Exploring Geoscience Across the Globe



Chris King

Approved by:
the International Geoscience Education Organisation
the International Union of Geological Sciences
the European Geosciences Union
for the teaching of the International Geoscience Syllabus

IGEO International GeoScience Education Organisation
IUGS International Union of Geological Sciences
EGU

Diritto d'autore: Chris King per conto dell'IGEO- International Geoscience Education Organisation

- Il materiale originale incluso in questa pubblicazione può essere riprodotto soltanto previa autorizzazione in forma scritta da parte dell'autore, o come espressamente consentito per uso didattico o di ricerca, secondo i termini concordati con l'organizzazione per quanto riguarda i diritti di appropriata riproduzione.
- Se il permesso di riprodurre materiale originale viene accordato da parte dell'autore, quest'ultimo deve ottenere l'appropriato riconoscimento.
- Il diritto d'autore del materiale qui riprodotto con il permesso di altri editori rimane di proprietà dell'editore originale.

Prima pubblicazione: 2019
ISBN: 978-1-9996264-0-2
Pubblicato presso: http://www.igeoscied.org/teaching-resources/geoscience-text-books/







La traduzione in italiano del libro di Chris King "*Exploring Geosciences Across the Globe*" è stata realizzata grazie alla collaborazione della Divisione Didattica delle Geoscienze della Società Geologia Italiana (SGI). Ai membri della Divisione e a tutti/e quelli/e che si sono adoperati per realizzare quest'opera in italiano, va il mio più vivo ringraziamento e quello della SGI.

La SGI è la più antica e rappresentativa associazione scientifica italiana nel campo delle geoscienze. La SGI si adopera, fin dalla sua nascita, per il progresso, la promozione e la diffusione delle conoscenze geologiche nei loro aspetti teorici e applicativi.

Il testo in oggetto è rivolto alle scuole e per la sua struttura e contenuti ben si presta a far conoscere e a diffondere la Geologia, di cui Geoscienze è sinonimo. Le tematiche coprono tutte gli aspetti di base della Geologia fino alle interazioni con l'ambiente e con l'uomo.

In un paese come l'Italia, con due catene di montagne attive, terremoti, numerosi vulcani attivi, un preoccupante dissesto idrogeologico e anche molte ricchezze e bellezze naturali, le interazioni con l'uomo sono quanto mai numerose, in molti casi utili e in certi casi anche pericolose. I cambiamenti climatici in atto, dei quali siamo testimoni, acuiscono le criticità geologiche della nostra penisola e del nostro territorio, già geologicamente fragile. Queste criticità vanno affrontate con la cultura, la consapevolezza e la conoscenza, una conoscenza corretta, solida e basata sulla scienza.

Questo libro serve a questo: a far conoscere in modo corretto e comprensibile la Geologia e le sue innumerevoli implicazioni e applicazioni. Mi auguro che questo libro sia largamente usato nelle scuole per coadiuvare i docenti nell'insegnamento della Geologia e per preparare gli studenti a conoscere meglio questa bellissima materia. Così avremo cittadini, sempre più consapevoli di come è fatto il nostro paese dal punto della geologia e della sua dinamica.

Il Presidente della Società Geologica Italiana
Prof. Rodolfo Carosi

SOCIETÀ GEOLOGICA ITALIANA ETS

FONDATA NEL 1881 - ENTE MORALE R. D. 17 OTTOBRE 1885

“Exploring Geoscience Across the Globe" di Chris King rappresenta un'importante risorsa per l'insegnamento delle Scienze della Terra, ora disponibile in italiano, integrata da immagini di contesti italiani di particolare interesse geologico.

Sebbene il testo sia stato originariamente concepito per fornire a studenti sedicenni a livello internazionale le base indispensabili per la conoscenza degli elementi fondamentali delle Scienze della Terra e non sia pertanto perfettamente allineato con i curricoli scolastici italiani, si rivela uno strumento particolarmente prezioso per i docenti italiani, offrendo un approccio globale all'insegnamento delle Scienze della Terra.

La presente edizione italiana è il risultato di un attento lavoro di traduzione, a cura di Susanna Occhipinti e di revisione, reso possibile grazie al contributo di numerosi professionisti del settore.

Per il contributo al lavoro di traduzione, si ringrazia Katia Berlingeri di FCF-OAVdA.

Un particolare ringraziamento va a tutti coloro che hanno partecipato al processo di revisione, garantendo l'accuratezza scientifica e la chiarezza espositiva del testo in italiano: Eleonora Paris, di UNICAM, che ha curato i primi due capitoli, a Elena Bonaccorsi di UNIPI, che ha curato i capitoli 3 e 5, a Enrico Capezzuoli di UNIFI, che ha curato il capitolo 4, a Francesca Cifelli di UNIROMA3 che ha curato i capitoli 6 e 7.

Si ringraziano inoltre Paolo Valcepina e Anna Maria Belenghi per il contributo alla traduzione dei primi due capitoli.

Il lavoro di traduzione e adattamento dei testi realizzato da Katia Berlingeri rientra nell'ambito del sostegno della Fondazione CRT alle attività dell'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta che, con il Planetario di Lignan, è gestito dalla Fondazione Clément Fillietroz-ONLUS, sostenuta dalla Regione Autonoma Valle d'Aosta, l'Unité des Communes Valdôtaines Mont-Émilius e il Comune di Nus.

In memoria del Professor Chris King, 1949- 2022 "Exploring Geoscience across the Globe"

Questo libro è stato ideato e scritto dal professor Chris King e pubblicato online in 2019. Sono state realizzate numerose versioni e traduzioni, l'ultima di queste è "Exploring Geoscience across the Globe - England". Questa è stata finalmente prodotta e pubblicata purtroppo due settimane prima che Chris morisse il 17 febbraio 2022. Sarebbe stato entusiasta di sapere che questo risultato era stato raggiunto

L'IGEO, la IUGS e l'EGU, che hanno commissionato i libri, desiderano rendere omaggio all''incredibile lavoro di Chris e alla sua dedizione nel portarlo a compimento.

Sicuramente questi libri devono essere considerati come il punto culminante della importante produzione di pubblicazioni di Chris, tutte volte a migliorare la conoscenza e l'interesse per la nostra meravigliosa Terra e per come funziona.

Non ci può essere un miglior modo per ricordare Chris che dare la più ampia pubblicità e ai suoi libri, così che possano essere messi a disposizione di quanti più giovani e insegnanti di tutto il m ondo, e gratuitamente

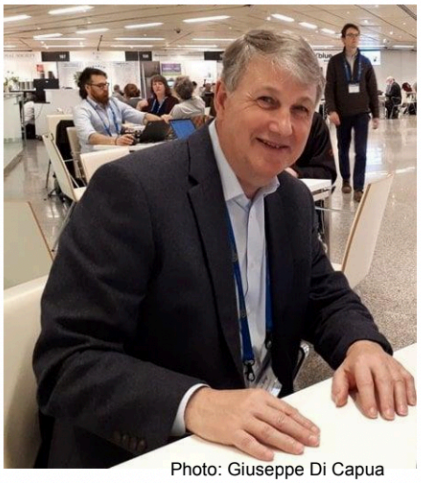


Photo: Giuseppe Di Capua

Ricerche internazionali indicano che, nel mondo, il livello dell'istruzione scolastica in Scienze della Terra è molto variabile; il sostegno offerto ai docenti di questa disciplina è in genere scarso e i libri di testo disponibili in molti paesi sono carenti quando non addirittura assenti.

È quindi meraviglioso, in un panorama così grigio, dare il benvenuto ai colori e alla vivacità del libro 'Exploring Geoscience – across the Globe'. Il libro nasce da una iniziativa sorta per sostenere l'International Geoscience Syllabus ed è promosso da organizzazioni internazionali tra cui IGEO (International Geoscience Education Organisation), IUGS (International Union of Geological Sciences) e EGU (European Geosciences Union).

La 'versione internazionale' del libro è una risorsa open source e liberamente scaricabile, che può essere usata ovunque nel mondo da docenti, studenti e autori di libri di testo. Il libro è stato scritto per essere accessibile e coinvolgente, nonché per essere tradotto anche in altre lingue. Ogni volta che la versione internazionale viene adattata in altre parti del mondo e tradotta secondo necessità, una nuova risorsa, verificata da esperti, si rende disponibile a dare un sostegno all'insegnamento e all'apprendimento delle Scienze della Terra.

È un grande piacere poter approvare questa utile e benvenuta iniziativa, nonché incoraggiare coloro che si interessano all'insegnamento delle Geoscienze nel mondo ad assumersi il compito di 'regionalizzare' e tradurre il libro affinché venga usato nel loro paese, diffondendo in questo modo il suo contenuto ricco di stimoli e il suo importante messaggio nella maniera più ampia possibile.

Iain Stewart Professore di Comunicazione delle Scienze della Terra e direttore del Sustainable Earth Institute, School of Geography, Earth and Environmental Sciences presso l'Università di Plymouth, Regno Unito.

Scopo del libro

Questo libro è stato realizzato per dare un supporto ai docenti di tutto il mondo nell'insegnamento dell'International Geoscience Syllabus (riportato in appendice). Questo syllabus è un compendio che comprende gli argomenti di Scienze della Terra che ogni studente di 16 anni dovrebbe conoscere, secondo quanto raccomandato dalla comunità internazionale per l'insegnamento delle Geoscienze.
La struttura dei titoli dei capitoli di questo libro riflette direttamente il syllabus. Il testo è scritto in un linguaggio che è stato reso il più semplice possibile e privo di gergo scientifico, affinché sia largamente accessibile ai docenti che vogliano usarlo nella loro didattica. La maggior parte degli esempi è presentata in tabelle e illustrazioni fotografiche, in modo tale che gli esempi non interferiscano con le parti di testo.
Il materiale aggiuntivo rispetto al syllabus è presentato entro apposite caselle, dette 'box', che possono essere utilizzate per fornire approfondimenti, senza aumentare l'impatto sulla didattica e per fornire brevi casi di studio; non è tuttavia necessario che tutto questo materiale addizionale venga presentato agli studenti.
Il testo originale è scritto sotto forma di una 'versione internazionale' chiamata '**Exploring Geoscience – across the Globe**' ed è corredata da fotografie scelte in tutto il mondo e da box di approfondimento di interesse generale. Il libro è pubblicato sul sito web http://www.igeoscied.org/teaching-resources/geoscience-text-books/.
Gli esperti di Scienze della Terra di tutto il mondo sono invitati ad aggiungere immagini e approfondimenti sulle loro aree geografiche e a tradurre il testo nelle loro lingue.

Il syllabus è pubblicato al seguente link: http://www.igeoscied.org/activities/international-geoscience-syllabus/

Ringraziamenti (versione originale in inglese)
Siamo grati a Gillian Drennen (gillian.drennen@wits.ac.za) per aver suggerito per prima la pubblicazione di un libro che si occupasse del syllabus e per aver proposto un workshop nell'ambito dell'International Geological Congress di Città del Capo nel 2016, dedicato a sviluppare questa idea. Siamo grati a tutti coloro che hanno contribuito a quel workshop per il modo in cui hanno indirizzato le idee emergenti riguardo il libro

Il testo originale e molti dei grafici sono stati realizzati da Chris King (chris@earthlearningidea.com); alcuni grafici sono stati tratti da altre fonti. Altri grafici e fotografie provengono direttamente da materiale privo di copyright reperibile su internet. La maggior parte dei grafici sono stati ridisegnati da Tanja Reinhardt (reinhardtt2@ukzn.ac.za) dell'Università di KwaZulu, Natal, Sudafrica, che ha gentilmente curato il design del libro e la sua copertina.

Siamo molto grati a Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page) come fonte di immagini e grafici privi di copyright che hanno ampiamente contribuito agli esempi del libro. Siamo altresì grati a ESEU (Earth Science Education Unit, http://www.earthscienceeducation.com/index.html) per alcune immagini.
Siamo immensamente grati a Peter Craig, Elizabeth and Martin Devon, Sid Howells, Peter Kennett, Pete Loader, Giulia Realdon, Tanja Reinhardt (capitolo 1), Ashvin Wickramasooriya e Sebastian Wolf (capitoli 1 e 2) per il loro lavoro di correzione dell'accuratezza del testo, per aver contribuito a rendere il testo più accessibile e per la correzione delle bozze. Siamo anche molto grati ad Anthony Tibbs per il suo formale contributo di correzione delle bozze. Qualsiasi errore che possa essere sfuggito rimane unicamente mio.
Il libro è stato approvato dalla International Geoscience Education Organisation, dalla International Union of Geological Sciences attraverso la sua Commission on Geoscience Education and Technology Transfer, e dalla European Geosciences Union per l'insegnamento del syllabus; siamo molto grati per il loro sostegno e incoraggiamento.

Chris King.

IGEO International Geoscience Education Organisation

IUGS

EGU

Indice

Scopo del libro
0. Perché esplorare le geoscienze?

1. La Terra come sistema in cambiamento
1.1 Attributi
1.2 Interazioni
1.3 Feedback
1.4 Processi e prodotti
1.4.1 Cicli
1.4.2 Il ciclo dell'acqua
1.4.3 Flussi, magazzini e tempi di residenza
1.4.4 Il ciclo delle rocce
1.4.5 Il ciclo del carbonio
1.5 Fonti di energia

2. La Terra è un sistema, all'interno del sistema solare, all'interno dell'universo
2.1 Origini
2.2 Il Sole
2.3 Sole, Terra e Luna
2.3.1 Giorno/notte
2.3.2 Le stagioni
2.3.3 Le fasi della Luna
2.3.4 Eclissi

3. La Terra è un sistema che è cambiato nel tempo
3.1 Intervallo temporale geologico
3.2 Datazione relativa
3.3 Datazione assoluta
3.4 Tassi di processo

4. Il sistema terrestre comprende sfere interagenti
4.1 Geosfera
4.1.1 Materiali e proprietà della Terra
4.1.1.1 Minerali
4.1.1.2 Rocce
4.1.1.3 Fossili
4.1.1.4 Rocce sedimentarie
4.1.1.5 Rocce ignee
4.1.1.6 Rocce metamorfiche
4.1.1.7 Suolo
4.1.2 Processi e caratteristiche osservate della Terra
4.1.2.1 Processi superficiali
4.1.2.2 Processi sedimentari
4.1.2.3 Processi ignei
4.1.2.4 Processi metamorfiche
4.1.2.5 Processi di deformazione
4.1.3 Struttura della Terra e prove

4.1.3.1 Prove
4.1.3.2 Crosta
4.1.3.3 Mantello
4.1.3.4 Nucleo
4.1.3.5 Litosfera
4.1.4 Tettonica delle placche e prove
4.1.4.1 Teoria unificante
4.1.4.2 Costruzione delle placche e subduzione
4.1.4.3 Caratteristiche dei margini delle placche
4.1.4.4 Meccanismo e tassi di movimento
4.1.4.5 Prove
4.2 Idrosfera
4.2.1 Acqua continentale
4.2.1.1 Fonti d'acqua continentale
4.2.1.2 Rifornimenti d'acqua
4.2.1.3 Contaminazione dell'acqua
4.2.2 Acqua oceanica
4.2.2.1 Composizione dell'acqua
4.2.2.2 Maree
4.2.2.3 Onde
4.2.2.4 Circolazioni su larga scala dei fluidi sulla Terra
4.3 Atmosfera
4.3.1 Composizione atmosferica
4.3.2 Flusso atmosferico
4.3.3 Cambiamento atmosferico
4.4 Biosfera
4.4.1 Evoluzione
4.4.2 Impatto su altri sistemi

5. Il sistema terrestre produce risorse
5.1 Materiali grezzi e combustibili fossili
5.1.1 Materiali grezzi per costruzione
5.1.2 Materiali grezzi per l'industria
5.1.3 Miniere di metalli
5.1.4 Minerali industriali
5.1.5 Combustibili fossili
5.1.5.1 Torba e carbone
5.1.5.2 Petrolio e gas naturale
5.1.6 Prospezione
5.1.7 Protezione ambientale e bonifica
5.2 Forniture energetiche
5.2.1 Energia dai combustibili fossili
5.2.2 Energia rinnovabile

6. Interazioni tra l'uomo e il sistema terrestre
6.1 Rischi naturali
6.1.1 Eruzione
6.1.2 Terremoto
6.1.3 Tsunami
6.1.4 Frana

6.2 Problemi ambientali
6.2.1 Erosione
6.2.2 Cambiamenti nel drenaggio
6.2.3 Smaltimento dei rifiuti
6.2.4 Inquinamento
6.2.5 Estrazione mineraria/escavazione
6.2.6 Combustione di combustibili fossili e effetto serra
6.3 Impatto sulla storia umana
6.3.1 Guerre per le risorse
6.3.2 Migrazione a causa del cambiamento climatico

7. Il sistema terrestre viene esplorato attraverso il lavoro sul campo e il lavoro pratico
7.1 Osservazione, misurazione e registrazione
7.2 Sintesi delle osservazioni
7.3 Investigazione e verifica dell'ipotesi

Glossario

Appendice – Sillabo Internazionale di Geoscienze

Immagini e Crediti delle Immagini

Figure

Box

Tabelle

0. Perché le Scienze della Terra?

Le Scienze della Terra o Geoscienze sono lo studio scientifico del nostro pianeta: oggi intendiamo anche più di questo, in quanto viene inclusa anche l'astrogeologia o geologia planetaria, che studia tutti i corpi celesti. Le Scienze della Terra coinvolgono i vari aspetti delle Geoscienze o Geologia in senso lato, come la geochimica, la geofisica, la paleontologia, l'idrogeologia e la geologia applicata, e inoltre includono la meteorologia, l'oceanografia, le scienze ambientali, la pedologia e lo studio del Sistema Solare. Le Geoscienze utilizzano le informazioni di ciò che è accaduto sulla Terra nel passato e nel presente per predire il futuro, ma fanno anche uso delle evidenze del presente per interpretare quello che è si è verificato nel passato. Inseriscono elementi di biologia, chimica, fisica, matematica, geografia e ingegneria nello studio della Terra e degli altri pianeti.

Una delle prerogative delle Geoscienze è che chiunque è in grado di studiarle. Quando i bambini si appassionano ai sassolini su una spiaggia e cominciano a domandarsi perché sono così diversi tra loro, stanno cominciando a porsi le domande che anche i geologi si pongono. Quando raccolgono sassolini diversi, o granelli di sabbia di diverso colore o fossili diversi, stanno cominciando a classificare i materiali della Terra, proprio come fanno i geologi. Quando si domandano perché la sabbia formi dei disegni interessanti, stanno cominciando a investigare i processi della Terra, proprio come i geologi.

Figura 0.1: Sassolini di forme e colori diversi e disegni fatti dalla sabbia.





Se poi si vogliono studiare le Geoscienze, si deve poterlo fare a scuola, o all'università. C'è chi studia la geologia perché vuole comprendere il funzionamento della Terra, oppure perché ama collezionare oggetti quali minerali o rocce. Altri, invece, diventano professionisti, geoscienziati e passano la loro vita a porsi problemi e a cercare soluzioni su questioni geologiche. Studiano la Terra dai tropici ai poli, dalle montagne più alte agli oceani più profondi, oppure cercano nuove risorse, nuovi e migliori modi di smaltire i rifiuti e luoghi adatti per costruire edifici in cui vivere in sicurezza.

Questo è ciò di cui parla il libro. Comincia con uno sguardo sull'intero Sistema Terra, la Terra all'interno del Sistema Solare e come tutto ciò sia cambiato nel tempo. Quindi il libro esamina la geosfera, l'idrosfera, l'atmosfera e la biosfera e spiega dove possiamo trovare le risorse e le energie di cui abbiamo bisogno. Si focalizza sui rischi ambientali e su come questi possano aver modificato la storia dell'uomo e, infine, spiega quello che i geologi fanno e in che modo lo fanno.
Quindi, chi è interessato a tutto ciò vada avanti a leggere: comincerà a pensare da subito come un geoscienziato.

La Terra: un sistema in continuo cambiamento

Un sistema è composto da una gamma di parti diverse, collegate in una rete che fa funzionare l'intero sistema. I sistemi possono essere semplici come un lavandino: l'acqua entra nel lavandino (input) e scorre via dal tubo di scarico (output). L'acqua può essere calda o fredda, e così anche l'energia dell'acqua (la sua temperatura) è uno degli input. Il calore dell'acqua calda può essere perso quando l'acqua scende per il tubo di scarico, ma può essere anche considerato un output se l'acqua nel lavandino

si raffredda. Il *sistema lavandino* ha dei confini che sono i lati e il fondo del lavandino. Gli input entrano dall'ambiente esterno e fuoriescono nell'ambiente circostante, al di là dei confini.

Il lavandino è un esempio di **sistema aperto**, che ha, ai suoi confini, interazioni con l'ambiente circostante. Nel caso del lavandino, acqua e calore sono input e output rispetto all'ambiente. Un esempio di **sistema chiuso** sono i thermos: quando il tappo è chiuso, il liquido non può entrare o uscire e nemmeno il calore può entrare o uscire. Nessun sistema può essere completamente chiuso, quindi anche il miglior thermos dopo un po' perderà calore dal liquido contenuto al suo interno.

Figura 1.1. Un lavandino e un thermos, esempi di sistema aperto e di sistema (quasi) chiuso.





Il sistema Terra non è solo estremamente complesso, molto più complesso di questi semplici esempi, ma ha anche molti sottosistemi; inoltre è cambiato e sta cambiando nel tempo.

1.1 Caratteristiche

La Terra è un sistema aperto per quanto riguarda l'energia. La maggior parte dell'energia che fa funzionare i sottosistemi superficiali terrestri proviene dal Sole, sotto forma di radiazioni elettromagnetiche. Questa energia è un input per la Terra durante il giorno, ma parte di essa viene irradiata verso lo spazio come output, durante il giorno e la notte. Poiché la radiazione in input e quella in output sono generalmente in equilibrio, la temperatura globale della Terra rimane fissa, almeno nel breve periodo. Oggi la Terra è un sistema quasi chiuso per quanto riguarda la materia. Ma non è sempre stato così: la Terra primordiale era infatti bombardata da asteroidi. Attualmente ciò che è sulla Terra rimane sulla Terra; pochissimo materiale, se paragonato alla grandezza della Terra, viene aggiunto da meteoriti e polvere interstellare, e il solo materiale solido che viene disperso nello spazio sono le sonde spaziali.

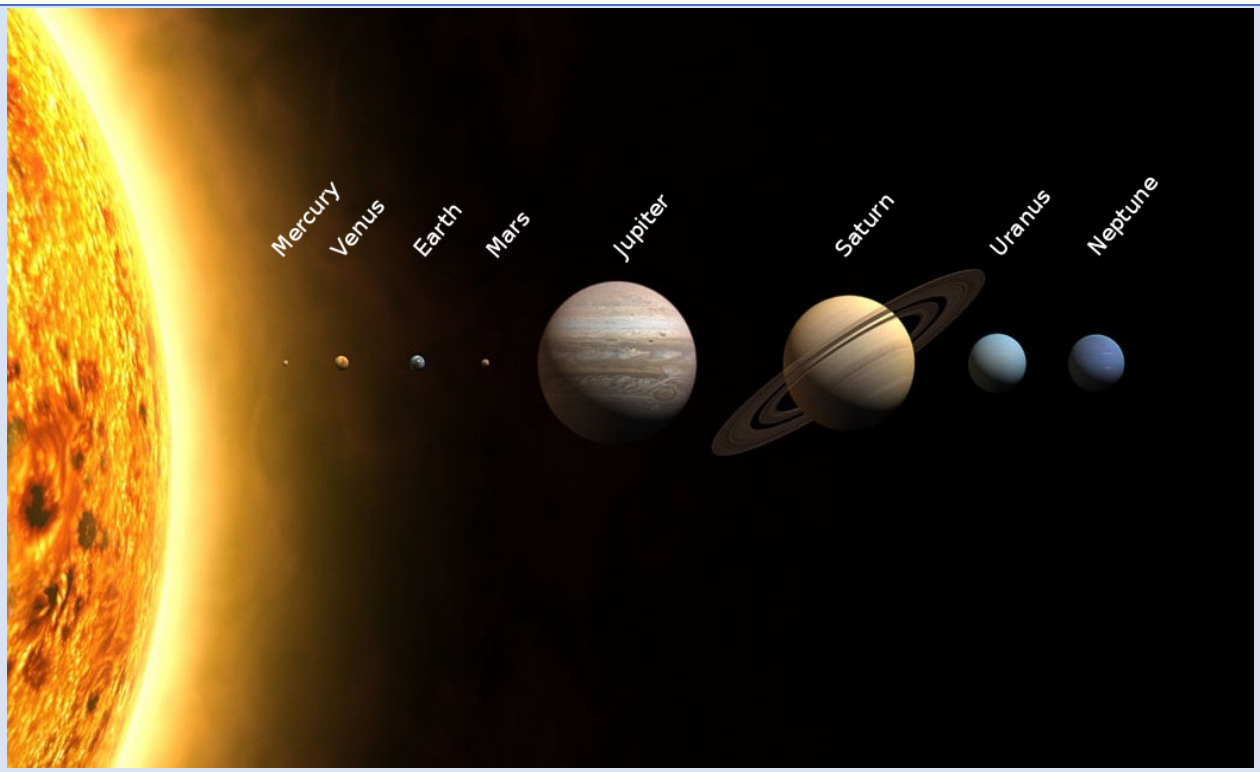
Il sistema Terra è cambiato nel tempo: non solo perché si è ridotta la quantità di meteoriti che bombardano la superficie, ma anche per altre ragioni, come il raffreddamento della Terra, la formazione degli oceani, l'evoluzione dell'atmosfera e della vita, la tettonica delle placche.

Figura 1.2. La Terra: un sistema molto complesso.



Il sistema Terra è parte del Sistema Solare. Anch'esso è un sistema quasi chiuso, sia per l'energia che per la materia: pochissima energia è infatti ricevuta dall'esterno del Sistema, e anche pochissima materia.

Box 1.1. Il sistema solare mostrato in scala rispettando le dimensioni ma non le distanze.



Questo 'ritratto' del sistema solare mostra il Sole e i pianeti. Le dimensioni sono rappresentate mantenendo le proporzioni corrette, ma non le distanze. Questa immagine mostra la materia del Sistema Solare. Non compaiono, in quanto di dimensioni troppo ridotte, la Luna, i pianeti nani, gli asteroidi, le comete e la polvere interstellare.

Il sistema Terra può essere diviso in quattro principali sottosistemi: la Terra solida (**geosfera**), l'aria intorno alla Terra (**atmosfera**), l'acqua sulla superficie del pianeta (**idrosfera**) e la vita sulla Terra (**biosfera**).

La **litosfera**, che forma le placche tettoniche terrestri è la parte esterna della geosfera.

1-.2 Interazioni

Geosfera, idrosfera, atmosfera e biosfera sono sistemi molto aperti in quanto tutti interagiscono tra loro, scambiando sia energia che materia. Le interazioni tra questi quattro sottosistemi avvengono ovunque e in continuazione, su intervalli di tempo che possono essere molto brevi o molto lunghi. Sono queste interazioni che rendono il nostro pianeta così dinamico. Ovunque si vada, qualsiasi cosa si faccia, questi sistemi interagiranno intorno a noi a velocità diverse, da molto rapidamente a molto lentamente.

Le sponde dei fiumi sono ottimi posti per osservare le interazioni del sistema Terra. Lo scorrere di un fiume è parte dell'idrosfera: erode le sponde e trasporta i sedimenti della geosfera. Gli organismi che costituiscono la biosfera vivono sulle sue rive, animali e piante respirano gas atmosferici, inspirano ossigeno ed espirano anidride carbonica, i vegetali per la fotosintesi utilizzano l'anidride carbonica e liberano ossigeno. L'acqua finisce in atmosfera attraverso l'evaporazione delle acque del fiume, la traspirazione delle piante e la respirazione degli animali, sottoforma di vapore acqueo, che può poi ricadere sotto forma di pioggia, contribuendo a riportare l'acqua atmosferica nuovamente nella geosfera.

Box 1.2. Il ciclo locale dell'acqua, un esempio di interazioni tra geosfera, idrosfera, atmosfera e biosfera.

Appena si formano, le gocce di pioggia non contengono né acidi né alcali, quindi sono neutre. Mentre cadono attraverso l'atmosfera, tuttavia, sciolgono l'anidride carbonica e quindi diventano leggermente acide. Quando la pioggia cade sul suolo, penetra in profondità. Molti animali vivono nel terreno e lì respirano, prendendo ossigeno e rilasciando anidride carbonica. Questa aggiunta di anidride carbonica si scioglie nell'acqua presente nel terreno facendola diventare ancora più acida. Il materiale vegetale in decomposizione aggiunge acido umico all'acqua. Questa acqua molto acida reagisce con frammenti di roccia nel terreno, sciogliendo particelle di calcare e di altre rocce. Attraverso queste reazioni l'acqua ritorna ad essere neutra: quando sgorga dalle sorgenti, infatti, di solito è neutra.



Pioggia



Umidità del suolo



Sorgente

Questo esempio evidenzia l'interazione tra i diversi sottosistemi del sistema Terra. Le gocce di pioggia nell'**idrosfera** si combinano con l'anidride carbonica dall'**atmosfera**. Penetrano nel suolo della **geosfera** dove sciolgono ulteriore anidride carbonica prodotta dagli animali della **biosfera**. L'acqua acidificata nel terreno reagisce con i frammenti di roccia della **geosfera**, sgorgando dalle sorgenti, dove è di nuovo **idrosfera** visibile.

In questo esempio viene scambiata la materia (acqua, anidride carbonica atmosferica, gli input e output della respirazione e della reazione con i frammenti di roccia); ma viene scambiata anche l'energia (la pioggia che cade, l'energia della respirazione e l'energia chimica coinvolta nelle reazioni acqua/roccia).

1.3 Feedback (retroazione)

Il **feedback** (o retroazione, ma il termine inglese è correntemente usato anche in italiano) è un elemento cruciale nei sistemi. Un esempio di feedback è una caldaia con termostato; il termostato è un termometro con un interruttore. Quando l'acqua nei termosifoni diventa fredda, il termometro dà un feedback all'interruttore, cioè gli passa l'informazione che l'acqua è diventata fredda, e la caldaia viene accesa. Quando l'acqua diventa abbastanza calda, questa informazione viene passata al termostato e la caldaia viene spenta. I nostri corpi funzionano con simili meccanismi di feedback: quando ci surriscaldiamo troppo, sudiamo per raffreddarci, ma quando ci raffreddiamo allora tremiamo per riscaldarci.

I feedback possono essere **positivi** o **negativi**, ma questi termini possono essere fraintesi. Il feedback negativo, infatti, mantiene il sistema in uno stato di stabilità e quindi è una buona cosa. Invece il feedback positivo può rendere instabile un sistema con risultati devastanti.

Ad esempio, la quantità di sali sciolti negli oceani è influenzata da un feedback negativo. I fiumi di tutto il mondo sciolgono i sali dalle rocce circostanti, carbonati, solfati e cloruri e li portano al mare, ma la salinità degli oceani rimane la stessa (intorno al 3,4% di cui il 2,7% costituita da NaCl, il Cloruro di Sodio) quando invece ci aspetteremmo che diventi sempre maggiore nel corso del tempo. Il feedback negativo che riduce la quantità di sali disciolti è determinato dalla sedimentazione, deposizione sul fondo degli oceani dei carbonati, che vengono sepolti creando rocce sedimentarie o quando l'acqua di mare resta intrappolata in bacini costieri: man mano che l'acqua marina evapora, il sale, in particolare cloruri e solfati, si depositano formando le rocce evaporitiche: in tal modo i sali vengono rimosso dagli oceani.

Figura 1.3. Sale che viene estratto da una salina a Trapani, in Sicilia.

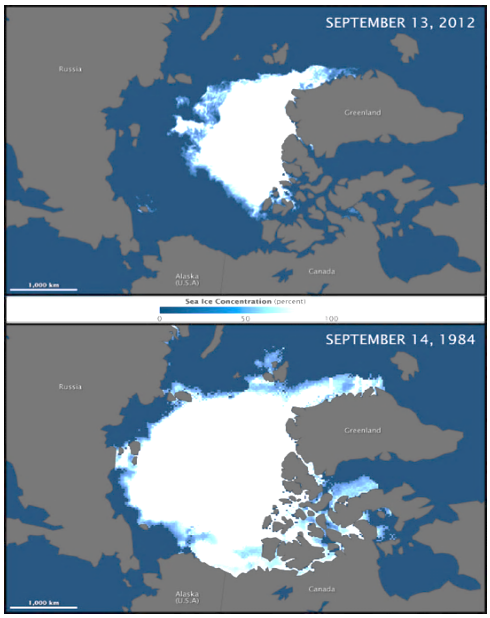


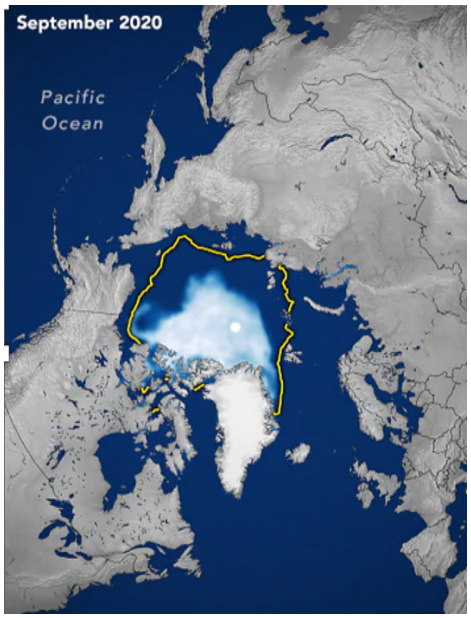
I processi di feedback negativo che avvengono negli esseri viventi, consentono agli organismi, quindi anche al corpo umano, di conservare le condizioni di equilibrio anche al variare delle condizioni esterne dell'ambiente; questi processi vengono detti omeostasi.

Quando c'è un feedback positivo, invece, il sistema può diventare instabile. Quando i raggi solari colpiscono le calotte di ghiaccio, la maggior parte di essi vengono riflessi e di conseguenza l'effetto di riscaldamento sulla Terra è minimo. La riflessione della luce solare, più precisamente della radiazione solare, da parte di una superficie è detta **albedo:** nelle superfici di colore chiaro come la neve e ancora di più nel ghiaccio il potere riflettente, e quindi l'albedo, ha i valori massimi (1). Questa riflessione della luce solare è uno dei fattori che mantengono stabile la temperatura della Terra. Però può esserci un feedback positivo, che può avere conseguenze diverse. Se la Terra si raffredda, le calotte di ghiaccio crescono aumentando l'effetto di albedo, così che la Terra diventa ancora più fredda. Ma se la Terra si riscalda, le calotte di ghiaccio si sciolgono, riducendo l'albedo e quindi causando un ulteriore riscaldamento. Qualora il ghiaccio si sciogliesse completamente, sulla Terra si verificherebbe un ulteriore aumento delle temperature.

Figura 1.4. I ghiacci artici nel 1984 e nel 2020. Nel passato, la vasta area di ghiaccio galleggiante provocava un notevole albedo. Con il riscaldamento globale, le zone ghiacciate si sono ristrette: questo ha ridotto l'albedo e ha contribuito al riscaldamento della Terra attraverso un meccanismo di feedback positivo.

Quando in un sistema c'è un feedback positivo, questo può continuare finché non si arriva a un punto di non ritorno: il sistema entra in un nuovo stato. Nel passato la Terra ha conosciuto periodi freddi in cui parti della Terra stessa erano coperte di ghiaccio, e periodi caldi in cui non c'erano calotte di ghiaccio.





1.4. Processi e prodotti

1..4.1 Cicli

Facciamo un semplice esempio di un ciclo: riempiamo una tazza con dell'acqua bollente e lasciamola per un minuto finché la tazza non si riscalda. Poi togliamo l'acqua dalla tazza, lasciando solo 1 cm di acqua bollente: mettiamo un bicchiere di vetro capovolto sopra la tazza, come mostrato in figura 1.5, e guardiamo cosa accade.

Il bicchiere si appanna man mano che l'acqua condensa sulla superficie interna del bicchiere: poi rivoletti di acqua scorreranno verso la tazza.

Ciò che accade è che l'acqua bollente evapora dalla superficie diventando vapore acqueo, che condensa sotto forma di goccioline all'interno del bicchiere, che è più freddo, e lo appanna, finché le gocce diventano grandi abbastanza da colare nella tazza.

Quello che possiamo osservare è una combinazione di processi e prodotti. Il processo di evaporazione dà come prodotto il vapore acqueo. Il processo di condensazione dà come prodotto le goccioline d'acqua che colano lungo il bicchiere, mescolandosi all'acqua all'interno della tazza.

Figura 1.5. Un semplice esempio del ciclo dell'acqua.



I **processi** fanno succedere qualcosa; i **prodotti** sono il risultato.

Questa è una semplice versione di un ciclo. L'acqua è allo stato liquido nella tazza, evapora fino a diventare vapore acqueo e poi condensa in goccioline che si uniscono per poi ricadere di nuovo dentro la tazza. Questo è anche un esempio di sistema chiuso rispetto all'acqua: l'acqua, infatti, non esce dal sistema.

Tutti i materiali terrestri subiscono in qualche modo un ciclo. Esempi importanti sono costituiti dai cicli dell'acqua, del carbonio e delle rocce.

1.4.2 Il ciclo dell'acqua

Il ciclo dell'acqua che avviene in natura è più complesso rispetto a quello che abbiamo visto nella figura 1.5, ma i processi e i prodotti del ciclo dell'acqua sono sempre intorno a noi.

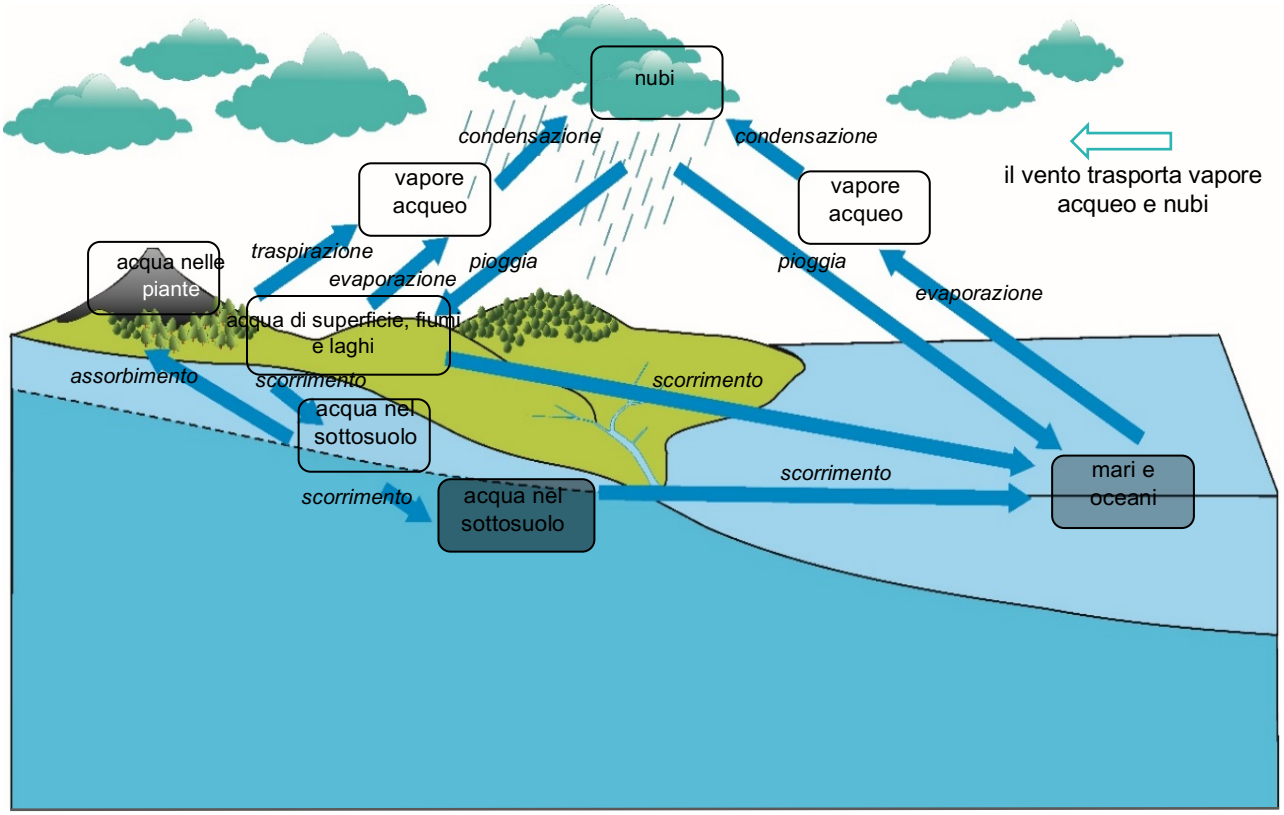
Quando piove, l'acqua piovana si accumula nei laghi, nei mari o in pozzanghere; dalla superficie l'acqua evapora in vapore acqueo, invisibile, nell'aria. Quando l'aria si raffredda, il vapore condensa in goccioline sotto forma di nubi. Man mano che le nubi si raffreddano, le goccioline d'acqua si aggregano e, quando diventano abbastanza grandi, ricadono sotto forma di pioggia. Questo semplice sistema è complicato da diversi fattori. Il vapore che condensa non produce soltanto nubi, ma anche nebbia e foschia. L'acqua cade dalle nubi sotto forma di pioggia, ma anche come neve e grandine. L'acqua che raggiunge il suolo forma pozzanghere, scorre in rigagnoli, ruscelli, fiumi e infine finisce in laghi e mari. L'acqua evapora da tutti questi prodotti del ciclo dell'acqua, ma anche le piante attraverso l'evapotraspirazione, rilasciano in aria, attraverso le foglie, l'acqua che hanno assorbito dalle loro radici. Il vapore acqueo, generato da **evaporazione** e **traspirazione**, viene trasportato e diffuso dalle correnti d'aria.

Pioggia e fiumi penetrano in parte nel suolo e nelle rocce sottostanti, e diventano acqua sotterranea accumulandosi negli spazi vuoti presenti nei sedimenti e nelle rocce porose. Quest'acqua scorre attraverso depositi e rocce permeabili e può infine emergere dalle sorgenti.

Nelle zone fredde l'acqua, che cade come neve, può accumularsi sotto forma di ghiaccio in ghiacciai e calotte glaciali, mentre l'acqua che è nel suolo può congelare a formare il **permafrost**, quando il terreno rimane sempre gelato. Il ghiaccio può anche scorrere e infine fondere e diventare nuovamente acqua allo stato liquido.

I principali processi del ciclo dell'acqua sono: evaporazione, condensazione, precipitazione (di pioggia, ecc.) e spostamento nell'atmosfera ad opera dei venti, scorrimento sul suolo o all'interno di esso. Nelle zone fredde si verifica anche il congelamento, lo scorrimento del ghiaccio e la fusione. Molti di questi processi e prodotti sono mostrati in figura 1.6.

Figura 1.6. Il ciclo dell'acqua: prodotti (nei riquadri) e processi (in *corsivo*).



Box 1.3. Parte del ciclo dell'acqua in giardino o in cortile.





In un giardino o nel cortile si può vedere parte del ciclo dell'acqua. Le gocce d'acqua cadono dalle nubi in pozzanghere; l'acqua scorre fino a raggiungere fiumi e laghi. L'evaporazione dei laghi e di altri specchi d'acqua produce vapore acqueo. Quando raffredda, il vapore condensa a formare le nubi che si ritrasformano in pioggia.

Flussi, riserve e tempo di residenza

I processi e i prodotti dei cicli possono essere definiti anche flussi e riserve.

I **flussi** indicano la velocità e la portata dei materiali durante i processi: i flussi del ciclo dell'acqua possono essere molto veloci (come l'acqua in un fiume in piena) o molto lenti (come il movimento di un ghiacciaio); inoltre possono essere molto grandi (l'evaporazione globale) o molto piccoli (la caduta della neve sopra le calotte di ghiaccio).
Le **riserve** possono rappresentare i prodotti: anch'esse possono essere molto grandi, come gli oceani, e molto piccoli, come l'acqua contenuta all'interno dei nostri corpi.
Il **tempo di residenza** è il tempo che impiega una riserva a rinnovarsi. Alcuni tempi di residenza sono corti, come ad esempio il tempo in cui il vapore acqueo resta in atmosfera (solo pochi giorni); altri tempi di residenza sono molto lunghi, come le decine di migliaia di anni in cui il ghiaccio rimane nelle calotte.

1.4.4 Il ciclo delle rocce

Il ciclo delle rocce è strettamente legato al ciclo dell'acqua. L'acqua che scorre in superficie, infatti, erode e trasporta i sedimenti. Nelle acque calme i sedimenti si depositano formando strati di materiali sciolti. Questi sedimenti litificano diventando cioè rocce sedimentarie: questo avviene in prevalenza in profondità. Se queste rocce vengono sollevate e i materiali che le ricoprono vengono rimossi, le rocce risultano esposte sulla superficie terrestre, così che il ciclo abbia nuovamente inizio.

Box 1.4. Parte del ciclo delle rocce in spiaggia.



È possibile osservare parte del ciclo delle rocce in azione quando il vento soffia o l'acqua scorre sul terreno. Il vento mette in movimento, trasporta e deposita la polvere, le foglie e i rifiuti, e così fa l'acqua. In questa piccola porzione di spiaggia, fatta di sabbia, l'acqua che scorre ha rimosso sabbia dall'alto, l'ha trasportata verso il basso nei canali che si vedono al centro e l'ha depositata nei piccoli delta che si vedono in basso.

Il ciclo delle rocce si complica quando le rocce sedimentarie sono coinvolte in episodi di sollevamento delle montagne, l'orogenesi. Temperature e pressioni elevate causano ripiegamenti e spaccature (faglie) e possono anche trasformare la roccia sedimentaria in una roccia metamorfica.

La trasformazione può essere più significativa, quando l'aumento delle temperature fa fondere parzialmente le rocce, fino a diventare un magma. I magmi sono caldi, di conseguenza meno densi delle rocce circostanti e quindi salgono verso la superficie. Possono raffreddarsi nel sottosuolo solidificando lentamente, formando le rocce plutoniche, oppure possono venire eruttati in superficie attraverso l'attività vulcanica. Tutte le rocce che si formano dai magmi sono chiamate rocce ignee. Tutte le rocce nel sottosuolo possono essere sollevate ed esposte in modo da rientrare nuovamente nel ciclo delle rocce.

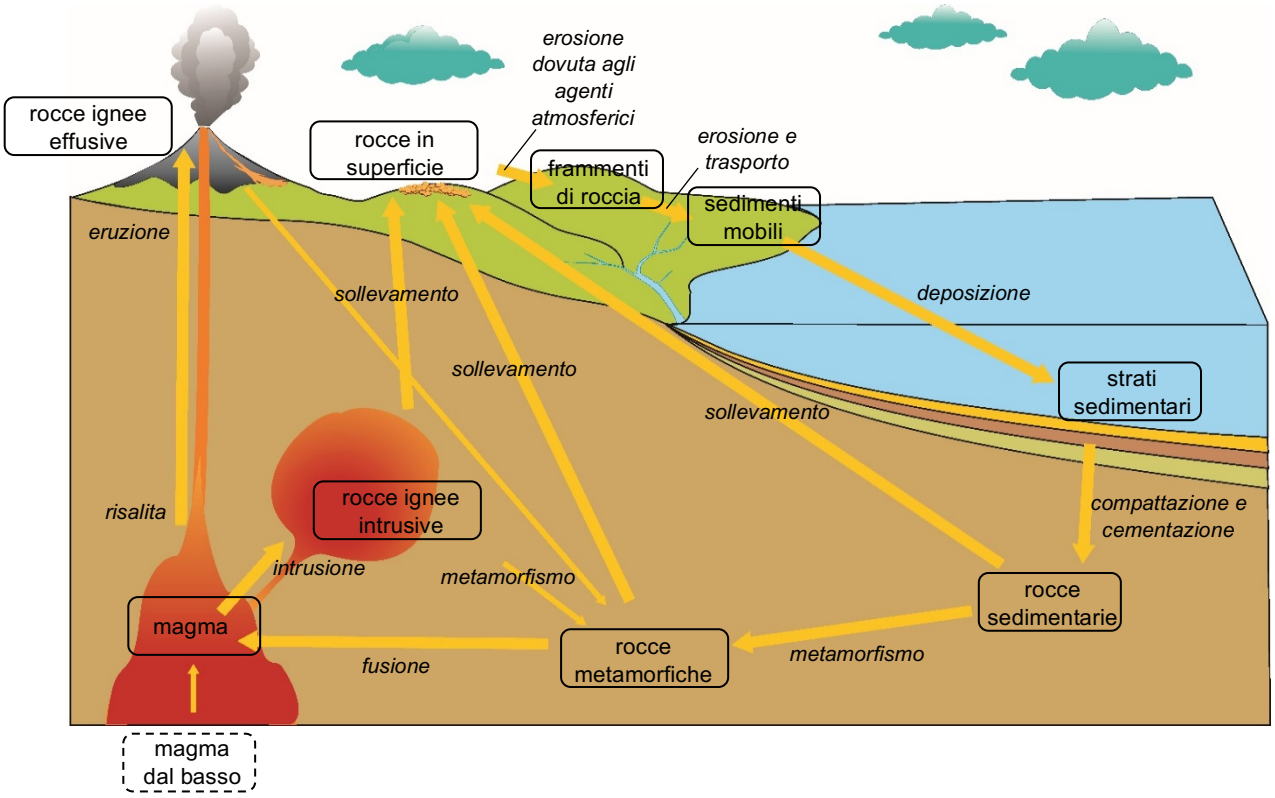
La figura 1.7 mostra i prodotti (nei riquadri) e i processi (in *corsivo*) del ciclo delle rocce, che sono collegati tra loro e con il ciclo dell'acqua. Le rocce della superficie terrestre vengono trasformate dagli agenti atmosferici in frammenti che, quando sono erosi e trasportati, diventano sedimenti detritici. La deposizione di questi sedimenti forma strati sedimentari. Essi possono essere compattati e cementati, tramite un processo detto diagenesi, trasformandosi in rocce sedimentarie che possono poi venire sollevate fino a diventare nuovamente rocce affioranti sulla superficie terrestre. Possono anche subire metamorfismo e diventare rocce metamorfiche, che possono anch'esse venire sollevate a formare nuove rocce sulla superficie terrestre.

Le rocce metamorfiche possono fondere e diventare magma che può formare rocce ignee intrusive o plutoniche: anch'esse possono venire sollevate fino alla superficie terrestre. Oppure il magma può risalire ed essere eruttato da un vulcano, e in questo caso si parla di rocce ignee effusive o vulcaniche. Anche i magmi profondi possono essere coinvolti in questo ciclo e anche le rocce ignee possono subire il metamorfismo.

Nel sistema del ciclo delle rocce, i prodotti o riserve sono le rocce sedimentarie, metamorfiche e ignee. I processi che causano i movimenti o flussi tra queste riserve sono il metamorfismo, la fusione, la solidificazione e tutti i processi coinvolti nell'erosione, trasporto e **litificazione**, che fa diventare un sedimento in roccia sedimentaria. Il tempo di residenza è di solito intorno ai milioni di anni.

Il ciclo delle rocce è in effetti più complesso: verrà illustrato nel dettaglio nella sezione 4.1.2.

Figura 1.7. Il ciclo delle rocce: prodotti (nei riquadri) e processi (in *corsivo*).



1.4.5 Il ciclo del carbonio

Quando un organismo respira, espira più anidride carbonica di quella che inspira. Questo avviene perché uno dei processi dell'organismo è la respirazione, in cui l'ossigeno reagisce con i composti del carbonio presenti nelle cellule, rilasciando energia e producendo anidride carbonica. Il processo di respirazione rilascia un flusso di anidride carbonica in atmosfera, che contiene sempre una piccola quantità di anidride carbonica (circa lo 0,04%).
Tutti gli organismi emettono anidride carbonica attraverso la respirazione e rilasciano anche composti del carbonio nell'atmosfera, attraverso le deiezioni e quando muoiono e si decompongono.

Il tempo di residenza dell'anidride carbonica in atmosfera è breve in quanto essa viene rimossa velocemente, soprattutto dalla fotosintesi delle piante. Nel processo di fotosintesi, l'energia solare fa reagire l'anidride carbonica con l'acqua a formare i

composti del carbonio che compongono le piante. Così le piante, e in particolare le alghe negli oceani, costituiscono una grande riserva di carbonio. Questo carbonio viene rilasciato quando le piante muoiono o vengono mangiate da animali, o quando le piante vengono bruciate, sia deliberatamente che a causa di incendi boschivi.

Box 1.5. Il ciclo del carbonio in azione.



Mentre questo escursionista riposa nella tundra dell'Alaska, respira immettendo anidride carbonica in atmosfera. Le piante verdi, nel frattempo, stanno facendo la fotosintesi grazie alla luce del sole, utilizzando l'anidride carbonica per costruire le proprie cellule vegetali. Se l'escursionista mangiasse i mirtilli, anch'essi farebbero parte del ciclo del carbonio. Questi flussi del ciclo del carbonio avvengono ovunque sulla Terra quando ci sono animali e piante, inclusi quelli che vediamo fuori dalla finestra.

Questo è il **ciclo breve del carbonio**, studiato da molti biologi. Coinvolge la fotosintesi e la respirazione, le deiezioni e la decomposizione. Sembra essere un ciclo in equilibrio, con tanto carbonio che viene aggiunto nell'atmosfera quanto quello che viene sottratto. Ma c'è anche una parte più lunga del ciclo del carbonio: ad esempio, una certa quantità dell'anidride carbonica presente in atmosfera può disciogliersi negli oceani, con tempo di residenza di migliaia di anni.

Alcuni animali e piante contengono nel loro corpo "parti dure" composte di carbonato di calcio. La formula chimica del carbonato di calcio è $CaCO_3$ dove la seconda C è il carbonio, che forma circa il 12% della massa del carbonato di calcio. Le nostre ossa e quelle di molti animali contengono carbonato di calcio. Le conchiglie sono fatte di carbonato di calcio e così anche alcune piante microscopiche. Quando questi animali e piante muoiono, parte del loro corpo si deposita sotto forma di sedimento e può diventare roccia sedimentaria, con un tempo di residenza di milioni di anni. La roccia ricca di carbonato di calcio composta per lo più da resti degli animali marini è detta calcare; la roccia composta prevalentemente da carbonato di calcio proveniente da frammenti di organismi è detta calcare organogeno.

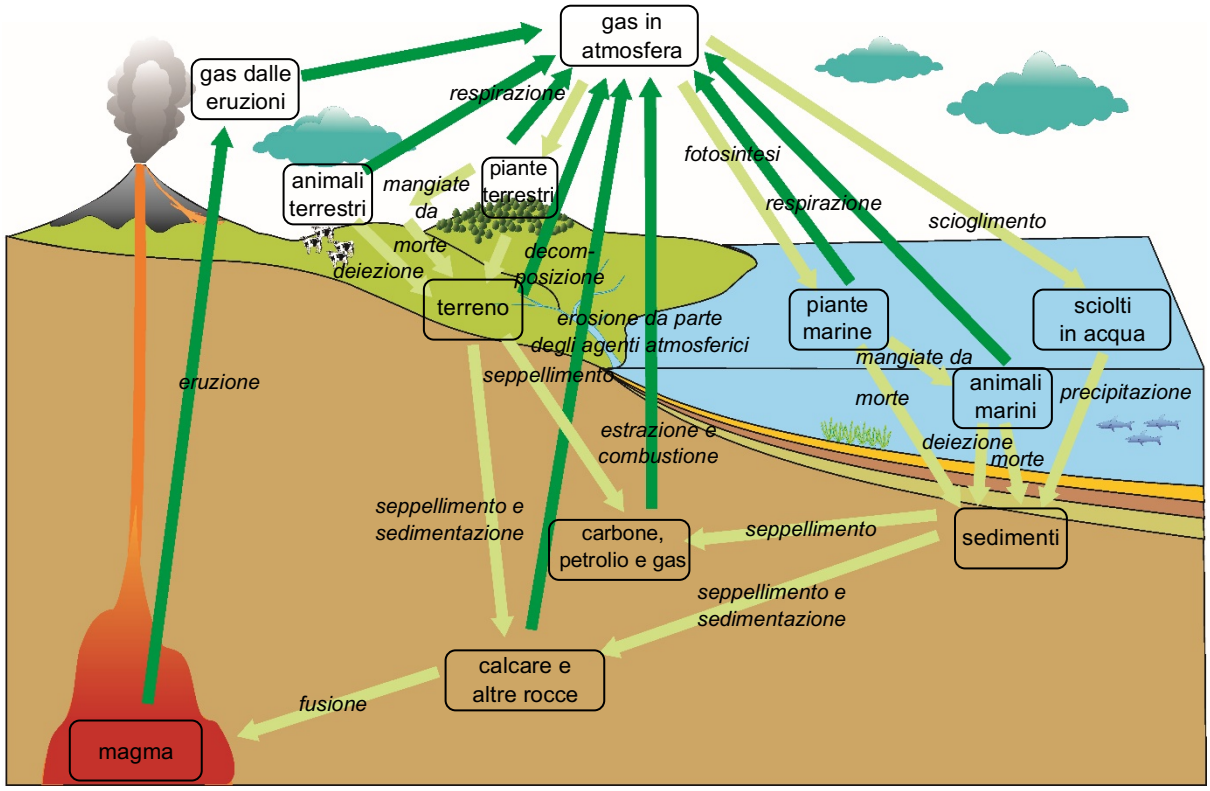
Quando le piante muoiono, in genere si decompongono; però, se vengono sepolte dai sedimenti e conservate, anche il carbonio al loro interno si conserva. Quando le piante terrestri si conservano in grandi spessori, possono formare il carbone, che nel suo processo di maturazione rilascia gas naturale. Anche microscopici animali e piante degli oceani, quando muoiono, possono conservarsi nei sedimenti e in seguito trasformarsi in petrolio e gas naturale. I processi naturali rilasciano queste riserve di carbonio nuovamente in atmosfera nel corso di milioni di anni; il petrolio e il gas possono infiltrarsi in superficie e il carbone può essere portato in superficie da fenomeni di sollevamento ed eroso da fenomeni superficiali.

Le rocce sedimentarie che contengono calcare, carbone, petrolio e gas naturale possono essere coinvolte in processi di sollevamento delle montagne, e anche metamorfosate o parzialmente fuse. In questo caso il magma prodotto dalla fusione parziale conterrà carbonio disciolto che può essere portato in superficie da eruzioni vulcaniche. Molte eruzioni rilasciano enormi quantità di anidride carbonica in atmosfera.

Anche queste parti del ciclo del carbonio di lungo termine sembrano essere in equilibrio. Le attività umane, tuttavia, possono alterare questo equilibrio estraendo e bruciando carbone, petrolio e gas naturale. Tutto questo è spiegato nella sezione 4.3.3.

I processi e i prodotti del ciclo breve del carbonio e di quello a lungo termine sono mostrati nella figura 1.8.

Figura 1.8. Il ciclo del carbonio: prodotti (nei riquadri) e processi (in *corsivo*). I processi che fissano carbonio sono quelli con le frecce verde chiaro, mentre i processi che rilasciano carbonio sono quelli con le frecce verde scuro.



1.4.5 Fonti di energia

La luce solare fornisce energia per la fotosintesi, ed è la fonte primaria della maggior parte dell'energia che regola il ciclo dell'acqua e i processi superficiali del ciclo delle rocce.

Nel ciclo del carbonio, parte dell'energia immagazzinata nelle cellule delle piante e ottenuta attraverso la fotosintesi può essere rilasciata quando gli animali mangiano le piante. Questo fornisce energia a tutti gli animali erbivori della Terra: i predatori si procurano quindi la loro energia mangiando altri animali. Parte di questa energia può essere immagazzinata nelle piante sepolte e nei resti degli animali, per essere in seguito rilasciata da processi naturali o dall'attività umana. Solo il processo di sollevamento, il processo metamorfico e il processo igneo del ciclo del carbonio impiegano energia che non si origina dal Sole: sono originati da energia proveniente dall'interno della Terra.

L'energia solare causa l'evaporazione che è parte del ciclo dell'acqua. Il vapore acqueo viene anche immesso in atmosfera attraverso la traspirazione delle piante, e le piante non potrebbero esistere senza la fotosintesi. L'energia dal Sole determina anche i moti dell'aria: l'aria si innalza sopra le aree più calde e ridiscende nelle zone più fredde, generando il movimento orizzontale chiamato vento. Il vapore acqueo che si genera in zone con forte evaporazione o traspirazione viene trasportato dall'azione del vento. Le parti del ciclo dell'acqua che non dipendono dall'energia solare sono il flusso verso il basso dell'aria fredda, che avviene per la forza di gravità e il moto circolare delle correnti in atmosfera e negli oceani, che invece dipende dalla rotazione terrestre.

Nel ciclo delle rocce l'energia solare è importante perché spacca le rocce ed il suolo sulla superficie terrestre. Le parti del ciclo dell'acqua dipendenti dall'energia del Sole, che trasportano e depositano i sedimenti, coinvolgono acqua e il flusso del ghiaccio;

anche il vento – originato dall'energia solare – trasporta i sedimenti. Le parti del processo di trasporto dei sedimenti che non coinvolgono energia solare sono il movimento verso il basso di rocce, acqua, ghiaccio e correnti d'aria, che dipendono dalla forza di gravità, e la compattazione dei sedimenti da parte di materiali sovrastanti, anch'essa dipendente dalla gravità.

L'interno della Terra dà un apporto molto minore rispetto all'energia che la Terra riceve dal Sole. Nonostante ciò, anche le fonti di energia interne alla Terra hanno effetti importanti, in particolare quando agiscono nel corso del tempo geologico.

Parte dell'energia è rimasta nel nucleo della Terra quando era interamente fusa, nelle prime fasi della sua formazione: questa energia primordiale viene ancora rilasciata lentamente. Un'altra importante fonte di energia è il decadimento radioattivo che avviene nelle parti solide della Terra, molto al di sotto della sua superficie. L'energia dell'interno della Terra determina i processi interni del ciclo delle rocce che hanno come risultato la litificazione dei sedimenti, le faglie che causano i terremoti, il metamorfismo, il sollevamento delle montagne e la fusione parziale che produce i magmi.

La maggior parte dell'energia sulla Terra proviene dunque dal Sole. Altre fonti di energia sono l'energia primordiale e quella derivante dal decadimento radioattivo, appena descritte. Inoltre, vanno considerate l'energia potenziale gravitazionale e l'energia cinetica rotazionale. L'attrazione gravitazionale tra Sole, Terra e Luna e la rotazione terrestre, l'orbita della Luna intorno alla Terra, e la Terra e la Luna che insieme orbitano intorno al Sole, sono convertite in energia termica definita "riscaldamento mareale".

2. La Terra è un sistema, nel Sistema Solare e nell'Universo

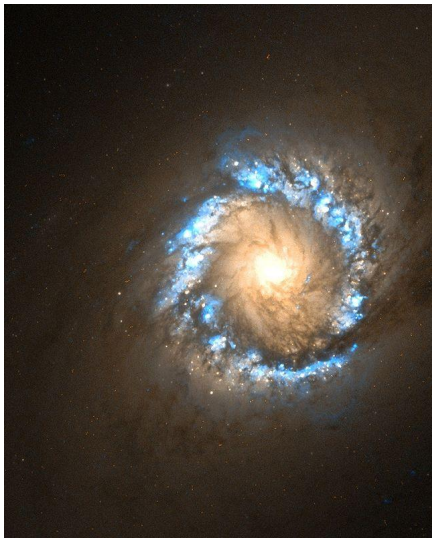
2. 1 Origini

Anche se la luce percorre una distanza di circa 300mila chilometri al secondo, ci vogliono 8 minuti affinché la luce del Sole ci raggiunga e diversi anni affinché la luce delle stelle più vicine raggiunga i nostri occhi. Quindi guardare il cielo notturno è come andare indietro nel tempo. Con potenti telescopi possiamo vedere l'aspetto che le galassie, "isole" cosmiche fatte di miliardi, fino a centinaia di miliardi di stelle, avevano nel passato. Gli studiosi hanno dimostrato che l'universo è nato circa 14 miliardi di anni fa. All'inizio non c'erano stelle e galassie, ma l'intero universo era pieno di radiazione ad alta energia. Con il **big bang** l'universo ha cominciato ad espandersi e la radiazione si è trasformata in materia.

Il più comune elemento nella materia è l'idrogeno, l'atomo più semplice. Però quasi tutto sulla Terra e anche oltre, inclusi i nostri corpi, è fatto di altri tipi di atomi che si sono formati inizialmente nei nuclei delle stelle. Man mano che la materia dell'universo si raffreddava, le stelle hanno cominciato a formarsi e a raggrupparsi in galassie. L'energia che alimenta le stelle, incluso il nostro Sole, deriva dalla fusione degli atomi di idrogeno a formare atomi più grandi. Nei nuclei delle stelle si sono formati infatti gli atomi che abbondano sulla Terra come silicio, ossigeno, carbonio, azoto e ferro. Nel corso del tempo le stelle hanno scagliato moltissima materia nello spazio, inclusi questi atomi appena formati. Intorno ai 4,6 miliardi di anni fa il sistema solare ha cominciato a formarsi a partire dall'idrogeno del Sole e dalle "ceneri" delle stelle preesistenti. Il nostro sistema Terra è parte del sistema solare.

Figura 2.1. Le galassie fotografate dal telescopio Hubble. I colori sono un'aggiunta basata sui dati reali per evidenziare i punti più significativi delle immagini.





Box 2.1. L'universo in giardino.

È possibile vedere le stelle dell'universo e anche alcuni pianeti del sistema solare, dal tuo giardino, ma è possibile vederne molti di più si va in un'area di campagna in una notte senza Luna, lontano da strade e da lampioni. Man mano che gli occhi si abituano al buio appariranno sempre più stelle. Le stelle scintillano, ma se c'è un pianeta visibile, brillerà di una luce più stabile. Se si vede una luce muoversi costantemente nel cielo, si tratta di un satellite che riflette la luce solare. Se fosse davvero molto buio, si potrebbe vedere una striscia di stelle che forma un arco sopra la testa, è la Via Lattea, ossia le stelle della nostra galassia, che vediamo di taglio. Se abbiamo una fotocamera che permette di tenere aperto il diaframma a lungo e la mettiamo in un luogo stabile senza muoverla, saremo in grado di catturare l'immagine dell'universo. Lasciando il diaframma aperto per più di un'ora, sarà possibile vedere come le stelle sembrano formare degli archi mentre la Terra gira.

Box 2.1. L'universo in giardino.



Due galassie riprese sopra la cupola dell'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta: la Via Lattea, e al centro l'ovale della galassia di Andromeda.



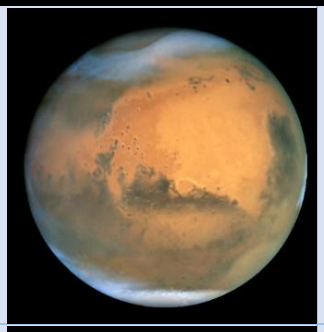
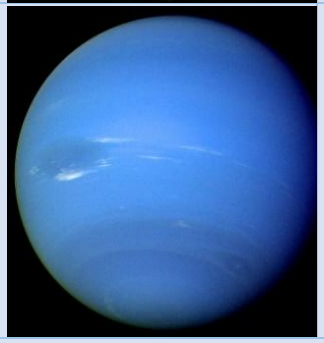
L'immagine a lunga esposizione rivela la rotazione apparente degli astri attorno al polo nord celeste sopra l'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta.

Il nostro sistema solare contiene gli 8 pianeti mostrati in tabella 2.1.

Tabella 2.1. Pianeti del Sistema Solare, in ordine a partire dal Sole

Nome	Immagine (non in scala)	Distanza dal Sole, milioni di km	Diametro, km	Massa, kg	Temperatura media in superficie, °C	Altre caratteristiche
Mercurio		57.9	4 879	0.33	167	Nessuna luna Superficie a crateri Pianeta "terrestre", solido
Venere		108.2	1 104	4.87	464	Nessuna luna Coperto da nuvole Superficie a crateri Pianeta "terrestre solido"
Terra		149.6	12 756	5.97	15	Una luna Oceani Alcuni crateri conosciuti Pianeta "terrestre" solido Dinamica di tettonica delle placche

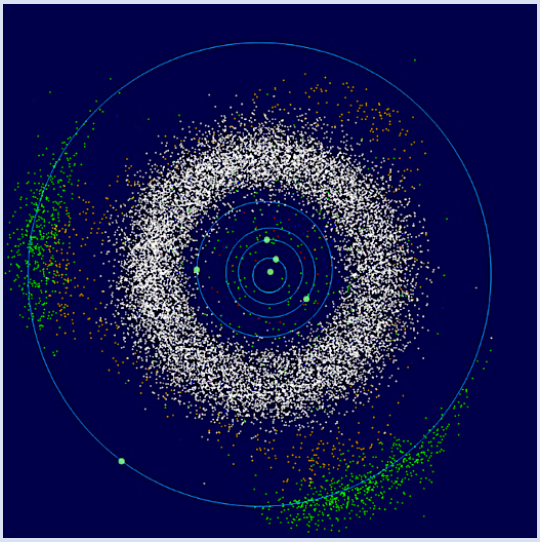
Tabella 2.1. Pianeti del Sistema Solare, in ordine a partire dal Sole

Nome	Immagine (non in scala)	Distanza dal Sole, milioni di km	Diametro, km	Massa, kg	Temperatura media in superficie, °C	Altre caratteristiche
Marte		227.9	6 792	0.64	-65	2 lune Superficie a crateri Grandi vulcani Antichi processi sedimentari Pianeta terrestre
Giove		778.6	142 984	1 898	-110	67 lune Sistema di anelli Cintura di nubi Grande Macchia Rossa (tempesta anticiclonica) Pianeta gassoso gigante
Saturno		1 433.5	120 536	568	-140	62 lune Sistema di anelli Cintura di nubi Pianeta gassoso gigante
Urano		2 782.5	51 118	86.8	-195	27 lune Sistema di anelli Pianeta gassoso gigante
Nettuno		4 495.1	4 528	102	-200	14 lune Sistema di anelli Pianeta gassoso
Plutone non è più considerato un pianeta del Sistema Solare, ma uno dei pianeti nani che orbita nella fascia di Kuiper esterna a Urano.						

Il nostro sistema solare non contiene solo pianeti e pianeti nani, ma anche cinture di **asteroidi** e **comete**. Molti dei meteoriti che hanno colpito la Terra e altri pianeti provenivano in origine dalla cintura di asteroidi o dalle comete. Impatti con meteoriti e altri corpi celesti sono uno degli eventi catastrofici che colpiscono la Terra nel corso del tempo; si veda la sezione 3.4.

Box 2.2. La cintura di asteroidi.

La principale cintura di asteroidi si trova tra l'orbita di Marte e quella di Giove e contiene miliardi e miliardi di granuli di roccia. Alcuni sono ricchi di carbonio, alcuni di silicio e altri di nichel e ferro. Il più grande asteroide ha un diametro di circa 1000 km, ma la maggior parte di essi ha le dimensioni di un ciottolo o anche meno. Ci sono tantissimi asteroidi, ma essi sono così distanziati che diversi veicoli spaziali ci sono passati attraverso senza subire danni. In altre parti del sistema solare questi granuli spaziali si sono scontrati e hanno formato pianeti, sembra invece che le grandi dimensioni del vicino pianeta Giove abbia impedito a questa cintura di asteroidi di aggregarsi a formare un pianeta.



La cintura di asteroidi tra Marte e Giove.



L'asteroide Gaspra fotografato dalla sonda spaziale Galileo.

Box. 2.3. Le comete.

Le comete sono corpi ghiacciati del sistema solare che, quando si trovano presso il Sole, rilasciano gas che formano una coda bianca. La coda va nella direzione del vento solare, sempre dalla parte opposta rispetto al Sole. Molte comete hanno enormi orbite ovali che le portano dallo spazio profondo fino all'interno del sistema solare e di nuovo all'esterno.



La cometa Hale-Bop vista dalla Croazia nel 1997.



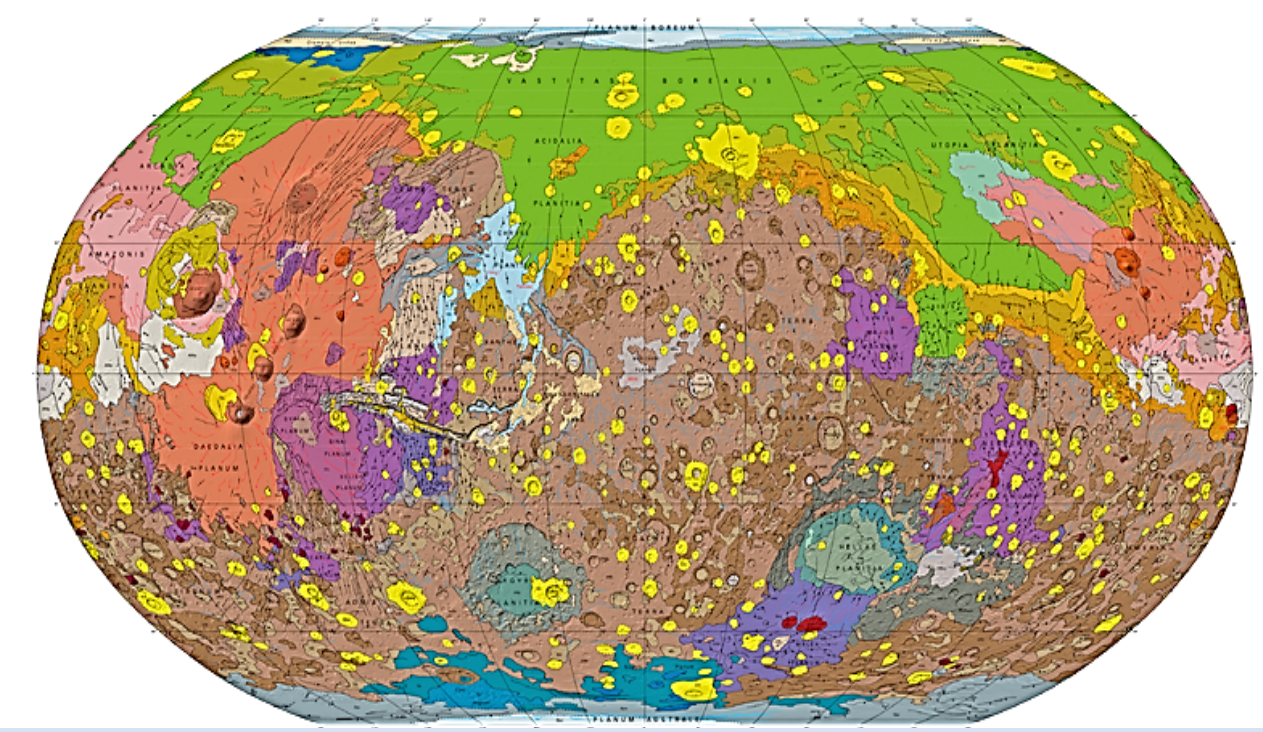
La cometa Churyumov–Gerasimenko nel settembre 2014, fotografata dalla sonda spaziale Rosetta prima che la sonda Philae raggiungesse la sua superficie.

Gli unici corpi del sistema solare che siamo stati in grado di raggiungere con la nostra strumentazione sono la Luna, alcune comete, tra cui la cometa Churyumov–Gerasimenko, i pianeti Marte, Venere, Mercurio e la luna di Saturno chiamata Titano. E alcuni asteroidi

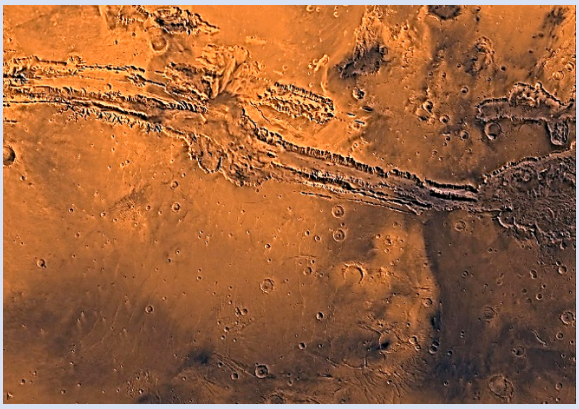
Box 2.4. Geologia planetaria di Marte.

Già prima che strumenti tecnici atterrassero su Marte, avevamo un'idea precisa della sua geologia, poiché i principi geologici che si applicano sulla Terra si possono anche applicare ad altri pianeti. Le osservazioni dai telescopi e i satelliti in orbita avevano già mostrato una estesa regione vulcanica che copre il 25% della superficie di Marte, inclusi tre enormi vulcani, i più grandi del sistema solare (in rosso e viola nella mappa). Ci sono anche crateri (in giallo nella mappa) molto vasti prodotti da impatti che hanno formato creste ai margini e depressioni centrali; il più grande ha un diametro di 1800 km. Vicino all'equatore c'è un sistema di canyon lungo oltre 4000 km, formato da faglie prodottesi nel lontano passato. Alcune parti della superficie presentavano valli attraversate da corsi d'acqua: sono state individuate più di 4000 valli formate dall'acqua, con letti lacustri e antichi delta fluviali che sono stati cartografati.

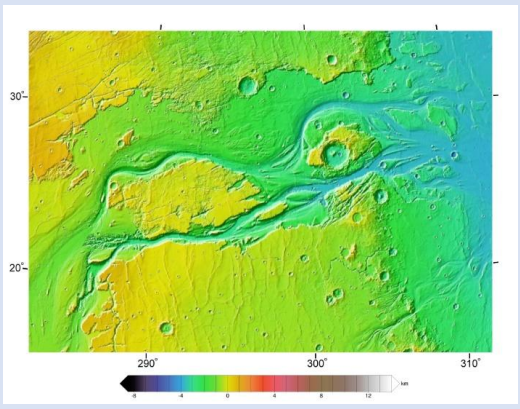
Le sonde ci hanno fornito prove ancora più evidenti di flussi d'acqua, inclusi strati sedimentari e ciottoli arrotondati. Le sonde inoltre hanno mostrato che la maggior parte di Marte è un deserto con crateri, coperto da massi e polvere. Se dell'acqua ha mai percorso la superficie di Marte, ora non c'è più.



Mappa geologica di Marte. Le aree verdi sono zone depresse; in rosso e in viola sono indicate le rocce vulcaniche; in blu le rocce dei poli; in marrone e arancio le zone montuose; in giallo i crateri da impatto.



Il sistema di faglie vicino all'equatore.



I canali di deflusso della Kasei Valles.

Box 2.4. Geologia planetaria di Marte.



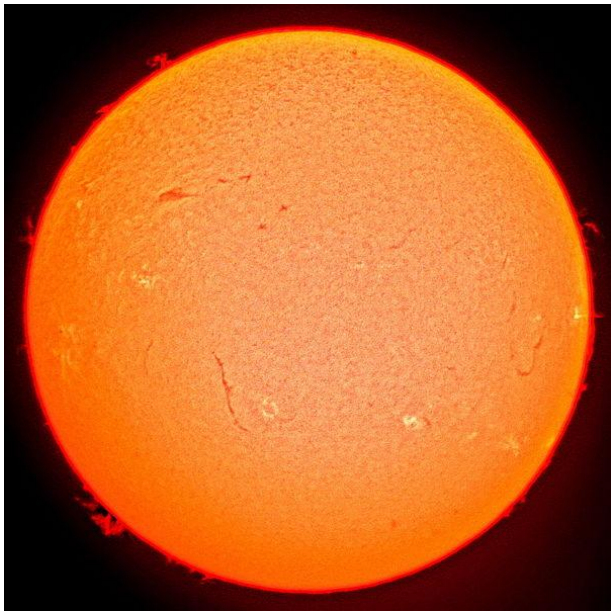
Vista dal sito della sonda Pathfinder, rocce e polvere in primo piano con colline basse sullo sfondo.

2.2 Il Sole

Il Sole è la nostra stella. Fornisce energia a tutto il sistema solare e anche oltre.

L'energia del Sole attraversa lo spazio soprattutto sotto forma di luce visibile e radiazione infrarossa e ultravioletta. Quando questa energia riscalda il terreno e la superficie degli oceani, parte di essa viene riflessa e riscalda l'atmosfera. La terra riceve energia dal Sole durante il giorno, e la riflette, irradiandola verso lo spazio durante la notte. Questi flussi di energia sono in equilibrio per cui la temperatura della Terra rimane la stessa su base giornaliera. Le osservazioni spaziali dell'energia emessa dal Sole che sono iniziate negli anni Settanta mostrano che questa emissione di energia si modifica secondo cicli ben definiti, ma solo dello 0,1%.

Figura 2.2. Il Sole, la nostra principale fonte di energia.



2.3 Il Sole, la Terra e la Luna

2.3.1 Giorno e notte

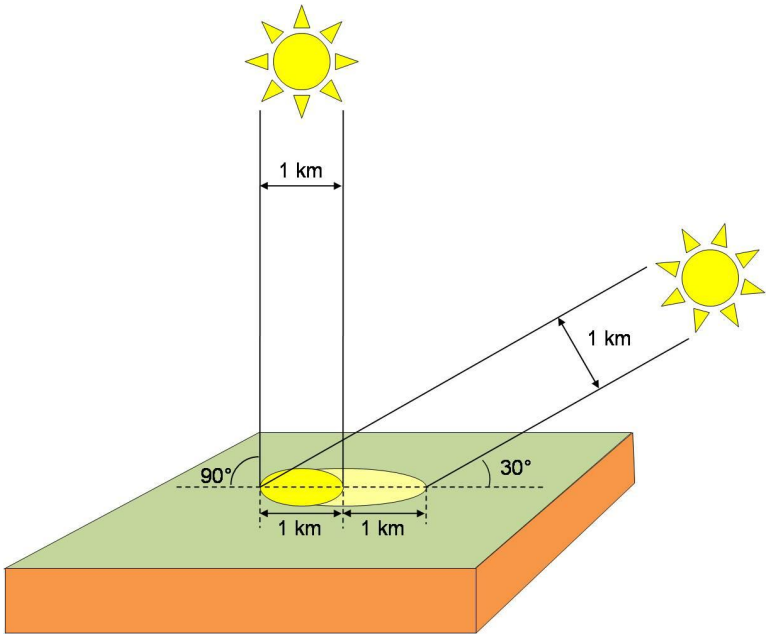
La Terra riceve energia dal Sole sotto forma di radiazione ultravioletta, luce visibile e radiazione infrarossa, che riscalda la superficie terrestre. Il riscaldamento è maggiore quando il Sole appare alto nel cielo, come mostrato in figura 2.3. Quando il Sole appare direttamente sopra le nostre teste, un raggio della radiazione solare largo 1 km colpisce una zona della Terra larga 1 km, ma quando l'angolo del Sole è di 30°, un raggio di Sole largo 1 km riscalda una zona della Terra larga 2 km, così solo metà della quantità di calore viene ricevuta in ogni punto.

Box 2.5. Le ombre si modificano nel corso del giorno.



Quando il Sole appare alto nel cielo, verso mezzogiorno, le ombre sono corte. Man mano che il Sole si abbassa, le ombre si allungano. La diversa posizione del Sole nel cielo è il risultato della rotazione della Terra. La foto a sinistra è stata scattata alle 13 e quella a destra alle 16 a Ibadan, Nigeria.

Figura 2.3. L'effetto di riscaldamento dipende dall'angolo del Sole.



Il riscaldamento della Terra richiede un po' di tempo; quindi, le ore più calde della giornata non corrispondono a quando il Sole è nella posizione più alta nel cielo, ma a quelle successive.

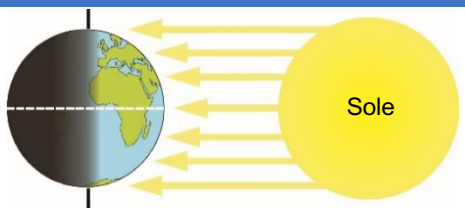
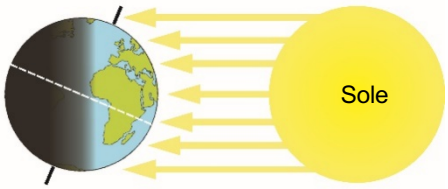
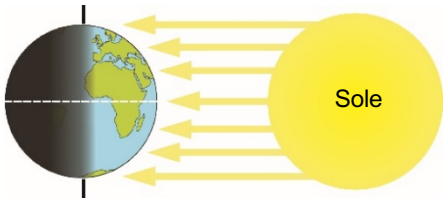
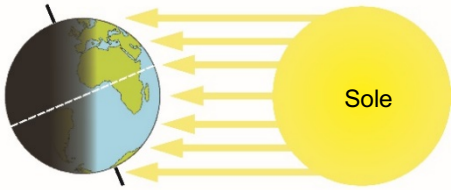
La quantità di calore ricevuta dipende da com'è la superficie. Superfici nere assorbono e irradiano molto più calore rispetto a quelle chiare, perché quelle chiare riflettono la maggior parte della radiazione: questo è l'effetto albedo. Il suolo si riscalda più velocemente dell'acqua, perché l'acqua mette in circolo verso livelli profondi il calore ricevuto. Ma il suolo si raffredda anche più velocemente dell'acqua, perché l'acqua in circolo impiega più tempo a perdere il suo calore. Questo significa che se si vive vicino a un grande bacino di acqua, la temperatura non salirà così tanto come se si vivesse molto lontano dall'acqua, e non sarà nemmeno mai molto bassa. Le zone costiere, infatti, hanno temperature più moderate sia nei valori alti che in quelli bassi, rispetto alle zone dell'entroterra.

L'energia che la Terra ha ricevuto durante il giorno viene irradiata di notte verso lo spazio sotto forma di radiazione infrarossa. Il momento più freddo della notte è di solito dopo l'alba, quando la radiazione che viene irradiata verso lo spazio comincia ad essere compensata dalla radiazione solare.

2.3.2 Le stagioni

L'effetto di riscaldamento dell'altezza apparente del Sole nel cielo mostrato in figura 2.3 influenza anche le stagioni, come vediamo in tabella 2.2. Anche la lunghezza del giorno e della notte ha effetti rilevanti.

Tabella 2.2. L'inclinazione della Terra e le stagioni

Emisfero	Stagione	Figura	Angolazione dei raggi	Lunghezza di giorno e notte
Marzo			**Marzo**	
Nord	Primavera		Stessa angolazione dei raggi solari e stessa lunghezza del giorno e della notte ovunque sulla Terra	
Sud	Autunno			
Giugno			**Giugno**	
Nord	Estate		Nord caldo perché:	
			Sole alto nel cielo	Giorni lunghi che ricevono calore dal Sole
Sud	Inverno		Sud freddo perché:	
			Sole basso nel cielo	Notti lunghe che disperdono il calore
Settembre			**Settembre**	
Nord	Autunno		Stessa angolazione dei raggi solari e stessa lunghezza del giorno e della notte ovunque sulla Terra	
Sud	Primavera			
Dicembre			**Dicembre**	
Nord	Inverno		Nord freddo perché:	
			Sole basso nel cielo	Notti lunghe che disperdono il calore
Sud	Estate		Sud caldo perché:	
			Sole alto nel cielo	Giorni lunghi che ricevono calore dal Sole

Vicino all'equatore non c'è molta variazione stagionale, perché il Sole appare sempre alto nel cielo: rimane quindi caldo tutto l'anno. Le variazioni stagionali vengono temperate da grandi bacini d'acqua proprio come accade per le temperature giornaliere; quindi, le zone costiere rimangono generalmente più fresche in estate, ma più calde in inverno rispetto alle zone dell'entroterra.

2.3.3. Le fasi lunari

Come la Terra, metà della Luna è colpita dai raggi solari e metà è al buio. La Luna impiega circa 27 giorni a orbitare intorno alla Terra. Quando la metà della Luna colpita dal Sole è di fronte alla Terra, possiamo vedere l'intera faccia della Luna, che viene detta Luna piena. Man mano che la Luna continua la sua orbita, vediamo meno la parte illuminata e sempre più parte in ombra. Dopo circa 13 giorni, il lato in ombra della Luna è di fronte a noi e quindi non la vediamo: è la Luna nuova. Poi ricominciamo a vedere sempre più parte illuminata fino a essere novamente nella fase di Luna piena (figure 2.4 e 2.5).

Figura 2.4. Le fasi della Luna.

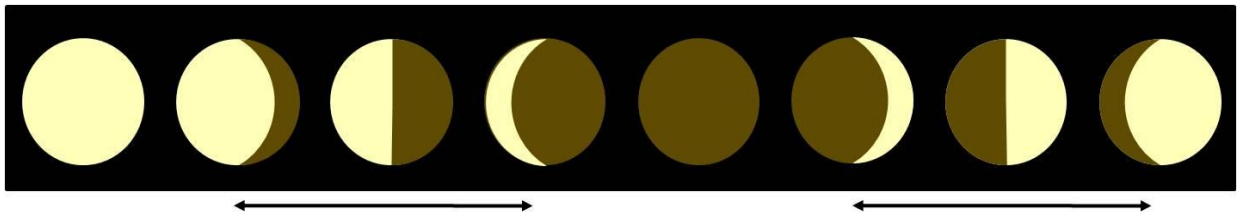


Figura 2.5. La Luna diventa piena: un collage di tre fotografie.

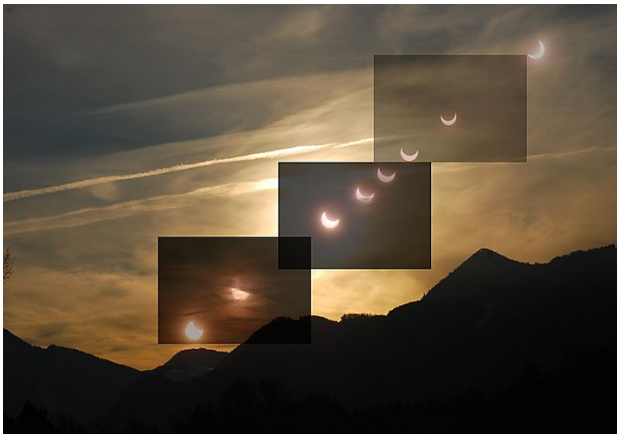


2.3.4 Le eclissi

L'orbita della Luna è inclinata rispetto all'orbita della Terra, quindi di solito la Luna non si trova tra Terra e Sole e la Terra non si trova tra Luna e Sole.

A volte, tuttavia, la Luna si trova tra Terra e Sole: questo fenomeno si chiama **eclissi solare**. Nonostante la Luna sia molto più piccola del Sole, si trova molto più vicina alla Terra e quindi, quando sta tra Terra e Sole, può coprire completamente il Sole. Durante una eclissi solare, si vede la Luna coprire completamente il Sole soltanto in alcune zone della Terra; in altre zone si vedrà una eclissi parziale, come nella figura 2.6.

Figura 2.6. Un collage di fotografie di una eclissi parziale di Sole vista dalla Germania.



Se si vuole guardare un'eclissi solare, bisogna proteggere gli occhi indossando occhiali speciali. Mentre si guarda il fenomeno, si vedrà la Luna coprire gradualmente il Sole mentre sulla Terra diventa sempre più buio. Poi la Luna si sposta di nuovo e la luce del giorno lentamente ricompare.

Quando la Luna si sposta dietro la Terra, e Sole, Terra e Luna sono allineati, l'ombra della Terra copre la Luna in una **eclissi lunare**. L'ombra della Terra si muove fino a coprire l'intera Luna, che quindi non si vede più. Poi l'ombra si sposta e la Luna riappare. Durante l'eclissi lunare, la rifrazione della luce da parte dell'atmosfera terrestre può colorare la Luna di arancione per un po' di tempo (figura 2.7).

Figura 2.7. Un collage fotografico di una eclissi lunare.



3 La Terra è un sistema che è cambiato nel tempo

3.1 Intervallo di tempo geologici

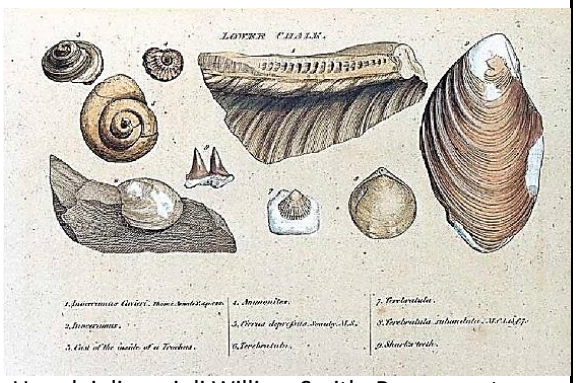
La Terra, come dimostrano i metodi di datazione radiometrica, ha la stessa età del sistema solare, 4.6 miliardi di anni (4600 milioni di anni).
Prima che i metodi di datazione radiometrica fossero resi disponibili molti geologi avevano tentato di stimare l'età della Terra. Avevano concluso che dovesse essere molto antica, e ci fu chi scrisse che studiare la Terra era come guardare negli "abissi del tempo" (John Playfair, 1805), "senza tracce di un inizio o prospettive di una fine" (James Hutton, 1795).
Sebbene all'epoca non fosse possibile definire l'età di alcun evento terrestre, restava la possibilità di porre questi eventi in ordine geologico. Ordinare gli eventi in relazione gli uni agli altri è chiamato datazione relativa, ci permette di identificare gli eventi più antichi rispetto ai più recenti.

3.2 La datazione relativa

Per la datazione relativa sono stati utilizzati molti metodi diversi. Tali metodi (mostrati nella tabella 3.1) sono stati scoperti molto tempo fa e sono state utilizzate dai geologi fin da subito. Alcuni dei metodi sono principi che funzionano nella maggior parte dei casi, ma in certe particolari circostanze non possono essere applicati; altri sono delle leggi che sono sempre valide, fintanto che ci si basa su osservazioni attente e dettagliate.
Tabella 3.1. Metodi di datazione relativa

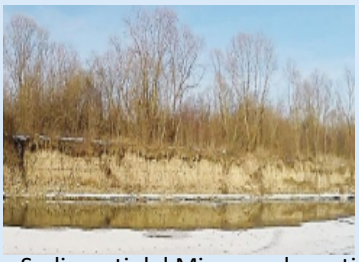
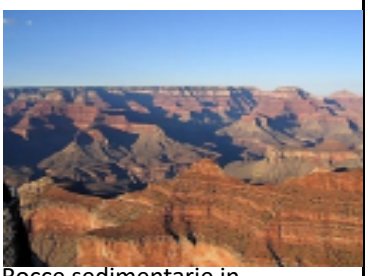
Metodo di Datazione relativa	Descritto da	Dettagli del metodo	Esempi
Principio di sovrapposizione degli strati	Nicholas Steno 1669	In una successione di strati rocciosi, quelli che si trovano più in alto sono i più recenti (ci sono alcune eccezioni, ad esempio se una sequenza è rovesciata a causa della deformazione, oppure quando i movimenti di una faglia spingono una successione più antica sopra una più giovane).	 Strati di gesso inclinati a Cipro, i più giovani sono in cima  Rocce piegate in Groenlandia – le rocce sommitali sono ribaltate, perciò quelle più antiche si trovano in cima
Legge di intersezione	Nicholas Steno 1669	Qualsiasi materiale (ad esempio fratture, vene di roccia, superfici erosive) ne attraversi un'altra roccia, deve essere più recente.	 Dicchi in Colorado, USA – la roccia grigia, più antica, è attraversata da dicchi orizzontali e trasversali, più giovani.

Tabella 3.1. Metodi di datazione relativa,

Metodo di datazione relativa	Descritto da	Dettagli del metodo	Esempi
Legge dell'inclusione dei frammenti	Charles Lyell 1830	Qualsiasi frammento roccioso incluso in un'altra roccia deve essere più antico di quest'ultima.	 Isola di Herm, UK – i frammenti, chiamati xenoliti, di roccia scura in un granito più chiaro sono più antichi.
Legge della successione faunistica	William Smith 1816	Gruppi di fossili si susseguono in un ordine noto nelle sequenze rocciose, permettendoci di ordinare le rocce nel tempo.	 Uno dei disegni di William Smith. Rappresenta un gruppo di fossili usato per datare una roccia.
Le rocce deformate e/o metamorfosate sono più antiche di quelle che non hanno subito tale processo.	Ignoto	Dato che la deformazione e gli eventi metamorfici agiscono su tutte le rocce di una regione, qualsiasi roccia non metamorfosata deve essere più giovane.	 Non conformità a Bochum, Germania. La roccia superiore, non deformata è più giovane della roccia grigia, deformata e inclinata che si trova sotto.

