

# Probabilità e salti mortali: le insidie della validazione dell'analisi di pericolosità attraverso l'occorrenza di singoli terremoti.

Why probabilistic hazard maps can not be validated by individual earthquake occurrences.

Iunio Iervolino<sup>1</sup> ■

## Sommario

In paesi di avanzata cultura sismica, e dotati di studi di pericolosità allo stato della migliore pratica corrente (e quindi necessariamente probabilistici), l'occorrenza di un evento dannoso spesso innesca un dibattito, tanto comprensibile quanto delicato, teso alla verifica e/o validazione delle stime di pericolosità fornite dalle mappe ufficiali. Queste valutazioni sono tipicamente basate sulla comparazione degli spettri di risposta derivati dalle registrazioni dell'evento in questione con gli spettri a pericolosità uniforme (di progetto), o sulla sovrapposizione delle misure d'intensità del moto al suolo con le curve di pericolosità disponibili. Questa breve nota discute alcune tesi secondo cui questo tipo di analisi è da interpretarsi con la dovuta cautela e tenendo conto delle implicazioni che le analisi probabilistiche hanno, per non correre il rischio di trarre conclusioni ingannevoli o che si prestino a fraintendimenti riguardo alla razionalità dell'approccio probabilistico alla valutazione della pericolosità sismica.

## Abstract

*It is often the case, for example in Italy, that occurrence of damaging earthquakes teases the possibility of checking whether probabilistic hazard estimates are consistent with, or consistently accounted for, the ground motion measured in the event, which took place. These analyses are typically based on comparison of recorded elastic response spectra with uniform hazard spectra that is equivalent to compare observed ground motion intensity measures with the corresponding hazard curves. This short note discusses a few arguments supporting the thesis this approach should be dealt with consciousness to avoid drawing false conclusions on the current approach to probabilistic seismic hazard analysis.*

## 1. Introduzione

Per il suo sott'inteso carattere predittivo e per la relativa recente introduzione in molti paesi, l'analisi probabilistica di pericolosità sismica (e.g., Cornell, 1968; Reiter, 1990; McGuire, 2004), che ha implicato, di fatto, un cambiamento di paradigma nelle comunità dell'ingegneria sismica e nella sismologia per l'ingegneria, è comprensibilmente, ma non necessariamente legittimamente, messa in discussione a ogni occorrenza di un terremoto dannoso. Ne sono esempio, per l'Italia, le recenti sequenze de L'Aquila (2009) e dell'Emilia (2012), che hanno infiammato il dibattito sulla consistenza e adeguatezza della mappa di pericolosità nazionale (Stucchi et al., 2011) su cui si basano le azioni sismiche di progetto secondo la vigente normativa per le costruzioni (CS.LL.PP., 2008). Le argomentazioni principali a supporto di queste valutazioni si fondano, di solito, sul confronto del moto al suolo osservato con valori di riferimento derivati dall'analisi di pericolosità, ne è esempio la comparazione degli spettri di risposta di segnali

registrati a uno o più siti interessati, con gli spettri a pericolosità uniforme (SPU) ottenuti dalle stime probabilistiche.

Sembra, tuttavia, che le implicazioni connesse alla natura probabilistica dell'analisi di pericolosità, e le conseguenze delle ipotesi che questa necessariamente richiede, non siano tenute in esplicita considerazione in molti di questi esercizi. Il rischio conseguente è quello di essere portati a trarre conclusioni fallaci, o almeno fuorvianti, mettendo in discussione un approccio ormai consolidato, e supportato da un largo consenso scientifico internazionale, per la valutazione razionale della pericolosità sismica.

Il modesto obiettivo delle brevi considerazioni riportate nel seguito è di richiamare alcuni aspetti di base dell'analisi probabilistica di pericolosità sismica, derivandone implicazioni su cosa sia legittimo e cosa richieda cautela nei tentativi di verificarne i valori attraverso confronti diretti con il moto al suolo osservato in singoli terremoti. A questo scopo, si richiamano dapprima brevemente gli elementi essenziali della valutazione

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ iunio.iervolino@unina.it

probabilistica (nella sua versione classica) di pericolosità. Si derivano, poi, i periodi di osservazione necessari, in principio, per verificare le frequenze degli eventi d'interesse. In seguito si discute come, per costruzione, le analisi di pericolosità tendano a fornire stime che sarebbero superate da altre che eventualmente assumessero che il sito oggetto di valutazione sia anche l'epicentro del terremoto. Conseguentemente, si analizzano le differenze tra stime di pericolosità sito-specifiche e regionali. In fine, si richiamano alcune caratteristiche dei dati d'ingresso e in uscita degli studi probabilistici, fissando alcuni punti per possibili valutazioni di compatibilità, invece che di validazione, delle informazioni di pericolosità attraverso le occorrenze di singoli eventi sismici. E' scopo ultimo della nota quello di contribuire alla discussione sull'approccio probabilistico per valutazioni di pericolosità sismica a scala nazionale.

