CAPITOLO

13

L'atmosfera

Viviamo sul fondo di un oceano d'aria: non lo vediamo, ma ogni metro quadrato del nostro corpo ne sostiene circa dieci tonnellate.

OBIETTIVI

1. Descrivere l'origine dell'atmosfera e la composizione dell'aria secca, con i valori attuali.
2. Riconoscere gli strati dell'atmosfera in base all'andamento della temperatura e spiegare perché la pressione diminuisce con la quota.
3. Illustrare il bilancio energetico della Terra, distinguendo l'effetto serra naturale dal buco dell'ozono.
4. Spiegare i fattori che controllano la temperatura dell'aria e leggere isoterme e isobare.
5. Spiegare l'origine dei venti, l'effetto di Coriolis, i venti locali e i venti dominanti a scala planetaria.
6. Riconoscere i principali inquinanti atmosferici, le loro fonti e i loro effetti.

INDICE DEL CAPITOLO

13.1 Origine e composizione dell'atmosfera 2
13.2 La struttura verticale dell'atmosfera 5
13.3 Il bilancio energetico e l'effetto serra 9
13.4 Temperatura e pressione dell'aria 13
13.5 I venti 16
13.6 L'inquinamento atmosferico 23

Scienze naturali 1 · Parte III · Aria, acqua e rilievo · versione 1.0
Capitolo 13: L'atmosfera · pagine 329–358 del volume completo · estratto per lo studio

Alza gli occhi: sopra di te c'è un cielo azzurro, forse qualche nuvola. Quello che non vedi è l'aria stessa, un miscuglio di gas trasparente e inodore che avvolge tutto il pianeta. Eppure senza l'aria non potresti respirare, non sentiresti alcun suono, non esisterebbero né la pioggia né il vento, e la temperatura media della Terra sarebbe ben al di sotto dello zero. L'involucro gassoso che circonda la Terra si chiama **atmosfera**, dal greco *atmós*, «vapore», e *sphâira*, «sfera».

L'atmosfera è sottilissima rispetto alle dimensioni del pianeta: metà della sua massa si trova sotto i 5,5 km di quota e il 99 % entro poco più di 30 km. Se la Terra fosse una mela, l'atmosfera sarebbe più sottile della buccia. In questo capitolo vedremo di che cosa è fatta, come è organizzata in strati, come riceve e restituisce l'energia del Sole, e perché la sua temperatura e la sua pressione cambiano da un luogo all'altro mettendo in moto i venti. Nel Capitolo 14 useremo queste basi per capire il tempo meteorologico e il clima.

13.1 Origine e composizione dell'atmosfera

13.1.1 Un'atmosfera che è cambiata nel tempo

L'aria che respiriamo non è sempre stata così. La Terra si è formata circa 4,5 miliardi di anni fa; l'eventuale involucro iniziale di idrogeno ed elio, gas leggerissimi, andò perduto molto presto. L'atmosfera che seguì fu prodotta dal pianeta stesso: attraverso i vulcani l'interno della Terra liberava gas (soprattutto vapore acqueo, diossido di carbonio e azoto, con quantità minori di composti dello zolfo). Questo processo si chiama **degassamento**.

Quella atmosfera primitiva era quasi priva di ossigeno. Raffreddandosi, il pianeta permise al vapore acqueo di condensare: piogge durate milioni di anni riempirono i bacini oceanici. Gran parte del diossido di carbonio si sciolse poi nell'acqua e finì intrappolata nelle rocce, per esempio nei calcari. L'azoto, poco reattivo, si accumulò lentamente fino a diventare il gas più abbondante.

L'ossigeno è un regalo della vita. I primi organismi capaci di *fotosintesi* (batteri simili agli attuali cianobatteri) usavano la luce del Sole per produrre sostanze organiche a partire da acqua e diossido di carbonio, liberando ossigeno come prodotto di scarto. Per centinaia di milioni di anni quell'ossigeno fu consumato da reazioni con il ferro sciolto negli oceani e con le rocce; solo intorno a 2,4 miliardi di anni fa cominciò ad accumularsi nell'aria. Dall'ossigeno si formò poi, in alta quota, lo strato di ozono che oggi ci protegge dai raggi ultravioletti (§ 13.2 e § 13.3): solo sotto questo schermo, molto più tardi (meno di 500 milioni di anni fa), la vita poté colonizzare stabilmente le terre emerse. La fotosintesi e la respirazione, che studierai in biologia, continuano ancora oggi a scambiare ossigeno e diossido di carbonio con l'atmosfera.

13.1.2 La composizione dell'aria secca

L'aria è un *miscuglio omogeneo* di gas, cioè una soluzione gassosa (Capitolo 3). Poiché la quantità di vapore acqueo cambia molto da un luogo all'altro e da un'ora all'altra, conviene descrivere prima l'**aria secca**, cioè l'aria privata del vapore. Nei primi 80 km circa la sua composizione è praticamente la stessa ovunque, perché i moti dell'aria la rimescolano continuamente (Tabella 13.1 e Figura 13.1).

Tabella 13.1 Composizione dell'aria secca vicino al suolo, in percentuale in volume (valori arrotondati; per il CO_2 e il metano, media mondiale 2023).

Gas	Formula	% in volume	Note
Azoto	N_2	78,08	poco reattivo; circola fra aria, suolo e viventi
Ossigeno	O_2	20,95	prodotto dalla fotosintesi; necessario alla respirazione e alle combustioni
Argo	Ar	0,93	gas nobile, chimicamente inerte
Diossido di carbonio	CO_2	≈ 0,04	≈ 420 ppm e in aumento; gas serra
Neon, elio, metano, kripton, idrogeno…		< 0,003	gas in tracce; il metano è un gas serra

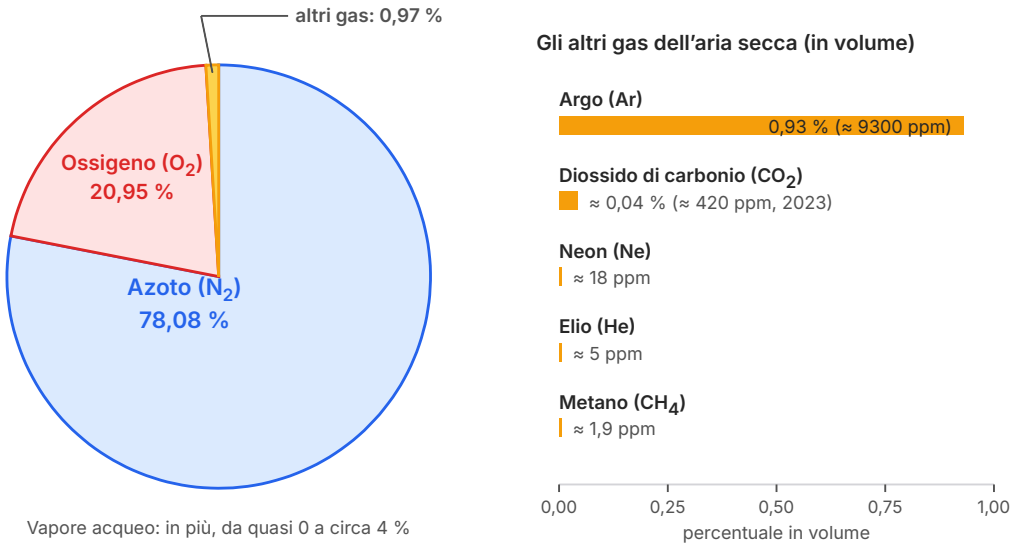


Figura 13.1 Composizione dell'aria secca vicino al suolo, in percentuale in volume. A sinistra i tre settori sono proporzionali ai valori reali: l'argo, il diossido di carbonio e gli altri gas insieme occupano meno dell'1 %. A destra lo stesso «1 %» è ingrandito: anche su questa scala il diossido di carbonio (≈ 420 ppm, media mondiale 2023) è una barra sottile, e neon, elio e metano sono quasi invisibili. Il vapore acqueo, molto variabile, non è compreso nell'aria secca.

Il diossido di carbonio è presente in quantità così piccole che si preferisce esprimerlo in **parti per milione** (ppm) in volume: 420 ppm significa che in un milione di litri d'aria ci sono 420 litri di CO_2, cioè lo 0,042 %. Prima della rivoluzione industriale il valore era di circa 280 ppm; l'aumento è dovuto soprattutto alla combustione di carbone, petrolio e gas naturale e alla deforestazione. Ne parleremo a proposito dell'effetto serra e, nel Capitolo 14, dei cambiamenti climatici.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> **«L'aria è ossigeno.»** No: l'ossigeno è soltanto un quinto dell'aria, mentre quasi quattro quinti sono azoto. E il diossido di carbonio non è lo «0,03 %» che si legge ancora in qualche vecchio libro: quel valore corrisponde agli anni Sessanta. Oggi è circa lo 0,04 %, cioè circa 420 ppm, e cresce di circa 2–3 ppm all'anno.

13.1.3 Vapore acqueo e aerosol

Oltre ai gas della tabella, l'aria contiene due componenti variabili ma importantissimi. Il primo è il **vapore acqueo**: nei deserti e nell'aria gelida delle regioni polari è quasi assente, mentre nell'aria calda e umida delle foreste equatoriali può raggiungere circa il 4 % in volume. Il vapo-

re è invisibile; quando condensa forma le goccioline di nubi e nebbie (Capitolo 14). Il secondo è l'**aerosol** atmosferico, cioè l'insieme di particelle solide e liquide sospese nell'aria, il *pulviscolo*: sabbia sollevata dal vento, sale marino, ceneri vulcaniche, pollini, fumo e particelle prodotte dalle attività umane. Molte di queste particelle sono così piccole da restare in sospensione per giorni; su di esse condensa il vapore, e senza di esse si formerebbero pochissime nubi.

13.2 La struttura verticale dell'atmosfera

13.2.1 Gli strati definiti dalla temperatura

Salendo di quota la temperatura dell'aria non cambia sempre nello stesso modo: in alcuni tratti diminuisce, in altri aumenta. Proprio l'andamento della temperatura permette di dividere l'atmosfera in strati sovrapposti, separati da superfici di passaggio chiamate «pause» (Figura 13.2). Per confrontare le misure, i meteorologi usano un modello di riferimento, l'**atmosfera standard** internazionale (ISA), che descrive le condizioni medie alle medie latitudini: al livello del mare 15 °C e 1013,25 hPa.

