industrializzazione questi flussi lordi, enormi rispetto alle emissioni umane, erano quasi esattamente bilanciati.



serbatoi in PgC (miliardi di tonnellate di carbonio) · flussi in PgC all'anno · in rosso le variazioni dovute all'uomo

Figura 16.8 Il ciclo globale del carbonio: serbatoi in PgC e flussi in PgC all'anno, con i valori dell'IPCC (AR6, 2021, Figura 5.12). In nero i valori preindustriali (intorno al 1750); in rosso le variazioni dovute all'uomo: per i serbatoi la variazione accumulata dal 1750, per i flussi la media del decennio 2010–2019. Schema non in scala; i valori sono stime, con incertezze anche grandi.

Le attività umane hanno rotto questo equilibrio. Nel decennio 2010–2019 la combustione dei combustibili fossili e la produzione di cemento hanno immesso in media 9,4 PgC all'anno, e i cambiamenti nell'uso del suolo, soprattutto la deforestazione, altri 1,6. Di questo carbonio, solo una parte rimane nell'atmosfera: il resto è assorbito dall'oceano e dalla vegetazione, che con più CO_2 nell'aria fotosintetizza di più (Tabella 16.1).

Tabella 16.1 Il bilancio globale del CO_2 di origine umana: media del decennio 2010–2019, in PgC all'anno (fonte: IPCC, AR6, 2021, Tabella 5.1). La somma delle destinazioni supera le emissioni di circa 0,1 PgC all'anno, una differenza entro le incertezze delle stime.

Voce	PgC/anno	Incertezza
Emissioni: combustibili fossili e cemento	9,4	± 0,5
Emissioni: cambiamenti nell'uso del suolo	1,6	± 0,7
Totale delle emissioni	10,9	± 0,9
Destinazione: aumento nell'atmosfera	5,1	± 0,02
Destinazione: assorbimento da parte dell'oceano	2,5	± 0,6
Destinazione: assorbimento da parte delle terre emerse	3,4	± 0,9

ESEMPIO SVOLTO

Dove va il carbonio che emettiamo

Problema. Con i dati della Tabella 16.1 calcola la frazione delle emissioni che rimane nell'atmosfera e l'aumento annuo della concentrazione di CO_2, sapendo che 1 ppm di CO_2 nell'atmosfera corrisponde a circa 2,12 PgC.

Soluzione. Frazione che resta nell'aria: 5,1 / 10,9 ≈ 0,47, cioè circa il 47 %; il resto si divide fra l'oceano (2,5 / 10,9 ≈ 23 %) e le terre emerse (3,4 / 10,9 ≈ 31 %). Aumento della concentrazione: 5,1 PgC/anno ÷ 2,12 PgC/ppm ≈ 2,4 ppm all'anno, in accordo con le misure dirette, come quelle di Mauna Loa. Controllo: il serbatoio atmosferico preindustriale, 591 PgC, corrisponde a 591 / 2,12 ≈ 279 ppm, il valore misurato nell'aria delle carote di ghiaccio prima del 1750.

Commento. Oceano e vegetazione «ci fanno uno sconto» di più della metà delle emissioni, ma non gratis: l'oceano si acidifica, e l'assorbimento delle terre emerse dipende dal clima e potrebbe ridursi con siccità e incendi più frequenti.

16.5.2 Il ciclo del carbonio: la parte lenta

Il serbatoio più grande non compare nella Figura 16.8: sono le rocce, soprattutto i calcari, che contengono decine di milioni di PgC. Il carbonio vi entra e ne esce con flussi piccolissimi, meno di un PgC all'anno, ma per milioni di anni: è il **ciclo lento**, geologico, che collega l'atmosfera alla tettonica delle placche studiata nel capitolo 14 e nel capitolo 15. L'acqua piovana, resa debolmente acida dal CO_2, altera i minerali silicatici delle rocce; i fiumi portano al mare gli ioni prodotti, e gli organismi marini li usano per costruire gusci di carbonato, che si accumulano sul fondo e diventano calcare. Per un silicato di calcio semplificato:

$$CaSiO_3(s) + 2\,CO_2(g) + H_2O(l) \rightarrow Ca^{2+}(aq) + 2\,HCO_3^-(aq) + SiO_2(s)$$

$$Ca^{2+}(aq) + 2\ HCO_3^-(aq) \rightarrow CaCO_3(s) + CO_2(g) + H_2O(l)$$

Sommando le due reazioni, una molecola di CO_2 per ogni $CaSiO_3$ esce dall'atmosfera e resta imprigionata nel calcare. Il carbonio torna in circolo quando la placca oceanica che porta i sedimenti sprofonda nella subduzione: le rocce si riscaldano, i carbonati reagiscono, e il CO_2 torna all'atmosfera con i gas vulcanici. Questo ciclo funziona come un termostato su tempi di centinaia di migliaia di anni: un clima più caldo e piovoso accelera l'alterazione delle rocce, che sottrae CO_2 all'aria e raffredda il clima; un clima più freddo la rallenta. È troppo lento, però, per compensare le emissioni attuali: i vulcani emettono circa 0,1 PgC all'anno, meno dell'1 % delle emissioni umane.

