CAPITOLO

14

Dalla deriva dei continenti alla tettonica delle placche

«La prima idea degli spostamenti dei continenti mi venne un giorno osservando la carta del mondo, sotto l'impressione immediata del parallelismo delle coste atlantiche.» — Alfred Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 2ª ed. (1920)

OBIETTIVI

1. Ricostruire le prove della deriva dei continenti e i motivi per cui Wegener fu respinto.
2. Descrivere dorsali, fosse, flusso di calore ed età dei fondali oceanici.
3. Spiegare la magnetizzazione delle rocce, le inversioni di polarità e la migrazione apparente dei poli, e calcolare una paleolatitudine.
4. Spiegare l'espansione dei fondali e le anomalie magnetiche simmetriche e calcolare velocità di espansione e di una placca su un punto caldo.
5. Descrivere le placche litosferiche, i tre tipi di margini e le forze che muovono le placche.
6. Leggere la nascita della tettonica delle placche come un caso di storia della scienza.

INDICE DEL CAPITOLO

14.1 La deriva dei continenti 2
14.2 L'esplorazione dei fondali oceanici 5
14.3 Il paleomagnetismo 7
14.4 L'espansione dei fondali oceanici 10
14.5 La teoria della tettonica delle placche 14

Scienze naturali 5 · Parte IV · La Terra come sistema: tettonica, atmosfera, oceani · versione 1.0
Capitolo 14: Dalla deriva dei continenti alla tettonica delle placche · pagine 385–408 del volume completo · estratto per lo studio

Guarda una carta del mondo: la costa orientale del Sud America e quella occidentale dell'Africa sembrano i due bordi di un foglio strappato. Per secoli la somiglianza è stata una curiosità. All'inizio del Novecento un meteorologo tedesco la prese sul serio e ne fece un'ipotesi: i continenti si spostano. Fu respinta da quasi tutti i geologi del suo tempo. Mezzo secolo dopo, i dati raccolti esplorando i fondali oceanici la trasformarono in una teoria che oggi spiega insieme vulcani, terremoti, catene montuose e la forma stessa degli oceani: la tettonica delle placche. In questo capitolo seguiamo quel percorso, che è anche uno dei casi più studiati di come cambia una teoria scientifica.

14.1 La deriva dei continenti

14.1.1 Un pianeta da spiegare

> **DA RICORDARE**
>
> **Richiamo.** In *Scienze naturali 4*, cap. 16, hai visto che la Terra è divisa in crosta, mantello e nucleo, e che il suo involucro esterno ha un comportamento meccanico diverso da quello sottostante: la **litosfera**, rigida, spessa in media circa 100 km, formata dalla crosta e dalla parte più alta del mantello, poggia sull'**astenosfera**, solida ma più calda e duttile, che si deforma lentamente. Hai visto anche che i blocchi della litosfera tendono a un equilibrio di galleggiamento, l'**isostasia**, e che vulcani ed epicentri dei terremoti si concentrano in fasce strette: la cintura circumpacifica, quella mediterraneo-himalayana e le dorsali medio-oceaniche. Quel capitolo descriveva i fenomeni e rimandava a quest'anno la loro causa. Ora la spieghiamo.

Fino all'inizio del Novecento quasi tutti i geologi erano **fissisti**: pensavano che continenti e oceani fossero rimasti al loro posto dalla formazione della crosta e che le catene montuose nascessero dalla contrazione della Terra che si raffreddava, come la buccia di una mela che si raggrinzisce seccando. Per spiegare perché gli stessi animali e le stesse piante fossili si trovano su continenti separati da oceani, immaginavano antichi «ponti continentali», lingue di terra poi sprofondate. Il **mobilismo** sostiene al contrario che i continenti si sono spostati orizzontalmente, anche di migliaia di chilometri.

14.1.2 Le prove di Wegener

Il primo a costruire un'ipotesi mobilista con prove raccolte da molte discipline fu **Alfred Wegener** (1880–1930), meteorologo e geofisico tedesco. La presentò il 6 gennaio 1912 a Francoforte,

alla Geologische Vereinigung, e la sviluppò nel libro *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* («La formazione dei continenti e degli oceani», 1915), che rielaborò in tre edizioni successive. Secondo la sua **deriva dei continenti**, nel tardo Paleozoico tutte le terre emerse formavano un unico supercontinente, che nella seconda edizione (1920) chiamò *Pangäa*, in italiano **Pangea** («tutta la Terra»); poi Pangea si spezzò e i frammenti si allontanarono fino alle posizioni attuali. Wegener mise insieme quattro gruppi di prove.

1. La forma dei continenti. I margini dei continenti non coincidono con la linea di costa, che dipende dal livello del mare, ma con il bordo della *scarpata continentale*, dove il fondale precipita verso le profondità oceaniche. Wegener lo sapeva, e nel 1965 il geofisico inglese Edward Bullard e i suoi collaboratori lo dimostrarono con un calcolatore: ruotando il Sud America di 57° attorno a un asse passante per il centro della Terra, il bordo della sua scarpata combacia con quello africano con uno scarto medio di circa 90 km (Figura 14.1).

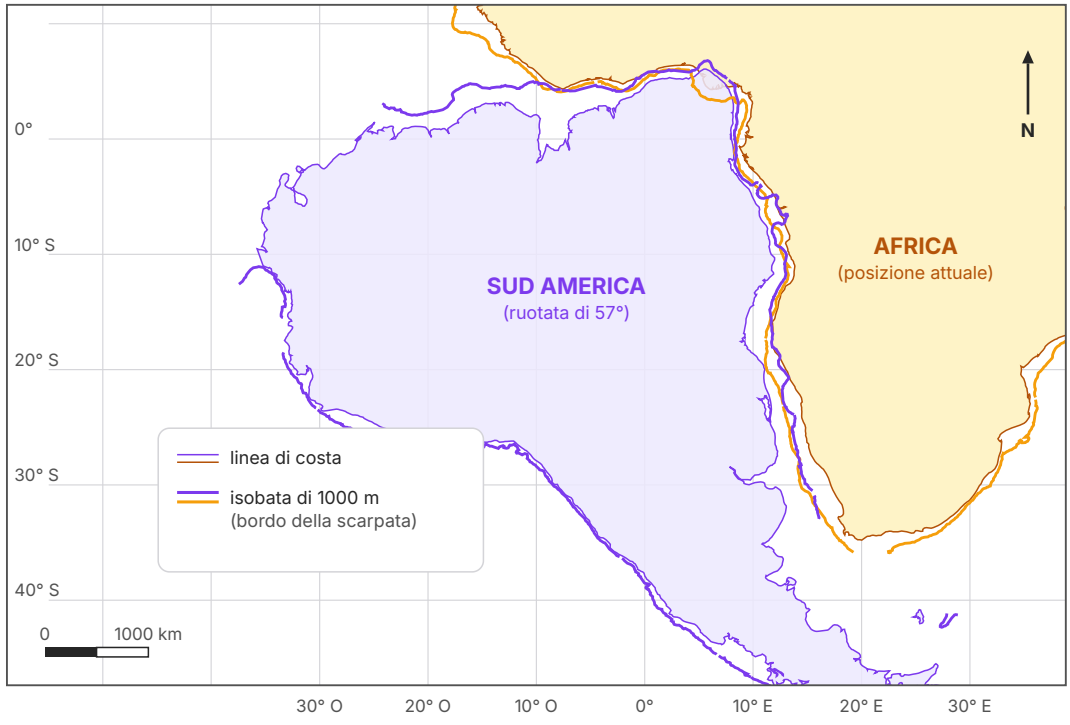


Figura 14.1 L'incastro del Sud America con l'Africa al bordo della scarpata continentale. L'Africa è nella posizione attuale; il Sud America è ruotato di 57,0° attorno a un polo posto a 44,0° N e 30,6° O, la rotazione calcolata da Bullard, Everett e Smith (1965, soluzione n. 9 della loro tabella 1) sull'isobata di 500 braccia (circa 900 m). Qui le isobate sono quelle di 1000 m e le coste attuali (Natural Earth); il reticolo di meridiani e paralleli è quello dell'Africa. Gli scarti residui, sovrapposizioni e piccoli vuoti, sono di decine di chilometri.

2. I fossili. I resti di alcuni organismi del Permiano e del Triassico si trovano su continenti oggi separati da migliaia di chilometri di oceano (Figura 14.2). *Mesosaurus*, un piccolo rettile vissuto

nelle acque dolci o salmastre, si trova in Brasile, in Uruguay e nell'Africa meridionale: non avrebbe potuto attraversare un oceano. *Glossopteris*, una pianta con semi pesanti, poco adatti a essere trasportati dal vento, è diffusa in tutti i continenti meridionali e in India. *Lystrosaurus*, un rettile terrestre del Triassico inferiore, si trova in Africa meridionale e in India; *Cynognathus*, rettile terrestre del Triassico, in Africa meridionale e in Argentina. Nel 1969 resti di *Lystrosaurus* furono trovati anche in Antartide, quasi quarant'anni dopo la morte di Wegener. Wegener chiamò **Gondwana**, con un nome già usato dai geologi, la parte meridionale di Pangea.

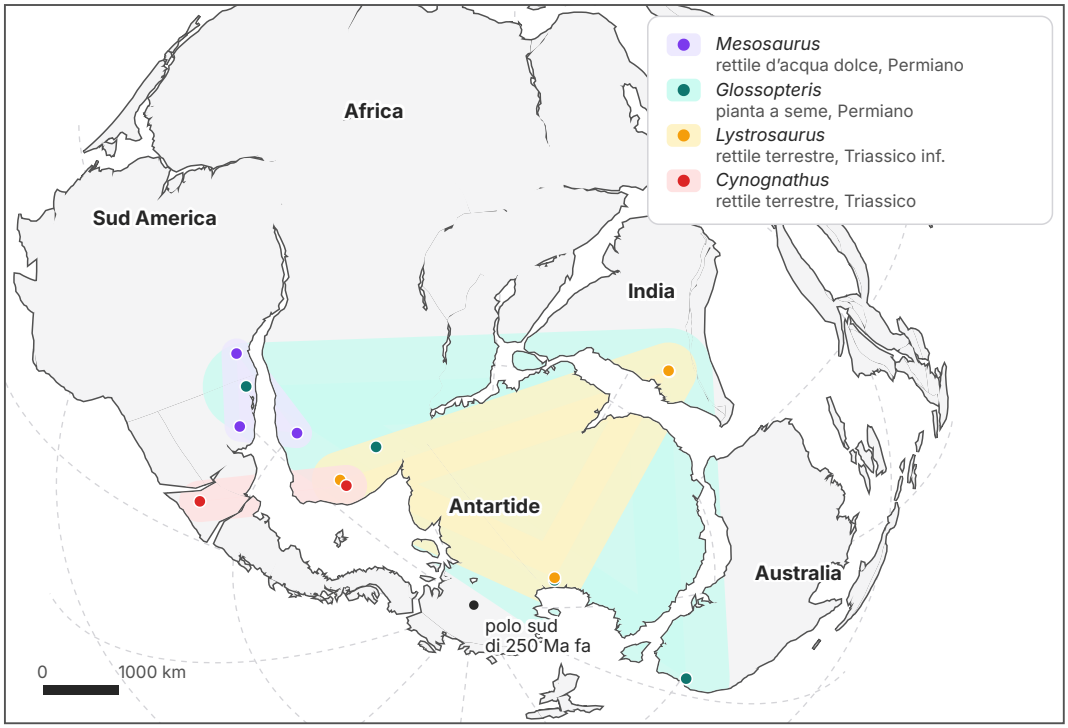


Figura 14.2 Gondwana circa 250 milioni di anni fa, con le coste attuali dei continenti riportate nella posizione di allora (ricostruzione con il programma GPlates e il modello di Müller e coautori, 2019; proiezione ortografica). I punti segnano alcune località di ritrovamento dei quattro fossili; le aree colorate le collegano sui continenti riuniti, in modo schematico. Le linee tratteggiate sono i paralleli di 30° S e 60° S e i meridiani di allora: buona parte di Gondwana si trovava alle alte latitudini meridionali. *Lystrosaurus* è noto anche in Asia, fuori da Gondwana.

