Alfonso Bosellini

Dagli **oceani perduti** alle **catene montuose**

secondo biennio e quinto anno



edizione blu

Italo Bovolenta editore

Copyright © 2013 Italo Bovolenta editore S.r.L., Ferrara [6707]
multimedia.bovolentaeditore.it

I diritti di elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale su supporti di qualsiasi tipo (inclusi magnetici e ottici), di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche), i diritti di noleggio, di prestito e di traduzione sono riservati per tutti i paesi.
L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

,

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume. Le richieste per tale tipo di riproduzione vanno inoltrate a

Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi)
Corso di Porta Romana, n.108
20122 Milano
e-mail autorizzazioni@clearedi.org e sito web www.clearedi.org

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale, consultabile al sito www.zanichelli.it/f_catalog.html.
La fotocopia dei soli esemplari esistenti nelle biblioteche di tali opere è consentita, oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche. Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei ed archivi, la facoltà di cui all'art. 71 - ter legge diritto d'autore.
Maggiori informazioni sul nostro sito: www.zanichelli.it/fotocopie/

Realizzazione editoriale:
– Progetto grafico: Chialab
– Disegni e impaginazione: Andrea Pizzirani

Contributi:
– Rilettura critica e stesura degli esercizi: Gino Bianchi, Anna Rosa Baglioni, Anna Ravazzi

Copertina:
– Progetto e realizzazione: Chialab
– Immagine di copertina: Used by special permission - Studio H.C. Berann

Prima edizione: marzo 2013

L'impegno a mantenere invariato il contenuto di questo volume per un quinquennio (art. 5 legge n. 169/2008) è comunicato nel catalogo Zanichelli, disponibile anche online sul sito www.zanichelli.it, ai sensi del DM 41 dell'8 aprile 2009, All. 1/B.

File per diversamente abili
L'editore mette a disposizione degli studenti non vedenti, ipovedenti, disabili motori o con disturbi specifici di apprendimento i file pdf in cui sono memorizzate le pagine di questo libro. Il formato del file permette l'ingrandimento dei caratteri del testo e la lettura mediante software screen reader. Le informazioni su come ottenere i file sono sul sito www.zanichelli.it/diversamenteabili

Suggerimenti e segnalazione degli errori
Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra essi. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli. Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro scrivere al seguente indirizzo:
bovolenta@iol.it

Zanichelli editore S.p.A. opera con sistema qualità
certificato CertiCarGraf n. 477
secondo la norma UNI EN ISO 9001: 2008

Le Scienze della Terra

Alfonso Bosellini

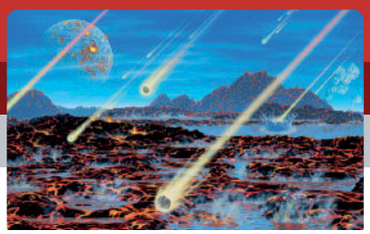
Dagli oceani perduti alle catene montuose

Secondo biennio e quinto anno



Italo Bovolenta editore

Indice



CAPITOLO 1

La Terra: uno sguardo introduttivo

1 LE SCIENZE DELLA TERRA

1.1 Lo studio del nostro pianeta A/1
1.2 Perché la Terra è «unica» A/2
1.3 Le scienze della Terra e il tempo geologico A/3

2 LA FORMAZIONE DELLA TERRA E LA SUA EVOLUZIONE PRIMORDIALE

1.4 La Terra primordiale A/6
1.5 «Catastrofe del ferro» e differenziazione A/8
1.6 Zonazione chimica della Terra A/9
1.7 Atmosfera, idrosfera e crosta primitive A/9
1.8 Il sistema Terra e le sue «sfere» A/10

3 LA TERRA: UNA MACCHINA TERMICA

1.9 Come funziona la «macchina» Terra A/13
1.10 Collisioni di continenti e nascita delle catene montuose A/16

APPROFONDIMENTI
- Le scienze della Terra
- La trasmissione del calore
- L'ipotesi di Gaia



CAPITOLO 2

Atomi, elementi, minerali e rocce

4 CRISTALLI, MINERALI E LORO PROPRIETÀ

2.1 Elementi e composti naturali A/22
2.2 I minerali A/24
2.3 La struttura cristallina dei minerali A/25
2.4 Fattori che influenzano la struttura dei cristalli A/26
2.5 Formazione dei minerali A/27
2.6 Proprietà fisiche dei minerali A/27
Per saperne di più - I cristalli più grandi del mondo A/28
2.7 Polimorfismo A/30
2.8 Isomorfismo A/30
2.9 Solidi amorfi A/31

5 SISTEMATICA DEI MINERALI

2.10 Criteri di classificazione dei minerali A/32
2.11 Classificazione dei silicati A/32
2.12 Silicati mafici e felsici A/35
Per saperne di più - Minerali e organismi viventi A/35
2.13 Minerali non silicati A/36

6 INTRODUZIONE ALLO STUDIO DELLE ROCCE

2.14 Le rocce della crosta terrestre A/37
2.15 Come riconoscere le rocce A/39
2.16 Il ciclo litogenetico A/40
Viaggio in Italia - I giacimenti minerari in Italia A/42

APPROFONDIMENTI
- I reticoli di Bravais
- Identificare i minerali con i raggi X
- Pietre preziose: naturali e sintetiche
- Il fullerene
- Lo stato solido: variazioni sul tema
- Amianto: un minerale pericoloso
- Minerali e alta tecnologia
- Rocce in sezione sottile
- Dove si possono trovare le rocce

ANIMAZIONI
- Il diamante e la grafite
- Il ciclo litogenetico

VIDEO
- Crescita dei cristalli
- La grotta di Naica
- La formazione dei minerali
- La struttura cristallina dei minerali
- Lo studio delle rocce

REINVENTORE
- La forma dei cristalli
- Le rocce intorno a noi

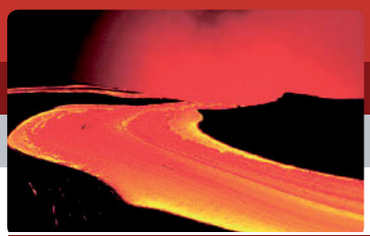
GALLERIA FOTOGRAFICA
- I minerali più comuni

ATTIVITÀ
- Tavola periodica interattiva
- Riconoscere i minerali

SCHEDE DI LABORATORIO
- La cristallizzazione a partire da soluzioni sature
- La cristallizzazione a partire da materiali fusi

SPAZIO CLIL - Audio
- What makes gems so special
- Asbestos: health hazard

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



CAPITOLO 3

Processo magmatico e rocce ignee

7 PROCESSO MAGMATICO, GENESI ED EVOLUZIONE DEI MAGMI

3.1 Il processo magmatico A/48
3.2 Il magma A/49
3.3 Genesi dei magmi A/51
3.4 Cristallizzazione magmatica e differenziazione ... A/54

8 CLASSIFICAZIONE DELLE ROCCE IGNEE

3.5 Le rocce ignee A/56
3.6 Le rocce ignee nel sottosuolo A/58
Per saperne di più - Messaggi dal profondo: gli xenoliti A/58
3.6.1 I plutoni A/59
3.6.2 I corpi ipoabissali A/60
Viaggio in Italia - I «graniti» italiani A/62

APPROFONDIMENTI
- Il diagramma di Streckeisen
- Le serie magmatiche

VIDEO
- Flusso di lava

GALLERIA FOTOGRAFICA
- Le rocce ignee più comuni

SCHEDA DI LABORATORIO
- I minerali del granito



CAPITOLO 4

I vulcani

9 MORFOLOGIA, ATTIVITÀ E CLASSIFICAZIONE DEI VULCANI

4.1 Definizione e relazioni geologiche A/68
4.2 Il meccanismo eruttivo A/69
4.3 Tipi di eruzione A/72

10 I PRODOTTI DELL'ATTIVITÀ VULCANICA

4.4 Attività eruttiva A/75
4.5 Attività vulcanica esplosiva A/75
Per saperne di più - L'esplosione del vulcano La Pelée A/78
4.6 Attività vulcanica effusiva A/78
4.7 Stili e forme dei prodotti e degli apparati vulcanici ... A/80
4.8 Manifestazioni gassose A/82
Per saperne di più - L'energia geotermica in Italia A/82
4.9 Rischio vulcanico: previsione e prevenzione A/84
Viaggio in Italia - I vulcani italiani A/86

APPROFONDIMENTO
- L'eruzione del Vesuvio del 79 d.C.

ANIMAZIONI
- Lo tsunami generato da un collasso vulcanico
- Le caldere (in 2 parti)
- I *geyser*

VIDEO
- Attività vulcanica esplosiva
- Attività vulcanica effusiva
- La forma dei vulcani
- I tipi di eruzione
- Manifestazioni vulcaniche gassose

GALLERIA FOTOGRAFICA
I vulcani più spettacolari della Terra

SPAZIO CLIL - Audio
- Monitoring volcanoes

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



CAPITOLO 5

Processo sedimentario e rocce sedimentarie

11 LA FORMAZIONE DEI SEDIMENTI

5.1 La degradazione meteorica A/92
5.2 Alterazione chimica delle rocce A/93
5.3 Disgregazione fisica delle rocce A/95
5.4 Azione degli organismi sulle rocce A/97

12 PROPRIETÀ DELLE ROCCE SEDIMENTARIE

5.5 Un archivio di pietra A/98
5.6 Dai sedimenti alle rocce sedimentarie A/98
5.7 Le proprietà fondamentali delle rocce sedimentarie A/100

13 LE ROCCE SEDIMENTARIE PIÙ COMUNI

5.8 Rocce terrigene A/102
5.9 Rocce carbonatiche A/104
5.10 Evaporiti A/107
5.11 Rocce silicee e altri gruppi minori di rocce sedimentarie A/108

VIAGGIO IN ITALIA - LE ROCCE SEDIMENTARIE IN ITALIA A/110

APPROFONDIMENTO
- Il petrolio

ANIMAZIONI
- Dai sedimenti alle rocce sedimentarie
- Stadi del ciclo di formazione delle rocce sedimentarie
- La formazione di giacimenti petroliferi
- L'origine di un giacimento di carbone

VIDEO
- La formazione delle rocce sedimentarie

GALLERIA FOTOGRAFICA
- Le rocce sedimentarie più comuni

SPAZIO CLIL - Audio
- Darwin's coral reefs and atolls



CAPITOLO 6

La dinamica dei processi sedimentari

14 PROCESSI E MECCANISMI DI SEDIMENTAZIONE

6.1 Deposizione dei sedimenti A/116
6.2 Meccanismi di trasporto A/117

PER SAPERNE DI PIÙ - FLYSCH E TORBIDITI A/119

15 CICLICITÀ DELLA SEDIMENTAZIONE

6.3 Fluttuazioni eustatiche del livello marino A/120
6.4 Trasgressioni e regressioni A/120

16 FACIES E AMBIENTI DI SEDIMENTAZIONE

6.5 La facies A/122
6.6 Ambienti continentali A/124
6.7 Ambienti di transizione A/126
6.8 Ambienti marini A/128

VIAGGIO IN ITALIA - LA VENA DEL GESSO A/130

APPROFONDIMENTO
- La stratigrafia
- Le unità litostratigrafiche
- I fossili e la stratigrafia

ANIMAZIONE
- La formazione di una discordanza

VIDEO
- I principi della stratigrafia
- Il ciclo geologico

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



CAPITOLO 7

Processo metamorfico e rocce metamorfiche

17 PETROLOGIA DEL METAMORFISMO

7.1 I processi metamorfici A/136
7.2 Facies metamorfiche A/138
7.3 Strutture delle rocce metamorfiche A/139
7.4 Minerali indice A/140

18 TIPI DI METAMORFISMO

7.5 Classificazione geologica del metamorfismo A/142
7.5.1 Metamorfismo regionale A/142
7.5.2 Metamorfismo di contatto A/143
7.5.3 Metamorfismo cataclastico A/144
7.5.4 Metamorfismo idrotermale A/144
7.6 Classificazione delle rocce metamorfiche A/145
Viaggio in Italia - Le rocce metamorfiche in Italia: le Alpi Apuane A/146

APPROFONDIMENTO
• Il marmo di Candoglia e il Duomo di Milano

ANIMAZIONE
• Gli ambienti del metamorfismo

GALLERIA FOTOGRAFICA
• Le rocce metamorfiche più comuni



CAPITOLO 8

La Terra deformata: faglie, pieghe, orogenesi

19 COMPORTAMENTO REOLOGICO DELLE ROCCE

8.1 Le deformazioni delle rocce A/152
8.2 Giacitura delle rocce A/153
8.3 Come si deformano le rocce A/154
8.4 Fattori che influenzano le deformazioni delle rocce A/154
Per saperne di più - Pressione litostatica A/155
8.5 Movimenti regionali della crosta terrestre A/156
8.6 Il principio dell'isostasia A/157

20 STRUTTURE DA DEFORMAZIONE NELLA CROSTA

8.7 Diaclasi e faglie A/160
8.8 Pieghe A/163
8.9 Falde di ricoprimento A/166

21 OROGENESI

8.10 Formazione ed evoluzione delle montagne A/167
8.11 Modelli orogenetici e tipi di catene montuose A/168
8.12 Morfostrutture dei continenti A/171
8.12.1 I cratoni A/172
8.12.2 Gli orogeni A/172
8.12.3 La crescita dei continenti A/173
Viaggio in Italia - Le grandi faglie italiane A/174

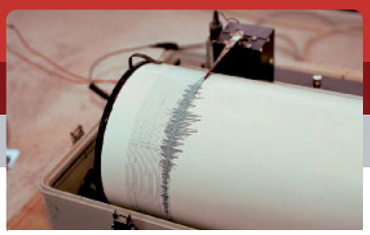
APPROFONDIMENTI
• Giacitura e stabilità dei versanti
• Isostasia e catene montuose

ANIMAZIONI
• L'isostasia
• Faglie normali, inverse e trascorrenti
• Schemi di pieghe

GALLERIE FOTOGRAFICHE
• Esempi di faglie
• Esempi di pieghe

SPAZIO CLIL - Audio
• The uplift of Scandinavia

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



CAPITOLO 9

I terremoti

22 PROPAGAZIONE DELLE ONDE SISMICHE

9.1 Il terremoto A/180
9.2 Comportamento elastico delle rocce A/181
9.3 Ciclicità statistica dei fenomeni sismici A/182
9.4 Onde sismiche A/183
9.5 Misura delle vibrazioni sismiche A/185
9.6 Determinazione dell'epicentro di un terremoto A/186
9.7 Dove avvengono i terremoti A/187

23 LA FORZA DEI TERREMOTI

9.8 Energia dei terremoti A/189
9.9 Intensità dei terremoti A/190

24 CONVIVERE CON IL TERREMOTO

9.10 Previsione e controllo dei terremoti A/192
9.11 Prevenzione dei terremoti A/193

VIAGGIO IN ITALIA - LA SISMICITÀ IN ITALIA A/194

APPROFONDIMENTI
- La Faglia di San Andreas e il *Big One*
- Il maremoto del 2004 in Indonesia
- Il maremoto del 2011 in Giappone
- Giuseppe Mercalli
- Il terremoto del 2009 in Abruzzo
- Proteggersi dai terremoti

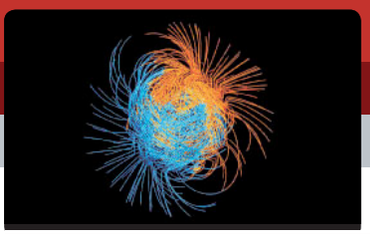
ANIMAZIONI
- Il rimbalzo elastico
- Il meccanismo del rimbalzo elastico
- Le onde P e S e le onde superficiali: schemi di propagazione
- Lo tsunami generato da un terremoto
- Come funziona il sismografo

VIDEO
- Il sismogramma
- Misurare i danni di un terremoto
- Il rischio sismico

REINVENTORE
- Le onde sismiche

SPAZIO CLIL - Audio
- Tsunamis

SCHEDE DI LABORATORIO
- Costruzione di un grafico dei tempi di propagazione delle onde sismiche
- Localizzazione dell'epicentro di un terremoto



CAPITOLO 10

L'interno della Terra

10.1 La struttura stratificata della Terra B/3
10.1.1 Crosta, mantello e nucleo B/4
10.1.2 Litosfera, astenosfera e mesosfera B/5
10.2 Il calore interno della Terra B/7
10.2.1 Origine del calore interno B/7
10.2.2 Gradiente geotermico B/9
10.2.3 Il flusso di calore B/10
10.3 Il nucleo B/11
10.3.1 La zona d'ombra B/12
10.3.2 Composizione del nucleo B/12
10.4 Il mantello B/12
10.4.1 Composizione del mantello B/13
10.4.2 Correnti convettive nel mantello B/14
10.4.3 Tomografia sismica B/15
10.5 La crosta B/16
10.6 Il campo magnetico della Terra B/18
10.7 Il paleomagnetismo B/20
10.7.1 Le inversioni di polarità B/21
10.7.2 Stratigrafia magnetica B/22

