

Quanti terremoti distruttivi abbiamo perso nell'ultimo millennio ? Spunti per la definizione di un approccio storico alla valutazione della completezza.

M. Stucchi, P. Albini

Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, CNR, Milano (e-mail: stucchi@irrs.mi.cnr.it)

1 Introduzione

Le elaborazioni per la valutazione della pericolosità sismica utilizzano ratei di sismicità determinati, per ciascuna classe di magnitudo, dividendo il numero di terremoti per l'intervallo temporale in cui si ritiene che il catalogo sia completo. Tali ratei, così determinati nell'ipotesi che la sismicità sia stazionaria, assumono quindi il ruolo di modelli di ricorrenza dei terremoti e vengono assunti, per definizione, come validi per tutto l'intervallo di tempo di interesse della elaborazione.

La definizione degli intervalli di completezza assume di conseguenza un ruolo cruciale. Se la sismicità è davvero stazionaria in una data area, è sufficiente un intervallo di tempo anche ridotto (ad esempio duecento anni) per determinare i ratei con sufficiente precisione; se non lo è, l'adozione di un intervallo di tempo troppo ridotto può fornire valori poco significativi dei ratei.

La definizione degli intervalli di completezza è stata oggetto di un numero di studi non particolarmente elevato; tutti questi lavori si affidano a procedure che cercano di valutare gli intervalli di completezza guardando all'interno dei dati stessi (es.: Tinti e Mulargia, 1985; Albarello et al., 1995).

Ad esempio, nell'ambito delle elaborazioni per la compilazione delle mappe di pericolosità sismica PS4 del GNDT (Slejko et al., 1998) sono stati adottati 4 set di intervalli di completezza per le quattro regioni evidenziate in Figura 1.

Da qualche anno, viceversa, si sta affermando l'idea che la determinazione della completezza dei dataset di origine storica andrebbe eseguita con approcci di tipo storico, guardando cioè al di fuori dei dati disponibili e cercando di capire quali siano i meccanismi di produzione/conservazione/perdita delle informazioni - prevalentemente di tipo storico ma non solo - che concorrono alla compilazione dei cataloghi. Spunti interessanti in questa direzione potrebbero venire da analisi di completezza dei dati strumentali raccolti da una rete sismica, ovviamente ad una soglia di M più bassa di quella in gioco per terremoti storici.

Un metodo consolidato per definire gli intervalli di completezza secondo un approccio storico non è ancora disponibile. Questo lavoro, tuttavia, vuole proporre un criterio per valutare criticamente l'affidabilità delle stime effettuate secondo gli approcci correnti, utilizzando considerazioni di tipo storico e geologico.

2 I terremoti "persi"

L'approccio che qui si propone si basa sul concetto di terremoti "persi" dal catalogo, secondo il modello di sismicità definito dai ratei, e sulla possibilità di valutare la ragionevolezza del loro numero.

