



Prolusione del prof. Giuliano F. Panza, ordinario di Sismologia

Verso una società preparata alle calamità ambientali: il terremoto

1. Introduzione

Rettore Magnifico, Signor Presidente della Camera dei Deputati, Autorità, Signore e Signori, cari colleghi italiani e stranieri e carissimi studenti, sono grato alle Autorità Accademiche per l'incarico di tenere la prolusione inaugurale dell'anno accademico dedicandola ad un tema sempre

attuale: la convivenza col terremoto. Oggi ricorre il 29esimo anniversario del terremoto dell'Irpinia, da me vissuto in prima persona e subito, in termini di danni alle persone ed alle cose, da alcuni miei famigliari. Sarei dovuto essere a Napoli con una relazione ad invito al congresso commemorativo organizzato dall'Ordine dei Geologi della Campania, ma trovo particolarmente significativo l'essere qui, proprio oggi. Questo mio intervento vuole essere anche commemorativo, ma soprattutto intende esortare alla ricerca scientifica tenace, assidua, onesta, non arroccata nel mondo accademico, ma capace di trasmettere capillarmente la cultura della prevenzione. L'umanità ha compiuto un lungo cammino nel tentativo di comprendere l'origine dei terremoti. Miti, leggende e immaginazioni apocalittiche, prevalentemente teriomorfe, sono state usate per spiegare i processi naturali dell'interno della Terra. Secondo la mitologia Hindu, ad esempio, il dio Vishnu, protettore dell'universo, giace sul serpente (l'universo). Sulla tartaruga (Vishnu) ci sono otto elefanti che sorreggono la Terra, immaginata come un disco. I movimenti degli elefanti causano i terremoti. Progressi nella mitigazione possono dunque essere lasciati al controllo della danza degli elefanti!!!! Certamente no!

È necessaria la comprensione della Fisica del terremoto e la

realizzazione di edilizia adeguata. Il rischio associato agli eventi sismici può essere ridotto solo grazie all'impiego congiunto di avanzate tecnologie d'ingegneria sismica e di metodologie sismologiche innovative ed attendibili per la stima della pericolosità sismica.

Nel 1660 Robert Hooke enuncia la legge fondamentale della elasticità "Ut tensio sic vis" che è alla base della fisica della sismologia e nel 1691 Marcello Bonito pubblica il volume "Terra tremante", in cui descrive con precisione gli effetti del terremoto che il 5 dicembre 1456 sconvolse L'Aquila e la regione circostante, producendo danni incalcolabili in un'area che risulta molto simile a quella del recente sisma del 6 Aprile 2009. Il riconoscimento del terremoto e delle eruzioni vulcaniche come fenomeni endogeni è un risultato acquisito dal mondo scientifico poco più di duecento anni fa (John Michell, 1760). Sul finire del 1700 con gli studi sull'elettricità nascono le teorie elettrosismiche e, come Franklin aveva pensato al parafulmine, Bertholon pensa al "paraterremoto" (Journal de physique, 1779). Giovanni Vivenzio nella sua opera "Historia e Teoria de tremuoti in generale ed in particolare di quelli della Calabria e di Messina del 1783", pubblicata nello stesso anno, afferma, che: "...i tremuoti non sono altro che tuoni sotterranei siccome Plinio l'ha conosciuto anticamente; e poichè è

dimostrato che il tuono è effetto di elettricità, non si può far di meno di riconoscere la materia elettrica per cagione dei tremuoti“. Cristofano Sarti, nel volume “Saggio di congetture su i terremoti” pubblicato nel 1788 elabora una serie di congetture sull’origine endogena del terremoto ed ha il grande merito di evidenziare la non necessaria correlazione tra terremoti e vulcani. Nei mesi di febbraio e marzo 1858 l’ingegnere irlandese Robert Mallet, forte di una sovvenzione di 150 sterline dalla Royal Society di Londra e su invito di Francesco II di Borbone intraprende una missione scientifica nell’area della Campania più colpita dal terremoto del 1857 e stila uno straordinario diario. Al ritorno in Inghilterra, Mallet elabora le sue osservazioni in una corposa opera che sottopone in forma manoscritta alla Royal Society di Londra per la pubblicazione. La ricchezza e la novità delle osservazioni, che rappresentano il primo tentativo sistematico di applicare i principi della Fisica agli effetti



dei terremoti, impressionarono il mondo accademico londinese che appoggiò anche finanziariamente la pubblicazione integrale. L'opera uscì nel 1862 con il titolo: *The Great Neapolitan Earthquake, The First Principles of Observational Seismology*. Nel frattempo in Italia erano caduti i Borboni, cui però resta il merito di avere stimolato la realizzazione di un'opera scientifica così importante. Infine sono da ricordare i grandi contributi di Mario Baratta (I terremoti in Italia), Giuseppe Mercalli (la scala dell'intensità macrosismica) e Vito Volterra (la teoria della dislocazione, basata sulla soluzione di Somigliana) che apre la strada allo studio della Fisica delle sorgenti sismiche. Fino ai primi del Novecento l'Italia è, quindi, all'avanguardia nello studio dei terremoti. Segue un declino molto grave e colpevole perchè irresponsabile, che vede una prima variazione di tendenza solo dopo il terremoto del Friuli del 1976, variazione che si concretizza nel 2003 con l'Ordinanza 3274 del Presidente del Consiglio dei Ministri seguita al terremoto di San Giuliano di Puglia del 2002 e con le iniziative successive al terremoto dell'Aquila del 2009.