SPAZIO CLIL - PALEOMAGNETISM B/23
SPAZIO CLIL - SEISMIC TOMOGRAPHY B/24

Audio

APPROFONDIMENTI
- Interno della Terra e simulatori al laser
- Meteoriti: invasori dallo spazio
- Andrija Mohorovičić
- La dinamo a disco
- Le aurore polari
- L'apparente migrazione dei poli

ANIMAZIONE
- Studiare la Terra con le onde sismiche

SCHEDA DI LABORATORIO
- Densità della crosta terrestre continentale

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



CAPITOLO 11

La tettonica delle placche: una teoria unificante

11.1 Concetti generali e cenni storici B/27
11.2 Che cosa è una placca litosferica B/28
11.3 I margini delle placche B/29
11.4 Quando sono «nate» le placche B/30
11.5 Tettonica delle placche extraterrestre? B/30
11.6 Placche e moti convettivi B/31
11.7 Il mosaico globale B/32
11.8 Placche e terremoti B/34
11.9 Placche e vulcani B/35
11.9.1 Vulcani legati alla subduzione B/35
11.9.2 Vulcani legati alle dorsali oceaniche B/36
11.9.3 Vulcani intraplacca B/37
11.9.4 Vulcani esplosivi e vulcani effusivi B/37
11.10 Tettonica delle placche e risorse naturali B/38

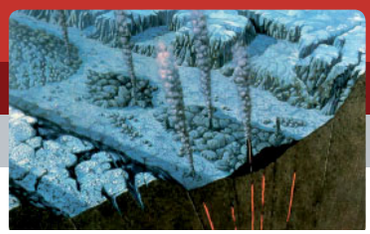
Audio
SPAZIO CLIL - MEASUREMENTS OF PLATE MOTION WITH GEODESY B/39
SPAZIO CLIL - GEOTHERMAL ENERGY B/40

APPROFONDIMENTI
- Catastrofismo e fissismo
- Alfred Wegener e la deriva dei continenti
- Pangea

ANIMAZIONI
- Meccanismi in zone attive che delimitano le placche
- I moti convettivi del mantello e la tettonica delle placche (in 2 parti)
- La distribuzione geografica dei terremoti
- La distribuzione geografica dei vulcani
- La tettonica delle placche e i giacimenti minerari

VIDEO
- La distribuzione dei vulcani

SCHEDE DI LABORATORIO
- I moti convettivi
- Ipocentri sismici e movimenti delle placche: il piano di Benioff



CAPITOLO 12

L'espansione del fondo ocenico

12.1 Le dorsali medio-oceaniche B/43
12.2 Espansione del fondo oceanico B/45
12.3 La struttura della crosta oceanica B/46
12.4 Il meccanismo dell'espansione B/47
12.5 Prove dell'espansione oceanica B/49
12.5.1 Le anomalie magnetiche dei fondi oceanici B/49
12.5.2 Età dei sedimenti oceanici B/50
12.5.3 Il flusso di calore B/51
12.5.4 Rapporto età-profondità della crosta oceanica . B/51
12.5.5 Le faglie trasformi B/52
12.5.6 Punti caldi B/53

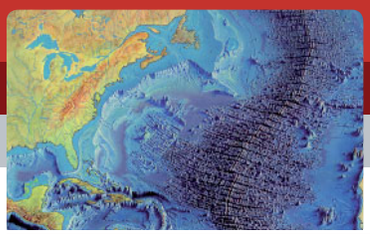
Audio
SPAZIO CLIL - GEOLOGY OF THE DEEP OCEANS B/57
SPAZIO CLIL - PROFILE ACROSS THE ATLANTIC B/58

APPROFONDIMENTI
- La vita nelle dorsali medio-oceaniche
- Le ricerche oceanografiche
- Punti caldi: un'ipotesi alternativa

ANIMAZIONI
- Prove paleomagnetiche dell'espansione dei fondi oceanici
- L'età dei fondi oceanici

SCHEDE DI LABORATORIO
- Il profilo batimetrico: morfologia dell'Atlantico settentrionale
- Espansione dei fondi oceanici ed età dei sedimenti marini

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



CAPITOLO 13

I margini continentali

13.1 Tipi di margine continentale B/61
13.2 Margini continentali passivi B/62
13.3 Margini continentali trasformi B/65
13.4 Margini continentali attivi B/66
13.4.1 La fossa oceanica B/67
13.4.2 La zona di subduzione B/67
13.4.3 L'intervallo arco-fossa B/67
13.4.4 L'arco magmatico B/67
13.4.5 L'area di retroarco B/68
13.4.6 Tipi di archi magmatici B/68
13.5 Tettonica delle placche e orogenesi B/69
13.6 Gli «oceani perduti»: le ofioliti B/71
SPAZIO CLIL - The Alpine-Himalayan Orogeny B/73
SPAZIO CLIL - Continental plate separation B/74

Audio

APPROFONDIMENTI
- Il prisma di accrezione
- La formazione dell'Himalaya



CAPITOLO 14

La storia della Terra

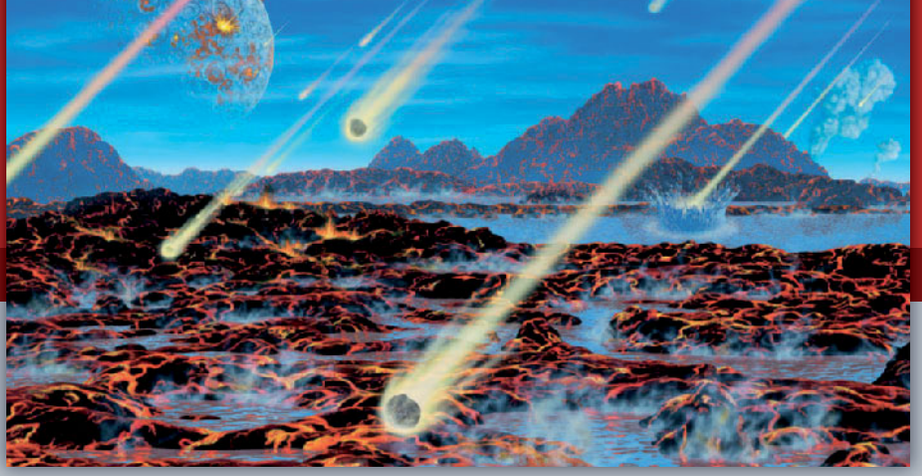
14.1 Dalle origini della vita alla comparsa dell'uomo B/77
14.2 Il Precambriano B/78
14.3 I fossili più antichi B/79
14.4 Il Fanerozoico B/81
14.5 Eventi geologici del Paleozoico B/81
14.6 Eventi biologici del Paleozoico B/82
14.7 Il Paleozoico in Italia B/84
14.8 Eventi geologici del Mesozoico B/84
14.9 Eventi biologici del Mesozoico B/85
14.10 Il Mesozoico in Italia B/89
14.11 Eventi geologici del Cenozoico B/89
14.12 Eventi biologici del Cenozoico B/91
14.13 Il Cenozoico in Italia B/94

APPROFONDIMENTI
- Fossili e processi di fossilizzazione
- Le datazioni assolute
- La Terra «palla di neve» (*Snowball Earth*)
- Estinzioni di massa
- I fossili di Bolca

ANIMAZIONI
- La storia della vita sulla Terra
- Oceanici e continenti: evoluzione della crosta terrestre (in due parti)

SPAZIO CLIL - Audio
- The Pleistocene glaciations
- Mass extinction

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



La Terra: uno sguardo introduttivo

CAPITOLO 1

Iniziamo ora un viaggio affascinante, che ci porterà a conoscere più da vicino il nostro pianeta, la Terra, con le sue caratteristiche, i suoi fenomeni e i cambiamenti che in essa avvengono nel tempo. Affronteremo questo percorso iniziando con un breve cenno sulle discipline che hanno come oggetto di studio la Terra. Successivamente saranno descritte le interpretazioni più generalmente accettate sul modo in cui la Terra si è formata, le interazioni tra i suoi componenti e il suo funzionamento come «macchina termica».

1 LE SCIENZE DELLA TERRA

1.1 Lo studio del nostro pianeta

Lo studio della componente non vivente del pianeta Terra dovrebbe essere lo scopo esclusivo della **geologia** (dal greco *geo* = terra e *lògos* = discorso, studio).

La geologia ha assunto un ruolo e un significato sempre più specialistici: essa studia le rocce della crosta terrestre a noi direttamente accessibili, la loro origine e le loro vicissitudini attraverso le ere geologiche. Questa specificità è dovuta essenzialmente allo sviluppo delle conoscenze che ha portato alla specializzazione delle varie discipline scientifiche in essa presenti, le quali hanno assunto progressivamente una propria autonomia.

► *Attualmente, per identificare il gruppo di discipline che hanno come oggetto di studio il sistema Terra nella sua completezza e complessità, si preferisce l'uso del termine* **scienze della Terra** *o* **geoscienze**.

Così, oltre alla geologia vera e propria, suddivisa in varie specializzazioni (geologia strutturale, stratigrafia, sedimentologia, geologia marina, geodinamica, ecc.), fanno parte delle scienze della Terra molte altre discipline scientifiche. Quelle più strettamente collegate alla geologia sono la paleontologia, la mineralogia, la petrologia, la geochimica, la vulcanologia e la geofisica (sismologia, geodesia), la geomorfologia. Altre, meno direttamente collegate alle scienze della Terra, sono l'oceanografia (fisica e chimica), l'idrologia e le **scienze dell'atmosfera** (meteorologia, climatologia) (figura 1.1).

Nel secolo scorso la geologia ha conosciuto un grande sviluppo come scienza del territorio e delle sue risorse, consentendone lo sfruttamento.

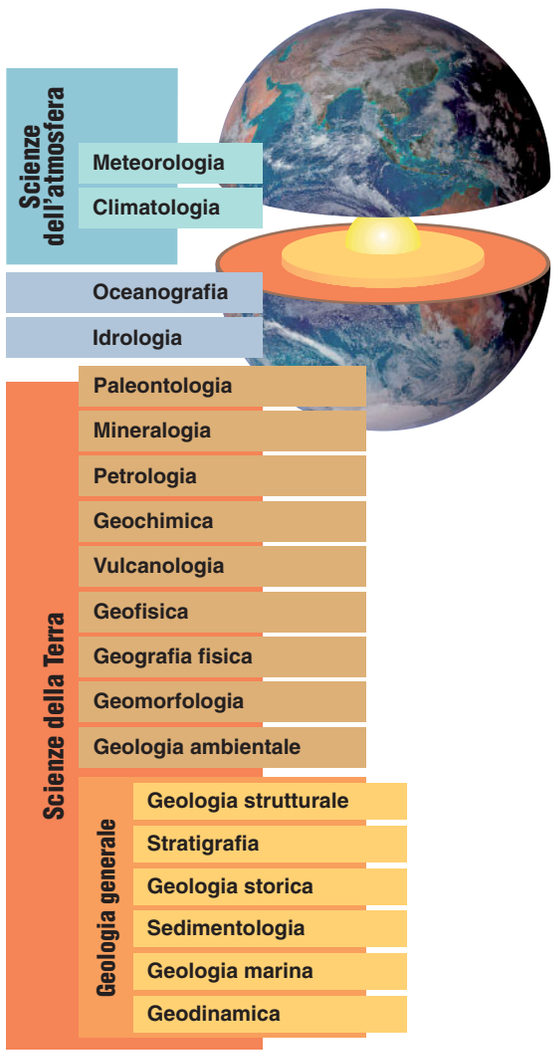


FIGURA 1.1 Le scienze della Terra comprendono molte discipline, le quali, assieme a molte altre scienze più o meno direttamente collegate, concorrono a definire le caratteristiche della componente non vivente del nostro pianeta.

APPROFONDIMENTO
Le scienze della Terra

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

Paul Crutzen, Premio Nobel per la chimica nel 1995 per gli studi sugli effetti dei CFC (clorofluorocarburi) nell'atmosfera, ha suggerito di definire il periodo geologico attuale, a partire dall'avvio della Rivoluzione industriale (1830), **Antropocene**, a dimostrazione del ruolo centrale che la specie umana ricopre nell'enorme modificazione dei sistemi naturali.

Sull'Himalaya la situazione dell'inquinamento dovuto a particolato atmosferico (aerosol) è «normale» per buona parte dell'anno, ma la situazione peggiora nella stagione pre-monsonica per l'arrivo della cosiddetta Asian brown cloud, una nuvola composta da sabbie desertiche, ma anche dai residui della combustione dei materiali che le popolazioni più povere usano per cucinare e scaldarsi: legname, carbone, sterco essiccato di bovino. La valle del Khumbu convoglia masse d'aria che trasportano particelle carboniose fini e ultrafini, dovute alle emissioni dei piccoli villaggi e agli inquinanti provenienti dal basso Nepal, dall'India e dal Pakistan, fino ai ghiacciai dell'Everest. Gli aerosol possono assorbire e riflettere la radiazione solare e, quindi, la deposizione di particolato sui ghiacciai himalayani può contribuire a ridurne lo spessore.

Negli ultimi decenni il problema del rischio ambientale è diventato predominante su quello dell'esplorazione e delle risorse; è cresciuta la consapevolezza della complessità dei cambiamenti globali e dell'impatto antropico.

In vari documenti e progetti internazionali si è auspicato il passaggio dalle scienze della Terra alla scienza integrata del sistema Terra: si è sentita cioè la necessità di ottenere una comprensione scientifica dell'intero sistema Terra su scala globale, descrivendo come funzionano i suoi componenti, come si sono evoluti, come interagiscono e come ci si può aspettare che continuino a evolvere a varie scale temporali.

Le scienze della natura nel loro complesso contribuiscono a maturare la capacità di prevedere i mutamenti che si verificheranno nei prossimi decenni, per cause sia naturali sia antropiche. Attualmente sta crescendo la consapevolezza che l'ecosistema terrestre rischia pericolose alterazioni per cause antropiche.

I cambiamenti prodotti dalle attività umane sono paragonabili, per estensione e impatto, ad alcune delle grandi forze della natura.

La natura dei cambiamenti oggi in atto, la loro dimensione e la velocità dei mutamenti sono senza precedenti. Ciò rende necessaria la conoscenza delle interazioni tra la complessa dinamica del sistema Terra e l'altrettanto complessa connessione tra uomo e ambiente. Oggi le indagini scientifiche e le strategie di salvaguardia dell'ecosistema complessivo hanno lo scopo di rendere sostenibile lo sviluppo socioeconomico sul nostro pianeta.

Il metodo d'indagine dei programmi di ricerca è quello di osservare e comprendere processi e meccanismi naturali attraverso lo studio delle loro evoluzioni nel passato, la verifica attenta del presente e la proiezione nel futuro sulla base di una serie di situazioni iniziali legate all'attività umana.

1.2 Perché la Terra è «unica»

Prima di iniziare lo studio della Terra vale la pena aprire la nostra prospettiva e chiederci quali sono le caratteristiche che rendono la Terra un corpo celeste così peculiare e quale posizione occupa nell'ambito dell'universo.

La Terra si formò circa 4,6 miliardi di anni fa e da allora, assieme agli altri oggetti celesti che formano il sistema solare, ha continuato a ruotare attorno al Sole. Il Sole, a sua volta, trascina la Terra e gli altri componenti del sistema attorno al centro della nostra Galassia, mentre la grande spirale galattica che contiene il sistema solare si muove silenziosamente nell'universo.

Sebbene i pianeti terrestri (Mercurio, Venere, Terra e Marte) abbiano molti caratteri in comune, essi tuttavia differiscono notevolmente per quanto riguarda la composizione delle loro atmosfere, la morfologia e la costituzione della loro superficie e per la presenza o assenza di acqua e di forme di vita.

Vista dallo spazio, la Terra presenta tonalità bianche e azzurre (figura 1.2) *perché è circondata da un'atmosfera gassosa, costituita principalmente da azoto, ossigeno, argon e vapore acqueo.* Nessun altro pianeta del sistema solare ha una simile atmosfera. Soprattutto la presenza di acqua (nubi, neve, ghiacciai, oceani, laghi, fiumi, acque sotterranee) rende la Terra un pianeta diverso da tutti gli altri. I pianeti più lontani dal Sole sono troppo freddi per avere acqua liquida in superficie, quelli più vicini hanno temperature così elevate che l'acqua, se mai c'è stata, è evaporata miliardi di anni fa. Sulla Terra l'acqua ha permesso lo sviluppo della vita a noi conosciuta e la formazione di una biosfera costituita da innumerevoli specie, sia animali sia vegetali.

Infine, un'altra speciale caratteristica della Terra è la natura della sua superficie.