3. Le rocce e le catene montuose. Strutture geologiche interrotte dalla costa riprendono sul continente opposto, dove l'incastro le fa combaciare: le pieghe della Sierra de la Ventana, a sud-ovest di Buenos Aires, proseguono in quelle del Capo, in Sudafrica; i Monti Appalachi, nel Nord America orientale, hanno la stessa età e la stessa struttura delle catene caledoniane della Scozia e della Scandinavia. È come ricomporre un giornale strappato e controllare che le righe di stampa continuino da un pezzo all'altro.

4. I paleoclimi. In India, in Africa meridionale, in Sud America e in Australia si trovano depositi glaciali del Carbonifero superiore e del Permiano, con rocce striate dal ghiaccio; alcuni sono oggi vicino ai tropici. In Europa e in Nord America, invece, si trovano negli stessi periodi grandi giacimenti di carbone, formati da foreste di climi caldi e umidi. Se si riuniscono i continenti in Pangea, le tracce glaciali si raccolgono attorno al polo sud di allora e i carboni vicino all'equatore di allora: è più semplice spostare i continenti che il clima.

14.1.3 Una teoria senza motore

Le prove di Wegener erano molte, ma il meccanismo che proponeva no. Egli immaginava che i continenti, fatti di rocce leggere, «navigassero» attraverso le rocce più dense del fondo oceanico, spinti da forze legate alla rotazione terrestre e alle maree. I fisici, primo fra tutti l'inglese Harold Jeffreys, mostrarono che quelle forze erano troppo deboli di molti ordini di grandezza, e che un continente non può aprirsi la strada in una crosta oceanica rigida senza deformarsi. Al convegno organizzato a New York nel 1926 dall'associazione americana dei geologi del petrolio, quasi tutti i relatori respinsero l'ipotesi. Wegener morì nel novembre 1930, durante una spedizione sulla calotta glaciale della Groenlandia, senza vederla accettata.

Un meccanismo più plausibile fu proposto alla fine degli anni Venti dal geologo inglese **Arthur Holmes**: il calore prodotto dagli elementi radioattivi poteva mettere in lento movimento il mantello solido con correnti convettive, che salendo sotto un continente lo avrebbero stirato e diviso, e scendendo avrebbero trascinato con sé la crosta. Holmes presentò l'idea alla Società geologica di Glasgow nel gennaio 1928; il testo completo uscì negli atti della società soltanto nel 1931. Mancavano però i dati per verificarla: si trovavano sul fondo degli oceani, che nessuno aveva ancora esplorato.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> **«Wegener scoprì la tettonica delle placche».** No. Wegener propose che si spostassero i *continenti*, attraverso un fondo oceanico fisso, con un meccanismo che si rivelò sbagliato. La tettonica delle placche, nata negli anni Sessanta, dice una cosa diversa: si muovono interi pezzi di *litosfera*, che comprendono continenti e fondali oceanici insieme, e i fondali stessi nascono e scompaiono. Nessun continente «ara» il fondo oceanico. Wegener aveva ragione sul fatto che i continenti si sono spostati, non sul come.

14.2 L'esplorazione dei fondali oceanici

14.2.1 Le dorsali e le fosse

Fino al Novecento la profondità del mare si misurava calando in acqua una corda con un peso: ogni misura richiedeva ore. L'**ecoscandaglio** misura invece il tempo che impiega un impulso sonoro emesso dalla nave a tornare dopo essersi riflesso sul fondo: con una velocità del suono

in acqua di circa 1,5 km/s, un'eco che torna dopo 6 s indica un fondale profondo circa 4,5 km. La spedizione tedesca della nave *Meteor* (1925–1927) attraversò più volte l'Atlantico meridionale misurandone il fondo con questo strumento; dopo la Seconda guerra mondiale gli ecoscandagli registrarono profili continui lungo le rotte di migliaia di navi.

Al Lamont Geological Observatory della Columbia University, a New York, la geologa e cartografa **Marie Tharp** trasformò quei profili, insieme a Bruce Heezen, in carte dei fondali. Nel 1952, allineando i profili attraverso l'Atlantico, Tharp notò che lungo la cresta della catena sottomarina che lo percorre corre una valle profonda. La catena è una **dorsale oceanica**, un rilievo largo da mille a qualche migliaio di chilometri, che si alza di 2–3 km sulle pianure abissali circostanti; la valle centrale è una **valle di rift**, una fossa delimitata da faglie dirette, segno che lì la crosta si sta allargando. Le dorsali formano un sistema continuo lungo in tutto circa 65 000 km, la catena montuosa più lunga della Terra, la cui cresta è spezzata da numerose faglie perpendicolari.

La scoperta non fu accolta subito. Negli anni Cinquanta alle donne non era permesso imbarcarsi sulle navi da ricerca della Columbia University, e Tharp (1920–2006) lavorava sui dati raccolti dagli altri. Quando mostrò a Heezen la valle lungo la cresta, lui la liquidò come «chiacchiere da ragazze»: una valle di rift significava che il fondo si stava aprendo, cioè dava ragione a Wegener. Si convinse quando vide che gli epicentri dei terremoti dell'Atlantico cadevano proprio dentro la valle. La loro prima carta fisiografica dell'Atlantico settentrionale uscì nel 1957; la carta di tutti i fondali oceanici, dipinta dal pittore austriaco Heinrich Berann, nel 1977.

Ai margini di molti oceani, soprattutto attorno al Pacifico, l'ecoscandaglio rivelò invece profonde depressioni strette e lunghe, le **fosse oceaniche**, che raggiungono le massime profondità dei mari, oltre 10 km nella fossa delle Marianne. Le fosse corrono parallele agli archi di isole vulcaniche, come il Giappone, o alle catene montuose costiere, come le Ande: proprio dove si concentrano i vulcani esplosivi e i terremoti più profondi della cintura circumpacifica.

14.2.2 Un fondo caldo, giovane e sottile

Altre misure mostrarono che il fondo oceanico è molto diverso da come lo si immaginava. Il **flusso di calore**, la quantità di calore che esce dal fondo per unità di superficie e di tempo, è massimo sulle dorsali e diminuisce allontanandosi da esse. I sedimenti, che si depositano lentamente e di continuo su tutto il fondo, sono quasi assenti sulle dorsali e diventano sempre più spessi verso i margini degli oceani; e i più antichi sono sempre più giovani di quanto ci si aspetterebbe da oceani vecchi quanto i continenti. Anche la profondità cresce con regolarità allontanandosi dalle dorsali (Figura 14.3a).

Le datazioni radiometriche hanno poi confermato il quadro: il fondo oceanico più antico ancora presente negli oceani ha circa 180 milioni di anni ed è del Giurassico (nel Pacifico occidentale, secondo le carte dell'età dei fondali di Müller e coautori, 2008), mentre le rocce continentali più antiche superano i 4 miliardi di anni (*Scienze naturali 2*, scala dei tempi geologici). Gli

oceani, cioè, sono strutture giovani, rinnovate di continuo; i continenti conservano quasi tutta la storia del pianeta.

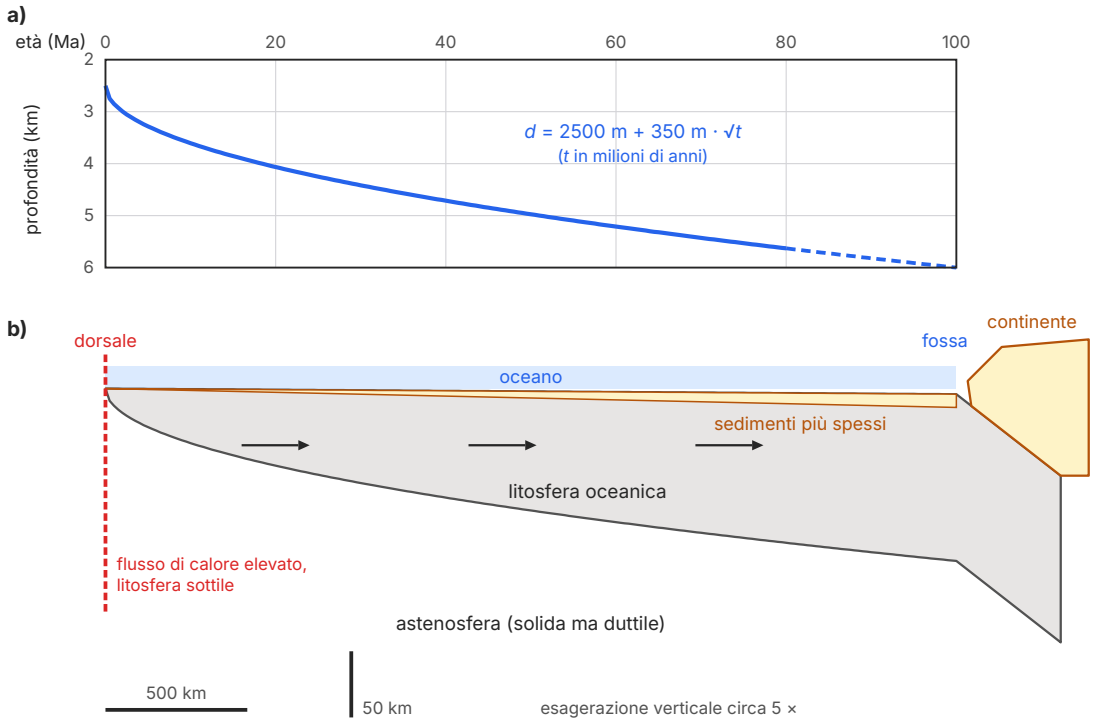


Figura 14.3 Dalla dorsale alla fossa. a) Profondità del fondale in funzione dell'età della litosfera, calcolata con la relazione empirica di Parsons e Sclater (1977), valida fino a circa 70–80 Ma: oltre, in tratteggio, la stessa relazione prolungata, mentre i fondali reali si approfondiscono più lentamente. b) Sezione schematica di un oceano che si espande a 3 cm/anno da ciascun lato della dorsale, così che 3000 km corrispondono a 100 Ma: lo spessore della litosfera cresce come la radice quadrata dell'età (circa 2,32 $\sqrt{(\kappa t)}$, con $\kappa = 10^{-6}$ m^2/s), lo spessore dei sedimenti cresce con l'età (schematico). Esagerazione verticale circa 5 volte; acqua e sedimenti non in scala.

