CAPITOLO

10

Le rocce e il ciclo litogenetico

Ogni pietra è un documento: chi sa leggerne i cristalli scopre se nacque dal fuoco, dal mare o dalla pressione delle montagne, e quanti milioni di anni fa.

OBIETTIVI

1. Distinguere rocce e minerali e classificare le rocce nelle tre famiglie in base al processo di formazione.
2. Descrivere il ciclo litogenetico e i processi che collegano rocce magmatiche, sedimentarie e metamorfiche.
3. Classificare le rocce magmatiche in base alla struttura e al contenuto di silice, e interpretare la serie di Bowen.
4. Riconoscere i principali tipi di rocce sedimentarie e metamorfiche e collegarli all'ambiente in cui si sono formati.
5. Applicare i principi della datazione relativa e spiegare a che cosa serve la datazione assoluta.
6. Riconoscere le rocce usate nelle città italiane e valutarne l'uso come risorse.

INDICE DEL CAPITOLO

10.1 Le rocce e il ciclo litogenetico 2
10.2 Le rocce magmatiche 5
10.3 Le rocce sedimentarie 10
10.4 Le rocce metamorfiche 13
10.5 Datare le rocce 15
10.6 Le rocce come risorse e beni culturali 20

Scienze naturali 3 · Parte III · Minerali e rocce · versione 1.0
Capitolo 10: Le rocce e il ciclo litogenetico · pagine 245–272 del volume completo · estratto per lo studio

Il Colosseo è costruito in gran parte di travertino, una roccia che si è depositata, strato dopo strato, dalle acque calde delle sorgenti vicino a Tivoli. Il *David* di Michelangelo è scolpito in un blocco di marmo delle Alpi Apuane, che era stato un fondale marino coperto di fango calcareo circa duecento milioni di anni fa. I cubetti di porfido di tante piazze del Nord vengono da colate di cenere incandescente di un'antica regione vulcanica del Trentino. Ogni pietra che calpesti o che tocchi in città ha una storia, e quella storia è scritta nei suoi minerali e nel modo in cui sono disposti.

Nel capitolo precedente hai studiato i minerali, i «mattoni» della crosta terrestre. In questo capitolo vedrai come i minerali si associano nelle rocce, come le rocce si formano in tre modi molto diversi, come si trasformano l'una nell'altra in un ciclo che dura milioni di anni e come si fa a stabilire la loro età. Alla fine saprai riconoscere le principali rocce italiane e leggere la legenda di una carta geologica.

10.1 Le rocce e il ciclo litogenetico

10.1.1 Che cos'è una roccia

Una **roccia** è un aggregato naturale di uno o più minerali, oppure di vetro vulcanico o di materia organica, che forma una parte ben riconoscibile della crosta terrestre. Il calcare è formato quasi solo da calcite: è una roccia *monomineralica*. Il granito contiene invece quarzo, feldspati e miche: è una roccia *polimineralica*. L'ossidiana non contiene quasi cristalli, perché è un vetro; il carbone è formato soprattutto da resti vegetali trasformati. Anche loro sono rocce, ma non sono minerali (cap. 9).

A differenza di un minerale, una roccia non ha una composizione chimica fissa né una struttura cristallina unica: due campioni di granito possono contenere quarzo in proporzioni diverse e restano entrambi granito. Per descrivere una roccia contano quindi due cose: la sua *composizione*, cioè quali minerali contiene e in quali proporzioni, e la sua *struttura*, cioè la forma, le dimensioni e la disposizione dei granuli. La struttura racconta come la roccia si è formata.

Roccia e minerale, quindi, non sono sinonimi, anche se nel linguaggio comune si confondono spesso. Il marmo non è un minerale ma una roccia fatta di tanti cristalli di calcite; il granito è una roccia fatta di cristalli di quarzo, feldspati e miche (cap. 9).

10.1.2 Tre famiglie di rocce

Le rocce si classificano in base al *processo* che le ha formate. Le **rocce magmatiche** (o ignee, dal latino *ignis*, «fuoco») si formano per raffreddamento e solidificazione di un magma. Le **rocce sedimentarie** si formano in superficie dall'accumulo e dal consolidamento di sedimenti: fram-

menti di altre rocce, sostanze precipitate dall'acqua, resti di organismi. Le **rocce metamorfiche** derivano da rocce preesistenti che, senza fondere, si sono trasformate perché si sono trovate a temperature e pressioni diverse da quelle in cui si erano formate.

Le rocce sedimentarie ricoprono gran parte delle terre emerse, ma formano solo un sottile rivestimento: in volume la crosta terrestre è costituita soprattutto da rocce magmatiche e metamorfiche, che affiorano dove l'erosione ha asportato la copertura, per esempio nelle Alpi o in Sardegna.

10.1.3 Il ciclo litogenetico

DA RICORDARE

Richiamo. In *Scienze naturali 1*, cap. 16, hai visto che la *degradazione meteorica* frantuma e altera le rocce sul posto, l'*erosione* asporta i frammenti, gli agenti esogeni (acque, ghiacciai, vento, mare) li trasportano e la *sedimentazione* li deposita quando l'agente perde energia. Gli agenti esogeni sono alimentati dall'energia del Sole; quelli endogeni, come il magmatismo, dal calore interno della Terra.

Nessuna roccia è eterna. Una roccia magmatica che affiora in superficie viene degradata ed erosa; i suoi frammenti si depositano in un bacino e diventano una roccia sedimentaria; se questa viene sepolta in profondità si trasforma in roccia metamorfica; se la temperatura sale ancora può fondere e dare un nuovo magma, che solidificando forma una nuova roccia magmatica. L'insieme di queste trasformazioni si chiama **ciclo litogenetico** (dal greco *líthos*, «pietra», e *génesis*, «origine») ed è rappresentato nella Figura 10.1.

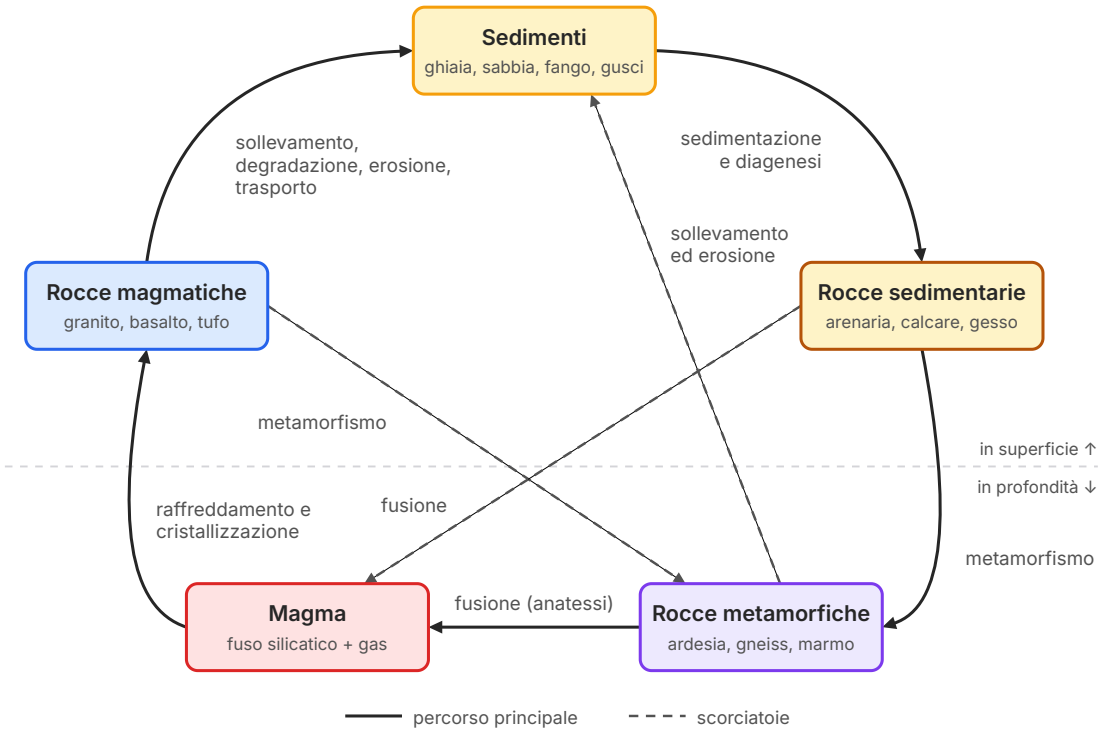


Figura 10.1 Il ciclo litogenetico. Le frecce continue indicano il percorso principale; quelle tratteggiate le «scorciatoie»: una roccia magmatica può essere metamorfosata senza passare per la superficie, una roccia metamorfica può essere sollevata ed erosa, una roccia sedimentaria sepolta in profondità può fondere. La linea orizzontale separa i processi che avvengono in superficie da quelli che avvengono in profondità.

Il ciclo non ha un percorso obbligato: un granito può essere sepolto e trasformato in gneiss senza essere mai stato eroso, e un'arenaria può essere sollevata ed erosa di nuovo, diventando la sabbia di una nuova arenaria. Il ciclo è alimentato da due motori: il calore interno della Terra, che fonde le rocce e le sposta in profondità, e l'energia del Sole, che muove le acque e l'atmosfera. Le sue trasformazioni sono lentissime: per completare un giro servono di solito decine o centinaia di milioni di anni. Nel prossimo anno studierai i fenomeni che sollevano le montagne e producono i magmi (vulcani, terremoti, orogenesi); qui ci occupiamo delle rocce che ne sono il risultato.

10.2 Le rocce magmatiche

10.2.1 Il magma

Un **magma** è una massa di roccia fusa, formata soprattutto da silicati, che contiene gas disciolti (soprattutto vapore acqueo, poi diossido di carbonio e composti dello zolfo) e spesso cristalli già solidificati. La sua temperatura è compresa all'incirca fra 700 e 1200 °C: i magmi più ricchi di silice sono i meno caldi, quelli più poveri i più caldi. I magmi si formano per fusione parziale di rocce del mantello o della crosta, a profondità di decine di chilometri; essendo meno densi delle rocce circostanti, tendono a risalire.

Un magma che raggiunge la superficie terrestre e fuoriesce da un vulcano si chiama **lava**. Durante l'eruzione la lava perde gran parte dei suoi gas, come una bibita gassata che si stappa. Magma e lava, quindi, non sono sinonimi: la lava è magma arrivato in superficie.