16.5.3 Il ciclo dell'azoto

L'atmosfera è composta per il 78 % da N_2, una molecola resa quasi inerte dal triplo legame. Per entrare nei viventi l'azoto deve essere **fissato**, cioè trasformato in composti reattivi come l'ammoniaca. In natura lo fanno alcuni batteri e archei dotati dell'enzima nitrogenasi, liberi nel suolo e nell'acqua o in simbiosi con le radici delle leguminose, e in piccola parte i fulmini. Dal Novecento lo fa anche l'industria con il processo Haber–Bosch (vedi *Scienze naturali 4*, cap. 3), che oggi fissa più azoto di tutta la fissazione biologica naturale delle terre emerse: circa 120 milioni di tonnellate nel 2010, il doppio (Fowler e colleghi, 2013). Nel suolo l'ammonio viene ossidato da batteri e archei a nitrito e poi a nitrato, la forma che le piante assorbono meglio: è la **nitrificazione**, che richiede ossigeno.

$$NH_4^+ + 2\ O_2 \rightarrow NO_3^- + 2\ H^+ + H_2O$$

Nei suoli e nei sedimenti poveri di ossigeno altri batteri usano il nitrato al posto dell'ossigeno per ossidare la materia organica e lo trasformano in N_2, che torna all'atmosfera: è la **denitrificazione**, che chiude il ciclo. Una parte esce come N_2O, un potente gas serra. Quando i fertilizzanti sono troppi, i nitrati non assorbiti dalle colture sono dilavati nei fiumi e nei mari, dove provocano l'eutrofizzazione (vedi *Scienze naturali 1*, cap. 15): l'Adriatico settentrionale, che riceve le acque del Po, ne è un esempio studiato da decenni.

COLLEGAMENTI

Storia, Filosofia ed Educazione civica · Il pane, la guerra, il futuro. Il chimico che rese possibile la fissazione industriale dell'azoto, Fritz Haber, diresse anche il programma tedesco dei gas nella Prima guerra mondiale (vedi *Storia 5*): la stessa ammoniaca serviva a produrre concimi ed esplosivi. Dagli anni Sessanta la «rivoluzione verde», con nuove varietà di cereali, fertilizzanti e irrigazione, fece crescere rapidamente i raccolti in Asia e in America latina (vedi *Storia 5*). I cicli biogeochimici mostrano il rovescio: l'umanità ha raddoppiato la quantità di azoto reattivo che circola sul pianeta e ha alterato il ciclo del carbonio in pochi decenni. Hans Jonas, nel *Principio responsabilità* (1979), chiede un'etica che tenga conto degli effetti cumulativi, irreversibili e planetari della tecnica (vedi *Filosofia 5*). Dal 2022 l'articolo 9 della Costituzione italiana affida alla Repubblica la tutela dell'ambiente, della biodiversità e degli ecosistemi «anche nell'interesse delle future generazioni».

16.5.4 Il ciclo del fosforo

Il fosforo, indispensabile per l'ATP, gli acidi nucleici e i fosfolipidi, **non ha una fase gassosa** significativa: il suo serbatoio sono le rocce, soprattutto i minerali dell'apatite, un fosfato di calcio. L'alterazione libera lentamente ioni fosfato nel suolo, che passano alle piante, agli animali e ai decompositori; una parte giunge al mare e si deposita nei sedimenti, che tornano in superficie solo quando la tettonica, dopo milioni di anni, li solleva. Per questo il fosforo è spesso il **fattore limitante** nelle acque dolci, e un eccesso di fosfati basta a provocare l'eutrofizzazione di un lago. I concimi fosfatici vengono da giacimenti concentrati in pochi paesi: circa due terzi delle riserve mondiali note sono in Marocco e nel Sahara Occidentale (fonte: USGS, 2025).

16.6 Il clima, i modelli e l'energia

16.6.1 Forzanti e retroazioni

Nel primo anno hai visto che il riscaldamento globale dipende dall'aumento dei gas serra. Per confrontare cause diverse i climatologi usano il **forzante radiativo**: la variazione del bilancio energetico al limite superiore dell'atmosfera, misurata in watt per metro quadrato, prodotta da un fattore che cambia, come la concentrazione di un gas, gli aerosol, l'attività solare o l'uso del suolo. Un forzante positivo fa entrare nel sistema più energia di quanta ne esca, e il sistema si scalda finché la maggiore emissione di infrarosso non ristabilisce l'equilibrio. Secondo l'IPCC (AR6, 2021) il forzante dovuto alle attività umane era nel 2019 di circa 2,7 W/m^2 rispetto al 1750, dovuto soprattutto ai gas serra e ridotto in parte dall'effetto raffreddante degli aerosol.

La risposta del clima a un forzante è amplificata o smorzata dalle retroazioni:

- **vapore acqueo** (positiva, la più forte): l'aria più calda può contenere più vapore, che è a sua volta un gas serra;

- **ghiaccio–albedo** (positiva): il ghiaccio e la neve che fondono lasciano scoperte superfici più scure, che assorbono più radiazione; è uno dei motivi per cui l'Artico si scalda molto più rapidamente della media;
- **nubi** (incerta): le nubi basse riflettono la luce solare e raffreddano, quelle alte trattengono l'infrarosso e scaldano; secondo l'IPCC l'effetto complessivo è probabilmente una retroazione positiva, ma è la principale fonte di incertezza delle proiezioni;
- **ciclo del carbonio** (positiva nel lungo periodo): un clima più caldo può ridurre l'assorbimento di CO_2 da parte dell'oceano e della vegetazione e liberare il carbonio del permafrost.

Il risultato complessivo si riassume in un numero: la **sensibilità climatica** all'equilibrio, cioè il riscaldamento medio della superficie terrestre che si raggiungerebbe, una volta stabilizzato il sistema, se la concentrazione di CO_2 raddoppiasse rispetto al livello preindustriale. L'IPCC (AR6, 2021) ne stima il valore migliore in **3 °C**, con un intervallo probabile fra 2,5 e 4 °C e un intervallo molto probabile fra 2 e 5 °C.