## 2. Elementi essenziali dell'analisi probabilistica (classica) di pericolosità

Prima di ogni successiva argomentazione, è necessario richiamare l'attenzione sulla definizione standard dell'analisi probabilistica di pericolosità sismica, la quale consiste nel calcolo del tasso (ad esempio espresso in eventi/anno) di superamento di un dato valore di una misura d'intensità sismica o IM (ad esempio l'accelerazione di picco al suolo; peak ground acceleration o PGA) a un sito d'interesse (ad esempio quello di costruzione per un edificio in fase di progettazione). Il calcolo<sup>1</sup> di tale tasso, che può definirsi simbolicamente come  $\lambda_{IM,r}$ , è spesso articolato considerando: dapprima il tasso,  $\nu$ , di occorrenza dei terremoti alla sorgente, poi la probabilità condizionata del superamento della misura di intensità al sito di interesse, data la magnitudo (M) dell'evento e la distanza dalla sorgente (R), e eventualmente altri parametri, e infine mediando tra tutti i possibili eventi che possono accadere, cioè marginalizzando attraverso le probabilità delle variabili rispetto a cui si è condizionato, come in Equazione (1). Tale procedura è per opportunità, perché il termine  $P[IM \geq im | m, r]$  si ottiene con quelle che si chiamano, con una sineddoche, leggi di attenuazione, mentre  $P[M=m, R=r]$  e  $\nu$  si ricavano da valutazioni sulla sismicità - storica o strumentale - e da studi geologici per la sorgente in questione<sup>2</sup>.

$$\lambda_{IM} = \nu \cdot P[IM > im] = \nu \cdot \sum_{m,r} P[IM > im | m, r] \cdot P[M=m] \cdot P[R=r] \quad (1)$$

Infatti, è possibile dimostrare che, se l'occorrenza dei terremoti sulla sorgente segue un processo, cosiddetto, di Poisson omogeneo (PPO) di parametro,  $\nu$ , allora il processo che regola l'occorrenza di eventi che determinano il superamento della IM al sito d'interesse è anch'esso un PPO. Inoltre, il suo tasso dipende da  $\nu$  proprio secondo l'Equazione (1).

Si parla, in effetti, di processo filtrato: l'occorrenza dei terremoti alla sorgente sismica è filtrata per la probabilità che questi provochino il superamento del livello d'intensità in questione,  $im$ , al sito d'interesse (Figura 1, sinistra). In altre parole, tra tutti i terremoti che occorrono sulla faglia, se ne scelgono solo quelli che al sito provocano l'effetto d'interesse, e l'occorrenza degli eventi appartenenti a questa selezione rimane ancora regolata da un PPO.

Se il sito è soggetto a  $n$  sorgenti sismiche, ciascuna dalle quali genera terremoti la cui occorrenza è regolata da un PPO, indipendente da quelli delle altre sorgenti, allora il tasso di superamento al sito è semplicemente la somma dei tassi come in Equazione (2).

$$\begin{aligned} \lambda_{IM} &= \sum_{i=1}^n \lambda_{IM,i} = \sum_{i=1}^n \nu_i \cdot P[IM > im | i] = \\ &= \sum_{i=1}^n \nu_i \cdot \sum_{m,r} P[IM > im | m, r] \cdot P[M=m | i] \cdot P[R=r | i] \end{aligned} \quad (2)$$

Se la media in Equazione (2) si ripete per tutti i possibili valori di  $im$  in un intervallo di interesse, allora si ottiene una curva che riporta  $\lambda_{IM}$  in funzione<sup>3</sup> di  $im$ . Tale diagramma si chiama curva di pericolosità, essa fornisce il parametro del PPO che regola il superamento, al sito d'interesse, di ciascun valore di  $im$ . Nella Figura 1 (destra), si riporta un esempio di curva di pericolosità calcolata per il sito di Mirandola (MO) considerando la (sola) zona sismogenetica 912 secondo Meletti et al. (2008) e i parametri di occorrenza dei terremoti sulla stessa secondo Barani et al. (2009). Il software di calcolo è lo stesso di Convertito et al. (2009) e Iervolino et al. (2011).

