

CONTINENTI ALLA DERIVA

(LA "TETTONICA DELLE ZOLLE")

Oltre 500 milioni di anni fa, la crosta terrestre si è frantumata in decine di giganteschi blocchi che - da allora - vanno alla deriva su un mare di magma infuocato.

Le prove? La più evidente è la lava che esce, costantemente, dalle fratture presenti sul fondo degli oceani.

La "tettonica delle zolle" è la scienza che studia i lentissimi movimenti di questi blocchi (detti appunto "zolle", o "placche"), in seguito ai quali nascono catene montuose e nuovi oceani, ma si scatenano anche vulcani e terremoti.

Questi movimenti, come si vede nei disegni a destra, hanno profondamente modificato, nel corso delle ere, la faccia stessa della Terra.

A cura di Luigi Bignami



L'era delle isole

500 milioni di anni fa, nel Cambriano, la superficie emersa era spezzettata in tanti mini-continenti.



Comincia l'aggregazione

420 milioni di anni fa, nel periodo detto Siluriano, i continenti erano già molto più vicini.



Il continente unico

240 milioni di anni fa si era ormai arrivati al continente unico, la Pangea... che però non sarebbe durato a lungo.



La situazione odierna

Oggi le placche continuano a muoversi: Africa e Sud America si allontanano e il Mediterraneo sparirà.

Terre col saliscendi

Eurasia e Africa in 3D. Le quote sul livello del mare variano: il Sud Africa, per esempio, si è sollevato di circa 300 metri negli ultimi 20 milioni di anni.

Come tessere di un puzzle

Sul magma semiliquido, a 100 km di profondità, "galleggiano" immense zattere di roccia: le zolle. I cui lentissimi spostamenti provocano terremoti ed eruzioni, e fanno nascere montagne.

Terremoti, vulcani, catene montuose, piane abissali, ma anche depositi minerali e giacimenti di petrolio... la loro origine è sempre la stessa: la "tettonica delle zolle", cioè l'insieme dei fenomeni, alimentati dal calore interno, che plasmano la superficie del pianeta.

Le "zolle" sono i frammenti in cui - proprio come un gigantesco puzzle - è suddivisa la litosfera (cioè la crosta terrestre più la parte solida del mantello). Con una differenza, però, rispetto a un vero puzzle: le zolle non sono immobili, ma si spingono tra loro, si allargano, si comprimono e si sovrappongono, incalzate dal flusso di materiale fuso proveniente da centinaia di km di profondità.

ALLA VELOCITÀ DI POCHI CM L'ANNO

Sono 7 le principali zolle (o "placche") che formano la litosfera, accompagnate, nel loro peregrinare, da un'altra decina di zolle più piccole che vanno a riempire i vuoti lasciati dalle prime (v. disegno nelle prossime pagine). «Il loro spessore è in media di 80 km, con una parte superficiale costituita da rocce rigide, come i basalti o i graniti, e una inferiore viscosa che fa presa sul manto sottostante» spiega Raymond Siever, della Harvard University (Usa). Tutte le placche sono in movimento, con spostamenti che vanno da 1 a 17 cm all'anno. Poco? Non proprio, considerando che 5 cm all'anno

significano 50 km in un milione di anni... e ci sono zolle che si muovono da 150-200 milioni di anni. Dopo un tale lasso di tempo, Milano potrebbe finire dove oggi c'è New York.

Quando due placche si separano, si creano lunghe fratture da cui fuoriescono lave molto fluide. Lungo le "dorsali" (così vengono chiamate queste fratture) la litosfera si assottiglia, creando depressioni che sono invase dall'acqua. E per questo che le dorsali sono tutte sottomarine. Eccezione una: la Rift Valley, in Africa (v. Focus n° 109). Ma è solo questione di tempo: i grandi laghi africani sono il primo atto di un futuro oceano, tra il Corno d'Africa e il resto del continente.

SCONTRI E... SCIVOLAMENTI

Dove invece due zolle si scontrano, una può finire sotto l'altra. Accade in genere quando la litosfera oceanica si scontra con una



Teorico della deriva
Alfred Wegener, studioso di meteorologia, fondò la scienza della tettonica.

placca che sostiene un continente (come la zolla dell'oceano Pacifico che si scontra con l'America). Il termine per definire il fenomeno è "subduzione". «La zolla che sprofonda scende nel mantello fino a 700 km, dove si fonde. Poi risale sotto forma di magma, ma solo in parte: in tal modo, vecchia crosta viene riciclata all'interno del mantello. A sostituirla sarà la lava che fuoriesce dalle dorsali» spiega Siever.