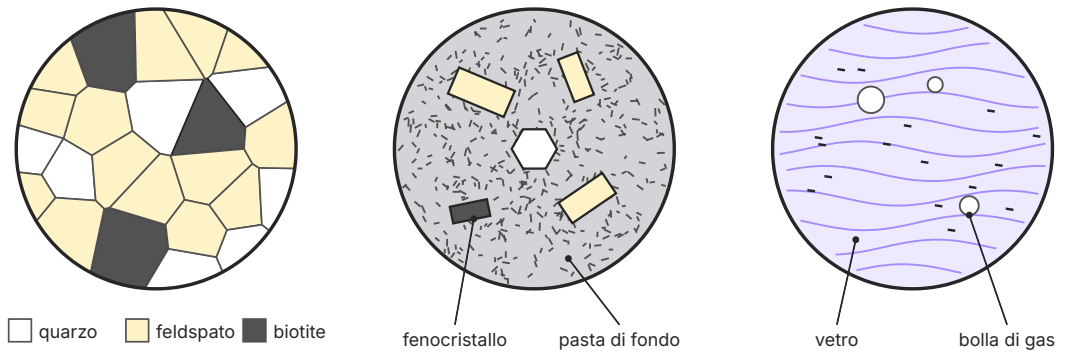
10.2.2 Intrusive o effusive: la velocità di raffreddamento

Quando un magma si raffredda, gli atomi e gli ioni si legano in reticoli ordinati e si formano i cristalli. Se il raffreddamento è lento, i cristalli hanno tempo di crescere: si formano pochi cristalli grandi. Se è rapido, si formano moltissimi cristalli minuscoli; se è rapidissimo, gli ioni restano «congelati» in disordine e si forma un vetro. Questa semplice regola permette di leggere nella struttura di una roccia magmatica dove si è raffreddato il suo magma.

Le **rocce intrusive** (o plutoniche, da Plutone, dio degli Inferi) si formano dai magmi che solidificano in profondità, dentro la crosta, in grandi corpi detti plutoni. Circondato da rocce che isolano come una coperta, il magma impiega migliaia o milioni di anni a solidificare. Tutta la roccia è formata da cristalli ben visibili a occhio nudo, da un millimetro a qualche centimetro, che si incastrano l'uno nell'altro: è la **struttura granulare** o olocristallina (dal greco *hólos*, «tutto») del granito (Figura 10.2a).

Le **rocce effusive** (o vulcaniche) si formano dalla lava che si raffredda in superficie, in pochi giorni o in pochi anni. Se il raffreddamento è stato rapido fin dall'inizio, i cristalli sono troppo piccoli per essere visti a occhio nudo (struttura *microcristallina*). Molto spesso, però, la roccia mostra cristalli più grandi, detti *fenocristalli*, dispersi in una *pasta di fondo* microcristallina o vetrosa: è la **struttura porfirica** (Figura 10.2b). Racconta una storia in due tempi: i fenocristalli sono cresciuti lentamente nel magma ancora in profondità, la pasta di fondo si è solidificata in fretta dopo l'eruzione.

Se il raffreddamento è rapidissimo, per esempio quando una lava molto viscosa e ricca di silice tocca l'aria o l'acqua, si forma una roccia con *struttura vetrosa*: l'*ossidiana*, nera e lucente, che si rompe con fratture concoidi dai bordi taglienti (Figura 10.2c). Se la lava è ricca di gas, le bolle restano intrappolate nel vetro e si forma la *pomice*, così piena di cavità da galleggiare sull'acqua.



a) granulare (olocristallina)
granito: raffreddamento lento

b) porfirica
porfido (riolite): due fasi di raffreddamento

c) vetrosa
ossidiana: raffreddamento rapidissimo

Figura 10.2 Tre strutture delle rocce magmatiche, come appaiono osservando una sezione sottile al microscopio (schemi non in scala; ogni cerchio rappresenta un campo di qualche millimetro). a) Struttura granulare: cristalli tutti visibili e incastrati. b) Struttura porfirica: fenocristalli in una pasta di fondo di cristalli minuscoli. c) Struttura vetrosa: vetro con linee di flusso, pochi microcristalli e qualche bolla.

ERRORE FREQUENTE

«Cristalli grandi = raffreddamento rapido». È il contrario: i cristalli grandi richiedono tempo per crescere, quindi indicano un raffreddamento *lento*, in profondità. Un granito (cristalli grandi) è intrusivo; un basalto (cristalli minuscoli) è effusivo. E attenzione a non confondere magma e lava: le rocce intrusive derivano da un magma che non è mai arrivato in superficie, e quindi non sono mai state lava.

Un caso a parte sono le **rocce piroclastiche** (dal greco *pyr*, «fuoco», e *klastós*, «spezzato»): si formano quando un'eruzione esplosiva frantuma il magma in ceneri, lapilli e blocchi, che ricadono e si accumulano. La cenere consolidata forma il *tufo*. Sono tufi, per esempio, il tufo giallo napoletano, usato da secoli nell'edilizia di Napoli, e i tufi del Lazio con cui nel IV secolo a.C. furono costruite le mura serviane di Roma.

10.2.3 Il contenuto di silice

La composizione dei magmi, e quindi delle rocce magmatiche, varia soprattutto nella percentuale in massa di silice, SiO_2, che si ottiene dall'analisi chimica della roccia. Su questa base le rocce magmatiche si dividono in quattro gruppi (Tabella 10.1). Le *rocce acide* (o felsiche) hanno più del 65 % di silice e sono ricche di minerali chiari, i minerali sialici del cap. 9: quarzo, feldspato potassico, plagioclasio sodico, muscovite. Le *rocce basiche* (o mafiche) ne hanno fra il 45 e il 52 % e sono ricche di minerali scuri, i minerali femici, ricchi di ferro e magnesio: pirosseni,

olivina, plagioclasio calcico. In mezzo stanno le *intermedie*; sotto il 45 % le *ultrabasiche*, formate quasi solo da olivina e pirosseni, che costituiscono gran parte del mantello.

Per ogni composizione esiste una coppia di rocce: una intrusiva e una effusiva, con gli stessi minerali ma una struttura diversa. Il granito e la riolite, per esempio, hanno quasi la stessa composizione chimica: il primo è solidificato in profondità, la seconda in superficie. I nomi «acide» e «basiche» sono storici e non hanno nulla a che vedere con gli acidi e le basi della chimica; i limiti percentuali, inoltre, variano leggermente da un testo all'altro (la classificazione internazionale IUGS pone a 63 % il limite delle rocce acide).

Tabella 10.1 Classificazione delle rocce magmatiche in base al contenuto di silice (percentuale in massa) e al luogo di raffreddamento. I limiti sono quelli più usati nei testi italiani.

Gruppo	% SiO_2	Minerali principali	Colore	Intrusiva	Effusiva
acide (felsiche)	> 65	quarzo, feldspato potassico, plagioclasio sodico, miche	chiaro	granito	riolite
intermedie	52–65	plagioclasio, anfiboli, biotite, poco quarzo	grigio	diorite	andesite
basiche (mafiche)	45–52	plagioclasio calcico, pirosseni, talvolta olivina	scuro	gabbro	basalto
ultrabasiche	< 45	olivina, pirosseni	verde scuro	peridotite	(rarissime)

La silice determina anche il comportamento del magma. Nei magmi ricchi di silice i tetraedri $[SiO_4]^{4-}$ si collegano già nel liquido in catene e reticoli (cap. 9), e il fuso diventa molto viscoso, come miele freddo; nei magmi basaltici, più caldi e poveri di silice, il liquido è fluido. Per questo i magmi granitici solidificano spesso in profondità, mentre i basalti formano colate che scorrono per chilometri, come quelle dell'Etna. L'anno prossimo vedrai che la viscosità decide anche se un'eruzione sarà tranquilla o esplosiva.

ESEMPIO SVOLTO

Dall'analisi chimica al nome della roccia

Problema. Un campione di lava grigia mostra fenocristalli bianchi di plagioclasio e neri di anfibolo in una pasta di fondo finissima. L'analisi di 2,000 g di roccia trova 1,180 g di silice. Classifica la roccia e dai il suo nome.

Soluzione. Percentuale in massa di silice: $\%\ SiO_2 = \frac{1{,}180\ g}{2{,}000\ g} \times 100 = 59{,}0\ \%$. Il valore cade fra 52 e 65 %: la roccia è intermedia. La struttura porfirica, con pasta di fondo finissima, indica una roccia effusiva. Nella Tabella 10.1 la roccia effusiva intermedia è l'andesite.

Risultato. Andesite (59,0 % di SiO_2). Se lo stesso magma fosse solidificato in profondità, con cristalli tutti grandi, avremmo una diorite. Plagioclasio e anfibolo confermano la classificazione: sono i minerali tipici delle rocce intermedie.

10.2.4 La serie di Bowen

Un magma non solidifica tutto in una volta, come l'acqua che gela a 0 °C: è una miscela di molti componenti, e i diversi minerali cristallizzano a temperature diverse. Nei primi decenni del Novecento il petrologo canadese Norman L. Bowen fuse in laboratorio miscele di composizione basaltica, le raffreddò lentamente e osservò in quale ordine comparivano i minerali. Il risultato, la *serie di reazione di Bowen*, è riassunto nella Figura 10.3.

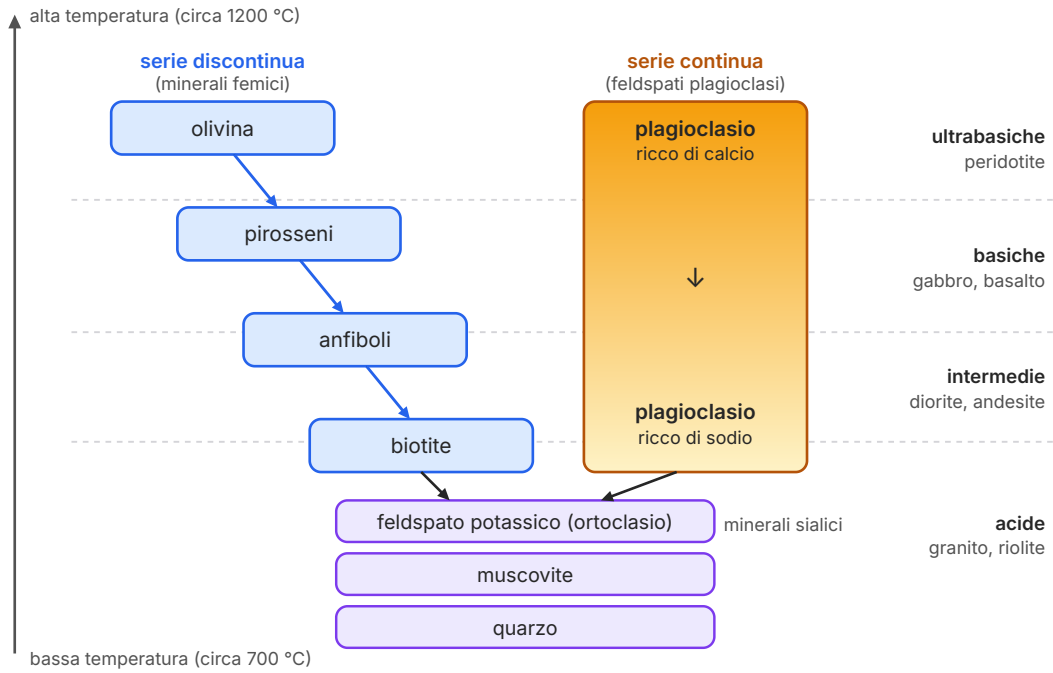


Figura 10.3 La serie di reazione di Bowen (andamento qualitativo). Da un magma basaltico che si raffredda cristallizzano prima i minerali in alto, poi quelli in basso. A sinistra la serie discontinua: ogni minerale reagisce con il liquido e si trasforma nel successivo, con una struttura diversa. A destra la serie continua: il plagioclasio cambia gradualmente composizione, da calcico a sodico. Le due serie convergono negli ultimi minerali. A destra, le rocce in cui prevalgono i minerali di ciascuna fascia.

