



Katsushika Hokusai, *Dietro la grande onda a Kanagawa* (1823-1829), dipinto su legno

Onde *da paura*: viaggio di FAUSTO SALERI al centro di uno *tsunami*!

Negli ultimi anni a causa di eventi particolarmente disastrosi l'attenzione delle persone è stata richiamata su quelli che i giornalisti hanno chiamato maremoti, onde killer, onde anomale o infine, più correttamente, tsunami. Tutti noi abbiamo purtroppo ben presente la devastazione portata da queste onde il 26 dicembre del 2004 su Sumatra o dalle onde anomale abbattutesi su Stromboli nel 2002 a causa di una frana.

Ma in che cosa consiste uno tsunami e come ci si può difendere da queste onde micidiali?

Il termine tsunami (津波) significa in giapponese "onda contro il porto" (dalla composizione dei due ideogrammi *tsu*, porto, e *nami*, onda), con riferimento alle devastazioni che accompagnano questo tipo di fenomeni nelle zone costiere. Si tratta, in generale, di onde oceaniche che, dopo aver percorso un numero anche molto ele-

vato di chilometri in mare aperto, aumentano enormemente la loro altezza in prossimità di bassi fondali, per terminare poi la corsa sulla terraferma investendo tutto quello che incontrano sul loro cammino. L'origine di uno tsunami può essere estremamente varia, andando dalla remota possibilità di impatti meteorici di grandi dimensioni

in mare a movimenti tettonici, frane o eruzioni sottomarine. Più in generale, possiamo immaginare che ogni evento in grado di mettere rapidamente in movimento una colonna d'acqua sufficientemente estesa possa scatenare uno tsunami. Proprio per questo motivo, in un congresso scientifico del 1963, si è deciso di usare il termine tsunami per

evitare sinonimi (come onda di marea o maremoto) fuorvianti.

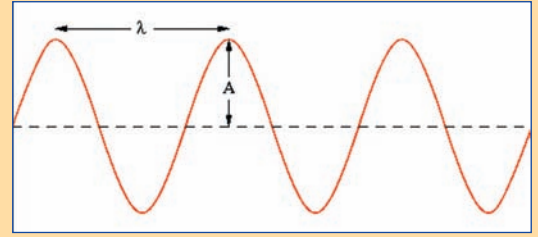
PER QUALI RAGIONI SI GENERA UNO TSUNAMI?

La ragione delle devastazioni causate da queste onde risiede nelle leggi che regolano la propagazione di un'onda. Un'onda (che immaginiamo per semplicità di tipo **sinusoidale**) può essere descritta attraverso la sua *ampiezza* e la sua *lunghezza d'onda*. Tanto maggiore è la lunghezza tanto maggiore sarà il tempo (il *periodo*) che ci vorrà perché, fissato un punto nello spazio, l'onda raggiunga di nuovo la medesima quota. Le onde che osserviamo sulla spiaggia sono solitamente generate al largo per effetto del vento e si stima che viaggino a una velocità circa pari alla metà di quella del vento che le ha generate. Per esempio, in caso di burrasca, con un vento che spira attorno ai 40 nodi (circa 70 km/h), si generano onde che viaggiano a una velocità di circa 20 nodi e che possono essere alte anche 8 metri (secondo quella che in nautica è chiamata la scala di Beaufort). Propagandosi, esse tenderanno ad affievolirsi, a causa dell'attrito con il fondale, e approssimativamente ridurranno di $\frac{1}{3}$ la loro ampiezza ogni volta che avranno percorso una distanza pari a circa 6.000 volte la loro lunghezza in metri: un'onda lunga 50 metri e alta 6 metri si ridurrà quindi di 2 metri di ampiezza dopo aver percorso circa 300 chilometri. Teniamo comunque conto che, in condizione normali di brezza, si generano onde al più di un metro di altezza, che giungono a riva con un periodo molto piccolo (dell'ordine, al massimo, di qualche decina di secondi) e una lunghezza dell'ordine di qualche centinaio di metri.

Quando la profondità del mare diventa inferiore alla metà della lunghezza d'onda si verificano dei cambiamenti nell'onda stessa, che diventa più ripida e instabile, per rompersi infine, quando la profondità del mare è circa una volta e mezza l'ampiezza dell'onda. In questo modo si origina lo spettacolo dei cavalloni che si infrangono sulle coste.

