CAPITOLO

14

Tempo meteorologico e clima

Il tempo è quello che trovi uscendo di casa; il clima è quello che ti aspetti quando prepari la valigia.

OBIETTIVI

1. Definire umidità assoluta, umidità relativa e punto di rugiada e calcolarli con una tabella del vapore saturo.
2. Spiegare come si formano nebbia, rugiada, brina e nubi, e riconoscere i dieci generi di nubi.
3. Descrivere i tipi di precipitazioni, i temporali, le masse d'aria, i fronti e i cicloni.
4. Spiegare perché le previsioni del tempo sono affidabili solo per pochi giorni.
5. Distinguere tempo e clima, costruire un climogramma e classificare un clima secondo Köppen.
6. Spiegare le cause naturali e umane dei cambiamenti climatici e le strategie di mitigazione e adattamento.

INDICE DEL CAPITOLO

14.1 L'umidità dell'aria 2
14.2 Condensazione: nebbie e nubi 6
14.3 Le precipitazioni 11
14.4 Masse d'aria, fronti e perturbazioni 13
14.5 Il clima 19
14.6 I cambiamenti climatici 22

Scienze naturali 1 · Parte III · Aria, acqua e rilievo · versione 1.0
Capitolo 14: Tempo meteorologico e clima · pagine 355–384 del volume completo · estratto per lo studio

«Domani piove?» È forse la domanda scientifica che si fa più spesso al mondo. Dalla risposta dipendono una gita, una partita, un raccolto, il volo di un aereo, la sicurezza di chi vive vicino a un torrente. Eppure la pioggia di domani è il risultato di processi che hai già incontrato in questo libro: l'acqua che evapora e condensa (Capitolo 2), l'aria che si scalda in modo diverso sulla terra e sul mare, la pressione che cambia da un luogo all'altro e i venti che ne derivano, deviati dalla rotazione terrestre (Capitolo 13).

In questo capitolo seguiremo l'acqua nell'atmosfera: vedremo quanto vapore può contenere l'aria, perché a un certo punto si formano nebbie e nubi e come da queste cadono pioggia, neve e grandine. Poi incontreremo le grandi «protagoniste» del tempo alle nostre latitudini, le masse d'aria e i fronti, e capiremo come lavora chi prepara le previsioni. Nella seconda parte del capitolo allargheremo lo sguardo dai singoli giorni ai decenni: passeremo dal *tempo* al *clima*, impareremo a classificare i climi della Terra e dell'Italia e affronteremo una delle questioni più importanti del nostro secolo, il riscaldamento globale.

14.1 L'umidità dell'aria

14.1.1 Quanto vapore può contenere l'aria

L'aria contiene sempre una certa quantità di **vapore acqueo**, un gas invisibile che proviene dall'evaporazione dei mari, dei laghi, dei suoli bagnati e dalla traspirazione delle piante. Nell'aria secca dei deserti freddi il vapore è quasi assente; nell'aria calda e afosa delle regioni equatoriali può arrivare a circa il 4 % del volume (Capitolo 13).

La quantità di vapore presente in un metro cubo d'aria si chiama **umidità assoluta** e si esprime in grammi al metro cubo (g/m³). Questa quantità, però, non può crescere a piacere: a ogni temperatura esiste un valore massimo di vapore che l'aria può contenere. Quando questo valore è raggiunto l'aria si dice **satura**: se si aggiunge altro vapore, o se l'aria si raffredda, l'eccesso *condensa* in goccioline d'acqua. Il valore massimo cresce molto rapidamente con la temperatura, come mostrano la Tabella 14.1 e la Figura 14.1: un metro cubo d'aria a 30 °C può contenere più di sei volte il vapore che contiene a 0 °C.

Tabella 14.1 Massa di vapore acqueo contenuta in 1 m³ di aria satura a varie temperature (sopra acqua liquida; valori arrotondati, alla pressione del livello del mare).

Temperatura (°C)	−10	−5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Vapore a saturazione (g/m³)	2,4	3,4	4,8	6,8	9,4	12,8	17,3	23,0	30,3	39,6	51,1

14.1.2 Umidità relativa e punto di rugiada

Sapere che in un metro cubo d'aria ci sono 9 g di vapore non ci dice se quell'aria è «umida» o «secca»: a 10 °C è quasi satura (9 g su un massimo di 9,4 g), a 30 °C è piuttosto secca (9 g su un massimo di 30,3 g). Per questo i meteorologi usano soprattutto l'**umidità relativa** (UR), che confronta il vapore presente con quello massimo possibile alla stessa temperatura:

$$\text{UR} = \frac{\text{vapore presente (g/m}^3\text{)}}{\text{vapore a saturazione alla stessa temperatura (g/m}^3\text{)}} \times 100$$

L'umidità relativa è una percentuale: vale 100 % nell'aria satura, intorno al 20–30 % in una giornata molto secca, oltre l'80 % in una giornata afosa o nebbiosa. Per stare bene in un ambiente chiuso l'umidità ideale è fra il 40 % e il 60 % circa.

Se raffreddiamo una massa d'aria senza aggiungere né togliere vapore, la sua umidità assoluta resta la stessa, ma il valore di saturazione diminuisce; l'umidità relativa quindi *aumenta*, finché l'aria diventa satura. La temperatura alla quale questo accade si chiama **punto di rugiada**. Se il raffreddamento continua, il vapore in eccesso condensa. Il punto di rugiada è una misura molto utile perché dipende soltanto dalla quantità di vapore presente: più è alto, più l'aria è carica di vapore. Quando la temperatura dell'aria e il punto di rugiada sono molto vicini, l'aria è prossima alla saturazione e c'è da aspettarsi nebbia o nubi basse.

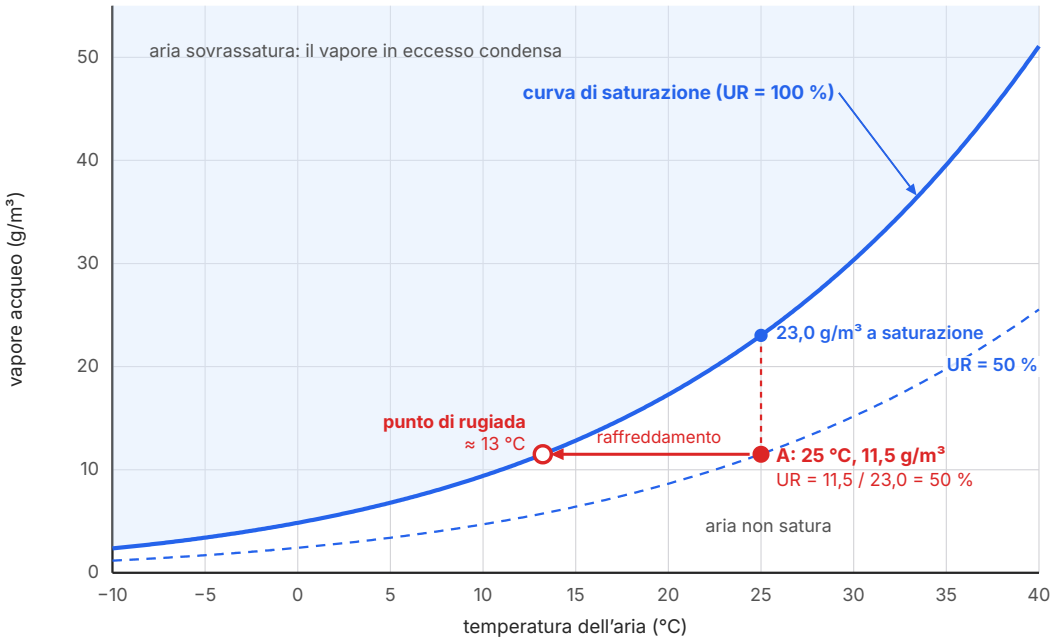


Figura 14.1 Curva di saturazione del vapore acqueo, calcolata con una formula empirica dai valori di pressione di vapore saturo. L'aria nel punto A (25 °C, 11,5 g/m³) ha un'umidità relativa del 50 %; raffreddandosi senza perdere vapore (freccia rossa) diventa satura a circa 13 °C, il suo punto di rugiada. La curva tratteggiata riunisce i punti con umidità relativa del 50 %.

ESEMPIO SVOLTO

Umidità relativa e punto di rugiada con la tabella

Problema. In un pomeriggio d'estate l'aria è a 25 °C e contiene 11,5 g/m³ di vapore. Calcola l'umidità relativa. Di notte la temperatura scende a 12 °C: che cosa succede?

Soluzione. Dalla Tabella 14.1, a 25 °C l'aria satura contiene 23,0 g/m³. Quindi UR = 11,5 / 23,0 × 100 = 50 %. Per trovare il punto di rugiada cerchiamo la temperatura alla quale 11,5 g/m³ è il valore di saturazione: sta fra 10 °C (9,4 g/m³) e 15 °C (12,8 g/m³), circa a 13 °C (Figura 14.1). A 12 °C l'aria è quindi già scesa sotto il punto di rugiada: è satura, e il vapore in eccesso condensa sulle superfici fredde (rugiada) o nell'aria (nebbia). A 12 °C l'aria satura contiene circa 10,7 g/m³, quindi condensa circa 11,5 − 10,7 ≈ 0,8 g di acqua per ogni metro cubo d'aria.

ERRORE FREQUENTE

«In inverno l'aria è più umida che in estate, perché l'umidità relativa è più alta.» Non è detto: l'umidità *relativa* è alta d'inverno perché l'aria fredda si satura con poco vapore. Una giornata nebbiosa di gennaio a 2 °C con UR del 100 % contiene circa 5,6 g/m^3 di vapore; un pomeriggio di luglio a 32 °C con UR del 40 % ne contiene circa 13,5 g/m^3, più del doppio. Per confrontare la quantità di vapore in situazioni diverse si usano l'umidità assoluta o il punto di rugiada, non l'umidità relativa.

14.1.3 Come si misura l'umidità

Gli strumenti che misurano l'umidità si chiamano **igrometri**. Il più antico ancora in uso è l'**igrometro a capello**, ideato dallo scienziato ginevrino Horace-Bénédict de Saussure nel 1783: un fascio di capelli sgrassati si allunga quando l'aria è umida e si accorcia quando è secca, e il movimento è trasmesso a un indice. Lo **psicrometro** è formato da due termometri affiancati, uno dei quali ha il bulbo avvolto in una garza bagnata. L'acqua della garza evapora e, per evaporare, sottrae calore al bulbo, che segna una temperatura più bassa; l'evaporazione è tanto più intensa quanto più l'aria è secca, perciò dalla differenza fra le due temperature si ricava l'umidità relativa con apposite tabelle. Oggi le stazioni meteorologiche e i termoigrometri domestici usano soprattutto sensori elettronici, nei quali una sottile pellicola assorbe più o meno vapore e cambia le sue proprietà elettriche.

ESEMPIO SVOLTO

Esperienza di laboratorio: misurare il punto di rugiada

Materiale: un barattolo di metallo lucido, acqua, cubetti di ghiaccio, un termometro, un cucchiaio.

