

# Prevedere i terremoti: la lezione dell'Abruzzo

Giuseppe Grandori\*, Elisa Guagenti\*\*

**SOMMARIO** – Il giorno 31-03-09 si riunisce a L'Aquila la Commissione Grandi Rischi “per esaminare la fenomenologia sismica in atto da alcuni mesi nel territorio della Provincia Aquilana che è culminata con la scossa di magnitudo 4.0 del 30-03-09”. La discussione si concentra sulla possibilità di previsione a breve termine di un forte terremoto. La Commissione conclude che “oggi non ci sono strumenti per fare previsioni e qualunque previsione non ha fondamento scientifico”.

In questa nota vengono presentate alcune osservazioni critiche sia sulle premesse scientifiche sia sul metodo adottato dalla Commissione per arrivare alla conclusione ora detta. Viene ricordato in particolare che le scosse premonitrici (come ad esempio quella di magnitudo 4.0 del 30-03-09) sono considerate dalla comunità scientifica internazionale come un reale precursore, sia pure con alta probabilità di falso allarme. Ricerche statistiche condotte sia in Italia sia in California assegnano mediamente a questa probabilità il valore  $p = 0.98$ , così che la probabilità del terremoto a valle del precursore è dell'ordine di 0.02. Il rischio è dunque molto piccolo in termini assoluti, ma è comunque oltre 100 volte più grande del rischio sismico di base della zona. Si osserva poi, dal punto di vista del metodo, che l'analisi deve ovviamente tener conto anche di tutti gli altri sintomi sismologici disponibili, nonché dello scenario sociale nel quale il precursore si inserisce. È ad esempio importante la valutazione del “costo sociale” di un eventuale falso allarme; elemento, questo, che in particolari circostanze può assumere valore decisivo. L'analisi condotta dalla Commissione non appare soddisfacente da questo punto di vista, almeno a giudicare dai documenti resi pubblici.

Nella nota si ricordano poi i risultati di alcune ricerche teoriche sui sistemi di allarme sismico basati su uno o più precursori. Si mette in evidenza come, a partire dalle caratteristiche dei precursori, si possano definire delle grandezze che sono di aiuto nella delicata ma ineludibile decisione circa l'opportunità di dichiarare l'allerta. Si tratta di un esemplare caso di decisione in condizioni di forte incertezza (piccole probabilità, gravi possibili danni) in cui ha un ruolo importante la valutazione delle ripercussioni sociali e del coinvolgimento collettivo.

**SUMMARY** – During the first three months of 2009 a sequence of small shocks  $M \leq 2.7$  occurred near the city of L'Aquila. Towards the end of March the frequency of the shocks was rising and on March 30 an  $M = 4$  earthquake occurred. A Committee of experts was charged to examine the likelihood of an impending strong earthquake. On March 31 the Committee concluded that nowadays no short-term prediction is possible and whatever proposed forecasting is not founded on a scientific basis.

In this paper some critical comments are presented both on the content of this conclusion and on the method used by the Committee for the analysis. We observe that foreshocks are considered by the scientific community as a very real precursory phenomenon, even though with a high probability of false alarm. Statistical researches carried out in Italy and in California found that this probability is of the order of 0.98, so that the probability of a strong earthquake after the foreshock is of the order of 0.02. In absolute terms the risk is very small, however it is more than 100 times larger than the basic risk of the zone. As far as the method is concerned the analysis should take into account, besides all other possible seismological symptoms, also the social scenario in which the foreshock happens.

Some results of theoretical researches on alarm systems based on more than one precursor are then summarized. They show how, starting from the characteristics of the precursors, it is possible to define new quantities that are helpful when the matter is to issue a public warning. It is a typical case of decision in uncertain conditions (small probabilities, heavy possible damage) in which an important role is played by social repercussions.

*Parole chiave:* precursore, scossa premonitrice, falso allarme, sistema di allerta.

*Keywords:* precursor, foreshock, false alarm, warning system.

## 1. Introduzione

Nei giorni immediatamente successivi a un evento naturale disastroso come il terremoto del 6 aprile scorso

nella zona dell'Aquilano, l'informazione riguardante la fenomenologia dell'evento può risultare confusa e scientificamente imprecisa. È difficile intervenire tempestivamente nel disordinato fluire di spiegazioni e commenti per correggere e chiarire.

Ma se l'evento coinvolge decisioni riguardanti la sicurezza delle persone, ed è possibile o addirittura probabile che si ripresenti con aspetti analoghi in altri

\* Professore emerito del Politecnico di Milano.

\*\* Già professore ordinario del Politecnico di Milano.

luoghi del Paese, allora è importante che all'opinione pubblica venga poi offerta una informazione precisa. Solo così, infatti, la società può far tesoro degli insegnamenti che ogni nuova esperienza contiene. Nell'ambito della Sismologia è socialmente rilevante sapere se, e con quali margini di incertezza, sia possibile prevedere l'arrivo di un forte terremoto con un anticipo dell'ordine di poche ore o al massimo di alcuni giorni; così che possano essere attuati gli opportuni provvedimenti di emergenza. È quel che viene chiamato "previsione a breve termine".