Una conseguenza importante dell'assunzione di PPO per l'occorrenza dei terremoti<sup>4</sup>, è che il tempo tra due eventi successivi (detto anche tempo d'inter-arrivo), che ovviamente è aleatorio, ha una distribuzione di probabilità di tipo

<sup>1</sup>Allo scopo di semplificare l'illustrazione, si esprimono le probabilità come di variabili aleatorie discrete, mentre a rigore, bisognerebbe considerarle continue sostituendo alle sommatorie e alle probabilità, integrali e funzioni di densità (o distribuzioni cumulate), rispettivamente.

<sup>2</sup> $P[M=m, R=r]$ , condizionatamente ad un'unica sorgente può vedersi come  $P[M=m] \cdot P[R=r]$ .

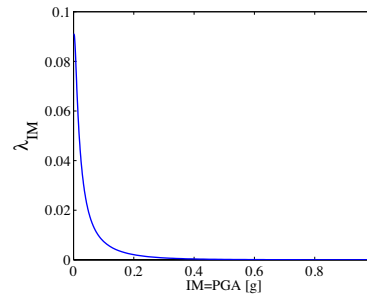
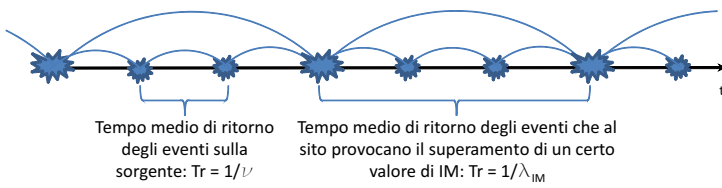


Figura 1  
 Concetto di filtraggio del PPO per passare dal processo di occorrenza dei terremoti nella sorgente al superamento dell'accelerazione al sito (sinistra); esempio di curva di pericolosità (destra).

Esponenziale. Quindi, la probabilità che il tempo trascorso tra due eventi successivi, che causino il superamento al sito del valore di IM di interesse,  $T(im)$ , sia minore di  $t$ , è data dall'Equazione (3). (Essa si può interpretare anche come la probabilità del tempo al prossimo evento, qualunque sia l'istante in cui si faccia la valutazione, essendo il PPO un processo ad incrementi indipendenti e stazionari.)

$$P[T(im) \leq t] = 1 - e^{-\lambda_{im} \cdot t} \quad (3)$$

Dalla Equazione (3) segue, ad esempio, che il valore della PGA di progetto, se il criterio è quello che una costruzione debba essere in grado di sopportare l'intensità che ha il 10% di probabilità di essere superata durante la vita utile assunta pari a 50 anni (e.g., CS.LL.PP., 2008), è pari a quello che nel pannello di destra della Figura 1 corrisponde a  $\lambda_{im} = 0.002$ . Da tale tasso consegue  $P[T(im) \leq 50] = 0.1$ . In virtù delle proprietà del PPO, il risultato fornito dalla Equazione (3) per la PGA e  $\lambda_{im}$ , si può anche rileggere dicendo che l'intensità dello scuotimento calcolata mediante la Figura 1 è superata mediamente ogni  $1 / \lambda_{im} = 1 / (2 \times 10^{-3}) = T_r = 475$  anni ( $T_r$  è anche detto periodo di ritorno dell'evento che causa il superamento della suddetta PGA).

### 3. Occorrenze e periodi di ritorno: quanti anni ci vogliono per validare le mappe di pericolosità?

Si supponga ora si voglia validare la misura d'intensità che la curva di pericolosità fa corrispondere, per il sito d'interesse, al tasso annuale 0.002, cioè la PGA che per il sito ha il 10% di probabilità di essere superato in una finestra di osservazione di 50 anni. Per confermare o smentire la frequenza associata a tale valore dalla analisi di pericolosità, bisogna essere in grado di osservare con che frequenza questo valore della PGA è effettivamente superato al sito (fatti salvi gli sciami sismici).

Questa questione non è dissimile dal problema

di stimare l'eventuale sovrappollamento di un autobus di una linea che passa con ricorrenza oraria a una data fermata. E' necessario aspettare un numero sufficiente di ore per osservare un numero sufficiente di autobus di cui misurare la frequenza con cui l'affollamento supera, ad esempio, l'ottanta per cento della capienza nominale.

Dunque, nel caso della PGA, supponiamo che ci si accontenti anche solo di dieci occorrenze dell'evento che ricorre al sito mediamente ogni cinquecento anni, allora bisognerà disporre di circa cinquemila anni di misure al sito.