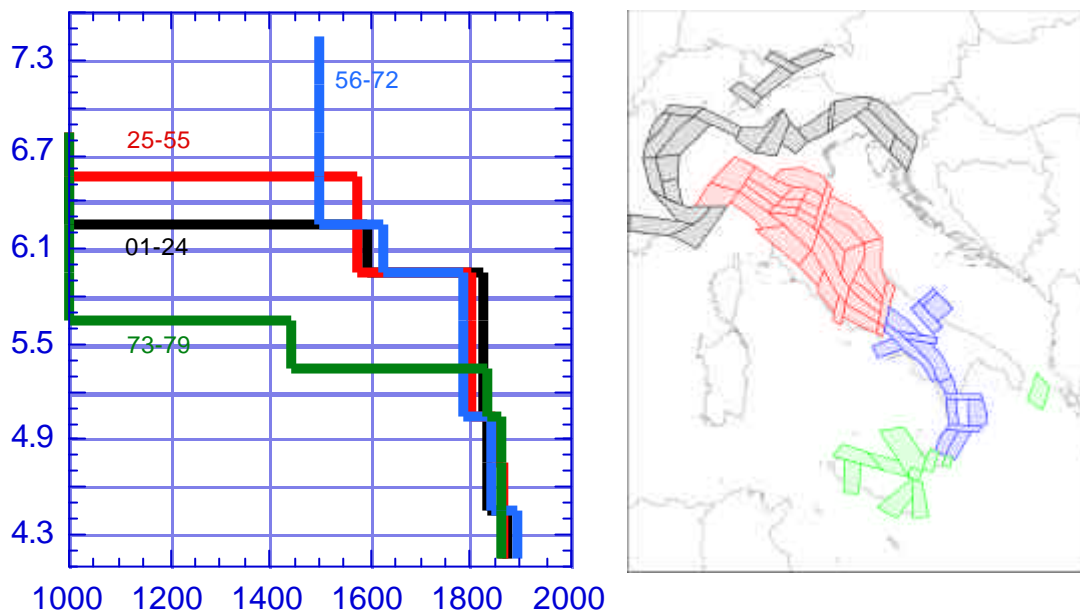


Fig. 1 - Set di intervalli di completezza adottati da PS4 per le 4 regioni a fianco.

Il ricorso alla definizione degli intervalli di completezza è dettato dalla convinzione che il catalogo non sia completo, ossia che un certo numero di terremoti, realmente accaduti, siano da considerare sconosciuti al catalogo, cioè persi. Il numero di questi terremoti è, per definizione, sconosciuto.

Tuttavia, quando si adotta un set di intervalli di completezza e di ratei di sismicità, ovvero dei relativi periodi di ritorno - determinati in un modo che non importa discutere in questa sede - si adotta di fatto un modello secondo il quale un certo numero di terremoti sono da considerare persi.

Questo numero si può determinare confrontando i periodi di ritorno relativi a ciascuna classe di M con l'intervallo coperto dal catalogo (es. 1000 anni); si determina cioè il numero di terremoti che sarebbero dovuti avvenire in mille anni in ciascuna classe di M e lo si pone a confronto con quelli effettivamente presenti in catalogo in quella classe; la differenza fornisce il numero dei terremoti che vanno considerati "persi" secondo il modello di sismicità adottato.

Va osservato che fissare un periodo di ritorno per una data classe di M equivale ad assumere un modello secondo il quale un terremoto di quella classe di M deve avvenire all'interno di ciascun intervallo di tempo pari al periodo di ritorno, non importa quando all'interno di esso.

In sostanza la metodologia consiste, per ciascuna ZS e per ciascuna classe di M:

- i) nel considerare i periodi di ritorno T_{zm} e nel determinare il rapporto

$$R_{zm} = \frac{1000}{T_{zm}}$$

che rappresenta il numero di periodi di ritorno compresi in 1000 anni e quindi il numero di eventi che sarebbero dovuti avvenire in 1000 anni

- ii) nel determinare la differenza $D_{zm} = R_{zm} - E_{zm}$ (dove E_{zm} è il numero di terremoti effettivamente avvenuti), che definisce il numero di terremoti "persi".

Questo concetto è illustrato in Figura 2, che si riferisce alla analisi della ZS n. 4 del modello sismogenetico ZS4 del GNDT (Meletti et al., 2000).

I dati di sismicità (rossi) provengono dal catalogo NT4.1 (Camassi e Stucchi, 1997), mentre gli intervalli di completezza (rettangoli grigi) e i ratei di sismicità (rappresentati sotto forma di periodi di ritorno, barre orizzontali) sono quelli utilizzati per la compilazione della mappa di pericolosità PS4 del GNDT (Slejko et al., 1998). Ratei e periodi di ritorno si riferiscono a classi di M dell'ampiezza di 0,3, centrati attorno al valore di M proposto.

Per le classi di M = 6.4, 6.1, 5.8 e 5.5 i terremoti "persi" risultano rispettivamente 0, 0, 9 e 41.