Alcuni di questi metodi di datazione relativa sono basati su due importanti principi descritti per la prima volta da Nicholas Steno, come mostrato nella Tabella 3.2.

Tabella 3.2. Principi di deposizione di sedimenti, lave e ceneri vulcaniche

Principio di formazione delle rocce	Descritto da	Dettagli	Esempi – seguono il principio	Esempi – non seguono il principio
Principio dell' orizzontalità originaria	Nicholas Steno 1669	Gli strati di sedimenti vengono originariamente deposti in orizzontale (come la lava e le ceneri vulcaniche) – ma talvolta possono essere deposti con un angolo di inclinazione	 Sedimenti del Miocene deposti orizzontalmente – Drahomyrchany, Ucraina.	 Sedimenti non deposti orizzontalmente in origine - stratificazione in crociata risalenti all'era glaciale. Estonia.
Principio di continuità laterale	Nicholas Steno 1669	Gli strati di sedimenti continuano lateralmente su grandi aree (così come la lava e i depositi di cenere) Esistono situazioni insolite in cui questo non si verifica.	 Rocce sedimentarie in continuità laterale del Grand Canyon, Arizona, USA.	 Sedimenti non continui, depositi fluviali in Islanda che si fermano ai lati della valle.

Questi principi e queste leggi possono essere utilizzati per determinare la storia geologica di un'area anche senza conoscere l'effettiva età delle rocce circostanti.

Box 3.1. Utilizzo delle tecniche di datazione relativa per comprendere la storia geologica delle rocce; il caso della sequenza del deserto di Negev in Israele:



- Le rocce sedimentarie orizzontali si depositano in sequenza, perciò, secondo il "Principio di sovrapposizione", le rocce più antiche si trovano in basso.
- Originariamente le rocce sono state depositate orizzontalmente e in continuità su una vasta area, come indicato dal "Principio di orizzontalità" e dal "Principio di continuità laterale".
- Lo strato più spesso vicino alla base della sequenza è un conglomerato contenente ciottoli; secondo la "Legge dell'inclusione di frammenti" i ciottoli sono più antichi dello strato in cui si trovano.
- Le rocce sono tagliate da un dicco verticale di roccia ignea che, in accordo con la "Legge di intersezione" deve essere più giovane d ei sedimenti orizzontali che attraversa.
- Tutta la superficie è stata intaccata dall'erosione originando la parete rocciosa visibile oggi, quindi questo è l'evento più recente, secondo la "Legge delle relazioni trasversali".

Box 3.1. Utilizzo dei metodi di datazione relativa per determinare la storia geologica delle rocce. Quindi la storia delle rocce è:

Evento più recente

- La facciata rocciosa subisce erosione
- La sequenza rocciosa viene tagliata da uno strato di magma che solidifica formando un dicco
- Gli strati rimanenti vengono deposti, i più recenti si trovano in alto
- Viene deposto lo strato più basso della scogliera, seguito dai conglomerati contenenti ciottoli

Evento più antico

- Si forma una roccia che viene successivamente erosa formando dei ciottoli

William Smith utilizzò i fossili per determinare l'età relativa delle rocce, descrisse il suo metodo come "Legge della successione faunistica". Egli riconobbe che molti strati di rocce sedimentarie contengono determinati gruppi di fossili che potevano essere rintracciati su grandi aree. Questo significa che ogniqualvolta trovava una roccia con un certo gruppo di fossili sapeva che si trattava di rocce della stessa età. Questo metodo è detto **correlazione**. Egli realizzò anche che gli strati contenenti determinati gruppi di fossili si trovavano sempre nello stesso ordine. Ciò significa che quando trovava una roccia con un gruppo di fossili, sapeva che le rocce sovrastanti e sottostanti contenevano altri gruppi di fossili con lo stesso ordine, come mostrato nella tabella 3.3. Nonostante Smith abbia usato questo metodo per mettere in correlazione le rocce e determinarne la sequenza, non sapeva per quale motivo i fossili si trovassero sempre nello stesso ordine. Solo più tardi Charles Darwin realizzò che questo avveniva a causa dell'evoluzione.

Tabella 3.3. Il metodo di William Smith, applicazione della "Legge di successione faunistica"

Sequenza di William Smith		Età correlata ai periodi della scala del tempo geologico, attribuita dopo Smith	Disegni originali dei fossili di William Smith
Più recenti	Strato inferiore di gesso	Tardo Cretaceo	
	Sabbia verde	Basso Cretaceo	
	Argilla di Quercia (oggi chiamata argilla di Kimmeridge)	Tardo Giurassico, Kimmeridgiano	
Più antichi	Pietra di Kelloways	Medio Giurassico	

Oggi possiamo applicare il metodo di Smith più ampiamente, poiché sappiamo che determinati gruppi di fossili si possono trovare solo in rocce con una certa datazione. In questo modo, riconoscendo i fossili, conosciamo l'età geologica delle rocce, come nella tabella 3.4.

Tabella 3.4. Fossili tipici rinvenuti in rocce di diverse età

Età geologica della roccia	Fossile trovato solo in rocce di questa età	Immagine del fossile
Quaternario	*Argopecten gibbous,* pettine – vive sul fondale marino, ma può battere le sue valve per spostarsi e sfuggire ai predatori; si trova nei sedimenti del Neogene, del Quaternario e contemporanei. Questo è un campione moderno	
Neogene	Conchiglia di ostrica *Crassostrea titan,* che viveva sulle coste rocciose; questo campione proviene dalla formazione di Santa Margarita in California, USA	
Paleogene	Denti fossili di squalo tigre della sabbia, *Carcharias tingitana,* estinto: i denti di questo squalo si ritrovano solo nel Paleogene; questi campioni proviene da Khouribga, Marocco.	
Cretaceo	L'echinoderma *Micraster leskei,* un riccio di mare che vive al di sopra o tra i sedimenti marini; questa specie si trova solo nel Cretaceo, mentre altre forme di *Micraster* si possono trovare nel Paleogene. Questo campione proviene dai gessi vicini a Puys, Dieppe, Francia.	

Tabella 3.4. Fossili tipici rinvenuti in rocce di diverse età,

Età geologica della roccia	Fossile trovato solo in rocce di questa età	Immagine del fossile
Giurassico	Ammonite *Calliphylloceras* che viveva come polpo con la conchiglia, nuotando nel mare; le pareti tra le camere della conchiglia avevano forme molto complesse, mostrate con una traccia nera nell'immagine; queste forme si trovano sono nelle ammoniti del Giurassico e del Cretaceo. 	
Triassico	Ammonite ceratitica *Ceratites* che viveva nuotando nel mare come polpo con la conchiglia. Le pareti tra le camere della conchiglia erano curvate dolcemente verso l'imboccatura del guscio, ma più complesse nella direzione opposta. Questo campione proviene da Oberer Muschelkalk. Hohenlohe, Germania. 	
Permiano	Ammonite goniatitica (si può trovare anche nelle rocce del Carbonifero e del Devoniano), come un piccolo polpo con la conchiglia, viveva nuotando nel mare. Le pareti tra le camere hanno una semplice forma a zig-zag. 	
Carbonifero	*Caninia* corallo rugoso solitario che viveva ancorato al fondale marino. Questi campioni provengono dai calcari di Lecompton, in Kansas, USA.	

Tabella 3.4. Fossili tipici rinvenuti in rocce di diverse età

Età geologica della roccia	Fossile trovato solo in rocce di questa età	Immagine del fossile
Devoniano	Trilobite *Phacops,* viveva sul fondale marino, probabilmente era un predatore attivo. Questo campione proviene dallo scisto siliceo del Devoniano medio in Ohio, USA.	
Siluriano	Graptolite *Monograptus* con un singolo braccio che trasporta una colonia di graptoliti, galleggiante nell'oceano.	
Ordoviciano	Graptolite *Tetragraptus* con quattro braccia*; ogni braccio trasporta una colonia di piccoli graptoliti, la colonia galleggia nell'oceano. Questo esemplare proviene dalla serie Bendigoiana del basso Ordoviciano a Bendigo, Victoria, Australia. *Nella foto sono visibili solo tre delle quattro braccia.	
Cambriano	Trilobite *Paradoxides* viveva sul fondale marino, probabilmente erano predatori attivi.	

Quando i geologi utilizzavano i fossili per correlare le sequenze di rocce, scoprirono che si verificavano dei cambiamenti improvvisi nei gruppi di fossili in certi punti del record fossile. Oggi sappiamo che queste anomalie si verificano perché in quelle epoche ci furono grandi estinzioni, ma i primi geologi erano più interessati a capire come queste anomalie potevano essere utilizzate per dividere le rocce. Infatti, i fossili erano utilizzati per identificare i periodi geologici (con i nomi mostrati nella prima colonna della tabella 3.4).

Box 3.2. Un esempio di periodo geologico – il Triassico

Il Triassico è il primo periodo del Mesozoico ("era della Vita intermedia"), il nome gli fu attribuito da Freidrich von Alberti nel 1834 perché era formato da tre strati principali (tri=tre), che si possono trovare in tutta la Germania e nel nord est dell'Europa. Questi strati sono formati da strati rossi sul fondo, seguiti da calcare, con strati di argilla/arenaria in cima. Egli fu in grado di distinguere le rocce del Triassico da quelle sottostanti e sovrastanti grazie alle evidenti variazioni nei fossili alla base e al tetto della sequenza. Oggi sappiamo che queste variazioni sono il risultato di estinzioni di massa su larga scala.

Oggigiorno, quando possibile, la posizione dei limiti maggiori nella colonna geologica viene identificata come "Sezione e Punto Stratigrafico Globali" ('Global Boundary Stratotype Section and Point' o GSSP). Un posto in qualche punto del globo dove è presente una serie di letti fossiliferi dell'età giusta e dove è possibile trovare l'esatta posizione del limite stratigrafico. Per identificare l'importanza del riferimento viene posizionato un "golden spyke" (chiodo d'oro).

Il "golden spyke" per il limite inferiore del Triassico (e dunque il limite superiore del precedente periodo Permiano) si trova a Meishan, nella provincia di Zhejiang in Cina, dove appare per la prima volta nella sequenza geologica il fossile di un conodonte chiamato *Hindeodus parvus*.

Il limite superiore del Triassico (e quindi il limite inferiore del periodo Giurassico) ha il suo "golden spyke" a Kuhjoch, nel Tirolo austriaco, dove viene trovata per la prima volta l'ammonite *Psiloceras spelae tirolicum*.



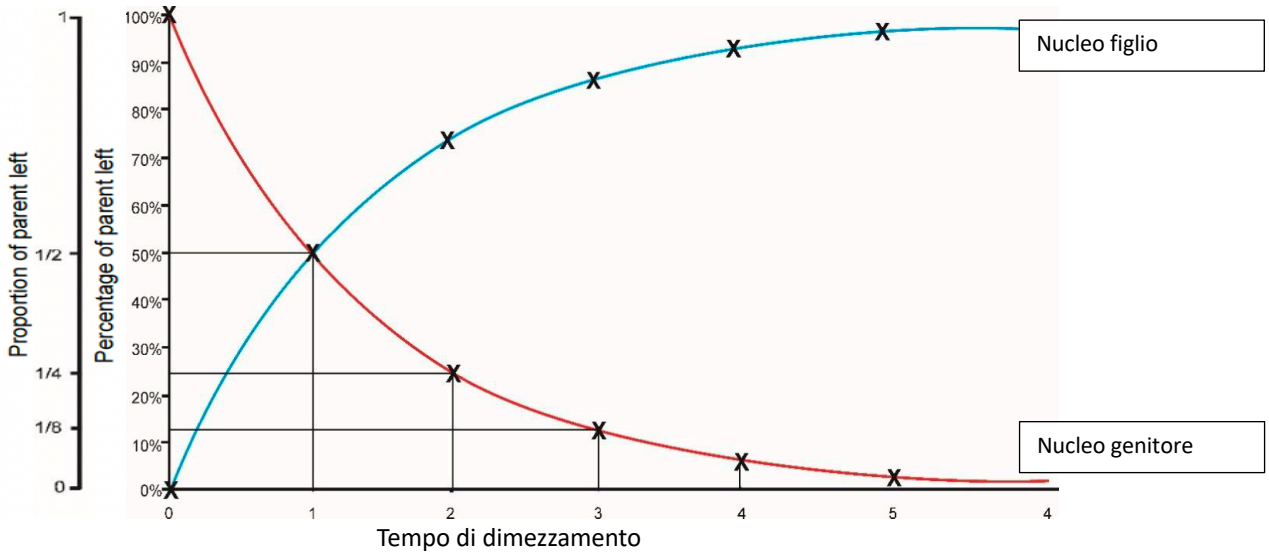
Il golden spike su uno dei limiti geologici del periodo Triassico, con un calco in gesso della ceratite che appare in questo punto per la prima volta, segnando il confine.

I metodi di datazione relativa sono stati usati per individuare l'età relativa delle rocce e dei periodi geologici per molti anni, ma non si sapeva quanto antichi fossero i periodi considerati, o l'età dei limiti stratigrafici tra i periodi, finché non è stato reso disponibile il metodo di datazione radiometrica.

3.3 Datazione assoluta

La datazione radiometrica è diventata possibile quando si è scoperto che gli elementi radioattivi contenuti in alcune rocce decadono formando altri elementi. Il decadimento nel tempo avviene in un modo prevedibile che può essere rappresentato in un grafico; spesso ci si riferisce a questo come **curva di decadimento radioattivo** (figura 3.1).

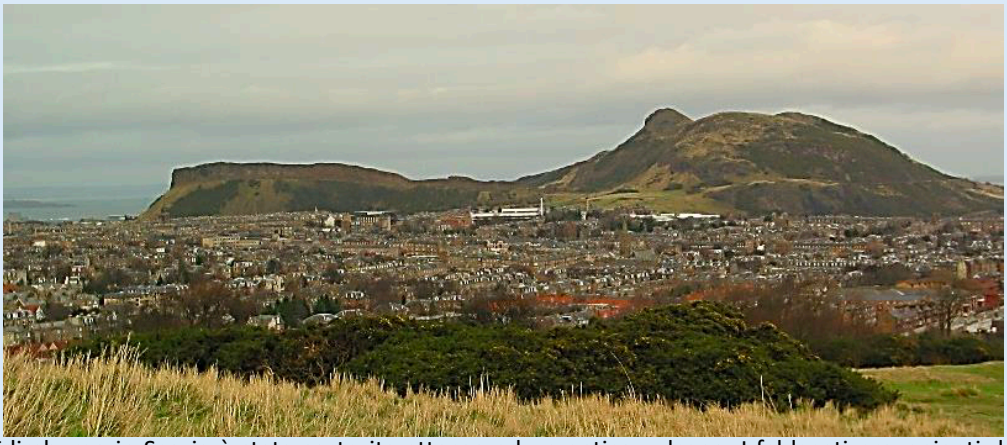
Figura 3.1. Curva di decadimento radioattivo per la scomposizione di tutti i materiali radioattivi



Gli elementi radioattivi che decadono sono detti "elementi genitori"; i nuovi elementi che si producono con il decadimento sono detti "elementi figli". Il grafico mostra che dopo un certo periodo di tempo, metà dell'elemento è decaduto nell'elemento figlio; questo lasso di tempo è detto **emivita**. Dopo un'altra emivita, un'altra metà dell'elemento genitore è decaduto nell'elemento figlio, perciò ne resta solo un quarto; la sostanza contiene il 25% dell'elemento genitore e il 75% dell'elemento figlio. Dopo un terzo periodo di emivita avviene un nuovo decadimento; quindi, la sostanza è composta per il 12,5% dall'elemento genitore e per l'87,5% dall'elemento figlio. La scomposizione continua, con la percentuale di elemento genitore che diminuisce, mentre quella dell'elemento figlio diventa sempre più grande.

Nonostante tutti gli elementi radioattivi decadano secondo questo schema, la durata della loro emivita varia enormemente, da miliardi di anni fino a meno di un microsecondo. Se scegliamo un elemento radioattivo con un tempo di dimezzamento noto, possiamo misurare la quantità di elemento genitore ed elemento figlio, per ottenere l'età in cui si è formato il primo elemento. Questo ci dice l'età del minerale o della roccia in cui è stato trovato. Questo metodo è detto **datazione assoluta** perché è in grado di fornire un'età in anni, migliaia, milioni e miliardi di anni. Dato che la misurazione può comportare un piccolo errore, i dati della datazione radiometrica indicano sempre il potenziale errore.

Box 3.3. L'intervallo di errore dato dalla datazione radiometrica assoluta.



La città di Edimburgo in Scozia è stata costruita attorno ad un antico vulcano. I feldspati provenienti dalle rocce vulcaniche sono stati usati per datare le eruzioni. La datazione fornita dal decadimento radioattivo dell'argon nei feldspati era di 349 ± 4 milioni di anni, ciò dimostra che il vulcano ha eruttato nel Carbonifero, tra 353 e 344 milioni di anni fa.

La datazione assoluta può essere utilizzata solo per rocce e minerali che contengono la giusta tipologia di elemento radioattivo e ci dice solo il momento in cui quella roccia si è formata. Funziona bene per le rocce ignee e metamorfiche. Non è utile per le rocce sedimentarie, dato che i grani che compongono il sedimento si sono formati prima del sedimento, in quanto sono stati erosi e ridepositati nel sedimento stesso. Ciò rende difficile collegare la datazione radiometrica con la datazione correlabile ai fossili, dato che i fossili vengono rinvenuti nelle rocce sedimentarie. Questo è uno dei motivi per cui ci è voluto molto tempo per datare correttamente i limiti dei periodi nella colonna geologica. Tuttavia, queste datazioni sono oggi quasi tutte confermate, permettendoci di realizzare la colonna geologica completa di date, come mostrato nella tabella 3.5. I maggiori eventi geologici sono stati aggiunti nell'ultima colonna della tabella.

Tabella 3.5. La principale suddivisione del tempo geologico basata sull'ultimo aggiornamento della Carta Cronostratigrafica Internazionale pubblicata dalla Commissione Internazionale di Stratigrafia*.

Eone	Era	Periodo	Abbreviazione	Età		Maggiori eventi
Fanerozoico	Cenozoico	Quaternario	Q	0 2.6	Milioni di anni	
		Neogene	N	23		3.3 Primi attrezzi di pietra 50 Montagne Himalaiane
		Paleogene	Pg	66		66 Estinzione di massa K-Pg
	Mesozoico	Cretaceo	K	145		130 Prime. Piante a fiore
		Giurassico	J	201		160 Primi uccelli 190 Si apre l'Oceano Atlantico
		Triassico	T	252		220 Primi mammiferi 252 Estinzione di massa
	Paleozoico	Permiano	P	299		299 Si forma il supercontinente Pangea
		Carbonifero	C	359		315 Primi rettili
		Devoniano	D	419		370 Primi anfibi 400 Primi insetti
		Siluriano	S	444		430 Prime piante terrestri
		Ordoviciano	O	485		
		Cambriano	CM	541		530 Primi pesci
Precambriano	Proterozoico			2.500		541 viventi con conchiglia/parti dure 200 Primi organismi pluricellulari
	Archeano			4.000		2100 Primi eucarioti 2700 Ossigeno in atmosfera3500 Primi batteri e alghe
	Adeano			4.600		4000 Più antiche rocce conosciute 4600 Origine della Terra

* Mentre i metodi di datazione miglioravano, alcune date sono state aggiornate. La Tabella 3.5 mostra l'ultima versione.

3.4 Velocità dei processi

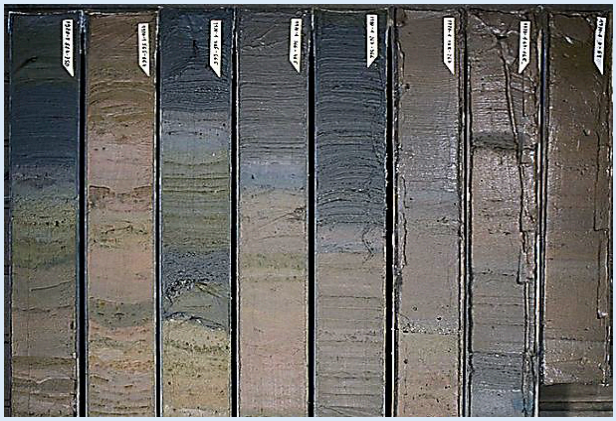
Un tempo si riteneva che la maggior parte dei processi geologici avvenissero in modo lento e costante. Oggi sappiamo che, mentre alcuni sono effettivamente lenti e costanti, altri possono essere molto veloci e catastrofici. Ad esempio, ci vogliono milioni di anni perché si formi una successione di rocce sedimentarie, ma un singolo strato può formarsi in pochi secondi. Allo stesso modo il magma che si trova nelle profondità della terra impiega milioni di anni a raffreddare e solidificarsi, mentre un vulcano può eruttare in pochi secondi. Le rocce possono essere sollevate lentamente, come quando la fusione dei ghiacci permette alla terra di sollevarsi, oppure il sollevamento può avvenire all'improvviso, durante i terremoti.

Oggi sembra che anche l'evoluzione, che si riteneva fosse un processo costante, spesso operi attraverso scatti improvvisi, mentre le estinzioni di massa sembrano catastrofi improvvise.

Quindi, è chiaro che il record geologico di un miliardo di anni registra una combinazione di processi estremamente lenti intervallati da eventi catastrofici, con altri processi che interagiscono nel frattempo.

Box 3.4. Da processi molto lenti a processi molto veloci

Nelle profondità del mare, fini sedimenti fangosi in sospensione si depositano molto lentamente, così possono richiedere milioni di anni per costituire una sequenza. Tuttavia, a volte sulla terra, nelle aree costiere e nelle profondità oceaniche, strati di sedimenti possono depositarsi molto più velocemente, in giorni o addirittura in ore, a causa di tempeste o altri eventi catastrofici.



Nuclei di sedimenti di mare profondo vicino alla Groenlandia; gli strati di sedimenti si sono formati in lunghi intervalli di tempo



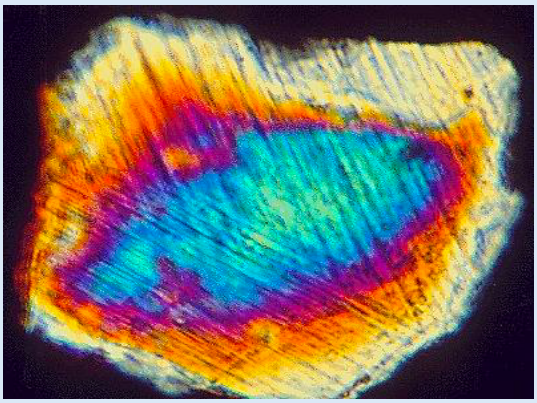
Strato grigio di un deposito formato da uno tsunami 8000 anni fa in Scozia. La deposizione ha richiesto pochi minuti. Al di sotto e al di sopra si trovano strati di torba scura.

Box 3.5. Eventi con impatto catastrofico

Oggetti provenienti dallo spazio spesso collidono con la Terra e con altri pianeti, molti sono piccoli e non sono rintracciabili. Ciononostante, asteroidi di 1 km di diametro colpiscono la Terra mediamente ogni mezzo milione di anni, mentre asteroidi di 5 km di diametro collidono con la Terra ogni 20 milioni di anni circa. Molti piccoli asteroidi si sgretolano nell'atmosfera, ma i più grandi possono colpire la Terra e creare crateri. L'effetto dell'impatto dipende dal diametro, dalla densità, dalla velocità e dall'angolo di collisione del corpo. Sebbene i crateri vulcanici possano sembrare molto simili ai crateri da impatto, solo in questi ultimi troviamo piccole sfere vetrose chiamate tectiti o "quarzo scioccato", (dall'inglese shocked) che si producono a causa della deformazione del quarzo durante l'impatto. Alcuni impatti possono produrre anche strati di iridio, così come strati di fuliggine e cenere.

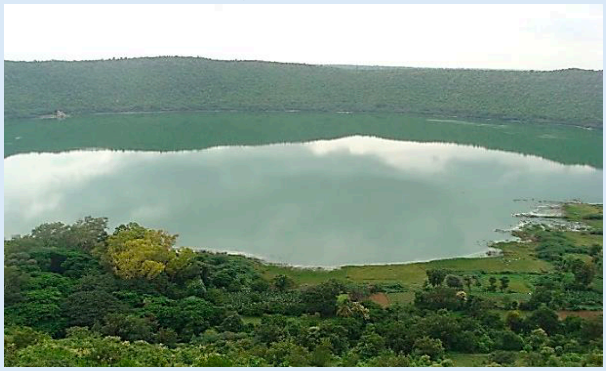


Forme comuni di tectite: a manubrio e a goccia



Quarzo scioccato con i piani di deformazione visti al microscopio in luce polarizzata incrociata.

Box 3.5. Eventi con impatto catastrofico

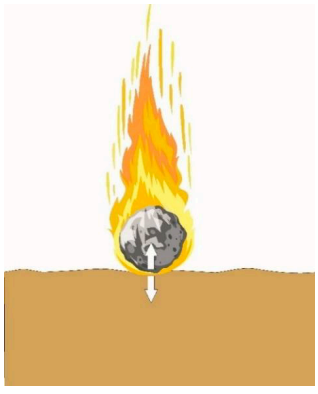


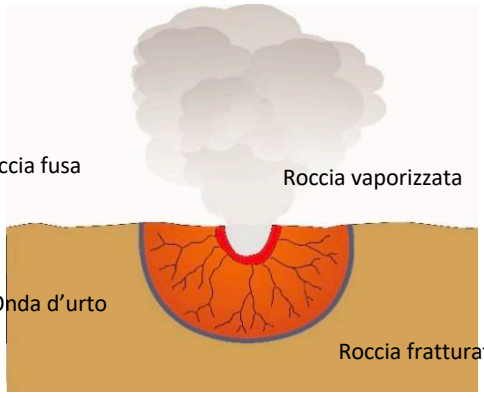
Cratere Lonar in India, prodotto da un impatto risalente a 52.000 anni fa circa



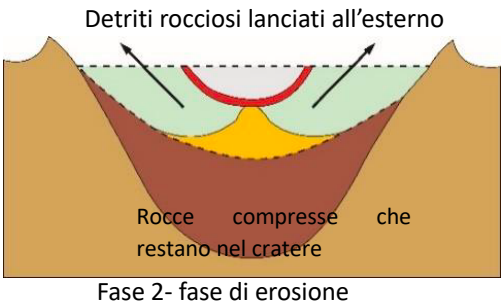
Manicouagan nella regione di Côte-Nord in Québec, Canada visto dalla stazione internazionale. Il cratere è largo 100 km, l'impatto risale a 215 milioni di anni fa.

La geologia degli impatti meteorici è insolita perché molti di questi eventi accadono in pochi secondi invece che nei lunghi lassi di tempo che i geologi sono abituati a studiare. Gli impatti di solito hanno le fasi mostrate di seguito. Il risultato è la familiare forma del cratere mostrata dal Cratere Meteor





Fase 1 – Contatto e compressione



Fase 2- fase di erosione



Fase 3- fase di modifica-assestamento



(Barringer) Cratere meteorico vicino a Flagstaff in Arizona, USA. Mostra la tipica depressione da impatto con il centro rialzato, circondata da bordi più alti, formata circa 50.000 anni fa

4 Il Sistema Terra comprende sfere che interagiscono fra di loro

L'intero sistema terrestre è composto da diversi sottosistemi. Essi possono essere divisi in geosfera, idrosfera, atmosfera e biosfera, tra questi sottosistemi ci sono molte interazioni e meccanismi di feedback, come mostrato nel capitolo 1.

4.1 Geosfera

La geosfera è la terra solida. Include l'intero pianeta, con il nucleo, il mantello, la crosta, le rocce, i minerali, i fossili e i suoli. Sono compresi anche tutti i processi che influenzano il sistema terra e i materiali che lo compongono.

4.1.1 Materiali e proprietà

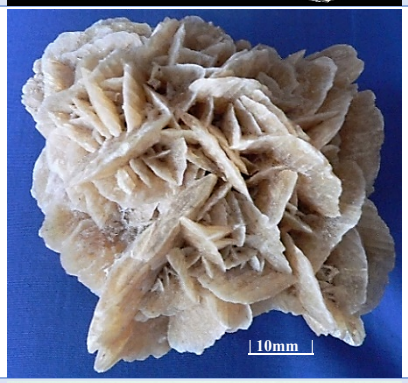
La parte più esterna della Terra è composta da rocce, che a loro volta sono formate da minerali o frammenti di altre rocce; spesso è ricoperta da suolo.

4.1.1.1 Minerali

I **minerali** sono sostanze naturali non organiche con una precisa struttura cristallina e proprietà caratteristiche. Possono essere composti da singoli elementi, ma per la maggior parte sono composti chimici di due o più elementi. A causa della loro origine naturale, solitamente non sono puri come le strutture chimiche create dall'uomo, ma presentano piccole differenze o alterazioni nella composizione chimica, nella struttura cristallina o nelle proprietà fisiche. Minerali diversi possono essere riconosciuti grazie alle loro proprietà. Le proprietà fondamentali sono: il colore, la forma cristallina, la durezza e le modalità con in cui si rompono: sfaldandosi e fratturandosi. Alcuni minerali hanno proprietà particolari che aiutano nella loro identificazione, come la reazione della calcite all'acido cloridrico, il gusto salato del salgemma, l'alta densità e la lucentezza metallica di minerali coma la galena. I minerali possono avere una forma, quindi un abito cristallino che indica l'aspetto complessivo, più comune, del cristallo, che non va confusa con la struttura cristallina, che dipende dal tipo e di elementi chimici e dai legami che li tengono uniti.
Minerali comuni sono mostrati nella tabella 4.1.

Tabella 4.1. Minerali comuni e meno comuni, caratteristiche chimiche, fisiche e forma

Nome	Immagine	Chimismo	Forma più comune	Proprietà fisiche
Quarzo **Cristalli provenienti da località ignota**		Biossido di Silicio; SiO_2	Esagonale	Solitamente bianco, grigio o incolore, ma può presentarsi anche in altri colori tenui; duro; difficile da rompere.
Feldspati **Cristalli provenienti da Rock Creek Canyon, Sierra Nevada, California, USA**		Silicati di Calcio/ Sodio/ Potassio; intervallo da $CaAl_2Si_2O_8$ a (K, Na)$AlSi_3O_8$	Parallelepipedo	Solitamente bianchi o grigi, a volte rosa; duri; frattura lungo le superfici piane.

Nome	Immagine	Chimismo	Forma di un cristallo ben formato	Proprietà fisiche
Mica **Cristalli provenienti da località ignota**		Silicio e ossigeno con Calcio, Sodio, Potassio, Alluminio, Magnesio e/o Ferro.	Esagonale piana	Incolore o nero; ma anche verde bassa durezza; si rompe facilmente in fogli piatti.
Calcite **Cristalli provenienti da Nkana Mine, Zambia**		Carbonato di calcio; $CaCO_3$	Forma romboidale	Bianchi o incolori; durezza piuttosto bassa; si rompe facilmente in forme cubiche schiacciate; reagisce all'acido cloridrico.
Salgemma o Halite **Cristalli provenienti dalla miniera di sale di Wieliczk in Polonia**		Cloruro di Sodio; NaCl	Cubica	Incolori bianchi o rosa; durezza bassa; si rompono molto facilmente in piccoli cubi; gusto salato.
Gesso **Cristalli provenienti da località ignota**		Solfato di Calcio; $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Forme tifiche sono a punta di lancia o a coda di rondine, ma possono formarsi sottili cristalli come nell'immagine, tipici delle "rose del deserto",	Incolori, bianchi o rosa; durezza bassa; si rompono facilmente lungo le superfici piane.
Pirite **Cristalli provenienti da località ignota**		Solfato di Ferro; FeS_2	Spesso cubici, con striature sulle facce, ma anche dodecaedri a faccia pentagonale	Giallo ottone brillante; durezza elevata; difficile da rompere; densità elevata.

Nome	Immagine	Chimismo	Forma di un cristallo	Proprietà fisiche
Galena **Cristalli provenienti dalla miniera di Gibraltar, Naica, Chihuahua, Mexico**		Solfuro di Piombo; PbS	Spesso cubici	Grigio scintillante; bassa durezza; si rompe facilmente il cubo; densità elevata
Elbaite **Cristallo policromo in matrice di quarzo e albite**		Minerale delle tormaline	prismatici	Possono essere piezoelettrici, piroelettrici e dicroici
Azzurrite **Aggregato di microcristalli su quarzo**		Carbonato di rame	Cristalli prismatici allungati o tabulari,	Azzurro, durezza media (4.5), frattura concoide, spesso i masserelle, veniva usata in passato come pigmento
Artinite, ciuffo di cristalli aciculari		Carbonato di magnesio	Cristalli aghiformi trimetrico	Bianchi, bassa densità, bassa durezza, frattura irregolare

Box 4.1. Un minerale insolito – il diamante





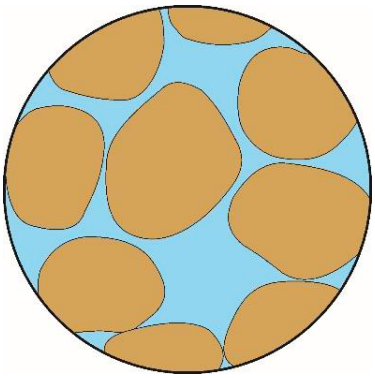


I diamanti si formano in condizioni di pressione elevata sotto la superficie terrestre a partire dal Carbonio. Vengono portati in superficie attraverso rocce vulcaniche dette kimberliti, rocce magmatiche ultrabasiche, che si formano ad alte temperature ed elevate pressioni. La risalita del magma scava camini circolari attraverso la crosta, a velocità elevata, portando con sé I diamanti.
I diamanti vengono estratti dai camini kimberlitici, come il "Big Hole" (Grande Buco n.d.t) che si trova a Kimberly, in Sud Africa, mostrato nella foto. Quando le kimberliti vengono erose, I diamanti vengono trasportati attraverso i fiumi e deposti sotto forma di depositi alluvionali; molti diamanti vengono estratti anche da questi depositi.
I diamanti sono così speciali a causa dei forti legami tra gli atomi di carbonio che li rendono I minerali più duri del pianeta. Hanno anche una superficie molto brillante. I diamanti grezzi, come quello mostrato nella fotografia centrale, possono essere tagliati per riflettere maggiormente la luce, questo li rende la gemma di maggior valore e più utilizzata in gioielleria. I diamanti più piccoli vengono utilizzati nel taglio industriale e nella lucidatura grazie alla loro durezza, spesso vengono usati anche per i trapani dei dentisti.

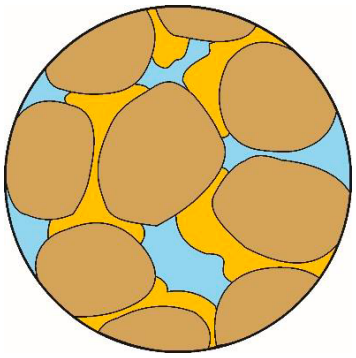
4.1.1.2 Rocce

Le **rocce** sono aggregate naturali, composti da minerali, frammenti di altre rocce o fossili e si formano attraverso il ciclo delle rocce descritto nella sezione 1.4.4. Le rocce vengono identificate e descritte sulla base della loro composizione chimica e della loro struttura fisica. La composizione chimica è legata ai minerali che compongono la roccia, mentre la struttura dipende dal tipo e dalla dimensione delle particelle, ma anche da come sono dispose. Queste caratteristiche si collegano a loro volta alla resistenza delle rocce all'usura, alla loro porosità e permeabilità.
La **porosità** è data dalla quantità di spazi o pori in una roccia, misurata in percentuale. Il 15% di porosità è un valore piuttosto elevato per le rocce; molte rocce hanno una porosità molto inferiore. La **permeabilità** ci indica quanto velocemente un fluido può passare attraverso una roccia. Una roccia con porosità elevata ha anche una permeabilità elevata se i pori sono abbastanza larghi da consentire il passaggio del fluido e se sono collegati tra loro. Rocce con pori molto piccoli, come le argilliti, non permettono il passaggio dei fluidi, perciò sono porose, ma impermeabili. Allo stesso modo, in alcune rocce laviche sono presenti buchi causati di gas intrappolati, ma questi fori non sono collegati tra loro, quindi abbiamo nuovamente una roccia porosa, ma impermeabile (figura 4.1). Rocce con struttura cristallina intergranulare, in cui cioè i cristalli sono strettamente connessi o che presentano una granulometria fine, impediscono l'attraversamento dei fluidi e sono impermeabili, a meno che non siano presenti fessure o fratture. La porosità e la permeabilità controllano la quantità dei fluidi naturali, come acqua, petrolio o gas, che possono essere immagazzinati nelle rocce e fluire attraverso esse.

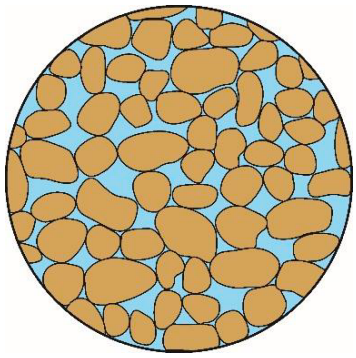
Figura 4.1. Porosità e permeabilità nelle rocce. La porosità e permeabilità in (a) vengono ridotte in presenza di cemento in (Bb); la permeabilità in (c) è piuttosto bassa perché I pori sono piccoli; la permeabilità in (d) è altrettanto bassa perché gli spazi tra i grani più grandi sono riempiti da grani più piccoli; lo scisto in (e) è impermeabile a meno siano presenti fratture.



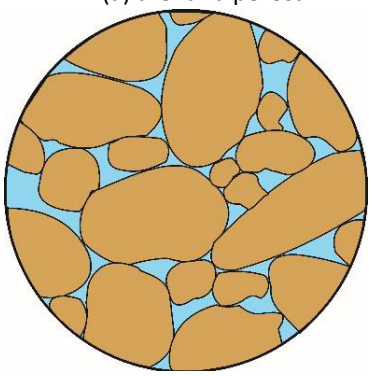
(a) arenaria porosa



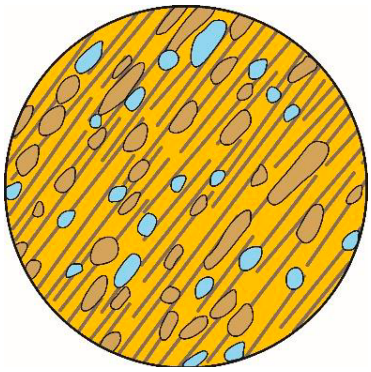
(b) arenaria cementata



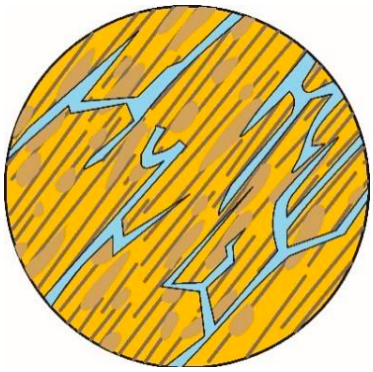
(c) arenaria a grana fine



(d) arenaria poco assortita



(e) scisto non fratturato



(f) scisto fratturato

Le rocce composte da grani che sono state compattate o cementate naturalmente sono **rocce sedimentarie** – possono avere composizione e struttura molto varie. Le rocce sedimentarie più comuni sono ricche in quarzo, feldspati e minerali argillosi. Possono avere grani di dimensioni molto variabili, da conglomerati a grana grossa (con grani tondeggianti) e brecce (con grani spigolosi), ad arenarie con grani di medie dimensioni, fino a rocce sedimentarie a grana fine come siltiti e argilliti. Anche i calcari sono rocce sedimentarie e sono formati principalmente da minerali contenenti carbonato di calcio, come la calcite, derivato in prevalenza da frammenti di conchiglie. I calcari possono essere identificati perché il carbonato di calcio reagisce a contatto con un acido diluito – una goccia di acido cloridrico su un calcare produce una reazione di effervescenza. Anche i calcari possono presentare grana fine o grossa, con colori che vanno dal grigio al crema, fino al bianco della creta, un calcare molto fine.

Le rocce ignee e metamorfiche sono composte da cristalli strettamente connessi tra loro, questo le rende di norma molto resistenti all'erosione ed impermeabili, a meno che non siano presenti fratture. Negli esemplari più grossolani i cristalli sono visibili a occhio nudo o con l'aiuto di una lente.

Le **rocce ignee** un tempo erano una roccia fusa detta **magma**, e solitamente si formano quando il magma di raffredda. Mentre il magma raffredda, i minerali cristallizzano fino riempire gli spazi tra loro e la roccia diventa solida. Minerali di composizione differente hanno colori diversi e cristallizzano a temperature diverse; quindi, le rocce ignee sono composte da un mix di minerali con colori, forme e dimensioni diversi. Solitamente i cristalli hanno un'orientazione casuale. L'unica eccezione si presenta quando le rocce si formano quando il magma che viene espulso in modo esplosivo
i dal vulcano, sotto forma di blocchi o cenere vulcanica.

Le **rocce metamorfiche** sono formate da rocce sedimentarie, ignee o metamorfiche più antiche dal **metamorfismo** causato dall'aumento della temperatura, della pressione o di entrambe. Si formano allo stato solido, non fondono (le rocce che si formano a partire da uno stato fuso sono ignee). L'aumento di temperatura può essere dovuto sia al riscaldamento causato da un magma situato nelle vicinanze o che dall'essere spinti a grandi profondità. Quando è coinvolta la pressione, le rocce metamorfiche si formano solo in situazioni di collisione tra placche tettoniche e non semplicemente dal seppellimento sotto spessi strati di rocce. Le rocce metamorfiche che si formano a causa del solo innalzamento della temperatura hanno i cristalli con orientazioni casuali, mentre le rocce metamorfiche che si formano a causa della spinta tettonica hanno i cristalli con orientazione ad angolo retto rispetto alla pressione ricevuta. Il marmo, essendo una rocca metamorfica formata da cristalli di carbonato di calcio, reagisce all'acido cloridrico diluito come il calcare.

Queste proprietà consentono di distinguere tra loro i tre maggiori gruppi di rocce: studiando i grani o cristalli, testando la permeabilità (versando l'acqua sulla superficie oppure immergendo il campione in acqua e osservando se risalgono delle bolle), e grattando la roccia con l'unghia o con un pezzo di metallo, ad esempio una moneta. I risultati sono mostrati nella Tabella 4.2. Calcare e marmo reagiscono anche con l'acido cloridrico.

Tabella 4.2. I risultati di semplici test per distinguere i tre principali gruppi di rocce

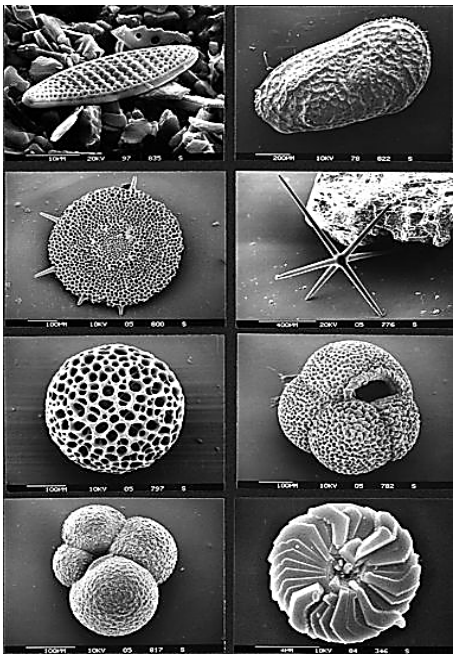
Osservazione/test gruppo di rocce	Analisi dei grani/cristalli	Test di permeabilità	Resistenza al graffio
Sedimentaria	Grani cementati o compressi	L'acqua penetra o flussi di bolle risalgono dal campione, a meno che non sia a grana molto fine o ben cementata	Si graffia facilmente a meno che non sia ben cementata
Ignea	Cristalli strettamente connessi, orientazione casuale	L'acqua non penetra la superficie, non risalgono bolle dal campione	Difficile da graffiare, a meno che non sia alterato da fenomeni atmosferici
Metamorfica	Cristalli strettamente connessi, orientazione casuale se formata principalmente a causa del calore, parallela o sub-parallela se formata da pressione e calore insieme		

4.1.1.3 Fossili

I **fossili** includono qualsiasi traccia di vita conservata, e sono considerati tali se più antichi di 10.000 anni. Le loro dimensioni variano dai più grandi dinosauri fino ai microfossili (Figura 4.2.).

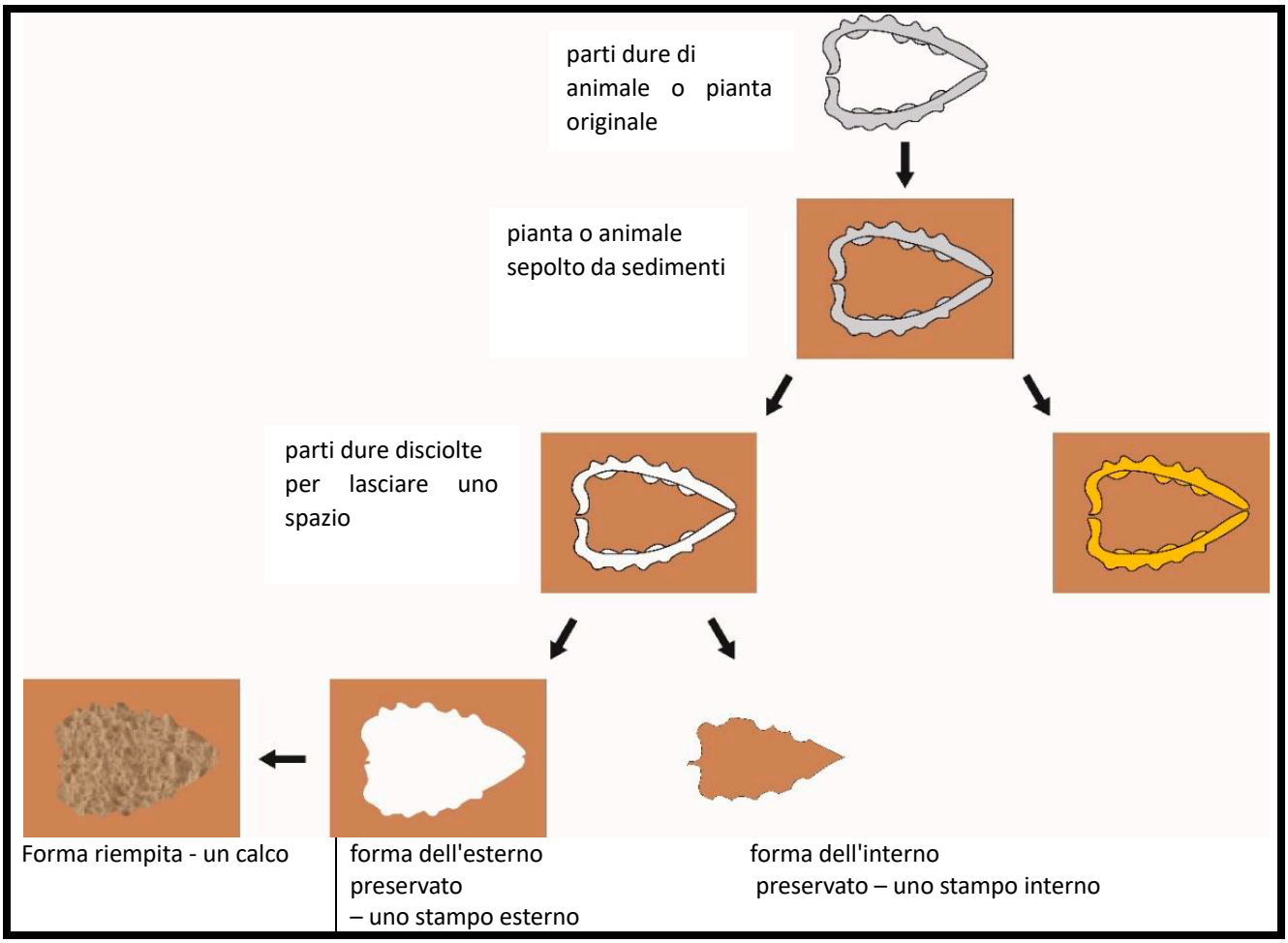
Figura 4.2. Argentinosaurus dall'Argentina, il più grande dinosauro noto finora, e minuscoli microfossili marini visti al microscopio elettronico a scansione (SEM)





I fossili si trovano nelle rocce sedimentarie e in alcune rocce con metamorfismo di basso grado. Sono i resti conservati di parti dure di organismi viventi, come conchiglie, ossa e raramente parti molli (incluse pelli, pellicce, penne, ecc.…). In alcuni casi il materiale originale è stato sostituito, atomo per atomo, da altri minerali, che possono mantenere o non mantenere tutte le caratteristiche originali. A volte i fossili si dissolvono lasciando una cavità, l'impronta nelle rocce circostanti. Le impronte possono essere riempite in seguito da altri materiali formando calchi del fossile originale (Figura 4.3.).

Figura 4.3. Fossilizzazione

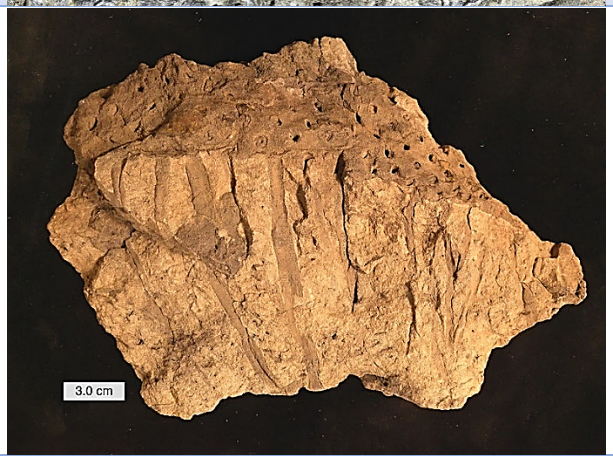


Le parti del corpo preservate nei fossili sono chiamate **corpi fossili**, mentre le **tracce fossili** sono i segni lasciati dagli organismi nei sedimenti, come impronte, tane, fori e tracce di radici. Importanti modalità di fossilizzazione sono mostrate nella Tabella 4.3.

Tabella 4.3. Importanti processi di fossilizzazione

Processo di fossilizzazione	Immagine	Gruppo fossile
Seppellimento – si preservano parti dure e parti molli		Piccolo fossile di mammifero simile a un toporagno – mostra le ossa e la pelliccia conservati. Fossile proveniente da Yixian Formation, nella provincia di Liaoning in China, basso Cretaceo

Processo di fossilizzazione	Immagine	Gruppo fossile
Seppellimento – si preservano solo parti dure		Un trilobite *Calymene* Fossil e proveniente dalla formazione di Henryhouse in Oklahoma, USA. Siluriano
Sostituzione – minerale originario sostituito da un nuovo minerale		Ammonite, originariamente composta da carbonato di calcio, ora sostituito da pirite. Fossile proveniente da Bully Calvados in Francia. Giurassico
Formazione di un calco		Calco interno ed esterno di un gasteropode simile a una lumaca a forma di serpente (il fossile si è dissolto, lasciando la forma dell'interno e dell'esterno del guscio). Fossile proveniente dalla formazione di Galena in Iowa, USA. Ordoviciano
Calco		Calco dell'impronta di un dinosauro; l'animale ha lasciato un'impronta nel fango che si è solidificata prima di essere riempita di sabbia; ora il fango è stato rimosso e l'arenaria è emersa a mostrare il calco. Fossile proveniente dalla formazione di Ashdown a Fairlight, nel Sussex, Inghilterra. Cretaceo.

Processo di fossilizzazione	Immagine	Gruppo fossile
Tracce fossili – tane e perforazioni		Tana e luogo di sosta di un trilobite Fossili provenienti dalla formazione di Gog presso il lago Louise ad Alberta, Canada. Cambriano.
Tracce fossili - radici		Tracce di radice (impronte) di una pianta di *Lepidodendron* con fossile della pianta (corpo fossile). Fossile proveniente dal Nord-Est dell'Ohio, USA. Carbonifero

4.1.1.4 Rocce sedimentarie

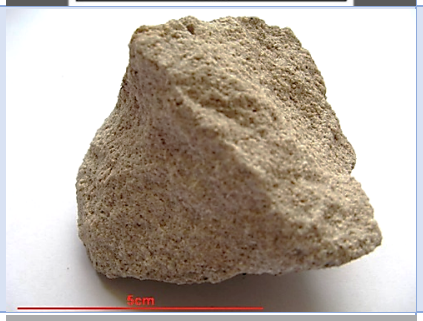
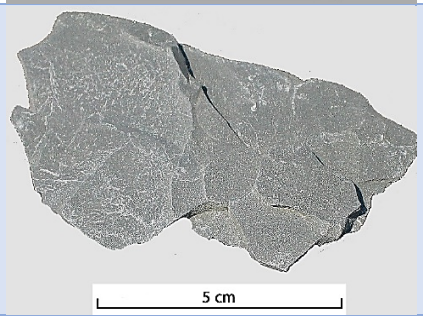
Le **Rocce sedimentarie** si depositano sotto forma di sedimenti e vengono identificate in base alla composizione chimica e alla dimensione dei grani (Tabella 4.4). Le rocce sedimentarie solitamente sono permeabili, a meno che non siano ben cementate o a grana molto fine, la maggior parte si possono incidere facilmente. I grani sono facilmente visibili nelle rocce a composizione sabbiosa, ma solitamente sono indistinguibili nelle rocce a composizione argillosa, anche usando una lente di ingrandimento.

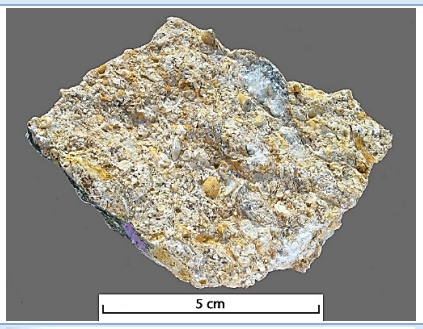
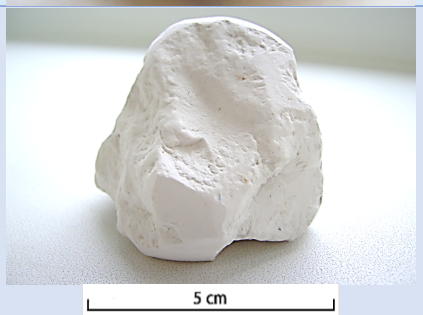
Tabella 4.4. Classificazione delle rocce sedimentarie

Composizione chimica		Ricche in silice	Ricche in carbonato di calcio	Ricche in cloruro di sodio	Ricche in carbonio
Caratteristiche		Rocce sedimentarie più comuni; resistenti se ben cementate, altrimenti facili da graffiare; comunemente di colore grigio scuro o chiaro, marrone, crema o rosso.	Reagiscono all'acido cloridrico diluito; facili da graffiare; comunemente di colore grigio chiaro, crema o bianco.	Composte di halite, dal gusto salato; cristalli cubici, molto facili da graffiare; di colore rosa, bianco o trasparente.	Molto facili da graffiare; spesso si rompono in forme cubiche; di colore nero; possono contenere fossili di piante.
Tipi di rocce comuni – vedi Tabella 4.5					
Dimensioni dei grani	Fini < 0.0625 mm	Argillite, Scisto, Argilla, Silt	Calcare;	Roccia evaporitica	Carbone
	Medi 0.0625 – 2 mm	Arenaria; Siltite	Calcare		
	Grossolani > 2 mm	Conglomerato; Breccia			

La maggior parte dei sedimenti sabbiosi vengono depositati in letti, mentre i fanghi si depositano in strati più sottili chiamati laminazioni. Man mano che i sedimenti venivano depositati, i fanghi si comprimevano in fanghi più compatti, o argilliti e il fango limoso è stato compresso in siltiti, mentre l'acqua veniva spremuta all'esterno.
Contemporaneamente l'acqua fluisce attraverso i pori dei sedimenti più grossolani, come i letti di ciottoli, le sabbie e i depositi organogeni, e i minerali disciolti nell'acqua cristallizzano formando un cemento naturale, che cementano i grani tra loro; questi sedimenti litificano in conglomerati a grana grossa e in arenarie o calcari a grana media, come mostrato nella Tabella 4.5. Quindi, per le rocce sedimentarie, i due processi di formazione principali sono la **compattazione** e la **cementazione**.

Tabella 4.5. Rocce sedimentarie comuni

Rocce sedimentarie	Immagini		Provenienza dell'immagine
	Tipologia	Affioramento	
Conglomerati			Esposizione di conglomerati, vicino a San Sebastian in Spagna. Cretaceo
Arenaria color crema			arenarie a stratificazione incrociata, F.ne Cala del Vino, Triassico, Sardegna
Arenaria rossa			Arenaria Red Navajo nel Canyon di Antelope in Arizona, USA. Il colore rosso è dovuto alla presenza di ematite nel cemento. Triassico/Giurassico
Argillite			Argillite rossa del Permiano, con strati di siltiti più chiare, Bassin de Lodève, Hérault, la Lieude, Mérifons, Francia

Rocce sedimentarie	Immagini		Provenienza dell'immagine
Argillite			Argillite marina, Slate Hill Road, Marcellus, New York, USA. Devoniano
Argilla			Argilla, Estonia. Quaternario
Arenarie e siltiti			Formazione del Macigno, Oligocene, Toscana meridionale
Calcare fossilifero			Calcare fossilifero dell'arco di Green Bridge, Pembrokeshire, Galles. Carbonifero
Calcare oolitico			Calcare oolitico della cava di Rothenstein III, nella regione di Jura, Francia. Giurassico
Calcari fini (calcilutiti)			Le alte scogliere di calcare di MØn, Danimarca. Cretaceo

Rocce sedimentarie	Immagini		Provenienza dell'immagine
Roccia evaporitica, sale			Miniera di Salgemma di Realmonte, Sicilia. Gli affioramenti naturali di sale si trovano solo sottoterra, dato che il sale si dissolve nell'acqua.
Carbone			Giacimento di carbone con entrata di una vecchia miniera, formazione di Stellarton, Nuova Scozia, Canada. Carbonifero

Box 4.2. Una roccia sedimentaria insolita – la selce (o pietra focaia)







La selce si trova sotto forma di noduli nel calcare a grana fine (foto a destra). Quando si trova nel calcare più fine è chiamata chalk (foto a sinistra) e veniva usata nella preistoria per fare punte di freccia e altri attrezzi affilati.

La selce e i noduli di selce si formano quando il fango contenente carbonato di calcio viene depositato in condizioni di quiete sul fondale marino e microscopici organismi marini morti, fatti di silice (diossido di silicio) si depositano nello stesso lasso di tempo. Mentre il carbonato di calcio, comprimendosi diventa calcare, la silice si dissolve nell'acqua tra le particelle. A questo punto ricristallizza in selce/noduli di selce a grana molto fine, che nel tempo si accrescono all'interno della roccia. I noduli hanno forme arrotondate e dimensioni insolite e spesso si trovano in strati. Le spiagge sotto le scogliere di calcari fini sono spesso fatte da ciottoli di selce molto duri perché il calcare viene eroso dal mare.

4.1.1.5 Rocce ignee

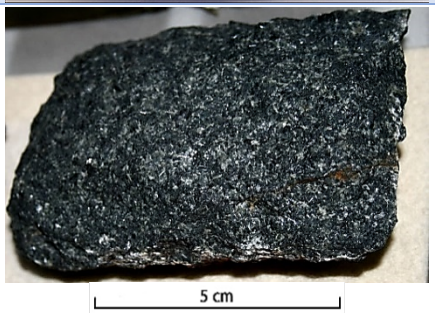
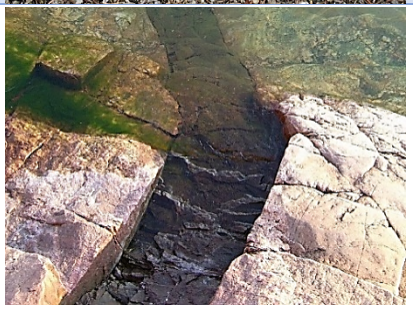
Le **rocce ignee** si formano dal magma fuso quando raffredda e cristallizza oppure quando viene eruttato in modo esplosivo da un vulcano. La maggior parte delle rocce ignee è impermeabile e resistente al graffio grazie alla presenza di cristalli strettamente connessi; possono essere identificate dalle dimensioni dei cristalli e dalla composizione chimica. I cristalli, nelle rocce a grana grossa sono facili da vedere, quelli nelle rocce a grana media richiedono l'utilizzo di una lente di ingrandimento, mentre i cristalli nelle rocce a grana fine solitamente sono impossibili da vedere senza l'aiuto di un microscopio. Le rocce a grana grossolana, che si sono formate a causa del lento raffreddamento del magma sotto la superfice terrestre, sono chiamate **rocce plutoniche**; le rocce a grana fine sono state eruttate come **rocce vulcaniche**.

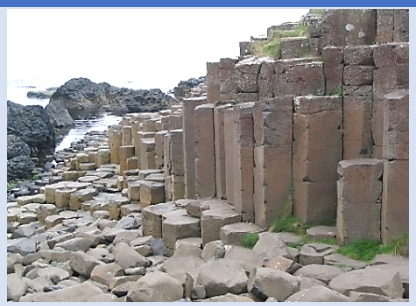
La composizione chimica delle rocce è correlata ai minerali presenti e questi determinano la colorazione complessiva della roccia. Le rocce ricche in ferro e magnesio hanno colori scuri a causa dell'elevata quantità di minerali ferro-magnesiaci, mentre le rocce ricce in silicio presentano prevalentemente minerali dai colori chiari come feldspati e quarzo. Questo consente la classificazione come riportato nella Tabella 4.6.

Tabella 4.6. Classificazione delle rocce ignee

Composizione chimica		Ricche in ferro/magnesio	Intermedie	Ricche in silice
Caratteristiche		Minerali scuri; colore scuro; alta densità (sono pesanti)	caratteristiche intermedie	Minerali chiari; colore chiaro; densità normale
Tipi comuni di rocce – vedi Tabella 4.7				
Grana	Fine (< 1mm)	Basalto	Andesite	Cenere vulcanica
	Media (1-3mm)	Diabase	Non comune	Non comune
	Grossolana (>3mm)	Gabbro	Non comune	Granito

Tabella 4.7. Rocce ignee comuni

Roccia ignea	Immagine		Provenienza dell'immagine
	Campione	Ambiente	
Granito			Affioramento di granito, Monte Hope, Victoria, Australia. Devoniano
Gabbro			Gabbro, Ucraina, sito nel Parco Folcloristico Botanico di Blankenfelde Pankow, Berlin, Germany
Diabase			Dicco di diabase sulla sponda di un fiume, Agwa Rock, Lake Superior Provincial Park, Canada

Roccia ignea	Immagine		Provenienza dell'immagine
Basalto			Colonne di basalto (formate durante il raffreddamento) presso il Lastricato dei Giganti, Irlanda del Nord. Terziario
Andesite			Colata lavica di andesite, vulcano Stewart Peak, Colorado, USA Terziario
Cenere vulcanica			Cenere vulcanica depositata tra strati di tufo presso le Isole Eolie Sicilia, Italia. Quaternario

Box 4.3. Un'insolita roccia ignea – il vetro vulcanico (Ossidiana)







Come le altre rocce ignee, il vetro vulcanico si è formato per raffreddamento del magma. Quando il magma raffredda lentamente sotto la superficie c'è il tempo perché si formino grandi cristalli. Quando viene eruttato come lava, si raffredda molto più velocemente, perciò ha cristalli molto più piccoli, come il basalto, una roccia magmatica a grana fine. Se raffredda ancora più velocemente non c'è il tempo per gli atomi di unirsi in cristalli e si forma il vetro. Il vetro vulcanico in questa colata lavica si è formato in questo modo, esempio di un coltello preistorico. Il vetro di bottiglie e finestre viene realizzato raffreddando il silicio fuso allo stesso modo.

4.1.1.6 Rocce metamorfiche

Le **rocce metamorfiche** si formano quando rocce sedimentarie, ignee o metamorfiche più antiche ricristallizzano allo stato solido a causa dell'aumento di pressione e/o temperatura. Le rocce non fondono durante il metamorfismo, altrimenti diventerebbero rocce ignee.

La gran parte delle rocce metamorfiche derivano dall'aumento di temperatura e pressione dovuti dalla formazione di una catena montuosa causata dalla collisione tra placche. Questo è il **metamorfismo regionale**. Alcuni minerali, sottoposti a queste intense sollecitazioni, si trasformano in altri minerali, alcuni ricristallizzano diventando più sottili e lunghi, mentre altri ruotano fino ad essere allineati ad angolo retto rispetto alla direzione della pressione.

Le rocce metamorfiche si formano anche quando una roccia di trova vicino a un corpo igneo caldo. Poiché la ricristallizzazione in questo caso è dovuta principalmente al calore e non c'è spinta tettonica, i cristalli nella nuova roccia hanno una orientazione casuale.

Il tipo di roccia metamorfica che si forma a causa di calore e pressione (metamorfismo regionale) o principalmente a causa del calore (**metamorfismo di contatto**) dipende dalla composizione della roccia originale, come mostrato nella Tabella 4.8.

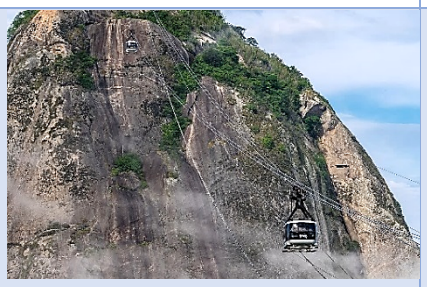
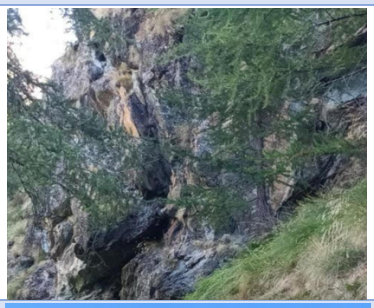
Tabella 4.8. Classificazione delle rocce metamorfiche

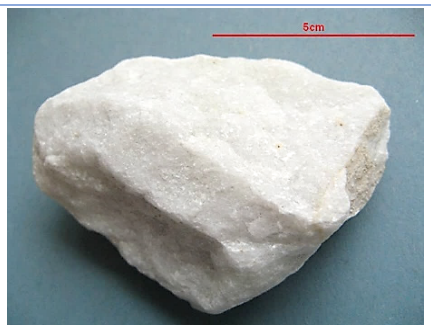
Composizione mineralogica		Minerali di quarzo e argilla in argillite o scisto	Quarzo in arenaria	Calcite in calcare
		Tipologie comuni di rocce metamorfiche – vedi Tabella 4.9		
Aumento di temperatura e pressione ↓	Basso	Ardesia	quarzite	Marmo
	Medio	Scisto		
	Elevato	Gneiss		
		Common thermal metamorphic rock types		
Aumento di temperatura		Cornubianite	quarzite	Marmo

Poiché le rocce metamorfiche sono fatte da cristalli strettamente connessi, solitamente sono impermeabili e resistenti al graffio, più della maggior parte delle rocce sedimentarie. Le rocce metamorfiche regionali possono essere identificate dai minerali allineati. Nell'ardesia a grana fine essi determinano condizioni di debolezza nella roccia, che può essere rotta in sottili fogli lungo i piani di debolezza o di sfaldamento. Negli scisti a grana grossolana i minerali allineati possono essere visti perché riflettono la luce e quindi luccicano quando si muove il campione. I minerali formano delle bande negli gneiss; a volte queste bande sono deformate in pieghe complesse. É difficile individuare l'allineamento di cristalli nella quarzite o nel marmo e quindi è difficile identificare se nella quarzite o nel marmo si tratta di un metamorfismo regionale o termico. La quarzite assomiglia a un'arenaria impermeabile, dura e dall'aspetto simile allo zucchero; anche il marmo può assomigliare allo zucchero, ma reagisce con l'acido cloridrico. Anche la cornubianite è dura e, trattandosi di una roccia derivata da metamorfismo di contatto, è formata da minerali disposti con orientazione casuale, che solitamente non sono visibili nelle rocce a grana fine.

Tabella 4.9. Rocce metamorfiche comuni

Roccia metamorfica	Immagine		Fonte dell'immagine
	Campione	Ambiente	
Ardesia			Ardesia in una scarpata stradale protetta da reti metalliche e ancoraggi, Rothaar Mountains, North Rhine, Germania. Devoniano

Roccia metamorfica	Immagine		Fonte dell'immagine
	Campione	Ambiente	
Scisto			Scisto micaceo, La Pierre Blanche, Isola di Groix, Bretagna, Francia. Devoniano
Gneiss			Lo gneiss a fasce delle Montagne Pan di Zucchero, Rio de Janiero, Brasile. Precambriano
Metagabbro			Liortère Valtournenche, Valle d'Aosta Pre-pliocene
Gneiss Occhiadino			Gneiss con grandi cristalli ovalizzati, presso il rifugio Sella in Val di Cogne Valle d'Aosta Mesozoico
Dolomie e marmi laminati			La parete carboniosa della Becca d'Aran in Valle d'Aosta Mesozoico
Serpentino			Pareti della Valtournenche con affioramenti in ofioliti Pre-pliocene

Marmo			Blocco di marmo della cava di Carrara, Italia – ampiamente usato come materiale da costruzione e per la scultura di statue. Giurassico
Quarzite			Affioramento di quarzite El Castellar, Saragozza, Spagna Ordoviciano

4.1.1.7 Suoli

Il **suolo** deriva dall'interazione tra gli esseri viventi e i materiali presenti sulla superficie terrestre – dove non c'è vita, non c'è suolo. Il suolo si forma attraverso l'interazione tra la geosfera solida, l'idrosfera, l'atmosfera e la biosfera. I suoli si formano su materiali superficiali sciolti come i depositi fluviali glaciali o per alterazione biologica del substrato roccioso. I numerosi tipi diversi di suoli che si possono formare dipendono da vari fattori, inclusi il clima, l'altitudine, la ripidità del pendio e il tipo di substrato o il materiale in superficie

I suoli hanno quasi sempre uno strato superficiale solitamente di colore scuro. Lo strato superficiale è la zona in cui si trovano la maggior parte delle radici delle piante; molti microorganismi e animali come i lombrichi vivono qui ed è dove si trova la maggior parte del materiale organico e dell'humus. Perciò I principali costituenti del suolo superficiale sono: animali e piante, humus, sedimenti o frammenti di roccia, acqua e aria. Piccole quantità di terreno contengono miliardi di piante e animali microscopici appartenenti a migliaia di specie diverse.

Sotto lo strato superficiale, nella maggior parte dei casi, c'è una zona composta da materiale a grana fine che si deposita a causa del dilavamento; la maggior parte delle alterazioni chimiche avviene qui. La base del suolo è un substrato roccioso o il materiale della superficie originaria.

Il suolo è un elemento chiave dell'ecosistema Terra; tutte le piante di grandi dimensioni crescono sul terreno. É un habitat fondamentale per molte piante e animali ed è la base dell'agricoltura. Ricicla nutrienti e rifiuti organici e influenza la qualità dell'acqua che vi scorre attraverso. Il suolo interagisce anche con I gas atmosferici. Il migliore terreno superficiale per la crescita delle piante è composto circa da metà materiale solido e la restante metà riempita di acqua o aria. Il materiale solido è un mix di sabbia, limo e humus; miscele diverse di sabbia, limo, argilla e humus danno origine a tipologie di suoli diversi.

Figura 4.4. Sequenza del suolo ad Altenberg, Germania



Gli agricoltori cercano di rendere i terreni più produttivi aggiungendo diversi componenti. Nelle aree in cui il suolo è acido viene aggiunta calce, (ossido/idrossido di calcio - $CaO/Ca(OH)_2$) per renderlo neutro. In altre aree l'aggiunta di argilla migliora il suolo, mentre in altre zone ancora, l'aggiunta di letame animale o fertilizzanti a base di potassio e azoto migliorano la produttività del terreno.

Box 4.4. Charles Darwin e il suolo



Charles Darwin fu uno dei primi a capire l'importanza dei lombrichi nella formazione del suolo. Egli notò che uno strato calce bianca di carbonato di calcio era stato messo su un terreno agricolo inglese molti anni prima ora formava uno strato spesso diversi centimetri sottoterra. Pensò che questo fosse dovuto all'azione dei lombrichi e costruì il suo terrario per verificare la sua idea. Pubblicò la sua idea riguardo l'importanza dei lombrichi nella formazione dei suoli nel 1881.

Foto di un terrario fatto in casa tagliando delle bottiglie di plastica – prima di aggiungere i lombrichi e diversi giorni dopo averli aggiunti.

4.1.2 Processi terrestri e caratteristiche osservate

I processi terrestri sono collegati tra loro attraverso il ciclo delle rocce, illustrato nella Figura 1.7. Il ciclo delle rocce comprende i processi superficiali di alterazione, erosione meteorica, trasporto e deposizione, strettamente legati alla parte superficiale del ciclo dell'acqua. Una volta depositati, i sedimenti possono essere sepolti dai sedimenti sovrastanti così che la compattazione e la cristallizzazione del cemento naturale li trasformano in rocce sedimentarie.

I processi di tettonica a placche guidano la parte interna del ciclo delle rocce, deformando le rocce, provocando metamorfismo, attività ignea e sollevando le rocce in superficie, dove vengono nuovamente attaccate dai processi superficiali.

4.1.2.1 Processi superficiali

L'atmosfera, l'idrosfera e la biosfera interagiscono con la geosfera, modellando il paesaggio e formando e depositando sedimenti. Le rocce superficiali vengono attaccate dall'alterazione e dall'erosione.
L'alterazione può essere fratturazione (alterazione fisica) e decomposizione (alterazione chimica) del materiale sulla superficie terrestre senza la rimozione di materiale solido. L'erosione è la rimozione di materiale solido, che può essere poi trasportato più lontano.

Sebbene i processi di alterazione tendano ad agire insieme, possono essere suddivisi in distinti agenti fisici, chimici e biologici, come mostrato nella Tabella 4.10.

Tabella 4.10. Processi di alterazione comuni

Processo		Descrizione	Immagine	Fonte
Fisici	Gelo/disgelo Crioclastismo	L'acqua entra nelle fessure, gela, si espande, poi fonde e si infiltra in profondità; con il proseguire dei cicli di gelo/disgelo, la fessura si allarga. Il fenomeno del gelo/disgelo è importante dove è più frequente, come sulle cime delle montagne.		Masso fratturato, Islanda meridionale

	Termoclastismo	Le rocce diventano molto calde di giorno e molto fredde di notte; poiché i minerali si espandono e si contraggono a velocità diverse, la roccia si indebolisce e si spacca. E' un fenomeno importante nelle regioni calde, che diventano molto fredde di notte.		Lastre di granito che si staccano a causa del riscaldamento/raffreddamento, Half Dome, Parco Nazionale dello Yosemite, USA
Chimici	Piogge acide su calcari e marmo	L'acqua piovana scioglie l'anidride carbonica dall'atmosfera e ne assorbe altra quando scorre nel suolo. L'acido carbonico debole scioglie il carbonato di calcio. Quando il calcare si scioglie lungo i giunti, questi diventano più larghi e si possono formare delle grotte.		Orizzonte in calcari carboniferi con giunti allargati Campi solcati, Doolin Quay, Irlanda
	Ossidazione di arenaria e quarzite	L'acqua piovana scorre lungo i giunti, ossidando (arrugginendo) i minerali di ferro fino a farli diventare di colore giallo, marrone e rosso vivo.		Alterazioni chimiche lungo un giunto nella formazione rocciosa di Khondalite presso la spiaggia di Rushikonda, Visakhapatnam, India

Processo	Descrizione	Immagine	Fonte
Biologici	Licheni e muschi	I licheni sono le prime piante a colonizzare la roccia nuda. Le loro minuscole radichette crescono nei pori tra i grani di roccia e indeboliscono la roccia quando il lichene si secca e si contrae. Hanno anche effetti biochimici. I licheni sono spesso seguiti dai muschi e poi dal suolo.		Licheni che crescono su roccia nuda, USA
	Formazione del suolo	Gli effetti biologici di alterazione sul substrato roccioso producono suolo		Strati di suolo nella valle del Reno vicino a Rastatt, Germania

L'erosione è la rimozione di materiale solido. I paesaggi vengono modellati e i sedimenti si formano attraverso quattro principali processi di erosione, come evidenziato nella Tabella 4.11.

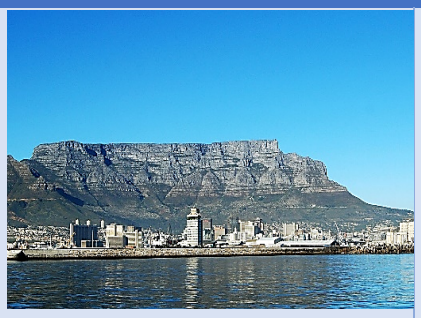
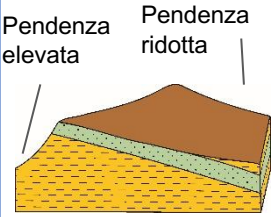
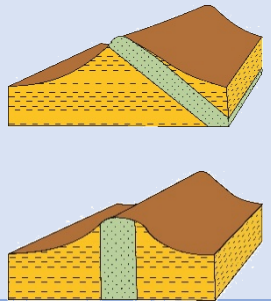
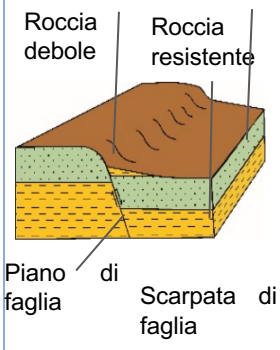
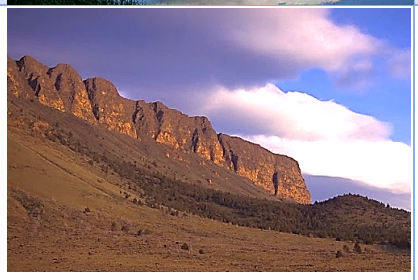
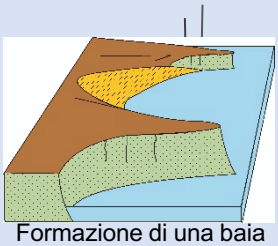
Tabella 4.11. Importanti processi erosivi

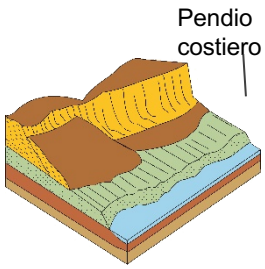
Processo	Descrizione	Immagine	Fonte
Acque fluenti (nei fiumi e nel mare)	L'acqua che scorre raccoglie ed erode le particelle e trasporta anche sedimenti che erodono la roccia. La maggior parte dell'erosione si verifica durante le piene, quando gli argini dei fiumi possono cedere in modo catastrofico.		Crollo di una sponda a causa dell'erosione, fiume Tista, Sundarganj Thana, Bangladesh
	Le onde e i sedimenti che trasportano erodono i piedi delle scogliere costiere, spesso causando cadute di massi. Queste ultime vengono poi disgregate dalle onde		Spiaggia chiusa da una frana per erosione costiera, Oddicombe, Devon, Inghilterra

Processo	Descrizione	Immagine	Fonte
Gravità	I frammenti di roccia, indeboliti dagli agenti atmosferici, cadono a causa della gravità. La caduta di massi su larga scala produce ghiaioni inclinati che hanno forma conica sotto le pareti rocciose. L'erosione per gravità comprende la caduta di massi e lo scivolamento di rocce nelle frane.		Conoidi di ghiaia, Lago Bow vicino a Crowfoot Mountain, Alberta, Canada
Aria in movimento (vento)	Il vento erode particelle di sabbia, limo e fango; la sabbia può formare dune in posto, mentre il limo e l'argilla possono essere trasportati lontano come nubi di polvere.		Una nuvola di sabbia che soffia su Al Asad, Iraq
	Erosione eolica di un affioramento roccioso; in caso di vento forte, più granelli di sabbia colpiscono ed erodono maggiormente la base dell'affioramento rispetto alla cima, per cui la base è più stretta.		Árbol de Piedra (albero di pietra), Riserva nazionale della fauna andina Eduardo Avaroa, Bolivia
Ghiaccio in movimento	Sebbene il ghiaccio di per sé non possa erodere il basamento roccioso, possono farlo i sedimenti che trasporta. Quando le lingue di ghiaccio si spostano, il basamento viene eroso nella direzione del movimento del ghiaccio, lasciando striature e solchi. Allo stesso tempo i detriti trasportati dal ghiaccio vengono sminuzzati.		Persona su roccia scalfita dal movimento glaciale, Ghiacciaio del Gorner, Zermatt, Svizzera

L'alterazione e l'erosione, assieme, modellano il paesaggio. La resistenza delle rocce all'alterazione e all'erosione dipende dalla stabilità chimica dei minerali sulla superficie terrestre e come sono connessi tra loro i grani della roccia. Le rocce formate da cristalli strettamente connessi e da grani ben cementati tendono a resistere all'erosione e danno forme più alte, scogliere costiere e promontori, mentre le rocce meno resistenti formano valli e baie. L'angolo di inclinazione delle rocce e altre caratteristiche geologiche spesso controllano la forma del paesaggio, producendo una varietà di forme del territorio e delle coste (Tabella 4.12).

Tabella 4.12. Forme del terreno formate da strati di roccia più resistente

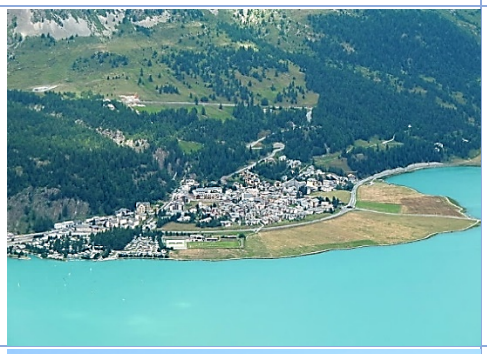
Forma del territorio	Descrizione	Disegno	Immagine	Fonte
Altopiano	Gli altopiani hanno sommità piatte e lati ripidi. Si formano quando le rocce resistenti sono orizzontali o quasi (possono anche formarsi come superfici di erosione su rocce diverse).			Altopiano della Table Mountain, Città del Capo, Sudafrica
Cuesta	Le cuesta hanno una pendenza maggiore in una direzione e minore nell'altra direzione. Si formano quando le rocce resistenti hanno una pendenza (inclinazione) ridotta.			Cuesta vista dal traghetto di Victoria Island, Vancouver, Canada
Crinale	I crinali hanno forti pendenze in due direzioni e si formano quando le rocce resistenti sono verticali o fortemente inclinate.			Cresta, Monte Rundle, vicino a Banff, Alberta, Canada
Scarpata di faglia	Quando le rocce su un lato di una faglia sono più resistenti dell'altro, spesso si forma una scarpata di faglia.			Scarpata della faglia di Abert Rim, Oregon, una delle più alte degli USA
Promontori o e baia	Quando alcune rocce costiere sono più resistenti di altre, si formano promontori e baie.			Una baia tra promontori, Cabo de la Vela, Colombia

Forma del territorio	Descrizione	Disegno	Immagine	Fonte
Falesia costiera	Dove le rocce resistenti sono orizzontali o poco inclinate rispetto al mare, normalmente si formano ripide scogliere, spesso con forme come archi e faraglioni.			Ripide scogliere e un arco, Island Archway, Great Ocean Road, Victoria, Australia
Versante costiero	Dove non ci sono rocce resistenti o gli strati rocciosi degradano verso il mare, di solito si sviluppano pendii costieri poco inclinati.			Scogliere costiere degradanti, Shippards Chine, Isola di Wight, Inghilterra

L'erosione è molto attiva durante le condizioni di alta energia come le tempeste. Dopo che i sedimenti sono stati erosi dalla gravità, dall'acqua in movimento, dal vento o dal ghiaccio, vengono trasportati; spesso vengono depositati ed erosi più volte durante il trasporto. La maggior parte della deposizione permanente avviene in condizioni più tranquille e a bassa energia. Alcune forme del paesaggio dipendono più dall'erosione e dalla deposizione che dalle caratteristiche delle rocce sottostanti, come nella tabella 4.13.

Tabella 4.13. Elementi del paesaggio formati principalmente da erosione e deposizione

Processo		Descrizione	Immagine	Fonte
Erosione	Da acqua in movimento	L'acqua che scorre erode la roccia alla base delle valli montane, rendendole più profonde. Quando il materiale scivola lungo i fianchi, spesso assumono la forma a V.		Valle del fiume Goriot a forma di V, Pakistan
	Dal ghiaccio in movimento	I ghiacciai che scendono lungo le valli montane erodono sia i fianchi che la base dei versanti producendo valli a forma di U		Valle glaciale di Prapic a forma di U vicino a Orcières, Hautes-Alpes, Francia

Deposizione	Dall'acqua nelle pianure alluvionali	Quando i fiumi esondano, l'acqua scorre attraverso le pianure alluvionali su entrambi i lati, depositando strati di fango e limo. Gli strati di fango si accumulano fino a formare ampie pianure alluvionali piatte, attraversate da canali fluviali a meandri		Fiume a meandri della pianura alluvionale dello Zambesi in Namibia, visti dall'alto; pista di atterraggio in basso a destra
	Dall'acqua in laghi e mari	I fiumi che trasportano i sedimenti nei laghi e in mari tranquilli li depositano costruendo delta spesso a forma di ventaglio.		Il delta di Silvaplana formato nel lago di Silvaplana, Svizzera
	Dalla fusione del ghiaccio	La fusione dei ghiacci deposita miscele di massi e argilla alle estremità e ai lati dei ghiacciai e dove si sono sciolti gli strati di ghiaccio. I depositi caotici sono chiamati morene, tilliti se anteriori al Quaternario		Il ghiacciaio Isunnguata Sermia sullo sfondo ha depositato la morena in primo piano, Kangerlussuaq, Groenlandia

Al giorno d'oggi, l'uomo può movimentare ogni anno più sedimenti di tutti i fiumi del mondo messi insieme, attraverso le miniere, le cave, le costruzioni e l'agricoltura. Nonostante ciò, la maggior parte della formazione del paesaggio rimane naturale, con questi processi.

4.1.2.2 Processi sedimentari

L'alterazione e l'erosione producono sedimenti, che vengono disgregati durante il trasporto. I frammenti di roccia si arrotondano. I minerali meno stabili si rompono, di solito in minerali argillosi, mentre i minerali più stabili, come il quarzo, diventano detrito di fondo. In condizioni più tranquille, frammenti di roccia, quarzo, argilla e altri minerali si depositano e i sedimenti si accumulano. Le sabbie e i fanghi calcarei, formati da minerali di carbonato di calcio, si depositano solitamente nei mari caldi e poco profondi delle aree tropicali e subtropicali e possono in seguito essere litificati in calcare.

Durante la loro deposizione, i sedimenti formano una serie di strutture sedimentarie che testimoniano il modo in cui si sono depositati, come illustrato nella Tabella 4.14.

Tabella 4.14. Importanti strutture sedimentarie

Struttura sedimentaria	Descrizione	Immagine	Fonte
Strati orizzontali	Di solito i sedimenti non si depositano in modo costante, ma spesso ogni strato si deposita in fretta, con tempi più tranquilli o addirittura con l'erosione nel mezzo. Gli strati dei sedimenti a grana media e grossolana sono chiamati **letti**; le rocce sono in strati orizzontali		Arenarie e siltiti in orizzonti piani Quebrada das Conchas, Salta, Argentina
Laminazione	Anche i fanghi sono spesso stratificati, ma si tratta di strati molto più sottili, chiamati **laminazioni.**		Argillite laminata, Hesselberg, Germania; Giurassico inferiore
Stratificazione incrociata	La stratificazione incrociata si forma quando la sabbia si deposita in dune. La sabbia e trasportata lungo un lato della duna e scivola nella parte anteriore creando strati incrociati, inclinati verso il basso. Dune formate dall'acqua di solito creano strati di spessore inferiore a 1 metro, mentre il vento ne può formare di spessi diversi metri.		Arenaria in strati incrociati F.ne Cala del Vino, Triassico, Sardegna
Ripple marks asimmetrici	Le correnti d'acqua sulla sabbia creano increspature asimmetriche., dette ripple marks. L'acqua risale il lato meno profondo e deposita la sabbia sul lato più ripido delle increspature. Le increspature possono essere lobate o rettilinee, quelle create dal vento sono solitamente rettilinee.		Campil Member of the Werfen Formation, Veneto
Ripple marks simmetrici	I ripple marks simmetrici si formano in acque poco profonde per l'azione delle onde. I ripple marks hanno pendenze uguali su entrambi i lati e di solito formano linee rette parallele. Le creste delle onde che formano i ripple marks sono parallele ad esse e spesso sono anche parallele alla costa.		sabbie fluviali a ripples, Fiume Adige, Veneto

Struttura sedimentaria	Descrizione	Immagine	Fonte
Stratificazione gradata	Quando una corrente che trasporta sedimenti di dimensioni miste rallenta, le particelle più grandi si depositano per prime e poi grani sempre più fini si depositano sopra, formando un unico letto di sedimenti che va da grossolano, in basso, a fine, in alto; la stratificazione gradata può essere usato per dimostrare che una sequenza di sedimenti non è stata ribaltata da una piega		Bedding graduato – grani dell'eocene in un muro di un giardino vicino a Besalú in Catalogna, Spagna
Crepe da disseccamento (mudcracks)	Quando il fango si secca, si crepa in forme poligonali; se le crepe vengono successivamente riempite dalla sabbia, spesso si conservano. Queste crepe da disseccamento mostrano che il fango deve essersi seccato; quindi, non può essere un fango di profondità.		Fratture da disseccamento ansa del fiume Arno, Toscana

Se i sedimenti sono depositati in regioni in subsidenza, possono diventare sequenze sedimentarie spesse. Dopo il seppellimento, i sedimenti fini si compattano e quelli più grossolani vengono compressi e cementati in rocce sedimentarie.

Molto più tardi, il movimento tettonico delle placche può sollevare la sequenza di rocce sedimentarie. Quando le rocce sedimentarie sollevate vengono erose, i sedimenti tornano a far parte del ciclo sedimentario. Il ciclo sedimentario è una parte del ciclo delle rocce.

4.1.2.3 Processi ignei

Quando le rocce diventano sufficientemente calde, fondono. Poiché le rocce sono di solito una miscela di minerali, spesso la fusione non è completa ma solo parziale, con i minerali a più basso punto di fusione che si fondono per primi. Se il magma prodotto dalla **fusione parziale** continua a fluire, ha una composizione chimica diversa dalla roccia originale, perché i minerali a più alto punto di fusione vengono separati. I processi di fusione parziale producono quindi una gamma di magmi diversi con composizioni diverse.

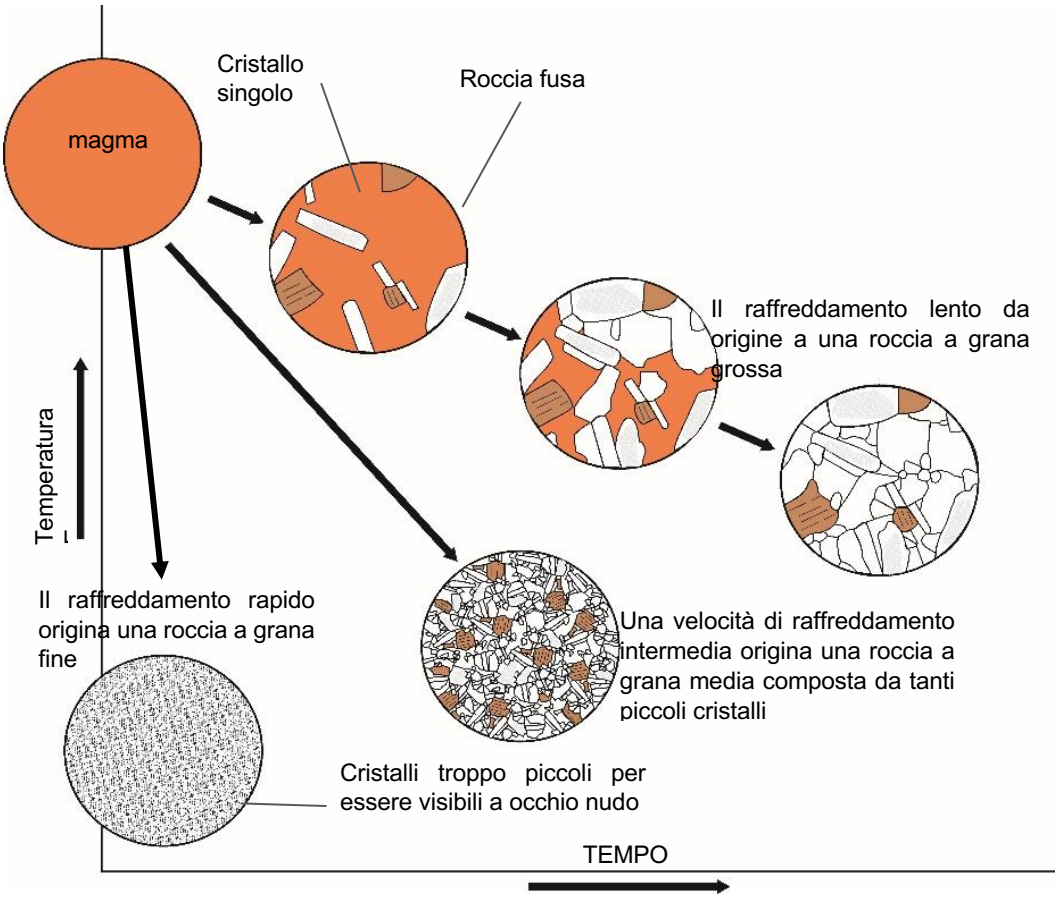
I fusi ricchi di ferro e magnesio si formano dai minerali con i punti di fusione più alti e quindi cristallizzano a temperature elevate, di solito ben oltre i 1000°C. I fusi ricchi di silicio, invece, hanno minerali con punti di fusione più bassi e quindi cristallizzano a temperature più basse, di solito inferiori a 1000°C. Ciò influisce sulla fluidità dei fusi (la loro viscosità) e sui processi ignei che si verificano. Il magma fuso si forma nelle profondità del sottosuolo e, essendo più caldo e meno denso della roccia circostante, risale.

La temperatura di fusione delle rocce non dipende solo dai punti di fusione dei singoli minerali, ma anche dalla quantità di acqua presente e dalla pressione delle rocce sovrastanti. Le rocce fondono a temperature più basse quando sono

"bagnate" e quando la pressione è ridotta. I processi ignei sono attivi sia nelle aree oceaniche che in quelle continentali, ma i magmi, le pressioni, il contenuto d'acqua e altri fattori differiscono e quindi anche i corpi ignei prodotti sono diversi.