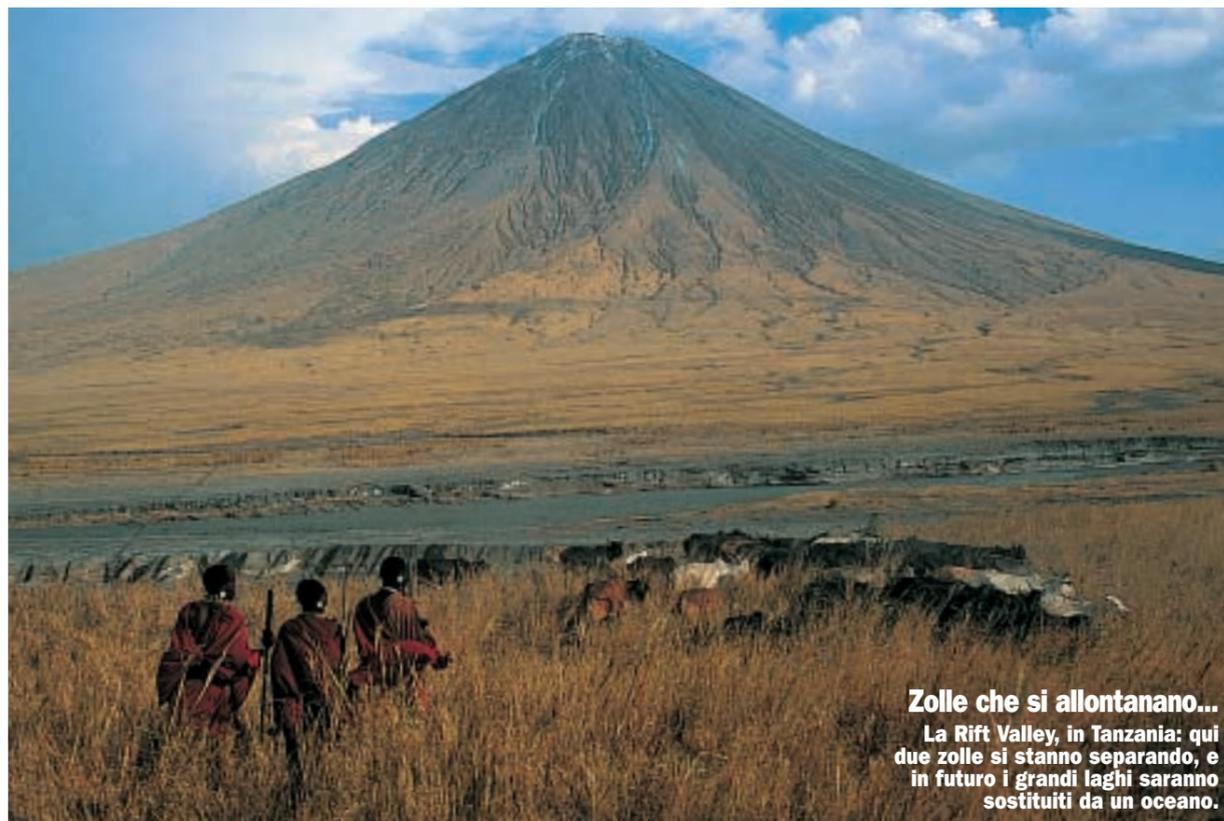
Se sono due zolle oceaniche a scontrarsi, come avviene nel Mar delle Filippine, va in subduzione la più sottile.

Quando invece si scontrano due zolle continentali, come quella indiana e quella asiatica, si formano catene montuose (in questo caso l'Himalaya).

Vi è infine la situazione in cui due placche scorrono l'una vicino all'altra, come lungo la faglia di San Andreas (Usa), dove la zolla del Pacifico si muove lateralmente di 3-5 cm all'anno rispetto a quella del Nord America.