Procedimento. Riempi il barattolo d'acqua a temperatura ambiente e misura la temperatura dell'aria della stanza. Aggiungi un cubetto di ghiaccio alla volta, mescolando lentamente con il termometro immerso. Osserva la superficie esterna del barattolo: nel momento in cui si appanna, leggi la temperatura dell'acqua.

Interpretazione. Lo strato d'aria a contatto con il metallo si raffredda fino alla temperatura dell'acqua; quando raggiunge il punto di rugiada, il vapore condensa in un velo di goccioline. La temperatura letta è quindi una stima del punto di rugiada. Con la Tabella 14.1 puoi calcolare il vapore presente nell'aria e l'umidità relativa della stanza. Ripeti la misura in un giorno di pioggia e in un giorno secco e confronta i risultati.

14.2 Condensazione: nebbie e nubi

14.2.1 I nuclei di condensazione

Perché il vapore condensi non basta che l'aria sia satura: le molecole d'acqua hanno bisogno di una superficie su cui raccogliersi. Nell'atmosfera questa funzione è svolta da particelle minuscole, con dimensioni dell'ordine di un decimo di micrometro, chiamate **nuclei di condensazione**: cristallini di sale marino, polveri del suolo, fumo e ceneri, particelle prodotte dalle attività umane e dagli incendi. Su ciascun nucleo si forma una gocciolina di circa un centesimo di millimetro di diametro. In un'aria perfettamente pulita il vapore potrebbe restare «sovrassaturo» ben oltre il 100 % di umidità relativa senza condensare; nell'atmosfera reale i nuclei sono così numerosi che la condensazione comincia appena si raggiunge la saturazione.

14.2.2 Nebbia, rugiada e brina

La **nebbia** è una nube che si forma a contatto con il suolo: un'enorme quantità di goccioline sospese che riduce la visibilità a meno di 1 km (con visibilità maggiore si parla di foschia). Si forma quando l'aria vicino al suolo si raffredda fino al punto di rugiada, in due modi principali.

- La **nebbia da irraggiamento** nasce nelle notti serene e senza vento, quando il suolo perde calore irraggiando nello spazio e raffredda lo strato d'aria che lo tocca. È tipica delle pianure e delle valli in autunno e in inverno, come la Pianura Padana, dove l'aria fredda e umida ristagna sotto un'inversione termica (Capitolo 13) e la nebbia può durare anche per giorni.
- La **nebbia da avvezione** si forma quando aria calda e umida scorre sopra una superficie più fredda, come il mare in primavera o un terreno innevato, e si raffredda dal basso. È frequente sulle coste e sui mari freddi.

Se l'aria si raffredda soltanto a contatto con oggetti molto freddi, il vapore condensa direttamente su di essi. Nelle notti serene l'erba, le foglie e i tetti delle auto si raffreddano per irraggiamento più dell'aria circostante: quando la loro temperatura scende sotto il punto di rugiada si coprono di goccioline di **rugiada**. Se il punto di rugiada è inferiore a 0 °C il vapore passa direttamente allo stato solido, con un brinamento (Capitolo 2), e le superfici si coprono di aghi di ghiaccio: è la **brina**. Diverso è il caso della *galaverna*, che si forma quando le goccioline di una nebbia, rimaste liquide sotto 0 °C, gelano nell'urto con rami e fili, ricoprendoli di incrostazioni bianche.

14.2.3 Perché l'aria che sale si raffredda

Le **nubi** sono ammassi di goccioline d'acqua o di cristalli di ghiaccio sospesi nell'atmosfera, a una certa altezza dal suolo. Quasi sempre si formano perché una massa d'aria *sale*. Salendo, l'aria trova una pressione sempre più bassa (Capitolo 13), quindi si espande; espandendosi com-

pie lavoro sull'aria circostante a spese della propria energia interna, e la sua temperatura diminuisce anche senza cedere calore all'esterno. Questo raffreddamento per espansione si chiama **raffreddamento adiabatico**: è lo stesso fenomeno per cui il gas che esce da una bomboletta spray si raffredda.

Finché l'aria non è satura si raffredda rapidamente salendo. Quando raggiunge il punto di rugiada, alla quota detta *livello di condensazione*, comincia la formazione della nube: la base piatta dei cumuli in una giornata estiva segna proprio questa quota. Da lì in su il vapore che condensa libera il suo calore latente (Capitolo 2) e il raffreddamento rallenta. Quando l'aria scende avviene il contrario: si comprime e si riscalda.

L'aria può essere costretta a salire in tre modi principali.

- **Sollevamento convettivo.** Il suolo scaldato dal Sole riscalda l'aria sovrastante, che diventa meno densa e sale in «bolle» chiamate termiche, sfruttate da alianti e uccelli; si formano così i cumuli dei pomeriggi estivi.
- **Sollevamento orografico.** Un vento che incontra una catena montuosa è costretto a risalirne il versante (Figura 14.2).
- **Sollevamento frontale.** Quando una massa d'aria calda incontra una massa d'aria fredda, l'aria calda, meno densa, sale sopra quella fredda (paragrafo 14.4).

Anche la convergenza dei venti al centro di un'area di bassa pressione, dove l'aria è costretta a salire, produce nubi: è il motivo per cui un ciclone porta di solito cielo coperto e piogge, mentre in un anticiclone l'aria scende, si riscalda e il cielo resta sereno (Capitolo 13).

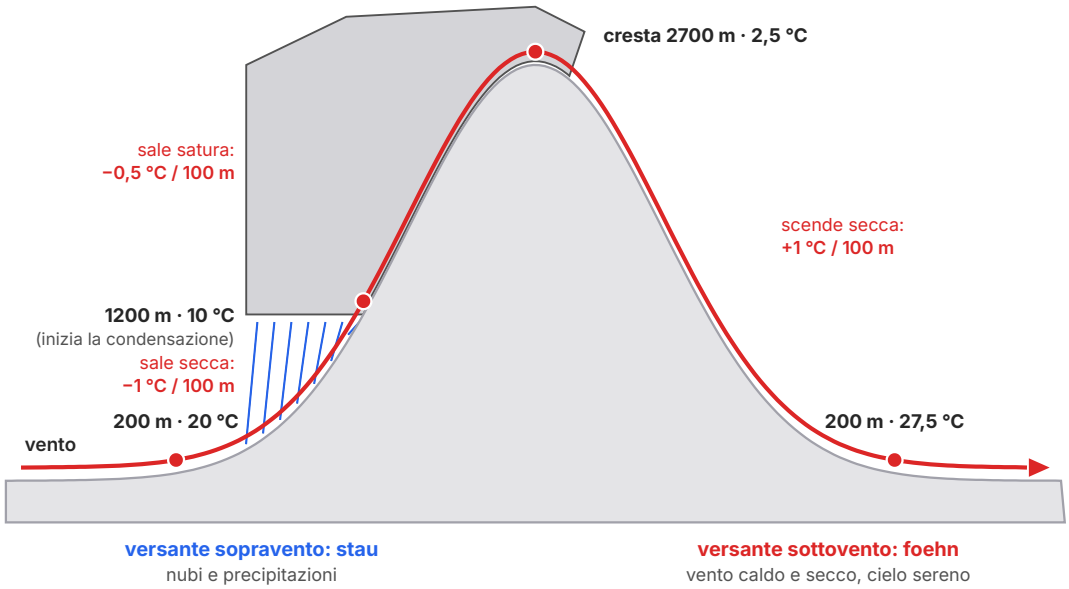


Figura 14.2 Sollevamento orografico. Sul versante sopravento l'aria sale, si raffredda e, superato il livello di condensazione (base piatta della nube, 1200 m), forma nubi e precipitazioni (*stau*). Sul versante sottovento l'aria, ormai più secca, scende riscaldandosi di 1 °C ogni 100 m e arriva a valle come vento caldo e secco (*foehn*). Le temperature sono calcolate nell'approfondimento «Stau e foehn in numeri»; scala verticale esagerata.

Il fenomeno della Figura 14.2 ha due nomi tedeschi entrati nell'uso dei meteorologi: **stau** («ristagno») indica l'accumulo di nubi e di piogge sul versante sopravento, **foehn** (o favonio) il vento caldo e secco che scende sul versante opposto. Sulle Alpi il foehn soffia sui versanti svizzero e austriaco quando i venti vengono da sud, e sulle valli italiane quando i venti vengono da nord: in inverno può far salire la temperatura di molti gradi in poche ore e fondere rapidamente la neve. Lo stesso meccanismo spiega perché i versanti sottovento delle catene montuose sono spesso più aridi di quelli sopravento: si dice che si trovano «all'ombra pluviometrica» delle montagne.

APPROFONDIMENTO · STAU E FOEHN IN NUMERI

Finché l'aria non è satura si raffredda di circa **1 °C ogni 100 m** di salita. Quando raggiunge il punto di rugiada, alla quota detta *livello di condensazione*, comincia la formazione della nube: la base piatta dei cumuli in una giornata estiva segna proprio questa quota. Da lì in su il vapore che condensa libera il suo calore latente (Capitolo 2) e frena il raffreddamento, che scende a circa **0,5 °C ogni 100 m** (il valore preciso varia fra circa 0,4 e 0,9 °C ogni 100 m con la temperatura). Quando l'aria scende avviene il contrario: si comprime e si riscalda, di circa 1 °C ogni 100 m. Non confondere questi valori con il gradiente medio di 6,5 °C/km dell'atmosfera standard (Capitolo 13): quello descrive come varia la temperatura dell'aria ferma con la quota, questi descrivono che cosa succede a una massa d'aria che si sposta in verticale.

Stau e foehn: i conti della Figura 14.2

Problema. Aria a 20 °C, a 200 m di quota, viene spinta dal vento contro una catena montuosa alta 2700 m. Il livello di condensazione è a 1200 m. Quale temperatura ha l'aria sulla cresta? E quando ridiscende a 200 m sul versante opposto?

Soluzione. Da 200 a 1200 m l'aria sale di 1000 m senza essere satura: si raffredda di 1 °C ogni 100 m, cioè di 10 °C, e arriva a 10 °C. Da 1200 a 2700 m sale di altri 1500 m, satura, raffreddandosi di 0,5 °C ogni 100 m: 1500 / 100 × 0,5 = 7,5 °C in meno, quindi sulla cresta ha 2,5 °C. Nel frattempo ha perso gran parte del suo vapore con le precipitazioni sul versante sopravento. Scendendo per 2500 m sul versante sottovento si riscalda di 1 °C ogni 100 m, cioè di 25 °C: arriva a valle a 27,5 °C. Alla stessa quota di partenza l'aria è più calda di 7,5 °C e molto più secca.

14.2.4 I dieci generi di nubi

La classificazione delle nubi che usiamo ancora oggi risale al farmacista e meteorologo dilettante inglese Luke Howard, che nel 1803 propose di chiamarle con nomi latini, come si fa per le specie dei viventi. I nomi si basano su poche radici: *cirrus* («ricciolo»), per le nubi alte e filamentose; *cumulus* («mucchio»), per le nubi a sviluppo verticale, con la base piatta e la sommità a cavolfiore; *stratus* («strato»), per le nubi estese orizzontalmente; *nimbus* («nembo»), per le nubi che portano precipitazioni. Combinando forma e quota, l'Organizzazione meteorologica mondiale (WMO) distingue **dieci generi** (Tabella 14.2 e Figura 14.3).