È opinione largamente condivisa che non esistano attualmente teorie e modelli matematici che consentano di affrontare utilmente il problema della previsione a breve termine dei terremoti. È perciò che l'attenzione della comunità scientifica si è concentrata sullo studio empirico dei "fenomeni precursori", a proposito dei quali una abbondante letteratura fiorì dopo il 1970; anche se l'idea dell'esistenza dei precursori, secondo Rikitake /1/, risale almeno al diciassettesimo secolo.

Su questo tema, il messaggio passato attraverso il sistema dell'informazione dopo il terremoto del 6 aprile è stato: la previsione dei terremoti non è possibile; in particolare, il metodo empirico basato sui fenomeni precursori ha dato risultati insoddisfacenti e non è attendibile.

Per quanto riguarda il metodo empirico, va precisato che l'individuazione delle caratteristiche di un precursore richiede una lunga serie di osservazioni necessariamente diluite nel tempo; e che, d'altro canto, per la maggior parte dei fenomeni presi in esame come possibili precursori, la raccolta dei dati ha avuto inizio in tempi relativamente recenti, così che ci vorrà tempo prima di raggiungere risultati conclusivi per questi possibili precursori. Ma la difficoltà non sussiste per le "scosse premonitrici" le quali costituiscono un precursore molto ben documentato da numerosissime osservazioni raccolte nei cataloghi sismici disponibili. Si riscontra cioè che in molte zone sismiche le scosse di magnitudo ( $M$ ) medio-basse (ad esempio dell'ordine di  $M = 4$ ) sono talvolta seguite da un terremoto violento. Discuteremo fra poco del peso della parola "talvolta", ma affermiamo fin d'ora che le scosse premonitrici meritano il nome che portano e lo hanno onorato nei decenni e forse nei secoli passati salvando molte vite umane.

Ciò è provato da diversi esempi, fra i quali è famoso il caso del terremoto di Haicheng (Cina, 1975) e rientra anche un caso italiano che merita un commento.

Nel settembre 1920 un violento terremoto ( $M = 6.4$ ) colpì la zona della Garfagnana causando gravi danni con il crollo di più di 100 edifici. Riferisce il rapporto Boschi et al. /2/ che "il numero delle vittime è stato relativamente basso principalmente perché il terremoto fu preceduto il giorno prima da una scossa avvertita da tutti, a seguito della quale molti pernottarono all'aperto".

Nel caso di Haicheng l'emergenza è stata dichiarata da una Stazione sismografica e poi gestita dagli apparati della Protezione civile. Nel caso della Garfagnana non si ha notizia di interventi di Enti pubblici o di esperti: si trattò di un allarme sismico "fai da te" basato su un provvidenziale precursore.

E veniamo al significato quantitativo della parola "talvolta" che entra nella definizione del precursore. Per la zona della Garfagnana è stato stimato che su 100 scosse premonitrici solo 2 (in media) sono seguite da un terremoto violento. Diciamo quindi che il precursore ha una probabilità di falso allarme  $p = 98\%$ . Risultati analoghi sono stati trovati per il Friuli e l'Irpinia /3/ e anche per la California meridionale /4/, così che sembra lecito, salvo prova contraria, ritenere che il risultato sia valido in prima approssimazione anche per l'Aquilano. Allora, quando in una di queste zone si verifica una scossa premonitrice, la persona o il comitato o l'Autorità che ha la responsabilità di dichiarare l'emergenza oppure no (in una parola il Decisore) deve tener conto che, se dichiara l'emergenza ha una alta probabilità (98%) di causare un disagio inutile, mentre, se non dichiara l'emergenza, ha una piccola probabilità (2%) di produrre un gravissimo danno: lasciar morire molte persone.

È opportuno qui osservare che il rischio di base in Garfagnana, inteso come probabilità di un forte terremoto in una settimana scelta a caso, è 100 volte più piccolo. La scossa premonitrice segnala dunque un importante (temporaneo) aumento di rischio e pone il problema se dichiarare o no l'emergenza.

Per chiarezza lessicale e per non confondere nuove definizioni con la definizione di falso allarme già introdotta e ormai in uso come caratteristica del precursore, chiameremo d'ora in poi "allerta" la dichiarazione dell'emergenza. Diremo poi "allerta falso", "allerta mancato" e "allerta con successo" rispettivamente l'allerta non seguito dal terremoto, il terremoto non preceduto da allerta e l'allerta seguito dal terremoto.

Causare un disagio inutile ha un "costo" formato da diverse voci, quali il costo vivo della organizzazione dei provvedimenti di prevenzione, il disturbo delle attività produttive e l'influenza negativa sulla credibilità del Decisore: troppo frequenti "al lupo, al lupo" senza l'arrivo del lupo vanificano il sistema di allarme. Chiameremo costo sociale il costo di un falso allerta.

