

LUCE COME TERAPIA • HARD DISK NANOTECNOLOGICI • L'ERRORE DI POPPER

LE SCIENZE

edizione italiana di
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

www.lescienze.it

Un nuovo modello per capire e prevedere i

TERREMOTI

**Dieci ipotesi
sulla forma dell'universo**

**A caccia del primo
antenato dell'uomo**

**Ricostruire la piramide
alimentare**



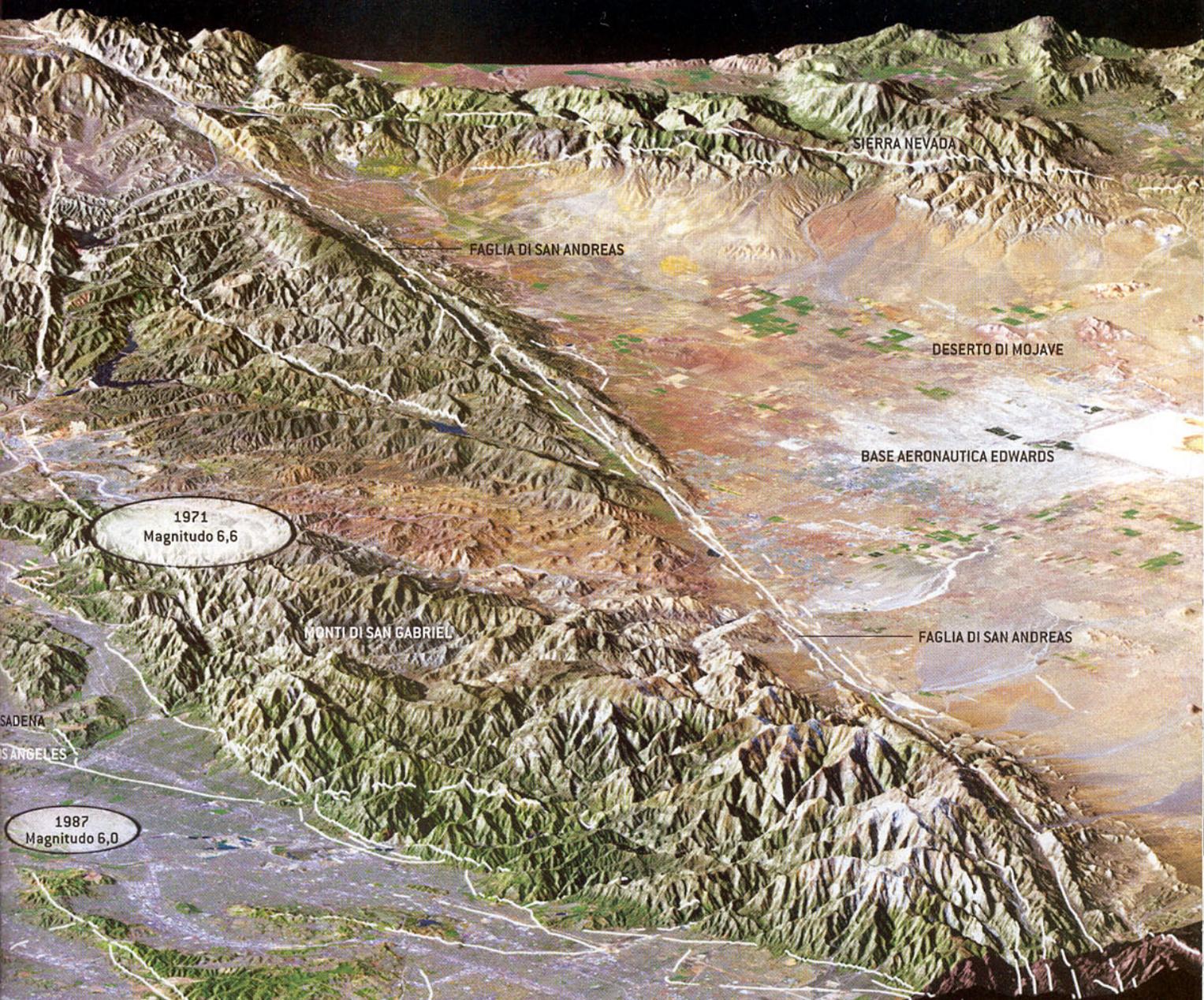


Robert E. Crippen/Jet Propulsion Laboratory

TREDICI MILIONI DI PERSONE gravitano su Los Angeles e si trovano a vivere su una rete complessa di faglie altamente sismiche, tra cui la famosa faglia di San Andreas. Alcuni scienziati pensano che ognuna delle forti scosse che hanno colpito la regione dal 1850 in poi abbia influenzato i tempi e i luoghi delle scosse successive.

I terremoti si parlano

di Ross S. Stein



**Contrariamente a quanto
si è sempre ritenuto,
i grandi terremoti possono
interagire in modi inaspettati.
Questa scoperta potrebbe
migliorare enormemente
la capacità di prevedere
gli eventi sismici**

Da molti decenni, gli esperti di terremoti sognano il giorno in cui saranno capaci di prevedere il tempo e il luogo della prossima scossa disastrosa. Ma all'inizio degli anni novanta il comportamento delle faglie sismogenetiche si era rivelato così complesso da lasciar concludere che i maggiori movimenti sismici del pianeta fossero isolati e pressoché imprevedibili. La maggior parte dei sismologi ora ritiene che, una volta che un terremoto di grande entità e le sue repliche abbiano fatto i loro danni, la faglia rimarrà silente fino a quando le tensioni all'interno della crosta terrestre si ricostituiranno, un avvenimento che tipicamente richiede centinaia o migliaia di anni. Una scoperta recente, secondo la quale i terremoti interagirebbero in modi finora neppure immaginati, sta iniziando a ribaltare tale assunto. Questo punto di vista è in linea con il concetto che una grande scossa sismica scarichi gli stress accumulati, e pertanto faccia diminuire la probabilità di un secondo grande terremoto a breve termine.