I minerali si ordinano in due serie. Nella *serie discontinua* cristallizzano per primi i silicati femici più semplici, l'olivina (tetraedri isolati); poi, reagendo con il liquido, si formano pirosseni (catene singole), anfiboli (catene doppie) e biotite (fogli): ogni minerale ha una struttura diversa dal precedente. Nella *serie continua* cristallizza il plagioclasio, che passa gradualmente da una composizione ricca di calcio a una ricca di sodio, senza cambiare struttura: è una soluzione solida (cap. 9). Per ultimi, a temperatura più bassa, cristallizzano feldspato potassico, muscovite e quarzo.

Se i primi cristalli, più densi del liquido, si depositano sul fondo della camera magmatica, il liquido rimasto si arricchisce di silice, sodio e potassio: è la **cristallizzazione frazionata**. Così, in parte, da un magma basaltico possono derivare magmi intermedi e acidi. La serie spiega anche perché nelle rocce olivina e quarzo quasi non si trovano insieme: cristallizzano a temperature molto diverse. Infine aiuta a capire i sedimenti: in superficie i minerali formati ad alta temperatura sono i meno stabili e si alterano per primi, mentre il quarzo, l'ultimo a cristallizzare, è il più resistente. Per questo la sabbia di molte spiagge e di molti fiumi è fatta soprattutto di quarzo.

10.2.5 Rocce magmatiche d'Italia

L'Italia offre esempi di quasi tutte le rocce magmatiche. Graniti antichi, formatisi circa 300 milioni di anni fa alla fine del Paleozoico, affiorano in gran parte della Sardegna nord-orientale, in Gallura; un granito molto più giovane forma il Monte Capanne, all'isola d'Elba. Le lave dell'Etna sono basalti e rocce affini, e si riconoscono nelle colate nere che scendono verso Catania. Il porfido del Trentino, cavato nella zona di Albiano e della Val di Cembra, è una roccia vulcanica acida, di composizione riolitica, con struttura porfirica: è un'ignimbrite, cioè il deposito saldato di colate di cenere incandescente, prodotto fra circa 280 e 260 milioni di anni fa, nel Permiano, da un vasto sistema di eruzioni esplosive (Provincia autonoma di Trento, schede dei porfidi trentini). Dall'isola di Lipari provengono ossidiana e pomice: già nel Neolitico l'ossidiana di Lipari, ottima per fabbricare lame, veniva scambiata in gran parte dell'Italia e del Mediterraneo centro-occidentale.

10.3 Le rocce sedimentarie

10.3.1 Il processo sedimentario

Le rocce sedimentarie sono il risultato di una catena di processi che avvengono in superficie: degradazione fisica e chimica delle rocce esistenti, erosione, trasporto, sedimentazione. I sedimenti si accumulano in un bacino (un lago, una laguna, un fondale marino) in livelli successivi, gli strati, separati da superfici dette giunti di stratificazione: la *stratificazione* è il carattere più tipico delle rocce sedimentarie.

Un sedimento sciolto, come la sabbia di una spiaggia, diventa roccia attraverso la **diagenesi**, l'insieme dei processi che avvengono dopo la deposizione, a temperature e pressioni modeste. Con la *compattazione*, il peso degli strati sovrastanti avvicina i granuli, riduce gli spazi vuoti (i pori) e spreme fuori l'acqua. Con la *cementazione*, le sostanze disciolte nell'acqua che circola nei pori (soprattutto carbonato di calcio, silice, ossidi di ferro) precipitano e incollano i granuli fra loro. In questo modo la sabbia diventa arenaria e il fango diventa argillite.

In base all'origine dei materiali, le rocce sedimentarie si dividono in tre gruppi: *clastiche* (o detritiche), *organogene* e *chimiche*.

10.3.2 Le rocce clastiche

Le **rocce clastiche** sono formate da frammenti (clasti) di rocce e minerali preesistenti, cementati fra loro. Si classificano in base alle dimensioni dei granuli, secondo la scala proposta nel 1922 dal geologo statunitense Chester K. Wentworth (Figura 10.4). Sopra 2 mm si parla di ghiaia, e la roccia che ne deriva è un *conglomerato* se i clasti sono arrotondati, una *breccia* se sono spigolosi. Fra 1/16 e 2 mm i granuli sono di sabbia e la roccia è un'*arenaria*. Sotto 1/16 mm (circa

0,06 mm) il sedimento è un fango, di limo o di argilla, e la roccia è una *siltite* o un'*argillite*; queste rocce a grana finissima si chiamano nel complesso peliti.

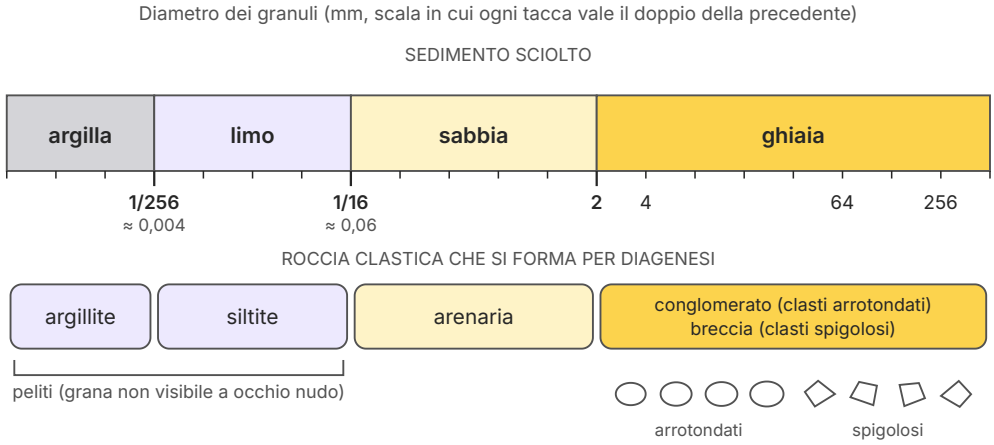


Figura 10.4 La scala granulometrica di Wentworth (1922). In alto le classi del sedimento sciolto; in basso le rocce clastiche che si formano da ciascuna classe dopo la diagenesi. L'asse è costruito per raddoppi (ogni tacca vale il doppio della precedente); i tre limiti principali sono 1/256 mm, 1/16 mm e 2 mm. In basso a destra, la forma dei clasti che distingue un conglomerato da una breccia.

La forma e la classazione dei clasti raccontano il viaggio del sedimento. I ciottoli si arrotondano urtandosi durante un lungo trasporto in un fiume o sulla battigia; gli spigoli di una breccia indicano invece un trasporto brevissimo, per esempio ai piedi di una parete rocciosa. Una corrente veloce trasporta anche granuli grossi, una corrente lenta solo quelli fini: per questo i conglomerati si formano negli alvei dei torrenti, le arenarie lungo le coste e nei fiumi di pianura, le argilliti nei laghi, nelle lagune e nel mare profondo, dove l'acqua è quasi ferma. La *pietra serena* grigia delle chiese fiorentine del Rinascimento è un'arenaria.

10.3.3 Le rocce organogene

Le **rocce organogene** si formano dall'accumulo di resti di organismi o dall'attività di organismi viventi. Le più diffuse sono i *calcari organogeni*, formati dai gusci e dagli scheletri di carbonato di calcio di molluschi, coralli, alghe calcaree e microrganismi marini. Le Dolomiti, per esempio, sono in buona parte antiche scogliere e piattaforme carbonatiche cresciute in un mare tropicale del Triassico. I *calcari a nummuliti* contengono i gusci a forma di moneta di grandi foraminiferi vissuti nell'Eocene: con calcari di questo tipo sono costruite in gran parte le piramidi di Giza.

Sono organogene anche le rocce che derivano dalla materia organica dei vegetali. In ambienti paludosi poveri di ossigeno, i resti delle piante non si decompongono del tutto; sepolti e

riscaldati, perdono acqua e altre sostanze volatili e si arricchiscono di carbonio. Si passa così dalla *torba* alla *lignite*, al *litantrace* e infine all'*antracite*, il carbone più ricco di carbonio. Molti grandi giacimenti di carbone, in Europa e in Nord America, derivano dalle foreste paludose del Carbonifero, il periodo che dal carbone prende il nome; bruciandolo restituiamo all'atmosfera, in pochi secoli, carbonio rimasto sepolto per centinaia di milioni di anni.

10.3.4 Le rocce chimiche

Le rocce sedimentarie chimiche si formano per precipitazione di sostanze disciolte nell'acqua. Le **evaporiti** si depositano quando l'acqua di un bacino chiuso o poco collegato al mare evapora e i sali disciolti superano la loro solubilità: prima precipitano i carbonati, poi il gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e infine il salgemma (NaCl). Circa sei milioni di anni fa, nel Messiniano, il Mediterraneo restò quasi isolato dall'Atlantico, il suo livello si abbassò e in molti bacini l'acqua evaporò: risalgono a quell'episodio i gessi della Sicilia e della Vena del Gesso in Romagna.