FIGURA 1.2 La prima immagine della «Terra piena» vista dallo spazio, ripresa dagli astronauti dell'Apollo 17, il 7 dicembre 1972.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

▶ *La Terra è in larga parte coperta da un sottile e irregolare strato di materiali incoerenti, sciolti (ciottoli, sabbie, fanghi), formatisi a causa della degradazione atmosferica; si tratta del prodotto dell'alterazione chimica e della disgregazione meccanica delle rocce provocate dalla loro esposizione all'atmosfera, all'idrosfera e all'azione degli organismi. Questo rivestimento è chiamato* **regolite** *(dal greco* rhegos = *lenzuolo e* lithos = *roccia).*

I suoli, i fanghi delle valli fluviali, delle pianure e dei mari, la sabbia dei deserti e tutti gli altri materiali incoerenti che si trovano sulla superficie terrestre fanno parte del regolite. *Anche gli altri pianeti e i vari corpi planetari aventi superfici rocciose hanno un regolite, ma di tutt'altra origine: in essi si è formato fondamentalmente a causa di innumerevoli impatti meteoritici. Il regolite terrestre, invece, si è formato da complesse interazioni di processi fisici, chimici e biologici, normalmente con l'intervento dell'acqua.*

In conclusione, che cos'è che fa della Terra un corpo celeste così unico? Noi *non conosciamo nessun altro pianeta dove la temperatura permetta all'acqua di esistere sulla sua superficie allo stato solido, liquido e gassoso.* Non conosciamo nessun altro corpo celeste che abbia avuto condizioni tali da permettere il nascere e l'evolversi della vita come noi la intendiamo. Ci sono miliardi e miliardi di stelle nell'universo, perciò ci sono, inevitabilmente, miliardi di pianeti e certamente molti di questi pianeti potrebbero essere simili alla Terra e quindi in grado di ospitare la vita. Tuttavia, se una civiltà relativamente progredita esiste da qualche parte nello spazio, a tutt'oggi non abbiamo sentito o avvertito alcun segnale della sua presenza.

1.3 Le scienze della Terra e il tempo geologico

Molti fenomeni naturali diventano comprensibili solo se si tiene conto del fattore tempo. Quando osserviamo un fiume scorrere sul fondo di una valle, possiamo comprendere che cosa ha originato quello stupendo spettacolo naturale solo se teniamo conto del fattore tempo (figura 1.3). Il fiume non ha occupato una valle già presente, bella pronta, ma l'ha scavata con un lento processo che si è protratto per centinaia di migliaia o per milioni di anni.



FIGURA 1.3 La valle incassata del fiume San Juan, nello Utah (USA), si è formata negli ultimi 5÷6 milioni di anni.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



FIGURA 1.4 Le rocce granitiche del massiccio del Monte Bianco, vecchie di oltre 300 milioni di anni, sono state innalzate fino a queste quote per un lento sollevamento, di pochi millimetri all'anno, protrattosi per alcune decine di milioni d'anni. (Willi Burkhardt, 1998)

Le misure temporali che siamo in grado di compiere direttamente abbracciano archi di tempo che vanno dalle frazioni di secondo a poche decine di anni. Alcuni fenomeni studiati dalle scienze della Terra, come i moti delle masse d'aria e di acqua e le variazioni climatiche stagionali, si sviluppano in intervalli di tempo di questo stesso ordine di grandezza. Per molti altri eventi, invece, l'ordine di grandezza temporale coinvolto è molte volte superiore al tempo della vita dell'uomo. Uno spessore di poche decine di centimetri di fango che si deposita su un fondale marino può richiedere decine di migliaia di anni per formarsi. Una catena montuosa si innalza in milioni di anni (figura 1.4). Le trasformazioni della composizione dell'aria che respiriamo sono avvenute in centinaia di milioni di anni.

È proprio la vastità del tempo geologico che ci induce a ragionare in termini di centinaia di milioni o miliardi di anni, un concetto che ci è quasi impossibile concepire. Ma è proprio questa vastità che ci permette di capire in modo corretto come si verificano gli eventi geologici. *L'erosione di una valle fluviale, il sorgere delle catene montuose, o la nascita dei bacini oceanici, non sono il risultato di eventi catastrofici, ma di movimenti lentissimi e impercettibili.* Basti pensare che lo spostamento di 1 mm all'anno implica uno spostamento di 1 km in un milione di anni.

Certamente esistono anche eventi geologici improvvisi e catastrofici, di brevissima durata geologica. Citiamo ad esempio terremoti, eruzioni vulcaniche, tsunami, l'impatto di una grande meteorite (figura 1.5), ma questi fenomeni, pur nella loro drammaticità, non cambiano l'assetto della superficie terrestre. È soltanto il loro lungo protrarsi (per milioni di anni) che può eventualmente incidere sulla struttura e sulla morfologia terrestre.

Il tempo è misurato da eventi e, come noi dividiamo il tempo in secoli, anni, stagioni,

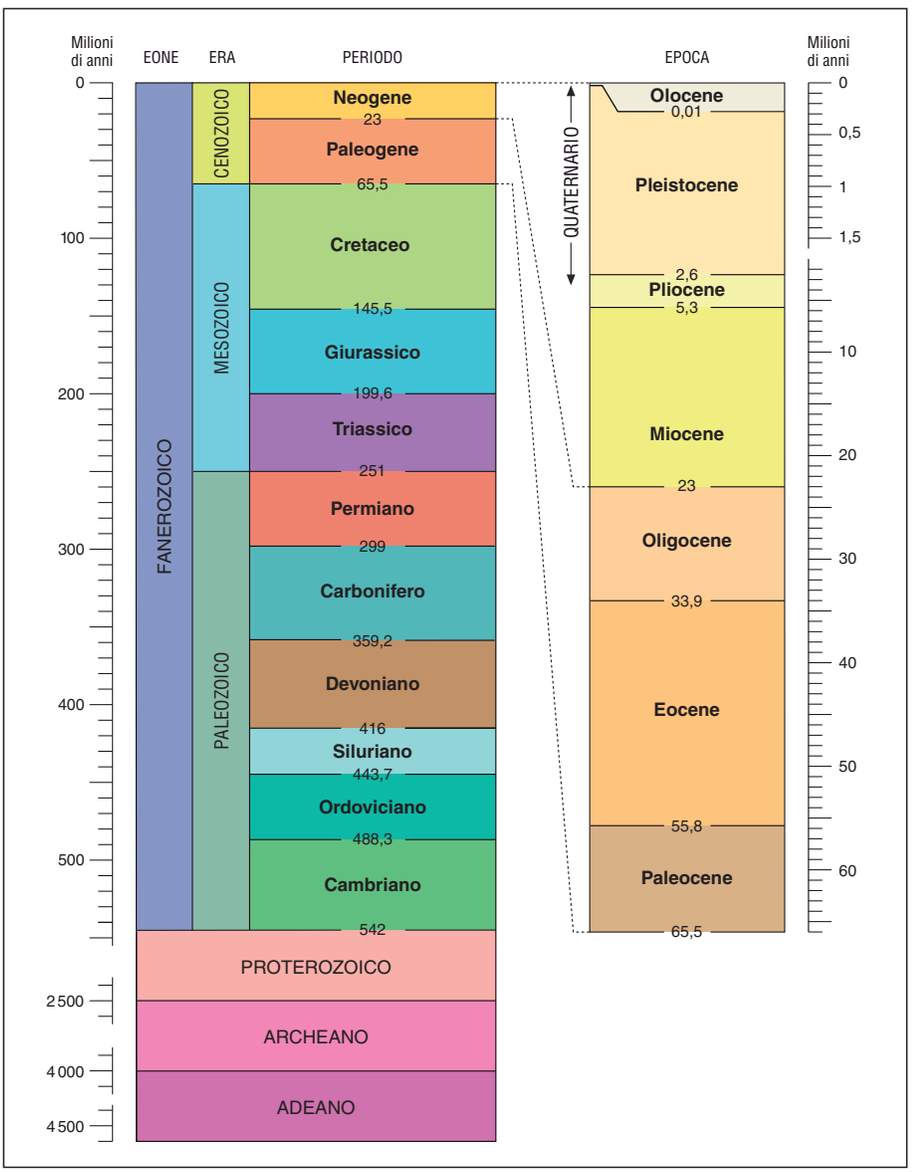


FIGURA 1.5 Meteor Crater, Arizona (USA). Circa 50 000 anni fa l'impatto esplosivo di una grande meteorite, del peso probabile di 300 000 tonnellate, creò in pochi secondi questo cratere del diametro di 1,2 kilometri.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

mesi e giorni, i geologi hanno stabilito di dividere il tempo geologico in eoni, ere, periodi, epoche, età. (tabella 1.1). Si tratta di unità cronologiche di diverso rango che assieme costituiscono la **scala dei tempi geologici** o **geocronologica**; a tale scala, continua per tutta la storia della Terra e a valore universale, è possibile riportare, con vari metodi di correlazione, tutti gli eventi geologici (processi sedimentari, eruzioni, spostamento di continenti, inversioni magnetiche, formazione delle catene montuose, fenomeni climatici, evoluzione degli organismi, ecc.) (figura 1.6).

▶ *La* **geocronologia** *è la disciplina che si occupa della misura del tempo geologico per quanto riguarda sia un intervallo di tempo, sia la datazione di un evento o l'età di una roccia.*



Unità geocronologiche	Durata (milioni di anni)
EONE	2.000
ERA	
PERIODO	
EPOCA	
ETÀ	0,01

TABELLA 1.1 Il tempo geologico viene suddiviso in unità geocronologiche che corrispondono a intervalli di tempo di durata via via maggiore.

FIGURA 1.6 La scala dei tempi geologici, secondo la più recente versione (2010) adottata dalla Commissione Internazionale di Stratigrafia. La lunga storia della Terra, iniziata 4 600 milioni di anni fa, è stata suddivisa in quattro eoni di durata molto diversa. La parte più antica, il Precambriano, corrisponde all'87% dell'intera età del pianeta. Di questo intervallo di tempo abbiamo scarse testimonianze. Il Fanerozoico è suddiviso in ere, nell'ordine Paleozoico, Mesozoico e Cenozoico, di cui abbiamo documentazioni via via sempre più abbondanti, che permettono di conoscere con maggiore dettaglio gli eventi che si sono succeduti. I limiti tra le ere, tra i periodi e tra le epoche sono stati stabiliti tenendo conto di importanti biologici, come comparsa o l'estinzione di molte specie di organismi, climatici o geologici, come la nascita di catene montuose. Il Quaternario, da sempre considerato un'era, seppure di brevissima durata, è stato «declassato» allo status di unità informale nell'ambito del periodo Neogene. I numeri indicano le età in milioni di anni, i colori sono quelli proposti dalla Commissione delle Carte Geologiche Mondiali.

METTITI alla PROVA

1 Quali sono le discipline scientifiche che fanno parte delle scienze della Terra?
2 Che cosa s'intende per scienza integrata del sistema Terra?
3 Dai una definizione di geocronologia.
4 Di che cosa si occupa la disciplina chiamata geologia?
5 A quale scopo lo scienziato Paul Crutzen ha coniato il termine Antropocene?
6 Come dividono il tempo i geologi?
7 Da che cosa dipendono le tonalità bianche e azzurre della Terra vista dallo spazio?
8 Che cosa si indica con il termine regolite?
9 Quali sono le conseguenze della deposizione di particolato sui ghiacciai himalayani?

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

1.4 La Terra primordiale

Circa 4,6 miliardi di anni fa, una massa rotante di polveri e gas, presente nello spazio interstellare della nostra galassia, iniziò a contrarsi e a raffreddarsi. La porzione centrale originò il Protosole, mentre frammenti e anelli di polvere e gas, agglomeratisi tra loro, portarono alla formazione di pianeti, tra i quali la Terra.

Anche se i dati oggi a disposizione non sono ancora sufficienti per tracciare un quadro evolutivo certo e completo sull'origine del sistema solare, gli scienziati tentano comunque di ricostruire la genesi e l'evoluzione primordiale della Terra.

Le rocce più antiche della Terra hanno 3,8÷4,2 miliardi di anni e sono state ritrovate in diverse zone, quali la Groenlandia, il Labrador, lo Zimbabwe e il Minnesota. Le datazioni radiometriche su meteoriti e rocce lunari ci propongono un'età del sistema solare di 4 560 milioni di anni.

La datazione più antica fatta finora su meteoriti è di 4 559±4 milioni di anni ed è solo un quarto dell'età dell'universo visibile. Ma che cosa è successo in quei 600÷700 milioni di anni che precedono la formazione delle prime rocce terrestri?

La Terra si formò per agglomerazione disordinata di vari oggetti che colpivano la sua superficie. Oggi gli scienziati sono concordi nel ritenere che la Luna sia «nata» da un impatto gigantesco. Secondo questa ipotesi la Terra sarebbe stata colpita da un corpo un po' più grande di Marte, la cui parte più esterna fu sbalzata nello spazio e cominciò a orbitare attorno alla Terra, diventando la Luna, mentre il nucleo si conficcava nel corpo terrestre (figura 1.7).

Una pioggia ininterrotta di planetesimi continuò a colpire i vari corpi celesti fino a 3 800 milioni di anni fa, distruggendo qualsiasi traccia di crosta primitiva sulla Terra e producendo le ben conosciute superfici butterate della Luna, di Mercurio, di Marte, fino ai satelliti più lontani di Urano.

► *I* **planetesimi** *sono oggetti rocciosi primordiali che incrociavano l'orbita terrestre e da cui si sarebbero formati i pianeti del sistema solare secondo l'ipotesi planetesimale.*

La **datazione radiometrica** (o **radiodatazione**) è uno dei metodi utilizzati per determinare l'età di un reperto antico. Essa si basa sul raffronto tra la quantità di un dato isotopo radioattivo e la quantità dei suoi prodotti di decadimento.

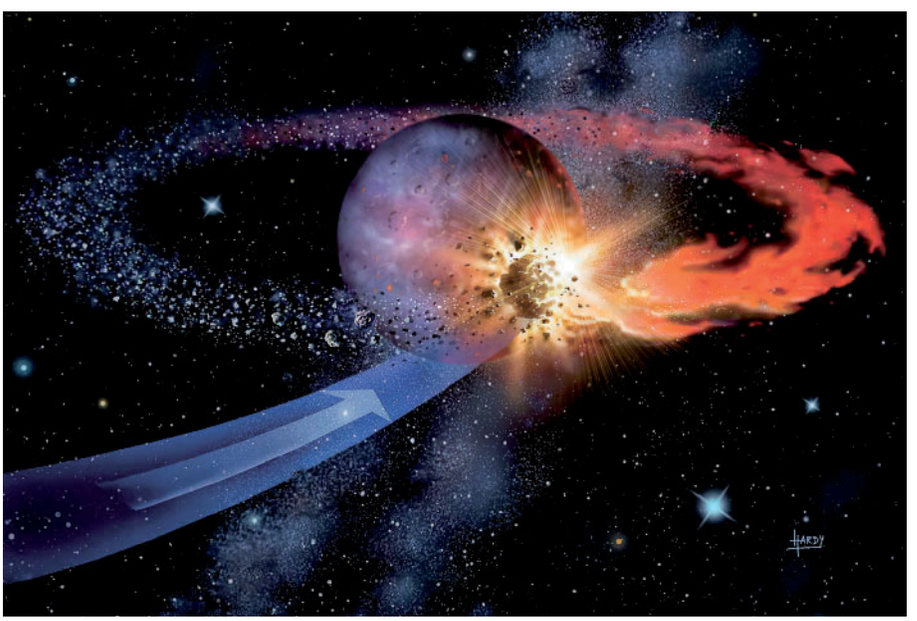


FIGURA 1.7 Circa 4,5 miliardi di anni fa, un corpo delle dimensioni di Marte entrò in collisione con la Terra. Il gigantesco urto scagliò nello spazio uno sciame di frammenti sia della Terra sia del corpo impattante. Dall'aggregazione di gran parte dei frammenti si formò la Luna. Le rocce lunari risalenti a 4,47 miliardi di anni fa, portate sulla Terra dagli astronauti delle missioni Apollo, confermano l'ipotesi dell'impatto.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



FIGURA 1.8 La superficie lunare fotografata durante la missione Apollo 15 rivela l'elevato numero di crateri grandi e piccoli che la caratterizzano.

L'intensità e l'estensione di questo bombardamento di planetesimi sulla Luna, dopo che essa aveva raggiunto le sue attuali dimensioni e che si era formata la sua crosta, sono evidenziate dalla presenza di almeno 80 crateri con diametri maggiori di 300 km e di 10 000 crateri con diametri tra 30 e 300 km (figura 1.8). Tutte queste strutture da impatto si formarono prima che la fase di bombardamento cessasse, cioè prima di 3 800 milioni di anni fa. Un simile bombardamento si verificò anche sulla Terra e questa è la ragione per cui sul nostro pianeta non si conoscono rocce con più di 3 800÷4 200 milioni di anni: ogni eventuale roccia primitiva fu distrutta e fusa dai tremendi impatti.

Stime comunemente accettate indicano in circa 200 i crateri con diametri maggiori di 1 000 km formatisi sulla Terra per impatto di corpi con diametri di qualche centinaio di kilometri. Questo bombardamento si verificò tra 4 400 e 3 800 milioni di anni fa, durante l'accrescimento della Terra.

Diversamente da ciò che si osserva sulla Luna, sulla Terra le tracce di questi impatti sono state distrutte e cancellate da 3 800 milioni di anni di eruzioni vulcaniche e formazione di montagne, oppure nascoste dalle acque oceaniche e dalle estese coperture sedimentarie (sabbie e fanghi) sia terrestri sia marine (figura 1.9).