L'ipotesi suggerisce anche che la probabilità di un terremoto in un'altra località lungo la stessa faglia o su una faglia adiacente possa aumentare fino a un fattore 3. Ciò non significa che un grande terremoto debba richiedere l'evacuazione immediata delle zone circostanti a quella colpita. Tuttavia si dovrebbe essere coscienti di questo rischio per meglio approntare i servizi di emergenza.

Al cuore di questa ipotesi, conosciuta come innesco da stress (*stress triggering*), vi è la constatazione che le faglie reagiscono in modo inaspettato a deboli stress acquisiti a seguito dello spostamento o dello scuotimento di faglie adiacenti. Studiando i cataloghi dei terremoti passati e basandoci su nuovi calcoli del comportamento delle faglie, nonché su recenti esperimenti di laboratorio, i miei colleghi e io abbiamo compreso che lo stress rilasciato nel corso di un terremoto non è semplicemente dissipato, ma si sposta lungo la faglia e si va a concentrare in siti non lontani. Questo aumento locale dello stress promuove a sua volta altre scosse. Lo studio di una ventina di faglie, dal 1992, ci ha convinti che i terremoti possono essere innescati perfino quando lo stress aumenta solo di un ottavo della pressione necessaria per gonfiare un pneumatico d'automobile.

Relazioni di causa-effetto così deboli tra grandi scosse di terremoto erano finora impensabili, e quindi non hanno mai avuto alcun peso nelle previsioni sismiche. Pertanto, molti scienziati si sono dimostrati comprensibilmente scettici sull'adozione di questa teoria per un nuovo approccio alla previsione. Nondimeno, l'ipotesi dell'innesco da stress ha continuato ad acquisire credibilità grazie alla sua capacità di spiegare la localizzazione e la frequenza di terremoti che hanno fatto seguito a scosse distruttive in California, Giappone e Turchia. La speranza di poter diramare allarmi preventivi più affidabili per disastri come questi è la motivazione primaria che ci muove nel nostro tentativo di interpretare queste inattese conversazioni fra terremoti.

L'idea di contraddire la teoria pressoché universale secondo cui i più intensi terremoti colpiscono in modo casuale sembrava inizialmente quasi folle, specialmente se si considera che centinaia di scienziati hanno cercato invano per oltre tre decenni di

bitto dopo una scossa principale. Dieci giorni più tardi il tasso delle repliche scende al 10 per cento di quello iniziale; 100 giorni più tardi cade all'1 per cento e così via. Questo tipo di andamento della sismicità significa che i terremoti iniziali modificano la crosta terrestre in modi che fanno aumentare il rischio di scosse successive, contraddicendo il punto di vista secondo cui i terremoti accadrebbero in modo casuale nel tempo. Ma dato che le repliche sono normalmente molto più deboli dei sismi che gli scienziati vorrebbero essere in grado di prevedere, esse sono state per molto tempo trascurate come possibile chiave per svelare i segreti della sismicità.

Repliche a parte, i sismi restanti sembrano in effetti, almeno a prima vista, distribuiti in modo casuale. Ma perché ignorare i terremoti più prevedibili per provare che i rimanenti sono privi di ordine? I miei colleghi e io abbiamo deciso di indagare piuttosto sul perché il comportamento delle repliche sia così regolare. Abbiamo iniziato la nostra ricerca in una delle regioni più sismicamente attive del mondo: il sistema della faglia di San Andreas, in California. Dalle registrazioni dei terremoti e delle loro repliche sappiamo che, il giorno successivo all'evento di un terremoto di magnitudo 7,3, la probabilità che un'altra forte scossa colpisca nel raggio di 100 chilometri è di circa il 67 per cento (20.000 volte la probabilità di un giorno qualsiasi). Qualcosa di legato alla prima scossa sembra incrementare enormemente le probabilità di scosse successive. Ma che cosa?

Questo balzo nella probabilità spiega come mai nessuno si sia sorpreso, nel giugno 1992, quando un terremoto di magnitudo 6,5 si verificò presso la cittadina californiana di Big Bear solo tre ore dopo una scossa di magnitudo 7,3 verificatasi a 40 chilometri di distanza, presso Landers. Il fatto sconcertante rispetto alle nozioni in possesso degli scienziati era che la scossa di Big Bear era stata determinata dalla rottura di una sezione della faglia che non si era mossa durante la scossa di Landers. L'evento di Big Bear si adattava al profilo di una replica in quanto a distribuzione temporale, ma non in quanto a distribuzione spaziale. Sospettammo che questa localizzazione misteriosa fosse l'indizio che stavamo cercando.



Perfino minime variazioni di stress possono avere effetti notevoli, positivi o negativi

individuare andamenti prevedibili nell'attività sismica globale. Alcuni hanno cercato di evidenziare variazioni nel numero di scosse di livello strumentale, e hanno usato dispositivi estremamente sensibili per misurare qualunque deformazione crostale. Altri hanno tentato di determinare l'andamento sotterraneo di gas, fluidi o correnti elettriche, oppure hanno monitorato piccole fratture nelle rocce per vedere se esse tendano ad aprirsi oppure a chiudersi dopo forti scosse. Indipendentemente dal metodo, i ricercatori hanno trovato pochi tratti in comune tra un grande terremoto e l'altro.