I terremoti non si possono evitare né, ad oggi, è possibile prevederli con precisione. Le conoscenze scientifiche di cui disponiamo permettono di stimare il rischio sismico, di indicare cioè quali sono le aree a più elevata pericolosità sismica e quale

è il livello di vulnerabilità dell'edificio. È possibile inoltre realizzare esperimenti di previsione a medio termine spazio-temporale che consentono di indicare le aree ed i periodi di tempo in cui risulta più probabile il verificarsi di un forte terremoto, fornendo vincoli utili per una valutazione più precisa del rischio sismico.

L'irregolarità e la notevole distanza temporale con cui i forti terremoti si succedono nelle diverse zone contribuiscono alla riduzione della consapevolezza del rischio sismico e, conseguentemente, alla limitatezza delle risorse dedicate alla sua mitigazione. Il periodo di ritorno dei terremoti forti è grande rispetto alla durata media dei governi nazionali. Quindi per l'Italia è particolarmente rilevante quanto espresso da Kofi Annan nel 1999:

Building a culture of prevention is not easy. While the costs of prevention have to be paid in the present, its benefits lie in a distant future. Moreover, the benefits are not tangible; they are the disasters that did NOT happen.

Tale affermazione è strettamente collegata al “principio di responsabilità” di Hans Jonas, principio che, per essere rispettato, richiede governi stabili e duraturi.

2. La previsione dei terremoti

Una strategia efficace per la mitigazione del rischio sismico richiede la risposta ai seguenti quesiti: a) dove, quando e quanto forte un terremoto può colpire la regione in esame?, b) quali conseguenze si devono attendere qualora esso avvenga? La risposta alla prima domanda riguarda la previsione dei terremoti, mentre la seconda è oggetto degli studi di rischio sismico.

La previsione può includere una percentuale intrinseca di falsi allarmi e di fallimenti. La precisione con la quale si può prevedere la localizzazione spazio-temporale di un forte terremoto, cioè di un evento con magnitudo superiore ad una certa soglia, M_0 , è tuttora un problema aperto. L'incertezza spaziale nella localizzazione dell'epicentro del terremoto incombente è intrinseca e non può essere inferiore alle dimensioni della sorgente del terremoto. Una sorgente sismica è, infatti, un oggetto di dimensioni finite, rappresentabile fisicamente come una porzione di faglia immersa nella litosfera.

2.1 Previsione dei terremoti e misure preventive

La previsione di un terremoto di una data magnitudo può essere a lungo termine temporale (decenni), a medio termine (pochi anni o mesi) ed a breve termine (giorni od ore). L'estensione

spaziale delle previsioni può variare da migliaia di chilometri fino alla localizzazione esatta della sorgente del terremoto (decine di chilometri).

Similmente, le misure preventive possono andare dalla definizione di normative antisismiche, alla dichiarazione di allarmi a medio-termine ed alla messa in sicurezza delle strutture ad elevato rischio, fino all' "allarme rosso". Diversi intervalli temporali, dalle decadi ai secondi, sono necessari per intraprendere le diverse azioni di prevenzione^{1,2} che hanno costi molto diversi e possono quindi essere realisticamente adottate entro aree e periodi di tempo differenti. L'elemento essenziale per la mitigazione dei danni consiste nel tempestivo e progressivo aumento o riduzione delle misure di sicurezza, in funzione dello stato di allerta in corso.

Le misure preventive elencate non sono indipendenti fra loro, ma compongono un'ovvia gerarchia ed acquistano significato solo se attivate in un certo ordine, come parte di uno scenario di risposta alla previsione.

- 1 Kantorovich, L.V., Keilis-Borok, V. I. (1991) - "Earthquake prediction and decision-making: social, economic and civil protection aspects" (Proc. International Conference on Earthquake Prediction: State-of-the-Art, pp. 586-593, Scientific-Technical Contributions, CSEM-EMSC, Strasbourg, France, 1991). Based on "Economics of earthquake prediction" (Proc. UNESCO Conference on Seismic Risk, Paris, 1977).
- 2 Keilis-Borok, V.I., Primakov, I. (1997) - "Earthquake Prediction and Earthquake Preparedness: The Possibilities to Reduce the Damage from Earthquakes". Fourth Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction, 6 - 24 October 1997, Trieste: ICTP, H4.SMR/1011-11, 30 pp.

a) Misure di sicurezza permanenti, che possono essere adottate nell'arco di decenni:

- limitazioni nell'utilizzo del territorio, specialmente per strutture ad elevato rischio ed attività che possono indurre terremoti;
- normativa sismica per l'edilizia, che richieda l'adeguamento antisismico degli edifici;
- restrizione delle norme generali di sicurezza;
- potenziamento dei servizi di pubblica sicurezza;
- assicurazione e tassazione specifica;
- raccolta ed analisi dei dati per la stima del rischio sismico e per l'identificazione dei precursori del terremoto;
- preparazione della risposta alla previsione e delle attività post-disastro: pianificazione; definizione della normativa di base; accumulo delle scorte; simulazione degli allarmi, formazione della popolazione, ecc.



b) Misure di sicurezza temporanee, che possono essere adottate come risposta ad un allarme:

- rafforzamento delle misure di sicurezza permanenti appena elencate;
- definizione di un piano di ristrutturazione per gli edifici strategici nell'area allertata;
- verifica dello stato degli alloggi temporanei (e.g. tende, strutture prefabbricate, ecc.) e garanzia della loro pronta disponibilità;
- predisposizione delle misure di intervento e soccorso a lungo termine (finalizzate al ripristino delle strutture abitative, degli apparati produttivi e delle attività lavorative, ecc.);
- evacuazione della popolazione e di strutture altamente vulnerabili (e.g. scuole ed ospedali);
- neutralizzazione delle potenziali sorgenti ad alto rischio: condutture (elettrodotti, oledotti, gasdotti, ecc.); centrali nucleari; impianti chimici; edifici precari (sospensione delle attività, parziale demolizione, ecc.);
- mobilitazione dei servizi di soccorso;
- verifica della pronta operatività dei piani di soccorso;
- intensificazione delle pratiche di prontezza operativa, aumentando la frequenza delle attività che coinvolgono studenti e Protezione Civile;

- monitoraggio dei cambiamenti socio-economici e previsione-prevenzione dei rischi eventualmente indotti;
- applicazione di disposizioni economiche obbligatorie;
- diffusione sistematica, attraverso i media, di semplici istruzioni per la predisposizione di punti di soccorso, in corrispondenza delle parti più resistenti degli edifici, forniti dei viveri essenziali (acqua, cibi di emergenza, oggetti di primo soccorso, ecc.).

Le misure elencate sono, seppur in modo diverso, applicabili su scala internazionale, nazionale, regionale e locale.

3. I precursori dei terremoti

I precursori dei terremoti, osservabili sulla superficie terrestre od in prossimità di essa, devono essere relativi a fenomeni quantificabili e statisticamente significativi, secondo quanto indicato dalla sotto-commissione sulla Previsione dei Terremoti, della International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior³.

Fra i molteplici segnali proposti come precursori rientrano anche le modificazioni anomale del flusso, della temperatura e del contenuto di alcuni componenti chimici delle acque sotterranee, quali anidride carbonica, ossidi di azoto e radon, di cui si è tanto discusso in occasione del terremoto dell'Aquila del 6 Aprile 2009.

³ Wyss, M. (1997). Second round of evaluation of proposed earthquake precursors, *Pure Appl. Geophys.*, 149, pp. 3-16.

Ad oggi la validità della maggioranza dei fenomeni proposti come precursori rimane indimostrata, soprattutto a causa della mancanza di osservazioni sufficientemente prolungate e sistematiche. I terremoti forti, infatti, sono eventi rari e ciascun fenomeno considerato precursore è caratterizzato da fluttuazioni proprie, non legate alla sismicità. I risultati delle ricerche volte all'identificazione di possibili precursori analizzati nel corso del "Second International Seminar on Prediction of Earthquakes"⁴ (Lisbona, 29-30 Aprile 2009) confermano la difficoltà di separare le anomalie indotte dal forte terremoto incombente da variazioni d'origine diversa come piovosità, micro-sismicità, variazioni di temperatura e/o pressione atmosferica. La conclusione del Seminario suggerisce di concentrarsi su azioni preventive, più economiche ed efficaci delle usuali operazioni di soccorso e ripristino. Gli sviluppi più recenti delle ricerche sull'evoluzione e dinamica della litosfera terrestre e sulla sua instabilità sono oggetto di speciali Advanced Schools del Centro Internazionale di Fisica Teorica di Miramare (www.ictp.it). Mi piace qui ricordare l'attività programmata, col patrocinio del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Mare e del Territorio, per il Maggio 2010.

⁴ Mendes-Victor, L.A. and Oliveira, C.S., Eds. (2009). "Second International Seminar on Prediction of Earthquakes". Program and Abstract Volume.