La Terra, che a causa dei numerosissimi impatti si andava via via ingrossando, cominciò subito a surriscaldarsi a causa di tre differenti fenomeni.

1 A ogni impatto dei planetesimi sulla superficie terrestre, la loro energia cinetica si trasformava in energia termica; questa in parte veniva dissipata nello spazio, ma in parte veniva trattenuta. In alcuni casi poi i planetesimi si accumulavano con tale frequenza che le regioni sottoposte agli impatti, surriscaldate, venivano rapidamente sepolte, sicché il calore poteva essere completamente ritenuto.

2 L'aumento della pressione a cui erano soggette le parti interne del pianeta, a causa dell'enorme peso dei materiali che si andavano via via accumulando nelle parti esterne, provocava un considerevole incremento di calore. E, data la scarsa conduttività delle rocce, la dispersione verso l'esterno di tale calore era quanto mai difficile.

3 La radioattività di elementi quali uranio, torio, ecc., la cui abbondanza era circa quindici volte maggiore rispetto a oggi, faceva sì che le particelle atomiche emesse da tali elementi venissero assorbite dai materiali circostanti e la loro energia cinetica trasformata in calore. La quantità non era molto elevata (usando il calore radioattivo sprigionatosi da 1 cm^3 di granito occorrerebbero 500 milioni di anni per far bollire una tazza di caffè), ma questa sorgente di calore è persistita per miliardi di anni e, come detto sopra, la dispersione di tale calore è lentissima.

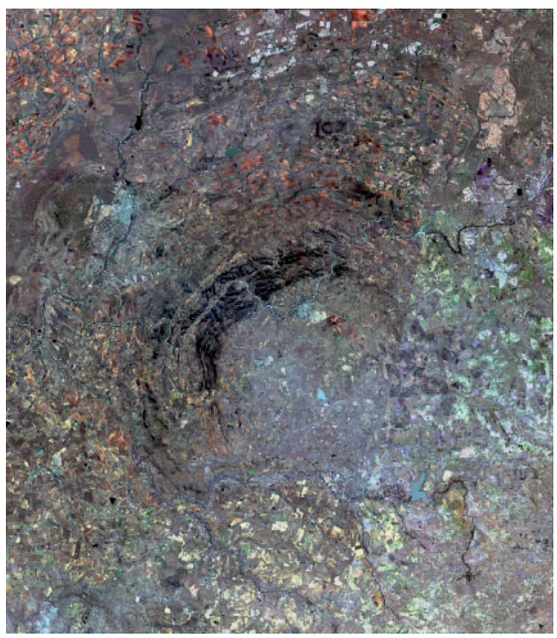


FIGURA 1.9 Poche sono le tracce degli impatti meteoritici verificatisi nelle prime fasi della formazione della Terra e si trovano generalmente nel cuore dei continenti, che rappresentano le zone più stabili e meno deformate della superficie terrestre. Il cratere Vredefort (in una foto satellitare), con un diametro stimato di circa 10 kilometri, è il più grande cratere meteoritico presente sulla Terra e uno dei più antichi. Si trova in Sudafrica e si stima che l'impatto tra il corpo celeste che lo ha prodotto e la superficie terrestre sia avvenuto oltre due miliardi di anni fa.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

In conclusione, **accrescimento per impatti**, **compressione gravitativa** e **disintegrazione di elementi radioattivi** sono i tre processi che avrebbero prodotto l'iniziale surriscaldamento interno della Terra. Si è calcolato che accrescimento e compressione, da soli, possono aver portato la temperatura interna del nuovo pianeta a 1 000 °C.

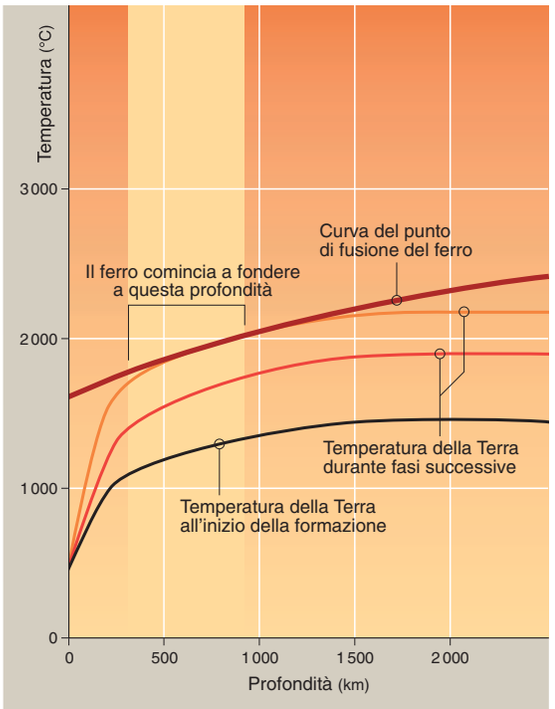


FIGURA 1.10 Variazioni della temperatura interna della Terra successivamente alla formazione. La curva inferiore indica lo stato termico iniziale (a 0 anni) raggiunto per accrescimento e compressione. Le curve centrali riportano l'andamento della temperatura con la profondità in momenti successivi. La curva in alto indica la temperatura di fusione del ferro. La temperatura necessaria a innescare la fusione del ferro fu raggiunta inizialmente a profondità comprese tra 400 e 800 kilometri.

1.5 «Catastrofe del ferro» e differenziazione

Astrofisici e geofisici hanno proposto differenti modelli su come sia variata la temperatura interna della Terra dopo la sua nascita. Ma tutti sono giunti alla stessa importante conclusione (figura 1.10): a causa della disintegrazione radioattiva, la temperatura interna iniziale andò continuamente aumentando. Dopo un periodo stimato tra 300 milioni e un miliardo di anni dalla agglomerazione iniziale della Terra sarebbe stata raggiunta la temperatura di fusione del ferro, a una profondità di 400÷800 kilometri.

▶ *Una volta iniziata la fusione, il ferro, a causa della sua elevata densità, cominciò a sprofondare verso il centro della Terra sotto forma di grandi «gocce», spostando i materiali più leggeri che vi si trovavano. È questa la cosiddetta* «**catastrofe del ferro**».

La formazione di un nucleo liquido fu un evento fondamentale nell'evoluzione terrestre: si liberarono altre enormi quantità di energia gravitazionale che a loro volta si convertirono in calore. Si verificò un ulteriore aumento termico di circa 2 000 °C e si giunse così alla fusione di larga parte del pianeta.

Quando, circa quattro miliardi di anni fa, cominciò a fondere il ferro, la Terra subì quindi una profonda riorganizzazione interna che la trasformò da corpo omogeneo in corpo stratificato. Infatti, trovandosi una gran parte del pianeta allo stato fuso, si innescò una sorta di differenziazione gravitativa: mentre un terzo della primordiale massa della Terra si addensava al centro a costituire un **nucleo** a base di ferro, i materiali più leggeri migravano verso l'esterno, raffreddandosi e formando la **crosta** primitiva. La parte restante, situata tra il nucleo e la crosta e avente caratteri fisico-chimici intermedi, è denominata **mantello** (figura 1.11).

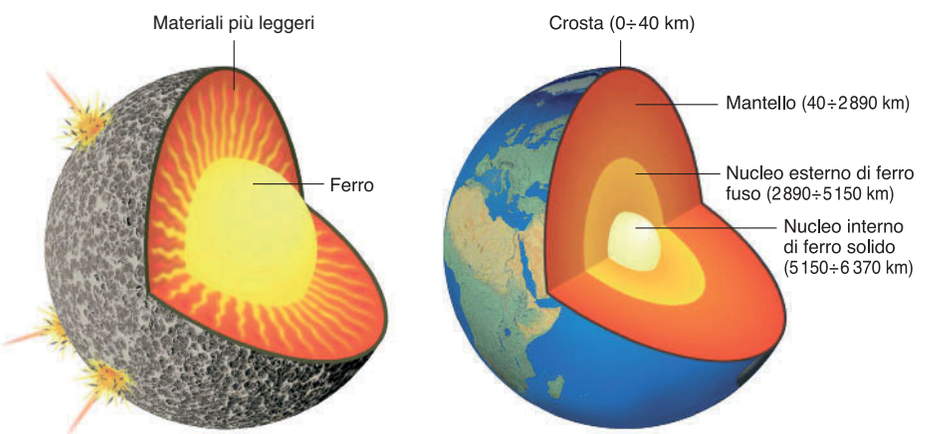


FIGURA 1.11 La differenziazione avvenuta nella Terra primordiale ha prodotto un pianeta costituito da vari livelli, o strati, concentrici: un grosso e denso nucleo a base di ferro, una sottile crosta di rocce relativamente leggere, separati da uno spesso strato intermedio, il cosiddetto mantello.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

1.6 Zonazione chimica della Terra

Circa il 90% della Terra è costituito da quattro elementi: ferro, ossigeno, silicio e magnesio. Ma poiché il ferro si condensò al centro per differenziazione gravitativa, nella crosta questo elemento risulta piuttosto carente. Al contrario, silicio, alluminio, calcio, potassio e sodio si spostarono verso l'esterno, aumentando considerevolmente la loro concentrazione nella crosta (figura 1.12).

Va tuttavia osservato che la differenziazione gravitativa dei vari elementi non fu governata dal loro peso specifico. La maggior parte di essi formò infatti dei composti minerali, e furono le proprietà fisiche e chimiche (punto di fusione, densità, affinità chimica) di questi composti a determinare la loro distribuzione verticale.

I feldspati, i minerali più comuni nelle crosta terrestre, iniziano a fondere a temperature di 700÷1 000 °C e una volta fusi sono relativamente leggeri. Minerali di questo tipo, fondendo prima degli altri, poterono dunque migrare verso la superficie e accumularsi nella crosta. Nel mantello, situato tra crosta e nucleo, vennero invece immagazzinati i silicati di ferro e magnesio (olivina e pirosseni) che fondono a temperature più elevate e sono più pesanti dei feldspati. Finirono probabilmente nel nucleo elementi pesanti quali oro e platino, che hanno poca affinità con ossigeno e silicio. Altri elementi pure pesanti, quali uranio e torio, i quali hanno però forte tendenza a formare ossidi e silicati, che sono leggeri, si accumularono invece in quantità rilevante nella crosta.

Una conseguenza molto importante della zonazione chimica della Terra è che, essendosi concentrati nel guscio esterno i più importanti minerali radioattivi, l'aumento della temperatura interna diminuì considerevolmente poiché il calore radioattivo poteva essere facilmente dissipato nell'atmosfera. Inoltre, quando l'interno della Terra divenne così caldo da fondere, un nuovo e più efficiente meccanismo si incaricò di trasferire il calore verso la superficie: la **convezione** (*vedi* § 1.9).

Il calore fu così dissipato più facilmente e la Terra poté raffreddarsi in tempi relativamente brevi.

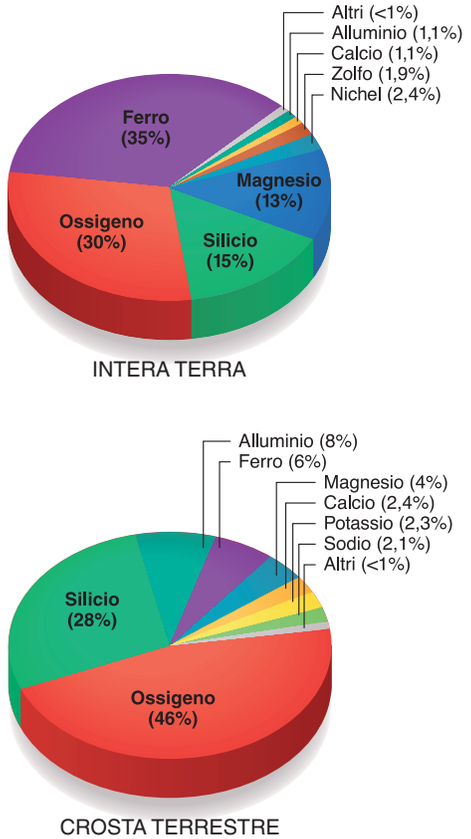


FIGURA 1.12 Abbondanza relativa (in peso percentuale) degli elementi nell'intera Terra a confronto con quella degli elementi della crosta terrestre. La differenziazione ha originato una crosta leggera, impoverita in ferro e arricchita in ossigeno, silicio, alluminio, calcio, potassio e sodio. Circa il 90% della Terra è formato da quattro soli elementi: ferro, ossigeno, silicio e magnesio. Si noti, inoltre, che l'ossigeno, il silicio e l'alluminio rappresentano, da soli, l'80% della crosta.

1.7 Atmosfera, idrosfera e crosta primitive

APPROFONDIMENTO
La trasmissione del calore

Come e quando cominciò a formarsi l'atmosfera è una questione di non facile soluzione. Le grandi collisioni verificatesi verso la fine dell'aggregazione rimossero certamente qualsiasi traccia di un'eventuale atmosfera primordiale. Dai dati geochimici si deduce che gli elementi volatili primitivi si originarono per degassamento delle rocce del mantello, nei primi 500 milioni di anni dopo la fine dell'accrescimento terrestre, cioè tra 4 000 e 3 500 milioni di anni fa (figura 1.13).



FIGURA 1.13 Nei primi stadi della sua esistenza il nostro pianeta si presentava in buona parte allo stato fluido. I magmi, in via di lento raffreddamento, liberarono grandi quantità di sostanze gassose che formarono la primitiva atmosfera terrestre.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

Alcuni ricercatori ritengono che l'atmosfera e l'idrosfera primitive si siano accresciute anche grazie all'apporto di acqua e volatili da parte della pioggia di comete che investì la Terra all'inizio della sua evoluzione.

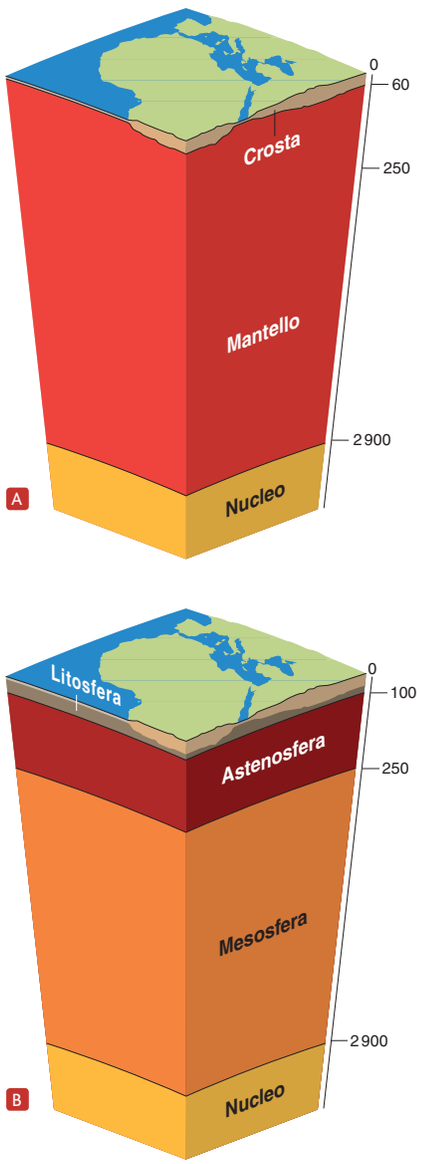


FIGURA 1.14 (A), *struttura interna della Terra secondo il criterio chimico-mineralogico*. Si distinguono la crosta, di spessore variabile (continentale od oceanica), quindi il mantello, che si spinge fino a una profondità di 2 900 km, e infine il nucleo esterno e quello interno. (B), *suddivisione degli involucri della Terra basata sullo stato fisico dei materiali*. Si distinguono una litosfera rigida ed elastica, un'astenosfera in parte fusa, una mesosfera solida e poi il nucleo.

Secondo gli scienziati, infatti, i planetesimi che si aggregarono per formare la Terra contenevano ghiaccio, acqua e sostanze volatili; quando i materiali costituenti il nostro pianeta fusero parzialmente, il vapore acqueo e i composti volatili si separarono dal fuso e migrarono verso l'esterno. Le continue eruzioni vulcaniche liberarono grandi quantità di gas, principalmente idrogeno, vapore acqueo, azoto e diossido di carbonio. L'idrogeno, molto leggero, sfuggì nello spazio, mentre i gas più pesanti avvolsero la Terra, formando l'atmosfera primordiale. Quando la temperatura superficiale scese sotto il punto critico dell'acqua, il vapore acqueo iniziò a condensare e a riempire, gradualmente, le parti depresse della superficie terrestre originando i primi oceani.