Nonostante tali disparità, i cataloghi storici confermano che circa un terzo dei terremoti registrati nel mondo - le cosiddette repliche - si addensa nello spazio e nel tempo. Si pensava che tutte le vere repliche colpissero da qualche parte lungo il segmento di faglia che si era mosso durante la scossa principale. Anche la loro distribuzione nel tempo segue un andamento regolare, secondo quanto confermano le osservazioni fatte per la prima volta nel 1894 dal sismologo giapponese Fusakichi Omori, e sviluppate da allora in un principio fondamentale noto come legge di Omori. Le repliche sono soprattutto abbondanti su-

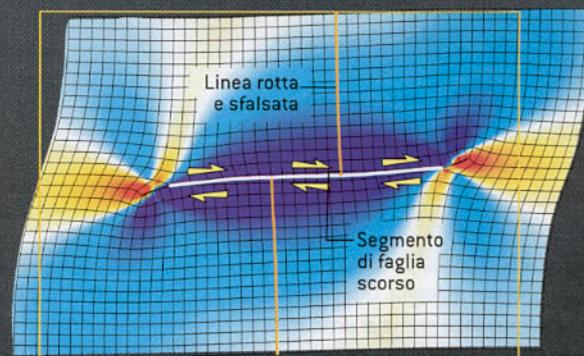
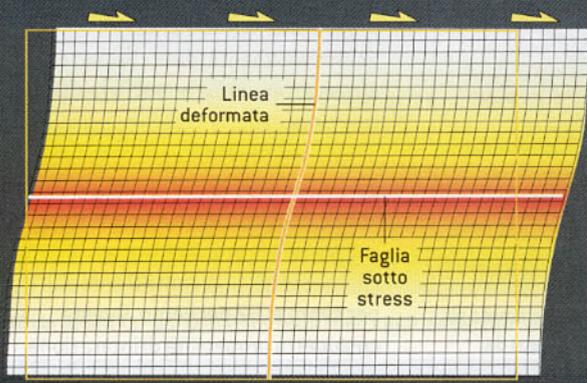
Mappando la localizzazione di Landers, di Big Bear e di centinaia di altri terremoti californiani, i miei colleghi e io abbiamo iniziato a notare una regolarità nella distribuzione non solo delle vere repliche, ma anche di altri più piccoli terremoti che seguono una scossa principale dopo giorni, settimane e perfino anni. Come il misterioso evento di Big Bear, una grande maggioranza di questi tremori tendeva ad addensarsi in aree lontane dalla faglia scorsa durante il terremoto, e quindi lontano dalla prevedibile localizzazione delle repliche. Se avessimo potuto determinare che cosa controllasse questa distribuzione, le stesse caratteristiche avrebbero forse potuto essere applicate anche alle scosse principali, sviluppando una nuova strategia di previsione dei terremoti.

Inneschi e ombre

Abbiamo iniziato osservando i cambiamenti che si producono nella crosta terrestre in seguito ai maggiori terremoti, che rilasciano parte dello stress che si accumula lentamente via via che le zolle tettoniche del pianeta entrano in interazione reci-

UNO STRESS CONTAGIOSO

L'accumulo e il rilascio dello stress che si accompagnano ai movimenti relativi delle zolle tettoniche determinano il ciclo di tutti i grandi terremoti. Lungo la faglia Nord-anatolica, in Turchia (*linea bianca*), il terreno a nord della faglia tende a muoversi verso est relativamente a quello che si trova a sud (*freccie gialle*), ma rimane bloccato. Quando lo stress lungo la faglia finisce con l'aver la meglio sull'attrito, la roccia ai due margini di faglia subisce uno scorrimento improvviso. La faglia Nord-anatolica è stata sede di un fenomeno catastrofico di questo tipo il 17 agosto 1999, quando un sisma di magnitudo 7,4 uccise 25.000 persone attorno alla città di Izmit. I calcoli schematici dello stress prima e dopo il terremoto di Izmit (*qui sotto*) rivelano come il cosiddetto stress di Coulomb sia venuto improvvisamente meno lungo il segmento di faglia.



Variazione dello stress di Coulomb [in bar]
Diminuzione -3 0 3 Incremento

PRIMA DEL TERREMOTO

Il segmento della faglia Nord-anatolica presso Izmit ha accumulato stress in quantità significativa (*in rosso*) nei 200 anni trascorsi dall'ultima scossa in grado di scaricare tensione. Una linea immaginaria (*in giallo*) e una griglia deformate sovrapposte al paesaggio visualizzano questo stress. I quadratini lungo la faglia appaiono deformati in parallelogrammi e la deformazione massima si verifica in prossimità della faglia.

DOPO IL TERREMOTO

Il terremoto ha attenuato lo stress (*in blu*) lungo tutto il segmento di faglia slittato. La linea prima deformata si è ora spezzata ed è rimasta sfalsata di parecchi metri, mentre i quadratini della griglia sono ritornati alla forma originaria. Lo stress si concentra a questo punto oltre le due estremità del segmento di faglia, dove i quadratini sono più intensamente deformati di quanto non fossero in precedenza.

IN SINTESI

- I sismologi tendevano a dare per scontato che un grande terremoto non influenzasse i tempi e la localizzazione di un successivo evento sismico, ma una scoperta sorprendente sta ribaltando questa visione: i terremoti «comunicano» tra di loro, poiché lo stress può essere trasferito di faglia in faglia.
- Le faglie sismiche, infatti, si stanno rivelando straordinariamente suscettibili a deboli stress acquisiti in seguito a scosse che hanno interessato le faglie vicine.
- A parità di altri fattori, le regioni della crosta terrestre in cui gli stress aumentano, anche in misura quasi impercettibile, saranno sede di prossimi terremoti.
- Se questa ipotesi si rivelerà corretta, le sue numerose implicazioni potrebbero migliorare notevolmente la capacità di valutazione del rischio sismico da parte di governi, istituzioni pubbliche e private e cittadini.

proca. Lungo la faglia di San Andreas, per esempio, la zolla nord-americana sta muovendosi verso sud relativamente a quella pacifica. Via via che i due lati tendono a muoversi in direzioni opposte, si esercita una forza di taglio parallelamente al piano della faglia, ma esiste anche una sollecitazione perpendicolare allo stesso piano che fa aumentare l'attrito, impedendo lo scorrimento. Quando la forza di taglio supera l'attrito, ovvero quando la sollecitazione che spinge l'uno contro l'altro i due lati della faglia si allenta, le rocce su ognuno dei lati scorreranno improvvisamente, rilasciando una tremenda quantità di energia nella forma di un terremoto. Entrambe le componenti dello stress, che quando sono sommate si chiamano stress di Coulomb, diminuiscono lungo il segmento della faglia che scorre. Ma dato che lo stress non può semplicemente scomparire, noi sapevamo che esso doveva essere redistribuito ad altri punti lungo la stessa faglia o ad altre faglie vicine. Sospettivamo anche che questo incremento nello stress di Coulomb potesse essere sufficiente a innescare terremoti in questi nuovi siti.