Questi fenomeni sono gli stessi che regolano l'evoluzione di uno tsunami, con un'enorme differenza: contrariamente alle onde generate dal vento, quelle che compaiono in uno tsunami hanno un periodo anche dell'ordine di un'ora, una

Un'onda sinusoidale viene generalmente descritta tramite la sua ampiezza A , che rappresenta la massima altezza che essa raggiunge, e la sua lunghezza λ che è la distanza fra due punti



di massimo (o di minimo) consecutivi. Se l'onda viaggia con velocità v e ha frequenza ν (equivalente all'inverso del periodo T) avremo che $\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$.

lunghezza d'onda che può superare i cento chilometri e un'ampiezza di qualche decina di centimetri. Sono quindi fin dall'inizio onde d'acqua bassa (*shallow water waves*), nel senso che la loro lunghezza d'onda è molto maggiore della profondità del mare. La loro velocità di propagazione v è pari a $(gh)^{1/2}$, dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità e h è la profondità del mare. Se supponessimo, per esempio, di trovarci nell'Oceano Indiano, che ha una profondità media di 3890 metri, usando la formula appena indicata, scopriremmo che le onde di uno tsunami si possono propagare a una velocità di circa 700 km/h! Si tratta quindi di onde che si muovono veloci quanto un aeroplano e che sono praticamente invisibili a un osservatore che si trovi in mare aperto, per la loro piccola ampiezza. Se a questo aggiungiamo il fatto che esse conservano praticamente inalterata la loro energia (la perdita di energia per un'onda è, infatti, inversamente proporzionale alla sua *frequenza*) possiamo avere un'idea del pericolo che gli tsunami rappresentano.

L'EVOLUZIONE DELL'ONDA

Proviamo allora a immaginare l'insorgere di uno tsunami: un terremoto del settimo grado della scala Richter scuote il fondo dell'Oceano Indiano generando onde di una lunghezza di circa 200 km e di una trentina di centimetri di altezza. Avendo un lungo periodo (e quindi una bassa frequenza), esse si avvicinano rapidamente alla costa mantenendo la medesima energia che avevano quando sono state generate. Al ridursi della profondità, per la legge che abbiamo scritto in precedenza, sono costrette a rallentare: quando il fondale tocca 2000 metri la loro velocità si riduce a circa 500 km/h e la loro lunghezza a 151 km. Lo tsunami è ormai in prossimità della costa e con il fondale a soli 100 metri è formato da onde che si muovono a 80 km/h e che

hanno una lunghezza d'onda di 23 km, il che le rende comunque del tutto invisibili a degli osservatori posti su una imbarcazione, e tali resteranno anche quando la profondità toccherà i 50 metri, viaggiando a 36 km/h con una lunghezza d'onda di circa 10 km. Se teniamo presente che una persona normale può correre alla velocità di 30 km/h per tempi brevissimi, ci rendiamo conto che un bagnante sorpreso sulla riva non avrà molte possibilità di fuga. Inoltre, conservandosi l'energia, l'altezza dell'onda non potrà che crescere (in prima approssimazione l'altezza delle onde aumenta proporzionalmente a $h^{-1/4}$). Giunto quindi in prossimità della riva, lo tsunami si manifesterà con violenza, eventualmente preceduto da una rapida, quanto effimera, bassa marea. È a questo punto che le onde raggiungeranno la loro massima altezza (chiamata *runup*), che può essere pari a dieci volte l'ampiezza dell'onda iniziale.

L'entità del *runup*, così come la successiva evoluzione del fenomeno, è decisamente influenzata dall'andamento della *batimetria* (cioè dalla conformazione del fondo), nonché dai materiali che costituiscono il fondale, caratteristiche che, unitamente alla presenza di alberi o ostacoli artificiali sulla terraferma, possono giocare favorevolmente nel limitare la forza distruttrice di uno tsunami e il suo potere di addentrarsi nell'entroterra. Questo non toglie che tsunami di particolare intensità (un mega-tsunami, come quello che investì l'isola di Sumatra il 26 dicembre del 2004) possano causare un numero molto elevato di vittime e danni enormi.

COME VENGONO CLASSIFICATI GLI TSUNAMI?