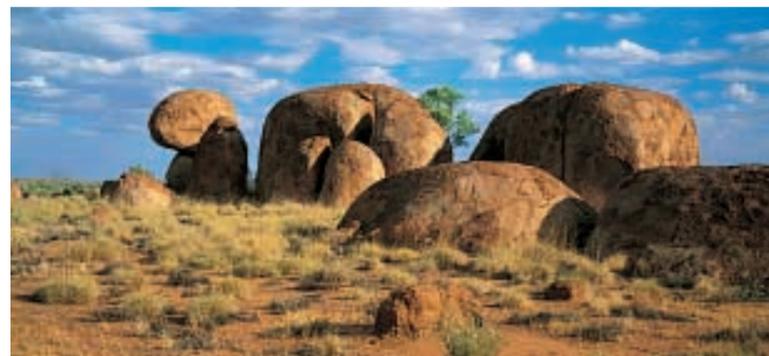
NASCITA DI UNA TEORIA

La prima intuizione che la crosta terrestre fosse così spezzettata si deve al meteorologo tedesco Alfred Wegener, che ai primi del '900 formulò la teoria della "deriva dei continenti".



Zolle che si allontanano...

La Rift Valley, in Tanzania: qui due zolle si stanno separando, e in futuro i grandi laghi saranno sostituiti da un oceano.



Sassi matusalemme

Australia settentrionale: qui le rocce sono tra le più antiche del pianeta.

Wegener era partito dall'osservazione che le coste di Sud America e Africa sembravano combaciare quasi perfettamente. Propose quindi l'idea di un antico mega-continente, la Pangea, poi spezzatosi in tante isole alla deriva.

La teoria, poi elaborata dallo svizzero Emile Angand, non spiegava però tutti i fenomeni geologici. Negli anni '50, con la scoperta del paleomagnetismo, divenne infine chiaro che non andavano alla deriva solo i continenti, ma blocchi di crosta terrestre che comprendevano anche quella sotto gli oceani. Nacque così la "tettonica delle zolle".

...e che si avvicinano
L'Himalaya, una catena montuosa nata dallo "scontro" tra due zolle continentali: indiana ed euroasiatica.



CONTINENTI VAGABONDI

Per due volte, in passato, le terre emerse si unirono in un supercontinente: un miliardo di anni fa nacque Rodinia, poi fu la volta di Pangea.

Studiando le rocce più antiche si è potuto ricostruire, seppure in modo parziale, la storia del movimento delle placche sino a 3 miliardi di anni fa, quando prese forma la prima zolla, alla quale è stato dato il nome di Ur.

■ **Da Ur a Pangea.** La seconda placca, di cui rimangono tracce in Antartide, nacque dopo mezzo miliardo di

anni. Dovettero trascorrere altri 500 milioni prima che due nuove zolle, la Baltica e l'Atlantica, prendessero forma. Le 4 zolle si mossero indipendentemente finché, un miliardo e mezzo di anni fa, Atlantica e Baltica si scontrarono con ciò che oggi è il lembo orientale dell'Antartide a formare Ne-

na. Nel momento in cui Nena, Atlantica e Ur si unirono, un miliardo di anni fa, nacque il supercontinente Rodinia. Dopo 300 milioni di anni le 3 zolle si separarono per riunirsi ancora dopo altri 400 milioni di anni. Questo è l'ultimo supercontinente, Pangea, che si frammentò 250 milioni di anni or sono, dando origine alle zolle attuali.



La Terra fra 50 milioni di anni: l'Australia si unirà all'Asia, l'Africa orientale diventerà un'isola e il Mediterraneo scomparirà.

UN PIANETA IN PEZZI (PER LA PRECISIONE, IN 15 PEZZI)

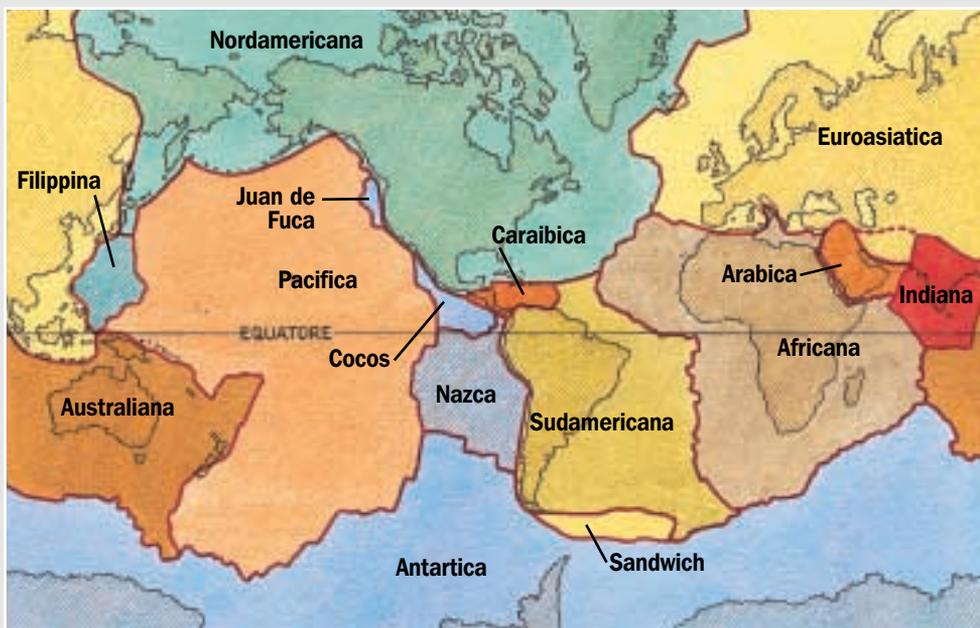
Una carta geografica inconsueta: quella delle zolle tettoniche. Nei punti di confine, la crosta si rinnova: o sprofondando nel mantello, oppure emergendo in superficie sotto forma di magma vulcanico, che poi formerà nuova roccia.