Il *travertino* si forma invece dove sgorgano acque ricche di idrogenocarbonato di calcio, come le sorgenti termali delle Acque Albule, presso Tivoli. Uscendo all'aria l'acqua perde diossido di carbonio, e il carbonato di calcio precipita:

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

È la stessa reazione che costruisce stalattiti e stalagmiti, e il contrario di quella che scioglie il calcare nel carsismo (*Scienze naturali 1*, cap. 16). Il travertino è poroso perché precipita intorno a muschi e alghe che poi si decompongono. È una roccia chimica anche la *dolomia*, formata dal minerale dolomite, $CaMg(CO_3)_2$, che si origina per lo più quando acque ricche di magnesio trasformano un calcare già deposto.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · La pietra di Dolomieu

Viaggiando fra le montagne del Tirolo, il geologo francese Déodat de Dolomieu notò una roccia che somigliava al calcare, ma che con un acido diluito faceva pochissima effervescenza. Pubblicò le sue osservazioni nel 1791 sul *Journal de Physique*, e l'anno seguente lo svizzero Nicolas-Théodore de Saussure, che ne aveva analizzato la composizione, chiamò la roccia *dolomie* in suo onore. Più tardi il nome passò alle montagne fatte di quella roccia: le Dolomiti. Dolomieu non fu il primo ad accorgersi della differenza (Linneo l'aveva già notata), ma fu il primo a descriverla in modo sistematico. La prova dell'acido è ancora oggi il modo più rapido per distinguere sul campo calcare e dolomia.

ERRORE FREQUENTE

«Tutti i calcari sono fatti di gusci» e «tutte le rocce sedimentarie contengono fossili». Entrambe le frasi sono false. Il travertino e molte dolomie sono calcari o rocce carbonatiche di origine chimica, senza gusci. E molte rocce sedimentarie non contengono fossili: un conglomerato di torrente, un'evaporite o un'arenaria di deserto possono esserne del tutto prive, perché gli organismi mancavano o i loro resti sono stati distrutti.

10.4 Le rocce metamorfiche

10.4.1 Che cos'è il metamorfismo

Il **metamorfismo** (dal greco *metamórphōsis*, «trasformazione») è l'insieme delle trasformazioni che una roccia subisce *allo stato solido* quando si trova in condizioni di temperatura e pressione diverse da quelle in cui si è formata. La roccia di partenza si chiama **protolito**. Senza fondere, gli atomi migrano lentamente nei cristalli e lungo i loro bordi: i minerali si ricristallizzano in granuli più grandi, oppure reagiscono fra loro formando nuovi minerali stabili nelle nuove condizioni, e la struttura della roccia cambia. Il metamorfismo comincia intorno ai 200 °C, dove finisce la diagenesi, e termina quando la roccia comincia a fondere.

Gli agenti del metamorfismo sono quattro. La *temperatura* cresce con la profondità, in media di circa 25–30 °C per chilometro (il gradiente geotermico), ed è molto più alta vicino a un corpo di magma. La *pressione litostatica*, dovuta al peso delle rocce sovrastanti, cresce anch'essa con la profondità e agisce in modo uguale in tutte le direzioni, come la pressione idrostatica della legge di Stevino, che studi in Fisica (cap. 9: $p = \rho g h$). La *pressione orientata* agisce invece più intensamente in una direzione, per esempio quando due blocchi di crosta si scontrano formando una catena montuosa. Infine i *fluidi*, soprattutto acqua calda con sostanze disciolte, che accelerano le reazioni.

ERRORE FREQUENTE

«Il metamorfismo è una fusione». No: avviene allo stato solido. Un marmo non è un calcare fuso e risolidificato, ma un calcare i cui cristalli di calcite sono ricresciuti, più grandi, senza mai passare per il liquido. Quando una roccia comincia a fondere si esce dal metamorfismo e si entra nel campo dei magmi. Per lo stesso motivo il metamorfismo non va confuso con la diagenesi, che avviene a temperature basse, vicino alla superficie.

10.4.2 Metamorfismo di contatto e regionale

Il *metamorfismo di contatto* avviene intorno a un'intrusione di magma, che riscalda le rocce incassanti. La temperatura è alta, la pressione relativamente bassa, e le rocce trasformate forma-

no intorno al plutone una fascia larga da pochi metri a qualche chilometro, detta **aureola di contatto** (Figura 10.5a). Un calcare diventa marmo; un'argillite diventa una *cornubianite*, una roccia dura, compatta e a grana fine, senza orientazione dei minerali, perché la pressione orientata è assente.

Il *metamorfismo regionale* interessa invece regioni vastissime, di centinaia di chilometri, quando le rocce vengono trascinate in profondità durante la formazione di una catena montuosa. Temperatura e pressione aumentano insieme, e la pressione orientata dispone i minerali lamellari, come le miche, con le facce perpendicolari alla direzione della compressione. La roccia acquista così una tessitura a piani paralleli, la **scistosità** o foliazione, lungo i quali tende a sfaldarsi in lastre (Figura 10.5b).

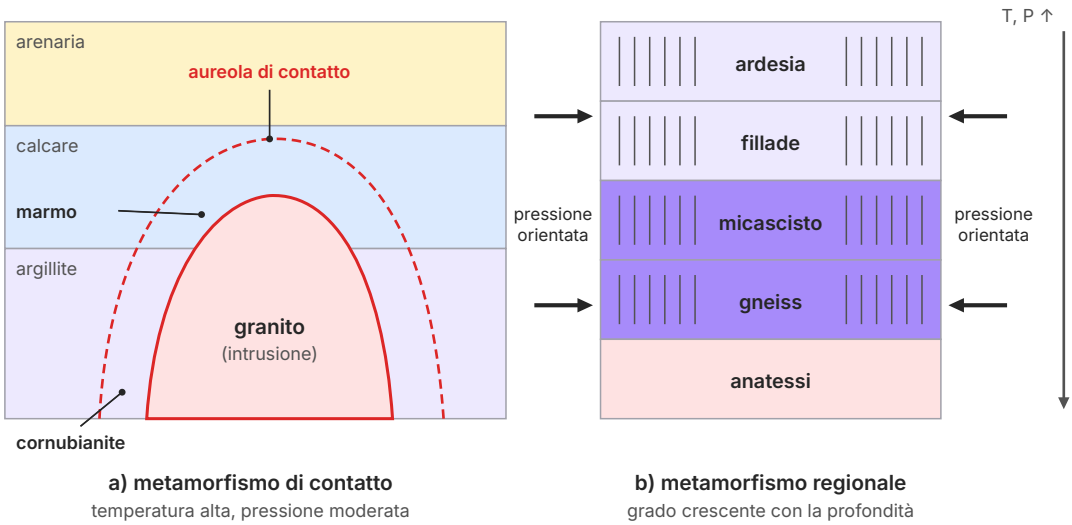


Figura 10.5 I due tipi principali di metamorfismo (schemi non in scala). a) Un'intrusione di granito riscalda le rocce che attraversa: nell'aureola di contatto il calcare diventa marmo e l'argillite cornubianite. b) In una catena montuosa in formazione una stessa argillite, sepolta a profondità crescenti, diventa ardesia, fillade, micascisto e gneiss; più in basso comincia a fondere. Le linee verticali indicano la scistosità, perpendicolare alla pressione orientata.

10.4.3 Il grado metamorfico

L'intensità delle trasformazioni si chiama **grado metamorfico**. Un'argillite permette di seguirlo passo per passo. A grado basso diventa *ardesia*: grigio-scura, a grana finissima, si divide in lastre sottili e regolari ed era usata per le lavagne e per i tetti; in Liguria si cava ancora in Val Fontanabuona. A grado un po' più alto diventa *fillade*, con una lucentezza sericea dovuta a minuscole miche; poi *micascisto*, con miche ben visibili e spesso cristalli di granato; infine *gneiss*, in cui i minerali chiari (quarzo, feldspati) e quelli scuri (biotite, anfiboli) si separano in bande al-

ternate. La sequenza argillite → ardesia → fillade → micascisto → gneiss è una scala di temperatura e pressione crescenti.

Non tutte le rocce metamorfiche sono scistose. Quelle formate da un solo minerale con cristalli tondeggianti, come il *marmo* (dal calcare) e la *quarzite* (da un'arenaria quarzosa), non mostrano piani paralleli anche quando si formano sotto pressione orientata (Tabella 10.2). Il marmo di Carrara deriva da calcari depositati in un mare poco profondo all'inizio del Giurassico, circa duecento milioni di anni fa, e trasformati durante la formazione dell'Appennino settentrionale, fra l'Oligocene e il Miocene: i cristalli di calcite, ricresciuti, gli danno l'aspetto zuccherino («saccaroide») e la luminosità che hanno reso celebri le statue di Michelangelo e di Canova.

Tabella 10.2 Alcune rocce metamorfiche e i loro protoliti più comuni.

Protolito	Roccia metamorfica	Struttura	Esempio italiano
argillite	ardesia, fillade, micascisto, gneiss (grado crescente)	scistosa	ardesia della Val Fontanabuona (Liguria)
granito	gneiss	scistosa, a bande	gneiss delle Alpi occidentali
calcare	marmo	non scistosa, saccaroide	marmo di Carrara (Alpi Apuane)
arenaria quarzosa	quarzite	non scistosa, compatta	quarziti delle Alpi
argillite (al contatto con un plutone)	cornubianite	non scistosa, a grana fine	aureole intorno ai graniti

10.4.4 Il ritorno al magma

Se la temperatura continua a salire, intorno ai 650–700 °C e in presenza di acqua, una roccia ricca di quarzo e feldspati, come uno gneiss, comincia a fondere parzialmente: è l'**anatessi** (o ultrametamorfismo). Le parti fuse formano un magma di composizione granitica, e il ciclo litogenetico si chiude: la roccia nata da un sedimento può diventare la sorgente di un nuovo granito.

10.5 Datare le rocce

Per ricostruire la storia di una regione i geologi devono stabilire l'età delle rocce. Ci sono due modi complementari: la datazione *relativa*, che stabilisce quale roccia è più antica di un'altra senza dire quanti anni hanno, e la datazione *assoluta*, che misura l'età in anni.

10.5.1 La datazione relativa

Nel volume dello scorso anno (*Scienze naturali 2*, cap. 10) hai incontrato il *principio di sovrapposizione*, pubblicato da Niccolò Stenone nel 1669: in una successione di strati non deformati ogni strato è più recente di quello su cui poggia. Stenone osservò anche che i sedimenti si depositano in strati orizzontali (principio dell'orizzontalità originaria): se oggi gli strati sono inclinati o piegati, sono stati deformati *dopo* la loro formazione. A questi principi se ne aggiungono altri.

- Secondo il **principio di intersezione**, un elemento geologico che ne taglia un altro (un filone di magma, una faglia, una superficie di erosione) è più recente di ciò che taglia.
- Un frammento di roccia inglobato in un'altra roccia (per esempio un ciottolo in un conglomerato) è più antico della roccia che lo contiene.
- I *fossili guida* (*Scienze naturali 2*, cap. 10) permettono di attribuire la stessa età a strati di località lontane e di collocarli nella scala dei tempi geologici.

Una superficie di erosione che separa due serie di strati si chiama **discordanza**: indica che, per un certo tempo, la sedimentazione si è interrotta, la regione è emersa ed è stata erosa, e poi è tornata sotto il livello del mare. Una discordanza è una pagina strappata dal libro delle rocce: rappresenta un intervallo di tempo di cui non resta alcuno strato. La Figura 10.6 mostra come si applicano questi principi a una sezione geologica.