I geofisici calcolano gli stress di Coulomb da anni, ma gli scienziati non li hanno mai usati per spiegare la sismicità. Il loro

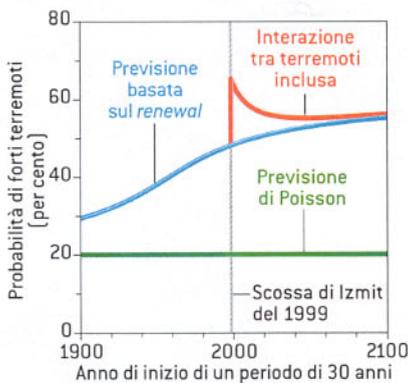
Il modo in cui la gente percepisce il rischio sismico cui è soggetta dipende in gran parte del tipo di avvertimenti ricevuti. La maggior parte delle attuali previsioni sismiche dà per scontato che ogni terremoto sia privo di relazioni con quello successivo. Ogni segmento di faglia viene visto come caratterizzato da un periodo di tempo medio tra sismi di una data entità: maggiore la scossa, più lungo il periodo. Ma la localizzazione temporale delle scosse è comunque ritenuta casuale. La caratteristica migliore di questo metodo, noto come probabilità di Poisson, è che una previsione può essere fatta senza sapere quando sia accaduto l'ultimo terremoto significativo. I sismologi possono dedurre il periodo di tempo trascorso sulla base di indizi geologici di eventi sismici molto più antichi lungo quel segmento di faglia. Questa strategia produce stime di probabilità che non cambiano con il tempo.

Per contrasto, un tipo più raffinato di previsione, detto probabilità di *renewal*, vuole che le probabilità di una scossa devastante aumentino quanto più tempo passa dall'ultimo sisma di grande intensità. Questo rischio crescente si basa sull'assunto che lo stress lungo una faglia aumenti gradualmente fino a causare un terremoto molto intenso.

I miei colleghi e io riciviamo le probabilità associate a interazioni tra terremoti sulla base di questa seconda tecnica tradizionale, includendo gli effetti delle variazioni di stress indotti da terremoti vicini. Confrontando i tre tipi di previsione per la faglia Nord-anatolica della Turchia presso Istanbul, si mettono in evidenza le loro differenze, che sono tanto più notevoli quanto più vicina è una grande scossa.

Negli anni precedenti il catastrofico terremoto di Izmit dell'agosto 1999, la probabilità di ripetizione di una scossa di magnitudo 7 o maggiore lungo le quattro faglie presenti entro 50 chilometri da Istanbul era andata aumentando lentamente fin dall'ultimo grande terremoto che aveva colpito ognuna di esse, tra 100 e 500 anni fa. Secondo questo tipo di previsione, la scossa di agosto aveva affossato la probabilità di

un secondo sisma di grande intensità nelle immediate vicinanze di Izmit, dal momento che si supponeva che le faglie si fossero «rilassate». Ma il terremoto non causò alcun cambiamento nella probabilità (pari al 48 per cento) di forti scosse 100 chilometri a ovest, a Istanbul, in un qualche momento dei



LE PROBABILITÀ che un forte terremoto si verifichi nel raggio di 50 chilometri da Istanbul possono variare enormemente. In base alle previsioni tradizionali rimangono invariate o aumentano lentamente con il tempo (*in verde e in blu*), ma salgono a circa il 25 per cento se viene considerato il trasferimento di stress causato dal terremoto di Izmit del 1999 (*in rosso*).

prossimi 30 anni. Queste probabilità continueranno a crescere lentamente con il tempo, a differenza della probabilità di Poisson che rimarrà al 20 per cento indipendentemente da altri sismi che possano verificarsi in prossimità della capitale.

Quando gli effetti calcolabili in base alla nostra nuova ipotesi furono aggiunti alla probabilità di *renewal*, tutto cambiò. Il risultato più significativo era che la probabilità di una seconda scossa presso Istanbul aumentava improvvisamente, dato che parte dello stress attenuatosi presso Izmit durante la scossa del 1999 si era spostata verso ovest, lungo la faglia, per concentrarsi più vicino alla capitale. Ciò significava che la scossa di Izmit aveva fatto aumentare le probabilità di un terremoto a Istanbul nei prossimi 30 anni dal 48 per cento al 62 per cento. Questa cosiddetta probabilità di interazione continuerà a diminuire al crescere della probabilità di *renewal*. Le due previsioni finiranno per convergere a circa il 54 per cento nel 2060, purché prima di allora non si verifichi un terremoto di grande intensità.



GLI EDIFICI DEVASTATI DELLA CITTÀ DI DÜZCE, in Turchia, all'indomani del terremoto avvenuto nel novembre 1999. Alcuni scienziati sospettano che questo disastro sia stato innescato da una scossa precedente avvenuta presso Izmit.



Sverrir Vilhelmsen/Morgunblaidd/AP

UNA FAGLIA APERTASI DOPO IL TERREMOTO DEL 2000 nella città islandese di Sellfos, a 50 chilometri da Reykjavik.

Tenendo conto delle nuove teorie, molte faglie dovranno essere considerate ad altissimo rischio

ragionamento era semplice: si assumeva che i cambiamenti fossero troppo esigui per fare una differenza. In effetti, la quantità di stress trasferita è in generale alquanto piccola: meno di 3,0 bar, o al più il 10 per cento del cambiamento totale di stress che le faglie subiscono normalmente durante un terremoto. Avevo i miei dubbi che una quantità del genere potesse essere sufficiente a innescare un altro terremoto. Ma quando Geoffrey King, dell'Institut de Physique du Globe di Parigi, Jian Lin della Woods Hole Oceanographic Institution nel Massachusetts e io abbiamo valutato le aree della California meridionale in cui lo stress era aumentato dopo grandi terremoti, siamo rimasti sorpresi nel vedere come gli incrementi, per quanto piccoli, corrispondessero chiaramente con le località in cui si erano addensate le scosse di assestamento. Le implicazioni di questa correlazione erano inequivocabili: le regioni nelle quali lo stress aumenta saranno teatro della maggioranza dei terremoti successivi, sia grandi sia piccoli. Abbiamo anche iniziato a notare qualcosa di egualmente sorprendente: le piccole riduzioni dello stress potrebbero inibire futuri tremori. Sulle nostre mappe, l'attività sismica precipitava in queste cosiddette «ombre di stress».