Tabella 14.2 I dieci generi di nubi, raggruppati per quota della base alle medie latitudini (i limiti fra i piani sono indicativi e in parte si sovrappongono).

Piano	Genere (sigla)	Aspetto e tempo associato
Nubi alte (5–13 km), di cristalli di ghiaccio	Cirri (Ci)	Filamenti bianchi e sottili; spesso annunciano l'arrivo di un fronte caldo.
	Cirrocumuli (Cc)	Piccoli fiocchi bianchi in file regolari («cielo a pecorelle»).
	Cirrostrati (Cs)	Velo lattiginoso trasparente; producono l'alone intorno al Sole o alla Luna.
Nubi medie (2–7 km)	Altocumuli (Ac)	Banchi di masse arrotondate grigio-bianche, più grandi dei cirrocumuli.
	Altostrati (As)	Strato grigio uniforme; il Sole appare come dietro un vetro smerigliato.
	Nembostrati (Ns)	Strato spesso e scuro, dalla base bassa fino a vari kilometri; piogge o nevicate continue.
Nubi basse (0–2 km)	Stratocumuli (Sc)	Banchi grigi a rotoli o lastre, con zone più chiare; di solito niente precipitazioni o piovaschi deboli.
	Strati (St)	Strato grigio uniforme e basso, simile a una nebbia sollevata; pioviggine.
Nubi a sviluppo verticale (base bassa)	Cumuli (Cu)	Nubi isolate a cavolfiore con base piatta; bel tempo, se restano piccoli.
	Cumulonembi (Cb)	Torri altissime fino alla tropopausa, con sommità a incudine; rovesci, temporali, grandine.

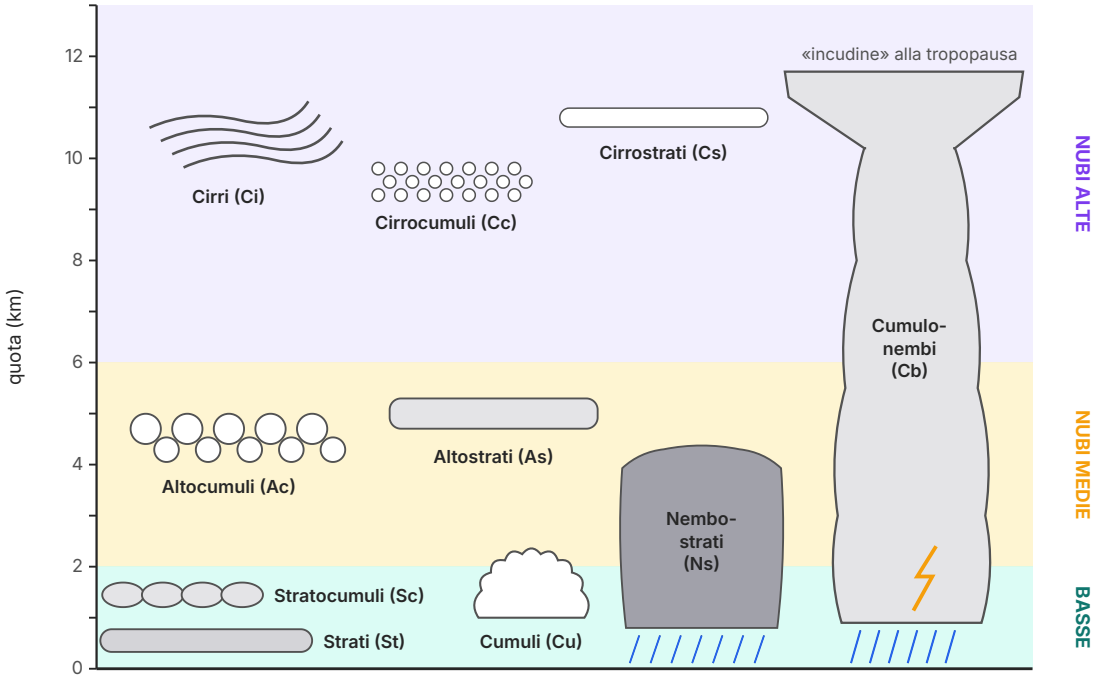


Figura 14.3 I dieci generi di nubi disposti secondo la quota alle medie latitudini (schema, forme stilizzate). I nembostrati e i cumulonembi si estendono su più piani; la sommità piatta dei cumulonembi, l'incudine, si allarga quando la nube raggiunge la tropopausa, che ne blocca la salita.

14.3 Le precipitazioni

14.3.1 Dalla gocciolina alla goccia di pioggia

Le goccioline di una nube sono così piccole, circa un centesimo di millimetro, che restano sospese sostenute dai moti dell'aria. Una goccia di pioggia di 2 mm di diametro ha un diametro 200 volte maggiore e quindi un volume circa 8 milioni di volte maggiore (200 × 200 × 200): per formarla devono riunirsi milioni di goccioline. Ciò avviene in due modi. Nelle nubi «calde», tutte al di sopra di 0 °C, le goccioline più grandi cadono più velocemente, urtano quelle più piccole e le inglobano (*coalescenza*). Nelle nubi che si spingono a quote dove la temperatura è inferiore a 0 °C convivono goccioline d'acqua sopraffusa e cristalli di ghiaccio: i cristalli crescono a spese delle goccioline, diventano abbastanza pesanti da cadere e, attraversando strati più caldi, fondono in pioggia. Alle medie latitudini la maggior parte delle piogge nasce proprio così, come neve che fonde durante la caduta.

Si chiamano **precipitazioni** tutte le forme di acqua, liquida o solida, che cadono dalle nubi e raggiungono il suolo.

- **Pioviggine**: gocce piccolissime (diametro inferiore a 0,5 mm) e fitte, che cadono da strati bassi.
- **Pioggia**: gocce da 0,5 mm a qualche millimetro; si parla di *rovesci* quando la pioggia è intensa, improvvisa e di breve durata, tipica dei cumuli e dei cumulonembi.
- **Neve**: cristalli di ghiaccio a simmetria esagonale, spesso riuniti in fiocchi, che arrivano al suolo senza fondere quando l'aria sotto la nube è abbastanza fredda, vicino o sotto 0 °C.
- **Grandine**: chicchi di ghiaccio con diametro di almeno 5 mm, che si formano soltanto nei cumulonembi.

La **grandine** merita una spiegazione, perché cade soprattutto in estate, quando al suolo fa caldo. Dentro un cumulonembo correnti ascendenti violente trasportano verso l'alto le gocce d'acqua, che gelano nelle zone più fredde della nube; il chicco ricade, si ricopre di un velo d'acqua, viene di nuovo sollevato e il velo gela. Dopo vari «viaggi» il chicco è formato da strati concentrici, come una cipolla, ed è così pesante che le correnti non riescono più a sostenerlo. Le grandinate più violente, con chicchi grandi come noci o più, si verificano nei pomeriggi estivi e possono distruggere in pochi minuti vigneti e frutteti.

14.3.2 Misurare le precipitazioni

La quantità di precipitazione si misura con il **pluviometro**, un recipiente con un imbuto di apertura nota che raccoglie l'acqua caduta. Il risultato si esprime in **millimetri**: è lo spessore dello strato d'acqua che si formerebbe su una superficie orizzontale se l'acqua non scorresse via, non evaporasse e non penetrasse nel suolo. La neve si fonde prima della misura. I pluviometri moderni sono spesso «a vaschetta basculante»: una piccola vaschetta si riempie, si ribalta quando ha raccolto una quantità prefissata d'acqua e invia un segnale elettrico, così da misurare anche l'intensità della pioggia nel tempo.

> **DA RICORDARE**
> 1 mm di pioggia = 1 litro d'acqua caduto su ogni metro quadrato. Infatti $1\ m^2 \times 1\ mm = 1\ m^2 \times 0{,}001\ m = 0{,}001\ m^3 = 1\ dm^3 = 1\ L$. In Italia le precipitazioni medie annue vanno da meno di 500 mm in alcune zone della Puglia e della Sicilia a oltre 3000 mm in alcune valli delle Prealpi Giulie, in Friuli; un temporale molto intenso può scaricare in un'ora alcune decine di millimetri.

14.3.3 Temporali e fulmini

Il **temporale** è un fenomeno legato ai cumulonembi, accompagnato da fulmini e tuoni, rovesci di pioggia, a volte grandine e forti raffiche di vento. Si forma quando l'aria vicino al suolo è calda e umida e l'aria in quota è molto più fredda: una bolla d'aria che comincia a salire resta

più calda dell'ambiente e continua a salire sempre più velocemente, alimentata dal calore latente liberato dalla condensazione. Una cella temporalesca attraversa tre fasi: nella fase di *sviluppo* un cumulo cresce rapidamente verso l'alto, sostenuto da correnti ascendenti; nella fase di *maturità*, che è la più violenta, la nube raggiunge la tropopausa e forma l'incudine, mentre la pioggia trascina verso il basso correnti discendenti fredde che arrivano al suolo come raffiche; nella fase di *dissipazione* prevalgono le correnti discendenti, la nube perde alimentazione e si disfa. Una singola cella dura in genere meno di un'ora, ma più celle possono susseguirsi o organizzarsi in sistemi che durano molte ore.

Nel cumulonembo gli urti fra cristalli di ghiaccio, chicchi di neve tonda e goccioline separano le cariche elettriche: in genere la parte alta della nube si carica positivamente e la parte inferiore negativamente. Quando la differenza di carica diventa enorme, l'aria non riesce più a isolarla e si produce una scarica elettrica, il **fulmine**, all'interno della nube, fra nubi diverse oppure fra la nube e il suolo. Il canale del fulmine si riscalda in una frazione di secondo fino a circa 30 000 °C; l'aria si dilata in modo esplosivo e produce l'onda sonora che sentiamo come **tuono**.

COLLEGAMENTI

Fisica e sicurezza. La luce del lampo ci arriva in pratica istantaneamente, mentre il suono del tuono viaggia nell'aria a circa 340 m/s, cioè circa 1 km ogni 3 s. Contando i secondi fra lampo e tuono e dividendo per 3 si ottiene la distanza del fulmine in kilometri: 6 s corrispondono a circa 2 km. Se il tuono si sente, il temporale è abbastanza vicino da essere pericoloso. Durante un temporale è bene rifugiarsi in un edificio o in un'automobile chiusa (la carrozzeria metallica conduce la corrente all'esterno dell'abitacolo) e, all'aperto, evitare alberi isolati, cime, creste e specchi d'acqua.

14.4 Masse d'aria, fronti e perturbazioni

14.4.1 Le masse d'aria

Quando l'aria ristagna per giorni sopra una regione molto estesa e uniforme, un oceano o un continente, acquista temperatura e umidità simili a quelle della superficie sottostante. Si forma così una **massa d'aria**: un enorme volume d'aria, largo anche migliaia di kilometri, con caratteristiche omogenee in orizzontale. Le masse d'aria si classificano in base alla regione d'origine: la latitudine ne determina la temperatura, la natura della superficie l'umidità (Tabella 14.3). Quando una massa d'aria si sposta porta con sé le sue caratteristiche e cambia il tempo delle regioni che attraversa.

Tabella 14.3 I principali tipi di masse d'aria e alcuni esempi che interessano l'Italia.