La scelta se dichiarare oppure no l'allerta è compito delicatissimo. È difficile immaginare un criterio decisionale valido in generale per la scelta fra le due opzioni. In ciascun singolo caso si deve infatti tener conto delle condizioni specifiche nelle quali il precursore si inserisce. Ad esempio, la presenza di numerose costruzioni che si ha motivo di ritenere di scarsa resistenza ai terremoti è elemento a favore dell'opzione allerta-sì; oppure, se particolari condizioni rendono altissimo (o viceversa molto modesto) il costo sociale di un falso allerta, si ha un elemento a favore dell'opzione allerta-no (oppure, rispettivamente, dell'opzione allerta-sì).

È istruttivo, al fine di trarre insegnamenti utili per il futuro, confrontare i fatti dell'Abruzzo con quanto avvenuto il 23 gennaio 1985 in Garfagnana: la zona è stata allertata a seguito di una scossa con  $M = 4.2$ . Non è stato reso pubblico l'iter decisionale che ha portato all'opzione allerta-sì, ma è chiaro che la scossa è stata considerata dal Decisore di allora come un plausibile precursore. Non si sa, peraltro, quale stima sia stata fatta della probabilità che si trattasse di un falso allarme (la stima  $p = 98\%$  sopra citata è stata pubblicata

successivamente nell'ambito di una ricerca indipendente /3/). In effetti, di un falso allarme (e di allerta falso) si trattò.

Nel caso dell'Abruzzo 2009 un abbozzo di iter decisionale si trova nel verbale della riunione della Commissione Grandi Rischi (in pratica il Decisore) avvenuta il 31 marzo a seguito delle preoccupazioni destinate nella popolazione dalla serie di scosse del giorno 30 marzo, fra le quali una con  $M = 4.0$ .

Sul tema della previsione appare dal verbale che è "improbabile che ci sia a breve una scossa come quella del 1703, pur se non si può escludere in maniera assoluta" (Boschi). Non vengono presentate valutazioni probabilistiche quantitative.

A questo proposito viene precisato che "la domanda da porre agli specialisti è se nei terremoti del passato c'è testimonianza di sequenze sismiche che precedono forti terremoti" (Barberi).

La domanda riceve tre risposte.

1 – "La casistica è molto limitata. In tempi recenti non ci sono stati forti eventi ma numerosi sciami che, però, non hanno preceduto grossi eventi" (Eva).

2 – "La semplice osservazione di molti piccoli terremoti non costituisce fenomeno precursore" (Boschi).

3 – "Ci sono stati anche alcuni terremoti recenti preceduti da scosse più piccole alcuni giorni o settimane prima, ma è anche vero che molte sequenze in tempi recenti non si sono poi risolte in forti terremoti" (Selvaggi).

Si conclude che "non c'è nessun motivo per cui si possa dire che una sequenza di scosse di bassa magnitudo possa essere considerata precursore di un forte evento" (Barberi). Si ricorda anche, con riferimento alle misurazioni di gas radon, che "in concomitanza dei fenomeni sismici ci sono fenomeni geochimici, la cui complessità è, però, tale da non poter essere utilizzati come precursori. Dunque, oggi, non ci sono strumenti per fare previsioni e qualunque previsione non ha fondamento scientifico" (Barberi).

Come si vede, l'iter è approssimativo e non privo di contraddizioni.

## 2. Osservazioni di metodo

1 – La proclamazione dell'allerta deve essere accompagnata da specifici consigli comportamentali dai quali dipende l'impatto pratico e psicologico sulla popolazione. Ma ciò che più conta è la decisione di base: allerta-sì oppure allerta-no. Ed è importante osservare che può essere oggetto di critica il metodo usato dal Decisore e la completezza della sua analisi ma non, a posteriori, la decisione stessa. In una impostazione inevitabilmente probabilistica il risultato di un singolo esperimento non può di per sé offrire validazione alcuna, nè qualora esso sia conforme a ciò che l'esperimento si proponeva, nè qualora accada l'opposto. Il singolo cittadino che decide in modo autonomo di dormire in macchina all'aperto sceglie l'opzione allerta-sì senza porsi questioni di metodo, in base a una propria intuitiva (e istintiva) analisi costi-benefici. Il compito del Decisore è molto più delicato perché coinvolge una

intera comunità. Egli deve dunque utilizzare con metodo trasparente le più aggiornate conoscenze scientifiche confrontandosi con la cittadinanza.

2 – Sulle scosse premonitrici Allen /5/ scrive: "Of course, foreshocks are a very real precursory phenomenon, whether or not we can as yet always recognize them as such". Tradotta in italiano e in linguaggio probabilistico la frase suona: ovviamente le scosse premonitrici sono un vero fenomeno precursore, anche se con alta probabilità di falso allarme. Questo giudizio è largamente condiviso; si veda ad esempio Vere-Jones /6/, Bakun /7/, Jones /4/, Aki /8/, Grandori et al. /3/, Guagenti et al. /9/. L'affermazione conclusiva della Commissione Grandi Rischi (nel seguito "la Commissione") che "oggi non ci sono strumenti per fare previsioni e qualunque previsione non ha fondamento scientifico" suona quindi scientificamente... azzardata. È inoltre chiaro che il Decisore del 1985 e quello del 2009 hanno opinioni discordi sulle scosse premonitrici. La comunità scientifica italiana dovrebbe essere investita del problema in modo che si pervenga a una conclusione condivisa.