L'analisi dello stress di Coulomb spiegava elegantemente la localizzazione di certi terremoti nel passato, ma non eravamo ancora in grado di stabilire se questa nuova tecnica fosse utilizzabile per prevedere in modo affidabile i siti di terremoti futuri. Sei anni fa mi aggregai al geofisico James H. Dieterich dello US Geological Survey e al geologo Aykut A. Barka del Politecnico di Istanbul per rilevare la faglia Nord-anatolica della Turchia, una tra le zone di faglia più densamente abitate al mondo. In base ai nostri calcoli per determinare i siti dove lo stress di Cou-

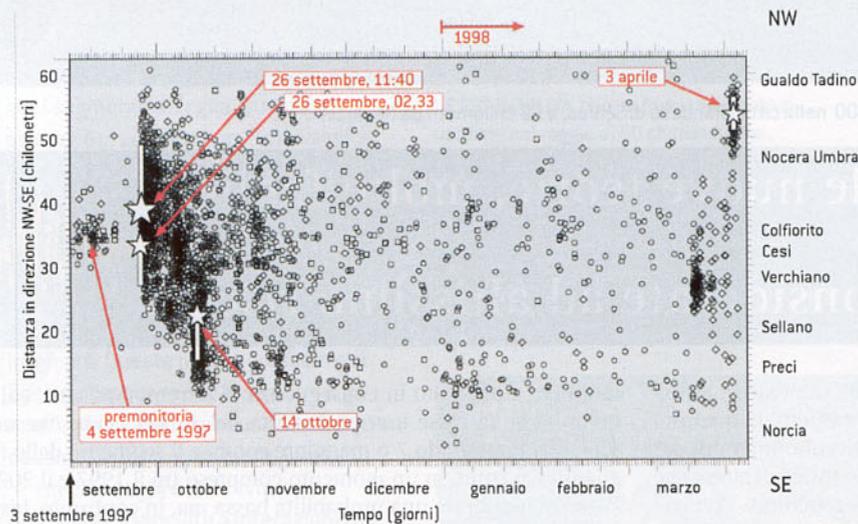
lomb era aumentato in conseguenza di terremoti passati, valutammo che ci fosse una probabilità del 12 per cento che una scossa di magnitudo 7 o maggiore colpisse il segmento della faglia presso Izmit, in un momento compreso tra il 1997 e il 2027. Potrebbe sembrare una probabilità bassa ma, in confronto, bisogna pensare che tutti gli altri segmenti di questa faglia lunga 1000 chilometri presentano probabilità solo dell'1-2 per cento.

Non dovemmo aspettare a lungo per averne la conferma. Nell'agosto del 1999 un terremoto di magnitudo 7,4 devastò Izmit, uccidendo 25.000 persone e facendo danni valutabili in 6,5 miliardi di euro. Ma questo terremoto era semplicemente il più recente in una sequenza in stile domino di 12 scosse principali che avevano colpito la faglia Nord-anatolica dal 1939 in poi. In un periodo di cinque anni particolarmente travagliato, ben 700 chilometri della faglia slittarono in una micidiale sequenza di quattro scosse verso ovest. Sospettivamo che lo stress trasferito oltre le estremità di ogni frattura avesse innescato il terremoto successivo, compreso quello di Izmit.

Nel novembre del 1999 la tredicesima tessera del domino cadde a sua volta. Lo stress di Coulomb che si era spostato dal segmento di faglia presso Izmit innescò un terremoto di magnitudo 7,1 vicino a Düzce, circa 100 chilometri a est. Fortunatamente, Barka aveva calcolato l'incremento di stress risultante dalla scossa di Izmit e lo aveva pubblicato sulla rivista «Science» due mesi prima. L'annuncio di Barka aveva indotto gli ingegneri a chiudere gli edifici scolastici di Düzce che erano rimasti leggermente danneggiati dalla prima scossa, a dispetto delle proteste delle autorità scolastiche. Alcuni di questi edifici furono rasi al suolo dalla scossa di novembre.

MA IN ITALIA È TUTTO PIÙ COMPLESSO

Ross Stein e collaboratori danno finalmente un buon supporto teorico e una solida base sperimentale a uno degli aspetti più significativi ma anche più sfuggenti della sismicità: il verificarsi di scosse ravvicinate nello spazio e nel tempo. Spesso un forte terremoto è seguito da un certo numero di «repliche», che in genere aggiungono poco agli effetti della scossa principale. Il terremoto dell'Irpinia del 1980, per esempio, ebbe questa caratteristica. Ma nella storia sismica italiana esistono numerosi casi in cui la «replica» ha assunto la forma di un terremoto confrontabile con quello «principale». Il tutto aggravato dal fatto che, mentre una piccola replica è per definizione associata a una piccola faglia, magari un frammento di quella principale, una forte replica richiede una grande faglia, lunga anche 10-20 chilometri, che per evidenti motivi di spazio sarà posta a una certa distanza dalla faglia responsabile della prima scossa. Quindi una forte replica è fatalmente destinata a produrre danni in una zona solo marginalmente colpita dalla prima forte scossa,



eventualmente innescando un fenomeno a catena come quelli che si osservano lungo la faglia Nord-anatolica.