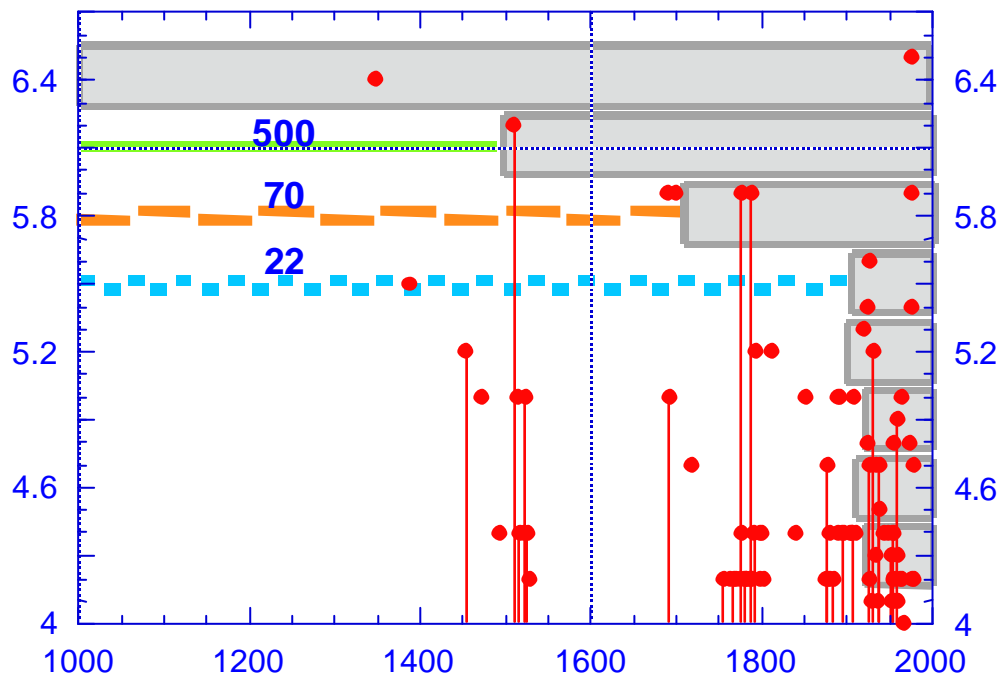


Fig. 2 - Terremoti (da NT4.1), intervalli di completezza e periodi di ritorno (da PS4) per la ZS n. 4 (Friuli) del modello sismogenetico ZS4.

3 I terremoti persi secondo i modelli adottati da PS4

Nel seguito analizzeremo i risultati dell'applicazione alle elaborazioni di PS4 della metodologia descritta più sopra. Prima di entrare nel merito, tuttavia, vogliamo sottolineare due aspetti.

Da un lato, le elaborazioni di PS4 sono state effettuate con i dati migliori e secondo le procedure più affidabili disponibili all'epoca. Come è ovvio, a tutti gli operatori che hanno contribuito a quella vicenda era chiaro che ciascuno degli ingredienti delle valutazioni stesse avrebbe potuto - auspicabilmente - essere migliorato nel futuro. Nello specifico, nonostante gli operatori coinvolti fossero d'accordo sulla necessità che le valutazioni di completezza del catalogo dovessero essere effettuate utilizzando in modo significativo considerazioni di tipo storico, ben pochi spunti in materia erano utilizzabili all'epoca della redazione di PS4.

Dall'altro lato, non si intende qui mettere in discussione le modalità con cui periodi di completezza e ratei di sismicità sono stati valutati per le diverse ZS. Si intende semplicemente rileggere, dal punto di vista della sismicità e sotto il profilo geologico e storico, le scelte adottate; in sostanza, non vengono prodotti dati nuovi, ma vengono semplicemente rilette dati già disponibili nella fase di produzione di PS4, anche se non nello stesso formato presentato in questo lavoro.

Ciò premesso, ripetendo per tutte le ZS di ZS4 il calcolo illustrato in precedenza si ottengono i risultati presentati in Tab. 1. L'analisi, limitata ai terremoti con $M \geq 5.8$, in quanto questa classe di M fornisce il maggior contributo in termini di hazard, è stata effettuata per l'intervallo di catalogo 1000-1980 e per i due sub-intervalli 1000-1399 e 1400-1980. Per comodità viene riportato anche il numero di terremoti presenti nel catalogo NT4.1.