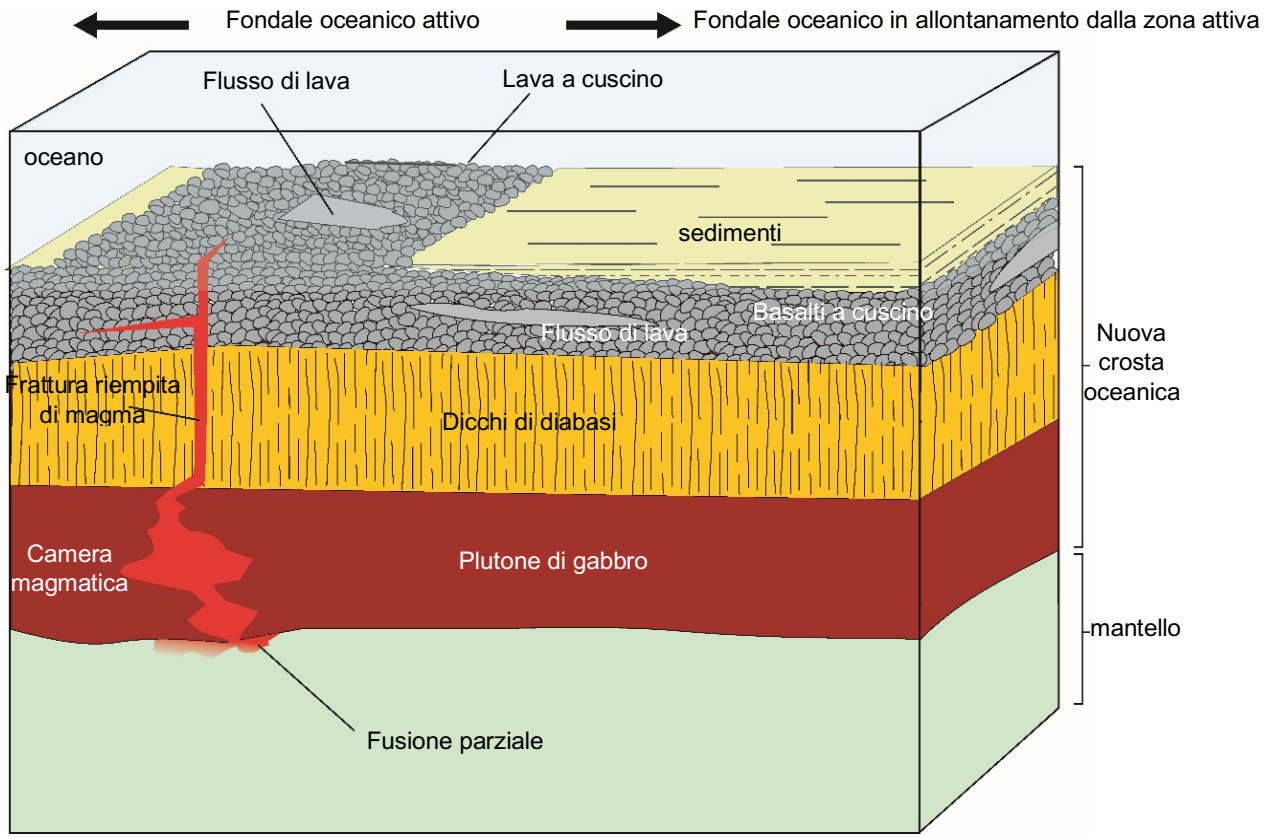
I magmi in risalita possono fermarsi in profondità, raffreddarsi e cristallizzare in **camere magmatiche**. Il magma ha tutto il tempo di raffreddarsi e di far crescere i cristalli nella massa fusa in raffreddamento. Il risultato è una roccia ignea a grana grossa. Se il magma risale più in alto, diventa più freddo e quindi cristallizza più rapidamente, formando una roccia a grana media. Se sale in superficie, viene eruttato dall'attività vulcanica. Le lave così formate si raffreddano molto rapidamente e diventano rocce ignee a grana fine (Figura 4.5).

Figura 4.5. Il raffreddamento e la cristallizzazione delle rocce ignee



Sotto gli oceani, dove le placche tettoniche si allontanano, il mantello solido sottostante è molto caldo e quindi scorre molto lentamente verso l'alto. Nel fluire verso l'alto, la pressione si riduce e quindi il mantello, molto ricco di ferro/magnesio, fonde parzialmente in magmi a loro volta ricchi di ferro/magnesio. Durante la risalita alcuni si raffreddano lentamente in camere magmatiche formando plutoni di gabbro a grana grossa alla base della crosta oceanica di nuova formazione. I magmi più ricchi in ferro/magnesio sono molto fluidi (bassa viscosità) e quindi alcuni continuano a risalire lungo le fratture. In questo caso si raffreddano più rapidamente in diabasi a grana media, sotto forma di dicchi. Altri magmi risalgono verso il fondo dell'oceano e fuoriescono come lave, di solito a forma di cuscino (pillow lava). Questi fenomeni generalmente producono una nuova crosta oceanica composta da rocce ignee ricche di ferro/magnesio, con gabbro grossolano alla base, strati verticali di diabasi a grana media al di sopra, e strati di basalto a cuscini a grana fine in superficie (Figura 4.6).

Figura 4.6. Corpi ignei negli oceani



Sotto i continenti, nelle aree in cui le placche tettoniche convergono, le rocce si riscaldano. L'acqua presente nelle rocce ne abbassa il punto di fusione, provocandone la parziale fusione. I magmi che si formano dipendono da quali rocce portano a fusione, per cui è possibile una vasta gamma di composizioni chimiche dei magmi. Alcuni magmi sono ricchi di ferro/magnesio, altri sono intermedi tra ferro/magnesio e ricchi di silicio; i magmi più comuni sono ricchi di silicio.

I magmi ricchi di silicio sono molto viscosi (poco fluidi) e quindi per lo più non raggiungono la superficie, ma cristallizzano lentamente in camere magmatiche sotterranee come graniti a grana grossa. Se raggiungono la superficie, essendo viscosi, eruttano per lo più in modo esplosivo, producendo ceneri vulcaniche diffuse. Anche i magmi intermedi eruttano in modo esplosivo, ma fuoriescono dai vulcani come lave, per raffreddarsi come andesiti a grana fine. I magmi ricchi di ferro e magnesio eruttano solitamente come basalti. I condotti che collegano i vulcani con le loro camere magmatiche di alimentazione sono chiamati **camini vulcanici**, che a volte sono esposti in superficie dopo l'erosione come **tappi vulcanici**.

Tra le camere magmatiche profonde e i vulcani di superficie, i magmi possono essere iniettati nelle rocce circostanti. Se tagliano gli strati rocciosi, sono **dicchi**; se seguono gli strati, sono **filoni-strato**. Le camere magmatiche sotterranee che si sono cristallizzate sono di solito a forma di bolla e sono chiamate **plutoni,** se sono piccole e **batoliti,** se sono grandi (Figura 4.7). Batoliti, plutoni, i dicchi e filoni-strato fanno parte delle **rocce ignee intrusive**, perché il magma si è intruso nel basamento circostante. Quelle in superficie sono rocce ignee effusive, poiché sono state estruse in superficie. Le diverse caratteristiche prodotte da questi processi sono riportate nella Tabella 4.15.

Figura 4.7. Corpi ignei sui continenti

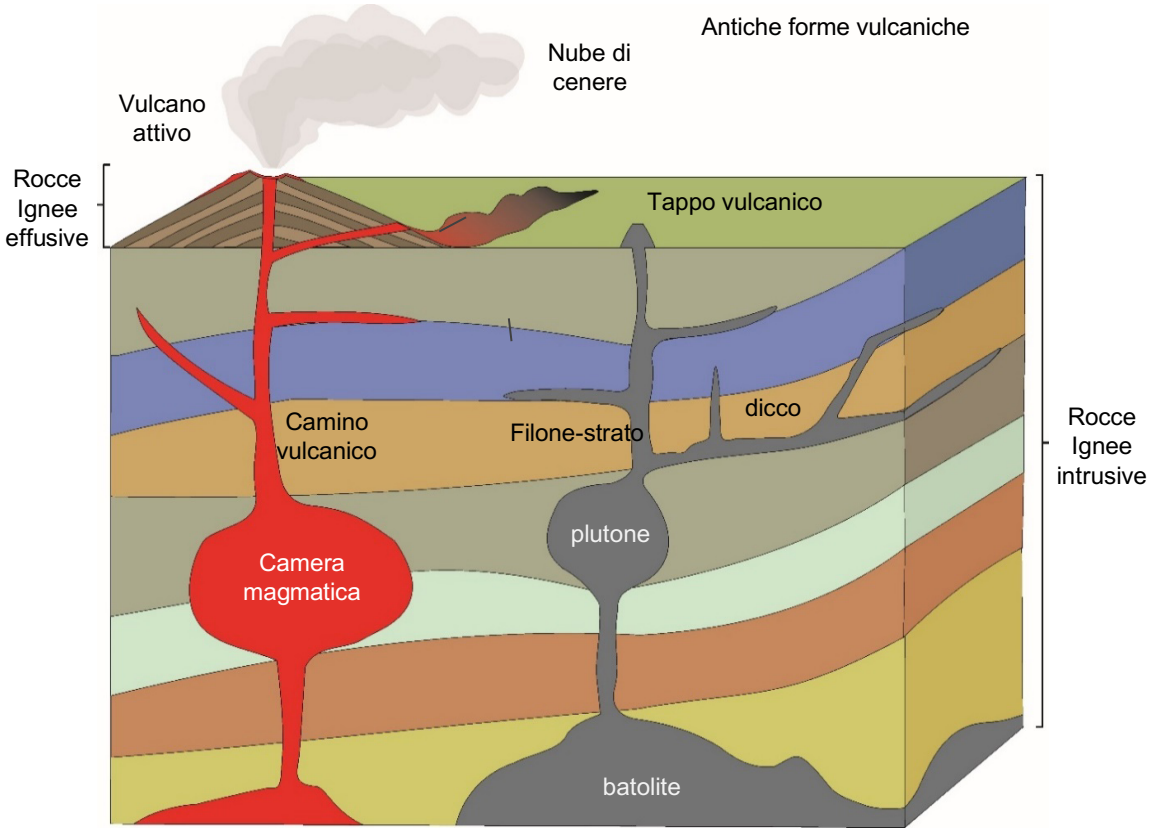
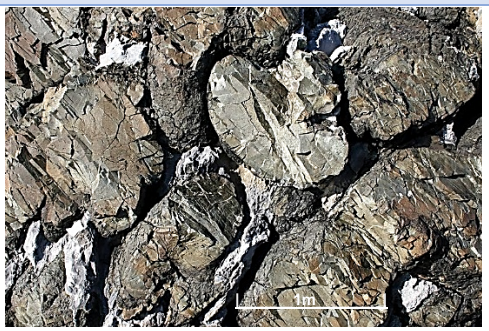
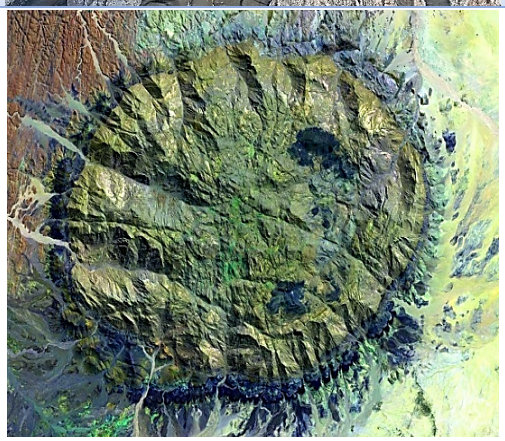


Tabella 4.15. Importanti caratteristiche ignee

struttura ignea	Descrizione	Immagine	Fonte
Cuscino di lava recente	Quando i basalti fluidi vengono eruttati (effusi) in acqua, come sul fondo dell'oceano, piccole lingue di magma fuoriescono e le parti esterne diventano solide; durante questo processo il materiale esterno già solidificato agisce come un sacco che si riempie di lava creando forme simili a cuscini.		Lave a cuscino sul fondo dell'oceano fotografate durante la Galapagos Rift Expedition nel Pacifico occidentale, 2002.
Cuscino di lava antico	Quando i cuscini antichi si rompono a metà, è spesso visibile il basalto a grana più fine dei margini. Poiché i cuscini più tardivi sprofondano tra quelli precedenti ancora in formazione, queste strutture possono essere utilizzate per capire se una sequenza è stata capovolta (invertita).		Basalti a cuscino invertiti dell'Ordoviciano Crozon, Bretagna, Francia

struttura ignea	Descrizione		Immagine	Fonte
Filoni-strato	I magmi che si intrudono lungo gli strati sedimentari o vulcanici (piani di letto) si raffreddano e cristallizzano, formando filoni-strato.	La maggior parte dei filoni-strato e dei dicchi sono a grana media e alcuni hanno margini a grana più fine. Alcuni metamorfosano le rocce che intrudono, dando origine a margini alterati dal calore.		Filone-strato di roccia Kilt, Skye, Regno Unito; gli strati sovrastanti sono stati erosi
Dicco	I dicchi si formano quando i magmi riempiono le fratture delle rocce e poi si raffreddano e cristallizzano.			Dicchi precambriani di diabase scura (1100 Ma), che tagliano rocce più chiare di 1800 Ma, Isole Koster, Svezia
Plutone/ batolite	Le batoliti sono grandi camere magmatiche, i plutoni sono più piccoli. Quando il magma si raffredda lentamente, si formava rocce ignee a grana grossa come il granito o il gabbro. Di solito hanno "cotto" la roccia circostante, formando un'aureola metamorfica.			Immagine satellitare dell' intrusione granitica del Massiccio di Brandberg, largo 30 km, in Namibia, che ha cotto le rocce circostanti in un'aureola metamorfica scura.

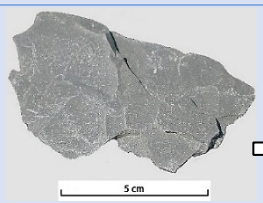
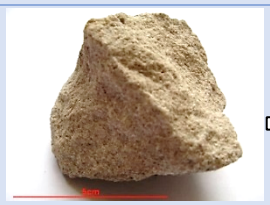
I processi ignei fanno parte del ciclo delle rocce, la parte del ciclo delle rocce guidata dall'energia della Terra. Sappiamo come funzionano i processi ignei da molti anni, ma le loro cause sono state comprese solo di recente, grazie alla teoria della tettonica a placche, come illustrato nella Tabella 4.21.

4.1.2.4 Processi metamorfici

Le rocce subiscono metamorfosi quando le placche tettoniche si scontrano dando luogo a episodi di orogenesi, con forti aumenti di temperatura e pressione nel sottosuolo; questo processo è chiamato **metamorfismo regionale**. Le rocce possono anche essere metamorfosate attraverso la cottura parte di magmi caldi vicini, in questo caso di verifica il **metamorfismo termico**. In entrambi i casi, le rocce sedimentarie, ignee o metamorfiche originali si ricristallizzano allo stato solido in rocce metamorfiche. Tuttavia, se le rocce si riscaldano a tal punto da fondersi completamente, il cambiamento va oltre il metamorfismo, diventando un processo igneo.

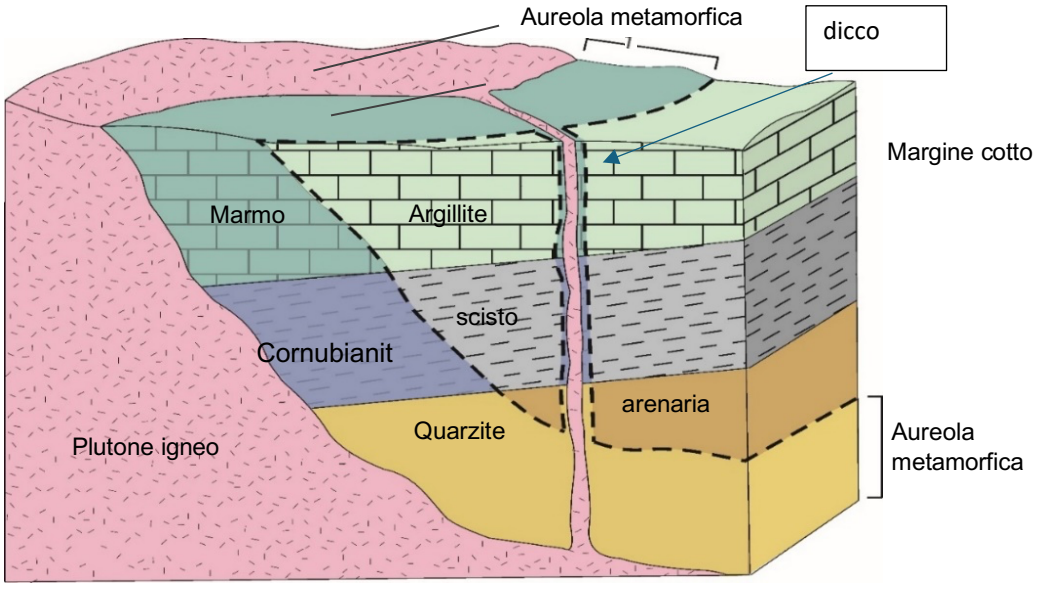
Il metamorfismo regionale, causato dalla collisione delle placche, produce rocce che vanno dalle ardesie di basso grado di metamorfismo agli gneiss di alto grado, insieme a marmi e quarziti, come mostrato nella Tabella 4.16. Queste rocce resistenti sono solitamente impermeabili e tendono a formare forme più elevate e paesaggi piuttosto aspri.

Tabella 4.16. Rocce metamorfiche formate dal metamorfismo regionale

Roccia originale	Basso grado	Grado medio	Alto grado
 Argillite	 Ardesia	 Scisto	 Gneiss
 Granito			
 Arenaria		 Quarzite	
 Calcare		 Marmo	

L'entità del metamorfismo termico causato dal calore del magma dipende dalle dimensioni del corpo magmatico. I corpi piccoli si limitano a cuocere la roccia circostante producendo sottili **margini cotti**. I corpi più grandi contengono molta più energia termica e producono ampie zone cotte chiamate **aureole metamorfiche**, dove le rocce a grana fine si trasformano in cornubianite, le arenarie in quarziti e i calcari in marmi (Figura 4.8 e Tabella 4.16).

Figura 4.8. Effetti del metamorfismo termico



Le cause del processo di metamorfismo del ciclo delle rocce sono state spiegate dalla teoria della tettonica delle placche (Tabella 4.21).

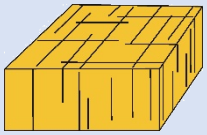
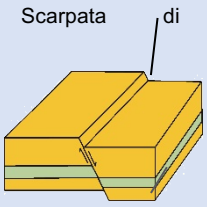
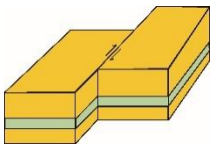
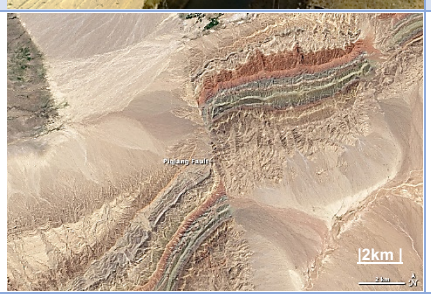
4.1.2.5 Processi di deformazione

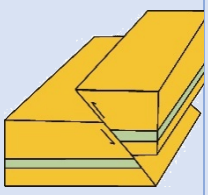
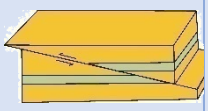
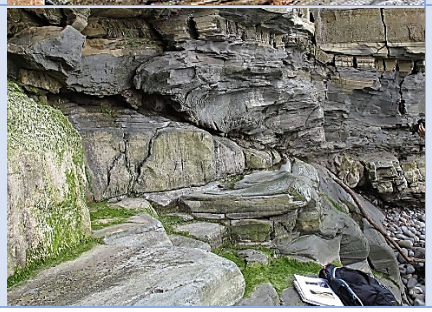
Quando le placche si scontrano nelle orogenesi, non solo le rocce possono essere metamorfosate, ma possono anche essere deformate in modi diversi. A profondità inferiori a circa 10 km, le pressioni e le temperature sono così intense che la maggior parte delle rocce si piega e inizia a fluire formando **pieghe**. A livelli più alti, dove le pressioni laterali sono ancora enormi, le rocce tendono a rompersi piuttosto che a piegarsi. Quindi, vicino alla superficie, le rocce hanno un comportamento fragile e si fratturano, mentre a profondità maggiori si comportano plasticamente, piegandosi e deformandosi.
Le rocce si deformano anche quando le placche si allontanano o si accostano l'una all'altra ma, poiché le temperature sono relativamente basse, di solito tendono a fratturarsi anziché comportarsi plasticamente.

Quando le rocce si fratturano, se non c'è movimento delle rocce su nessuno dei lati, si forma un **giunto**. Se invece le rocce su entrambi i lati si muovono, si forma una **faglia**. Molti giunti sono il risultato di rocce che vengono fratturate, in tensione. La tensione, quando le rocce vengono fratturate, può formare anche delle **faglie normali**, quando un fianco scivola verso il basso rispetto all'altro.

Quando le rocce scivolano lateralmente l'una rispetto all'altra, si formano **faglie trascorrenti**, di solito con facce quasi verticali.
Quando le rocce vengono compresse, un lato può essere spinto verso l'alto e sopra l'altro in una **faglia inversa** che solitamente ha una superficie di faglia, o **piano di faglia**, di circa 45°. In caso di compressione molto intensa, i piani di faglia hanno di solito angoli inferiori, intorno ai 10°, e sono chiamati **sovrascorrimenti**. (Tabella 4.17).

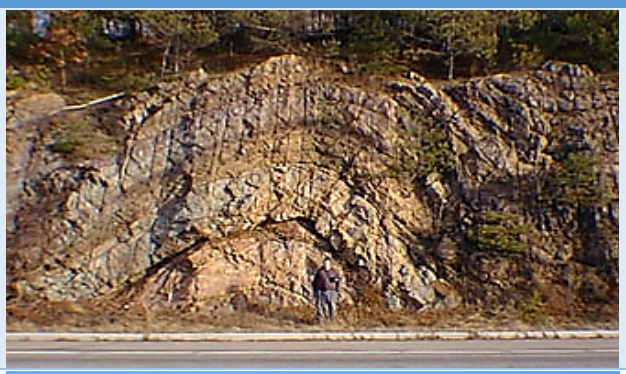
Tabella 4.17. Fratture causate da fratture fragili - giunti e faglie

Struttura	Stress	Descrizione	Disegno	Immagine	Fonte
Sistema di giunti	Tensione orizzontale	Insieme di piani paralleli che attraversano la roccia senza alcun movimento relativo, spesso verticali, a volte orizzontali o con altre angolazioni.			Letto di siltite articolato in scisti dell' Ordoviciano, Fort Plain, New York, USA
Faglia normale		A causa della tensione, un blocco è scivolato rispetto all'altro lungo il piano di faglia– solitamente è piuttosto ripido, 60° o più.			Faglia normale nelle pareti del Canale di Corinto, Grecia
Faglia a trascorrente	Scorrimento verticale	I blocchi sono scivolati lateralmente l'uno rispetto all'altro, di solito su un piano di faglia quasi verticale.			Vista satellitare della faglia di Piquiang, China, Tian Shan Mountains

Struttura	Stress	Descrizione	Disegno	Immagine	Fonte
Faglia inversa	Compressione orizzontale	Sotto pressione un blocco è spinto verso l'alto rispetto a un altro – piani di faglia di oltre 45°			Faglia inversa in arenaria, Oregon, USA
Sovrascorrimento		Sotto pressione intensa, un blocco viene spinto su un altro - piano di faglia < 45°, spesso intorno a 10°			Il lato destro viene spinto sul lato sinistro i, Lilstock Bay, UK

Le rocce che si comportano in modo plastico quando vengono compresse formano pieghe. Le pieghe possono avere dimensioni diverse, da pochi millimetri a montagne. Esse si formano in serie, come se mettessimo le mani su un tessuto su una superficie lucida e li facessimo scivolare. Si vedrà una serie di pieghe; Le pieghe verso l'alto sono chiamate **antiformi** (comunemente chiamate anticlinali) e quelle verso il basso sono **sinformi**. (comunemente chiamate sinclinali). Le forme delle pieghe dipendono dal tipo di roccia e dall'entità della compressione, variano da **pieghe aperte** a **pieghe strette**, fino a **pieghe isoclinali** con fianchi paralleli. Le pieghe possono essere angolari o arrotondate. La zona di flessione delle pieghe è la **cerniera**, mentre i lati sono i **fianchi** (Tabella 4.18)

Tabella 4.18. Tipi di pieghe

Tipo di piega	Descrizione	Immagine	Fonte
Antiforme	Piega antiforme, piega aperta con una cerniera arrotondata		Antiforme in gneiss precambriano NJ Route 23 vicino a Butley, New Jersey, USA – persona per riferimento in scala
Sinforme	Sinforme ribassata - una piega aperta con una cerniera fortemente angolata		Sinforme nelle arenarie della Formazione Barstow, Neogene, San Bernardino County, California, USA

Tipo di piega	Descrizione		Immagine	Fonte
Piega aperta	Pieghe aperte, con un angolo tra i fianchi superiore a 45°, con cerniere arrotondate			Letti piegati di calcare nel Glasen-bachklamm Gorge, Austria
Piega stretta	Le pieghe strette hanno un angolo inferiore a 45°	Pieghe strette con cerniere angolari		Pieghe strette a Ágios Pávlos nel sud di Creta
		Pieghe strette con cerniere arrotondate		Formazione a bande di ferro, Banded Iron Formation piegata precambriano 2,6 miliardi di anni, vicino a Soudan, Minnesota, USA
Pieghe isoclinali	Pieghe con fianchi paralleli			Piccole pieghe isoclinali presso la Vetta di Cima Bianca Valtournenche Italia,

La teoria della tettonica a placche è ora in grado di spiegare molte delle cause alla base della deformazione della Terra, come illustrato nella Tabella 4.21.

4.1.3 Struttura della Terra e prove

Conosciamo le rocce presenti nella parte più superficiale della Terra, sui continenti, perché possiamo vederle naturalmente esposte in scogliere marine e in zone montuose; possiamo anche vedere le rocce che affiorano nelle incisioni stradali, ferroviarie e nelle cave. Sappiamo come sono le rocce nelle profondità della Terra grazie alle miniere e ai carotaggi che vanno da metri a chilometri di profondità. Possiamo sapere anche come sono le rocce dei fondali oceanici, grazie al programma di sondaggi delle profondità marine (Deep-Sea Drilling Programm). Dobbiamo, però, usare altri tipi di prove per scoprire com'è la Terra al di sotto della profondità dei pozzi di trivellazione.

Box 4.5. Il pozzo più profondo della Terra



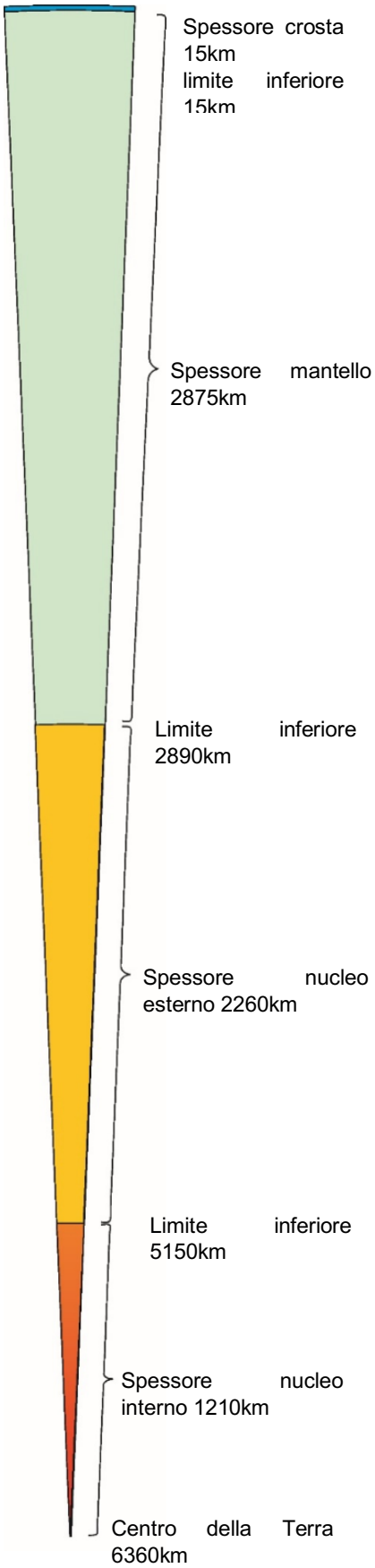
Il pozzo più profondo mai scavato finora sulla Terra è il pozzo di Kola (Kola Superdeep Borehole), profondo 12,3 km. È stato perforato nell'estremo nord-ovest della Russia, per oltre 20 anni, terminando nel 1992. Il pozzo ha perforato circa un terzo della crosta continentale, per lo più attraverso graniti e gneiss precambriani. Una delle sorprese è stata che la roccia era ancora satura d'acqua in profondità.

4.1.3.1 Prove

La migliore prova che abbiamo di come sia la Terra sotto i nostri piedi, al di sotto della profondità dei pozzi, sono i dati sismici dei terremoti. Ogni volta che si verifica un terremoto di forte intensità, le onde d'urto attraversano la Terra mentre l'intero pianeta vibra. Esse sii irradiano attraverso la Terra come le onde di un lago dopo avervi gettato un sasso. La velocità delle onde dipende dal materiale che viene attraversato e questo ci aiuta a capire dove sono i confini tra i diversi tipi di roccia e che rocce sono.

Abbiamo anche altri indizi sulla composizione degli strati della Terra, come descritto nelle sezioni seguenti, ma le onde sismiche ci hanno fornito la maggior parte delle informazioni, come mostrato nella Figura 4.9.

Figura 4.9. Sezione trasversale della Terra

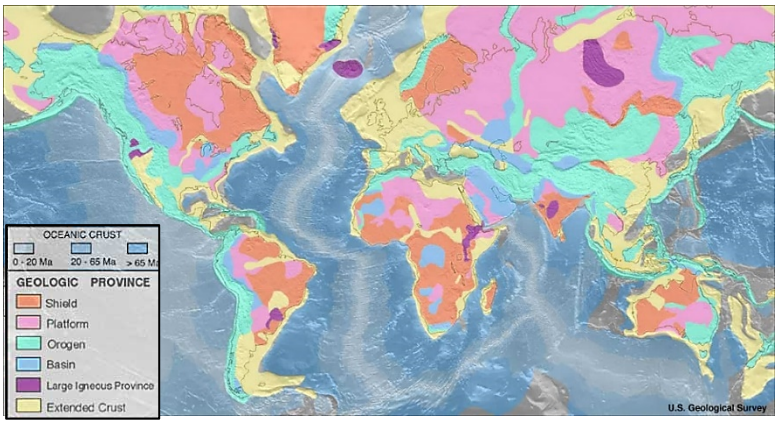


4.1.3.2 Crosta

La figura 4.9 evidenzia che la crosta è molto sottile rispetto alla distanza dal centro della Terra. Si potrebbe confrontare lo spessore della crosta a quello di un francobollo incollato su un pallone da calcio. Esistono due tipi di crosta: la crosta continentale, in corrispondenza di continenti e piattaforme continentali, e la crosta oceanica, sotto gli oceani.

La carta geologica della Figura 4.10 mostra che la crosta dei continenti è molto più complessa di quella degli oceani. Questo perché la crosta continentale è generalmente molto più antica di quella oceanica e alcune aree sono state coinvolte più volte nel ciclo della roccia. Le rocce più antiche finora trovate sulla Terra hanno più di 4 miliardi di anni e si trovano in Australia. Le parti più antiche della crosta oceanica, invece, hanno raramente più di 200 milioni di anni e hanno una storia molto più semplice.

Figura 4.10. La geologia della crosta terrestre



La crosta continentale su cui viviamo ha uno spessore che varia da circa 25 a 70 km. Sebbene le rocce sedimentarie rappresentino solo il 5% circa del volume dell'intera crosta, coprono il 75% della superficie crostale continentale, circa tre quarti dell'area colorata della Figura 4.10. Le stime indicano che queste rocce sedimentarie continentali sono costituite per il 79% da argilliti, per il 13% da arenarie e per l'8% da calcari. La maggior parte del volume della crosta continentale è formata da rocce ignee come il granito e metamorfiche come lo gneiss (Figura 4.11). Queste rocce si sono formate attraverso i normali processi del ciclo litogenetico, anche se alcuni dei materiali in esse contenuti sono stati interessati da diversi cicli di formazione delle rocce.

Le prove della struttura e delle rocce della crosta oceanica includono dati sismici, dati provenienti da sondaggi in acque oceaniche profonde e informazioni provenienti da luoghi come Cipro, dove la collisione di placche ha spinto la vecchia crosta oceanica sul continente. Queste prove mostrano che la crosta oceanica ha quattro strati principali. Sopra c'è uno strato di sedimenti marini profondi che non si trovano sulle dorsali oceaniche, ma che diventano sempre più spessi allontanandosi dalle dorsali. Sotto i sedimenti si trova uno strato di basalto a grana fine, spesso sottoforma di lava a cuscino. Il basalto sovrasta uno strato costituito da numerosi filoni verticali di dicchi di diabase a grana media. Sotto di esso si trova uno spesso strato di gabbro a grana grossa, prima di raggiungere il fondo della crosta oceanica e la parte superiore del mantello (Tabella 4.19).

Figura 4.11. Le rocce più comuni della crosta continentale

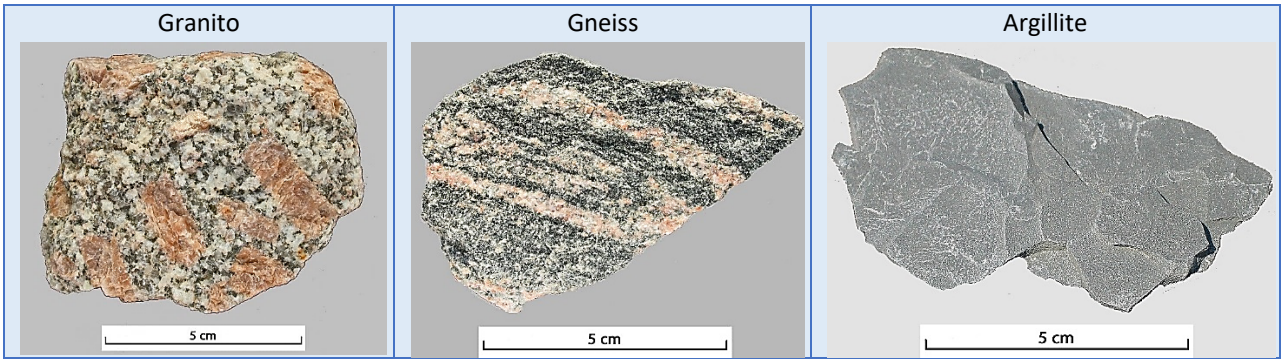
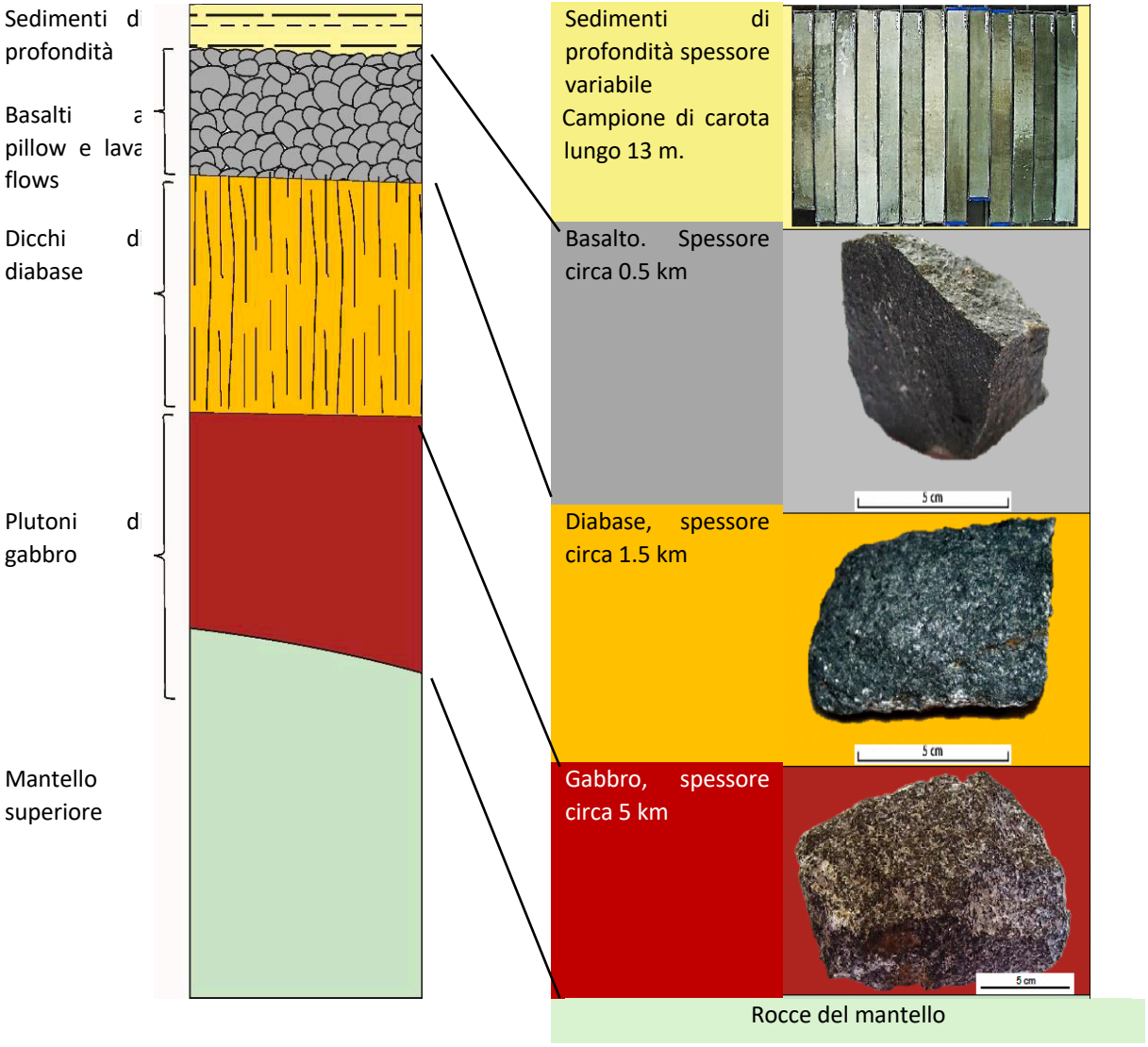


Tabella 4.19. Rocce della crosta oceanica



Le prove mostrano come si forma nuova crosta oceanica in corrispondenza dei margini divergenti delle placche. Il magma proveniente da una fusione parziale e locale del mantello risale in corrispondenza delle dorsali oceaniche. Lì si raccoglie e si solidifica sotto la superficie, formando gabbro a grana grossa. Se risale in superficie attraverso fratture verticali, erutta come lava sul fondo dell'oceano, spesso con le caratteristiche forme di lava a cuscino, e si solidifica rapidamente in basalto a grana fine. Nel frattempo, il magma nelle fratture verticali si solidifica più lentamente in diabase a grana media. Ogni volta che una frattura si apre, si forma un nuovo dicco, producendo sempre più dicchi di diabase.

Box 4.6 Formazione sottomarina di lave a cuscino

Quando la lava basaltica viene eruttata sott'acqua, assume una "forma a cuscino". Appaiono roventi lingue di lava arancione la cui superficie esterna si raffredda rapidamente nell'acqua creando un rivestimento solido, ma flessibile. Man mano viene eruttata altra lava, la roccia appena formata assume una forma di cuscino. I cuscini che si formano successivamente, si comprimono verso l'alto e assumono la forma dei cuscini che si sono formati precedentemente. Poiché questo processo avviene solo in presenza di acqua i cuscini antichi conservati nelle sequenze rocciose dimostrano che devono essersi formati sott'acqua. Filmare la formazione dei cuscini di lava può essere molto pericoloso perché il mare circostante contiene zone invisibili di acqua bollente



Una lingua di lava sottomarina | Cuscini sul fondale vicino alle Hawaii | Antiche lave a cuscino, sezione trasversale

La crosta oceanica a tre strati appena formata viene lentamente allontanata dal margine divergente della placca a causa del movimento delle placche. Dall'oceano sovrastante precipita fango a grana fine (spesso gusci ricchi di calcare di plancton microscopico) e si deposita sopra i cuscini. Più la placca si sposta, più questa coltre di sedimenti diventa spessa, fino a raggiungere 1 km o più di spessore vicino ai bordi degli oceani.

Ai margini degli oceani, la crosta oceanica viene spesso riportata all'interno del mantello, attraverso la subduzione. Questo spiega perché la crosta oceanica di solito non ha più di 200 milioni di anni e perché, quanto più la crosta oceanica è lontana dal margine di placca divergente, tanto più diventa vecchia, come mostrato nella Figura 4.10.

La densità media della crosta oceanica, come dimostrano la velocità delle onde sismiche e le misure dei campioni di roccia, è maggiore della densità media della crosta continentale. Il mantello è alla base di tutta la crosta e molte osservazioni hanno dimostrato che, pur essendo completamente solido, è in grado di fluire molto lentamente sotto le intense pressioni e temperature in profondità e con grandi quantità di tempo a disposizione (si muove a circa 1 cm all'anno). Quindi, sia la crosta oceanica che quella continentale sono sostenute dal sottostante mantello solido che si muove. Poiché la crosta oceanica è più densa di quella continentale, essa sprofonda a un livello inferiore. Ciò significa che quasi tutta la crosta oceanica si trova al di sotto del livello del mare, mentre la maggior parte della superficie crostale continentale si trova al di sopra del livello del mare. La crosta oceanica è anche più sottile, con uno spessore medio di circa 7 km (Tabella 4.20).

Tabella 4.20. Caratteristiche degli strati della Terra

Strato		Profondità media, km		Spessore medio, km		Stato		Densità media relativa*	
Crosta continentale	**Crosta oceanica**	35	7	35	7	Solido	Solido	2.7	2.9
Mantello		2890		2875		Solido		3.3 – 5.7	
Nucleo esterno		5150		2260		Liquido		9.9 – 12.2	
Nucleo interno		6360 Centro della Terra		1210		Solido		12.6 – 13.0	

* La densità relativa è il rapporto tra la densità di un materiale e la densità dell'acqua e non necessita di unità di misura.

4.1.3.3 Mantello

Il confine tra la crosta e il mantello sottostante è stato scoperto grazie alle misurazioni delle onde sismiche nel 1909. I dati sismici moderni dimostrano che gran parte del mantello solido può fluire nel corso del tempo geologico, spiegando non solo il "galleggiamento" della crosta ma anche il movimento delle placche tettoniche della Terra.

Box 4.7. Di cosa è fatto il mantello?

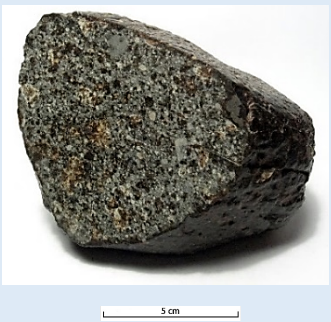
Un tentativo di perforare la crosta oceanica fino al mantello negli anni '60 è fallito, quindi l'unica prova che abbiamo di come potrebbero essere le rocce del mantello è indiretta.



Alcune eruzioni vulcaniche contengono frammenti di altre rocce che si pensa siano state portate in superficie dal mantello sottostante.



In alcune zone di collisione dove si è avuta formazione di montagne i, le rocce del mantello sembrano essere state spinte sul continente, con antiche rocce della crosta oceanica al di sopra.



Si pensa che alcune meteoriti pietrose provengano dai mantelli di piccoli pianeti che si sono disintegrati in passato

Sulla base di questa e di altre prove, si ritiene che il mantello sia costituito da peridotite e rocce simili. La peridotite è una roccia molto densa formata principalmente dai minerali olivina verde e pirosseno di colore scuro.

4.1.3.4 Nucleo

La densità relativa dell'intera Terra è di circa 5,5, ma la densità delle parti esterne della Terra è molto inferiore; pertanto, la Terra deve avere un nucleo molto più denso. Il limite del nucleo è stato scoperto grazie a studi sismici nel 1914. Ulteriori dati sismici hanno mostrato che la parte esterna del nucleo è liquida (poiché le onde di taglio sismico non la attraversano), mentre la parte interna del nucleo è solida. Si ritiene che le correnti nel nucleo esterno liquido generino il campo magnetico della Terra.

Box 4.8. Di cosa è fatto il nucleo?

Il limite del nucleo si trova a quasi 3000 km sotto la superficie terrestre; perciò, non saremo mai in grado di campionare le rocce del nucleo. Abbiamo quindi bisogno di prove indirette per capire da cosa è probabilmente formato il nucleo. Il ferro ha la giusta densità per essere una roccia del nucleo ed è un materiale comunemente presente nello spazio. Molti meteoriti sono costituiti da una miscela di ferro con un po' di nichel; si pensa che possano provenire da piccoli pianeti che si sono disgregati in un antico passato. Questa miscela di ferro e nichel ha densità e caratteristiche sismiche simili a quelle del nucleo. Si pensa quindi che il nucleo sia costituito da una lega di ferro e nichel. Questa lega è liquida nel nucleo esterno e solida al centro. Recenti ricerche suggeriscono che il nucleo potrebbe contenere anche un po' di silicio.



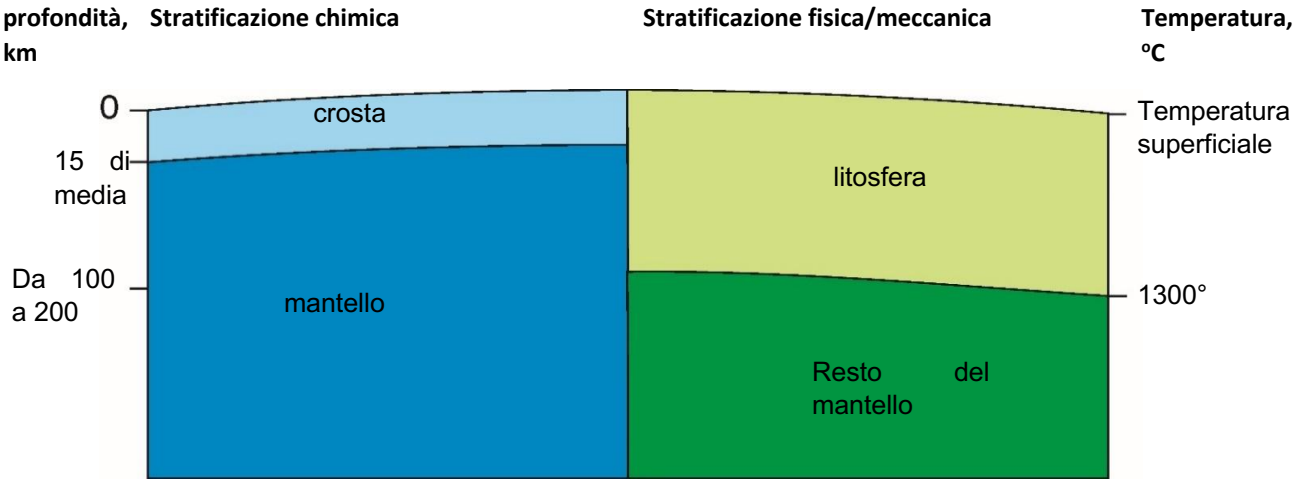
Un meteorite ferroso di 30 cm di diametro dalla Siberia – la parte esterna si è fusa mentre cadeva nell'atmosfera

4.1.3.5 Litosfera

I limiti tra crosta e mantello e tra mantello e nucleo sono segnati da cambiamenti chimici: la crosta è ricca di silicio con un po' di ferro, il mantello contiene molto più ferro e il nucleo è quasi interamente di ferro. Ora sappiamo che esiste un altro importante confine nella Terra, segnato non da cambiamenti chimici ma da cambiamenti meccanici, cambiamenti nel modo in cui le rocce si comportano.

Il confine è la base della litosfera, segnata dalla zona in cui la temperatura della roccia raggiunge circa 1300°C. Le rocce al di sopra di questa zona di temperatura sono solide e rigide, mentre al di sotto sono solide ma in grado di deformarsi e scorrere molto lentamente. La litosfera, solida e rigida, è costituita dalla crosta e dall'estremo mantello superiore e forma le placche terrestri. Queste vengono spostate dai processi di tettonica a placche, mentre il mantello sottostante, più debole, ne consente il movimento. La Figura 4.12 mostra la struttura della Terra esterna con la crosta, la litosfera e il mantello.

Figura 4.12. La parte esterna della Terra



Le placche terrestri sono quindi costituite da litosfera e sono in grado di muoversi sul resto del mantello sottostante che, sebbene solido, può scorrere lentamente. Le proprietà e il movimento delle placche sono descritti dalla teoria della tettonica delle placche.

4.1.4 Tettonica a placche ed evidenze

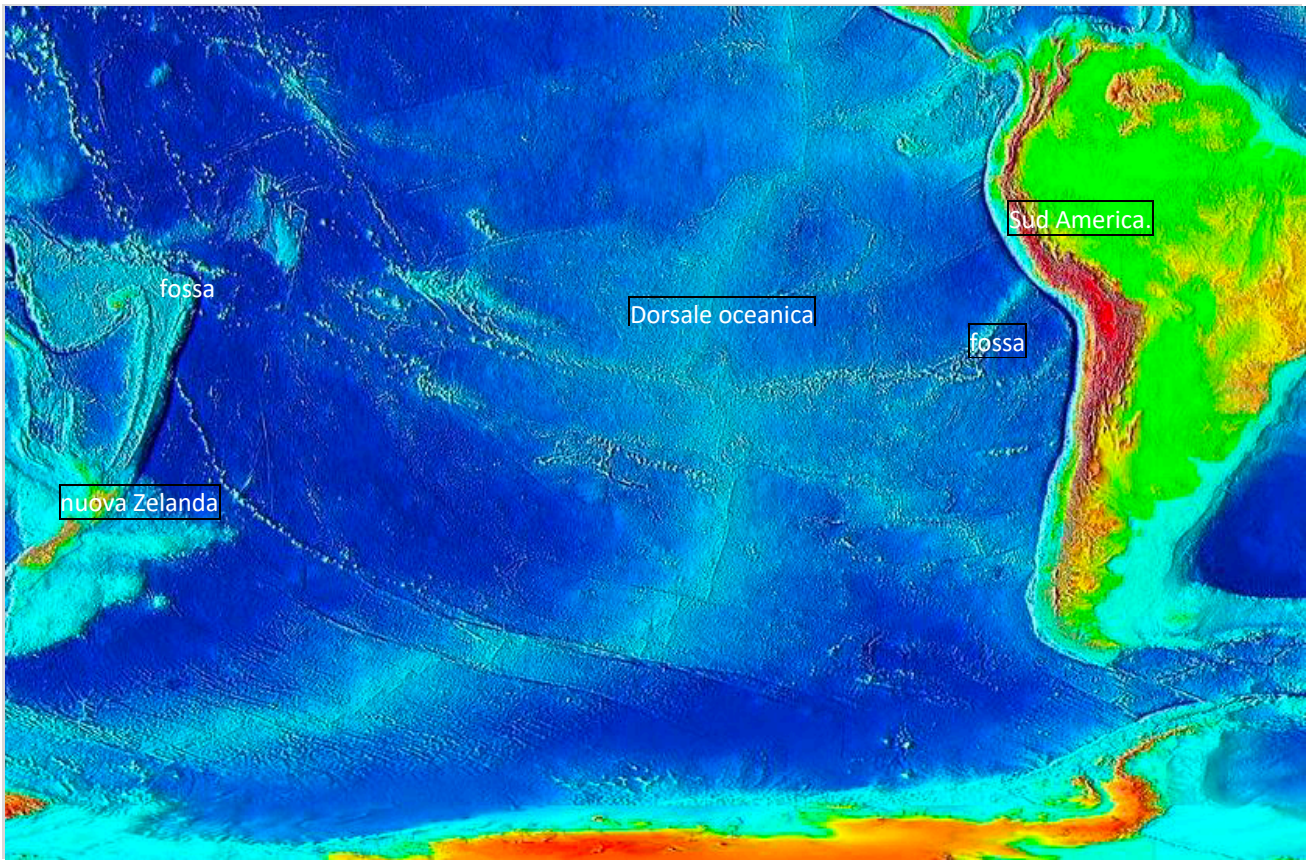
4.1.4.1 Teoria unificante

Quando furono disponibili le prime mappe mondiali sufficientemente accurate, si notò che le coste dell'Africa e del Sud America mostravano una corrispondenza molto stretta. Tuttavia, solo nel 1915 Alfred Wegener pubblicò un libro in cui forniva prove che dimostravano che i due continenti erano un tempo uniti, nella sua teoria della **Deriva dei Continenti**. Il libro, che fu pubblicato in inglese nel 1922, includeva prove non solo per la forma a puzzle dei continenti, ma anche per la corrispondenza geologica e la presenza di fossili su entrambi i lati. Wegener dimostrò anche come la deriva dei continenti potesse spiegare i cambiamenti ambientali registrati nelle rocce continentali, dove depositi glaciali erano spesso seguiti da arenarie desertiche e, successivamente, da rocce di ambienti equatoriali.
Il suo lavoro fu in gran parte ignorato, in parte perché non riusciva a proporre un meccanismo convincente che spiegasse lo spostamento dei continenti. La maggior parte dei geologi dell'epoca pensava che la crosta terrestre potesse muoversi solo verticalmente, non lateralmente. Inoltre, si riteneva che la crosta terrestre fosse troppo sottile per formare continenti in grado di andare alla deriva. Oggi sappiamo che effettivamente la crosta è troppo sottile per formare placche; queste ultime sono infatti costituite dalla litosfera, molto più spessa (Figura 4.12).

Durante la Seconda Guerra Mondiale, negli anni '40, gli scienziati svilupparono due metodi per rilevare i sottomarini che si rivelarono poi fondamentali per la storia della tettonica a placche. Il sonar, che invia onde sonore nell'acqua e riceve quelle che rimbalzano, può rilevare non solo i sottomarini, ma anche il fondale marino e la sua profondità.
Furono anche sviluppati magnetometri per rilevare il magnetismo dei sottomarini, che in seguito vennero utilizzati per rilevare le variazioni magnetiche del fondale oceanico.

Negli anni '50 e '60 il sonar fu utilizzato per mappare i fondali oceanici. Le mappe mostrarono che gli oceani avevano dorsali meno profonde vicino ai centri degli oceani e aree più profonde, chiamate fosse, vicino ai margini oceanici. Alcune dorsali superavano i 1,5 km di altezza, mentre le fosse raggiungevano profondità di oltre 11 km (Figura 4.13). Ciò portò Harry Hess a proporre, nel 1962, la sua ipotesi **dell'Espansione del Fondale Oceanico**. Hess ipotizzò che la nuova crosta oceanica si formasse nelle dorsali situate vicino ai centri degli oceani e venisse spostata lateralmente fino a raggiungere le fosse, dove veniva riassorbita nel mantello. La temperatura giocava un ruolo chiave nella sua teoria. Dove si formava il nuovo materiale, esso era molto caldo e, di conseguenza, a bassa densità, dando origine alle dorsali. Mentre il materiale si allontanava, si raffreddava e sprofondava, fino a quando, nelle fosse, diventava così freddo e denso da poter sprofondare nuovamente nel mantello.

Figura 4.13. Il fondale dell'Oceano Pacifico meridionale; dorsale oceanica vicino al centro e fosse a est e ovest.



Mentre gli scienziati mappavano il fondale oceanico usando il sonar, utilizzavano anche i magnetometri per misurare il magnetismo del fondale oceanico. Scoprirono che il fondale oceanico era magnetico. In alcune aree, il magnetismo era allineato con il magnetismo normale della Terra, dando un segnale magnetico più forte. In altre aree, invece, il magnetismo del fondale era in direzione opposta e annullava parzialmente il magnetismo terrestre normale, producendo un segnale più debole.

Quando questi dati furono rappresentati su una mappa, si osservò un modello su entrambi i lati delle dorsali oceaniche, come quello mostrato nella Figura 4.14. Questa osservazione fu spiegata nel 1963 da Vine e Matthews nel Regno Unito e da Morley in Canada. Essi sapevano già che, quando le rocce contenenti minerali magnetici si raffreddano, diventano magnetizzate nella stessa direzione del campo magnetico presente al momento del raffreddamento. Così, le lave basaltiche che si raffreddano oggi si magnetizzano nella direzione del campo magnetico attuale, con una magnetizzazione nord-sud. Conoscevano anche la teoria secondo cui, sebbene il polo magnetico nord si trovi

attualmente vicino al Polo Nord geografico (e il polo magnetico sud vicino al Polo Sud), il magnetismo si sia invertito più volte nel passato geologico. Ci sono stati periodi, quindi, in cui il polo magnetico nord era vicino al Polo Sud e il polo magnetico sud vicino al Polo Nord.
Questo li aiutò a spiegare che il modello magnetico sul fondale oceanico era formato dai basalti che si erano magnetizzati durante il raffreddamento. Se si raffreddavano quando il campo magnetico terrestre era nella stessa direzione di quello attuale, acquisivano una magnetizzazione nord-sud; se invece si raffreddavano quando il campo era nella direzione opposta, acquisivano una magnetizzazione sud-nord. Le rocce con magnetizzazione nord-sud rafforzano il campo magnetico attuale, dando un'anomalia positiva, detta **polarità magnetica normale. I** basalti con magnetizzazione sud-nord riducono il campo magnetico complessivo, dando un'anomalia negativa, detta **polarità magnetica inversa**, come mostrato nella Figura 4.15.

Figura 4.14. Anomalie magnetiche sulla dorsale Reykjanes a sud-ovest dell'Islanda.

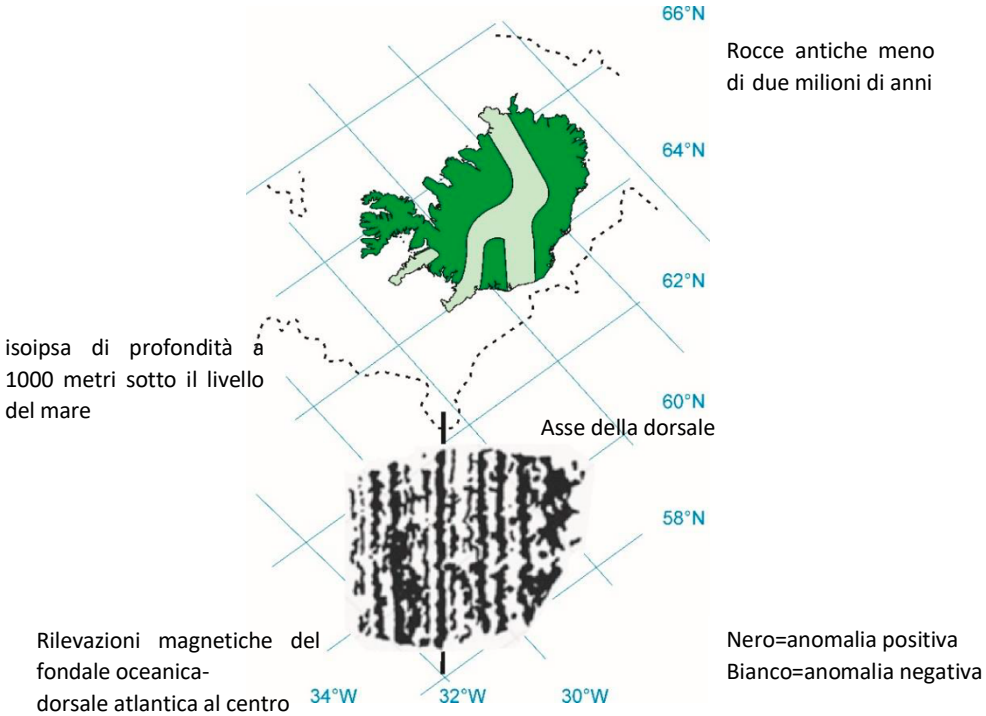
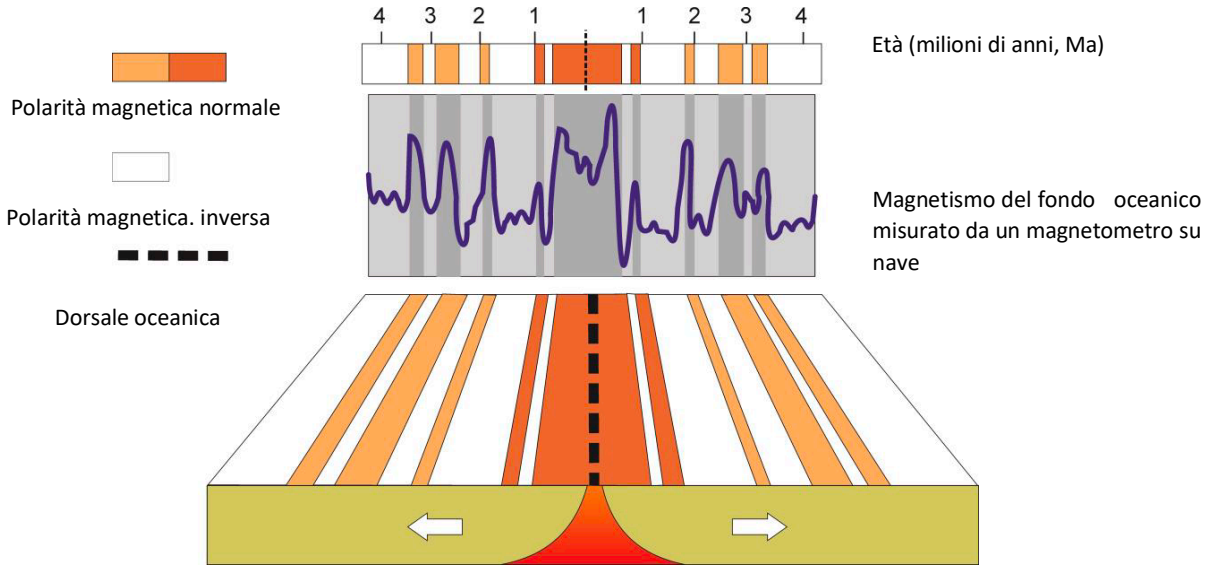


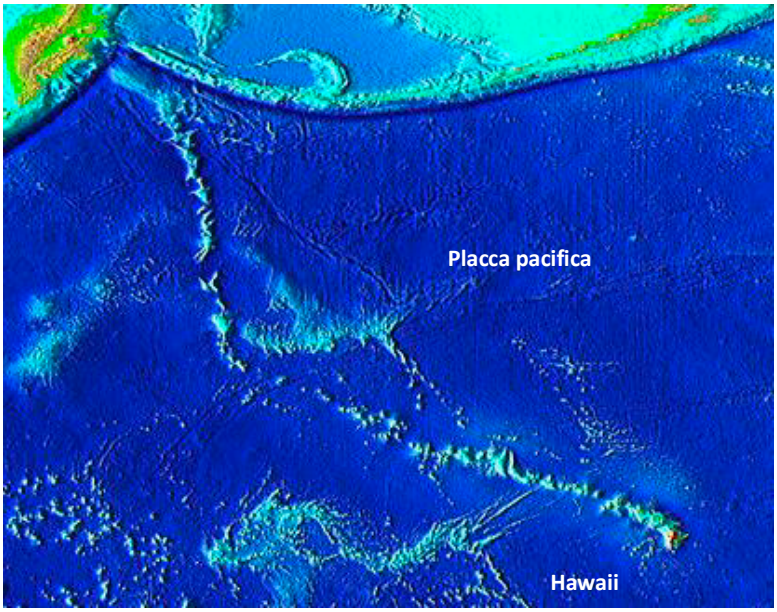
Figura 4.15. La formazione di bande magnetiche nei basalti dei fondali oceanici



Le inversioni dei poli magnetici terrestri non sono regolari: a volte può esserci un lungo intervallo tra un'inversione e l'altra, mentre in altri periodi accadono rapidamente. Questo è il motivo per cui le strisce magnetiche del fondale oceanico hanno larghezze diverse e perché la forma su un lato di una dorsale oceanica è l'immagine speculare di quello sull'altro lato. Le strisce magnetiche fornirono un ottimo supporto all'ipotesi dell'Espansione del Fondale Oceanico di Hess.

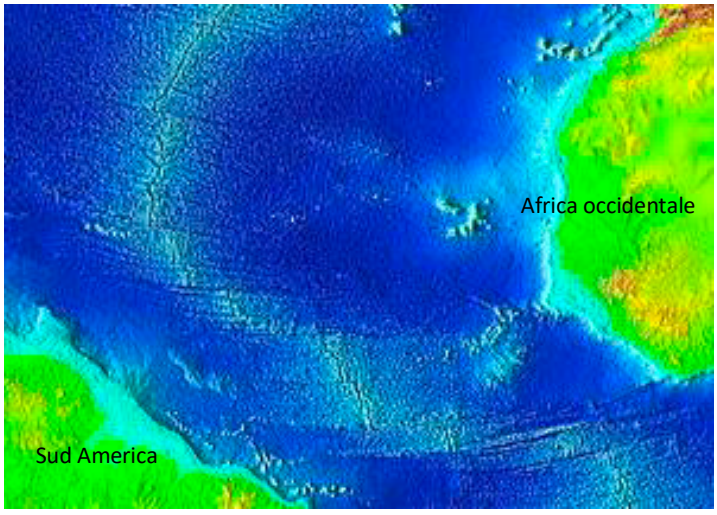
Uno dei problemi con l'idea dell'espansione del fondale era che l'attività vulcanica negli oceani non era concentrata solo nelle dorsali oceaniche, ma si trovava anche in alcune isole vulcaniche lontane dalle dorsali. John Tuzo Wilson spiegò questo fenomeno nel 1963 con la sua teoria dei punti caldi (hotspot). Un pennacchio caldo di roccia risale nel mantello e fonde parzialmente per formare magma basaltico. Questo magma risale attraverso la litosfera fino a eruttare tramite un vulcano. Man mano che la litosfera si muove sopra questo hotspot, si forma una catena di vulcani, come mostrato nella Figura 4.16. Più lontano dall'hotspot vengono portate le isole vulcaniche, più esse risultano antiche.

Figura 4.16. La catena di isole vulcaniche e di vulcani sottomarini legata al punto caldo delle Hawaii nell'Oceano Pacifico. La brusca curva nella catena è collegata a un cambiamento nella direzione di movimento della placca del Pacifico.



Nel 1964 John Tuzo Wilson riconobbe un altro elemento chiave a supporto dell'idea dell'espansione del fondale oceanico. Si rese conto che non solo si formava nuovo fondale oceanico presso le dorsali e veniva riassorbito nel mantello presso le fosse oceaniche, ma anche che le dorsali oceaniche erano dislocate in molti punti da enormi faglie, che chiamò faglie trasformi (Figura 4.17).

Figura 4.17. Faglie trasformi che dislocano la dorsale oceanica dell'Atlantico.



Tutte queste prove, insieme, portarono alla nuova teoria unificante della tettonica a placche, che fu ampiamente accettata a metà degli anni '60. La nuova teoria unificava la teoria della Deriva dei Continenti di Wegener con quella dell'Espansione del Fondale Oceanico di Hess e tutte le altre evidenze, spiegando che l'intera superficie esterna della Terra era suddivisa in pezzi, chiamati in seguito placche, che si muovevano attraverso la superficie terrestre. Queste placche avevano tre tipi di margini: le dorsali oceaniche e le fosse riconosciute da Hess e le faglie trasformi riconosciute da Wilson. Man mano che le placche si spostavano trasportavano i continenti con loro; quindi, i continenti non andavano alla deriva da soli, come proposto da Wegener, ma venivano trasportati dal movimento delle placche.

Wilson realizzò poi che il movimento delle placche poteva spiegare la formazione dei supercontinenti nel passato geologico, e che, man mano che i continenti si univano e poi si separavano, si formavano nuovi oceani. Questo ciclo di formazione e separazione dei supercontinenti è ora chiamato Ciclo di Wilson o *ciclo dei supercontinenti*.

La nuova teoria unificante non solo spiegava le caratteristiche geologiche su scala globale, ma rendeva conto anche degli episodi di orogenesi e sollevamento, che sono elementi chiave del ciclo delle rocce. Spiegava come aree potessero avere sequenze rocciose sedimentarie deposte in ambienti molto diversi, che potevano variare da glaciali a equatoriali e da mari profondi a montagne. Il movimento delle placche fu poi riconosciuto come una delle forze motrici dell'evoluzione, unificando così molte aree della geologia. Da allora, sono state trovate sempre più prove a sostegno della teoria della tettonica delle placche; essa spiega la maggior parte delle caratteristiche geologiche, ma non tutte. Le caratteristiche non spiegate dalla teoria "normale" della tettonica a placche sono oggi oggetto di molte ricerche scientifiche.

4.1.4.2 Costruzione e subduzione delle placche

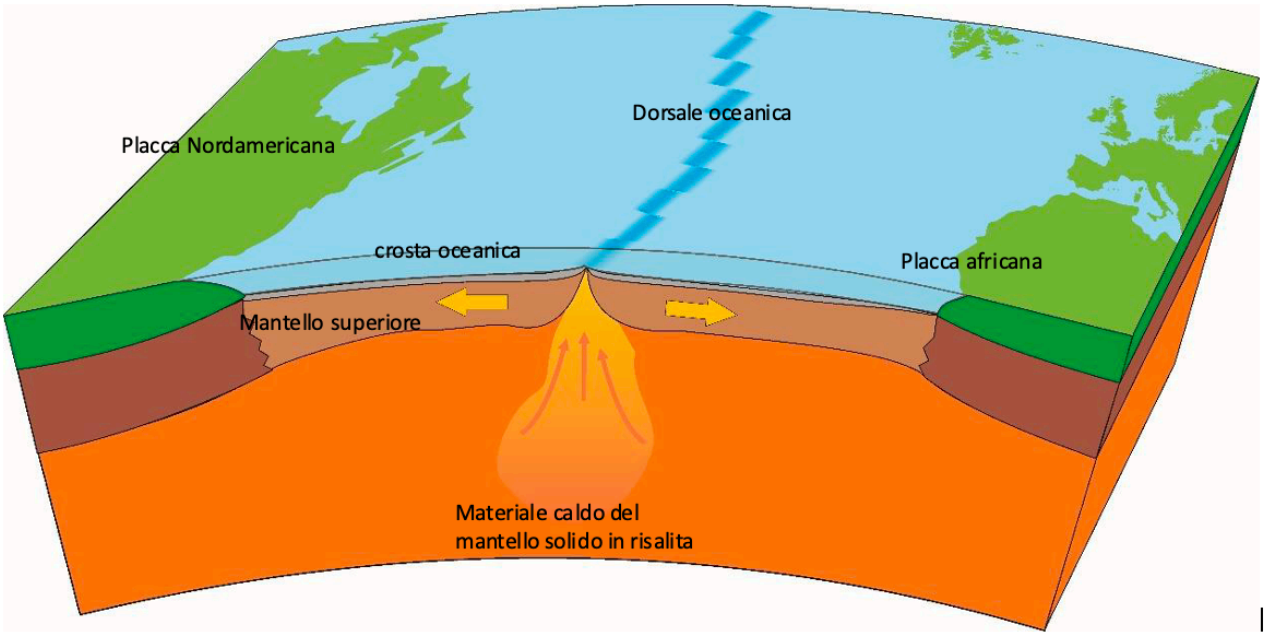
La litosfera terrestre è suddivisa in una serie di pezzi grandi e piccoli chiamati placche tettoniche. Mentre queste placche si muovono, trasportano con sé i continenti. Alle dorsali oceaniche si forma nuovo materiale di placca, che si allontana dalla dorsale, per cui queste vengono chiamate **margini di placca divergenti**. Le dorsali oceaniche sono dislocate da faglie trasformi, dove non viene prodotto né distrutto materiale di placca; queste faglie trasformi sono quindi chiamate anche **margini di placca conservativi**, dove la placca viene conservata.

Il nuovo materiale di placca caldo e galleggiante delle dorsali oceaniche si raffredda lentamente e sprofonda man mano che si allontana dalle dorsali. Alla fine, diventa così freddo e denso da cominciare a sprofondare nuovamente nel mantello; questo sprofondamento è chiamato **subduzione**. Il risultato della subduzione è che due placche si muovono l'una verso l'altra, motivo per cui vengono chiamati **anche margini convergenti**. La litosfera subdotta viene reintegrata nel mantello, permettendo alle rocce della litosfera di essere riciclate nel ciclo globale della tettonica a placche.

4.1.4.3 Caratteristiche dei margini di placca

Margini di placca divergenti. In questi margini, si forma nuovo materiale di placca presso le dorsali oceaniche man mano che le placche vengono tirate verso l'esterno, consentendo al magma, formatosi per fusione parziale del mantello sottostante, di risalire. Questo si solidifica nelle camere magmatiche formando gabbri, nei dicchi come diabasi o sul fondale oceanico come lave basaltiche (Tabella 4.19). Questa nuova crosta, insieme a una parte del mantello sottostante, diventa nuova litosfera man mano che si crea nuova placca oceanica (Figura 4.18).

Figura 4.18. Nuova litosfera oceanica creata sulla dorsale oceanica al centro dell'Oceano Atlantico

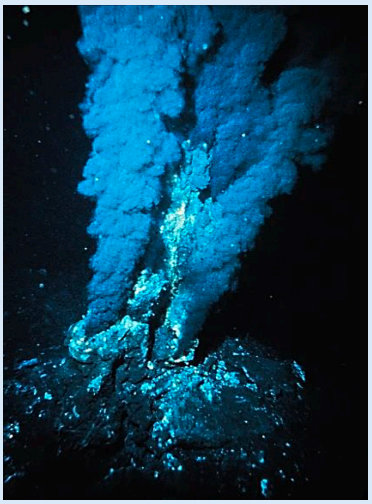


Box 4.9. La scoperta dei black smokers delle dorsali oceaniche

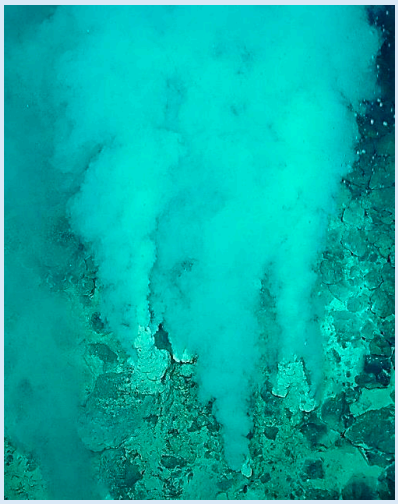
Nel 1977, il sottomarino subacqueo Alvin stava investigando un'area di dorsale oceanica a 2 km di profondità, quando i suoi due piloti videro per la prima volta i black smokers. Scoprirono che l'acqua dei black smokers che fuoriusciva era riscaldata a più di 400 °C ed era fortemente acida. Trovarono forme di vita strane che vivevano grazie all'energia e ai nutrienti prodotti dai fumaioli. Ulteriori indagini mostrarono che l'acqua di mare fredda veniva aspirata nel fondale marino crepato nelle vicinanze, dove le rocce calde sottostanti la riscaldavano. L'acqua super riscaldata scioglieva i minerali dalle rocce circostanti mentre risaliva verso il fondale marino. Quando fuoriusciva, l'acqua reagiva con l'acqua di mare e i minerali neri cristallizzavano, producendo quella che veniva chiamata "fumosità nera". Questi sono ora conosciuti come **fonti idrotermali**. Questa scoperta straordinaria, di un nuovo processo inimmaginabile in profondità sul fondale marino, cambiò la nostra comprensione non solo dei processi chimici oceanici, ma anche di come le comunità biologiche potessero svilupparsi senza luce. Fornì anche nuove intuizioni sulla geofisica delle dorsali oceaniche. È insolito che una sola scoperta abbia un impatto così grande sulla nostra comprensione della biologia, chimica e fisica. Alvin e altri sottomarini subacquei stanno ancora approfondendo questa scoperta oggi. I fumaioli bianchi sono stati ora scoperti sui fondali oceanici lontano dalle dorsali oceaniche, con "fumi" bianchi alcalini di minerali chiari in presenza di anidride carbonica liquida.



Veicolo sottomarino di profondità, Alvin



Black smokers, dorsale Atlantica



White smokers, Arco delle Marianne Oceano Pacifico

Quando le placche appena formate vengono tirate lateralmente, ciò provoca tensione e fratture, poiché la placca solida viene fratturata da una serie di faglie normali. La parte centrale scivola verso il basso formando una valle di rift. Tali valli di rift si trovano al centro delle dorsali oceaniche in tutto il mondo (Figura 4.19). L'Islanda è uno dei pochi luoghi in cui una dorsale oceanica si trova sulla terra; la Figura 4.20 mostra una piccola valle di rift islandese che fa parte del più ampio sistema di rift della dorsale oceanica.

Figura 4.19. La valle di rift al centro di una dorsale oceanica.

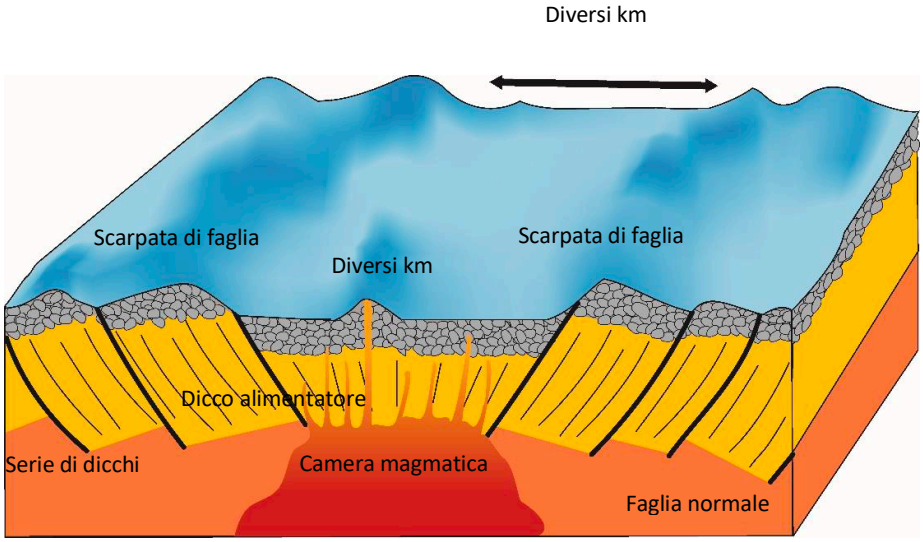


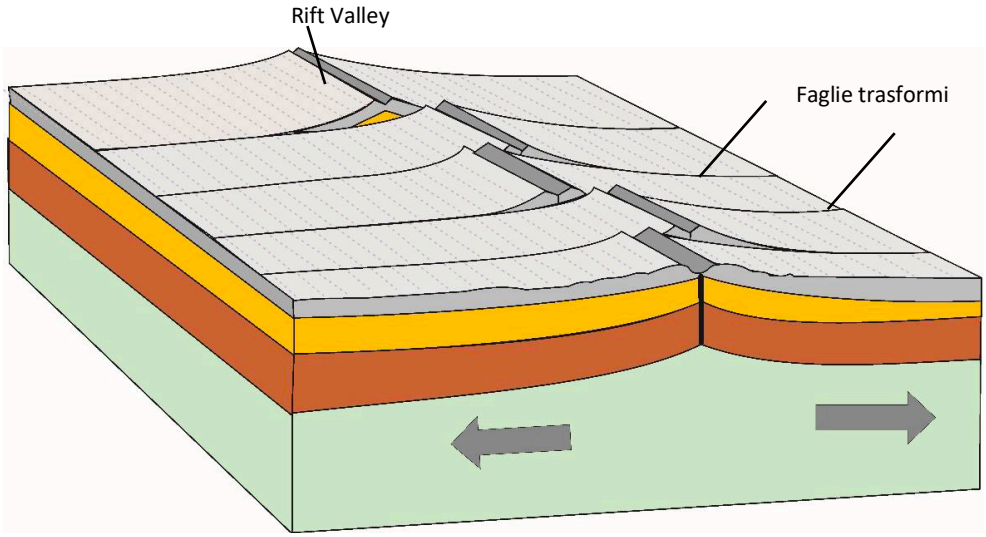
Figura 4.20. Una piccola rift Valley in Islanda, collegata al rifting della dorsale oceanica



Recenti perforazioni sottomarine e prove sismiche mostrano che nuova litosfera oceanica si sta formando in un modo diverso in alcune parti dell'oceano. In alcune aree, sembra che slabs (lastre) di mantello vengano estratte completamente da sotto, lungo profonde faglie, per diventare nuova litosfera oceanica. Questo processo, appena riconosciuto, è ancora oggetto di indagine. Tuttavia, qualunque sia il modo in cui si forma la nuova litosfera oceanica, non appena appare, i fanghi sottomarini iniziano a depositarsi sopra di essa dall'oceano sovrastante. Questa copertura di fango diventa sempre più spessa man mano che la placca si allontana dalle dorsali oceaniche e attraversa il fondo oceanico profondo.

Margini di placca conservativi. Le dorsali oceaniche sono dislocate da faglie trasformi (Figura 4.17) a questi margini e queste sono diverse da qualsiasi altra faglia. Sebbene si muovano l'una accanto all'altra in un normale movimento di strisciamento, si estendono nelle zone di frattura oltre le dorsali oceaniche, dove le rocce su ciascun lato della faglia si muovono nella *stessa* direzione, sebbene a velocità leggermente diverse, come mostrato in Figura 4.21.

Figura 4.21. Una serie di faglie trasformi che dislocano una dorsale oceanica e una rift Valley



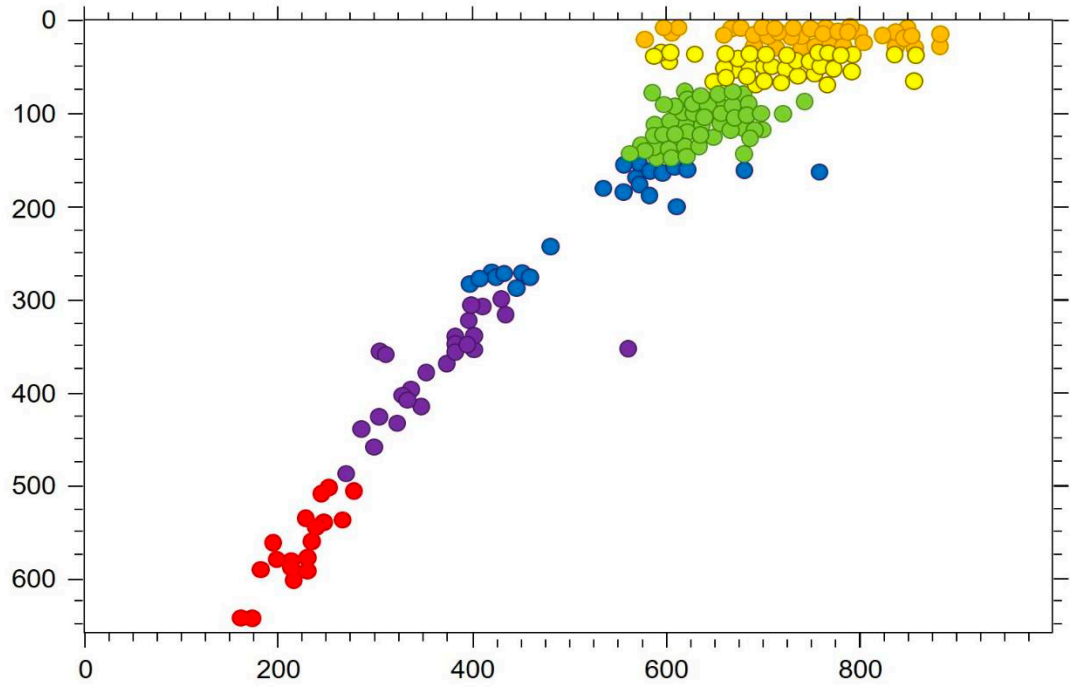
Le faglie trasformi non solo dislocano le dorsali oceaniche, ma collegano anche i margini delle dorsali oceaniche con le zone di subduzione. Esse influenzano anche i continenti; esempi famosi che attraversano i continenti sono la Faglia Alpina in Nuova Zelanda e la Faglia di San Andreas negli Stati Uniti (Figura 4.22). Poiché le faglie trasformi sono margini di placca conservativi, non presentano attività vulcanica, nonostante quanto possa essere mostrato in alcuni film popolari.

Figura 4.22. La Faglia di San Andreas in California, USA. Il terreno in primo piano è stato dislocato di 130 metri verso sinistra da quando il corso d'acqua ha inizialmente inciso o la sua valle, spostandolo di questa distanza.



Le scosse sismiche si verificano in tutti i margini attivi delle placche, ma, rispetto a quelle delle zone di subduzione, i terremoti ai margini divergenti e alle faglie trasformi sono tutti a ipocentro superficiale; si verificano solo fino alla profondità della litosfera, che è spessa meno di 100 km. Tuttavia, dove le placche sono in subduzione, la litosfera fredda viene portata verso il basso nel mantello e può causare terremoti a tutte le profondità fino a circa 750 km. La subduzione provoca una zona inclinata di terremoti, come mostrato nella Figura 4.23.

Figura 4.23. Terremoti registrati nella zona di subduzione delle Isole Curili nel nord-ovest dell'Oceano Pacifico.
I terremoti sono rappresentati a colori in base alla profondità, mostrando che la placca è in subduzione verso sinistra.



Quando la fredda litosfera oceanica affonda nel mantello, essa porta con sé l'acqua di mare intrappolata nelle rocce. Questa acqua, insieme all'aumento della temperatura man mano che la litosfera affonda, provoca la parziale fusione delle rocce sopra la litosfera in subduzione, producendo magma. Una volta formato, il magma caldo ha una densità inferiore a quella delle rocce sovrastanti e risale, causando attività ignea nella placca sovrastante.

Gli effetti della subduzione variano a seconda di dove avviene. Quando una placca oceanica si subduce sotto un'altra, si forma una serie di isole vulcaniche. Quando una placca oceanica viene subdotta sotto una placca che trasporta un continente, si forma una catena montuosa con attività vulcanica associata. Quando due placche continentali vengono unite dalla subduzione della litosfera oceanica tra di esse, si genera una catena montuosa ancora più grande a causa della collisione.

Margini convergenti oceano-oceano. Quando due placche oceaniche si avvicinano l'una all'altra, la placca più fredda è più densa e quindi viene subdotta. La subduzione produce una fossa oceanica dove le due placche si incontrano e una zona inclinata di terremoti, come mostrato nella Figura 4.23. La fusione parziale di una parte dello slab (lastra) in subduzione produce magma intermedio (né ricco di ferro né di silicio) che risale in eruzioni vulcaniche esplosive, formando una catena di vulcani. La fossa e i vulcani formano una curva sulla superficie della Terra, dando un altro nome a questo tipo di margine: un margine ad **arco insulare** (Figura 4.24)."

Figura 4.24. Subduzione in caso di collisione di due placche oceaniche

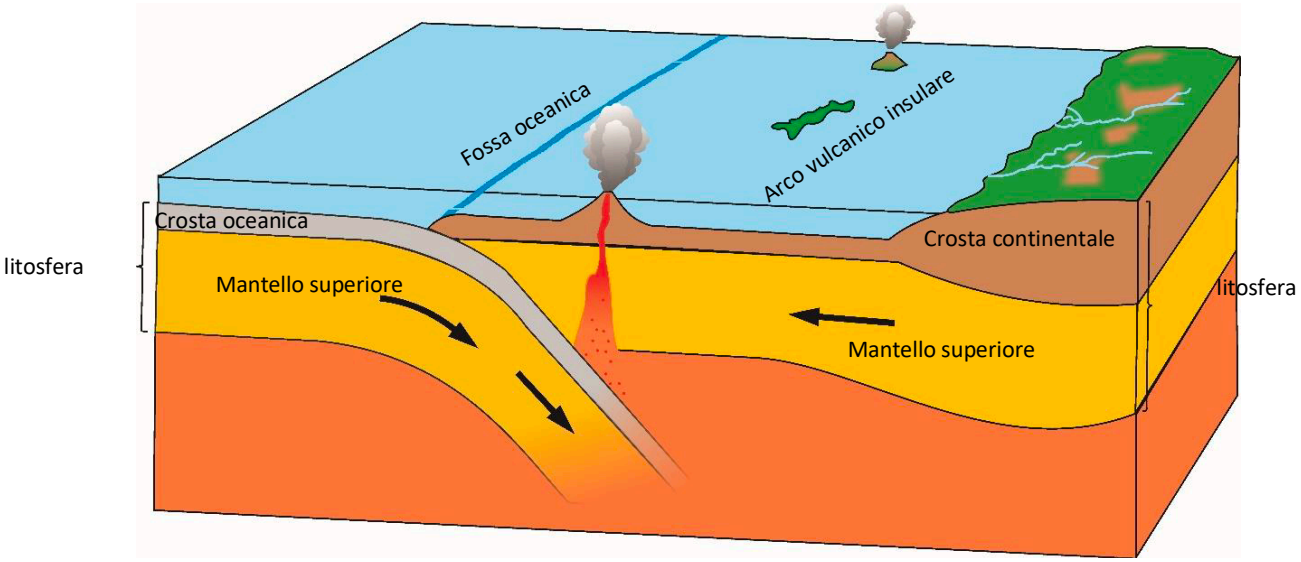


Figura 4.25. L'arco insulare dei Caraibi, che mostra la curva della fossa oceanica con l'arco delle isole vulcaniche all'interno, mentre la placca dell'Atlantico settentrionale collide con la placca caraibica.

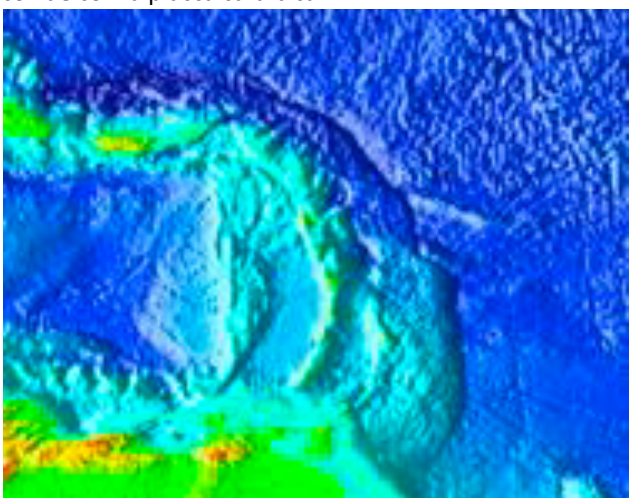


Figura 4.26. Il vulcano Soufrière Hills in eruzione nell'isola Montserrat nell'arco insulare dei Caraibi



Margini convergenti oceano-continente. Quando una placca oceanica collide con una placca che trasporta un continente, le rocce continentali sono meno dense della litosfera oceanica, causando la subduzione della placca oceanica. Come negli archi insulari, si verifica un piano inclinato di terremoti, accompagnato da eruzioni vulcaniche esplosive. Tuttavia, poiché su una delle placche c'è un continente, ci sono anche molti altri effetti. Man mano che la placca oceanica si subduce, scaglie del fondale oceanico vengono separate e accumulate, come mostrato nella Figura 4.27, in un denso cuneo di sedimenti chiamato **prisma di accrezione**. Questo aggiunge nuovo materiale al continente, che cresce verso l'esterno. Cresce anche verso l'alto e verso il basso, poiché, con l'aggiunta di nuovo materiale, si formano montagne e diventa più spesso. Man mano che le montagne diventano più alte, affondano ulteriormente nel mantello sottostante, perché il mantello, sebbene solido, è in grado di fluire. Pertanto, man mano che le montagne della crosta continentale diventano più alte, le loro basi vengono costrette a scendere a profondità maggiori. Le masse di crosta continentale forzate verso il basso per sostenere le catene montuose sono chiamate **radici delle montagne**.

Anche se le temperature e le pressioni a cui sono sottoposte le radici sono intense a causa della loro grande profondità, ci sono anche forze di compressione aggiuntive causate dalla forza delle placche che si muovono insieme. Sono queste pressioni laterali che deformano e metamorfosano le rocce. Nel frattempo, il magma viene prodotto dalla fusione parziale legata alla placca in subduzione. Non solo vengono prodotti magmi intermedi, ma la fusione parziale della crosta inferiore produce anche fusi ricchi di silicio. Questi sono per lo più così viscosi che si solidificano prima di raggiungere la superficie in grandi camere magmatiche, formando plutoni e batoliti. Il lento raffreddamento di questa roccia ricca di

silicio forma granito. Se il magma ricco di silicio raggiunge la superficie, come il magma intermedio, provoca eruzioni esplosive altamente pericolose di cenere vulcanica.

Figura 4.27. Subduzione di una placca oceanica sotto una placca continentale.

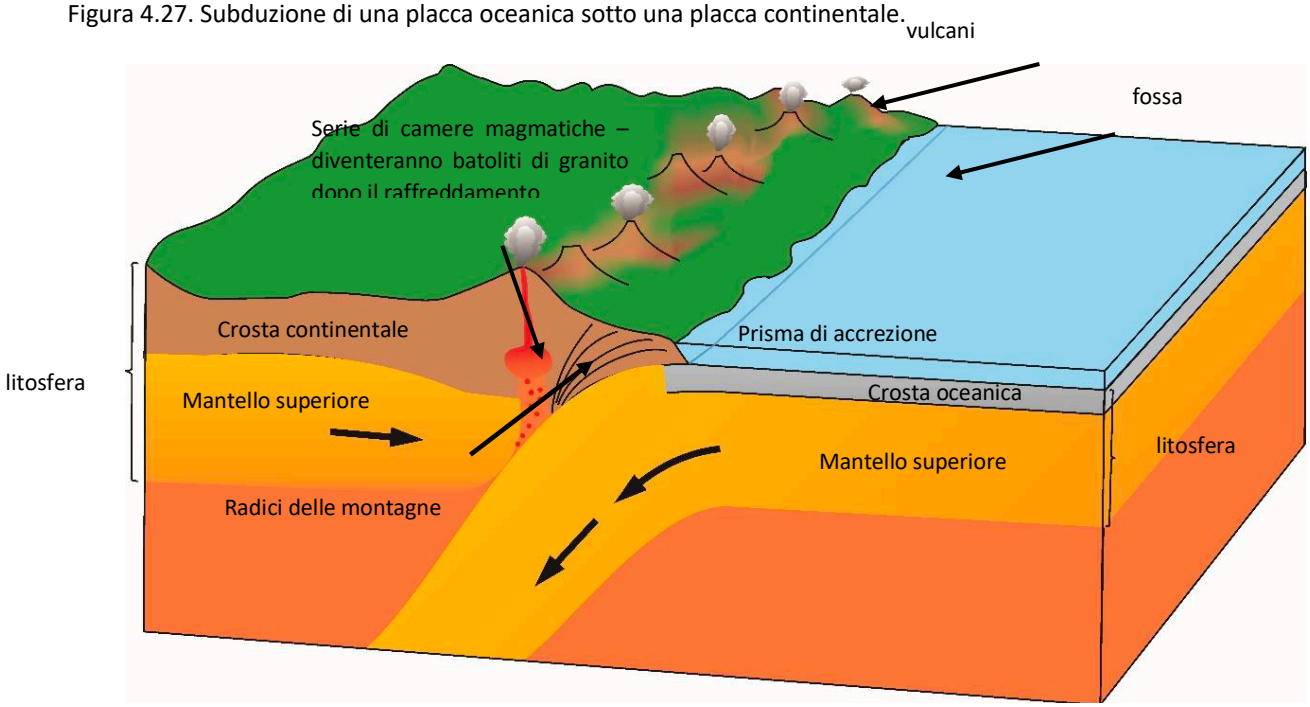


Figura 4.28. La zona di collisione formata dalla placca di Nazca in subduzione sotto la placca sudamericana

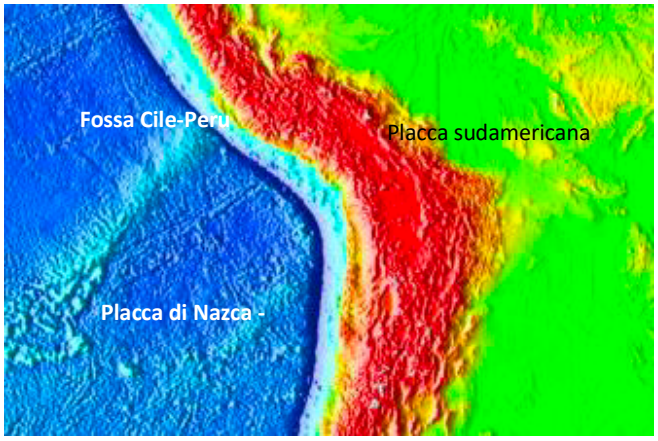


Figura 4.29. La catena montuosa delle Ande tra il Cile e Argentina



Margini convergenti continente-continente.