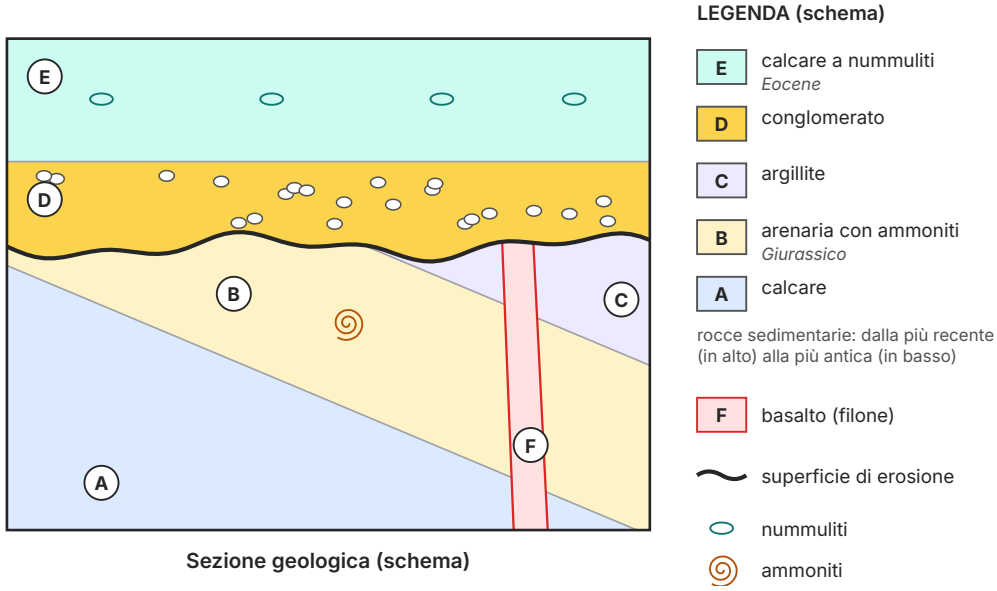


Figura 10.6 Una sezione geologica e la sua legenda (schema, dati di fantasia per l'esercizio). Gli strati A, B e C si sono deposti in orizzontale, sono stati inclinati e poi attraversati dal filone di basalto F; l'erosione li ha tagliati tutti, filone compreso; sopra la superficie di erosione (discordanza) si sono deposti D ed E. Come nelle carte geologiche, la legenda elenca le rocce sedimentarie dalla più recente alla più antica e indica a parte quelle magmatiche.

La datazione relativa ordina gli eventi, ma non dice quanti anni sono passati. L'età in anni si misura con la *datazione assoluta*, che usa come orologio i nuclidi radioattivi contenuti nei minerali: un nuclide radioattivo si trasforma in un altro con un ritmo costante, che non dipende dalla temperatura né dalla pressione, e misurando quanto ne resta e quanto se n'è formato si risale al momento in cui il minerale è cristallizzato. Il metodo, presentato nell'approfondimento che segue, ha permesso di stabilire l'età delle rocce più antiche e della Terra.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · La datazione assoluta

Nell'Approfondimento del cap. 3 hai visto che un nuclide radioattivo decade spontaneamente in un altro, e che dopo ogni tempo di dimezzamento il numero dei suoi atomi si riduce alla metà, indipendentemente dalla temperatura, dalla pressione e dal composto in cui si trova. Questa regolarità fa dei nuclidi radioattivi degli orologi naturali. Nella **datazione radiometrica** si misurano, in un minerale, il numero di atomi del nuclide radioattivo rimasto (il *nuclide padre*, P) e quello degli atomi prodotti dal decadimento (il *nuclide figlio*, D).

L'orologio si mette in moto quando il minerale cristallizza. Lo zircone ($ZrSiO_4$), per esempio, quando si forma accoglie nel suo reticolo atomi di uranio ma quasi non accoglie atomi di piombo: tutto il piombo-206 che contiene oggi è stato prodotto, dopo la cristallizzazione, dal decadimento dell'uranio-238. Se il minerale è rimasto un sistema chiuso, cioè non ha perso né acquistato atomi padre o figlio, la somma D + P è uguale al numero iniziale di atomi padre. Dopo n tempi di dimezzamento la frazione di atomi padre rimasti è $(1/2)^n$, e il rapporto D/P vale 1, 3, 7, 15… (Figura 10.7).

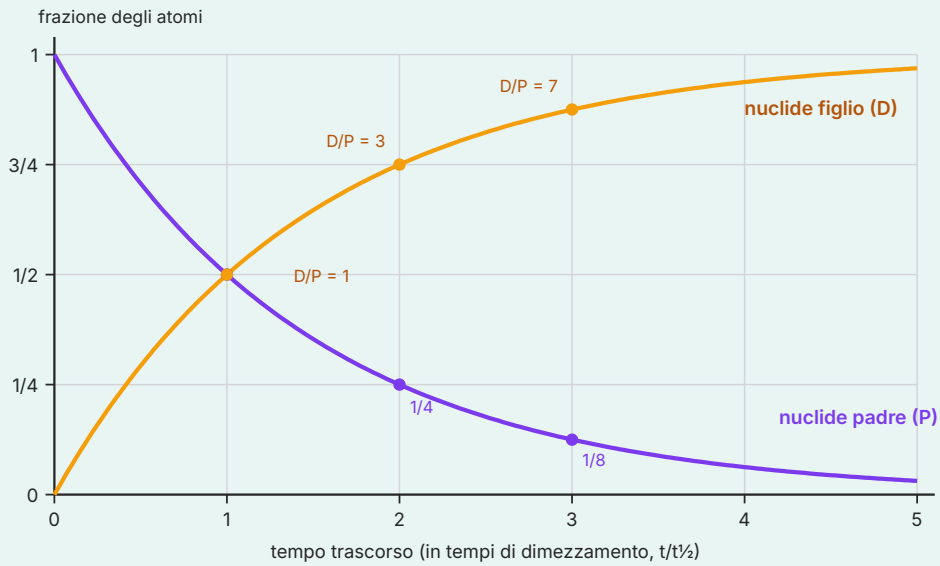


Figura 10.7 Il decadimento di un nuclide radioattivo in un minerale che si comporta come un sistema chiuso, calcolato con la relazione $P/P_0 = (1/2)^{t/t_{½}}$. Gli atomi padre (viola) si dimezzano a ogni tempo di dimezzamento; gli atomi figlio (arancio) aumentano, in modo che la somma resti costante. Dal rapporto D/P si ricava quanti tempi di dimezzamento sono trascorsi.

Il decadimento come orologio. Numero di tempi di dimezzamento trascorsi: $n = t/t_{½}$. Atomi padre rimasti: $P = P_0 \cdot (1/2)^n$. In un sistema chiuso, senza atomi figlio iniziali: $D = P_0 - P$, quindi $D/P = 2^n - 1$. Età della roccia: $t = n \cdot t_{½}$.

Esempio svolto · Quanti anni ha uno zircone?

Problema. In un cristallo di zircone si contano 7 atomi di piombo-207 per ogni atomo di uranio-235 rimasto. L'uranio-235 decade (attraverso una serie di passaggi) in piombo-207 con un tempo di dimezzamento di 704 milioni di anni. Supponendo che il cristallo non contenesse piombo quando si è formato e che sia rimasto un sistema chiuso, calcola la sua età.

Soluzione. Per ogni 8 atomi iniziali di uranio-235, ne resta 1 e 7 sono diventati piombo-207: la frazione rimasta è $P/P_0 = 1/8 = (1/2)^3$. Sono trascorsi quindi $n = 3$ tempi di dimezzamento (controllo: $D/P = 2^3 - 1 = 7$). Età: $t = 3 \times 704$ milioni di anni = 2112 milioni di anni.

Risultato. Circa 2,11 miliardi di anni ($2{,}11 \times 10^9$ anni). Nei laboratori si usano coppie di nuclidi diverse (uranio-238 e piombo-206, uranio-235 e piombo-207) sullo stesso cristallo: se le due età coincidono, il sistema è rimasto chiuso e la misura è affidabile.

Ogni metodo funziona bene solo su un certo intervallo di età, che dipende dal tempo di dimezzamento. Nel metodo *potassio–argon* una parte del potassio-40 ($t_{½} \approx 1{,}25$ miliardi di anni) decade in argon-40, un gas: finché la roccia è fusa l'argon sfugge, e l'orologio parte quando la lava solidifica. Per questo il metodo è adatto alle rocce vulcaniche, anche di poche centinaia di migliaia di anni. I metodi *uranio–piombo* (uranio-238, $t_{½} \approx 4{,}47$ miliardi di anni; uranio-235, 704 milioni di anni), applicati agli zirconi, sono i più precisi per le rocce di milioni e miliardi di anni.

La datazione radiometrica funziona soprattutto per le rocce magmatiche, perché misura il momento in cui i minerali sono cristallizzati. In una roccia sedimentaria i granuli hanno l'età delle rocce da cui provengono, non quella dello strato. Le rocce sedimentarie si datano allora combinando i due metodi: uno strato compreso fra due livelli di cenere vulcanica datati, per esempio, a 102 e 98 milioni di anni ha un'età intermedia fra le due.

Attenzione a un errore frequente: il carbonio-14 non serve a datare le rocce. Il carbonio-14 ha un tempo di dimezzamento di circa 5730 anni: dopo circa nove tempi di dimezzamento, circa 50 000 anni, ne resta una quantità troppo piccola per essere misurata. Inoltre data solo materiali che contenevano carbonio di organismi vivi (legno, ossa, carbone di un focolare), non i minerali di una lava. Per una roccia di milioni di anni servono nuclidi con tempi di dimezzamento di milioni o miliardi di anni.

10.5.2 Le rocce più antiche e l'età della Terra

Le rocce più antiche della crosta terrestre hanno circa 4 miliardi di anni, ma i minerali più antichi sono ancora più vecchi. Nelle Jack Hills, in Australia occidentale, un conglomerato metamorfosato contiene minuscoli cristalli di zircone erosi da rocce scomparse: i più antichi hanno dato età di circa 4,4 miliardi di anni (S. A. Wilde e colleghi, *Nature*, 2001; studi successivi hanno confermato età fra 4,37 e 4,40 miliardi di anni). È un esempio straordinario di ciclo litogenetico:

lo zircone, durissimo e quasi inalterabile, è sopravvissuto all'erosione della sua roccia madre, alla sedimentazione e al metamorfismo. L'età della Terra, 4,54 miliardi di anni, si ricava invece dai meteoriti, formati insieme al Sistema solare.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Patterson e il piombo

Lo statunitense Clair Patterson misurò gli isotopi del piombo in frammenti di meteoriti, fra cui quelli di Canyon Diablo, il meteorite che ha scavato il Meteor Crater in Arizona. Supponendo che meteoriti e Terra si fossero formati insieme e dallo stesso materiale, nel 1956 pubblicò sulla rivista *Geochimica et Cosmochimica Acta* un'età di 4,55 ± 0,07 miliardi di anni, molto vicina al valore accettato oggi. Per misurare tracce così piccole di piombo dovette costruire uno dei primi laboratori «ultrapuliti»: scoprì così che l'ambiente era contaminato dal piombo aggiunto alla benzina, e si batté per anni perché venisse vietato. Una ricerca sull'età della Terra finì per cambiare la salute pubblica di tutto il mondo.