Esattamente come per i terremoti, si fa riferimento a scale di intensità basate sugli effetti osservati. La più utilizzata è quella proposta nel 1927 da August Sieberg (1875-1945) e successivamente

modificata nel 1962 da Nicholas Ambraseys. In essa, attraverso 6 gradi, si passa da tsunami classificati come molto deboli (caratterizzati da onde registrate solo dai mareografi) ad altri molto più disastrosi (con distruzione completa delle opere costruite dall'uomo, anche a grande distanza dalla costa, e con molte vittime). Attualmente questa scala non è considerata adeguata dai ricercatori del settore e nel 2001 Gerassimos Papadopoulos e Fumiko Imamura ne hanno proposta una articolata su 12 livelli nella quale, per ogni livello di intensità, vengono distinti gli effetti sugli uomini, sugli oggetti (incluse le imbarcazioni) e sugli edifici e viene indicata l'altezza massima delle onde. Tanto per avere un'idea, il livello V (forte) di questa scala corrisponde approssimativamente al livello 4 della scala di Sieberg-Ambraseys e prevede onde di un metro d'altezza (il livello XII prevede onde alte 32 metri!).

Onde di questa intensità non sono fortunatamente frequenti, anche se storicamente la successione degli tsunami più disastrosi è impressionante e non risparmia nessuna parte del globo. I dati che riportiamo nella tabella riassumono i peggiori 5 tsunami, dal punto di vista delle vittime, di cui si abbia memoria in quattro aree: Oceano Pacifico, Atlantico, Indiano e Mar Mediterraneo. Come si vede dai numeri, anche se l'Oceano Indiano è certamente l'area più soggetta a eventi di questo tipo, proprio per l'intensa attività sismica che lo contraddistingue, anche l'Italia è stata segnata da tsunami disastrosi, come quello che colpì la città di Messina nel 1908, causato dal terremoto.

nelle isole Hawaii dallo tsunami generato da un terremoto di magnitudine 7.1, con epicentro nelle Isole Aleutine. La rete, che ha la sede operativa nelle isole Hawaii (nel *Pacific Tsunami Warning Center*, PTWC), è costituita da un sistema di osservazione e monitoraggio che combina rilevazioni sismologiche (provenienti da circa 150 stazioni sismiche distribuite sul globo) con misure delle variazioni del livello del mare (provenienti da un centinaio di stazioni e boe), per individuare l'insorgere di uno tsunami e allertare quindi i paesi rivieraschi. Ad essa si affiancano centri di allerta nazionali (i principali in Cile, Giappone e Russia, oltre che negli Stati Uniti). Quando viene rilevato un sisma sottomarino di magnitudine almeno pari a 6.5 i paesi membri della rete vengono immediatamente informati e, se la magnitudine è superiore a 7.5, si lancia l'allarme di un possibile maremoto che verrà confermato o meno a seconda dei dati che arriveranno dalle boe oceanografiche o dalle stazioni costiere (come quelle che formano il cosiddetto sistema DART, *Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*). È proprio questa seconda parte che si è rivelata deficitaria nella tardiva previsione dello tsunami del 2004: le onde sismiche sono state infatti rilevate dal PTWC, come da tutte le stazioni sismiche del mondo, ma il PTWC non aveva allora alcun mareografo collegato nell'Oceano Indiano e, conseguentemente, ha emanato bollettini imprecisi che sottostimavano la probabilità di maremoto. Bisogna anche aggiungere, a questo riguardo, che in gene-

Oceano Pacifico			Oceano Atlantico		
		<u>vittime</u>			<u>vittime</u>
22 maggio 1782	Taiwan	40.000	1 novembre 1755	Portogallo	60000
20 settembre 1498	Giappone	31.000	7 giugno 1962	Giamaica	2000
28 ottobre 1707	Giappone	30.000	3 ottobre 1780	Giamaica	300
15 giugno 1896	Giappone	27.122	7 maggio 1842	Haiti	300
13 agosto 1868	Cile	25.674	6 dicembre 1917	Nuova Scozia	200
Oceano Indiano			Mar Mediterraneo		
		<u>vittime</u>			<u>vittime</u>
26 dicembre 2004	Sumatra	225000	1410 a.C.	Mare Egeo	>100000
27 agosto 1883	Giava/Sumatra	36500	28 dicembre 1908	Italia	>10000
26 giugno 1941	Isole Andamane	5000	6 febbraio 1783	Italia	>1500
3 settembre 1861	Sumatra	1700	11 gennaio 1693	Italia	>1000
16 giugno 1819	Mare Arabico	1543	20 settembre 1867	Grecia	12

È POSSIBILE PREVENIRE GLI TSUNAMI?