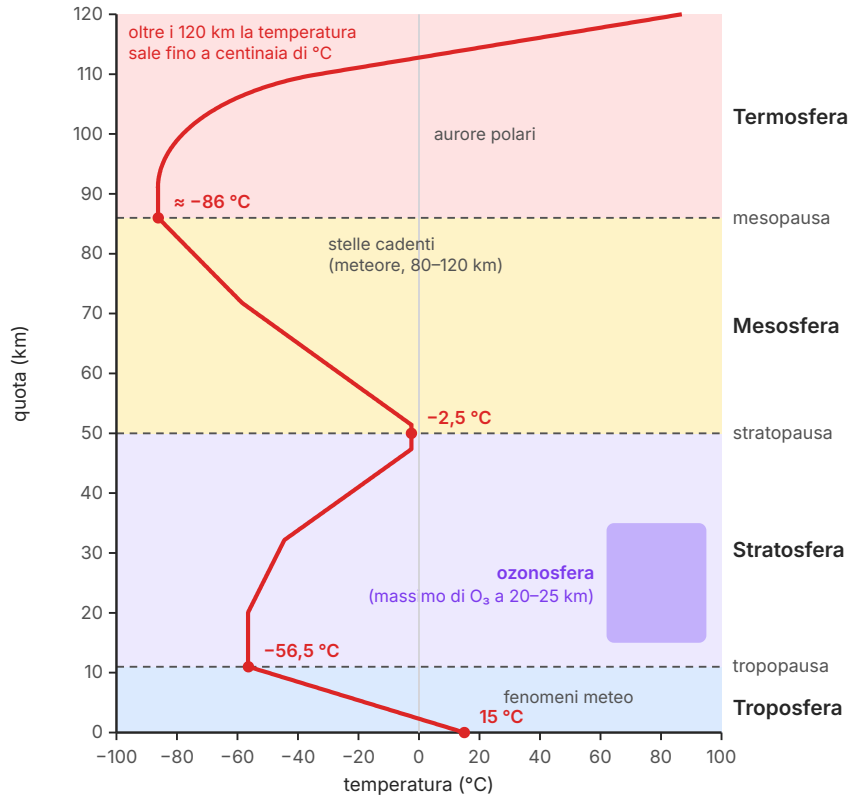


Figura 13.2 Andamento della temperatura con la quota secondo l'atmosfera standard (ISA, alle medie latitudini), calcolato fino a 86 km dai gradienti del modello e prolungato fino a 120 km con l'atmosfera standard degli Stati Uniti (1976). Le quote delle «pause» cambiano con la latitudine e la stagione: la tropopausa, per esempio, è a circa 8 km sopra i poli e a 16–18 km sopra l'equatore.

La **troposfera** è lo strato più basso, a contatto con la superficie. Il suo spessore varia con la latitudine e con la stagione: circa 8 km sopra i poli, 11–12 km alle nostre latitudini, 16–18 km sopra l'equatore. Pur essendo così sottile contiene circa tre quarti della massa dell'atmosfera e quasi tutto il vapore acqueo; per questo vi avvengono quasi tutti i fenomeni meteorologici: nubi, piogge, temporali, venti. Nella troposfera la temperatura diminuisce con la quota in media di 6,5 °C ogni chilometro: questo valore si chiama **gradiente termico verticale**. L'aria, infatti, è riscaldata soprattutto dal basso, dal suolo che ha assorbito la radiazione solare, e salendo si allontana da questa «stufa». In più, la pressione diminuisce e l'aria che sale si espande, raffreddandosi. Il limite superiore della troposfera è la **tropopausa**, dove la temperatura alle medie latitudini è di circa −56 °C.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto fa freddo in vetta? A Courmayeur (circa 1200 m) il termometro segna 20 °C. Usando il gradiente medio di 6,5 °C/km, stima la temperatura sulla vetta del Monte Bianco, a circa 4800 m.

Soluzione. Dislivello: 4800 m − 1200 m = 3600 m = 3,6 km. Diminuzione di temperatura: 6,5 °C/km × 3,6 km = 23,4 °C. Temperatura in vetta: 20 °C − 23,4 °C ≈ −3 °C. È una stima: il gradiente reale cambia da giorno a giorno e con l'umidità dell'aria.

Sopra la tropopausa si trova la **stratosfera**, che arriva fino a circa 50 km. Nella parte bassa la temperatura resta quasi costante, poi aumenta fino a valori vicini a 0 °C alla *stratopausa*. Il riscaldamento è dovuto all'**ozono** (O_3), una molecola formata da tre atomi di ossigeno, che assorbe la radiazione ultravioletta del Sole. L'ozono è concentrato fra circa 15 e 35 km, con un massimo intorno ai 20–25 km: è l'**ozonosfera**. Anche nello strato più ricco l'ozono è in quantità minime, pochi milionesimi delle molecole presenti, ma basta a filtrare la gran parte degli ultravioletti più pericolosi per i viventi. Nella stratosfera l'aria è secca e molto stabile: gli aerei di linea volano spesso alla base della stratosfera, sopra le nubi e le turbolenze.

Fra 50 e circa 85 km si estende la **mesosfera**, dove la temperatura torna a diminuire fino a −80/−90 °C alla *mesopausa*, il luogo più freddo dell'atmosfera. Qui l'aria è ormai rarefatta, ma abbastanza densa da frenare i piccoli frammenti di roccia provenienti dallo spazio: l'attrito li porta all'incandescenza e li vaporizza, producendo le *stelle cadenti* (meteore, Capitolo 9).

Oltre la mesopausa inizia la **termosfera**. Le pochissime molecole presenti assorbono la radiazione solare più energetica (ultravioletti estremi e raggi X) e raggiungono temperature di centinaia di gradi, oltre 1000 °C quando il Sole è molto attivo. Eppure un termometro non «sentirebbe» caldo: le molecole sono così rade che cedono pochissima energia a un oggetto. Nella termosfera la Stazione Spaziale Internazionale orbita a circa 400 km di quota. La radiazione solare strappa elettroni ad atomi e molecole, trasformandoli in ioni: la parte di atmosfera ricca di particelle cariche, fra circa 60 e 1000 km, si chiama **ionosfera**. Essa riflette alcune onde radio, permettendo collegamenti a grande distanza, e qui, fra 100 e 300 km circa, si accendono le *aurore polari* (Capitolo 9). Per convenzione lo spazio comincia a 100 km (linea di Kármán).

Lo strato più esterno è l'**esosfera**, che inizia fra circa 500 e 1000 km di quota: gli atomi, soprattutto di idrogeno ed elio, sono così radi che possono sfuggire nello spazio. L'atmosfera non ha quindi un limite netto: sfuma gradualmente nel vuoto interplanetario.

IN SINTESI

Gli strati dell'atmosfera (alle medie latitudini)

Troposfera 0–11 km: T diminuisce di ≈ 6,5 °C/km; meteo. · Stratosfera 11–50 km: T costante, poi in aumento; ozono. · Mesosfera 50–85 km: T diminuisce fino a ≈ −86 °C; meteore. · Termosfera oltre 85 km: T in forte aumento; ionosfera, aurore. · Esosfera oltre 500–1000 km: passaggio allo spazio.

13.2.2 La pressione diminuisce con la quota

L'aria ha una massa e quindi un peso: ogni strato preme su quelli sottostanti. La **pressione atmosferica** in un punto è la forza che il peso della colonna d'aria sovrastante esercita su ogni unità di superficie (la pressione è stata definita nel Capitolo 2: $p = F/A$, in pascal). Al livello del mare vale in media 101 325 Pa, cioè 1013,25 hPa, ossia 1 atm. Che cosa significa concretamente? Un pascal è un newton su un metro quadrato; 101 325 N su un metro quadrato è il peso di circa 10 300 kg: sopra ogni metro quadrato del suolo grava una colonna d'aria di oltre dieci tonnellate. Non ce ne accorgiamo perché la pressione agisce in tutte le direzioni e i fluidi del nostro corpo spingono verso l'esterno con la stessa pressione.

Salendo, la colonna d'aria sovrastante si accorcia e la pressione diminuisce. Ma non lo fa in modo lineare, perché l'aria è comprimibile: gli strati bassi sono schiacciati dal peso di quelli superiori e sono più densi. Il risultato è una diminuzione all'incirca *esponenziale*: la pressione si dimezza ogni 5,5 km circa (Figura 13.3). A 5,5 km è circa metà di quella al livello del mare, a 11 km circa un quarto, a 16 km circa un decimo. Anche la densità dell'aria diminuisce: in cima all'Everest (8849 m) ogni respiro porta ai polmoni circa un terzo dell'ossigeno che si inspira al livello del mare, e la maggior parte degli alpinisti usa bombole d'ossigeno.

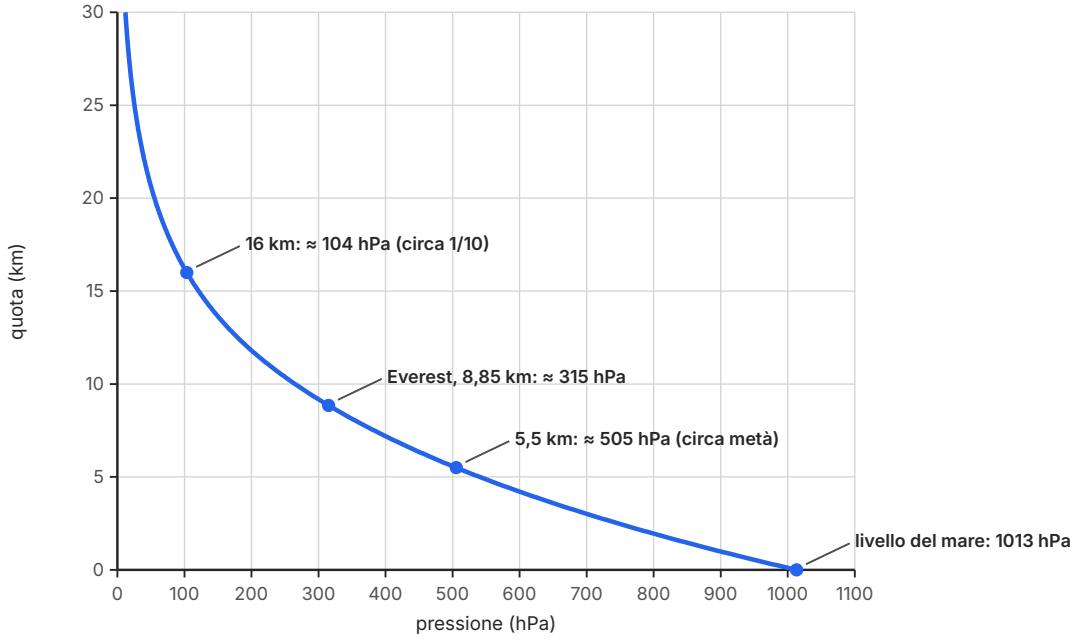


Figura 13.3 Pressione atmosferica in funzione della quota, calcolata con il modello dell'atmosfera standard (ISA). La curva non è una retta: la pressione diminuisce rapidamente vicino al suolo e sempre più lentamente in alto, dimezzandosi ogni 5,5 km circa.

ERRORE FREQUENTE

La pressione non cala «di tot ettopascal ogni chilometro». Vicino al suolo diminuisce di circa 12 hPa ogni 100 m, ma questo vale solo nei primi chilometri. Se la diminuzione continuasse con quel ritmo, l'atmosfera finirebbe a circa 8 km di quota. In realtà la pressione diminuisce sempre più lentamente, perché l'aria in alto è sempre più rarefatta: dimezza ogni 5,5 km circa, come mostra la curva della Figura 13.3.

13.3 Il bilancio energetico e l'effetto serra

13.3.1 L'energia che arriva dal Sole

Quasi tutta l'energia che muove l'atmosfera viene dal Sole sotto forma di radiazione elettromagnetica: luce visibile, una parte di ultravioletti e di infrarossi. Le regioni equatoriali, dove i raggi arrivano quasi perpendicolari, ne ricevono molta più delle regioni polari.