14.3 Il paleomagnetismo

14.3.1 Le rocce come bussole fossili

Il campo magnetico terrestre, generato dai moti del ferro liquido nel nucleo esterno (*Scienze naturali 4*, cap. 16), somiglia vicino alla superficie a quello di un grande magnete posto al centro della Terra, cioè di un *dipolo*, con l'asse inclinato oggi di circa 10° rispetto all'asse di rotazione. Le sue linee escono dall'emisfero australe e rientrano in quello boreale; un ago magnetico libero di ruotare anche in verticale si dispone lungo le linee, e l'angolo che forma con l'orizzontale, l'*inclinazione magnetica*, dipende dalla latitudine (vedi *Fisica 4*, cap. 15): è nulla all'equatore e

vale 90° ai poli (Figura 14.4). Per un dipolo allineato all'asse di rotazione la relazione fra inclinazione I e latitudine λ è

$$\tan I = 2 \cdot \tan \lambda$$

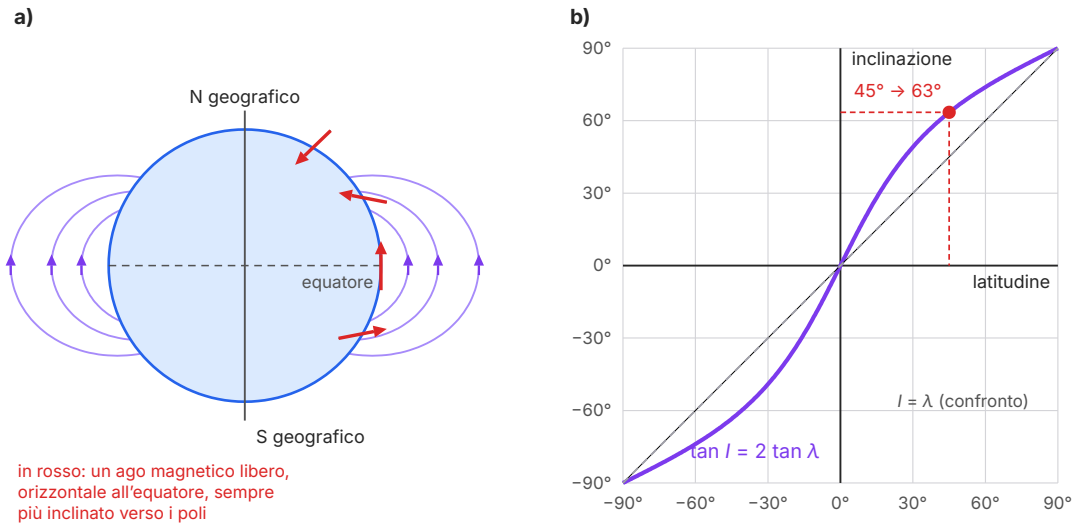


Figura 14.4 a) Linee del campo di un dipolo assiale, calcolate con l'equazione $r = L \cos^2 \lambda$, in una sezione che passa per i poli; le frecce rosse sono aghi magnetici liberi alle latitudini di 0°, 30° e 60° N e di 30° S. b) Inclinazione in funzione della latitudine per un dipolo assiale ($\tan I = 2 \tan \lambda$); in tratteggio, per confronto, la retta $I = \lambda$. Nell'emisfero boreale il campo punta verso il basso (inclinazione positiva), in quello australe verso l'alto.

Mediato su qualche migliaio di anni, il polo magnetico oscilla attorno al polo geografico e ne coincide in media: per questo le rocce possono dire, oltre alla direzione del nord di allora, anche la latitudine a cui si formarono. Una lava contiene piccoli cristalli di magnetite (Fe_3O_4) e di altri ossidi di ferro. Sopra una temperatura caratteristica, la **temperatura di Curie**, circa 580 °C per la magnetite, un materiale ferromagnetico perde il suo magnetismo permanente (vedi *Fisica 4*, cap. 16); quando la lava si raffredda sotto questa temperatura, i domini magnetici dei cristalli si orientano in prevalenza secondo il campo terrestre del momento e restano così bloccati per milioni di anni. È la **magnetizzazione residua** (o termoresidua) della roccia. Anche le rocce sedimentarie possono registrare il campo, perché i granuli magnetici si orientano mentre si depositano. Il **paleomagnetismo** studia queste magnetizzazioni per ricostruire il campo del passato.

ESEMPIO SVOLTO

Dalla roccia alla latitudine

Problema. In una colata di lava di 200 milioni di anni fa, oggi in Europa, la magnetizzazione residua ha un'inclinazione di 30° verso il basso, nel verso del nord di allora. A quale latitudine si formò la lava?

Soluzione. Da $\tan I = 2 \tan \lambda$ si ricava $\tan \lambda = \tan I / 2 = \tan 30° / 2 = 0{,}577 / 2 = 0{,}289$, quindi $\lambda = \arctan 0{,}289 \approx 16°$. L'inclinazione è positiva, come nell'emisfero boreale attuale: la lava si formò a circa 16° N, in un clima tropicale, anche se oggi si trova a latitudini molto più alte. Il polo non si è spostato: si è spostato il continente.

14.3.2 Le inversioni di polarità

Nel 1906 il fisico francese Bernard Brunhes trovò nel Massiccio Centrale alcune lave magnetizzate in verso opposto a quello del campo attuale, e nel 1929 il giapponese Motonori Matuyama propose che il campo terrestre si fosse invertito durante il Quaternario. Negli anni Sessanta la datazione radiometrica di centinaia di lave di tutto il mondo dimostrò che rocce della stessa età hanno, ovunque, la stessa polarità: il campo magnetico si è invertito molte volte, scambiando nord e sud magnetici. Durante un'**inversione di polarità** l'intensità del campo diminuisce e la sua direzione cambia nel giro di qualche migliaio di anni, un tempo brevissimo per la geologia; i periodi fra un'inversione e l'altra hanno durate irregolari, da decine di migliaia a decine di milioni di anni. L'ultima inversione, detta di Brunhes–Matuyama, risale a circa 780 000 anni fa.

Le epoche di polarità *normale*, come quella attuale, e *inversa*, ordinate e datate, formano la **scala delle polarità magnetiche** (Figura 14.6, in basso): le epoche più recenti portano i nomi di Brunhes, Matuyama, Gauss e Gilbert. È un codice a barre del tempo, e lo stesso codice è scritto in tutte le rocce che si sono formate in quegli intervalli.

14.3.3 Le curve di migrazione dei poli

Negli anni Cinquanta i paleomagnetisti inglesi, fra cui Keith Runcorn, misurarono rocce europee di età diverse e calcolarono per ciascuna la posizione del polo magnetico che le aveva magnetizzate. I poli non coincidono con quello attuale: più le rocce sono antiche, più il loro polo è lontano, e i poli di età successive formano una curva che si avvicina al polo attuale (Figura 14.5a). Sembra che il polo abbia vagato sulla superficie terrestre: è la **migrazione apparente dei poli**.

La sorpresa venne dal Nord America. Le sue rocce danno una curva della stessa forma, ma spostata di circa 30° di longitudine verso ovest rispetto a quella europea. Il campo terrestre però ha in ogni epoca un solo polo nord: due curve diverse non possono descrivere il moto di un unico polo. Se invece si richiude l'Atlantico, riportando il Nord America contro l'Europa, le due curve coincidono (Figura 14.5b). La migrazione è «apparente» perché non si è mosso il

polo, ma i continenti, e si sono mossi l'uno rispetto all'altro. Alla fine degli anni Cinquanta il paleomagnetismo aveva così riaperto la questione della deriva, con dati quantitativi che Wegener non aveva.

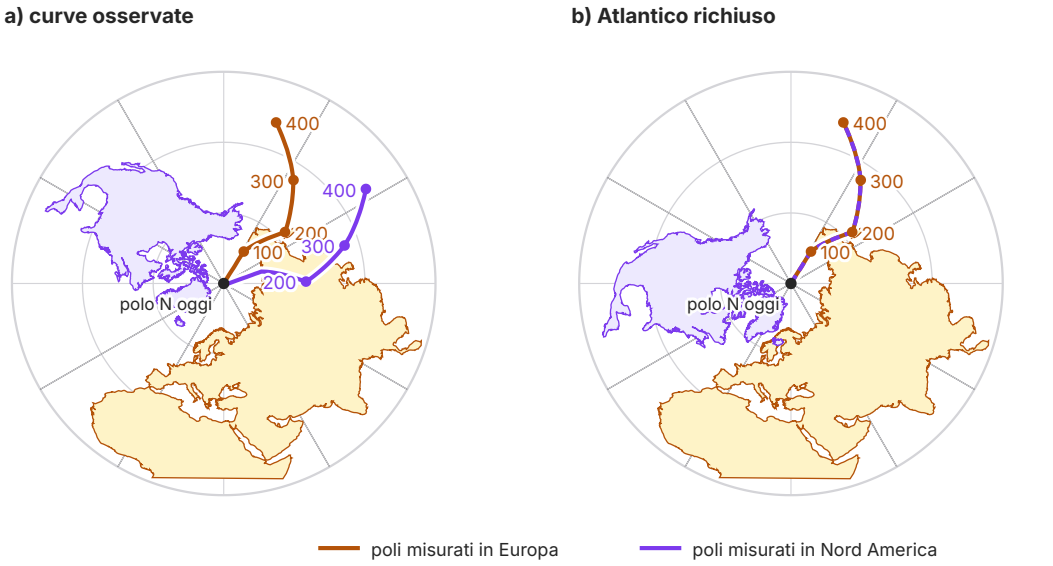


Figura 14.5 La migrazione apparente dei poli, schema. Le curve uniscono i poli magnetici calcolati da rocce di età diverse (in milioni di anni) dell'Europa (arancio) e del Nord America (viola), in una proiezione centrata sul polo nord. a) Nella posizione attuale dei continenti le due curve sono distinte. b) Ruotando il Nord America di 38° per richiudere l'Atlantico settentrionale (rotazione di Bullard e coautori, 1965), i due continenti tornano a contatto e le curve coincidono. Le posizioni dei poli sono schematiche; le forme delle curve riprendono l'andamento di quelle pubblicate.