Relativamente più semplice appare la formulazione di ipotesi riguardanti l'origine della primitiva crosta terrestre. Vari studi hanno dimostrato che essa si è venuta formando gradualmente nei tempi geologici. Non sono state trovate rocce più vecchie di 3 800 ÷ 4 200 milioni di anni fa; pare che una larga parte si sia formata 3 000 ÷ 2 500 milioni di anni fa, mediante ripetute emissioni di lava, a cui seguivano rifusioni parziali delle rocce appena consolidate. Così, mentre da una parte si aveva la separazione di una crosta esterna più leggera da una interna più pesante, iniziava il processo di degradazione della primordiale superficie terrestre a opera degli agenti atmosferici (vento, pioggia, insolazione, gelo) e si formava il primitivo regolite. E i primi sedimenti, permeati da gas vulcanici, riassorbiti e riciclati all'interno della Terra a opera di processi vulcanici e spinte interne, contribuivano alla formazione dei primi nuclei dei blocchi continentali.

1.8 Il sistema Terra e le sue «sfere»

L'insieme delle diverse parti del nostro pianeta e delle loro reciproche interazioni costituisce il sistema Terra.

Per le particolari condizioni che caratterizzano la Terra, alcuni dei materiali di cui è costituita si trovano allo stato solido, altri allo stato liquido e altri allo stato aeriforme. Questi materiali possono essere suddivisi in base alla loro densità in «sfere».

- *La componente liquida della Terra è detta* **idrosfera** *e comprende le acque dei mari e quelle continentali (fiumi, laghi e ghiacciai).*
- *La componente gassosa è chiamata* **atmosfera** *ed è costituita dall'aria, che avvolge tutto il pianeta.*
- *La componente solida superficiale è detta* **litosfera** *ed è costituita dalle rocce.*

La Terra solida non è tuttavia un corpo omogeneo: è infatti ormai noto da tempo che essa è zonata concentricamente e la litosfera rappresenta solo la sua parte più esterna. Vi sono però due differenti criteri di suddivisione della Terra solida.

Il primo, basato sulla composizione chimica e mineralogica, distingue una sottile crosta di tipo continentale più leggera e una di tipo oceanico più pesante (*vedi* § 1.9), di spessore variabile, quindi un mantello roccioso a base di silicati (*vedi* § 2.9) che si spinge fino ad una profondità di 2 900 km e infine un nucleo metallico a base di ferro (cfr. § 1.5) (figura 1.14 A).

Il secondo, basato sullo stato fisico dei materiali, individua, appunto, una litosfera rigida ed elastica, un'**astenosfera** parzialmente fusa, una **mesosfera** solida e infine un nucleo distinto in esterno e interno (figura 1.14 B).

I materiali che costituiscono le «sfere» interagiscono tra loro attivamente. Gli scambi e le interazioni tra idrosfera, atmosfera e litosfera avvengono in corrispondenza della superficie terrestre, una fascia spessa alcuni kilometri, che comprende tutta l'idrosfera, la parte inferiore dell'atmosfera

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

e una sottile pellicola della litosfera. Questa fascia è una zona assai dinamica, dove le acque e i venti modellano e rinnovano continuamente la superficie terrestre e a loro volta sono influenzati dalle nuove forme che la superficie assume.

Ma vi è un ultimo elemento che caratterizza questa fascia e ne accentua ulteriormente il dinamismo: si tratta degli esseri viventi, i quali sono ospitati proprio nella zona di transizione.

► *Alla componente biologica e all'ambiente con cui essa interagisce viene dato il nome di* **biosfera**.

I sistemi viventi si trovano ovunque, nel terreno, nell'acqua e nell'aria. La biosfera non è perciò un sistema separato dalle altre «sfere», ma le compenetra e si sovrappone a esse per certe parti. Per questo motivo i viventi interagiscono con le componenti non viventi del nostro pianeta e influenzano molti fenomeni che vi si verificano.

Il sistema Terra è, perciò, caratterizzato da complesse relazioni tra le diverse «sfere» che avvengono con scambi di materia e di energia; questi processi sono attivati e sostenuti dal calore interno della Terra e dall'energia solare che arriva alla sua superficie. L'energia interna favorisce i processi endogeni (movimenti nel mantello, nel nucleo, fusione delle rocce, formazione di catene montuose, ecc.), mentre il calore del Sole favorisce i processi esogeni (movimenti di fluidi, passaggi di stato, tempo atmosferico, clima, modellamento superficiale, ecc.).

Tutte le componenti del sistema Terrra possono essere distinte in due gruppi: quelle attivate dall'energia solare e quelle attivate dal calore interno della Terra (tabella 1.2).

Le componenti attivate dall'energia solare sono l'atmosfera, l'idrosfera e la biosfera, mentre sono attivate dal calore interno della Terra la litosfera, l'astenosfera, il mantello, il nucleo esterno e quello interno.

La Terra va considerata come un sistema unico in quanto le varie componenti interagiscono profondamente tra loro: qualsiasi mutamento intervenuto in una sua parte determina effetti e ripercussioni sulle altre.

I termini **litosfera**, **idrosfera** e **atmosfera** derivano dal greco: *lito-* significa pietra, roccia; *idro-* significa acqua, *atmo-* significa soffio, vapore.
Anche il termine **biosfera** deriva dal greco: *bio-* significa vita. La biosfera è, dunque, la sfera della vita.

APPROFONDIMENTO
L'ipotesi di Gaia

TABELLA 1.2 Le componenti del sistema Terra e i loro meccanismi di attivazione. Il nostro pianeta funziona come un insieme di parti legate tra loro da continui flussi di materia e di energia.

COMPONENTI ATTIVATE DALL'ENERGIA SOLARE	
Atmosfera	Involucro gassoso di aria che avvolge la parte solida e liquida della Terra e nella quale avvengono i fenomeni atmosferici
Idrosfera	Insieme delle acque distribuite sulla superficie terrestre sia in forma liquida (oceani, laghi, fiumi, falde sotterranee) sia solida (nevi, ghiacci), sia aeriforme (vapore acqueo)
Biosfera	Insieme delle parti della Terra occupate da organismi viventi: comprende l'atmosfera fino a circa 5 km di altezza, la litosfera fino a circa 2 km di profondità e l'idrosfera
COMPONENTI ATTIVATE DAL CALORE INTERNO DELLA TERRA	
Litosfera	Involucro esterno roccioso della Terra che comprende la crosta e la parte superiore del mantello, fino a una profondità media di circa 100 km; è frammentata in diverse placche tettoniche (o litosferiche)
Astenosfera	Strato debole e duttile del mantello, al di sotto della litosfera, che si deforma per adattarsi ai movimenti orizzontali e verticali delle placche
Mantello profondo	Parte al di sotto dell'astenosfera che si estende da una profondità di circa 400 km fino al limite mantello-nucleo (profondo circa 2 900 km)
Nucleo esterno	Involucro liquido, composto principalmente di ferro fuso, che si estende approssimativamente tra i 2 900 km e i 5 150 km di profondità
Nucleo interno	Sfera interna, costituita prevalentemente di ferro solido, che si estende all'incirca tra i 5 150 km e il centro della Terra (a una profondità di circa 6 370 km)

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

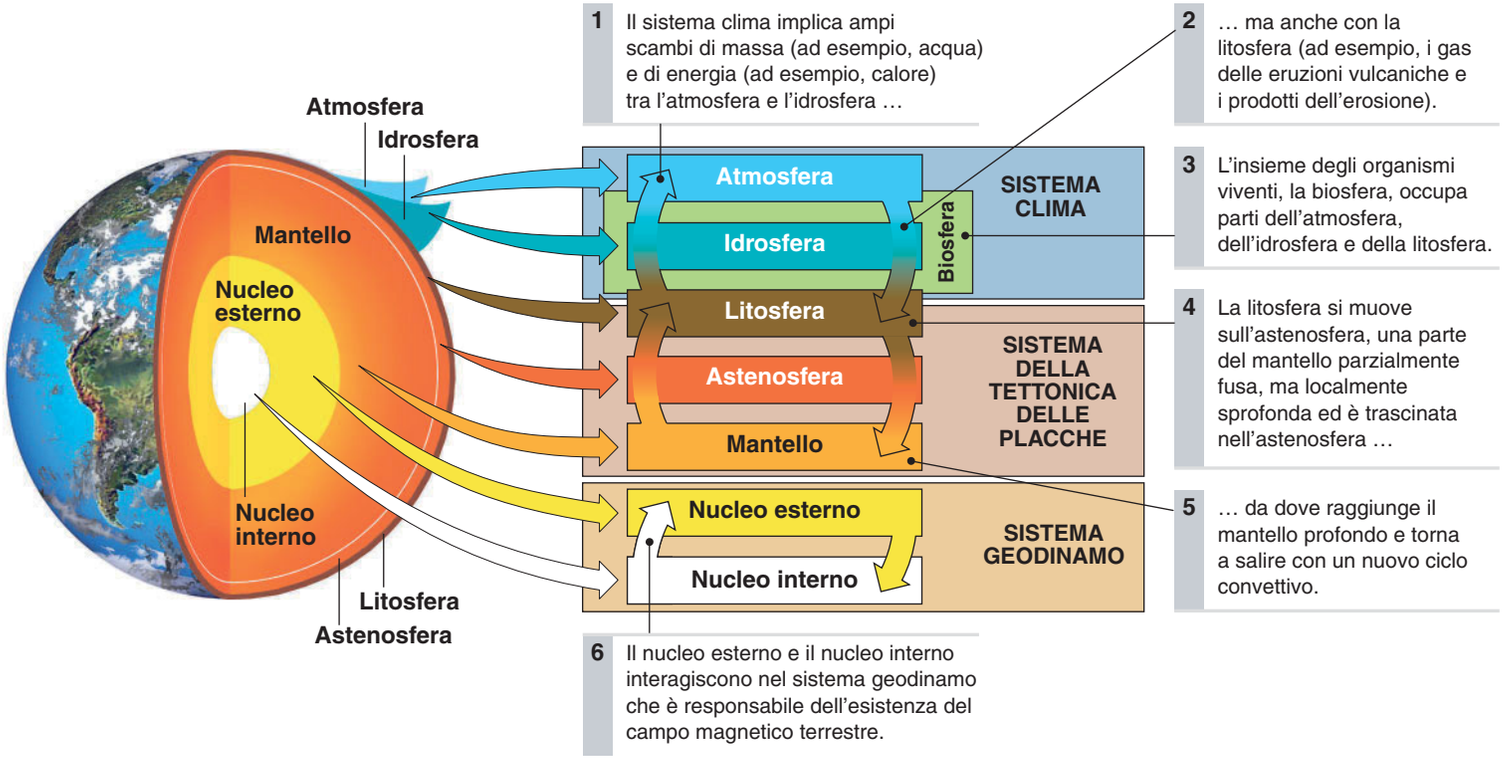


FIGURA 1.15 *I principali geosistemi e le loro componenti*. Le interazioni tra le diverse componenti sono attivate dall'energia solare e da quella proveniente dall'interno del nostro pianeta; queste interazioni sono inquadrabili in tre geosistemi globali: il sistema clima, il sistema della tettonica delle placche e il sistema geodinamo.



Per meglio comprenderne i rapporti, basti pensare che gli spessori del nucleo, del mantello e della crosta della Terra hanno circa le stesse proporzioni del nocciolo, della polpa e della buccia di un avocado.

Risulta, tuttavia, particolarmente difficoltoso analizzarne tutti gli aspetti contemporaneamente; conviene, quindi, suddividere il sistema Terra in sottosistemi (geosistemi) per poi esaminare come essi funzionano e interagiscono tra loro. Le interazioni tra le diverse componenti sono inquadrabili in tre geosistemi che operano su scala globale: il *sistema della tettonica delle placche*, il *sistema geodinamo* e il *sistema clima*. Nella figura 1.15 è rappresentato uno schema che raffigura i tre geosistemi.

Nel prossimo paragrafo sarà introdotto il sistema tettonica delle placche che, attivato dal calore interno della Terra, si compie attraverso flussi di materia e di energia (moti convettivi) tra mantello profondo, astenosfera e litosfera. Il ciclo delle rocce, le deformazioni alle quali sono sottoposti i materiali litosferici, i terremoti, le eruzioni vulcaniche, la formazione degli oceani e delle catene montuose, sono tutte conseguenze delle interazioni tra le varie componenti della Terra solida.

Il sistema geodinamo, responsabile dell'esistenza del campo magnetico terrestre, ha origine profonda, ma è in grado di interagire con le componenti più esterne del sistema Terra, come la biosfera e l'atmosfera.

Il sistema clima coinvolge tutte le componenti del sistema Terra; le loro interazioni concorrono a determinare il clima su scala globale e le sue variazioni nel tempo. Il clima non esprime soltanto il comportamento dell'atmosfera, ma è influenzato anche dai molteplici processi che coinvolgono l'idrosfera, la litosfera e la biosfera.

METTITI alla PROVA

10 Quali sono i tre differenti fenomeni che hanno causato il subitaneo surriscaldamento della Terra?
11 Qual è l'intervallo temporale tra la formazione della Terra e la formazione delle sue rocce più antiche?
12 Spiega per quale motivo sulla superficie della Terra le tracce degli impatti meteoritici sono molto rare.
13 Spiega quando il meccanismo della convezione è divenuto un efficiente meccanismo di trasferimento di calore della Terra.
14 Descrivi che cosa si intende per differenziazione gravitativa.
15 Che cosa si intende esattamente per «catastrofe del ferro»?
16 Qual è il risultato della zonazione chimica della Terra?
17 Illustra, a grandi linee, le caratteristiche chimiche della Terra.
18 Perché la formazione di un nucleo liquido fu fondamentale nell'evoluzione terrestre?
19 Descrivi l'ipotesi che spiega la formazione della primitiva crosta terrestre.
20 Che cosa s'intende con il termine biosfera?
21 Spiega perché la biosfera non può essere un sistema separato dalle altre sfere.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

1.9 Come funziona la «macchina» Terra

Molti fenomeni che si manifestano sulla superficie terrestre trovano la loro origine all'interno del nostro pianeta e sono indicatori di condizioni d'instabilità interna. Nonostante l'impossibilità di esplorare direttamente le profondità della Terra, con metodi geofisici integrati da dati di laboratorio si cerca di costruirne modelli strutturali di dettaglio. Secondo questi modelli la Terra al proprio interno è molto calda e disperde continuamente calore attraverso la sua superficie; essa si comporta quindi come una gigantesca «macchina termica» con distribuzione delle temperature al proprio interno strettamente legata alla sua struttura, composizione, stato dinamico ed evoluzione. L'elevata temperatura e l'instabilità termica producono forze in grado di rimescolare e di spingere verso l'alto i materiali interni e sono, in definitiva, responsabili dell'energica attività geologica della parte superiore del pianeta.

Dalla seconda metà degli anni '60 del secolo scorso esiste una teoria generale in grado di spiegare in modo unificante tutti i grandi fenomeni geologici, tra cui l'origine e la distribuzione dei vulcani, dei terremoti, dei fondi oceanici e delle catene montuose. Secondo questa teoria, conosciuta come **tettonica delle placche**, la parte superficiale della Terra è costituita da un involucro relativamente rigido, la litosfera, un sottile guscio (ricordiamoci che il raggio equatoriale terrestre è di 6 378 km) che, a sua volta, è suddiviso in un certo numero di elementi, le placche, incastrati l'uno nell'altro come i pezzi di un gigantesco puzzle (figura 1.16).