Sfortunatamente, la prima registrazione accelerometrica di un evento sismico risale al terremoto di Long Beach (CA, USA) nel 1933, quindi non esiste sito per cui si possa fare questo confronto diretto, e non ce ne saranno per ancora molto tempo.

Si può dire in conclusione che, la frequenza di occorrenza dell'intensità del terremoto con  $T_r$  anni quale periodo di ritorno richiede, accontentandosi di dieci osservazioni,  $10 \times T_r$  anni per essere confrontata con quanto calcolato mediante l'analisi di pericolosità. In altre parole, se in un sito esistono cinquanta anni di registrazioni continue, con questo criterio ci si attende di poter validare solo la frequenza del valore PGA con un periodo di ritorno (relativo al superamento) di soli cinque anni.

### 4. Perché le stime sembrano sempre eccedute?

Sovente, nelle comparazioni di stime di pericolosità con le registrazioni dei terremoti, queste ultime sono scelte tra le più intense osservate, il che, per la natura dell'attenuazione, spesso significa scegliere le registrazioni più vicine alla sorgente. A titolo di esempio si riportano, in Figura 1, gli spettri di progetto secondo la norma italiana (NTC nella legenda) per periodi di ritorno 475 e 2475 anni per il sito di Mirandola (MRN), al variare della classe di suolo, e le registrazioni orizzontali del terremoto del 20 maggio 2012

<sup>3</sup> E' una curva perché diversi valori di IM hanno tassi di superamento differenti. Ad esempio, se la IM è la accelerazione di picco al suolo, più grande è il valore di PGA di interesse, minore sarà il tasso che caratterizza il processo di Poisson omogeneo al sito. In altre parole, maggiore è il valore di PGA a cui si guarda, più basso sarà il numero eventi che causeranno il suo superamento nell'unità di tempo.

<sup>4</sup> Si trascurano in questa sede considerazioni sulla scelta, pur frequente, del PPO per descrivere l'occorrenza dei terremoti e altre alternative che consentono di modellare altri effetti quali la tempo-dipendenza della ricorrenza o l'occorrenza di sciami sismici.

(Chioccarelli et al., 2012). Nel pannello di destra della stessa figura si confrontano gli spettri di progetto di stazioni colpite dal terremoto ma non nell'epicentro (entro 47 km da esso). Si noti preliminarmente come le stime di pericolosità (gli spettri di progetto NTC praticamente coincidono con gli SPU calcolati secondo Stucchi et al., 2011) siano comparabili con le registrazioni solo nell'epicentro<sup>5</sup>.

Quest'approccio è perfettamente comprensibile, cionondimeno nell'applicarlo bisognerebbe tenere in conto che l'analisi probabilistica di pericolosità sismica, di cui alla Equazione (1) e alla Equazione (2), media su tutte le possibili posizioni dell'epicentro sulla(e) zona(e) di interesse per il sito. In altre parole, siccome la posizione in cui si genererà il terremoto che causerà il superamento della IM al sito è incerta, il valore della intensità stimato, e che nella curva di pericolosità corrisponde ad un certo periodo di ritorno è, di fatto, una media pesata<sup>6</sup> degli scuotimenti da tutti gli epicentri possibili. Nel caso si volesse calcolare la pericolosità, assumendo come dato di fatto (condizionatamente, parlando in termini probabilistici) che l'epicentro coincida con il sito per cui si sta valutando la pericolosità, allora le PGA (o qualunque altra IM) calcolate sarebbero, a parità di periodo di ritorno, superiori rispetto al caso in cui il possibile epicentro sia distribuito sulla sorgente; Equazione (4).

$$\lambda_{IM|R=0} = v \sum_m P[IM > im | m, 0] \cdot P[M=m] > \lambda_{IM} \quad (4)$$

A titolo di esempio si riporta in Tabella 1, per il sito di Mirandola, la pericolosità in termini di PGA relativamente ad alcuni periodi di ritorno, e quindi tassi annuali ottenuti dalla Figura 1, destra. Nella stessa tabella si riporta lo stesso calcolo condizionatamente ad avere che l'epicentro coincida con il sito d'interesse. Si noti l'incremento delle stime. Può sorgere il dubbio se non sia opportuno, quindi, far sempre coincidere l'epicentro con il sito d'interesse nel calcolo delle mappe di pericolosità, giacché ciò porterebbe a stime conservative. In realtà, quest'approccio sarebbe probabilisticamente inconsistente, perché non rifletterebbe l'effettivo stato di conoscenza sul fenomeno, non essendo gli epicentri dei prossimi terremoti noti, se non con incertezza. Nel calcolo di pericolosità ogni localizzazione deve avere un'importanza (cioè un peso) proporzionale alla fiducia che essa sia effettivamente la sorgente dell'evento d'interesse; i.e., la sua probabilità.