16.6.2 Che cos'è un modello climatico

Un **modello climatico** è un programma che risolve, su un supercalcolatore, le equazioni della fisica che governano l'atmosfera e l'oceano: la conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto, le leggi dei gas, il trasferimento della radiazione. Il pianeta è suddiviso in una griglia tridimensionale di celle, larghe tipicamente qualche decina o un centinaio di chilometri, e il calcolo procede a passi di qualche decina di minuti per secoli di tempo simulato. I processi più piccoli di una cella, come le singole nubi o la turbolenza vicino al suolo, non possono essere calcolati direttamente: si rappresentano con formule semplificate, ricavate dalle osservazioni, chiamate **parametrizzazioni**. I modelli del sistema Terra aggiungono la vegetazione, il ghiaccio, la chimica dell'atmosfera e il ciclo del carbonio.

Un modello si mette alla prova sul passato: deve riprodurre il clima osservato dal 1850, compreso il raffreddamento temporaneo dopo le grandi eruzioni, e i climi del passato geologico. Si confrontano poi molti modelli, e lo stesso modello con condizioni leggermente diverse: l'**ensemble** dà la stima migliore e il suo margine di incertezza. I futuri possibili si esplorano con gli **scenari** di emissione; l'AR6 ne usa cinque, chiamati SSP (*Shared Socio-economic Pathways*): per il 2081–2100, rispetto al 1850–1900, il riscaldamento più probabile va da circa 1,4 °C con emissioni molto basse (SSP1-1.9) a circa 2,7 °C con emissioni intermedie (SSP2-4.5) e a circa 4,4 °C con emissioni molto alte (SSP5-8.5).

16.6.3 Tempo e clima: il caos

Perché si può proiettare il clima di fine secolo se le previsioni del tempo non vanno oltre una decina di giorni? Nel 1963 il meteorologo statunitense **Edward Lorenz**, studiando un modello semplificato della convezione con tre equazioni, scoprì che due simulazioni partite da condizioni iniziali quasi identiche finivano per divergere completamente: il sistema era deterministico,

eppure imprevedibile a lungo termine. È il **caos deterministico**, reso popolare dall'immagine della farfalla che, battendo le ali in Brasile, potrebbe influire su un tornado in Texas. La previsione del **tempo**, che deve dire dove e quando pioverà, ha quindi un orizzonte di circa due settimane. Una proiezione del **clima** non riguarda un giorno preciso ma la statistica di molti giorni (medie, frequenza delle ondate di calore e delle piogge intense), che dipende dal bilancio energetico, cioè dai forzanti, e non dalle condizioni iniziali: non si prevede un singolo lancio di dado, ma si prevede con sicurezza che cosa succede alla media se si truccano le facce.

COLLEGAMENTI

Matematica e Filosofia · Determinismo e prevedibilità. Le equazioni di Lorenz sono un sistema di tre equazioni differenziali, un oggetto che studi in *Matematica 5*, cap. 12: le loro soluzioni dipendono in modo continuo dalle condizioni iniziali, ma due soluzioni vicine si allontanano in media in modo esponenziale, come 2^n dopo n intervalli di tempo. Un errore iniziale di un millesimo, raddoppiato ogni due giorni, diventa dell'ordine dell'unità in una ventina di giorni. Il caos mostra che determinismo e prevedibilità non sono la stessa cosa: un tema che in *Filosofia 5*, cap. 9, incontri a proposito del determinismo di Laplace e della fisica dei quanti.

16.6.4 Il clima del passato

I modelli si confrontano anche con gli **archivi naturali** del clima passato. I più famosi sono le carote di ghiaccio estratte in Antartide: a Vostok, dove sono stati ricostruiti i circa 420 000 anni più recenti, e nel sito europeo EPICA di Dome C, dove si arriva a circa 800 000 anni. Le bollicine d'aria intrappolate nel ghiaccio conservano campioni dell'atmosfera antica, e la composizione isotopica del ghiaccio registra la temperatura. Le due curve variano insieme: durante le glaciazioni il CO_2 scendeva intorno a 180 ppm, nei periodi interglaciali saliva a circa 280–300 ppm. I cicli glaciali sono innescati da piccole variazioni dell'orbita terrestre, ma il CO_2, liberato o assorbito dagli oceani, li amplifica. Oggi la concentrazione supera i 420 ppm, un valore che non compare negli 800 000 anni dell'archivio.

16.6.5 Le fonti di energia

Oltre l'80 % dell'energia primaria usata nel mondo viene ancora da carbone, petrolio e gas naturale, cioè dal carbonio organico sepolto nel ciclo lento in milioni di anni (vedi *Scienze naturali 4*, cap. 6). Le fonti rinnovabili sfruttano invece flussi che si rinnovano: il **solare** cattura la radiazione; l'**eolico** il vento, cioè radiazione solare trasformata in moto dell'atmosfera; l'**idroelettrico** l'acqua sollevata dal ciclo idrologico; la **geotermia**, come a Larderello (vedi *Scienze naturali 4*, cap. 16), il calore interno; le **biomasse** il carbonio fissato di recente dalla fotosintesi (vedi capitolo 11 e capitolo 13), il cui bilancio di CO_2 può essere vicino a zero se si ripiantano le colture e si contano anche l'energia e i fertilizzanti usati.

In Italia, nel 2024, le fonti rinnovabili hanno coperto circa il 41 % della domanda di energia elettrica, soprattutto con l'idroelettrico e il fotovoltaico (fonte: Terna). Il sole e il vento sono però intermittenti e richiedono accumuli e reti flessibili. La transizione energetica (obiettivi 7 e 13 dell'Agenda 2030) è insieme un problema di scienza, di tecnologia e di scelte collettive; alla **mitigazione**, che riduce le cause, si affianca l'**adattamento** agli effetti già inevitabili: la tempesta Daniel ricorda che anche una diga ben mantenuta e un allarme dato in tempo sono parte della risposta.