È quindi importante munirsi di strumenti che permettano, da un lato, di rilevare lo tsunami nella sua fase iniziale, in modo da allertare per tempo le popolazioni costiere, dall'altro di simulare *real-time* l'evoluzione, così da avere previsioni sufficientemente accurate delle aree che verranno maggiormente colpite e migliorare gli interventi di difesa. E non va neppure sottovalutato l'aspetto informativo, se si pensa che fu proprio il ricordo di una lettura sul ritiro dell'acqua che precede uno tsunami a salvare la vita alla piccola Tilly, una bimba inglese di dieci anni, durante lo tsunami di Sumatra.

Storicamente, la prima rete di rilevamento degli tsunami, il Pacific Tsunami Warning System (PTWS), è stata attivata nel 1948 dagli Stati Uniti d'America nell'Oceano Pacifico a seguito della devastazione provocata il 1° aprile 1946

rale non vengono comunque emanati bollettini di allerta se non dopo 15-20 minuti dal rilevamento del sisma, ossia fuori tempo massimo per gli abitanti del Nord di Sumatra che sono stati investiti dall'onda dopo soli 15 minuti (e che hanno costituito i 4/5 del totale delle vittime).

E per quanto riguarda l'Italia? Anche se, come abbiamo visto, l'Italia non è stata esente da tsunami in passato, attualmente non esiste l'equivalente del PTWC né nel Mediterraneo, né per i paesi europei che si affacciano sull'Atlantico. Solo di recente si è formato, sotto la presidenza italiana, un gruppo di coordinamento intergovernativo (l'ICG/NEAMTWS, *Intergovernmental Coordination Group for the establishment of the North East Atlantic, the Mediterranean and connected seas Tsunami Warning System*), che deve studiare la messa a punto di un sistema analogo al PTWC. Il problema principale è il tempo d'allerta: tenendo conto infatti che i possibili punti di

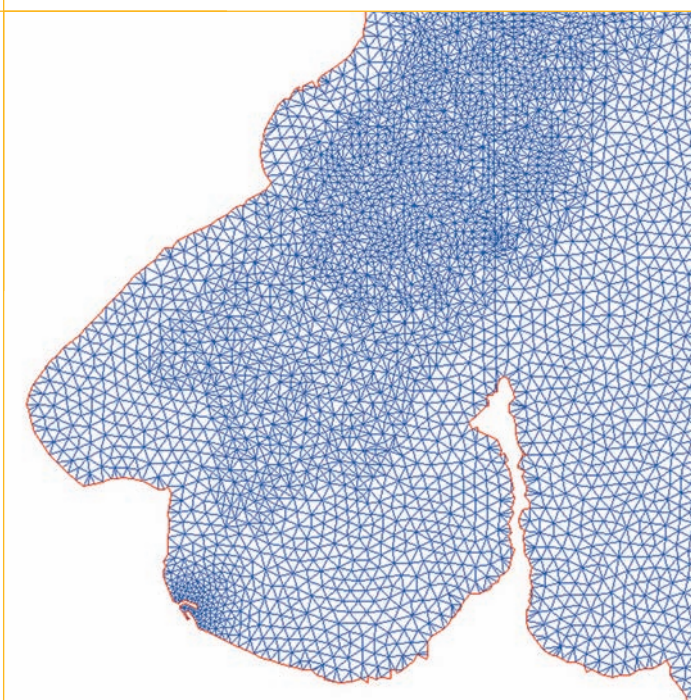
partenza di tsunami (associati a faglie particolarmente attive o a vulcani sottomarini) si trovano a meno di 10 minuti dalla costa, è indispensabile che i bollettini possano essere emessi in tempo reale.