4. Gli algoritmi di previsione a medio termine spazio temporale

Tra le poche metodologie di previsione formalmente definite che consentono di effettuare un'analisi sistematica ed in tempo reale, nonché una verifica su vasta scala della loro capacità predittiva, rientrano gli algoritmi CN ed M8⁵. Gli esperimenti condotti per oltre venti anni su scala globale hanno già permesso una prima valutazione della significatività statistica delle previsioni fornite dal CN ed M8. Il livello di confidenza dei risultati ottenuti (superiore al 95% per il CN ed al 99% per l'M8) evidenzia la capacità predittiva di tali algoritmi. CN ed M8 utilizzano l'informazione contenuta nei cataloghi dei terremoti ed individuano, nell'attività sismica di magnitudo moderata, le variazioni che possono essere considerate precursori di un forte terremoto. L'analisi consente di determinare gli intervalli temporali (TIP, ovvero Times of Increased Probability) in cui risulta aumentata, rispetto alle condizioni normali, la probabilità che si verifichi un terremoto con magnitudo superiore ad M_0 . Le caratteristiche della sequenza dei terremoti che avvengono entro una certa regione (i.e. il flusso sismico) e le loro variazioni temporali sono descritte in modo quantitativo mediante un insieme di funzioni definite empiricamente^{6,9,10}.

5 Keilis-Borok, V.I. and Soloviev, A., Eds. (2003). *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

4.1 La previsione dei terremoti in Italia

A partire dal Luglio 2003 è in corso un esperimento per il collaudo di CN ed M8 sul territorio italiano⁶: l'analisi viene regolarmente aggiornata ogni due mesi ed i risultati sono accessibili al link: www.ictp.trieste.it/www_users/sand/prediction/prediction.htm.

Al fine di evitarne un uso improprio, ma di consentirne una verifica in tempo reale, l'accesso ai risultati aggiornati è riservato ai numerosi esperti autorizzati. I risultati ottenuti sino al giugno 2009 sono in sintesi i seguenti. L'algoritmo M8 ha previsto 17 dei 28 eventi di magnitudo $5.5 \leq M < 5.9$, con un volume spazio-temporale occupato dagli allarmi di circa il 35% ed un livello di confidenza superiore al 98%. L'algoritmo CN ha previsto 12 dei 14 terremoti forti avvenuti entro le tre zone monitorate, con un volume (spazio-temporale) occupato dagli allarmi inferiore al 30% del volume totale considerato. Il livello di confidenza di tali previsioni è superiore al 99%. I risultati preliminari (non ancora inclusi nella statistica delle previsioni CN) ottenuti per la regione Adriatica sono i seguenti: 7 dei 9 terremoti di magnitudo $M \geq 5.4$, avvenuti nel periodo 1964-2009 sono correttamente preceduti da un allarme, con una durata complessiva degli allarmi pari a circa il 36% del tempo totale considerato. L'esperi-

6 Peresan A., Kossobokov V., Romashkova L. and Panza G.F. (2005). Intermediate-term middle-range earthquake predictions in Italy: a review. *Earth Sci.Rev.*, 69, pp. 97-132.

mento di previsione in tempo reale degli eventi sismici che possono interessare il territorio italiano, effettuato mediante CN ed M8, è in corso da oltre sei anni e si pone all'avanguardia rispetto a progetti solo recentemente intrapresi o in fase di definizione per la validazione delle metodologie di previsione dei terremoti (e.g. CSEP; <http://us.cseptest.org/>).

5. Scenari di pericolosità sismica

Una volta definite le caratteristiche di un possibile terremoto nella regione in esame è necessario indicare quali possano essere le sue conseguenze in termini di moto del suolo, ossia la pericolosità sismica associata all'evento incombente.



5.1 Stima della pericolosità sismica: metodo probabilistico e metodo deterministico

L'analisi probabilistica (PSHA – Probabilistic Seismic Hazard Assessment) definisce il tasso di probabilità che il moto del suolo superi un determinato livello. In tal modo si ottengono indicazioni potenzialmente utili, ma non attendibili per caratterizzare la pericolosità sismica, come evidenziato da diversi autori, che hanno dimostrato che i risultati non sono né realistici né affidabili⁷.

La stima deterministica della pericolosità (NDSHA - Neo-Deterministic Seismic Hazard Assessment), invece, utilizza un insieme di sorgenti sismiche opportunamente definite per generare una banca dati di migliaia di sismogrammi ottenuti mediante la modellazione realistica del moto del suolo, conformi a principi fisico-matematici di base (sismogrammi sintetici). NDSHA è particolarmente indicato quando si applicano tecniche di isolamento sismico per proteggere integralmente le costruzioni ed evitare il danneggiamento, anche per terremoti estremamente violenti, non solo degli elementi strutturali ma anche di quelli non strutturali (persone e cose). L'isolamento assicura, quindi, il funzionamento dopo il terremoto, condizione essenziale per edifici strategici

⁷ Klügel, S. J.U. (2007). Error inflation in Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *Engineering Geology* 90, pp. 186–192.

come ospedali, scuole, ecc. Inoltre è minimizzato il panico, molto pericoloso negli edifici pubblici affollati. La nuova normativa sismica, divenuta di recente obbligatoria, favorisce l'utilizzazione dell'isolamento sismico e rende molto limitati i costi aggiuntivi di costruzione. L'approccio NDSHA è applicato sia su scala regionale che a scala locale (approfondimenti su tali argomenti sono reperibili nei testi di Dolce, Martelli e Panza^{8,9}): la procedura è utilizzata, fra l'altro, nei progetti UNESCO/IUGS/IGC *Realistic Modelling of Seismic Input for Megacities and Large Urban Areas*, concluso nel 2004¹⁰, *Seismic Hazard and Risk Assessment in North Africa*, *Seismic Microzoning in Latin America Cities*, e *Seismic Hazard in Asia*.