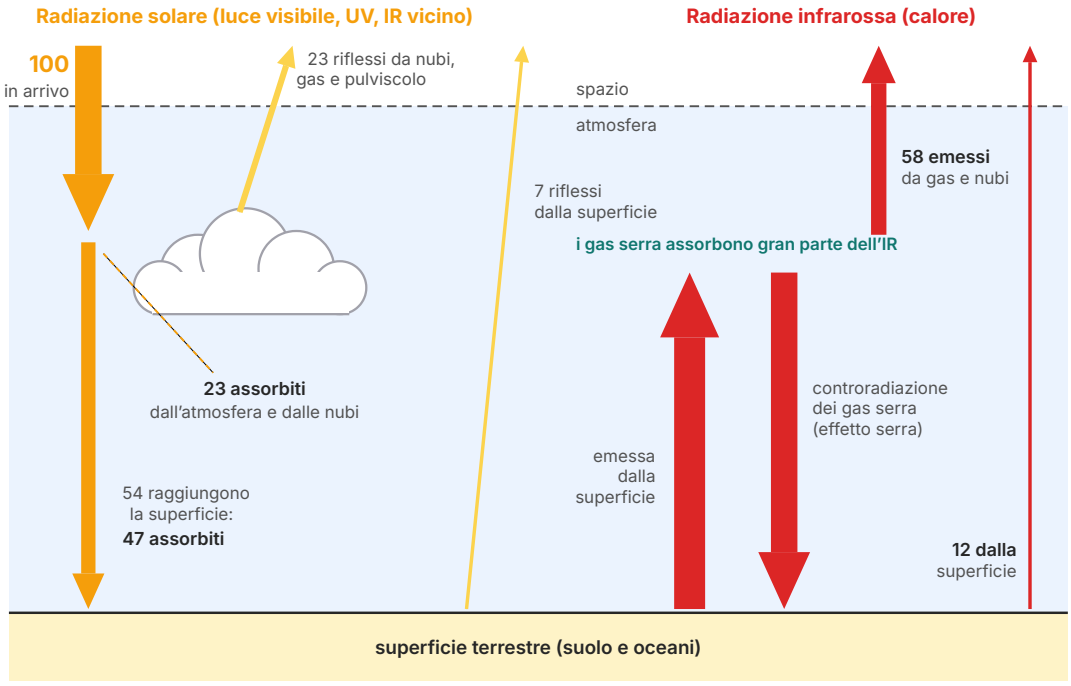
Non tutta questa energia viene assorbita. Una parte è riflessa nello spazio dalle nubi, dalle molecole dell'aria, dal pulviscolo e dalla superficie (soprattutto da neve e ghiacci). La frazione

di radiazione riflessa da una superficie si chiama **albedo**: per la Terra nel suo insieme vale circa 0,30, cioè il 30 %. L'albedo cambia molto da una superficie all'altra: la neve fresca riflette fino all'80–90 % della luce, l'oceano meno del 10 %, una foresta circa il 10–15 %.

Facciamo il conto in «unità»: se 100 unità rappresentano la radiazione solare media in arrivo, circa 30 sono riflesse (23 da nubi, gas e pulviscolo, 7 dalla superficie), 23 sono assorbite dall'atmosfera e dalle nubi (in particolare dal vapore acqueo e, negli ultravioletti, dall'ozono) e circa 47 sono assorbite dalla superficie terrestre, che si riscalda (Figura 13.4).

13.3.2 La Terra irraggia nell'infrarosso

Ogni corpo emette radiazione in quantità tanto maggiore quanto più è caldo. Il Sole, con la sua superficie a circa 5800 K, emette soprattutto luce visibile; la Terra, molto più fredda, emette radiazione **infrarossa**, invisibile ai nostri occhi ma percepibile come calore (è la stessa radiazione che senti avvicinando la mano a un termosifone). Su tempi lunghi la Terra deve restituire allo spazio tanta energia quanta ne assorbe: se ne assorbisse di più si scalderebbe, se ne emettesse di più si raffredderebbe. Questo equilibrio fra energia assorbita ed energia emessa è il **bilancio energetico** (o radiativo) della Terra. Nello schema della Figura 13.4: 100 unità in arrivo = 30 riflesse + 70 emesse nello spazio come infrarosso.



In alto: 100 in arrivo = 30 riflessi (23 + 7) + 70 emessi come infrarosso (58 + 12)

(valori in unità: 100 = media della radiazione solare in arrivo, ≈ 340 W/m²)

Figura 13.4 Il bilancio energetico medio della Terra, in unità: 100 unità corrispondono alla radiazione solare media in arrivo, ≈ 340 W/m² (valori arrotondati, da stime della NASA). Le frecce gialle e arancioni indicano la radiazione solare, quelle rosse la radiazione infrarossa; lo spessore è proporzionale al valore. La superficie emette circa 117 unità di infrarosso e ne riceve circa 100 dall'atmosfera: entrambi i valori superano le 47 unità che assorbe dal Sole, ed è la controradiazione dei gas serra a renderlo possibile. Non sono disegnati gli scambi di calore fra superficie e aria dovuti alla convezione e all'evaporazione dell'acqua.

13.3.3 L'effetto serra naturale

Qui entra in gioco una proprietà decisiva dell'atmosfera. I suoi gas principali, azoto e ossigeno, sono trasparenti sia alla luce solare sia all'infrarosso. Alcuni gas presenti in piccole quantità, invece, lasciano passare quasi tutta la luce visibile ma *assorbono* gran parte dell'infrarosso emesso dal suolo: sono i **gas serra**. I principali sono il vapore acqueo (il più importante), il diossido di carbonio, il metano, il protossido di azoto (N_2O) e l'ozono; a questi si aggiungono gas artificiali come i CFC. Dopo aver assorbito l'infrarosso, i gas serra lo riemettono in tutte le direzioni: una parte torna verso il suolo (la *controradiazione*), che riceve così energia sia dal Sole sia dall'atmosfera e si mantiene più caldo. Solo una piccola parte dell'infrarosso emesso dalla superficie sfugge direttamente nello spazio, attraverso una «finestra» di lunghezze d'onda che i gas serra non assorbono.

Questo fenomeno è l'**effetto serra**. Il nome viene dal confronto con le serre degli orti, che lasciano entrare la luce e trattengono il calore (anche se in una serra conta soprattutto il fatto che il vetro impedisce all'aria calda di disperdersi). Senza effetto serra, con la stessa albedo, la temperatura media della superficie terrestre sarebbe di circa −18 °C; grazie all'effetto serra è invece di circa 15 °C. L'effetto serra naturale non è quindi un male: è una delle condizioni che rendono la Terra abitabile. Il confronto con i pianeti vicini è istruttivo: su Venere un'atmosfera densissima di CO_2 produce un effetto serra enorme e una superficie a circa 460 °C; su Marte l'atmosfera sottilissima ne produce pochissimo (Capitolo 9).

Il problema nasce quando le attività umane aumentano la concentrazione dei gas serra: il diossido di carbonio è passato da circa 280 ppm a circa 420 ppm, il metano è più che raddoppiato. Una parte maggiore dell'infrarosso viene trattenuta e il bilancio si sposta verso il riscaldamento: è l'*effetto serra antropico*, causa del riscaldamento globale che studierai nel Capitolo 14.

APPROFONDIMENTO · QUANTA ENERGIA ARRIVA DAL SOLE

Quasi tutta l'energia che muove l'atmosfera viene dal Sole sotto forma di radiazione elettromagnetica: luce visibile, una parte di ultravioletti e di infrarossi. Fuori dall'atmosfera, su una superficie di un metro quadrato perpendicolare ai raggi solari, arrivano in media circa 1361 W (watt, cioè joule al secondo): questo valore è la **costante solare**. La Terra, però, intercetta i raggi con un disco di area πR^2, mentre la sua superficie totale è $4\pi R^2$, quattro volte più grande; inoltre metà del pianeta è sempre al buio. In media, quindi, ogni metro quadrato del limite superiore dell'atmosfera riceve circa 1361/4 ≈ 340 W.

Da dove viene il −18 °C? Una legge della fisica (la legge di Stefan-Boltzmann) lega la potenza irraggiata da un corpo alla quarta potenza della sua temperatura assoluta. Se la Terra assorbe (1 − 0,30) × 340 W/m² ≈ 238 W/m² e deve irraggiarne altrettanti, la legge dà una temperatura di circa 255 K, cioè circa −18 °C. La differenza di circa 33 °C fra questo valore e la temperatura media reale, 15 °C, misura l'effetto serra naturale. Studierai la legge al quinto anno; per ora conta il ragionamento: energia in arrivo = energia in uscita.

13.3.4 Il buco dell'ozono

Nel 1985 un gruppo di ricercatori del British Antarctic Survey pubblicò un risultato inatteso: ogni primavera australe (settembre–ottobre) l'ozono della stratosfera sopra l'Antartide si riduceva drasticamente, fino a perdere più della metà del suo valore normale. Era il **buco dell'ozono**. I responsabili erano già stati indicati dai chimici Mario Molina e Sherwood Rowland nel 1974: i **clorofluorocarburi** (CFC), gas allora usati nei frigoriferi, nei condizionatori e nelle bombolette spray. I CFC sono molto stabili; arrivati nella stratosfera, la radiazione ultravioletta li spezza e libera atomi di cloro, ognuno dei quali può distruggere migliaia di molecole di ozono. Sopra l'Antartide il freddo intensissimo dell'inverno polare favorisce la formazione di nubi stratosferiche che accelerano queste reazioni al ritorno della luce in primavera.

La risposta internazionale fu rapida. Il **Protocollo di Montréal**, firmato nel 1987, ha ridotto e poi vietato la produzione dei CFC e di altre sostanze che danneggiano l'ozono; è uno dei pochissimi trattati internazionali ratificati da tutti i Paesi del mondo. Nel 1995 Paul Crutzen, Mario Molina e Sherwood Rowland ricevettero il premio Nobel per la chimica per i loro studi sull'ozono. Poiché i CFC restano nell'atmosfera per decenni, il recupero è lento: secondo la valutazione scientifica dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale e del Programma ambientale dell'ONU del 2022, l'ozono sopra l'Antartide dovrebbe tornare ai livelli del 1980 intorno al 2066.

ERRORE FREQUENTE

Buco dell'ozono ed effetto serra sono due problemi diversi. Il buco dell'ozono riguarda la *stratosfera* e la radiazione *ultravioletta*: più ultravioletti al suolo significano più danni alla pelle, agli occhi e alle piante. L'effetto serra riguarda soprattutto la *troposfera* e la radiazione *infrarossa*: più gas serra significano temperature più alte. Il buco dell'ozono non è un «buco» da cui esce il calore, e il riscaldamento globale non è causato dal buco dell'ozono. I due problemi hanno qualche legame (i CFC sono anche potenti gas serra), ma cause, meccanismi e rimedi sono diversi.