14.4 L'espansione dei fondali oceanici

14.4.1 L'ipotesi di Hess

Nel 1962 il geologo americano **Harry Hess**, che durante la Seconda guerra mondiale aveva raccolto profili del fondo del Pacifico come comandante di una nave della marina, riunì tutti questi indizi in un'ipotesi che egli stesso definì «un saggio di geopoesia». Sotto le dorsali il mantello caldo risale lentamente; diminuendo la pressione, una piccola parte di esso fonde e il magma basaltico che ne deriva sale nella valle di rift, solidifica e forma nuova crosta oceanica. La crosta nuova si allontana simmetricamente dalla dorsale, come su due nastri trasportatori che partono dallo stesso asse, e si raffredda, diventando più densa: per questo il fondo si approfondisce con l'età e i sedimenti si accumulano sui fondali più vecchi. Nelle fosse il fondo oceanico ritor-

na nel mantello. Il geologo americano Robert Dietz, che nel 1961 aveva proposto un'idea simile, la chiamò **espansione dei fondali oceanici**.

L'ipotesi spiegava in un colpo solo il flusso di calore elevato sulle dorsali, la giovinezza dei fondali e la sottigliezza dei sedimenti; e risolveva il problema di Wegener: i continenti non si fanno strada nel fondo oceanico, ma si spostano insieme a esso. Restava un'ipotesi. Per diventare una teoria doveva superare una prova capace di smentirla.

14.4.2 Le anomalie magnetiche: la prova

Negli anni Cinquanta, per scopi in parte militari, le navi avevano cominciato a trainare magnetometri sopra i fondali. Il campo misurato era ora un po' più intenso, ora un po' più debole del valore medio atteso: sono le **anomalie magnetiche**. Disegnate su una carta, formavano lunghe strisce parallele alle dorsali, alternativamente positive e negative, larghe da pochi chilometri a qualche decina.

> **COLLEGAMENTI**
>
> **Storia · La guerra fredda e i fondali.** Molti dati che fondarono la tettonica delle placche furono raccolti per ragioni militari. Le marine degli Stati Uniti e dell'Unione Sovietica avevano bisogno di conoscere i fondali e le proprietà dell'acqua per far navigare e nascondere i sottomarini; i magnetometri trainati derivavano da strumenti costruiti durante la Seconda guerra mondiale per scoprire i sottomarini, e la rete mondiale di sismografi installata nei primi anni Sessanta serviva anche a sorvegliare gli esperimenti nucleari sotterranei. Una parte dei dati restò a lungo riservata (vedi *Storia 5*, cap. 13).

Nel 1963 Frederick Vine e Drummond Matthews, dell'Università di Cambridge, e in modo indipendente il canadese Lawrence Morley, ne diedero la spiegazione. Se il fondo nasce sulla dorsale e si allontana, ogni basalto, raffreddandosi sotto la temperatura di Curie, registra la polarità del campo di quel momento. Quando il campo si inverte, la crosta che si forma da quel momento è magnetizzata in verso opposto. Il fondo oceanico diventa così un nastro magnetico: dove la crosta è magnetizzata come il campo attuale il suo campo si somma a quello terrestre e l'anomalia è positiva; dove è magnetizzata al contrario l'anomalia è negativa. L'ipotesi faceva una previsione rischiosa: le strisce dovevano essere **simmetriche** rispetto all'asse della dorsale, e le loro larghezze dovevano riprodurre, in proporzione, le durate delle epoche della scala delle polarità ricavata sulle lave dei continenti (Figura 14.6).

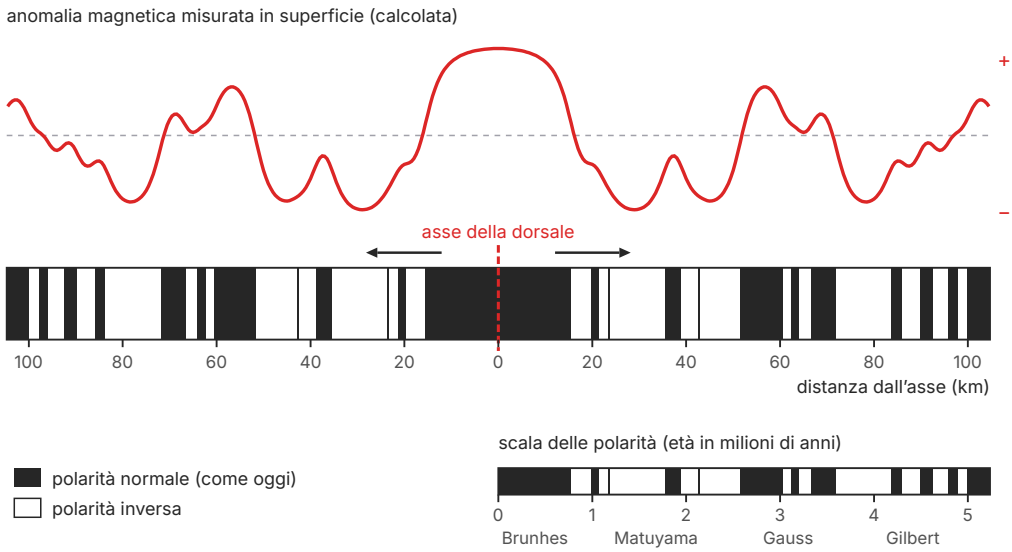


Figura 14.6 Le strisce magnetiche simmetriche di una dorsale. In basso: la scala delle polarità degli ultimi 5,2 milioni di anni (semplificata dalla scala dei tempi geologici GTS2012). Al centro: la crosta oceanica che ne deriva se ciascun lato della dorsale si allontana dall'asse a 2 cm/anno (20 km per milione di anni); in nero la crosta magnetizzata come il campo attuale, in bianco quella magnetizzata in verso inverso. In alto: il profilo dell'anomalia magnetica calcolato con un modello semplificato, in cui la magnetizzazione delle strisce è «sfumata» dalla distanza di 3 km fra la crosta e il sensore (unità arbitrarie). I due lati sono uno l'immagine speculare dell'altro.

Nel 1966 fu pubblicato un profilo registrato dalla nave *Eltanin* sopra la dorsale fra Pacifico e Antartide: mostrava una simmetria quasi perfetta, e la sequenza delle anomalie coincideva con quella delle polarità datate sulle terre emerse. Il fondo oceanico si espande davvero, e le anomalie diventarono uno strumento per datarlo.

ERRORE FREQUENTE

«Le strisce magnetiche si formano perché il campo terrestre si indebolisce e si rafforza». No. Le strisce non registrano variazioni di intensità, ma di **verso**: ogni striscia di crosta si è magnetizzata nel verso che il campo aveva quando quella crosta si è raffreddata, normale o inverso. Né le strisce sono simmetriche per caso: lo sono perché la crosta nata in un certo momento sull'asse si è divisa in due metà, che si sono allontanate verso lati opposti.

14.4.3 Misurare la velocità di espansione

Se si conosce l'età di una striscia dalla scala delle polarità e se ne misura la distanza dall'asse, il rapporto dà la velocità con cui quel lato si è allontanato dalla dorsale, detta *velocità di semiespansione*. Poiché i due lati si allontanano in versi opposti, la velocità con cui si allontanano

l'uno dall'altro, la **velocità di espansione** totale, è il doppio. Le velocità si esprimono di solito in cm/anno; 1 cm/anno equivale a 10 km per milione di anni.

IN SINTESI

Velocità di espansione. $v_{semi} = d / t$, con d distanza della striscia dall'asse e t età della striscia; velocità totale $v = 2\, v_{semi}$. Conversione: 1 cm/anno = 10 km/Ma. **Paleolatitudine.** $\tan I = 2 \tan \lambda$ (dipolo assiale). **Velocità di una placca da una catena di punto caldo.** v = distanza dal punto caldo / età del vulcano.

ESEMPIO SVOLTO

La velocità di una dorsale

Problema. Su un profilo perpendicolare a una dorsale, il limite fra la striscia di Brunhes e quella di Matuyama (0,78 Ma) si trova a 19,5 km dall'asse da entrambi i lati. Calcola la velocità di semiespansione e quella totale, in cm/anno.

Soluzione. $v_{semi} = d / t$ = 19,5 km / 0,78 Ma = 25 km/Ma. Poiché 1 cm/anno = 10 km/Ma, v_{semi} = 2,5 cm/anno. Velocità totale: $v = 2 \times 2{,}5 = 5{,}0$ cm/anno.

Confronto con i dati. La dorsale medio-atlantica si apre in media di circa 2,5 cm/anno in totale ed è una dorsale *lenta*, con una valle di rift profonda; la dorsale del Pacifico orientale, vicino all'isola di Pasqua, supera i 15 cm/anno (fonte: USGS, *This Dynamic Earth*), ed è *veloce*, con una cresta ampia e senza una vera valle. La nostra dorsale sarebbe intermedia.

14.4.4 La conferma delle perforazioni

Restava da verificare l'età dei fondali con campioni diretti. Dal 1968 la nave da perforazione *Glomar Challenger* del Deep Sea Drilling Project, gestito da un consorzio di istituti di ricerca americani (JOIDES), prelevò carote di sedimenti fino alla crosta basaltica in tutti gli oceani. Già nel 1968, in una serie di pozzi attraverso la dorsale dell'Atlantico meridionale, l'età dei sedimenti più antichi, appoggiati sul basalto e datati con i microfossili, risultò crescere in proporzione alla distanza dalla dorsale, come prevedevano le anomalie magnetiche. Da allora i programmi internazionali di perforazione oceanica non hanno trovato fondali oceanici più antichi del Giurassico.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Un modello di carta dell'espansione dei fondali

Obiettivo. Costruire un modello che mostri come nascono strisce magnetiche simmetriche e usarlo per calcolare una velocità di espansione.

Materiali. Due strisce di carta bianca lunghe circa 50 cm e larghe 8 cm; un foglio di cartoncino di formato A4; forbici con punte arrotondate; un pennarello nero; un righello; un cronometro o lo smartphone.

