

IL TERREMOTO DI ACQUA

Tutto comincia con due enormi strati di crosta terrestre che scivolano l'uno sull'altro. Poi il mare sussulta. Un'onda ancora impercettibile ma di energia inaudita si propaga per centinaia di chilometri trasformandosi in un muro d'acqua al suo arrivo davanti alla costa. Basta una semplice formula per prevedere come viaggerà e cosa diventerà uno tsunami, ma non ci sono formule per arrestarlo

testo **Giovanni Siniscalchi**, con la collaborazione di **Sabrina Mugnos**

2 L'onda di tsunami si propaga rimanendo quasi invisibile. Vicino alla costa, dove la profondità del mare è minore, inizia a innalzarsi.

3 Giunto a riva, il muro d'acqua può innalzarsi di decine di metri.

1 Un terremoto sottomarino fa innalzare e sprofondare il fondale. La colonna d'acqua soprastante sussulta: nasce uno tsunami.

L'energia di uno tsunami è tale che l'onda può compiere danni anche se le coste non sono piate ma ripide: l'acqua può risalire nell'entroterra anche fino al doppio dell'altezza dell'onda.



La nostra Terra è viva. E da quattro miliardi e mezzo di anni, l'epoca della sua formazione, continua a rimodellarsi di continuo. Spesso in tempi lunghissimi, non a caso detti tempi geologici, talvolta con brusche impennate ed eventi improvvisi e catastrofici. Come lo tsunami del 26 dicembre.

La struttura del nostro Pianeta è a cipolla: ha una crosta esterna, suddivisa in oceanica, spesso circa 7 chilometri, e continentale, spesso in media 20 e più chilometri; seguono un mantello intermedio, suddiviso in superiore e inferiore, e infine un nucleo esterno ancora fluido e un nucleo interno solido. Proprio nel suo cuore, protetto da più di 6000 chilometri di strati rocciosi e compresso da pressioni di milioni di atmosfere, la temperatura del Pianeta è intorno ai 6000 °C e fa fondere gli strati soprastanti innescando dei moti convettivi.

Questi ultimi, nel corso di milioni di anni,

hanno creato forti tensioni negli strati rocciosi superficiali arrivando a frammentarli in diverse placche.

E così i primi 100-200 chilometri di superficie chiamati litosfera (la crosta e una porzione di mantello) sono frammentati in una dozzina di placche che si muovono a velocità dell'ordine di alcuni centimetri l'anno galleggiando sopra uno strato semi-fluido, l'astenosfera.

Dal momento che la massa del nostro Pianeta è costante, per ogni zona in cui le placche si allontanano permettendo al magma caldo di risalire dalla profondità della Terra e di solidificare formando nuova crosta, ne deve esistere un'altra dove le stesse zolle convergono e sprofondano l'una sotto l'altra.

L'attività sismica è localizzata in queste zone, dove ampie porzioni di margini di placca rimangono spesso bloccate da forti attriti per periodi più o meno lunghi subendo una progressiva deformazione e il conseguente accumulo di sforzo elastico.

A un certo punto tale sforzo supera la resistenza di attrito e i due margini di placca hanno un brusco scorrimento: si scatena il terremoto.