13.4 Temperatura e pressione dell'aria

13.4.1 Misurare la temperatura dell'aria

La temperatura dell'aria si misura con termometri posti all'ombra, in un ambiente ventilato, a un'altezza fra 1,25 e 2 m dal suolo, di solito sopra un prato. Le stazioni tradizionali usano una **capannina meteorologica**: una cassetta bianca con pareti a persiana, che riflette la luce del Sole e lascia circolare l'aria. Un termometro al sole, infatti, misurerebbe la propria temperatura riscaldata dai raggi, non quella dell'aria. Oggi le stazioni automatiche usano sensori elettronici in schermi simili e registrano i dati ogni pochi minuti.

Dalle misure si ricavano alcune grandezze importanti. La *temperatura media giornaliera* si calcola, nel modo più semplice, come media fra la temperatura massima e la minima del giorno. La differenza fra massima e minima è l'**escursione termica** diurna. La differenza fra la temperatura media del mese più caldo e quella del mese più freddo è l'escursione termica annua.

13.4.2 I fattori che influenzano la temperatura

Perché in una stessa giornata a Palermo ci sono 18 °C e a Bolzano 2 °C? La temperatura dell'aria dipende da diversi fattori.

- **Latitudine.** Più ci si allontana dall'equatore, più i raggi del Sole arrivano inclinati e l'energia si distribuisce su una superficie maggiore (Capitolo 10). In media la temperatura diminuisce dall'equatore verso i poli.

- **Altitudine.** Nella troposfera la temperatura diminuisce in media di 6,5 °C ogni 1000 m. Una località di montagna è più fredda di una di pianura alla stessa latitudine, anche se è (di pochissimo) più vicina al Sole.
- **Distanza dal mare.** L'acqua ha un calore specifico molto alto (Capitolo 2): si riscalda e si raffredda lentamente. Per questo il mare mitiga il clima delle coste: estati meno calde, inverni meno freddi, escursioni termiche piccole. All'interno dei continenti, lontano dal mare, le escursioni sono grandi: è la *continentalità*.
- **Esposizione.** In montagna, nell'emisfero boreale, i versanti rivolti a sud (detti *a solatìo*) ricevono i raggi del Sole meno inclinati e più a lungo dei versanti rivolti a nord (*a bacìo*): sono più caldi, e per questo vi si trovano i vigneti e i paesi.
- **Copertura del suolo e nuvolosità.** Le nubi riducono il riscaldamento di giorno e il raffreddamento di notte; le città, con asfalto e cemento, sono più calde delle campagne circostanti (*isola di calore urbana*).

Per rappresentare la distribuzione della temperatura su una carta si usano le **isoterme**, linee che uniscono i punti con la stessa temperatura (spesso riportata al livello del mare, per eliminare l'effetto dell'altitudine). Le isoterme sono all'incirca parallele all'equatore, ma si piegano dove ci sono continenti, oceani, correnti marine e catene montuose.

13.4.3 L'inversione termica

Di solito la temperatura diminuisce con la quota, ma non sempre. Nelle notti serene e senza vento d'inverno il suolo irraggia molta energia verso lo spazio e si raffredda; l'aria a contatto con esso diventa più fredda di quella sovrastante. L'aria fredda, più densa, scivola lungo i pendii e ristagna nei fondovalle e nelle pianure. Si crea così uno strato in cui la temperatura *aumenta* con la quota: è un'**inversione termica**. Chi sale in collina in una mattina di gennaio può passare dalla nebbia gelida della pianura al sole tiepido sopra di essa. L'inversione blocca i moti verticali dell'aria come un coperchio: nebbia, fumi e gas di scarico restano intrappolati negli strati bassi. È uno dei motivi per cui d'inverno la Pianura Padana, chiusa fra Alpi e Appennini e spesso senza vento, ha un'aria tra le più inquinate d'Europa (§ 13.6).

13.4.4 Misurare la pressione: l'esperimento di Torricelli

Che l'aria avesse un peso era stato sostenuto già nell'antichità, ma la prima misura della pressione atmosferica si deve a Evangelista Torricelli, allievo di Galileo, nel 1643. Torricelli riempì di mercurio un tubo di vetro lungo circa un metro, chiuso a un'estremità; tappata l'apertura con un dito, lo capovolse in una bacinella anch'essa piena di mercurio e tolse il dito. Il mercurio non uscì tutto: scese nel tubo fino a fermarsi a un'altezza di circa 76 cm (760 mm) sopra la superficie del mercurio nella bacinella, lasciando in alto uno spazio vuoto (Figura 13.5A). La spiegazione di Torricelli fu che la colonna di mercurio è sostenuta dalla pressione che l'aria esercita

sulla superficie libera della bacinella: il peso della colonna di mercurio equilibra il peso di una colonna d'aria alta quanto l'intera atmosfera.

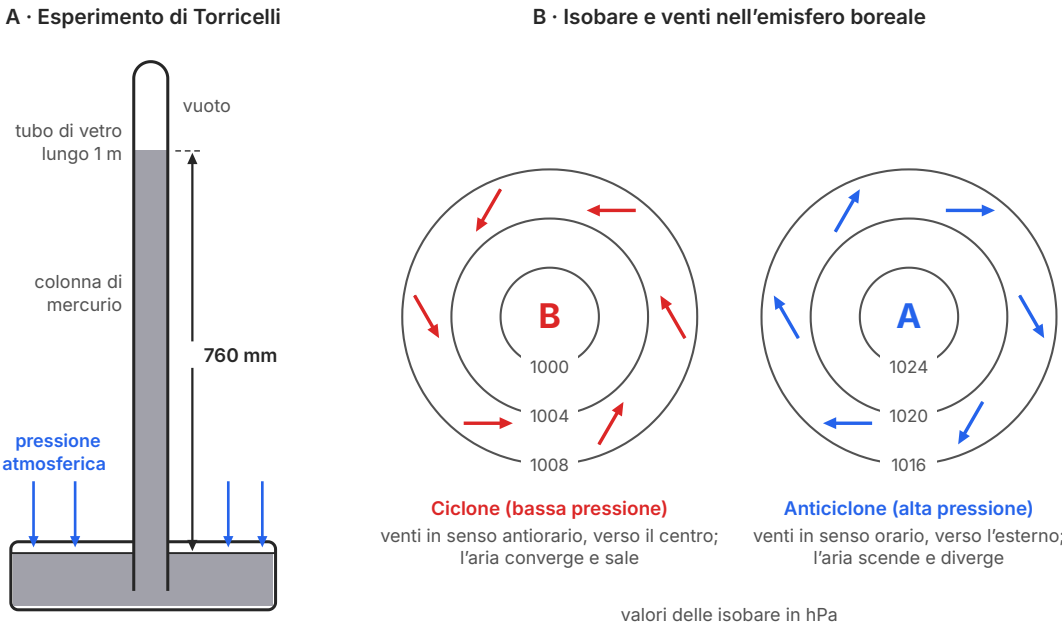


Figura 13.5 A: l'esperimento di Torricelli (1643), schema non in scala orizzontale. La pressione atmosferica, che agisce sulla superficie libera del mercurio nella bacinella, sostiene una colonna di mercurio alta circa 760 mm, misurata dalla superficie della bacinella; sopra resta uno spazio vuoto. B: un ciclone e un anticiclone nell'emisfero boreale. Al suolo l'aria si muove dalle alte alle basse pressioni attraversando le isobare con un angolo, deviata verso destra dall'effetto di Coriolis: ruota in senso antiorario intorno al ciclone e in senso orario intorno all'anticiclone.

Da questo esperimento nasce l'unità di misura *millimetro di mercurio* (mmHg): 760 mmHg = 1 atm = 101 325 Pa = 1013,25 hPa. Il mercurio era la scelta giusta: con l'acqua, 13,6 volte meno densa, la colonna sarebbe stata alta più di 10 m. Lo strumento che misura la pressione atmosferica si chiama **barometro**. Oltre al barometro a mercurio (oggi in disuso, perché il mercurio è tossico), esistono il *barometro aneroide*, in cui una capsula metallica sottovuoto si deforma al variare della pressione, e i sensori elettronici presenti anche negli smartphone. In meteorologia la pressione si esprime in ettopascal (hPa); il valore misurato in una stazione viene «riportato al livello del mare» per poter confrontare stazioni a quote diverse.

APPROFONDIMENTO

Il vuoto che non doveva esistere. Al tempo di Torricelli molti studiosi seguivano ancora l'idea aristotelica che «la natura ha orrore del vuoto». I fontanieri di Firenze sapevano però che le pompe aspiranti non riuscivano a sollevare l'acqua oltre una decina di metri, e Galileo se n'era occupato senza trovare la spiegazione. Torricelli capì che non era il vuoto ad «attirare» l'acqua, ma l'aria esterna a spingerla; scrisse che viviamo «sommersi nel fondo d'un pelago d'aria». Nel 1648, su suggerimento di Blaise Pascal, il cognato Florin Périer portò un tubo di Torricelli sul Puy de Dôme, in Francia, a circa 1000 m sopra la città di partenza: la colonna di mercurio si abbassò di alcuni centimetri. Era la prova che la pressione diminuisce con la quota, perché sopra la montagna c'è meno aria.

13.4.5 Isobare, anticicloni e cicloni

Sulle carte meteorologiche la pressione (riportata al livello del mare) è rappresentata con le **isobare**, linee che uniscono i punti con la stessa pressione, tracciate di solito ogni 4 hPa. Le isobare formano spesso linee chiuse intorno a zone in cui la pressione è più alta o più bassa delle zone circostanti. La pressione dipende soprattutto dalla temperatura e dai moti verticali dell'aria: l'aria calda è meno densa e tende a salire, alleggerendo la colonna sopra il suolo; l'aria fredda è più densa e tende a scendere.

- Un'area di **alta pressione**, o **anticiclone** (sulle carte italiane la lettera A), è una zona in cui l'aria scende dall'alto, si comprime e si riscalda: le nubi si dissolvono e il tempo è di solito sereno e stabile. Esempi importanti per l'Italia sono l'anticiclone delle Azzorre, che porta estati calde e asciutte, e l'anticiclone russo-siberiano, che d'inverno può portare aria gelida.
- Un'area di **bassa pressione**, o **ciclone** (lettera B, depressione), è una zona in cui l'aria converge al suolo e sale: salendo si raffredda, il vapore condensa e si formano nubi e precipitazioni. Il tempo è perturbato. Sul Mediterraneo si formano spesso depressioni, per esempio nel Golfo di Genova.

Il valore di 1013 hPa è soltanto una media: si parla di alta o bassa pressione per confronto con le zone vicine. Al livello del mare la pressione oscilla di solito fra circa 980 e 1040 hPa; nei cicloni tropicali più intensi scende sotto i 900 hPa.

13.5 I venti

13.5.1 Perché soffia il vento

Il **vento** è il movimento orizzontale dell'aria. La sua causa è semplice: quando due luoghi vicini hanno pressioni diverse, l'aria viene spinta dalla zona di alta pressione verso quella di bassa pressione, come l'aria che esce da un pallone forato. La differenza di pressione per unità di di-

stanza si chiama **gradiente barico**: più è grande, più forte è il vento. Sulle carte un gradiente forte si riconosce da isobare fitte, vicine fra loro; isobare molto distanziate indicano vento debole. All'origine di tutto c'è il riscaldamento disuguale della superficie da parte del Sole: le zone più calde riscaldano l'aria sovrastante, che sale e lascia al suolo una pressione più bassa.