Nell'illustrazione a destra abbiamo riprodotto le zolle tettoniche, sovrapposte ai continenti. Le 7 principali sono: Nordamericana (in verde), Euroasiatica (giallo), Australiana (arancione scuro), Pacifica (arancione chiaro), Sudamericana (ocra), Africana (marrone) e Antartica (azzurro). Oltre a queste, ci sono svariate zolle minori: Indiana (a volte indicata insie-

me all'Australiana), Nazca, Cocos, Caraibica, Arabica, Filippina, Juan de Fuca, Sandwich. Vulcani e terremoti sono concentrati principalmente ai margini delle zolle. ■ **Non mi spezzo.** Ogni zolla può piegarsi senza rompersi, dando origine a corrugamenti montuosi. Il loro spessore va da 80 km (per quelle oceaniche) a 130 km (per quelle continentali).

Un gioco a incastro

Le maggiori zolle tettoniche. Ognuna comprende zolle più piccole, capaci di piccoli spostamenti: uno di questi confini "minori" attraversa l'Italia.



anni dopo, quando si comprese che i fondali oceanici erano composti al 99% da lave, e si dimostrò che il campo magnetico terrestre si inverte (cioè il polo nord diventa polo sud e viceversa) a intervalli irregolari.

LA PROVA DEL FLIP-FLOP

Spiega Anthony Hallam, geologo e storico della geologia, della University of Birmingham (Gran Bretagna): «Agli inizi degli anni '60, Allan Cox, Richard Doell e Brent Dalrymple dell'U. S. Geological Survey determinarono con precisione il numero di inversioni avvenute negli ultimi 4 milioni di anni. Frederick Vine avanzò una ipotesi molto semplice: se davvero le dorsali sono fratture della litosfera, da cui esce lava che riempie il vuoto lasciato dalle placche in allontanamento, allora i minerali ferrosi nelle rocce devono essersi magnetizzati - a destra e a sinistra della dorsale - con la direzione e l'intensità del

campo magnetico nel momento in cui si sono solidificate. E se il campo magnetico terrestre si inverte, la traccia lasciata nella roccia deve essere ancora più evidente. Bastò una serie di campionamenti e l'ipotesi venne confermata».

I fondali degli oceani della Terra furono ben presto suddivisi in bande parallele, simmetriche rispetto alle dorsali, nelle quali le rocce avevano i minerali ferrosi alternativamente orientati verso il polo nord e il polo sud dell'epoca: era la prova decisiva. In tal modo, inoltre, si riuscì a ricostruire il flip-flop del cam-

po magnetico terrestre sino a 200 milioni di anni fa.

LE CONFERME SUCCESSIVE

Dalla fine degli anni '60 si cercò di spiegare tutti i fenomeni geologici nel quadro della tettonica.

I vulcani dell'"anello di fuoco" del Pacifico, per esempio, risultarono essere prodotti dalla risalita dei magmi che si formavano in seguito allo scontro della placca del Pacifico con l'asiatica e l'americana, dove la prima andava in subduzione rispetto alle altre. I terremoti di queste fasce

vennero ben presto interpretati come rilascio dell'energia accumulata in seguito all'attrito che il piano di subduzione subiva durante lo sprofondamento.

Anche elementi di secondaria importanza davano ragione alla teoria. Un esempio è l'interpretazione del modo con cui si formò la Catena Emperor nell'oceano Pacifico, dove una serie di vulcani sottomarini termina con le Hawaii: i vulcani si sono formati in seguito al passaggio della placca pacifica su uno stesso "pennacchio" di risalita di magma dal mantello terrestre. I

vulcani più vecchi sono stati erosi dal mare e sono finiti sotto la superficie, quelli attuali si trovano proprio sopra il camino vulcanico, mentre altri se ne formeranno a mano a mano che la zolla si sposterà.