### 5. Rischio individuale (locale) e rischio sociale (regionale)

E' dunque un fatto che, nel caso si nuclei in una regione un terremoto forte (i.e., sopra media),

Figura 2  
Spettri registrati vicino all'epicentro del terremoto del 20 maggio 2012, confrontati con gli spettri di progetto per periodi di ritorno pari a 475 e 2475 anni per lo stesso sito (sinistra), e spettri registrati entro 47 km dall'epicentro confrontati con gli stessi spettri (destra).

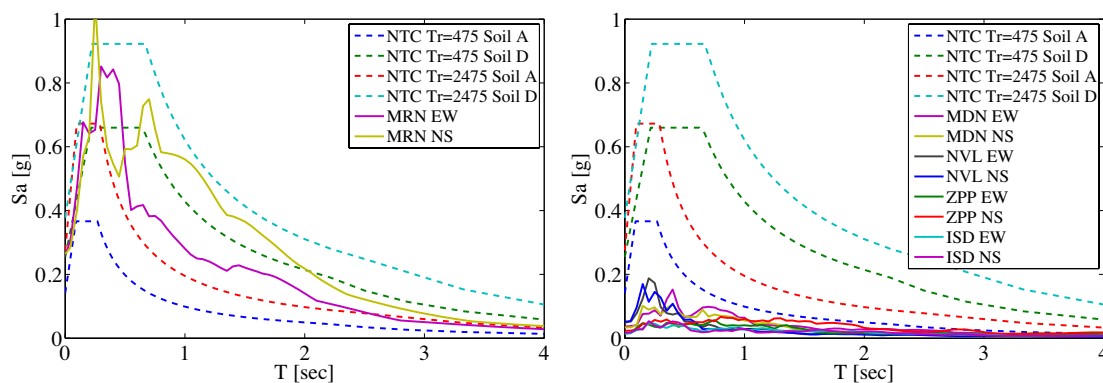


Tabella 1 Pericolosità per Mirandola (long. 11.06; lat. 44.88) in termini di PGA [g], distribuendo i possibili epicentri nella zona sismogenetica che contiene la località, e condizionatamente al fatto che l'epicentro si trovi nel sito per cui si valuta la pericolosità.

	T <sub>r</sub> [anni] (λ <sub>IM</sub> [eventi/anno])			
	50 (0.02)	475 (0.002)	975 (0.001)	2475 (0.0004)
Epicentro distribuito uniformemente nella Zona 912	4.60E-02	1.72E-01	2.22E-01	2.88E-01
Epicentro certo nel sito per cui si valuta la pericolosità	2.51E-01	4.42E-01	5.09E-01	5.97E-01

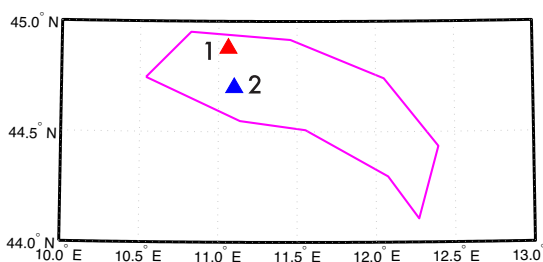
<sup>5</sup> Per gli altri siti si sarebbero dovuti usare gli spettri di progetto relativi a ciascuno di essi secondo le NTC, si sono invece assunti gli spettri corrispondenti a Mirandola (gli stessi che nella figura di destra). Questo per semplicità, essendo gli spettri di progetto di siti vicini e appartenenti alla stessa zona sismogenetica, molto simili.

<sup>6</sup> I pesi, ovviamente, data la magnitudo, sono le probabilità che il sito e l'epicentro si trovino ad una data distanza; Equazione (1). Per questo, la stima probabilistica è compresa tra un minimo ed un massimo. Il massimo, per la natura delle leggi di attenuazione, coincide proprio, fissata la magnitudo, con il valore calcolato assumendo che il sito di interesse sia l'epicentro del terremoto.