Un vento si indica con la direzione *da cui proviene*: un vento di nord soffia da nord verso sud. La direzione si misura con la banderuola (o anemoscopio) e la velocità con l'**anemometro**, in genere a coppette, posto a 10 m dal suolo. La velocità si esprime in m/s, in km/h o in nodi (1 nodo = 1 miglio marino all'ora = 1,852 km/h).

13.5.2 Coriolis e attrito: perché i venti girano

Se la Terra non ruotasse, il vento soffierebbe dritto dall'alta alla bassa pressione. Come hai visto nel Capitolo 10, però, sulla Terra in rotazione ogni corpo in movimento subisce una deviazione apparente, l'**effetto di Coriolis**: verso destra nell'emisfero boreale, verso sinistra in quello australe; l'effetto è nullo all'equatore e massimo ai poli, e conta solo per moti su grandi distanze.

In quota, oltre circa 1 km, dove l'attrito con il suolo è trascurabile, la deviazione fa sì che il vento finisca per soffiare *parallelo alle isobare*, invece che perpendicolare a esse. Vicino al suolo l'*attrito* con il terreno, gli alberi e gli edifici rallenta l'aria e riduce la deviazione: il vento attraversa le isobare con un certo angolo, dirigendosi verso la bassa pressione. Il risultato, nell'emisfero boreale, è quello della Figura 13.5B:

- intorno a un ciclone l'aria ruota in senso **antiorario** e converge verso il centro, dove sale;
- intorno a un anticiclone l'aria ruota in senso **orario** e diverge verso l'esterno, alimentata dall'aria che scende.

Nell'emisfero australe i versi sono opposti. Ne deriva una regola pratica, nota come *legge di Buys-Ballot* (1857): nell'emisfero boreale, se volti le spalle al vento, la bassa pressione è alla tua sinistra.

13.5.3 Brezze e monsoni

Alcuni venti sono generati da differenze di temperatura su piccola scala e cambiano verso fra il giorno e la notte. Le più note sono le **brezze** di mare e di terra (Figura 13.6). Di giorno la terraferma, che ha un calore specifico basso, si scalda più in fretta del mare; l'aria sopra la terra si scalda, si espande e sale, e al suolo la pressione diventa più bassa che sul mare. Si forma così una piccola circolazione chiusa: al suolo l'aria fresca si muove dal mare verso la terra (*brezza di mare*), in quota torna verso il mare e lì scende. Di notte la terra si raffredda più in fretta del mare e la circolazione si inverte: al suolo soffia la *brezza di terra*, dalla costa verso il largo. Le brezze sono deboli, si sentono fino a qualche decina di chilometri dalla costa e sono più evidenti d'estate, con cielo sereno.

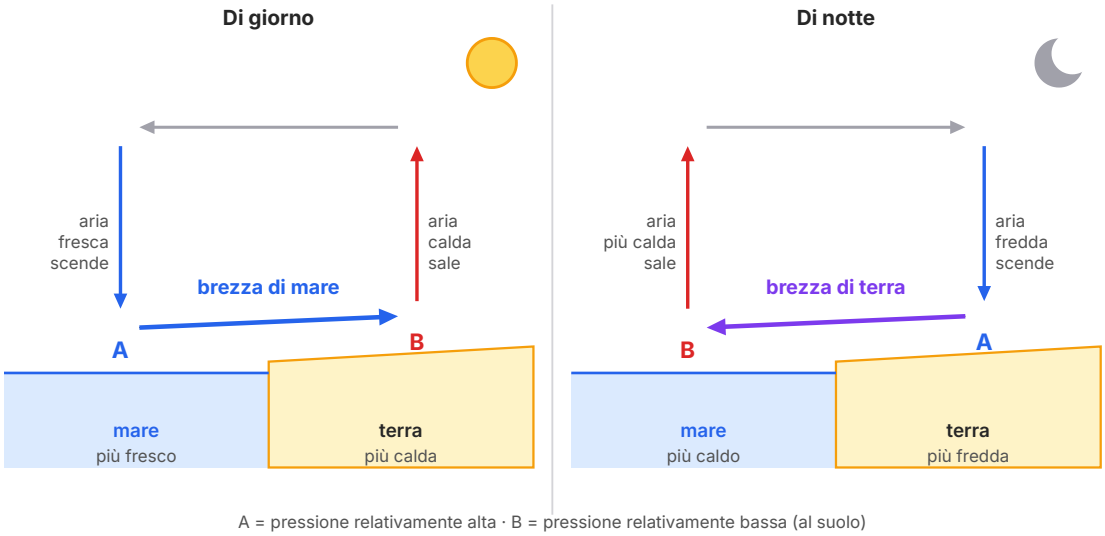


Figura 13.6 Brezze di mare e di terra (sezione schematica, non in scala). Di giorno la terra è più calda del mare: l'aria sale sopra la terra e al suolo si muove dal mare verso la costa. Di notte la terra è più fredda del mare e la circolazione si inverte.

In montagna avviene qualcosa di simile: di giorno i pendii soleggiati scaldano l'aria a contatto, che risale la valle e i versanti (*brezza di valle*); di notte l'aria raffreddata dai pendii scende verso il fondovalle (*brezza di monte*).

Su scala molto più grande, lo stesso meccanismo produce i **monsoni**, venti stagionali che invertono la direzione fra estate e inverno. Il caso più famoso è quello dell'Asia meridionale. D'estate il continente asiatico si scalda molto più dell'Oceano Indiano: sull'India si forma una bassa pressione e soffia dal mare il *monsone estivo*, da sud-ovest, carico di umidità, che porta piogge abbondantissime, indispensabili all'agricoltura di centinaia di milioni di persone. D'inverno il continente è freddo, vi si forma un'alta pressione e soffia il *monsone invernale*, da nord-est, secco.

13.5.4 I venti dell'Italia e la rosa dei venti

Nel Mediterraneo i marinai hanno dato da secoli un nome ai venti delle otto direzioni principali, raccolti nella **rosa dei venti** (Figura 13.7). Molti nomi richiamano le terre da cui il vento sembrava arrivare a chi navigava nel Mediterraneo centrale: il *grecale* dalla Grecia, il *libeccio* dalla Libia, il *levante* da dove «si leva» il Sole, il *ponente* da dove il Sole «si pone», la *tramontana* da oltre i monti.

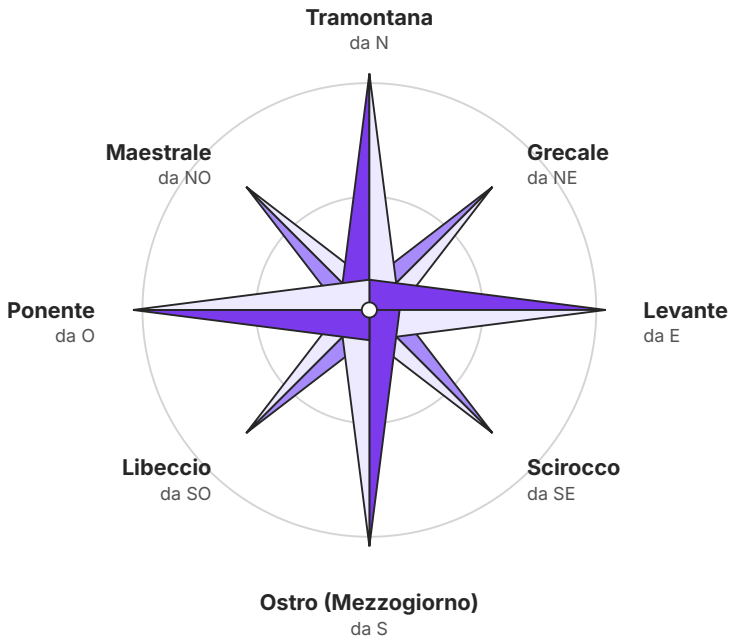


Figura 13.7 La rosa dei venti tradizionale del Mediterraneo, con gli otto venti principali. Ogni vento prende il nome dalla direzione da cui proviene: la tramontana soffia da nord verso sud.

- **Tramontana** (da nord): fredda e secca, spesso associata a cielo limpido.
- **Grecale** (da nord-est): freddo d'inverno, può agitare molto lo Ionio e il basso Adriatico. Al grecale è affine la **bora**, il vento freddo e impetuoso che scende dal Carso su Trieste, da est-nord-est, con raffiche che possono superare i 150 km/h.
- **Levante** (da est) e **ponente** (da ovest): il secondo, d'estate, è spesso una brezza piacevole sulle coste tirreniche.
- **Scirocco** (da sud-est): nasce come vento caldo e secco sul Nord Africa, ma attraversando il Mediterraneo si carica di umidità; porta caldo afoso, a volte pioggia con sabbia sahariana, e spingendo l'acqua verso il nord dell'Adriatico contribuisce all'acqua alta a Venezia (Capitolo 15).
- **Ostro** o **mezzogiorno** (da sud): caldo e umido.
- **Libeccio** (da sud-ovest): porta mareggiate violente sulle coste del Tirreno, dalla Liguria alla Toscana.
- **Maestrale** (da nord-ovest): il vento dominante in Sardegna, spesso forte, fresco e secco; scende dalla valle del Rodano, dove è chiamato *mistral*.

Un vento locale particolare è il **foehn** (o favonio): un vento caldo e secco che scende sul versante sottovento di una catena montuosa. Sulle Alpi, quando l'aria umida proveniente da nord è costretta a risalire il versante svizzero e austriaco, si raffredda e perde il suo vapore sotto forma di pioggia o neve; ridiscendendo verso la Lombardia o il Piemonte si comprime e si riscalda, arrivando secca e più calda di quanto fosse alla stessa quota sul versante opposto. Vedrai perché nel Capitolo 14.

Per stimare la forza del vento senza strumenti si usa ancora la **scala Beaufort**, ideata nel 1805 dall'ammiraglio britannico Francis Beaufort sulla base degli effetti del vento sul mare e poi adattata alla terraferma (Tabella 13.2).

Tabella 13.2 La scala Beaufort, con le velocità corrispondenti (misurate a 10 m dal suolo) e gli effetti sulla terraferma.

Grado	Denominazione	Velocità (km/h)	Effetti sulla terraferma
0	calma	< 1	il fumo sale verticale
1	bava di vento	1–5	il fumo si inclina; le banderuole non si muovono
2	brezza leggera	6–11	si sente il vento sul viso; le foglie frusciano
3	brezza tesa	12–19	foglie e ramoscelli in continuo movimento; le bandiere si distendono
4	vento moderato	20–28	si sollevano polvere e carta; si muovono i rami piccoli
5	vento teso	29–38	gli arbusti con foglie oscillano
6	vento fresco	39–49	si muovono i rami grossi; difficile usare l'ombrello
7	vento forte	50–61	si muovono interi alberi; fatica a camminare controvento
8	burrasca moderata	62–74	si spezzano i rami
9	burrasca forte	75–88	lievi danni agli edifici (tegole, comignoli)
10	tempesta	89–102	alberi sradicati, danni rilevanti (raro sulla terraferma)
11	tempesta violenta	103–117	danni estesi (rarissimo sulla terraferma)
12	uragano	≥ 118	distruzione

13.5.5 La circolazione generale dell'atmosfera

Su scala planetaria il motore dei venti è la differenza di riscaldamento fra le basse latitudini, che ricevono più energia di quanta ne irraggiano, e le alte latitudini, che ne irraggiano di più: l'atmosfera, insieme agli oceani, trasporta continuamente calore dall'equatore verso i poli. Ne nascono, al suolo, alcune fasce di venti dominanti. Fra l'equatore e i 30° di latitudine soffiano gli

alisei, venti costanti diretti verso l'equatore, da nord-est nel nostro emisfero: le navi a vela li sfruttavano per attraversare l'Atlantico verso le Americhe. Fra 30° e 60° dominano i **venti occidentali**, che spiegano perché le perturbazioni arrivano in Italia soprattutto da ovest.