	1000 - 1980		1000 - 1399		1400 - 1980	
M	noti	persi	noti	persi	noti	persi
³ 7.0	14	13	7	10	7	3
6.7	11	1	3	1	8	0
6.4	28	16	7	8	7	8
6.1	32	45	4	24	28	21
5.8	51	98	9	51	42	47
tot.	136	173	30	94	106	79

Tab. 1 - Numero di terremoti conosciuti dal catalogo NT4.1 e numero di terremoti "persi" nelle classi di $M \geq 5.8$, secondo i ratei di sismicità adottati da PS4.

Questi risultati richiedono qualche riflessione, in quanto il fatto che il numero totale (173) di terremoti persi secondo il modello adottato sia superiore a quello dei terremoti presenti in catalogo (136) non può non sorprendere. In sostanza, i modelli di sismicità adottati da PS4 implicano che il catalogo conosca meno della metà dei terremoti realmente accaduti con $M \geq 5.8$; questo sembra poco credibile in un paese che conserva una notevole memoria storica, che ha una lunga e consolidata tradizione di raccolta di notizie e di compilazione di repertori di terremoti e che ha visto un notevole sforzo di ricerche di sismologia storica negli ultimi vent'anni.

I terremoti persi non si distribuiscono in maniera omogenea fra le ZS. La Figura 3 mostra con chiarezza che alcune ZS avrebbero perso un numero di terremoti molto elevato, a fronte di altre che presentano perdite più contenute o addirittura nulle.

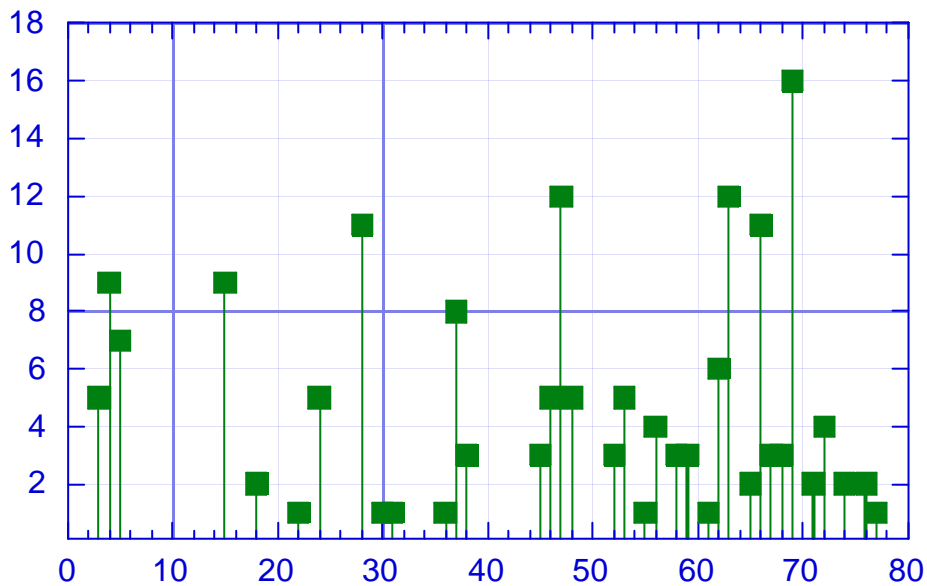


Fig. 3 - Distribuzione di terremoti persi, secondo i ratei di PS4, nelle varie ZS.

In Figura 4 i terremoti persi sono plottati all'interno delle ZS cui si riferiscono: ovviamente la loro posizione è convenzionale, l'unico vincolo essendo costituito dalla appartenenza alla Zs stessa.

Come si può vedere, i terremoti persi si addensano principalmente in alcune ZS, la maggior parte delle quali hanno la caratteristica di essere molto strette e/o dotate di un evento forte recente. Questo può significare che la determinazione dei ratei di sismicità, in queste ZS, è stata molto influenzata dai terremoti recenti.

Nel seguito sono state eseguite delle analisi per verificare quanto questi risultati dipendano strettamente dalle modalità adottate da PS4 (Slejko et al., 1998), esplorando ad esempio i ratei di sismicità adottati nei calcoli di pericolosità PS99 (Albarello et al., 2000).