esso potrebbe eccedere le soglie di progetto per il sito nell'epicentro sebbene, per effetto della distanza, essere sotto soglia in molti altri siti. In effetti, se la zona è densamente abitata, è probabile che una, tra le località edificate, sarà effettivamente l'epicentro. Questa questione è simile al caso della lotteria. A ogni estrazione c'è un solo biglietto estratto, quindi al più un vincitore, e moltissimi non vincitori. La probabilità che il singolo vinca (rischio individuale) è molto bassa, ma la probabilità che almeno uno vinca (rischio aggregato o sociale) è più alta, dipendendo dal numero di biglietti venduti su quelli estratti. Se non siamo interessati alla probabilità che uno solo vinca, ma che si vinca in un gruppo specifico (per esempio che vinca una persona in una certa città), bisogna usare un altro criterio di calcolo. Nel caso della pericolosità, un modo probabilistico per cautelarsi da questo fenomeno potrebbe essere quello di calcolare l'intensità del moto al suolo che ha un certo tasso annuale di essere superato in almeno uno tra i più siti d'interesse. Per chiarire meglio questo concetto si considerino due località {1,2} che si trovino nella regione che è influenzata sismicamente dalla stessa sorgente. Si assuma che l'obiettivo dell'analisi probabilistica di pericolosità regionale (e.g., Esposito and Iervolino, 2011) sia il calcolo del tasso degli eventi che, occorrendo nella sorgente, causano il superamento di un certo valore di  $im$  ad almeno uno dei due siti. Tale calcolo si può effettuare secondo la Equazione (5) che fornisce valori più grandi di quelli della pericolosità di ciascuno dei due siti specifici. Inoltre, maggiore è il numero di siti considerati (più grande è la regione), maggiore è la discrepanza tra la pericolosità regionale e quella individuale per ciascun sito<sup>7</sup>.

$$\lambda_{\lambda_{IM,UM_i}} = v \cdot \left\{ 1 - \sum_{m,r} P[IM_1 \leq im \cap IM_2 \leq im | m, r_1, r_2] \cdot P[R_2 = r_2 | r_1] \cdot P[R_1 = r_1] \cdot P[M = m] \right\} > \{ \lambda_{IM1}, \lambda_{IM2} \} \quad (5)$$



E' da notare che, la pericolosità regionale può avere, forse, una certa utilità dal punto del controllo del rischio sociale, se le conseguenze del collasso in almeno uno dei siti si riflettono su di un'intera regione. Si pensi, ad esempio, a un'area in cui siano presenti diversi impianti nucleari; le conseguenze del collasso di una qualunque installazione nucleare interesserebbero tutta la regione, indipendentemente da dove si trovi l'impianto collassato, per questo potrebbe avere senso calcolare la pericolosità come la probabilità di superare l'accelerazione critica per almeno uno dei siti, cioè considerandoli tutti insieme nella pericolosità.

D'altra parte, il risultato dell'analisi di pericolosità regionale non può essere usato per analisi di rischio di singoli edifici che si trovino in siti specifici della regione. Infatti, tali progetti hanno come obiettivo il controllo del rischio sismico nel sito di costruzione, e richiedono la pericolosità sito-specifica, alla base dei codici di costruzione moderni, e discussa sopra.

### 6. Comparazioni di osservazioni con studi di pericolosità e altri salti mortali

Nonostante tutte le argomentazioni sviluppate, va tenuto in conto che alcune valutazioni di compatibilità sui parametri d'ingresso dei modelli di valutazione della pericolosità sono, tuttavia, possibili. All'occorrenza di un terremoto, ad esempio, si può verificare che magnitudo e localizzazione siano comprese tra quelli plausibili secondo l'analisi di pericolosità, in relazione alle caratteristiche delle sorgenti considerate. Inoltre, si può verificare che le intensità occorse siano in buon accordo (probabilisticamente parlando) con le leggi di attenuazione considerate (si veda Chioccarelli et al., 2012 per esempi in questo senso). Questo garantisce, almeno, che il terremoto occorso non sia atipico, e quindi non tenuto in conto dagli strumenti utilizzati nella analisi di pericolosità.

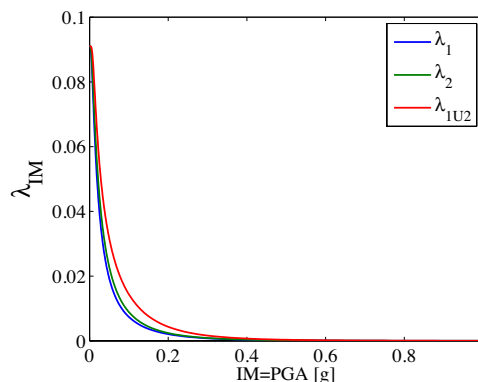


Figura 3  
Siti 1 e 2 considerati nella zona sismogenetica 912 (sinistra) e curva della pericolosità dei due siti confrontata con la pericolosità sito-specifica (destra).