APPROFONDIMENTO · LA CIRCOLAZIONE GENERALE DELL'ATMOSFERA

Perché i venti dominanti si dispongono in fasce? Se la Terra non ruotasse basterebbe una sola grande cella per emisfero; la rotazione, con l'effetto di Coriolis, la spezza in tre celle (Figura 13.8).

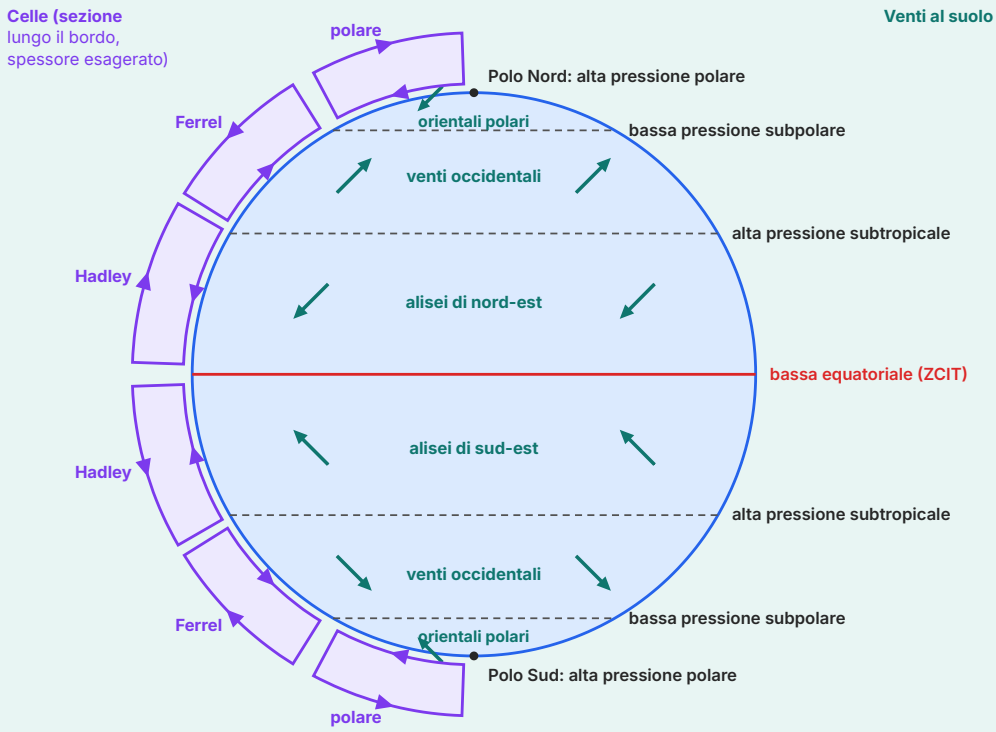


Figura 13.8 Schema della circolazione generale dell'atmosfera (non in scala; lo spessore delle celle è molto esagerato). A sinistra, in sezione lungo il bordo del globo, le celle di Hadley, di Ferrel e polari, con le frecce che indicano il verso del moto dell'aria al suolo e in quota. Sul globo, i venti dominanti al suolo, deviati dall'effetto di Coriolis verso destra nell'emisfero boreale e verso sinistra in quello australe; a destra, le fasce di pressione. La posizione reale delle fasce si sposta con le stagioni.

- **Cella di Hadley** (fra l'equatore e circa 30°). All'equatore l'aria molto calda e umida sale, dando origine a nubi imponenti e piogge quasi quotidiane: qui si trova una fascia di basse pressioni, la **zona di convergenza intertropicale** (ZCIT), dove convergono i venti dei due emisferi. Un tempo i marinai la chiamavano «calme equatoriali», perché il vento al suolo è spesso debolissimo. In quota l'aria si muove verso i poli, si raffredda e intorno ai 30° di latitudine scende, formando le *alte pressioni subtropicali*: l'aria che scende è secca, e non a caso

a queste latitudini si trovano molti grandi deserti, come il Sahara. Al suolo l'aria torna verso l'equatore: sono gli alisei, venti costanti che la deviazione di Coriolis fa soffiare da nord-est nell'emisfero boreale e da sud-est in quello australe. Le navi a vela li sfruttavano per attraversare l'Atlantico verso le Americhe.

- **Cella di Ferrel** (fra circa 30° e 60°). Al suolo una parte dell'aria che scende ai 30° si dirige verso i poli; deviata dalla rotazione, forma i **venti occidentali**, che soffiano da sud-ovest nell'emisfero boreale e da nord-ovest in quello australe. Sono i venti dominanti alle nostre latitudini e spiegano perché le perturbazioni arrivano in Italia soprattutto da ovest.
- **Cella polare** (fra circa 60° e i poli). Sopra i poli l'aria gelida scende e forma le alte pressioni polari; al suolo si allontana dai poli e, deviata, forma i *venti orientali polari*. Intorno ai 60° essa incontra l'aria più tiepida dei venti occidentali: lungo questo *fronte polare* l'aria sale, si formano le basse pressioni subpolari e nascono molte delle perturbazioni che attraversano l'Europa.

Questo schema è una semplificazione. La distribuzione di continenti e oceani spezza le fasce di pressione in grandi anticicloni e cicloni semipermanenti (come l'anticiclone delle Azzorre e la depressione d'Islanda), e tutto il sistema si sposta verso nord nell'estate boreale e verso sud nell'inverno, seguendo il Sole. In alta troposfera, fra le celle, scorrono le *correnti a getto*, fiumi d'aria che soffiano da ovest, spesso a oltre 200 km/h, e che gli aerei sfruttano nei voli verso est.

DA RICORDARE

I venti soffiano dalle alte alle basse pressioni, deviati dall'effetto di Coriolis (a destra nell'emisfero boreale). Al suolo: **alisei** fra 0° e 30° (da NE e da SE), **venti occidentali** fra 30° e 60°, **venti orientali polari** oltre i 60°. Basse pressioni all'equatore (ZCIT) e a 60°; alte pressioni a 30° e ai poli.

13.6 L'inquinamento atmosferico

13.6.1 Gli inquinanti principali

Si parla di **inquinamento atmosferico** quando nell'aria sono presenti sostanze in quantità tali da danneggiare la salute dell'uomo, gli ecosistemi, le coltivazioni o i materiali. Alcuni inquinanti sono *primari*, cioè emessi direttamente dalle sorgenti (camini, tubi di scarico); altri sono *secondari*, cioè si formano nell'aria per reazioni chimiche fra inquinanti primari. Le sorgenti principali sono i processi di combustione: traffico, riscaldamento domestico (in particolare con legna e pellet), industria, centrali termoelettriche; anche l'agricoltura e gli allevamenti contribuiscono, con l'ammoniaca che forma particelle secondarie.

- **Particolato (PM).** È l'insieme delle particelle solide e liquide sospese nell'aria. Si indica con **PM10** la frazione con diametro inferiore a 10 µm (micrometri, millesimi di millimetro) e

con PM2,5 quella sotto i 2,5 µm. Più le particelle sono piccole, più penetrano in profondità nell'apparato respiratorio: il PM2,5 arriva fino agli alveoli polmonari. Per il PM10 la normativa europea in vigore fissa un limite di 50 µg/m^3 come media giornaliera, da non superare per più di 35 giorni l'anno; una nuova direttiva, approvata nel 2024, abbassa i limiti a partire dal 2030.

- **Ossidi di azoto (NO_x).** Si formano nelle combustioni ad alta temperatura, quando l'azoto e l'ossigeno dell'aria reagiscono fra loro, soprattutto nei motori dei veicoli (in particolare diesel). Il diossido di azoto (NO_2) è un gas bruno-rossastro, irritante per le vie respiratorie.
- **Ossidi di zolfo (SO_x).** Derivano dalla combustione di carbone e di derivati del petrolio che contengono zolfo. In Europa sono diminuiti moltissimo dagli anni Settanta grazie a combustibili più puliti e ai filtri nelle industrie.
- **Monossido di carbonio (CO).** Si forma nelle combustioni con poco ossigeno; è inodore e molto tossico, perché impedisce al sangue di trasportare ossigeno. È pericoloso soprattutto negli ambienti chiusi, con stufe e caldaie mal funzionanti.
- **Ozono troposferico.** È un inquinante secondario: si forma vicino al suolo, nelle giornate estive calde e soleggiate, da reazioni fra ossidi di azoto e composti organici volatili attivate dalla luce solare. È la stessa molecola dello strato di ozono, ma qui, dove respiriamo, è irritante e dannosa.

DA RICORDARE

L'ozono: «buono» in alto, «cattivo» in basso. Nella stratosfera (15–35 km) l'ozono ci protegge dagli ultravioletti e va difeso; nella troposfera, vicino al suolo, è un inquinante che va ridotto. Si tratta della stessa sostanza, O_3, in posti diversi.

13.6.2 Smog e piogge acide

La parola **smog** nasce dalla fusione delle parole inglesi *smoke* (fumo) e *fog* (nebbia). Lo *smog classico* si forma d'inverno, quando fumo, particolato e ossidi di zolfo si accumulano nell'aria fredda e umida, spesso sotto un'inversione termica. Nel dicembre 1952, a Londra, un'inversione persistente intrappolò per cinque giorni i fumi del carbone bruciato nelle case e nelle fabbriche: lo «smog di Londra» causò la morte di migliaia di persone e portò alle prime leggi moderne sull'aria pulita. Lo *smog fotochimico*, invece, è tipico delle giornate estive soleggiate nelle grandi città: la luce del Sole trasforma gli inquinanti del traffico in ozono e altre sostanze irritanti, formando una foschia giallo-bruna.

Gli ossidi di zolfo e di azoto, reagendo con l'acqua e l'ossigeno dell'atmosfera, si trasformano in acido solforico e acido nitrico, che si sciolgono nelle gocce di pioggia, neve o nebbia. Si formano così le **piogge acide**. Anche la pioggia «pulita» è leggermente acida, perché scioglie un po' di diossido di carbonio dell'aria; le piogge acide lo sono molto di più (la misura dell'acidità, il pH, la studierai più avanti). Gli effetti sono gravi: acidificazione di laghi e fiumi, con danni ai

pesci; danni alle foreste, perché il suolo perde sostanze nutritive; corrosione di metalli e di monumenti in marmo e calcare, che reagiscono con gli acidi. Poiché le masse d'aria trasportano gli inquinanti per centinaia di chilometri, le piogge acide possono colpire Paesi lontani dalle sorgenti: negli anni Settanta e Ottanta i laghi della Scandinavia erano danneggiati da emissioni prodotte in gran parte in altri Paesi europei. Per questo i rimedi richiedono accordi internazionali.