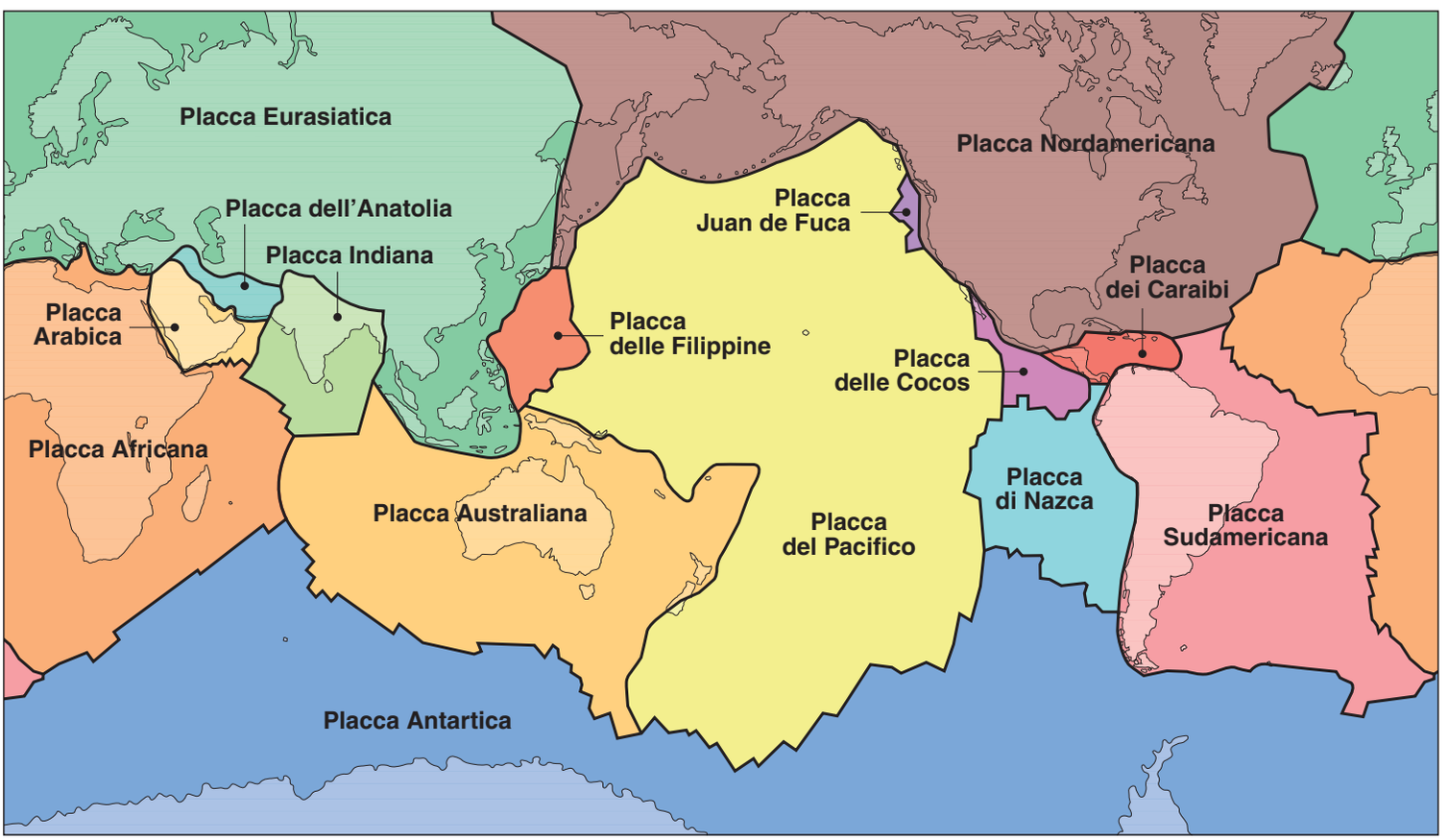


FIGURA 1.16 *Il mosaico globale delle placche litosferiche*. Si noti che alcune, come quelle Africana, Australiana e Sudamericana, comprendono, oltre a porzioni di crosta oceanica, anche grandi blocchi continentali; altre invece, come quella del Pacifico, sono interamente costituite di litosfera oceanica. Le placche si muovono molto lentamente (sull'ordine di alcuni centimetri all'anno).

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

▶ **Tettonica** *è la parte della geologia che studia la deformazione delle rocce, le grandi strutture e i movimenti delle placche litosferiche.*

Le placche si estendono verso il basso per 100÷120 km, fino a una zona non ben definita dove le rocce sono sensibilmente più calde e meno resistenti della sovrastante più fredda e più rigida litosfera (figura 1.17). Le placche sono in continuo movimento l'una rispetto all'altra, ma la velocità dei loro spostamenti è modesta (2÷15 cm all'anno). Tuttavia, considerando l'ampiezza dei tempi geologici, ci si può rendere facilmente conto che gli spostamenti possono essere dell'ordine di migliaia di kilometri.

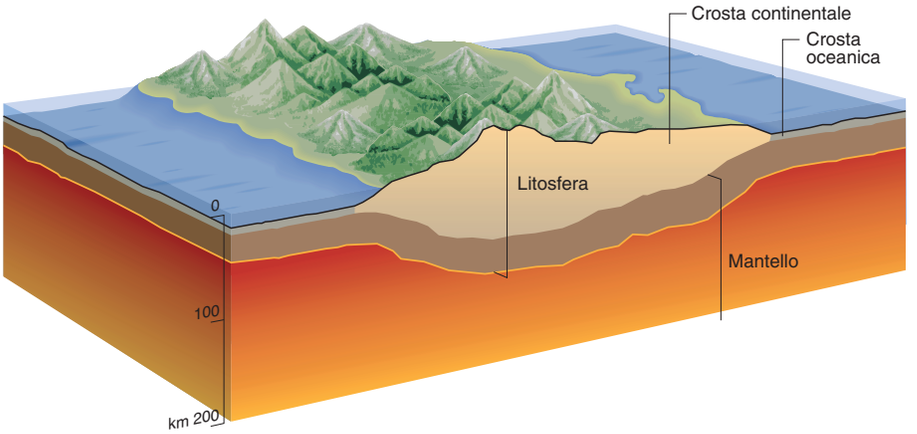


FIGURA 1.17 *Sezione della parte più esterna della Terra*. Il guscio superficiale, rigido e resistente, detto litosfera, è composto dalla crosta, suddivisa in continentale (granitica) e oceanica (basaltica), e dalla porzione più esterna del mantello, che è la parte preponderante dell'interno della Terra. La litosfera, che costituisce le placche, ha uno spessore di 100÷120 km in corrispondenza dei continenti e di 20÷30 km sotto gli oceani.

Il «motore» che fa muovere le placche va ricercato nei moti convettivi che rimescolano l'interno della Terra (figura 1.18). Si tratta di movimenti simili a quelli che si formano in una pentola d'acqua che bolle, ma, naturalmente, sono assai più lenti perché il materiale coinvolto è molto viscoso, quasi allo stato solido. Essi servono a disperdere il grande calore immagazzinato all'interno della Terra fin da quando il nostro pianeta era ancora una massa incandescente.

In definitiva, è come se la Terra, al suo interno, fosse in continua ebollizione. La parte superficiale delle placche è costituita prevalentemente da materiale basaltico, cioè lava scura e relativamente pesante che fuoriesce nel mezzo degli oceani, in corrispondenza di lunghissimi rilievi sottomarini costellati di vulcani, le cosiddette **dorsali oceaniche** (figura 1.19).

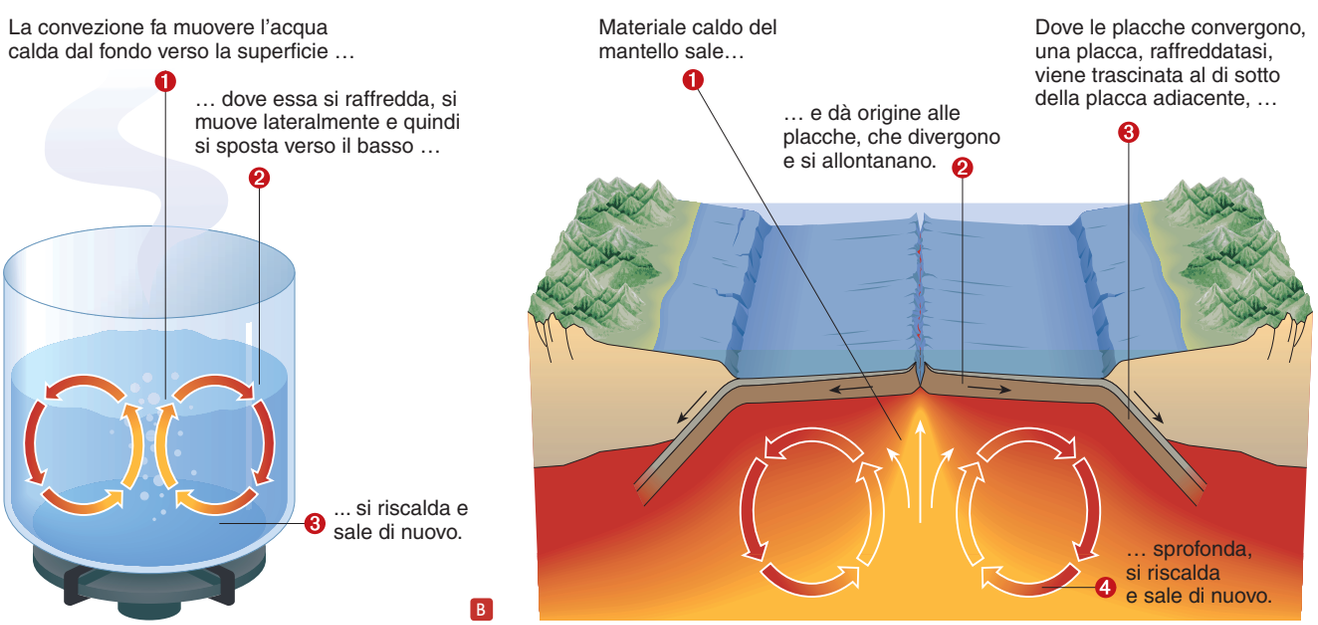


FIGURA 1.18 (A), l'acqua in ebollizione è un esempio familiare di movimento convettivo. (B), l'interno della Terra (dove si raggiungono temperature fino a 5 000÷6 000 °C) è rimescolato da lenti movimenti di materiale, detti correnti convettive, che servono a disperdere l'elevatissimo calore presente all'interno del pianeta. Tali correnti sono il «motore» che fa muovere le placche e determina tutta la dinamica della crosta terrestre (spostamenti di continenti, vulcani, terremoti, nascita delle catene montuose).

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

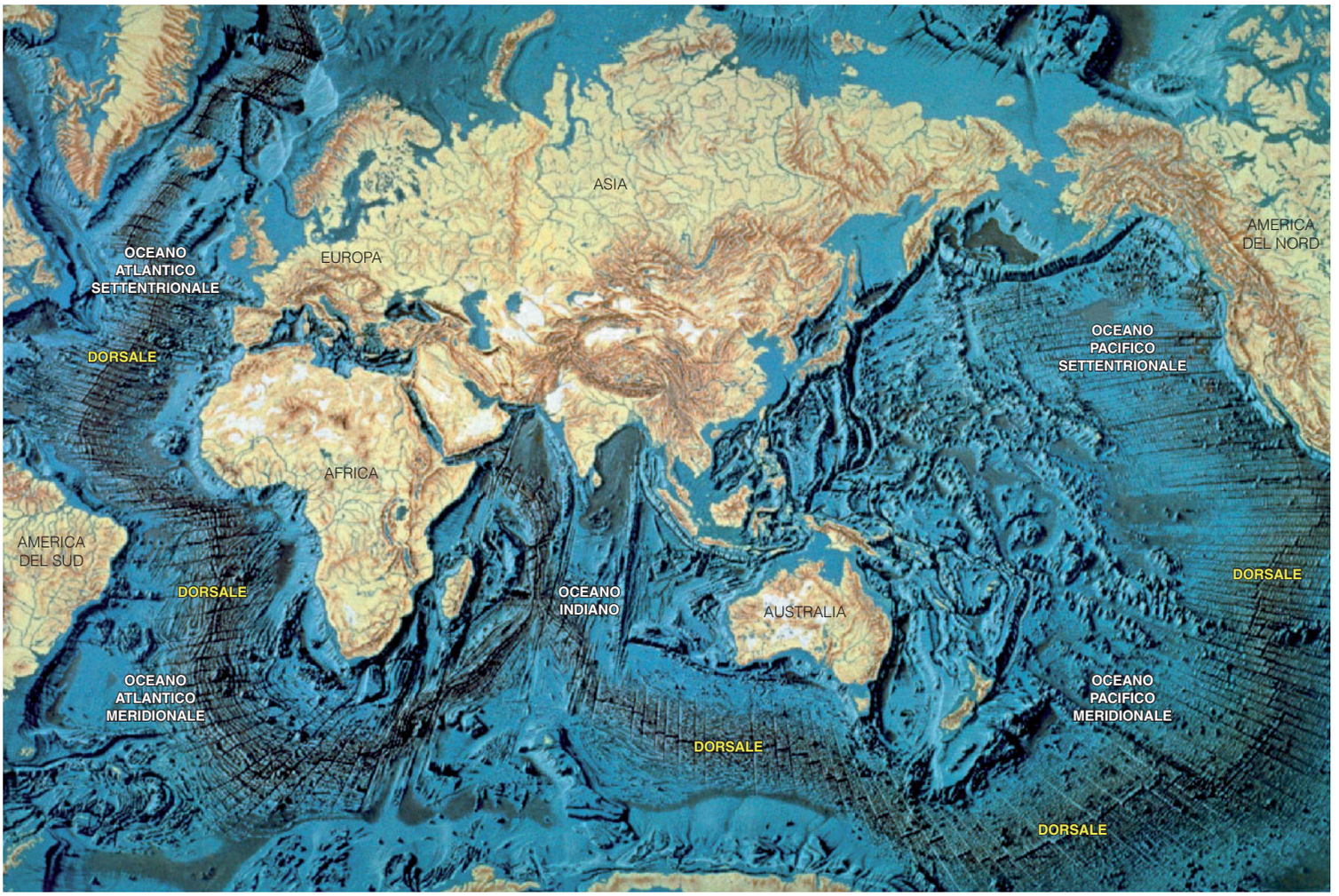


FIGURA 1.19 *Morfologia sottomarina degli Oceani Atlantico, Indiano e Pacifico*. Sono ben visibili le dorsali oceaniche in corrispondenza delle quali risalgono le correnti convettive e si crea continuamente nuova crosta oceanica.

I continenti (Africa, Americhe, Australia, Antartide, Asia, Europa) sono invece masse di materiale più leggero, essenzialmente di tipo granitico, e sono inglobati in questa specie di «nastro trasportatore» che sono le placche; si spostano «galleggiando», trascinati passivamente dal loro movimento (figura 1.20).

Le placche, dunque, si accrescono negli oceani a partire dalle dorsali. Le dorsali sono imponenti zone rilevate sottomarine, al centro delle quali è presente una profonda incisione chiamata *rift valley*. In corrispondenza della *rift valley* le correnti convettive che rimescolano l'interno della Terra arrivano in superficie (cfr. figura 1.18 B). Ma se lungo le dorsali esce in continuazione materiale e si genera nuova litosfera, è necessario che una corrispondente quantità venga inghiottita da qualche altra parte, altrimenti la Terra dovrebbe aumentare di volume. E non vi è alcuna evidenza che confermi tale fenomeno. La Terra infatti può essere considerata un sistema termodinamicamente chiuso che scambia con l'esterno energia, ma non materia (tranne una trascurabile quantità di polvere cosmica e rare meteoriti) e conserva perciò la sua massa.

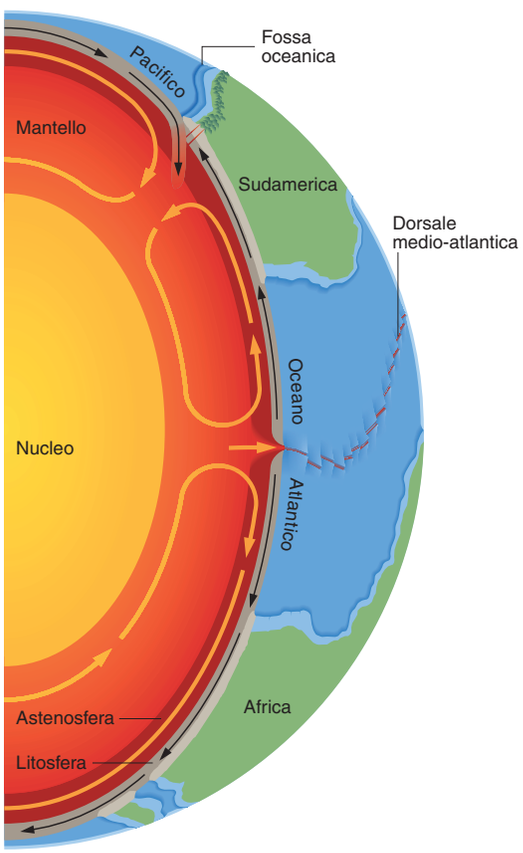
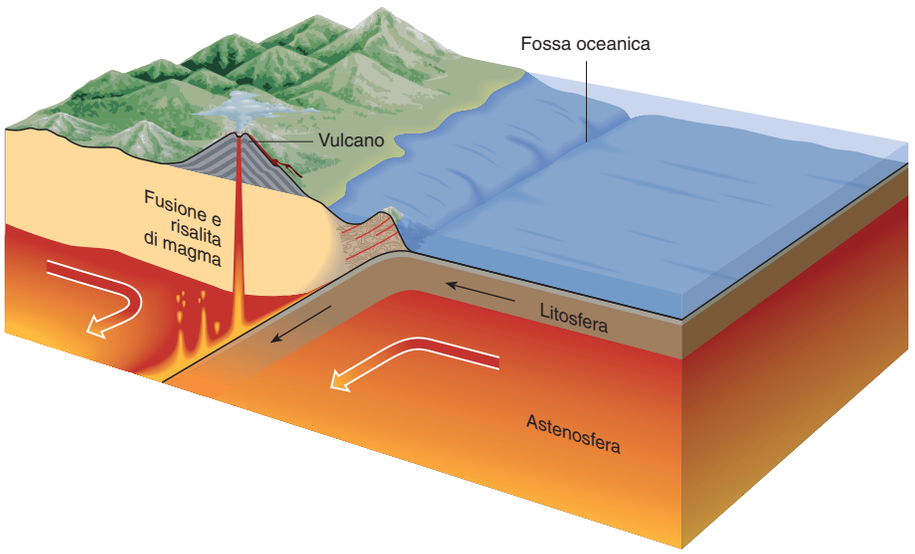


FIGURA 1.20 I continenti, costituiti di materiale granitico relativamente leggero, vengono trascinati e trasportati passivamente, inglobati all'interno delle placche.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

Sulla Terra devono dunque esistere dei luoghi dove le placche si distruggono e scompaiono. Infatti, in certe zone, che sono le **fosse oceaniche** (cfr. figura 1.18 B), una placca si immerge, sprofonda sotto un'altra e viene riassorbita all'interno della Terra: questo processo o movimento di lenta discesa e penetrazione di una placca all'interno della Terra è detto **subduzione** (figura 1.21). Quando le placche in movimento trascinano blocchi continentali incastonati al loro interno, quali potrebbero essere, ad esempio, l'Africa, l'Australia o l'Europa, questi, una volta giunti «faccia a faccia» nella zona di subduzione, trovano notevole difficoltà a infilarsi l'uno sotto l'altro e a penetrare in profondità, all'interno della Terra. Infatti, come già accennato in figura 1.17, i continenti sono costituiti di materiale granitico, che è sensibilmente più leggero (densità = 2,7÷2,8 g/cm^3) delle rocce che stanno al di sotto delle placche (densità = 3,3 g/cm^3): è come se si volesse far affondare nell'acqua un tappo di sughero.