Tipo (sigla)	Origine	Caratteristiche	Effetti sull'Italia
Polare marittima (mP)	Atlantico settentrionale	fresca e umida	piogge e rovesci, soprattutto in autunno e primavera
Polare continentale (cP)	Russia e Siberia	fredda e secca	ondate di gelo invernali, a volte con nevicate fino al mare sul versante adriatico
Artica (A)	Mar Glaciale Artico	molto fredda	irruzioni fredde, rare e intense
Tropicale marittima (mT)	Atlantico subtropicale (zona delle Azzorre)	calda e umida	estati calde e serene sotto l'anticiclone; afa
Tropicale continentale (cT)	Sahara	calda e secca	ondate di calore estive, polvere del deserto nel cielo

14.4.2 I fronti

Due masse d'aria con temperatura e densità diverse non si mescolano facilmente: restano separate da una zona di transizione inclinata chiamata superficie frontale. La linea in cui questa superficie incontra il suolo è il **fronte**. Al passaggio di un fronte il tempo cambia: varia la temperatura, il vento ruota, la pressione cambia andamento e spesso si formano nubi e precipitazioni, perché in ogni caso l'aria calda, meno densa, è costretta a salire sopra quella fredda (Figura 14.4).

- Nel **fronte freddo** è l'aria fredda ad avanzare: più densa, si incunea sotto l'aria calda e la solleva bruscamente. Si formano cumulonembi: il passaggio è breve ma intenso, con rovesci, temporali e raffiche; poi la temperatura cala e il cielo si rasserena.
- Nel **fronte caldo** è l'aria calda ad avanzare, scivolando lentamente sopra quella fredda: il cielo si copre gradualmente, dai cirri fino ai nembostrati, e cadono piogge deboli ma continue; dopo il passaggio la temperatura sale.
- Il fronte freddo è in genere più veloce di quello caldo e può raggiungerlo: si forma allora un **fronte occluso**.

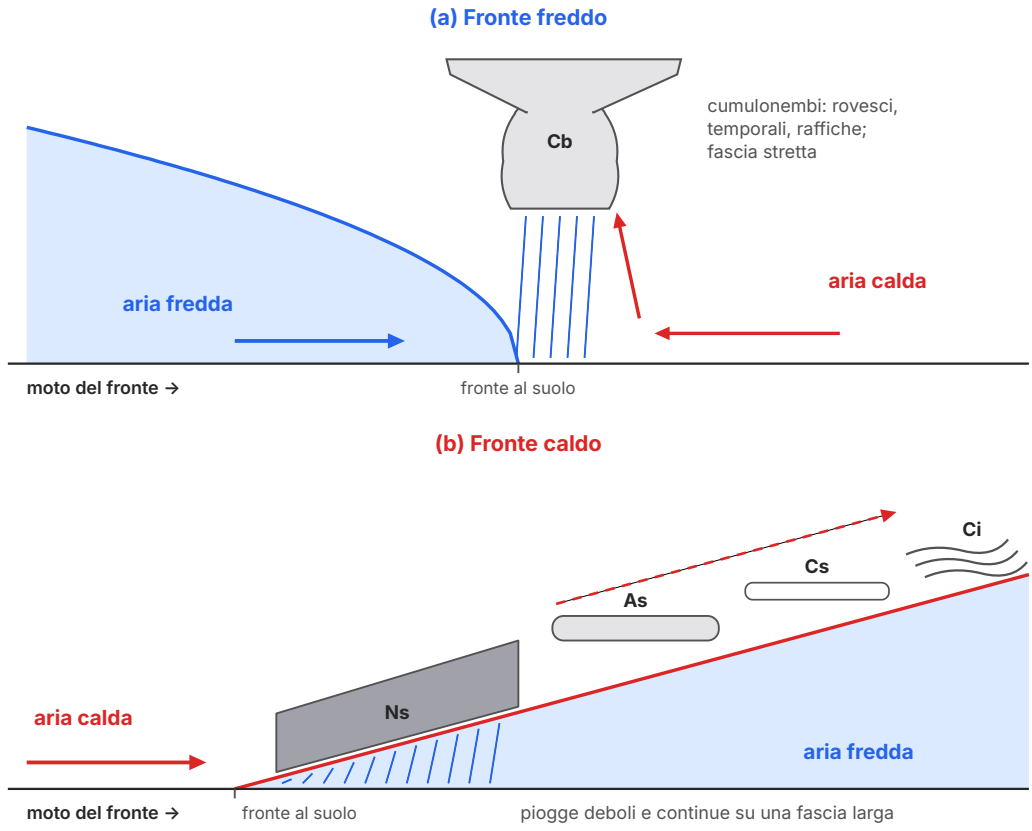


Figura 14.4 Sezioni verticali di un fronte freddo (a) e di un fronte caldo (b); in entrambi i casi il fronte si sposta verso destra. Nel fronte freddo l'aria fredda solleva bruscamente l'aria calda lungo una superficie ripida, con cumulonembi e rovesci in una fascia stretta; nel fronte caldo l'aria calda risale lentamente sopra l'aria fredda, con la sequenza Ci → Cs → As → Ns e piogge estese. La scala verticale è molto esagerata: le superfici frontali reali sono assai meno inclinate.

14.4.3 I cicloni extratropicali

Alle medie latitudini le masse d'aria polari e quelle tropicali si fronteggiano lungo una fascia chiamata fronte polare, sopra la quale scorrono i venti occidentali (Capitolo 13). Lungo questo fronte si formano continuamente vortici di bassa pressione larghi 1000–2000 km, che ruotano in senso antiorario nell'emisfero boreale, con un fronte caldo nella parte anteriore e un fronte freddo in quella posteriore (Figura 14.5): sono i **cicloni extratropicali**, le «perturbazioni» dei bollettini meteorologici, che si spostano in genere da ovest verso est e vivono alcuni giorni. Molte raggiungono l'Italia dall'Atlantico; altre nascono nel Mediterraneo stesso, soprattutto nel Golfo di Genova, sottovento alle Alpi, e attraversano la penisola portando piogge, nevicate e mareggiate.

14.4.4 Cicloni tropicali e tornado

I **cicloni tropicali** sono vortici di bassa pressione più piccoli dei cicloni extratropicali (qualche centinaio di kilometri) ma molto più violenti. Si formano sopra gli oceani caldi, con acqua superficiale oltre circa 26–27 °C, fra circa 5° e 20° di latitudine (non all'equatore, dove la deviazione di Coriolis è nulla e il vortice non può avviarsi), e traggono energia dal calore latente del vapore che condensa: per questo si indeboliscono rapidamente sulla terraferma. Nell'Atlantico si chiamano **uragani**, nel Pacifico nord-occidentale **tifoni**. I danni maggiori sono spesso causati dalle inondazioni e dall'innalzamento del mare lungo le coste.

Il **tornado** è invece un vortice piccolissimo e brevissimo, largo da qualche decina a qualche centinaio di metri, che scende da un cumulonembo fino al suolo, con i venti più violenti osservati sulla Terra. Ne nascono anche in Italia, soprattutto in Pianura Padana; quelli che si formano sul mare si chiamano trombe marine.

APPROFONDIMENTO · LE PREVISIONI E LA CARTA DEL TEMPO

Una previsione meteorologica si costruisce in tre passi: osservare lo stato attuale dell'atmosfera, calcolarne l'evoluzione e interpretare i risultati.

- **Osservazioni.** Migliaia di stazioni a terra, navi e boe misurano pressione, temperatura, umidità, vento e precipitazioni alle stesse ore in tutto il mondo; palloni sonda lanciati due volte al giorno misurano le stesse grandezze in quota. I **satelliti meteorologici** geostazionari, a circa 36 000 km sopra l'equatore, fotografano continuamente lo stesso emisfero e permettono di seguire il moto delle nubi; quelli in orbita polare, a circa 800 km, passano più vicini e misurano la temperatura dell'atmosfera a varie quote. I **radar meteorologici** emettono onde elettromagnetiche che vengono riflesse dalle gocce e dai fiocchi: mostrano dove sta piovendo e con quale intensità.
- **Modelli numerici.** I dati vengono inseriti in programmi che risolvono le equazioni della fisica dell'atmosfera su una griglia tridimensionale di punti, calcolando passo dopo passo il tempo dei giorni successivi. Servono supercalcolatori fra i più potenti al mondo; uno dei centri principali, il Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (ECMWF), ha un grande centro di calcolo a Bologna.
- **Interpretazione.** I meteorologi confrontano i risultati di modelli diversi, li correggono con l'esperienza e preparano bollettini e carte.

Anche con i calcolatori migliori le previsioni hanno un limite: l'atmosfera è un sistema caotico, nel quale piccolissimi errori nei dati iniziali crescono con il tempo. Oggi le previsioni sono in genere affidabili per i primi giorni e restano utili fino a circa una settimana o poco più; per questo i centri meteorologici calcolano decine di previsioni con dati iniziali leggermente diversi e forniscono anche la *probabilità* che un evento si verifichi.

Il risultato si riassume nella **carta del tempo** (Figura 14.5): le isobare mostrano la distribuzione della pressione al suolo, le lettere B e A indicano i centri di bassa e di alta pressione, i simboli colorati indicano i fronti. Dove le isobare sono fitte la pressione cambia rapidamente da un luogo all'altro e il vento è forte. Nell'emisfero boreale il vento ruota in senso antiorario intorno alle basse pressioni e in senso orario intorno alle alte (Capitolo 13).

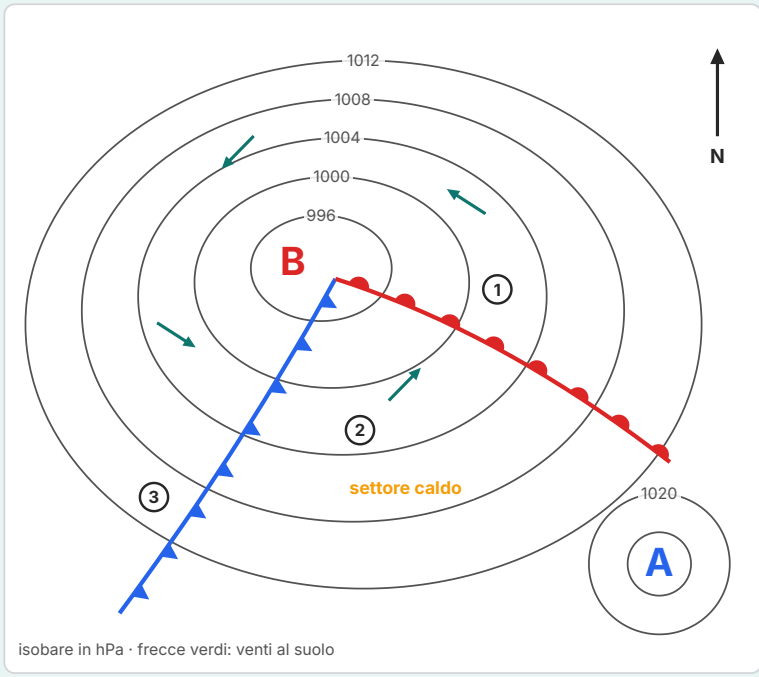


Figura 14.5 Carta del tempo schematica (non in scala) con un ciclone extratropicale dell'emisfero boreale: fronte caldo nella parte anteriore, fronte freddo in quella posteriore e settore caldo fra i due; i simboli dei fronti sono disegnati dalla parte verso cui il fronte si muove. A destra la legenda dei simboli usati sulle carte. I punti numerati servono per l'esercizio 26.