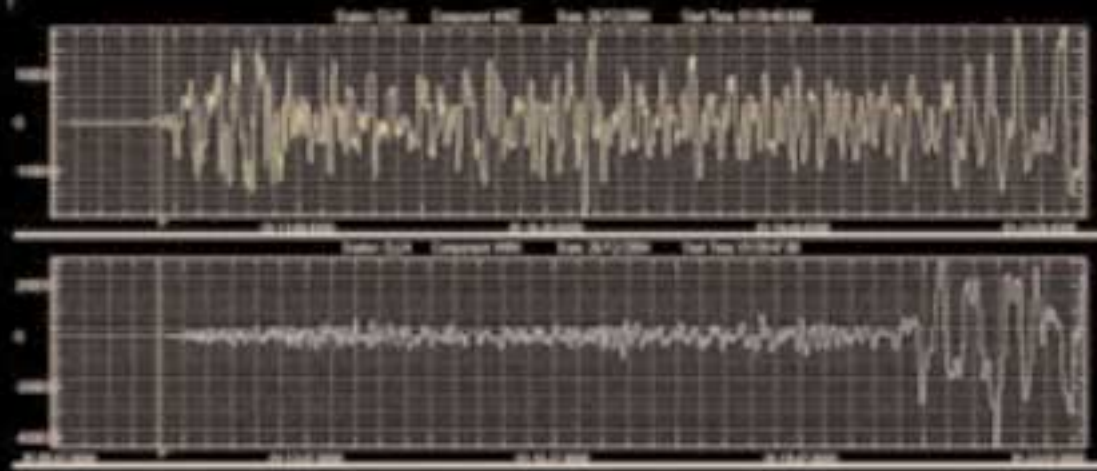
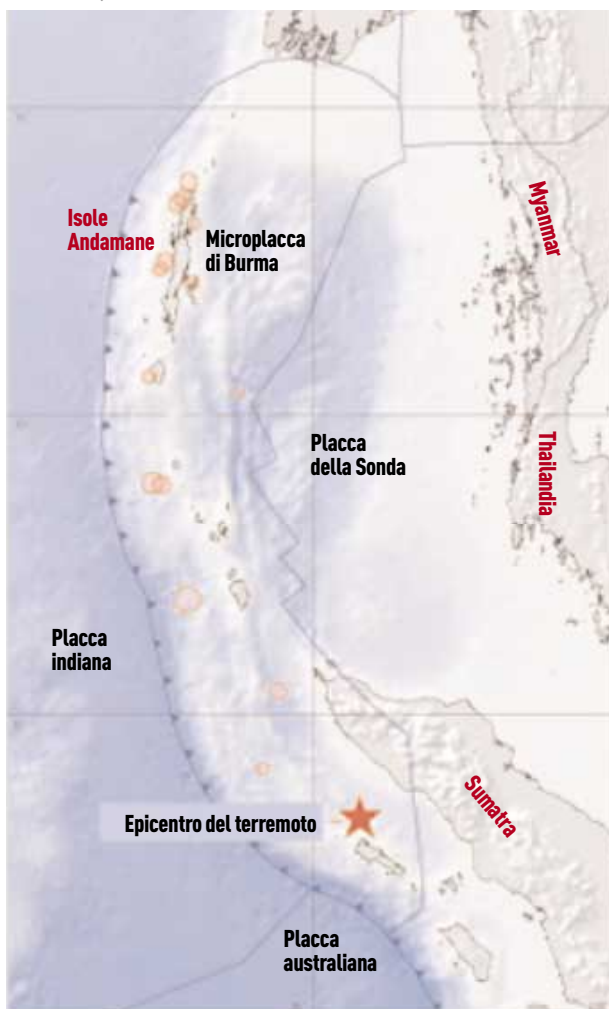
Un improvviso muro liquido

La regione indonesiana è una delle zone più sismiche della Terra. L'attività tettonica è dominata dalla convergenza delle placche indiana e australiana verso la placca euroasiatica a una velocità di circa 6 centimetri l'anno.

Il terremoto del 26 dicembre è avvenuto al largo della costa nordoccidentale di Sumatra, dove si trovano la placca australiana, quella indiana, quella della Sonda e la microplacca di Burma. In particolare il sisma si è verificato tra quest'ultima e le placche indiana e australiana. La sua magnitudo è stata pari a 9 sulla scala Richter, una delle maggiori degli ultimi 100 anni in tutto il mondo. Dalla metà dello scorso secolo a oggi solo altri tre terremoti sono stati più intensi: quello del Cile nel 1960 (magnitudo 9,5), dell'Alaska nel 1964 (9,2) e sempre in Alaska nel 1957 (9,1).