IL CONTRIBUTO DELLA MATEMATICA

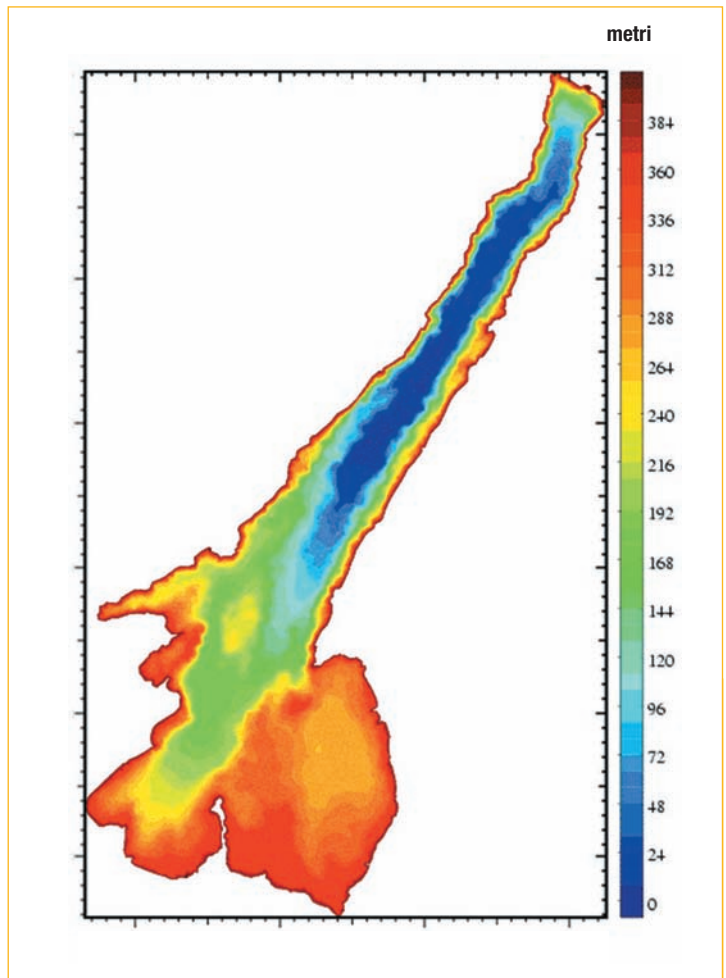
La modellistica matematica può dare in questi casi un aiuto importante. È infatti teoricamente possibile simulare al computer l'evoluzione e l'impatto sulle coste di uno tsunami, utilizzando modelli numerici basati sull'approssimazione delle equazioni di Navier-Stokes per un fluido incomprimibile (come l'acqua) a superficie libera (ossia la posizione del livello del mare). In queste equazioni, che descrivono i principi fisici di conservazione della massa e dell'energia, le incognite del problema (velocità, pressione e altezza dell'acqua) compaiono attraverso le loro derivate (parziali) rispetto al tempo e allo spazio: sono dunque equazioni differenziali per le quali non è possibile trovare in generale una soluzione analitica e, per questo motivo, si deve ricorrere a opportune approssimazioni.

Le tecniche di approssimazione passano attraverso la discretizzazione del dominio di calcolo (cioè del tratto di mare o di oceano che si vuole studiare), ossia attraverso la sua decomposizione in un numero finito (potenzialmente anche molto grande) di più elementi geometrici semplici (tetraedri, esadri o prismi): essi costituiranno la cosiddetta *griglia di calcolo*. L'idea è che, infittendo la griglia, aumentando cioè il numero di elementi che la compongono, si possano approssimare sempre meglio le grandezze fisiche incognite. Un esempio di griglia formata da triangoli e relativa alla parte meridionale del lago di Garda è mostrata in figura: si noti che il "passo di griglia", vale a dire la grandezza dei triangoli che la costituiscono, non è uniforme e si infittisce laddove il modellatore ha ritenuto di dover risolvere meglio il problema fisico.