5.2 Stima integrata della pericolosità sismica

Una delle prerogative della metodologia NDSHA è certamente la flessibilità, ossia la capacità d'incorporare le nuove informazioni, sia teoriche che empiriche, rese progressivamente disponibili dalle ricerche sismologiche e geologiche; un allarme (TIP) può

8 Dolce M., Martelli A., e Panza, G.F. (2005). Proteggersi dal terremoto: le moderne tecnologie e metodologie e la nuova normativa sismica. Sec.Ed. 21mo Secolo (pp. 336, ISBN 88-87731-28-4)

9 Dolce M., Martelli A., e Panza, G.F. (2006). Moderni metodi di protezione dagli effetti del terremoto, 21mo Secolo (pp. 376, ISBN 88-87731-30-6)

10 G.F. Panza ed altri (2002), «Realistic modeling of seismic input for megacities and large urban areas (the UNESCO / IUGS / IGCP project 414)», *Episodes*, Vol. 25, pp. 160-184 (si veda anche il sito Internet www.ictp.trieste.it/www_users/sand/).

essere associato a mappe che descrivono il moto del suolo stimato in corrispondenza delle sorgenti dell'area allertata.

Il vantaggio della procedura integrata consiste principalmente nell'informazione temporale fornita dalle previsioni a medio termine spazio-temporale, che consente l'esecuzione ottimale di protocolli di prevenzione (e.g. paragrafo 2.1).

Nell'ambito del progetto SISMA, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, si sta sviluppando ed applicando a livello prototipale, in collaborazione con la Protezione Civile della Regione Friuli Venezia Giulia, una metodologia innovativa che consente la definizione dell'input sismico dipendente dal tempo, mediante il regolare e continuo aggiornamento delle previsioni a medio termine spazio-temporale (CN ed M8S). Il metodo integra le tecniche di *pattern-recognition* con la simulazione realistica del moto del suolo e con le tecniche di osservazione satellitari (Earth Observation)¹¹. La complessità del progetto è motivata dalla unicità del laboratorio a disposizione della Sismologia – la Terra – che non può essere duplicata se non nel computer ed entro i limiti delle conoscenze disponibili. Ciò rende particolarmente ardua l'applicazione del principio di ripetibilità, alla base della Fisica di Galileo.

¹¹ Peresan A., Zuccolo E., Vaccari F. and Panza G.F. (2009). Neo-deterministic seismic hazard scenarios for North-Eastern Italy. **Boll.Soc.Geol.It.**, 128, pp. 229-238.

6. Il terremoto dell'Aquila del 6 Aprile 2009

L'epicentro del terremoto dell'Aquila del 6 Aprile 2009 è stato localizzato appena fuori (circa 10 km) dalla regione interessata da un allarme a medio termine; formalmente è **quindi un fallimento di previsione (Fig. 1)**.

Ciò nondimeno, dal punto di vista della gestione delle calamità, lo scenario di scuotimento associato all'allarme prevede correttamente le intensità macrosismiche osservate in seguito al terremoto (Fig. 2), con forti amplificazioni locali in un ampio intervallo spettrale e quindi dannose per varie classi di edifici, in corrispondenza dei sedimenti alluvionali del fiume Aterno¹² (Fig. 3).

7. Alcune considerazioni conclusive

7.1 Riscaldamento globale e terremoti

Grazie alla disponibilità di un catalogo di terremoti sufficientemente esteso nel tempo, in due regioni della Terra (Himalaya e Alpi), dove sono in atto processi orogenetici ed una notevole riduzione del volume dei ghiacciai, la deformazione della crosta terrestre, dovuta a variazioni climatiche stagionali o secolari, condiziona il processo sismogenetico. Il picco stagionale (prima

¹² Panza, G.F., Peresan, A. e Vaccari, F., (2009). La previsione dei terremoti: stato dell'arte. *Geoitalia*, 28, 2009, 18-23.



Figura 1. Il 6 Aprile 2009 era in corso un allarme CN nella regione delimitata in rosso; l'epicentro del terremoto (★) è localizzato appena fuori (circa 10 km) dalla regione allertata dall'algoritmo CN; si tratta quindi di un fallimento di previsione.