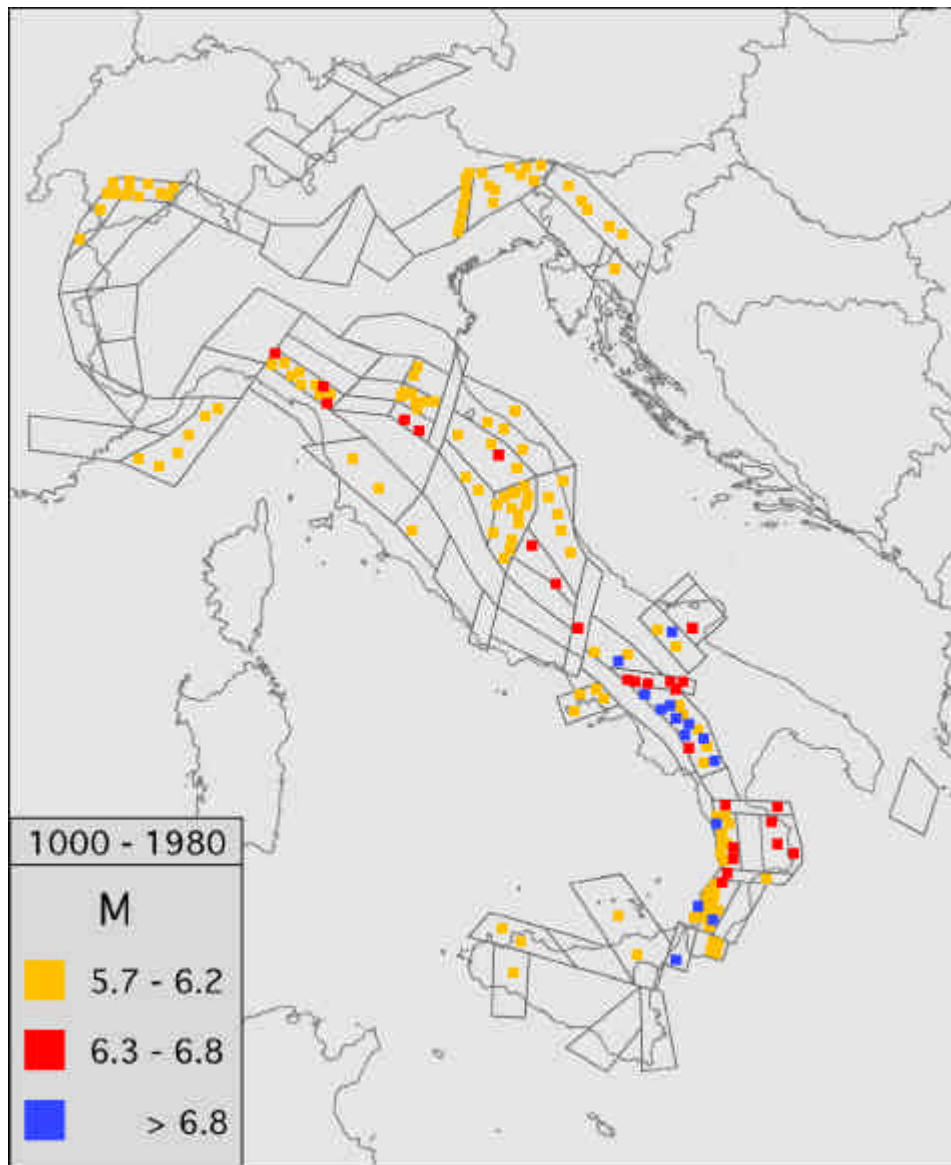


Fig. 4 - Distribuzione dei terremoti persi, secondo i ratei di PS4, nelle relative ZS. La localizzazione dei terremoti all'interno della relativa ZS è fittizia.