Procedimento. 1) Nel centro del cartoncino pratica una fessura lunga 9 cm: è l'asse della dorsale. 2) Infila insieme le due strisce dal basso nella fessura e ripiegale una a destra e una a sinistra. 3) Un compagno legge la sequenza delle polarità della Figura 14.6, dalla più antica alla più recente, contando un secondo per ogni 0,1 milioni di anni. 4) Tu tiri fuori le strisce, una per lato, a velocità costante (per esempio 1 cm al secondo); durante le epoche normali colori di nero la carta appena uscita, su entrambe le strisce, durante quelle inverse la lasci bianca. 5) Misura la distanza dall'asse dei limiti fra le strisce e confrontala con le età.

Sicurezza. Usa forbici con punte arrotondate e taglia il cartoncino appoggiato sul banco, lontano dalle mani; non tirare la carta di scatto vicino al viso dei compagni.

Risultati attesi. Le due strisce mostrano lo stesso codice a barre, uno l'immagine speculare dell'altro; le strisce più vicine all'asse sono le più giovani. Dividendo la distanza di un limite per la sua età si ritrova la velocità a cui hai tirato la carta, nella scala del modello.

Domande. a) Che cosa rappresentano, nel modello, la fessura, la carta che esce e il pennarello? b) Che cosa succede alle strisce se tiri una striscia più velocemente dell'altra? Esistono dorsali asimmetriche? c) Quale parte del processo naturale il modello non rappresenta? (Pensa alla magnetite e alla temperatura di Curie.)

14.5 La teoria della tettonica delle placche

14.5.1 Placche rigide su un mantello duttile

Fra il 1965 e il 1968 un piccolo gruppo di geofisici, fra cui il canadese J. Tuzo Wilson, gli inglesi Dan McKenzie e Robert Parker, l'americano W. Jason Morgan e il francese Xavier Le Pichon, unì espansione dei fondali, paleomagnetismo e sismologia in una teoria unica, la **tettonica delle placche**. La litosfera è divisa in **placche litosferiche**, grandi lastre rigide spesse da pochi chilometri sotto le dorsali a 100–150 km sotto gli oceani antichi e ancora di più sotto i continenti, che si muovono le une rispetto alle altre scorrendo sull'astenosfera duttile. Una placca può essere tutta oceanica, come la placca pacifica, o comprendere oceano e continente, come la sudamericana, che va dalla dorsale medio-atlantica alle Ande.

Sono le placche, non i continenti, i pezzi del mosaico. Il modello di Peter Bird (2003) distingue 52 placche, ma poche coprono quasi tutta la superficie terrestre: le sette maggiori sono la pacifica, la nordamericana, la sudamericana, l'euroasiatica, l'africana, l'antartica e l'indo-australiana; fra le minori ci sono la placca di Nazca, di Cocos, caraibica, filippina, araba e di Scotia (Figura 14.7).

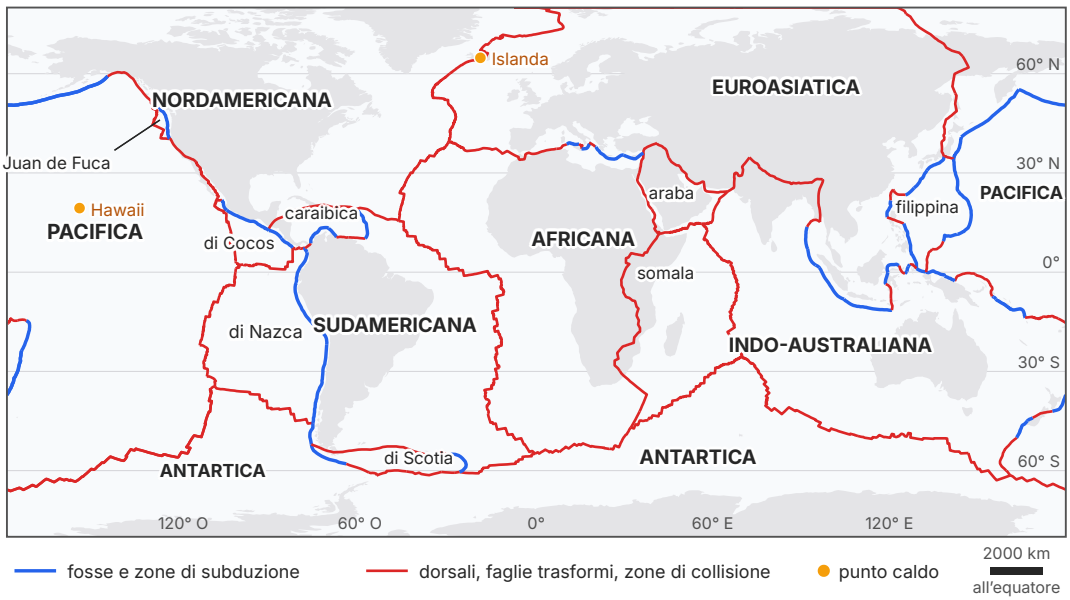


Figura 14.7 Le principali placche litosferiche, semplificate dal modello PB2002 di Bird (2003): molte microplacche sono riunite alle placche vicine, e la placca indiana e quella australiana, che molti modelli recenti separano lungo una larga zona di deformazione, sono indicate insieme come indo-australiana. In blu i margini con subduzione; in rosso, senza distinguerli, tutti gli altri: dorsali, faglie trasformi e zone di collisione. Proiezione equirettangolare, coste Natural Earth.

14.5.2 Tre tipi di margini

All'interno di una placca la deformazione è scarsa; quasi tutta l'attività geologica si concentra nei **margini di placca**, le zone in cui due placche si toccano. In base al moto relativo delle placche se ne distinguono tre tipi.

- Nei **margini divergenti**, o *costruttivi*, le placche si allontanano e si forma nuova litosfera: sono le dorsali oceaniche e, sui continenti, le fosse di rift come quella dell'Africa orientale.
- Nei **margini convergenti**, o *distruttivi*, le placche si avvicinano. Se almeno una è oceanica, questa si piega e scende nel mantello sotto l'altra: è la *subduzione*, segnata in superficie da una fossa. Se si incontrano due continenti, troppo leggeri per sprofondare, si scontrano e si forma una catena come l'Himalaya.

- Nei **margini trasformi**, o *conservativi*, le placche scorrono una accanto all'altra lungo una **faglia trasforme**, una faglia trascorrente che collega due tratti di margine: la litosfera non si crea né si distrugge. La più famosa, la faglia di San Andreas in California, separa la placca pacifica dalla nordamericana.

Le faglie trasformi furono riconosciute da Wilson nel 1965 proprio nei segmenti che spezzano le dorsali: fra due tratti di dorsale sfalsati, le due placche scorrono in versi opposti, e i terremoti avvengono soltanto nel tratto compreso fra le due creste. Con i tre tipi di margine si spiegano finalmente le fasce di vulcani e terremoti descritte lo scorso anno: terremoti poco profondi e vulcanismo basaltico tranquillo sulle dorsali; terremoti fino a centinaia di chilometri di profondità e vulcani esplosivi sopra le zone di subduzione; terremoti superficiali e niente vulcani lungo le faglie trasformi. La struttura dei margini, l'origine delle catene montuose e la geologia dell'Italia sono l'argomento del capitolo 15.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> **«Le placche galleggiano su un mare di magma».** No. L'astenosfera è **solida**: le onde S la attraversano. È soltanto abbastanza calda da deformarsi lentamente in modo duttile, di pochi centimetri all'anno, come un solido plastico; contiene al più una piccolissima frazione di fuso. Il magma si forma solo in punti particolari, quando le rocce del mantello risalgono e si decomprimono, ricevono acqua o si scaldano. E le placche non coincidono con i continenti: la placca africana, per esempio, comprende anche metà dell'Atlantico meridionale.

14.5.3 Il motore delle placche

Il mantello trasporta verso l'alto il calore interno della Terra con la convezione: le rocce più calde, e quindi meno dense, risalgono lentamente, quelle più fredde scendono, con velocità di pochi centimetri all'anno. Le placche sono la parte superiore, fredda e rigida, di questo sistema convettivo. Ma quali forze le spingono? Due contributi principali sono legati alle placche stesse.

Nelle zone di subduzione la litosfera oceanica vecchia, fredda e più densa del mantello circostante, sprofonda per il proprio peso e tira con sé il resto della placca: è la **trazione della placca** (in inglese *slab pull*). Sulle dorsali la litosfera giovane, rialzata perché calda, scivola verso i lati lungo il proprio pendio: è la **spinta dalla dorsale** (*ridge push*). Secondo la maggior parte dei modelli la trazione della placca è la forza più importante: le placche con un lungo margine in subduzione, come la pacifica, la placca di Nazca o quella di Cocos, si muovono a velocità di circa 5–10 cm/anno, mentre quelle quasi prive di margini in subduzione, come l'euroasiatica, si spostano di circa 1–2 cm/anno. La convezione del mantello resta il quadro generale, ma non è un nastro trasportatore che porta passivamente le placche: le placche ne sono una parte attiva.

14.5.4 I punti caldi

Alcuni vulcani si trovano lontano da qualunque margine. Le isole Hawaii, per esempio, sono al centro della placca pacifica, a più di 3000 km dal margine più vicino. Nel 1963 Wilson notò che le isole e le montagne sottomarine della catena delle Hawaii diventano più vecchie allontanandosi verso nord-ovest dall'isola di Hawaii, dove si trovano i vulcani attivi della catena, come il Kilauea, insieme al vulcano sottomarino Kama'ehuakanaloa (un tempo chiamato Loihi). Propose che sotto la catena ci sia un **punto caldo**, una zona del mantello più calda che alimenta il vulcanismo in un punto relativamente fisso, mentre la placca gli scorre sopra: ogni vulcano nasce sopra il punto caldo, poi viene trasportato via e si spegne, e al suo posto ne nasce un altro. Nel 1971 Morgan propose che i punti caldi siano alimentati da **pennacchi** di mantello caldo che salgono da grande profondità, forse dal limite fra mantello e nucleo: è ancora oggi l'ipotesi più diffusa, anche se l'origine profonda dei pennacchi è discussa.

Tabella 14.1 Distanza lungo la catena dal vulcano Kilauea ed età di alcuni vulcani della catena Hawaii–Imperatore (età K–Ar; Clague e Dalrymple, 1987, USGS Professional Paper 1350). Le età di Daikakuji e Suiko, nella parte settentrionale, sono state in parte riviste da datazioni più recenti.

Vulcano	Posizione	Distanza (km)	Età (Ma)
Kilauea	isola di Hawaii	0	attivo
Waianae	isola di Oahu	374	3,7
Kauai	isola di Kauai	519	5,1
Nihoa	isole Hawaii nord-occidentali	780	7,2
Necker	isole Hawaii nord-occidentali	1058	10,3
Midway	atollo	2432	27,7
Daikakuji	montagna sottomarina, presso la curva	3493	42,4
Suiko (parte centrale)	catena dell'Imperatore	4860	64,7

ESEMPIO SVOLTO

La velocità della placca pacifica

Problema. Usa i dati della Tabella 14.1 per calcolare la velocità media della placca pacifica rispetto al punto caldo delle Hawaii negli ultimi 5 milioni di anni e negli ultimi 28 milioni di anni.