SINTESI

- La Terra è un sistema di sottosistemi (geosfera, atmosfera, idrosfera, criosfera, biosfera) che si scambiano energia e materia; i serbatoi cambiano quando i flussi si squilibrano; le retroazioni negative stabilizzano, quelle positive amplificano.
- Una particella d'aria che sale si espande e si raffredda adiabaticamente: di circa 9,8 °C/km se non è satura, di 4–7 °C/km se è satura, perché la condensazione libera calore latente. La base delle nubi è a circa 125 m per ogni grado di differenza fra temperatura e punto di rugiada.
- L'atmosfera è instabile quando una particella sollevata diventa più calda dell'aria circostante; l'instabilità condizionata alimenta i cumulonembi, i temporali e le supercelle.
- Il foehn è caldo e secco perché l'aria si raffredda con il gradiente saturo in salita, perdendo vapore, e si riscalda con il gradiente secco in discesa.
- Sul vento agiscono la forza del gradiente di pressione, l'effetto di Coriolis (apparente, a destra nell'emisfero boreale, nullo all'equatore) e l'attrito. In quota il vento geostrofico soffia parallelo alle isobare; al suolo le attraversa verso la bassa pressione.
- Le correnti a getto polare e subtropicale scorrono a 9–12 km di quota; le onde di Rossby guidano le perturbazioni e, quando si bloccano, prolungano ondate di calore e piogge.
- I cicloni extratropicali nascono come onde sul fronte polare e muoiono con l'occlusione (modello di Bergen); i cicloni tropicali e i medicane traggono energia dal calore latente di un mare caldo.
- Il trasporto di Ekman sposta l'acqua superficiale a 90° dal vento e provoca la risalita costiera di acque fredde e ricche di nutrienti; la circolazione termoalina (AMOC nell'Atlantico) è guidata da temperatura e salinità.
- ENSO è un'oscillazione accoppiata di oceano e atmosfera nel Pacifico equatoriale (circolazione di Walker, El Niño, La Niña), con teleconnessioni su tutto il pianeta.
- L'oceano assorbe calore e CO_2; il CO_2 disciolto ne abbassa il pH (circa −0,1 dall'epoca preindustriale) e riduce gli ioni carbonato.
- Il ciclo veloce del carbonio passa per fotosintesi, respirazione e scambi con l'oceano; quello lento per l'alterazione dei silicati, i calcari, la subduzione e i vulcani. Delle emissioni umane circa il 47 % resta nell'atmosfera.
- Il ciclo dell'azoto dipende da fissazione, nitrificazione e denitrificazione, ed è raddoppiato dal processo Haber–Bosch; il ciclo del fosforo non ha fase gassosa e passa per le rocce.
- Forzanti radiativi e retroazioni (vapore acqueo, ghiaccio–albedo, nubi) determinano la sensibilità climatica, stimata in 3 °C (probabile 2,5–4 °C); i modelli climatici risolvono le equazioni della fisica su una griglia e si verificano sul passato.
- Il tempo è caotico e prevedibile per circa due settimane; il clima, statistica del tempo, dipende dai forzanti e si proietta con gli scenari.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Una particella d'aria non satura che sale di 2 km in modo adiabatico:
   A. si scalda di circa 19,6 °C
   B. si raffredda di circa 13 °C
   C. si raffredda di circa 19,6 °C
   D. mantiene la stessa temperatura, perché non scambia calore

2. ● Il gradiente adiabatico saturo è minore di quello secco perché:
   A. la condensazione del vapore libera calore latente
   B. l'aria satura è più densa e si espande meno
   C. il vapore acqueo assorbe la radiazione solare
   D. nelle nubi la pressione resta costante

3. ● Il vento geostrofico:
   A. soffia perpendicolarmente alle isobare, dalle alte alle basse pressioni
   B. si osserva soprattutto all'equatore
   C. è frenato dall'attrito con il suolo
   D. soffia parallelo alle isobare, per l'equilibrio fra gradiente di pressione e Coriolis

4. ● Al suolo, nell'emisfero australe, l'aria intorno a un ciclone:
   A. ruota in senso antiorario e diverge dal centro
   B. ruota in senso orario e converge verso il centro
   C. ruota in senso orario e diverge dal centro
   D. non ruota, perché nell'emisfero australe Coriolis è nullo

5. ●● Nel modello della scuola di Bergen, l'occlusione si verifica quando:
   A. il fronte freddo raggiunge il fronte caldo e solleva l'aria del settore caldo
   B. il ciclone si sposta sopra un mare tropicale
   C. la corrente a getto si interrompe
   D. il fronte caldo supera il fronte freddo e scende sotto di esso

6. ●● Il trasporto di Ekman nell'emisfero boreale sposta l'acqua superficiale:
   A. nella stessa direzione del vento
   B. a 45° a sinistra del vento
   C. a 90° a destra del vento
   D. in direzione opposta al vento

7. ●● Durante un episodio di El Niño:
   A. gli alisei si rinforzano e la risalita lungo il Perù aumenta
   B. l'acqua calda si estende verso il Pacifico orientale e il termoclino si appiattisce
   C. le piogge aumentano in Indonesia e in Australia
   D. il termoclino si inclina più del normale: ancora più profondo a ovest e più vicino alla superficie a est

8. ●● Quale dei seguenti processi sottrae CO_2 all'atmosfera su tempi di milioni di anni?
   A. la respirazione dei decompositori
   B. il degassamento dei vulcani
   C. la combustione delle biomasse
   D. l'alterazione dei silicati seguita dalla deposizione di carbonati

9. ●●● La sensibilità climatica all'equilibrio, secondo l'IPCC (AR6), è:
   A. l'aumento di temperatura osservato dal 1850 a oggi, circa 1,1 °C
   B. il riscaldamento di equilibrio per un raddoppio del CO_2, con valore migliore 3 °C e intervallo probabile 2,5–4 °C
   C. il forzante radiativo dovuto al raddoppio del CO_2, circa 4 W/m²
   D. il riscaldamento previsto per il 2100 nello scenario SSP5-8.5

Vero o falso

10. ● All'equatore la deviazione di Coriolis è nulla; per questo lì non si formano cicloni tropicali.