10.6 Le rocce come risorse e beni culturali

10.6.1 Le pietre delle città italiane

Le rocce sono state il primo materiale da costruzione, e ogni città italiana porta i segni delle rocce del suo territorio. Roma è la città del travertino e del tufo: il Colosseo e il colonnato di San Pietro sono di travertino di Tivoli. Firenze è grigia e bianca: la pietra serena delle colonne e delle cornici di Brunelleschi (San Lorenzo, Santo Spirito) risalta sull'intonaco chiaro. Napoli è costruita in gran parte di tufo giallo, scavato spesso sotto le case stesse, e lastricata con la pietra lavica del Vesuvio. Le città del Nord usano il porfido trentino per le pavimentazioni, Genova l'ardesia per i tetti e i portali, Carrara esporta marmo da più di duemila anni.

La scelta non è solo estetica. Una pietra da costruzione deve resistere al peso, al gelo e all'inquinamento. Il marmo e il travertino, fatti di carbonato di calcio, sono attaccati dagli acidi, anche da quelli delle piogge acide (è la stessa reazione dell'effervescenza della calcite con l'acido cloridrico, cap. 9), che ne corrodono la superficie e trasformano la calcite in gesso, formando croste nere sui monumenti; per questo i loro restauri richiedono pulizie e protezioni periodiche. Le rocce silicatiche come il granito e il porfido sono invece molto più resistenti.

10.6.2 Dal calcare al cemento

Il cemento, il materiale da costruzione più usato al mondo, si produce dalle rocce. Una miscela di calcare (circa tre quarti) e argilla viene cotta in grandi forni rotanti a circa 1450 °C. Il carbonato di calcio si decompone in ossido di calcio e diossido di carbonio, e l'ossido di calcio reagisce con i silicati e gli ossidi dell'argilla formando il *clinker*, che macinato con un po' di gesso dà il cemento. La reazione di decomposizione del calcare è:

$$CaCO_3(s) \rightarrow CaO(s) + CO_2(g)$$

COLLEGAMENTI

Educazione civica e Agenda 2030 · Il costo delle rocce. Secondo un rapporto di Chatham House del 2018 (J. Lehne, F. Preston, *Making Concrete Change*), ogni anno si producono nel mondo più di 4 miliardi di tonnellate di cemento, responsabili di circa l'8 % delle emissioni globali di CO_2; circa la metà di queste emissioni viene dalla decomposizione del calcare, non dai combustibili. Ridurle significa usare meno clinker, riciclare i materiali e progettare edifici che durino a lungo (obiettivi 9, 11 e 13 dell'Agenda 2030). Anche le cave hanno un costo: modificano il paesaggio, producono enormi quantità di detriti e devono essere ripristinate a fine attività. Nelle Alpi Apuane, dove l'estrazione del marmo dura da secoli, il conflitto fra lavoro, paesaggio e tutela delle sorgenti carsiche è da anni al centro di un acceso dibattito pubblico.

10.6.3 Leggere una carta geologica

Una carta geologica rappresenta, su una base topografica, le rocce che affiorano in superficie o sotto un sottile strato di suolo. Ogni unità rocciosa ha un colore e una sigla; la *legenda*, come nella Figura 10.6, elenca le unità sedimentarie in ordine di età, dalla più recente in alto alla più antica in basso, con una breve descrizione della roccia e la sua età geologica, mentre le rocce magmatiche e metamorfiche sono di solito raggruppate a parte. Linee e simboli indicano le faglie, la giacitura degli strati e le discordanze. In Italia il Servizio geologico d'Italia (ISPRA) pubblica la Carta geologica d'Italia alla scala 1:50 000 (progetto CARG), consultabile anche in rete: saper leggere la legenda della carta della propria zona permette di capire su quali rocce sorge la propria città e da dove vengono le sue pietre.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Riconoscere le rocce e le pietre della propria città

Obiettivo. Classificare un gruppo di campioni di rocce con semplici osservazioni e prove, e riconoscere le stesse rocce negli edifici e nei monumenti della propria città.

Materiale. Una collezione di 8–10 campioni (per esempio granito, basalto, pomice, ossidiana, arenaria, conglomerato, calcare, travertino, marmo, micascisto); lente d'ingrandimento 10×; chiodo d'acciaio e vetrino da microscopio per le prove di durezza; acido cloridrico diluito al 10 % in un contagocce, distribuito dall'insegnante; acqua in un becher; occhiali di protezione e guanti.

1. Osserva ogni campione con la lente. I granuli sono cristalli che si incastrano, clasti cementati, oppure non si vedono? C'è vetro, ci sono cavità?
2. Controlla se la roccia ha strati o piani paralleli (stratificazione, scistosità) o fossili.
3. Prova a scalfire il vetrino con uno spigolo del campione: le rocce ricche di quarzo e feldspati lo scalfiscono, i calcari e i marmi no.
4. Con il contagocce, l'insegnante mette una goccia di acido diluito su una parte non pregiata del campione: l'effervescenza vivace indica calcite (calcare, marmo, travertino); un'effervescenza debolissima, la dolomia.
5. Metti la pomice nell'acqua e osserva.
6. Usa la chiave seguente: cristalli incastrati e visibili, senza orientazione → roccia magmatica intrusiva, o marmo e quarzite se monominerale; cristalli in piani o bande → roccia metamorfica scistosa; fenocristalli in pasta di fondo, vetro o cavità → roccia magmatica effusiva; clasti cementati → roccia sedimentaria clastica (classificala con la Figura 10.4); grana fine, effervescenza e fossili → calcare organogeno; effervescenza e porosità a strati sottili → travertino.
7. **Sul campo.** Con l'insegnante percorri un itinerario nel centro storico: per ogni edificio annota la roccia usata (facciata, colonne, gradini, pavimenti), il suo stato di conservazione e, con la carta geologica regionale, la sua probabile provenienza.

Sicurezza. Occhiali di protezione per tutta l'esperienza, anche durante le prove di durezza (le schegge di vetro sono taglienti). L'acido cloridrico, anche diluito, irrita pelle e occhi: lo maneggia l'insegnante, gli studenti usano i guanti; in caso di contatto si sciacqua subito con molta acqua. I campioni trattati con l'acido vanno sciacquati prima di essere toccati di nuovo; l'acido residuo, molto diluito, si smaltisce come indicato dall'insegnante. Durante l'uscita non si salgono gradini o muretti, non si scalfiscono i monumenti e non si usa l'acido: sul campo si osserva soltanto.

Risultato atteso. Calcare, travertino e marmo fanno effervescenza ma non scalfiscono il vetro; granito e arenaria quarzosa lo scalfiscono; la pomice galleggia; l'ossidiana mostra fratture concoidi; il micascisto mostra piani di minerali lamellari.

Domande. Quali campioni hanno una storia di raffreddamento in due tempi? Perché marmo e calcare reagiscono allo stesso modo con l'acido, anche se appartengono a famiglie diverse? Quale delle rocce osservate in città è la più degradata, e perché?

SINTESI

- Una roccia è un aggregato naturale di minerali (o di vetro, o di materia organica). Si descrive con la composizione e la struttura; la struttura rivela l'origine.
- Le rocce si dividono in magmatiche, sedimentarie e metamorfiche; il ciclo litogenetico le collega attraverso cristallizzazione, degradazione ed erosione, sedimentazione e diagenesi, metamorfismo, fusione e sollevamento.
- Il magma è un fuso silicatico con gas disciolti (circa 700–1200 °C); la lava è magma arrivato in superficie.
- Le rocce intrusive si raffreddano lentamente in profondità (struttura granulare, cristalli grandi); le effusive rapidamente in superficie (struttura microcristallina, porfirica o vetrosa). Il tufo è una roccia piroclastica.
- In base alla silice le rocce magmatiche sono acide (> 65 %: granito/riolite), intermedie (diorite/andesite), basiche (45–52 %: gabbro/basalto) e ultrabasiche (< 45 %: peridotite).
- La serie di Bowen descrive l'ordine di cristallizzazione: olivina → pirosseni → anfiboli → biotite e plagioclasio calcico → sodico; per ultimi feldspato potassico, muscovite e quarzo.
- Le rocce sedimentarie si formano per diagenesi (compattazione e cementazione) dei sedimenti; sono clastiche (conglomerati e brecce > 2 mm, arenarie 1/16–2 mm, siltiti e argilliti < 1/16 mm), organogene (calcari organogeni, carboni) o chimiche (evaporiti, travertino, dolomia).
- Il metamorfismo trasforma una roccia allo stato solido per effetto di temperatura, pressione litostatica e orientata e fluidi; può essere di contatto o regionale.
- Con il grado metamorfico crescente un'argillite diventa ardesia, fillade, micascisto e gneiss; marmo e quarzite non sono scistosi. L'anatessi riporta le rocce allo stato di magma.
- La datazione relativa usa i principi di sovrapposizione, orizzontalità originaria e intersezione, le inclusioni, i fossili guida e le discordanze.
- La datazione assoluta misura l'età in anni con l'orologio dei nuclidi radioattivi. I minerali più antichi hanno circa 4,4 miliardi di anni; la Terra ne ha 4,54.
- Le rocce sono risorse e beni culturali: pietre da costruzione, materie prime per il cemento, elementi del paesaggio da tutelare.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Una roccia è:
   - **A.** un minerale con una formula chimica definita
   - **B.** un aggregato naturale di uno o più minerali, o di vetro o materia organica
   - **C.** un cristallo cresciuto in una cavità
   - **D.** qualunque sostanza solida estratta da una cava

2. ● Il magma che fuoriesce in superficie si chiama:
   - **A.** pomice
   - **B.** tufo
   - **C.** lava
   - **D.** pasta di fondo

3. ● Una roccia magmatica formata tutta da cristalli ben visibili e incastrati si è raffreddata:
   - **A.** lentamente, in profondità
   - **B.** rapidamente, in superficie
   - **C.** rapidissimamente, a contatto con l'acqua
   - **D.** in due fasi, prima in profondità e poi in superficie

4. ●● Una roccia magmatica a grana fine, scura, contiene il 49 % di silice. È:
   - **A.** un granito
   - **B.** una riolite
   - **C.** un gabbro
   - **D.** un basalto

5. ● La diagenesi comprende:
   - **A.** la fusione e la cristallizzazione
   - **B.** la degradazione e l'erosione
   - **C.** la compattazione e la cementazione
   - **D.** la ricristallizzazione sotto pressione orientata

6. ●● Un'arenaria è formata da granuli con diametro compreso fra:
   - **A.** 1/16 e 2 mm
   - **B.** 2 e 64 mm
   - **C.** 1/256 e 1/16 mm
   - **D.** 0,001 e 0,004 mm

7. ●● Il marmo si forma:
   - **A.** per evaporazione dell'acqua di mare
   - **B.** per metamorfismo di un calcare
   - **C.** per raffreddamento lento di un magma ricco di calcio
   - **D.** per cementazione di gusci calcarei

8. ●● Secondo la serie di Bowen, il primo minerale che cristallizza da un magma basaltico è:
   - **A.** il quarzo
   - **B.** la biotite
   - **C.** il feldspato potassico
   - **D.** l'olivina

Vero o falso

9. ● Una roccia può essere formata da un solo minerale.