3 – La Commissione non ha considerato e discusso i seguenti elementi di giudizio, tutti a favore dell'opzione allerta-sì.

a) Nella nota di Boschi et al. /10/ "Forecasting Where Larger Crustal Earthquakes Are Likely to Occur in Italy in the Near Future" del 1995 la regione dell'Aquilano risulta, fra le 20 regioni considerate, quella con la maggior probabilità di un forte evento nel ventennio 1995-2015.

b) La testimonianza (Selvaggi) che "una sequenza di piccole scosse talvolta precede un forte terremoto e altre volte no" definisce tale sequenza come precursore, anche se non ne viene precisata la probabilità di falso allarme.

c) La presenza di danneggiamenti alle costruzioni (di cui riferisce il prof. Dolce) provocati dalle scosse di modesta magnitudo dei giorni precedenti induce a ritenere particolarmente pericoloso un eventuale forte terremoto.

d) I tre punti precedenti si riferiscono a sintomi utili per soppesare al meglio la probabilità di un forte terremoto in tempi brevi e la gravità dei suoi effetti. Ma a favore dell'allerta vi era, alla sera del 31 marzo, un importante elemento indipendente dal valore (comunque non nullo) di detta probabilità: il costo sociale di un eventuale allerta falso era prossimo a zero. Infatti i disagi provocati dalla sequenza sismica non sarebbero praticamente aumentati in seguito a una pacata spiegazione dell'effettivo aumento temporaneo del rischio di un forte terremoto. L'apprestamento ordinato delle misure di prevenzione (come la selezione dei luoghi di raccolta, l'organizzazione dell'evacuazione degli ospedali e del trasporto delle persone disabili, il raduno di mezzi di soccorso provenienti da zone non esposte, eventuali consigli di abbandonare le case danneggiate) rende la popolazione più consapevole e fiduciosa. Che se poi, come è molto probabile, il terremoto non viene, il comportamento del Decisore verrà giudicato prudente ma non ingiustificato da chi era già in ansia anche

senza l'intervento degli esperti. Per contro, se l'opzione è allerta-no, e il terremoto pur essendo poco probabile si verifica, il costo in termini di vittime è incommensurabile con il costo sociale del falso allerta.

4 – Resta inspiegabile il fatto che la Commissione e i responsabili della Protezione civile, oltre a scegliere l'opzione allerta-no (scelta legittima pur se criticabile dal punto di vista metodologico), abbiano potuto assumersi la responsabilità di scoraggiare le iniziative di prevenzione che molti cittadini suggerivano o autonomamente assumevano.

5 – L'atteggiamento sfiduciato della Commissione nei riguardi dei precursori riflette la delusione di molti che avevano sperato in una soluzione quasi-deterministica del problema della previsione a breve termine. A questo proposito notava Vere-Jones: ...è paradossale che lo scetticismo circa la fattibilità della previsione dei terremoti sembra aver raggiunto il suo massimo proprio quando per la prima volta la qualità e la quantità dei dati disponibili rendono particolarmente plausibile tale programma. Questo paradosso può rappresentare un cambio di paradigma, un tardivo riconoscimento che l'iniziale sogno di previsione deterministica, pur con qualche termine di errore aggiunto, deve essere sostituito con la più modesta ambizione di definire regioni con maggiore o minore rischio transitorio /6/. E anche: ... il monitoraggio continuo di un vasto spettro di potenziali precursori può essere essenziale prerequisito per il successo della previsione dei terremoti /11/.

Per gettare uno sguardo verso le prospettive di successo degli sviluppi di ricerca auspicati da Vere-Jones, è necessario completare l'esame delle caratteristiche dei precursori e dei sistemi di allarme che su di essi si fondano.

### 3. Sistemi di allarme sismico

Se  $p$  è la probabilità di falso allarme di un precursore,  $1-p$  è una misura della sua "sincerità", qualità ovviamente molto importante. Ma non meno importante è la sua "solerzia", misurata da  $1-q$ , essendo  $q$  la probabilità di mancato allarme, cioè la probabilità che un forte terremoto non sia preceduto dal precursore.

I valori  $p$  e  $q$  delle scosse premonitrici, per una data zona, variano a seconda dell'intervallo al quale si conviene appartenga la loro magnitudo. Mediamente, per le tre zone Garfagnana, Friuli e Irpinia, con le convenzioni più favorevoli si è trovato all'incirca /3/  $p = 0.97$  e  $q = 0.5$ . Dunque, per la metà dei terremoti forti il precursore non ci sarà, mentre a valle di un precursore la probabilità di un terremoto a breve sarà dell'ordine di 0.03. È ben vero che si tratta di un rischio molto più grande del rischio di base, ma in valore assoluto è ancora molto piccolo. Così che, in assenza di altri sintomi o di circostanze particolari, non si ritiene in generale che sia opportuno dichiarare l'allerta tutte le volte che il precursore si verifica.