11. ● Il foehn è caldo perché, scendendo, l'aria si avvicina al Sole.

12. ●● Il gradiente termico ambientale è sempre uguale al gradiente adiabatico secco.

13. ●● La circolazione termoalina è guidata da differenze di densità dovute a temperatura e salinità.

14. ●● Il ciclo del fosforo ha una fase gassosa importante, come quelli del carbonio e dell'azoto.

15. ●●● Nella denitrificazione alcuni batteri, in ambienti poveri di ossigeno, trasformano i nitrati in N_2 che torna all'atmosfera.

Applicare

16. ● Al suolo l'aria ha una temperatura di 24 °C e un punto di rugiada di 15 °C. A che quota sopra il suolo si troverà la base dei cumuli?

17. ●● Una particella d'aria parte da 200 m a 20,0 °C con punto di rugiada di 12,0 °C. Usa 9,8 °C/km e 6,0 °C/km per l'aria non satura e satura. Trova la quota della base della nube e la temperatura della particella a 2200 m.

18. ●●● Aria a 400 m di quota, a 18,0 °C e con punto di rugiada di 10,0 °C, supera una cresta alta 2600 m e scende in una valle a 600 m. Con 9,8 °C/km (non satura) e 6,0 °C/km (satura), calcola la temperatura sulla cresta e nella valle.

19. ●● Una radiosonda misura 20 °C al suolo e 8 °C a 2 km. Calcola il gradiente termico ambientale e stabilisci se l'aria è stabile, instabile o in instabilità condizionata, usando 9,8 °C/km e 5 °C/km.

20. ●● Nel decennio 2010–2019 le emissioni umane di carbonio sono state 10,9 PgC/anno e l'oceano ne ha assorbite 2,5 PgC/anno. Calcola la percentuale assorbita dall'oceano e quanto CO_2 (in miliardi di tonnellate) corrisponde a 2,5 PgC, sapendo che le masse molari di C e CO_2 sono 12,0 e 44,0 g/mol.

21. ●● Il pH di un campione di acqua di mare scende da 8,15 a 8,05. Di quale fattore aumenta la concentrazione di ioni H^+?

22. ●●● Bilancia e verifica (atomi e cariche) la reazione complessiva che si ottiene sommando l'alterazione di $CaSiO_3$ e la deposizione di $CaCO_3$ scritte nel paragrafo sul ciclo lento del carbonio. Quante moli di CO_2 sono sottratte all'atmosfera per ogni mole di $CaSiO_3$?

Leggere dati e figure

23. ●● Osserva la Figura 16.1. a) A quale quota la particella raggiunge il livello di condensazione e quale temperatura ha? b) Fra 0 e 2,5 km la particella è più calda o più fredda dell'ambiente? Che cosa serve per farla salire fin lì? c) Che cosa succederebbe se l'aria al suolo fosse più secca, con punto di rugiada di 12 °C?

24. ●●● Nella tabella sono riportati alcuni valori dell'indice oceanico Niño (ONI, °C; fonte: NOAA, Climate Prediction Center) per trimestri consecutivi: 2015, AMJ 1,04 · MJJ 1,19 · JJA 1,44 · JAS 1,73 · ASO 2,02 · SON 2,28 · OND 2,45 · NDJ 2,59; 2016, DJF 2,50 · JFM 2,21 · FMA 1,69 · MAM 1,11 · AMJ 0,57 · MJJ 0,09 · JJA −0,19. a) Si tratta di un episodio di El Niño o di La Niña? Giustifica con la definizione dell'indice. b) In quale trimestre è stato raggiunto il massimo? c) Quanti trimestri consecutivi, fra quelli elencati, hanno un indice ≥ +0,5 °C? d) Quali effetti ti aspetti in Indonesia e sulle coste del Perù in quei mesi?

25. ●● Osserva la Figura 16.8. a) Qual è il flusso naturale più grande da e verso l'atmosfera? b) Perché le emissioni da combustibili fossili, circa 9,4 PgC/anno, contano molto anche se sono meno di un decimo della fotosintesi? c) Di quanti PgC è aumentato il carbonio dell'oceano profondo dal 1750, e da dove viene?

26. ●●● Osserva la Figura 16.7. Descrivi le differenze fra i due pannelli per: direzione e forza degli alisei, posizione della zona delle piogge, profondità del termoclino a ovest e a est, risalita lungo il Sudamerica. Spiega poi perché il fenomeno si autoalimenta.

Indagare e argomentare

27. ●● Progetta un esperimento, con la vaschetta dell'esperienza di laboratorio, per verificare se l'acqua dolce aggiunta in superficie (come quella di fusione della Groenlandia) rallenta lo sprofondamento dell'acqua fredda. Indica la variabile indipendente, quella dipendente, le variabili da tenere costanti, la prova di controllo e una regola di sicurezza.

28. ●●● Spiega, usando il concetto di retroazione, perché l'Artico si riscalda più rapidamente della media globale, e perché il ciclo lento del carbonio funziona come un termostato del clima su tempi geologici ma non può compensare le emissioni attuali.

29. ●●● «Se le previsioni del tempo sbagliano dopo dieci giorni, le proiezioni sul clima del 2100 non possono essere attendibili.» Discuti questa affermazione, distinguendo tempo e clima e spiegando che cosa scoprì Lorenz nel 1963.