APPROFONDIMENTO

Dalla «previsione» di FitzRoy ai supercalcolatori

Il primo servizio pubblico di previsioni del tempo nacque in Gran Bretagna con l'ammiraglio Robert FitzRoy, che negli anni Sessanta dell'Ottocento raccoglieva per telegrafo le osservazioni di molte stazioni costiere e pubblicava sui giornali le sue «previsioni», una parola che proprio lui rese popolare. Lo scopo era salvare vite: avvisare i pescatori dell'arrivo delle tempeste. Nel 1922 il matematico inglese Lewis Fry Richardson pubblicò il primo tentativo di prevedere il tempo risolvendo a mano le equazioni dell'atmosfera; il suo calcolo, durato settimane, diede un risultato sbagliato, ma l'idea era giusta. Divenne realizzabile solo con i calcolatori elettronici: la prima previsione numerica riuscita fu calcolata nel 1950 su uno dei primi computer, l'ENIAC. Oggi una previsione per i giorni successivi si calcola in meno di un'ora.

14.5 Il clima

14.5.1 Tempo e clima

Il *tempo meteorologico* è lo stato dell'atmosfera in un luogo e in un momento precisi: oggi a Milano piove e ci sono 12 °C. Il **clima** è invece l'insieme delle condizioni meteorologiche medie di una regione, con la loro variabilità e i loro valori estremi, calcolato su un periodo lungo. Per convenzione l'Organizzazione meteorologica mondiale usa periodi di 30 anni: le medie calcolate su questi periodi si chiamano **normali climatologiche** (l'ultima di riferimento è 1991–2020). In altre parole, il tempo cambia da un giorno all'altro, il clima descrive che cosa ci si deve aspettare.

Gli **elementi del clima** sono le grandezze che lo descrivono: soprattutto la temperatura e le precipitazioni, e poi l'umidità, la pressione, i venti, la nuvolosità e le ore di sole. I **fattori del clima** sono invece le cause che, in ogni luogo, determinano i valori di questi elementi.

- **Latitudine.** Determina l'inclinazione dei raggi solari e la durata del dì nelle varie stagioni (Capitolo 10), quindi l'energia che il suolo riceve: è il fattore principale.
- **Altitudine.** La temperatura diminuisce in media di circa 6,5 °C ogni 1000 m di quota (Capitolo 13); per questo in montagna si incontrano climi simili a quelli di latitudini molto più alte.
- **Vicinanza del mare.** L'acqua ha un calore specifico elevato (Capitolo 2) e si scalda e si raffredda lentamente: le località costiere hanno inverni più miti, estati più fresche e un'escursione annua minore delle località interne, che hanno un clima *continentale*.
- **Correnti marine.** Le correnti calde riscaldano le coste che lambiscono, quelle fredde le raffreddano e le rendono più aride: la Corrente del Golfo, per esempio, rende l'Europa nord-occidentale molto più mite di altre regioni alla stessa latitudine (Capitolo 15).
- **Rilievo.** Le catene montuose fanno da barriera ai venti e alle masse d'aria, e producono versanti piovosi e versanti asciutti (stau e foehn). Le Alpi, per esempio, riparano in parte la Pianura Padana dai venti freddi del nord.
- **Vegetazione e suolo.** Le foreste trattengono umidità e restituiscono vapore all'aria con la traspirazione; i suoli chiari, le nevi e i ghiacci riflettono molta radiazione (albedo elevata, Capitolo 13).

14.5.2 Il climogramma

Il clima di una località si rappresenta con il **climogramma** (o diagramma termopluviometrico): un grafico che riporta, mese per mese, la temperatura media con una linea e le precipitazioni medie con barre verticali, su due assi verticali diversi. Spesso si sceglie la scala in modo che 1 °C corrisponda a 2 mm di pioggia: con questa convenzione, i mesi in cui la linea delle tempera-

ture supera le barre delle precipitazioni sono mesi *aridi*, nei quali l'acqua che evapora è più di quella che cade. La Tabella 14.4 e la Figura 14.6 mostrano il climogramma di Roma.

Tabella 14.4 Temperature medie mensili e precipitazioni medie mensili a Roma (stazione di Ciampino; valori arrotondati e indicativi, basati sulle normali climatologiche 1971–2000 del Servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare).

Mese	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
T media (°C)	7,5	8,3	10,6	13,0	17,4	21,3	24,2	24,3	21,0	16,6	11,7	8,5
Precipitazioni (mm)	67	73	58	81	53	35	19	37	73	113	115	81

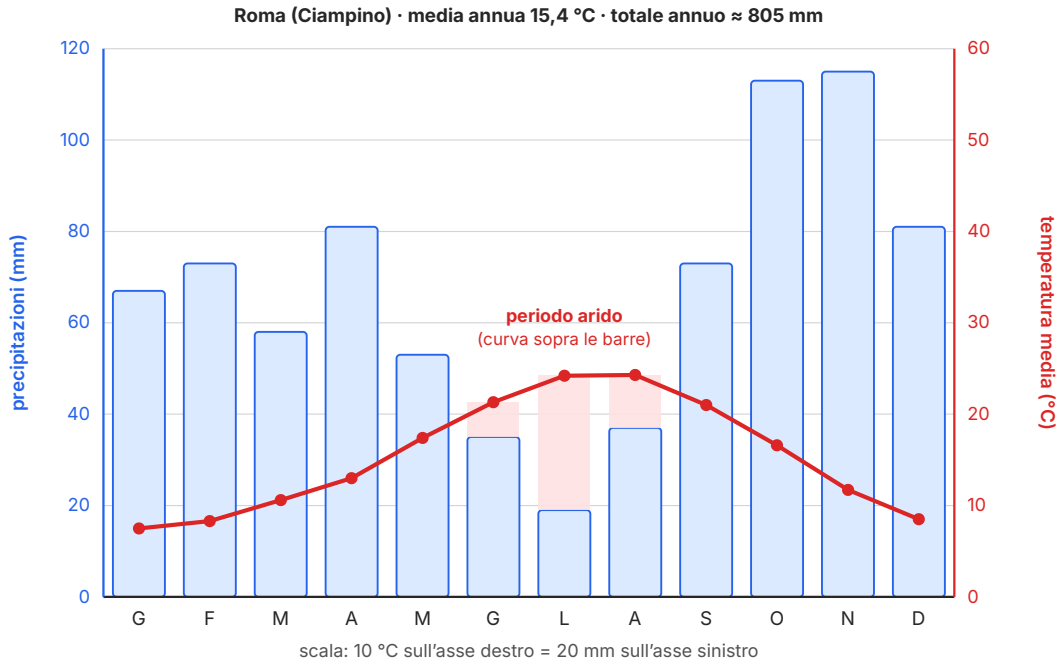


Figura 14.6 Climogramma di Roma costruito con i dati della Tabella 14.4: barre blu per le precipitazioni (asse sinistro), linea rossa per la temperatura media (asse destro, con 1 °C = 2 mm). Nei mesi di giugno, luglio e agosto la linea supera le barre: è il periodo arido tipico del clima mediterraneo. La temperatura media annua è di circa 15,4 °C, l'escursione annua di 16,8 °C.

14.5.3 La classificazione di Köppen

Per confrontare i climi del pianeta il climatologo Wladimir Köppen, nato in Russia da una famiglia tedesca, elaborò fra la fine dell'Ottocento e il 1936 una classificazione ancora oggi molto usata. La **classificazione di Köppen** si basa su due elementi facili da misurare, la temperatura e le precipitazioni, e sull'osservazione che i climi si riconoscono dalla vegetazione naturale che

permettono. Divide i climi in cinque gruppi principali, indicati da lettere maiuscole (Tabella 14.5); una seconda e una terza lettera indicano il regime delle piogge e il calore dell'estate. Per esempio **Csa** significa: clima temperato (C), con estate secca (s, dal tedesco *sommertrocken*), con estate calda, cioè con il mese più caldo sopra i 22 °C (a).

Tabella 14.5 I cinque gruppi climatici di Köppen, con i criteri principali (semplificati) e i biomi corrispondenti.

Gruppo	Criterio principale	Esempi di sottotipi	Biomi tipici
A tropicali umidi	tutti i mesi con temperatura media ≥ 18 °C	Af equatoriale sempre piovoso; Aw della savana, con stagione secca	foresta pluviale, savana
B aridi	evaporazione potenziale maggiore delle precipitazioni (soglia che dipende dalla temperatura)	BW desertico; BS della steppa	deserti, steppe
C temperati	mese più freddo fra −3 °C e 18 °C; mese più caldo > 10 °C	Cs mediterraneo; Cf umido senza stagione secca; Cw con inverno secco	macchia mediterranea, foreste di latifoglie
D continentali freddi	mese più freddo < −3 °C; mese più caldo > 10 °C	Df, Dw	taiga (foresta di conifere)
E polari	mese più caldo < 10 °C	ET della tundra (mese più caldo fra 0 e 10 °C); EF dei ghiacci perenni (< 0 °C)	tundra, deserti glaciali

Il limite di 10 °C per il mese più caldo non è casuale: corrisponde all'incirca al limite oltre il quale gli alberi non riescono a crescere, cioè al passaggio dalla foresta alla tundra. È un esempio del legame stretto fra clima e **biomi**, le grandi comunità di viventi che occupano le diverse regioni del pianeta e che studierai in biologia. Spesso alla classificazione si aggiunge un gruppo H per i climi di alta montagna, nei quali le condizioni cambiano rapidamente con la quota.

IN SINTESI

Come classificare un clima con Köppen (versione semplificata). 1) Il mese più caldo è sotto 10 °C? → **E**. 2) Le precipitazioni sono molto scarse rispetto all'evaporazione? → **B**. 3) Tutti i mesi sono ≥ 18 °C? → **A**. 4) Il mese più freddo è sotto −3 °C? → **D**; altrimenti → **C**. Poi: estate secca → s; inverno secco → w; nessuna stagione secca → f; mese più caldo ≥ 22 °C → a.

14.5.4 I climi dell'Italia

L'Italia si allunga per oltre 10 gradi di latitudine, è circondata dal mare e attraversata dalle Alpi e dagli Appennini: per questo, pur essendo un paese piccolo, ha climi molto diversi. Nella maggior parte del territorio il clima è temperato (gruppo C), ma con differenze importanti.