Un tentativo spontaneo per ottenere previsioni più stringenti è quello di puntare su un sistema di allarme

fondato su due o più precursori. Il seguente semplice e ipotetico esempio offre prospettive incoraggianti.

Siano  $F_1$  e  $F_2$  due precursori "deboli" con uguale probabilità di falso allarme pari a 0.98, ma fra loro indipendenti. A proposito di tale indipendenza va chiarito che essa non significa che gli "eventi"  $F_1$  e  $F_2$  sono statisticamente indipendenti. Ciò sarebbe in contrasto con il fatto che entrambi sono correlati con  $E$  (terremoto forte). Diciamo che i due precursori sono indipendenti quando sono correlati fra loro "solo" attraverso gli eventi  $E$ , senza alcuna altra correlazione diretta (sono condizionalmente indipendenti).

Si assume che il sistema dia segnale di allarme solo quando i due precursori si sovrappongono. Per convenzione, se  $\Delta t$  è la durata dell'allerta (comune ai due precursori) si assume che la durata dell'allerta del sistema sia  $\Delta t$  misurato dall'istante del verificarsi del secondo. Sotto tali ipotesi la probabilità di falso allarme del sistema è  $p = 0.375$ , cioè la probabilità di un terremoto imminente è 0.625, mentre con il precursore singolo era 0.02!

Per converso, se la probabilità di mancato allarme è per ciascuno 0.5, quella del sistema basato sulla coppia è 0.75.

Allora chiediamoci: si può definire una "efficacia" complessiva del sistema di allarme, che possa fornire supporto alla decisione di allerta?

È chiaro che di decisione in condizioni di incertezza si tratta. Molti sono i problemi di questo tipo che oggi si pongono alla società e alla scienza. Esiste ormai un'ampia e prestigiosa tradizione di ricerca (Kahneman è premio Nobel) sulle logiche decisionali utilizzate in condizioni di forte incertezza, in particolare ove siano implicate piccole probabilità e grandi possibili perdite /12/ /13/.

Proposte sono state introdotte anche nel campo specifico dell'ingegneria sismica e della sismologia applicata (si veda ad es. Vere-Jones /6/, Molchan et al. /14/, Grandori et al. /3/). Diamo qui di seguito una breve sintesi di un possibile approccio decisionale alla dichiarazione di allerta sismico.

Una grandezza è stata proposta come definitoria dell'efficacia  $U$  di un sistema di allerta che tiene conto di allerta falsi  $f$ , allerta mancati  $m$  e allerta con successo  $s$ .

$$U = \frac{s}{f + m}$$

Essa è il rapporto fra successi e insuccessi del sistema di allerta.

Se il sistema si basa su un singolo precursore, e si dà l'allerta ogni volta che il precursore si verifica,  $f$  e  $m$  coincidono con le caratteristiche di falso e mancato allarme del precursore  $p$  e  $q$ ; la probabilità di un terremoto imminente è, come si è detto, 0.02, ma l'efficacia del sistema si trova valore 0.02. È ben vero che l'incremento di pericolosità a valle dell'allerta è notevole (100 volte), ma l'efficacia di un simile sistema di allarme non può considerarsi soddisfacente.

Se il sistema di allarme si basa su due precursori, e si dà l'allerta ogniqualvolta i due si verificano en-

trambi,  $f$  e  $m$  coincidono con le probabilità di falso e mancato allarme della coppia,  $p^{(2)}$  e  $q^{(2)}$ . Nel caso che entrambi abbiano le stesse caratteristiche del singolo precursore già introdotte, le caratteristiche del doppio precursore divengono, come si è già accennato,  $p^{(2)} = 0.375$  e  $q^{(2)} = 0.75$ , con probabilità di un terremoto imminente altissima (0.625) e anche l'efficacia  $U^{(2)}$ , che nel sistema singolo valeva 0.02, aumenta considerevolmente al valore 0.27. In tal caso non solo l'incremento di pericolosità è enorme, ma anche il giudizio sul sistema di allerta è molto migliorato. Resta però il fatto che, ogni 4 eventi E, 3 non verranno segnalati ( $q^{(2)} = 0.75$ ). Non è un buon biglietto da visita per un sistema di allerta, tuttavia il grande aumento di "sincerità" ottenuto passando dal singolo alla coppia incoraggia a insistere su questa pista. E un altro esempio ipotetico delinea un traguardo non impossibile al quale è forse lecito mirare come a una luce in fondo al tunnel.