Verso l'esame

30. ●●● **Dal documento al colloquio.** Leggi il documento. «Settembre 2023. Un ciclone nato sulla Grecia attraversa lo Ionio, si rafforza sopra un mare insolitamente caldo e prende l'aspetto di un piccolo uragano, con un occhio e bande di nubi a spirale. Tocca terra in Libia; sui monti alle spalle di Derna cadono circa 200 mm di pioggia, due dighe costruite negli anni Settanta crollano nella notte e l'acqua travolge i quartieri vicini al letto del fiume.» (Testo della redazione, dai dati ECMWF.) a) Che tipo di ciclone è descritto, e da dove trae la sua energia? b) Perché il riscaldamento del Mediterraneo può rendere più intensi eventi di questo tipo? Usa il linguaggio di probabilità dell'IPCC. c) Collega il caso alla Storia e all'Educazione civica: perché una catastrofe naturale è anche il risultato di scelte umane (manutenzione delle opere, sistemi di allerta, stabilità delle istituzioni)? d) Proponi un collegamento con la Fisica: che cosa significa che l'energia del ciclone viene dal calore latente?

31. ●●● **Collegare.** Ricostruisci il percorso di un atomo di carbonio che, partendo da una molecola di CO_2 nell'aria, passa per una foglia, un animale, il mare, un guscio, un sedimento, una zona di subduzione e un vulcano, e torna nell'atmosfera. Per ogni passaggio indica il processo, il capitolo di questo volume o dei volumi precedenti in cui lo hai studiato (fotosintesi, respirazione, equilibri dei carbonati, tettonica delle placche) e il tempo indicativo che richiede.

Approfondimento

32. ●●● (Approfondimento) A 60° di latitudine due isobare che differiscono di 4 hPa distano 400 km. Calcola la velocità del vento geostrofico a una quota dove $\rho = 1{,}0\ \text{kg/m}^3$ ($\Omega = 7{,}29 \times 10^{-5}$ rad/s). Come cambierebbe la velocità se le isobare fossero distanti la metà?

PER APPROFONDIRE

- [AHR] C. D. Ahrens, R. Henson, *Meteorology Today*: i capitoli sulla stabilità atmosferica, sulle forze che muovono l'aria, sui cicloni delle medie latitudini e tropicali e sul sistema climatico.
- [IPC] IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*: il riassunto per i decisori politici (*Summary for Policymakers*) e il capitolo 5 sul ciclo del carbonio, liberamente consultabili sul sito dell'IPCC.
- [GRO] J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Understanding Earth*: i capitoli sul sistema climatico e sul ciclo del carbonio, con il legame fra tettonica e clima.

Glossario del capitolo

AMOC
Circolazione di ribaltamento meridionale atlantica: acqua calda verso nord in superficie e fredda verso sud in profondità (ingl. *Atlantic Meridional Overturning Circulation*).

Ciclogenesi
Formazione o intensificazione di un ciclone, per esempio da un'onda sul fronte polare (ingl. *cyclogenesis*).

Corrente a getto
Fascia stretta di vento occidentale molto forte, a circa 9–12 km di quota, sopra il fronte polare o al margine della cella di Hadley (ingl. *jet stream*).

Denitrificazione
Riduzione biologica dei nitrati a N_2 (e N_2O) in ambienti poveri di ossigeno, che restituisce azoto all'atmosfera (ingl. *denitrification*).

ENSO
Oscillazione accoppiata oceano–atmosfera del Pacifico equatoriale che comprende El Niño, La Niña e l'oscillazione meridionale della pressione (ingl. *El Niño–Southern Oscillation*).

Forza del gradiente di pressione
Forza che spinge l'aria dalle alte alle basse pressioni, perpendicolarmente alle isobare, tanto più intensa quanto più le isobare sono fitte (ingl. *pressure-gradient force*).

Forzante radiativo
Variazione del bilancio energetico del pianeta, in W/m^2, causata da un fattore che cambia, come la concentrazione dei gas serra o degli aerosol (ingl. *radiative forcing*).

Gradiente adiabatico saturo
Diminuzione della temperatura di una particella d'aria satura che sale, circa 4–7 °C/km, minore di quella secca per il calore latente liberato dalla condensazione (ingl. *saturated adiabatic lapse rate*).

Gradiente adiabatico secco
Diminuzione della temperatura di una particella d'aria non satura che sale, circa 9,8 °C/km; in discesa la particella si riscalda nella stessa misura (ingl. *dry adiabatic lapse rate*).

Medicane
Ciclone mediterraneo che nella fase più intensa assume caratteri simili a quelli di un ciclone tropicale, come l'occhio e il nucleo caldo (ingl. *medicane*).

Nitrificazione
Ossidazione biologica dell'ammonio a nitrito e nitrato, in presenza di ossigeno (ingl. *nitrification*).

Onde di Rossby
Grandi ondulazioni della corrente a getto polare intorno al pianeta, che guidano lo spostamento delle perturbazioni (ingl. *Rossby waves*).

Particella d'aria
Volume ideale di aria, omogeneo per temperatura e umidità, che si sposta in verticale senza mescolarsi né scambiare calore con l'aria circostante (ingl. *air parcel*).

Retroazione
Risposta di un sistema che modifica la causa che l'ha prodotta: negativa se la attenua e stabilizza il sistema, positiva se la amplifica (ingl. *feedback*).

Risalita costiera
Risalita di acqua profonda, fredda e ricca di nutrienti, lungo una costa da cui il trasporto di Ekman allontana l'acqua superficiale (ingl. *upwelling*).

Sensibilità climatica
Riscaldamento medio di equilibrio della superficie terrestre per un raddoppio della concentrazione di CO_2; secondo l'IPCC circa 3 °C, probabilmente fra 2,5 e 4 °C (ingl. *equilibrium climate sensitivity*).