10. ●● Tutti i calcari si formano dall'accumulo di gusci e scheletri di organismi.

11. ● A parità di composizione, una roccia intrusiva ha cristalli più grandi di una effusiva perché si è raffreddata più lentamente.

12. ● Un filone di basalto che attraversa una serie di strati è più antico degli strati che attraversa.

13. ●● Ardesia, fillade, micascisto e gneiss possono derivare dalla stessa roccia di partenza, sottoposta a gradi metamorfici crescenti.

Applicare

14. ● Classifica i quattro campioni di rocce magmatiche, usando la Tabella 10.1: a) roccia chiara a cristalli grandi, con il 74 % di SiO_2; b) roccia nera a grana finissima con pochi fenocristalli, 50 % di SiO_2; c) roccia grigia a cristalli grandi bianchi e neri, 58 % di SiO_2; d) roccia verde scura a cristalli grandi, quasi solo olivina, 42 % di SiO_2.

15. ● Dai il nome alla roccia clastica che si forma per diagenesi da ciascun sedimento: a) ciottoli arrotondati di 1–5 cm; b) granuli di quarzo di 0,2 mm; c) particelle di 0,002 mm; d) frammenti spigolosi di 3 cm; e) particelle di 0,03 mm.

16. ●● Usa la chiave dell'Esperienza di laboratorio per riconoscere ciascun campione e indicarne la famiglia: a) granuli cristallini chiari, aspetto zuccherino, effervescenza vivace con l'acido, nessuna orientazione; b) vetro nero lucente con fratture concoidi; c) roccia chiarissima piena di cavità, che galleggia; d) granuli di sabbia arrotondati e cementati, che scalfiscono il vetro e non fanno effervescenza; e) bande alternate chiare e scure di cristalli grandi, con miche orientate.

17. ●●● Una roccia si trova a 15 km di profondità. a) Calcola la pressione litostatica, supponendo che le rocce sovrastanti abbiano una densità media di 2700 kg/m^3 (g = 9,81 m/s^2), in pascal e in atmosfere. b) Stima la temperatura, se in superficie è 15 °C e il gradiente geotermico vale 30 °C/km. c) In queste condizioni una roccia granitica ricca d'acqua è fusa?

18. ● In una cava si osservano, dal basso: un'argillite (1), un'arenaria (2), un calcare (3). Una faglia sposta tutti e tre gli strati. Un filone di basalto attraversa i tre strati e la faglia senza essere spostato, e viene troncato da una superficie di erosione su cui poggia un conglomerato (4). Ordina tutti gli eventi dal più antico al più recente.

19. ●● Nella produzione del cemento il calcare si decompone secondo la reazione $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$. Calcola la massa di diossido di carbonio liberata dalla decomposizione di 1,00 t di carbonato di calcio puro, e la massa di ossido di calcio che si ottiene.

Leggere dati e figure

20. ● Osserva la Figura 10.3. a) Quali minerali ti aspetti di trovare in un granito e quali in un basalto? b) Perché è rarissimo trovare olivina e quarzo nella stessa roccia magmatica?

21. ●●● Osserva la Figura 10.6 e la sua legenda. a) Ordina dal più antico al più recente gli strati A–E, il filone F, l'inclinazione degli strati e la superficie di erosione, indicando per ogni passaggio il principio che usi. b) Che cosa puoi dire dell'età degli strati A, B e C, sapendo che E è dell'Eocene e usando i fossili di B? c) Che cosa indica il conglomerato D, subito sopra la discordanza?

Tabella 10.3 Analisi granulometrica di un sedimento fluviale (dati di esempio): percentuale in massa di ciascuna classe.

Classe	ghiaia	sabbia	limo	argilla
% in massa	5	70	20	5

22. ●● L'analisi granulometrica di un sedimento fluviale dà i risultati della tabella. a) Quale classe prevale? b) Quale roccia si formerebbe per diagenesi? c) Il sedimento è stato deposto da una corrente veloce o lenta? Motiva usando la Figura 10.4.

Indagare e argomentare

23. ●●● Ricostruisci, attraverso il ciclo litogenetico, la storia possibile di un granulo di quarzo che si trova oggi in una quarzite, partendo dal momento in cui cristallizzò in un granito. Per ogni tappa indica il processo, l'ambiente (superficie o profondità) e la roccia che si forma.

24. ●●● Progetta un esperimento controllato per verificare che la dimensione dei cristalli dipende dalla velocità di raffreddamento, usando il salolo (salicilato di fenile), che fonde a circa 42 °C, fuso a bagnomaria e versato su vetrini a temperature diverse. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, le variabili da tenere costanti, la prova di controllo, le norme di sicurezza e il risultato che ti aspetti, collegandolo alle rocce intrusive ed effusive.

25. ●●● Il comune vuole ripavimentare la piazza principale della tua città e deve scegliere fra lastre di marmo, travertino, porfido e granito. Confronta le quattro rocce dal punto di vista della resistenza al gelo, all'usura e alle piogge acide, della provenienza (cave italiane, trasporto) e dell'impatto ambientale dell'estrazione, e argomenta la tua scelta.

Approfondimento

26. ●●● Per misurare l'età di un granito di circa 300 milioni di anni il metodo più adatto è:
    A. uranio–piombo sugli zirconi del granito
    B. il conteggio degli strati di una roccia sedimentaria vicina
    C. il carbonio-14 su un frammento di legno trovato nella cava
    D. la misura della durezza dei suoi feldspati

27. ●● Il metodo del carbonio-14 permette di datare una colata di lava di due milioni di anni.

28. ●● Un nuclide radioattivo ha un tempo di dimezzamento di 50 milioni di anni (dato di esempio). a) Quale frazione degli atomi padre resta in un minerale dopo 150 milioni di anni? b) Dopo quanto tempo dalla cristallizzazione il rapporto D/P vale 15?

29. ●●● Lo zircone di un granito contiene 1 atomo di piombo-206 per ogni atomo di uranio-238 ($t_{½}$ = 4,47 miliardi di anni); il cristallo era privo di piombo quando si è formato. a) Quanti anni ha? b) Uno studente trova in uno zircone terrestre $D/P = 3$ per la stessa coppia di nuclidi. Perché la sua misura deve essere sbagliata, o il sistema non è rimasto chiuso?

30. ●● Osserva la Figura 10.7. a) Leggi sul grafico la frazione di atomi padre rimasti dopo 2,5 tempi di dimezzamento e verifica il valore con la calcolatrice. b) Quanto vale in quel momento il rapporto D/P? c) Perché le due curve si incrociano proprio a $t = t_{½}$?

PER APPROFONDIRE

- [GRO] J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Understanding Earth*: i capitoli sulle rocce magmatiche, sedimentarie e metamorfiche e quello sulla datazione delle rocce, con molte fotografie di campioni e di sezioni sottili.
- [KLE] C. Klein, B. Dutrow, *Manual of Mineral Science*: le pagine sulla cristallizzazione dei silicati dai magmi e sui minerali delle rocce metamorfiche.

Glossario del capitolo

Anatessi
Fusione parziale di una roccia metamorfica ad alta temperatura (intorno a 650–700 °C in presenza di acqua), che produce un magma; detta anche ultrametamorfismo.

Ciclo litogenetico
Insieme dei processi (cristallizzazione, degradazione ed erosione, sedimentazione, diagenesi, metamorfismo, fusione, sollevamento) che trasformano le rocce di una famiglia in quelle di un'altra.

Cristallizzazione frazionata
Separazione dei minerali che cristallizzano per primi da un magma, che modifica la composizione del liquido rimasto, arricchendolo di silice; l'ordine di cristallizzazione è descritto dalla serie di Bowen.

Datazione radiometrica
Determinazione dell'età assoluta di un minerale o di una roccia dal rapporto fra gli atomi di un nuclide radioattivo (padre) e quelli del nuclide prodotto dal suo decadimento (figlio).

Diagenesi
Insieme dei processi (compattazione e cementazione) che, a bassa temperatura e pressione, trasformano un sedimento sciolto in roccia sedimentaria.

Discordanza
Superficie di erosione che separa due successioni di strati e corrisponde a un intervallo di tempo senza sedimentazione.

Evaporiti
Rocce sedimentarie chimiche formate per precipitazione dei sali disciolti durante l'evaporazione dell'acqua di un bacino, come il gesso e il salgemma.

Grado metamorfico
Intensità delle trasformazioni metamorfiche, che cresce con la temperatura e la pressione (per esempio argillite → ardesia → fillade → micascisto → gneiss).

Lava
Magma che ha raggiunto la superficie terrestre e ha perso gran parte dei gas disciolti.

Magma
Massa di roccia fusa, di composizione per lo più silicatica, con gas disciolti e spesso cristalli in sospensione, a temperature di circa 700–1200 °C.

Metamorfismo
Trasformazione allo stato solido della composizione mineralogica e della struttura di una roccia, per effetto di temperatura, pressione e fluidi diversi da quelli in cui si era formata.

Principio di intersezione
Principio della datazione relativa: un elemento geologico (filone, faglia, superficie di erosione) che ne taglia un altro è più recente di quello che taglia.

Rocce clastiche
Rocce sedimentarie formate da frammenti (clasti) di rocce e minerali preesistenti, classificate in base alle dimensioni dei granuli: conglomerati e brecce, arenarie, siltiti e argilliti.

Rocce intrusive / effusive
Rocce magmatiche solidificate lentamente in profondità, a cristalli grandi (intrusive o plutoniche), oppure rapidamente in superficie, a grana fine, porfiriche o vetrose (effusive o vulcaniche).