In questo modo è possibile aumentare l'accuratezza dell'approssimazione solo dove effettivamente serve, contenendo il numero complessivo di incognite del metodo numerico (tec-



Una griglia di calcolo non uniforme formata da triangoli per la parte meridionale del lago di Garda (si può riconoscere la penisola di Sirmione)



Batimetria del lago di Garda usata dal modello numerico per la simulazione dello tsunami (immagine generata da Edie Miglio, Mox - Politecnico di Milano)

niche di questo tipo prendono il nome di **metodi adattivi** o **con adattività di griglia**). Le variabili di interesse (nonché le loro derivate, che compaiono nelle equazioni di Navier-Stokes) verranno quindi approssimate solo in un numero finito di punti, i cosiddetti *gradi di libertà* o *nodi*, associati agli elementi della discretizzazione. Per esempio, per una griglia bidimensionale formata da triangoli, i gradi di libertà potrebbero essere i valori assunti dalle quantità incognite nei vertici dei triangoli stessi. È importante osservare come, in questo processo di discretizzazione, vengano sistematicamente eliminate tutte quelle operazioni che, come la derivazione, richiedono un passaggio al limite per essere risolte: i calcolatori sono infatti delle macchine finite che non possono eseguire se non un numero finito (seppur enorme e al di fuori della nostra portata) di operazioni. In tal modo si giunge a determinare le approssimazioni della velocità e dell'altezza del fluido in esame risolvendo un sistema algebrico con il computer, di solito con un numero assai elevato di equazioni.

Naturalmente, per poter eseguire simulazioni sufficientemente accurate, servono come dati d'ingresso la conoscenza dell'andamento dei fondali (la batimetria), dei materiali che li compongono, la localizzazione del sisma o dell'evento che ha innescato lo tsunami e una stima ragionevole della sua intensità, nonché una griglia di calcolo sufficientemente fine e, conseguentemente, un elevato numero di incognite. La risoluzione approssimata e accurata delle equazioni di Navier-Stokes su un volume di grande dimensioni (per esempio, l'intero Oceano Indiano) e per periodi di alcune ore

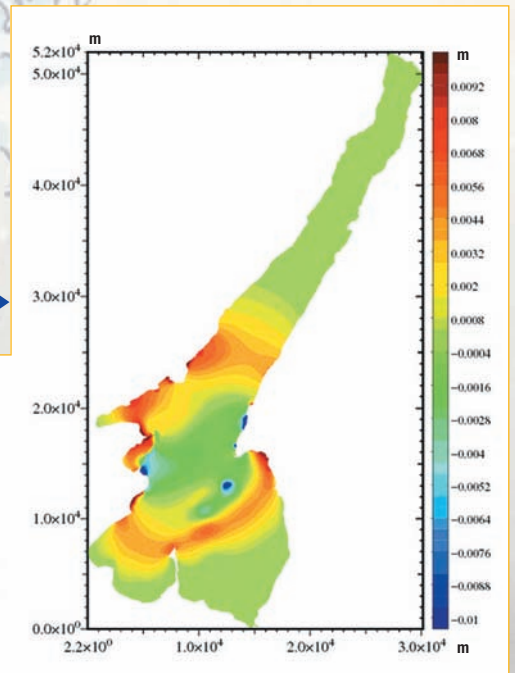
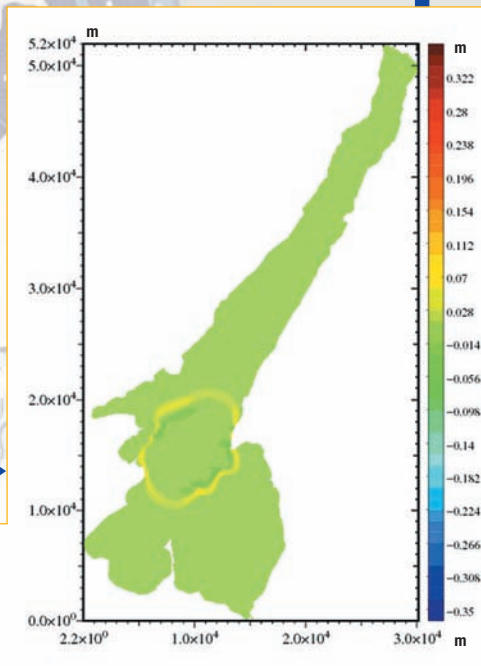
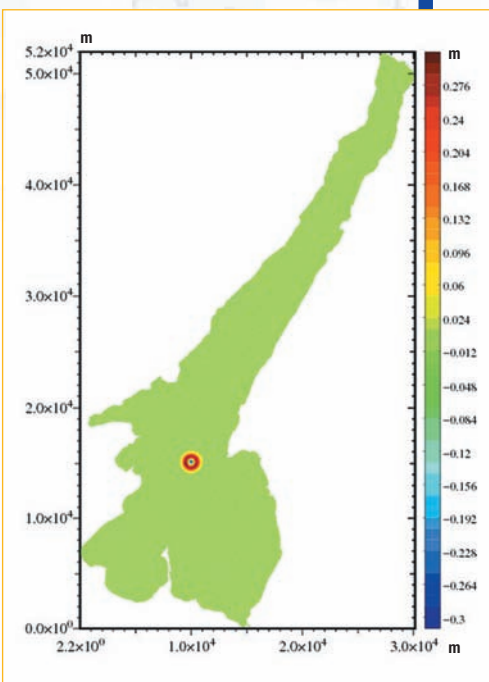
richiede dei tempi di calcolo molto elevati (anche dell'ordine di giorni), di modo che, pur facendo ricorso ai costosi super calcolatori (come *BlueGene*, installato al *Lawrence Livermore National Laboratory* in California e in grado di eseguire 280 *Teraflops*, cioè 280 trilioni di operazioni al secondo), non si potrebbero utilizzare queste simulazioni in situazioni di reale emergenza. A questo si aggiunga che, per simulare uno tsunami, non serve tener conto di tutti i fenomeni che vengono descritti dalle equazioni di Navier-Stokes nella loro forma completa, si può cioè passare a dei modelli semplificati dal costo computazionale decisamente inferiore, caratterizzati da livelli di risoluzione differenti, a seconda, per esempio, che si sia vicino o lontano dalla costa (dove si suppone che i fenomeni ondosi siano più semplici, perché meno perturbati dal fondale e dalla linea costiera).