Quando due placche che trasportano continenti si muovono l'una verso l'altra, la placca oceanica tra di esse subduce e l'oceano si chiude gradualmente. Quando i continenti delle placche collidono, si formano alte catene montuose con profonde radici, le più alte catene montuose della Terra. La collisione provoca una intensa deformazione, con grandi faglie di sovrascorrimento e pieghe, insieme a metamorfismo fino ai gradi più elevati. Sebbene la zona di collisione possa essere attiva per milioni di anni, non può avvenire ulteriore subduzione, quindi non c'è attività vulcanica. Tuttavia, la regione è molto soggetta a terremoti, spesso di alta magnitudo e catastrofici (Figure 4.30, 4.31 e 4.32).

Figura 4.30. Una zona di collisione tra due placche continentali

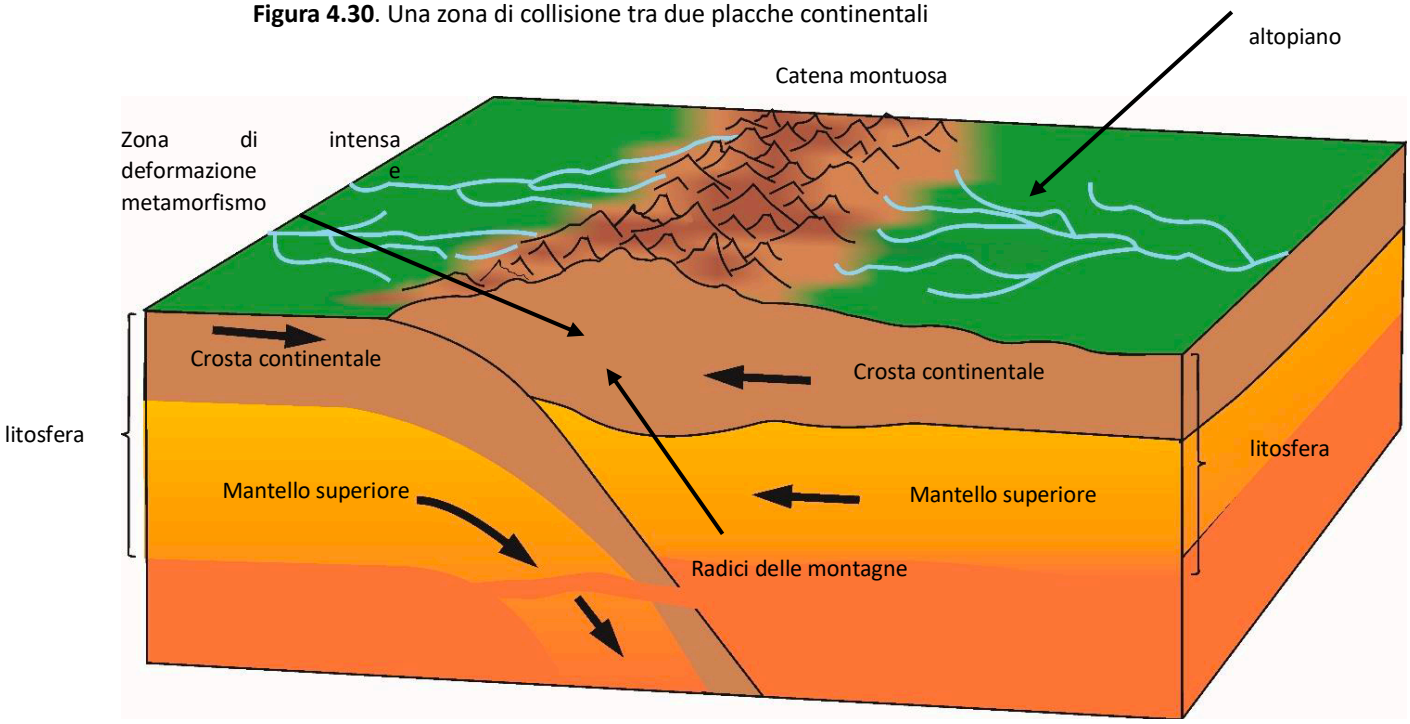


Figura 4.31. Collisione della placca indiana con la placca eurasiatica, producendo la Catena montuosa dell'Himalaya

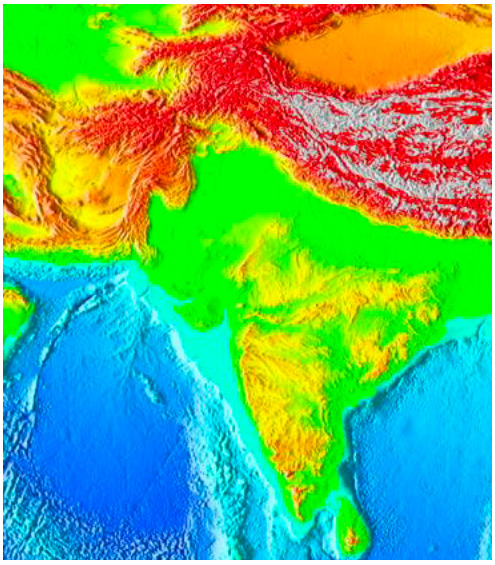


Figura 4.32. La catena montuosa dell'Himalaya vista dalla Stazione Spaziale Internazionale, con il Monte Everest al centro in alto



Box 4.10. Scaglie di sovrascorrimento prodotte da collisioni tra placche

Quando due placche continentali collidono, scaglie di roccia possono essere sollevate e possono essere spostate per molti chilometri lungo faglie di sovrascorrimento a basso angolo. A volte, le rocce nella parte anteriore del sovrascorrimento possono essere rovesciate in enormi pieghe, dove la sequenza rocciosa alla base delle pieghe è completamente capovolta.



Il sovrascorrimento di Glarus nelle Alpi svizzere. La roccia scura vicino alla cima della montagna è sovrascorsa verso nord per più di 100 km sulle rocce inferiori, mentre la catena montuosa alpina è stata sollevata a causa della collisione tra le placche africana ed europea.



La piega del Dent de Morcles, nelle Alpi svizzere vicino al Vallese. Le rocce scure in cima alla montagna hanno la stessa età di quelle sottostanti alla piega, dove la sequenza rocciosa inferiore è stata rovesciata a causa della collisione tra le placche africana ed europea.

Ora che sappiamo come operano i margini delle placche, possiamo spiegare le parti del ciclo delle rocce che erano difficili da comprendere prima che la teoria della tettonica a placche fosse disponibile, come mostrato nella Tabella 4.21.

Tabella 4.21. I processi del ciclo interno delle rocce spiegati dalla teoria della tettonica a placche

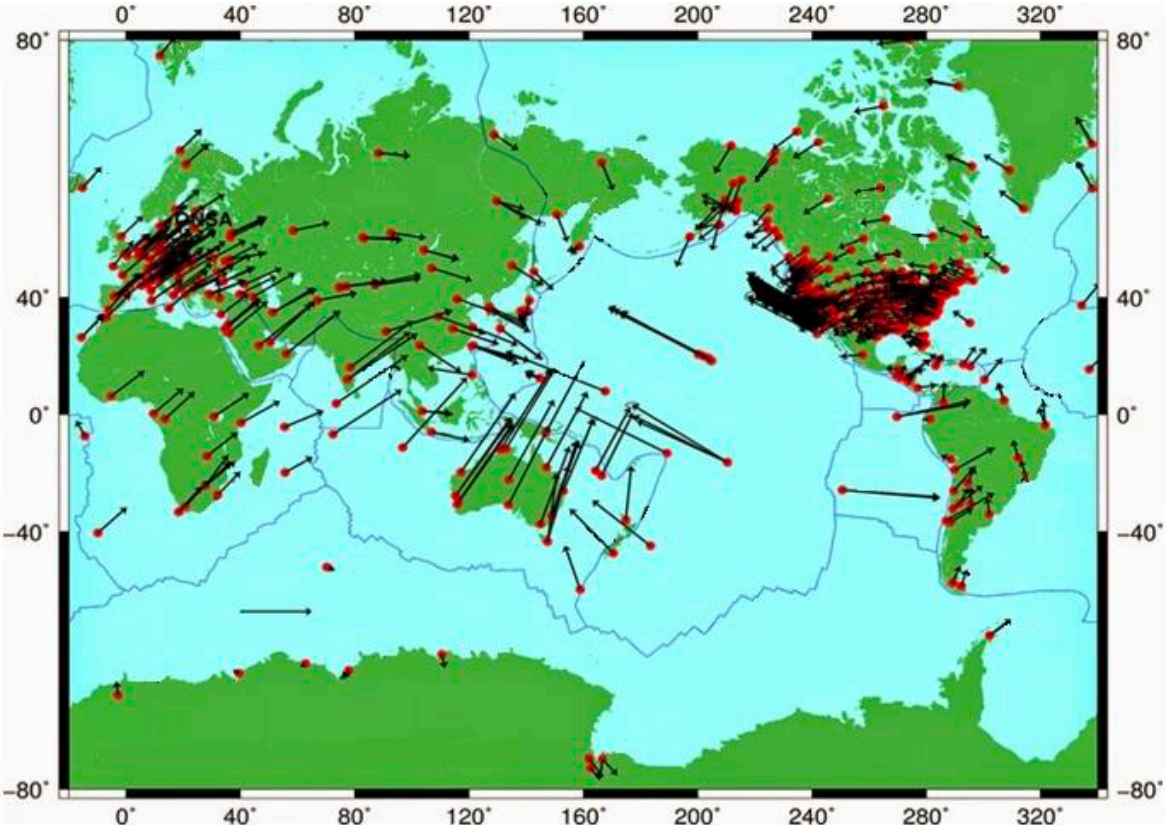
Processo interno al ciclo delle rocce	Spiegazione conseguente la tettonica delle placche
Metamorfismo	Metamorfismo regionale: quando le catene montuose si formano in corrispondenza dell'oceano-continente e continente-continente, le rocce vengono trasportate fino a profondità dove le temperature e le pressioni delle rocce sovrastanti sono molto elevate; l'estrema sollecitazione di compressione delle placche in collisione provoca la ricristallizzazione della roccia
	Metamorfismo termico: magmi intrusi, formatisi come descritto di seguito, cuociono il rocce circostanti in un'aureola metamorfica
Fusione (fusione parziale)	Nelle zone di subduzione: la placca in subduzione porta con sé acqua; l'acqua e l'aumento delle temperature causano la fusione parziale delle rocce sopra la placca e la minore densità del magma che formato da questo processo lo fa risalire
	Ai margini divergenti delle placche: al di sotto delle dorsali oceaniche il mantello diventa abbastanza caldo da fondere parzialmente, generando i magmi ricchi di ferro/magnesio che formano il materiale della nuova placca oceanica
Intrusione ignea	Quando il magma ai margini della placca sale nella crosta più fredda soprastante, si raffredda e cristallizza in grandi camere magmatiche come plutoni o batoliti
Attività vulcanica	Se il magma ai margini delle placche e ai punti caldi raggiunge la superficie, erutta; Le eruzioni vanno da relativamente sicure o a catastroficamente pericolose
Sollevamento	Quando le catene montuose si formano ai margini delle placche oceano-continente o continente-continente, alcune rocce vengono sollevate mentre altre aree vengono spinte in profondità nelle radici delle montagne. Poiché la catena montuosa 'galleggia' nel mantello solido, man mano che la roccia sovrastante viene rimossa dall'erosione, le rocce sottostanti risalgono e si sollevano.
Deformazione	Ai margini divergenti: quando le placche si allontanano, le rocce fragili si fratturano in faglie normali, con un lato che scivola verso il basso rispetto all'altro
	Ai margini conservativi: nella formazione di faglie trasformi, una placca scivola accanto all'altra e le rocce fragili si fratturano in faglie trascorrenti

	Ai margini convergenti tra placca oceanica e continentale o tra placche continentali, le enormi forze compressive fanno sì che le rocce vicino alla superficie si fratturino in faglie inverse e faglie di sovrascorrimento; a profondità maggiori, le rocce si deformano attraverso piegamenti

4.1.4.4 Meccanismo e dimensione del movimento

Oggi, il movimento delle placche può essere monitorato da satelliti utilizzando il Sistema di Posizionamento Globale (GPS). Questo mostra valori di movimento delle placche compresi tra circa 1 e 10 cm all'anno, circa lo stesso tasso con cui crescono le unghie delle mani (Figura 4.33).

Figura 4.33. Dimensione del movimento delle placche; le lunghezze delle frecce mostrano la velocità misurata dalle GPS della placca.

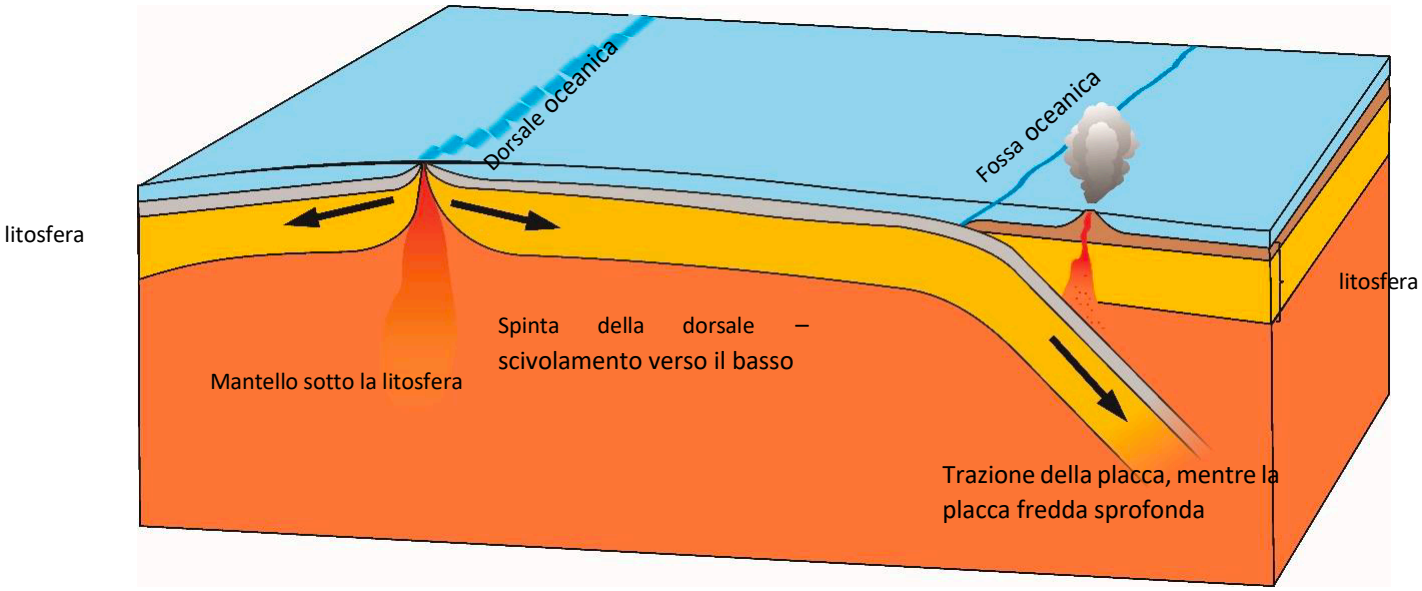


Per molti anni si è pensato che le correnti nel mantello solido sottostante trasportassero le placche; correnti guidate dal calore come queste sono chiamate **correnti di convezione**. Oggi possiamo utilizzare informazioni sismiche per "scannerizzare" la Terra, come gli scanner medici possono essere utilizzati per esaminare il tuo corpo. Questo studio ha messo in discussione l'idea delle correnti di convezione su larga scala nel mantello. Pertanto, il **meccanismo di convezione del mantello** potrebbe non essere la principale forza motrice del movimento delle grandi placche.

Le placche vengono subdotte nelle zone di subduzione perché sono più dense delle rocce circostanti. Sembra che gran parte del movimento delle placche possa essere spiegato dallo slab, una scaglia che affonda, di litosfera densa e fredda che trascina la placca a cui è attaccata attraverso la superficie; questo è il **meccanismo di trascinamento della placca**. Questo agisce come un tessuto con un bordo che pende su un tavolo liscio: quando il bordo cade a terra, tira il resto del tessuto sulla superficie.
Dove non c'è un grande effetto di trascinamento della placca, sembra esserci una spinta dalle dorsali oceaniche. Poiché le dorsali oceaniche sono più alte del fondale marino circostante, la litosfera appena formata scivola dalle dorsali, spingendo la placca in avanti; questo è il **meccanismo di spinta della dorsale**.

Il trascinamento della placca e la spinta della dorsale sembrano ora essere le principali forze motrici delle grandi placche, sebbene questo sia ancora oggetto di indagine; nel frattempo, altre forze potrebbero avere effetti anche (Figura 4.34)

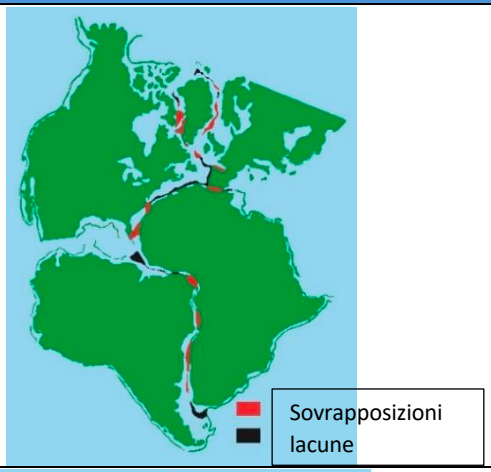
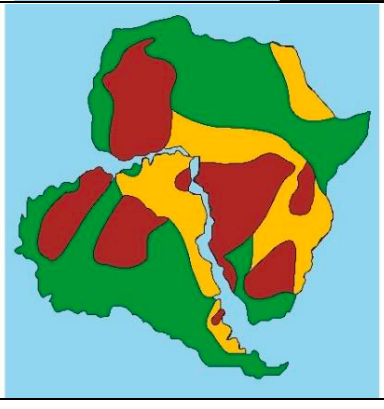
Figure 4.34. Meccanismo del movimento delle placche

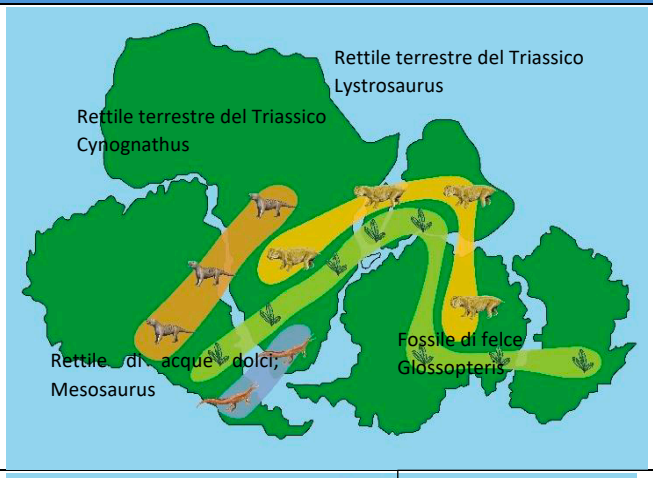
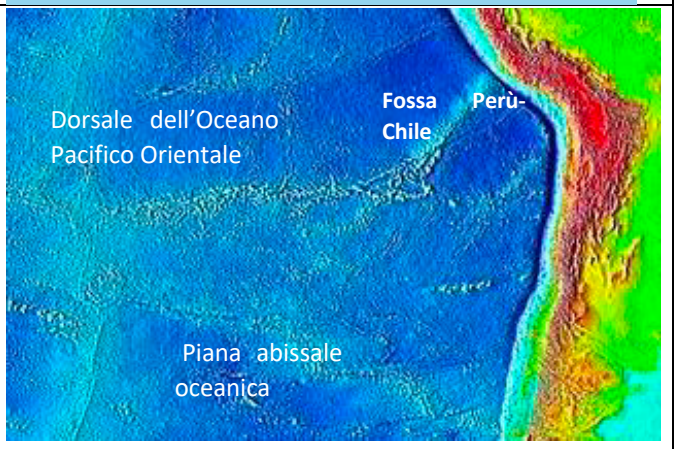
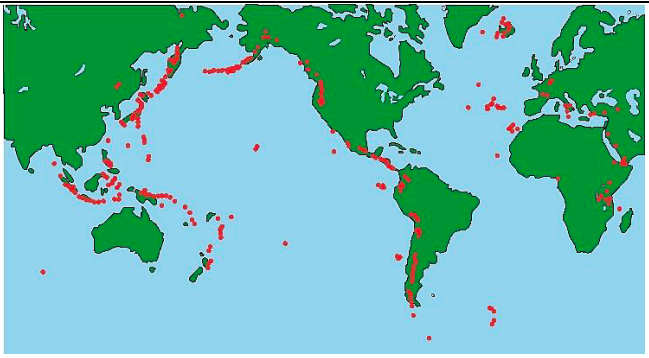


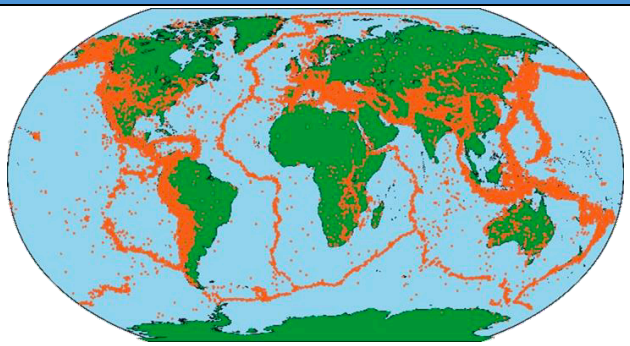
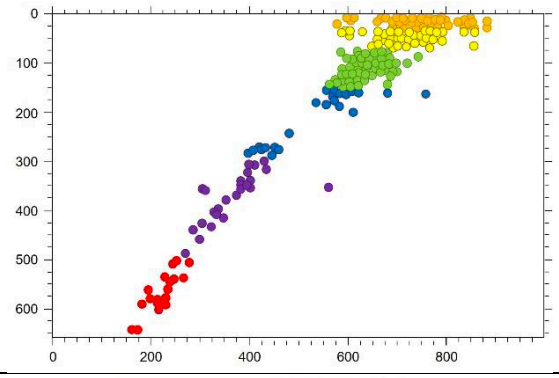
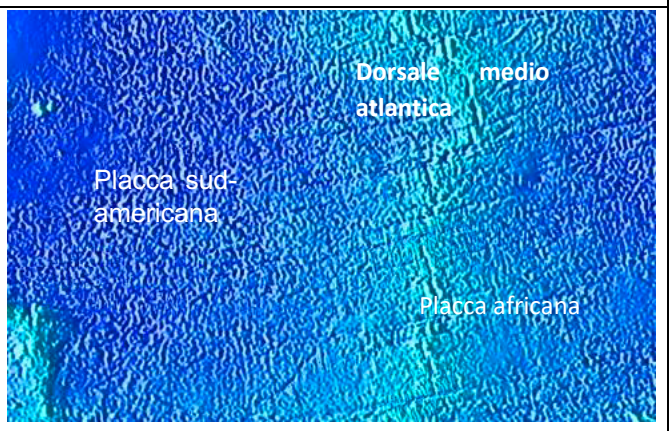
4.1.4.5 Evidenze

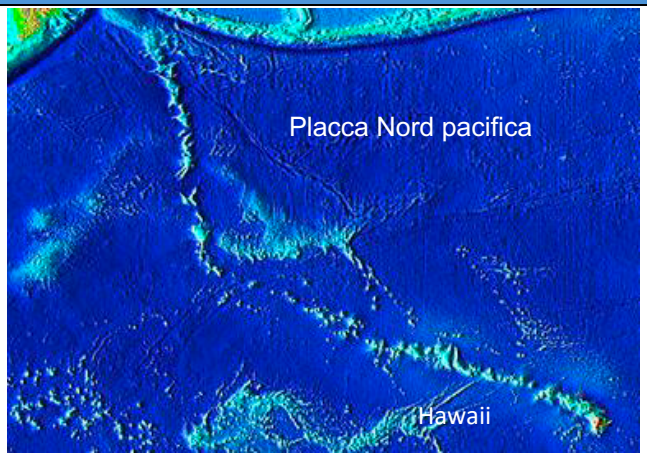
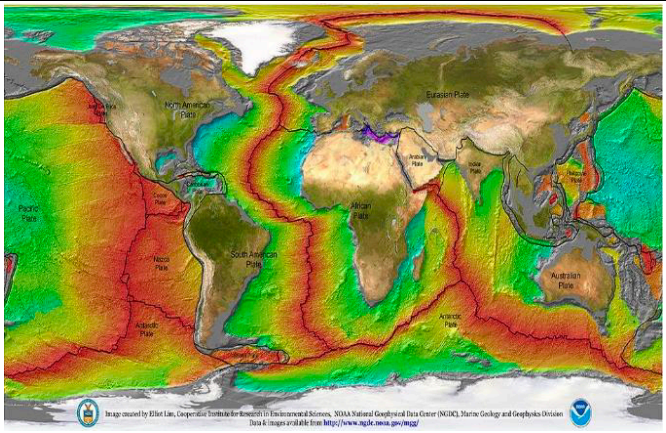
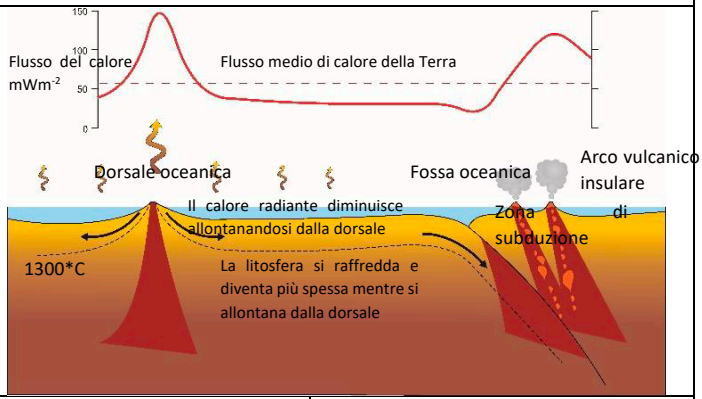
Ora abbiamo così tante evidenze a supporto della teoria della tettonica a placche che può essere quasi considerata un "fatto" piuttosto che una teoria. Questo è particolarmente vero perché, come tutte le buone teorie, ha riunito molte idee e ha offerto previsioni che sono state testate e risultate corrette. Tuttavia, come la maggior parte delle teorie, la tettonica a placche certamente non spiega tutti i processi superficiali della Terra e alcune delle sue previsioni sono ancora in fase di indagine. Le principali linee di evidenza a sostegno della teoria della tettonica a placche oggi sono riassunte nella Tabella 4.22.

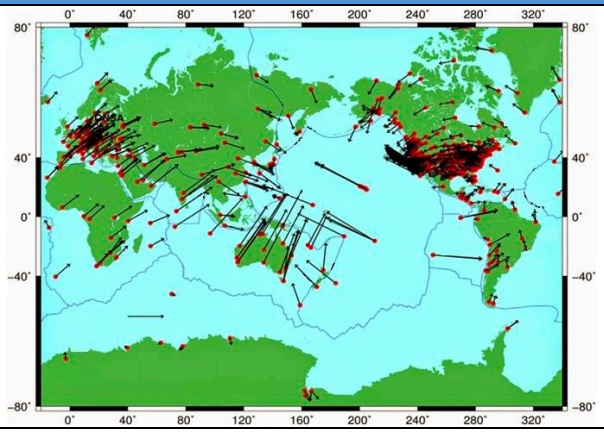
Tabella 4.22. Le principali evidenze a sostegno della teoria della tettonica a placche.

Prova	Proposta da	Spiegazione	immagine
Forma a puzzle	Du Toit, Wegener	I continenti erano una volta uniti ma si sono separati, ed è per questo che le forme delle loro coste combaciano. Ricostruzioni successive, basate sui margini delle piattaforme continentali e utilizzando modelli computerizzati, hanno mostrato una corrispondenza molto precisa	
Evidenze geologiche della forma a puzzle	Du Toit, Wegener	Le forme delle rocce sui continenti coincidono quando i continenti vengono riuniti. Qui, le rocce di colore marrone hanno più di 2000 milioni di anni, mentre quelle verde chiaro hanno un'età compresa tra 2000 e 600 Ma.	

Prova	Proposta da	Spiegazione	immagine
Evidenze fossili nella forma a puzzle	Wegener	I luoghi in cui sono stati trovati fossili terrestri coincidono quando i continenti vengono riuniti; questa mappa mostra dove si trovano questi fossili: Cynognathus (marrone), Lystrosaurus (arancione), Glossopteris (verde) e Mesosaurus (blu).	
Evidenze paleoclimatiche	Wegener	Le aree dei continenti che erano originariamente coperte di ghiaccio coincidono quando i continenti vengono riuniti; le mappe mostrano le aree precedentemente glaciali ombreggiate.	
Rilievi della Terra	Hess	Hess capì che le caratteristiche del fondale oceanico, come le fosse e le dorsali oceaniche, potevano essere collegate tra loro nella sua ipotesi di Espansione del fondale oceanico; questa teoria fu successivamente estesa, con la tettonica a placche, per includere anche le caratteristiche continentali	
Mappa della distribuzione dei vulcani		La distribuzione dei vulcani sulla Terra, indicata dai punti rossi, è sempre in relazione con margini di placca o 'punti caldi'.	

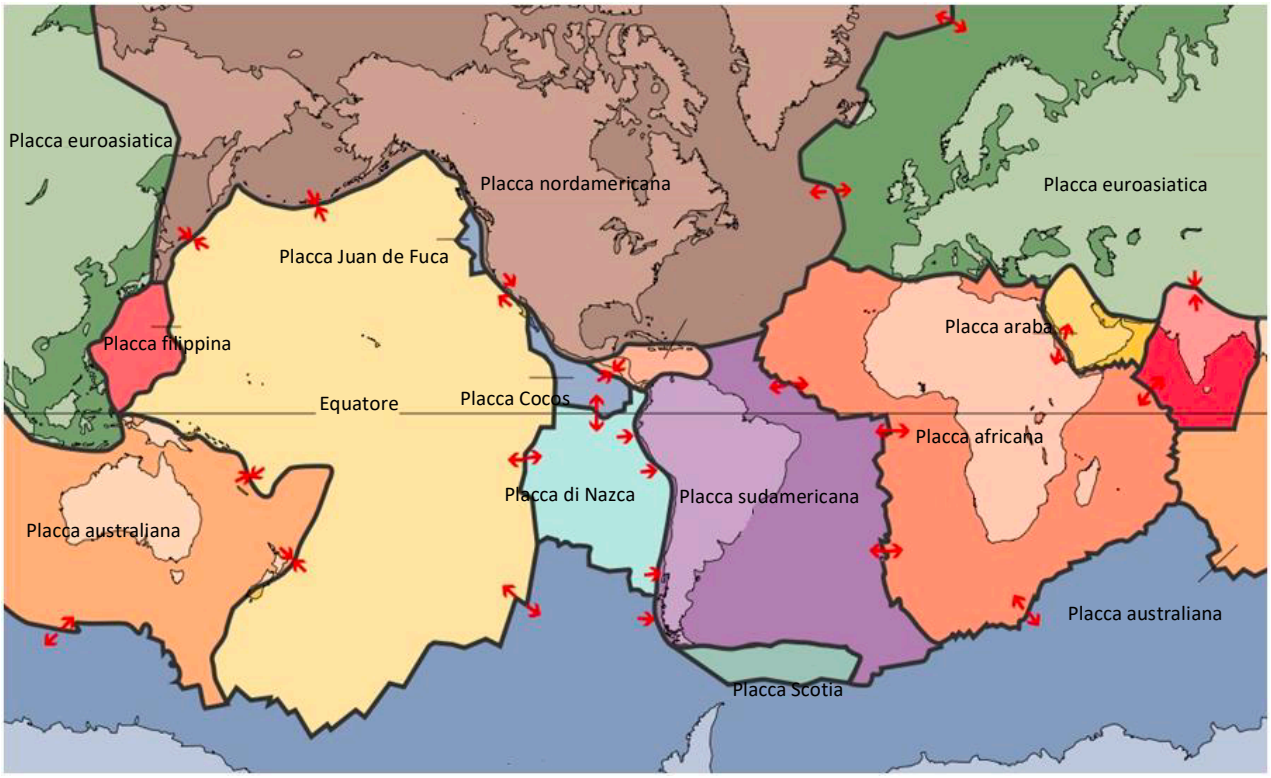
Prova	Proposta da	Spiegazione	immagine
Distribuzione dei terremoti		Le distribuzioni dei principali terremoti, mostrati qui come piccoli punti arancioni, indicano che, sebbene ci siano terremoti in molti luoghi, la maggior parte si verifica ai margini delle placche, in particolare nelle zone di subduzione	
Profondità dei terremoti	Benioff Wadati	La crescente profondità dei terremoti lungo le zone di subduzione mostra la pendenza della placca in subduzione, come spiegato in precedenza	
Bande magnetiche	Vine e Matthews Morlei	La forma simmetrica delle 'strisce magnetiche' nei basalti del fondale oceanico su entrambi i lati delle dorsali oceaniche mostra come la nuova litosfera oceanica si stia espandendo su entrambi i lati, come spiegato in precedenza	
Faglie trasformi	J.Tuzo Wilson	Dove le dorsali oceaniche sono spostate, ci sono faglie insolite che si muovono lateralmente tra le dorsali ma nella stessa direzione lontano dalle dorsali; queste faglie trasformi collegano anche diversi tipi di margini di placca, come nel caso della faglia di San Andreas	

Prova	Proposta da	Spiegazione	immagine
Hotspots	J.Tuzo Wilson	Quando le placche si muovono sopra i 'punti caldi' nel mantello, l'attività vulcanica erutta attraverso di essi; i vulcani estinti diventano più vecchi allontanandosi dal punto caldo, mostrando così la direzione del movimento delle placche, come spiegato in precedenza	
Età dei fondi oceanici		La perforazione profonda dell'oceano ha recuperato rocce che possono essere datate radiometricamente. Questa mappa mostra le età delle rocce più antiche trovate in diverse parti degli oceani; le rocce del fondale oceanico sono le più giovani vicino alle dorsali oceaniche e diventano più vecchie verso l'esterno	
Flusso di calore		Le misurazioni del calore che fluisce dalla Terra mostrano picchi elevati nelle dorsali oceaniche e nelle aree vulcaniche continentali, punti bassi nelle fosse e il lento e costante raffreddamento della placca mentre si allontana dalle dorsali	
Composizione dei magmi		Le eruzioni alle dorsali oceaniche e ai punti caldi sono di basalto; le eruzioni nelle zone di subduzione sono per lo più di andesite e cenere vulcanica. I diversi tipi di magma possono essere spiegati dai diversi processi tettonici che avvengono	 

Prova	Proposta da	Spiegazione	immagine
Misura del movimento delle placche		I movimenti delle placche attuali sono mostrati dalle misurazioni GPS; più lunga è la freccia in questo diagramma, più rapido è il movimento.	

Le numerose indagini scientifiche sulla tettonica a placche hanno fornito i dati necessari per tracciare una mappa dettagliata delle principali placche e dei margini di placca sulla Terra, come mostrato nella Figura 4.35. Un planisfero può mostrare solo le placche principali; ci sono anche molte placche minori.

Figura 4.35. Le principali placche tettoniche della Terra; le frecce rosse indicano le direzioni di movimento delle placche ai margini.



4.2 Idrosfera

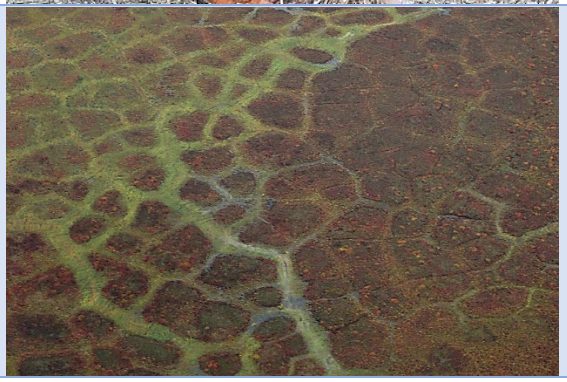
Idrosfera è il nome dato a tutta l'acqua presente sul nostro pianeta, dagli ampi oceani alla condensa che si vede all'esterno di una bibita ghiacciata, dall'alta dell'atmosfera al fondo della più profonda trivellazione.

4.2.1 Acque continentali

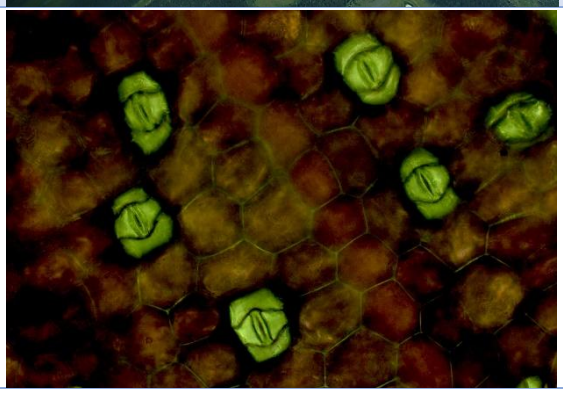
4.2.1.1 Fonti di acqua continentale

La principale riserva di acqua sulla Terra è costituita dagli oceani, ma l'acqua viene portata sui continenti attraverso i processi del ciclo dell'acqua descritti nel Capitolo 1. Sebbene solo il 2,5% circa dell'acqua della Terra si trovi sui continenti (il resto è negli oceani), quest'acqua dolce non solo ha un'ampia gamma di effetti geologici, ma è anche vitale per la vita sulla Terra. Le diverse fonti di acqua continentale sono illustrate nella Tabella 4.23.

Tabella 4.23. Acqua continentale sulla Terra

Fonte d'acqua	Percentuale di acqua continentale	Immagine	Fonte
Calotte glaciali, ghiacciai e nevi permanenti	68.7		La calotta glaciale che ricopre l'Isola di Saunders nella Baia di Baffin vicino alla Groenlandia
Acque sotterranee	30.1		Sorgente nelle montagne del Caucaso, in Asia occidentale. L'acqua sotterranea che emerge contiene minerali disciolti.
Ghiaccio al suolo e permafrost (suolo ghiacciato e acque sotterranee)	0.86		Suoli poligonali prodotto dal permafrost nella tundra ghiacciata dei Parchi nazionali dell'Artico occidentale, Alaska, USA.

Fonte d’acqua	Percentuale di acqua continentale	Immagine	Fonte
Laghi	0.26		Satpara Lake, uno dei laghi ad altitudine più elevata in Pakistan
Umidità del suolo	0.05		Terreno umido a Lüningsburg nella Bassa Sassonia, Germania
Atmosfera	0.04		Nuvole nel cielo di Muelle de El Quisco, Valparaiso, Chile, 1997
Acque di palude	0.03		La foresta paludosa d'acqua dolce di Ratargul a Sylhet, Bangladesh

Fonte d'acqua	Percentuale di acqua continentale	Immagine	Fonte
Fiumi	0.006		I meandri del fiume Yukon, nel Canada settentrionale
Acque biologiche	0.003		Una foglia di *Tradescantia zebrina* al microscopio mostra gli stomi verdi, che rilasciano acqua in atmosfera nella traspirazione

Più di due terzi dell'acqua continentale si trova nelle calotte di ghiaccio delle regioni polari e nelle zone montuose coperte di ghiaccio e neve. Quest'acqua si accumula sotto forma di neve che si trasforma in calotte glaciali e ghiacciai e viene riciclata quando questi si sciolgono.

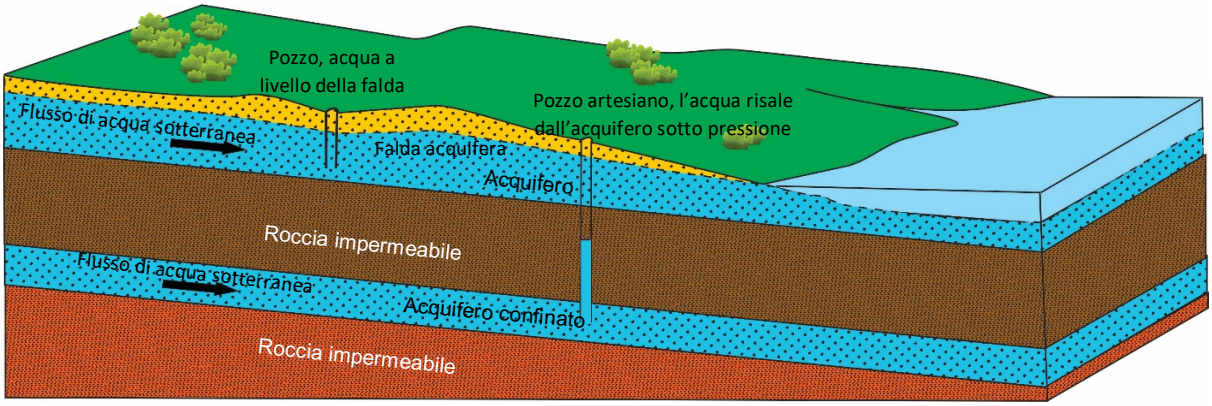
La maggior parte dell'acqua continentale rimanente si trova nel sottosuolo, negli spazi dei pori della roccia, come acqua freatica o, dove il terreno è ghiacciato, come permafrost. Meno dell'1% dell'acqua terrestre forma tutti i laghi, i bacini e i sistemi fluviali. Una minuscola percentuale dell'acqua terrestre si trova nell'atmosfera sotto forma di vapore acqueo invisibile e di gocce d'acqua visibili nelle nuvole. L'acqua atmosferica viene rapidamente riciclata e portata sui continenti attraverso la pioggia e altri tipi di precipitazioni come la neve e la grandine.

Quando piove, una parte della pioggia scorre sul terreno fino ai ruscelli e ai piccoli corsi d'acqua, per poi confluire nei torrenti e nei fiumi più grandi. Una parte, però, permea nel terreno, un processo noto come **infiltrazione**. Gli animali e le piante presenti nel terreno utilizzano gran parte dell'acqua del suolo e una parte di essa viene riciclata nell'atmosfera dalle piante. Le piante assorbono l'acqua attraverso le radici, la spostano lungo i fusti e i tronchi e la disperdono attraverso le foglie sotto forma di vapore acqueo nell'aria; questo è il processo di **traspirazione**.

Una parte dell'acqua scorre più in basso, nella roccia. L'acqua scende attraverso la roccia fino a raggiungere un livello in cui tutti i piccoli spazi dei pori sono pieni d'acqua. Questa zona è chiamata **zona di saturazione** perché è satura di tutta l'acqua che può contenere. La parte superiore della zona di saturazione è la **falda acquifera**. Se si guarda in un pozzo, si può vedere la superficie dell'acqua molto più in basso: questa è la falda freatica. L'acqua nella zona satura si chiama **acqua di falda** e scorre nel sottosuolo fino a quando non esce di nuovo dalla roccia in una **sorgente**, in una palude o in un acquitrino, oppure si riversa in un fiume, in un lago o nel mare. Le acque sotterranee scorrono nel sottosuolo solo lentamente e talvolta possono rimanere nella roccia per migliaia di anni.
Le rocce che contengono acqua che può essere estratta per essere utilizzata sono chiamate **acquiferi**. La maggior parte degli acquiferi è aperta all'aria, ma a volte la roccia che contiene l'acqua freatica si immerge al di sotto di uno strato impermeabile, per cui l'acquifero diventa un acquifero confinato e l'acqua che contiene è **acqua artesiana**. Quando si perforano i pozzi negli acquiferi confinati, l'acqua risale al livello che aveva quando è stata confinata (Figura 4.36). Se

l'area in cui è stata confinata per la prima volta si trova al di sopra della superficie terrestre in cui viene praticato il foro, l'acqua fuoriesce dal terreno in un **pozzo artesiano**.

Figure 4.36. Acquifero



4.2.1.2 Riserve d'acqua

L'acqua è forse la nostra risorsa più importante in assoluto. Senza acqua, la vita è impossibile e l'uomo non può sopravvivere. L'acqua è fondamentale per l'agricoltura e per molte esigenze industriali, oltre che per le nostre necessità domestiche quotidiane. A livello globale, la maggior parte dell'acqua viene utilizzata per l'agricoltura; circa un quarto dell'utilizzo globale dell'acqua viene fatto dall'industria e solo l'8% circa dalle famiglie di tutto il mondo. Tuttavia, solo l'85% circa della popolazione mondiale ha accesso all'acqua pulita del rubinetto. Il restante 15% delle persone deve raccogliere l'acqua da fiumi, laghi o pozzi, anche se è noto che l'accesso all'acqua pulita è il fattore più importante per la salute umana.

L'acqua del rubinetto, che proviene da acque superficiali di fiumi e bacini o da acque sotterranee, deve essere trattata per renderla idonea all'uso. Il trattamento prevede la decantazione e la filtrazione per rimuovere i sedimenti fangosi in sospensione e metodi chimici e biologici per rimuovere materiale organico come batteri, alghe e virus.

La maggior parte dell'acqua sulla Terra proviene da fonti superficiali, ma circa il 40% è costituito da acque sotterranee pompate da falde acquifere. Le acque sotterranee vengono filtrate naturalmente attraverso il sottosuolo e sono quindi generalmente molto più pulite delle acque di superficie. Le forniture commerciali di acque sotterranee sono comunque sottoposte a trattamento, anche se la maggior parte dell'acqua prelevata direttamente dalle sorgenti può essere bevuta in sicurezza. In effetti, molte acque di sorgente vengono imbottigliate per la vendita senza alcun trattamento.

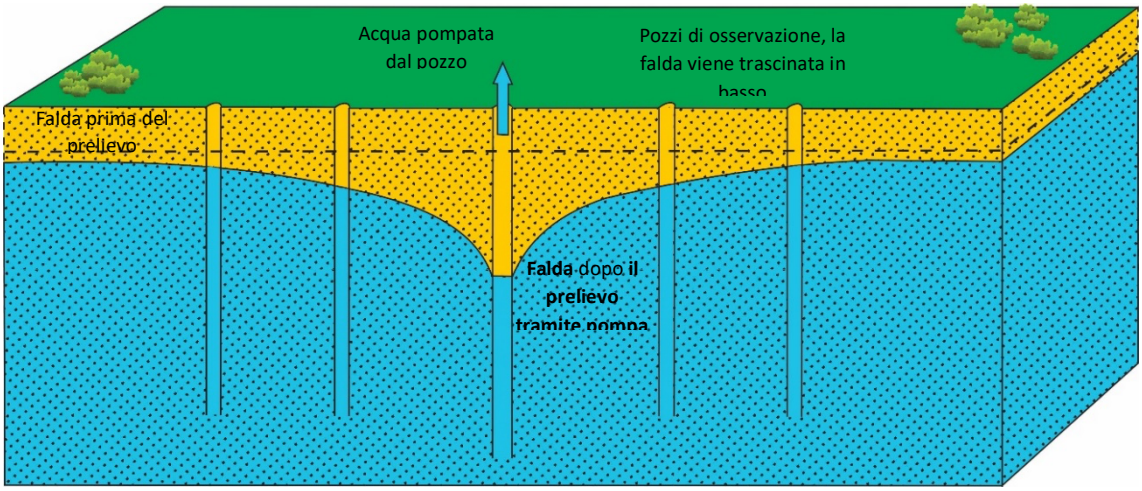
Box 4.11. Acqua di sorgente commercializzata

L'offerta di acque sorgente in bottiglia è molto ampia.



Gli idrogeologi esplorano l'acqua studiando la morfologia del terreno e la geologia di un'area e poi eseguono una trivellazione di prova, chiamata pozzo. Una serie di pozzi di osservazione viene perforata in linea su entrambi i lati del pozzo di prova e l'acqua viene pompata dal pozzo di prova, abbassando la falda acquifera. Se l'abbassamento si estende su un'ampia area, l'acqua fluisce facilmente nel pozzo di prova ed è probabile che il progetto abbia successo. Tuttavia, se l'area di abbassamento è piccola, la roccia non è molto permeabile e il pozzo potrebbe essere inaffidabile come fonte di approvvigionamento idrico (Figura 4.37).

Figura 4.37. Prova di pompaggio del pozzo



Una volta trovato un pozzo affidabile, l'acqua deve essere estratta dal pozzo attraverso una pompa (a meno che non si tratti di un pozzo artesiano). In passato il pompaggio avveniva a mano o con enormi macchine a vapore. Oggi le pompe a mano sono ancora utilizzate nelle zone rurali, insieme alle pompe a vento, ma altrove le acque sotterranee vengono pompate con pompe diesel o elettriche.

Box 4.12. Metodi di pompaggio delle acque sotterranee



Stazione di pompaggio vittoriana, a Londra, in Inghilterra, che un tempo conteneva un'enorme macchina di pompaggio a vapore



Pompe eoliche, Namaqualand, Sudafrica



Pompa diesel per acque sotterranee in uso oggi, Inghilterra



Una moderna pompa a mano, stazione ferroviaria di Pindial, India

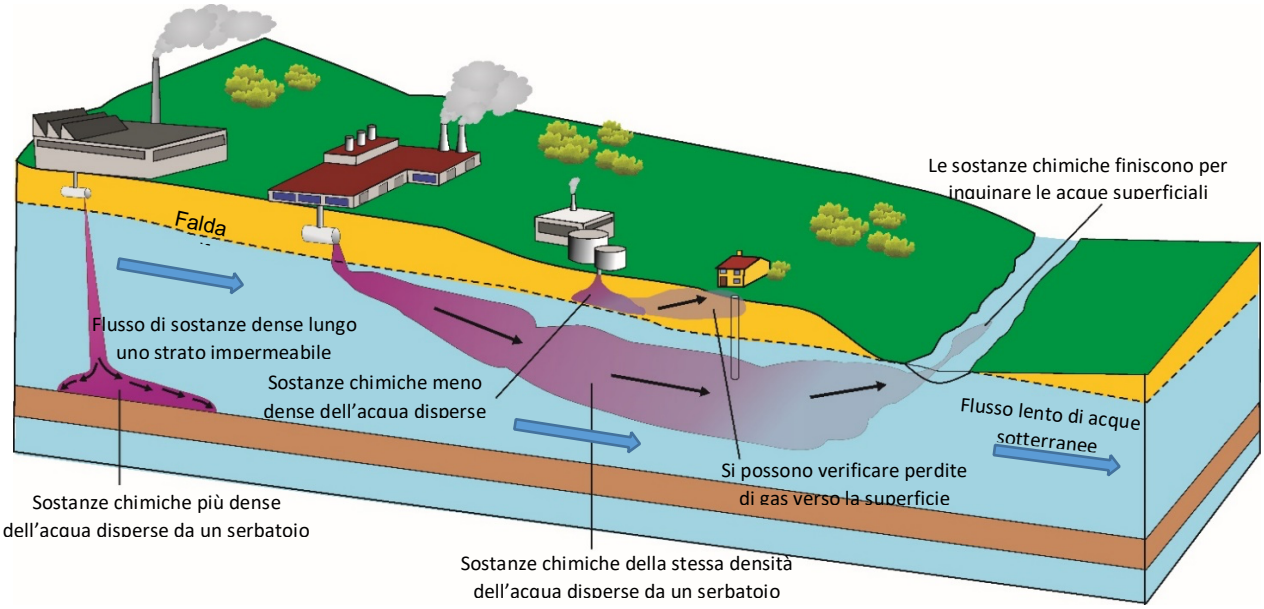
4.2.1.3 Contaminazione dell'acqua

Le acque superficiali e sotterranee possono essere contaminate da fonti naturali, ma la maggior parte dell'inquinamento dell'acqua è dovuto all'attività umana. La contaminazione può essere causata da: fluidi leggeri (a bassa densità), come i carburanti, che galleggiano sulle acque superficiali o sulla falda acquifera; fluidi pesanti (ad alta densità) che affondano sul fondo dei serbatoi o delle falde acquifere; o da un'ampia gamma di materiali sospesi o disciolti nell'acqua.

I principali contaminanti delle acque superficiali provengono dalle attività urbane. Tra questi vi sono il sale e l'olio delle strade, la contaminazione industriale dovuta alla perdita di serbatoi di prodotti chimici e di carburante, i cumuli di rifiuti delle miniere e le persone che si disfano di detergenti, detersivi, olio, vernici e prodotti per il giardino versandoli nello scarico. Anche l'agricoltura produce rifiuti, tra cui scarti animali, fertilizzanti e pesticidi.

Esiste anche un inquinamento sotterraneo delle acque sotterranee. Può provenire da discariche urbane, da perdite di fognature e fosse settiche, da condutture industriali e da pozzi mal costruiti nelle aree urbane e rurali (Figura 4.38).

Figu a 4.38. Pennacchi di inquinamento delle acque sotterranee



I geologi ambientali lavorano per prevenire l'inquinamento delle acque superficiali e sotterranee. Cercano aree di roccia impermeabile per lo smaltimento dei rifiuti, in modo che i fluidi dei rifiuti non si disperdano e inquinino le riserve idriche; controllano anche i siti di smaltimento dei rifiuti industriali e delle discariche per individuare eventuali perdite. La protezione dell'ambiente può comprendere la raccolta regolare di campioni di acqua di superficie e l'analisi della loro contaminazione, nonché il monitoraggio di pozzi di prova intorno a potenziali siti di contaminazione. Quando si verifica una contaminazione delle acque sotterranee, questa può essere risanata, ma i metodi di bonifica sono molto costosi.

4.2.2 Acque oceaniche

Gli oceani e le acque marine coprono oggi più di due terzi della superficie terrestre, anche se nel passato geologico ci sono stati periodi in cui gli oceani coprivano aree molto più grandi o molto più ridotte. I principali oceani profondi della Terra comprendono l'Oceano Pacifico, l'Oceano Atlantico, l'Oceano Indiano, l'Oceano Artico e l'Oceano Meridionale, e ci sono molti mari sulle piattaforme continentali.

4.2.2.1 Composizione dell'acqua

L'acqua di mare contiene circa il 3,5% di sale disciolto; quindi, la salinità dell'acqua di mare normale è del 3,5%. Il sale è costituito principalmente da ioni di sodio e cloro, ma comprende anche magnesio, calcio, potassio, idrogeno carbonato, solfato e altri ioni minori. Questi sono stati portati in mare dai fiumi in un lontano passato geologico e vi si sono concentrati.

Quando l'acqua dolce dei fiumi si mescola con l'acqua di mare, la salinità si riduce e l'acqua diventa salmastra. Altrove, nei mari poco profondi in forte evaporazione, la rimozione dell'acqua provoca un aumento della salinità fino a quando l'acqua diventa così sovrasatura di sale che si formano cristalli che si depositano sul fondo marino. L'acqua di mare ha un sapore sgradevole, ma quella supersatura ha un sapore davvero orribile e può irritare gli occhi.

L'acqua dolce è meno densa di quella salata, per cui quando le acque dei fiumi sfociano in mare, la loro acqua galleggia in superficie senza mescolarsi per molto tempo. Di solito c'è un confine netto tra l'acqua dolce sopra e l'acqua marina più salata sotto.

4.2.2.2 Maree

Le aree costiere sono interessate dalle maree, che sono causate dall'attrazione gravitazionale della Luna e del Sole legata alla rotazione della Terra.

Figura 4.39. Bassa e alta marea - Ponte Humber, Inghilterra

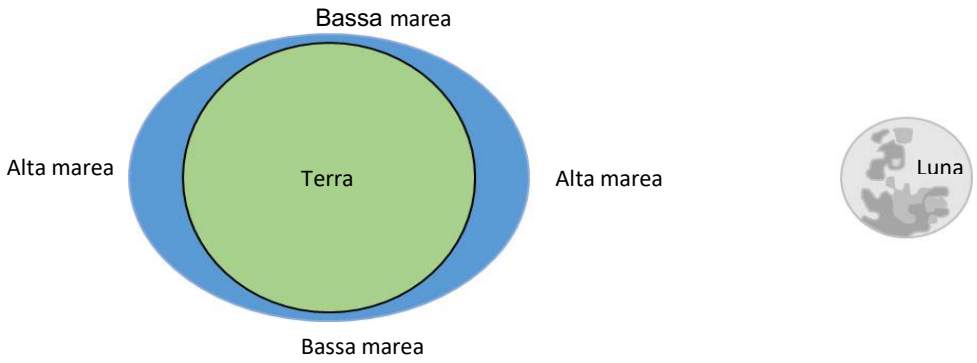




Nella maggior parte delle zone costiere si verificano ogni giorno due alte maree separate da due basse maree. La acqua sale come marea di piena per diverse ore fino a raggiungere il livello più alto, l'alta marea. Poi l'acqua si ritira lentamente fino a raggiungere il punto più basso, la bassa marea, prima che il ciclo ricominci. L'aumento e la diminuzione delle maree spostano la zona d'onda in alto e in basso per le spiagge e le aree costiere rocciose. Nel frattempo, le piane di marea vengono inondate da acqua piuttosto ferma, prima che questa venga drenata, lasciandole nuovamente esposte.

La causa principale delle maree è l'attrazione gravitazionale della Luna. L'attrazione della Luna provoca un'alta marea sul lato della Terra su cui si trova la Luna e anche sul lato opposto, con basse maree nel mezzo, come mostrato nella Figura 4.40. La Luna impiega circa 29 giorni per girare intorno alla Terra, mentre la Terra ruota su se stessa nell'arco di una giornata; quindi, se consideriamo la Luna come un punto "fermo", la maggior parte delle aree terrestri sperimenta due alte e due basse maree al giorno, a causa della rotazione della Terra stessa. Dato che il tempo necessario perché si completi l'intero fenomeno è di circa 25 ore, lo schema delle maree si sposta di circa un'ora al giorno.

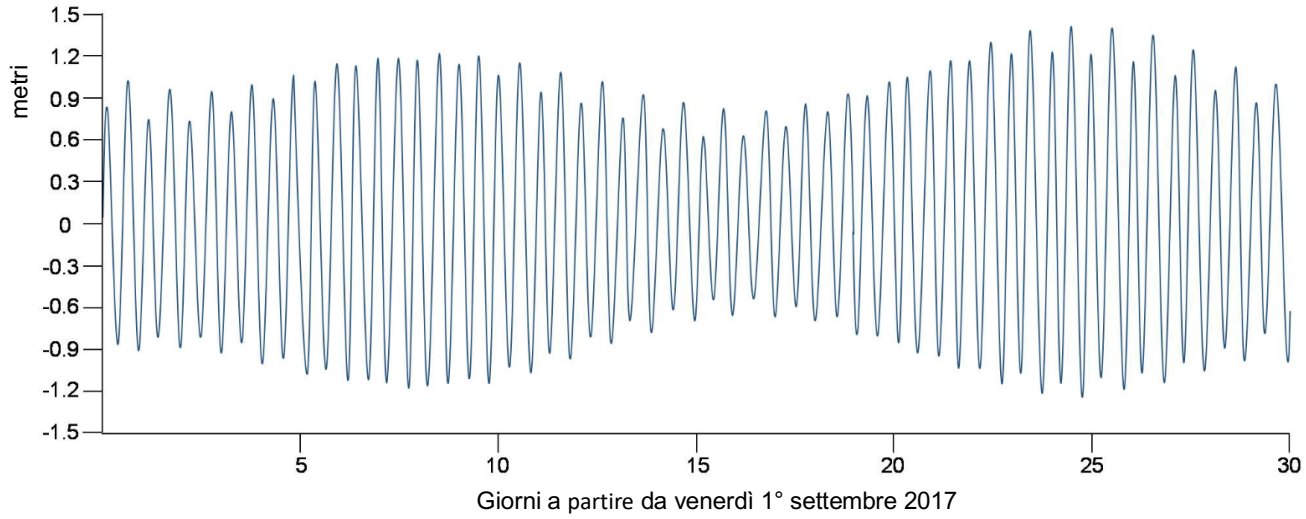
Figura 4.40. La luna causa i rigonfiamenti di marea



Sebbene il Sole sia molto più lontano, è molto più grande della Luna e quindi ha anch'esso un effetto. Ciò significa che quando la Luna e il Sole sono allineati, c'è una maggiore attrazione, con alte maree più alte e basse maree più basse - queste sono le **maree equinoziali**. (le maree equinoziali sono di solito in primavera e in autunno). Tuttavia, quando le forze di attrazione della Luna e del Sole si trovano ad angolo retto l'una rispetto all'altra, la loro forza di attrazione gravitazionale complessiva si riduce, con alte maree più basse e basse maree più alte - le **maree di quadratura**.

Il risultato per la maggior parte delle aree costiere è una carta delle maree come quella mostrata nella Figura 4.41. Il grafico mostra che ogni giorno ha due basse e due alte maree, ma che l'alta marea è più alta e la bassa marea è più bassa intorno all'8° e al 25° giorno: questi sono i giorni delle maree equinoziali. Le maree di quadratura si verificano intorno al 3° e al 16° giorno. Se volete vedere le più ampie distese di spiagge e fanghi piatti di marea, visitate la costa durante la bassa marea di primavera. Se invece volete vedere la maggiore erosione costiera di coste scoscese, visitatela durante le massime maree di primavera, quando le maree portano le onde più in alto sulla spiaggia e sulle scogliere. Allo stesso tempo, le piane di marea sono completamente allagate.

Figura 4.41. Cambiamenti di marea - un esempio da Bridgeport, Connecticut, USA



4.2.2.3 Onde

Quando si osservano le onde in riva al mare, sembra che spostino enormi volumi d'acqua. Tuttavia, se si osserva un oggetto che galleggia al di là della linea dei frangenti, si noterà che si muove solo in alto e in basso e difficilmente si sposta lateralmente. Questo perché, al passaggio di una cresta d'onda, l'acqua si alza e si sposta un po' in avanti, mentre al passaggio di una depressione si abbassa e si sposta un po' all'indietro, perché l'acqua in superficie si muove semplicemente in un cerchio verticale. In profondità, sotto ogni onda, l'acqua si muove in cerchi più piccoli fino a quando

l'onda si spegne in profondità. Quindi, anche se le onde di tempesta negli oceani aperti possono essere alte diversi metri, non causano alcun movimento orizzontale complessivo dell'acqua.
Quando le onde raggiungono la costa, l'attrito sul fondale marino aumenta, quindi la base dell'onda rallenta, facendo crescere l'onda. Alla fine, diventa abbastanza alta da collassare in avanti in un frangente. Quando i frangenti sono alti, sono adatti al surf. Quando il frangente crolla sulla spiaggia, un fiume d'acqua si riversa sulla spiaggia, ma poi torna indietro per gravità, fino all'arrivo dell'onda successiva.

Figura 4.42. Onde – grande e piccola





Le onde sono causate dai venti che soffiano sulla superficie del mare in oceano aperto. L'attrito tra il vento e l'acqua provoca la formazione di piccole onde, che vengono spinte dal vento. Quindi, più lungo è il tempo e maggiore è la distanza dell'oceano su cui soffia il vento, più grandi diventano le onde; venti più forti producono onde più grandi. Le migliori spiagge per il surf, quindi, con le onde più grandi, si trovano di fronte agli oceani aperti.
Le onde e le maree, lavorando insieme, producono una serie di caratteristiche costiere.

Tabella 4.24. Caratteristiche costiere prodotte da onde e maree

Processo	Descrizione	Immagine	Fonte
Formazione di spiaggia ad opera dei temporali	Quando una tempesta coincide con l'alta marea equinoziale, la mareggiata spinge le onde della tempesta ancora più in alto sulla spiaggia rispetto al normale, formando un banco di ciottoli e ghiaia sul fondo della spiaggia.		Una spiaggia interessata da un temporale Veluga a Batanes, Filippine
Formazione di piane di marea	Durante le alte maree, e in particolare durante le alte maree equinoziali, le piane di marea sono coperte dall'acqua; il fango si deposita quando l'acqua è ferma formando uno strato ogni volta che la piana viene inondata; gli strati si accumulano nel tempo fino a diventare piane di marea.		Piana di fango di marea vicino a Palau Melaka, Malacca, Malesia
Lingua di terra	Quando le onde colpiscono una spiaggia con un angolo, l'impeto dell'onda che crolla spinge la sabbia in diagonale verso l'alto, ma l'onda torna dritta verso il basso, trasportando la sabbia. In questo modo la sabbia si sposta costantemente lungo la spiaggia con un movimento che ricorda i denti di una sega. Alla fine della spiaggia, la sabbia viene trasportata verso il mare, formando una lingua di terra.		Vista satellitare di Farewell Spit, sulla punta settentrionale dell'Isola del Sud, Nuova Zelanda

4.2.2.4 Circolazione dei fluidi su larga scala sulla Terra

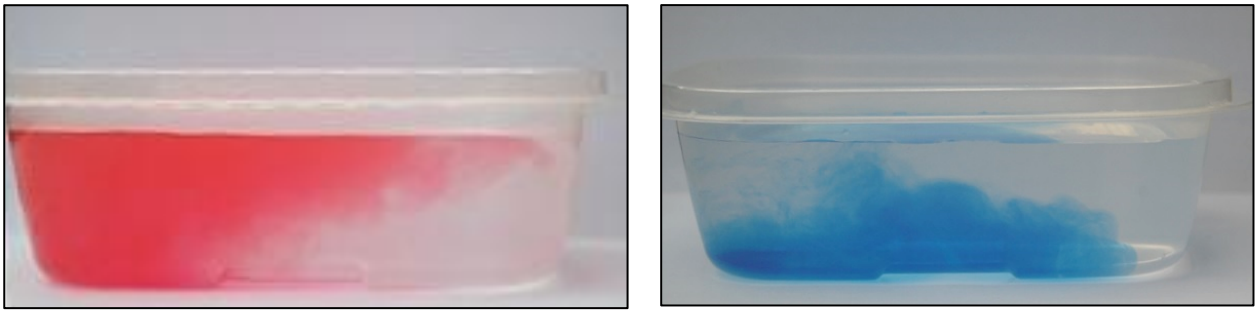
Sia gli oceani che l'atmosfera sono fluidi e forze simili agiscono su questi fluidi producendo effetti simili.

Quando entrambi i tipi di fluido (acqua e aria) sono riscaldati, diventano meno densi del fluido circostante e quindi salgono; quando raggiungono quote più elevate e più fredde, fluiscono verso l'esterno. Negli oceani, questo significa che l'acqua riscaldata nelle regioni tropicali fluisce sotto forma di correnti verso l'esterno della superficie oceanica. Mentre l'acqua calda scorre lateralmente, l'acqua più fredda dal basso sale; quest'acqua è spesso ricca di sostanze nutrienti e quindi queste sono aree oceaniche ricche di vita. Nel frattempo, nell'atmosfera, l'aria calda in aumento esercita una minore pressione sulla superficie terrestre, causando una **bassa pressione**. L'aria calda sale e scorre lateralmente nell'alta atmosfera. Questi flussi fluidi fanno parte della convezione.

Quando i fluidi si raffreddano diventano più densi e si muovono verso il basso. Negli oceani, l'acqua più fredda si trova nelle regioni polari. Quest'acqua fredda affonda e scorre sui fondali oceanici. Nell'atmosfera, l'aria fredda fluisce verso il basso, causando **alta pressione**. Quando raggiunge la superficie terrestre, fluisce lateralmente sulla superficie verso le aree a bassa pressione; questo flusso d'aria superficiale è il vento. Questi flussi completano il ciclo della convezione.

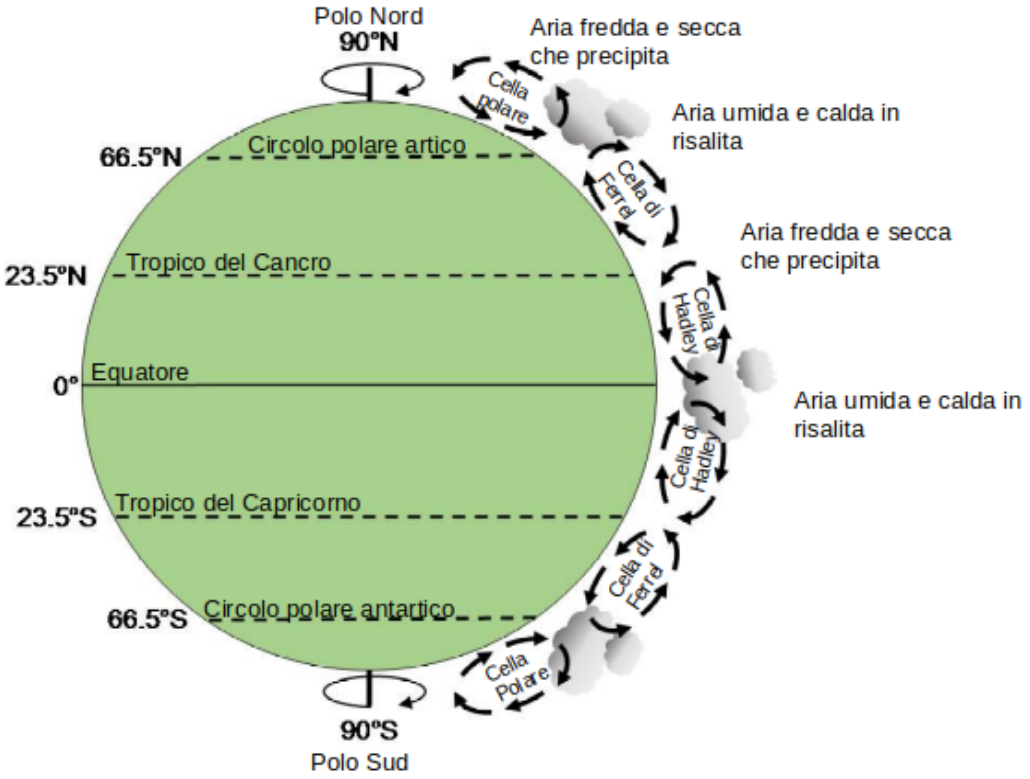
I flussi di fluidi caldi e freddi avvengono anche su scale molto più piccole. Spesso si può vedere il luccichio dell'aria calda che sale su una stufa o un fuoco; l'opposto accade se si apre un congelatore verticale a piedi nudi, si può sentire l'aria fredda che scorre verso il basso sulla pelle. Se si fa un bagno e si aggiunge altra acqua calda, spesso si può sentire l'acqua calda che scorre sulla superficie, mentre se si aggiunge acqua fredda, questa scorre sul fondo della vasca e non è così piacevole (Figura 4.43).

Figura 4.43. Corrente calda di colore rosso che scorre sulla superficie; corrente fredda di colore blu che scorre sul fondo - entrambi in un contenitore di plastica



Le aree equatoriali, essendo molto calde, hanno aria in risalita e bassa pressione. L'aria calda che scorre nell'alta atmosfera diventa più fredda e sprofonda nelle aree desertiche subtropicali, come mostrato nella Figura 4.44. Quando l'aria che fluisce verso il basso raggiunge il suolo, parte di essa torna verso l'Equatore per completare la circolazione tropicale/subtropicale chiamata cella di Hadley. Ma una parte dell'aria che ha raggiunto il suolo scorre verso i poli. Attraversando i mari caldi, diventa più calda e alla fine sale. Nell'alta atmosfera, parte dell'aria torna verso l'Equatore, per completare la cella di circolazione di Ferrel. Una parte soffia verso i poli, diventando più fredda. Alla fine, l'aria si inabissa sopra i poli e scorre verso l'equatore sulla superficie terrestre, completando la cella di circolazione polare.

Figura 4.44. Circolazione delle masse d'aria sulla Terra



Questo semplice schema di circolazione atmosferica è influenzato dalla rotazione della Terra. I flussi d'aria nell'emisfero settentrionale sono deviati in senso orario, mentre quelli nell'emisfero meridionale sono deviati in senso antiorario. Si ottiene così un modello generalizzato di circolazione dei venti di superficie, come illustrato nella Figura 4.45.

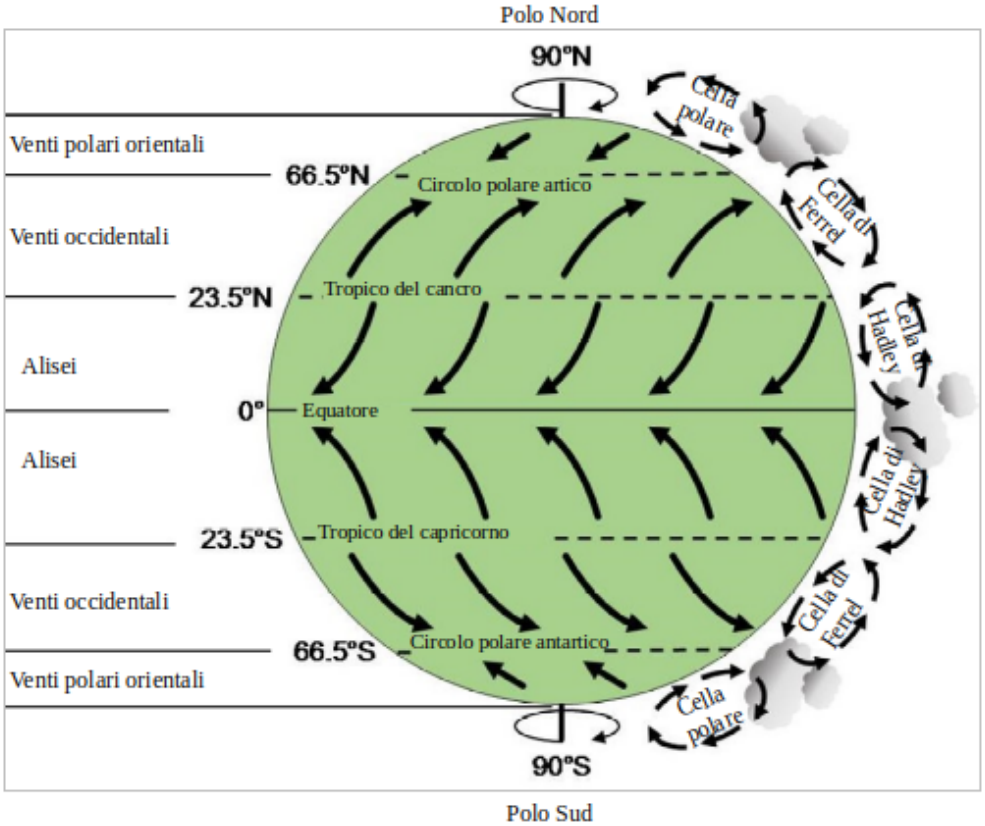
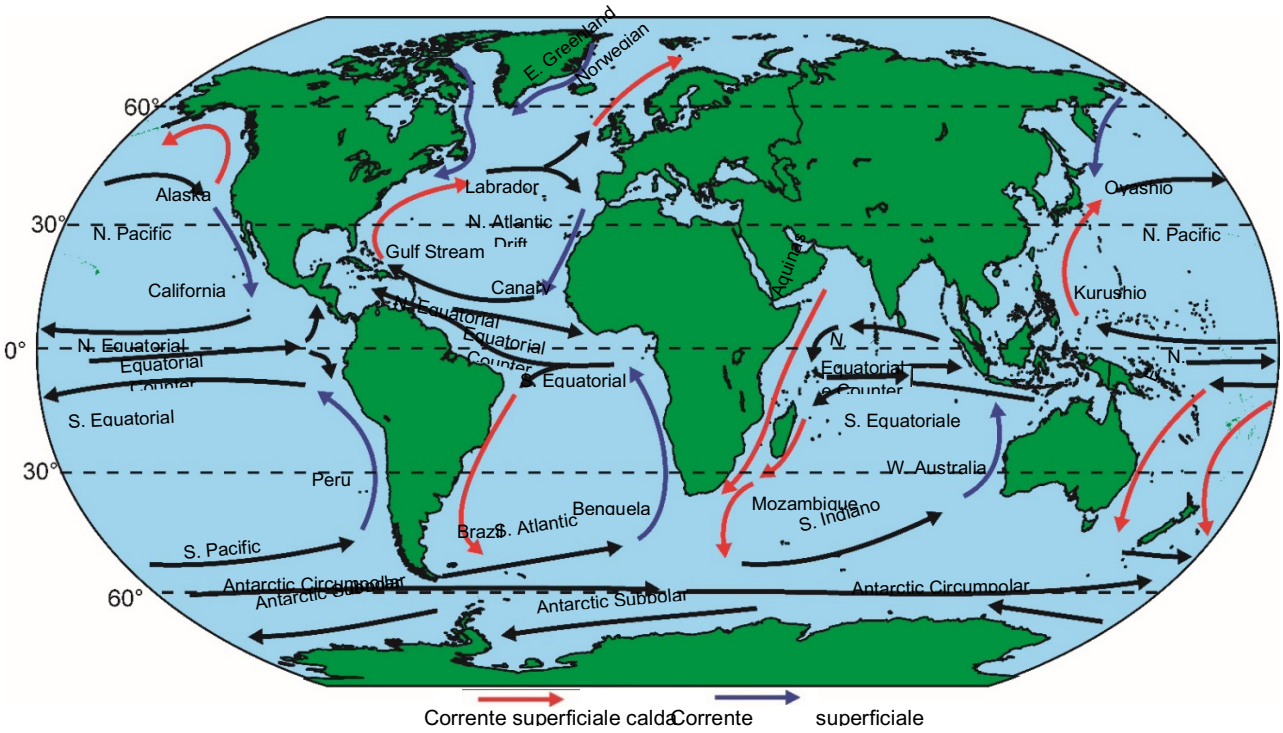


Figura 4.45. Schema generale dei venti di superficie sulla Terra

I venti superficiali generali alla base della cella di Hadley sono gli Alisei orientali. Quelli alla base della cella di Ferrel sono i Westerly Winds (venti che soffiano da ovest) e i venti superficiali della cella polare sono i Venti Polari orientali.

I venti globali trascinano la superficie dell'oceano, facendola muovere nella direzione in cui soffia il vento e aggiungendosi alla direzione naturale del flusso: in senso orario nell'emisfero settentrionale e in senso antiorario nell'emisfero meridionale. Le principali correnti oceaniche di superficie ruotano quindi in senso orario nell'emisfero settentrionale e in senso antiorario nell'emisfero meridionale, spinte dalla rotazione della Terra (Figura 4.46).

Figura 4.46. Circolazione superficiale degli oceani

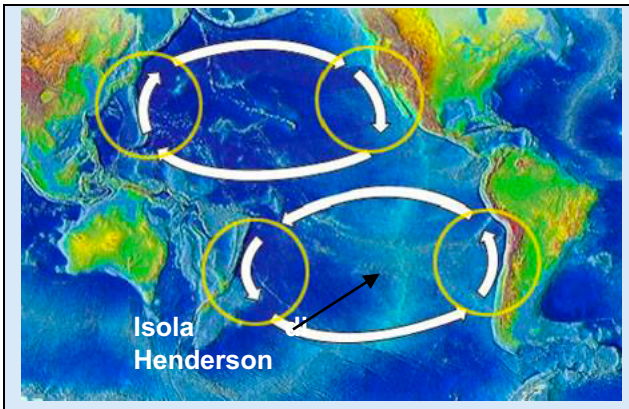


Box. 4.13. Correnti oceaniche e l'isola più inquinata del mondo

Henderson Island, nel sud dell'Oceano Pacifico, è disabitata e una delle isole più lontane da qualsiasi continente. La scienziata Jennifer Lavers, che ha guidato una spedizione sull'isola nel 2015, è rimasta stupita dalla quantità di inquinamento da plastica che si era accumulata lì. Ha dichiarato: "Ho visto molta plastica durante i miei viaggi – in alcuni dei luoghi più remoti – ma Henderson Island è la peggiore. La quantità di plastica è davvero allarmante e ti toglie il fiato." La spedizione ha trovato fino a 671 pezzi di plastica per ogni metro quadrato di spiaggia e ha stimato che le spiagge di tutta l'isola contengano oltre 37 milioni di frammenti di detriti – il più grave inquinamento da plastica mai registrato al mondo. La situazione stava danneggiando gravemente la fauna selvatica: una tartaruga è stata trovata strangolata da uno spago di plastica e i paguri utilizzavano contenitori cosmetici di plastica come rifugio.

L'inquinamento si accumula vicino al centro del vortice del Pacifico meridionale, una corrente oceanica superficiale che circola in senso antiorario nel sud dell'Oceano Pacifico, il South Pacific Gyre, trasportando i detriti galleggianti verso il centro.

Jennifer Lavers ha aggiunto: "Una volta che la plastica entra nell'oceano, è praticamente impossibile con la tecnologia attuale rimuoverla. Bisogna concentrarsi per evitare che raggiunga il mare." Ha osservato molti spazzolini da denti di plastica spiaggiati e ha spiegato che gli spazzolini realizzati in bambù e fibra di legno costano quanto quelli in plastica ma non inquinano la Terra per centinaia di anni. Tutti dovrebbero smettere di abbandonare rifiuti sulle spiagge e utilizzare meno plastica, optando per materiali meno dannosi.



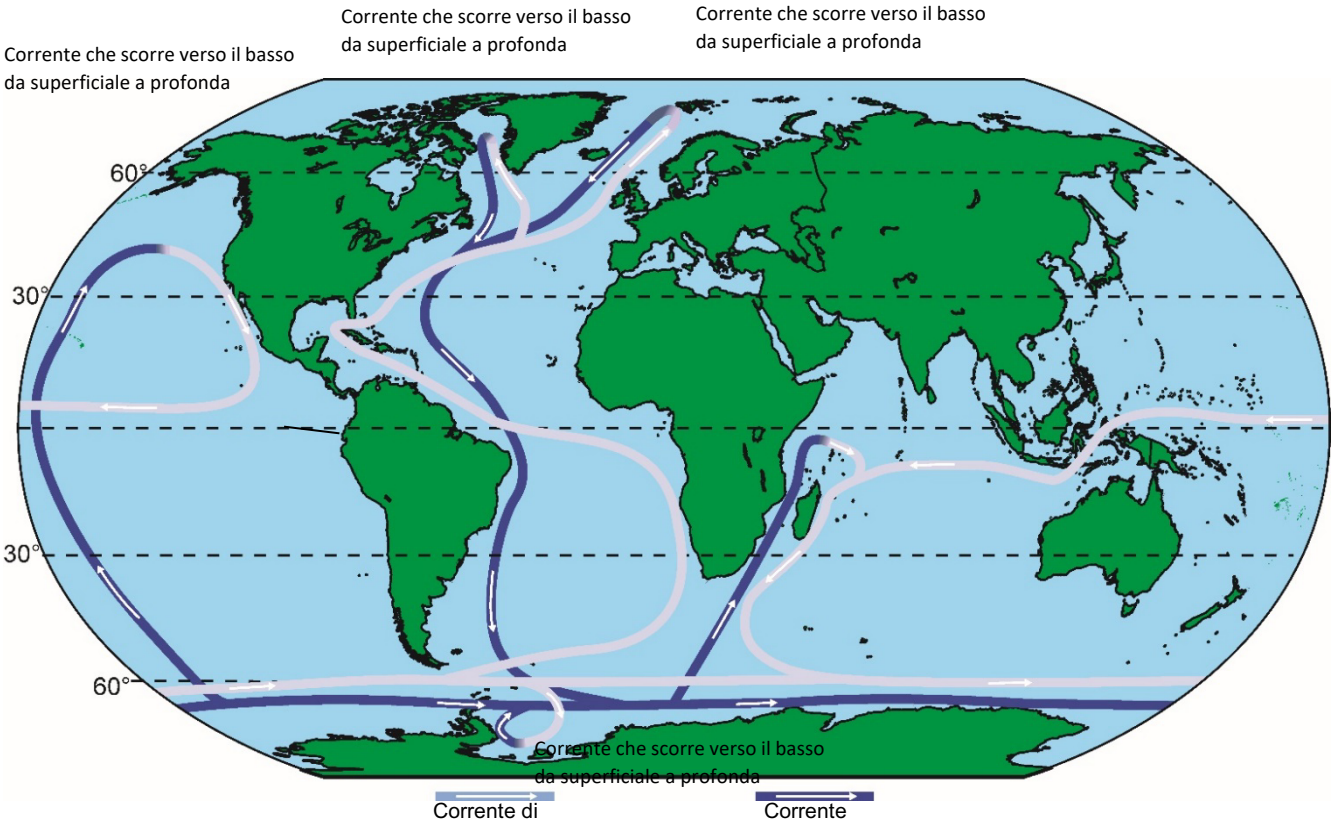
Correnti oceaniche superficiali circolanti nell'Oceano Pacifico settentrionale meridionale



La spiaggia inquinata dell'isola disabitata di Henderson nel remoto Oceano Pacifico meridionale

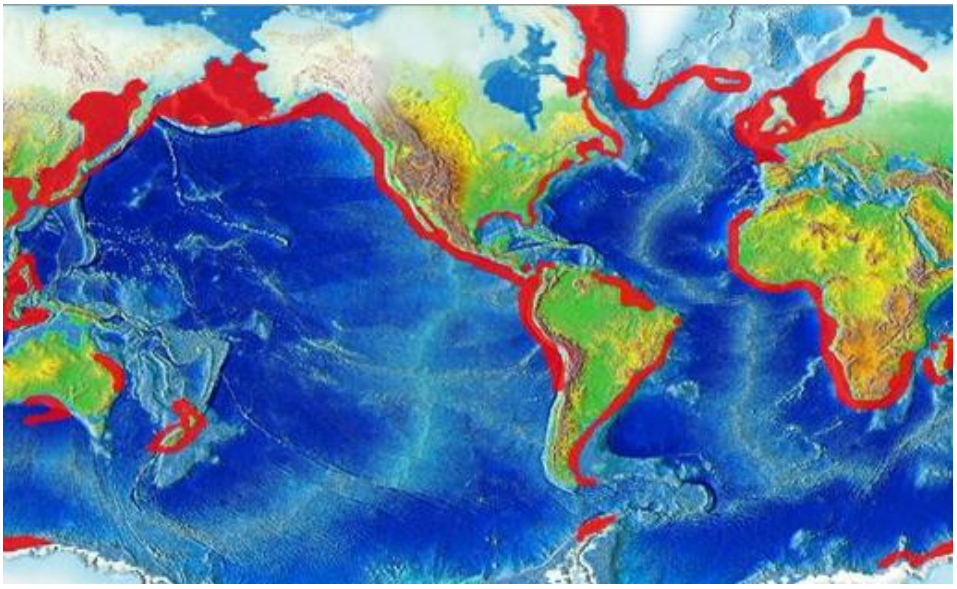
Le correnti oceaniche di superficie sono collegate alle correnti oceaniche profonde. Quando le correnti oceaniche calde fluiscono verso i poli, diventano più fredde e più saline a causa dell'evaporazione. Questo aumenta la loro densità, quindi affondano vicino ai poli come correnti fredde e dense di acqua salata. Questo produce il modello di circolazione da bassa a profonda mostrato nella Figura 4.47.

Figura 4.47. Il modello di circolazione - da superficiale a profondo - degli oceani terrestri



La risalita di acque oceaniche profonde, fredde e ricche di nutrienti, causata dai venti che allontanano le acque superficiali più calde, provoca una fioritura di plancton, che fornisce il cibo nelle migliori zone di pesca della Terra, come mostrato nella Figura 4.48.

Figura 4.48. Le migliori zone di pesca, indicate in rosso, sono prodotte dalla risalita di acque oceaniche fredde e profonde.



Le interazioni mostrano quanto i sistemi terrestri siano strettamente interconnessi. Il flusso di aria atmosferica, o vento, guida le correnti oceaniche di superficie, mentre l'oceano riscalda l'aria, contribuendo alla circolazione atmosferica. La risalita dell'acqua ricca di nutrienti nell'oceano favorisce un'abbondante vita marina. L'atmosfera, l'idrosfera e la biosfera sono chiaramente strettamente legate da questi processi.

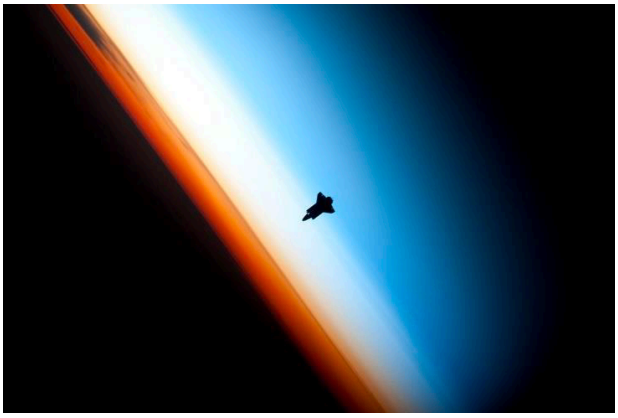
4.3 Atmosfera

L'atmosfera terrestre, come le altre sfere, è fondamentale per la vita sulla Terra. L'atmosfera è composta da diversi strati, ma lo strato più importante per la vita è quello più basso, la troposfera; questo è il più ricco di ossigeno e ha la temperatura adatta alla vita. La troposfera è spessa circa 16 km all'Equatore e si assottiglia verso i poli. Se lo spessore della crosta terrestre fosse equivalente a un francobollo attaccato a un pallone da calcio, allora la troposfera sarebbe come un francobollo di metà spessore attaccato sopra. Anche lo strato sopra la troposfera è importante, poiché contiene l'ozono, che ci protegge dalle radiazioni ultraviolette dannose del Sole (Figure 4.49 e 4.50).

Figura 4.49. La Terra simile a un "marmo blu" che mostra il sottile strato di atmosfera in viola intorno all'esterno



Figura 4.50. Space Shuttle Endeavour in orbita nella parte esterna dell'atmosfera, mostrando lo strato di troposfera arancione e lo strato bianco sovrastante che contiene ozono



4.3.1 Composizione atmosferica

Quando la Terra primitiva si raffreddava oltre 4000 milioni di anni fa, qualsiasi atmosfera precoce che si era formata fu spazzata via dal vento solare, mentre la Terra subiva bombardamenti di meteoriti. Tuttavia, con la diminuzione di questi bombardamenti, intensa attività vulcanica aggiunse acqua, anidride carbonica e altri gas come azoto, metano e zolfo a una nuova atmosfera. Gran parte dell'acqua cadde sotto forma di pioggia dall'atmosfera, formando i primi oceani. Questa atmosfera primitiva non conteneva ossigeno. Circa 2500 milioni di anni fa, nei mari si svilupparono i primi batteri capaci di fare la fotosintesi. Questi batteri assorbivano anidride carbonica dall'atmosfera e liberavano ossigeno attraverso la fotosintesi (Figura 4.51). L'ossigeno appena formato reagiva con altri materiali, come il ferro; quindi, solo circa 200 milioni di anni dopo l'ossigeno libero iniziò ad accumularsi nell'atmosfera.

Figura 4.51. Batteri microscopici degli oceani che effettuano la fotosintesi, assorbendo anidride carbonica e liberando ossigeno.



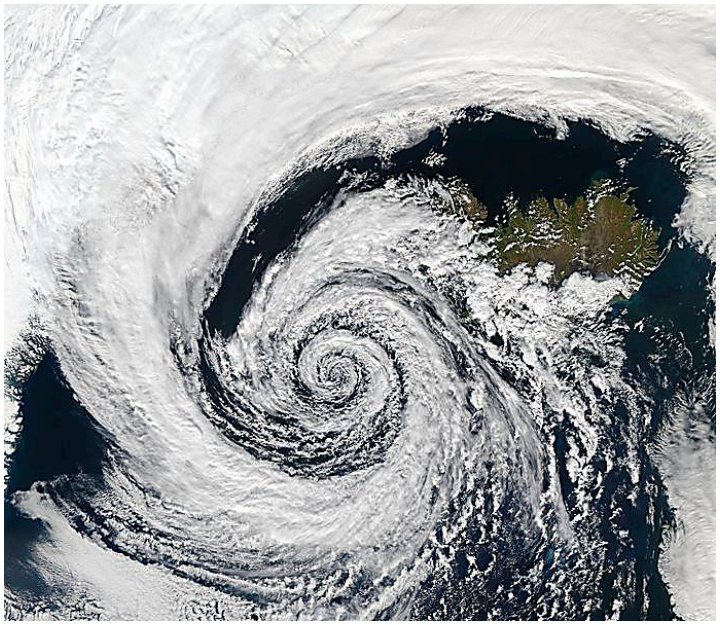
L'ossigeno libero nell'atmosfera rese per la prima volta la superficie terrestre un ambiente ossidante, ma fu solo alla fine del tempo Precambriano, con l'inizio del Cambriano 541 milioni di anni fa, che gli animali che utilizzavano ossigeno divennero abbondanti sulla Terra. Da allora, le percentuali dei diversi gas che compongono l'atmosfera hanno continuato a cambiare. L'atmosfera odierna contiene il 78,09% di azoto, il 20,95% di ossigeno, lo 0,93% di argon e lo 0,04% di anidride carbonica, con piccole quantità di altri gas. Contiene anche una quantità variabile di vapore acqueo che può arrivare a oltre il 4%, ma questo non viene incluso nei calcoli percentuali dei gas atmosferici perché cambia così tanto.

La misura della quantità di vapore acqueo nell'aria è chiamata umidità. Quando l'aria raggiunge il 100% di umidità, non può trattenere ulteriore vapore acqueo. A questo punto, il gas invisibile inizia a cambiare stato, formando piccole gocce d'acqua liquide (in condensazione, nebbia, brina o nuvole). Le gocce possono quindi aggregarsi per formare gocce d'acqua o cristalli di ghiaccio, che cadono come pioggia o altre forme di precipitazione. L'aria molto umida risulta sgradevole se è calda (spesso chiamata "torrida") o fredda (spesso descritta come "fresca"), quindi le persone generalmente preferiscono condizioni di aria secca.

4.3.2 Flusso atmosferico

Il flusso globale dell'aria è guidato dalle diverse quantità di riscaldamento dell'aria che causano differenze di densità, insieme alla rotazione della Terra, come mostrato nella Sezione 4.2.2.4 sopra. Questi sono fattori chiave anche nei flussi d'aria più locali. Le masse d'aria calda si sollevano attraverso le regioni della Terra; mentre lo fanno, la rotazione della Terra le fa ruotare, in senso antiorario nell'emisfero settentrionale e in senso orario in quello meridionale. Queste masse d'aria in salita, che causano bassa pressione sulla superficie terrestre, sono chiamate cicloni. Alla base dei cicloni, sulla superficie terrestre, l'aria fluisce verso l'interno come venti a spirale, evidenziati dalle formazioni nuvolose della Figura 4.52.

Figura 4.52. Le nuvole a spirale di un ciclone vicino all'Islanda il 4 settembre 2003.



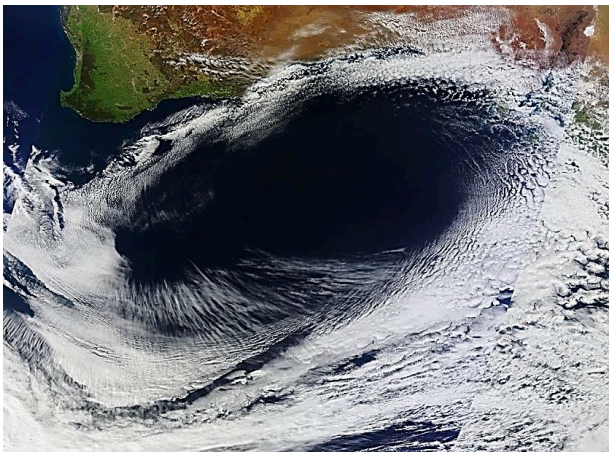
Le nuvole si formano perché l'aria in salita si raffredda e l'aria più fredda può trattenere meno acqua rispetto all'aria più calda. L'acqua si trasforma in gocce di nuvola, che poi producono pioggia o neve. Pertanto, i cicloni normalmente causano condizioni ventose e umide. Quando i cicloni si sviluppano sopra il mare nelle aree tropicali, il mare caldo contiene molta energia termica che può trasformare i cicloni in uragani o tifoni di dimensioni molto maggiori (Figura 4.53). Quando uragani e tifoni colpiscono la terra, portano venti di forza uragano e piogge molto intense. I forti venti possono spingere l'acqua del mare sulla costa in mareggiate che possono essere molto dannose quando si verificano in concomitanza con le maree alte.

Figura 4.53. L'uragano Isabel nell'Oceano Atlantico settentrionale nel 2003, con l'occhio caratteristico al centro. Sono stati registrati venti altamente distruttivi di 265 km/h con molti millimetri di pioggia.