<sup>7</sup> In effetti un criterio di questo tipo fornendo frequenze maggiori e potendo avvalersi di dati osservati a più siti, sarebbe più facile da validare con le osservazioni.

Con cautela, invece, è opportuno affrontare il confronto degli spettri di risposta osservati con gli SPU<sup>8</sup> (come, in effetti, riportato in Figura 2). Infatti, le valutazioni di cui sopra possono mettere in discussione la fondatezza della scelta del particolare SPU con cui effettuare il confronto. Inoltre, per definizione, gli SPU sono combinazioni di spettri di terremoti diversi (ad esempio è noto che le alte frequenze siano influenzate da terremoti di magnitudo moderata e sorgente vicina al sito, mentre le basse frequenze sono più influenzate da magnitudo maggiori a più grandi distanze; e.g., Reiter, 1990).

Si può dire, a ragion veduta quindi, che gli SPU non rappresentano alcun terremoto<sup>9</sup>, e che il confronto con spettri di singoli eventi va fatto con coscienza. Con specifico riferimento a questa sola questione, altri spettri derivati dalla pericolosità, per esempio lo spettro medio condizionato a magnitudo e distanza occorsi (e.g., Baker and Cornell, 2006), potrebbero rappresentare punti di confronto più appropriati.

## 7. Considerazioni conclusive

Quando un terremoto dannoso accade in una regione per cui è disponibile una stima della pericolosità sismica, questa è puntualmente chiamata in causa in un dibattito teso a verificarne la consistenza con il moto al suolo osservato. In realtà, nel caso le stime di pericolosità siano probabilistiche, una serie di punti critici deve essere chiaramente tenuti in conto nel cimentarsi in questo esercizio. Questa breve nota ha tentato di argomentare su alcune implicazioni, della natura probabilistica e dell'assunzione poissoniana dell'occorrenza dei terremoti, alla base delle valutazioni di pericolosità nella migliore pratica corrente.

In particolare si sono evidenziate le seguenti questioni.

1. Per validare la frequenza associata a una certa intensità del moto al suolo dall'analisi di pericolosità, sono necessari molti anni. Infatti, per stimare la frequenza dell'intensità che è superata con periodo di ritorno di  $T_r$  anni al sito in esame, sono necessari, anche accontentandosi di sole dieci occorrenze, mediamente  $10 \times T_r$  anni di osservazioni allo stesso sito.

2. Le intensità di riferimento per la progettazione, calcolate attraverso studi di pericolosità, sembrano spesso eccedute in terremoti particolarmente forti. Spesso questa valutazione si fa considerando le sole registrazioni all'epicentro e confrontandole con la pericolosità per lo

stesso sito. Bisogna considerare, tuttavia, che la pericolosità media tra tutti i probabili epicentri, mentre se il terremoto occorre proprio al sito d'interesse, la pericolosità di riferimento dovrebbe almeno essere quella condizionata al fatto che il sito si trovi sulla sorgente. Quest'ultima, a parità di tutti gli altri parametri, sarebbe superiore.

3. Dal punto 2 segue che un terremoto d'intensità molto sopra la media, sarà probabilmente critico per il sito epicentrale. Un criterio alternativo per tenere in conto questo effetto potrebbe essere quello di calcolare la pericolosità regionale, cioè valutare la probabilità che una certa intensità sia ecceduta ad almeno uno dei siti nella regione d'interesse. Tuttavia, ciò condurrebbe a valori maggiori, ma che non potrebbero essere usati per valutazioni di rischio in siti specifici, il che è il vero obiettivo dell'analisi di pericolosità classica.

4. Gli spettri a pericolosità uniforme non rappresentano il moto al suolo di alcun terremoto specifico, essendo combinazione degli spettri di tutti i terremoti possibili nella regione (in termini di magnitudo e distanza ad esempio) coinvolti nell'analisi di pericolosità. Per questo, così come sono, essi vanno considerati con cautela quali riferimenti *tout-court* per il confronto con le controparti osservate.