La differenza tra PS4 e PS99 risiede nel fatto che, per costruire i ratei, per PS4 si utilizzano solo parti del catalogo (per ciascuna classe di magnitudo dall'anno di inizio della completezza fino alla fine del catalogo); i ratei calcolati in PS99 sono determinati utilizzando la funzione di completezza per pesare ogni singolo terremoto presente nel catalogo. In pratica vengono utilizzati, con pesi diversi, tutti i terremoti, mentre in PS4 consistenti parti del catalogo restano inutilizzate.

I risultati portano, abbastanza sorprendentemente, ad un numero complessivo di terremoti persi con $M \geq 5.8$ pari a 203, superiore quindi a quello di PS4.

4 Sostenibilità dei risultati

Il numero globale di terremoti che i ratei di sismicità presuppongono (eventi in catalogo + eventi persi) può essere valutato alla luce di considerazioni di tipo geologico. Un caso emblematico è costituito dalla ZS 63 (Irpinia), nella quale la situazione dei terremoti presenti in catalogo e persi sarebbe la seguente:

M	noti	persi
5.8	2	3
6.1	1	2
6.4	2	0
6.7	0	0
7.0	3	7
tot.	8	12

Dato che i terremoti con $M \geq 6.8$ hanno in Appennino periodi di ritorno di circa 1500-2000 anni (Pantosti et al., 1993; Pantosti et al., 1996; Galadini e Galli, 1999), possiamo concludere che i 3 eventi noti + i 7 persi nella classe $M = 7.0$, per essere avvenuti in 1000 anni, avrebbero dovuto essere generati da 10 sorgenti indipendenti della lunghezza di più di 40 km ciascuna (Fig. 5), il che appare abbastanza irrealistico nello spazio coperto dalla ZS n. 63.

Considerazioni analoghe possono essere svolte per altre ZS. In definitiva, alcuni ratei di sismicità adottati da PS4 per alcune ZS appaiono difficilmente compatibili con le dimensioni e con le caratteristiche sismogenetiche delle ZS stesse, in quanto richiedono un numero di sorgenti molto più elevato di quelle ipotizzabili nello spazio a disposizione, oppure dei valori di slip-rate molto più elevati di quelli medi italiani.

Il numero di terremoti persi può essere valutato anche alla luce di considerazioni di tipo storico. Sotto questo profilo, infatti, ci si può chiedere se è realistico che il catalogo conosca meno della metà (136) del totale dei terremoti distruttivi (136+173) che sarebbero avvenuti nell'ultimo millennio. Tra l'altro, osservando che i dati degli ultimi due secoli del millennio si considerano sostanzialmente completi, il divario fra terremoti conosciuti e persi si farebbe ancora più elevato.

E' difficile rispondere con sicurezza, visto che si tratta di ragionare attorno a dati che sono, per l'appunto, mancanti. Certamente il catalogo non è completo. Oltre alle perdite documentarie, ci sono situazioni in cui gli eventi non sono stati registrati: ad esempio in zone a bassa popolazione e bassa produzione di documenti, oppure - anche in tempi recenti - nel caso di terremoti forti offshore (superficiali) che hanno prodotto effetti modesti in terra.

Tuttavia, le perdite non sono da considerarsi dei buchi neri, le cui dimensioni possano essere grandi a piacere. Di fatto, un terremoto distruttivo occupa uno spazio

non piccolo, sia nello spazio (dimensioni della sorgente e dell'area di danneggiamento), sia nel tempo (durata degli effetti). Di conseguenza, così come non possiamo avere un numero elevato di terremoti in una data ZS, non possiamo nemmeno pensare che il numero di terremoti sfuggiti alla registrazione nelle fonti - e/o le relative fonti andate perdute - sia grande a piacere.