Una teoria che spiega tutto, dunque? «No, c'è ancora molto da capire. Per esempio, non sappiamo se la tettonica sia in azione da sempre, o se sia solo una fase dell'evoluzione terrestre. E, poi, come si trasmettono gli stress là dove due zolle si scontrano? Occorreranno ancora tempo e altri studi per rispondere a queste domande» afferma Götz Bokelmann, della Stanford University, che, insieme ad altri 800 geologi, ha da poco partecipato all'annuale incontro dell'American Geophysical Union a San Francisco proprio per discutere di tettonica delle zolle. ■



Un geologo studia le lave recenti che hanno dato forma alle isole Hawaii.



Rischio di terremoti
La faglia di San Andreas, in California: qui le zolle scorrono parallele.

Per saperne di più:

G. Picciolo, *Scienze della Terra* (Editrice San Marco). Presenta il quadro completo dei fenomeni relativi alla tettonica delle zolle.

Su Internet: <http://www.ov.ingv.it/tettonic.htm> Tra i migliori in italiano.

Le prime prove: fossili, rocce e clima

Prima delle conferme dovute al paleomagnetismo, ecco le evidenze iniziali sulle quali si basò Alfred Wegener per proporre l'ipotesi della "deriva dei continenti". E le obiezioni dei suoi avversari.

Prima del 1912, quando Alfred Wegener rese pubblica l'ipotesi sulla deriva dei continenti, si credeva che la Terra avesse assunto l'attuale aspetto (con catene montuose e grandi depressioni) a causa del raffreddamento primordiale: il pianeta, insomma, si sarebbe raggrinzito come una mela. «Ma in tal caso le rughe, cioè le montagne, dovrebbero essere distribuite uniformemente, non soltanto in zone ristrette» obiettava Wegener. La sua teoria, però, non nasceva solo da considerazioni di buon senso. Aveva invece basi paleontologiche, geologiche, geografiche e geofisiche. Ecco, in estrema sin-

tesi, che cosa aveva osservato Wegener.

FOSSILI "CUGINI" IN 2 CONTINENTI

L'argomento forte era quello paleontologico: sino al Mesozoico vi sono infatti molti fossili comuni tra i continenti meridionali del pianeta, poi più nulla. A partire dal Cenozoico, la vita si è sviluppata in modo diverso in Africa e in Sud America. La spiegazione più semplice è che i due continenti, un tempo uniti, si siano poi separati.

C'è poi l'argomento geologico: in Africa meridionale (e in molte altre zone della Terra) si ritrovano rocce originate dalla fusione di ghiacciai, come le tiliti, accanto a rocce che indicano condizioni di grande caldo e aridità, come le evaporiti. Variazioni climatiche così drastiche si spiegherebbero solo se il continente fosse andato a occupare fasce climatiche diverse nel corso delle ere geologiche.

L'EFFETTO PENTOLA

Che cosa mancava, allora, perché l'ipotesi della "deriva dei continenti" si

La prova dei vulcani

I vulcani delle Hawaii sono tutti in fila: nascono dallo stesso "geyser" di magma, che buca la crosta, in movimento.



Dalla nave Atlantis II, parte Alvin, sommergibile per ricerche geologiche.

IL PIANETA-PALLONCINO

Tra le ipotesi alternative alla tettonica ce n'è una sorprendente: la Terra si sta gonfiando.

Oggi nessuno crede più che le montagne siano nate da un "raggrinzimento" della Terra nella sua iniziale fase di raffreddamento. Un'ipotesi alternativa alla tettonica delle zolle, però, sopravvive: è la "teoria dell'espansione".

■ **Senza mari.** Proposta nel 1920, la teoria sostiene che, in origine, la litosfera continentale coprì tutta la superficie. Da allora, il pianeta si sarebbe lentamente gonfiato,

frammentando la crosta superficiale, mentre i varchi venivano riempiti da nuova materia risalita dal mantello, e successivamente d'acqua.