Un esempio italiano che tutti ricordano è quello del terremoto di Colfiorito del 26 settembre 1997 (si veda il grafico). Nella notte si verificò una scossa di magnitudo 5,6 che indusse una prima serie di crolli causando alcune vittime. La mattina dopo una scossa di magnitudo 5,8 localizzata un po' a nord della precedente peggiorò drasticamente il quadro, danneggiando anche la basilica di S. Francesco in Assisi e causando la morte di due persone. Nelle settimane successive altre scosse, tra cui una di magnitudo 5,0 presso Gualdo Tadino, estesero di molto la zona colpita, secondo un fenomeno di innesco del tutto simile a quello descritto da Stein: nell'insieme la sequenza aveva finito per interessare circa 50 chilometri di dorsale appenninica tra Umbria e Marche.

Quello del 1997 è un esempio recente, ma certamente non è l'unico. Il settore di catena che va da Norcia a L'Aquila aveva visto qualcosa di simile nel 1703, anche se in quel caso le scosse più forti ebbero magnitudo superiore a 6,5. Nel 1783 fu

la volta della Calabria, che venne scossa per oltre 100 chilometri dall'Aspromonte alla Sila con una serie di forti scosse culminate con una di magnitudo 6,9. Episodi analoghi si sono verificati più o meno in tutte le epoche, talora generando fenomeni spaventosi: il terremoto che nel 1456 devastò buona parte dell'Italia centro-meridionale, e che per anni è apparso nei cataloghi come un singolo evento di magnitudo ben superiore a 7, è quasi certamente l'effetto cumulato di tre o più scosse innescatesi reciprocamente. E non si dimentichi il recente terremoto del Molise, che con le forti scosse del 31 ottobre e 1 novembre 2002 ha fatto rivivere l'angoscia del «terremoto infinito» umbro-marchigiano del 1997.

Ora Stein e collaboratori stanno accendendo la speranza che, analizzando la storia sismica di una determinata regione, sia possibile capire quale segmento di faglia si romperà per primo: un'informazione che non consentirebbe un'evacuazione preventiva, come nel caso di una eruzione vulcanica, ma che potrebbe servire per una seria e risolutiva politica di

prevenzione, tale da rendere minime le perdite sia di vite umane sia materiali. Ma sarà possibile fare previsioni del genere anche in Italia? Stein e collaboratori descrivono tre generazioni di calcolo della pericolosità sismica (si veda la finestra a pagina 30) e, come è giusto che sia per chi fa ricerca di frontiera, considerano acquisiti i primi due livelli. Los Angeles, Istanbul e Tokyo condividono non solo un rischio sismico elevatissimo, ma anche condizioni «sperimentali» privilegiate: la faglia di San Andreas, la faglia Nord-anatolica e la fossa del Giappone sono tra le sorgenti di terremoti meglio studiate e meglio comprese del mondo. Ne è nota la

struttura interna, la storia sismica, lo stato di segmentazione, cioè la condizione fisica di «spezzettamento» in tanti elementi, ognuno capace di dare un forte terremoto. Sono tre zone di deformazione veloci e ben strumentate, dove è possibile formulare e verificare ipotesi nel volgere di pochi decenni. La «struttura sismica» dell'Italia, purtroppo, così come quella di moltissime aree sismiche del globo, non ci è ancora nota con questo dettaglio. La nostra penisola, fortunatamente, è sottoposta a processi deformativi relativamente lenti, e la sua geologia è complessa. Le nostre faglie sono piccole, frammentate e ben nascoste. Sappiamo che anche i terremoti italiani si parlano, anzi ne sentiamo spesso il brusio, ma non sappiamo ancora con esattezza dove sono. Capire dove si trovano le sorgenti sismogenetiche dei terremoti del futuro ancora prima che comincino a «parlare» è il nostro obiettivo primario e irrinunciabile per una più efficace mitigazione del rischio sismico in Italia.

Gianluca Valentini
Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia

Se sono corretti i calcoli eseguiti successivamente da Parsons dell'USGS, da Shinji Toda del Centro di ricerca giapponese sulle faglie attive, da Barka, da Dieterich e dal sottoscritto, questo potrebbe non essere stato l'ultimo degli strascichi del terremoto di Izmit. Lo stress trasferito durante quella scossa ha anche fatto aumentare da 1,9 a 4,2 per cento la probabilità di un forte sisma nella vicina Istanbul, entro l'anno in corso. Questa probabilità sale al 62 per cento se calcolata per i prossimi 30 anni; assumendo invece - secondo la visione convenzionale - che le grandi scosse si distribuiscano a caso, questa probabilità sarebbe solo del 20 per cento.

L'ipotesi dell'innescò da stress offre anche qualche motivo di consolazione, oltre a prospettive inquietanti. Quando certe regioni vengono messe in stato di allerta per i terremoti, il pericolo diminuisce inevitabilmente in altre. In Turchia le regioni a minor rischio risultano ben poco densamente popolate rispetto a Istanbul. Ma in qualche caso è vero il contrario. Uno degli esempi più chiari è la relativa mancanza di sismicità che l'area della Baia di San Francisco, attualmente dimora di 5 milioni di persone, ha sperimentato dopo il grande terremoto del 1906 di magnitudo 7,9. Un'analisi del 1998 condotta dai miei colleghi dell'USGS Ruth A. Harris e Robert W. Simpson ha dimostrato che le ombre di stress (*stress shadow*) collegate alla scossa del 1906 hanno toccato diversi segmenti paralleli della faglia di San Andreas, nell'area della Baia, ma a nord e a sud di questa zona d'ombra gli stress sono invece aumentati. Ciò potrebbe spiegare perché il tasso di scosse distruttive nell'area della Baia sia sceso di un ordine di grandezza rispetto ai 75 anni precedenti il 1906. La sismicità nell'area della Baia va ora ricostituendosi via via che lo stress si accumula di nuovo lungo la faglia.