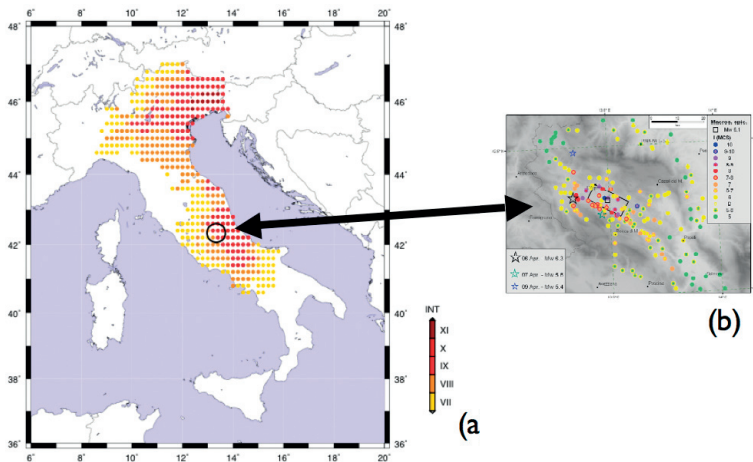


Figura 2. Lo scenario di scuotimento (moto del suolo al basamento) associato all'allarme CN (parte a) ha correttamente previsto le intensità macrosismiche che sono state osservate in seguito al terremoto (parte b).

vera-estate) nella sismicità registrato nelle Alpi e nell'Himalaya dal 1850 conferma i risultati ottenuti per il Giappone da Heki¹³. La mini-glaciazione, che va dal 1350 al 1850 circa, ben si correla con un minimo nella sismicità, che cresce molto rapidamente dopo il 1850, in corrispondenza dell'inizio dell'attuale riscaldamento. Quindi variazioni secolari delle dimensioni dei ghiacciai e del carico nevoso stagionale causano deformazioni cristalline che modulano la sismicità nei due complessi orogenici attivi Alpi e Himalaya.

¹³ Heki, K., 2003. Snow load and seasonal variation of earthquake occurrence in Japan. *EPSL*, 207, 159-164, doi:10.1016/S0012-821X(02)01148-2.

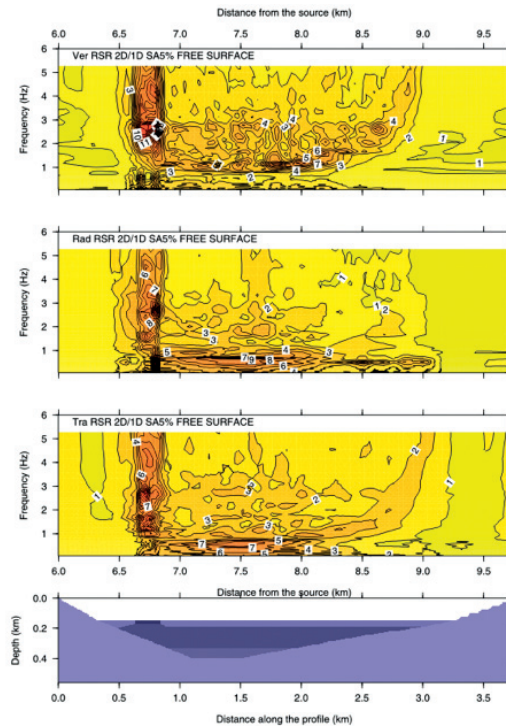


Figura 3. Modellazioni, basate su di un profilo disponibile in letteratura, riportata nella parte bassa della figura, mostrano notevoli **amplificazioni** del moto del suolo, espresse in termini di rapporti tra spettri di risposta¹³, in corrispondenza dei sedimenti alluvionali del fiume Aterno.

Le amplificazioni si manifestano in un ampio intervallo spettrale, ponendo quindi a rischio varie classi di edifici, e spiegano, almeno in parte, la distribuzione a macchia di leopardo dei danni osservati.

7.2 *Rischio sismico a Roma*

La normativa, successiva all'Ordinanza 3274 seguita al terremoto di San Giuliano di Puglia del 2002, rispecchia la sollecitazione sismica media della città, ma non è in grado di coprire nè la sollecitazione derivante dal potenziale sismogenetico incombente (storia sismica e sismotettonica), nè gli effetti locali che risultano alquanto rilevanti (almeno un grado I_{MCS} in più) e riguardano zone abbastanza ampie, quali le valli alluvionali del Tevere e dell'Aniene¹⁴ (Fig. 4).

Dai monumenti storici si può dedurre che forti variazioni laterali possono verificarsi nel moto sismico del suolo. La Colonna traiana, alta circa 30 m (se si esclude il basamento), è costituita da 17 rocchi sovrapposti, poggia su terreno ben compattato ed è ben conservata (Fig. 5, parte sinistra).

Un analogo monumento funebre, la colonna di Marco Aurelio (Fig. 5, parte destra), sorge sui sedimenti del Tevere e mostra una dislocazione di circa 8 cm tra due rocchi centrali (Fig. 6). Il diverso stato di conservazione di questi due "sismografi monumentali", molto simili e quasi coevi, è una chiara indicazione del diverso tipo di risposta alla sollecitazione sismica.