Rocce magmatiche
Rocce formate per raffreddamento e solidificazione di un magma; dette anche ignee.

Rocce organogene
Rocce sedimentarie formate dall'accumulo di resti di organismi o dalla loro attività, come i calcari organogeni e i carboni.

Rocce sedimentarie
Rocce formate in superficie dall'accumulo e dalla diagenesi di sedimenti: frammenti di rocce, sostanze precipitate dall'acqua o resti di organismi.

Roccia
Aggregato naturale di uno o più minerali, oppure di vetro vulcanico o di materia organica, che forma una parte della crosta terrestre.

Scistosità
Disposizione dei minerali lamellari di una roccia metamorfica in piani paralleli, perpendicolari alla pressione orientata; detta anche foliazione.

Struttura porfirica
Struttura di una roccia magmatica con cristalli grandi (fenocristalli) dispersi in una pasta di fondo microcristallina o vetrosa, che indica un raffreddamento in due fasi.

Soluzioni

1. B. Una roccia è un aggregato; un minerale ha composizione definita e struttura cristallina ordinata.

2. C. La lava è il magma arrivato in superficie, che ha perso gran parte dei gas.

3. A. Struttura granulare: raffreddamento lento in profondità (roccia intrusiva).

4. D. Il 49 % cade fra 45 e 52 %: roccia basica; la grana fine indica una roccia effusiva, quindi basalto (il gabbro è l'intrusiva corrispondente).

5. C. Compattazione (riduzione dei pori, espulsione dell'acqua) e cementazione (precipitazione di sostanze che incollano i granuli).

6. A. È l'intervallo della sabbia nella scala di Wentworth; 1/256–1/16 mm è il limo, sopra 2 mm la ghiaia.

7. B. Il marmo è un calcare ricristallizzato allo stato solido per metamorfismo di contatto o regionale.

8. D. Olivina, in cima alla serie discontinua; il quarzo è l'ultimo a cristallizzare.

9. V. Il marmo e il calcare puro, per esempio, sono formati quasi solo da calcite (rocce monominerali-che); il granito, invece, è polimineralico.

10. F. Esistono calcari di origine chimica, come il travertino, che precipita dalle acque termali.

11. V. Il raffreddamento lento dà ai cristalli il tempo di crescere.

12. F. È più recente: per il principio di intersezione, per tagliare gli strati il filone deve essersi formato dopo di loro.

13. V. È la sequenza dell'argillite a grado metamorfico crescente.

14. a) Acida e intrusiva: granito. b) Basica (45–52 %) ed effusiva, con struttura porfirica: basalto. c) Intermedia (52–65 %) e intrusiva: diorite. d) Ultrabasica (< 45 %) e intrusiva: peridotite.

15. a) Conglomerato (ghiaia arrotondata, > 2 mm). b) Arenaria (0,2 mm è fra 1/16 ≈ 0,06 mm e 2 mm). c) Argillite (0,002 mm < 1/256 mm ≈ 0,004 mm). d) Breccia (ghiaia spigolosa). e) Siltite (0,03 mm è fra 0,004 e 0,06 mm).

16. a) Marmo, metamorfica. b) Ossidiana, magmatica effusiva (struttura vetrosa). c) Pomice, magmatica effusiva. d) Arenaria quarzosa, sedimentaria clastica. e) Gneiss, metamorfica (scistosa, a bande).

17. a) $p = \rho g h = 2700\ \text{kg/m}^3 \times 9{,}81\ \text{m/s}^2 \times 15\,000\ \text{m} = 3{,}97 \times 10^8\ \text{Pa} \approx 4{,}0 \times 10^8\ \text{Pa}$ (circa 400 MPa); in atmosfere $3{,}97 \times 10^8 / 101\,325 \approx 3{,}9 \times 10^3$ atm. b) $T \approx 15\ °\text{C} + 30\ °\text{C/km} \times 15\ \text{km} = 465\ °\text{C}$, cioè circa 470 °C. c) No: l'anatessi comincia intorno a 650–700 °C. La roccia subisce metamorfismo regionale di grado medio, allo stato solido.

18. 1, 2, 3 (deposizione dal basso verso l'alto, per sovrapposizione); faglia (taglia 1–3); filone di basalto (taglia la faglia, che quindi è più antica); erosione (tronca il filone); deposizione del conglomerato 4.

19. $M(\text{CaCO}_3) = 40{,}08 + 12{,}01 + 3 \times 16{,}00 = 100{,}09\ \text{g/mol}$; $M(\text{CO}_2) = 44{,}01\ \text{g/mol}$; $M(\text{CaO}) = 56{,}08\ \text{g/mol}$. Il rapporto molare è 1 : 1 : 1. $n(\text{CaCO}_3) = 1{,}00 \times 10^6\ \text{g} / 100{,}09\ \text{g/mol} = 9{,}99 \times 10^3\ \text{mol}$. $m(\text{CO}_2) = 9{,}99 \times 10^3\ \text{mol} \times 44{,}01\ \text{g/mol} = 4{,}40 \times 10^5\ \text{g} = 440\ \text{kg}$; $m(\text{CaO}) = 9{,}99 \times 10^3\ \text{mol} \times 56{,}08\ \text{g/mol} = 5{,}60 \times 10^5\ \text{g} = 560\ \text{kg}$ (controllo: 440 + 560 = 1000 kg).

20. a) Granito: quarzo, feldspato potassico, plagioclasio sodico, muscovite e biotite (parte bassa della figura). Basalto: plagioclasio calcico, pirosseni, talvolta olivina (parte alta). b) Olivina e quarzo cristallizzano a temperature molto diverse, agli estremi opposti della serie: quando cristallizza il quarzo, l'olivina ha già reagito con il liquido trasformandosi in pirosseni, oppure si è separata dal magma per cristallizzazione frazionata.

21. a) A, B, C si depongono in quest'ordine (sovrapposizione), in orizzontale (orizzontalità originaria);

poi vengono inclinati (sono inclinati ma si erano deposti orizzontali); poi si forma il filone F (taglia A–C: intersezione); poi l'erosione tronca strati e filone (intersezione); infine si depongono D ed E (sovrapposizione). b) Sono più antichi di D e di E, quindi più antichi dell'Eocene; B, con ammoniti del Giurassico, permette di dire che C è giurassico o più recente e A giurassico o più antico. c) Il conglomerato indica ciottoli arrotondati deposti da acque energiche, per esempio lungo una costa: il mare è tornato a coprire la regione dopo una fase di emersione ed erosione.

22. a) La sabbia, con il 70 % in massa. b) Un'arenaria (con una parte di matrice fine di limo e argilla). c) Una corrente di velocità media: abbastanza veloce da non lasciar depositare gran parte del fango fine, ma non tanto da trasportare molta ghiaia, come un fiume di pianura o un ambiente costiero.

23. Traccia di risposta. Cristallizzazione del quarzo dal magma granitico, in profondità (roccia magmatica intrusiva); sollevamento ed esposizione del granito; degradazione meteorica: feldspati e miche si alterano in argilla, il quarzo resiste (serie di Bowen); erosione e trasporto fluviale, che arrotondano il granulo; sedimentazione in una spiaggia o in un delta; diagenesi: compattazione e cementazione, arenaria quarzosa (roccia sedimentaria clastica, in superficie o a debole profondità); seppellimento durante la formazione di una catena montuosa e metamorfismo: i granuli di quarzo ricristallizzano e si saldano, quarzite (roccia metamorfica, in profondità).

24. Traccia di risposta. Variabile indipendente: temperatura del vetrino (per esempio vetrino raffreddato in frigorifero, a temperatura ambiente, scaldato a circa 35 °C su una piastra); variabile dipendente: dimensione media dei cristalli, osservata con la lente o al microscopio, e tempo di solidificazione. Costanti: quantità di salolo (stesso numero di gocce), tipo di vetrino, temperatura del fuso. Controllo: vetrino a temperatura ambiente; ripetere ogni prova almeno tre volte. Sicurezza: occhiali e guanti, il salolo è irritante; bagnomaria a temperatura moderata, niente fiamme libere; smaltimento dei residui come indicato dall'insegnante. Risultato atteso: sul vetrino freddo cristalli piccoli e numerosi (come nelle rocce effusive), su quello tiepido pochi cristalli grandi (come nelle intrusive). Limite: il salolo è una sostanza pura, non un fuso silicatico.

25. Traccia di risposta. Marmo e travertino (carbonato di calcio) sono attaccati dalle piogge acide e il travertino, poroso, soffre il gelo; il marmo lucido diventa scivoloso; sono belli ma richiedono manutenzione. Porfido e granito (silicati, ricchi di quarzo) resistono all'usura, al gelo e agli acidi e sono antiscivolo se lavorati a piano grezzo o fiammato. Provenienza: porfido dal Trentino, granito dalla Sardegna o dalle Alpi, marmo dalle Apuane, travertino dal Lazio: conviene la cava più vicina (meno trasporto, meno emissioni) e un materiale che duri a lungo. Impatto: ogni cava modifica il paesaggio e produce detriti; vanno preferite cave autorizzate con piani di ripristino. Una scelta ben argomentata, per una piazza molto frequentata, è di solito il porfido o il granito, con il marmo per gli elementi decorativi.

26. A. Il metodo uranio–piombo sugli zirconi copre età di milioni e miliardi di anni; il carbonio-14 arriva solo a circa 50 000 anni e un frammento di legno non data il granito.

27. F. Il carbonio-14 data solo materiali organici fino a circa 50 000 anni; per una lava si usa per esempio il metodo potassio–argon.

28. a) 150/50 = 3 tempi di dimezzamento: resta $(1/2)^3$ = 1/8 degli atomi padre. b) $D/P = 15$ significa $2^n - 1 = 15$, cioè $2^n = 16$ e $n = 4$: dopo $4 \times 50 = 200$ milioni di anni.

29. a) $D/P = 1 \rightarrow 2^n = 2$, $n = 1$: l'età è un tempo di dimezzamento, 4,47 miliardi di anni. b) $D/P = 3 \rightarrow n = 2$, cioè 8,94 miliardi di anni: più dell'età della Terra (4,54 miliardi) e del Sistema solare. Il cristallo conteneva piombo già alla formazione, ha acquistato piombo o perso uranio dopo (sistema non chiuso), oppure la misura è errata.

30. a) Sul grafico circa 0,18; con la calcolatrice $(1/2)^{2,5} = 0,177$. b) $D = 1 - 0,177 = 0,823$; $D/P = 0,823/0,177 \approx 4,66$. c) Dopo un tempo di dimezza-

mento metà degli atomi padre è decaduta: padri e figli sono uguali, ciascuno il 50 %.