Soluzione. Kauai si trova a 519 km dal Kilauea e ha 5,1 Ma: v = 519 km / 5,1 Ma ≈ 102 km/Ma ≈ 10 cm/anno. Midway si trova a 2432 km e ha 27,7 Ma: v = 2432 km / 27,7 Ma ≈ 88 km/Ma ≈ 9 cm/anno.

Commento. I due valori sono vicini: la placca si è mossa verso nord-ovest a una velocità quasi costante, di circa 9–10 cm/anno. Oltre Daikakuji la catena cambia direzione e prosegue verso nord con la catena dell'Imperatore: la curva, formata circa 47–50 milioni di anni fa secondo le datazioni più recenti, registra un cambiamento del moto della placca e, secondo studi paleomagnetici, anche uno spostamento del punto caldo stesso.

A seconda dei criteri usati, i geologi riconoscono da alcune decine a più di cento punti caldi, fra cui quelli di Yellowstone, delle Canarie, delle Galápagos e della Riunione. L'Islanda si trova su un punto caldo posto proprio sotto la dorsale medio-atlantica: per questo è un tratto di dorsale emerso, con un vulcanismo molto più abbondante che nel resto della dorsale. Poiché i punti caldi si muovono molto più lentamente delle placche, le catene di vulcani che lasciano sono un sistema di riferimento per misurare il moto assoluto delle placche.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · I moti sulla sfera e il polo di Eulero. Una placca rigida non si muove in linea retta, perché si trova su una sfera. Un teorema di Eulero dice che ogni spostamento di un corpo rigido su una sfera equivale a una rotazione attorno a un asse che passa per il centro: l'asse incontra la superficie nel **polo di Eulero** del moto di due placche. Se due placche ruotano l'una rispetto all'altra con velocità angolare ω, un punto a distanza angolare Δ dal polo di Eulero si muove con velocità $v = \omega \cdot R \cdot \sin \Delta$, dove R = 6371 km è il raggio terrestre: la velocità è nulla al polo e massima a 90° da esso. Per questo la velocità di espansione di una dorsale cambia lungo il suo percorso, e le faglie trasformi sono archi di cerchi centrati sul polo di Eulero: con questa geometria McKenzie, Parker e Morgan dimostrarono che le placche si comportano come corpi rigidi.

14.5.5 Misurare oggi il movimento

Le velocità ricavate dalle anomalie e dai punti caldi sono medie su milioni di anni; oggi le placche si misurano in diretta con i sistemi di posizionamento satellitare (GNSS, di cui il GPS è il più noto), che con stazioni fisse localizzano un punto al millimetro, e con l'interferometria

radio a base molto lunga (VLBI), che misura la distanza fra radiotelescopi lontani osservando le stesse radiosorgenti dell'universo. Le misure, raccolte da decenni, danno velocità di pochi centimetri all'anno, più o meno quanto crescono le unghie, in accordo con le velocità medie dei milioni di anni precedenti. La deriva dei continenti, che Wegener non poteva misurare, è oggi un dato di osservazione.

COLLEGAMENTI

Filosofia · Una rivoluzione scientifica. La storia di questo capitolo è uno degli esempi preferiti dagli storici della scienza. Nella *Struttura delle rivoluzioni scientifiche* (1962), uscita lo stesso anno dell'articolo di Hess, Thomas Kuhn descrive la scienza normale, che lavora entro un paradigma condiviso, le anomalie che si accumulano, la crisi e la rivoluzione che instaura un nuovo paradigma (vedi *Filosofia 5*, cap. 11). Il fissismo fu a lungo il paradigma; i dati paleomagnetici e oceanografici furono le anomalie; in pochi anni, fra il 1963 e il 1968, la comunità dei geologi cambiò modo di vedere la Terra. Si può leggere la stessa storia anche con Karl Popper: l'ipotesi di Vine e Matthews faceva una previsione che poteva essere smentita, le strisce simmetriche, e superò la prova.

SINTESI

- Il fissismo considerava continenti e oceani immobili; il mobilismo sostiene che i continenti si sono spostati. Wegener (1912, 1915) propose la deriva dei continenti da un supercontinente, Pangea, che si sarebbe frammentato dopo il Paleozoico.
- Le prove di Wegener: l'incastro dei continenti al bordo della scarpata (confermato nel 1965 da Bullard), i fossili di *Mesosaurus*, *Glossopteris*, *Lystrosaurus* e *Cynognathus*, la continuità di rocce e catene, i paleoclimi (depositi glaciali di Gondwana, carbone nelle regioni oggi temperate).
- La deriva fu respinta perché il meccanismo proposto era impossibile; Holmes (1928) suggerì la convezione del mantello.
- Lo studio dei fondali rivelò le dorsali oceaniche con la valle di rift (circa 65 000 km in tutto) e le fosse; il flusso di calore è massimo sulle dorsali, i sedimenti si ispessiscono e la profondità cresce allontanandosi da esse; il fondo oceanico più antico ha circa 180 Ma.
- Le lave si magnetizzano raffreddandosi sotto la temperatura di Curie (circa 580 °C per la magnetite): la magnetizzazione residua registra direzione e inclinazione del campo, da cui la paleolatitudine ($\tan I = 2 \tan \lambda$).
- Il campo terrestre si è invertito molte volte (l'ultima volta circa 780 000 anni fa); le epoche datate formano la scala delle polarità magnetiche.
- Le curve di migrazione apparente dei poli di Europa e Nord America coincidono solo richiudendo l'Atlantico: si sono mossi i continenti, non il polo.
- Hess (1962) propose l'espansione dei fondali oceanici: la litosfera nasce sulle dorsali, si allontana, si raffredda e torna nel mantello nelle fosse.
- Le anomalie magnetiche simmetriche (Vine e Matthews, Morley, 1963) e le perforazioni oceaniche (dal 1968) confermarono l'espansione e permettono di calcolare la velocità: $v_{\text{semi}} = d/t$, da circa 2,5 cm/anno (dorsale atlantica, totale) a oltre 15 cm/anno.
- La tettonica delle placche (1965–1968) divide la litosfera in placche rigide che si muovono sull'astenosfera solida e duttile, con margini divergenti, convergenti e trasformi.
- Il motore è la convezione del mantello, di cui le placche fanno parte; secondo la maggior parte dei modelli la forza principale è la trazione della placca in subduzione, insieme alla spinta dalla dorsale.
- I punti caldi, relativamente fissi, producono catene di vulcani di età crescente nel verso del moto della placca (Hawaii: circa 9–10 cm/anno); oggi GNSS e VLBI misurano direttamente velocità di pochi centimetri all'anno.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● L'obiezione principale che i geofisici rivolsero a Wegener fu che:
   - **A.** i continenti non hanno forme che combaciano
   - **B.** gli stessi fossili non si trovano su continenti diversi
   - **C.** le forze che egli proponeva erano troppo deboli per muovere i continenti attraverso il fondo oceanico
   - **D.** non esistono depositi glaciali antichi nei continenti meridionali

2. ● I fossili di *Mesosaurus* sono un argomento a favore della deriva perché:
   - **A.** era un rettile d'acqua dolce che non poteva attraversare un oceano, ma si trova in Sud America e in Africa
   - **B.** era un rettile marino diffuso in tutti gli oceani
   - **C.** è vissuto solo in Antartide
   - **D.** è un organismo attuale

3. ● La temperatura di Curie è la temperatura:
   - **A.** a cui fonde una lava basaltica
   - **B.** a cui il campo magnetico terrestre si inverte
   - **C.** del limite fra litosfera e astenosfera
   - **D.** al di sopra della quale un minerale ferromagnetico perde la magnetizzazione permanente

4. ● Il fondo oceanico più antico ancora presente negli oceani ha un'età di circa:
   - **A.** 4 miliardi di anni
   - **B.** 180 milioni di anni
   - **C.** 20 milioni di anni
   - **D.** 780 000 anni

5. ●● Allontanandosi da una dorsale oceanica verso una fossa, che cosa accade?
   - **A.** il flusso di calore aumenta e i sedimenti si assottigliano
   - **B.** l'età del fondo diminuisce e la profondità aumenta
   - **C.** l'età del fondo, lo spessore dei sedimenti e la profondità aumentano
   - **D.** la profondità diminuisce perché la litosfera si scalda

6. ●● Una lava che si è solidificata all'equatore magnetico registra un'inclinazione:
   - **A.** nulla
   - **B.** di 45°
   - **C.** di 90°, verso il basso
   - **D.** uguale alla sua latitudine attuale

7. ●● In un margine trasforme:
   A. si forma nuova litosfera
   B. la litosfera oceanica scende nel mantello
   C. si scontrano due continenti
   D. due placche scorrono l'una accanto all'altra, senza creare né distruggere litosfera

8. ●● Nella catena delle Hawaii le età dei vulcani crescono verso nord-ovest. Questo indica che:
   A. la placca pacifica si muove verso sud-est rispetto al punto caldo
   B. la placca pacifica si muove verso nord-ovest rispetto al punto caldo
   C. il punto caldo si sposta verso nord-ovest più velocemente della placca
   D. i vulcani più vecchi sono quelli più vicini al punto caldo

9. ●●● Quale osservazione sostiene meglio l'idea che la trazione della placca sia la forza principale?
   A. le dorsali sono più alte delle pianure abissali
   B. l'astenosfera è solida
   C. le placche con lunghi margini in subduzione sono le più veloci
   D. i punti caldi si trovano spesso lontano dai margini

Vero o falso

10. ● Wegener propose la teoria della tettonica delle placche.

11. ● L'astenosfera è solida, ma abbastanza calda e duttile da permettere alla litosfera di muoversi sopra di essa.

12. ●● Le anomalie magnetiche dei due lati di una dorsale sono una l'immagine speculare dell'altra.

13. ●● La costa atlantica del Sud America non è un margine di placca.

14. ●● Le rocce europee di 200 milioni di anni fa danno un polo paleomagnetico diverso da quello attuale perché il polo geografico si è spostato.

15. ●●● I punti caldi sono assolutamente immobili rispetto al centro della Terra.

Applicare

16. ● Su un profilo magnetico il limite fra le strisce di Brunhes e di Matuyama (0,78 Ma) si trova a 39 km dall'asse della dorsale. Calcola la velocità di semiespansione e la velocità totale, in cm/anno. La dorsale è lenta o veloce?