■ **Dilatazione.** In effetti, il calore interno può far pensare a una dilatazione, ma (secondo i calcoli dei fisici, sulla base della natura dei materiali coinvolti) molto inferiore a quella che sarebbe necessaria per dare conferma all'ipotesi dell'espansione.

trasformasse in teoria? Spiega Hallam: «Due cose: il fatto che non tutti i fenomeni geologici si spiegavano con la semplice deriva dei continenti (la faglia di San Andreas, per esempio, rimaneva un caso misterioso), e l'incertezza di Wegener sulle forze che davano origine alla deriva». Lui stesso scrisse: «La soluzione completa al problema delle forze motrici è ancora lontana a venire, perché significa districare un groviglio di fenomeni in cui spesso è difficile distinguere la causa dall'effetto».

Solo con la tettonica si giunse a capire che il "motore" si trovava nell'astenosfera (la regione del mantello dove le rocce sono vicine al punto di fusione), dove si formano **celle convettive di magma**. Lo stesso fenomeno per cui, in una pentola messa su un fornello, l'acqua più calda vicino al fuoco risale in superficie, si raffredda e poi ritorna in profondità.

LE OBIEZIONI DEI RIVALI

L'avversario più feroce dell'ipotesi di Wegener fu



La prova della lava
Una foto fatta da Alvin: lave "a cuscino" sul fondo, presso una dorsale oceanica.

Charles Schuchert, della Yale University, uno dei principali esperti nella ricostruzione di ambienti geografici del passato. Schuchert non negava le somiglianze della flora e della fauna antiche tra i continenti, ma le spiegava con l'esistenza di pochi "ponti continentali" attraverso l'Artico, l'Atlantico meridionale e l'oceano Indiano, sprofondati dopo il Mesozoico. Peccato che di questi "ponti" non sia mai stata trovata alcuna traccia geologica.

Ancor più duro di Schuchert fu Kelvin Chamberlin, geologo americano, che trovò ben 18 obiezioni - poi cadute al procedere delle ricerche - contro l'i-

dea della deriva dei continenti.

Wegener non ribatté mai alle critiche più accese, se non sottolineando che la geologia è una scienza di integrazione e di sintesi, i cui modelli devono tenere in considerazione il maggior numero di aspetti possibili. Morì nel 1930, durante una spedizione di ricerche meteorologiche in Groenlandia, senza avere avuto contatti con chi cominciava a sostenere la sua ipotesi (come lo svizzero Émile Angand o l'americano Robert Daly) e senza poter assistere all'evoluzione della sua ipotesi nella teoria, ormai universalmente accettata, della "tettonica delle zolle". ■



Drammi al rallentatore

Vulcani in Indonesia. Sono il risultato dello scontro in corso tra la placca australiana e quella euroasiatica: in futuro l'intero arcipelago scomparirà, schiacciato dal lentissimo urto tra Australia e Asia.

Così nascono le montagne

Dalle Ande agli Appennini, ecco alcuni esempi di come una semplice teoria possa arrivare a far comprendere alcuni eventi fondamentali nell'evoluzione del pianeta.

Le catene montuose sono una delle prove fondamentali della validità della tettonica delle zolle. Si sono formate, infatti, unicamente in seguito allo scontro tra zolle.

I più antichi indizi di catene montuose sono stati scoperti in Groenlandia e risalgono a circa 3 miliardi e 750 milioni di anni fa. Ciò che rimane oggi, però, non è una catena montuosa, bensì i pochi resti lasciati