Altrove, le masse d'aria fredde e in discesa ruotano anch'esse, in senso orario nell'emisfero settentrionale e in direzione opposta in quello meridionale. Questi anticicloni sono aree di alta pressione (Figura 4.54). L'aria che scende dolcemente nelle aree di alta pressione genera venti più leggeri rispetto ai cicloni e poco vento al centro. Mentre l'aria scende, si riscalda e può trattenere quantità crescenti di vapore acqueo; quindi, gli anticicloni presentano poche nuvole o pioggia.

Figura 4.54. Un anticiclone vicino all'Australia meridionale nel 2012. Venti e scie nuvolose spiraleggiano in senso antiorario (spiralerebbero in senso orario nell'emisfero settentrionale), ma l'aria in discesa e in riscaldamento non produce nuvole al centro.



Su scale ancora più piccole, l'aria fredda in discesa può intrappolare inquinamento, fumi e nuvole sottostanti, il che può essere molto sgradevole in alcune città (Figura 4.55). In altre aree, un forte riscaldamento del terreno può causare vortici di aria calda in risalita chiamati termiche, dove gli uccelli e i deltaplani possono planare per molte ore (Figura 4.56).

Figura 4.55. inquinamento da smog a Shanghai, Cina, intrappolato sotto l'aria fresca che tende a fluire verso il basso



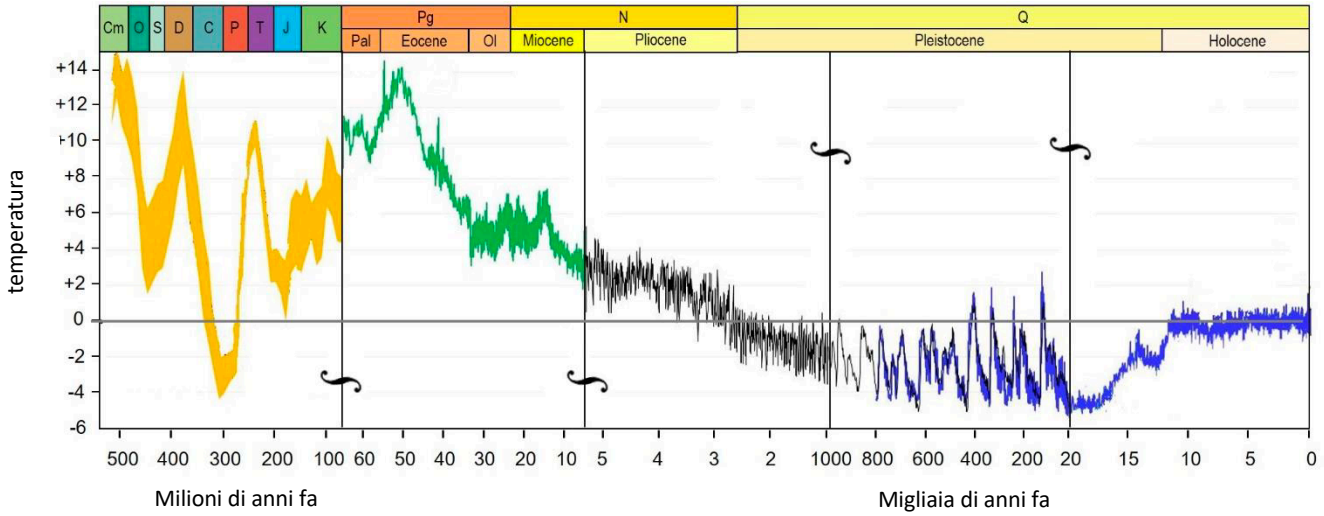
Figura 4.56. Un parapendio vicino a Reichenburg, Svizzera, che utilizza le termiche per risalire



4.3.3 Cambiamento atmosferico

Le evidenze provenienti da diverse fonti mostrano che la temperatura media della superficie terrestre è cambiata notevolmente nel passato. La Figura 4.57 presenta cinque grafici che mostrano come si pensa che la temperatura sia variata sopra e sotto lo 0 del grafico, corrispondente alla temperatura media attuale della superficie di 14 °C. Il primo grafico mostra il cambiamento della temperatura da 540 milioni di anni fa a 65 milioni di anni fa, il secondo da 65 milioni di anni fa a 6 milioni di anni fa, il terzo da 6 milioni di anni fa a 1 milione di anni fa, il quarto da 1 milione di anni fa a 20.000 anni fa e l'ultimo grafico per gli ultimi 20.000 anni.

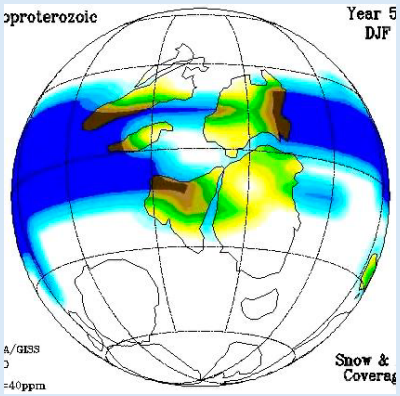
Figura 4.57. La temperatura media passata della superficie terrestre (°C) come indicato da evidenze provenienti da diversi indicatori. Cinque grafici sono tracciati, uno dopo l'altro, mostrando i cambiamenti su intervalli di tempo sempre più brevi, fino ai giorni nostri. Lo zero (0 °C) sui grafici rappresenta la temperatura media attuale della Terra di 14 °C.



I grafici mostrano che nel passato geologico le temperature medie massime erano superiori di oltre 10 °C rispetto a quelle attuali (a volte più di 14 °C); le temperature più basse scendevano fino a 5 °C al di sotto di quelle odierne. Con le temperature attuali, i poli sono glaciali, il che indica che quando le temperature erano più basse in passato, le glaciazioni devono essere state molto più diffuse. I grafici mostrano glaciazioni diffuse o condizioni di "icehouse" nei periodi Pleistocene e Carbonifero/Permiano. Ci sono anche evidenze di condizioni di "icehouse" nei periodi Ordoviciano/Siluriano e di due glaciazioni nei tempi Precambriani, prima dell'inizio dei grafici nella Figura 4.57. L'era glaciale del tardo Precambriano è stata la più grande che la Terra abbia mai conosciuto; l'intero pianeta potrebbe essere stato coperto di ghiaccio (il cosiddetto "snowball Earth") oppure potrebbe essere rimasta una zona di mare aperto vicino all'Equatore ("slushball Earth").

Box 4.14. Snowball Earth o slushball Earth?

La teoria dello "snowball Earth" si basa su evidenze che indicano che tra 650 e 635 milioni di anni fa rocce sedimentarie depositate da ghiacciai coprivano continenti che le misurazioni paleomagnetiche mostrano essere stati vicino all'Equatore. Questa idea sarebbe rafforzata se si potesse dimostrare che tutti i depositi sedimentari formatisi in quel periodo fossero glaciali. Tuttavia, questo è molto difficile da provare, poiché non ci sono fossili disponibili per datare le rocce sedimentarie depositate in quel periodo (poiché la vita con parti dure non si era ancora evoluta e normalmente non si troverebbe in depositi glaciali). Ci sono anche evidenze sedimentarie che indicano che c'erano almeno alcune aree di acqua aperta in quel periodo. Pertanto, molti scienziati della Terra si sentono più a loro agio con l'idea dello "slushball Earth" (con acqua aperta nei mari vicino all'Equatore) piuttosto che con quella dello "snowball Earth". Tuttavia, ci sono buone evidenze che la Terra abbia subito una glaciazione molto severa circa 640 milioni di anni fa.



Simulazione al computer della copertura di giaccio durante la fase Snowball Earth

Uno dei processi che si pensa abbia innescato le glaciazioni globali è il feedback positivo dall'effetto albedo, descritto nella sezione 1.3 di questo libro. Man mano che le calotte glaciali si espandevano riflettevano sempre di più la radiazione solare, raffreddando la Terra e causando una maggiore crescita delle calotte glaciali, fino a coprire gran parte del pianeta di ghiaccio. La fine di questa severa era glaciale potrebbe essere stata innescata da vulcani che immettevano grandi quantità di anidride carbonica nell'atmosfera, causando un riscaldamento su larga scala attraverso l'effetto serra.

Tra i periodi molto freddi, ci sono stati momenti in cui la Terra era molto più calda di oggi, in particolare nei periodi Paleocene/Eocene, Permo-Triassico, Devoniano e Cambriano. Questi periodi, in cui non c'erano calotte glaciali globali, sono spesso definiti "condizioni di serra".

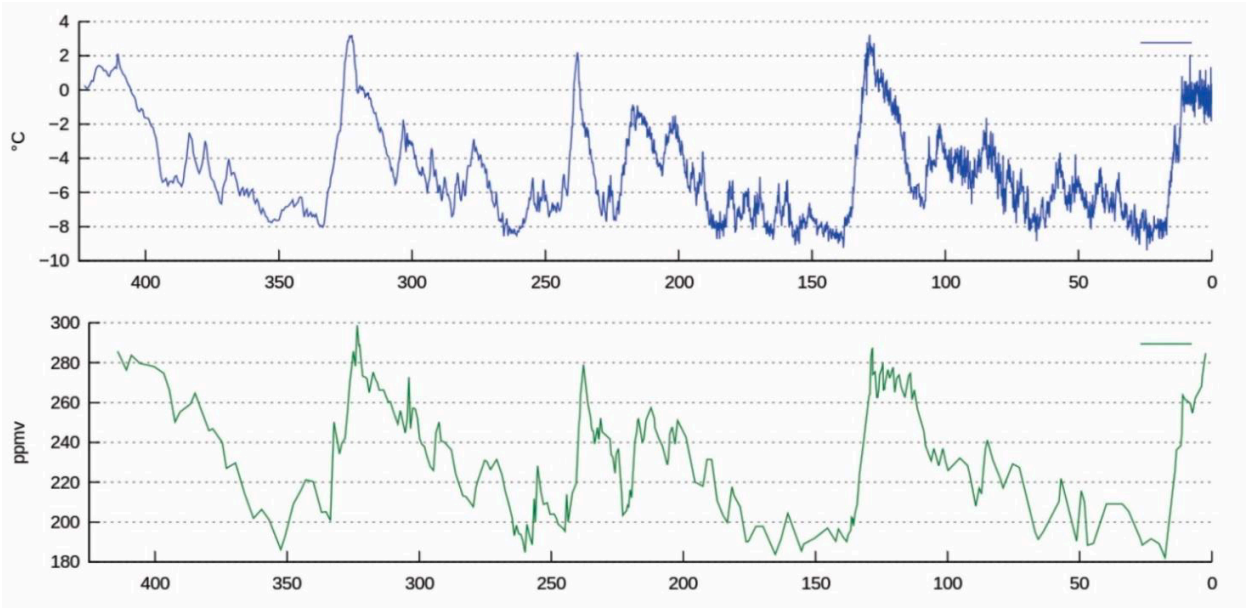
Figura 4.58 Estrazione di. Una carota di ghiaccio presa da un tubo di un carotaggio nel ghiaccio



Nel corso del tempo geologico, l'energia complessiva che raggiunge la Terra dal Sole è aumentata, quindi potremmo aspettarci che le temperature globali mostrino un aumento costante. Poiché non c'è stato un aumento costante della temperatura media della Terra, devono esserci altri fattori che influenzano questo aspetto. I campioni di ghiaccio forniscono indizi sui principali fattori che influenzano la temperatura della Terra. Vengono perforati dei pozzi nelle parti più spesse delle calotte glaciali polari per estrarre carote di ghiaccio (Figura 4.58). I dati provenienti dai campioni di ghiaccio possono essere utilizzati per mostrare la temperatura, così come il contenuto di diversi gas nell'atmosfera al momento in cui è stato formato quello strato di ghiaccio.

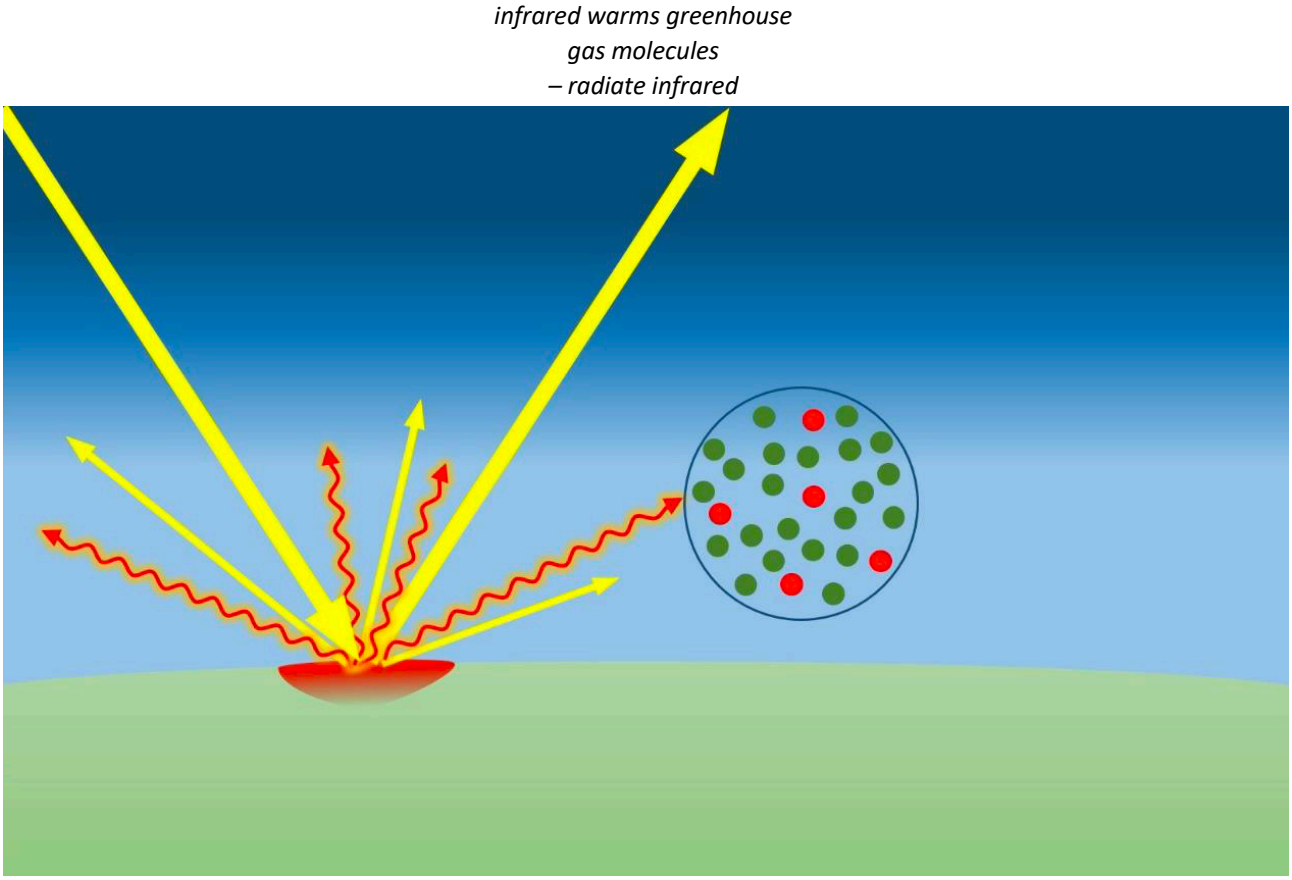
La Figura 4.59 mostra i grafici della temperatura e del contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera negli ultimi 400.000 anni. I grafici evidenziano una connessione molto stretta tra la quantità di anidride carbonica nell'atmosfera e la temperatura della Terra. Mentre alcuni scienziati della Terra sostengono che sia la temperatura della Terra a causare il cambiamento nei livelli di anidride carbonica, la maggior parte degli scienziati della Terra ritiene il contrario, credendo che le variazioni nei livelli di anidride carbonica causino i cambiamenti nella temperatura della Terra. È quindi ampiamente accettato che alti livelli di anidride carbonica provochino alte temperature sulla Terra.

Figura 4.59. Grafici del cambiamento di temperatura e della variazione di CO_2 nell'atmosfera negli ultimi 400.000 anni registrati nel campione di ghiaccio di Vostok dall'Antartide (ppmv = parti per milione di CO_2 nell'atmosfera in volume).



Il legame tra la temperatura terrestre e la quantità di anidride carbonica (e di altri gas chiave) nell'atmosfera è chiamata **effetto serra**, come mostrato in Figura 4.60.

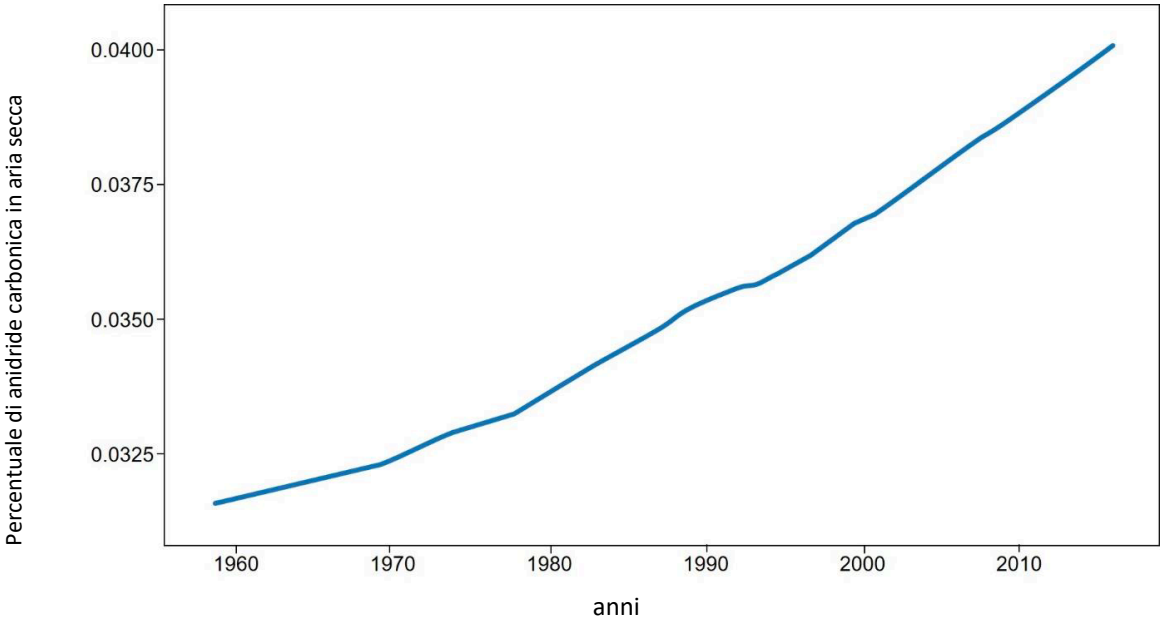
Figura 4.60. L'effetto serra (la radiazione infrarossa è calore)



La radiazione del Sole raggiunge la Terra come luce visibile. Una parte di questa viene riflessa nello spazio, ma una parte viene assorbita dalla superficie terrestre e riemessa come calore, o radiazione infrarossa. Parte del calore riemesso attraversa l'atmosfera e va nello spazio, ma una parte viene assorbita dai gas serra, rendendo l'atmosfera più calda. Maggiore è la quantità di gas serra presente nell'atmosfera, più questa si riscalda, riscaldando a sua volta la Terra. Il gas serra più abbondante nell'atmosfera terrestre è il vapore acqueo, seguito da anidride carbonica, metano e protossido di azoto. La quantità di vapore acqueo nell'atmosfera varia continuamente, e le quantità di metano e protossido di azoto sono ridotte, quindi il gas principale che influisce sulla Terra nel lungo termine sembra essere l'anidride carbonica.

Se non ci fossero gas serra nell'atmosfera, tutta la radiazione del Sole verrebbe riemessa, e la Terra sarebbe così fredda da rimanere permanentemente ghiacciata. Pertanto, abbiamo bisogno dell'effetto serra affinché la Terra sia sufficientemente calda per la vita. Il problema sorge quando si aggiungono gas serra extra all'atmosfera, causando **l'effetto serra potenziato**. Sembra che i periodi molto caldi del passato della Terra (condizioni di serra) siano collegati a livelli elevati di gas serra nell'atmosfera. Questi potrebbero essere correlati a periodi di intensa attività tettonica delle placche che aumentano l'attività vulcanica, rilasciando gas serra. Il cambiamento climatico sembra quindi essere strettamente legato alla quantità di gas serra presenti nell'atmosfera. È per questo che gli scienziati sono preoccupati per l'aumento della quantità di anidride carbonica nell'atmosfera. La quantità di anidride carbonica nell'atmosfera viene monitorata dall'osservatorio situato sulla sommità del tranquillo vulcano Mauna Loa, alle Hawaii, dal 1958. Queste misurazioni mostrano l'aumento costante evidenziato nella Figura 4.61.

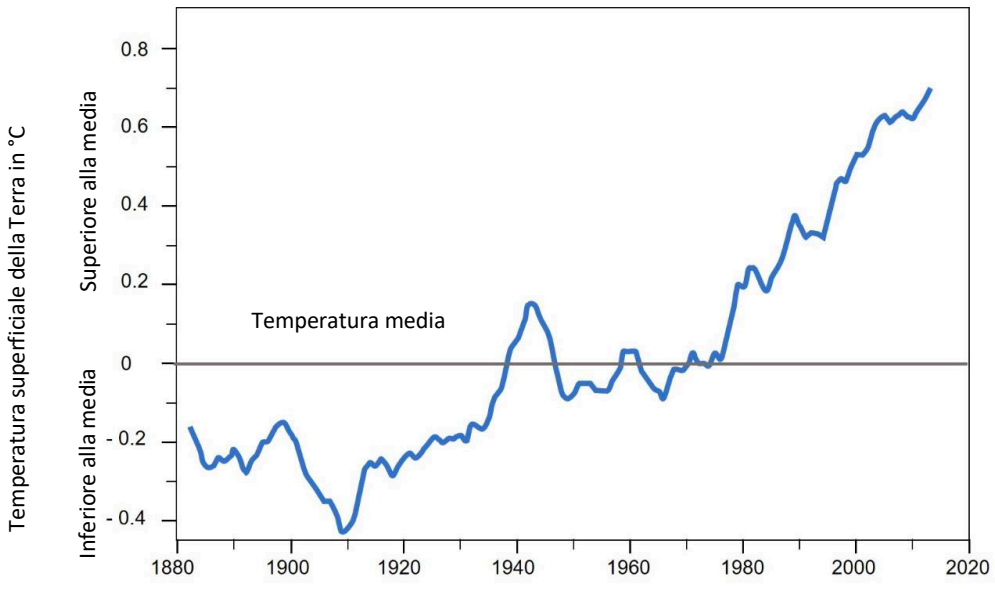
Figura 4.61. Il cambiamento nei livelli di anidride carbonica nell'atmosfera da quando sono iniziate le misurazioni nel 1958, effettuate dall'osservatorio di Mauna Loa, Hawaii (la sommità del Mauna Loa è stata scelta come luogo per queste osservazioni perché si trova in alta atmosfera e lontano dalle masse terrestri continentali; le misurazioni non sono correlate a nessuna attività vulcanica.)



La maggior parte degli scienziati ritiene che questo costante aumento registrato nel contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera sia principalmente dovuto alle attività umane, come la combustione di combustibili fossili come carbone, petrolio e gas naturale, insieme alla deforestazione su larga scala delle aree di foresta pluviale tropicale. La combustione di combustibili fossili rilascia ulteriore anidride carbonica nell'atmosfera e la distruzione della vegetazione riduce il numero di piante disponibili per rimuovere e immagazzinare l'anidride carbonica attraverso la fotosintesi.

Sebbene sappiamo che gli oceani possono assorbire parte dell'anidride carbonica in eccesso dall'atmosfera, gli scienziati continuano a ricercare quanto possa essere assorbito e come questo possa influenzare gli oceani. Questo costante aumento del contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera sembra essere legato all'aumento piuttosto costante della temperatura della Terra misurato dagli anni '60, come mostrato nel grafico dei dati compilati dalla NASA negli Stati Uniti, illustrato nella Figura 4.62.

Figura 4.62. Variazione della temperatura della superficie terrestre, dai dati compilati dalla NASA.



Quindi, con l'aumento dell'anidride carbonica nell'atmosfera, molto probabilmente a causa dell'attività umana, la Terra sta diventando
Caldo. Una Terra più calda potrebbe sembrare una buona idea per quelle persone che vivono in paesi più freddi, ma un il riscaldamento della Terra potrebbe causare grossi problemi, come previsto nella Tabella 4.25.

Tabella 4.25. Problemi che potrebbero essere causati dal riscaldamento della Terra

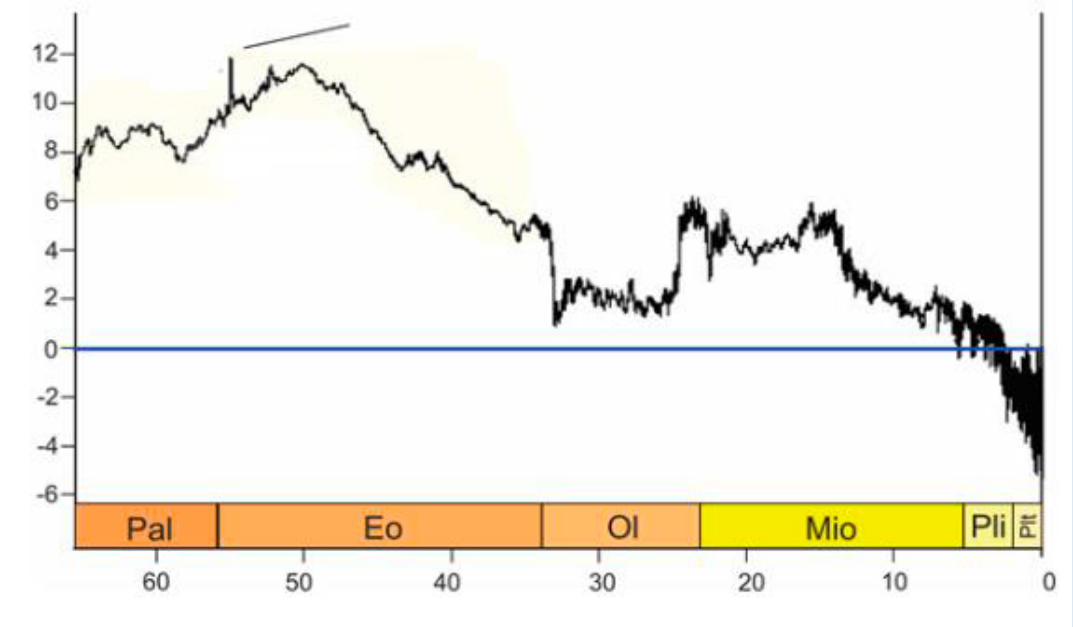
Problema potenziale	Probabili effetti
Un "punto di non ritorno" potrebbe essere raggiunto (come descritto nella Sezione 1.3), dove i cicli di feedback positivo causano un notevole riscaldamento della Terra	Tutti i problemi nella tabella sottostante sarebbero molto più gravi
Gli oceani più caldi contribuiscono con più calore all'atmosfera	Il calore oceanico genera tempeste, quindi la Terra potrebbe essere interessata da fenomeni più intensi (tempeste)
Le condizioni più calde aumentano i tassi di evaporazione e condensazione	I cambiamenti nel ciclo dell'acqua significano che alcune aree del pianeta diventano più umide e altre più secche
Le calotte di ghiaccio terrestri si sciolgono, aggiungendo acqua agli oceani	L'innalzamento del livello del mare causa ulteriori inondazioni delle aree a bassa quota, in particolare durante le tempeste
Le acque oceaniche si espandono man mano che si riscaldano.	L'espansione delle acque oceaniche contribuisce all'innalzamento del livello del mare
L'innalzamento del livello del mare riduce l'area di terra disponibile per l'agricoltura e l'industria	Potrebbero verificarsi migrazioni di massa delle popolazioni umane in cerca di terre più favorevoli in aree già sovraffollate del mondo
Il riscaldamento degli oceani influisce sul volume e sulla velocità delle correnti oceaniche, con effetti sugli oceani e sull'atmosfera	Le correnti oceaniche redistribuiscono il calore sulla Terra; il cambiamento di queste correnti potrebbe rendere alcune regioni più calde e altre più fredde
Le zone climatiche si spostano verso i poli	Lo spostamento delle zone climatiche fa sì che alcune specie prosperino in nuove aree, mentre altre si estinguono
L'acqua oceanica diventa più acida man mano che dissolve anidride carbonica.	Specie come i coralli, che non possono adattarsi ad acque più acide, si estinguono, insieme alle loro comunità di barriera corallina

Ci possono essere alcuni vantaggi in una Terra che si riscalda, come la possibilità di coltivare nuovi raccolti in aree più vicine ai poli, un aumento della crescita forestale stimolata dall'anidride carbonica aggiuntiva e la possibilità che il passaggio marittimo a nord del Canada diventi navigabile per le navi in estate. Tuttavia, la maggior parte delle persone sostiene che gli svantaggi superino di gran lunga i possibili vantaggi. La Terra ha subito forti riscaldamenti globali in passato, come durante i periodi Paleocene/Eocene, ed è sopravvissuta

Box 4.15. La Terra durante il massimo termico Paleocene/Eocene

Durante le condizioni di serra al confine tra i periodi Paleocene e l'inizio dell'Eocene, circa 56 milioni di anni fa, ci sono evidenze che indicano che la Terra fosse fino a 12 °C più calda di oggi e rimanesse più di 8 °C più calda per quasi 10 milioni di anni. Questo era probabilmente collegato a enormi quantità di anidride carbonica rilasciate nell'atmosfera in quel periodo. Gli scienziati della Terra stanno attivamente ricercando questo periodo di alta temperatura, poiché potrebbe fornire spunti utili per gli attuali studi sui cambiamenti climatici.

.



Temperatura della Terra (°C) rispetto alla temperatura odierna, negli ultimi 65 milioni di anni

In questo periodo non c'erano calotte glaciali sulla Terra e l'espansione degli oceani caldi contribuì all'innalzamento del livello del mare, sommergendo molte aree continentali a bassa quota. Le evidenze fossili mostrano che le foreste coprivano l'intera Terra, dall'equatore ai poli, ad eccezione di alcune aree più aride. Le foreste pluviali tropicali crescevano in Nord America e in Europa, mentre le palme si sviluppavano nell'Artico. Nuove specie di mammiferi si evolsero, ma per lo più si trattava di specie molto piccole e nane, probabilmente perché i mammiferi di dimensioni più ridotte sono meglio adattati a condizioni calde rispetto agli animali più grandi. I rettili erano abbondanti, in particolare i pitoni e le tartarughe. Gli insetti erano comuni. Ci furono cambiamenti significativi negli oceani. Mentre molte specie microscopiche bentoniche si estinsero, gli organismi planctonici vicino alla superficie del mare prosperarono. Gli oceani caldi brulicavano di pesci e altre forme di vita marina. Questo era un mondo molto diverso dalla Terra di oggi.

I grafici della temperatura della Terra, in particolare negli ultimi milioni di anni, come mostrato nelle Figure 4.57 e 4.59, mostrano cicli regolari di cambiamento della temperatura. Si pensa che questi siano legati alla quantità di radiazione solare ricevuta dalla Terra, dovuta principalmente a cambiamenti regolari nel modo in cui la Terra ruota e orbita attorno al Sole. Tuttavia, gli effetti serra moderni potrebbero avere un impatto ancora maggiore rispetto a questi cambiamenti regolari verificatisi all'epoca.

4.4 Biosfera

Più studiamo la vita sulla Terra, più scopriamo come i processi della biosfera siano strettamente interconnessi con quelli degli altri sistemi, la geosfera, l'idrosfera e l'atmosfera. Abbiamo anche scoperto come piccoli cambiamenti in una parte di uno di questi sistemi possano produrre grandi cambiamenti altrove.

4.4.1 Evoluzione

William Smith aveva dimostrato che i fossili nelle rocce si trovavano sempre nella stessa sequenza (si veda la sezione 3.2), ma gli scienziati non sapevano perché questo accadesse. Nel 1858 Charles Darwin e Alfred Russel Wallace proposero una teoria che spiegava perché le sequenze di fossili cambiassero in questo modo; si tratta della teoria dell'evoluzione.

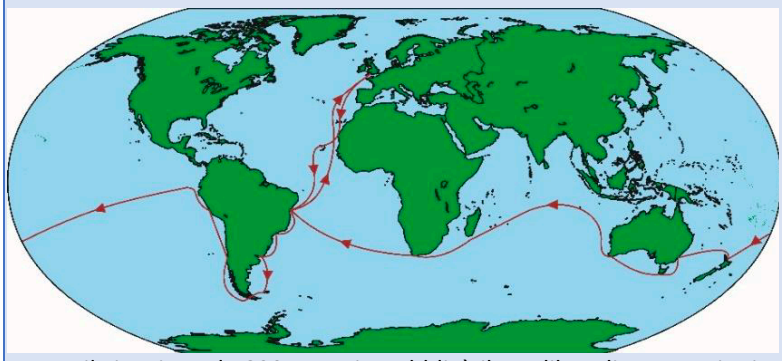
La teoria dell'evoluzione si basa su tre osservazioni scientifiche sulla biosfera:
1) i singoli organismi (come animali, piante, fossili) sono diversi gli uni dagli altri;
2) alcuni individui sono meglio adattati per sopravvivere e riprodursi rispetto ad altri;
3) molte caratteristiche degli individui si trasmettono da una generazione all'altra.

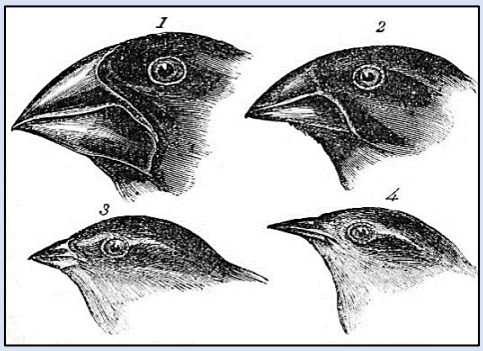
Tutto ciò ha dato origine a un processo che ha portato gruppi di animali e piante a cambiare nel tempo, o a evolversi, Darwin chiamò questo processo selezione naturale. Tale fenomeno è stato poi chiamato "sopravvivenza del più adatto"; gli organismi più adatti alla sopravvivenza producono prole, mentre quelli meno adatti si estinguono. Per la prima volta, l'evoluzione fu in grado di spiegare la maggior parte delle numerose osservazioni fatte riguardo la vita sulla Terra.
Oggi abbiamo capito come si possono spiegare le tre osservazioni scientifiche sull'evoluzione:
1) gli individui differiscono l'uno dall'altro perché la riproduzione sessuale fa sì che ogni individuo abbia un insieme unico di geni;
2) alcune combinazioni di geni di un individuo gli danno maggiori possibilità di sopravvivenza rispetto ad altri; per esempio, alcune combinazioni di geni possono dare a un animale zampe più lunghe, permettendogli di correre più velocemente; altre combinazioni di geni possono far sì che un albero abbia un tronco più spesso, permettendogli di crescere più in alto;
3) durante la riproduzione sessuata nelle piante e negli animali, metà dei geni provengono da un genitore e metà dall'altro; la metà dei geni ricevuti da un genitore porta alcune delle caratteristiche del genitore alla generazione successiva.

I fossili dimostrano che talvolta la vita sembra evolversi in modo costante, mentre altri mostrano un gruppo che si evolve improvvisamente in un gruppo diverso. I salti evolutivi improvvisi sembrano verificarsi quando un gruppo di animali o piante è separato dal resto del gruppo, ad esempio su un'isola o in cima a una catena montuosa. In queste condizioni, quando una pianta o un animale sviluppa una nuova caratteristica, questa non viene persa dall'incrocio con altri individui a monte, ma può essere conservata e sviluppata nel corso delle generazioni.

Box 4.16. Charles Darwin e l'evoluzione

Nel 1831 Charles Darwin si unì al viaggio di esplorazione del veliero HMS Beagle come naturalista, uno scienziato che studiava sia la geologia che la biologia. Durante il viaggio intorno al mondo, durato quasi cinque anni, Darwin registrò un numero enorme di osservazioni sulla geologia, sui fossili e sulla fauna dei Paesi che visitò e raccolse molti esemplari. Alcuni degli uccelli che raccolse alle isole Galapagos, nell'Oceano Pacifico orientale, furono in seguito dimostrati essere tipi di fringuelli. Questi uccelli si erano adattati a stili di vita diversi nelle varie isole, con speciali adattamenti del becco che consentivano loro di mangiare noci, frutta o vermi. Darwin pensò che probabilmente una specie di fringuello aveva originariamente raggiunto le isole dal continente sudamericano, ma che, spostandosi su isole diverse, si era isolata e quindi si era evoluta in specie distinte. Questa e altre osservazioni simili furono un importante stimolo per il suo pensiero sull'evoluzione.





Dopo il viaggio, nel 1839, Darwin pubblicò il suo libro di osservazioni, tra cui i suoi studi sulle rocce vulcaniche e la sua esperienza di un terremoto di magnitudo 8,5 in Cile. Solo 20 anni dopo, nel 1859, pubblicò il suo libro sulla teoria dell'evoluzione, intitolato "Sull'origine delle specie".

Le diverse distribuzioni dei continenti dovute al movimento delle placche hanno avuto effetti importanti sull'evoluzione della vita sulla Terra. Quando tutti i continenti erano uniti in un supercontinente, c'erano poche aree terrestri isolate e quindi poche possibilità di un salto evolutivo. Nel frattempo, intorno alle coste del supercontinente le aree marine poco profonde erano di nuovo interconnesse, riducendo anche le opportunità di evoluzione.

In altri periodi, quando i continenti erano separati, si sono verificati salti evolutivi sulle masse terrestri e nei mari poco profondi separati. Un esempio sono i cambiamenti evolutivi che hanno dato alla Nuova Zelanda una fauna unica.

Figura 4.63. Mappa dei continenti a 280Ma, durante il Permiano, con un supercontinente che unisce aree terrestri e mari poco profondi interconnessi (evoluzione più lenta)

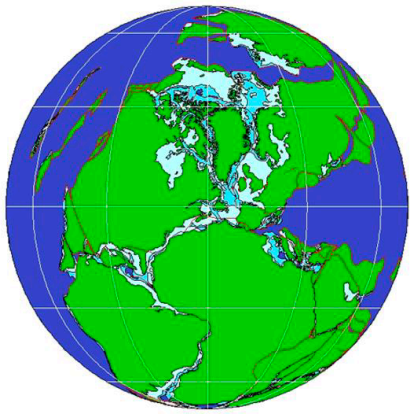
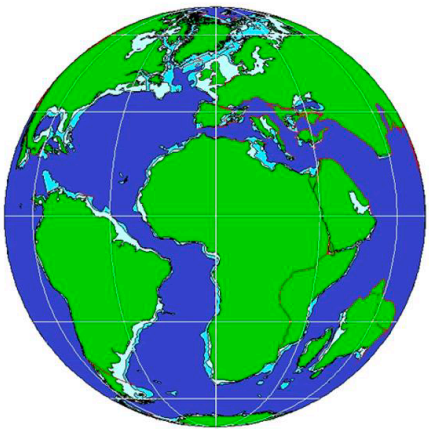
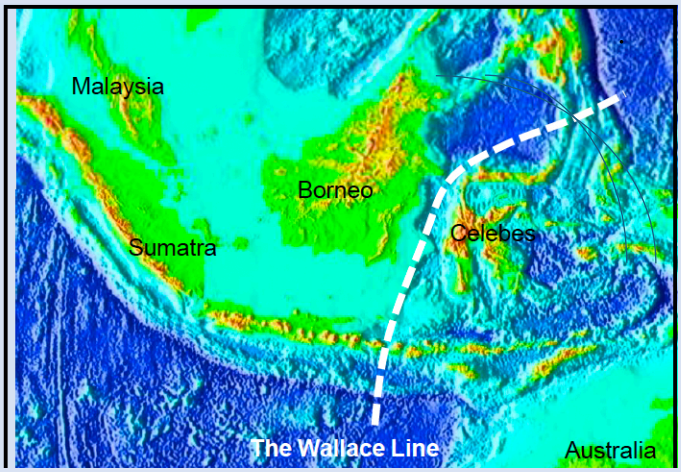


Figura 4.64. Mappa dei continenti a 85Ma, durante il Cretaceo, con continenti separati e mari poco profondi (evoluzione più rapida)



Box 4.17. La Linea di Wallace

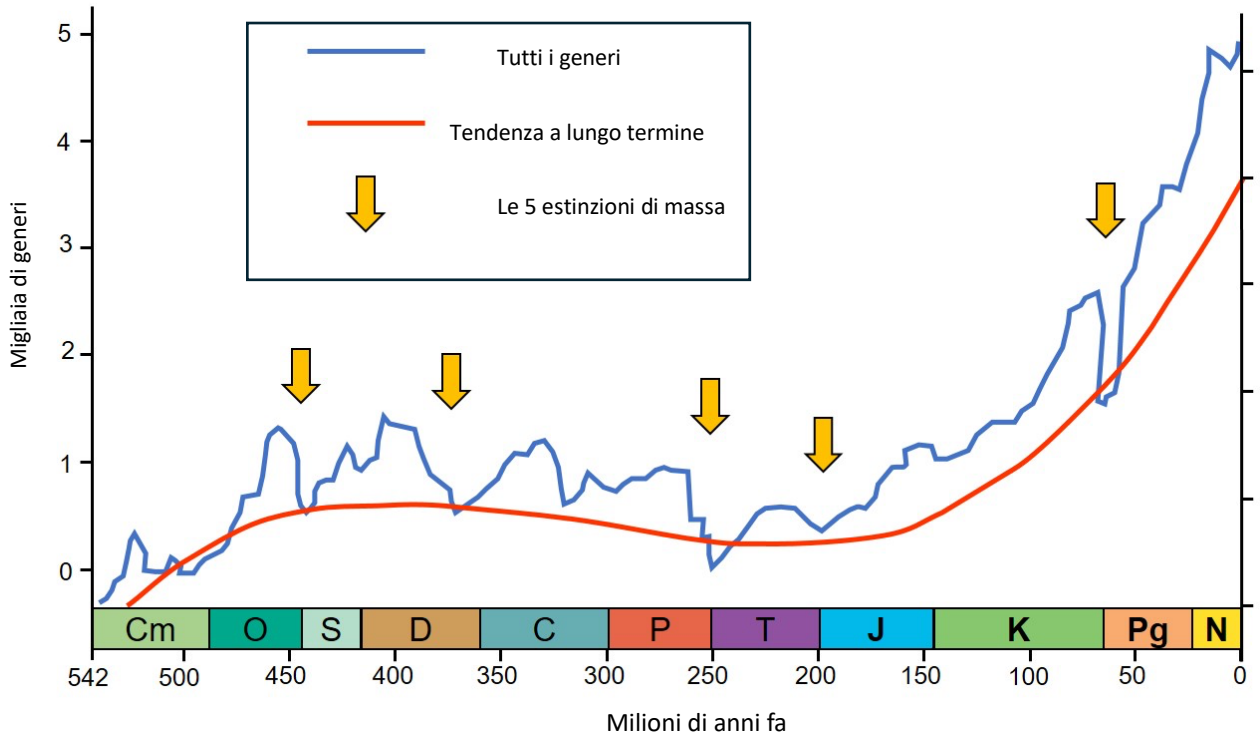
Alfred Russell Wallace, che insieme a Charles Darwin sviluppò la teoria dell'evoluzione, mise insieme le sue idee durante i suoi lunghi viaggi, prima nell'area amazzonica del Sud America e poi nel sud-est asiatico. Identificò la linea nel sud-est asiatico, oggi chiamata Linea di Wallace, che separa gli animali prevalentemente asiatici a ovest da un misto di animali asiatici e australasiatici a est. Ciò lo spinse a riflettere su come si fossero formati questi diversi gruppi di animali, portandolo a sviluppare la teoria dell'evoluzione. Quando l'Australasia si è separata dall'Asia nel passato geologico, diversi gruppi di animali si sono evoluti nelle diverse regioni.



La sequenza globale delle rocce registra diversi episodi di **estinzione di massa**, quando molti gruppi diversi si sono estinti nello stesso momento. In effetti, i confini di ciascuno dei principali periodi geologici a partire dal Cambriano sono stati definiti quando un evento di estinzione di massa ha causato grandi cambiamenti nella documentazione fossile. Di solito, prima di un evento di estinzione di massa, la vita sembrava progredire normalmente. Poi, durante l'evento, un'ampia gamma di gruppi si estingue improvvisamente. Dopo l'evento, i gruppi sopravvissuti si sono evoluti in una serie di nuovi gruppi, probabilmente perché non c'era competizione da parte dei gruppi che si erano estinti. Quindi, oltre a causare l'estinzione di molti gruppi, le estinzioni di massa hanno anche innescato la successiva evoluzione di molti nuovi gruppi.

Negli ultimi 450 milioni di anni si sono verificate cinque grandi estinzioni di massa in cui si è estinto più del 60% di tutte le specie, ma la più grande si è verificata alla fine del periodo Permiano, quando si è estinto più del 90% delle specie.

Figura 4.65. La tendenza a lungo termine della vita sulla Terra e le principali estinzioni, come mostrato dal numero di generi (raggruppamenti biologici contenenti un numero di specie)



Per spiegare le estinzioni di massa sono state avanzate molte teorie diverse, tra cui enormi eruzioni vulcaniche, abbassamenti globali del livello del mare, impatti di asteroidi e grandi cambiamenti del clima (raffreddamento e riscaldamento). A volte diversi di questi eventi, insieme ad altri grandi cambiamenti, sembrano essersi verificati nello stesso momento.

Box 4.18. La "grande estinzione" di massa

Alla fine del Permiano (e inizio del Triassico, 252Ma), si estinse oltre il 90% di tutte le specie della Terra. Si estinse fino al 96% di tutte le specie marine, con estinzioni importanti anche di animali terrestri e insetti. Le condizioni devastanti di questo evento sono quasi impossibili da immaginare: non solo scomparvero molte specie animali e vegetali sulla terraferma, ma anche negli oceani, quando "quasi tutta la vita morì".

Sono state proposte molte ipotesi per spiegare questa "grande moria", tra cui l'eruzione di enormi volumi di lava basaltica, che avrebbe rilasciato enormi quantità di cenere e gas vulcanici in atmosfera. La cenere avrebbe coperto la luce solare, bloccando la fotosintesi, mentre il rilascio di anidride carbonica vulcanica avrebbe causato il riscaldamento globale e l'acidificazione degli oceani.

Il fenomeno potrebbe essere stato innescato da un asteroide che ha colpito la Terra, ma se il luogo dell'impatto si trovasse negli oceani, probabilmente il sito sarebbe già scomparso, poiché i fondali oceanici vengono riciclati dalla tettonica a placche. Non sembra essersi conservata alcuna prova di un impatto importante di quel periodo; quindi, la spiegazione di un impatto con un asteroide sembra improbabile.



Foglie e baccelli di Glossopteris - trovati prima della "grande estinzione", ma non dopo.

Box 4.19. L'estinzione di massa K-Pg

66Ma, alla fine del Cretaceo e all'inizio del Paleogene, si estinsero i tre quarti della vita sulla Terra. Non sopravvissero grandi anfibi, grandi rettili (compresi i dinosauri, ma non i coccodrilli) e grandi mammiferi. Anche i gruppi marini furono devastati: le ammoniti si estinsero, insieme a molti pesci, squali e gruppi di plancton.

Le condizioni dell'epoca devono essere state devastanti, con la morte di così tante piante e animali sulla terraferma e nel mare in un periodo di tempo molto breve.

Per spiegare un evento così improvviso e drammatico sono state avanzate diverse ipotesi scientifiche, tra cui enormi eruzioni vulcaniche dei Traps basaltici del Deccan (nell'attuale India), l'innalzamento del livello del mare, i cambiamenti climatici o una combinazione di questi fattori.

Quando negli anni '80 si scoprì che il confine K-Pg è segnato in molte sequenze rocciose da uno strato di sedimenti fangosi ricchi di iridio, fu proposta l'idea che un asteroide avesse colpito la Terra; gli asteroidi sono ricchi di iridio, ma la Terra no. Poco dopo fu scoperto il cratere Chicxulub nel Golfo del Messico, in America centrale. Si ritiene che questo cratere, largo 180 km e profondo 20 km, sia il luogo di impatto di un asteroide di almeno 10 km di diametro. Un'ulteriore prova dell'impatto è data dal "quarzo shockato" (cristalli di quarzo deformati da una pressione improvvisa) e da perle di vetro (tectiti) di rocce fuse ed espulse dalla collisione. Gli scienziati sono quasi certi che la collisione di un asteroide abbia causato il cratere, ma se questa collisione abbia causato l'estinzione di massa K-Pg, o vi abbia contribuito, o abbia avuto un effetto minimo sulla vita sulla Terra in quel periodo, è ancora oggetto di un acceso dibattito.

L'estinzione di massa K-Pg ha lasciato molti habitat quasi vuoti, dando la possibilità di un'improvvisa esplosione dell'evoluzione dopo l'evento dell'estinzione. In particolare, uccelli, pesci e mammiferi si sono evoluti in molti nuovi gruppi; i mammiferi si sono sviluppati in cavalli, pipistrelli, balene e primati.



Tyrannosaurus rex - uno degli ultimi gruppi di dinosauri ritrovati prima dell'estinzione di massa K-Pg



Geologi che raccolgono sedimenti al confine K-Pg, Wyoming, USA

L'estinzione di massa Cretaceo/Paleogene è spesso chiamata estinzione di massa K-Pg perché, nella colonna geologica, il periodo Cretaceo può essere abbreviato in "K" (la lettera "C" era stata usata più in basso nella colonna per il "Carbonifero") e il Paleogene è abbreviato in "Pg" (dato che la "P" era stata usata in precedenza per il periodo "Permiano") (Figura 4.65). In modo confuso, l'estinzione di massa K-Pg era chiamata estinzione di massa K-T prima che il T ("Terziario") fosse suddiviso. Una delle suddivisioni è stata chiamata "Paleogene" e il termine "Terziario" non è più formalmente utilizzato.

Le estinzioni di massa non hanno avuto solo effetti negativi ma anche positivi, poiché ogni estinzione di massa ha lasciato nuovi habitat disponibili per nuove esplosioni evolutive. Quindi, senza le estinzioni in generale e quelle di massa in particolare, l'evoluzione non avrebbe potuto produrre l'enorme diversità della vita sulla Terra.

4.4.2 Impatto su altri sistemi

Sembra che più studiamo i sistemi terrestri, più scopriamo gli effetti essenziali che la vita ha su questi sistemi. La biosfera ha avuto effetti importanti sull'evoluzione dell'intero pianeta.

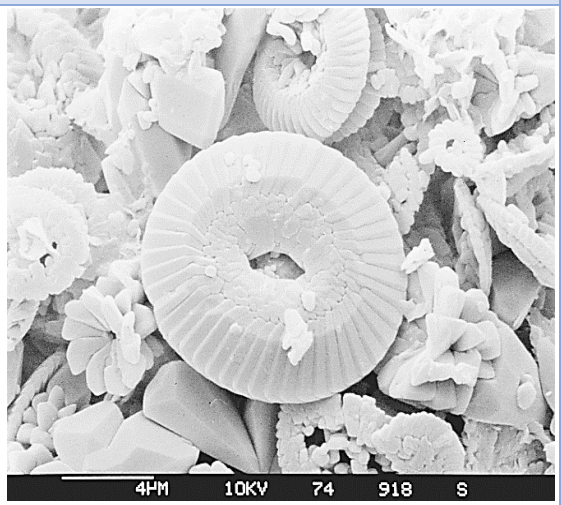
Ad esempio, l'alterazione delle rocce comporta una serie di processi. Il gelo e il disgelo, il riscaldamento e il raffreddamento hanno effetti fisici di frantumazione della roccia in pezzi più piccoli. Anche le piante hanno molti effetti fisici, dalle radichette dei licheni che separano i granelli di roccia, al movimento delle radici degli alberi durante le tempeste che staccano i massi dalle pareti rocciose. Allo stesso modo, gli effetti chimici delle piogge acide e dell'ossidazione nella disgregazione chimica delle rocce vengono potenziati dalla vita nel suolo che aggiunge ulteriore anidride carbonica alla pioggia, rendendo l'acqua del suolo ancora più acida e in grado di attaccare la roccia. Anche la decomposizione della materia organica produce sostanze acide, aumentando l'acidità dell'acqua, con una serie di altri effetti di disgregazione biochimica. Il suolo si forma solo dove c'è vita, che aggiunge materiale vegetale e animali del suolo. Pertanto, dove c'è poca vita, come nelle zone polari o nei deserti aridi, non c'è suolo.

La vita svolge un ruolo fondamentale anche nella costruzione delle rocce e nella loro degradazione, come mostra la Tabella 4.26. Circa il 10% di tutte le rocce presenti sulla superficie terrestre sono calcari e la maggior parte di queste deriva da processi biologici. La vita è quindi molto importante per la formazione delle rocce.

Gli esseri viventi hanno anche prodotto tutti i nostri combustibili fossili. Il carbone si forma come descritto nella Tabella 4.26 e durante la sua formazione rilascia gas naturale, o metano. Il petrolio si forma principalmente dalla decomposizione di minuscole piante e animali planctonici depositati nei fanghi del fondo marino e successivamente sepolti.

Tabella 4.26. Il contributo della vita alla formazione delle rocce

Processo	Descrizione	Immagine	Fonte
Formazione del carbone	Quando la vita vegetale è abbondante e le piante muoiono, non si decompongono completamente se cadono in un ambiente privo di ossigeno; prima si forma la torba; successivamente, attraverso l'interramento, il carbone.		Fossili di foglie nel carbone del Carbonifero
Formazione di scogliera in calcare	I coralli e altri animali costruiscono le barriere coralline oggi e lo hanno fatto anche nel passato geologico, contribuendo in modo importante alla formazione del calcare.		Corallo fossile di età pleistocenica nel Windley Key Fossil Reef Geological State Park, Florida, USA

Processo	Descrizione	Immagine	Fonte
Calcari formati da detriti fossili	La maggior parte dei calcari è formata da detriti fossili. I fossili sono a volte facilmente visibili, come in questo esemplare, ma possono anche essere spezzati in minuscoli frammenti, impossibili da vedere ad occhio nudo.		Pietra da costruzione alterata: calcare formato da bivalvi e gasteropodi frantumati del Cenozoico presso il Tempio di Zeus, Olimpia, Grecia
Calcare a grana molto fine formato da coccoliti	Prima che i microscopi elettronici a scansione (SEM) diventassero disponibili, i geologi avevano un'idea vaga di come si formasse il calcare a grana fine (chalk). Ora i SEM hanno dimostrato che il gesso è composto principalmente da coccoliti, minuscole piastrine di carbonato di calcio delle alghe planctoniche, insieme ad altri microfossili.		Un'immagine al microscopio elettronico a scansione dei coccoliti, che costituiscono il finissimo fango carbonatico che può diventare chalk.
Sedimenti modificati dalla costruzione di tane	Le tane degli animali in molte arenarie e fanghi hanno distrutto lo stato originale e altre strutture.		Tane di animali simili a granchi nell'arenaria del Giurassico, Makhtesh Qatan, Israele meridionale

L'equilibrio tra l'immagazzinamento del carbonio nella formazione del calcare e il suo rilascio attraverso gli agenti atmosferici ha probabilmente svolto un ruolo chiave nel passato geologico, attraverso la quantità di anidride carbonica nell'atmosfera e il conseguente effetto serra. Anche la subduzione delle rocce calcaree ai margini convergenti delle placche potrebbe aver giocato un ruolo importante nei climi del passato geologico, attraverso la disgregazione del calcare per formare anidride carbonica, poi rilasciata sotto forma di gas vulcanici.

Box 4.20. L'ipotesi Gaia di James Lovelock

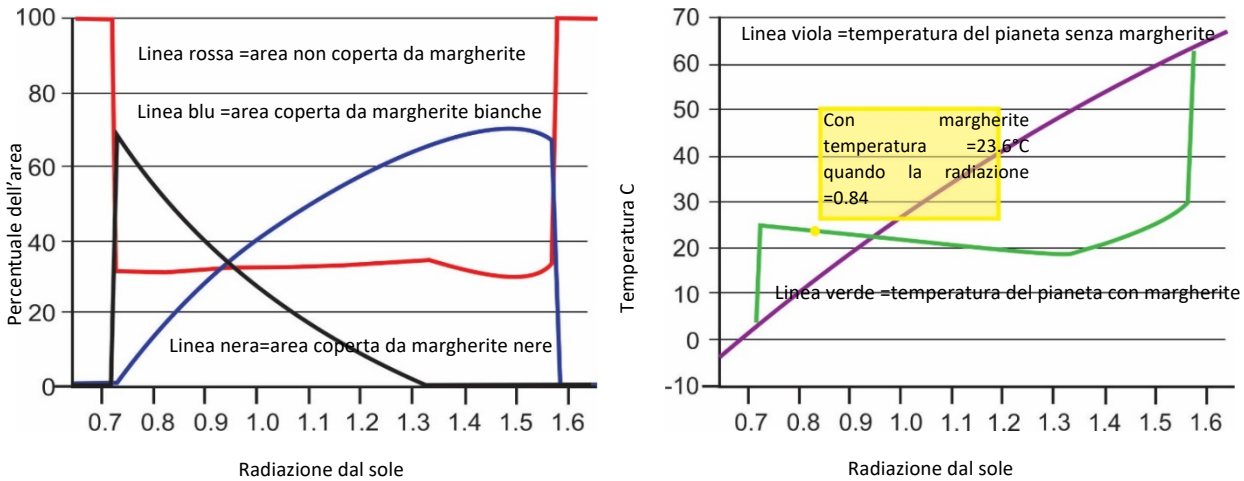
James Lovelock ha proposto non solo che la vita svolge un ruolo importante nei sistemi terrestri, ma che controlla i sistemi terrestri. Ha chiamato la sua idea "ipotesi Gaia" (dal nome della dea greca Gaia, la Madre Terra) e sostiene che, così come il nostro corpo ha molti sistemi diversi che lo regolano, anche la Terra lo fa. Per esempio, se si ha troppo caldo si suda per raffreddarsi, ma se si ha troppo freddo si rabbrividisce per riscaldarsi. Quando gli scienziati non erano d'accordo sul fatto che la Terra potesse avere dei sistemi per regolare la sua temperatura e altri aspetti del suo sistema, Lovelock ideò un programma al computer che chiamò "Daisyworld" per mostrare come questo potesse funzionare.

Nella simulazione mostrata nei grafici, la linea viola nel grafico di destra mostra come la temperatura del pianeta simulato, se non ci fosse vita, aumenterebbe all'aumentare delle radiazioni solari. Il pianeta simulato da Lovelock è simile alla Terra, dove le radiazioni ricevute dal nostro Sole sono aumentate costantemente nel corso del tempo geologico.

Se all'inizio del pianeta simulato un'ampia area fosse stata coperta da margherite nere (linea nera del grafico di sinistra), il colore nero avrebbe assorbito una maggiore quantità di radiazioni e aumentato la temperatura del pianeta fino a più di 20°C (linea verde del grafico di destra). Poi, con l'aumento delle radiazioni solari, le margherite nere sono diventate troppo calde e hanno iniziato a morire, sostituite da margherite bianche (linea blu del grafico di sinistra). Man mano che il sole riceveva sempre più radiazioni, le margherite bianche ne riflettevano sempre di più, mantenendo la temperatura vicina ai 20° C. Alla fine, le margherite nere sono state sostituite da quelle bianche. Alla fine, le margherite non ce la fecero più e si estinsero. A quel punto la temperatura del pianeta è aumentata drasticamente fino a raggiungere quella che sarebbe stata se non ci fossero state le margherite. Quindi, l'effetto delle margherite è stato quello di mantenere il pianeta simulato a una temperatura abbastanza stabile, mentre la luminosità solare (radiazione dal sole) è più che raddoppiata.

Attraverso questa simulazione, Lovelock dimostrò come la vita in evoluzione potesse regolare la temperatura di un pianeta. Egli ragionò sul fatto che, in modi diversi, la vita potrebbe regolare i sistemi di un intero pianeta come la Terra, mantenendo la sua capacità di autoperpetrarsi, dal momento in cui la vita ha iniziato a evolversi abbondantemente fino ad oggi.

Alcune delle idee di Lovelock sono oggi alla base del modo in cui gli scienziati studiano i sistemi terrestri, anche se molti non concordano sul fatto che la vita regoli l'intero sistema terrestre nel modo descritto da Lovelock.



5 Il sistema Terra produce risorse

Le risorse naturali sono tutti i materiali della geosfera, idrosfera, atmosfera e biosfera che possono essere utilizzati dall'uomo. Comprendono l'ampia gamma mostrata nella Tabella 5.1.

Tabella 5.1. Risorse naturali dalla Terra

Fonte	Esempi di risorse naturali utilizzabili	Immagine	Fonte
Geosfera	• Suolo • Rocce per l'edilizia e l'industria • minerali evaporitici • Minerali metallici • Combustibili fossili • Energia geotermica • Uranio		I Butchart Gardens a Victoria, British Columbia, Canada, si trovano in una cava di calcare bonificata.
Idrosfera	• Acqua potabile • Acqua per l'industria e l'agricoltura • Minerali evaporitici • Energia idroelettrica, dalle onde e dalle maree		Una salina a Trapani
Atmosfera	• Gas atmosferici • Aria per l'industria • Energia da urbine eoliche		Impianto di ossigeno a membrana, utilizzato per estrarre l'ossigeno dall'aria
Biosfera	• Pesci e altri organismi marini • Animali • Vegetali • Prodotti agricoli terrestri e marini		Coltivazione di alghe in Indonesia

5.1 Materie prime e combustibili fossili

Affinché le materie prime possano essere estratte dal sottosuolo, esse devono essersi concentrate in particolari aree; questo vale anche per i combustibili fossili. Il processo di concentrazione avviene in natura in due modi distinti: i processi naturali trasportano gli elementi utili in particolari “trappole” geologiche, aumentandone la concentrazione, oppure i processi naturali rimuovono da un sito i materiali non economicamente interessanti, lasciando i minerali utili.

I minerali vengono estratti per essere utilizzati solo se sono economicamente vantaggiosi. Ciò significa che un materiale viene estratto solo se l'equilibrio tra il bisogno locale o globale del materiale stesso (la domanda) e la sua disponibilità locale o globale (l'offerta) rende il prezzo sufficientemente alto. Se il prezzo è abbastanza alto da coprire i costi di prospezione, estrazione, bonifica, lavorazione e trasporto, allora vale la pena procedere con l’estrazione.

Tutto lo sviluppo per soddisfare i bisogni umani dovrebbe essere sostenibile. Lo sviluppo sostenibile è stato descritto come "uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni". Ciò significa che i bisogni economici e demografici dovrebbero essere soddisfatti senza danneggiare l'ambiente a tal punto da non poter soddisfare i bisogni futuri. Per l'estrazione di materiali naturali, tutti gli aspetti dell'operazione dovrebbero essere progettati e realizzati in modo da essere sostenibili secondo questo criterio.

La bonifica prevede che, al termine dell’estrazione del materiale condotta con il minor danno possibile per la comunità e l'ambiente circostanti, si proceda ad un successivo ripristino dell'area a una qualità vicina a quella originaria, con un monitoraggio per evitare che si verifichino problemi nel tempo. Alcuni Paesi hanno alti livelli di controllo ambientale, che garantiscono un'adeguata bonifica, mentre altri Paesi hanno livelli di controllo inferiori.

5.1.1 Materie prime sfuse per l'edilizia

L’edilizia su larga scala richiede enormi quantità di materiale, il cui trasporto può essere molto costoso. Per questo motivo molte cave di grandi dimensioni sono situate sulla costa e altre cave importanti hanno linee ferroviarie proprie. La maggior parte delle città ha cave vicine per soddisfare il proprio fabbisogno edilizio, ben collegate dalle strade. La roccia frantumata, la sabbia e la ghiaia di alcune cave vengono utilizzate come ‘**aggregati’** per l'edilizia.

Tabella 5.2. Esempi di materie prime sfuse utilizzate nell'edilizia

Materia prima	Dettagli	Immagine	Fonte
Rocce ignee	Le rocce ignee, come granito, gabbro e dolerite, sono molto resistenti e si utilizzano come aggregati nel calcestruzzo, la costruzione di strade e la massicciata su cui vengono posate le ferrovie.		Banchina di carico della super-cava di granito di Glensanda, Loch Linnhe, Scozia, tra le più grandi d'Europa, ma nascosta nelle colline retrostanti.

Pietre calcaree	Il calcare viene utilizzato per la produzione di aggregati e cemento.		Cava di calcare a Nagara, Toyohashi, Giappone

Tabella 5.2. Esempi di materie prime sfuse utilizzate nell'edilizia

Materia prima	Dettagli	Immagine	Fonte
Sabbia e ghiaia	La sabbia e la ghiaia vengono estratte per la produzione di aggregati nel calcestruzzo.		Cava di sabbia e ghiaia vicino a Lisbona, Portogallo

5.1.2 Materie prime grezze per l'industria

L'industria ha bisogno di aggregati per una serie di usi, tra cui: la produzione di materiali da costruzione, l'approvvigionamento per le industrie ceramiche, e come materie prime per le industrie chimiche e i fertilizzanti agricoli (Tabella 5.3). Poiché i costi di trasporto degli aggregati sono elevati, gli impianti di lavorazione sono situati il più vicino possibile alle cave, oppure sono necessari buoni collegamenti. A volte sono chiamate materie prime grezze perché il loro costo è basso in relazione alla loro massa e al loro volume; quindi, per essere redditizie devono essere estratte su larga scala.

Tabella 5.3. Esempi di materie prime grezze utilizzate nella produzione di materiali da costruzione, nell'industria ceramica e chimica

Materia prima	Dettagli	Immagine	Fonte
Pietre calcaree	Cemento per il calcestruzzo; i blocchi di cemento e la malta si ottengono riscaldando ad alta temperatura calcare e argilla in un forno e macinando il prodotto con gesso ed altri additivi.		Cementificio, Holcim, Eclépens, Svizzera

	l calcare viene riscaldato per formare la calce , utilizzata in agricoltura e nell'industria chimica per produrre l'acciaio, coprenti e leganti per la carta, sbiancanti, per la raffinazione dello zucchero e per il trattamento delle acque.		Un moderno forno rotativo per calce, Wyoming, USA

Tabella 5.3. Esempi di materie prime grezze utilizzate nella produzione di materiali da costruzione, nell'industria ceramica e chimica

Materia prima	Dettagli	Immagine	Fonte
Sale	Il cloruro di sodio non si ricava solo per evaporazione di lagune salate, ma anche dall'estrazione sotterranea di antichi giacimenti di halite (salgemma); si usa per salare gli alimenti, come antigelo sulle strade e per la produzione di plastica e carta.		Cristalli cubici del minerale alite, miniera di sale di Merkers, Germania
Potassa	La potassa è cloruro di potassio. Si ricava dall'estrazione mineraria e il pompaggio della salamoia. È la principale fonte di potassio nei fertilizzanti agricoli e si utilizza anche per produrre molti prodotti chimici industriali.		L'acqua viene pompata all'interno del deposito minerale di potassa solubile, viene poi estratta come salamoia in appositi bacini di evaporazione per recuperare la potassa, Utah, USA

Gesso	Il gesso è un solfato di calcio idrato. Si usa per produrre il "gesso di Parigi" che è usato per fare intonaci e rivestimenti in cartongesso utilizzati nella maggior parte degli edifici moderni.		Una cava di gesso in rocce triassiche vicino a Nottingham, Inghilterra
Argilla per mattoni	L'argilla per mattoni viene modellata in varie forme e poi cotta in forni per produrre mattoni per l'edilizia domestica		Scavo di argilla per mattoni, Baduria, Bengala occidentale, India

Tabella 5.3. Esempi di materie prime grezze utilizzate nella produzione di materiali da costruzione, nell'industria ceramica e chimica

Materia prima	Dettagli	Immagine	Fonte
Argilla cinese	L'argilla cinese – il caolino- è utilizzata per la produzione di porcellana fine, per la produzione di carta e di cosmetici.		Cava di argilla cinese vicino a Kaznějov nella Repubblica Ceca
Sabbia silicea	La sabbia di silice viene mescolata con soda (carbonato di sodio), calce (ossido di calcio) e altre sostanze chimiche, fusa e poi fatta galleggiare sul metallo fuso per ottenere il vetro utilizzato nelle finestre di oggi.		Vista aerea dell'enorme cava di sabbia silicea vicino a Frechen, nella Germania occidentale

5.1.3 Minerali metallici

I minerali metallici sono concentrazioni naturali di metalli che sono economicamente vantaggiosi. Devono essere presenti in quantità ancora maggiori rispetto ad altre materie prime grezze, per rendere economicamente redditizia l'estrazione. Una serie di processi sedimentari, ignei e metamorfici concentrano naturalmente i minerali; alcuni esempi sono riportati nella Tabella 5.4

Tabella 5.4. Esempi di estrazione di minerali metallici

Minerale metallico	Giacimenti naturali	Immagine	Fonte
Ferro, Ematite, Fe_2O_3	Le enormi sequenze di pietre ferrose a bande in Australia e in altre aree continentali si sono formate in epoca precambriana, attraverso processi sedimentari che gli scienziati stanno ancora cercando di spiegare.		Miniera di pietra ferrosa di Tom Price, Australia occidentale - tutto il panorama è macchiato di rosso dalla polvere di ematite

Tabella 5.4. Esempi di estrazione di minerali metallici

Minerale metallico	Giacimenti naturale	Immagine	Fonte
Rame, calco-pirite, $CuFeS_2$	La calcopirite e altri minerali di rame sono stati depositati da fluidi idrotermali caldi che hanno avuto origine in profondità sotto la superficie, attraverso processi metamorfici e idrotermali.		Miniera di rame di Bingham Canyon, Utah, USA - la più grande miniera del mondo, con oltre un chilometro di profondità e quattro di larghezza.
Piombo, galena, PbS	Il piombo si trova spesso insieme a minerali di zinco, rame e argento; i minerali sono spesso depositati dai fluidi idrotermali prodotti dall'intrusione dei magmi nelle rocce circostanti.		Miniera del Monte Isa, Queensland, Australia; la ciminiera alta è quella della fonderia di piombo; la ciminiera della fonderia di rame è di colore bianco-rosso.

Oro, Au	L'oro può essere trovato nativo, non combinato con altri elementi; essendo un minerale denso, dopo essere stato liberato dalla roccia a causa dell'erosione, può depositarsi come oro di giacimento nei letti dei corsi d'acqua.		La ricerca commerciale dell'oro da parte dei Sakalava in Madagascar

5.1.4 Minerali industriali

Si tratta di minerali estratti per il loro valore, che non sono combustibili, minerali metallici o materie prime grezze. Comprendono una gamma molto ampia di materiali. Due esempi sono riportati nella Tabella 5.5.

Tabella 5.5. Esempi di estrazione mineraria industriale

Minerale industriale	Dettaglio	Immagine	Fonte
Elementi rari	Questi giacimenti contengono elementi di terre rare che vengono utilizzati in dispositivi moderni come memorie di computer, telefoni cellulari, DVD, magneti, illuminazione fluorescente e batterie ricaricabili.		Vista satellitare di una miniera di terre rare a Bayan Obo, Cina
Diamanti	I diamanti provenienti dalle profondità del mantello sono portati in superficie da eruzioni vulcaniche che scavano camini fino alla superficie; sono utilizzati come pietre preziose e per il taglio e la macinazione industriale.		La miniera di Mir, Mirny, Russia

5.1.5 Combustibili fossili

I combustibili fossili sono i resti di piante e animali microscopici conservati nel terreno. Quando erano vive, le piante assorbivano energia dal Sole attraverso la fotosintesi. Morendo, i loro resti si sono accumulati, spesso in acqua con poco o senza ossigeno. Poiché l'ossigeno è necessario perché il materiale organico si decomponga completamente, i resti si sono decomposti solo parzialmente, formando depositi sedimentari ricchi di materiale organico. In seguito al seppellimento e alla compressione, gran parte dell'acqua e dei gas di decomposizione sono stati espulsi, arricchendo ulteriormente il contenuto organico. Tutti i materiali organici contengono l'elemento carbonio, ed è la combustione del carbonio nei combustibili fossili a liberare energia.

5.1.5.1 Torba e carbone

La torba è l'accumulo di materiale vegetale parzialmente decomposto nelle acque povere di ossigeno di torbiere, paludi e acquitrini. La torba si accumula nel corso di migliaia di anni, spesso fino a raggiungere uno spessore di oltre 2 metri. Le torbiere non solo sono ricche di carbonio, ma catturano anche l'anidride carbonica rilasciata durante la decomposizione e sono quindi uno dei principali depositi di carbonio sottratto all'atmosfera. Se la torba viene interrata e compressa, conserva una concentrazione di carbonio ancora maggiore.
La torba viene tagliata per essere bruciata e per produrre compost organico per i giardini. Tuttavia, poiché gli scienziati hanno compreso meglio come le torbiere svolgano un ruolo così importante nella rimozione del carbonio dall'atmosfera, lo scavo della torba è stato ridotto a livello globale.

Figura 5.1. Taglio commerciale della torba, Ljungby, Svezia



Se la torba fosse sepolta a profondità ancora maggiori, la compressione da parte dei sedimenti sovrastanti la convertirebbe in carbone. Tuttavia, la maggior parte del carbone viene prodotta nelle condizioni della foresta pluviale delle paludi tropicali. Le piante e gli alberi crescono rapidamente nelle condizioni di caldo umido e, quando muoiono e cadono nelle paludi povere di ossigeno, si decompongono solo parzialmente. Se l'area è soggetta a subsidenza, possono accumularsi molti metri di materiale organico, che a volte conserva foglie, radici o interi tronchi d'albero. Quando lo strato organico viene sepolto sempre più in profondità dai sedimenti sovrastanti, la temperatura aumenta naturalmente mentre l'acqua e i gas di decomposizione vengono “spremuti” fuori, producendo orizzonti di carbone. Maggiore è l'aumento della pressione e della temperatura, maggiore è la quantità di gas rilasciata e più alta la qualità del carbone; il carbone di qualità migliore contiene un’elevata concentrazione di carbonio.

I depositi superficiali di carbone sono stati sfruttati per la prima volta molto tempo fa. Poi sono state scavate gallerie nel sottosuolo, orizzontali o inclinate, oppure pozzi verticali. L'estrazione sotterranea del carbone è chiamata estrazione profonda e alcune miniere raggiungono più di 1 km di profondità. L'estrazione del carbone in profondità continua in molte parti del mondo, ma un'alternativa più economica è l'estrazione del carbone a cielo aperto.

Nelle moderne miniere a cielo aperto, lo strato superficiale viene rimosso e stoccato. Poi si rimuovono le rocce sedimentarie che sovrastano i filoni di carbone e accumulate altrove. Una volta raggiunto il filone, il carbone viene accuratamente pulito e, grazie a macchinari di grandi dimensioni, frantumato e infine trasportato fuori dalla cava. A volte lo scavo a cielo aperto rivela le vecchie gallerie per l'estrazione del carbone in profondità, come nella Figura 5.2. Vengono scavate trincee a cielo aperto sempre più profonde man mano vengono estratti orizzonti più profondi, a volte fino a 60 m di profondità. Poi si scava la trincea successiva e la si riempie con la roccia di scarto della trincea precedente. I minatori a cielo aperto lavorano lungo il sito, trincea dopo trincea, fino a quando tutto il carbone è stato rimosso e l'ultima trincea è stata riempita. A questo punto lo strato superficiale viene riposizionato e l'area viene sistemata nel modo più simile possibile alle condizioni originali.

Figura 5.2. Una miniera di carbone a cielo aperto in un filone di carbone a forte immersione, che rivela un vecchio condotto minerario profondo. Filone di Foord nella Formazione Carbonifera di Stellarton, Stellarton, Nuova Scozia, Canada



5.1.5.2 Petrolio e gas naturale

Gran parte del gas naturale estratto dalla Terra è stato prodotto dalla degassazione naturale del carbone, compresso e riscaldato durante il seppellimento. Nel frattempo, il petrolio greggio e il gas naturale si formano da fanghi e scisti ricchi di sostanze organiche, anch'essi riscaldati e compressi dal seppellimento. Il materiale organico che costituisce la fonte del petrolio proviene originariamente da plancton marino microscopico, piante e animali. Questi si depositavano sul fondo del mare quando morivano e venivano sepolti nel fango che alla fine diventava argillite e scisto. Quindi, il carbone, le argilliti e gli scisti ricchi di sostanze organiche sono le rocce madri originarie del petrolio e del gas. Tutti i materiali organici presenti nelle rocce di partenza ottenevano originariamente la loro energia attraverso la fotosintesi dal Sole e quindi contengono "energia solare fossilizzata".

Affinché si formino depositi di petrolio e gas nel sottosuolo, sono necessari i cinque elementi indicati nella Tabella 5.6, in sequenza dal basso verso l'alto.

Tabella 5.6. I cinque requisiti per la formazione di un giacimento di petrolio e/o di gas

Requisiti del settore petrolifero/ gas	Dettaglio	Immagine	Fonte
Trappola	La forma della roccia di copertura che sovrasta la roccia serbatoio dovrebbe intrappolare un giacimento di petrolio o gas sottostante a forma di bolla. Una forma comune di trappola è l'anticlinale, ma esistono anche diversi altri tipi.		Un'anticlinale al passo Pang La in Tibet
Rocce di copertura	Le rocce di copertura sono costituite da rocce a grana fine che sono impermeabili (i fluidi non possono attraversarle) e intrappolano il petrolio e/o il gas in forma a bolla al di sotto di esse.		Roccia argillosa a Deakin, della formazione siluriana Yarralumla, Canberra, Australia

Roccia serbatoio	Una roccia serbatoio è una roccia con spazi porosi interconnessi sufficienti per contenere un fluido come l'acqua, il petrolio o il gas; è una roccia permeabile che deve essere sia porosa (con spazi porosi) che permeabile (per consentire il passaggio del fluido). Le arenarie sono le più comuni rocce serbatoio di petrolio.		Arenaria contenente naturalmente petrolio, proveniente dal giacimento petrolifero di Hutton nel Mare del Nord
Calore di seppellimento e pressione	Quando le rocce vengono interrate, la loro temperatura aumenta naturalmente. A circa 2 km di profondità la temperatura raggiunge i 60°C e le rocce organiche iniziano a rilasciare petrolio. A 4 km di profondità la temperatura è di 120°C e gran parte del petrolio è stato rilasciato. A questa temperatura inizia a essere rilasciato anche il gas naturale. A 9 km di profondità, a una temperatura di oltre 200°C, il gas rimanente diventa grafite e non può essere rilasciato.		
Roccia originaria	La roccia madre è una roccia ricca di sostanze organiche da cui provengono originariamente il petrolio e il gas. Per il gas naturale, la roccia di partenza è il carbone o fonti petrolifere. La maggior parte del petrolio e una parte del gas naturale provengono da scisti bituminosi neri o da argilliti di colore più chiaro contenenti grandi quantità di materia organica.		Scisti bituminosi dal giacimento di età eocenica nella fossa di Messel, vicino a Francoforte, in Germania.

Tutte le rocce porose contengono fluidi negli spazi dei pori, di solito acqua. Quando le pressioni e le temperature di seppellimento aumentano, le rocce rilasciano il loro petrolio e il loro gas. Questi ultimi salgono negli spazi dei pori perché sono meno densi dell'acqua. Continuano a salire attraverso le rocce permeabili o lungo le fratture, finché non raggiungono la superficie e si disperdono, oppure raggiungono uno strato di roccia impermeabile. Un giacimento sotterraneo di petrolio/gas si forma se la roccia di copertura ha la forma giusta per intrappolare il petrolio/gas al di sotto, è abbastanza grande e ha una roccia sottostante con uno spazio dei pori sufficiente a contenere una buona quantità di petrolio/gas (una roccia serbatoio come quelle della Figura 5.3). Il gas negli spazi dei pori galleggia sul petrolio, che a sua volta galleggia sull'acqua, come illustrato nella Figura 5.4.

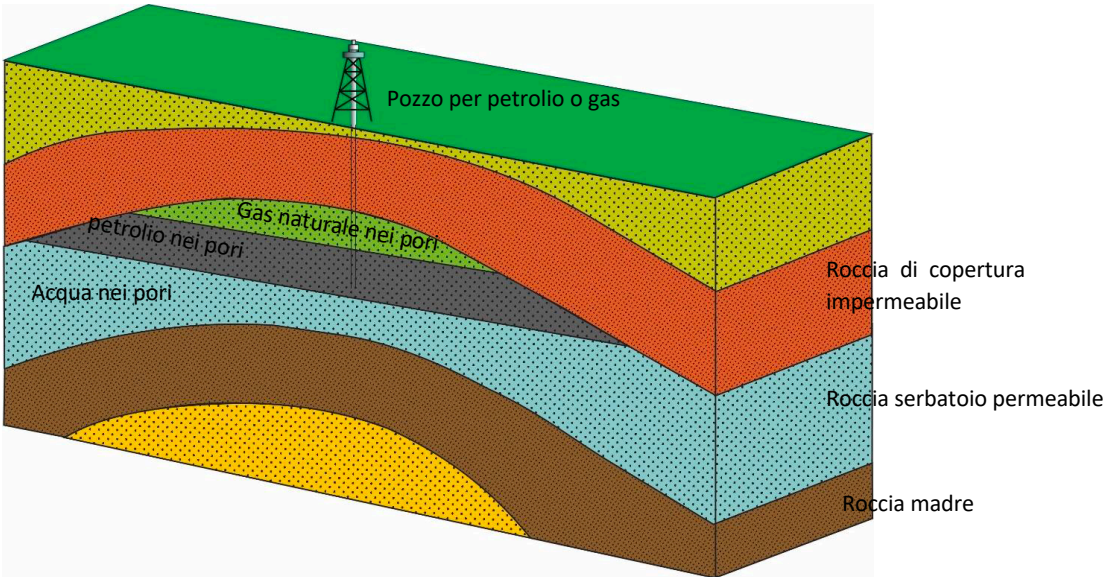
Figura 5.3. Due lastre di arenaria immerse nell'olio del motore, che mostrano come arenarie diverse possano assorbire quantità diverse di olio nei loro pori.





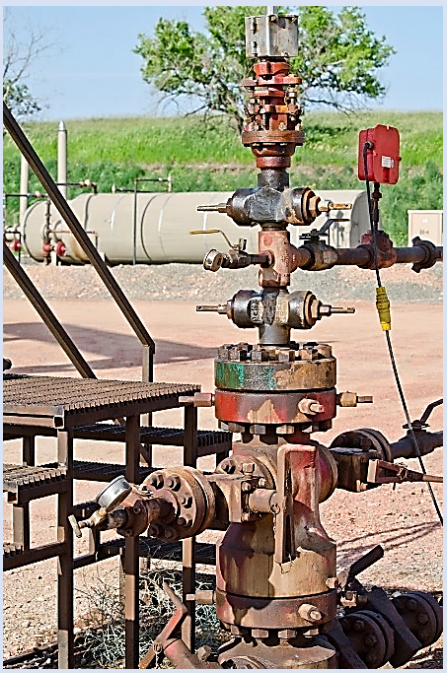
Quando si effettua una perforazione in un giacimento di petrolio e/o gas, il petrolio/gas risale perché ha una densità inferiore a quella dell'acqua e a causa della pressione delle rocce sovrastanti. Può fuoriuscire pericolosamente in superficie, a meno che non venga attentamente controllato dalla serie di valvole collegate alla sommità di tutti i pozzi di esplorazione di petrolio/gas.

Figura 5.4. Un giacimento formato da rocce ripiegate (un'anticlinale) - queste possono contenere petrolio, gas o entrambi insieme



Box 5.1. Valvole per pozzi petroliferi

I pozzi di petrolio/gas sono dotati di un "albero di Natale" di valvole in superficie, per impedire che il petrolio/gas in pressione naturale schizzi pericolosamente fuori dal pozzo (l'immagine qui a fianco proviene da un pozzo nel North Dakota, USA). In passato, prima dell'uso di queste valvole, il petrolio a volte schizzava in superficie attraverso pericolosi "zampilli", come nell'immagine qui sotto, proveniente dagli Stati Uniti intorno al 1911.





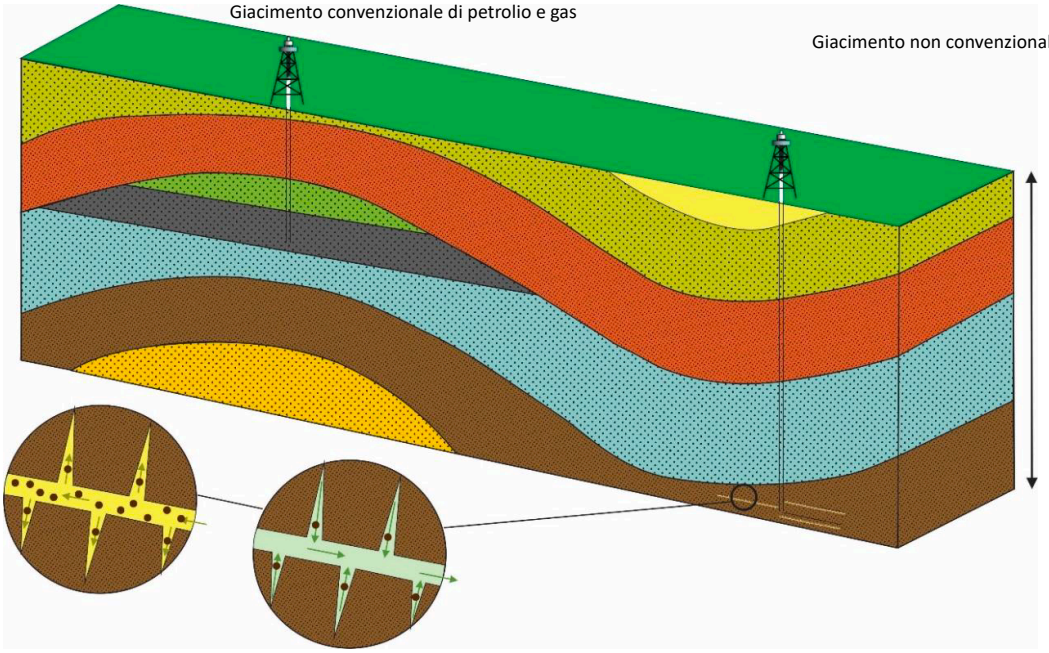
Le rocce serbatoio di molti giacimenti moderni di petrolio e gas vengono fratturate idraulicamente (fracking) per aumentare le quantità di petrolio/gas che possono essere rilasciate dalla roccia. Durante il fracking, il fluido viene pompato nella roccia sotto grande pressione e frattura gli spazi dei pori, allargandoli. Il fluido contiene sabbia che si attacca alle nuove fratture, mantenendole aperte. I pori e le fratture più ampie rilasciano più facilmente petrolio e gas.

Box 5.2. Fratturazione di scisti e arenarie compatte “tight”

Il fracking può essere utilizzato per rilasciare gas naturale da rocce scistose che hanno pochi spazi porosi o sono state sepolte così profondamente che gli spazi porosi sono ridotti. Poiché non è possibile rilasciare quantità economicamente sfruttabili di petrolio/gas da queste rocce senza il fracking, esse sono spesso chiamate "giacimenti non convenzionali", in contrasto con i giacimenti convenzionali mostrati nel diagramma. I giacimenti convenzionali subiscono fracking da molti anni.

I pozzi per il fracking vengono perforati verticalmente dalla superficie e poi orizzontalmente lungo gli strati da fratturare. Da ogni foro verticale viene eseguita una serie di fori orizzontali. Il fluido di fracking viene quindi pompato ad altissima pressione, per contrastare la massa delle rocce sovrastanti. Il fluido di fracking è una miscela di detergente (come il detersivo per i piatti), acido della forza dell'aceto, gelatina (come quella che si trova in alcuni dolci), acqua e sabbia. Il detergente aiuta il fluido a scivolare nel foro, l'acido favorisce la disgregazione chimica della roccia e la gomma addensa il fluido. Le particelle di sabbia spingono le nuove fratture ad aprirsi. L'effetto è quello di rendere le rocce precedentemente quasi impermeabili abbastanza permeabili da rilasciare il gas.

Box 5.2. Fracking di scisti e arenarie compatte



1^: il fluido di fracking viene forzato nella roccia sotto pressione, aprendo fratture - che vengono poi tenute aperte dai grani di sabbia

2^: il gas naturale è rilasciato dalle fratture e fluisce dai pozzi di gas verso la superficie

Se la fratturazione non è controllata in modo adeguato, il rivestimento del foro di trivellazione può perdere, permettendo al fluido o al gas di fratturazione di fuoriuscire nelle falde acquifere vicine alla superficie, inquinandole. Mantenere gli involucri dei pozzi a prova di perdite è uno dei controlli più importanti durante le operazioni di fracking e la successiva estrazione di gas.

5.1.6 Prospezioni

I primi cercatori erano soliti cercare i depositi naturali di minerali o le infiltrazioni di petrolio esposti sulla superficie terrestre, ma questi affioramenti e segni superficiali sono stati quasi tutti trovati, per cui oggi sono necessarie tecniche più efficaci.

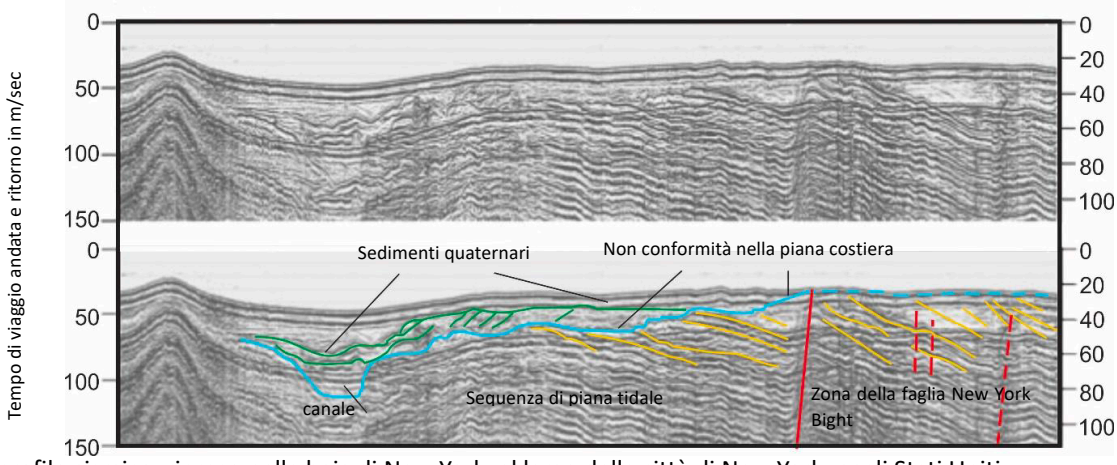
Oggi i cercatori sanno, grazie alla mappatura geologica di superficie sulla terraferma, dove è probabile che si trovino le rocce sorgenti, le rocce serbatoio e le rocce di copertura nel giusto ordine; quindi, cercano soprattutto forme di trappole sotterranee. Possono iniziare effettuando rilievi gravimetrici e magnetici da remoto, poiché questi mostrano dove le rocce più dense o magnetiche si avvicinano alla superficie e possono indicare la presenza di anticlinali poco profonde o formazioni simili nel sottosuolo. In seguito, è probabile che vengano effettuate delle indagini sismiche per mostrare la struttura delle rocce sotto il suolo. Una volta individuata una struttura target probabile, si procede alla perforazione di un pozzo di ispezione alla ricerca di petrolio/gas. La trivellazione è molto costosa, soprattutto in mare aperto; quindi, il geologo di prospezione deve prestare molta attenzione alla raccolta di informazioni e alla previsione dei probabili obiettivi.

Box 5.3. Indagine sismica

Il rilevamento sismico dipende dalle onde d'urto che vengono riflesse dai diversi strati della sequenza rocciosa. La squadra di esplorazione genera onde d'urto sulla terraferma con un'esplosione o utilizzando un "camion vibratore", oppure in mare con un cannone ad acqua o un'esplosione. Le onde d'urto viaggiano verso il basso nella sequenza rocciosa e vengono riflesse dai diversi strati. Le onde d'urto riflesse vengono rilevate da una serie di microfoni, chiamati geofoni a terra, o idrofoni in mare.

Box 5.3. Indagine sismica, continua

I risultati vengono analizzati al computer per produrre una traccia sismica, come mostrato di seguito. La scala verticale a sinistra rappresenta il tempo di percorrenza bidirezionale, ovvero il tempo necessario all'onda d'urto per raggiungere il letto riflettente e rimbalzare verso il ricevitore: questo indica la profondità del letto, indicata a destra. Il diagramma inferiore mostra un'interpretazione della traccia sismica del diagramma superiore, per produrre un'immagine della geologia, come una sezione trasversale geologica.



Un profilo sismico, ripreso nella baia di New York, al largo della città di New York, negli Stati Uniti.

Se un profilo sismico come questo venisse ripreso durante la prospezione petrolifera, un buon obiettivo per il petrolio/gas potrebbe essere l'anticlinale indicata all'estremità occidentale del profilo, o le rocce sotto la non conformità, se le rocce sopra la non conformità fossero impermeabili.

I rilievi gravitazionali e magnetici vengono effettuati anche durante l'ispezione di altre risorse naturali, alla ricerca di anomalie di alta gravità (alta densità) e di magnetizzazione, come indicatori di possibili obiettivi di minerali metallici.

Un metodo di ispezione spesso utilizzato per la ricerca di minerali metallici è il campionamento geochimico di torrenti e terreni. Più comunemente, una serie di campioni di sedimenti viene raccolta dal letto di un torrente, lasciata asciugare e setacciata per ottenere sedimenti a grana fine. Questi vengono poi inviati a un laboratorio per l'analisi, di solito mediante spettrometria a fluorescenza a raggi X (XRF) per più di 50 elementi. Quando si trovano alte concentrazioni di elementi target, i livelli di solito aumentano a monte fino a raggiungere la sorgente; questo viene poi verificato con un campionamento più dettagliato del torrente. Una volta individuata l'area della sorgente, si procede al campionamento del suolo secondo uno schema a griglia fino a trovare i valori più elevati. Infine, vengono scavati dei pozzi fino a identificare la roccia madre e a valutarne il valore come futuro sito minerario.

Box 5.4. Come trovare una miniera di diamanti

- Andare in un continente dove sono stati trovati diamanti in precedenza (i diamanti si formano solo in aree di crosta continentale antica e spessa).
- Eseguire il campionamento dei corsi d'acqua e trattare ogni campione per concentrare i minerali pesanti (densi). Sebbene i diamanti si trovino raramente nei corsi d'acqua, essi provengono da rocce vulcaniche insolite chiamate kimberliti, che contengono altri minerali kimberlitici pesanti come i granati di colore rosso intenso.
- Inviare il concentrato di minerali pesanti al laboratorio per l'analisi.
- Identificare le aree dei corsi d'acqua con alti livelli di minerali kimberlitici e seguirli fino alla loro area di origine.
- Eseguire un campionamento del suolo a griglia nell'area di provenienza, concentrando i minerali pesanti e inviandoli al laboratorio per l'analisi.
- Individuare l'anomalia kimberlitico-minerale più alta e scavare, aspettandosi di trovare kimberlite vulcanica.
- Se siete molto fortunati, la kimberlite che trovate potrebbe essere una delle pochissime kimberliti che contengono abbastanza diamanti da renderla coltivabile.

Box 5.4. Come trovare una miniera di diamanti



Raccolta di un campione di minerali pesanti in un letto di fiume asciutto



Concentrazione di minerali pesanti sul campo



Concentrazione di minerali pesanti su una kimberlite



Miniera di diamanti Premier, Cullinan, Sudafrica

Nota: a volte, quando una kimberlite è stata erosa nel passato geologico, i diamanti possono essere concentrati nei sedimenti di un fiume o di una spiaggia in quantità sufficiente da meritare di essere estratti.