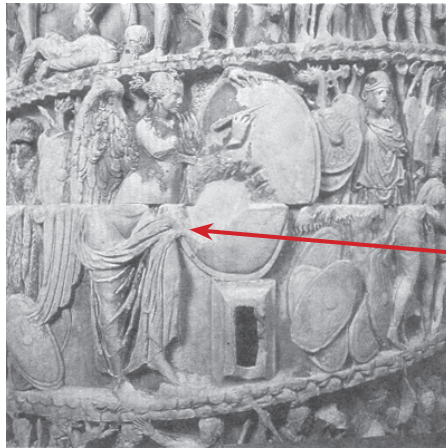
In considerazione del deterioramento delle proprietà mecca-

¹⁴ Peresan, A., Vaccari, F., Romanelli, F. e Panza, G.F., (2005). Pericolosità sismica in ambiente urbano: la città di Roma. Atti dei convegni lincei, 218, 263-287.

niche del sottosuolo (e.g. effetto acque sotterranee) negli ultimi cento anni, un terremoto simile a quello del Fucino può indurre in città valori di intensità macrosismica superiori a quelli osservati nel 1915.

7.3 I maremoti in Adriatico

La distribuzione degli tsunamis storici in Adriatico deducibile dal “Catalogue of the reported tsunami events in the Adria-



Dislocazione di circa **8 cm** tra i rocchi IX e X della Colonna di Marco Aurelio

Figura 6. La colonna di Marco Aurelio, sorge sui sedimenti del Tevere e mostra una dislocazione di circa 8 cm tra due rocchi centrali, mentre la Colonna traiana è ottimamente conservata. Il diverso stato di conservazione di questi due “sismografi monumentali”, molto simili e quasi coevi, è una chiara indicazione del diverso tipo di risposta, nei due siti, alla sollecitazione sismica.

tic Sea (from 58 B.C. to 1979 A.D.)”¹⁵ indica che tutto il bacino può essere interessato da questo fenomeno (Fig. 7) e che la percezione generale corrente, di relativa sicurezza, sottostima gravemente questo rischio.

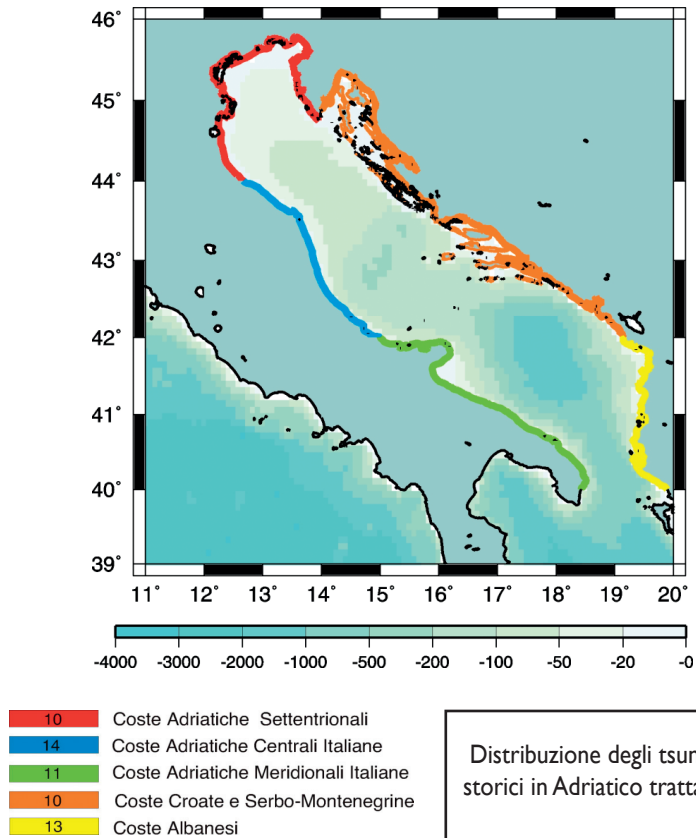
Ciò deriva dal fatto che i fenomeni più rilevanti sono avvenuti in epoca storica, come ad esempio i maremoti che hanno causato danni a Venezia ed associati ai terremoti del 1106, del 1321 e del 1348 quando “...per la forte commozione del suolo restò asciutto il fondo del Canal Grande” e del 1511^{16,17}. Per quanto riguarda Trieste la situazione merita ancor maggior attenzione dato che la percezione generale è di “sicurezza” rispetto ai fenomeni sismici ed al maremoto in particolare, nonostante la recente normativa abbia incluso la città in quarta categoria e studi di dettaglio indichino parti di Trieste esposte a pericolosità sismica pari alla terza categoria¹⁸.

15 Pinat, T., Romanelli, F. and Panza G.F., (2005). Catalogue of reported tsunamis events in the Adriatic Sea (from 58 B.C. to 1979 A.D.). The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, IC/IR/2005/1, Internal Report. 10 pagine.

16 Caputo, M. e Faita, G. (1984). Primo catalogo dei maremoti delle coste italiane, Atti Acc. Naz. dei Lincei, Mem. Cl. Sc. Fis., Mat. e Nat. s. VIII - Volume XVII - Sez. I - Fasc.7, Roma).