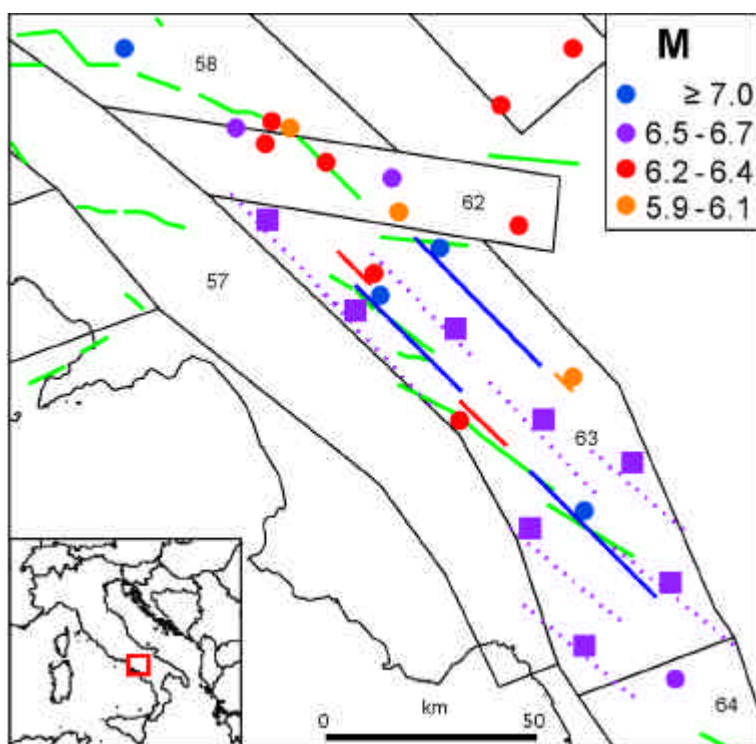


Fig. 5 - Terremoti noti (cerchi) e persi (quadrati), tracce in superficie delle relative sorgenti ipotizzate (tratto pieno: terremoti noti; tratteggio: terremoti persi) e delle faglie attive note (in verde) nella ZS n. 63 (Irpinia).

In sostanza, mentre da un lato è credibile che i dati relativi ai terremoti medio-bassi siano molto o del tutto lacunosi per gran parte del millennio, dall'altro è possibile proporre qualche considerazione generale atta a fornire qualche limite superiore al numero di terremoti distruttivi persi.

Ad esempio in Italia, negli ultimi vent'anni, sono state svolte numerose ricerche di sismologia storica, che hanno portato a notevoli risultati. Per i terremoti distruttivi ($M \geq 5.8$) la tendenza generale è stata sia di cancellare dal catalogo diversi terremoti provati falsi, sia di ridimensionarne altrettanti, facendoli uscire dalla classe in questione per andare nelle classi energetiche sottostanti. Viceversa, solo in pochi casi si sono "scoperti" o rivalutati terremoti di questa classe.

E' pur vero che le ricerche in questione in maggioranza hanno avuto come obiettivo quello di aggiornare le conoscenze su terremoti già noti, e che le ricerche per "scoprire" terremoti nuovi dovrebbero seguire altre linee. Pur tuttavia sembra

difficile pensare ad una perdita così massiccia di terremoti distruttivi, ovvero di quelli che solitamente lasciano una traccia consistente nella vita sociale e, di conseguenza, anche nelle fonti; terremoti che, in generale, vengono registrati da diverse fonti, diminuendo quindi il rischio di perdita totale della loro memoria.

5 Conclusioni

Il numero di terremoti persi secondo i ratei adottati da PS4 sembra elevato, sotto l'aspetto sia geologico, sia storico. La ragione principale può essere individuata nella scelta degli intervalli di completezza, che tendono a basarsi molto su cluster di sismicità avvenuti nei secoli più recenti e a considerare come incomplete porzioni di catalogo che magari si riferiscono soltanto a periodi di quiescenza.

A titolo sperimentale si è provato a proporre intervalli di completezza determinati a partire da considerazioni di tipo storico. La Figura 6 propone il confronto fra gli intervalli di completezza usati da PS4 e un nuovo set proposto su base storica (HCA), ancora per la ZS n. 4. Per le classi di $M \geq 5.8$ sono anche riportati i numeri dei terremoti persi a partire dai rispettivi set di ratei. La soluzione "storica" sembra più realistica. La Figura 7 propone invece, per la stessa ZS, i valori di PGA determinati da PS4 e quelli che si otterrebbero adottando gli intervalli di completezza determinati su base storica. Le differenze sono dell'ordine di 0.08 g, quindi abbastanza significative.