- **Clima mediterraneo** (Csa): coste tirreniche, ioniche e dell'Adriatico meridionale, isole. Inverni miti e piovosi, estati calde, soleggiate e secche, sotto l'anticiclone subtropicale. Roma ne è un esempio (Figura 14.6).
- **Clima padano** (Cfa, con caratteri continentali): Pianura Padana e Veneta. Lontana dall'influenza del mare aperto e chiusa da Alpi e Appennini, ha inverni freddi, con frequenti nebbie e inversioni termiche, ed estati calde e afose; le precipitazioni sono distribuite in tutto l'anno, con massimi in primavera e in autunno. L'escursione annua è maggiore che sulle coste.
- **Clima appenninico**: rilievi dell'Appennino. Con la quota le temperature diminuiscono, gli inverni diventano freddi e nevosi e le precipitazioni aumentano, soprattutto sui versanti esposti ai venti umidi occidentali.
- **Clima alpino**: arco alpino. Le temperature dipendono soprattutto dall'altitudine: nei fondovalle il clima è temperato o continentale, sopra il limite degli alberi (circa 2000 m) diventa simile alla tundra (ET), e sulle vette più alte i ghiacciai sono perenni.

COLLEGAMENTI

Geografia · Clima e paesaggio italiano. Il clima ha modellato il paesaggio e le attività umane che studi in geografia. L'olivo, che soffre le gelate intense, disegna quasi da solo la carta del clima mediterraneo; le risaie del Vercellese, del Novarese e della Lomellina sfruttano l'acqua dei fiumi alpini e le estati calde della pianura; nelle Alpi il clima di montagna sostiene pascoli, boschi e turismo invernale. Confronta la carta dei climi d'Italia con una carta delle colture e con una carta della densità di popolazione: quali somiglianze noti?

14.6 I cambiamenti climatici

14.6.1 Il clima è sempre cambiato

Il clima della Terra non è mai stato immutabile. Negli ultimi 2,6 milioni di anni si sono alternati periodi glaciali, nei quali grandi calotte di ghiaccio coprivano il Nord America e il Nord Europa, e periodi interglaciali più caldi, come quello attuale, iniziato circa 11 700 anni fa. Durante l'ultimo massimo glaciale, circa 20 000 anni fa, i ghiacciai alpini scendevano fino allo sbocco delle valli nella Pianura Padana, dove hanno lasciato grandi colline moreniche (Capitolo 16), e il livello del mare era più basso di circa 120 m: l'Adriatico settentrionale era una pianura.

Il ritmo di queste glaciazioni è legato ai **cicli di Milanković** (Capitolo 10): le lente variazioni dell'eccentricità dell'orbita, dell'inclinazione dell'asse e della precessione modificano la quantità di radiazione solare che arriva alle alte latitudini in estate. Le variazioni orbitali da sole sono piccole, ma vengono amplificate da altri processi: quando i ghiacci si estendono la Terra riflette più luce (albedo più alta) e si raffredda ancora; quando l'oceano si raffredda scioglie più anidri-

de carbonica, che lascia l'atmosfera, e l'effetto serra diminuisce. Le bolle d'aria intrappolate nei ghiacci dell'Antartide mostrano che negli ultimi 800 000 anni la concentrazione di CO_2 è oscillata fra circa 180 ppm nei periodi glaciali e circa 280–300 ppm in quelli interglaciali, insieme alla temperatura. Altre cause naturali di variazione sono le piccole oscillazioni dell'attività solare e le grandi eruzioni vulcaniche, che immettono nella stratosfera particelle capaci di raffreddare il pianeta per uno o due anni.

14.6.2 Il riscaldamento attuale

Il cambiamento che stiamo vivendo oggi è diverso per causa e per velocità. Secondo il Sesto rapporto di valutazione dell'IPCC (il Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico delle Nazioni Unite, 2021), nel decennio 2011–2020 la temperatura media della superficie terrestre è stata di circa 1,1 °C più alta che nel periodo 1850–1900, e l'influenza umana su questo **riscaldamento globale** è «inequivocabile». Gli anni successivi sono stati ancora più caldi: nel rapporto dell'Organizzazione meteorologica mondiale pubblicato all'inizio del 2025, il 2024 risultava l'anno più caldo mai registrato, con una temperatura media di circa 1,5 °C superiore al livello preindustriale.

La causa principale è l'aumento dei gas serra (Capitolo 13), soprattutto dell'anidride carbonica prodotta dalla combustione di carbone, petrolio e gas naturale e dalla deforestazione. La misura più famosa è la **curva di Keeling** (Figura 14.7): dal 1958 la concentrazione di CO_2 viene misurata in modo quasi continuo sul vulcano Mauna Loa, nelle Hawaii, lontano da fonti locali di inquinamento. La media annua è passata da circa 316 ppm nel 1959 a circa 421 ppm nel 2023 e a circa 425 ppm nel 2024, un valore che nell'atmosfera non si registrava da almeno 800 000 anni. Sulla crescita si sovrappone un'oscillazione stagionale di circa 6 ppm: la concentrazione cala nella primavera-estate boreale, quando la vegetazione dell'emisfero settentrionale, dove si trova la maggior parte delle terre emerse, assorbe CO_2 con la fotosintesi, e risale in autunno e in inverno.

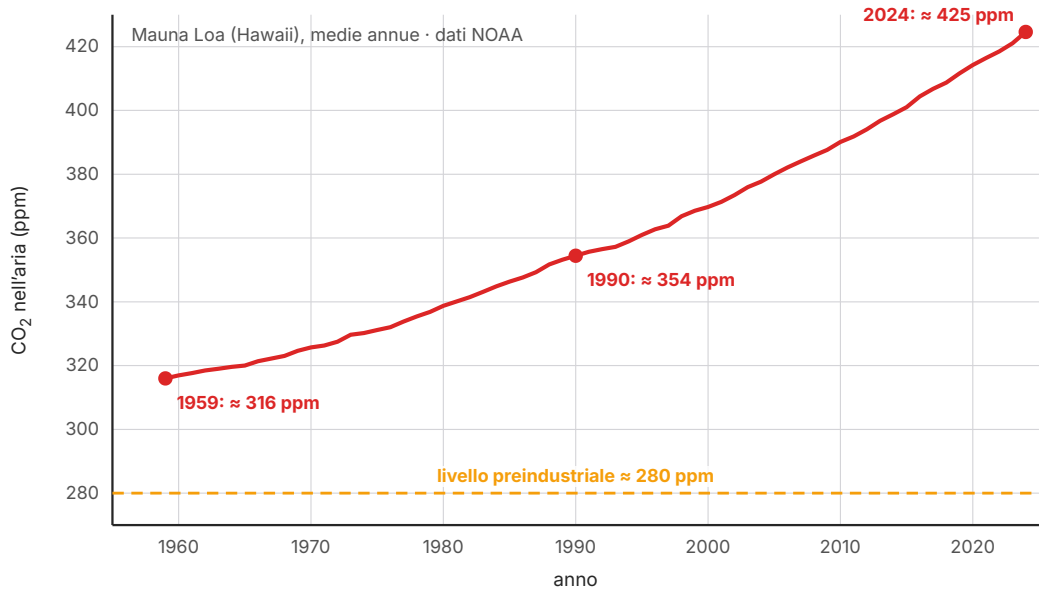


Figura 14.7 La curva di Keeling: concentrazione media annua di CO_2 nell'aria misurata all'osservatorio di Mauna Loa dal 1959 al 2024 (dati NOAA, Global Monitoring Laboratory). La linea tratteggiata indica il valore preindustriale di circa 280 ppm. Non sono rappresentate le oscillazioni stagionali, che si vedrebbero con le medie mensili.

APPROFONDIMENTO

Charles David Keeling e la misura più importante del secolo

Negli anni Cinquanta del Novecento molti scienziati pensavano che l'anidride carbonica prodotta dall'uomo venisse assorbita rapidamente dagli oceani. Il giovane chimico statunitense Charles David Keeling costruì strumenti abbastanza precisi da misurare la CO_2 nell'aria con un'incertezza piccolissima e scelse di misurarla in luoghi isolati, lontani da città e foreste. Nel 1958 cominciò le misure sul Mauna Loa. In pochi anni emersero due fatti: la concentrazione oscilla ogni anno come se il pianeta «respirasse» con le stagioni, e cresce di anno in anno. Le misure continuano ancora oggi e sono diventate il simbolo dell'influenza umana sull'atmosfera.

ERRORE FREQUENTE

«Quest'inverno ha nevicato molto e ha fatto freddo: il riscaldamento globale non esiste.» Un singolo inverno, o una singola ondata di freddo, è *tempo*, non *clima*. Il riscaldamento globale riguarda la media dell'intero pianeta su decenni: anche in un mondo più caldo continuano a esserci giornate e stagioni fredde, ma diventano meno frequenti, mentre le ondate di calore diventano più frequenti e intense. Non confondere inoltre il riscaldamento globale con il buco dell'ozono: sono due problemi diversi, con cause diverse (Capitolo 13).

14.6.3 Conseguenze, mitigazione e adattamento

Le conseguenze del riscaldamento sono già misurabili. I ghiacciai si ritirano quasi ovunque, compresi quelli alpini, e le calotte della Groenlandia e dell'Antartide perdono ghiaccio; il livello medio del mare è salito di circa 20 cm dall'inizio del Novecento, sia per l'acqua di fusione sia perché l'acqua si dilata scaldandosi. Le ondate di calore sono più frequenti e intense, e in molte regioni aumentano sia le piogge violente sia i periodi di siccità. Gli oceani, che assorbono una parte della CO_2 emessa, diventano più acidi, con danni per coralli e molluschi. Il Mediterraneo è considerato una delle regioni del mondo più esposte: in Italia si osservano estati più calde e secche, il ritiro dei ghiacciai alpini e un aumento del rischio di alluvioni lampo.

Le risposte sono di due tipi. La **mitigazione** agisce sulle cause, riducendo le emissioni di gas serra: produrre energia da fonti rinnovabili (sole, vento, acqua), migliorare l'efficienza di edifici e trasporti, ridurre gli sprechi, proteggere e ampliare le foreste che assorbono CO_2. L'**adattamento** agisce sugli effetti, preparando la società a convivere con i cambiamenti che non si possono più evitare: difese contro le inondazioni, gestione più attenta dell'acqua, colture più resistenti alla siccità, città con più verde e ombra contro le ondate di calore.

COLLEGAMENTI

Educazione civica e Agenda 2030. Con l'**Accordo di Parigi**, firmato nel dicembre 2015 alla conferenza delle Nazioni Unite sul clima (COP21), quasi tutti i paesi del mondo si sono impegnati a mantenere l'aumento della temperatura media globale «ben al di sotto» di 2 °C rispetto all'epoca preindustriale e a fare il possibile per limitarlo a 1,5 °C. Ogni paese fissa i propri obiettivi di riduzione delle emissioni e li aggiorna periodicamente. La lotta al cambiamento climatico è anche l'Obiettivo 13 dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile. Le scelte individuali (come ci spostiamo, quanta energia consumiamo, che cosa mangiamo e sprechiamo) contano, ma il risultato dipende soprattutto da decisioni collettive su energia, trasporti e territorio.