L'ipotesi prende corpo

L'analisi dei terremoti in Turchia e nella California meridionale ha contribuito a rafforzare la nostra asserzione secondo cui perfino piccoli cambiamenti di stress possono avere effetti importanti, nel bene o nel male. Ma nonostante il sempre maggiore numero di esempi disponibili per sostenere questa idea, un punto critico rimaneva difficile da spiegare: circa un quarto dei terremoti che abbiamo esaminato si era verificato in aree nelle quali lo stress era *diminuito*. Fu facile per i nostri colleghi più scettici osservare che in queste zone d'ombra non si sarebbe dovuta verificare sismicità, dal momento che la scossa principale avrebbe alleviato almeno in parte lo stress allontanando così l'eventualità di collasso per quei segmenti di faglia. Oggi abbiamo una risposta. La sismicità non viene mai completamente meno nelle zone d'ombra, e neppure viene completamente attivata nelle zone di innescò. Piuttosto, il tasso di sismicità, vale a dire il numero di terremoti per unità di tempo, semplicemente viene a diminuire nelle zone d'ombra o a crescere nelle zone di innescò, relativamente al tasso precedente nella stessa area.

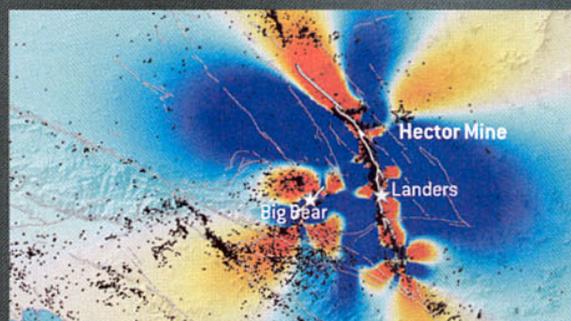
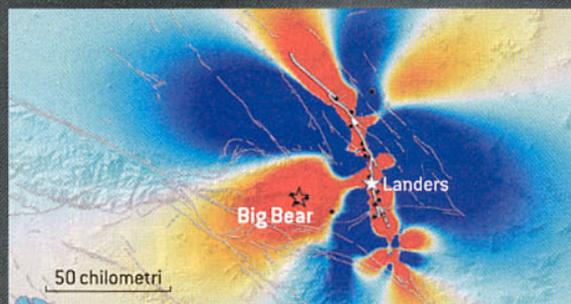
Dobbiamo questa persuasiva estensione dell'ipotesi dell'innescò da stress a una teoria proposta da Dieterich nel 1994. Questa teoria, che Dieterich ha denominato *rate/state friction*, comporta l'abbandono del confortevole concetto di attrito come proprietà che può solo variare tra due valori: alto attrito quando il materiale è stazionario e attrito minore quando sta scorrendo. Invece, le faglie possono diventare più o meno suscettibili di scorrimento con il variare della velocità di movimento lungo la faglia. Queste conclusioni sono state tratte da esperimenti di laboratorio nei quali il gruppo di Dieterich ha prodotto una faglia in miniatura in un blocco di granito delle dimensioni di una Volkswagen, innescando minuscoli terremoti.

Quando il comportamento dei terremoti viene calcolato considerando l'attrito come una variabile anziché un valore fisso, di-

GRAPPOLI DI TERREMOTI

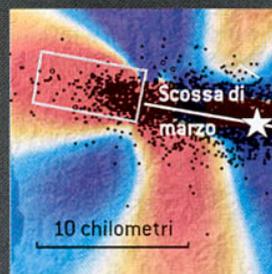
I SITI IN CUI LO STRESS AUMENTA (*in rosso*) dopo i grandi terremoti (*stelle piene*) tendono a essere sede di sismi successivi, forti (*stelle vuote*) o deboli (*punti neri*). Invece, pochi tremori si verificano laddove lo stress decade (*in blu*), per quanto vicine siano le faglie (*linee bianche*).

CALIFORNIA MERIDIONALE



UNA SCOSSA DI MAGNITUDO 7,3 nel deserto della California meridionale presso Landers, nel 1992, ha fatto aumentare il tasso di sismicità a sud-ovest, dove il terremoto di Big Bear (magnitudo 6,5) ha colpito tre ore dopo. Gli stress generati dalla combinazione dei due eventi di Landers e Big Bear corrispondono alle zone in cui si è verificata la grande maggioranza dei sismi nei sette anni successivi, culminando con il terremoto di magnitudo 7,1 di Hector Mine, nel 1999.

KAGOSHIMA, GIAPPONE



TERREMOTI GEMELLI possono far variare il tasso di sismicità in positivo o in negativo nello stesso sito. Nel marzo 1997 un sisma di magnitudo 6,5 ha fatto aumentare lo stress e la sismicità a ovest della faglia collasata (*in alto a sinistra*). La sismicità in quell'area è poi caduta, assieme allo stress (*a destra*) in seguito a una scossa di magnitudo 6,3 avvenuta 48 giorni dopo 3 chilometri più a sud.

venta chiaro che la legge di Omori è una proprietà fondamentale non solo delle cosiddette repliche, bensì di *tutti* i terremoti. La previsione basata su questa legge, secondo cui il numero delle scosse si impenna in un primo momento e poi diminuisce con il tempo, spiega perché una regione non mantenga per sempre il più alto tasso di sismicità che risulta da un incremento dello stress. Ma questa è solo metà della storia. La teoria di Dieterich rivela una caratteristica della sismicità dopo una scossa principale che la legge di Omori manca totalmente di evidenziare. Nelle aree in cui una scossa principale attenua lo stress, il tasso di sismicità precipita immediatamente, ma ritornerà lentamente agli stessi valori che precedevano la scossa principale in un modo prevedibile. Questi punti possono sembrare poco rilevanti, ma ci hanno permesso per la prima volta di fare previsioni sull'andamento della sismicità nel tempo. Quando in precedenza i nostri calcoli si basavano solo sugli stress di Coulomb, potevamo definire in generale la localizzazione di nuovi terremoti, ma non i tempi del loro verificarsi.

Le nostre idee furono ulteriormente confermate da uno studio globale condotto all'inizio dello scorso anno. Parsons considerò oltre 100 terremoti di magnitudo 7 o maggiore verificatisi in tutto il mondo negli ultimi 25 anni e quindi esaminò tutte le scosse successive di magnitudo almeno 5 nel raggio di 250 chilometri da ogni evento di magnitudo 7. Tra i 2000 e più eventi sismici di questo inventario, il 61 per cento corrispondeva a siti in cui una scossa precedente aveva provocato un incremento di stress. Poiché di queste scosse innescate erano abbastanza vicine al terremoto principale da poter essere considerate repliche, e in tutti i casi il tasso di questi tremori innescati decadeva nel periodo di tempo previsto da Dieterich e Omori.