Spirale di Ekman
Rotazione della direzione della corrente con la profondità, prodotta dal vento e dall'effetto di Coriolis; il trasporto medio è a 90° dal vento (ingl. *Ekman spiral*).

Stabilità atmosferica
Condizione in cui una particella d'aria spostata in verticale torna alla quota di partenza; se invece continua a muoversi l'atmosfera è instabile (ingl. *atmospheric stability*).

Vento geostrofico
Vento in quota che soffia parallelo alle isobare, quando la forza del gradiente di pressione è bilanciata dall'effetto di Coriolis (ingl. *geostrophic wind*).

Soluzioni

1. C. −9,8 °C/km × 2 km = −19,6 °C: la particella si raffredda per espansione adiabatica.

2. A. Il calore latente liberato dalla condensazione compensa in parte il lavoro di espansione.

3. D. In quota, senza attrito, la forza del gradiente di pressione e l'effetto di Coriolis si bilanciano.

4. B. Nell'emisfero australe Coriolis devia a sinistra: rotazione oraria intorno alla bassa pressione, con convergenza al suolo.

5. A. Il fronte freddo, più veloce, raggiunge quello caldo; il ciclone perde la sua fonte di aria calda e umida.

6. C. Nell'emisfero boreale il trasporto medio dello strato superficiale è a 90° a destra del vento.

7. B. Gli alisei si indeboliscono, l'acqua calda rifluisce verso est, la risalita si arresta; le piogge si spostano nel Pacifico centrale e l'Indonesia ha siccità.

8. D. È il ciclo lento: il carbonio finisce nei calcari e torna in circolo solo con la subduzione e i vulcani.

9. B. La A è il riscaldamento osservato, la C confonde temperatura e forzante, la D è una proiezione di scenario.

10. V. Senza Coriolis l'aria che converge non avvia un vortice: i cicloni tropicali si formano fra circa 5° e 20° di latitudine.

11. F. Il foehn si scalda per compressione adiabatica (9,8 °C/km in discesa) e perché ha perso vapore, e quindi calore latente, sul versante sopravento; la distanza dal Sole non cambia in modo apprezzabile.

12. F. Il gradiente ambientale si misura e varia (in media 6,5 °C/km); il gradiente adiabatico secco (9,8 °C/km) descrive una particella che si sposta in verticale.

13. V. L'acqua più fredda e più salata è più densa e sprofonda, soprattutto nei mari a nord dell'Atlantico e intorno all'Antartide.

14. F. Il fosforo non ha una fase gassosa significativa: il suo serbatoio principale sono le rocce (apatite) e i sedimenti.

15. V. I batteri denitrificanti usano il nitrato al posto dell'ossigeno per ossidare la materia organica e liberano N_2 (e in parte N_2O).

16. 125 m × (24 − 15) = 125 m × 9 = 1125 m ≈ 1,1 km sopra il suolo.

17. Livello di condensazione: 125 m × (20,0 − 12,0) = 1000 m sopra il punto di partenza, cioè a 1200 m. Temperatura a 1200 m: 20,0 − 9,8 × 1,0 = 10,2 °C. Da 1200 a 2200 m (1,0 km) satura: 10,2 − 6,0 × 1,0 = 4,2 °C.

18. Livello di condensazione: 125 m × 8,0 = 1000 m sopra la partenza, cioè a 1400 m; lì T = 18,0 − 9,8 × 1,0 = 8,2 °C. Cresta: 8,2 − 6,0 × 1,2 = 1,0 °C. Valle (discesa di 2,0 km, non satura): 1,0 + 9,8 × 2,0 = 20,6 °C, più caldo di 2,6 °C dell'aria di partenza nonostante la valle sia 200 m più in alto.

19. Gradiente ambientale: (20 − 8) °C / 2 km = 6 °C/km. È compreso fra il gradiente saturo (5 °C/km) e quello secco (9,8 °C/km): instabilità condizionata (stabile per l'aria non satura, instabile per quella satura).

20. 2,5 / 10,9 ≈ 0,23 = 23 %. Massa di CO_2: 2,5 × 44,0 / 12,0 ≈ 9,2 miliardi di tonnellate all'anno.

21. $[H^+] = 10^{-pH}$: il rapporto è $10^{8,15 - 8,05} = 10^{0,10} \approx 1,26$; la concentrazione aumenta di circa il 26 %.

22. Somma: $CaSiO_3 + 2\ CO_2 + H_2O + Ca^{2+} + 2\ HCO_3^- \rightarrow Ca^{2+} + 2\ HCO_3^- + SiO_2 + CaCO_3 + CO_2 + H_2O$; semplificando le specie che compaiono da entrambe le parti resta $CaSiO_3(s) + CO_2(g) \rightarrow CaCO_3(s) + SiO_2(s)$. Verifica: Ca 1 = 1; Si 1 = 1; C 1 = 1; O 3 + 2 = 5 = 3 + 2; cariche 0 = 0. Si sottrae 1 mol di CO_2 per mole di $CaSiO_3$.

23. a) A 1000 m, con circa 18 °C (28 − 9,8 × 1,0 ≈ 18,2 °C). b) Più fredda: da sola ricadrebbe; serve una spinta (riscaldamento del suolo, un rilievo, un fron-

te, la convergenza) che la sollevi fino al livello di libera convezione, a circa 2,5 km. c) Con $T - T_d = 16$ °C il livello di condensazione salirebbe a circa 2000 m e la particella, raffreddandosi di più lungo il tratto secco, sarebbe ancora più fredda dell'ambiente: il temporale sarebbe meno probabile o impossibile.