5.1.7 Protezione dell'ambiente e bonifica

I moderni siti di estrazione delle risorse hanno solitamente politiche di protezione e bonifica ambientale. Le politiche di protezione ambientale proteggono l'area locale dagli effetti dell'estrazione. Le politiche di bonifica assicurano che il sito sia lasciato in buone condizioni dopo la fine dell'estrazione e che il monitoraggio del sito continui. Si utilizza una serie di metodi di protezione ambientale, come illustrato nella Tabella 5.7.

Tabella 5.7. Metodi di protezione dell'ambiente durante lo sfruttamento delle risorse naturali

Strategia di protezione ambientale	Dettaglio	Immagine	Fonte
Argini	Le barriere sono costruite intorno alla sommità delle aree di estrazione in modo che non siano facilmente visibili dall'esterno e per ridurre la polvere e il rumore.		Barriera costruita intorno alla sommità di una cava di basalto nei pressi di Hohenfels-Essingen, in Germania.

Tabella 5.7. Metodi di protezione dell'ambiente durante lo sfruttamento delle risorse naturali

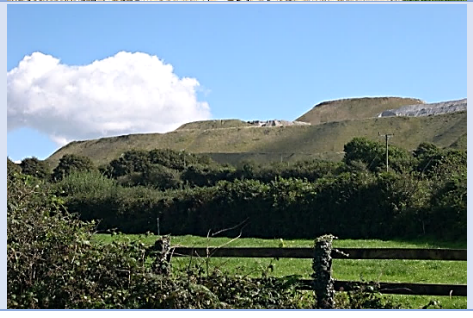
Strategia di protezione ambientale	Dettaglio	Immagine	Fonte
Piantumazione	Gli alberi vengono piantati intorno ai siti di estrazione in modo che il sito non sia facilmente visibile e per ridurre il rumore e la polvere provenienti dal sito.		Schermatura mediante piantumazione di alberi intorno a una cava di basalto attiva, Hühnerberg, Baviera, Germania
Bacini di decantazione	L'acqua pompata dalle miniere e dalle cave, insieme al deflusso durante le piogge, viene convogliata in bacini di decantazione. Il fango si deposita prima che l'acqua venga utilizzata per le operazioni di lavaggio o lasciata scorrere nei corsi d'acqua locali.		Laghetto di decantazione della miniera di ferro della Cagdianao Mining Corporation nelle Filippine
Trattamento di acque contaminate	Le acque reflue vengono trattate per rimuovere gli elementi inquinanti prima di essere rilasciate nei sistemi fluviali.		Trattamento delle acque di scarico delle miniere per rimuovere l'inquinamento da metalli in Australia
Lavaggio dei veicoli	Il fango e la polvere vengono lavati dai veicoli, in modo da non essere trasportati sulle strade vicine.		Un sistema di lavaggio delle ruote dei camion in Germania
Impianto di vegetazione sulle discariche	La vegetazione viene piantata sopra le discariche in modo che le radici leghino il terreno e riducano il flusso dell'acqua sulla superficie, riducendo così l'erosione.		Terrazzamenti erbosi in una discarica di argilla cinese, Higher Coldvreath, Cornovaglia, Inghilterra

Tabella 5.7. Metodi di protezione dell'ambiente durante lo sfruttamento delle risorse naturali

Strategia di protezione ambientale	Dettaglio	Immagine	Fonte
Monitoraggio delle acque sotterranee	Una serie di pozzi viene trivellata intorno al sito di scavo e le acque sotterranee vengono monitorate per verificare la presenza di inquinanti.		Monitoraggio delle acque sotterranee, Coronado National Memorial, Arizona, USA

Quando un sito estrattivo chiude, deve essere bonificato, ovvero ripulito il più possibile, per renderlo adatto a usi futuri. A volte è possibile restituire il sito all'uso originario, ma in altri casi viene destinato a nuovi usi, come un parco naturale o un porto turistico. I processi di bonifica prevedono il modellamento del sito, il ripristino del terreno superficiale rimosso e la piantumazione di piante accuratamente scelte che possano sopravvivere nelle nuove condizioni e possibilmente contribuiscano alla bonifica del terreno.

Nelle aree di estrazione mineraria e di cava, alcuni dei vecchi macchinari e altri oggetti storici possono essere esposti in musei del patrimonio. Alcune pareti rocciose possono essere conservate per il loro valore scientifico, educativo o storico o come siti per la fauna selvatica, ad esempio per gli uccelli che nidificano o per gli animali che amano l'acqua. Anche dopo la bonifica, i siti possono continuare a richiedere un monitoraggio regolare della qualità delle acque sotterranee e dell'ecologia.

Tabella 5.8. Esempi di bonifica

Esempi di bonifica	Dettaglio	Immagine	Fonte
Paesaggistica	Le cave, i pozzi, le miniere e i rifiuti minerari vengono sistemati per ridurre le pendenze e piantumati con vegetazione per ridurre al minimo l'erosione.		L'ex miniera di uranio Jackpile-Paguate sul Laguna Pueblo, a ovest di Albuquerque, USA
Recupero	Le miniere a cielo aperto possono essere bonificate per uso agricolo		Miniera di carbone a cielo aperto e terreno bonificato presso North Antelope Rochelle, Wyoming, USA

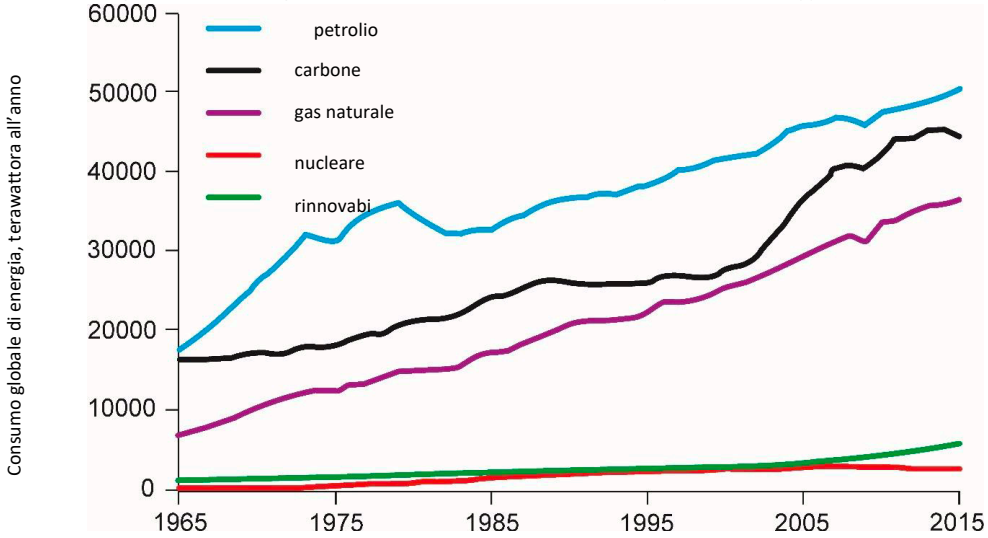
Tabella 5.8. Esempi di bonifica

Esempi di bonifica	Dettaglio	Immagine	Fonte
Conservazione	Parti del vecchio sito estrattivo possono essere conservate per il loro valore storico.		Edificio conservato di una vecchia miniera di zinco, piombo e zolfo, Tipperary, Irlanda
Nuovi usi	Le cupole del progetto Eden, che coltivano piante provenienti da tutto il mondo, sono situate in una vecchia cava di argilla.		Il Progetto Eden in Cornovaglia, Inghilterra
Lavoro sul campo	Le pareti rocciose di vecchi siti di cava hanno una serie di usi scientifici e educativi.		Lavoro sul campo degli studenti ad Apes Tor, un'antica cava di calcare, Staffordshire, Inghilterra

5.2 Fonti di energia

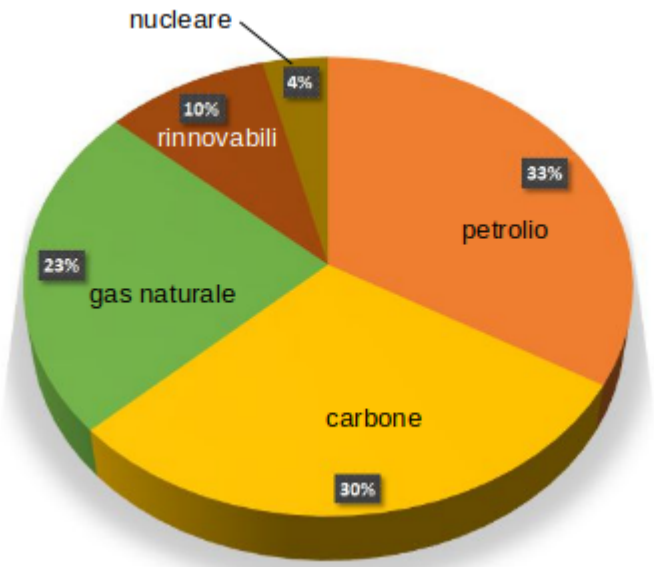
La Figura 5.5 mostra come il consumo mondiale di energia da diverse fonti sia cambiato dagli anni '60, con un aumento dell'utilizzo di petrolio, gas e fonti rinnovabili. Recentemente l'energia nucleare ha registrato un leggero calo e il carbone una diminuzione più marcata.

Figura 5.5. Consumo globale di energia; dati della *BP statistical review of world energy*



La Figura 5.6 riporta un grafico a torta di dati recenti, che mostra come oltre l'85% dell'attuale consumo mondiale di energia provenga da combustibili fossili, il 10% da fonti rinnovabili e solo il 4% da energia nucleare.

Figura 5.6. Consumo globale di energia; dati della *BP statistical review of world energy*



Nonostante i tentativi di ridurre l'uso dei combustibili fossili in tutto il mondo e di passare a fonti di energia rinnovabili, i dati recenti mostrano ancora il peso e l'aumento dell'utilizzo delle fonti fossili. Alle condizioni attuali, è chiaro che ci vorrà molto tempo per invertire queste tendenze.

5.2.1 Energia dai combustibili fossili

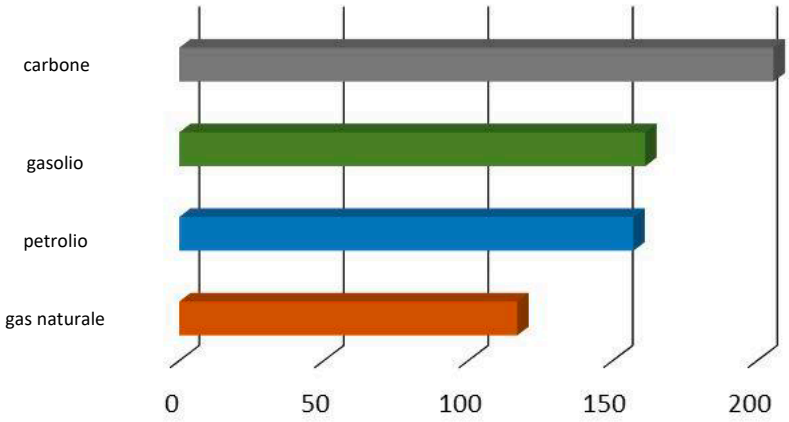
La maggior parte delle centrali elettriche bruciano i combustibili fossili: carbone, petrolio o gas naturale. Tutti e tre sono utilizzati anche per produrre prodotti chimici e altri prodotti industriali, tra cui la plastica.

Il petrolio, una volta raffinato, è la principale fonte di energia per i veicoli stradali e ferroviari e l'unico combustibile utilizzato nei trasporti commerciali aerei e marittimi.

Esiste una pressione globale per ridurre l'uso di combustibili fossili e sostituirli con energie rinnovabili, a causa della loro influenza sul cambiamento climatico. I legami tra l'anidride carbonica, l'effetto serra e i cambiamenti climatici sono stati illustrati nella sezione 4.3.3.

Il grafico della Figura 5.7 mostra che il combustibile che produce più anidride carbonica quando viene bruciato è il carbone. La combustione del carbone rilascia anche più sostanze inquinanti rispetto agli altri combustibili fossili. Tra questi, gas di anidride solforosa e ossido di azoto gassosi, particelle di fumo e le ceneri. A livello globale si stanno facendo passi per chiudere le centrali a carbone e sostituirle con centrali a gas naturale, perché la combustione del gas naturale rilascia solo poco più della metà della quantità di anidride carbonica prodotta dal carbone e riduce notevolmente anche le emissioni di altri inquinanti.

Figura 5.7. Le quantità di anidride carbonica rilasciate dalla combustione di diversi combustibili fossili per produrre la stessa quantità di energia



I combustibili fossili non sono rinnovabili. Ciò significa che, sebbene oggi esistano le condizioni per l'accumulo di materiale organico e la sua conversione in combustibili fossili, ciò avviene molto più lentamente di quanto i combustibili fossili vengano estratti. Pertanto, arriverà un momento in cui la maggior parte dei combustibili fossili presenti sulla Terra sarà stata estratta, il che significa che un'ulteriore estrazione diventerà molto più difficile e costosa.

Proprio perché i combustibili fossili non sono rinnovabili e sono anche inquinanti, è in atto un movimento globale verso le risorse energetiche rinnovabili.

5.2.2 Energie rinnovabili

Le fonti di **energia rinnovabile** vengono sostituite almeno altrettanto rapidamente quanto vengono utilizzate e quindi continueranno a essere disponibili anche in futuro. Inoltre, non rilasciano sostanze inquinanti durante l'uso, anche se possono avere altri effetti sull'ambiente. Per questi motivi, lo sviluppo e la crescita delle fonti di energia rinnovabile sono in aumento a livello mondiale. La Figura 5.8 mostra che la fonte di energia rinnovabile più utilizzata oggi è quella idroelettrica, seguita dall'energia solare, dai biocombustibili e dall'energia eolica (Tabella 5.9). Le fonti geotermiche e mareomotrici generano solo piccole quantità di energia a livello globale, mentre l'energia dalle onde rimane in fase sperimentale.

Figura 5.8. Produzione recente di energia da diverse fonti rinnovabili; dati da REN21 global status report, Tabella R1

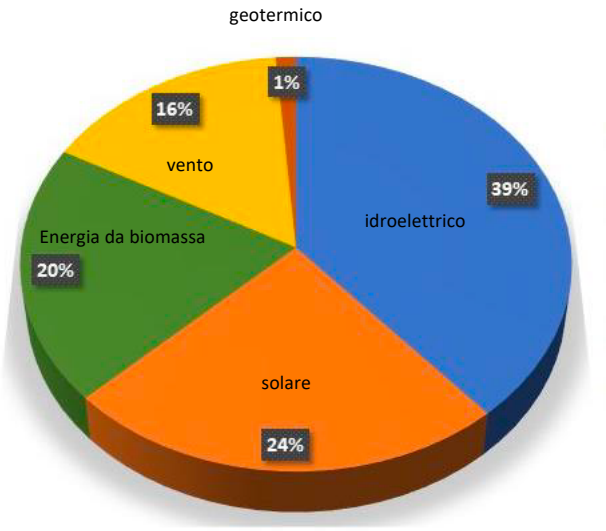


Tabella 5.9. Fonti energetiche rinnovabili, dalla fonte che produce la maggior parte dell'energia globale in cima alla tabella a quella che ne produce di meno in basso

Fonte di energia rinnovabile	Dettaglio	Immagine	Fonte
Idroelettrica	L'energia idroelettrica è generata dalla costruzione di dighe per creare bacini e incanalare l'acqua in turbine per produrre elettricità quando esce dal bacino.		Un canale idroelettrico che collega il bacino del lago Pukaki, in Nuova Zelanda, alle turbine della centrale elettrica
Solare	I pannelli solari sono orientati in modo da raccogliere la maggior quantità di energia solare.		Gli impianti solari PS20 e PS10 in Andalusia, Spagna
Biocombustibili	La maggior parte di questa energia è generata dalla combustione di biomassa (colture speciali o materiali di scarto) per produrre elettricità, ma alcune colture sono utilizzate per produrre biocarburanti per il trasporto.		Impianto di teleriscaldamento a biomassa nei pressi di Steinfelde, Ternitz, Bassa Austria - sullo sfondo la fornitura di combustibile legnoso

Tabella 5.9. Fonti energetiche rinnovabili, dalla fonte che produce la maggior parte dell'energia globale in cima alla tabella, a quella che ne produce di meno, in fondo

Fonte di energia rinnovabile	Dettaglio	Immagine	Fonte
Vento	I parchi eolici sono costituiti da gruppi di turbine eoliche, sulla terraferma o in mare aperto.		Un parco eolico offshore, Bạc Liêu, Vietnam
Geotermica	L'energia geotermica viene generata nelle regioni vulcaniche, dove viene solitamente chiamata energia idrotermale; viene anche estratta da rocce calde in altre aree.		La centrale idrotermale di Nesjavellir a Thingvellir, Islanda
Mareomotrice	L'energia mareomotrice viene generata su piccola scala in diversi paesi, ma finora non esistono centrali mareomotrici commerciali su larga scala.		Modello della centrale mareomotrice di Kislogubskaya nella penisola di Kola, Russia settentrionale
Onde	L'energia delle onde non viene ancora utilizzata commercialmente su larga scala, ma si stanno testando generatori su piccola scala.		Una delle tre macchine Pelamis che attraversa un'onda all'Aguçadoura Wave Park, Portogallo

Due dei problemi di alcune fonti di energia rinnovabile sono che la loro produzione è variabile e che attualmente non disponiamo di un metodo per immagazzinare la loro energia su larga scala. Pertanto, nei giorni in cui c'è poco sole (energia solare), i venti sono deboli o troppo forti (energia eolica), le correnti di marea sono ridotte (durante le maree calanti) o le onde sono piccole (energia delle onde), è necessaria un'altra fonte di energia per fornire una regolare "fornitura di base". La fornitura di base su larga scala è stata tradizionalmente fornita da combustibili fossili e fonti nucleari che possono essere accese e spente abbastanza facilmente a seconda delle necessità.

Anche se le fonti di energia rinnovabili sono rinnovabili e non generano inquinamento durante l'uso, hanno tutte un impatto ambientale, perché utilizzano materie prime ed energia durante la costruzione. Alcune sono criticate anche per altri motivi: la generazione di energia idroelettrica richiede la costruzione di grandi dighe e l'inondazione delle valli da parte di bacini artificiali; i pannelli solari utilizzano costosi elementi di terre rare per la loro costruzione; le colture per la

biomassa possono essere coltivate su terreni utili per altri tipi di agricoltura; le turbine eoliche sono costose da costruire; alcuni pensano che la vista delle turbine eoliche migliori l'ambiente, altri il contrario.

Box 5.5. Energia geotermica: è rinnovabile?

L'energia geotermica può essere ottenuta da tre diverse situazioni geologiche:

- Quando le rocce ignee di grandi plutoni sono diventate calde a causa del decadimento dei minerali radioattivi che contengono: si perforano due pozzi e si frattura la roccia tra di essi; l'acqua viene pompata in un pozzo, si riscalda scorrendo attraverso le fratture e viene estratta dal secondo foro; il calore viene prelevato dall'acqua calda e l'acqua viene pompata nuovamente verso il basso. Si tratta di energia geotermica da roccia calda secca.
- In presenza di falde acquifere profonde, il calore proveniente da livelli profondi della Terra ha riscaldato l'acqua, che è rimasta calda grazie agli spessi strati isolanti di sedimenti sovrastanti. Quest'acqua calda viene pompata all'esterno e riciclata, come descritto sopra. Si tratta di energia geotermica da rocce calde umide
- Nelle aree di attività vulcanica le acque riscaldate dalle camere magmatiche sottostanti diventano calde e possono salire dal basso in pozze calde e geyser; queste acque calde possono essere estratte tramite pozzi e utilizzate per azionare turbine nelle centrali idrotermali. Questa è l'energia idrotermica.

Sia nelle rocce calde e secche che in quelle calde e umide, il calore si è accumulato nel corso di molte migliaia di anni e viene estratto molto più velocemente di quanto possa essere reintegrato; quindi, questi tipi di energia geotermica non sono rinnovabili. Dove esistono centrali idrotermali, il calore viene di solito estratto a una velocità superiore a quella con cui viene rinnovato. Queste centrali eventualmente devono essere chiuse e ne devono essere aperte di nuove in un altro punto del campo idrotermico; quindi, anche questa energia non è di solito estratta in modo rinnovabile.



Centrale idrotermale e pozzo di trivellazione, Brühl, Germania occidentale

Nota: l'energia prelevata dal suolo dalle pompe di calore locali è talvolta chiamata anche energia geotermica; tuttavia, la maggior parte dell'energia estratta in questo modo proviene dal riscaldamento della superficie terrestre da parte del Sole e non da fonti di calore sotterranee. Si tratta di una risorsa rinnovabile, anche se necessita di energia elettrica per il funzionamento del sistema.

6 Interazioni Uomo /Sistema Terra

Senza le interazioni con il sistema Terra, la vita sul nostro pianeta in generale, e quella umana in particolare, non potrebbero esistere. Quindi, anche se molte delle interazioni riportate di seguito hanno effetti negativi o persino devastanti, non dobbiamo dimenticare che senza le relazioni che legano atmosfera e oceano, rocce e suoli, altopiani e pianure e le altre caratteristiche dei sistemi terrestri, la vita come la conosciamo non sarebbe possibile.

6.1 Pericoli naturali

I fenomeni naturali rappresentano **pericoli** che diventano rischi solo quando la vita umana e la proprietà possono essere coinvolte; se c'è una frana in una regione remota, è solo una frana, un pericolo, non un rischio. Il modo migliore per gestire un pericolo naturale è che le autorità competenti si assicurino che le persone non vivano in aree potenzialmente a rischio. Quando ciò non è possibile, si adottano altri mezzi per ridurre o **mitigare** il rischio.

6.1.1 Eruzioni

Quando il magma in risalita raggiunge la superficie terrestre, si verifica un'eruzione vulcanica; alcune eruzioni sono abbastanza sicure e spettacolari, ma altre possono essere pericolose. La gamma dei diversi tipi di attività vulcanica dipende principalmente dalla fluidità (viscosità) del magma. Quando il magma raggiunge la superficie può fuoriuscire dai vulcani sotto forma di lava, oppure viene espulso come cenere fine, blocchi solidi più grandi o "bombe" di lava liquida (Figura 6.1.).

Figura 6.1. 'Bombe' di lava liquida eruttate di notte dal vulcano Stromboli, 2013



La viscosità del magma dipende dalla sua composizione chimica, dalla sua temperatura e dalla quantità di gas e cristalli vulcanici contenuti. Le sezioni 4.1.2.3. (Processi ignei) e 4.1.4. (Tettonica delle placche) mostrano come i diversi margini delle placche sono caratterizzati generalmente da magmi con diverse composizioni.

I magmi più comuni nei margini divergenti (costruttivi) delle placche sono i magmi ricchi di Ferro/Magnesio che producono i basalti. In corrispondenza dei margini convergenti (distruttivi) sono eruttati più comunemente i magmi meno ricchi di Ferro (intermedi) che producono lave andesitiche, anche se talvolta eruttano anche magmi ricchi di Silicio. L'equilibrio tra la percentuale di Ferro/Magnesio e Silicio nei magmi ne modifica la fluidità: i magmi basaltici ricchi di Ferro/Magnesio sono i più fluidi (a bassa viscosità) e si trovano a un estremo della scala, mentre all'altro estremo ci sono quelli ricchi di Silicio, meno fluidi (altamente viscosi). I magmi basaltici sono di solito anche i più caldi e più il magma è caldo, meno è viscoso. I magmi basaltici tendono anche a contenere pochi cristalli, aumentando la loro fluidità. Quando i magmi contengono molto gas, anche questo li rende più fluidi, anche se i magmi basaltici di solito non contengono molto gas. In sintesi, i magmi basaltici ricchi di Ferro/Magnesio sono fluidi e a bassa viscosità, mentre i magmi intermedi e ricchi di Silicio sono più densi e ad alta viscosità.

Quando il magma basaltico fluisce sotto forma di lava, si riversa lungo lunghe fessure superficiali o attraverso le bocche vulcaniche e può essere spruzzato in aria come spettacolari fontane di lava. I fiumi di lava possono scorrere sul terreno o spostarsi più lentamente come masse isolate che avanzano con forza. Si tratta di eruzioni spettacolari che di solito sono abbastanza sicure…se non ci si avvicina troppo!

L'eruzione di magmi intermedi e ricchi di Silicio è molto diversa. Il magma erutta dalle bocche, a volte sotto forma di lava, ma di solito diventa solido all'interno della bocca vulcanica, dando luogo a eruzioni molto più esplosive, come illustrato nella Tabella 6.1.

Tabella 6.1. Fenomeni vulcanici e i loro effetti

Fenomeni vulcanici	Descrizione		Immagine	Fonte
Eruzione di lava	Solitamente a bassa viscosità	La lava può fuoriuscire da una bocca centrale o da fratture formando fontane di lava, scorrendo come un fiume di lava; si creano così vulcani (centrali o lineari) con pendici poco ripide o, se sott'acqua, lave a cuscino.		Fontane di lava e colate laviche in un vulcano di tipo lineare, Hawaii, 2004
Esplosione laterale	Di solito ad alta viscosità; il magma solidifica nel condotto producendo eruzioni esplosive	Quando un vulcano erutta in modo esplosivo lateralmente invece che verso l'alto, può produrre un'esplosione laterale che devasta centinaia di chilometri quadrati di territorio nella direzione dell'esplosione.		Grandi alberi abbattuti dall'esplosione del Mount St Helens, 1980 (persone, in basso a destra, danno idea delle dimensioni)
Eruzione di ceneri/ blocchi		I pennacchi di cenere vulcanica vengono eruttati nell'alta atmosfera. Vengono espulsi anche blocchi che poi ricadono, producendo un cono vulcanico dai lati ripidi. Le ceneri possono essere trasportate dal vento a grande distanza		Eruzione di cenere del Monte St Helens, Stato di Washington, USA, 1980
Nube piroclastica/ nube ardente		Le nubi di cenere vulcanica eruttate possono scorrere velocemente lungo i fianchi dei vulcani come correnti ad alta temperatura chiamate nubi ardenti (nubi incandescenti) o flussi piroclastici.		Nubi ardenti che scendono dal vulcano Mayon nelle Filippine, 1984

Tabella 6.1. Fenomeni vulcanici e i loro effetti

Fenomeni vulcanici	Descrizione		Immagine	Fonte
Flusso di lahar	Di solito ad alta viscosità; il magma si solidifica nel condotto provocando eruzioni esplosive	Quando la cenere vulcanica viene raccolta dall'acqua di un lago craterico, di fusione di ghiaccio o neve su un vulcano o dall'acqua piovana, scorre velocemente a valle con una consistenza simile al cemento, a volte per molti chilometri.		Lahar che seppellisce le case vicino al vulcano Galang-gung, Indonesia, 1983

Il Volcanic Explosivity Index (VEI) o indice di esplosività vulcanica misura l'esplosività delle eruzioni vulcaniche, che vanno da non esplosive a mega-colossali, come mostrato nella Tabella 6.2.

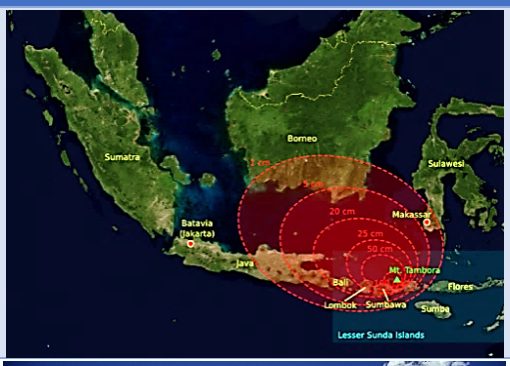
Tabella 6.2. Tipi di eruzioni secondo l'Indice di Esplosività Vulcanica (VEI), che considera l'altezza della colonna eruttiva(m), il volume di materiale espulso (m^3) e la frequenza approssimativa di quel tipo di eruzione (frequenza globale).

VEI	Descrizione	Altezza del pennacchio Volume Frequenza globale	Immagine	Fonte
0	non-esplosiva	Altezza < 100m Volume 1000 m^3 continuo		Lava incandescente che fluisce dal vulcano Pu'u 'Ō'ō, Kilauea, Hawaii, 1997
1	leggera	Altezza 100-1000m Volume 10,000 m^3 giornaliero		Eruzione dello Stromboli di notte; bombe vulcaniche sparate a più di 100 metri di altezza, Italia, 1980
2	esplosiva	Altezza 1-5km Volume 1,000,000 m^3 settimanale		Eruzione del Monte Sinabung, Medan, Indonesia, che ha ucciso le viti in primo piano, 2014

Tabella 6.2. Tipi di eruzioni secondo l'Indice di Esplosività Vulcanica (VEI), che considera l'altezza della colonna eruttiva (m), il volume di materiale espulso (m^3) e la frequenza approssimativa di quel tipo di eruzione (frequenza globale).

VEI	Descrizione	Altezza del pennacchio Volume Frequenza globale	Immagine	Fonte
3	Catastrofica	Altezza 3-15 km Volume 0.01 km^3 mensile		Nevado del Ruiz; questo lahar di cenere eruttata ha sepolto la città di Armero, situata nel centro dell'immagine Colombia,1985
4	cataclismica	Altezza 10-25 km Volume 0.1 km^3 Due anni		Pennacchio dell'eruzione del vulcano Calbuco vicino a Puerto Varas, Cile, 2015
5	Parossistica	Altezza > 25km Volume 1km^3 Dieci anni		Vista satellitare del pennacchio di cenere lungo 800 km dell'eruzione di Puyehue-Cordón del 2011, Cile
6	Colossale	Altezza > 25km Volume 10s km^3 50 – 100 anni		Pennacchio di cenere del Pinatubo durante l'eruzione del 1991 nelle Filippine

Tabella 6.2. Tipi di eruzioni secondo l'Indice di Esplosività Vulcanica (VEI), che considera l'altezza della colonna eruttiva (m), il volume di materiale espulso (m^3) e la frequenza approssimativa di quel tipo di eruzione (frequenza globale).

VEI	Descrizione	Altezza del pennacchio Volume Frequenza globale	Immagine	Fonte
7	Super-colossale	Altezza > 25 km Volume 100 km^3 500 – 1000 anni		Stima dell'area coperta dalla caduta di cenere dell'eruzione del Tambora, Indonesia, 1815
8	Mega-colossale	Altezza > 25 km Volume 1,000 km^3 > 50,000 anni		Enorme cratere vulcanico (caldera) prodotto da tre eruzioni, Yellowstone Wyoming, USA - l'ultima 630.000 anni fa

È difficile immaginare cosa significhino le grandi eruzioni per le persone che vivono nelle vicinanze o capire come possano influenzare l'intera Terra, ma lo studio di particolari eruzioni può dare un'idea.

Box 6.1. Un'eruzione colossale – Krakatoa, 1883

L'eruzione VEI 6 del Krakatoa in Indonesia è stata la prima eruzione colossale ad essere riportata a livello mondiale, grazie ai nuovi collegamenti telegrafici globali dell'epoca e alle notizie diffuse dai giornali, come il Times di Londra.

ERUZIONE VULCANICA A JAVA
BATAVIA, 27 agosto
Ieri sera si sono sentite terribili detonazioni dall'isola vulcanica di Krakatoa, udibili fino a Soerakarta, e piogge di cenere sono cadute fino a Cheribon. I lampi del vulcano sono ben visibili da qui. Serang è ora nell'oscurità totale. In quel luogo sono cadute delle pietre. Anche Batavia è quasi al buio. Tutte le luci a gas sono state spente durante la notte. È impossibile comunicare con Anjer e si teme che lì sia accaduta qualche calamità. Diversi ponti tra Anjer e Serang sono stati distrutti e un villaggio vicino alla prima località è stato spazzato via, poiché i fiumi sono straripati a causa dell'impeto del mare verso l'entroterra.

Il resoconto del Times del giorno successivo mostra come la portata della tragedia abbia iniziato a delinearsi, man mano che iniziavano a filtrare notizie da fonti diverse.



Un'impressione dell'artista disegnata subito dopo l'eruzione

Box 6.1. Un’eruzione colossale – Krakatoa, 1883

La piena portata del disastro è diventata più chiara solo in seguito, quando sono stati raccolti molti altri racconti dell'eruzione a livello locale, i geologi hanno esaminato l'area e sono state raccolte le osservazioni di scienziati di tutto il mondo.

Dall’indagine è emerso che:

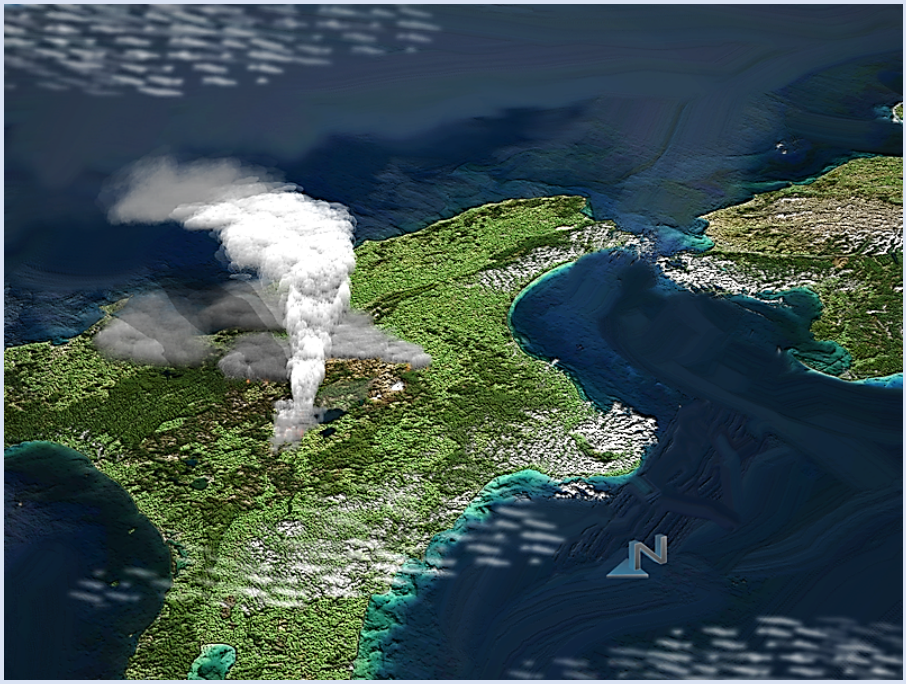
- quasi tre quarti della piccola isola di Krakatoa sono stati distrutti dall'eruzione finale;
- quasi 40.000 persone sono state uccise dall'eruzione e dagli tsunami che ha prodotto;
- la nube di ha raggiunto circa 27 km di altezza;
- pezzi di pomice larghi 10 cm sono caduti sui ponti delle navi a più di 20 km di distanza;
- enormi isole di pomice galleggianti hanno attraversato l'oceano per mesi;
- sono stati eruttati circa 20 km^3 di materiale;
- l'esplosione si è sentita fino a 4.800 km di distanza, sull'isola di Rodrigues nell'Oceano Indiano (dove il governatore pensava che ci fosse una battaglia navale al largo) e nelle città australiane di Perth e Alice Springs;
- l’esplosione di Krakatoa è stato il suono più forte sentito sulla Terra negli ultimi due secoli;
- gli tsunami prodotti hanno generato onde più alte di 30 metri;
- piccole onde di tsunami sono state registrate nel Canale della Manica, dall'altra parte del globo;
- l'onda d'urto atmosferica è stata registrata in tutto il mondo, girando più volte intorno al globo;
- le ceneri si sono sollevate a 80 km di altezza nell'atmosfera e hanno influenzato le dinamiche meteorologiche globali a lungo;
- la cenere è stata trasportata nell'alta atmosfera dalla corrente a getto, che è stata osservato per prima volta;
- nell'anno successivo, le temperature globali nell'emisfero settentrionale si sono abbassate di circa 1,2°C, poiché la luce solare è stata riflessa nello spazio dalle nubi prodotte dai gas vulcanici rilasciati;
- la cenere ha prodotto tramonti spettacolari in tutto il mondo per diversi mesi e il Sole e la Luna sono apparsi a volte con colori strani;
- si ritiene che l'energia rilasciata dall'eruzione sia stata pari a circa quattro volte la potenza della più grande bomba nucleare mai esplosa.

Queste osservazioni danno una buona idea di come sia effettivamente un'eruzione "colossale".



Dipinti del cielo nel "bagliore" causato dalle ceneri dell'eruzione del Krakatoa nel 1883, di William Ashcroft

Box 6.2. Un’eruzione mega-colossale – Eruzione di Oruanui, 25.360 anni fa



Impressione d'artista dell'eruzione di Oruanui dallo spazio

La mega-eruzione Oruanui del vulcano Taupo è la più recente eruzione VEI 8 che ha colpito la Terra. L'eruzione è avvenuta circa 25.000 anni fa, molto prima che l'uomo colonizzasse la Nuova Zelanda. Questo è un fatto positivo, perché l'eruzione ha probabilmente devastato l'intera Nuova Zelanda. Poiché non abbiamo testimonianze oculari dell'eruzione, dobbiamo basare le nostre idee di come sia stata l’eruzione sulla base delle evidenze geologiche. Queste indicano che:

- sono stati espulsi 1170 km^3 di materiale ricco di silicio, quasi 60 volte la quantità di materiale eruttato dal Krakatoa nel 1883;
- 430 km^3 di cenere sono stati eruttati nel cielo, ricadendo sulla maggior parte della Nuova Zelanda sotto forma di spessi depositi di cenere spessi 18 cm che sono stati individuati su isole a 1000 km di distanza;
- 320km^3 di cenere è stata eruttata lateralmente in nubi ardenti, lasciando depositi spessi fino a 200 metri;
- la camera magmatica è collassata formando un enorme cratere (caldera) di oltre 30 km di diametro, oggi riempito dal lago Taupo;
- il corso del fiume Waikato è stato deviato in modo da raggiungere il mare sulla costa occidentale dell'Isola del Nord, anziché su quella settentrionale.

Per questo evento catastrofico ci sono solo testimonianze geologiche mentre non ci sono registrazioni degli impatti sul resto della Terra perché l'eruzione è avvenuta molto prima dell'invenzione della scrittura. Essendo al centro dell'Isola del Nord, l'eruzione potrebbe non aver prodotto tsunami, ma l'eruzione di enormi quantità di ceneri e gas vulcanici nell'atmosfera deve aver avuto effetti climatici a livello mondiale. Se l'eruzione del VEI 7 di Tambora in Indonesia nel 1815 ha potuto produrre un "anno senza estate" e una carestia in Europa, gli effetti globali dell'eruzione del VEI 8 di Oruanui possono solo essere immaginati, dato che ha eruttato nell'atmosfera una quantità di ceneri e gas vulcanici forse dieci volte superiore.

Le eruzioni di vulcani ad alta esplosività possono essere così devastanti che gli scienziati stanno lavorando da molti anni per prevederle. È stata sperimentata un'ampia gamma di metodi di monitoraggio dei vulcani, alcuni dei quali sono descritti nella Tabella 6.3. Il problema di tutti questi metodi è che possono indicare che un’eruzione è probabile, portando all'evacuazione delle aree circostanti, ma se i segnali decrescono, senza alcuna eruzione, le persone saranno meno propense a obbedire al successivo ordine di evacuazione. Quindi, pur sapendo che le eruzioni dei vulcani attualmente attivi si verificheranno, prevedere il momento esatto e la portata delle eruzioni rimane un compito molto difficile.

Tabella 6.3. Metodi utilizzati per monitorare le eruzioni vulcaniche

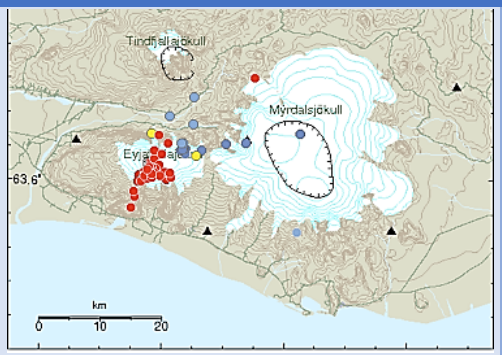
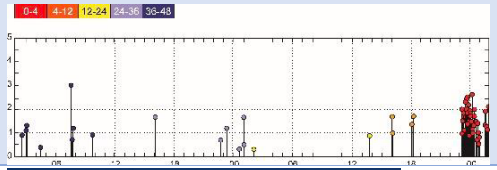
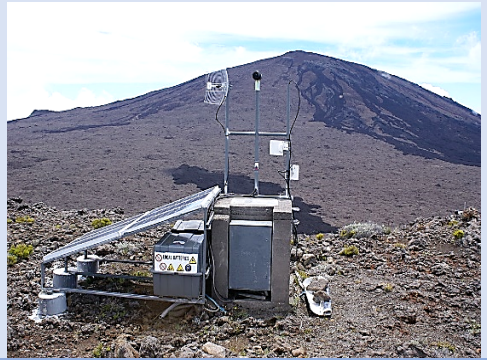
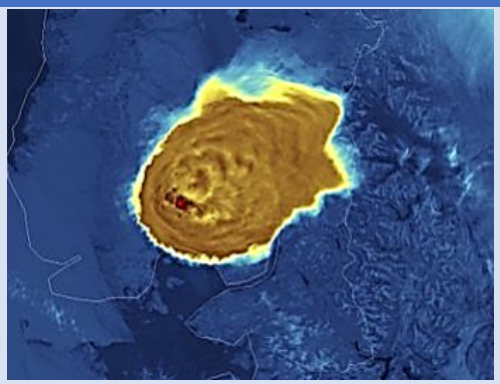
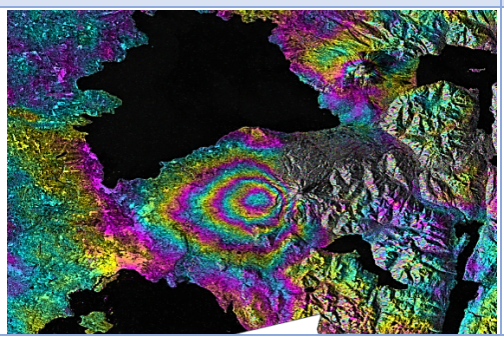
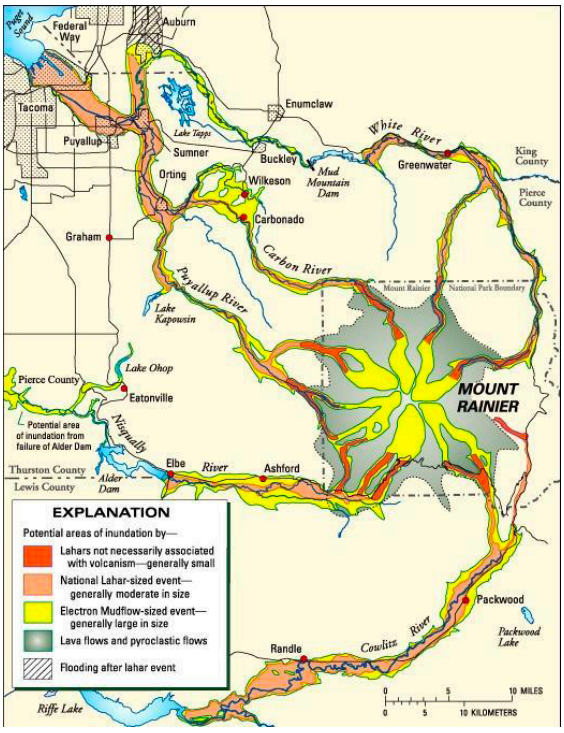
Metodo di monitoraggio	Descrizione	Immagine	Fonte
Sismicità	Nel periodo che precede le eruzioni vulcaniche possono prodursi diversi tipi di scosse sismiche, tra cui quelle armoniche che si pensa siano prodotte dal flusso di magma nel sottosuolo.	 Tempistica e dimensione delle scosse sismiche prima dell'eruzione dell'Eyjafjallajökull alle 01:55 di mercoledì 14 aprile 2010. 	Terremoti legati all'eruzione del 2010 dell'Eyjafjallajö-kull in Islanda
Emissioni di gas	La fuoriuscita di gas può aumentare o diminuire prima delle eruzioni vulcaniche, fornendo indizi su future eruzioni.		Zolfo giallo in uno sfiato di gas vulcanico; il gas viene monitorato da un sensore, White Island, Nuova Zelanda
Deformazione del suolo	Il rigonfiamento di un vulcano indica che il magma si sta accumulando vicino alla superficie. Questo fenomeno può essere monitorato misurando le variazioni di posizione di una stazione, utilizzando il Global Positioning System (GPS), e misurando le variazioni di pendenza con i clinometri, e le deformazioni con gli estensimetri.		Stazione di monitoraggio GPS, vulcano Piton de la Fournaise, Isola della Riunione, Oceano Indiano

Tabella 6.3. Metodi utilizzati per monitorare le eruzioni vulcaniche

Metodo di monitoraggio	Descrizione	Immagine	Fonte
Monitoraggio termico	Il movimento del magma, il rilascio di gas e l'attività idrotermale possono riscaldare un vulcano prima di un'eruzione; ciò può essere rilevato dai satelliti e sul terreno. I rilevamenti a terra possono misurare direttamente la temperatura superficiale o monitorare i cambiamenti nelle sorgenti calde o nei pozzi d'acqua.		Immagine termica; elevato flusso di calore (rosso, marrone e giallo) nel cratere di Calbuco in Cile, 2015, sullo sfondo blu della terraferma.
Telerilevamento	I satelliti possono monitorare la temperatura, come indicato sopra, e anche la deformazione del terreno, così come il rilascio di gas vulcanici e l'eruzione di nubi di cenere prodotte dai vulcani.		Deformazione del terreno mostrata in un'immagine satellitare in falsi colori, legata all'eruzione del 2015 di Calbuco, Cile

Il modo più efficace per mitigare o ridurre il rischio di eruzioni vulcaniche è la pianificazione territoriale che impedisca alle persone di costruire in aree pericolose. Le aree a rischio possono essere studiate attraverso un'indagine geologica per individuare i segni di eruzioni pericolose avvenute in passato e quindi produrre mappe di pericolosità (ad esempio, Figura 6.2).

Figura 6.2. Un esempio di mappa di pericolosità vulcanica, Monte Rainier, Stato di Washington, USA, che prevede cosa potrebbe accadere in una grande eruzione vulcanica.



Quando non è possibile costruire al di fuori delle aree pericolose, si adottano misure per prepararsi alle eruzioni pericolose. Queste includono il monitoraggio dei vulcani e la preparazione di risposte di emergenza agli allarmi. La popolazione viene istruita su come comportarsi in caso di emergenza e vengono istituiti sistemi per avvisare la popolazione. I servizi di emergenza sono addestrati all'evacuazione delle persone e ai metodi di ricerca e salvataggio. Ci si prepara ad aiutare le persone ad affrontare la catastrofe della perdita di case e proprietà e a ricostruire gli insediamenti nello stesso luogo o altrove.

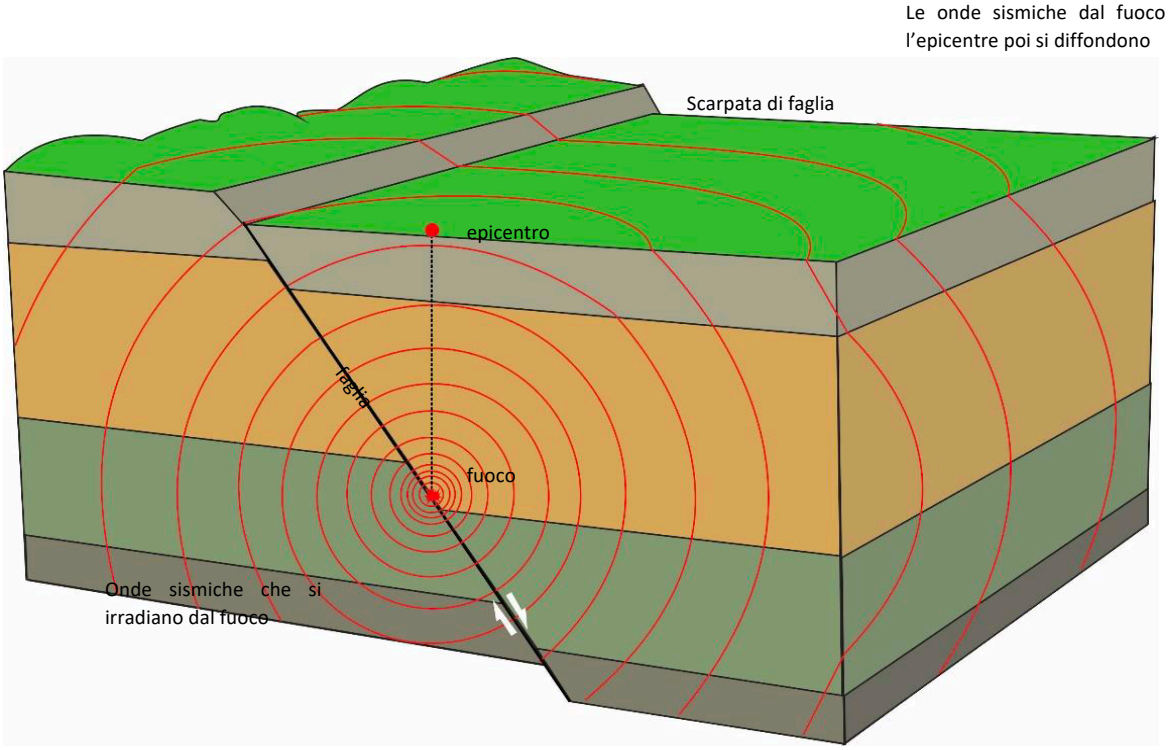
Laddove sono stati istituiti sistemi di questo tipo, hanno avuto successo. La mitigazione della colossale eruzione del 1991 VEI 6 del Pinatubo nelle Filippine ha salvato 5.000 vite e proprietà per 250 milioni di dollari di. La mitigazione dell'eruzione catastrofica del 1995 VEI 3 sull'isola di Montserrat, nelle Antille, ha salvato 11.000 vite.

6.1.2 Terremoti

I terremoti sono causati dalla rottura delle rocce lungo delle strutture chiamate faglie con liberazione di energia che si propaga in tutte le direzioni. La natura dei terremoti è stata spiegata da un punto di vista fisico e meccanico dagli studi di H.F. Reid sulla faglia di San Andreas in California (1911). Prima di allora, non c'era un'idea chiara di cosa causasse i terremoti, quindi non sorprende che in tutto il mondo siano nati molti miti e storie per spiegare questi eventi catastrofici.

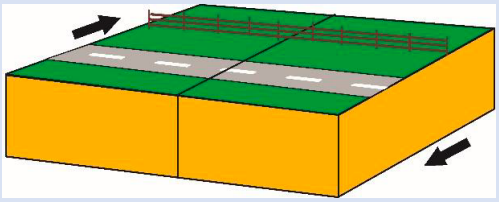
Le pressioni alle quali sono sottoposte le rocce del nostro pianeta per via della tettonica delle placche, si accumulano fino a quando le rocce si fratturano lungo una faglia, quando cioè le rocce si muovono in corrispondenza di queste superfici tettoniche. Il punto di frattura, dove si verifica il maggior movimento, è il **fulcro** (o ipocentro). La rottura improvvisa produce onde d'urto che si irradiano in tutte le direzioni come onde del terremoto. Le onde d'urto che attraversano la Terra sono chiamate **onde sismiche**.
Quando le onde d'urto raggiungono la superficie terrestre, direttamente sopra il fuoco, questo è il punto in cui il terremoto è più forte e in cui eventualmente si verificano i danni maggiori; questo è **l'epicentro** (Figura 6.3). Le onde d'urto si irradiano sulla superficie terrestre a partire dall'epicentro, come le increspature di uno stagno, e riducendo la loro potenza proprio come queste. Normalmente la maggior parte dei danni causati dai terremoti si verifica in corrispondenza dell'epicentro, anche se altri fattori, come la geologia del sottosuolo e la tipologia di costruzioni possono influenzare il risentimento sismico nelle aree interessate dall'attraversamento delle onde sismiche.

Figura 6.3. Un terremoto che produce onde sismiche

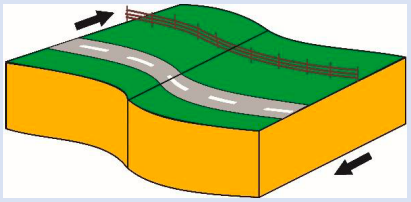


Box 6.3. La teoria del rimbalzo elastico

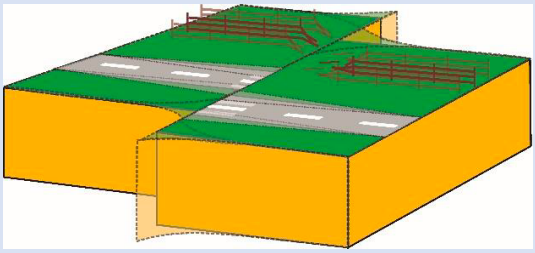
Una teoria scientifica per spiegare i terremoti fu sviluppata nel 1911 da H.F. Reid, studiando la faglia di San Andreas in California, negli Stati Uniti. Egli tracciò il movimento dei punti su entrambi i lati della faglia e si rese conto che il terreno si muoveva in direzioni diverse su entrambi i lati di una faglia prima del terremoto. Man mano che la pressione aumentava, il terreno su entrambi i lati si piegava. Alla fine, non potendo più piegarsi, la faglia si ruppe, provocando le onde d'urto, cioè il terremoto. La chiamò "teoria del rimbalzo elastico" perché il terreno rimbalzava elasticamente quando la faglia si muoveva.



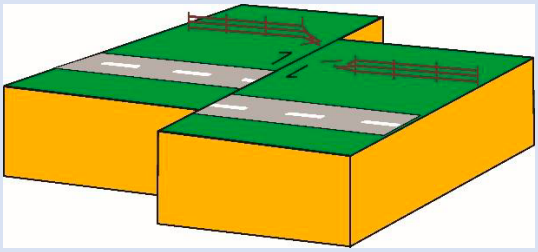
1-Recinzione e strada sono costruite sopra una faglia ferma



2-La pressione aumenta, la roccia, la recinzione e la strada si piegano.



3-La faglia si rompe improvvisamente, la roccia rimbalza elasticamente (boing!) causando un terremoto.



4-Dopo il terremoto, la faglia si è mossa, la recinzione e la strada sono di nuovo dritte, ma sono spezzate lungo la faglia.

Movimento del terreno nella "teoria del rimbalzo elastico" di H.F. Reid

I piccoli terremoti, solitamente chiamati tremori sismici, sono così deboli che possono essere rilevati solo da dispositivi per il rilevamento sismico chiamati sismografi. I sismografi sono così sensibili da poter rilevare le vibrazioni di camion o treni, le esplosioni delle cave e persino l'urlo della folla quando viene segnato un gol in uno stadio di calcio. Reti di sismografi sono state collocate in tutto il mondo e non solo mostrano le dimensioni del terremoto, ma anche la posizione del suo epicentro e la profondità del suo fuoco. Questo lavoro è stato utilizzato per localizzare la posizione e la profondità dei terremoti nella Tabella 4.22, utilizzata come prova della teoria della tettonica a placche.

Box 6.4. Sismometri

I sismometri hanno una massa sospesa all'interno, in questo modo quando la Terra muove il sismometro, la massa all'interno si muove, più lentamente. La differenza tra il movimento del sismografo e quello della massa all'interno viene ingrandita e registrata da una penna su un tamburo che ruota nel tempo, oppure come registrazione elettronica. I sismografi all'aperto sono solitamente collocati in buche nel terreno con l'apparecchiatura di registrazione nelle vicinanze, compresa l'apparecchiatura per inviare i dati a un laboratorio di registrazione. I sismografi per interni devono essere montati su pavimenti in cemento al pianterreno; i piani superiori degli edifici vibrano troppo. I moderni telefoni cellulari sono dotati di un sensore di vibrazioni simile, che può essere utilizzato come sismometro scaricando l'applicazione corretta.

Box 6.4. Sismografi, continua



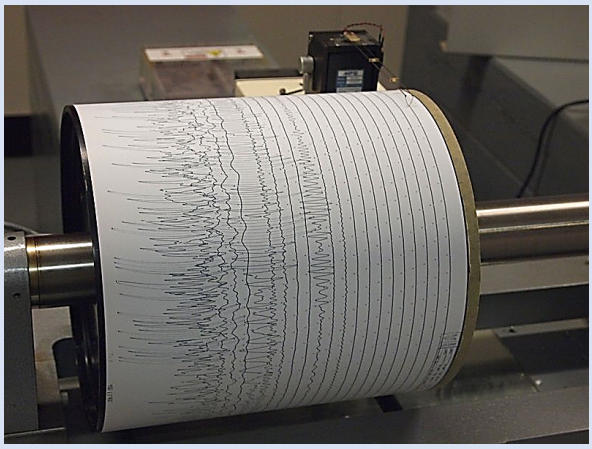
Apparecchiatura di registrazione per un sismografo, facente parte di una rete, posizionato in una buca nelle vicinanze, Golfo di Corinto, Grecia



Apparecchiature di registrazione e alimentazione elettrica di riserva per un sismografo del Golfo di Corinto



Due sismometri, uno più vecchio a sinistra, uno più moderno a destra, Laboratorio sismologico di Patrasso, Grecia



Registrazione del tamburo di un sismografo

I sismometri possono misurare la forza o la magnitudo di un terremoto all'ipocentro. Un tempo si registrava con la scala Richter, ma oggi si usa invece la scala della Magnitudo del Momento sismico. La forza di un terremoto ad ogni livello è dieci volte la magnitudo del terremoto di livello inferiore (Tabella 6.4).

Tabella 6.4. La scala della Magnitudo del Momento sismico

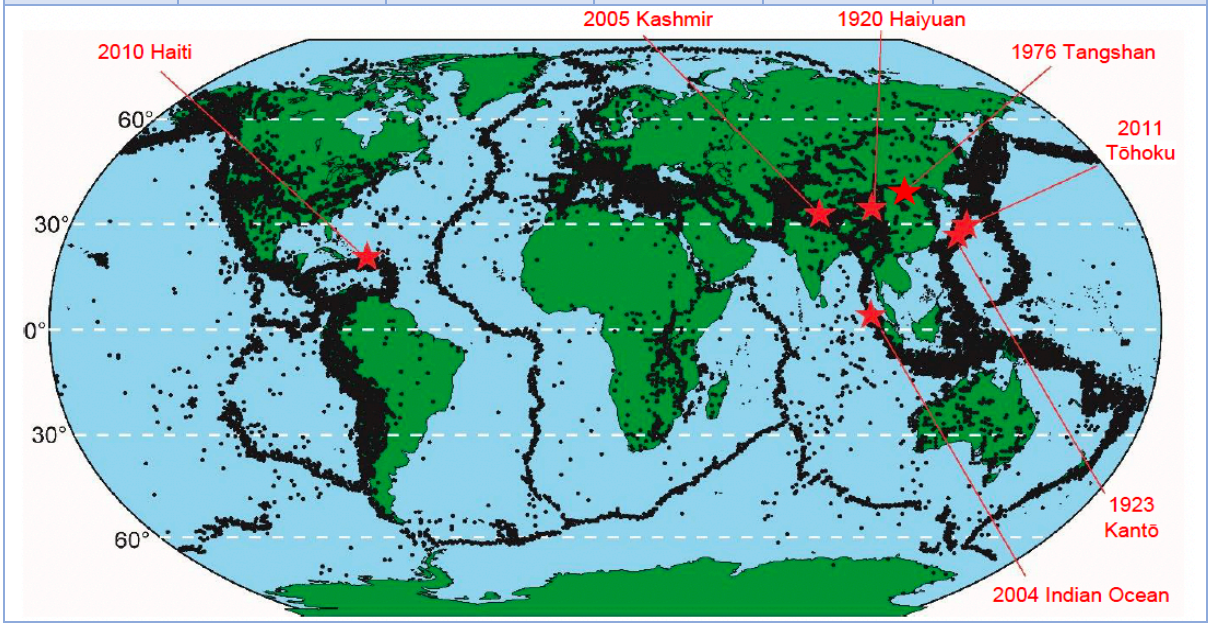
Magnitudo Momento	Descrizione	Danni	Numero approssimativo all'anno
Meno di 3	Non percepito dalle persone	Nessuno	Molti
3 - 5	Minore	Pochi	150000
5 - 7	Da moderato a forte	Da lievi a intensi	150
7 - 8	Maggiore	Seri	15
Più di 8	Un "grande" terremoto	Catastrofici	1

Il più grande terremoto mai registrato finora è stato quello di magnitudo 9,5 in Cile nel 1960. Un terremoto di magnitudo 10 non è mai stato registrato.

I dettagli di alcuni terremoti importanti, registrati in ordine di numero approssimativo di morti, sono mostrati nella Tabella 6.5.

Tabella 6.5. Alcuni dei terremoti più pericolosi, in base al numero di morti

Terremoto	Data	Posizione	Morti	Magnitudine	Commento
Haiyuan	16 dicembre 1920	Ning-Gansu, China	Più di 270,000	7.8	Scuotimenti, fratture del terreno e frane
Tangshan	28 luglio 1976	Hebei, China	Più di 240,000	7.8	Scosse amplificate dal terreno soffice
Oceano Indiano	26 dicembre 2004	Al largo di Sumatra, Indonesia	Più di 230,000	9.2	La maggior parte dei morti causati dallo tsunami
Haiti	12 gennaio 2010	Haiti, Mar dei Caraibi	100,000 – 316,000	7.0	La scarsa profondità dell'epicentro ha causato forti scosse
Kantō	1° settembre 1923	Kantō, Japan	Più di 100,000	7.9	Il terremoto ha provocato numerosi incendi nelle case, causando molte vittime
Kashmir	8 ottobre 2005	Muzaffarabad, Pakistan	Più di 85,000	7.6	Scosse intense
Tōhoku	11 marzo 2011	Al largo di Sendai, Japan	Più di 15,000	9.0	La maggior parte dei morti causati dallo tsunami, danneggiata la centrale nucleare



La Tabella 6.5 mostra alcuni dei diversi fattori che possono rendere i terremoti così disastrosi. Nella maggior parte dei terremoti la principale causa di morte è lo scuotimento della superficie del suolo che provoca il crollo degli edifici. Il tenente di polizia H. N. Powell ha descritto questo fenomeno durante il terremoto del 1906 a San Francisco: "*Valencia Street... cominciò a ballare, ad arretrare e a rotolare in onde come un mare agitato... Era impossibile per un uomo stare in piedi... Le case si fratturavano, si piegavano e si rompevano come la strada stessa*". Le scosse e la distruzione possono essere molto più gravi quando il terreno è morbido, come quando gli edifici sono stati costruiti su vecchi depositi lacustri o su terreni bonificati.

Vale la pena ricordare il vecchio detto: *"Non sono i terremoti a uccidere le persone, ma gli edifici"*.

Le faglie profonde possono talvolta raggiungere la superficie, danneggiando grandi strutture come ponti, dighe e centrali nucleari. I terremoti innescano frane e valanghe in aree con forti pendenze. La rottura della rete elettrica e del gas

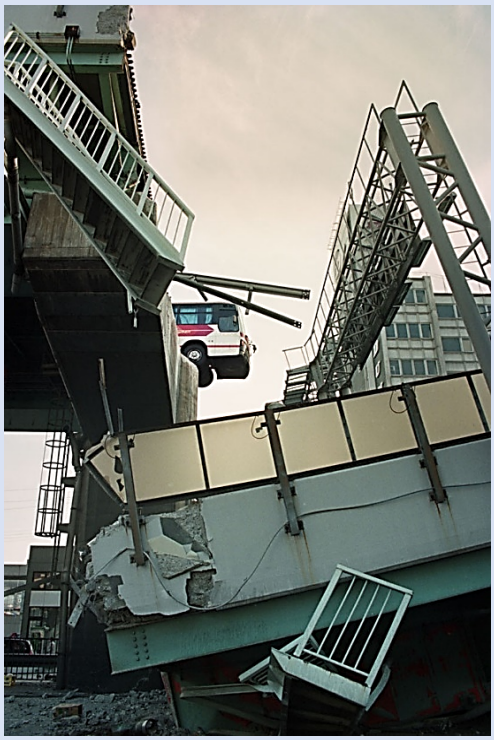
provoca incendi, che non possono essere controllati se anche la rete idrica è stata interrotta. Alcuni terremoti provocano tsunami, che possono essere molto dannosi nelle zone costiere. Tutti questi fattori aumentano il rischio sismico.
La Tabella 6.5 mostra che il numero di morti può non essere strettamente legato alla magnitudo di un terremoto. Quando i terremoti colpiscono città moderne e preparate, il numero di morti è di solito molto più basso rispetto ai terremoti in regioni meno sviluppate. Nelle aree meno sviluppate, gli edifici possono essere stati costruiti male e la ripresa può essere lenta a causa del crollo delle comunicazioni e della scarsa preparazione. Ad esempio, il bilancio delle vittime del terremoto di magnitudo 7,0 ad Haiti nel 2010, riportato nella Tabella 6.5, è stato superiore a 100.000 perché la maggior parte degli edifici era in cemento armato di scarsa qualità. Quando un terremoto di magnitudo 8,8, molto più grande, ha colpito il Cile nello stesso anno, il bilancio delle vittime è stato di soli 520 morti, perché le norme edilizie antisismiche erano state fortemente applicate.

Box 6.5. Il terremoto di Kobe, Giappone, 1995 - magnitudo 6.9

Studente della scuola superiore di Akatsukayama,

Yasuyo Morita (17 anni) in quel momento stavo dormendo. All'inizio ho pensato che mia madre mi stesse svegliando, ma dal suo urlo ho capito che si trattava di un terremoto! Non sapevo cosa fare al buio. Le scale erano distrutte, così sono scesa con una scala a piedi nudi e in pigiama. Non riuscivo a trattenere le lacrime per il buio e il freddo. Ero nel panico. Nel mio quartiere ci sono molte case di legno. Ora sono distrutte senza pietà. Presto è diventato più chiaro e ho potuto vedere ciò che mi circondava. Alcuni sono impazziti. Sono andata in ospedale con mia nonna che è stata salvata da un cumulo di macerie. Le si stava staccando un dito. Siamo arrivati in ospedale. Era un inferno in terra. Un uomo che sanguinava dalla testa, un bambino - forse violaceo per il soffocamento. Era pieno di gente. Mia nonna è stata disinfettata, tutto qui. La sua ferita non era grave rispetto agli altri. La casa di mia nonna e quella di mio nonno sono entrambe bruciate. Non siamo riusciti a tirar fuori nulla. La città che mi piaceva è cambiata in un attimo. Ero triste. Ora vivo in uno dei rifugi e di notte ho paura. Voglio vedere Kobe ricostruita al più presto".

Fonte: http://www.sln.org.uk/geography/7-11kobe.htm



Il terremoto colpì la città di Kobe in Giappone alle 05.46 del mattino del 17 gennaio 1995, quando la maggior parte delle persone stava ancora dormendo. Il terremoto misurò 6,9 sulla scala di Magnitudo del Momento sismico; il suo ipocentro era su una faglia attiva a 17 km di profondità. In alcune aree si verificarono scosse violente durate fino a tre minuti. Il movimento della faglia è stato innescato dalla subduzione della placca del Mare delle Filippine sotto la placca Eurasiatica, che trasporta il Giappone.

L'epicentro è stato a 20 km dalla città di Kobe, con una popolazione di 1,5 milioni di persone. Circa 4.600 abitanti di Kobe hanno perso la vita, soprattutto a causa del crollo di edifici. Molti incendi imperversarono sulla città, causati dalla rottura delle linee del gas e dell'elettricità. Il terreno più soffice nell'area portuale si è liquefatto, tanto che gli edifici si sono rovesciati e le gru sono cadute in mare. Molte linee di trasporto furono distrutte e un'autostrada sopraelevata che attraversava la città crollò. I cavi elettrici, le tubature del gas, dell'acqua e delle fognature si sono rotte, aggravando i problemi. I servizi di soccorso non hanno potuto raggiungere la città facilmente e, una volta arrivati, hanno dovuto affrontare strade bloccate e comunicazioni interrotte. I binari del treno ad alta velocità e di altre due ferrovie erano interrotti, tagliando a metà le comunicazioni in Giappone.

La maggior parte degli edifici crollati era stata costruita secondo le norme edilizie del 1960; gli edifici costruiti secondo norme edilizie più recenti sono per lo più sopravvissuti. In seguito al terremoto, molti volontari si sono recati nella zona per offrire aiuto, i piani di prevenzione dei disastri del Paese sono stati migliorati e sono stati molto più efficaci in un successivo terremoto, sono stati costruiti molti rifugi antisismici e l'economia della zona è tornata quasi alla normalità nel giro di un anno.

Box 6.6. Il terremoto del Kashmir, Pakistan, 2005 - magnitudo 7.6

Shazia Ahmed – una madre

"Ho fame!" Queste sono state le prime parole che mia figlia mi ha detto quando l'ho tirata fuori dalle macerie di quella che era la nostra casa. Non avevo mai provato tanto sollievo in tutta la mia vita. Anche se Umbreen era impolverata e piena di lividi, era viva e in quel momento non poteva esserci miracolo più grande.

Sono stati tre giorni di terrore agonizzante prima che mio marito e i vicini riuscissero a salvare la nostra bambina. Tre giorni di tortura che solo una madre può capire. L'ho afferrata e ho controllato freneticamente che non mancassero arti, dita delle mani e dei piedi. L'ho portata all'ospedale da campo in fondo alla montagna e, a parte alcuni tagli e lividi, i medici le hanno dato un certificato di buona salute. È un miracolo che sia viva e stia bene...

Il nostro "villaggio" è ora composto solo da circa 200 tende alla base della montagna. Le case di tutti sono state distrutte. Per fortuna il personale di Sungi (un partner locale di Oxfam) è venuto ad aiutarci. Non solo hanno fornito tende, coperte e acqua potabile, ma anche una spalla su cui appoggiarsi nel momento in cui ne avevamo più bisogno.

A volte si ha solo bisogno di qualcuno che ascolti e condivida il proprio dolore".

Fonte: https://www.oxfam.org.nz/what-we-do/emergencies/previous-emergencies/kashmir-earthquake-2005/stories -from-balakot



Shazia con la sua bambina, sopravvissuta per tre giorni tra le macerie a Balakot prima di essere salvata



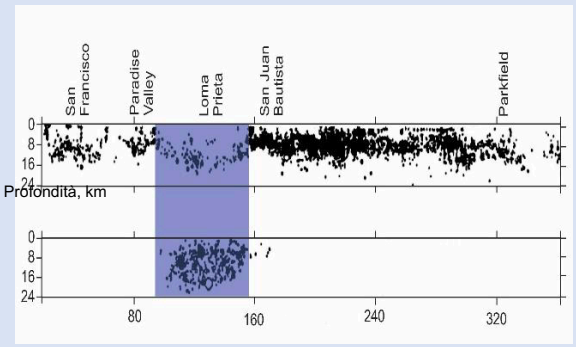
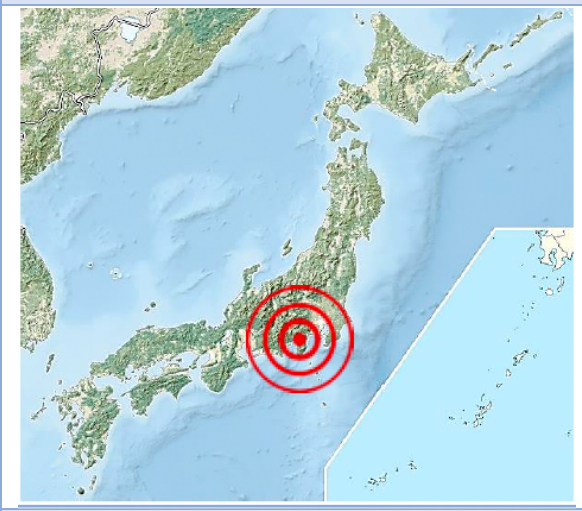
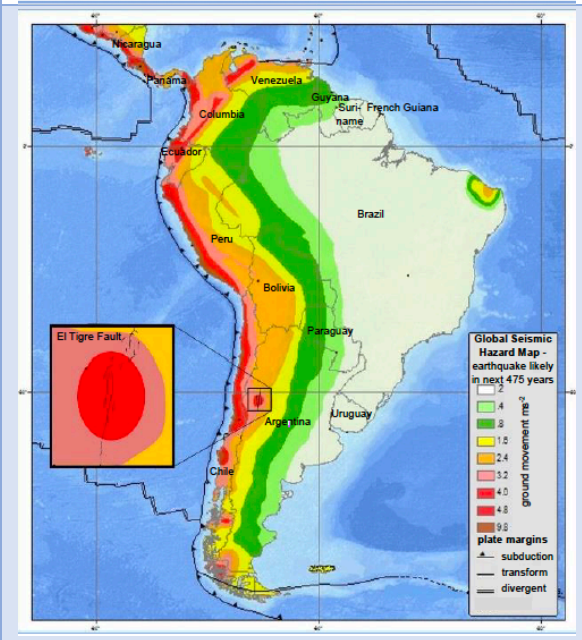
La città di Balakot devastata

Il terremoto del Kashmir ha colpito il Pakistan settentrionale alle 08.50 del mattino dell'8 ottobre 2005. Si è verificato nella zona di collisione delle placche tettoniche Eurasiatica e Indiana che hanno formato la catena montuosa dell'Himalaya. Il terremoto è stato uno dei peggiori disastri naturali che abbiano mai colpito l'Asia meridionale. Il bilancio stimato è di oltre 85.000 vittime; la città di Muzaffarabad fu la più colpita. Molte altre persone sono rimaste ferite e 3,5 milioni di persone sono rimaste senza casa. Molte scuole sono crollate e gli ospedali e i servizi di soccorso hanno fallito. Città e villaggi sono stati completamente spazzati via in remote aree montuose. Le strade bloccate dalle frane hanno reso ancora più difficile il lavoro dei soccorritori. Ci furono molte forti scosse di assestamento. In seguito, le misurazioni satellitari hanno mostrato che la terra sopra l'epicentro si era sollevata di diversi metri.

Subito dopo ci fu un'enorme risposta di soccorso nazionale e internazionale, ma la ricostruzione delle strutture nella regione nei mesi e negli anni successivi fu lenta.

Nei Paesi che possono essere colpiti da forti terremoti, la popolazione deve essere protetta. Le misure di protezione comprendono i **tentativi** di previsione (Tabella 6.6) e prevenzione dei terremoti dannosi, la costruzione di edifici in grado di resistere ai terremoti e la predisposizione di piani per affrontare gli effetti dei terremoti.

Tabella 6.6. Metodi di previsione dei terremoti

Metodo di previsione	Descrizione	Immagine	Fonte
Lacuna sismica nello spazio	Lungo le faglie spesso ci sono aree con tanti e con pochi terremoti. Dove ci sono pochi terremoti, è possibile che si stia accumulando tensione, lì ci si aspetta il prossimo terremoto.		La lacuna sismica di Loma Prieta sulla faglia di San Andreas, California, USA. Il diagramma superiore mostra che ci sono stati pochi terremoti nella lacuna fino al "big one" e alle sue scosse di assestamento del 1989 - diagramma inferiore
Lacuna sismica nel tempo	Alcuni terremoti hanno un andamento temporale abbastanza regolare, che consente di prevedere il momento del prossimo terremoto.		I terremoti di Tōkai in Giappone hanno colpito regolarmente, ogni 100-150 anni, nel 1498, 1605, 1707 e 1854. Il prossimo terremoto è previsto a breve
Mappatura del rischio sismico	Utilizza tutti i dati disponibili per mostrare le aree a più alto rischio sismico.		Mappa della pericolosità sismica del Sud America, elaborata dal Servizio geologico degli Stati Uniti.

I metodi di previsione dei terremoti possono indicare dove è probabile che si verifichino grandi terremoti. Ma i metodi di predizione dei terremoti cercano di individuare con maggiore precisione il luogo e il momento probabili. Diversi di questi metodi sono oggetto di indagine scientifica, ma finora nessuno è risultato affidabile. I metodi includono:

- monitorare il sollevamento e l'inclinazione del terreno in prossimità delle faglie;
- misurare piccoli terremoti con sismometri, nel caso in cui si tratti di "scosse premonitrici" prima di un grande terremoto;

- monitorare i livelli nei pozzi d'acqua, nel caso in cui l'aumento della pressione provochi l'innalzamento delle acque sotterranee o l'aumento della tensione provochi un aumento delle fratture, quando i livelli dell'acqua scendono;
- controllare l'emissione di gas radon dal terreno - nel periodo che precede un terremoto, piccole fratture possono rilasciare una quantità di gas radon superiore al normale, che può essere rilevata nelle acque sotterranee;
- misurare l'eventuale variazione della capacità delle rocce di trasmettere elettricità (la loro resistività elettrica) prima di un terremoto. Più acqua contiene una roccia e meglio può trasmettere l'elettricità; quindi, se prima di un terremoto si formano più fratture, queste si riempiono di acqua e possono trasmettere l'elettricità in modo più efficace (abbassando così la loro resistività alle correnti elettriche).

Quando gli edifici sono costruiti per resistere ai terremoti e le norme edilizie antisismiche vengono applicate, i danni possono essere notevolmente ridotti e anche il numero di vittime. Alcuni metodi utilizzati per aiutare gli edifici a resistere ai danni causati dai terremoti sono illustrati nella Tabella 6.7.

Tabella 6.7. Metodi di costruzione per resistere ai danni del terremoto

Metodo antisismico	Descrizione		Immagine	Fonte
Resistenza durante la vibrazione	Le onde sismiche si muovono verso l'alto, verso il basso e anche lateralmente	Le pareti a taglio sono fatte da pannelli che possono vibrare senza rompersi.		Pareti costruite di taglio per dare maggiore resistenza a un edificio, Oregon, USA
		I bulloni di fondazione collegano in modo flessibile le pareti alle fondamenta.		Bulloni e cinghie di fondazione, Napa, California, USA
Isolamento durante la vibrazione	Per isolare gli edifici dalle vibrazioni del terreno è possibile utilizzare un'ampia gamma di metodi, tra cui ammortizzatori in gomma, molle, ruote e cuscinetti a sfera.			Tavola di scuotimento per testare i metodi di isolamento della base. L'edificio normale non isolato sulla sinistra sta crollando. Università della California, San Diego, USA

Tabella 6.7. Metodi di costruzione per resistere ai danni del terremoto

Metodo antisismico	Descrizione	Immagine	Fonte
Edificio in cemento armato	Gli edifici in cemento armato sono costruiti con reti di armature (barre di rinforzo) - barre di acciaio all'interno del calcestruzzo in grado di arrestare le scosse che causano il cedimento del calcestruzzo che è fragile.		Rete di armature per la fondazione di un ponte in calcestruzzo
Resistenza delle reti idrica, del gas ed elettrica	Le reti del gas e dell'elettricità possono essere avere dispositivi che interrompono automaticamente l'erogazione - per prevenire gli incendi; la rete idrica può avere giunti flessibili che resistono ai danni, per non interrompere l'erogazione dell'acqua durante gli incendi causati dai terremoti		Valvola di interruzione automatica montata su una conduttura del gas, Seattle, USA

Nelle aree colpite da terremoti, le autorità dovrebbero mettere in atto dei piani per proteggere la popolazione. Spesso si articolano in quattro fasi: mitigazione (riduzione degli effetti probabili, ad esempio con i metodi indicati nella Tabella 6.7), piano di preparazione (che comprende la pianificazione amministrativa, la preparazione e la formazione), risposta (come devono reagire i servizi di emergenza durante e subito dopo il terremoto) e recupero (inizio della conservazione e della ricostruzione della comunità).
Parte della preparazione ai terremoti è la formazione degli studenti nelle scuole e dei cittadini in generale su cosa fare durante e dopo un terremoto. La parte più importante è che ogni famiglia, scuola, fabbrica, ufficio, ecc. sviluppi il proprio piano.

Box 6.7. Un piano per i terremoti

L'Alleanza per il Paese del Terremoto in California, USA, evidenzia i *"Sette passi per la sicurezza antisismica".*

Preparazione

Step 1: Mettete in sicurezza il vostro spazio: assicuratevi che i mobili, ecc. non cadano pericolosamente.

Step 2: Pianificate la vostra sicurezza: preparate il vostro piano di emergenza e assicuratevi che tutti ne conoscano il contenuto.

Step 3: Organizzate le scorte per le calamità, dove possono essere trovate facilmente.

Step 4: Riducete al minimo i disagi, organizzando i documenti, rafforzando l'edificio e stipulando un'assicurazione.



Avviso di rischio sismico, Vancouver, Canada

Sopravvivenza e recupero

Step 5: Abbassarsi, coprirsi e aggrapparsi: proteggersi sotto i mobili pesanti durante il terremoto.

Step 6: Migliorare la sicurezza - lasciare l'edificio se possibile, aiutare i feriti e prevenire altri infortuni.

Step 7: Riconnettersi e ripristinare - collegarsi con gli altri, riparare i danni e ricostruire la comunità.

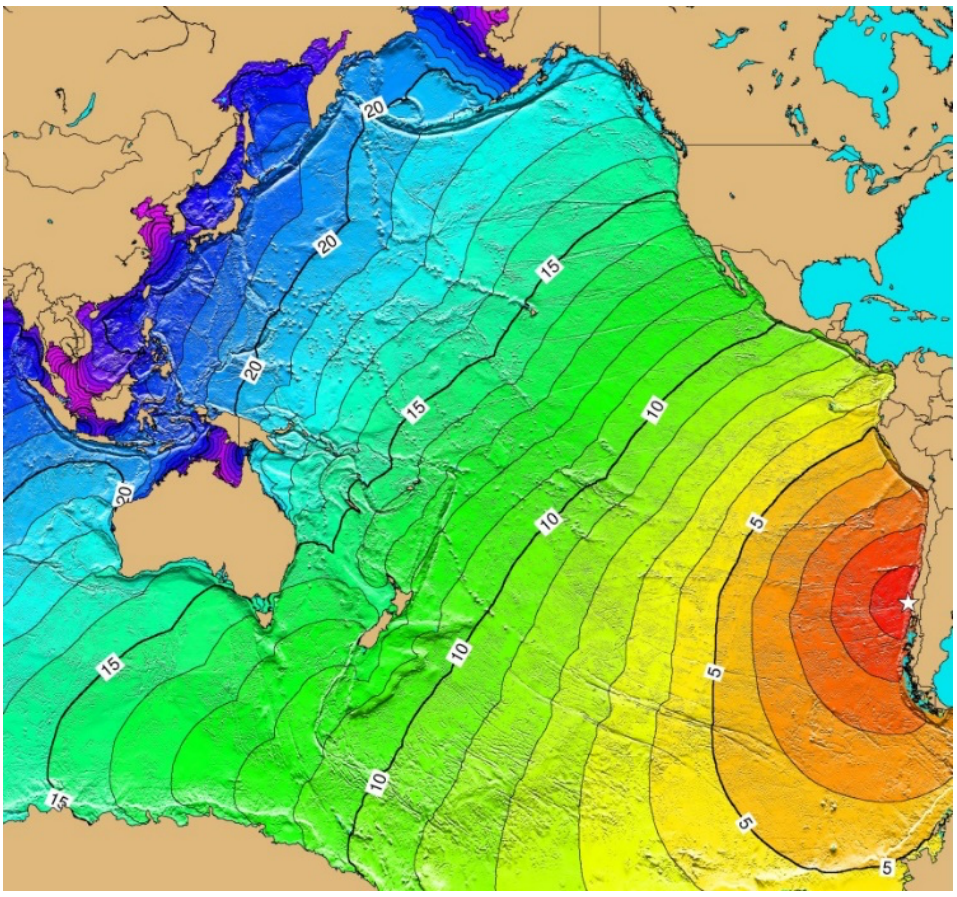
6.1.3 Tsunami

Gli tsunami sono grandi onde d'acqua causate da terremoti, eruzioni vulcaniche, frane che scivolano in acqua o impatti di meteoriti; "tsunami" in giapponese significa "onda di porto". In passato gli tsunami venivano chiamati "maremoti", anche se non hanno nulla a che fare con le maree.

L'altezza delle onde di tsunami che raggiungono la costa dipende dall'entità del processo che lo ha innescato e dalla forma della linea di costa. In oceano aperto, le onde di tsunami sono basse ma viaggiano a velocità fino a 800 km/h. Quando raggiungono acque meno profonde vicino alle coste, l'attrito rallenta la base dell'onda, facendola diventare sempre più alta. Le coste poco profonde producono onde più alte rispetto a quelle in forte pendenza. Le onde di tsunami più grandi possono raggiungere un'altezza di oltre 40 metri, pari all'altezza di un edificio di 12 piani.
Non è solo l'altezza delle onde a essere dannosa, ma quando gli tsunami raggiungono la terraferma riversano enormi volumi d'acqua sulla costa. Questi possono avanzare fino a 10 km nell'entroterra travolgendo tutto ciò che non è fissato al suolo. Questo è il motivo per cui così tante persone possono essere uccise dagli tsunami.

Le onde di tsunami di grandi dimensioni possono attraversare ampi oceani. Il terremoto più potente mai registrato, quello di Valdivia in Cile nel 1960, ha causato uno tsunami che ha attraversato l'Oceano Pacifico, devastando l'isola di Hawaii e raggiungendo la Nuova Zelanda, l'Australia, le Filippine, il Giappone e la Cina (Fig. 6.4).

Figura 6.4. Lo tsunami causato dal terremoto di Valdivia del 1960, con l'indicazione dei tempi di percorrenza in ore attraverso l'Oceano Pacifico



I dettagli di alcuni tsunami di grandi dimensioni e devastanti sono riportati nella Tabella 6.8.

Tabella 6.8. I grandi tsunami e i loro effetti

Tsunami	Descrizione	Immagine	Fonte
2011 Tsunami di Tōhoku, Giappone	Un terremoto di magnitudo 9,0 nell'oceano ha provocato uno tsunami che ha causato più di 15.000 morti e il danneggiamento della centrale nucleare di Fukushima, con l'evacuazione di centinaia di migliaia di abitanti (Tabella 6.5)		Lo tsunami di Tōhoku, in Giappone; fumo nero da una raffineria di petrolio danneggiata
2004 Tsunami dell'Oceano Indiano	230.000 persone sono state uccise in Indonesia e in altri paesi costieri dell'Oceano Indiano, tra cui Sri Lanka, India e Somalia (Tabella 6.5)		Lo tsunami del 2004 ad Ao Nang, provincia di Krabi, Thailandia
1883 eruzione del Krakatoa	Più di 36.000 morti sono stati causati dallo tsunami dovuto all'eruzione del Krakatoa		Una rappresentazione dello tsunami causato dall'eruzione del Krakatoa del 1883
1755 terremoto di Lisbona, Portogallo	Oltre 40.000 morti causati dal terremoto, dallo tsunami e dagli incendi; la capitale portoghese, Lisbona, è stata quasi completamente distrutta.		Una veduta d'artista del terremoto e dello tsunami di Lisbona del 1755

Box 6.8. Lo tsunami del 2011 a Tōhoku, Giappone

Venerdì 11 marzo 2011, il più potente terremoto mai registrato in Giappone (magnitudo 9.0) ha scatenato un forte tsunami che ha raggiunto i 40 metri di altezza e si è riversato per 10 km nell'entroterra. Questa è la storia degli alunni della scuola del distretto di Unosumaicho, registrata dai reporter Sho Komine e Yasushi Kaneko del quotidiano nazionale giapponese Yomiuri Shimbun.



L'ospedale pubblico di Minamisanriku dopo lo tsunami del 2011

"Lo tsunami ha colpito il distretto di Unosumaicho a Kamaishi, con le acque che hanno raggiunto il terzo piano della scuola media di Kamaishi-Hogashi e della vicina scuola elementare di Unosumai. Prima dell'ultimo terremoto, le due scuole avevano condotto congiuntamente delle esercitazioni in caso di disastro. Nella scuola media il sistema di allarmi si è guastato subito dopo il terremoto e non è stato in grado di trasmettere le chiamate di evacuazione. Tuttavia, gli studenti sono stati in grado di lasciare rapidamente l'edificio e la palestra, come si erano esercitati, e hanno afferrato le mani degli studenti della scuola elementare - anch'essi in procinto di fuggire dall'edificio - e insieme hanno corso verso un terreno più alto". "Un'alunna di prima media, Dai Dote, 13 anni, teneva per mano due bambine di terza elementare [8 anni]. Durante la salita, una delle bambine ha pianto e ha iniziato a iperventilare, mentre l'altra non riusciva più a parlare. "Va tutto bene", ha detto Dote alle bambine mentre correvano verso la cima della collina, a più di due chilometri dalle loro scuole. Una volta avuta la conferma della sicurezza di tutti i loro amici, le ragazze sembravano sollevate, ha detto Dote". Un insegnante ha dichiarato allo Yomiuri Shimbun: "Ho ripetuto più volte ai bambini in classe che avremmo potuto subire uno tsunami più grande di quanto ci si potesse aspettare. È quasi un miracolo che si siano salvati così tanti bambini. Sono orgogliosa dei bambini per aver preso decisioni [per salvarsi] da soli"

Box 6.9. Lo tsunami del 2004 nell'Oceano Indiano

Il 26 dicembre 2004, (il giorno dopo Natale) Tilly Smith, una studentessa inglese di 11 anni, era in spiaggia con il padre, la madre e la sorella minore a Phuket, in Thailandia.

In seguito, ha raccontato la sua storia a un giornalista.
https://it.wikipedia.org/wiki/Tilly_Smith



Onda di tsunami che colpisce la costa di Phuket

Box 6.9. Lo tsunami del 2004 nell'Oceano Indiano

La storia di Tilly:

> "Mi ricordai che mi era stato insegnato durante una lezione di geografia. La schiuma era esattamente la stessa, come quella di una birra, era come se sfrigolasse. Ho detto: "Ci sarà sicuramente uno tsunami" e mia madre non mi ha creduto e ha continuato a camminare. Ma mio padre mi ha creduto e Holly, mia sorella, si stava spaventando molto. Così è tornata di corsa alla piscina [dell'hotel] e mio padre è tornato con lei. E poi ho detto: "Bene mamma, io vado, vado sicuramente, ci sarà sicuramente uno tsunami". E lei: "Hmmm... ciao, allora". Così sono tornata indietro e lei ha reagito un po' di più quando me ne sono andata; quindi, è tornata a vedere se stavo bene. E nel momento in cui è tornata, l'acqua ha iniziato a risalire la spiaggia.
>
> "Beh, l'ho detto a mio padre e mio padre l'ha detto alla guardia di sicurezza e la guardia di sicurezza l'ha detto alle persone sulla spiaggia. C'erano parecchie famiglie sulla spiaggia, proprio in acqua.
>
> "Se non fosse stato per il signor Kearney (il mio insegnante di geografia), probabilmente sarei morta, così come la mia famiglia. Sono quindi molto orgogliosa che me l'abbia insegnato in tempo.
>
> Mia madre non se n'è accorta perché quando era più giovane non le avevano insegnato nulla sugli tsunami e non sapeva cosa fosse uno tsunami. Non sapeva nemmeno che quella parola esistesse. Perciò penso che sia molto positivo conoscere la parola e che venga insegnata."

La famiglia di Tilly salì al piano superiore dell'hotel e guardò le onde dello tsunami che riempivano la piscina di detriti. Tilly potrebbe aver salvato quasi 100 vite sulla spiaggia quel giorno, un giorno in cui più di 8.000 persone sono morte solo in Thailandia.

Il Programma nazionale di mitigazione del rischio tsunami negli Stati Uniti è composto dalle tre parti mostrate nella Figura 6.5, ovvero l'informazione del pericolo, la mitigazione e la valutazione dei rischi, come indicato nella Tabella 6

Figura 6.5. Il logo del Programma nazionale statunitense di mitigazione del rischio tsunami

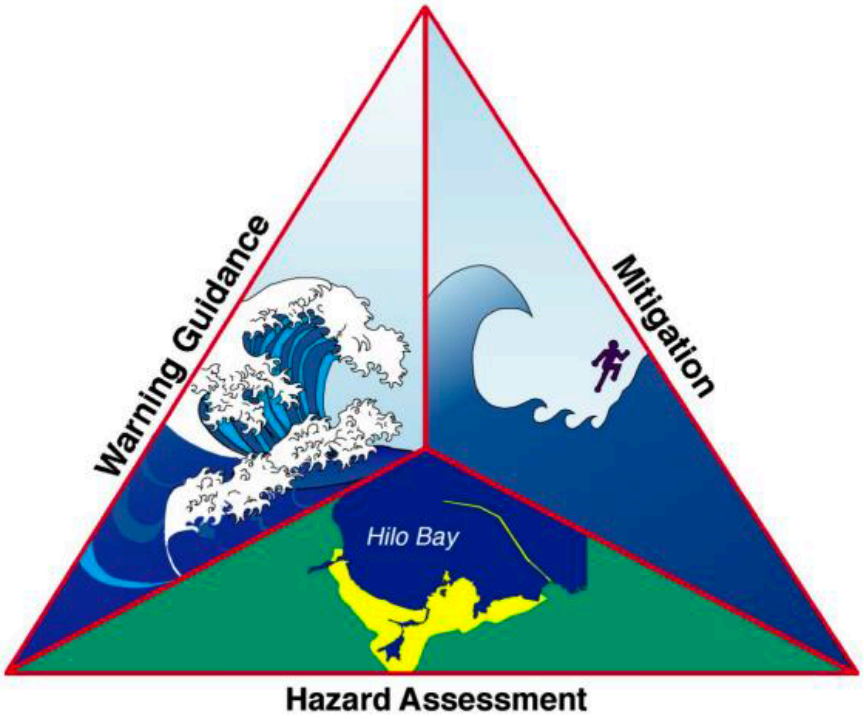
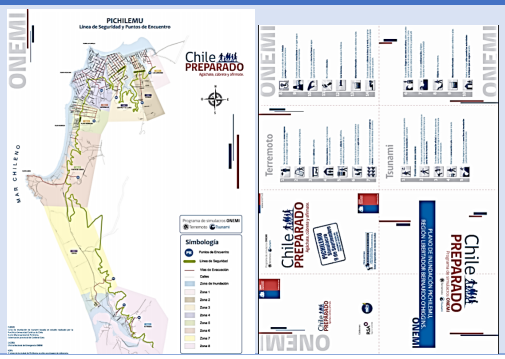
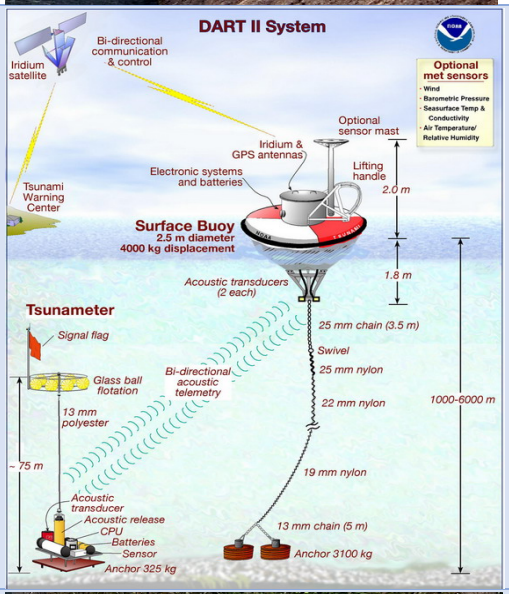


Tabella 6.9. Metodi utilizzati per aumentare la sicurezza durante gli tsunami

Metodo di prevenzione tsunami	Descrizione	Immagine	Fonte
Valutazione del rischio	I rischi vengono valutati e i risultati pubblicati per aiutare la comunità. Questo opuscolo di allerta cileno contiene informazioni su zone a rischio tsunami, punti di incontro, aree di assistenza di emergenza e vie di evacuazione.		Opuscolo di allerta sul rischio tsunami per la città costiera di Pichilemu nel Cile centrale
Mitigazione	Il rischio di tsunami si riduce con la costruzione di muri antitsunami.		Un muro antitsunami a Tsu-shi in Giappone
Avvertenze e indicazioni	Il sistema Deep-Ocean Assesment and Reporting of Tsunamis (DART) si basa su una serie di boe attraverso gli oceani che rilevano le variazioni di pressione causate dagli tsunami, così da poter emettere avvisi tempestivi.		La boa DART II e il sistema di allarme della rete
	Il pubblico viene istruito su come comportarsi in caso di allarme, mentre le informazioni vengono pubblicate su opuscoli e cartelli.		Cartello di allarme tsunami, con le vie di evacuazione Okumatsu-shima, Giappone,

Box 6.10. Informazioni sull'allarme tsunami

Una scheda informativa sulla mitigazione degli tsunami, pubblicata online negli Stati Uniti, contiene questa guida.