L'elevatissima energia liberata dal sisma è stata all'origine del catastrofico tsunami che ha devastato l'intero Oceano Indiano.

L'epicentro del terremoto del 26 dicembre e le faglie che lo hanno provocato (i margini di placca sono in azzurro).



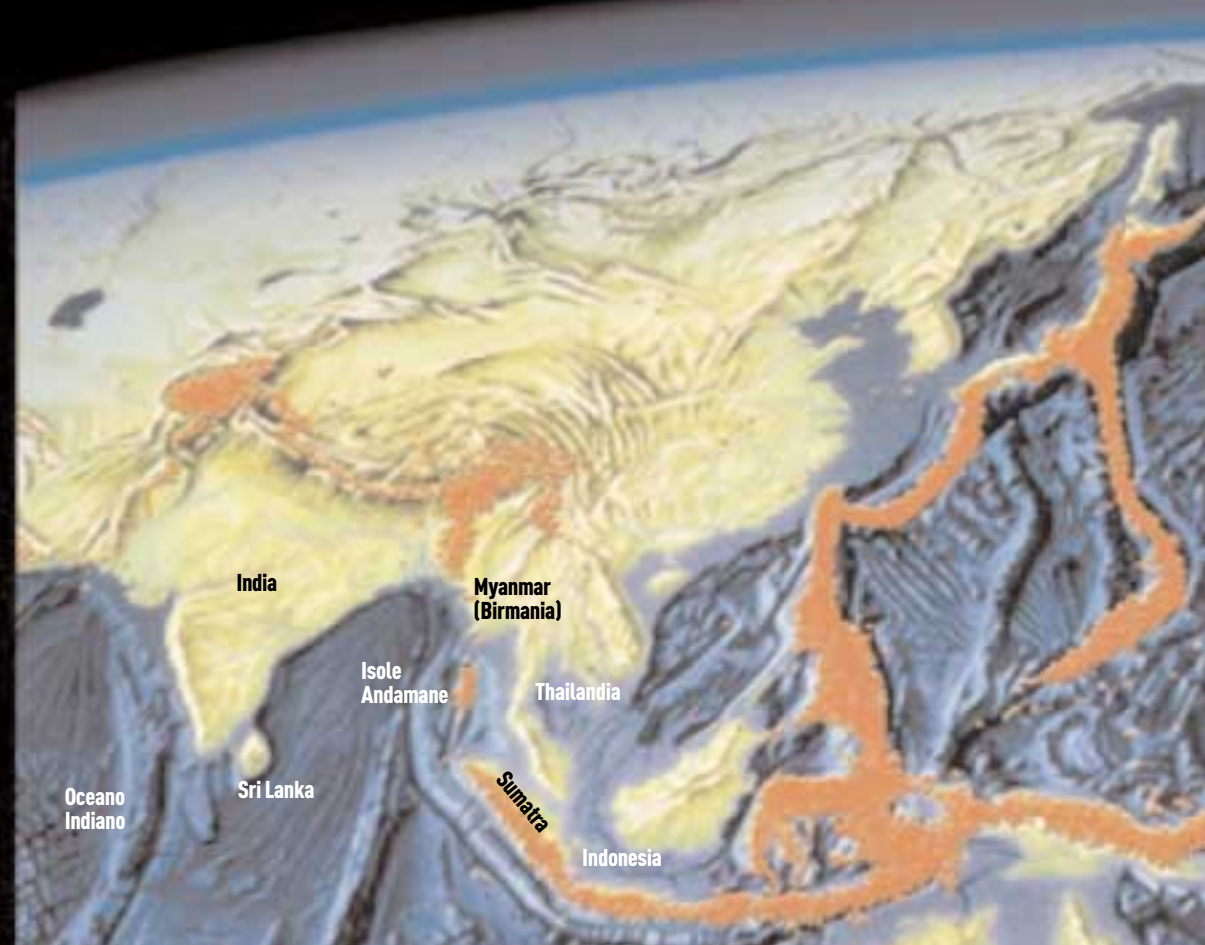
UNA FRATTURA CHE HA VIAGGIATO A 7200 KM/H