17. ●● Un basalto di 260 milioni di anni fa, oggi in Sudafrica, ha una magnetizzazione residua con inclinazione di 70° verso l'alto, nel verso del nord di allora. Calcola la paleolatitudine e indica l'emisfero.

18. ●● Usa la Tabella 14.1. a) Calcola la velocità media della placca pacifica fra il Kilauea e Necker, in cm/anno. b) Quanti anni impiega la placca a spostarsi di 1 km?

19. ●● Una stazione GNSS si allontana da un'altra di 2,5 cm/anno. a) Di quanti metri cresce la loro distanza in 1000 anni? b) In quanti milioni di anni crescerebbe di 100 km, se la velocità restasse costante?

20. ●● Con la relazione della Figura 14.3 (d = 2500 m + 350 m · $\sqrt{t}$, t in Ma): a) quanto è profondo un fondale di 25 Ma? b) Quanti anni ha un fondale profondo 4600 m?

21. ●●● Supponi che, a una certa latitudine, il fondo oceanico fra le scarpate del Sud America e dell'Africa sia largo 5800 km e che l'oceano abbia cominciato ad aprirsi 130 milioni di anni fa. Calcola la velocità media di espansione totale e confrontala con quella attuale della dorsale medio-atlantica (circa 2,5 cm/anno).

22. ●●● Su un profilo perpendicolare a una dorsale, l'inizio dell'epoca di Gauss (2,58 Ma) si trova a 64,5 km dall'asse sul lato ovest e a 52 km sul lato est. Calcola le due velocità di semiespansione e la velocità totale. Che cosa significa la differenza?

Leggere dati e figure

23. ● Osserva la Figura 14.1. a) Perché l'incastro si cerca sul bordo della scarpata e non sulla linea di costa? b) Indica un tratto in cui le isobate dei due continenti si sovrappongono e uno in cui resta un vuoto. c) Perché un incastro perfetto non è possibile?

24. ●● Riporta in un grafico i dati della Tabella 14.1, con la distanza in ascissa e l'età in ordinata. a) I punti fino a Midway stanno su una retta? Che cosa rappresenta l'inverso della sua pendenza? b) Che cosa può indicare il cambiamento di direzione della catena dopo Daikakuji?

25. ●● Nella Figura 14.6 leggi a che distanza dall'asse comincia, da ciascun lato, l'epoca di Gauss (2,58 Ma) e ricava la velocità di semiespansione usata nel modello. Verifica poi che lo stesso valore si ottiene con il limite fra Brunhes e Matuyama.

26. ●●● Osserva la Figura 14.3. a) Leggi la profondità del fondale a 0 Ma e a 50 Ma. b) Perché la litosfera oceanica si approfondisce invecchiando? Usa i concetti di raffreddamento, densità e isostasia. c) Perché in b) la litosfera è più spessa vicino alla fossa che vicino alla dorsale?

Indagare e argomentare

27. ●● Wegener presentò la deriva dei continenti nel 1912, ma la teoria fu accettata solo alla fine degli anni Sessanta. Ricostruisci i motivi del rifiuto e quelli dell'accettazione: che cosa mancava a Wegener e quali dati nuovi arrivarono? Usa almeno quattro date del capitolo.

28. ●●● Progetta un esperimento, eseguito dall'insegnante, per mostrare che un ago d'acciaio magnetizzato perde la magnetizzazione se viene scaldato oltre una certa temperatura e che, raffreddandosi vicino a un magnete, si magnetizza di nuovo. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, le variabili da controllare, il controllo e le norme di sicurezza, e collega il risultato alla magnetizzazione delle lave.

29. ●●● Sui continenti si trovano rocce di oltre 4 miliardi di anni, negli oceani nessun fondale più antico di circa 180 milioni di anni. Spiega questa differenza con la tettonica delle placche, e spiega perché, al contrario, l'Islanda è insieme un tratto emerso di dorsale e un'isola con un vulcanismo eccezionale.

Verso l'esame

30. ●●● **Dal documento al colloquio.** Leggi il passo, tratto dalla seconda edizione (1920) di *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* di Alfred Wegener (traduzione nostra). Wegener ha elencato sei corrispondenze fra le due sponde dell'Atlantico, dalle morene glaciali alle catene del Capo e di Buenos Aires. *«Supponiamo, per farci un'idea degli ordini di grandezza, che, alla distanza attuale fra le due coste, come luogo della prosecuzione [di una catena piegata] entri in considerazione un tratto di 2000 km della costa opposta, e che tutti i segmenti di 200 km di questo tratto abbiano la stessa probabilità. Allora la probabilità che la prosecuzione della piega si trovi per caso proprio nel segmento che la ricostruzione porta a contatto con l'estremità della piega di qua è 1/10 […]. Ma se questo "caso" deve verificarsi contemporaneamente in più punti, l'improbabilità si eleva a potenza. […] la probabilità che qui ci inganni il caso è $(1/10)^6$, cioè 1 : 1 000 000.»* a) Spiega con le regole della probabilità (Matematica) perché le probabilità si moltiplicano e quale ipotesi richiede questo calcolo. b) Quali corrispondenze di questo capitolo potrebbero essere sei «prove» indipendenti? c) Perché un argomento così forte non convinse i geologi del suo tempo? d) Collega il caso alla Filosofia: è un argomento che conferma una teoria nel senso di Popper?

31. ●●● **Collegare.** In *Scienze naturali 4*, cap. 16, hai studiato la distribuzione di vulcani e terremoti in tre grandi fasce, l'isostasia e l'orogenesi come fenomeno. Spiega come la tettonica delle placche rende conto di ciascuno di questi fatti, indicando per ogni fascia il tipo di margine, il tipo di vulcanismo e la profondità dei terremoti. Concludi con una domanda che resta aperta e che il capitolo 15 affronta.

Approfondimento

32. ●●● Due placche ruotano l'una rispetto all'altra a 0,25° per milione di anni. Calcola, in cm/anno, la velocità relativa di un punto del loro margine a 90°, a 60° e a 30° di distanza angolare dal polo di Eulero (R = 6371 km).

PER APPROFONDIRE

- [WEG] A. Wegener, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*: il libro della deriva dei continenti, in quattro edizioni (1915–1929); la seconda (1920) è leggibile liberamente in rete, nel tedesco originale.
- [GRO] J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Understanding Earth*: i capitoli sulla tettonica delle placche, con le carte delle anomalie magnetiche, dell'età dei fondali e delle velocità delle placche.
- [KEA] P. Kearey, K. A. Klepeis, F. J. Vine, *Global Tectonics*: per chi vuole approfondire il paleomagnetismo, le rotazioni sulla sfera e le forze che muovono le placche, in un testo universitario scritto anche da uno dei protagonisti della scoperta.

Glossario del capitolo

Anomalia magnetica
Differenza fra il campo magnetico misurato in un punto e il valore medio atteso; sui fondali oceanici forma strisce simmetriche rispetto alle dorsali (ingl. *magnetic anomaly*).

Deriva dei continenti
Ipotesi di Wegener (1912) secondo cui i continenti, un tempo riuniti in Pangea, si sono spostati fino alle posizioni attuali (ingl. *continental drift*).

Dorsale oceanica
Catena montuosa sottomarina, lunga in tutto circa 65 000 km, dove le placche divergono e si forma nuova litosfera oceanica (ingl. *mid-ocean ridge*).

Espansione dei fondali oceanici
Processo per cui la litosfera oceanica si forma sulle dorsali e se ne allontana simmetricamente (ingl. *seafloor spreading*).

Faglia trasforme
Faglia trascorrente che collega due tratti di margine di placca, lungo la quale le placche scorrono senza creare né distruggere litosfera (ingl. *transform fault*).

Fossa oceanica
Depressione stretta e lunga del fondo oceanico, profonda fino a oltre 10 km, dove una placca scende nel mantello (ingl. *ocean trench*).

Inversione di polarità
Scambio dei poli nord e sud del campo magnetico terrestre, avvenuto molte volte nella storia della Terra (ingl. *geomagnetic reversal*).

Magnetizzazione residua
Magnetizzazione permanente acquisita da una roccia quando si forma, che registra direzione e verso del campo terrestre di allora (ingl. *remanent magnetization*).

Margine di placca
Zona di contatto fra due placche: divergente, convergente o trasforme (ingl. *plate boundary*).

Migrazione apparente dei poli
Spostamento nel tempo dei poli paleomagnetici calcolati dalle rocce di un continente, dovuto al moto del continente e non del polo (ingl. *apparent polar wander*).

Paleomagnetismo
Studio del campo magnetico terrestre del passato registrato nelle rocce (ingl. *palaeomagnetism*).

Pangea
Supercontinente che riuniva tutte le terre emerse alla fine del Paleozoico e cominciò a frammentarsi nel Mesozoico (ingl. *Pangaea*).

Placca litosferica
Porzione rigida della litosfera, oceanica o continentale e oceanica insieme, che si muove rispetto alle altre sull'astenosfera (ingl. *lithospheric plate*).

Punto caldo
Zona di vulcanismo intenso alimentata da mantello più caldo, relativamente fissa, sopra la quale scorre una placca (ingl. *hotspot*).

Scala delle polarità magnetiche
Successione datata delle epoche di polarità normale e inversa del campo magnetico terrestre (ingl. *geomagnetic polarity time scale*).

Temperatura di Curie
Temperatura al di sopra della quale un materiale ferromagnetico perde la magnetizzazione permanente; circa 580 °C per la magnetite (ingl. *Curie temperature*).

Tettonica delle placche
Teoria (1965–1968) secondo cui la litosfera è divisa in placche rigide che si muovono, interagendo lungo i margini (ingl. *plate tectonics*).

Trazione della placca
Forza dovuta al peso della litosfera fredda e densa che sprofonda in una zona di subduzione e tira il resto della placca (ingl. *slab pull*).

Soluzioni

1. C. Wegener proponeva forze legate alla rotazione terrestre e alle maree, molti ordini di grandezza troppo deboli; e un continente non può farsi strada attraverso la crosta oceanica rigida.

2. A. Un rettile d'acqua dolce o salmastra non poteva attraversare migliaia di chilometri di oceano: le due popolazioni dovevano vivere su terre unite.

3. D. Sopra la temperatura di Curie (circa 580 °C per la magnetite) l'agitazione termica distrugge l'allineamento dei domini; il magnetismo permanente si fissa solo raffreddandosi sotto di essa.

4. B. Il fondo oceanico più antico ancora presente è del Giurassico, circa 180 Ma; 4 miliardi di anni è l'età delle rocce continentali più antiche.

5. C. Il fondo invecchia allontanandosi dalla dorsale: si raffredda, diventa più denso e si approfondisce, e accumula sedimenti per più tempo; il flusso di calore diminuisce.