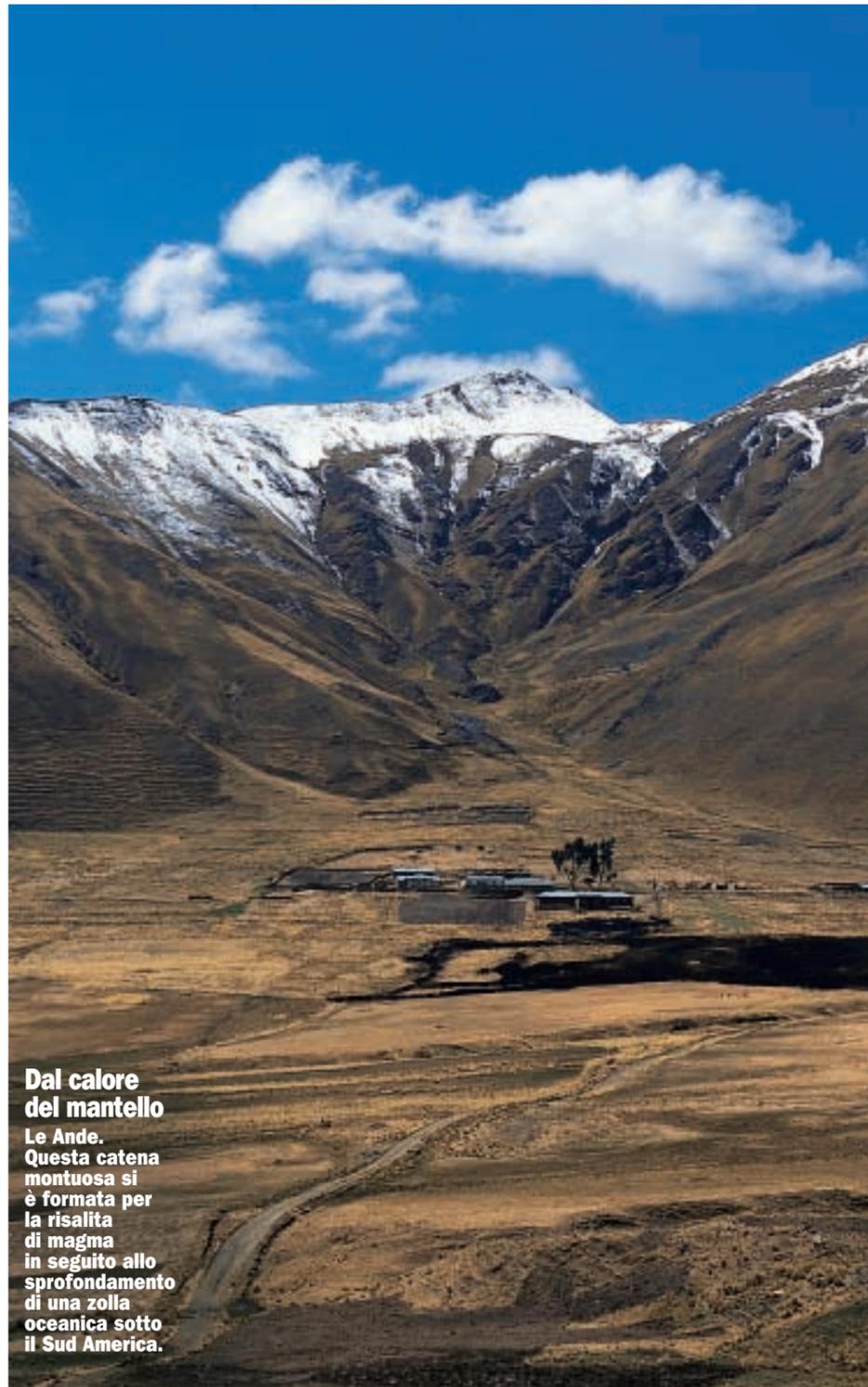
dall'erosione. Tra le catene più caratteristiche ancora esistenti vi è quella delle Ande, dove lo scontro tra due placche appare con la massima evidenza. Ecco come andò, secondo la teoria della tettonica.

Circa 250 milioni di anni fa, la dorsale medio-atlantica iniziò ad aprirsi, la zolla sudamericana fu costretta a migrare verso ovest. In altre parole, Africa e Sud America cominciarono ad allontanarsi. La zolla sudamericana prese quindi a premere contro quella di Nazca, che cedette (nell'incontro tra zolle, quella oceanica esce sempre sconfitta) e andò in subduzione, cioè fu schiacciata in profondità sotto quella sudamericana.

MAGMI = ROCCE DURISSIME

Ciò che scende, però, finisce sempre per risalire, almeno in parte. E, infatti, la zolla oceanica in fase di sprofondamento subì un processo di fusione parziale, nel quale si formarono magmi leggeri che risalirono fino alla superficie. In tal modo nacque un arco di isole vulcaniche, al largo delle coste del Sud America, simili a quelle dell'arcipelago giapponese (in effetti, oggi in Giappone sta succedendo esattamente la stessa cosa, solo che a scontrarsi sono la placca nordamericana e quella euroasiatica).

E le Ande? Mentre una zolla scende, l'altra sale: con il passare del tempo, le isole vulcaniche e il continente vengono spinti verso l'alto, e la successiva erosione porta alla luce i magmi raffreddati che si trovano sotto la superficie. Questo spiega l'esistenza di guglie granitiche come il



Dal calore del mantello

Le Ande. Questa catena montuosa si è formata per la risalita di magma in seguito allo sprofondamento di una zolla oceanica sotto il Sud America.

Cerro Torre, il Fitzroy e le torri del Paine.