In alto, la registrazione dei primi 15 minuti del terremoto del 26 dicembre effettuata dai sismometri della stazione sismica di Colliano (Irpinia) dell'Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Secondo i primi calcoli effettuati dal Servizio Geologico degli Stati Uniti, in questo sisma le tensioni

accumulate hanno frammentato le rocce a 30 chilometri di profondità, innescando uno scorrimento su un piano di faglia lungo 400 chilometri. La frattura si è propagata, come l'incrinatura su una lastra di vetro, alla elevatissima velocità di 2 chilometri al secondo (7200 chilometri l'ora) cosicché in

200 secondi, poco più di 3 minuti, ha creato una spaccatura lunga come da Roma al Po. Lo scorrimento tra un piano e l'altro della faglia è stato di 15 metri. Di conseguenza l'isola di Sumatra, che è grande una volta e mezzo l'Italia e si trova sul bordo superiore della faglia, si è spostata di

una quindicina di metri verso Sudovest, insieme ovviamente a tutto il fondale marino su cui poggia e che si è sollevato di circa un metro, poiché il piano della faglia risulta inclinato di circa 15 gradi rispetto alla superficie terrestre. In basso, la mappa della sismicità (in rosso) dell'Asia sudorientale.



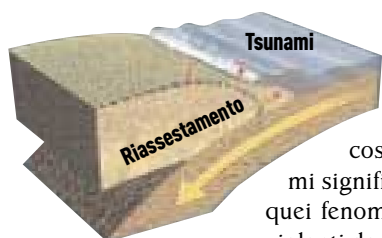


La sequenza dei fenomeni che hanno generato il terremoto del 26 dicembre.

1. La placca indiana sprofonda al di sotto della placca di Burma. Quest'ultima oppone resistenza e tende a tornare nella posizione originaria. **2.** Si crea un'area di distorsione (in rosso), con sprofondamenti e sollevamenti.



3. L'area di confine fra le due placche si solleva e poi si riassetta di colpo: si verifica il terremoto e quindi lo tsunami.



La parola tsunami deriva dall'unione di due termini giapponesi: *tsu* significa porto, spiaggia o più genericamente costa, *nami* significa onde. Tsunami significa così onde di porto e indica quei fenomeni, maremoti compresi, così violenti da sconvolgere anche le acque all'interno dei porti, cioè dove le imbarcazioni dovrebbero essere mag-

giormente protette. È un'onda anomala, che non ha nulla a che fare con quelle prodotte da tempeste e uragani. Quando comincia a formarsi una tempesta c'è un congruo preavviso: vento e pioggia incrementano progressivamente col tempo, così come il moto ondoso. Uno tsunami, invece, non dà preavviso. Il tempo è mite e soleggiato, il mare calmo e la terra ferma. Poi, improvvisamente, un muro d'acqua travolge ogni cosa.

Esso si genera allorché una perturbazione si propaga all'interno di una massa acquosa. La causa più frequente di tale perturbazione sono i terremoti sottomarini che generano spostamenti di porzioni del fondo del mare; seguono le eruzioni vulcaniche o le grosse frane sottomarine. Tuttavia il fenomeno può innescarsi anche per un evento che si verifica sulla terraferma, come quando una frana si stacca da una riva alta e ripida e precipita in mare.



La costa di Kalutara, nello Sri Lanka, fotografata dal satellite Quickbird il 26 dicembre alle 10,20 locali, un'ora dopo l'arrivo della prima onda di tsunami. Altre onde arrivano, mentre dall'entroterra le precedenti rifluiscono verso il mare creando le turbolenze visibili nell'immagine. Già a questo punto il mare aveva «mangiato» 150 metri di costa verso l'interno.