In generale, se pensate che possa arrivare uno tsunami, se la terra trema sotto i vostri piedi o se sentite che c'è un allarme, avvisate i vostri parenti e amici e **spostatevi rapidamente su un terreno più alto**.

Fatti importanti da conoscere sugli tsunami

- Gli tsunami che colpiscono le località costiere del bacino dell'Oceano Pacifico sono quasi sempre causati da terremoti. Questi terremoti possono verificarsi lontano o vicino al luogo in cui si vive.
- Alcuni tsunami possono essere molto grandi. Nelle zone costiere la loro altezza può raggiungere i 9 metri o più (30 metri in casi estremi) e possono spostarsi nell'entroterra per diverse centinaia di metri.
- Tutte le aree costiere a bassa quota possono essere colpite da tsunami.
- Uno tsunami è costituito da una serie di onde. Spesso la prima onda può non essere la più grande. Il pericolo di uno tsunami può durare per diverse ore dopo l'arrivo della prima onda.
- Gli tsunami possono muoversi più velocemente di quanto una persona possa correre.
- A volte uno tsunami fa ritirare l'acqua vicino alla costa, esponendo il fondo dell'oceano.
- La forza di alcuni tsunami è enorme. Grandi rocce del peso di diverse tonnellate, insieme a barche e altri detriti, possono essere spostate nell'entroterra per centinaia di metri dalla forza delle onde dello tsunami. Case e altri edifici vengono distrutti. Tutto questo materiale e l'acqua si muovono con grande forza e possono uccidere o ferire le persone.
- Gli tsunami possono verificarsi in qualsiasi momento, di giorno o di notte.
- Gli tsunami possono risalire i fiumi e i torrenti che portano all'oceano.

Se siete sulla terraferma:

- Informatevi sul pericolo tsunami. Questa conoscenza potrebbe salvarvi la vita! Condividete queste conoscenze con i vostri parenti e amici. Potrebbe salvare loro la vita!
- Se siete a scuola e sentite che c'è un allarme tsunami, seguite i consigli degli insegnanti e del personale scolastico.
- Se siete a casa e sentite che c'è un allarme tsunami, dovete assicurarvi che tutta la vostra famiglia sia al corrente dell'allarme. La famiglia deve evacuare la casa se si vive in una zona di evacuazione tsunami. Muovetevi in modo ordinato, calmo e sicuro verso il luogo di evacuazione o verso un luogo sicuro al di fuori della zona di evacuazione. Seguite i consigli delle autorità locali di Protezione Civile e delle forze dell'ordine.
- Se vi trovate in spiaggia o vicino all'oceano e sentite la terra tremare, spostatevi immediatamente su un terreno più alto. NON aspettate che venga annunciato un allarme tsunami. State lontani da fiumi e torrenti che portano all'oceano, come stareste lontani dalla spiaggia e dall'oceano in caso di tsunami. Uno tsunami regionale causato da un terremoto locale potrebbe colpire alcune aree prima che venga annunciato un allarme tsunami.
- Gli tsunami generati in luoghi distanti in genere danno alle persone il tempo sufficiente per spostarsi su un terreno più alto. Per gli tsunami generati localmente, dove si può sentire la terra tremare, si possono avere solo pochi minuti per spostarsi su un terreno più alto.
- In molte zone costiere a bassa quota si trovano hotel alti, a più piani e in cemento armato. I piani superiori di questi hotel possono rappresentare un luogo sicuro in cui rifugiarsi nel caso in cui si verifichi un allarme tsunami e non sia possibile spostarsi rapidamente verso l'entroterra per raggiungere un terreno più alto. Le procedure della Protezione Civile locale, tuttavia, potrebbero non consentire questo tipo di evacuazione nella vostra zona. Le case e i piccoli edifici situati nelle zone costiere a bassa quota non sono progettati per resistere agli impatti degli tsunami. Non rimanete in queste strutture in caso di allarme tsunami.
- Le barriere coralline e le aree poco profonde possono aiutare a ridurre la forza delle onde di tsunami, ma le onde grandi e pericolose possono comunque rappresentare una minaccia per i residenti delle coste in queste aree. **In caso di allerta tsunami, il consiglio più sicuro è quello di tenersi lontani da tutte le aree basse.**

In Italia si segnala il centro tsunami INGV **https://cat.ingv.it/it/**

6.1.4 Frana

Le frane si verificano quando rocce e/o terreni cedono, e il cedimento può essere innescato da terremoti, eruzioni, alluvioni e facilitato dalle condizioni poco stabili del territorio. Le frane in acqua possono a loro volta scatenare tsunami.

Le **frane** comprendono processi come crolli, scivolamenti e colate che possono verificarsi in modo rapido, ma anche molto lentamente, provocando comunque danni (Tabella 6.10). Le frane possono verificarsi sulla terraferma o sott'acqua.

Tabella 6.10. Diversi tipi di crolli, scivolamenti e flussi

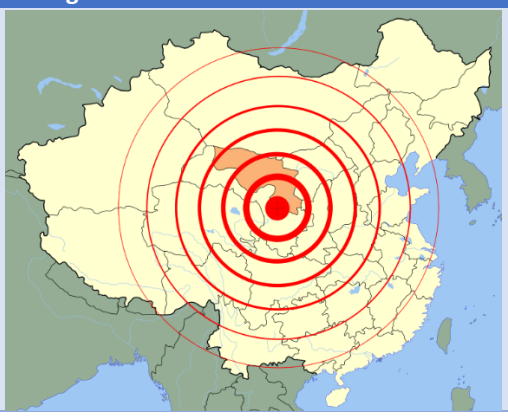
Tipo di frana	Descrizione	Immagine	Fonte
Caduta massi	Ribaltamento o crollo per gravità, con una rapidità spesso catastrofica		Caduta di massi nelle montagne della British Columbia, Canada, 2011
Frana	Le rocce collassano in massa e non come singoli blocchi, con una rapidità spesso catastrofica		Frana sulla spiaggia di Oddicombe, Devon, Inghilterra, 2010
Smottamento	I crolli sono movimenti di materiale lungo un pendio in un'unica massa; alcuni cedimenti sono catastroficamente veloci mentre altri scorrono molto lentamente; alcuni cedimenti sono rotazionali, quando la superficie di scivolamento si inclina all'indietro mentre il blocco scivola lungo una sezione curva.		Smottamenti rotazionali sull'area più ampia della vecchia strada, Mam Tor, Derbyshire, Inghilterra

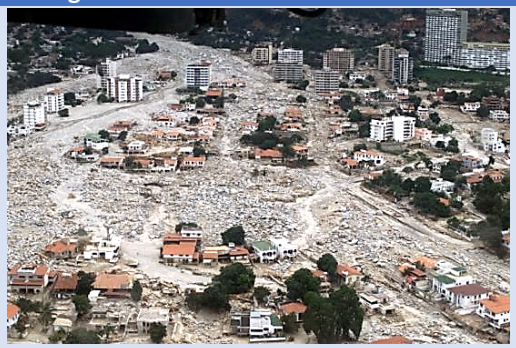
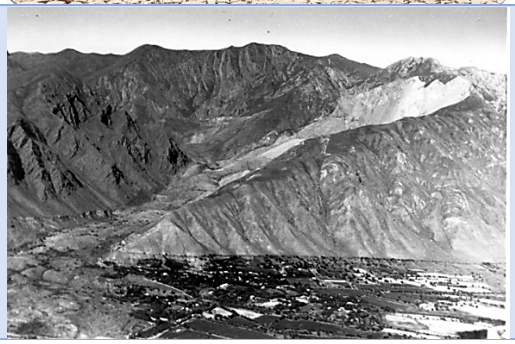
Tabella 6.10. Diversi tipi di cadute, scivoli e flussi,

Tipo di frana	Descrizione	Immagine	Fonte
Colata detritica	Le colate detritiche includono colate e valanghe detritiche (debris flow e mud flow); poiché contengono molta acqua, scorrono ad alta velocità, fino a decine di km all'ora, soprattutto lungo i pendii ripidi e valli.		Vargas, Venezuela, un mese dopo la colata detritica del dicembre 1999
Scivolamento Creep	I materiali di superficie, come il suolo, scendono lentamente verso il basso, sotto forma di masse arrotondate o formando una serie di piccoli terrazzi, spesso utilizzati in seguito come percorsi dagli animali da allevamento.		Lobi di soliflusso nel Wyoming, USA
			Soliflusso a gradini sotto Morgan's Hill, Wiltshire, Inghilterra

Nella Tabella 6.11 sono riportate alcune delle frane globali più dannose.

Tabella 6.11. Grandi frane

Frana	Descrizione	Immagine	Fonte
Frane di Haiyuan, dicembre 1920	Le frane sono state innescate dal terremoto di Haiyuan di magnitudo 7,8 (registrato in Cina come magnitudo 8,5) del 16 dicembre 1920 (Tabella 6.5); i pendii instabili di limo a grana fine (loess) sono crollati causando più di 600 frane con un bilancio totale di oltre 100.000 vittime.		Il terremoto di Haiyuan del 1920 che ha innescato le colate di Haiyuan nella Cina centrale

Frana	Descrizione	Immagine	Fonte
Inondazioni di Vargas, Venezuela, dicembre 1999	Il 15 dicembre 1999, le piogge torrenziali hanno innescato una serie di colate detritiche che hanno causato la morte di oltre 30.000 persone, la distruzione di molte abitazioni e il crollo delle strutture statali; intere città sono scomparse e le case sono state trascinate in mare		Distruzione diffusa nella zona di Caraba-lleda causata da una colata detritica di 6 metri di spessore
Caduta di detriti del Nevado Huascarán, Yungay, Perù, maggio 1970	Un'iscrizione su questa devastazione recita: "Qui sorgeva una città in cui vivevano 35.000 persone; sotto un terremoto e una successiva frana del Huascarán [il vulcano, sullo sfondo] resta solo una copertura detritica [sic]. Tutto è accaduto in pochi minuti il 31 maggio 1970"		Foto scattata a Yungay, dieci anni dopo la tragedia - l'edificio con l'iscrizione
Frane di Khait, Tagikistan, luglio 1949	Centinaia di frane sono state innescate dal terremoto di magnitudo 7,4 di Khait; il limo a grana fine saturo d'acqua è fluito a più di 30 m/sec uccidendo circa 4.000 persone a Khait e circa 28.000 persone nelle aree circostanti		La cicatrice sul monte Chokrak e la frana che ha distrutto il villaggio di Khait
La frana di Crollo del Vajont	La frana del Vajont, avvenuta il 9 ottobre 1963, è stata una delle più grandi catastrofi nella storia italiana. Una massa di roccia di circa 270 milioni di mc si staccò dal monte Toc e precipitò nel bacino artificiale della diga del Vajont. L'impatto provocò un'onda di circa 50 metri che superò la diga e si abbatté sui paesi sottostanti, in particolare su Longarone, causando circa 2000 vittime.		La tragedia fu il risultato di una sottovalutazione dei rischi geologici dell'area: i tecnici erano infatti consapevoli dell'instabilità del monte Toc, ma continuarono comunque con il riempimento del bacino.
La frana di Sarno	La frana di Sarno avvenne il 5 maggio 1998 in Campania, causando 160 vittime. Si trattò di colate rapide di fango e detriti (debris flow) innescate da piogge intense che, saturando i suoli vulcanici presenti sui versanti dei monti Picentini, causarono il distacco di numerose frane.		Questo evento ha portato a una maggiore consapevolezza sul rischio idrogeologico in Italia e all'istituzione del Sistema di Protezione Civile moderno

Le frane possono essere catastrofiche e improvvise, senza che le persone abbiano il tempo di evacuare le loro case, causando molte vittime.

Box 6.11. La colata di fango di Oso, 29 marzo 2014

La frana più dannosa nella storia degli Stati Uniti ha distrutto circa 50 case, uccidendo 43 persone, nei pressi di Oso, nella regione delle Cascade Mountain, nello Stato di Washington, vicino a Seattle. Una collina satura d'acqua è crollata producendo un'enorme colata di fango. I testimoni oculari hanno descritto un muro di fango, alto forse otto metri, che correva attraverso la valle verso di loro con il rumore di treni merci, incidenti aerei e "decine di migliaia di cose che si urtavano l'un l'altra". Le forti piogge delle settimane precedenti potrebbero aver destabilizzato il pendio.



Per ridurre il rischio di frana si utilizzano diversi metodi. Questi vanno dalla mappatura e dal monitoraggio dei pericoli, ai sistemi di allerta, fino a diversi modi per prevenire le frane o ridurne gli effetti, come illustrato nella Tabella 6.12.

Tabella 6.12. Metodi di riduzione del rischio di frana e caduta massi

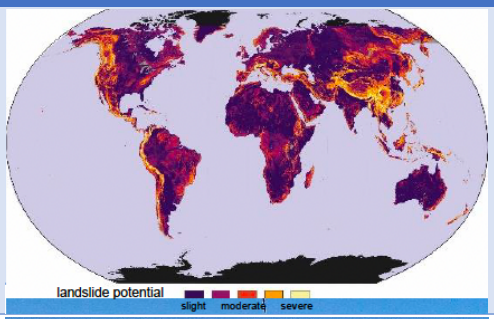
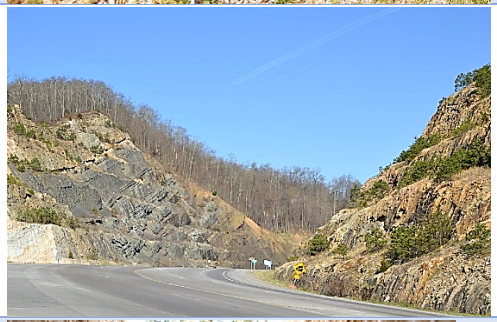
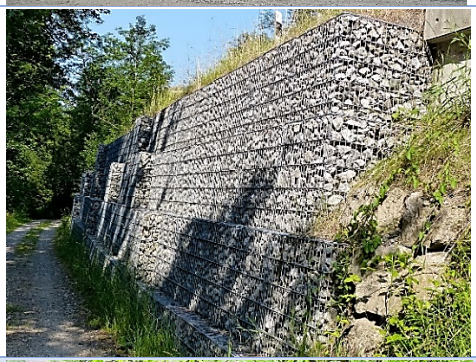
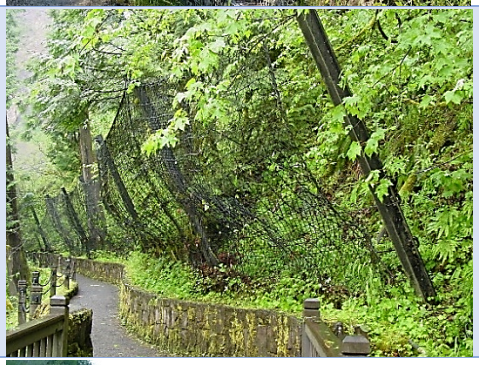
Riduzione del rischio di frana	Descrizione	Immagine	Fonte
Mappatura del rischio	I rischi di frana sono mappati su scala locale e globale. La mappa della NASA mostra che le regioni più pericolose si trovano in aree climatiche e tettoniche attive, comprese le zone montuose al margine delle placche		Mappa globale del pericolo di frane compilata dalla National Aeronautics and Space Administration (NASA) degli Stati Uniti
Monitoraggio	I pendii cedevoli sono monitorati da una serie di dispositivi, tra cui estensimetri a filo, geofoni sismici e pluviometri, e per la misurazione delle pressioni idriche sotterranee		Un dispositivo di monitoraggio di un estensimetro a filo, collegato a un'area instabile e che trasmette i dati a distanza via radio
Norme edilizie e segnali di pericolo	Le norme edilizie (quando vengono applicate) impediscono la costruzione di edifici in aree altamente pericolose, mentre i cartelli di avvertimento mettono in guardia il traffico e il pubblico in generale		Segnale di pericolo per il traffico
Riduzione della pendenza e terrazzamenti	Il rischio viene ridotto rendendo i pendii meno ripidi e scavando terrazze orizzontali a intervalli; le terrazze riducono l'altezza delle pareti rocciose e trattengono i detriti		Terrazzamenti rocciosi sulla Route 23, Pound Gap, Cumberland Mountains, Virginia, USA
Drenaggi	I drenaggi sono collocati in cima e in fondo ai pendii e all'interno degli stessi, per rimuovere rapidamente l'acqua, riducono la possibilità che l'aumento della pressione dell'acqua provochi una frana		Un canale di scolo francese riempito di ghiaia per raccogliere i sedimenti, con tubi perforati (con piccoli fori in cima) per portare via l'acqua

Tabella 6.12. Metodi di riduzione del rischio di frana e caduta massi

Riduzione del rischio di frana	Descrizione	Immagine	Fonte
Piantumazione	Alberi o altri arbusti vengono piantumati in modo che le loro radici leghino i materiali sciolti e facciano defluire l'acqua, contribuendo a stabilizzare i pendii		Larici piantati per controllare l'erosione su un ripido pendio di ghiaia sciolta nel Broken River Ski Field, Nuova Zelanda
Rimozione di materiali superficiali sciolti e chiodatura della roccia	I detriti vengono rimossi e le lastre più grandi e altri materiali sciolti vengono fissati al pendio con lunghi chiodi		chiodatura a Black Rock, sulla costa del Sussex, Inghilterra
Copertura con reti metalliche e geotessili	Vengono fissati sopra il pendio per evitare la caduta di detriti  Campioni di geotessile		Protezione con rete metallica contro la caduta di rocce, Marine Drive, Llandudno, Galles
Copertura in calcestruzzo proiettato	Uno strato di cemento viene spruzzato sulle pareti rocciose fratturate per legarle e stabilizzarle		Una scogliera stabilizzata con calcestruzzo proiettato, Auckland, Nuova Zelanda

Tabella 6.12. Metodi di riduzione del rischio di frana e caduta massi

Riduzione del rischio di frana	Descrizione		Immagine	Fonte
Modellamento e scarpate protette da muri e gabbioni	Le basi dei pendii instabili vengono protette per ridurre le possibilità di scivolamento e di crollo e per prevenire l'erosione.	Muri in pietra naturale o in cemento vengono costruiti per proteggere la scarpata		Un taglio stradale stabilizzato da un muro in pietra naturale alla base e da un muro di contenimento a monte in calcestruzzo, Rebernice, Slovenia
		I gabbioni sono scatole di rete metallica riempite di rocce; la rete è galvanizzata per protezione		Un taglio stabilizzato con gabbioni in Germania
Barriere	Le barriere sono costruite per contenere i detriti, lasciando spazio a monte per consentirne l'accumulo			Una rete cattura massi su un sentiero escursionistico alle Multnomah Falls, Oregon, USA
Gallerie di protezione	Le gallerie sono costruite per proteggere le vie di comunicazione e le aree pubbliche dalla caduta di detriti.			Tunnel di protezione da frane e crolli, strada 751 di Narvik/Beisfjord in Norvegia
Contrafforti in cemento armato e scogliere artificiali	Si costruiscono contrafforti in cemento e scogliere artificiali di grandi massi vengono lasciati ai piedi dei pendii che potrebbero cedere o essere erosi dalle correnti fluviali o costiere			Scogliera artificiale di massi sulla costa dell'East Sussex, in Inghilterra, per proteggere il villaggio di Fairlight

6.2 Problematiche ambientali

L'uomo influenza l'ambiente a tutti i livelli, da locale a globale. Spesso ci abituiamo a questi cambiamenti e non li vediamo come problemi per l'ambiente. I cambiamenti più importanti includono la costruzione di insediamenti e la coltivazione di vaste regioni. Per questo motivo, gli ambienti di molte parti della Terra oggi sono molto diversi rispetto al loro selvaggio stato originale. In effetti, l'impatto dell'attività umana è stato registrato in quasi tutti gli ambienti della Terra, dai mari più profondi alle montagne più alte, dai poli ai mari tropicali poco profondi.

6.2.1 Erosione

L'erosione è il processo naturale di degradazione e trasporto di materiali della crosta terrestre ad opera di agenti come acqua, vento e ghiaccio, che modellano il paesaggio nel corso del tempo. Questo processo viene significativamente accelerato da attività umane come la deforestazione, l'agricoltura intensiva, l'urbanizzazione e le attività minerarie, che rimuovono la vegetazione protettiva ed espongono direttamente il suolo agli agenti erosivi. Il fenomeno naturale che richiederebbe millenni viene così drammaticamente velocizzato, causando perdita di suolo fertile, sedimentazione dei corsi d'acqua e alterazione degli ecosistemi in tempi molto più brevi. Ogni volta che si cammina lungo un sentiero, si rischia di provocare erosione, soprattutto se molte altre persone utilizzano lo stesso sentiero (Figura 6.6).

Figura 6.6. Erosione del sentiero, foresta di Fontainebleau vicino a Parigi, Francia



Gli unici modi per evitare l'erosione da calpestio da parte del pubblico sono la chiusura o la deviazione del sentiero o il suo rafforzamento con la posa di passerelle in pietra o in legno.

Ma anche quando i terreni vengono esposti a causa di metodi di coltivazione scorretti o quando la vegetazione viene bruciata, il suolo può essere facilmente eroso dall'acqua e dal vento. (Tabella 6.13).

Tabella 6.13. Erosione del suolo

Erosione del suolo	Descrizione	Immagine	Fonte
Erosione del suolo dovuta all'acqua	Nelle aree in pendenza non protette dalla vegetazione, l'erosione del suolo può formare profonde gole che sono molto difficili da recuperare una volta formatesi; queste aree sono chiamate calanchi		In primo piano, erosione del suolo provincia di Bologna, Italia; il prato verde mostra la differenza che possono fare le buone pratiche agricole

Tabella 6.13. Erosione del suolo

Erosione del suolo	Descrizione	Immagine	Fonte
Erosione del suolo dovuta al vento	L'erosione eolica può rimuovere enormi quantità di suolo sotto forma di polvere		Una tempesta di polvere nella contea di Hamadan, Iran
Erosione del suolo causata dall'azione dell'uomo	I metodi di coltivazione scorretti negli anni '30 nell'area delle Grandi Pianure (Stati Uniti centrali) hanno portato alla degradazione del suolo; così quando negli anni '30 ci fu una grande siccità, enormi quantità di terreno sono state erose nelle regioni americane del "dust bowl" (conca di polvere)		Macchinari agricoli sepolti dalla polvere trasportata dal vento, Dallas, South Dakota, USA, 1936

Le buone pratiche agricole per preservare il suolo comprendono:

- non arare i pendii lungo la massima pendenza, ma arare trasversalmente lungo i contorni del pendio; questo impedisce all'acqua di scorrere velocemente verso il basso durante i temporali; invece, l'acqua si infiltra nel suolo
- piantare alberi nei canaloni, in modo che le loro radici leghino il terreno;
- assicurarsi che il suolo sia coperto dalle colture per il maggior tempo possibile durante l'anno, in particolare durante le stagioni ventose;
- piantare file di alberi e siepi come frangivento per ridurre l'erosione eolica;
- aggiungere nutrienti al terreno con i fertilizzanti, in modo che le colture continuino a crescere;
- assicurarsi che la vegetazione non sia sovra-pascolata e che il suolo non venga eccessivamente compattato dagli animali.

Le coste si erodono naturalmente quando le maree fanno salire e scendere le onde dalle spiagge, soprattutto durante le tempeste. Questo non è un problema a meno che non interessi aree abitate, zone di comunicazione costiera o spiagge utilizzate dai turisti. Diversi metodi per ridurre l'erosione costiera sono mostrati nella Tabella 6.14

Tabella 6.14. Metodi per ridurre l'erosione costiera

Riduzione dell'erosione costiera	Descrizione	Immagine	Fonte
Frangiflutti	I frangiflutti sono barriere di legno, massi o cemento costruite trasversalmente alle spiagge per ridurre il movimento dei sedimenti lungo la spiaggia. I sedimenti si accumulano su un lato, producendo una serie di aree di piccole spiagge curve.		Frangiflutti roccioso costruito attraverso la spiaggia "du Prevent" a Capbreton, Landes, Francia

Tabella 6.14. Metodi per ridurre l'erosione costiera

Riduzione dell'erosione costiera	Descrizione	Immagine	Fonte
Muro paraonde	I muri paraonde sono costruiti con grandi massi e pietre che possono essere cementate, o con mura in cemento che proteggono le aree costiere		Onda che colpisce un muro paraonde a Plogoff, Finistère, Bretagna, Francia
Scogliera	Massi di riporto posti nelle aree in erosione		Massi di riporto e paraonde a, Beesands, Devon, Inghilterra
Tetrapodi	Grandi strutture in calcestruzzo appositamente progettate per rompere la forza delle onde		Tetrapodi in un frangiflutti a Górky Wschodnie, Danzica, Polonia, sulla costa del Baltico

Uno dei problemi della riduzione dell'erosione in una parte della costa è che non è sempre chiaro se quell'area può essere l'origine di sedimenti per altre aree più lontane. Quindi, quando un'area della costa viene protetta, l'erosione può aumentare in altre zone vicine. Questo evidenzia come, in aree costiere dinamiche, l'ingegneria costiera possa avere "conseguenze impreviste" altrove.

6.2.2 Modifiche al drenaggio

La maggior parte degli edifici e delle altre costruzioni incanalano l'acqua piovana. Quando l'acqua piovana raggiunge i corsi d'acqua, scorre più velocemente e ha maggiori probabilità di causare erosione. Perciò gli edifici richiedono grondaie, le grondaie richiedono la costruzione di canali speciali o tombini per il deflusso e i fiumi in cui questi scaricano devono essere progettati per ridurre l'erosione (Figura 6.7). Tutto ciò ha come conseguenza che l'acqua piovana viene incanalata lontano dalle aree edificate e non può penetrare nel terreno per ricaricare le falde acquifere. Ma può anche causare inondazioni improvvise a valle. Questo problema viene affrontato in alcune aree non cementificando o asfaltando tutto, ma lasciando deliberatamente delle aree in cui l'acqua piovana possa penetrare nel terreno.

Figura 6.7. Canale per il deflusso delle acque piovane, Dobney Avenue, Wagga Wagga, Nuovo Galles del Sud, Australia



6.2.3 Smaltimento dei rifiuti

Gli esseri umani producono enormi quantità di rifiuti. La Banca Mondiale ha stimato che, in media al mondo, ogni persona produce più di 1 kg di rifiuti al giorno, ma la produzione non è uniforme: alcune regioni producono molti più rifiuti di altre.

Molte persone una volta gettati i loro rifiuti in un bidone non pensano più a che fine faranno, ma tutti i rifiuti devono essere gestiti. I metodi di gestione dei rifiuti variano da regione a regione (Figure 6.8 e 6.9) e sono cambiati nel tempo; i metodi più moderni di solito prevedono le "tre R" di "riduci, riusa e ricicla". L'obiettivo è estrarre il massimo valore dai rifiuti e smaltire la minima quantità di materiale.

Figura 6.8. Gestione dei rifiuti a Kathmandu, Nepal

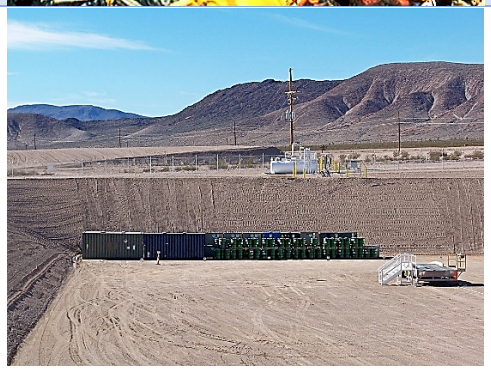


Figura 6.9. Gestione dei rifiuti a Stoccolma, Svezia



Per quanto i materiali possano essere riutilizzati e riciclati, alla fine una parte dovrà essere smaltita. I principali tipi di rifiuti che devono essere smaltiti sono riportati nella Tabella 6.15.

Tabella 6.15. Materiali di scarto da smaltire

Materiale di scarto	Descrizione	Immagine	Fonte
Rifiuti inerti	I rifiuti inerti non sono chimicamente reattivi; includono macerie di edifici e residui di demolizione. Tuttavia, possono ancora contenere materiali chimicamente reattivi come carta, legno e cartongesso, e materiali pericolosi come l'amianto		Macerie di un edificio demolito a Milovice, Repubblica Ceca
Rifiuti domestici	I rifiuti domestici, contengono un'ampia gamma di materiali, quando si decompongono, producono un liquido tossico chiamato percolato e rilasciano gas, tra cui il metano		Rifiuti domestici compattati in una discarica australiana
Rifiuti tossici	I rifiuti tossici sono rifiuti solidi o liquidi chimicamente reattivi che possono essere dannosi se ingeriti, inalati o assorbiti attraverso la pelle. Comprendono vernici, oli e un'ampia gamma di sostanze chimiche e sono più comunemente smaltiti in discariche impermeabili		Il sito di rifiuti tossici Valley of the Drums, Kentucky, USA, negli anni '80; siti come questo hanno cambiato la legislazione ambientale negli Stati Uniti
Rifiuti radioattivi	I rifiuti radioattivi continuano a rilasciare radiazioni dannose per migliaia di anni o più; di solito si dividono in rifiuti a bassa, media e alta attività; i rifiuti a bassa attività possono essere interrati vicino alla superficie, ma quelli ad alta attività devono essere interrati in profondità		Smaltimento di rifiuti radioattivi a bassa attività in Nevada, USA

I rifiuti domestici e tossici vengono smaltiti correttamente in siti appositamente predisposti. I siti migliori sono le vecchie cave e i pozzi di mattoni in rocce impermeabili, anche se vengono utilizzate anche cavità in superfici impermeabili. L'impermeabilità impedisce al **percolato** liquido di raggiungere le acque sotterranee e ai gas di fuoriuscire nelle pareti della fossa. Nei siti più permeabili, le rocce possono essere rivestite con una costosa membrana di plastica impermeabile (Figura 6.10). Nelle aree in cui non ci sono avvallamenti o cave, le discariche possono essere costituite da basse colline prima di essere rivestite e ricoperte.

Figura 6.10. Discarica di South East New Territories rivestita con membrana geotessile, Hong Kong



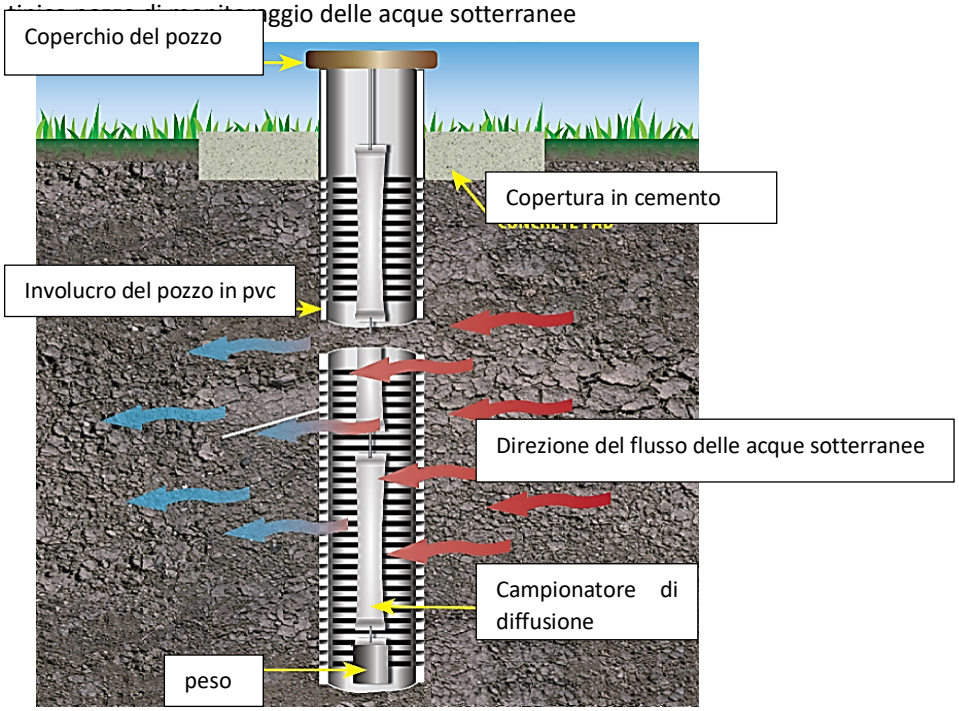
Quando le discariche sono piene, vengono modellate con cura e poi ricoperte con argilla o altro materiale impermeabile per tenere all'esterno l'acqua piovana che potrebbe far defluire il percolato. Poi vengono ricoperte di terriccio e vengono aggiunte delle prese d'aria per il metano, per consentire la fuoriuscita del gas. Infine, viene piantata erba o altra vegetazione per aiutare il sito a integrarsi con l'area circostante. In alcuni siti il metano viene raccolto e utilizzato per produrre energia, riducendo così il suo contributo ai gas serra nell'atmosfera.

Figura 6.11. Serie di sfiati di gas metano in una vecchia discarica paesaggistica dove in passato è stato scavato lo scisto bituminoso, Seafield, West Lothian, Scozia



Infine, nelle discariche ben gestite, vengono effettuate perforazioni nelle rocce circostanti e monitorato l'inquinamento delle acque sotterranee (Figura 6.12).

Figura 6.12. Schema di un tipico pozzo di monitoraggio delle acque sotterranee



6.2.4 Inquinamento

Gli **inquinanti** sono materiali di scarto che contaminano l'ambiente. Tre fattori influenzano il loro potere inquinante: la loro composizione chimica, la loro concentrazione e la loro persistenza (quanto a lungo rimangono tossici).
L'inquinamento può essere classificato in base alla sua origine in due categorie principali:
Inquinamento naturale: deriva da fenomeni e processi naturali della Terra, come le eruzioni vulcaniche che rilasciano nell'atmosfera gas (CO_2, SO_2, H_2S), ceneri e altri materiali particolati. Altri esempi includono gli incendi boschivi naturali, l'erosione del suolo che causa torbidità nelle acque, e le emissioni naturali di metano dalle zone paludose.
Inquinamento antropico: è causato direttamente dalle attività umane, come l'utilizzo di combustibili fossili per industrie e trasporti, l'agricoltura intensiva, lo smaltimento dei rifiuti, e le attività minerarie. Questo tipo di inquinamento ha subito un drastico incremento dall'inizio della rivoluzione industriale ed è responsabile di significativi impatti negativi sugli ecosistemi e sulla salute umana.
È importante notare che mentre l'inquinamento naturale fa parte dei cicli naturali della Terra, l'inquinamento antropico spesso supera la capacità degli ecosistemi di assorbire e neutralizzare gli inquinanti.
Le acque sotterranee possono essere inquinate dal percolato le perdite delle discariche ma anche da una serie di processi industriali e agricoli, come illustrato nella sezione 4.2.1.3. In queste situazioni il monitoraggio tramite pozzi come quello della Figura 6.12 è molto importante.

Processi simili possono contaminare anche le acque superficiali, motivo per cui l'acqua per uso umano e industriale deve essere trattata prima dell'uso.

Box 6.12. Drenaggio acido delle miniere AMD

Nelle vecchie aree minerarie, quando il pompaggio dell'acqua dalle miniere si interrompe, queste si riempiono di acqua ossigenata. Essa reagisce con i minerali della miniera, dissolvendoli e portandoli in superficie sotto forma di acqua molto acida e ricca di ferro che può uccidere ogni forma di vita nei corsi d'acqua che raggiunge. Poiché la miniera non è più in attività, spesso non ci sono fondi per affrontare questo costoso problema e deve essere affrontato dalle autorità locali.



Drenaggio acido da una vecchia miniera,
Rio Tinto, Spagna

Oltre all'inquinamento delle acque superficiali e sotterranee, viene riconosciuta un'ampia gamma di altri tipi di inquinamento. Tra questi vi sono:

- inquinamento atmosferico, sostanze chimiche, gas e particelle come la fuliggine rilasciate nell'atmosfera;
- contaminazione del suolo, sostanze chimiche industriali e agricole che si disperdono nel suolo;
- discarica, abbandono di rifiuti da parte dei cittadini e discariche abusive;
- inquinamento luminoso, in particolare quello provocato dai lampioni: le persone che vivono nelle aree urbane vedono meno stelle nel cielo notturno rispetto a quelle che si vedono nelle aree più buie;
- inquinamento termico, in particolare l'acqua di raffreddamento delle centrali elettriche che riscalda le acque locali;
- inquinamento acustico, compreso il rumore delle strade, degli aerei e delle industrie;
- inquinamento visivo, da miniere e cave (vedi sotto) ma anche da linee elettriche, cartelloni pubblicitari, parchi eolici, discariche di rifiuti e siti industriali abbandonati;
- l'inquinamento marino, dovuto allo scarico in mare di rifiuti trattati e non trattati.

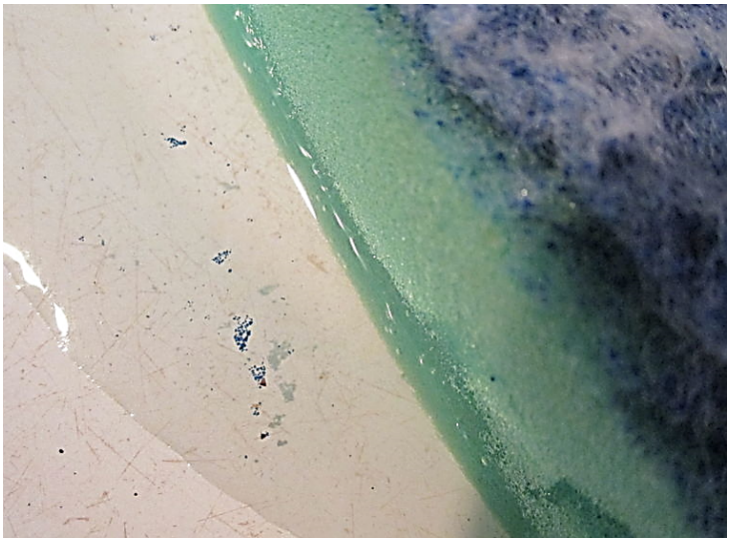
Recentemente l'inquinamento è stato affrontato con il principio "chi inquina paga", secondo cui chi inquina deve pagare per le operazioni di bonifica. Oggi questo principio viene solitamente inserito nei contratti delle industrie e delle operazioni di estrazione mineraria e di cava potenzialmente inquinanti; tuttavia, quando 'inquinatore non può essere identificato, questo non è possibile.

È molto difficile individuare l'origine dell'inquinamento nelle aree marine, dove esistono tre fonti principali di inquinamento: il flusso diretto di inquinanti negli oceani, il deflusso delle piogge attraverso torrenti e fiumi e gli inquinanti provenienti dall'atmosfera. Gli inquinanti possono fluire direttamente in mare sotto forma di acque reflue provenienti dalle fognature o di rifiuti industriali, compresi quelli minerari. Il deflusso porta l'inquinamento derivante dalla costruzione di edifici, strade e porti, dai terreni agricoli, dai fertilizzanti e dai pesticidi. L'inquinamento atmosferico comprende l'inquinamento dei veicoli, la polvere e detriti trasportati dal vento e rifiuti provenienti dalle discariche. L'aumento dei livelli di anidride carbonica nell'atmosfera stanno acidificando gli oceani, con un impatto particolare sulle comunità delle barriere coralline.

Il petrolio è uno dei principali inquinanti degli oceani, soprattutto a causa dei grandi sversamenti di greggio. Tuttavia, la maggior parte dell'inquinamento da petrolio negli oceani proviene da petroliere che riversano acque di scarico, da condotte che perdono o da petrolio gettato nei tombini sulla terraferma.

I detriti di plastica sono un problema grave perché la plastica si decompone molto lentamente. Minuscole microsfere di plastica sono utilizzate in molti scrub da cucina, dentifrici e cosmetici e ora sono state trovate ad inquinare gli ambienti marini, dalle aree costiere alle fosse oceaniche. Gli animali marini le ingeriscono nel loro cibo e si stima che più di un terzo dei pesci del Canale della Manica sia contaminato da queste microplastiche. Ora sono state vietate in diversi Paesi e si spera che vengano eliminate in tutto il mondo molto presto.

Figura 6.13. Microsfere di plastica rilasciate da una spugna abrasiva in una ciotola bianca; le microsfere hanno dimensioni comprese tra un millimetro e un centesimo di millimetro



6.2.5 Estrazione mineraria

In passato, le miniere e le cave hanno inquinato visivamente molte aree del Pianeta, causando anche inquinamento idrico, atmosferico e acustico. Oggi, i controlli ambientali sono severi e vengono utilizzati diversi metodi per ridurre l'inquinamento, come illustrato nella Tabella 5.7. Nel frattempo, molte vecchie aree minerarie sono state edificate, mentre le vecchie cave sono diventate parchi nazionali e riserve naturali. Le vecchie cave possono offrire un'ampia gamma di nicchie ecologiche, come pareti rocciose e stagni, normalmente non disponibili per la fauna selvatica della regione, rendendole attraenti sia per la natura che per il pubblico.

Figura 6.14. Riserva naturale di Heeseberg in una vecchia cava, Bassa Sassonia, Germania

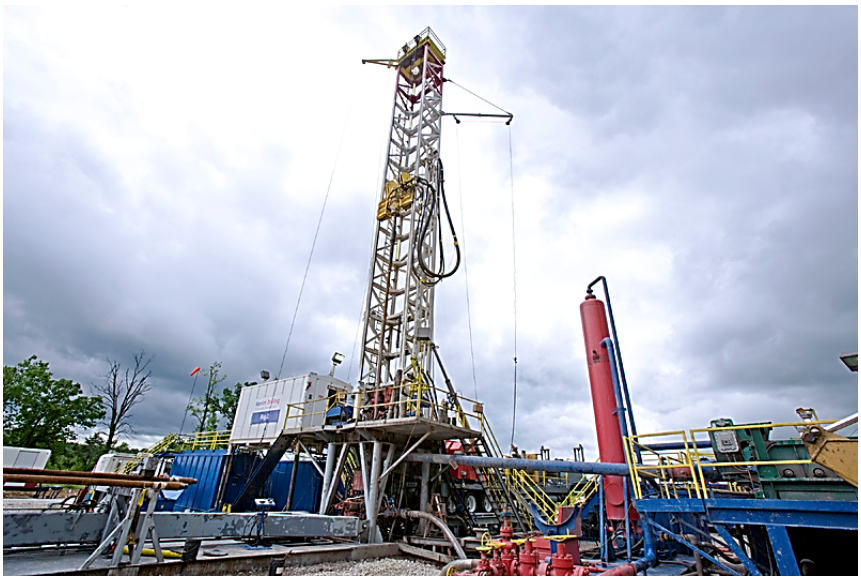


6.2.6 La combustione di combustibili fossili e l'effetto serra

Molti scienziati ritengono, come discusso nella Sezione 4.3.3 sui cambiamenti atmosferici, che la combustione di combustibili fossili stia contribuendo all'aumento delle quantità di anidride carbonica nell'atmosfera, che a sua volta contribuisce ai cambiamenti climatici. Bruciare combustibili rilascia anidride carbonica, e il carbone ne rilascia quasi il doppio rispetto al gas naturale (cfr. Figura 5.6). Tuttavia, anche altri processi industriali rilasciano anidride carbonica, in particolare la produzione di cemento dal calcare.

Attualmente sono in corso ricerche per capire se l'anidride carbonica formata da questi processi possa essere "catturata" e pompata in vecchi giacimenti di petrolio o di gas, evitando così di essere rilasciata nell'atmosfera. La ricerca sta dimostrando che la "cattura del carbonio" (o "cattura e stoccaggio del carbonio", CCS) è possibile, ma anche che è costosa. Per questo motivo, ad oggi, non esistono operazioni di cattura del carbonio su larga scala in tutto il mondo (Figura 6.15).

Figura 6.15. Tecnologia di cattura del carbonio in fase di sperimentazione in una miniera di carbone



6.3 Impatto sulla storia umana

L'impatto delle geoscienze sullastoria umana è molto spesso difficile da vedere. Tuttavia, ci sono esempi in cui i processi geologici hanno avuto effetti importanti.

Box 6.13. La fine della civiltà minoica

La civiltà minoica, sull'isola di Creta nel Mar Mediterraneo, potrebbe essere stata la prima grande civiltà europea. La sua durata va da circa 6600 a 3400 anni fa e il suo crollo potrebbe essere stato causato dall'eruzione della vicina isola vulcanica di Thera (oggi Santorini).

L'eruzione di Thera ebbe un indice di esplosività vulcanica (VEI) di 6 o 7 e fu una delle più grandi eruzioni della storia. Ha distrutto l'isola di Thera, lasciando un enorme cratere e seppellendo la città minoica di Akrotiri sotto strati di cenere vulcanica. Uno tsunami causato dall'eruzione, forse accompagnato da terremoti, potrebbe aver distrutto molte città costiere minoiche. È possibile che questa eruzione abbia indebolito i Minoici a tal punto che i Micenei, arrivati successivamente, li conquistarono facilmente.



Vista satellitare del cratere di Thera (Santorini) oggi

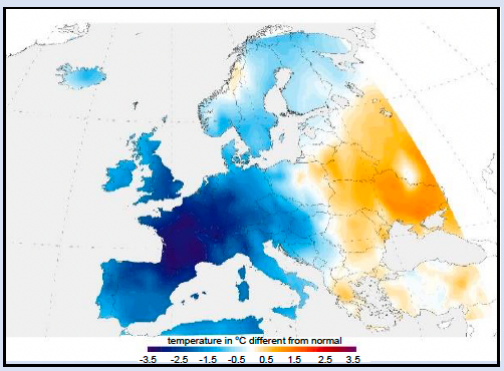
Box 6.14." L'anno senza estate", 1816

Il 1816 fu un anno catastrofico per l'agricoltura di tutto il mondo, causando la morte per fame di decine di migliaia di persone. Si pensa che questo disastro globale sia stato causato dall'eruzione del Monte Tambora in Indonesia nel 1815. Oltre alle ceneri, l'eruzione ha rilasciato nell'atmosfera enormi quantità di anidride solforosa. Di conseguenza, le temperature globali si ridussero di circa 0,5°C con conseguenze come:

- cambiamenti nei monsoni indiani che hanno causato tre raccolti falliti;
- temperature fredde e piogge abbondanti hanno distrutto i raccolti in tutta Europa;
- gelate, neve e nebbie estese in estate nella fascia agricola degli Stati Uniti centrali, hanno spinto migliaia di persone a migrare altrove;
- il freddo ha ucciso gli alberi e le coltivazioni di riso nel nord della Cina e l'inondazione della valle del fiume Yangtse;
- i pittori hanno ritratto splendidi tramonti, causati dalla cenere nell'atmosfera;
- un gruppo di autori in vacanza in Svizzera, dovendo restare in casa, si sfidarono a scrivere storie spaventose, portando alla pubblicazione di Frankenstein e ispirando Dracula.

La carestia del 1816 portò a rivolte e a malattie diffuse in diverse parti del mondo.

L'elevata concentrazione di anidride solforosa nell'atmosfera del 1816 è stata registrata nelle carote di ghiaccio della Groenlandia.



1816 calo della temperatura in Europa



Canale di Chichester, una scena di tramonto dipinta in Inghilterra da J.M.W. Turner

6.3.1 Guerre per le risorse

In passato molte guerre sono state combattute per le risorse. A volte le risorse sono il fattore principale del conflitto, altre volte giocano un ruolo minore, ma è chiaro che in passato sono state elementi chiave della guerra e della pace.

Box 6.15. Guerre per l'acqua

La regione del Medio Oriente comprende i Paesi della Penisola Arabica e le aree circostanti di Egitto, Siria, Iraq, Iran e Turchia. Quest'area è talvolta chiamata "mezzaluna fertile" perché l'acqua, in particolare quella dei fiumi Nilo, Tigri ed Eufrate, veniva utilizzata per l'irrigazione e la coltivazione, costituendo la base di alcune delle prime civiltà della Terra, a partire da circa 5000 anni fa. La lunga storia di quest'area registra molte guerre, alcune delle quali basate sull'approvvigionamento idrico. Ad esempio, l'impero assiro si basava su una diffusa irrigazione e ci sono testimonianze di re assiri che distrussero i sistemi di irrigazione dei loro nemici o gettarono detriti nei canali di irrigazione per inondare le città dei loro avversari.

Una delle più recenti "guerre dell'acqua" in Medio Oriente è stata il conflitto per il fiume Giordano a metà degli anni Sessanta. L'acqua del fiume Giordano è una fonte vitale per l'irrigazione in Israele. Senza di essa, sarebbe impossibile sostenere la popolazione. Tuttavia, il fiume Giordano nasce al di fuori di Israele e gli stati arabi circostanti decisero di deviare l'acqua dalle sorgenti del Giordano, riducendo la disponibilità per Israele del 35%. Gli israeliani si ribellarono a questa decisione durante la Guerra dei Sei Giorni del 1967 e il piano fu abbandonato.



Il fiume Giordano, che porta acqua a Israele dal Nord

Box 6.16. Guerre per il petrolio

Molte delle guerre combattute a partire dagli anni Trenta sono state definite "guerre del petrolio" perché le risorse petrolifere di alcuni paesi sono state uno dei fattori chiave che hanno scatenato la guerra.

La prima guerra ad essere definita "guerra del petrolio" fu quella tra Bolivia e Paraguay, in Sud America, a metà degli anni Trenta. Sebbene vinta dal Paraguay, decine di migliaia di soldati morirono ed entrambi i Paesi furono gravemente colpiti. Negli anni successivi non sono state trovate quantità commerciali di petrolio nell'area, anche se più recentemente sono stati trovati sia petrolio che gas.

La prima guerra del Golfo, nel 1990, fu scatenata dall'invasione del Kuwait da parte dell'Iraq; le dispute tra i Paesi per il petrolio furono un motivo importante per l'invasione. I giacimenti petroliferi del Kuwait vennero incendiati, danneggiandoli in modo considerevole, così da inviare enormi pennacchi di fumo nell'atmosfera e causando un inquinamento diffuso. Ci sono voluti diversi mesi dopo la fine della guerra per spegnere tutti gli incendi e tappare i pozzi di petrolio.
Una parte importante della strategia durante la seconda guerra in Iraq, iniziata nel 2003, fu la messa in sicurezza dei giacimenti petroliferi iracheni, che è stata portata a termine senza danni ai giacimenti.



Campi petroliferi in fiamme dietro un carro armato abbandonato, Kuwait

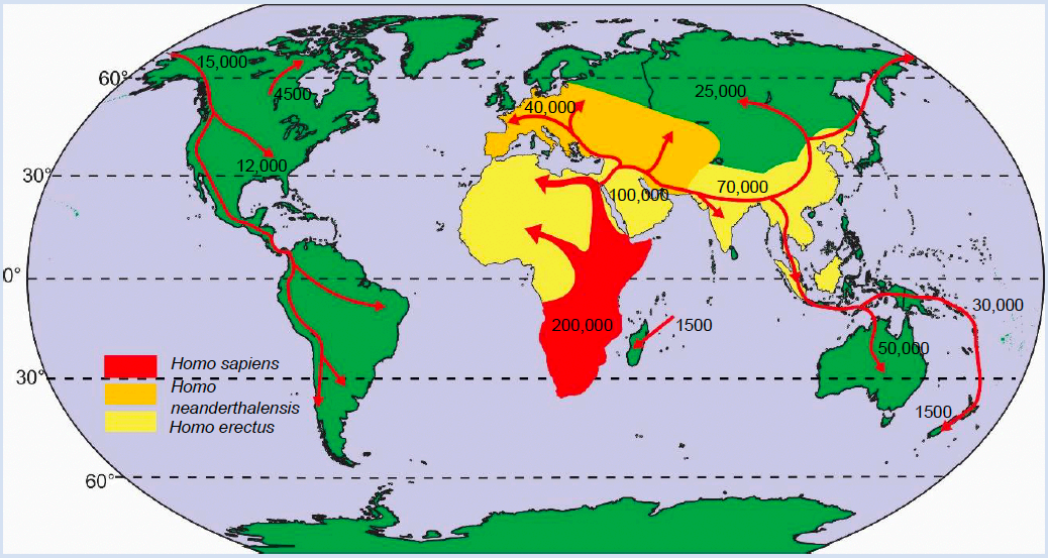
Si pensa che molti altri conflitti in tutto il mondo le risorse petrolifere siano state uno dei fattori determinanti ad averle causate.

6.3.2 Migrazioni dovute ai cambiamenti climatici

I cambiamenti climatici naturali hanno causato migrazioni nel passato geologico, a causa del cambiamento del clima e delle variazioni del livello del mare ad esso collegate. I cambiamenti del livello del mare e il movimento delle fasce climatiche e delle placche tettoniche devono aver causato enormi modificazioni di habitat nel passato geologico, ma abbiamo prove più dettagliate delle migrazioni avvenute in tempi geologici più recenti.

Box.6.17. La migrazione dei primi esseri umani dall'Africa

La migrazione dei primi esseri umani e di molti altri gruppi è legata ai cambiamenti climatici. La teoria della Pompa del Sahara spiega che durante i periodi più umidi, il Nord Africa e il Medio Oriente si sono trasformati in praterie, permettendo a molte specie diverse di migrare dall'Africa all'Asia. Ma durante i periodi più secchi, queste aree sono tornate a essere desertiche, poiché la "Sahara Pump" si è fermata. La teoria della Pompa è stata utilizzata per spiegare le ondate migratorie di diversi mammiferi, tra cui i cavalli, e di diversi gruppi di uomini primitivi. La prima migrazione umana dall'Africa all'Asia sembra essere avvenuta circa 1,75 milioni di anni fa. Quando i gruppi umani successivi si sono evoluti in Africa, uno di questi è migrato lungo la stessa rotta, circa 70.000 anni fa, per colonizzare l'Asia e infine l'Europa, le Americhe e il resto del mondo.



La diffusione dei primi gruppi umani nel mondo, con le date di diffusione: primo – Homo erectus; secondo – Homo neanderthalensis; terzo – Homo sapiens

Box 6.18. L'inaridimento del Sahara

Circa 6000 anni fa, l'area che oggi chiamiamo deserto del Sahara era una prateria con molte precipitazioni. Le popolazioni che vivevano in quel luogo dipinsero immagini nell'arte rupestre; queste mostravano molti animali diversi che dovevano vivere a quel tempo nelle praterie. Nel sito pittorico (immagine seguente), i cammelli sono dipinti sopra altri animali e quindi devono essere stati aggiunti in seguito. Questo potrebbe registrare l'inizio del cambiamento climatico che ha reso molte parti del Ciad, una delle regioni più aride della Terra, con pochissima acqua, vegetazione e fauna.

Oggi l'aria che scorre verso il basso dell'atmosfera nella cella di circolazione di Hadley, produce condizioni molto secche nel Sahara. Ma le prove dimostrano che le condizioni piovose equatoriali possono essersi allontanate dall'Equatore molto più di quanto non facciano oggi. Questo sembra spiegare perché alcune zone del Sahara fossero molto più umide in passato. Gli scienziati stanno continuando a indagare sul motivo per cui parti delle fasce climatiche potrebbero muoversi in questo modo.

Box 6.18. L'inaridimento del Sahara



Grotta di Manda Guéli, Monti Ennedi, Ciad



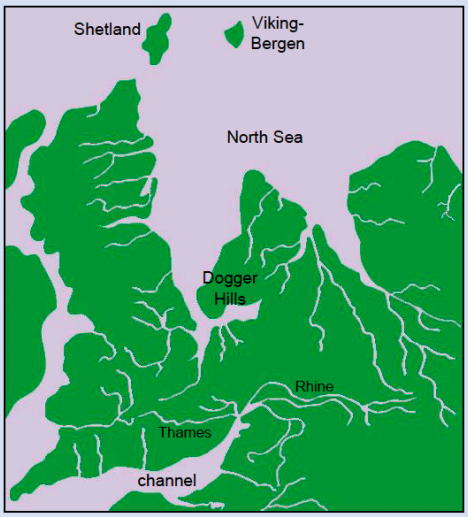
Formazione rocciosa erosa dal vento, Monti Ennedi, Ciad

Box 6.19. "Doggerland" nell'area del Mare del Nord

Doggerland è il nome dato a un'area, ora sotto il Mare del Nord, che un tempo era una terraferma che univa il Regno Unito all'Europa.

L'area era un'ampia valle poco profonda con basse colline e paludi, ricca di vegetazione e di fauna selvatica, abitata da bande di uomini cacciatori/raccoglitori. Lo dimostrano i ritrovamenti di draghe sottomarine che hanno portato alla luce utensili e armi preistoriche, nonché ossa di mammut, leoni e altri animali. Con lo scioglimento delle calotte glaciali alla fine dell'ultima era glaciale, il livello del mare si alzò e inondò gradualmente l'area. Uno tsunami legato a un improvviso scivolamento sottomarino nel Mare del Nord settentrionale, circa 8200 anni fa, potrebbe aver inondato alcune aree. L'innalzamento del livello del mare sembra aver annegato definitivamente il Doggerland circa 6000 anni fa.

I dati dei rilevamenti sismici delle compagnie di esplorazione petrolifera hanno permesso di ricostruire il modello di come appariva il Doggerland in passato, prima che esseri umani e animali selvatici fossero allontanati dall'innalzamento del livello del mare. L'inondazione del Doggerland ha separato il Regno Unito dalla terraferma europea, trasformando Inghilterra, Galles e Scozia in un'isola.



mappa di Doggerland 10.000 anni circa AC

Se i cambiamenti climatici di oggi comportano grandi variazioni del livello del mare o grandi spostamenti delle fasce climatiche, possiamo aspettarci di assistere a maggiori migrazioni di diversi tipi di animali (uomo incluso) in futuro.

7 Esplorazione del sistema Terra attraverso il lavoro sul campo e il lavoro pratico

I geologi studiano la Terra dalla scala atomica a quella globale in diversi modi. Questi variano dalla raccolta dati attraverso l'osservazione e la misurazione sul campo, all'uso di tecniche di telerilevamento, dalla modellazione dei processi geologici in laboratorio alla modellizzazione al computer, dall'uso di dispositivi di osservazione e misurazione ad alta tecnologia in laboratorio, ai programmi di monitoraggio globale che coinvolgono la geosfera, l'atmosfera, l'idrosfera e la biosfera.

I geoscienziati sono tutti coloro che studiano il sistema Terra e hanno un'ampia gamma di specializzazioni, alcune delle quali sono illustrate nella Tabella 7.1.

Tabella 7.1. Alcune delle numerose specializzazioni nel campo delle Geoscienze

Specializzazione	Descrizione	Immagine	Fonte
Climatologia	I climatologi studiano i modelli meteorologici a lungo termine in un territorio, di solito su cicli di 30 anni; il loro lavoro va dal prelievo di campioni di acqua, suolo, ghiaccio o sedimenti all'utilizzo di dati satellitari		Registrazione di dati glaciali, Parco Nazionale dei Ghiacciai, Montana, USA
Geologia applicata	I geologici applicati contribuiscono ai grandi progetti di costruzioni, attraverso la mappatura geologica, la realizzazione e l'interpretazione di operazioni di perforazione, l'analisi dati e la redazione di relazioni e indicazioni		Carota da perforazione in Australia occidentale
Geologia ambientale	I geologi ambientali monitorano l'ambiente durante l'estrazione delle materie prime o lo smaltimento dei rifiuti, e bonificano successivamente gli ambienti, utilizzando un'ampia gamma di dati raccolti in loco o altrove		Analisi di un'area mineraria abbandonata negli USA
Rilevamento geologico	Il geologo rilevatore raccoglie dati sul campo collegandoli con dati cartografici, geochimici, geofisici e di perforazione per mappare le strutture rocciose sotterranee durante l'esplorazione di giacimenti di petrolio, gas e minerali		Esame di carotaggi freschi, Cile

Tabella 7.1. Alcune delle numerose specializzazioni nel campo delle geoscienze

Specializzazione	Descrizione	Immagine	Fonte
Geochimica	I geochimici studiano la composizione geochimica della Terra dalla scala atomica a quella globale; la geochimica è utilizzata per la ricerca di petrolio, gas e minerali e per il monitoraggio dell'inquinamento ambientale		Studio della geochimica dei gas vulcanici, Monte Baker, Washington, USA
Geomorfologia	I geomorfologi studiano come la superficie terrestre si forma e viene modificata dai processi terrestri; studiano la morfologia dei paesaggi legata agli agenti atmosferici, all'erosione, ai fiumi, alle coste e alle glaciazioni		Studio della glaciazione, ghiacciaio centrale di Rongbuk, Everest, Nepal
Geofisica	I geofisici effettuano ricerche sui terremoti e la valutazione del rischio sismico; interpretano i dati sismici raccolti durante la ricerca di petrolio, gas e minerali, effettuano indagini in sito e studiano la struttura della Terra dalla superficie al nucleo		Dispiegamento di un sismometro per i fondali oceanici al largo delle Barbados
Idrogeologia	Gli idrogeologi non si limitano a ricercare l'acqua e a valutare le potenzialità idriche, ma monitorano anche le acque sotterranee per verificare la presenza di inquinanti e i rischi per la salute, partecipano alla bonifica dei siti contaminati e studiano soluzioni per il pompaggio delle acque da miniere e cave		Campionamento delle acque sotterranee in Germania

Tabella 7.1. Alcune delle numerose specializzazioni nel campo delle geoscienze

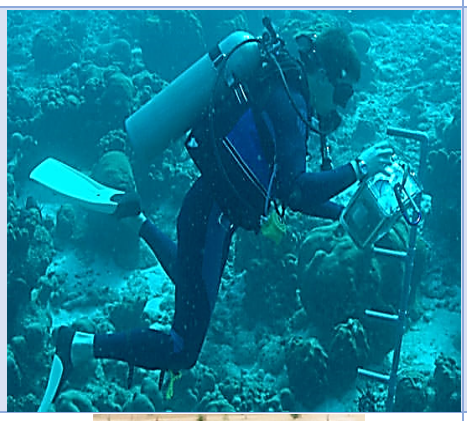
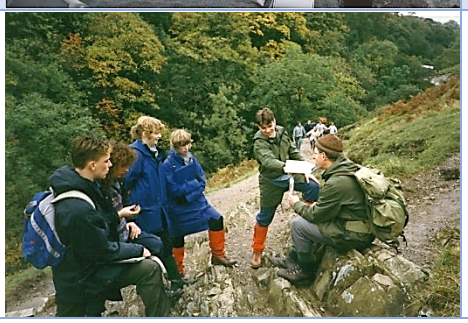
Specializzazione	Descrizione	Immagine	Fonte
Meteorologia	I meteorologi utilizzano un'ampia gamma di metodi scientifici per misurare, comprendere, modellare e prevedere il tempo atmosferico, la sua fisica e la sua chimica		Misura della profondità della neve in Iran
Geologia mineraria	I geologi minerari studiano i collegamenti tra la geologia e i giacimenti di minerali per seguire i corpi mineralizzati noti e trovarne di nuovi. Forniscono consulenza sui piani minerari a breve e lungo termine attraverso una gamma di metodi di rilevamento		Vena di fluorite in una miniera, Peak District, Inghilterra
Oceanografia	Gli oceanografi comprendono specializzazioni biologiche, chimiche, geologiche e fisiche. I geologi marini esaminano i processi oceanici presenti e passati, tra cui la tettonica delle placche, la circolazione oceanica e i cambiamenti climatici		Impostazione dell' apparecchiatura di monitoraggio dei fondali marini
Paleontologia	I paleontologi studiano la vita dei fossili, dai microfossili ai dinosauri, studiando l'evoluzione della vita e i paleoambienti in cui vivevano piante e animali; i fossili sono utilizzati per datare e correlare le rocce e per fornire informazioni sulle temperature e i climi del passato		Paleontologo con il femore di un grande dinosauro, Zimbabwe

Tabella 7.1. Alcune delle numerose specializzazioni nel campo delle geoscienze

Specializzazione	Descrizione	Immagine	Fonte
Geologia strutturale	I geologi I geologi strutturali studiano le deformazioni delle rocce e della crosta terrestre, analizzando come le forze tettoniche modellano la struttura della Terra nel tempo, i meccanismi di deformazione delle rocce e la loro risposta agli stress tettonici, fondamentale per comprendere l'evoluzione geologica di un'area		Esame degli affioramenti di granito nei Monti Fosdick, Antartide
Sedimentologia	I sedimentologi studiano i sedimenti moderni e le rocce sedimentarie antiche per esplorarne le caratteristiche e comprendere i processi che inizialmente li hanno formati, lavorando sul campo e in laboratorio e costruendo modelli fisici e al computer		Analisi delle dimensioni dei sedimenti in laboratorio, Naval Oceanographic Office, Mississippi, USA
Pedologia	I pedologi classificano e mappano i terreni, analizzandone le proprietà fisiche, chimiche, biologiche e la fertilità sul campo e in laboratorio; gestiscono i suoli per l'agricoltura e li bonificano nelle aree danneggiate		Rilevamento della superficie del suolo con un quadrato, Tucson, Arizona, USA
Vulcanologia	I vulcanologi studiano tutti i processi ignei, compresi quelli dei vulcani attivi, le eruzioni, il flusso di lava e il rilascio di gas vulcanici per definire il rischio vulcanico in aree dinamicamente attive		Analisi di campioni nel cratere del vulcano Mutnovsky, Kamchatka, Russia orientale
Insegnamento	Gli insegnanti insegnano le geoscienze ad alunni e studenti della scuola primaria, della scuola secondaria di primo e secondo grado, fino al livello universitario e oltre, in campo e sul terreno		Un insegnante discute di lavoro sul campo con un gruppo di studenti vicino a Ingleton, nello Yorkshire, Regno Unito

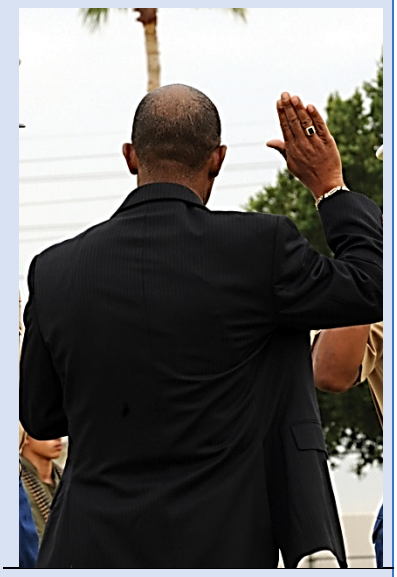
I geoscienziati devono attenersi alla Promessa Geoetica in ogni momento del loro lavoro.

Box 7.1. Promessa Geoetica

Prometto ...

- *di praticare le geoscienze essendo pienamente consapevole delle implicazioni sociali e di fare del mio meglio per la protezione del sistema Terra e per il bene dell'umanità.*
- *Di tenere sempre presenti le mie responsabilità nei confronti della società, delle generazioni future e della Terra per uno sviluppo sostenibile.*
- *Di mettere al primo posto nel mio lavoro l'interesse sociale*
- *Di non fare mai cattivo uso delle mie conoscenze geologiche, resistendo a costrizioni o coercizioni.*
- *Di essere sempre pronto a fornire la mia assistenza professionale in caso di necessità e sarò imparziale nel mettere la mia esperienza a disposizione dei decisori.*
- *Di continuare a sviluppare le mie conoscenze scientifiche per tutta la vita.*
- *Di mantenermi sempre intellettualmente onesto nel mio lavoro, essendo consapevole dei limiti delle mie competenze e capacità.*
- *Di adoperarmi per favorire il progresso delle scienze geologiche, la condivisione delle conoscenze geoscientifiche e la diffusione dell'approccio geoetico.*
- *Di essere sempre pienamente rispettoso dei processi della terra nel mio lavoro di geologa/o*

Lo prometto!



Questa importante promessa dovrebbe essere fatta da tutti coloro che studiano le geoscienze e può essere semplificata in:

Prometto che ...

- *Lavorerò nel campo delle geoscienze per proteggere al meglio gli abitanti della Terra e tutti i sistemi terrestri.*
- *Sono consapevole che il mio lavoro consiste nel contribuire a proteggere la Terra per il futuro, attraverso uno sviluppo sostenibile.*
- *Nel mio lavoro metterò al primo posto l'interesse di tutte le persone.*
- *Non farò mai un uso improprio delle mie conoscenze geologiche, qualunque cosa gli altri possano dire o fare.*
- *Sarò sempre pronto a usare la mia conoscenza delle geoscienze in modo utile e cercherò di fornire una visione equilibrata alle persone che prendono le decisioni.*
- *Svilupperò la mia conoscenza delle geoscienze per tutta la vita.*
- *Sarò sempre il più onesto possibile.*
- *Cercherò di far progredire lo studio delle geoscienze, di condividere le conoscenze geologiche e di aiutare tutti a comportarsi in modo etico.*
- *Nei miei studi di geoscienza rispetterò sempre i processi terrestri.*

Lo prometto!



I geologi, durante la loro formazione e nella loro vita professionale, utilizzano un'ampia gamma di competenze per osservare, misurare e monitorare l'ambiente, per raccogliere le loro osservazioni e spiegare come funzionano gli ambienti, oggi e nel passato geologico, e per risolvere domande e problemi geologici.

Il lavoro sul campo deve essere intrapreso solo dopo un'attenta valutazione dei rischi, seguendo i codici di condotta in materia di salute e sicurezza e di geologia. I dettagli su tutte queste aree sono liberamente disponibili su Internet.

7.1 Osservazione, misurazione e registrazione di dati

L'osservazione, la misurazione e la raccolta di dati geoscientifici vengono effettuate a diverse scale, da quella microscopica a quella del paesaggio e più ampia. Molti dei metodi utilizzati sono riportati nella Tabella 7.2.

Tabella 7.2. Metodi utilizzati per osservare e monitorare l'ambiente, registrando le caratteristiche geo scientifiche

Metodo	Descrizione	Immagine	Fonte
Osservazione al microscopio	Utilizzo di un microscopio a oculare singolo o binoculare per osservare da vicino i materiali terrestri		Osservazione di diamanti microscopici, Swaziland
Osservazione con lenti	Per utilizzare una lente a mano in laboratorio o sul campo, bisognare avvicinarla all'occhio e portare il materiale vicino per ottenere la migliore visuale. Questo procedimento non può essere mostrato in un'immagine fotografica.		Osservare un fossile con una lente manuale
Osservazione del paesaggio	Osservare il paesaggio come ausilio alla mappatura geologica, concentrandosi sulle discontinuità, le faglie e gli angoli di pendenza e sui cambiamenti della vegetazione.		Osservazione del paesaggio nelle Yorkshire Dales, Inghilterra
Osservazione attraverso il Geographic Information Systems (GIS)	Le caratteristiche geologiche possono essere evidenziate sul GIS, così come nelle fotografie aeree e nelle immagini satellitari		Immagine satellitare di sequenze di pieghe nella roccia nel deserto algerino
Misure sul campo e in laboratorio	Misura dell'angolo di immersione e direzione della pendenza; l'angolo di immersione si misura con un clinometro che fornisce la pendenza massima da 0-90°; la direzione è quella della massima pendenza verso il basso ed è un valore da 0-360°		Misurazione dell'angolo di immersione di un letto nel Regno Unito

Tabella 7.2. Metodi utilizzati per osservare e monitorare l'ambiente, registrando le caratteristiche geoscientifiche,

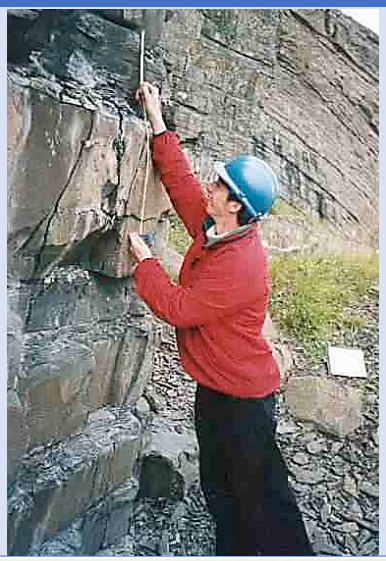
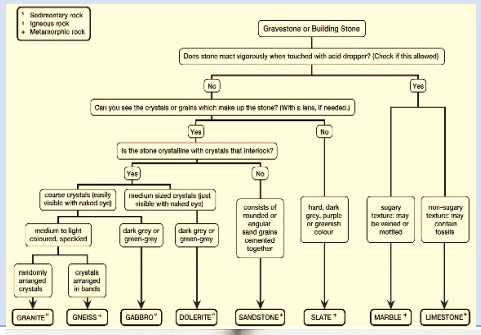
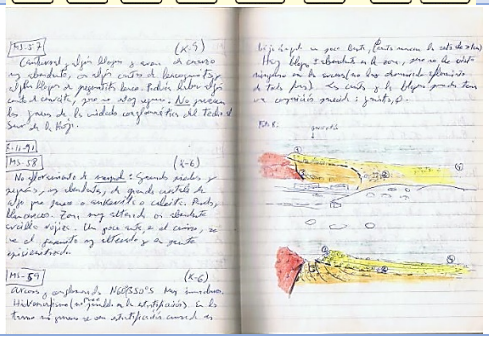
Metodo	Descrizione	Immagine	Fonte
Misure sul campo e in laboratorio	Misurazione delle differenze di spessore dei letti		Misurazione dello spessore dello strato dell'Aberystwyth Grits in Galles
Test sul campo e in laboratorio	Le rocce e i minerali possono essere analizzati per una serie di proprietà in laboratorio e sul campo		Lo striscio dei campioni di ematite
Applicazione di sistemi di classificazione	Si possono utilizzare sistemi di classificazione di minerali, rocce, fossili, tessiture delle rocce, strutture delle rocce, composizioni delle rocce, ecc. utilizzando libri di riferimento come guida		La chiave di riconosciment o delle rocce dell'Unità di Educazione alle Scienze della Terra.
Annotazioni	Gli appunti sulle caratteristiche geologiche sono accuratamente registrati, con dettagli della data, delle località visitate, delle caratteristiche rilevate e la loro posizione, in quaderni o su tablet		Appunti di geologia sul campo

Tabella 7.2. Metodi utilizzati per osservare e monitorare l'ambiente, registrando le caratteristiche geoscientifiche,

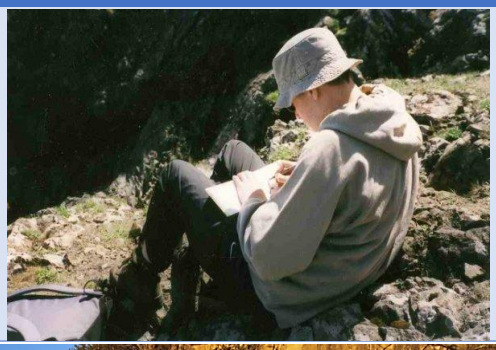
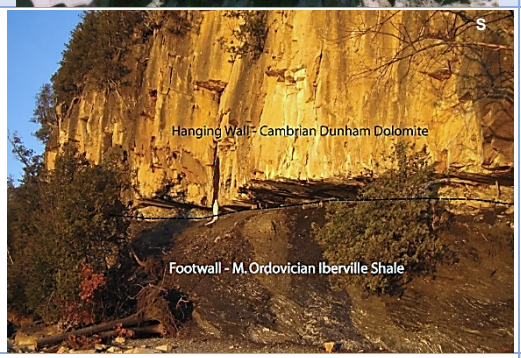
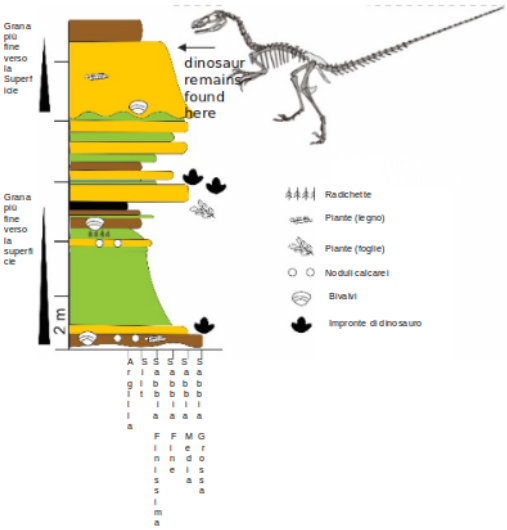
Metodo	Descrizione	Immagine	Fonte
Raccolta dati attraverso schemi sul campo e in laboratorio	I diagrammi sono disegnati in scala ed etichettati, e le loro località e la loro posizione geografica sono annotati		Registrazione di un diagramma sul campo, a Strumble Head in Galles
Documentazione fotografica	Le fotografie costituiscono una preziosa documentazione, soprattutto se annotate o accompagnate da diagrammi di campo		Fotografia commentata - Champlain Thrust, Lone Rock Point, Burlington, Vermont, USA
Grafici	I grafici o le sequenze stratigrafiche sono disegnati in scala verticale e mostrano la granulometria in base alla larghezza del campione e i tipi di roccia sedimentaria con colori o ombreggiature; vengono aggiunte altre caratteristiche come le strutture sedimentarie o gli orizzonti fossili		Sequenza stratigrafica della formazione Kitadani, ricca di fossili, del Cretaceo inferiore, vicino alla città di Katsuyama, Giappone
Osservazioni metereologiche	Vengono effettuate misurazioni regolari utilizzando una capannina meteorologica (o schermo di Stevenson) 		Capannina meteorologica che protegge gli strumenti meteorologici, con un pluviometro a destra

Tabella 7.2. Metodi utilizzati per osservare e monitorare l'ambiente, registrando le caratteristiche geoscientifiche

Metodo	Descrizione	Immagine	Fonte
Monitoraggio della qualità dell'aria	La qualità dell'aria è monitorata, in particolare nelle aree urbane e metropolitane		Monitoraggio della qualità dell'aria in Francia
Scavi nel terreno	I profili del suolo attraverso gli strati orizzontali del terreno vengono misurati scavando dei pozzi		Pozzo nel suolo nei Carpazi, Polonia
Monitoraggio della qualità dell'acqua	La qualità dell'acqua viene monitorata utilizzando una serie di test		Analisi della qualità dell'acqua, Port Macquarie, Nuovo Galles del Sud, Australia
Campionamento oceanografico	Vengono effettuate regolarmente misurazioni in mare utilizzando un'ampia gamma di dispositivi		Campionamento della colonna d'acqua nell'oceano al largo dell'Australia

7.2 Sintesi delle osservazioni

Man mano vengono raccolte le osservazioni sul campo, queste vengono riunite in modelli flessibili del processo geologico, ne viene studiata la storia o la distribuzione spaziale, come illustrato nella Tabella 7.3. L'insieme di queste immagini aiuta l'osservatore a capire quali ulteriori osservazioni sono necessarie e il modo migliore per raccoglierle.

Tabella 7.3. Costruire osservazioni geoscientifiche in modelli e mappe

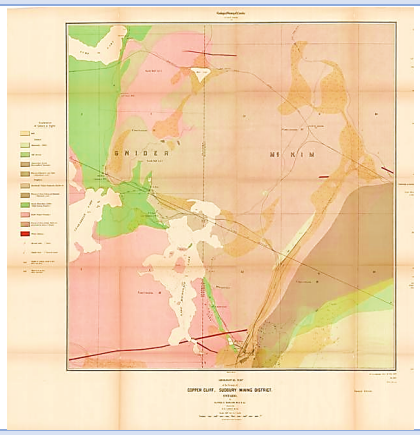
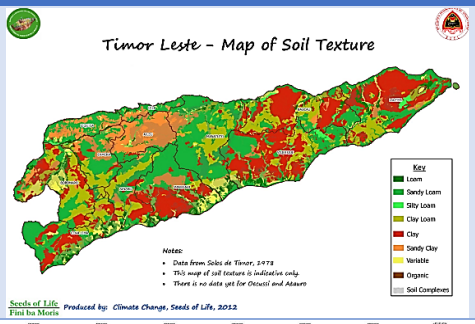
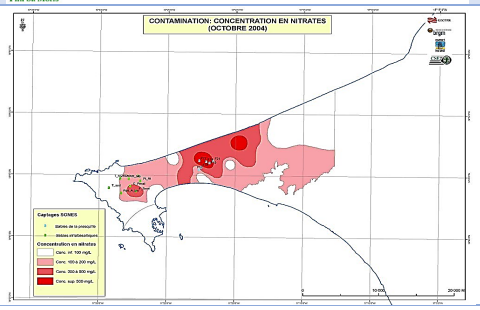
Metodo	Descrizione	Immagine	Fonte
Interpretazioni paleoambientali	I geologi utilizzano gli indizi osservati nelle rocce sedimentarie per costruire un quadro di come era l'area quando i sedimenti sono stati depositati		Diorama giurassico Smithsonian Museum di Storia Naturale, Washington DC, USA
Storia del raffreddamento di una roccia ignea	Nelle rocce ignee con cristalli grandi isolati, i cristalli hanno iniziato a crescere nei primi stadi di evoluzione del magma, prima che esso si intrudesse in un'area più fredda e si raffreddasse più velocemente, formando una matrice a grana fine		Grandi cristalli di feldspato in roccia ignea di fondo a grana più fine - che mostra un raffreddamento a due stadi, vicino a Porto, Portogallo
Comprensione della geologia locale	In questa foto, gli strati inferiori si sono depositati, formando rocce, e poi si inclinati verticalmente durante un episodio di orogenesi; in seguito altre rocce sono state deposte in orizzontale sopra le precedenti già erose, inclinate ed erose a loro volta		La discordanza angolare scoperta da James Hutton a Siccar Point in Scozia (contrassegnata da una linea arancione)
Disegno di una carta geologica	Le osservazioni superficiali degli affioramenti rocciosi, i modelli di drenaggio e le variazioni di pendenza che segnano i confini geologici sono raccolti nel disegno di una carta geologica - una vista aerea delle rocce dell'area come se tutto il terreno sovrastante venisse rimosso		Carta geologica di Copper Cliff, distretto minerario di Sudbury, Ontario, Canada
Sezione geologica trasversale	La costruzione di una sezione trasversale mostra la struttura geologica del sottosuolo		La sezione trasversale della mappa Copper Cliff, dell'immagine precedente

Tabella 7.3. Costruire osservazioni geoscientifiche in modelli e mappe

Metodo	Descrizione	Immagine	Fonte
Disegnare una carta del suolo	I pedologi cartografano i suoli superficiali in base alle loro caratteristiche; le carte del suolo sono utilizzate nella pianificazione agricola		Carta del suolo dell'isola di Timor
Carta dell'inquinamento	Gli idrogeologi cartografano l'inquinamento delle acque sotterranee		Carta dell'inquinamento da nitrati delle acque sotterranee della Penisola di Cap-Vert, Senegal

7.3 Indagine e verifica delle ipotesi

I geologi svolgono indagini alla ricerca di prove per rispondere a quesiti geoscientifici

- Anzitutto, viene identificata una domanda a cui rispondere o un'ipotesi o un'idea che deve essere dimostrata.
- La fase successiva consiste nel mettere a punto un piano per indagare l'ipotesi o dimostrare l'idea, che sia abbastanza flessibile da poter essere modificato durante l'indagine se i primi risultati non fossero quelli attesi o fornissero informazioni non utili.
- Si effettua un processo di valutazione dei pericoli se ne prende nota.
- Si procede con il piano, che cambia e si evolve man mano che si raccolgono altre informazioni.
- Man mano che si raccolgono dati, questi vengono elaborati in modi diversi, ad esempio cartografandoli, disegnando sezioni trasversali, eseguendo calcoli, elaborando grafici con mezzi diversi o costruendo modelli, compresi modelli fisici, computerizzati e matematici.
- I risultati dell'elaborazione vengono valutati per costruire un quadro generale in risposta alla domanda iniziale, per individuare informazioni insolite che possono o meno essere importanti e per guidare la raccolta di altri dati.
- Durante questo processo, i risultati devono essere trasmessi a coloro che necessitano di informazioni, attraverso una serie di metodi che includono relazioni, presentazioni e pubblicazioni accademiche.

Quando tutto il procedimento si conclude, i risultati mostrano l'esito dell'indagine, se si sono ottenute risposte alle domande e alle ipotesi e le idee sono state sperimentate con successo, oppure non è stato possibile ottenere risultati per mancanza di dati probanti. Tuttavia, è possibile che non ci sia alcun risultato a causa della mancanza di prove.

Box 7.2. Indagini di cartografia geologica

In risposta alla domanda "Dove si trovano le formazioni geologiche e i loro confini (limiti) in quest'area?", un geologo produrrebbe una carta geologica.

Le carte geologiche sono viste in pianta (dall'alto) di un'area e mostrano dove si vedrebbero i confini (limiti) tra le formazioni geologiche, se tutti il suolo, gli edifici e altri materiali sovrastanti fossero rimossi. Le carte geologiche sono complesse perché i confini tra le formazioni devono essere prima identificati; quindi, le loro posizioni devono essere tracciate sulle carte topografiche, tenendo conto dei rilievi della topografia. Per fare questo, i geologi devono sapere in ogni momento dove si trovano sulla carta topografica, misurando i punti di riferimento, usando foto aeree o satellitari o utilizzando i sistemi di posizionamento globale (GPS).

Box 7.2. Indagini di cartografia geologica

Una linea che mostra un profilo geologico è abbastanza facile da tracciare su una mappa se la differenza tra le due formazioni è chiara, se il confine è ben esposto e quasi verticale. Quando i profili sono quasi orizzontali, la forma della linea dipende strettamente dalla forma del terreno (la topografia) e quindi può essere complessa.

I geologi tracciano le mappe sulle carte di base topografiche sul campo. Innanzitutto, identificano il profilo che vogliono tracciare, quindi tracciano la sua posizione sulle loro carte di base usando rilievi, foto o sistemi GPS. Seguono quindi il limite, l'inclinazione della roccia e altre informazioni, tracciando la posizione del limite man mano che procedono. Quando il limite scompare sotto il suolo, utilizzano le caratteristiche della superficie, come le variazioni di pendenza, la vegetazione, il drenaggio o i cambiamenti di colore del suolo o i frammenti di roccia scavati dagli animali per le tane che li aiutano a trovare il tracciato più probabile del limite. Quando il profilo viene nuovamente esposto, possono modificare la loro "mappatura delle caratteristiche" secondo necessità. I limiti geologici tracciati includono i confini delle formazioni, le faglie e la dislocazione dei profili da parte delle faglie, e altre caratteristiche come le discordanze o i margini delle intrusioni; vengono inoltre misurate le direzioni di movimento delle faglie.

Durante la mappatura, i geologi misurano e riportano le immersioni e le direzioni sia dei piani di sedimentazione che delle strutture geologiche (es. faglie, pieghe, ecc), che forniscono una guida alla storia strutturale della sequenza, mostrando ad esempio dove si trovano rocce inclinate, anticlinali, sinclinali e faglie.



Limite geologico tra arenaria grigia e granito chiaro a grana fine, Sea Point, Città del Capo, Sudafrica



Un importante cambiamento di pendenza al confine geologico tra le dure rocce ignee di un filone-strato, a destra, e le più deboli rocce sedimentarie, a sinistra,

Vallo di Adriano, nell'Inghilterra settentrionale.

Box 7.3. Un'indagine di prospezione per i diamanti

I diamanti provengono da rocce vulcaniche chiamate kimberliti che si trovano normalmente in camini vulcanici verticali, ma possono anche formare dicchi e filoni-strato. I diamanti sono rari nelle kimberliti; molto più comuni sono altri minerali kimberlitici come i granati; quindi, i cercatori non cercano diamanti ma granati kimberlitici.

Il campionamento dei corsi d'acqua e del suolo di un'area dell'Africa meridionale aveva fatto emergere una stretta area di terreno con tendenza nord-sud lunga circa 1 km, ricca di minerali kimberlitici e di tre microscopici diamanti. L'ipotesi di lavoro era che questi dovessero provenire da un dicco di kimberlite con immersione Nord-Sud contenente diamanti. Fu quindi scavata una serie di trincee est-ovest fino al basamento giurassico, alla ricerca del dicco, ma non fu trovato.



Scavo di trincee fino al sottosuolo (prima delle moderne norme di salute e sicurezza)

Il basamento giurassico era costituito in gran parte da arenaria, con alcuni letti di fango, e inclinava verso ovest. Era un letto di argillite ad essere ricco di granati kimberlitici e di alcuni diamanti, e il suo affioramento da nord a sud aveva prodotto la zona del suolo ricca di granati. Si trattava di un fenomeno molto insolito: mai prima d'ora in Africa erano state trovate antiche rocce sedimentarie contenenti grandi quantità di minerali kimberlitici e diamanti.



Uno strato di argillite ricco di diamanti

L'indagine doveva quindi procedere in due direzioni. Il giacimento doveva essere analizzato per scoprire se fosse abbastanza ricco di diamanti da rendere l'estrazione vantaggiosa. Nel frattempo, si la ricerca doveva continuare per trovare la fonte originaria dei diamanti, sperando che fosse estraibile.

Furono effettuate misurazioni sulle stratificazioni dell'arenaria, che hanno dimostrato che il fiume che ha depositato le arenarie nel Giurassico scorreva da ovest. Questa era una buona notizia perché, se la fonte originaria dei minerali e dei diamanti fosse stata un camino kimberlitico, avrebbe potuto essere ancora esposta. Se la fonte fosse stata a est, sarebbe stata sepolta sotto altre arenarie giurassiche; se fosse stata a sud o a nord, anche qui sarebbe stata sepolta.



Arenaria giurassica a strati incrociati, che mostra il flusso dell'antico fiume da ovest (a sinistra)

Fu quindi avviato un ulteriore programma di campionamento dei torrenti e del terreno averso ovest e alla fine fu trovata un'area circolare di terreno ricco di granati. Una volta scavata, si scoprì che si trattava di una kimberlite sufficientemente ricca di diamanti da poter essere sfruttata. La miniera produsse i diamanti con successo per oltre quindici anni. Nel frattempo, si scoprì che il deposito originale non conteneva abbastanza diamanti da rendere l'estrazione vantaggiosa ai prezzi dei diamanti disponibili all'epoca, anche se in futuro potrebbe ancora essere sfruttata.

Glossario

Ognuno di questi termini è indicato in grassetto nel punto in cui appare per la prima volta e viene poi definito nel testo. Utilizzate il vostro "cercatore" per trovare il primo utilizzo del termine e la sua definizione.

Acque sotterranee
Acque artesiane
Acquifero
Acquifero confinato
Aggregato
Albedo
Alta pressione
Anticlinale
Arco insulare
Asteroide
Atmosfera
Aureola metamorfica
Base della montagna
Bassa pressione
Batolite
Big bang (teoria)
Biosfera
Bonifica
Camera magmatica
Camino vulcanico
Cementazione
Cerniera di piega
Ciclo breve del carbonio
Ciclo dei supercontinenti
Ciclo dell'acqua
Ciclo di Wilson (o Ciclo di J. Tuzo Wilson)
Colata
Cometa
Compattazione
Condensazione
Condizione di serra
Corpo fossile
Correlazione
Curva di decadimento radioattivo
Datazione assoluta
Datazione radiometrica
Datazione relativa
Deriva dei continenti (teoria)
Dicco
Eclisse lunare
Eclisse solare
Effetto ghiacciaia
Effetto serra
Emivita
Energia rinnovabile
Epicentro
Erosione
Espansione dei fondali (teoria)
Estinzione di massa
Evaporazione
Faglia
Faglia aperta
Faglia a scorrimento
Faglia di spinta
Faglia inversa
Faglia normale
Faglia trasforme
Falda acquifera
Feedback
Feedback negativo
Feedback positivo
Fianco (della piega)
Fossile
Frana
Fuoco
Fusione parziale
Geosfera
Giunto
Idrosfera
Impermeabile
Infiltrazione
Inquinante
Intemperie
Laminazione
Letto
Litificazione
Litosfera
Magma
Marea di quadratura
Marea di primavera
Margine conservativo
Margine convergente
Margine di cottura
Margine divergente
Meccanismo convettivo
Meccanismo di spinta della dorsale
Meccanismo di trazione della placca
Metamorfismo
Metamorfismo regionale
Metamorfismo termico
Minerale
Mitigazione
Onde sismiche
Percolato
Pericolo
Pericolo naturale
Permafrost
Permeabilità
Piano di faglia
Piega
Piega isoclinale
Piega stretta
Plutone
Polarità magnetica inversa
Polarità magnetica normale
Porosità
Potenziamento dell'effetto serra
Pozzo
Pozzo artesiano
Prisma di accrezione
Processo
Prodotto
Punto di svolta
Roccia
Roccia ignea
Roccia ignea effusiva
Roccia ignea intrusiva
Roccia metamorfica
Roccia plutonica
Roccia sedimentaria
Roccia vulcanica
Scivolamento
Selezione naturale
Sequestro del carbonio
Sinclinale
Sismometro
Sistema
Sistema aperto
Sistema chiuso
Subduzione
Suolo
Sviluppo sostenibile
Tappo vulcanico
Tempo di permanenza
Terra a palla di fango
Terra a palla di neve
Tettonica delle placche (teoria)
Traccia fossile
Traspirazione
Zona satura

Glossario di elementi, composti e ioni

Elementi	Composti	Ioni
Al – alluminio	CaO – ossido di calcio, calce	Cl^- – ione cloruro
Au - oro	$Ca(OH)_2$ – idrossido di calcio, calce	HCO_3^- – ione carbonato di idrogeno
Ca – calcio	$CaCO_3$ – carbonato di calcio, calcite	K^+ – ione potassio
Cl – cloro	$CaSO_4$. $2H_2O$ – solfato di calcio, gesso	Mg^{2+} – ione magnesio
Fe – ferro	CH_4 – metano	Na^+ – ione sodio
H – idrogeno	CO_2 – biossido di carbonio, anidride carbonica	SO_4^{2-} – ione solfato
K – potassio	$CuFeS_2$ – calcopirite	
Mg – magnesio	Fe_3O_4 – ossido di ferro, ematite	
Na – sodio	FeS – solfato di ferro, pirite	
O – Ossigeno	KCl – cloruro di potassio, potassa	
Pb - piombo	NaCl – cloruro di sodio, salgemma	
S – Zolfo	PbS – solfuro di piombo, galena	
	SiO_2 – biossido di silicio, quarzo	

International Geoscience Syllabus, a cui possono partecipare tutti gli studenti a partire dai 16 anni

Questo programma è stato preparato dall'Organizzazione internazionale per l'educazione alle geoscienze (IGEO) e dalla Commissione per l'educazione alle geoscienze dell'Unione internazionale delle scienze geologiche (IUGS-COGE)

Il programma si basa sui seguenti principi:

- si basa su programmi di studio esistenti in tutto il mondo, poiché una proposta basata su programmi di studio esistenti ha maggiori probabilità di essere accettata a livello globale - la matrice della copertura dei programmi di studio esistenti inizia a pagina 7;
- la struttura del syllabus internazionale è chiaramente evidente, anche se non facilmente riscontrabile in molti curricula esistenti;
- il syllabus è presentato in modo conciso su una sola pagina, poiché è più probabile che un programma conciso sia accettabile per gli educatori e gli insegnanti di scienze della Terra; nelle pagine successive vengono forniti maggiori dettagli attraverso esempi per indicare l'estensione della copertura, anche se si prevede che i dettagli varieranno da paese a paese;
- il syllabus non ha lo scopo di indicare una progressione.