Oggi la Cordigliera è formata da due grandi catene: quella orientale (più interna), formata principalmente in seguito alle spinte e quindi composta dai sedimenti più antichi, e quella occidentale, più esterna, nella quale l'ero-

sione ha portato in luce i graniti (ultima testimonianza dei magmi risaliti durante la subduzione). Tutto ciò, evidentemente, avviene in tempi lunghissimi, tanto che - dal punto di vista dei geologi - la subduzione della zolla di Nazca sotto quella sudamericana è tuttora in atto.

TIBET + INDIA = HIMALAYA

Più complesso è il caso dell'Himalaya, dove la zolla indo-australiana, che un tempo era collegata all'Antartide, dopo essersi staccata da quest'ultima e aver subdoto qualcosa come 5.000 km di litosfera oceanica (quella esistente tra l'Antartide e l'Asia), ha trasportato a ridosso del Tibet, e poi fatto scontrare, il blocco continentale del Deccan (India), dando vita così alla più alta catena montuosa della Terra.

LE ALPI? UN ANTICO MARE

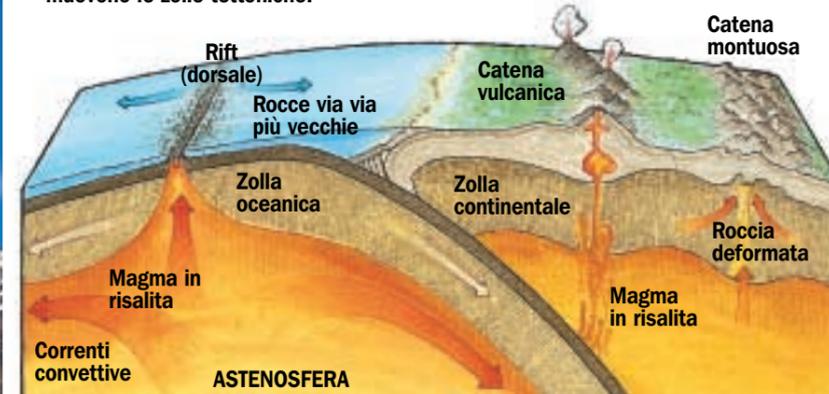
Anche la catena alpina ha avuto una nascita complessa, al punto che, ancora oggi, non è chiara in ogni

dettaglio. In ogni caso, può essere così riassunta: 180 milioni di anni fa, in una placca di crosta continentale iniziò a formarsi un oceano. Questo portò la placca a dividersi in due: a nord quella europea, a sud quella adriatica. Il mare aveva una direzione grosso modo sud-ovest/nord-est, e raggiunse la massima larghezza circa 120 milioni di anni or sono. La prova? Nelle Alpi sono presenti basalti, cioè rocce tipicamente oceaniche.

Ma torniamo a quell'antico mare: 115 milioni di anni fa, le due zolle presero ad avvicinarsi, dando origine a "falde di ricoprimento", cioè a spessi strati rocciosi sovrapposti, e alla parziale subduzione della placca europea sotto quella adriatica.

Lo schema della subduzione

Nel disegno, la tipica subduzione di una zolla oceanica che si scontra con una zolla continentale.



Magmi in emersione

Un geologo preleva campioni di roccia vulcanica nella Rift Valley, in Tanzania.

GLI APPENNINI: DUE SUBDUZIONI

Gli Appennini, la seconda catena montuosa d'Italia, si sono formati invece in modo completamente diverso. Semplificando, sono nati da due opposte subduzioni: la principale verso sud-ovest, quindi verso il Mediterraneo, da parte della litosfera che costituisce il mar Adriatico e il mar Ionio. Parallelamente, in prossimità della Calabria, dove la litosfera è più sottile e più pesante rispetto alle aree a nord, la subduzione avviene verso nord-est, proprio il contrario di ciò che succede a nord. E questo complicato gioco di subduzioni che, nel complesso, ha dato all'Italia la sua tipica forma a stivale inclinato.

FOCUS

© Gruner und Jahr - Mondadori SpA
Tutti i diritti di proprietà letteraria e artistica riservati.



Gruner und Jahr-Mondadori SpA

Gruner und Jahr-Mondadori SpA
Corso Monforte, 54 - 20122 Milano

Elaborazione **ELEUER SRL**

FOCUS

© Gruner und Jahr - Mondadori SpA
Tutti i diritti di proprietà letteraria e artistica riservati.



Gruner und Jahr-Mondadori SpA

Gruner und Jahr-Mondadori SpA
Corso Monforte, 54 - 20122 Milano

Elaborazione **ELEUER SRL**