6. A. All'equatore le linee del campo di un dipolo sono parallele alla superficie: $\tan I = 2 \tan 0° = 0$.

7. D. Lungo una faglia trasforme le placche scorrono orizzontalmente; la litosfera si conserva (margine conservativo).

8. B. Ogni vulcano nasce sopra il punto caldo e la placca lo trasporta via: i vulcani più lontani, a nord-ovest, sono i più vecchi, quindi la placca si muove verso nord-ovest.

9. C. Se a muovere le placche fosse soprattutto la spinta dalle dorsali o il trascinamento del mantello, la velocità non dipenderebbe dalla lunghezza dei margini in subduzione; invece le placche pacifica, di Nazca e di Cocos, con lunghe zone di subduzione, sono le più veloci.

10. F. Wegener propose la deriva dei *continenti* attraverso un fondo oceanico fisso; la tettonica delle placche (1965–1968) riguarda placche di litosfera che comprendono anche i fondali, i quali nascono e scompaiono.

11. V. L'astenosfera è solida (la attraversano le onde S), ma calda e duttile; contiene al più una piccolissima frazione di fuso. Non è quindi un oceano liquido su cui la litosfera «galleggia».

12. V. La crosta formata in un certo momento sull'asse si divide in due metà che si allontanano in versi opposti, quindi le strisce e le anomalie sono simmetriche.

13. V. I margini delle placche non coincidono con le coste: la placca sudamericana comprende anche metà dell'Atlantico meridionale, fino alla dorsale, e la costa atlantica del Sud America è interna alla placca.

14. F. Il polo magnetico, mediato su migliaia di anni, coincide con quello geografico; il polo «diverso» è il segno che l'Europa si è spostata e ruotata rispetto al polo (migrazione apparente).

15. F. I punti caldi sono *relativamente* fissi: si spostano molto più lentamente delle placche, ma si spostano; la curva della catena Hawaii–Imperatore registra in parte anche un moto del punto caldo.

16. v_{semi} = 39 km / 0,78 Ma = 50 km/Ma = 5,0 cm/anno; velocità totale 10 cm/anno. È una dorsale veloce, come quelle del Pacifico orientale.

17. $\tan \lambda = \tan(-70°)/2 = -2{,}747/2 = -1{,}374$, quindi $\lambda \approx -54°$: circa 54° S. L'inclinazione verso l'alto indica l'emisfero australe: una latitudine alta, come quella di gran parte di Gondwana nella Figura 14.2.

18. a) v = 1058 km / 10,3 Ma ≈ 103 km/Ma ≈ 10 cm/anno. b) 1 km / (103 km/Ma) ≈ 0,0097 Ma ≈ 9700 anni, cioè circa 10 000 anni.

19. a) 2,5 cm/anno × 1000 anni = 2500 cm = 25 m. b) 100 km = 10^7 cm; 10^7 cm / 2,5 cm/anno = 4×10^6 anni = 4 Ma.

20. a) d = 2500 m + 350 m × √25 = 2500 m + 1750 m = 4250 m. b) $\sqrt{t}$ = (4600 − 2500)/350 = 6, quindi t = 36 Ma.

21. v = 5800 km / 130 Ma ≈ 45 km/Ma ≈ 4,5 cm/anno (velocità totale media). È poco meno del doppio della velocità attuale della dorsale medio-atlantica: la velocità di espansione è cambiata nel tempo (in parte anche lungo la dorsale, a latitudini diverse).

22. Ovest: 64,5 km / 2,58 Ma = 25 km/Ma = 2,5 cm/anno; est: 52 km / 2,58 Ma ≈ 20 km/Ma = 2,0 cm/anno; totale circa 4,5 cm/anno. La dorsale è asimmetrica: ha prodotto più crosta su un lato, oppure si è spostata nel tempo (salti dell'asse); le dorsali reali sono spesso un po' asimmetriche.

23. a) La costa dipende dal livello del mare, che è cambiato molto; il vero margine del continente, cioè il limite fra crosta continentale e oceanica, è vicino al bordo della scarpata. b) Per esempio, le isobate si incrociano e si sovrappongono nel golfo di Guinea, dove dopo la separazione si è formato il delta del Niger, e lasciano piccoli vuoti nel tratto meridionale, fra l'Argentina e il Sudafrica; altre risposte sono accettabili se lette sulla figura. c) Dopo la separazione i margini sono stati modificati da sedimenti (delta del Niger), da vulcanismo (dorsale di Walvis, rilievi presso Trindade) e dall'assottigliamento della crosta; inoltre i continenti non sono perfettamente rigidi. Bullard trovò uno scarto medio di circa 90 km.

24. a) Sì, fino a Midway i punti sono quasi allineati: la pendenza (età/distanza) è il tempo per chilometro, il suo inverso (distanza/età) è la velocità della placca, circa 9–10 cm/anno. b) Il cambiamento di direzione indica che circa 47–50 milioni di anni fa la placca pacifica cambiò direzione di moto e/o che il punto caldo si spostava; le età K–Ar della tabella danno circa 42 Ma.

25. Il limite dell'epoca di Gauss è a circa 52 km da ciascun lato: 52 km / 2,58 Ma ≈ 20 km/Ma = 2,0 cm/anno. Il limite Brunhes–Matuyama è a circa 16 km: 15,6 km / 0,78 Ma = 20 km/Ma; i valori coincidono.

26. a) Circa 2,5 km a 0 Ma; a 50 Ma d = 2500 + 350 √50 ≈ 4975 m, circa 5 km. b) Allontanandosi dalla dorsale la litosfera si raffredda, si contrae e diventa più densa; per l'isostasia una colonna più densa affonda di più nell'astenosfera, quindi il fondale si abbassa (e su di esso si accumula più acqua). c) Raffreddandosi dall'alto, la litosfera fa «crescere» verso il basso lo strato rigido: lo spessore aumenta come la radice quadrata dell'età, ed è massimo sulla litosfera più vecchia, vicino alla fossa.

27. Traccia: 1912 e 1915 (Wegener), prove varie ma meccanismo sbagliato (forze troppo deboli, continenti che «navigano» nella crosta oceanica); 1926 (convegno di New York, rifiuto); 1928 (Holmes, convezione, pubblicata nel 1931, senza dati); anni Cinquanta (ecoscandagli, Tharp e Heezen, valle di rift, 1952 e 1957; paleomagnetismo e curve di migrazione dei poli); 1962 (Hess, espansione); 1963 (Vine e Matthews, Morley); 1966 (profilo dell'*Eltanin*); 1965–1968 (faglie trasformi, placche rigide); 1968 (perforazioni). Mancavano i dati sui fondali e un meccanismo fisicamente possibile; arrivarono strumenti nuovi, in parte sviluppati per scopi militari.

28. Traccia: variabile indipendente: la temperatura raggiunta dall'ago (o la sua assenza di riscaldamento); variabile dipendente: la magnetizzazione, misurata dalla capacità di attrarre piccoli spilli o dalla deviazione di una bussola posta a distanza fissa. Variabili da controllare: tipo e dimensioni dell'ago, modo di magnetizzarlo (stesso numero di sfregamenti con lo stesso magnete), distanza dalla bussola, tempo di riscaldamento. Controllo: un ago identico magnetizzato ma non scaldato. L'insegnante scalda l'ago tenendolo con una pinza nella fiamma di un becco Bunsen fino al rosso, lontano da sostanze infiammabili, con occhiali di protezione, e lo lascia raffreddare su una piastra resistente al calore; gli studenti non toccano l'ago finché non è freddo. Risultato atteso: l'ago scaldato perde la magnetizzazione; se si raffredda vicino a un magnete si rimagnetizza secondo il campo del magnete, come una lava che si raffredda sotto la temperatura di Curie nel campo terrestre.

29. Traccia: la litosfera oceanica nasce sulle dorsali e, raffreddandosi, diventa abbastanza densa da tornare nel mantello nelle zone di subduzione: il fondo

oceanico viene continuamente rinnovato, e il più antico ha circa 180 Ma. La litosfera continentale è troppo leggera per essere subdotta e conserva rocce di oltre 4 Ga. L'Islanda si trova sulla dorsale medio-atlantica, dove le placche nordamericana ed euroasiatica divergono (valle di rift, faglie dirette, vulcanismo basaltico), ma anche sopra un punto caldo, che fornisce molto più magma della norma: per questo la dorsale emerge e il vulcanismo è eccezionalmente abbondante.

30. Traccia: a) eventi indipendenti: la probabilità che si verifichino tutti è il prodotto delle probabilità ($1/10 \times 1/10 \times \ldots = (1/10)^6$); il calcolo richiede che le sei corrispondenze siano davvero indipendenti e che ogni segmento sia equiprobabile, ipotesi discutibili. b) La forma dei margini, le catene della Sierra de la Ventana e del Capo, Appalachi e Caledonidi, i depositi glaciali, i fossili di *Mesosaurus* e *Glossopteris*. c) Mancava un meccanismo fisicamente possibile, e la spiegazione alternativa dei ponti continentali sembrava sufficiente; il paradigma fissista dominava (Kuhn). d) Popper: le conferme non dimostrano una teoria; conta la capacità di superare prove che potrebbero smentirla. La prova rischiosa venne con le anomalie simmetriche (1963–1966).

31. Traccia: cintura circumpacifica: margini convergenti con subduzione (fosse, archi vulcanici, Ande), vulcani esplosivi andesitici, terremoti da superficiali a profondi fino a circa 700 km lungo la placca che scende. Cintura mediterraneo-himalayana: convergenza fra Africa, Arabia, India ed Eurasia, con collisione continentale (Himalaya, Alpi) e subduzioni (Egeo, arco calabro), terremoti superficiali e intermedi, vulcanismo dove c'è subduzione. Dorsali: margini divergenti, vulcanismo basaltico effusivo e terremoti poco profondi; terremoti superficiali anche lungo le faglie trasformi. Isostasia: la litosfera ispessita nelle collisioni ha radici profonde e si solleva. Orogenesi: le catene nascono dove le placche convergono. Domanda aperta: come si è formata la complessa geologia dell'Italia, con Alpi, Appennini e Tirreno (vedi il capitolo 15).

32. $\omega = 0{,}25°/\text{Ma} = 0{,}25 \times \pi/180\ \text{rad/Ma} \approx 4{,}36 \times 10^{-3}$ rad/Ma; $\omega R \approx 4{,}36 \times 10^{-3} \times 6371$ km $\approx 27{,}8$ km/Ma. A 90°: 27,8 km/Ma ≈ 2,8 cm/anno; a 60°: $27{,}8 \times \sin 60° \approx$ 24,1 km/Ma ≈ 2,4 cm/anno; a 30°: $27{,}8 \times 0{,}5 \approx 13{,}9$ km/Ma ≈ 1,4 cm/anno.