In questo modo si possono ottenere simulazioni come quelle riportate in questa pagina, relative a un ipotetico mini-tsunami (le onde prodotte sono di poche decine di centimetri di altezza) sul lago di Garda, generato da un sisma attivato da una delle due faglie che attraversano il Benaco. La simulazione ha richiesto 450 secondi su un PC accessibile a un

prezzo modesto e ha permesso di simulare 12 ore di durata del fenomeno reale; si tratta quindi di un calcolo che può essere usato a scopi predittivi durante lo svolgimento reale del fenomeno in oggetto, incorporando eventualmente rilevazioni sperimentali della posizione del fronte ondoso per migliorare la simulazione.

Simulazioni di questo tipo possono essere anche utilizzate per migliorare *a posteriori* la localizzazione del sisma che ha generato lo tsunami: confrontando le altezze delle onde misurate dai mareografi con quelle generate dal modello al calcolatore si può indagare sulla corretta posizione dell'epicentro o sull'estensione della faglia associata al sisma.

In conclusione, anche se non sarà possibile prevedere l'insorgere di uno tsunami, l'uso combinato di sistemi di rilevamento e di modelli numerici per la simulazione, può rivelarsi un strumento fondamentale per contenere la pericolosità di queste onde *meravigliose e terribili*.



Le tre figure si riferiscono alla simulazione dell'evoluzione di un mini-tsunami sul lago di Garda: posizione dell'onda anomala dopo 10 minuti, due ore e quattro ore dall'evento sismico che l'ha provocata (immagini generate da Edie Miglio, Mox - Politecnico di Milano)

LINKS

Alcuni siti per cominciare a esplorare il mondo degli tsunami:

- <http://www.tsunamiwave.info/> International Tsunami Information Centre
- <http://www.prh.noaa.gov/ptwc/> Pacific Tsunami Warning Center
- <http://nctr.pmel.noaa.gov/> NOAA Center for Tsunami Research
- <http://www.tsunami.org/> Pacific Tsunami Museum: un sito ricco di materiale foto e cinematografico sugli tsunami del Pacifico. Si possono anche trovare diversi libri sull'argomento
- <http://www.ess.washington.edu/tsunami/index.html> Tsunami! Un sito ricco di informazioni, tenuto dall'Università di Washington
- <http://labtinti4.df.unibo.it/transfer/index.php> Tsunami Risk and Strategies for the European Region, Università di Bologna
- <http://www.mate.polimi.it/stratos/>; mox.polimi.it due siti dove potete trovare il codice di calcolo usato per le simulazioni presentate in questo articolo

e quello dei super computer:

- <http://www.top500.org> un elenco aggiornato ogni 6 mesi con i 500 più potenti supercalcolatori del mondo