International Geoscience Syllabus, a cui possono partecipare tutti gli studenti a partire dai 16 anni – il cuore del programma

Entro l'età di 16 anni, gli studenti dovrebbero sviluppare una comprensione dei seguenti aspetti:

La Terra come sistema in evoluzione

- Attributi — aperta all'energia, quasi chiusa alla materia, mutevole nel tempo, all'interno del sistem atmosfera, biosfera
- Interazioni — interazione tra geosfera, idrosfera, atmosfera, biosfera
- Feedback — positivi e negativi
- Processi e prodotti — ciclo dell'acqua, ciclo delle rocce, ciclo del carbonio
- Fonti di energia — solare, interna

La Terra è un sistema, all'interno del sistema solare, all'interno dell'universo

- Origine — big bang; accrezione da polveri; stelle; pianeti
- Il Sole — unica fonte di energia esterna; fluttuazioni
- Effetti rotazionali — giorno/notte, stagioni, fasi lunari, eclissi

La Terra è un sistema che è cambiato nel tempo

- Tempo geologico — arco di tempo, eventi principali, metodi di datazione relativi e assoluti, velocità dei processi

Il sistema Terra è costituito da sfere interagenti

- **geosfera**
- Materiali e proprietà della terra — minerali, fossili, rocce sedimentarie, ignee e metamorfiche, suoli
- Processi terrestri e caratteristiche — processi superficiali, processi sedimentari, ignei e metamorfici, deformazione (AW)
- Struttura della Terra e prove — crosta, mantello, core, litosfera
- Tettonica delle placche e prove — teoria unificante, costruzione delle placche e subduzione, caratteristiche dei margini delle placche, meccanismo, velocità di movimento; evidenze

- **idrosfera**
- Acque continentali — posizione, processi di movimento, usi
- Acque oceaniche — posizione, processi di movimento, usi

- **atmosfera**
- Composizione — evoluzione, composizione attuale
- Flussi — processi di movimento
- Cambiamenti — effetto serra, influenze planetarie, influenza umana, impatto sul livello del mare

- **biosfera**
- Evoluzione — selezione naturale, prove fossili, estinzione di massa
- Impatti su altri sistemi — il ruolo della biosfera sui sistemi terrestri

Il sistema Terra produce risorse

- Materiali grezzi e combustibili fossili — concentrati in natura, non rinnovabili, da gestire con attenzione (sviluppo sostenibile), potenzialmente inquinanti
- Energie rinnovabili — problemi

Interazione tra l'uomo e il sistema Terra

- Pericoli naturali — impatto umano, previsione, mitigazione
- Questioni ambientali — da locale a globale, mitigazione
- Impatto sulla storia dell'uomo — guerre per le risorse; migrazioni dovute ai cambiamenti climatici

Il sistema Terra viene esplorato attraverso il lavoro sul campo e il lavoro pratico

- Osservazione — osservazione, misure e registrazione
- Sintesi delle osservazioni — interpretazione
- Indagine e verifica delle ipotesi — elaborare e attuare piani, elaborare dati, trarre conclusioni, valutare i risultati e comunicare i risultati

Esemplificazione del nucleo centrale per indicare l'ampiezza della copertura (si prevede che questo varierà da Paese a Paese)

La Terra come sistema in evoluzione

• Attributi	aperta all'energia, quasi chiusa alla materia, mutevole nel tempo, all'interno del sistema solare, comprendente geosfera, idrosfera, atmosfera, biosfera	
• Interazioni	interazione tra geosfera, idrosfera, atmosfera, biosfera	*l'interazione litosfera/idrosfera causa i processi costieri; l'interazione idrosfera/atmosfera causa le onde e il riscaldamento atmosferico; l'interazione atmosfera/biosfera controlla climaticamente la vegetazione; l'interazione litosfera/biosfera influisce sulla qualità del suolo; la velocità varia*
• Feedback	positivi e negativi	*positivo - l'aumento della superficie delle calotte polari comporta una maggiore riflessione dell'energia solare, con conseguente aumento del raffreddamento, con conseguente aumento della superficie delle calotte polari; negativo - più anidride carbonica viene rilasciata nell'atmosfera, più viene assorbita dagli oceani*
• Processi e prodotti	ciclo dell'acqua, ciclo delle rocce, ciclo del carbonio	*proprietà uniche dell'acqua, evaporazione, traspirazione, condensazione, precipitazione; agenti atmosferici/erosione, sedimentazione, metamorfismo, fusione, attività ignea; fotosintesi, respirazione, interramento come calcare/combustibile fossile, rilascio tramite combustione/erosione*
• Fonti di energia	solare, interna	*l'energia interna della radioattività e l'energia della formazione della Terra*

La Terra è un sistema all'interno del sistema solare, all'interno dell'universo

• Origini	big bang; accrezione di polveri; stelle; pianeti	
• Il Sole	unica fonte di energia esterna; fluttuazioni	*energia solare che guida il ciclo dell'acqua e il meteo; fluttuazioni a lungo termine dell'energia del Sole, in relazione ai cambiamenti climatici*

• Effetti rotazionali	giorno/notte, stagioni, fasi lunari, eclissi	

La Terra è un sistema che è cambiato nel tempo

• Tempo geologico	arco di tempo, eventi principali, metodi di datazione relativi e assoluti, velocità dei processi	*eventi principali: 4600 milioni di anni (Ma) - formazione della Terra; 3600Ma - inizio della vita; 550Ma - animali con parti dure; 250Ma - estinzione di massa, compresi i trilobiti; 65Ma - estinzione di massa, compresi i dinosauri; era glaciale di 1Ma; principi di datazione: sovrapposizione, relazioni trasversali, correlazione dei fossili; datazione radiometrica; i processi si verificano su uno spettro di frequenza-magnitudo da continuo a catastrofico*

Il sistema Terra è costituito da sfere interagenti - - geosfera

• Materiali e proprietà della terra	minerali, fossili, rocce sedimentarie, ignee e metamorfiche, suoli	*definizioni di: minerale, fossile, roccia, roccia sedimentaria, roccia ignea, roccia metamorfica, suolo; minerali tra cui: quarzo, feldspato, mica, granato, calcite, alite, gesso, pirite, galena; fossili tra cui: trilobite, ammonite, dinosauro; processi di fossilizzazione tra cui: sepoltura, sostituzione, stampi e calchi, fossili in tracce; struttura della roccia, porosità, permeabilità; rocce sedimentarie tra cui: calcare, gesso, conglomerato, arenaria, argilla, scisto, salgemma; caratteristiche sedimentarie tra cui: stratificazione (bedding), cross bedding, segni di increspatura; rocce ignee tra cui: granito, basalto, andesite, gabbro, cenere vulcanica; rocce metamorfiche tra cui: ardesia, scisto, gneiss, marmo, metaquarzite (quarzite)*

• Processi terrestri e caratteristiche	processi superficiali, processi sedimentari, ignei e metamorfici, deformazione (AW)	*agenti atmosferici (fisici/chimici), erosione, trasporto, deposizione, litificazione, metamorfismo, intrusione, estrusione, piegatura, fagliazione, giunzione*
• Struttura della Terra e prove	crosta, mantello, core, litosfera	*prove sismiche*
• Tettonica delle placche e prove	teoria unificante, costruzione delle placche e subduzione, caratteristiche dei margini delle placche, meccanismo, velocità di movimento; evidenze	*margini costruttivi, distruttivi e conservativi; prove passate e presenti*
- **idrosfera**		
• Acque continentali	posizione, processi di movimento, usi	*acque superficiali, acque sotterranee, calotte glaciali/glaciali; infiltrazione, flusso discendente; gestione delle risorse idriche.*
• Acque oceaniche	posizione, processi di movimento, usi	*salinità; flusso superficiale e onde causate dal vento; flusso profondo dovuto a differenze di densità causate da temperatura e salinità*
- **atmosfera**		
• Composizione	evoluzione, composizione attuale	*degassamento da parte dell'attività vulcanica precoce; azoto, ossigeno, gas in tracce tra cui vapore acqueo e anidride carbonica*
• Flussi	processi di movimento	*riscaldamento ineguale della Terra, flusso dovuto a differenze di densità causate dalla temperatura, fonte di calore oceanica*
• Cambiamenti	effetto serra, influenze planetarie, influenza umana, impatto sul livello del mare	*grafici della temperatura su diversi archi temporali; legame tra variazione della temperatura e livello del mare*
- **biosfera**		
• Evoluzione	selezione naturale, prove fossili, estinzione di massa	*effetti paleogeografici sull'evoluzione; estinzione di massa da attività vulcanica e impatto*
• Impatti su altri sistemi	il ruolo della biosfera sui sistemi terrestri	*invecchiamento biologico; deposizione biologica*
Il sistema Terra produce risorse		
• Materiali grezzi e combustibili fossili	concentrati in natura, non rinnovabili, da gestire con attenzione (sviluppo sostenibile), potenzialmente inquinanti	*petrolio/gas; minerali metallici; materie prime sfuse; esempi locali di estrazione mineraria/cava*
• Energie rinnovabili	problemi	*basso inquinamento, costo, regolarità della fornitura*
Interazione tra l'uomo e il sistema Terra		
• Pericoli naturali	impatto umano, previsione, mitigazione	*eruzioni; terremoti; tsunami; frane*
• Questioni ambientali	da locale a globale, mitigazione	*impatto umano globale (causa di erosione, inquinamento, cambiamenti nel drenaggio, estrazione mineraria); combustione di combustibili fossili ed effetto serra*
• Impatto sulla storia dell'uomo	guerre per le risorse; migrazioni dovute ai cambiamenti climatici	

Il sistema Terra viene esplorato attraverso il lavoro sul campo e il lavoro pratico.

• Osservazioni • Sintesi delle osservazioni • Indagine e verifica delle ipotesi	osservazione, misure e registrazione interpretazione elaborare e attuare piani, elaborare dati, trarre conclusioni, valutare i risultati e comunicare i risultati	*ambiente di formazione delle rocce; storia geologica; questioni ambientali*

Immagini e fonti

Chiave

CCA-SA Creative Commons Attribution-Share Alike
ESEU Earth Science Education Unit
GNUFDL GNU Free Documentation Licence (Versione 1.2)
ipd in/into the public domain
ISAL Image Science and Analysis Laboratory
NASA National Aeronautics and Space Administration
USGS United States Geological Survey
USNOAA United States National Oceanic and Atmospheric Administration
…….

FIGURE

Figura 0.1. Ciottoli e forme di sabbia interessanti

- Ciottoli. Pubblicato da David Bleasdale sotto Licenza internazionale CCA A 2.0 Licenza generica
- Forme di sabbia. Pubblicato da vastateparksstaff sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Figura 1.1. Sistemi aperti e chiusi

- Un lavandino. Rilasciato (dominio pubblico) da Chris McKenna
- Thermos. Concesso in licenza da Termolar S.A. sotto licenza Internazionale CCA-SA 4.0

Figura 1.2. La Terra – un sistema molto complesso. Questo file è (dominio pubblico) perché è stato creato esclusivamente dalla NASA

Figura 1.3. Estrazione di sale da una laguna salata costiera in Tunisia. Pubblicato da Kalechnizar sotto Licenza internazionale CCASA 3.0

Figura 1.4. La calotta glaciale artica nel 1984 e 2012. Pubblicato da http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=79256 e (dominio pubblico) perché creato esclusivamente dalla NASA

Figura 1.5. Una semplice dimostrazione del ciclo dell'acqua. Foto: Chris King

Figura 1.6. Processi e prodotti del ciclo dell'acqua. Ridisegnato da Sigried sotto Licenza internazionale CCA-SA A 3.0

Figura 1.7. Processi e prodotti del ciclo delle rocce

Figura 1.8. Processi e prodotti del ciclo del carbonio

Figura 2.1. Galassie fotografate dal telescopio Hubble

- Messier 96, una galassia a spirale. Pubblicata dalla NASA (dominio pubblico)
- Galassie a spirale in forma di rosa. Pubblicata dalla NASA (dominio pubblico)
- Centro NGC 1097. Pubblicato dalla NASA (dominio pubblico)

Figura 2.2. Il Sole – la nostra principale fonte di energia. Pubblicato da HalloweenNight sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Figura 2.3. L'effetto riscaldante dell'angolo del Sole nel cielo

Figura 2.4. Le fasi della Luna

Figura 2.5. La Luna che diventa piena. Pubblicato da MKcray sotto i termini GNUFDL

Figura 2.6. Un collage di fotografie di un'eclissi solare parziale, vista dalla Germania. Pubblicato da Sgbeer sotto i termini GNUFDL Versione 1.2.

Figura 2.7. Un foto collage di un'eclissi lunare, vista dalla California, USA. Pubblicato da Jason Snell sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Figura 3.1. La curva di decadimento radioattivo per la decomposizione di tutti i materiali radioattivi

Figura 4.1. Porosità e permeabilità nelle rocce.

Figura 4.2. Argentinosaurus dall'Argentina, il più grande tipo di dinosauro conosciuto finora e immagini al microscopio elettronico a scansione di minuscoli microfossili marini

- Ricostruzione di Argentinosaurus in una mostra speciale del Naturmuseum Senckenberg, Francoforte, Germania. Pubblicato da Eva Kröcher sotto i termini GNUFDL
- Immagini SEM di microfossili marini. Pubblicato da Hannes Grobe/AWI sotto Licenza internazionale CCAA 3.0

Figura 4.3. Fossilizzazione

Figura 4.4. Sequenza del suolo ad Altenberg, Germania. Pubblicato da Failbub sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 4.5. Il raffreddamento e la cristallizzazione delle rocce ignee

Figura 4.6. Corpi ignei negli oceani

Figura 4.7. Corpi ignei sui continenti

Figura 4.8. Effetti metamorfici termici

Figura 4.9. Sezione trasversale della Terra

Figura 4.10. La geologia della crosta terrestre. Pubblicato da USGS e (dominio pubblico) perché contiene solo materiali provenienti originariamente da USGS

Figura 4.11. Le rocce più comuni della crosta continentale

- Granito. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Gneiss. ESEU. Come sopra
- Mudstone (roccia argillosa). ESEU. Come sopra

Figura 4.12. La parte esterna della Terra

Figura 4.13. Il fondale dell'Oceano Pacifico; dorsale oceanica vicino al centro e fosse a Est e Ovest. Pubblicato da http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html e di pubblico dominio

Figura 4.14. Anomalie magnetiche sulla dorsale di Reykjanes, a sud-ovest dell'Islanda. © Geoscience, ridisegnato da ESEU e utilizzato con il permesso di ESEU.

Figura 4.15. La formazione di strisce magnetiche da parte dei basalti del fondale oceanico. Modificato da "This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics" (edizione online), di W. Jacquelyne Kious e Robert I. Tilling e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USGS.

Figura 4.16. La catena di isole vulcaniche e seamount vulcanici sottomarini collegati all'hotspot delle Hawaii nell'Oceano Pacifico. Pubblicato dal National Geophysical Data Center/USGS e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 4.17. Faglie trasformi che compensano la dorsale oceanica dell'Oceano Atlantico. Pubblicato da http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 4.18. Nuova litosfera oceanica in formazione alla dorsale oceanica nell'Oceano Atlantico centrale. © Press & Siever, ridisegnato da ESEU, modificato e utilizzato con permesso

Figura 4.19. La valle di rift al centro di una dorsale oceanica

Figura 4.20. Una piccola valle di rift in Islanda, collegata al rifting della dorsale oceanica. Ponte tra i continenti nella penisola di Reykjanes, Islanda sud-occidentale, attraverso la valle di rift Alfagja, il confine tra le placche tettoniche continentali eurasiatica e nordamericana. Pubblicato da Chris 73 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 4.21. Una serie di faglie trasformi che compensano una dorsale oceanica e una valle di rift. Disegnato da D. King

Figura 4.22. La Faglia di San Andreas in California, USA. Pubblicato da Robert E. Wallace e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USGS

Figura 4.23. Terremoti registrati attraverso la zona di subduzione delle Isole Curili; i terremoti sono codificati a colori per profondità. Pubblicato da USGS e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USGS

Figura 4.24. Subduzione in una collisione di due placche oceaniche. Zona di collisione della placca oceanica. Riprodotto con il permesso di USGS, ridisegnato da ESEU e utilizzato con permesso

Figura 4.25. L'arco insulare dei Caraibi. Pubblicato da http://www.ngdc.nooa.gov/mgg/image/2minrelief.html e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 4.26. Il vulcano Soufriere Hills in eruzione sull'isola di Montserrat nell'arco insulare dei Caraibi. Immagine scattata dall'equipaggio della Spedizione NASA 21 e rilasciata (dominio pubblico) perché creata esclusivamente dalla NASA

Figura 4.27. Subduzione di una placca oceanica sotto una placca continentale. Riprodotto con il permesso di USGS, ridisegnato da ESEU e utilizzato con modifiche e permesso

Figura 4.28. La zona di collisione dove la placca di Nazca subduce sotto la placca sudamericana. Pubblicato da http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 4.29. La catena montuosa delle Ande tra Cile e Argentina. Pubblicato da Jorge Morales Piderit e rilasciato (dominio pubblico)

Figura 4.30. Una zona di collisione tra due placche continentali. Riprodotto con il permesso di USGS, ridisegnato da ESEU e modificato, con permesso

Figura 4.31. La collisione della placca indiana con la placca eurasiatica, che ha prodotto la catena montuosa dell'Himalaya. Pubblicato da http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 4.32. La catena montuosa dell'Himalaya vista dalla Stazione Spaziale Internazionale. Da http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_152.html e (dominio pubblico) perché creata da ISAL del NASA Johnson Space Center

Figura 4.33. Tassi di movimento delle placche. Ridisegnato da un diagramma pubblicato dalla NASA su https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html e (dominio pubblico) perché creato esclusivamente dalla NASA

Figura 4.34. Meccanismi di movimento delle placche

Figura 4.35. Le principali placche tettoniche della Terra. Pubblicato da USGS e (dominio pubblico) perché contiene solo materiali provenienti originariamente da USGS

Figura 4.36. Acquiferi

Figura 4.37. Prova di pompaggio

Figura 4.38. Un pennacchio di inquinamento delle acque sotterranee. Ridisegnato da http://pbisotopes.ess.sunysb.edu/classes/geo101-notes-07/ex-2-5.htm

Figura 4.39. Alta marea e bassa marea, Ponte Humber, Inghilterra. Entrambe le immagini pubblicate da David Wright sul sito web Geograph e concesse in licenza per il riutilizzo sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0

Figura 4.40. La Luna che causa rigonfiamenti di marea

Figura 4.41. Cambiamenti di marea, un esempio da Bridgeport, Connecticut, USA. Pubblicato da NickyMcLean e rilasciato (dominio pubblico)

Figura 4.42. Onde – grandi e piccole

- Surf, California. Pubblicato da 2010_mavericks_competition.jpg: Shalom Jacobovitz sotto licenza CC A-SA 2.0 Licenza generica
- Frangente d'onda, Shingleton Beach, Australia Occidentale. Pubblicato da Orderinchaos sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 4.43. Corrente calda di colore rosso che scorre in superficie; corrente fredda di colore blu che scorre sul fondo. Foto: Chris King

Figura 4.44. Circolazione delle masse d'aria sulla Terra. Basato sul disegno diprodotto di http://www.bbc.co.uk/education/guides/zym77ty/revision/2

Figura 4.45. Schema generalizzato dei venti superficiali sulla Terra. Basato sul disegno diprodotto di https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_circulation#/media/File:AtmosphCirc2.png

Figura 4.46. Circolazioni oceaniche superficiali. Basato sul disegno diprodotto di https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/Corrientes-oceanicas.png

Figura 4.47. Il modello di circolazione dalla superficie al profondo della Terra. Basato sul disegno diprodotto di https://en.wikipedia.org/wiki/Thermohaline_circulation#/media/File:Thermohaline_Circulation_2.png

Figura 4.48. Le migliori zone di pesca, prodotte dalla risalita delle fredde acque oceaniche profonde. Pubblicato da USNOAA e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 4.49. La Terra "biglia blu" che mostra il sottilissimo strato di atmosfera in viola intorno all'esterno. Immagine (dominio pubblico) perché creata esclusivamente dalla NASA

Figura 4.50. Lo Space Shuttle Endeavour in orbita nell'atmosfera esterna che mostra lo strato di troposfera arancione e lo strato bianco sopra che contiene ozono. Immagine (dominio pubblico) perché creata da ISAL del NASA Johnson Space Center

Figura 4.51. Batteri oceanici microscopici che fotosintetizzano, assorbendo anidride carbonica e rilasciando ossigeno. Pubblicato da Doc. RNDr. Josef Reischig, CSc. sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 4.52. Le nubi a spirale di un ciclone vicino all'Islanda il 4 settembre 2003. Immagine (dominio pubblico) perché creata esclusivamente dalla NASA

Figura 4.53. L'uragano Isabel nell'Oceano Atlantico settentrionale nel 2003, con il caratteristico occhio al centro. Immagine (dominio pubblico) perché creata esclusivamente dalla NASA

Figura 4.54. Un anticiclone vicino all'Australia meridionale. Immagine (dominio pubblico) poiché creata esclusivamente dalla NASA

Figura 4.55. Smog da inquinamento a Shanghai, Cina, intrappolato sotto aria fredda in discesa. Pubblicato da DL5MDA sotto i termini GNUFDL, Versione 1.2

Figura 4.56. Un parapendio che utilizza le termiche sul bordo di un pendio per il sollevamento. Pubblicato da Peter Greis, Stäfa, Svizzera sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Figura 4.57. La temperatura nel passato della superficie terrestre come mostrato dalle evidenze di diversi indicatori. Ridisegnato da un'immagine pubblicata da Glen Fergus sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 4.58. Estrazione di una carota di ghiaccio da un tubo di carotaggio prelevato da un pozzo nel ghiaccio. Pubblicato da Lonnie Thompson, Byrd Polar Research Center, Ohio State University e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 4.59. Grafici del cambiamento di temperatura e della variazione di CO2 nell'atmosfera negli ultimi 42.000 anni registrati nella carota di ghiaccio di Vostok dall'Antartide. Ridisegnato da un'immagine pubblicata da USNOAA sotto i termini GNUFDL, Versione 1.2

Figura 4.60. L'effetto serra

Figura 4.61. Il cambiamento nei livelli di anidride carbonica nell'atmosfera, misurato da Moana Loa, Hawaii. Dati del Dr. Pieter Tans, USNOAA/ESRL e Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography. Ridisegnato da un'immagine pubblicata da Delorme sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Figura 4.62. Cambiamento nella temperatura superficiale della Terra, da dati compilati dalla NASA. Ridisegnato da dati (dominio pubblico) perché creati esclusivamente dalla NASA

Figura 4.63. Mappa dei continenti 280Ma prodotta attraverso una collaborazione tra Earth Science Education Unit e Cambridge Paleomap Services Ltd, che ha prodotto le immagini delle mappe utilizzate. ESEU ringrazia per la competenza e l'assistenza di Alan Smith e Lawrence Rush di CPSL. Immagine utilizzata con il permesso di ESEU.

Figura 4.64. Mappa dei continenti 85Ma prodotta attraverso una collaborazione tra Earth Science Education Unit e Cambridge Paleomap Services Ltd, che ha prodotto le immagini delle mappe utilizzate. ESEU ringrazia per la competenza e l'assistenza di Alan Smith e Lawrence Rush di CPSL. Immagine utilizzata con il permesso di ESEU.

Figura 4.65. Il trend a lungo termine della vita sulla Terra e le principali estinzioni, come mostrato dal numero di generi (gruppi biologici contenenti numeri di specie). Ridisegnato da un'immagine pubblicata da Riferimento: Rohde, R.A., e Muller, R.A. (2005-03). Cycles in Fossil Diversity. Nature 434: 208-210, versione SVG di Albert Mestre sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 5.1. Taglio commerciale della torba, Ljungby, Svezia. Pubblicato da Masse e rilasciato (dominio pubblico)

Figura 5.2. Una miniera di carbone a cielo aperto in un spesso strato di carbone inclinato, che rivela un vecchio cunicolo di miniera profonda, strato Foord nella Formazione Carbonifero Stellarton, Stellarton, Nova Scotia, Canada. Pubblicato da Michael C. Rygel sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 5.3. Due lastre di arenaria immerse in olio motore – che mostrano come diverse arenarie possono assorbire diverse quantità di olio nei loro spazi porosi. Peter Craig in King C. (2017) Scottish 'Bring and Share'. Dalla Conferenza ESTA di St Andrews, settembre 2016. Teaching Earth Sciences 41.2. pp 24-5

Figura 5.4. Una trappola formata da roccia piegata verso l'alto (un'anticlinale) – può contenere petrolio o gas o entrambi insieme. Modificata per includere l'acqua nella roccia serbatoio. Pubblicato da MagentaGreen sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 5.5. Consumo energetico globale. Pubblicato da Martinburo da Bp_world_energy_consumption_2016.gif sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Figura 5.6. Consumo energetico recente. Dati presi da http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energyeconomics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf

Figura 5.7. Le quantità di anidride carbonica rilasciate dalla combustione di diversi combustibili fossili per produrre la stessa quantità di energia. Dati dalla US Energy Information Administration (USEIA) su https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=73&t=11

Figura 5.8. Produzione energetica recente da diverse fonti rinnovabili. Dati dal rapporto sullo stato globale REN21, Tabella R1 presa da http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf

Figura 6.1. 'Bombe' di lava liquida in eruzione di notte dallo Stromboli, vicino alla Sicilia, Italia, 2013. Pubblicato da Drtrotsky sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 6.2. Esempio di una mappa di rischio vulcanico, Monte Rainier, Stato di Washington, USA. Pubblicato da Sémhur e (dominio pubblico) perché contiene solo materiali provenienti originariamente da USGS; legenda modificata

Figura 6.3. Terremoto e onde sismiche. Ridisegnato da un'immagine di Dollynarak e rilasciato (dominio pubblico)

Figura 6.4. Lo tsunami causato dal terremoto di Valdivia del 1960, che mostra i tempi di percorrenza attraverso l'Oceano Pacifico. Pubblicato da http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1960_05_22_tsunami.php e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 6.5. Il logo del Programma Nazionale di Mitigazione del Rischio Tsunami degli Stati Uniti. Preso da http://nws.weather.gov/nthmp/documents/NTHMPStrategicPlan.pdf. Pubblicato da USNOAA/National Science Foundation e (dominio pubblico) perché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Figura 6.6. Erosione del sentiero, Foresta di Fontainebleau vicino a Parigi, Francia. Pubblicato da Romary sotto i termini GNUFDL

Figura 6.7. Scarico delle acque piovane, Dobney Avenue, Wagga Wagga, Nuovo Galles del Sud, Australia. Pubblicato da Bidgee sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 6.8. Gestione dei rifiuti a Kathmandu, Nepal. Pubblicato da Sigismund von Dobschütz sotto i termini GNUFDL

Figura 6.9. Gestione dei rifiuti a Stoccolma, Svezia. Pubblicato da Holger.Ellgaard sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 6.10. Discarica del Sud Est dei Nuovi Territori rivestita con membrana geotessile, Hong Kong. Pubblicato da Minghong sotto i termini GNUFDL, Versione 1.2

Figura 6.11. Serie di sfiati di gas metano su un vecchio sito di discarica paesaggistico dove in passato veniva estratto scisto bituminoso, Seafield, West Lothian, Scozia. Pubblicato da Paul Birrell come parte della collezione del progetto Geograph sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Figura 6.12. Diagramma di un tipico pozzo di monitoraggio delle acque sotterranee. Pubblicato da AuntSpray sotto CCA-SA. Modificato per includere l'acqua nella roccia serbatoio. Pubblicato da MagentaGreen sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 6.13. Sferule di microplastica che fuoriescono da una spugna abrasiva in una ciotola bianca. Pubblicato da Hungchaka sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Figura 6.14. Riserva naturale Heeseberg in una vecchia cava, Bassa Sassonia, Germania. Pubblicato da Manomaari sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Figura 6.15. Tecnologia di cattura del carbonio testata in una miniera di carbone. Pubblicato da Peabody Energy, Inc sotto Licenza internazionale CCA 3.0

BOX

Box 1.1. Il sistema solare. Rilasciato da Planets2008.jpg sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 1.2.

- Pioggia vicino a Lunde, Funen, Danimarca. Pubblicato da Malene Thyssen sotto GNUFDL
- Suolo. Pubblicato da Ichor202 sotto GNUFDL
- Una sorgente raccolta in una vasca di pietra, Owlcots Lane vicino a Bradford, Inghilterra. Pubblicato da Betty Longbottom come parte della collezione del progetto Geograph sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Box 1.3.

- Gocce di pioggia che cadono sull'acqua. Pubblicato da Juni da Kyoto, Giappone sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Grondaia stradale nella Città Vecchia, Stoccolma, Svezia. Pubblicato da Bengt Nyman sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Stagno di Dasher Bari. Pubblicato da Syed Aminul sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Box 1.4. Motivo nella sabbia, Barton on Sea, Hampshire, Inghilterra. Pubblicato da Clive Perrin come parte del progetto Geograph e pubblicato sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Box 1.5. Escursionista che riposa sulla tundra vicino a Onion Portage in Alaska. Pubblicato da Western Arctic National Parklands sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Box 2.1. L'universo dal tuo cortile

- Due galassie riprese sopra la cupola dell'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta: la Via Lattea, cioè la galassia che ospita il Sistema Solare, attraversa l'immagine dal basso verso l'alto, mentre al centro dell'immagine si riconosce l'ovale della galassia di Andromeda. Credit: cortesia Andrea Vanoni per la Fondazione Clément Fillietroz-ONLUS
- L'immagine a lunga esposizione rivela la rotazione apparente degli astri attorno al polo nord celeste sopra l'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta.
  Credit: Nikki Miller per la Fondazione Clément Fillietroz-ONLUS/European Southern Observatory

Box 2.2. La fascia degli asteroidi

- La fascia principale degli asteroidi. Rilasciato (dominio pubblico) dal suo autore, Mdf su English Wikipedia
- Asteroide Gaspra ripreso dalla sonda Galileo. (dominio pubblico) perché creato esclusivamente dalla NASA

Box 2.3. Comete

- Cometa Hale-Bopp vista dalla Croazia nel 1997. Pubblicata da Philipp Salzgeber sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Austria
- Cometa Churyumov-Gerasimenko nel settembre 2014 fotografata da Rosetta. Pubblicata da ESA/Rosetta/NAVCAM, CC BY-SA IGO 3.0 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0 IGO

Box 2.4. Geologia planetaria - Marte

- Mappa geologica di Marte. Da http://pubs.usgs.gov/sim/3292/pdf/sim3292_map.pdf. Pubblicata da USGS e di dominio pubblico in quanto opera preparata da un funzionario o dipendente del governo USA nell'ambito delle proprie funzioni ufficiali
- Il sistema di canyon con faglie vicino all'equatore. Pubblicato da NASA/JPL/USGS e di dominio pubblico poiché contiene solo materiali provenienti originariamente dall'USGS

- Canale di deflusso Kasei Valles. Pubblicato da Areong secondo i termini GNUFDL
- Jim Secosky ha modificato l'immagine NASA. Immagine per cortesia di NASA/USGS e di dominio pubblico poiché contiene solo materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Vista dal sito Pathfinder su Marte. Da http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02405 e di dominio pubblico poiché creata esclusivamente dalla NASA

Box 2.5. Il cambiamento delle ombre durante il giorno

- Foto: Chris King

Box 3.1. Utilizzo di metodi di datazione relativa per ricostruire la storia geologica delle rocce

- Formazione rocciosa nel Machtesh Ramon, Israele. Pubblicata secondo i termini GNUFDL

Box 3.2. Un esempio di periodo geologico - il Triassico

- Il 'chiodo d'oro' nella Sezione e Punto del Stratotipo del Confine Globale (GSSP) dello stadio Ladinico (Triassico Medio superiore), sezione di Bagolino, Alpi italiane. Pubblicato da Xavier Caré sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 3.3. Il margine di errore fornito con le date radiometriche assolute

- Vista di Edimburgo sotto le rocce vulcaniche di Arthur's Seat in Scozia. Pubblicata da Andrew Bell sotto licenze CCA-SA 3.0 2.5, 2.0 e 1.0 Licenza generica

Box 3.4. Da processi molto, molto veloci a processi molto, molto lenti

- Carote di sedimenti marini profondi dal mare profondo vicino alla Groenlandia. Pubblicato da Hannes Grobe sotto Licenza internazionale CCA 3.0
- Strato grigio di un deposito di tsunami di 8.000 anni fa, depositato in minuti, con strati di torba scura sopra e sotto, dal deposito dello tsunami di Storegga nel bacino di Montrose, Maryton, Scozia. Pubblicato da Stozy10 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 3.5. Eventi di impatto catastrofico

- Forme comuni di tektite. Pubblicato da Brocken Inaglory secondo i termini GNUFDL
- Quarzo shock al microscopio in luce polarizzata incrociata. Pubblicato da Glen A. Izett e di dominio pubblico poiché contiene solo materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Cratere meteoritico di Lonar in India. Pubblicato da Nagwani sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Il cratere Manicouagan largo 100 km nella regione Côte-Nord del Québec, Canada. Pubblicato su http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/crew-30/html/iss030e031663.html e di dominio pubblico poiché creato da ISAL del NASA Johnson Space Center
- Meteor Crater vicino a Flagstaff in Arizona, USA, che mostra la tipica depressione con centro rialzato, circondata dal bordo del cratere. Pubblicato da Neil su www.nabber.org sotto Licenza internazionale CCA 3.0
- Fasi dell'impatto. Ridisegnato da: http://www.impact-structures.com/understanding-the-impact-crateringprocess-a-simple-approach/

Box 4.1. Un minerale insolito - il diamante

- La 'big hole' (grande buca) del camino diamantifero, Kimberley, Sudafrica. Pubblicata da Lubor Ferenc sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Diamante in kimberlite. Questa immagine è di dominio pubblico poiché contiene solo materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Diamanti tagliati. Pubblicato da Mario Sarto secondo i termini GNUFDL, Versione 1.2

Box 4.2. Una roccia sedimentaria insolita - la selce

- Selci nel gesso del Cretaceo a St Margaret-at-Cliffe vicino a Dover, Kent, Inghilterra. Pubblicata da Clem Rutter, Rochester, Kent, UK sotto GNUFDL
- Punta di freccia in selce. Pubblicata da Adrian Michael sotto GNUFDL
- Selce nel calcare. Pubblicata da Acar54 e Benzer Fotoğraflar sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Box 4.3. Una roccia ignea insolita - il vetro vulcanico

- Colata lavica di vetro vulcanico, Lago Paulina, Monumento Vulcanico Nazionale Newberry, Oregon, USA. Il detentore del copyright di questo file permette a chiunque di utilizzarlo per qualsiasi scopo - Gary Halvorson, Archivi di Stato dell'Oregon, USA
- Campione di ossidiana, Lake country, Oregon. Pubblicato da PAR~commonswiki che ha rilasciato l'opera di dominio pubblico
- Coltello in ossidiana. Pubblicato da Birmingham Museums Trust, Tom Brindle sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Box 4.4. Charles Darwin e i vermi

- Foto dei vermi; compostaggio: Peter Kennett, Earthlearningidea

Box 4.5. Il Pozzo Superprofondo di Kola. Pubblicato da Andre Belozeroff sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 4.6. Formazione sottomarina di lave a cuscino

- Una lingua di lava sottomarina. Pubblicata da USNOAA/National Science Foundation e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- Cuscini sul fondale marino vicino alle Hawaii. Pubblicato da OAR/National Undersea Research Program (NURP) e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- Antica lava a cuscini, sezione trasversale. Peter Kennett, ESEU

Box 4.7. Di cosa è fatto il mantello?

- Xenoliti di peridotite in roccia vulcanica, xenoliti basaltici olivinici di lherzolite. Pubblicato da Khruner sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Roccia obdotta, probabilmente proveniente dal mantello, serpentinite cromitica dal Complesso Kraubath (Complesso Speik) nelle Alpi Orientali austriache. Pubblicata da James St John sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Meteorite rocciosa del meteorite NWA 869. Pubblicata da H. Raab (User: Vesta) secondo i termini GNUFDL

Box 4.8. Di cosa è fatto il nucleo?

- Un meteorite individuale di 1,7 kg dalla pioggia di meteoriti Sikhote Alin. Pubblicato da H. Raab (User: Vesta) secondo i termini GNUFDL, Versione 1.2

Box 4.9. La scoperta dei fumaioli neri alle dorsali oceaniche

- Alvin. Pubblicato da USNOAA e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- Fumaiolo nero a una sorgente idrotermale della dorsale medio-oceanica. Pubblicato da USNOAA e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- Fumaioli bianchi, Arco delle Marianne, Oceano Pacifico. Pubblicato da USNOAA e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Box 4.10. Falde di sovrascorrimento prodotte dalle collisioni tra placche

- Il Sovrascorrimento di Glarus nelle Alpi svizzere, Martinsloch, Tschingelhörner. Pubblicato da Sunna sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- La piega Dent de Morcles. Pubblicata da Lysippos secondo i termini GNUFDL

Box 4.11. Acqua di sorgente venduta commercialmente

- Evian. Pubblicata da Arroser sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Crystal geyser. Pubblicata da Cgroxane e di dominio pubblico
- Sasal. Pubblicata da Vincent de Groot su http://www.videgro.net secondo i termini GNUFDL
- Evergrande. Pubblicata da WKDx417 sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Dispenser d'acqua Cre Cla in Giappone. Pubblicato da Pedia-City e rilasciato di dominio pubblico

Box 4.12. Metodi di pompaggio delle acque sotterranee

- Stazione di pompaggio vittoriana, Londra, Inghilterra. Pubblicata da R Sones per il progetto Geograph e concessa in licenza per il riutilizzo sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0
- Mulini a vento per pompaggio, Namaqualand, Sudafrica. Pubblicato da Caroline Auzias (vedi Delphine Ménard per i dettagli) sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Francia
- Pompa moderna per acque sotterranee. Pubblicata da John Poyser per il progetto Geograph e concessa in licenza per il riutilizzo sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0
- Una moderna pompa manuale, Stazione ferroviaria di Pindial, India. Pubblicata da Nikhilb239 sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Box 4.13. Correnti oceaniche e l'isola più inquinata della Terra. Parole della scienziata Jennifer Lavers da http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4507612/World-s-polluted-island-revealed.html

- Correnti oceaniche superficiali circolanti nel Pacifico settentrionale e meridionale. Di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- La spiaggia inquinata dell'isola Henderson nell'Oceano Pacifico meridionale. Pubblicata da American secondo i termini GNUFDL

Box 4.14. Terra palla di neve o Terra palla di neve e fango?

- Una simulazione computerizzata della copertura glaciale durante la 'Terra palla di neve'. Pubblicata da Linda Sohl e Mark Chandler su http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/sohl_01/ e di dominio pubblico poiché creata esclusivamente dalla NASA

Box 4.15. La Terra durante il massimo termico del Paleocene/Eocene

- Grafico del cambiamento di temperatura dal Paleocene al presente. Pubblicato da Robert A. Rohde per Global Warming Art sotto licenza CC-SA 3.0

Box 4.16. Charles Darwin e l'evoluzione

- Il percorso del viaggio del Beagle. Pubblicato da Sémhur sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International Licenza generica
- I fringuelli di Darwin dalle Isole Galapagos. Disegnati da John Gould e di dominio pubblico poiché il termine del copyright è la vita dell'autore più 100 anni o meno

Box 4.17. La Linea di Wallace

- Mappa del sud-est asiatico pubblicata da http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA

Box 4.18. La 'grande estinzione di massa'

- Glossopteris dal Museo di Scienze Naturali di Houston, Houston, Texas, USA. Pubblicato da Daderot sotto CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication

Box 4.19. L'estinzione di massa K-Pg

- Tyrannosaurus rex, uno degli ultimi gruppi di dinosauri trovati prima dell'estinzione di massa K-Pg, Museum of the Rockies. Pubblicato da FunkMonk sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Raccolta di ceneri al confine K-Pg. Pubblicata da Dcondon sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 4.20. L'ipotesi Gaia di James Lovelock

- StandardDaisyWorldRun2color.gif Ridisegnato da un'immagine di Ginger Booth e rilasciato di dominio pubblico

Box 5.1. Valvole dei pozzi petroliferi

- 'Albero di Natale', North Dakota, USA. Pubblicato da Tim Evanson sotto Licenza internazionale CCA-SA A 2.0 Licenza generica
- Geyser petrolifero – Lakeview gusher negli USA, intorno al 1911. Pubblicato su http://www.sjvgeology.org/history/lakeview/lakeview09.jpg e di dominio pubblico

Box 5.2. Fratturazione idraulica dello scisto

- Ridisegnato da un'immagine di MagentaGreen pubblicata sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Box 5.3. Prospezione sismica

- Profilo sismico e interpretazione. Pubblicato da USGS e di dominio pubblico poiché contiene solo materiali provenienti originariamente da USGS

Box 5.4. Come trovare una miniera di diamanti

- Campionamento di minerali pesanti, concentrato di crivello e concentrato di minerali pesanti. Foto: Chris King
- Miniera di diamanti Premier, Cullinan, Sudafrica. Pubblicata da Paul Parsons (paul.parsons@hyphen.co.za) sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 5.5. Energia geotermica - è rinnovabile?

- Pozzo di centrale geotermica, Brühl, Germania occidentale. Pubblicato da AnRo0002 sotto Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication

Box 6.1. Un'eruzione colossale - Krakatoa nel 1883

- Litografia da "L'Eruzione di Krakatoa e Fenomeni Successivi", 1888. Curato da George James Symonds (1838-1900). Pubblicato dalla Royal Society (UK). Comitato Krakatoa, 71-1250, Biblioteca Houghton, Università di Harvard, USA. Di dominio pubblico poiché il termine del copyright è la vita dell'autore più 100 anni o meno
- Dipinti del cielo nel bagliore dell'eruzione del Krakatoa nel 1888, dipinti da William Ashcroft e inclusi in "L'Eruzione di Krakatoa e Fenomeni Successivi" (1888), curato da George James Symonds. 71-1250, Biblioteca Houghton, Università di Harvard e di dominio pubblico poiché prodotto più di 100 anni fa

Box 6.2. Un'eruzione mega-colossale - L'eruzione Oruanui del vulcano Taupo, circa 25.360 anni fa

- Impressione artistica dell'eruzione Oruanui. Pubblicata da Anynobody, basata su una fotografia NASA, pubblicata sotto CCA-SA

Box 6.3. La teoria del rimbalzo elastico

- Movimento del terreno nella teoria del rimbalzo elastico di H.F. Reid.

Box 6.4. Sismometri

- Attrezzatura di registrazione sismica, Golfo di Corinto, Grecia. Foto: Chris King
- Due sismometri, Laboratorio Sismologico di Patrasso, Grecia. Foto: Chris King
- Registrazione su tamburo da un sismometro. Pubblicata da Z22 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 6.5. Il terremoto di Kobe, Giappone, 1995

- Storia di Yasuyo Morita da http://www.sln.org.uk/geography/7-11kobe.htm
- Danni a un viadotto a Kobe. Rilasciato da 野田知明 sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Box 6.6. Il terremoto del Kashmir, Pakistan, 2005 - magnitudo momento 7.6

- Storia di madre Shazia Ahmed. Da https://www.oxfam.org.nz/what-we-do/emergencies/previousemergencies/kashmir-earthquake-2005/stories-from-balakot

- Shazia con il suo bambino che è sopravvissuto per tre giorni tra le macerie prima di essere soccorso. Oxfam da https://www.oxfam.org.nz/what-we-do/emergencies/previous-emergencies/kashmir-earthquake2005/stories-from-balakot
- La città devastata di Balakot. Pubblicata dall'Aeronautica USA e di dominio pubblico - preparata da un ufficiale o dipendente del governo USA

Box 6.7. Un piano per il terremoto

- Segnale di allarme per il terremoto a Vancouver, Canada. Pubblicato da Wikiemon sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- L'Earthquake Country Alliance in California evidenzia 'Sette Passi per la Sicurezza dal Terremoto. http://www.earthquakecountry.org/sevensteps/

Box 6.8. Tsunami del 2011, Tōhoku, Giappone

- Resoconto di un testimone oculare preso da http://factsanddetails.com/japan/cat26/sub161/item1674.html#chapter-10
- Ospedale pubblico a Minamisanriku dopo lo tsunami di Tōhoku del 2011, Giappone. Pubblicato da Christopher Johnson sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Box 6.9. Lo tsunami dell'Oceano Indiano, 2004

- Intervista trascritta dal video UNISDR pubblicato su Youtube su https://www.youtube.com/watch?v=V0s2i7Cc7wA
- Onda dello tsunami che colpisce la costa di Phuket. Pubblicata da FlyAkwa sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0

Box 6.10. Informazioni di allerta tsunami

- Scheda pubblicata online dal Dipartimento del Commercio USNOAA, Servizio Meteorologico Nazionale, Commissione Oceanografica Intergovernativa e Centro Internazionale Informazioni Tsunami su https://earthweb.ess.washington.edu/tsunami/general/mitigation/mitigation.html

Box 6.11. La colata di fango di Oso, Spagna, 29 marzo 2014

- Racconto di un testimone oculare da https://www.earthmagazine.org/article/oso-landslide-report-yields-someanswers
- La frana di Oso e la sua cicatrice. Pubblicata da Samantha Ciaramitaro e di dominio pubblico

Box 6.12. Drenaggio acido di miniera

- Drenaggio da una vecchia miniera, Rio Tinto, Spagna. Pubblicato da Carol Stoker, NASA e di dominio pubblico poiché creato esclusivamente dalla NASA

Box 6.13. La fine della civiltà minoica

- Vista satellitare del cratere di Santorini (Thera) oggi. Pubblicata dalla NASA e di dominio pubblico

Box 6.14. 'L'anno senza estate', 1816

- Caduta delle temperature in Europa nel 1816. Da http://www.giub.unibe.ch/klimet/docs/luterbacheretal_science.pdf. Pubblicato da Giorgiogp2 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Canale di Chichester, una scena al tramonto dipinta nel Regno Unito da J.M.W. Turner. Di dominio pubblico poiché il termine del copyright è la vita dell'autore più 100 anni o meno

Box 6.15. Guerre dell'acqua

- Il fiume Giordano, che porta acqua a Israele dal nord. Pubblicato da Jean Housen secondo i termini GNUFDL

Box 6.16. Guerre del petrolio

- Campi petroliferi in fiamme dietro un carro armato abbandonato, Kuwait, 1991. Pubblicato da JO1 Gawlowicz della Marina USA e quindi di dominio pubblico

Box 6.17. La migrazione dei primi umani dall'Africa

- La diffusione dei primi gruppi umani nel mondo, con date di diffusione: Primo, Homo erectus; Secondo, Homo neanderthalensis; Terzo, Homo sapiens. Ridisegnato da un'immagine pubblicata da NordNordWest e rilasciata di dominio pubblico

Box 6.18. L'inaridimento del Sahara

- Grotta di Manda Guéli, Montagne Ennedi, Chad nord-orientale. Pubblicata da David Stanley da Nanaimo, Canada sotto Licenza internazionale CCA-SA2.0 Licenza generica
- Formazione rocciosa, Montagne Ennedi, Chad. Pubblicata da David Stanley da Nanaimo, Canada sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Box 6.19. 'Doggerland' nell'area del Mare del Nord

- Mappa di Doggerland. Ridisegnata da un'immagine pubblicata da Max Naylor sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 7.1. La Promessa Geoetica. Presa da http://www.geoethics.org/geopromise

- Giuramento a Yuma, Arizona. Pubblicato da un dipendente militare USA o del Dipartimento della Difesa, scattata o realizzata come parte dei suoi doveri ufficiali. Come opera del governo federale USA, l'immagine è di dominio pubblico
- Bambini afghani. Pubblicata da un soldato o dipendente dell'Esercito USA, come sopra

Box 7.2. Indagini di mappatura geologica

- Confine geologico tra arenaria grigia e granito a grana fine chiaro, contatto di Sea Point, Città del Capo. Foto: Chris King
- Un importante cambio di pendenza al confine geologico tra le dure rocce ignee di un sill a destra e le più deboli rocce sedimentarie a sinistra. Vista lungo il Whin Sill verso Crag Lough, da sopra Milecastle 39 sul Vallo di Adriano, Inghilterra settentrionale. Pubblicata da Nilfanion sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Box 7.3. Un'indagine di prospezione per diamanti

- Foto: Chris King

TABELLE

Tabella 2.1. Pianeti del sistema solare

- Mercurio dal sorvolo di Messenger. Pubblicato dalla NASA e di dominio pubblico
- Venere dalle immagini di Mariner 10. Pubblicato dalla NASA e di dominio pubblico; elaborazione dell'immagine di R. Nunes su http://www.astrosurf.com/nunes
- Terra seguendo il tutorial di BlenderGuru.com. Pubblicata da Jason Harwell sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Marte dal telescopio Hubble. Pubblicato dalla NASA e di dominio pubblico
- Giove dalle immagini di Voyager 1. Come sopra
- Saturno da Voyager 2. Come sopra
- Urano da Voyager 2. Come sopra
- Nettuno da Voyager 2. Come sopra

Tabella 2.2. L'inclinazione della Terra che causa le stagioni

Tabella 3.1. Metodi di datazione relativa

- Gesso inclinato a Cipro. Rilasciato di dominio pubblico dal suo autore, MeanStreets, su English Wikipedia
- Roccia piegata in Groenlandia. Pubblicata da Håvard Berland secondo i termini GNUFDL
- Dicchi in Colorado, USA. Pubblicato da Wing-Chi Poon sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Xenoliti nel granito, Herm, Isole del Canale, Regno Unito. Pubblicato da Kevin Walsh sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Disegno di William Smith. Di dominio pubblico poiché il termine del copyright è la vita dell'autore più 70 anni o meno
- Discordanza a Bochum, Germania, dove la roccia più giovane del Cretaceo sovrasta la roccia inclinata del Carbonifero sottostante. Pubblicata da Hermann A. Wiese secondo i termini GNUFDL

Tabella 3.2. Principi della deposizione di sedimenti, lave e ceneri vulcaniche

- Sedimenti del Miocene depositati orizzontalmente, Drahomyrchany, Ucraina. Pubblicato da Gretarsson sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Sabbie con stratificazione incrociata, Estonia. Pubblicate da Hannu e rilasciate di dominio pubblico
- Grand Canyon, Arizona, USA. Pubblicato da selbst gemacht sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Depositi di fiume intrecciato in Islanda. Pubblicato da Christopher Michel sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Tabella 3.3. Il metodo di William Smith che applica la 'Legge della successione faunistica' Tutti i disegni di William Smith sono di dominio pubblico poiché il termine del copyright è la vita dell'autore più 70 anni o meno

Tabella 3.4. Fossili tipici trovati in rocce di diverse età

- Pettine Argopecten gibbous. Pubblicato da FWC Fish and Wildlife Research Institute sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Ostrica Crassostrea titan. Pubblicata da Kevmin sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Denti fossili di Carcharias tingitana dal Marocco. Pubblicati da Hectonichus sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Echinoderma Micraster leskei. Pubblicato da Didier Descouens sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Ammonite Calliphylloceras. Rilasciato di dominio pubblico da Antonov
- Ceratite ammonoide Ceratites. Pubblicato da BerndH sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Goniatite. Pubblicato da Ghedoghedo sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Phacops. Pubblicato da Dwergenpaartje sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Monograptus. Pubblicato da porshunta secondo i termini GNUFDL
- Tetragraptus. Pubblicato da James St John sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Paradoxides. Pubblicato da Sam Gon III per uso per qualsiasi scopo

Tabella 3.5. Le principali suddivisioni del tempo geologico

Tabella 4.1. Minerali comuni, loro chimica, forma e proprietà fisiche

- Quarzo. Pubblicato da Luis Miguel Bugallo Sánchez sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Feldspato - cristalli di feldspato potassico nel granito, Sierra Nevada orientale, Rock Creek Canyon, California, USA. Rilasciato da Wilson44691, di dominio pubblico
- Mica. Pubblicata da Pascal Terjan sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Calcite - un gruppo di cristalli di calcite giallastra a dente di cane dalla miniera di Nkana dello Zambia. Pubblicato da Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0
- Halite, dalla miniera di sale di Wieliczka in Polonia. Pubblicata da Lech Darski sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Gesso - nella sua forma 'rosa del deserto'. Pubblicato da Rama sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Francia
- Pirite. Pubblicata da Mauro Cateb sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Galena su calcite, dalla miniera Gibraltar, Naica, Municipio de Saucillo, Chihuahua, Messico. Pubblicata da Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0
- Elbaite, cristallo policromo su calcite S. Piero in Campo Isola d'Elba, foto F. Picciani, coll F. Pezzotto (Geologicamente 14)
- Azzurrite, aggregato di microcristalli su quarzo, Monte Cabianca, Carona BG Coll. Privata foto C. Piccinelli (Geologicamente 14)
- Artinite, ciuffo di cristalli aciculari Ciappanico (SO) Foto e collezione D. Preite (Geologicamente 14)

Tabella 4.2. Un'insolita roccia sedimentaria: la selce (o chert)

- Selci nel gesso del Cretaceo a St Margaret-at-Cliffe vicino a Dover, Kent, Inghilterra. Pubblicato da Clem Rutter, Rochester, Kent, Regno Unito sotto GNUFDL
- Punta di freccia in selce. Pubblicato da Adrian Michael sotto GNUFDL
- Selce in pietra calcarea. Pubblicato da Acar54 e Benzer Fotoğraflar con Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Tabella 4.3. Importanti processi di fossilizzazione

- Mammifero fossile che mostra la pelliccia - il fossile di Eomaia scansoria esposto nel Museo della Scienza di Hong Kong, Cina. Pubblicato da Laikayiu sotto GNUFDL
- Un trilobite Calymene - raccolto nella Formazione Henryhouse vicino a Ada, Oklahoma, USA, del Siluriano. Pubblicato da Dwergenpaartje sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Ammonite sostituita da pirite, Bully Calvados, Francia. Pubblicata da Didier Descouens sotto Licenza internazionale CCA 3.0
- Stampo interno ed esterno di gasteropode, Formazione Galena, Ordoviciano, Iowa, USA. Pubblicato da James St John sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Calco di impronta di dinosauro, Fairlight, Sussex, Inghilterra. Pubblicato da Sandpiper sotto CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication
- Tane e luogo di riposo di trilobite - Rusophycus e altre tracce fossili dalla Formazione Gog (Cambriano Medio), Lake Louise, Alberta, Canada. Pubblicato da Wilson44691 e rilasciato di dominio pubblico
- Radice e radicelle di Lepidodendron - Carbonifero Superiore dell'Ohio nord-orientale, USA. Pubblicato da Wilson44691 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Tabella 4.5. Rocce sedimentarie comuni - Immagini di campioni

- Conglomerato. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Arenaria crema. Foto: Massimiliano Ghinassi
- Arenaria rossa. ESEU, come sopra
- Mudstone, ESEU, come sopra
- Scisto. Pubblicato da Amcyrus2012 sotto Licenza internazionale CCA 4.0 International
- Argilla da San Julian, Santa Cruz, Argentina. Pubblicata da Beatrice Murch sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Calcare fossilifero. Foto: Massimiliano Ghinassi Calcare oolitico. ESEU, come sopra
- Gesso. Pubblicato da Superagent001 sotto Licenza internazionale CCA 4.0 International
- Salgemma – Miniera di Salgemma di Realmonte, Sicilia Credits Creative Commons
- Carbone. ESEU, come sopra

Immagini di affioramenti

- Affioramento di conglomerato, monte Adarra, San Sebastian, Spagna. Pubblicato da Joxemai sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Arenaria crema con stratificazione incrociata, Isola di Bressay, Isole Shetland, Regno Unito. Copyright di Anne Burgess e concessa in licenza per il riutilizzo sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0
- Arenaria rossa Navajo, Antelope Canyon, Arizona, USA. Pubblicata da Meckimac secondo i termini GNUFDL
- Mudstone rosso del Permiano con strati di siltite più chiari, Bacino di Lodève, Hérault, la Lieude, Mérifons, Francia. Pubblicato da Pinpin sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

- Scisto. Pubblicato da Lvklock sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Argilla. Pubblicata da Siim Sepp sotto GNUFDL
- Calcare e siltiti, Formazione del Macigno Toscana
- Calcare oolitico del Giura, cava Rothenstein III, regione del Giura, Francia. Pubblicato da J. Stiegler sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Gesso, la scogliera di gesso di Møn, Danimarca. Pubblicato da Chad K sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Salgemma, Miniera di Salgemma di Realmonte, Sicilia Credits Creative Commons
- Strato di carbone inclinato con un vecchio pozzo minerario, Formazione Stellarton, Nova Scotia, Canada. Pubblicato da Michael C. Rygel sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Tabella 4.7. Rocce ignee comuni –
Immagini di campioni

- Granito. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Gabbro. Come sopra
- Dolerite. Collezione del Museo Nazionale, Praga, Repubblica Ceca. Pubblicato da Karelj e rilasciato di dominio pubblico
- Basalto. Come sopra
- Andesite. Pubblicata da Michael C. Rygel sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Cenere vulcanica. Fonte: http://resourcescommittee.house.gov/subcommittees/emr/usgsweb/photogallery/; English Wikipedia, caricamento originale 3 agosto 2004 di Chris 73. Come opera del governo federale USA, l'immagine è di dominio pubblico

Immagini di affioramenti

- Affioramenti di granito, Mount Hope, Victoria, Australia. Pubblicato da Melburnian sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Gabbro dall'Ucraina, in una parete geologica nel Parco Botanico Popolare, Blankenfelde, Pankow, Berlino, Germania. Pubblicato da Sebastian Wallroth sotto Licenza internazionale CCA 3.0
- Dicco di dolerite sul bordo di un fiume, Agwa Rock, Parco Provinciale del Lago Superiore, Canada. Pubblicato da Fungus Guy sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Colonne di basalto, Selciato del Gigante, Irlanda del Nord. Pubblicato da Sebd secondo i termini GNUFDL
- Colate laviche andesitiche, vulcano Stewart Peak, Colorado, USA. Pubblicato da P.W. Lipman; di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Cenere vulcanica depositata come strati di tufo nelle Isole Eolie vicino alla Sicilia, Italia. Pubblicato da stefanfotos da Lipsia, Germania sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Tabella 4.9. Rocce metamorfiche comuni –
Immagini di campioni

- Ardesia. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Scisto. Come sopra
- Gneiss. Come sopra
- Metagabbro Foto di L, Passeri e G. V. Dal Piaz
- Gneiss occhiadino, come sopra
- Dolomia e marmi laminati, come sopra
- Serpentino, come sopra
- Marmo Foto: Peter Kennett
- Metaquarzite (quarzite). Come sopra

Immagini di affioramenti

- Ardesia, in un taglio stradale protetto da ancoraggi rocciosi e rete metallica, Montagne Rothaar, Renania Settentrionale, Germania. Pubblicato da Elop sotto Licenza internazionale CCA-SA3.0
- Scisto micaceo, La Pierre Blanche, isola di Groix, Bretagna, Francia. Pubblicato da Lyokoï88 sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Lo gneiss del Monte Pan di Zucchero, Rio de Janeiro, Brasile. Pubblicato da Raphael de Siqueira Ferreira sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Metagabbro GEOLOGIA DELLA VALLE D'AOSTA PROGETTO ID 4834481PROGRAMMA DI COOPERAZIONE TRANSFRONTALIERA ITALIA-SVIZZERA 2014-2020
- Gneiss occhiadino, come sopra
- Dolomia e marmi laminati, come sopra
- Serpentino, come sopra
- Blocco di marmo, cava di Carrara, Italia. Pubblicato da Lucarelli sotto GNUFDL

- Affioramento di metaquarzite, El Castellar, Saragozza, Spagna. Pubblicato da PePeEfe sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- **Tabella** 4.10. Processi comuni di alterazione
- Masso spezzato, Islanda meridionale. Pubblicato da Till Niermann sotto GNUFDL, Versione 1.2
- Lastre di granito che si staccano a causa del riscaldamento/raffreddamento, Half Dome, Parco Nazionale di Yosemite, USA. Pubblicato da HylgeriaK sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Pavimento calcareo carbonifero con giunti allargati (grike), Doolin Quay, Irlanda. Pubblicato da Bob Jones sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Alterazione chimica lungo un giunto nella formazione rocciosa di Khondalite alla spiaggia di Rushikonda, Visakhapatnam, India. Pubblicato da Adityamadhav83 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Licheni che crescono su roccia nuda, USA. Pubblicato da Sarah Murray da South Bend, Indiana, USA sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Strati di suolo nella Valle del Reno vicino a Rastatt, Germania. Pubblicato da U. Burkhardt sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Tabella 4.11. Importanti processi erosivi

- Coni detritici, Lago Bow vicino a Crowfoot Mountain, Alberta, Canada. Pubblicato da Florian Fuchs sotto Licenza internazionale CCA 3.0
- Erosione del fiume Tista, Sundarganj Thana, Bangladesh. Pubblicato da Ibrahim Husain Meraj sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Una nube di tempesta di sabbia che soffia su Al Asad, Iraq. Pubblicato da Alicia M. Garcia e di dominio pubblico poiché proveniente originariamente dal Corpo dei Marines USA
- Roccia madre graffiata (striature) dal movimento glaciale, Ghiacciaio Gorner, Zermatt, Svizzera. Pubblicato da Michael C. Rygel sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Tabella 4.12. Forme del terreno formate da strati di roccia resistente

- Altopiano di Table Mountain, Città del Capo, Sudafrica. Pubblicato da Harvey Barrison da Massapequa, NY, USA sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Cuesta vista dal traghetto dell'Isola Victoria, Vancouver, Canada. Foto, Chris King
- Cresta, Mount Rundle, vicino a Banff, Alberta, Canada. Pubblicato da Stevan Marcus Stevanm1 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Scarpata di faglia di Abert Rim, Oregon – una delle più alte negli USA. Pubblicata da Abert Rim ACEC sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Scogliere ripide e un arco, Island Archway, Victoria, Australia. Pubblicato da Diliff sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Una baia tra promontori, Cabo de la Vela, Colombia. Pubblicata da Tanenhaus sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Scogliere costiere franose, Shippards Chine, Isola di Wight, Inghilterra. Pubblicato da Graham Horn sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Tabella 4.13. Caratteristiche del paesaggio formate principalmente da erosione e deposizione

- Valle fluviale a V, Goriot, Pakistan. Pubblicata da Khakan Ibrahim sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Valle glaciale a U di Prapic vicino a Orcières, Hautes-Alpes, Francia. Pubblicata da Fr. Latreille sotto GNUFDL
- I canali meandriformi della pianura alluvionale dello Zambezi in Namibia, visti dall'alto. Pubblicato da NASA Earth Observatory: zambezi_ali_2010128_lrg.jpg. Di dominio pubblico poiché creato esclusivamente dalla NASA
- Delta a ventaglio di Silvaplana che si estende nel Lago Silvaplana, Svizzera. Pubblicato da On-chan sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Il ghiacciaio Isunnguata Sermia sullo sfondo ha depositato la morena in primo piano, Kangerlussuaq, Groenlandia. Pubblicato da Chmee2/Valtameri sotto Licenza internazionale CCA 3.0

Tabella 4.14. Importanti strutture sedimentarie

- Arenarie e siltiti stratificate, Quebrada das Conchas, Salta, Argentina. Pubblicato da http://www.flickr.com/photos/travelwayoflife/6164348161/in/photostream/ sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Mudstone laminato, Hesselberg, Germania; Giurassico Inferiore. Pubblicato da Oswald Engelhardt sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Arenarie a stratificazione incrociata F.ne Cala del Vino, Triassico, Sardegna Foto Alessandro Ghinazzi Padova
- ripples da onda, Campil Member of the Werfen Formation, Veneto, come sopra
- sabbie fluviali a ripples, Fiume Adige, Veneto come sopra
- Gradazione - grit eocenico in un muro di giardino vicino a Besalú in Catalogna, Spagna. Foto: Pete Loader

- Fessure di disseccamento intorno a un'impronta di dinosauro nella siltite,
- Fratture da disseccamento ansa del fiume Arno, Toscana Foto Alessandro Ghinazzi Padova
- **Tabella** 4.15. Importanti caratteristiche ignee
- Lave a cuscino moderne sul fondo oceanico, scattata durante la Spedizione della Dorsale delle Galapagos nell'Oceano Pacifico occidentale, 2002. Pubblicata da USNOAA Photo Library: su Flickr: expl1528 sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Basalti a cuscino ordoviciani rovesciati, Crozon, Bretagna, Francia. Pubblicato da zarmel
- **Traduzioni delle Didascalie e Descrizioni delle Immagini**
- Il neck vulcanico Devil's Tower in Wyoming, USA. Pubblicato da Chris Light, sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Il sill di Kilt Rock, Skye, Scozia. Pubblicato da arjecahn su flickr sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Dicchi doleritici precambriani scuri (1100Ma), che tagliano rocce più chiare di 1800Ma, Isole Koster, Svezia. Pubblicato da Thomas Eliasson del Servizio Geologico Svedese sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Immagine satellitare dell'intrusione granitica del Massiccio Brandberg che ha "cotto" le rocce circostanti in un'aureola metamorfica scura, Namibia. Di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS

Tabella 4.16. Rocce metamorfiche formate da metamorfismo regionale

- Mudstone. ESEU. Foto: Peter Kennett
- Ardesia. Come sopra
- Scisto. Come sopra
- Gneiss. Come sopra
- Granito. Come sopra
- Arenaria. Come sopra
- Metaquarzite (quarzite). Come sopra
- Calcare fossilifero. Come sopra
- Marmo. Pubblicato da Beatrice Murch sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Tabella 4.17. Fratture causate da rottura fragile - giunti e faglie

- Strato di siltite con giunti in scisto ordoviciano, Fort Plain, New York, USA. Pubblicato da Michael C. Rygel sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Fagliazione normale nelle pareti del Canale di Corinto, Grecia. Foto: Chris King
- Vista dall'alto della Faglia di Piquiang, Monti Tien Shan, Cina. Pubblicato da NASA Earth Observatory, immagini di Robert Simmon e Jesse Allen, di dominio pubblico essendo creato dalla NASA
- Faglia inversa. Dalla AGI World Image Bank, hflo30, Marli Miller, Università dell'Oregon, USA
- Faglia di sovrascorrimento, Baia di Lilstock, Somerset, Inghilterra. Pubblicato da Mikenorton sotto Licenza internazionale CCA-SA International

Tabella 4.18. Tipi di pieghe

- Anticlinale in gneiss precambriano lungo la Route 23 vicino a Butley, New Jersey, USA. Pubblicato da Vsmith e di dominio pubblico poiché proviene originariamente dall'USGS
- Calcare stratificato piegato nella gola di Glasenbachklamm in Austria. Pubblicato da Viva La Ren sotto licenze CCA-SA 3.0 2.5 Licenza generica, 2.0 Licenza generica e 1.0 Licenza generica
- Pieghe strette vicino ad Ágios Pávlos a Creta meridionale. Pubblicato da Dieter Mueller sotto GNUFDL
- Formazione ferrifera bandata precambriana di 2,6 miliardi di anni strettamente piegata vicino a Soudan, Minnesota, USA. Pubblicato da James St John sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Piega isoclinale di circa vicino alla vetta di Cima Bianca, Foto di L, Passeri e G. V. Dal Piaz GEOLOGIADELLA VALLE D'AOSTA PROGETTO ID 4834481PROGRAMMA DI COOPERAZIONE TRANSFRONTALIERA ITALIA-SVIZZERA 2014-2020

Tabella 4.19. Rocce della crosta oceanica

- Carota di sedimenti dall'Atlantico meridionale. Pubblicato da Hannes Grobe/AWI sotto Licenza internazionale CCA
- Gabbro. ESEU, foto: Peter Kennett
- Dolerite. Pubblicato da Karelj e rilasciato di dominio pubblico
- Basalto. Come sopra

Tabella 4.20. Caratteristiche degli strati della Terra

Tabella 4.21. Processi del ciclo delle rocce interno ora spiegati dalla teoria della tettonica a placche

Tabella 4.22. Le principali prove a sostegno della teoria della tettonica a placche

- Forma a puzzle - Il puzzle continentale, piattaforma continentale. © Andrew McLeish in Geological Science, ridisegnato da ESEU e utilizzato con permesso

- Prove geologiche sul 'puzzle' - distribuzione di rocce antiche attraverso Sud America e Africa. © Andrew McLeish in Geological Science, ridisegnato da ESEU e utilizzato con permesso
- Prove fossili sul 'puzzle' - distribuzione di animali e piante terrestri/d'acqua dolce nei continenti del 'Gondwana'. Riprodotto con permesso dell'USGS, ridisegnato da ESEU e utilizzato con permesso
- Prove paleoclimatiche - I puzzle continentali (distribuzione precedente dei ghiacci attraverso i continenti del Gondwana). © Andrew McLeish in Geological Science, ridisegnato da ESEU e utilizzato con permesso
- Rilievo terrestre. Pubblicato da http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- Distribuzione dei vulcani. Pubblicato su http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/PlateTectonics/Maps/map_plate_tectonics_world.html e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Distribuzione dei terremoti. Pubblicato dalla NASA e di dominio pubblico poiché creato esclusivamente dalla NASA
- Profondità dei terremoti - terremoti registrati attraverso la zona di subduzione delle Isole Kurili, Russia. Pubblicato da USGS e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Strisce magnetiche. © Geoscience, ridisegnato da ESEU e utilizzato con permesso di ESEU
- Faglie trasformi nell'Atlantico meridionale. Pubblicato dal National Geophysical Data Center/USGS e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- 'Punti caldi', Hawaii, USA. ESEU, come sopra
- Età del fondale oceanico. Pubblicato da USNOAA e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- Flusso di calore - il modello di flusso di calore dal fondale oceanico e dalla parte superiore del mantello e della crosta. © Chris King e Dee Edwards, ridisegnato da ESEU e utilizzato con permesso
- Composizione del magma - eruzione lavica dello Stromboli, Italia. Pubblicato da Wolfgang Beyer sotto i termini della GNUFDL
- Composizione del magma, Monte St Helens, Washington, USA. Pubblicato da USGS e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Misurazioni del movimento delle placche. Pubblicato dalla NASA e di dominio pubblico essendo creato esclusivamente dalla NASA

Tabella 4.23. Acque continentali sulla Terra

- Dati percentuali da http://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html. Fonte: capitolo di Igor Shiklomanov 'World Fresh Water Resources' in Peter H. Gleick (editore), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources (Oxford University Press, New York)
- La calotta di ghiaccio che copre l'Isola di Saunder nella Baia di Baffin vicino alla Groenlandia. Pubblicato dalla NASA e non protetto da copyright
- Una sorgente di acqua minerale nell'area del Caucaso. Pubblicato da Ivtorov sotto Licenza internazionale CCA-SA International
- 'Terreno modellato' prodotto dal permafrost nella tundra gelata del Western Arctic National Parklands, Alaska, USA. Pubblicato dal Western Arctic National Parklands sotto Licenza internazionale CCA Licenza generica
- Lago Satpara, uno dei laghi più alti del Pakistan. Pubblicato da Waqas Usman sotto Licenza internazionale CCA-SA Licenza generica
- Suolo umido dalla Lüningsburg nella Bassa Sassonia, Germania. Pubblicato da Ukko.de sotto i termini della GNUFDL
- Nuvole al Muelle de El Quisco, Valparaíso, Cile, 1997. Pubblicato da Jorge Barrios e rilasciato di dominio pubblico
- La palude d'acqua dolce di Ratargul, Foresta di Sylhet, Bangladesh. Pubblicato da Md Habibur Rahman Salman sotto licenza
- Fiume Yukon, Canada settentrionale. Pubblicato da Jessie Hey sotto licenza CAA-SA 2.0 Licenza generica
- Foglia di Tradescantia zebrina vista al microscopio, che mostra gli stomi verdi che rilasciano acqua nell'atmosfera durante la traspirazione. Pubblicato da AioftheStorm sotto CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication

Tabella 4.24. Caratteristiche costiere prodotte da onde e maree

- Una spiaggia di tempesta sul retro della spiaggia di Veluga a Batanes nelle Filippine. Pubblicato da anne_jimenez sotto Licenza internazionale CCA Licenza generica
- Pianure di marea fangose vicino a Palau Melaka, Città di Malacca, Malaysia. Pubblicato da Vmenkov sotto i termini della GNUFDL
- Lo Spit, Isola di Bruny, Tasmania, Australia. Pubblicato da J.J. Harrison sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.5 Licenza generica

Tabella 4.25. Problemi probabilmente causati dal riscaldamento terrestre

Tabella 4.26. Il contributo della vita alla formazione delle rocce

- Formazione del carbone - fossili di foglie nel carbone del Carbonifero. Dal Natural History Museum Library, Londra, e di dominio pubblico poiché il termine del copyright è la vita dell'autore più 70 anni o meno
- Formazione della barriera corallina - corallo fossile nel Windley Key Fossil Reef, Parco Geologico Statale, Florida, USA. Pubblicato da Fredlyfish4 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Pietra da costruzione alterata: calcare formato da bivalvi e gasteropodi cenozoici frammentati al Tempio di Zeus, Olimpia, Grecia. Pubblicato da Koelle sotto i termini della GNUFDL
- Un'immagine al microscopio elettronico a scansione di coccoliti. Pubblicato da Hannes Grobe/AWI sotto Licenza internazionale CCA
- Tane di animali simili a granchi in mudstone giurassico, Makhtesh Qatan, Israele meridionale. Pubblicato da Mark A. Wilson e rilasciato di dominio pubblico dal suo autore

Tabella 5.1. Risorse naturali dalla Terra

- Butchart Gardens, Victoria, Columbia Britannica, Canada, situato in una cava di calcare recuperata. Pubblicato da Mitzi.humphrey sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Una salina a Trapani (Sicilia, Italia). Wikimedia Commons, foto di Graziella Taibi.
- Impianto di ossigeno a membrana, utilizzato per estrarre ossigeno dall'aria. Pubblicato da grasys.com sotto i termini della GNUFDL
- Coltivazione di alghe in Indonesia. Pubblicato da Hassan Abdel-Rahman sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Tabella 5.2. Esempi di materiali grezzi sfusi

- Supercava di granito di Glensanda in Scozia, una delle più grandi d'Europa. Pubblicato da Donald MacDonald come parte del progetto Geograph sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Cava di calcare Nagara, Toyohashi, Giappone. Pubblicato da Alpsdake sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Cava di sabbia e ghiaia vicino a Lisbona, Portogallo. Pubblicato da Hansueli Krapf sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Tabella 5.3. Esempi di materiali grezzi sfusi utilizzati nella produzione di materiali da costruzione e nelle industrie ceramica e chimica

- Cementificio, Holcim, Eclépens, Svizzera. Pubblicato da Roland Zumbühl, www.picswiss.ch sotto i termini della GNUFDL
- Un moderno forno rotativo per calce, Wyoming, USA. Pubblicato da P.D. Tillman e Greg Goebel sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Cristalli cubici del minerale halite, miniera di sale di Merkers, Germania. Pubblicato da Wampi sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Acqua pompata nel minerale di potassio solubile viene poi pompata come salamoia in vasche di evaporazione per recuperare la potassa, Utah, USA. Pubblicato da un pilota sconosciuto e di dominio pubblico essendo creato esclusivamente dalla NASA
- Una cava di gesso in rocce triassiche vicino a Nottingham, Inghilterra. Pubblicato da Jim Thornton come parte del progetto Geograph sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Estrazione di argilla per mattoni, Baduria, Bengala occidentale, India. Pubblicato da Biswarup Ganguly sotto i termini della GNUFDL
- Cava di caolino vicino a Kaznějov, Repubblica Ceca. Pubblicato da Petr Kinšt sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Vista aerea dell'enorme cava di sabbia silicea vicino a Frechen nella Germania occidentale. Pubblicato da Frank Herz e rilasciato di dominio pubblico

Tabella 5.4. Esempi di estrazione di minerali metalliferi

- Miniera di ferro Tom Price, Australia occidentale. Pubblicato da Bäras sotto i termini della GNUFDL
- Miniera di rame di Bingham Canyon, Utah, USA. Pubblicato da Spencer Musick e rilasciato di dominio pubblico
- Miniera di Mt Isa, Queensland, Australia. Pubblicato da Tennis expert sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.5 Licenza generica
- Ricerca dell'oro commerciale da parte del popolo Sakalava in Madagascar. Pubblicato da Heinonlein sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International

Tabella 5.5. Esempi di estrazione di minerali industriali

- Miniera di terre rare a Bayan Obo, Cina. Pubblicato dalla NASA e di dominio pubblico
- La miniera di Mir, Mirny, Russia. Pubblicato da Staselnik sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Tabella 5.6. I cinque requisiti per formare un giacimento di petrolio e/o gas

- Anticlinale al passo di Pang La in Tibet. Pubblicato da Einar Fredriksen sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

- Mudstone nell'anticlinale di Deakin della formazione Yarralumla del Siluriano, Canberra, Australia. Pubblicato da Graeme Bartlett sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Arenaria contenente naturalmente petrolio, dal giacimento petrolifero di Hutton nel Mare del Nord. Peter Craig in King C. (2017) Scottish 'Bring and Share', dalla Conferenza ESTA di St Andrews, settembre 2016, Teaching Earth Sciences', 41.2. pp 25
- Scisto bituminoso dal deposito eocenico nella fossa di Messel vicino a Francoforte, Germania. Pubblicato da Fafner sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Tabella 5.7. Metodi utilizzati per proteggere l'ambiente durante lo sfruttamento delle risorse naturali

- Piantagione di alberi per schermatura, cava di basalto attiva, Hühnerberg, Baviera, Germania. Pubblicato da Wolkenkratzer sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Argine costruito intorno alla sommità della cava di basalto vicino a Hohenfels-Essingen, Germania. Pubblicato da Beckstet sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Bacini di decantazione della miniera di ferro Cagdianao Mining Corporation nelle Filippine. Pubblicato da Edgardo Caringal sotto i termini della Free Art Licence
- Trattamento delle acque di miniera per rimuovere l'inquinamento da metalli in Australia. Pubblicato da CSIRO sotto Licenza internazionale CCA 3.0
- Sistema di lavaggio ruote per camion in Germania. Pubblicato da FRUTIGER Company AG sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Terrazze di discariche di caolino seminate a erba, Higher Coldvreath, Cornovaglia, Inghilterra - pubblicato da Tony Atkin per il progetto Geograph sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Monitoraggio delle acque sotterranee, Coronado National Memorial, Arizona, USA. Pubblicato da SonoranDesertNPS da Tucson, Arizona, USA sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica

Tabella 5.8. Esempi di bonifica

- L'ex miniera di uranio Jackpile-Paguate nel Laguna Pueblo, a ovest di Albuquerque, USA. Pubblicato da Mary Gant, NIEHS, e di dominio pubblico essendo un'opera preparata da un funzionario o dipendente del Governo USA
- Miniera di carbone a cielo aperto e terreno recuperato presso la miniera di carbone North Antelope Rochelle in Wyoming USA. Pubblicato da Peabody Energy sotto Licenza internazionale CCA 3.0
- Edificio della fornace conservato in una vecchia miniera di zinco, piombo e zolfo, Co. Tipperary, Irlanda. Pubblicato da John Gibson per il progetto Geograph sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- L'Eden Project in Cornovaglia, Inghilterra. Pubblicato da Richard Johns per il progetto Geograph sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Lavoro sul campo degli studenti ad Apes Tor, una vecchia cava di calcare, Staffordshire, Inghilterra. Foto: Chris King

Tabella 5.9. Fonti di energia rinnovabile

- Un canale idroelettrico che va dal bacino del Lago Pukaki, Nuova Zelanda, verso le turbine della centrale elettrica. Pubblicato da Mark Oliver Dittrich e rilasciato di dominio pubblico
- Gli impianti solari PS20 e PS10 in Andalusia, Spagna. Pubblicato da Koza1983 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Centrale di teleriscaldamento a biomassa vicino a Steinfelde, Ternitz, Bassa Austria - fornitura di combustibile legnoso sullo sfondo. Pubblicato da Herzi Pinki sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Un parco eolico offshore, Bạc Liêu, Vietnam. Pubblicato da Tycho sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- La centrale geotermica di Nesjavellir a Thingvellir, Islanda. Pubblicato da Gretar Ívarsson, geologo a Nesjavellir, e rilasciato di dominio pubblico
- Modello della centrale mareomotrice di Kislogubskaya nella Penisola di Kola, Russia. Pubblicato da Galin Vladimir Petrović e rilasciato di dominio pubblico
- Una delle tre macchine Pelamis che attraversa un'onda al Parco delle Onde di Aguçadoura, Portogallo. Pubblicato da P123 e rilasciato di dominio pubblico

Tabella 6.1. Processi vulcanici e loro effetti

- Fontane di lava e colata lavica, Hawaii, USA, 2004. Di dominio pubblico essendo un'opera preparata da un funzionario o dipendente del Governo USA
- Grandi alberi abbattuti dall'esplosione del Monte St Helens, Stato di Washington, USA, 1980. Pubblicato da USGS Cascades Volcano Observatory e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Eruzione di ceneri del Monte St Helens, 1980. Pubblicato dalla Federal Emergency Management Agency Photo Library e rilasciato di dominio pubblico
- Flussi piroclastici che scendono dal Vulcano Mayon, Filippine, 1984. Pubblicato da C.G. Newhall e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS

- Lahar che seppellisce case vicino al vulcano Galanggung, Indonesia, 1983. Pubblicato da Robin Holcomb, USGS, e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS

Tabella 6.2. Eruzioni secondo l'Indice di Esplosività Vulcanica (VEI)

- Lava dal cono vulcanico Pu‘u ‘Ō‘ō Kilauea, Hawaii, USA, 1997. Pubblicato da Brian Snelson sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Eruzione dello Stromboli di notte, Italia 1980 - bombe vulcaniche lanciate a più di 100m in aria. Pubblicato da Wolfgang Beyer sotto i termini della GNUFDL
- Eruzione del Monte Sinabung, Medan, Indonesia che ha distrutto le viti, 2014. Pubblicato da Rendy Cipta Muliawan sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Lahar dall'eruzione del Nevado del Ruiz, Colombia, del 1985, con la città sepolta di Armero al centro. Pubblicato da Jeffrey Marso, geologo USGS, e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Pennacchio eruttivo del vulcano Calbuco vicino a Puerto Varas, Cile, 2015. Pubblicato da Aeveraal sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Vista satellitare del pennacchio di cenere lungo 800 km dall'eruzione di Puyehue-Cordón del 2011, Cile. Pubblicato da Jeff Schmaltz e di dominio pubblico essendo creato esclusivamente dalla NASA
- Pennacchio di cenere del Pinatubo durante l'eruzione del 1991 nelle Filippine. Pubblicato da D. Harlow e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS
- L'area stimata coperta dalla caduta di cenere dall'eruzione del Tambora del 1815, Indonesia. Mappa di base presa dall'immagine NASA Image: Indonesia_BMNG.png, e mappe delle isopache tracciate da Oppenheimer (2003). Pubblicato da Indon~commonswiki sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- L'enorme cratere vulcanico (caldera) dalle tre eruzioni di Yellowstone, Wyoming, USA. Pubblicato da Ed Austin/Herb Jones e di dominio pubblico come opera di un dipendente del National Park Service del governo federale USA

Tabella 6.3. Metodi utilizzati nel tentativo di prevedere le eruzioni vulcaniche

- Terremoti legati all'eruzione del 2010 dell'Eyjafjallajökull in Islanda. Pubblicato da Veðurstofa Íslands sotto CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication
- Stazione di monitoraggio GPS, vulcano Piton de la Fournaise, Isola della Riunione, Oceano Indiano. Pubblicato da B. navez sotto i termini della GNUFDL
- Alto flusso di calore in rosso del Calbuco in Cile, 2015, contro lo sfondo blu freddo di terra e mare. Pubblicato dalla NASA e di dominio pubblico
- Deformazione del suolo mostrata dal satellite, legata all'eruzione del 2015 del Calbuco, Cile. Pubblicato da ESA/NASA/JPL-Caltech e di dominio pubblico

Tabella 6.4. La scala di magnitudo momento

Tabella 6.5. Alcuni dei terremoti più pericolosi, in base al numero di vittime

- Distribuzione della mappa dei terremoti. Pubblicato dalla NASA e di dominio pubblico essendo creato esclusivamente dalla NASA

Tabella 6.6. Metodi di previsione dei terremoti

- La faglia di Loma Prieta sulla Faglia di San Andreas, California, USA. Di dominio pubblico poiché contiene solo materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Mappa del Giappone. Pubblicato da Alexrk2 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Mappa del rischio sismico del Sud America preparata dall'USGS. Pubblicato da USGS Department of the Interior/USGS e rilasciato di dominio pubblico

Tabella 6.7. Metodi di costruzione per resistere ai danni dei terremoti

- Pareti di taglio costruite per dare maggiore resistenza a un edificio. Pubblicato dal Dipartimento dei Trasporti dell'Oregon USA, sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Bulloni e staffe di fondazione, Napa, California, USA. Pubblicato da Adam Dubrowa della Federal Emergency Management Agency e quindi di dominio pubblico
- Un tavolo vibrante che testa metodi di isolamento alla base - l'edificio regolare a sinistra sta crollando. Università della California, San Diego, USA. Pubblicato da Shustov sotto i termini della GNUFDL
- Rete di armatura per una fondazione di ponte in calcestruzzo. Pubblicato da Wonaw sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Valvola di interruzione automatica installata su una condotta principale del gas, Seattle, USA. Pubblicato da John Shea della Federal Emergency Management Agency e quindi di dominio pubblico

Tabella 6.8. Grandi tsunami e i loro effetti

- Gli effetti dello tsunami di Tōhoku, Giappone. Pubblicato dalla US Navy e quindi di dominio pubblico

- Lo tsunami del 2004 ad Ao Nang, Provincia di Krabi, Thailandia. Pubblicato da Bild: Davidsvågfoto.JPG e può essere utilizzato da chiunque per qualsiasi scopo
- Il risultato dello tsunami causato dall'eruzione del Krakatoa del 1883. Dagli Anales de la Sociedad Espala de Historia Natural, fonte: https://www.flickr.com/photos/internetarchivebookimages/18162559072/; di dominio pubblico poiché ha più di 100 anni
- Una vista artistica del terremoto e dello tsunami di Lisbona del 1755, Portogallo. Di dominio pubblico poiché ha più di 100 anni

Tabella 6.9. Metodi utilizzati per aumentare la sicurezza durante gli tsunami

- L'opuscolo di avvertimento del rischio tsunami preparato per la città costiera di Pichilemu nel Cile centrale. Pubblicato da Gobierno de Chile, ONEMI sotto Licenza internazionale CCA 3.0 Chile
- Un muro antitsunami a Tsu-shi in Giappone. Pubblicato da Rudolf Ammann sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Il sistema di allarme della rete DART II. Questa immagine è di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente da USNOAA
- Cartello di avvertimento tsunami, Okumatsushima, Giappone. Pubblicato da David.Monniaux sotto i termini della GNUFDL

Tabella 6.10. Diversi tipi di frane e colate

- Caduta massi nelle montagne della Columbia Britannica, Canada, 2011. Immagine fornita da Natural Resources Canada, Geoscape Vancouver sotto i termini della GNUFDL
- La Frana Ferguson sulla California State Highway 140, USA, 2008. Pubblicato da Eeekster sotto Licenza internazionale CCA 3.0
- Scivolamenti rotazionali nell'area più ampia franata della vecchia strada, Mam Tor, Derbyshire, Inghilterra. Pubblicato da Mike Peel (www.mikepeel.net) sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Vargas, Venezuela, un mese dopo la colata detritica del dicembre 1999. Pubblicato da Veronidae sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Lobi di reptazione del suolo in Wyoming, USA. Pubblicato da Jack Flanagan sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Terrazzette sotto Morgan's Hill, Wiltshire, Inghilterra. Pubblicato come parte del progetto Geograph da Derek Harper sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Tabella 6.11. Principali frane

- Terremoto di Haiyuan del 1920 che ha innescato le colate di Haiyuan nella Cina centrale. Pubblicato da User: PhiLiP e rilasciato di dominio pubblico
- Distruzione diffusa nell'area di Caraballeda, Venezuela, causata da una colata detritica spessa 6m. Pubblicato da Smith, Lawson, US ACE e di dominio pubblico poiché contiene materiali provenienti originariamente dall'USGS
- Foto scattata a Yungay, Perù, 10 anni dopo la tragedia - l'edificio con l'iscrizione. Pubblicato da DB e rilasciato di dominio pubblico
- La cicatrice sul monte Chokrak, Tagikistan, e la frana che ha distrutto il villaggio di Khait. Pubblicato da R.L. Wesson (USGS) e di dominio pubblico

Tabella 6.12. Metodi di riduzione del rischio di frane e caduta massi

- Mappa globale del rischio frane compilata dalla NASA. Da https://earthobservatory.nasa.gov/images/89937/a-global-view-of-landslide-susceptibility
- Un dispositivo di monitoraggio estensimetro a filo - collegato via filo a un'area instabile, che trasmette dati a distanza via radio. Pubblicato da Jfoster7991 sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Segnale di avvertimento del traffico. Pubblicato da Oimee sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Terrazzamento roccioso sulla Route 23, Pound Gap, Monti Cumberland, Virginia, USA. Pubblicato da Nyttend e rilasciato di dominio pubblico
- Fosso di drenaggio francese riempito di ghiaia per catturare i sedimenti, con tubi perforati per allontanare l'acqua. Pubblicato da Scooter133 e rilasciato di dominio pubblico
- Larici piantati su un ripido pendio detritico nel Broken River Ski Field in Nuova Zelanda per controllare l'erosione. Pubblicato da Alan Liefting e rilasciato di dominio pubblico
- Bulloni di ancoraggio a Black Rock sulla costa del Sussex, Inghilterra. Pubblicato come parte del progetto Geograph da Simon Carey sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Geotessili. Pubblicato da Marilyn475 e di dominio pubblico
- Protezione con rete metallica contro la caduta massi, Marine Drive, Llandudno, Galles. Pubblicato come parte del progetto Geograph da Eric Jones sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

- Scarpata stabilizzata con calcestruzzo proiettato, Auckland, Nuova Zelanda. Pubblicato da Uploader e rilasciato di dominio pubblico
- Taglio stradale stabilizzato da un muro in pietra naturale alla base con un muro di contenimento in calcestruzzo sopra, Rebernice, Slovenia. Pubblicato da Ljuba brank sotto i termini della GNUFDL
- Taglio stabilizzato con gabbioni in Germania. Pubblicato da Geolina163 sotto Licenza internazionale CCA-SA International
- Rete para-massi su un sentiero escursionistico alle Multnomah Falls, Oregon, USA. Pubblicato da Dar-Ape e rilasciato di dominio pubblico
- Galleria di protezione dalle frane, strada Narvik/Beisfjord 751 in Norvegia. Pubblicato da TorbjørnS sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Massi di scogliera artificiale depositati sulla costa nell'East Sussex, Inghilterra, per proteggere il villaggio di Fairlight soprastante. Pubblicato come parte del progetto Geograph da Nigel Chadwick sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica

Tabella 6.13. Erosione del suolo

- Erosione del suolo, provincia di Huesco, Spagna; il campo verde mostra la differenza che possono fare i buoni metodi di coltivazione. Pubblicato da Rockwurm sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Una tempesta di sabbia nella Contea di Hamadan, Iran. Pubblicato da Saman-1984 sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Macchinari agricoli sepolti dalla polvere trasportata dal vento a Dallas, South Dakota, USA, nel 1936. Pubblicato da Sloan, un dipendente del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, e quindi di dominio pubblico

Tabella 6.14. Metodi di riduzione dell'erosione costiera

- Pennello roccioso costruito attraverso la spiaggia 'du Prevent' a Capbreton, Landes, Francia. Pubblicato da Tangopaso e rilasciato di dominio pubblico
- Onda che colpisce un muro di mare, Plogoff, Finistère, Bretagne, Francia. Pubblicato da Henri Camus sotto Licenza internazionale CCA 1.0 Licenza generica
- Scogliera artificiale e muro di mare, Beesands, Devon, Inghilterra. Pubblicato da Nigel Chadwick come parte del progetto Geograph sotto Licenza internazionale CCA-SA 2.0 Licenza generica
- Tetrapodi in un frangiflutti a Górky Wschodnie, Danzica, Polonia, sulla costa del Baltico. Pubblicato da Andrzej Otrębski sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0

Tabella 6.15. Materiali di scarto che necessitano di smaltimento

- Macerie da un edificio demolito a Milovice, Repubblica Ceca. Pubblicato da Tiia Monto sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Rifiuti domestici in fase di compattazione in una discarica in Australia. Pubblicato da Ropable e rilasciato di dominio pubblico
- Il sito di rifiuti tossici Valley of the Drums, Kentucky, USA, negli anni '80. Pubblicato dall'Agenzia per la Protezione Ambientale degli Stati Uniti (EPA) e rilasciato di dominio pubblico
- Smaltimento di rifiuti radioattivi a basso livello in Nevada, USA. Pubblicato da ENERGY.GOV e rilasciato di dominio pubblico

Tabella 7.1. Alcune delle numerose specializzazioni delle geoscienze

- Scienziati del clima che registrano dati glaciali, Parco Nazionale dei Ghiacciai, USA. Pubblicato da AlbertHerring dell'USGS sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Geologo ingegnere che cataloga carote in Australia Occidentale. Pubblicato da Jlawrencegeo sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Scienziato ambientale che esamina un'area mineraria abbandonata negli USA. Pubblicato da My Public Lands Roadtrip: Behind the Scenes with BLM Nevada Abandoned Mines and Lands Program Lead sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Esame di carote di perforazione fresche, Cile. Pubblicato da Geoz e rilasciato di dominio pubblico
- Studio della geochimica dei gas vulcanici, Monte Baker, Washington, USA. Pubblicato da W. Chadwick dell'USGS e di dominio pubblico

Tabella 7.2. Metodi utilizzati per osservare e registrare l'ambiente per osservare e registrare caratteristiche geoscientifiche

- Osservazione di diamanti microscopici. Foto: Chris King
- Osservazione di un fossile con una lente d'ingrandimento. Pubblicato da Catherine Christopoulou sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Osservazione del paesaggio nel Peak District, Inghilterra. Foto: Peter Kennett
- Sequenze rocciose piegate nel deserto algerino. Google Earth™
- Misurazione dell'inclinazione di uno strato. Foto: Peter Kennett

- Misurazione degli spessori degli strati. Come sopra
- Striscia di campioni di ematite. Pubblicato da KarlaPanchuk sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- La chiave di descrizione delle rocce dell'Earth Science Education Unit. Con il permesso di ESEU
- Note di campo geologiche. Pubblicato da PePeEfe sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Registrazione di un diagramma sul campo. Foto: James Speed
- Fotografia annotata, Spinta di Champlain, Lone Rock Point, Burlington, Vermont, USA. Pubblicato da Ed Meyer e rilasciato di dominio pubblico
- Log stratigrafico della formazione Kitadani del Cretaceo inferiore vicino alla città di Katsuyama, Giappone. Ridisegnato da un'immagine pubblicata da Yoichi Azuma, Xing Xu, Masateru Shibata, Soichiro Kawabe, Kazunori Miyata & Takuya Imai sotto Licenza internazionale CCA 4.0 International
- Schermo di Stevenson che protegge strumenti meteorologici e pluviometro. Pubblicato da Famartin sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Vengono effettuate misurazioni regolari presso uno Schermo di Stevenson. Pubblicato da J-H. Janßen sotto i termini della GNUFDL
- Campionamento della qualità dell'aria in Francia. Pubblicato da Cjp24 sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Trincea nel suolo nei piedi dei Carpazi, Polonia. Pubblicato da Plogeo sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Test della qualità dell'acqua, Port Macquarie, Nuovo Galles del Sud, Australia. Pubblicato da Brian Tolagson sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Dispositivo per il campionamento della colonna d'acqua nell'oceano. Pubblicato su http://www.scienceimage.csiro.au/pages/about/ sotto Licenza internazionale CCA 3.0

Tabella 7.3. Costruzione di osservazioni geologiche in modelli e mappe

- Diorama del Giurassico, Museo di Storia Naturale Smithsonian, Washington DC, USA. Pubblicato da Carl Malamud sotto Licenza internazionale CCA 2.0 Licenza generica
- Grandi cristalli di feldspato in una roccia ignea a grana più fine - che mostra il raffreddamento in due fasi. Pubblicato da Chmee2 sotto i termini della GNUFDL
- La discordanza scoperta da James Hutton a Siccar Point in Scozia. Pubblicato da Stuart Sutherland sotto Licenza internazionale CCA-SA 4.0 International
- Mappa geologica di Copper Cliff, Distretto Minerario di Sudbury, Ontario, Canada. Pubblicato dal Geological Survey of Canada sotto la Open Government Licence, Canada 2.0
- Mappa del suolo di Timor. Pubblicato da Seeds of Life sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0
- Mappa della contaminazione da nitrati delle acque sotterranee nella penisola di Cap-Vert, Senegal. Pubblicato da J-C. Comte, O. Banton & Y. Travi sotto Licenza internazionale CCA-SA 3.0