LA RICOSTRUZIONE DELLA CATASTROFE

La ricostruzione in laboratorio dello tsunami seguito al terremoto del 26 dicembre, realizzata dall'Istituto nazionale di Geofisica e Vulca-

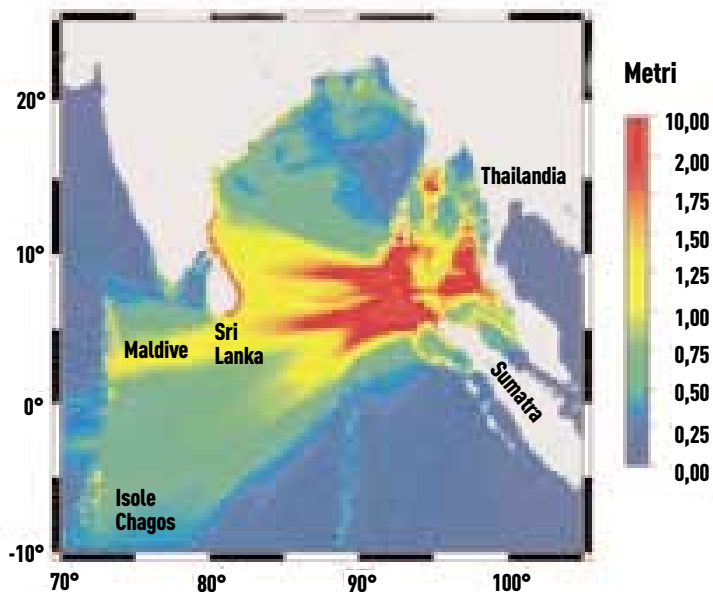
nologia. Il colore indica l'altezza delle onde: in rosso l'altezza maggiore (10 metri), in blu il normale livello del mare. Si vede come le coste

dello Sri Lanka e della Thailandia siano state quelle maggiormente colpite dallo tsunami. Si nota come le onde, molto basse in mare aperto, acquistino

altezza diventando enormi in prossimità delle coste. Le onde si sono propagate in tutte le direzioni, ma con una evidente concentrazione in direzio-

ne Est-Ovest, verso la Thailandia (Est) e verso lo Sri Lanka (Ovest). La prima onda che si è propagata verso Est (Thailandia) è stata di ampiezza negativa, seguita da un'onda positiva: questo significa che l'arrivo dello tsunami sulle coste della Thailandia si è manifestato come un ritiro del mare a cui ha fatto seguito l'inondazione. Lo tsunami che si è propagato verso Ovest (Sri Lanka) è stato invece caratterizzato da una prima onda positiva seguita da una negativa: sulle coste dello Sri Lanka dell'India e delle Maldive, si è manifestato come un'inondazione a cui ha fatto seguito un ritiro dell'acqua.

Massima altezza dell'acqua



Eccezionalmente uno tsunami può essere generato dall'impatto di corpi celesti, quali asteroidi o meteoriti, sulla superficie degli oceani. Ma affinché la perturbazione sia tale da generare uno tsunami deve essere verticale e improvvisa.

Infatti, nel caso di fenomeni che implicano una deformazione lenta e costante del fondo del mare quali subsidenza (sprofondamento), bradisismo (lento alternarsi di sprofondamenti e innalzamenti) e colate laviche non esplosive, la massa d'acqua si adatta alle deformazioni della superficie passando attraverso varie configurazioni di equilibrio.

Inoltre, uno tsunami può nascere soltanto se la lunghezza delle onde generate, cioè la distanza tra le creste di due onde successive, è maggiore della profondità media del bacino. Quindi la perturbazione deve verificarsi su una superficie sufficientemente grande, cioè di raggio maggiore della profondità media del mare nella zona.

La legge della velocità

Gli tsunami si propagano con una velocità proporzionale alla profondità del mare in quel punto; in particolare la velocità è uguale alla radice quadrata del prodotto dell'accelerazione di gravità ($9,8 \text{ cm/s}^2$)

per la profondità dell'acqua (anch'essa in centimetri). In un oceano con la profondità media di 4000 metri le onde arrivano a 712 chilometri l'ora; in acque ancora più profonde raggiungono quella di un aereo: a 6100 metri di profondità viaggiano a 890 chilometri orari.