SINTESI

- L'umidità assoluta è la massa di vapore in 1 m^3 d'aria; il valore massimo possibile (saturazione) cresce rapidamente con la temperatura.
- L'umidità relativa è il rapporto percentuale fra il vapore presente e quello a saturazione alla stessa temperatura; il punto di rugiada è la temperatura alla quale l'aria, raffreddandosi, diventa satura.
- Il vapore condensa sui nuclei di condensazione; la nebbia è una nube al suolo (da irraggiamento o da avvezione); rugiada e brina si depositano sulle superfici raffreddate dall'irraggiamento notturno.
- L'aria che sale si espande e si raffredda, più rapidamente finché non è satura; il sollevamento può essere convettivo, orografico o frontale.
- Sui rilievi l'aria che sale produce nubi e piogge sul versante sopravento (stau) e scende calda e secca su quello sottovento (foehn).
- Le nubi si dividono in dieci generi, raggruppati in nubi alte, medie, basse e a sviluppo verticale; i cumulonembi sono le nubi dei temporali.
- Le precipitazioni (pioviggine, pioggia, neve, grandine) si misurano con il pluviometro in millimetri: 1 mm = 1 L/m^2.
- Le masse d'aria hanno le caratteristiche delle regioni d'origine; i fronti caldi, freddi e occlusi separano masse d'aria diverse e portano nubi e precipitazioni.
- I cicloni extratropicali sono le perturbazioni delle medie latitudini; i cicloni tropicali (uragani, tifoni) nascono sugli oceani caldi; i tornado sono vortici piccoli ma violentissimi.
- Le previsioni del tempo si basano su osservazioni e modelli numerici e sono affidabili per pochi giorni, perché l'atmosfera è un sistema caotico (approfondimento).
- Il clima è la media del tempo su almeno 30 anni; dipende da latitudine, altitudine, distanza dal mare, correnti, rilievo e vegetazione; si rappresenta con il climogramma e si classifica con il sistema di Köppen (gruppi A, B, C, D, E).
- Il clima è sempre cambiato per cause naturali (cicli di Milanković), ma il riscaldamento attuale, circa +1,1 °C nel 2011–2020 rispetto al 1850–1900, è dovuto alle attività umane; si affronta con mitigazione e adattamento.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● L'umidità relativa è:
   - **A.** la massa di vapore contenuta in 1 m³ d'aria
   - **B.** il rapporto percentuale fra il vapore presente e quello massimo possibile alla stessa temperatura
   - **C.** la temperatura alla quale l'aria diventa satura
   - **D.** la quantità di pioggia caduta in un giorno

2. ● Il punto di rugiada è:
   - **A.** la temperatura alla quale l'acqua bolle
   - **B.** la temperatura alla quale l'umidità relativa si annulla
   - **C.** la temperatura minima notturna
   - **D.** la temperatura alla quale l'aria, raffreddandosi senza cambiare il contenuto di vapore, diventa satura

3. ● Le nubi alte, sottili e filamentose, formate da cristalli di ghiaccio, sono:
   - **A.** i cirri
   - **B.** gli strati
   - **C.** i nembostrati
   - **D.** i cumuli

4. ● La nube dei temporali, con la sommità a forma di incudine, è:
   - **A.** il nembostrato
   - **B.** l'altocumulo
   - **C.** il cumulonembo
   - **D.** lo stratocumulo

5. ● Una precipitazione di 1 mm corrisponde a:
   - **A.** 1 litro d'acqua su ogni centimetro quadrato
   - **B.** 1 litro d'acqua su ogni metro quadrato
   - **C.** 10 litri d'acqua su ogni metro quadrato
   - **D.** 1 millilitro d'acqua su ogni metro quadrato

6. ●● I cicloni tropicali si formano:
   - **A.** sopra i grandi continenti, in estate
   - **B.** esattamente sull'equatore
   - **C.** sopra i mari freddi, in inverno
   - **D.** sopra oceani con acqua superficiale oltre circa 26–27 °C, fra circa 5° e 20° di latitudine

7. ● Il clima di una località è:
   A. il tempo che fa oggi
   B. la previsione per i prossimi dieci giorni
   C. l'insieme delle condizioni meteorologiche medie, calcolate su almeno 30 anni
   D. la temperatura più alta mai registrata

8. ●● Nella classificazione di Köppen un clima appartiene al gruppo C se:
   A. tutti i mesi hanno temperatura media di almeno 18 °C
   B. il mese più freddo è fra −3 °C e 18 °C e il mese più caldo supera 10 °C
   C. le precipitazioni sono minori dell'evaporazione
   D. il mese più caldo è sotto 10 °C

Vero o falso

9. ● Se la temperatura dell'aria aumenta senza che cambi la quantità di vapore, l'umidità relativa diminuisce.

10. ● La nebbia è una nube che si trova a contatto con il suolo.

11. ● La grandine cade soprattutto in inverno, perché è la stagione più fredda.

12. ●● Il foehn è un vento caldo e secco che scende lungo il versante sottovento di una catena montuosa.

13. ● Tornado e uragano sono due nomi diversi dello stesso fenomeno.

14. ●● Prima dell'industrializzazione il clima della Terra era rimasto sempre lo stesso.

Applicare e calcolare

15. ● L'aria di un'aula a 20 °C contiene 8,7 g/m^3 di vapore. Usando la Tabella 14.1 calcola l'umidità relativa.

16. ●● In una giornata d'estate l'aria è a 30 °C con umidità relativa del 60 %. Calcola la massa di vapore contenuta in 1 m^3 d'aria e stima, con la Tabella 14.1, il punto di rugiada.

17. ●● Una camera di 4 m × 5 m × 3 m ha l'aria a 20 °C con umidità relativa del 40 %. Quanti grammi d'acqua deve far evaporare un umidificatore per portare l'umidità relativa al 60 %, a temperatura costante?

18. ● a) Durante un temporale cadono 12 mm di pioggia: quanti litri d'acqua raccoglie una grondaia che drena un tetto di 80 m^2 (in proiezione orizzontale)? b) Un pluviometro con l'imbuto di 200 cm^2 di apertura raccoglie 250 mL d'acqua: quanti millimetri di pioggia sono caduti?

19. ● Durante un temporale conti 9 s fra il lampo e il tuono. A quale distanza è caduto il fulmine? (velocità del suono 340 m/s)

20. ●● Con i dati della Tabella 14.4 calcola la temperatura media annua di Roma, l'escursione termica annua e il totale annuo delle precipitazioni. Quale percentuale delle precipitazioni annue cade nei tre mesi estivi (giugno, luglio, agosto)?

21. ●● A Mauna Loa la media annua della CO_2 era 316,0 ppm nel 1959, 398,8 ppm nel 2014 e 424,6 ppm nel 2024. Calcola l'aumento medio annuo fra il 1959 e il 2024 e fra il 2014 e il 2024. Di quale percentuale è aumentata la concentrazione nel 2024 rispetto al valore preindustriale di 280 ppm?

Leggere dati e figure

22. ●● Osserva la Figura 14.1 e la Tabella 14.1. a) Quanto vapore contiene al massimo 1 m^3 d'aria a 30 °C? b) Aria a 15 °C ha umidità relativa del 50 %: quanto vapore contiene e qual è, all'incirca, il suo punto di rugiada? c) L'aria del punto A si raffredda fino a 5 °C: quanti grammi d'acqua condensano per ogni metro cubo?

23. ● Osserva la Figura 14.6. Qual è il mese più piovoso e quale il più secco? Quali mesi sono aridi e perché? Spiega, con i dati, perché il clima di Roma si classifica come Csa.

24. ●●● Classifica con il sistema di Köppen (gruppo e, se possibile, sottotipo) le quattro stazioni seguenti. Stazione P: tutti i mesi fra 25 e 28 °C, piogge abbondanti in ogni mese (2500 mm annui). Stazione Q: gennaio −15 °C, luglio 17 °C, precipitazioni moderate distribuite nell'anno. Stazione R: mese più caldo 6 °C, mese più freddo −25 °C. Stazione S: gennaio 9 °C, luglio 25 °C, luglio con 10 mm e novembre con 120 mm di pioggia.

Indagare e argomentare

25. ●● Una bibita appena presa dal frigorifero si «appanna» in pochi secondi d'estate, ma non d'inverno in una stanza riscaldata e secca. Spiega il fenomeno usando il concetto di punto di rugiada e progetta una misura per verificarlo.

26. ●● Spiega perché la nebbia è così frequente in Pianura Padana nelle notti d'autunno e d'inverno, collegando l'irraggiamento notturno, l'assenza di vento, l'umidità e la forma del territorio.

27. ●● Un amico dice: «Le previsioni del tempo sbagliano sempre, quindi anche le previsioni sul clima del 2050 non valgono niente». Spiega perché prevedere il tempo fra tre settimane e stimare il clima medio fra trent'anni sono problemi diversi.

28. ●●● Proponi, per il tuo comune o la tua scuola, due azioni di mitigazione e due di adattamento ai cambiamenti climatici, spiegando per ciascuna su quale causa o quale effetto agisce.

Approfondimento: carte del tempo e conti del foehn

29. ●● Sulle carte del tempo una linea con triangoli blu indica:

    A. un fronte freddo
    B. un fronte caldo
    C. un fronte occluso
    D. una isobara di alta pressione

30. ●●● Aria a 16 °C, al livello del mare, è spinta contro una catena montuosa alta 3000 m; il livello di condensazione è a 1000 m. Usando i valori di 1 °C ogni 100 m per l'aria non satura e di 0,5 °C ogni 100 m per l'aria satura, calcola la temperatura sulla cresta e quella dell'aria quando è scesa a 500 m sul versante sottovento. Di quanti gradi è più calda dell'aria che si trova a 500 m sul versante sopravento?

31. ●● a) Un fronte freddo si trova a 210 km da una città e avanza a 30 km/h: fra quante ore la raggiungerà? b) Esprimi in m/s la velocità di 119 km/h, soglia dell'uragano, e quella di 180 km/h.

32. ●● Osserva la Figura 14.5. Descrivi il tempo che ti aspetti nelle località 1, 2 e 3 e indica come cambierà nelle ore successive, sapendo che il ciclone si sposta verso est. In quale verso ruotano i venti intorno al centro B?

PER APPROFONDIRE

- [AHR] C. D. Ahrens, *Meteorology Today*: un manuale universitario molto illustrato su umidità, nubi, fronti, cicloni, previsioni e clima.
- [PRE] F. Press, R. Siever, J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Capire la Terra*: i capitoli sul sistema climatico e sulle glaciazioni.
- [SAG] C. Sagan, *Cosmos*: le pagine sull'effetto serra di Venere e sulla fragilità dell'atmosfera terrestre.

Glossario del capitolo

Aria satura
Aria che contiene la massima quantità di vapore possibile alla sua temperatura; un ulteriore raffreddamento o un'aggiunta di vapore provoca condensazione.

Brina
Deposito di cristalli di ghiaccio che si forma per brinamento del vapore su superfici raffreddate sotto 0 °C, quando il punto di rugiada è inferiore a 0 °C.

Ciclone extratropicale
Vortice di bassa pressione delle medie latitudini, con fronte caldo, fronte freddo e settore caldo; è la «perturbazione» dei bollettini.

Ciclone tropicale
Vortice di bassa pressione molto intenso che si forma sugli oceani caldi delle zone tropicali; chiamato uragano, tifone o ciclone secondo la regione.

Classificazione di Köppen
Classificazione dei climi basata su temperature e precipitazioni, con cinque gruppi principali: A, B, C, D, E.

Clima
Insieme delle condizioni meteorologiche medie di una regione, con la loro variabilità, calcolate su periodi di almeno 30 anni.

Climogramma
Grafico che riporta mese per mese la temperatura media (linea) e le precipitazioni (barre) di una località.