Le analisi statistiche riguardanti le scosse premonitrici hanno mostrato che la probabilità di falso allarme può essere dell'ordine di 0.97 e quella di mancato allarme dell'ordine di 0.5. Non sembra irragionevole chiedersi: e se avessimo una coppia di precursori indipendenti entrambi con  $p = 0.96$  e  $q = 0.4$  cosa ne sarebbe di  $p$ ,  $q$  e  $U$  della coppia? Il calcolo dice

Singolo			Coppia		
$p$	$q$	$U^{(1)}$	$p^{(2)}$	$q^{(2)}$	$U^{(2)}$
0.96	0.4	0.04	0.125	0.64	0.52

Si avrebbe cioè un "precursore" di tutto rispetto.

È vero che questo precursore è poco solerte, visto che segnala poco più di un terzo degli eventi E; ma in compenso la sua grande sincerità eliminerebbe ogni incertezza decisionale: quando il sistema dà l'allarme il Decisore emana l'allerta e 9 volte su 10 il terremoto arriva. Rispetto alla situazione con un solo precursore "debole" vi sarebbe un nettissimo miglioramento, ciò che è segnalato anche dal confronto fra  $U^{(1)}$  e  $U^{(2)}$ .

Tutto ciò è forse un miraggio, ma avvalora la raccomandazione di Vere-Jones di continuare il monitoraggio di un largo spettro di possibili precursori. Fra questi è particolarmente interessante il precursore costituito dalle variazioni di contenuto di radon nelle acque sorgive; secondo Cao and Aki /15/ si tratta di uno dei più credibili precursori a breve termine; inoltre l'ipotesi di indipendenza dalle scosse premonitrici sembra sostenibile dal punto di vista fenomenologico.

Non si vuole sostenere che le due grandezze  $p^{(2)}$  e  $U^{(2)}$  qui introdotte forniscano "il" criterio decisionale. Sono però certamente utili, come già un po' si è visto da quanto esposto, per decidere se dichiarare o no l'allerta, assieme a tutte le considerazioni di contesto di cui si è detto all'inizio.

Altre numerose considerazioni si possono fare. Ad esempio, con due precursori monitorati, qual è la probabilità del terremoto imminente qualora un solo precursore si sia verificato in assenza dell'altro? Adirittura diminuirebbe (0.016) rispetto alla probabilità segnalata dal sistema a precursore singolo monitorato.

Analogamente può accadere /16/ con due precursori non indipendenti.

Infine, per quanto ancora a uno stadio iniziale, lo studio per costruire la struttura decisionale dell'allerta sismico ha preso in considerazione una terza grandezza: il numero atteso degli allerta sismici su un lungo periodo di tempo.

Per giudicare la complessiva buona scelta di un sistema di allerta si procederà a un esame comparato delle tre grandezze proposte a descrivere le caratteristiche del sistema:

1) la probabilità condizionata che un evento potenzialmente distruttivo E si verifichi nel periodo  $\Delta t$  che segue l'allarme (questa probabilità è una misura del pericolo incombente; è inutile sottolinearne l'importanza);

2) una grandezza che fornisca una misura sintetica dell'efficacia del sistema di allerta, come ad esempio la funzione  $U$  introdotta (la sua espressione può essere opportunamente modificata, qualora condizioni sociali, ambientali o psicologiche facciano apparire preferibile attribuire pesi relativi differenti ai successi e agli insuccessi);

3) il numero atteso degli allerta nell'unità di tempo (esso pure sembra un importante parametro decisionale in quanto permette di misurare il disagio, sul lungo periodo, di allerta eventualmente troppo frequenti).

L'esame comparato di queste tre grandezze può aiutare a risolvere il dilemma tipico di un sistema di precauzioni: o essere troppo conservativi per timore di incorrere in pericoli non cautelati, o essere imprudenti per non rischiare di mettere in atto inutilmente misure cautelative. Aiuta in particolare a individuare quella soglia di pericolosità da giudicare sufficientemente alta per giustificare la proclamazione dello stato di allerta.

#### 4. Conclusioni

Una delle principali caratteristiche dei fenomeni precursori è la probabilità di falso allarme, cioè la probabilità che dopo il manifestarsi del precursore non si verifichi in tempi brevi un forte terremoto (caratteristica che ovviamente permette di calcolare anche la probabilità che si verifichi). È opinione largamente condivisa nella comunità scientifica internazionale che le scosse moderate siano un reale precursore, sia pure con alta probabilità di falso allarme.

Quando si manifesta un precursore di caratteristiche note il Decisore è chiamato in primo luogo a stimare la probabilità che il terremoto si verifichi, tenendo conto di tutti gli altri sintomi sismologici disponibili. È poi suo compito coinvolgere la cittadinanza spiegando quale sia il livello del rischio sismico di base nella zona e quale ne sia il presumibile temporaneo incremento segnalato dal precursore, nonché illustrando e discutendo i possibili provvedimenti di emergenza e infine motivando una scelta decisionale. In tal modo la delicatissima e ineludibile scelta del Decisore fra l'opzione allerta-sì e l'opzione allerta-no potrà essere capita e condivisa.

Infine, alla luce della tragedia avvenuta e delle difficoltà decisionali incontrate, sarebbe auspicabile che la comunità scientifica, nel riprendere gli studi sui precursori (come previsto in una recente ordinanza), volga l'attenzione soprattutto alla loro corretta interpretazione probabilistica al fine di addivenire a criteri decisionali definiti e condivisi.