COLLEGAMENTI

Educazione civica e Agenda 2030. L'inquinamento dell'aria è considerato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità uno dei principali rischi ambientali per la salute. Tra gli obiettivi dell'Agenda 2030 dell'ONU, il Goal 3 (salute e benessere) chiede di ridurre le malattie e le morti dovute all'inquinamento, e il Goal 11 (città sostenibili) chiede di ridurre l'impatto ambientale delle città, con particolare attenzione alla qualità dell'aria. In Italia i dati delle centraline sono pubblicati ogni giorno dalle Agenzie regionali per la protezione dell'ambiente (ARPA): prova a cercare quelli della tua città e a confrontare i valori di PM10 d'inverno e d'estate.

Le soluzioni sono note, anche se non semplici: veicoli e impianti di riscaldamento meno inquinanti, trasporto pubblico, mobilità in bicicletta e a piedi, efficienza energetica degli edifici, fonti di energia che non usano la combustione. Molte di queste misure riducono allo stesso tempo l'inquinamento locale e le emissioni di gas serra: aria più pulita e clima più stabile sono, in buona parte, lo stesso obiettivo.

SINTESI

- L'atmosfera attuale deriva dal degassamento del pianeta; l'ossigeno si è accumulato grazie alla fotosintesi, a partire da circa 2,4 miliardi di anni fa.
- L'aria secca è formata da azoto (78,08 %), ossigeno (20,95 %), argo (0,93 %), diossido di carbonio (≈ 0,04 %, ≈ 420 ppm, in aumento) e gas in tracce; il vapore acqueo varia da quasi 0 a circa il 4 %.
- In base alla temperatura si distinguono troposfera (fenomeni meteorologici, T diminuisce di ≈ 6,5 °C/km), stratosfera (ozonosfera, T aumenta), mesosfera, termosfera (ionosfera, aurore) ed esosfera.
- La pressione atmosferica è il peso della colonna d'aria sovrastante per unità di superficie: al livello del mare 1013,25 hPa = 760 mmHg = 1 atm. Diminuisce con la quota in modo esponenziale, dimezzandosi ogni 5,5 km circa.
- La Terra riflette circa il 30 % della radiazione solare (albedo ≈ 0,30) e, in equilibrio, irraggia nello spazio come infrarosso tanta energia quanta ne assorbe: è il bilancio energetico.
- I gas serra (vapore acqueo, CO_2, metano, N_2O, ozono) assorbono l'infrarosso e lo riemettono anche verso il suolo: l'effetto serra naturale porta la temperatura media da ≈ −18 °C a ≈ 15 °C.
- Il buco dell'ozono, causato dai CFC, riguarda la stratosfera e gli ultravioletti; il Protocollo di Montréal (1987) ha messo al bando i CFC.
- La temperatura dell'aria dipende da latitudine, altitudine, distanza dal mare, esposizione; si rappresenta con le isoterme. Nell'inversione termica la temperatura aumenta con la quota.
- Torricelli (1643) misurò la pressione con una colonna di mercurio alta 760 mm. Sulle carte le isobare delimitano anticicloni (A, aria che scende, bel tempo) e cicloni (B, aria che sale, tempo perturbato).
- Il vento va dalle alte alle basse pressioni; l'effetto di Coriolis lo devia a destra nell'emisfero boreale, dove i venti girano in senso antiorario intorno ai cicloni e orario intorno agli anticicloni.
- Brezze e monsoni nascono dal diverso riscaldamento di terra e mare. Su scala planetaria dominano gli alisei fra 0° e 30° e i venti occidentali fra 30° e 60° (la circolazione generale a celle è un approfondimento).
- I principali inquinanti sono particolato (PM10, PM2,5), ossidi di azoto e di zolfo, monossido di carbonio e ozono troposferico; producono smog e piogge acide.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il gas più abbondante nell'aria secca è:
   - **A.** l'ossigeno
   - **B.** il diossido di carbonio
   - **C.** l'azoto
   - **D.** l'argo

2. ● La concentrazione attuale del diossido di carbonio nell'atmosfera è circa:
   - **A.** 420 ppm, cioè circa lo 0,04 %
   - **B.** 0,4 %
   - **C.** 4 %
   - **D.** 280 ppm, cioè circa lo 0,03 %

3. ● Quasi tutti i fenomeni meteorologici avvengono:
   - **A.** nella stratosfera
   - **B.** nella mesosfera
   - **C.** nella ionosfera
   - **D.** nella troposfera

4. ●● Nella stratosfera la temperatura aumenta con la quota perché:
   - **A.** lo strato è più vicino al Sole
   - **B.** l'ozono assorbe la radiazione ultravioletta
   - **C.** l'aria è compressa dagli strati superiori
   - **D.** il vapore acqueo vi condensa liberando calore

5. ● L'albedo della Terra, cioè la frazione di radiazione solare riflessa nello spazio, è circa:
   - **A.** 0,03
   - **B.** 0,10
   - **C.** 0,30
   - **D.** 0,90

6. ●● Il buco dell'ozono:
   - **A.** si forma soprattutto sopra l'Antartide durante la primavera australe
   - **B.** è la causa principale del riscaldamento globale
   - **C.** riguarda la troposfera e la radiazione infrarossa
   - **D.** è stato causato dall'aumento del CO_2

7. ● In un anticiclone:
   A. l'aria sale e il tempo è perturbato
   B. la pressione è più bassa che nelle zone vicine
   C. i venti al suolo convergono verso il centro
   D. l'aria scende dall'alto e il tempo è di solito sereno

8. ●● Di giorno, su una costa, la brezza soffia dal mare verso la terra perché:
   A. il mare si scalda più in fretta della terra
   B. la terra si scalda più in fretta e sopra di essa la pressione al suolo diminuisce
   C. l'effetto di Coriolis spinge l'aria verso la costa
   D. sul mare l'aria calda sale e richiama aria dalla terra

9. ●● Fra l'equatore e i 30° N i venti al suolo dominanti sono:
   A. gli alisei di nord-est
   B. i venti occidentali
   C. gli alisei di sud-est
   D. i venti orientali polari

Vero o falso

10. ● La pressione atmosferica diminuisce con la quota di una quantità costante per ogni chilometro.

11. ● L'effetto serra naturale è indispensabile per mantenere la temperatura media della Terra intorno ai 15 °C.

12. ●● Nella termosfera la temperatura può superare i 1000 °C, ma un oggetto non verrebbe riscaldato molto perché l'aria è rarefattissima.

13. ● Il maestrale è un vento che soffia da sud-est.

14. ●● Nell'emisfero boreale, se si volgono le spalle al vento, la bassa pressione si trova a sinistra.

15. ● L'ozono è utile nella stratosfera ma è un inquinante nella troposfera.

Applicare e calcolare

16. ● Al livello del mare la temperatura è 18 °C. Usando il gradiente medio di 6,5 °C/km, stima la temperatura a 2500 m di quota.

17. ●● Una stazione meteorologica in fondovalle, a 300 m, registra 12,0 °C; nello stesso momento una stazione su una cima a 2100 m registra −0,6 °C. Calcola il gradiente termico verticale in °C/km e confrontalo con il valore medio.

18. ●● Un aereo vola a 10 km di quota. Con il gradiente medio di 6,5 °C/km, quale temperatura esterna ti aspetti se al suolo ci sono 15 °C? Confronta il risultato con il valore dell'atmosfera standard a 10 km, −50 °C circa.

19. ● Un'aula misura 7 m × 8 m × 3 m. Calcola il volume d'aria contenuto e, considerandola aria secca, il volume di ossigeno, di azoto e di diossido di carbonio (420 ppm, in litri).

20. ●● Usando la regola approssimata «la pressione si dimezza ogni 5,5 km», stima la pressione a 11 km e a 16,5 km di quota, partendo da 1013 hPa al livello del mare.

21. ●● La densità del mercurio è 13,6 g/cm^3, quella dell'acqua 1,00 g/cm^3. Quanto sarebbe alta la colonna di un barometro ad acqua alla pressione di 1 atm?

22. ●●● Un barometro segna 1028 hPa. Esprimi questa pressione in atmosfere e in millimetri di mercurio (1 atm = 1013,25 hPa = 760 mmHg). Si tratta di alta o di bassa pressione?

23. ●● Un anemometro misura un vento di 65 km/h. Esprimi la velocità in m/s e in nodi (1 nodo = 1,852 km/h) e indica il grado della scala Beaufort.

Leggere dati e figure

24. ● Osserva la Figura 13.2. A quale quota si trovano la tropopausa, la stratopausa e la mesopausa, e quale temperatura ha l'aria in ciascuna di esse? In quali strati la temperatura diminuisce con la quota?

25. ●● Osserva la Figura 13.3. A quale quota circa la pressione vale 300 hPa? Di quanti ettopascal diminuisce la pressione fra 0 e 5 km e fra 10 e 15 km? Spiega perché i due valori sono diversi.

26. ●● Osserva la Figura 13.4. Verifica che il bilancio al limite superiore dell'atmosfera è in pareggio. Che cosa accadrebbe alla temperatura della superficie se i gas serra aumentassero e le 58 + 12 unità emesse verso lo spazio diminuissero, mentre le 70 unità assorbite restano uguali?

27. ● Osserva la Figura 13.7. Come si chiama il vento che soffia da sud-est? E quello che soffia da nord-ovest? Una persona a Trieste dice che «soffia un vento da nord-est»: quale vento della rosa è, e quale vento locale potrebbe essere?

Indagare e argomentare

28. ●● Progetta un semplice esperimento, da fare a casa o in laboratorio, che dimostri che l'aria esercita una pressione (per esempio con un bicchiere pieno d'acqua e un cartoncino, oppure con una lattina vuota riscaldata e poi raffreddata). Descrivi materiale, procedimento, osservazioni attese e spiegazione.

29. ●● «In montagna fa più freddo perché si è più lontani dal Sole»: «No, perché si è più vicini al Sole dovrebbe fare più caldo». Entrambe le affermazioni sono sbagliate. Spiega perché, e spiega la vera causa della diminuzione di temperatura con la quota nella troposfera.

30. ●●● Spiega perché, nelle giornate invernali senza vento, l'inquinamento da PM10 nella Pianura Padana raggiunge spesso valori elevati, usando i concetti di inversione termica, sorgenti di inquinamento e geografia della pianura. Proponi almeno due misure per ridurlo.

31. ●● Un compagno sostiene che «il riscaldamento globale è causato dal buco dell'ozono, da cui entra più calore». Spiega che cosa c'è di sbagliato in questa affermazione, distinguendo i due fenomeni (strato coinvolto, tipo di radiazione, gas responsabili, rimedi).

Approfondimento: l'energia del Sole in numeri

32. ●● La costante solare è 1361 W/m^2. Calcola la potenza media che arriva su ogni metro quadrato del limite superiore dell'atmosfera, quella riflessa e quella assorbita, con un'albedo di 0,30.