Cumulonembo
Nube a grande sviluppo verticale, con sommità a incudine fino alla tropopausa, che produce rovesci, temporali e grandine.

Foehn
Vento caldo e secco che scende sul versante sottovento di una catena montuosa dopo che l'aria ha perso vapore sul versante sopravento (stau).

Fronte
Linea di separazione al suolo fra due masse d'aria di temperatura diversa; può essere freddo, caldo, occluso o stazionario.

Igrometro
Strumento che misura l'umidità dell'aria (a capello, psicrometro, sensore elettronico).

Massa d'aria
Grande volume d'aria con temperatura e umidità omogenee, acquisite dalla regione d'origine (continentale o marittima, polare o tropicale).

Mitigazione
Insieme delle azioni che riducono le cause del riscaldamento globale, cioè le emissioni di gas serra.

Nebbia
Nube a contatto con il suolo che riduce la visibilità a meno di 1 km; si forma per irraggiamento o per avvezione.

Nuclei di condensazione
Particelle minuscole sospese nell'aria (sale marino, polveri, fumo) sulle quali il vapore condensa formando goccioline.

Pluviometro
Strumento che misura le precipitazioni in millimetri; 1 mm corrisponde a 1 litro d'acqua per metro quadrato.

Punto di rugiada
Temperatura alla quale l'aria, raffreddandosi senza cambiare il contenuto di vapore, diventa satura e il vapore comincia a condensare.

Raffreddamento adiabatico
Raffreddamento di una massa d'aria che sale e si espande senza scambiare calore con l'esterno: circa 1 °C ogni 100 m se l'aria non è satura, circa 0,5 °C se è satura.

Umidità assoluta
Massa di vapore acqueo contenuta in 1 m^3 d'aria, espressa in g/m^3.

Umidità relativa
Rapporto percentuale fra il vapore presente nell'aria e quello che l'aria conterrebbe se fosse satura alla stessa temperatura.

Soluzioni

1. B. È un rapporto percentuale; la massa di vapore in 1 m^3 (A) è l'umidità assoluta, la temperatura di saturazione (C) è il punto di rugiada.

2. D. Raffreddando l'aria a contenuto di vapore costante si arriva alla saturazione: quella temperatura è il punto di rugiada.

3. A. I cirri sono nubi alte (5–13 km) di cristalli di ghiaccio, sottili e filamentose.

4. C. Il cumulonembo si sviluppa fino alla tropopausa, dove la sommità si allarga a incudine.

5. B. 1 m^2 × 0,001 m = 0,001 m^3 = 1 L.

6. D. Serve acqua superficiale calda (oltre circa 26–27 °C) come fonte di vapore e di calore latente, e una forza di Coriolis non nulla, assente all'equatore.

7. C. Il clima è la media su periodi di 30 anni (normali climatologiche), con la variabilità e gli estremi.

8. B. A corrisponde al gruppo A, C al gruppo B, D al gruppo E.

9. V. Il vapore resta lo stesso, ma il valore di saturazione cresce: il rapporto diminuisce.

10. V. È formata da goccioline sospese, come una nube, e riduce la visibilità sotto 1 km.

11. F. La grandine si forma nei cumulonembi, che si sviluppano soprattutto nei pomeriggi caldi di tarda primavera ed estate; i chicchi gelano in quota, dove la temperatura è molto inferiore a 0 °C anche d'estate.

12. V. L'aria, dopo aver perso vapore sul versante sopravento, scende riscaldandosi di circa 1 °C ogni 100 m.

13. F. Il tornado è un vortice piccolo (decine o centinaia di metri) e breve, legato a un cumulonembo; l'uragano è un ciclone tropicale di centinaia di kilometri che dura giorni.

14. F. Il clima è sempre cambiato per cause naturali: negli ultimi 2,6 milioni di anni si sono alternati periodi glaciali e interglaciali, legati ai cicli di Milanković.

15. UR = 8,7 / 17,3 × 100 ≈ 50 %.

16. A 30 °C la saturazione è 30,3 g/m^3: vapore = 0,60 × 30,3 ≈ 18,2 g/m^3. Questo valore è il vapore di saturazione a una temperatura fra 20 °C (17,3 g/m^3) e 25 °C (23,0 g/m^3), poco sopra 20 °C: punto di rugiada ≈ 21 °C (interpolando: 20 + 5 × 0,9/5,7 ≈ 20,8 °C).

17. Volume = 4 × 5 × 3 = 60 m^3. Il vapore deve passare dal 40 % al 60 % di 17,3 g/m^3, cioè aumentare di 0,20 × 17,3 = 3,46 g/m^3. Totale: 3,46 × 60 ≈ 208 g d'acqua (circa 0,2 L).

18. a) 12 mm = 12 L/m^2; 12 × 80 = 960 L. b) 250 mL = 250 cm^3; altezza = 250 cm^3 / 200 cm^2 = 1,25 cm = 12,5 mm.

19. d = 340 m/s × 9 s = 3060 m ≈ 3,1 km (con la regola pratica: 9 / 3 = 3 km).

20. Somma delle temperature = 184,4 °C; media = 184,4 / 12 ≈ 15,4 °C. Escursione annua = 24,3 − 7,5 = 16,8 °C. Totale delle precipitazioni = 805 mm. Estate: 35 + 19 + 37 = 91 mm, cioè 91 / 805 × 100 ≈ 11 % del totale annuo.

21. 1959–2024: (424,6 − 316,0) / 65 ≈ 1,67 ppm/anno. 2014–2024: (424,6 − 398,8) / 10 ≈ 2,58 ppm/anno: l'aumento è diventato più rapido. Rispetto a 280 ppm: (424,6 − 280) / 280 × 100 ≈ 51,6 %, cioè circa il 52 % in più.

22. a) Circa 30 g (30,3 g/m^3). b) Vapore = 0,50 × 12,8 = 6,4 g/m^3; questo è il valore di saturazione a circa 4 °C (fra 0 °C, 4,8 g/m^3, e 5 °C, 6,8 g/m^3): punto di rugiada ≈ 4 °C. c) A 5 °C l'aria satura contiene 6,8 g/m^3: condensano 11,5 − 6,8 = 4,7 g per metro cubo.

23. Più piovoso: novembre (115 mm); più secco: luglio (19 mm). Aridi giugno, luglio e agosto, perché in quei mesi la curva della temperatura (con 1 °C = 2

mm) supera le barre: per esempio a luglio 2 × 24,2 = 48 mm > 19 mm. Csa: il mese più freddo (7,5 °C) è fra −3 e 18 °C e il più caldo supera 10 °C → C; l'estate è secca (luglio, 19 mm, ha meno di 30 mm e meno di un terzo del mese invernale più piovoso, 115 mm) → s; il mese più caldo (24,3 °C) supera 22 °C → a.

24. P: tutti i mesi ≥ 18 °C e piogge abbondanti in ogni mese → A (Af, equatoriale). Q: mese più freddo < −3 °C, mese più caldo > 10 °C → D (Df, senza stagione secca). R: mese più caldo fra 0 e 10 °C → E (ET, tundra). S: mese più freddo fra −3 e 18 °C, più caldo > 22 °C, estate secca → C (Csa, mediterraneo).

25. Traccia: la lattina fredda (circa 4–5 °C) raffredda l'aria a contatto; d'estate l'aria è calda e ricca di vapore, con un punto di rugiada spesso sopra 15 °C, quindi l'aria vicino alla lattina scende sotto il punto di rugiada e il vapore condensa sulla superficie. In una stanza riscaldata d'inverno l'aria contiene poco vapore e il punto di rugiada può essere sotto la temperatura della lattina: niente condensa. Verifica: misurare la temperatura della lattina e il punto di rugiada della stanza con l'esperienza del barattolo e ghiaccio (o con un termoigrometro), in giorni diversi, e controllare che la condensa compaia solo quando la temperatura della lattina è inferiore al punto di rugiada.

26. Traccia: nelle lunghe notti d'autunno e d'inverno, con cielo sereno, il suolo perde calore per irraggiamento e raffredda l'aria a contatto; l'aria padana è umida (suoli irrigui, fiumi, risaie, vicinanza del mare) e raggiunge facilmente il punto di rugiada; la pianura chiusa fra Alpi e Appennini ha spesso venti deboli, che non rimescolano l'aria; si forma un'inversione termica che intrappola l'aria fredda e umida vicino al suolo; inoltre l'inquinamento fornisce molti nuclei di condensazione. Il debole Sole invernale non riesce a dissolvere la nebbia, che può persistere per giorni.

27. Traccia: la previsione del tempo cerca di stabilire lo stato preciso dell'atmosfera in un luogo e in un giorno; a causa del comportamento caotico dell'atmosfera, gli errori dei dati iniziali crescono e dopo circa una o due settimane la previsione perde valore. Le proiezioni climatiche non dicono che tempo farà in un giorno preciso del 2050, ma come cambieranno le medie su decenni in risposta a cause che si conoscono, come l'aumento dei gas serra (un po' come non si può prevedere il risultato di un singolo lancio di dadi, ma si può prevedere la media di migliaia di lanci). Inoltre i modelli climatici sono verificati confrontandoli con il clima passato.

28. Traccia: mitigazione (agisce sulle cause, cioè riduce le emissioni o aumenta l'assorbimento di CO_2): pannelli fotovoltaici sui tetti della scuola; isolamento termico degli edifici; incentivi per biciclette, trasporto pubblico e piedibus; piantare alberi. Adattamento (agisce sugli effetti): alberi e tende per fare ombra nei cortili durante le ondate di calore; tetti verdi e superfici permeabili per assorbire le piogge intense e ridurre gli allagamenti; sistemi di raccolta dell'acqua piovana per i periodi di siccità; piani di protezione civile per le alluvioni. Una buona risposta spiega per ogni azione il legame con la causa o con l'effetto.

29. A. Il fronte caldo si indica con semicerchi rossi, quello occluso con triangoli e semicerchi viola alternati.

30. Da 0 a 1000 m (non satura): 16 − 10 = 6 °C. Da 1000 a 3000 m (satura): 6 − 20 × 0,5 = −4 °C sulla cresta. Discesa da 3000 a 500 m (2500 m, secca): −4 + 25 = 21 °C. Sul versante sopravento, a 500 m, l'aria (che sale non satura) ha 16 − 5 = 11 °C: sottovento è più calda di 10 °C.

31. a) t = 210 km / 30 km/h = 7,0 h. b) 119 km/h : 3,6 ≈ 33 m/s; 180 km/h : 3,6 = 50 m/s.

32. Traccia: località 1, davanti al fronte caldo: cielo che si copre progressivamente (cirri, poi altostrati e nembostrati), pressione in calo, piogge deboli e continue in arrivo; dopo il passaggio del fronte caldo la temperatura salirà. Località 2, nel settore caldo: aria più calda e umida, cielo variabile o coperto da nubi basse, possibili foschie; all'arrivo del fronte freddo rovesci e temporali, poi calo della temperatura, rotazione del vento e pressione in aumento. Località 3, dietro il fronte freddo: aria più fredda e secca, pressione in aumento, cielo che si rasserena con qualche rovescio residuo. Intorno a B

i venti ruotano in senso antiorario, convergendo verso il centro.