## Bibliografia

- /1/ Rikitake T., 1976, "Earthquake prediction" Elsevier, Amsterdam.
- /2/ Boschi E. et al., 1985, "Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 al 1980", Istituto Nazionale di Geofisica.
- /3/ Grandori G., Guagenti E., Perotti F., 1988, "Alarm system based on a pair of short-term earthquake precursors", Bull. Seism. Soc. Am., v. 78, n. 4, p. 1538-1549.
- /4/ Jones L., 1985, "Foreshocks and time-dependent earthquake hazard assessment in southern California" Bull. Seism. Soc. Am., v. 75, p. 1669-1679.
- /5/ Allen C.R., 1982, "Earthquake prediction – 1982 overview" Bull. Seism. Soc. Am., v. 72, n. 6, p. S331-S335.
- /6/ Vere-Jones D., Harte D., Kosuch M., 1998, "Operational requirements for an earthquake forecasting programme in New Zealand", Bull. Of the New Zealand Nat. Soc. For earth. Eng., v. 31, p. 194-205.
- /7/ Bakun W.H. et al., «Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake» 2005, Nature, v. 437/13, p. 969-974.
- /8/ Aki K., 1981, "A probabilistic synthesis of precursory phenomena" in "Earthquake prediction: an international review", Am. Geoph. Un., Washington D.C., p. 566-574.
- /9/ Guagenti E., Grandori G., Tagliani A., 1991, "Probabilistic interpretation of short-term earthquake precursors in non stationary condition" Proc. sixth int. conf. on application of statistics and probability in civil engineering, Mexico City.
- /10/ Boschi E., Gasperini P., Mulargia F., 1995, "Forecasting Where Larger Crustal Earthquakes Are Likely to Occur in Italy in the Near Future" Bull. Seism. Soc. Am., v. 85, n. 5, p. 1475-1482.
- /11/ Vere-Jones D., "Forecasting earthquakes and earthquake risk", 1995, Int. Journ. of Forecasting, v. 11, p. 503-538.
- /12/ Kahneman D., Slovic P., Tversky A. (eds), 1982, "Judgment under uncertainty: Heuristic and biases" Cambridge University Press.
- /13/ Thaler R.H., 1991, "Quasi rational economics", New York: Russell sage Foundation.
- /14/ Molchan G.M., Kagan Y.Y., 1992, "Earthquake prediction and its optimization" Journal of Geophysical Research, 97, p. 4823-4838.
- /15/ Cao T., Aki K., 1983, "Assigning probability gain to precursors of four large Chinese earthquakes" Journ. Geph. Res., v. 88, p. 2185-2190.
- /16/ Grandori G., Guagenti E., 1988, "Multiprecursors systems based on non independent precursors" Sem. on the prediction of earth., Lisbon, 14-18 nov.

## EXTENDED ABSTRACT

# Earthquake Prediction. Lesson from l'Aquila Earthquake

G. Grandori, E. Guagenti

*During the first three months of 2009 a sequence of small earthquakes ( $M \leq 2.7$ ) occurred near the city of L'Aquila. Towards the end of March the frequency of the shocks was rising and on March 30 an  $M = 4$  shock occurred. A Committee of experts was charged to examine the probability that these events could be followed within a short period  $\Delta t$  by a strong earthquake. On March 31 the Committee declared that nowadays no short-term prediction of earthquakes is possible and whatever proposed forecasting is not founded on scientific basis. In particular, the Committee stated that there were no indications that the observed seismic activity could represent a precursory phenomenon.*

*Actually it is generally recognized that a moderate shock (for instance with  $M = 4$ ) is sometimes followed by a strong earthquake. Allen /5/ writes: "of course, foreshocks are a very real precursory phenomenon, whether or not we can as yet always recognize them as such". This means that a moderate shock is, with a non zero probability, a foreshock. In other words, a*

*moderate shock is a precursor with a probability of false alarm  $p$ : the probability of a strong earthquake, given the precursor, is  $1 - p$ .*

*For three different zones in Italy (Garfagnana, Friuli and Irpinia) it has been found /3/ that this kind of precursor has probability of false alarm  $p \cong 0.98$  if the time period  $\Delta t = 7$  days is assumed for the validity of the alarm. Similar results have been obtained by Jones for southern California /4/. So, the probability of a strong earthquake in the 7 days after the precursor is of the order of 0.02, more than 100 times greater than the background risk in the Italian zones.*

*However, if no other seismological symptom is present, and in absence of particular anomalous circumstances, the transient risk 0.02 is not considered in general high enough to proclaim a warning whenever the precursor occurs.*

*On the other hand it must be said that in many cases moderate shocks resulted in saving numerous human lives. This is proved by clear examples, like the famous*

Haicheng earthquake (China, 1975) and an Italian case on which a concise comment is appropriate.