FIGURA 1.21 La litosfera, che si forma calda e plastica in corrispondenza delle dorsali oceaniche, ridiscende poi, fredda e pesante, nelle zone di subduzione, la cui espressione morfologica superficiale sono le fosse oceaniche.



I margini delle placche litosferiche sono distinti, in base al movimento relativo delle placche, in tre tipologie:

- **margini divergenti** o **in accrescimento**: corrispondono alle dorsali oceaniche, dove le placche si allontanano e si genera continuamente nuova crosta oceanica;
- **margini convergenti** o **in consunzione**: corrispondono alle zone di subduzione, dove le placche convergono e una di esse «sprofonda» nell'astenosfera, consumandosi e perdendo la propria identità;
- **margini trasformi** o **conservativi**: corrispondono a grandi fratture oceaniche e continentali a scorrimento orizzontale lungo le quali le placche scivolano una accanto all'altra in direzioni opposte, mentre le superfici in gioco rimangono immutate.

1.10 Collisioni di continenti e nascita delle catene montuose

Secondo la moderna visione dinamica della Terra, i continenti, trascinati passivamente dal movimento delle placche in cui sono inglobati, vagano sulla superficie terrestre come grandi zattere alla deriva: essi possono spaccarsi in tronconi, strisciare l'uno vicino all'altro o scontrarsi più o meno frontalmente.

Lo scontro tra due continenti, detto *collisione*, si verifica in genere alla velocità relativa di 5÷10 cm l'anno e implica necessariamente la scomparsa dell'oceano che li separava. Per oceano s'intende non tanto la massa d'acqua, ma il fondo oceanico vero e proprio, con le sue rocce e i suoi sedimenti. Alla scala dei tempi geologici, i fondi oceanici sono dunque effimeri, hanno cioè breve durata: la crosta oceanica attuale, che si crea continuamente in corrispondenza delle dorsali che stanno in mezzo agli oceani, viene altrettanto continuamente inghiottita e distrutta in corrispondenza delle fosse oceaniche (figura 1.21).

La collisione tra due continenti porta evidentemente a un'intensa deformazione della zona, lunga e relativamente stretta, in cui avviene il loro accostamento e la sutura finale (figura 1.22). Le rocce e i sedimenti dell'oceano interposto, come pure le rocce delle due zone marginali dei continenti stessi, sono piegate, rotte, innalzate, a volte anche profondamente trasformate dalle enormi pressioni e dalle alte temperature che si producono nella mor-

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

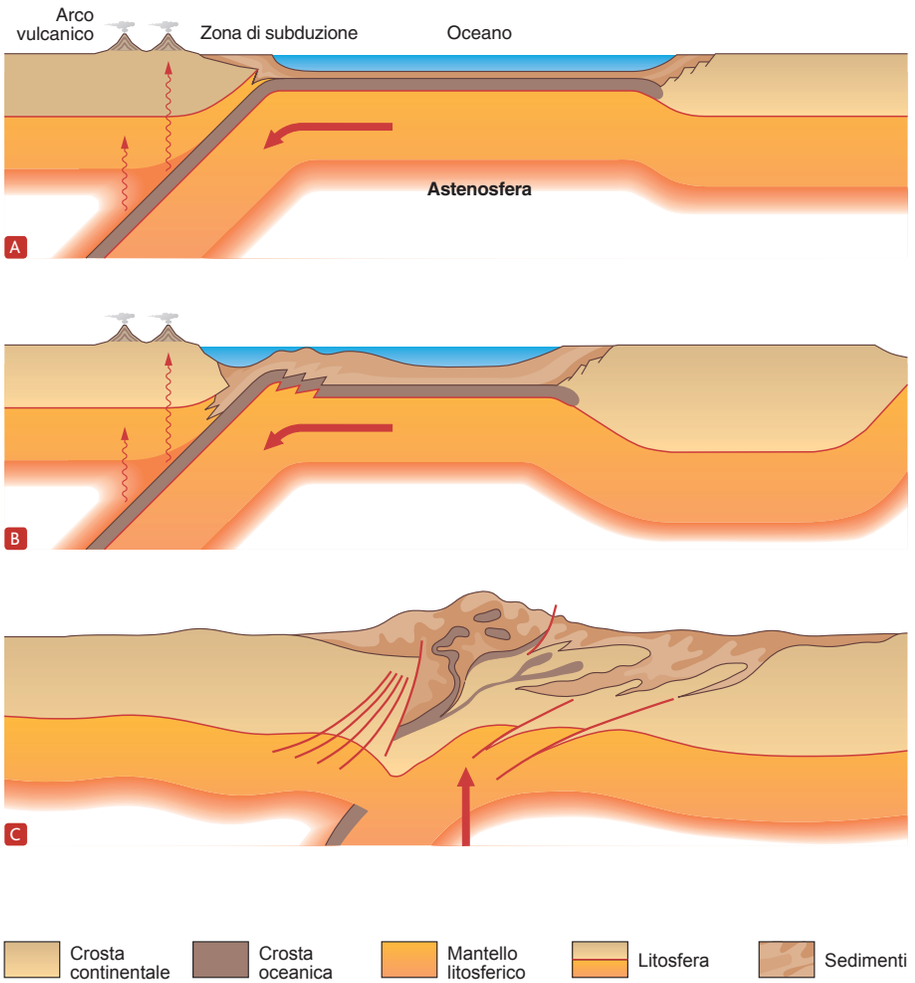


FIGURA 1.22 La collisione tra due blocchi continentali porta alla formazione di una catena di montagne.
(A), la convergenza tra le due placche avviene a spese della subduzione di crosta oceanica. Adiacente alla zona di subduzione si forma una serie di vulcani che derivano dalla fusione della placca inghiottita all'interno della Terra.
(B), il bacino oceanico intermedio è quasi chiuso; la crosta oceanica si rompe in cunei che tendono ad accavallarsi verso la placca in subduzione e i sedimenti marini cominciano a deformarsi sensibilmente.
(C), i due continenti sono entrati in collisione: compressione e deformazione raggiungono la massima intensità. Frammenti di crosta oceanica, sedimenti marini e rocce dei due blocchi continentali opposti vengono ridotti in cunei e scaglie che si accavallano reciprocamente. A questo punto il processo di convergenza si blocca e l'intero edificio di scaglie accavallate, non più compresso, si solleva per riequilibrare le masse (*vedi* § 8.6). Infatti, nell'area dove è avvenuta la collisione lo spessore della crosta è aumentato notevolmente e, analogamente a quanto avviene nel caso di un iceberg, al maggior spessore della crosta deve corrispondere una maggiore elevazione della superficie terrestre. Durante il lento sollevamento, l'edificio collisionale viene attaccato e eroso dagli agenti atmosferici: nasce così una catena di montagne.

sa dei due blocchi continentali. Occorre ricordare che tutto ciò avviene in tempi geologici, cioè lunghissimi. Non ci sono cataclismi, sconvolgimenti terrestri, catastrofi; tutto si svolge come avviene oggi nelle regioni in fase collisionale attiva: qualche terremoto, qualche vulcano che ogni tanto entra in attività, mobilità e impercettibili sollevamenti delle coste e poco più.

Il risultato finale di un processo collisionale è l'orogenesi, cioè la formazione di una catena montuosa (figura 1.22) (*vedi* capitolo 8).

▶ *L'***orogenesi** *(da* oros = *monte e* genesis = *origine) è l'insieme dei fenomeni sedimentari, magmatici, tettonici, geodinamici in generale, che danno luogo alla formazione delle catene montuose.*

I sedimenti marini, accumulatisi durante decine o centinaia di milioni di anni nel mare interposto ai due blocchi continentali o sui margini dei continenti stessi, vengono compressi, strizzati e poi sollevati, a mano a mano che le due masse continentali si avvicinano. Prima si formano isole e vulcani, poi quando avviene l'aggancio vero e proprio sorge un rilievo lungo quanto il fronte collisionale e costituito da rocce, in larga parte di origine marina, metamorfosate (*vedi* capitolo 7), fratturate, piegate e accavallate le une sulle altre. Questa massa di rocce, a mano a mano che si solleva, è attaccata dagli agenti atmosferici, dalle acque superficiali (ruscelli, torrenti, fiumi), dai ghiacciai, dal vento, che ne scolpiscono la morfologia e ne modellano il rilievo. Le parti che si sollevano più velocemente vengono incise più profondamente, le rocce più tenere sono erose e spianate più facilmente e quelle più dure e resistenti restano rilevate e sporgenti: si formano pianure, valli, creste, guglie, altopiani.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*



FIGURA 1.23 Tipiche catene di montagne formatesi per collisione di continenti sono la catena himalayana, nata dallo scontro tra India e Asia, e le catene dell'area mediterranea conseguenza, più o meno diretta, del progressivo avvicinamento dell'Africa all'Europa, un fenomeno che si sta verificando anche attualmente (*vedi* anche figura 8.30).

Così, alla fine di una lunga successione di eventi, nasce una catena di montagne (figura 1.23).

Le collisioni e l'orogenesi sono accompagnate da due fenomeni naturali tra i più eclatanti, che fin dall'antichità hanno suscitato nell'uomo timore e rispetto: terremoti e vulcani.

I terremoti sono strettamente associati ai movimenti delle placche e più in particolare a quanto avviene ai loro margini. Infatti, dove le placche si scontrano, divergono o strisciano l'una accanto all'altra si registrano sforzi immani nelle masse rocciose coinvolte, le quali possono alla fine fratturarsi e subire spostamenti liberando energia. Il terremoto è una vibrazione del terreno prodotta dalla rottura di grandi masse di roccia situate nel sottosuolo.

Anche la maggior parte dei vulcani ha a che fare con le placche e il loro movimento. I vulcani attualmente attivi sulla Terra sono presenti in tutti i continenti e in tutti gli oceani, ma non sono distribuiti in modo uniforme. La maggioranza si trova allineata in corrispondenza delle zone di subduzione o al centro degli oceani, lungo le dorsali oceaniche.

Riepilogando, si può affermare che la mobilità delle placche è stato un importante processo che ha interessato larga parte della storia della Terra. Questa mobilità è responsabile della creazione di catene montuose, della distribuzione dei vulcani e dei terremoti, della forma dei continenti e dei grandi bacini oceanici. *La tettonica delle placche ha anche influenzato la formazione dell'atmosfera, lo sviluppo delle zone climatiche e l'evoluzione della vita.*

La teoria della tettonica delle placche è in grado di spiegare che:

1 i continenti si sono spostati lateralmente sulla superficie terrestre per migliaia di kilometri e si stanno muovendo tuttora, seppur molto lentamente, di qualche centimetro l'anno;
2 i bacini oceanici, intesi come depressioni della crosta terrestre e non come massa d'acqua, si sono formati per progressivo allontanamento dei blocchi continentali e continua fuoriuscita di materiale proveniente dall'interno della Terra;
3 quando, nel loro lento movimento di deriva, due masse continentali si avvicinano fino a collidere frontalmente, i materiali interposti subiscono un'intensa deformazione che porta al sollevamento di tutta la zona compressa, che diventa una catena di montagne.

METTITI alla PROVA

22 Qual è la causa principale dei fenomeni geologici che si manifestano sulla superficie terrestre?
23 Come viene suddiviso l'interno della Terra?
24 Elenca quali sono i punti fermi e documentati che danno forza al modello della tettonica delle placche.
25 Come si chiamano le zone nelle quali viene prodotta nuova litosfera? E quelle nelle quali viene distrutta?
26 Perché due masse continentali che collidono trovano notevole difficoltà a infilarsi l'una sotto l'altra?
27 Qual è il principale meccanismo di trasferimento di calore nell'interno terrestre?
28 Qual è il motore che fa muovere le placche?
29 Come è distribuita sulla Terra la maggior parte dei vulcani attivi?
30 Quali sono le conseguenze della collisione frontale di due masse continentali, in seguito al loro movimento di deriva?

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

ENGLISH FOCUS ON EARTH SCIENCES

Adattato da F. PRESS, R. SIEVER, J. GROTZINGER, T.H. JORDAN, *Understanding Earth*, Fourth Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 2004

► Summary

What is geology? Geology is the science that deals with Earth-its history, its composition and internal structure, and its surface features.

How do geologists study Earth? Geologists, like other scientists, use the scientific method. They share the data that they develop and check one another's work. A hypothesis is a tentative explanation of a body of data. If it is confirmed repeatedly by other scientists' experiments, it may be elevated to a theory. Many theories are abandoned when subsequent experimental work shows them to be false. Confidence grows in those theories that withstand repeated tests and are able to predict the results of new experiments.

How did our solar system originate? The Sun and its family of planets probably formed when a primeval cloud of gas and dust condensed about 4.5 billion years ago. The planets vary in chemical composition in accordance with their distance from the Sun and with their size.

How did Earth form and evolve over time? Earth probably grew by accretion of colliding chunks of matter. Soon after it formed, it was struck by a giant bolide. Matter ejected into space from both Earth and the impactor reassembled to form the Moon. The impact melted much of Earth. Radioactivity also contributed to early heating and melting. Heavy matter, rich in iron, sank toward Earth's center, and lighter matter floated up to form the outer layers that became the crust and continents. Outgassing contributed to the growth of the oceans and a primitive atmosphere. In this way, Earth was transformed into a differentiated planet with chemically distinct zones: an iron core; a mantle that is mostly magnesium, iron, silicon, and oxygen; and a crust rich in the light elements oxygen, silicon, aluminum, calcium, potassium, and sodium and in radioactive elements.

What are the basic elements of plate tectonics? The lithosphere is not a continuous shell; it is broken into about a dozen large «plates». Driven by convection in the mantle, plates move over Earth's surface at rates of a few centimeters per year. Each plate acts as a distinct rigid unit, riding on the asthenosphere, which also is in motion. The lithosphere begins to gel from rising hot mantle material where plates separate, cooling and becoming more rigid as it moves away from this divergent boundary. Eventually, it sinks into the asthenosphere, dragging material back into the mantle at boundaries where plates converge.

How do we study Earth as a system of interacting components? When trying to understand a complex system such as Earth, we find that it is often easier to break the system down into subsystems (geosystems) to see how they work and interact with one another. Two major global systems are the climate system, which mainly involves interactions among the atmosphere, hydrosphere, and biosphere driven by heat from the Sun, and the plate tectonic system, which mainly involves interactions among Earth's solid components (lithosphere, asthenosphere, and deep mantle) driven by the planet's internal heat.

► Glossary

Atmosphere. Gaseous envelope extending from Earth's surface to an altitude of about 100 km.

Asthenosphere. Weak, ductile layer of *mantle* beneath the *lithosphere* that deforms to accommodate the horizontal and vertical motions of *plate tectonics*.

Biosphere. The total sum of all living organisms and the organic matter they produce.

Climate system. A *geosystem* that includes all parts of the *Earth system* and all the interactions among these components needed to describe how climate behaves in space and time.

Convection. A mechanism of heat transfer in which a heated fluid expands and rises because it has become less dense than the surrounding material. Convection moves heat more efficiently than conduction because the heated material itself moves, carrying its heat with it. Colder material flows in to take the place of the hot rising fluid, is itself heated, and then rises to continue the cycle.

Core. The central part of the Earth below a depth of 2900 km, comprising a liquid outer core and a solid inner core. The core is composed of iron and nickel, with minor amounts of some lighter element, such as oxygen or sulfur.

Crust. The thin (from about 7 to 70 km thick) outer layer of the Earth, consisting of relatively light materials that melt at low temperatures. Continental crust consists largely of granite. Oceanic crust is mostly basalt.

Deep mantle. Mantle beneath the *asthenosphere*, extending from about 400 km deep to the core-mantle boundary (about 2900 km deep).

Earth system. All the parts of our planet and all their interactions, taken together.

Eon. The largest division of *geologic time*, embracing several *eras*; for example, the Phanerozoic eon, from 543 million years ago to the present.

Era. A division of geologic time including several *periods*, but smaller than an *eon*. Commonly recognized eras are the Paleozoic, Mesozoic, and Cenozoic.