Infine, date queste argomentazioni e altre (non affrontate) che concernono le ipotesi di base sui processi che regolano l'occorrenza dei terremoti, la validazione della pericolosità sismica probabilistica con singoli terremoti può essere un esercizio molto difficile. D'altra parte, è possibile eseguire valutazioni di compatibilità tra quanto osservato e i parametri di input o i modelli considerati dagli studi di pericolosità. Inoltre, sebbene non sia opportuno mettere in discussione l'approccio corrente alla valutazione probabilistica della pericolosità sismica, è pur vero che tale analisi può, e deve, essere sempre migliorata in relazione al progresso sullo stato di conoscenza dei fenomeni coinvolti (le analisi probabilistiche sono sempre condizionate allo stato di conoscenza sul fenomeno oggetto di valutazione). Ad esempio, è ormai noto come in zone vicina alla sorgente (dove i terremoti sono tipicamente più dannosi), per questioni relative soprattutto al meccanismo di rottura e alla geometria sito-sorgente, possono eventualmente verificarsi effetti peculiari (direttivi) che non sono ancora tenuti in conto dalle mappe di

<sup>8</sup>Gli SPU sono spettri ottenuti mettendo in funzione del periodo, le accelerazioni (ordinate) spettrali che hanno la stessa probabilità di superamento al sito secondo l'analisi probabilistica, si veda Iervolino et al. (2009), su questa stessa rivista, per un approfondimento.

<sup>9</sup>Su questa stessa rivista è stata affrontata una discussione simile per il terremoto de L'Aquila 2009, si veda Crowley et al. (2009).

pericolosità (in alcuna nazione). Questo soprattutto perché richiedono un livello di dettaglio sulle faglie raramente disponibile (e.g., Pacor et al. 2009, su questa stessa rivista, o Chioccarelli e Iervolino, 2010 e 2012). Questo può essere un limite degli studi di pericolosità basati sulle zone sismogenetiche.

### Ringraziamenti

Lo spunto per sviluppare le riflessioni di cui sopra è nato da una discussione con Gian Michele Calvi, Gaetano Manfredi, Carlo Meletti, e Massimiliano Stucchi. Massimiliano Giorgio ha dato preziosi commenti alla bozza di questa nota. Eugenio Chioccarelli ha operativamente contribuito allo sviluppo degli esempi.

### Bibliografia

- Baker J.W., Cornell C.A. (2006), Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35:1077–1095.
- Barani S., Spallarossa D., Bazzurro P. (2009), Disaggregation of probabilistic ground motion hazard in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99:2638–61.
- Chioccarelli E., De Luca F., Iervolino I. (2012), Preliminary study of Emilia (May 20th 2012) earthquake ground motion records V2.1, disponibile a <http://www.reluis.it>.
- Chioccarelli E., Iervolino I. (2010), Near-Source Seismic Demand and Pulse-Like Records: a Discussion for L'Aquila Earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 39:1039–1062.
- Chioccarelli E., Iervolino I. (2012), Near-source seismic hazard and design scenarios. *Earthquake Engineering and Structural dynamics*. DOI: 10.1002/eqe.2232
- Convertito V., Iervolino I., Herrero A. (2009), The importance of mapping the design earthquake: insights for southern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5), 2979–2991.
- Cornell C.A. (1968), Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of Seismological Society of America*, 58:1583–1606.
- CS.LL.PP. (2008), Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008: Norme tecniche per le costruzioni. In: *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 29, 4 febbraio 2008, Suppl. Ordinario n. 30. Ist. Polig. e Zecca dello Stato S.p.a., Roma.
- Crowley H., Stucchi M., Meletti C., Calvi G.M., Pacor F. (2009), Uno sguardo agli spettri delle NTC08 in relazione al terremoto de L'Aquila, L'Aquila, April 6th 2009, 3:32 am, *Progettazione Sismica*, 3:75-83, IUSS Press, Pavia.
- Esposito S., Iervolino I. (2011), PGA and PGV spatial correlation models based on European multi-event datasets, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101: 2532–2541.
- Iervolino I., Chioccarelli E., Convertito V. (2011), Design earthquakes from multimodal hazard disaggregation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31: 1212–1231
- Iervolino I., Cosenza E., Galasso C. (2009), Spettri, Accelerogrammi e le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni. *Progettazione Sismica*, 1:33-50. IUSS Press, Pavia.
- McGuire R.K. (2004), Seismic hazard and risk analysis. *Earthquake Engineering Research Institute*. MNO-10, 240 p.
- Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba S., et al. (2008), A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics*, 450:85–108.
- Pacor F., Paolucci R., Iervolino I., Nicoletti M., Ameri G., Bindi D., Cauzzi C., Chioccarelli E., D'Alema E., Luzi L., Marzorati S., Massa M., Puglia R. (2009), Caratteristiche dei dati accelerometrici registrati durante la sequenza sismica aquilana. *Progettazione Sismica*, 3:57-68. IUSS Press, Pavia.
- Reiter R. (1990), *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*. Columbia, University Press, New York. ISBN 0-231- 06534-5.
- Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Crowley H., Calvi G.M., Boschi E. (2011), Seismic Hazard Assessment (2003-2009) for the Italian Building Code. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101:1885–1911.