Ora che stiamo applicando regolarmente la teoria di Dieterich nelle nostre analisi di terremoti, abbiamo iniziato a scoprire esempi più sofisticati di interazione tra i terremoti di quanto avremmo potuto fare con le sole analisi basate sugli stress di Coulomb. Fino a poco tempo fa, abbiamo spiegato solo situazioni relativamente semplici, come quelle della California e della Turchia, in cui un grande terremoto provoca un incremento della sismicità in alcune aree e una diminuzione in altre. Sapevamo che una conferma più decisiva per l'ipotesi dell'innescato da stress sarebbe stata un esempio nel quale scosse successive di entità equivalente avessero mutato la frequenza dei terremoti in positivo e in negativo al tempo stesso.

Toda e io abbiamo scoperto un esempio spettacolare di questo fenomeno. All'inizio dello scorso anno abbiamo cominciato ad analizzare un'insolita coppia di terremoti di magnitudo 6,5 che avevano colpito Kagoshima, in Giappone, nel 1997. Immediatamente dopo il primo terremoto, verificatosi in marzo, un'improvvisa esplosione di sismicità si manifestò in una regione di 25 chilometri quadrati appena oltre l'estremità occidentale del segmento di faglia interessato dal sisma. Quando calcolammo dove la scossa iniziale avesse trasferito lo stress, ci rendemmo conto che questo stress andava a ricadere proprio nella zona in-

teressata dall'incremento di sismicità. Ricontrammo anche che il tasso iniziava immediatamente a decadere, proprio come previsto. Ma quando la seconda scossa colpì 3 chilometri più a sud solo sette settimane più tardi, la regione resa più sismica sperimentò un'improvvisa diminuzione di oltre l'85 per cento. In questo caso i nostri calcoli rivelavano che la zona di innescato del primo terremoto era andata a ricadere nella zona d'ombra del secondo. In altre parole, il primo terremoto aveva fatto aumentare la sismicità, ma il secondo l'aveva smorzata.

Previsioni di nuova generazione

Ascoltare le conversazioni fra terremoti ha rivelato, se non altro, che la sismicità è altamente interattiva. E per quanto fenomeni diversi dal trasferimento di stress possano influenzare queste interazioni, i miei colleghi e io riteniamo che vi siano prove a sufficienza per indurre a una radicale revisione delle tradizionali previsioni probabilistiche. Attraverso una migliore definizione della probabilità che i movimenti sismici riflettano piccole variazioni dello stress sarà possibile aiutare i governi, le società di assicurazione e il pubblico in generale a valutare meglio le situazioni di rischio sismico. Le strategie tradizionali già rendono possibile istituire un qualche grado di priorità, consigliando il rafforzamento degli edifici e altri tipi di precauzioni. Ma le nostre analisi hanno mostrato come il tenere in conto l'innescato da stress possa condurre a una riclassificazione della pericolosità di alcune faglie, portandone alcune ai primi posti della lista. Viceversa, una faglia ritenuta pericolosa secondo i criteri tradizionali potrebbe in effetti costituire un rischio molto minore.

Un'avvertenza importante è che qualunque tipo di previsione sismica è difficile da verificare e quasi impossibile da falsificare. Oltre ai fattori che vengono considerati, il caso svolge un ruolo preponderante nel decidere se un terremoto si verifichi o no, un po' come, nella dinamica delle perturbazioni atmosferiche, determina se da una particolare configurazione si possa verificare o meno una tempesta. Il vantaggio dei meteorologi sui sismologi è che essi hanno acquisito milioni di dati critici in più che li possono aiutare nel miglioramento delle loro previsioni. I modelli atmosferici sono molto più facili da definire che non gli stress all'interno della Terra, dopo tutto, e le tempeste sono assai più frequenti dei terremoti.

Il raffinamento delle previsioni sismiche deve seguire la stessa falsariga, per quanto più lentamente. È questo il motivo per cui il mio gruppo di ricerca è andato avanti nell'inventario delle previsioni per i grandi terremoti che potrebbero verificarsi nei dintorni delle città a rischio sismico di Istanbul, Landers, San Francisco e Kobe. Stiamo anche attrezzandoci per fare previsioni su Los Angeles e Tokyo, dove un terremoto di grande entità potrebbe causare danni da migliaia di miliardi di dollari. Stiamo infine verificando la teoria attraverso lo studio di terremoti molto più piccoli che, in quanto più numerosi, sono anche più facili da prevedere.

L'AUTORE

ROSS S. STEIN, geofisico, fa parte dell'Earthquake Hazards Team dello US Geological Survey a Menlo Park, in California. È stato aggregato allo USGS nel 1981 dopo aver conseguito il Ph.D. alla Stanford University nel 1980. La ricerca di Stein, che è dedicata al miglioramento degli strumenti teorici per determinare il rischio sismico, è stata finanziata da enti come l'Office of Foreign Disaster Assistance e da società private, compresa la società europea di assicurazioni SwissRe. Per il lavoro delineato in questo articolo, Stein ha ricevuto lo Shoemaker Distinguished Achievement Award dello USGS nel 2000.

BIBLIOGRAFIA

GELLER ROBERT J., JACKSON DAVID D., KAGAN YAN Y. e MULARGIA FRANCESCO, *Earthquakes Cannot Be Predicted*, in «Science», 275, p. 1616, 1997.
PARSONS TOM, TODA SHINJI, STEIN ROSS S., BARKA AYKUT e DIETERICH JAMES H., *Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: An Interaction-Based Probability Calculation*, in «Science», 288, pp. 661-665, 2000.
Per osservare simulazioni di terremoti e scaricare Coulomb 2.2 [software per Macintosh e tutorial per il calcolo delle variazioni di stress] si veda il sito: <http://quake.usgs.gov/~ross>