24. a) El Niño: l'indice resta ≥ +0,5 °C per ben più di cinque trimestri consecutivi. b) NDJ 2015 (novembre 2015–gennaio 2016), con +2,59 °C. c) Tredici: gli otto del 2015 (da AMJ a NDJ) e i primi cinque del 2016 (da DJF ad AMJ, che vale 0,57). d) In Indonesia siccità e incendi, perché la zona delle piogge si sposta verso il Pacifico centrale; in Perù mare caldo, crollo della pesca per la fine della risalita e piogge intense sulla costa.

25. a) La fotosintesi lorda delle terre emerse (113 PgC/anno, più 29 per l'effetto umano) e la respirazione con gli incendi (111,1 + 25,6), seguite dagli scambi fra oceano e atmosfera (circa 54–55 PgC/anno). b) Perché i flussi naturali sono quasi bilanciati fra loro, mentre le emissioni sono un flusso netto in una sola direzione, che si somma anno dopo anno: il serbatoio atmosferico cresce di circa 5 PgC all'anno. c) Di 173 PgC: è CO_2 di origine umana assorbito dall'oceano superficiale e trasportato in profondità dalla circolazione e dalla «pompa biologica».

26. Normali: alisei forti verso ovest; piogge sopra Indonesia e Australia; termoclino profondo a ovest e superficiale a est; risalita attiva lungo il Sudamerica. El Niño: alisei deboli; piogge spostate nel Pacifico centrale, siccità a ovest; termoclino quasi piatto; niente risalita. Si autoalimenta per la retroazione positiva di Bjerknes: alisei più deboli → acqua calda verso est → minore differenza di temperatura fra ovest ed est → circolazione di Walker e alisei ancora più deboli.

27. Traccia: variabile indipendente: presenza e quantità di acqua dolce aggiunta in superficie (0, 50, 100 mL); dipendente: tempo che l'acqua fredda colorata impiega a raggiungere il fondo, o spessore dello strato blu sul fondo dopo 5 minuti; costanti: volume e temperatura dell'acqua, dimensione e colore del cubetto, posizione, tempo di osservazione; controllo: prova senza acqua dolce; tre ripetizioni per condizione. Atteso: lo strato di acqua dolce, meno densa, «isola» la superficie e rallenta lo sprofondamento. Sicurezza: niente acqua bollente, asciugare il pavimento.

28. Traccia: Artico: la fusione di neve e ghiaccio marino scopre superfici scure (mare, tundra) che assorbono più radiazione → altro riscaldamento → altra fusione (retroazione positiva ghiaccio–albedo), a cui si aggiungono altre retroazioni locali. Ciclo lento: un clima più caldo e piovoso accelera l'alterazione dei silicati, che sottrae CO_2 e raffredda; un clima più freddo la rallenta (retroazione negativa). Ma agisce su centinaia di migliaia di anni e i flussi sono di frazioni di PgC all'anno, contro circa 11 PgC all'anno di emissioni umane.

29. Traccia: l'atmosfera è caotica (Lorenz 1963): piccole incertezze sulle condizioni iniziali crescono finché la previsione del tempo di un giorno preciso perde valore dopo circa due settimane. Il clima è la statistica del tempo (medie, frequenze di eventi) e dipende dai forzanti e dal bilancio energetico, non dalle condizioni iniziali; i modelli si verificano sul clima passato e si usano con ensemble e scenari. L'affermazione confonde quindi due problemi diversi: non si prevede il tempo del 3 luglio 2100, si proietta la sua statistica.

30. Traccia: a) un medicane, ciclone di origine extratropicale che nella fase matura assume caratteri tropicali (occhio, nucleo caldo); energia dal calore latente del vapore evaporato da un mare caldo che condensa nelle nubi. b) Un mare più caldo fornisce più vapore e più energia; l'aria più calda contiene più vapore (circa il 7 % in più per grado), per cui le piogge estreme si intensificano; l'IPCC giudica molto probabile che le piogge intense aumentino con il riscaldamento; per il singolo evento si usano gli studi di attribuzione. c) Storia ed Educazione civica: la vulnerabilità e l'esposizione (rischio = pericolosità × vulnerabilità × esposizione, vedi *Scienze naturali 4*, cap. 16), la manutenzione delle infrastrutture, i sistemi di allerta e la protezione civile, l'instabilità politica della Libia; l'art. 9 della Costituzione e l'obiettivo 13 dell'Agenda 2030. d) Fisica: ca-

lore latente di vaporizzazione (circa $2{,}5 \times 10^6$ J/kg), primo principio, trasformazione del calore in lavoro e in energia cinetica del vento.

31. Traccia: CO_2 → fotosintesi, ciclo di Calvin (capitolo 11, ore) → respirazione cellulare di un animale che mangia la foglia (capitolo 9, giorni) → CO_2 nell'aria e scambio con l'oceano (anni) → equilibri dei carbonati (*Scienze naturali 4*, cap. 3–4) e guscio di $CaCO_3$ di un organismo marino → sedimento e calcare (migliaia–milioni di anni) → subduzione (capitolo 15) e decarbonatazione → degassamento vulcanico (milioni di anni). Collegamenti attesi: ciclo veloce e ciclo lento, differenza fra i tempi di residenza, perché le emissioni fossili spostano in decenni carbonio accumulato in milioni di anni.

32. $f = 2 \times 7{,}29 \times 10^{-5} \times \sin 60° \approx 1{,}26 \times 10^{-4}\ s^{-1}$; v_g = 400 Pa / $(1{,}0 \times 1{,}26 \times 10^{-4} \times 4{,}0 \times 10^5$ m) ≈ 7,9 m/s (circa 29 km/h). Con le isobare a metà distanza la velocità raddoppia, circa 16 m/s.