On September 7, 1920 a strong earthquake ( $M = 6.4$ ) occurred in the Garfagnana zone, producing the destruction of more than 100 buildings. The number of victims has been comparatively small mainly because during the previous day a moderate shock ( $M = 4.1$ ) convinced many people to sleep outdoors. In the case of Haicheng, the warning has been proclaimed by a Seismografic station. In the case of Garfagnana there is no information about an official warning: people by themselves decided on the basis of a providential foreshock.

In order to rationalize decision making when a precursor occurs, it is important to observe that the decision maker faces a very difficult choice if the probability of false alarm is high (for instance  $p = 0.98$ ): the option "warning" produces with high probability (0.98) a useless inconvenience, while the option "no-warning" leads with small probability (0.02) to the loss of many human lives.

The cost of a useless inconvenience depends on many elements, like the prime cost of the organization of main safety provisions, the negative effects on productive activities, the credibility drop of decision maker. This will be called "social cost" of a warning not followed by the earthquake. It is difficult to imagine a general criterion for the choice between the two options. In every single case it is necessary to consider, besides all other possible seismological symptoms, also the social scenario that the precursor enters. For instance, there may be numerous old buildings constructed without antiseismic criteria or anyhow buildings that show some safety defects; this would be an element in favour of the option "warning". Otherwise, the social cost of a warning not followed by the earthquake may be whether very high or very modest, depending on various circumstances; a very high social cost is an element in favour of the option "no-warning", while a modest social cost is in favour of the option "warning".

The Committee did not consider all the elements in favour of the option "warning" that were available at the time of the meeting of March 31. In particular, in some buildings there was evidence of damage due to shocks of moderate magnitude, so that, in the case of a strong earthquake, unusual heavy destruction should be expected. Moreover the social cost of a warning not followed by the earthquake was near to zero. As a matter of fact, the inconvenience due to the seismic sequence would not be appreciably enlarged by a calm explanation of the transient higher risk and by the preparation of precautionary measures. If then the earthquake does not occur, the behavior of the decision maker will be judged cautious, but not unjustified, by people who were anxious even without the official warning. On the other hand, if the option is "no-warning" and the earthquake occurs (even though the event has a small probability), the cost in term of victims is incommensurable in respect of the social cost of a useless warning.

At this point, it is important to observe that critical comments can be cauched as regards the method used by the decision maker and the completeness of his

analysis, but no judgement on the "goodness" of the decision can be derived a posteriori.

As regards the discouraged attitude versus short-term precursors, Vere-Jones /6/ says: "It is something of a paradox that scepticism concerning the feasibility of earthquake prediction seems to have reached its climax at just the point where for the first time the quality and quantity of current data make such a programme look distinctly more plausible. This paradox may represent a change of paradigm, a belated recognition that the initial dream of deterministic earthquake prediction, even with some errors attached, has to be replaced with the lesser ambition of defining regions of greater or lesser transient risk".

In order to take a look at possible research developments, it is, first, necessary to introduce another important feature of short-term precursors: the "probability of missed alarm"  $q$  (i.e. the probability that in the interval  $\Delta t$  immediately before a strong earthquake the precursor does not occur). From  $p$  and  $q$  it is possible to derive the "effectiveness"  $U$  of the warning system, defined as the ratio between the expected number of favorable cases and the expected number of unfavorable cases,  $U = s/(f + m)$ , where  $s$  is the expected number of successes (warnings followed by a strong earthquake within  $\Delta t$ ) over a long time period,  $f$  and  $m$  are the expected number of false and missed warnings over the same time period.

It has been shown that the precursor "moderate shock" is a weak precursor with  $p = 0.98$ ,  $q = 0.5$  this means that one half of strong earthquakes will not have the precursor while, when a precursor occurs, the probability of a strong earthquake within  $\Delta t$  is 0.02.

A spontaneous attempt to obtain alarm systems whit a more tight precursor-earthquake correlation is to consider an alarm system based on two or more (conditionally) independent precursors. The following hypothetical example shows encouraging results.

Let two "weak" precursors have the same characteristics  $p$  and  $q$ , being independent from each other. Let  $U$  be the effectiveness of the warning system based on a single monitored precursor, warning being proclaimed every time the precursor occurs. Let  $p''$ ,  $q''$ ,  $U''$  the features of the system based on monitoring both of the precursors, warning being proclaimed every time both precursors occur. The comparison between the two systems is as follows:

single precursor			double precursor		
$p$	$q$	$U$	$p''$	$q''$	$U''$
0.98	0.5	0.02	0.375	0.75	0.27.

Finally, as a wishful dream we consider the hypothesis that future research could lead to the knowledge of two independent precursors, both with  $p=0.96$ ,  $q=0.4$ . Actually, in particular conditions Jones finds that moderate shocks may be a similar precursor. The dream is that a second similar precursor will be discovered. In this case the comparison between single and double precursor is as follows:

$p$	$q$	$U$	$p''$	$q''$	$U''$
0.96	0.4	0.4	0.125	0.64	0.52.

It would be a respectable warning system!