17 Bedosti, B., Caputo, M. (1986). Primo aggiornamento del catalogo dei maremoti delle coste italiane, Atti Acc. Naz. dei Lincei, Rend. Cl. Sc. Fis., Mat. e Nat., s. VIII, 80, 570-584, Roma).

18 Vaccari, F., Romanelli, F. and Panza, G.F., (2005). Detailed modelling of strong ground motion in Trieste; Modellazione dettagliata del moto sismico del suolo a Trieste. *Geologia tecnica & ambientale*, 2/2005, pp. 7-40.



Distribuzione degli tsunami storici in Adriatico tratta dal:

“Catalogue of the reported tsunami events in the Adriatic Sea (from 58 B.C. to 1979 A.D.)”

Figura. 7. Regionalizzazione della distribuzione dei maremoti lungo le coste dell’Adriatico

A tal proposito è particolarmente illuminante la Storia Cronografica di Trieste dalla sua Origine all'Anno 1695 cogli Annali dal 1695 al 1848 del Procuratore Civico Pietro Kandler¹⁹: “Nel 1511 si sentirono orribilissimi terremoti, uno dei quali, il 26 marzo, tra le ore due e le tre dopo mezzogiorno, spaventoso, due torri del porto atterrò con molte mura e case.

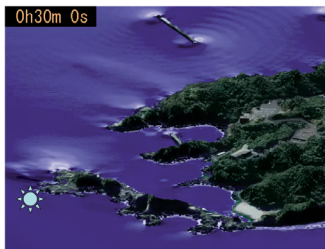
Le eminenze sassose della montagna cascavano, molti villaggi restarono rovinati, e sì grande era l'accrescimento del mare, che gli abitanti di Trieste si trasportarono ad alloggiare sotto il castello. Ciò non solo in Trieste avvenne, ma anco ad Udine e Tolmino, i loro castelli cascarono, come le memorie capitolari e Francesco Palladio raccontano”. Nel 1511 il maremoto non ha causato grossi danni perché l'area a bassa quota nei pressi della costa non era assolutamente abitata (Fig. 8).

La situazione attuale è ben diversa non solo a Trieste, ma in tutto l'Alto Adriatico, dove beni e persone sono esposti al rischio maremoto, come ben illustrato nella Fig. 9, che mostra quattro momenti di una simulazione, di durata effettiva pari a 15 minuti, relativa ad un evento sismico il cui epicentro è indicato dalla stella.

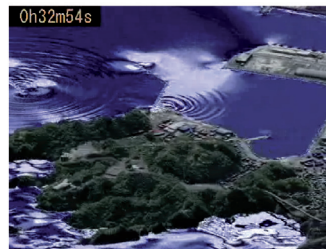
¹⁹ Scussa, V. (1863). Storia cronografica di Trieste dalla sua origine all'anno 1695, cogli annali dal 1695 al 1848 di P. Kandler, Italo Svevo, Edizioni - Trieste; 1986, 303 pagine; Ristampa fotomeccanica dell'edizione Coen, Trieste 1863.



Figura 8. La planimetria della città di Trieste nel 1450 e nel 1660, tratta dall'Albo storico topografico della città e territorio di Trieste di Pietro Kandler (edizioni Italo Svevo, Trieste, 1989) evidenzia che all'epoca del terremoto e susseguente maremoto del 1511, le attuali Rive ed aree circostanti a bassa quota, non erano abitate.



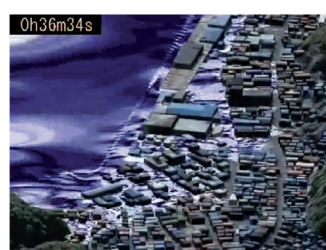
Animation by Prof. Shuto – Emeritus at Tohoku University



Animation by Prof. Shuto – Emeritus at Tohoku University



Animation by Prof. Shuto – Emeritus at Tohoku University



Animation by Prof. Shuto – Emeritus at Tohoku University

Figura 9. Istante iniziale e tre momenti successivi della simulazione di un possibile maremoto in zona di costa bassa. Si può osservare come enormi danni possono essere causati anche da onde di modesta ampiezza (inferiore a due metri). La simulazione è paradigmatica per molte zone della costa adriatica.

I progressi conseguiti nella comprensione dei terremoti, come processo fisico e come fenomeno ad elevato impatto sulla società e sull'ambiente, indicano che ci si può e ci si deve difendere dalle calamità ambientali con la previsione e con la prevenzione, perchè, se è vero, come dice Terenzio, che

Sine Cerere et Libero friget Venus (Terenzio, Eunuchus)

così

Sine Vulcano et Neptuno friget Tellus.



**Sine Cerere et
Libero friget
Venus** (Terenzio, Eunuchus 4:732)

da un'invenzione di Abraham Bloemaert (1564-1651)



**Sine Vulcano
friget Tellus**



et Neptuno