Nel 1960, uno tsunami generato dal terremoto del Cile attraversò l'intero Oceano Pacifico in diagonale raggiungendo in 22 ore il Giappone, distante oltre 16.800 chilometri, dove uccise oltre 200 persone.

Poiché in uno tsunami la velocità e l'altezza delle onde hanno un rapporto sostanzialmente fisso, legato all'energia in gioco che ha attivato il fenomeno, più le onde sono veloci e più la loro altezza è bassa; solitamente in mare aperto questa non supera alcune decine di centimetri.

Lo tsunami del 1896 che distrusse 275 chilometri di costa in Giappone facendo 28.000 vittime non fu individuato dai pescatori che si trovavano a 30 chilometri al largo dalla costa giapponese perché le onde erano alte appena 40 centimetri.

NEL 1960 UNO TSUNAMI PARTÌ DAL CILE E DOPO 22 ORE PROVOCÒ OLTRE 200 VITTIME IN GIAPPONE

La lunghezza d'onda, cioè la distanza tra una cresta e l'altra, va da alcune decine fino ad alcune centinaia di chilometri, con un periodo di oscillazione che quindi varia da 5 minuti fino a un'ora e mezza.

In passato molte persone hanno perso la vita perché, passate alcune decine di minuti dalla prima onda, sono tornate nelle case ritenendo che l'allarme fosse cessato. Invece dopo un'ora è arrivata la seconda ondata.

Il record: un'onda di 520 metri

A mano a mano che il fondale marino si rialza, verso le coste, e quindi la profondità del mare si riduce, la velocità delle onde si abbassa. Di conseguenza, poiché l'energia

essere enormi, come il maremoto del 26 dicembre ha mostrato: abbattendosi su una riva, un'onda di tsunami può risalire sulla costa anche ad altezze tre volte superiori alla propria, mentre le correnti generate dall'acqua possono penetrare fino a 20 chilometri nell'entroterra muovendosi a 35-70 chilometri l'ora, una velocità che non consente scampo.

Non si tratta poi di semplice acqua di mare, ma di fango e detriti che viaggiano a questa velocità travolgendo e seppellendo ogni cosa che incontrano. Nel caso delle piccole isole, come è avvenuto nell'Oceano Indiano, si può verificare un ulteriore fenomeno,



Nella simulazione al computer, come si presenta un'onda di tsunami. Sul mare assolutamente calmo appare un vero e proprio muro d'acqua lungo chilometri e chilometri.

in gioco resta la stessa (le perdite dovute alla distanza sono minime), l'altezza delle onde aumenta vertiginosamente, fino a raggiungere anche diverse decine di metri. La più alta onda di tsunami mai registrata è stata di 520 metri e fu provocata da un terremoto con conseguente frana nella Lituya Bay in Alaska, nel 1958.

Quello che gli sfortunati abitanti delle coste vedono nell'imminenza di uno tsunami non è però un'onda solitaria e torreggiante, come un cavallone; piuttosto una specie di gigantesca marea, come se tutto il mare prima si ritirasse e poi improvvisamente crescesse di livello. In pratica l'intero mare è l'onda. Le devastazioni possono

detto *wrap around* (avvolgimento). Le onde di tsunami, avvicinandosi a un arcipelago, vengono riflesse dalle isole o si avvolgono intorno a esse; inoltre vengono diffratte nei canali tra un'isola e l'altra, proprio come avviene nel caso della luce che passa attraverso una feritoia. Il fenomeno, a seconda della lunghezza d'onda, può far annullare due onde (se la cresta dell'una coincide con il ventre di un'altra) o rinforzarle, generando un'onda alta il doppio delle due originarie. Che moltiplica i danni.

**VIAGGIANDO A 70 KM ORARI
L'ONDA PUÒ ARRIVARE FINO A 20
CHILOMETRI NELL'ENTROTERRA**