PER APPROFONDIRE

- [AHR] C. D. Ahrens, *Meteorology Today*: i capitoli sulla composizione e struttura dell'atmosfera, sul bilancio energetico, sulla pressione e sui venti, con molti esempi e grafici.
- [PRE] F. Press, R. Siever, J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Capire la Terra*: le pagine sul sistema climatico e sull'evoluzione dell'atmosfera nella storia della Terra.
- [SAG] C. Sagan, *Cosmos*: il capitolo sui pianeti vicini confronta l'effetto serra di Venere con l'atmosfera della Terra.

Glossario del capitolo

Aerosol atmosferico
Insieme delle particelle solide e liquide sospese nell'aria (pulviscolo): sabbia, sale marino, ceneri, pollini, fumi; fa da nucleo di condensazione.

Albedo
Frazione della radiazione incidente riflessa da una superficie; per la Terra nel suo insieme vale circa 0,30.

Alisei
Venti costanti che soffiano fra i 30° di latitudine e l'equatore: da nord-est nell'emisfero boreale e da sud-est in quello australe.

Anticiclone
Area di alta pressione in cui l'aria scende; nell'emisfero boreale i venti vi ruotano in senso orario divergendo; porta di solito tempo stabile.

Atmosfera
Involucro gassoso che circonda la Terra, trattenuto dalla gravità; metà della sua massa è sotto i 5,5 km di quota.

Buco dell'ozono
Forte riduzione stagionale dell'ozono stratosferico sopra l'Antartide, causata dal cloro liberato dai CFC; contrastata dal Protocollo di Montréal (1987).

Ciclone (depressione)
Area di bassa pressione in cui l'aria converge e sale; nell'emisfero boreale i venti vi ruotano in senso antiorario; porta nubi e precipitazioni.

Costante solare
Potenza della radiazione solare che giunge fuori dall'atmosfera su 1 m^2 perpendicolare ai raggi: circa 1361 W/m^2.

Degassamento
Liberazione di gas (vapore acqueo, diossido di carbonio, azoto…) dall'interno della Terra attraverso i vulcani; ha prodotto l'atmosfera primitiva.

Effetto serra
Riscaldamento della superficie dovuto ai gas serra, che assorbono l'infrarosso emesso dal suolo e lo riemettono in parte verso il basso; porta la temperatura media da circa −18 °C a circa 15 °C.

Gas serra
Gas trasparenti alla luce visibile ma capaci di assorbire l'infrarosso: vapore acqueo, CO_2, metano, protossido di azoto, ozono, CFC.

Gradiente barico
Variazione della pressione per unità di distanza orizzontale; più è grande (isobare fitte), più forte è il vento.

Gradiente termico verticale
Diminuzione della temperatura con la quota nella troposfera: in media circa 6,5 °C ogni chilometro.

Inversione termica
Situazione in cui la temperatura dell'aria aumenta con la quota invece di diminuire; blocca i moti verticali e favorisce nebbie e accumulo di inquinanti.

Isobare
Linee che uniscono i punti con la stessa pressione atmosferica (riportata al livello del mare), tracciate di solito ogni 4 hPa.

Ozonosfera
Fascia della stratosfera, fra circa 15 e 35 km, in cui è concentrato l'ozono (O_3) che filtra la radiazione ultravioletta del Sole.

Pressione atmosferica
Forza per unità di superficie esercitata dal peso dell'aria sovrastante; al livello del mare vale in media 1013,25 hPa = 760 mmHg = 1 atm.

Stratosfera
Strato fra la tropopausa e circa 50 km in cui la temperatura aumenta con la quota perché l'ozono assorbe gli ultravioletti.

Termosfera
Strato oltre gli 85 km circa, in cui i gas rarefatti assorbono la radiazione solare più energetica e raggiungono centinaia di gradi; vi si trovano ionosfera e aurore.

Troposfera
Strato più basso dell'atmosfera (circa 8–18 km di spessore), sede dei fenomeni meteorologici; la temperatura diminuisce in media di 6,5 °C/km.

Soluzioni

1. C. L'azoto (N_2) costituisce il 78,08 % dell'aria secca; l'ossigeno il 20,95 %.

2. A. Circa 420 ppm (media mondiale 2023), cioè lo 0,042 %; 280 ppm era il valore preindustriale e lo «0,03 %» è un valore degli anni Sessanta.

3. D. Nella troposfera, che contiene circa tre quarti della massa dell'atmosfera e quasi tutto il vapore acqueo.

4. B. L'ozono, concentrato fra 15 e 35 km, assorbe la radiazione ultravioletta del Sole e riscalda l'aria.

5. C. Circa 0,30: la Terra riflette nello spazio circa il 30 % della radiazione solare in arrivo.

6. A. Si forma sopra l'Antartide in settembre–ottobre; riguarda la stratosfera e gli ultravioletti ed è causato dai CFC, non dal CO_2.

7. D. Nell'anticiclone l'aria scende, si comprime e si riscalda, le nubi si dissolvono; al suolo i venti divergono verso l'esterno.

8. B. La terra, con calore specifico basso, si scalda prima del mare; l'aria sopra la terra sale e al suolo la pressione diminuisce, così l'aria si muove dal mare verso la terra.

9. A. Gli alisei, che nell'emisfero boreale soffiano da nord-est verso la ZCIT.

10. F. La diminuzione è circa esponenziale: rapida vicino al suolo (≈ 12 hPa ogni 100 m), sempre più lenta in quota; la pressione si dimezza ogni 5,5 km circa.

11. V. Senza effetto serra la temperatura media sarebbe di circa −18 °C invece di circa 15 °C.

12. V. Le poche molecole sono molto veloci ma così rade che cedono pochissima energia a un oggetto.

13. F. Il maestrale soffia da nord-ovest; il vento di sud-est è lo scirocco.

14. V. È la legge di Buys-Ballot, conseguenza della rotazione antioraria dei venti intorno alle basse pressioni nell'emisfero boreale.

15. V. Nella stratosfera filtra gli ultravioletti; vicino al suolo è un inquinante irritante, componente dello smog fotochimico.

16. Diminuzione: 6,5 °C/km × 2,5 km = 16,25 °C; temperatura: 18 °C − 16,25 °C ≈ 1,8 °C (circa 2 °C).

17. ΔT = 12,0 °C − (−0,6 °C) = 12,6 °C; Δh = 2100 m − 300 m = 1,8 km; gradiente = 12,6 °C / 1,8 km = 7,0 °C/km, un po' più del valore medio di 6,5 °C/km (accade per esempio con aria secca).

18. 6,5 °C/km × 10 km = 65 °C; 15 °C − 65 °C = −50 °C, in ottimo accordo con il valore dell'atmosfera standard (circa −50 °C).

19. V = 7 m × 8 m × 3 m = 168 m^3. Ossigeno: 0,2095 × 168 m^3 ≈ 35,2 m^3; azoto: 0,7808 × 168 m^3 ≈ 131 m^3; CO_2: 420 × 10^{-6} × 168 m^3 ≈ 0,0706 m^3 ≈ 71 L.

20. 11 km = 2 × 5,5 km: 1013 hPa / 4 ≈ 253 hPa; 16,5 km = 3 × 5,5 km: 1013 hPa / 8 ≈ 127 hPa. (Il modello ISA dà 226 hPa e 95 hPa: la regola è solo un'approssimazione.)

21. L'altezza è inversamente proporzionale alla densità: h = 760 mm × 13,6 / 1,00 ≈ 10 300 mm ≈ 10,3 m.

22. 1028 / 1013,25 ≈ 1,015 atm; 1,015 × 760 mmHg ≈ 771 mmHg. È superiore al valore medio di 1013 hPa: alta pressione, tipica di un anticiclone.

23. 65 km/h / 3,6 ≈ 18,1 m/s; 65 / 1,852 ≈ 35,1 nodi; grado 8 della scala Beaufort (62–74 km/h), burrasca moderata.

24. Tropopausa ≈ 11 km, ≈ −56,5 °C; stratopausa ≈ 50 km, ≈ −2,5 °C; mesopausa ≈ 86 km, ≈ −86 °C. La temperatura diminuisce con la quota nella troposfera e nella mesosfera (aumenta nella parte alta della stratosfera e nella termosfera).

25. 300 hPa a circa 9 km (9,2 km). Fra 0 e 5 km la pressione scende da ≈ 1013 a ≈ 540 hPa (≈ 470 hPa in meno); fra 10 e 15 km da ≈ 265 a ≈ 120 hPa (≈ 145 hPa

in meno). In quota sopra c'è meno aria e l'aria è più rarefatta: a parità di dislivello la pressione diminuisce di meno, perché la diminuzione è esponenziale e non lineare.

26. In arrivo 100; in uscita 23 + 7 (riflessi) + 58 + 12 (infrarosso) = 100: il bilancio è in pareggio. Se uscisse meno energia di quanta ne viene assorbita, la Terra accumulerebbe energia e la temperatura della superficie aumenterebbe, finché la maggiore emissione infrarossa ristabilisce l'equilibrio a una temperatura più alta: è il meccanismo del riscaldamento globale.

27. Da sud-est: scirocco; da nord-ovest: maestrale. Da nord-est: grecale; a Trieste potrebbe trattarsi della bora, vento freddo e a raffiche che scende dal Carso da est-nord-est.

28. Traccia: bicchiere colmo d'acqua coperto da un cartoncino e capovolto: il cartoncino non cade perché la pressione dell'aria dal basso supera quella esercitata dalla colonna d'acqua. Oppure: lattina con un po' d'acqua scaldata finché esce vapore, poi capovolta in acqua fredda (con le pinze e la supervisione di un adulto): il vapore condensa, la pressione interna crolla e la pressione esterna schiaccia la lattina. Indicare materiale, procedimento, precauzioni di sicurezza, osservazioni e spiegazione in termini di differenza di pressione.

29. Traccia: salendo di qualche chilometro la distanza dal Sole (≈ 150 milioni di km) cambia in modo del tutto trascurabile. La troposfera è scaldata soprattutto dal basso, dal suolo che assorbe la radiazione solare ed emette infrarosso; salendo ci si allontana da questa sorgente, e inoltre l'aria che sale si espande per la minore pressione e si raffredda. Risultato: −6,5 °C/km in media.

30. Traccia: d'inverno le notti lunghe e serene raffreddano il suolo e l'aria bassa, formando un'inversione termica che impedisce il rimescolamento verticale; la pianura è chiusa da Alpi e Appennini e spesso senza vento; le sorgenti (traffico, riscaldamento a legna e pellet, industria, ammoniaca da allevamenti e agricoltura) sono molto concentrate. Misure: limitare il traffico privato e potenziare il trasporto pubblico, sostituire stufe e caldaie inquinanti, ridurre le emissioni agricole, isolare gli edifici.

31. Traccia: il buco dell'ozono riguarda la stratosfera, la radiazione ultravioletta e i CFC; è stato affrontato con il Protocollo di Montréal (1987). Il riscaldamento globale riguarda la troposfera e la radiazione infrarossa trattenuta dai gas serra (soprattutto CO_2 e metano), e richiede la riduzione delle emissioni da combustibili fossili. Dal buco dell'ozono non «entra calore»: entrano più ultravioletti, dannosi per i viventi.

32. Media al limite dell'atmosfera: 1361 / 4 ≈ 340 W/m^2; riflessa: 0,30 × 340 ≈ 102 W/m^2; assorbita: 340 − 102 ≈ 238 W/m^2.