Geochronology. The science of absolute dating and relative dating of geologic formation and events.

Geodynamo. The mechanism that sustains Earth's magnetic field, essentially driven by *convection* in the outer core.

Geologic time. The entire span of time since the Earth formed.

Geosystem. A specialized subsystem of the Earth that encompasses interesting types of terrestrial behavior. Geosystems include the *plate tectonic system*, the *climate system*, the *geodynamo*, and other smaller subsystems. The *Earth system* can be thought of as the collection of all these open, interacting (and often overlapping) geosystems.

Hydrosphere. Earth's surface waters, including all oceans, lakes, rivers, and groundwater.

Inner core. Inner sphere composed primarily of solid iron, extending from about 5150 km deep to Earth's center (about 6400 km deep).

Lithosphere. The strong, rigid outer shell of the Earth that encases the *asthenosphere* and contains the *crust*, the uppermost part of the *mantle* down to an average depth of about 100 km, the continents, and the plates.

Mantle. The region that forms the main bulk of the solid Earth, between the *crust* and the *core*, ranging from depths of about 40 km to 2900 km. It is composed of rocks of intermediate *density*, mostly compounds of oxygen with magnesium, iron, and silicon.

Mid-ocean ridge. A major elevated linear feature of the sea floor consisting of many small, slightly offset segments, with a total lenght of 200 to 20000 kilometers. Characteristic type of *plate* boundary occurring in a divergence zone; a site where two *plates* are being pulled apart and new oceanic *lithosphere* is being created.

Orogeny. Mountain building, particularly by the folding and thrusting of rock layers, often with accompanying magmatic activity.

Outer core. Liquid shell composed primarily of molten iron, extending from about 2900 km to 5150 km in depth.

Period. A division of *geologic time* representing one subdivision of an *era*.

Plate tectonic system. A *geosystem* that includes all parts of the *Earth system* and all the interactions among these components needed to describe how *plate tectonics* works in space and time.

Plate. One of the dozen or more segments of the *lithosphere* that are internally rigid and move independently over the interior, meeting in convergence zones and separating in divergence zones.

Plate tectonics. The theory proposing that the *lithosphere* is broken into about a dozen large *plates* that move over Earth's surface. Each plate acts as a distinct rigid unit that rides on the *asthenosphere*, which is also in motion.

Radiometric dating. The use of naturally occurring radioactive elements to determine the ages of rocks.

Regolith. The layer of loose, heterogeneous material overlying bedrock, including soil, particles of weathered and unweathered parent rock, clay minerals, iron and other metal oxides, and other products of weathering.

Rift valley. A long, narrow trough bounded on each side by one or more parallel normal faults. Created by tensional forces.

Subduction. The sinking of an oceanic plate beneath an overriding plate at a convergent plate boundary. The overriding plate may be oceanic or continental.

Trench. A long and narrow deep trough in the sea floor: interpreted as marking the line along which a *plate* bends down into a *subduction* zone.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

FACCIAMO IL PUNTO

▶ Sommario

Di che cosa si occupano le scienze della Terra? Le scienze della Terra sono l'insieme delle discipline che si occupano dello studio del pianeta Terra nella sua componente non vivente.

Perché la Terra è un pianeta «unico» nel sistema solare? La Terra è un pianeta «unico», perché:
1) è circondata da un'atmosfera gassosa (formata soprattutto da azoto, ossigeno, argon e vapore acqueo);
2) presenta acqua allo stato solido, liquido e gassoso e ciò ha reso possibile la nascita e lo sviluppo della vita;
3) possiede una superficie ricoperta da materiali incoerenti e sciolti, che formano il regolite, originato grazie alle interazioni di processi chimici, fisici e biologici.

Che cosa è la scala dei tempi geologici? La scala dei tempi geologici indica la sequenza degli eventi che si sono verificati sulla Terra correlandola all'età assoluta. Il tempo geologico viene suddiviso in unità cronologiche, cui corrispondono insiemi di rocce formate in determinati intervalli di tempo. A questo calendario è possibile ricondurre, con differenti criteri di correlazione, tutti gli accadimenti geologici.

Come si è formato il pianeta Terra? Il pianeta Terra si è formato 4560 milioni di anni fa dall'aggregazione di materiali metallici e rocciosi che ruotavano intorno al Sole in via di formazione. I frammenti si aggregarono a formare corpi rocciosi maggiori, i planetesimi. L'agglomerato di materiali che costituiva la Terra nel corso del suo processo di formazione si accresceva per i continui urti con altri frammenti e aumentava la temperatura a seguito degli impatti e della crescente pressione cui erano soggette le parti interne e del decadimento radioattivo.

Quale rapporto intercorre fra la «catastrofe del ferro» e la zonazione chimica? L'aumento della temperatura portò alla fusione del ferro, che a causa dell'elevata densità cominciò a spostarsi verso il centro della Terra («catastrofe del ferro»). L'energia gravitazionale liberata in questo spostamento portò a fusione il pianeta. Ne derivò il processo della differenziazione gravitativa, con la conseguente stratificazione della struttura del pianeta. La zonazione chimica dei vari elementi non fu dovuta al loro diverso peso specifico, ma alle proprietà fisiche e chimiche dei minerali di cui entrarono a far parte.

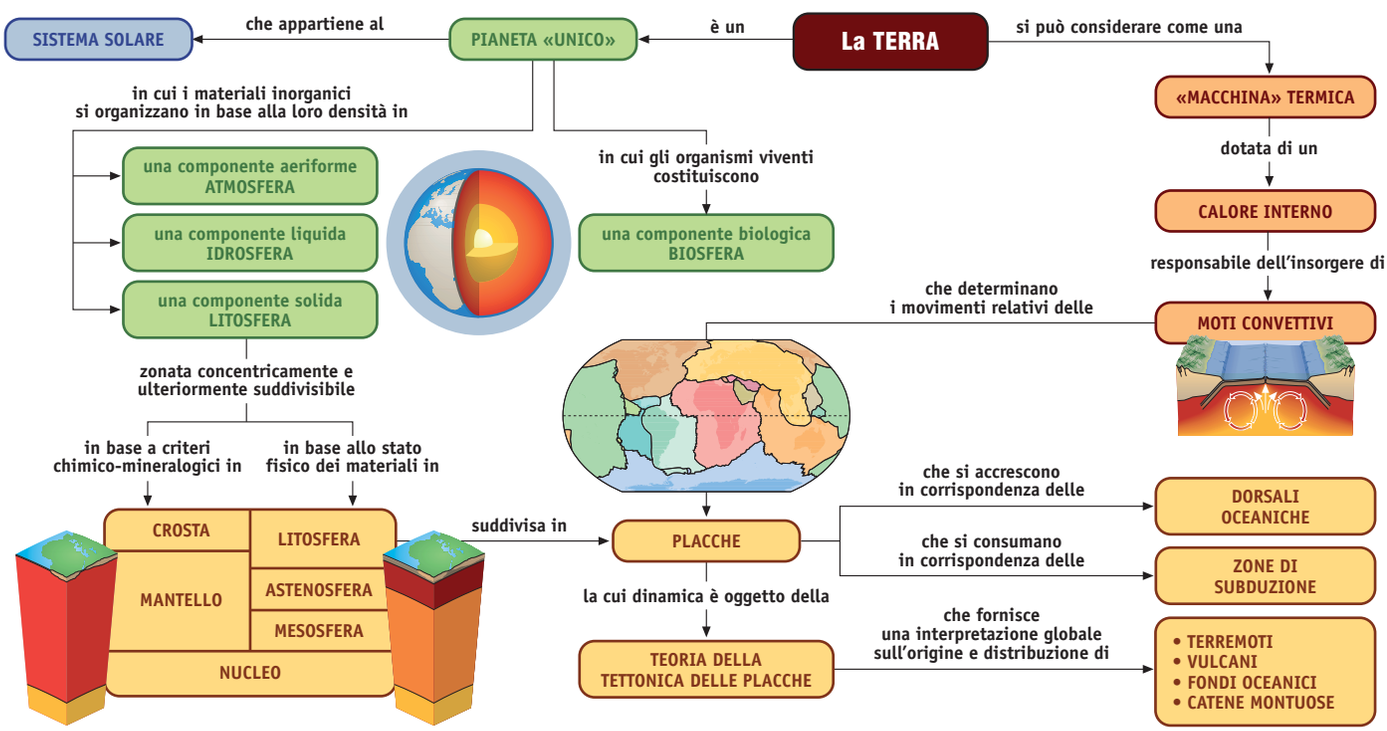
Come si è originata la primitiva crosta terrestre? Nella crosta terrestre non sono state trovate rocce più antiche di 3800 ÷ 4200 milioni di anni. Si ritiene che i materiali che la costituiscono si siano formati attraverso vari processi: ripetute emissioni di lava cui sarebbero seguite rifusioni parziali delle rocce appena consolidate; degradazione per opera degli agenti atmosferici con formazione di un primitivo regolite; riassorbimento e riciclo dei sedimenti all'interno della Terra per opera di processi vulcanici e tettonici.

Come si chiamano le «sfere» che costituiscono il sistema Terra? La Terra può essere idealmente suddivisa in tre «sfere»:
1) la litosfera, che comprende la componente solida dei materiali presenti sul pianeta;
2) l'idrosfera, formata dalla componente liquida;
3) l'atmosfera, che comprende la componente gassosa.

Una quarta componente, la biosfera, è quella occupata dagli organismi viventi, e comprende: l'atmosfera fino a circa 5 km di altezza, la litosfera fino a circa 2 km di profondità, e tutta l'idrosfera.

Qual è la teoria che spiega come «funziona» la Terra? Esiste una teoria unificante, chiamata tettonica delle placche, che giustifica l'esistenza dei grandi fenomeni geologici (distribuzione dei vulcani, terremoti, espansione dei fondi oceanici, creazione delle catene montuose) che fanno della Terra un pianeta dinamico, in continua evoluzione. Secondo questa teoria, l'involucro roccioso esterno della Terra, la litosfera, è suddiviso in placche che galleggiano su uno strato parzialmente fuso sottostante (astenosfera) e che sono mosse da lenti moti convettivi generati dal grande calore interno immagazzinato nel nucleo. Nuova litosfera viene continuamente prodotta in corrispondenza delle dorsali oceaniche, mentre altra viene riassorbita in corrispondenza delle zone di subduzione. Il volume globale della Terra rimane costante. La teoria della tettonica delle placche sostiene che:
1) i continenti si spostano lateralmente;
2) i bacini oceanici si sono formati per allontanamento dei blocchi continentali;
3) quando due masse continentali collidono si originano delle catene montuose.

▶ Mappa per il ripasso visivo



Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*

VERIFICA LE CONOSCENZE

▶ Domande a risposta multipla
(scegli il/i completamento/i corretto/i)

1 Le caratteristiche distintive che rendono la Terra un pianeta «unico» nel sistema solare sono:

A avere un satellite;
B avere un rivestimento di regolite generatosi con gli impatti meteoritici del passato;
C essere circondata da un'atmosfera gassosa;
D avere acqua nei tre stati di aggregazione.

2 Fanno parte del regolite terrestre:

A suolo e altro materiale a granulometria eterogenea;
B acqua e resti organici;
C frammenti meteoritici di provenienza lunare;
D lo strato di roccia compatta usualmente chiamato roccia madre.

3 La Terra primordiale:

A ha subito un intenso bombardamento da parte di planetesimi;
B è nata in conseguenza dell'impatto con un corpo di grosse dimensioni, che ha cominciato a gravitarle attorno;
C aveva temperatura e pressione elevate;
D possedeva un'intensa radioattività.

4 La catastrofe del ferro produsse:

A un aumento di densità della Terra;
B una zonazione chimica;
C una differenziazione gravitativa;
D una diminuzione del volume.

5 La differenziazione gravitativa della Terra è stata governata da:

A peso specifico degli elementi;
B proprietà chimico-fisiche, come punto di fusione, densità e affinità chimica dei minerali;
C differenze di temperatura fra i diversi strati;
D meccanismo della convezione.

6 Il nucleo esterno:

A è liquido e composto essenzialmente di ferro;
B è solido e composto essenzialmente di ferro;
C è a diretto contatto con l'astenosfera;
D appartiene al sistema geodinamo.

7 Le dorsali oceaniche sono zone nelle quali:

A fuoriesce lava scura e pesante;
B le rocce sono formate da graniti;
C viene riassorbita parte della litosfera terrestre;
D le placche litosferiche sono riassorbite.

8 La tettonica delle placche spiega:

A La formazione dei bacini oceanici;
B la degradazione chimica delle rocce;
C la formazione delle montagne;
D il riscaldamento globale del pianeta.

9 La subduzione è il fenomeno tramite il quale:

A una placca sprofonda all'interno della Terra;
B una placca galleggia sull'astenosfera;
C una placca si scontra con un'altra e forma una catena montuosa;
D si forma nuova crosta, mentre altra viene riassorbita.

10 Litosfera, idrosfera, atmosfera:

A sono le suddivisioni della Terra, fatte a scopo di studio;
B sono rispettivamente la parte solida, liquida e gassosa del pianeta;
C sono intimamente interconnesse;
D effettuano scambi trofici ed energetici con la biosfera.

11 La litosfera è:

A la componente solida della Terra;
B lo strato parzialmente fuso che costituisce la parte più superficiale della Terra;
C uno strato dinamico, continuamente prodotto e distrutto;
D suddivisa in placche.

▶ Quesiti

12 Che cosa sono le geoscienze? E quali sono le principali branche scientifiche?
13 Quali sono le cosiddette scienze dell'atmosfera?
14 Quali sono i fenomeni che rendono la Terra un pianeta unico?
15 Per quali ragioni il regolite del pianeta Terra è diverso da quello degli altri pianeti?
16 Che cos'è la scala dei tempi geologici?
17 Tutti sono ormai consapevoli di ciò che l'ecosistema terrestre sta rischiando. Spiega.
18 In quale luogo sono state ritrovate le rocce più antiche e quale età hanno?
19 Descrivi i processi che hanno portato all'iniziale riscaldamento interno della Terra.
20 Quali sono i quattro elementi che da soli costituiscono circa il 90% della Terra?
21 Qual è stata l'origine dell'atmosfera?
22 Quali sono le componenti della Terra attivate dal calore interno?
23 Qual è lo stato fisico dell'astenosfera?
24 Di che cosa si occupa la tettonica?
25 Che cosa s'intende per orogenesi?

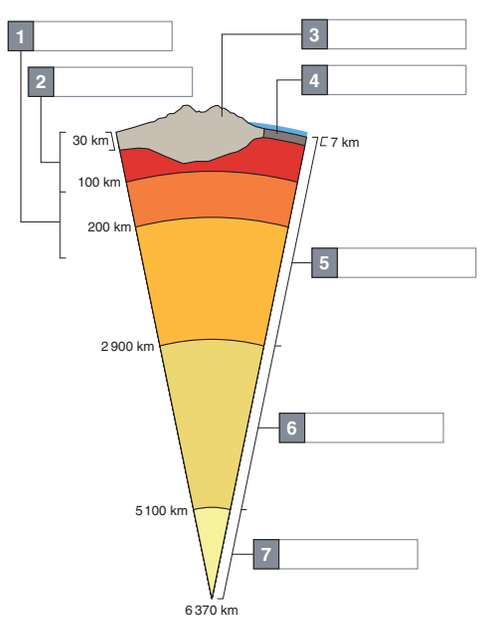
VERIFICA LE ABILITÀ

▶ Quesiti

26 Spiega le interazioni che esistono tra le diverse «sfere» che costituiscono il geosistema.
27 Chiarisci il processo di formazione della Luna nell'ambito della recente ipotesi di collisione con un grande corpo celeste.
28 Chiarisci perché attribuiamo al nostro pianeta un'età maggiore di quella delle rocce più antiche su di esso ritrovate.
29 Evidenzia il motivo che ha portato all'accumulo dei feldspati nel guscio terrestre più esterno.
30 Esponi i principi generali che rendono valida la teoria della tettonica delle placche.
31 Descrivi la teoria della tettonica delle placche come modello che applica il principio fisico di conservazione della massa.
32 Aiutandoti con la figura 1.14 descrivi i criteri secondo i quali è possibile suddividere l'interno della Terra.
33 Per quale motivo la superficie terrestre, a differenza di quella lunare, presenta ridotte tracce di impatti con planetesimi?
34 Illustra, alla luce della teoria della tettonica delle placche, le relazioni che esistono tra astenosfera e litosfera.

▶ Esercizio

35 Lo schema a lato rappresenta una sezione della Terra. Inserisci i termini appropriati per i diversi strati in ciascuna delle caselle bianche.



▶ Questions

36 Take help from the following terms (iron, elements, inner core, pressure, to melt, Earth's crust, zoned planet, mantle) to explain what caused Earth to differentiate, and what was the result.
37 Take help from the following terms (lithosphere, asthenosphere, convection, rift valley, subduction), to try to give an outline of plate tectonic system.

Alfonso Bosellini **DAGLI OCEANI PERDUTI ALLE CATENE MONTUOSE** © Italo Bovolenta editore 2013 *Secondo biennio e Quinto anno*