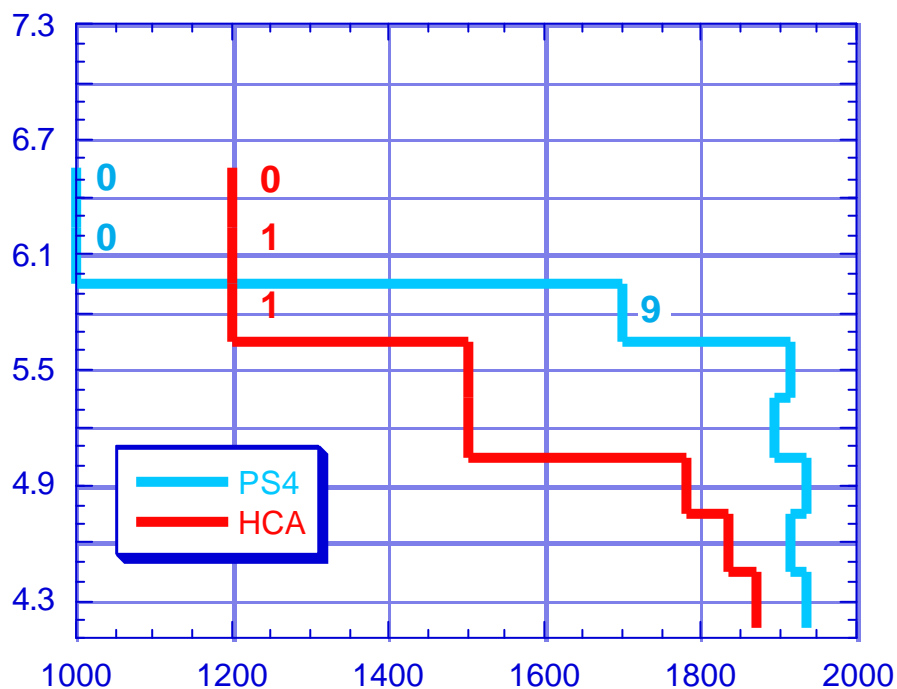


Fig. 6 - Confronto fra gli intervalli di completezza usati da PS4 e quelli determinati su base storica (HCA) per la ZS n. 4. Sono anche indicati i terremoti persi secondo i due modelli.

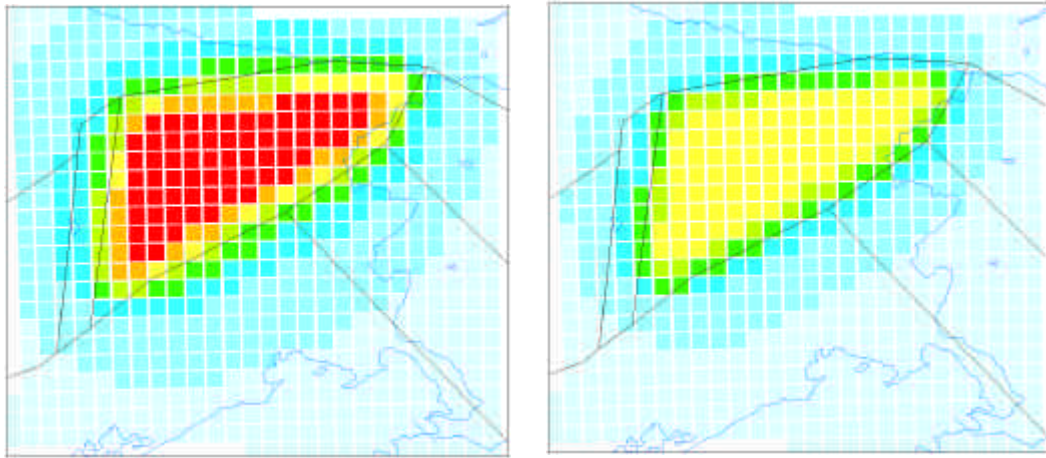


Fig. 7 - Confronto fra i valori di PGA (perido di ritorno 475 anni) ottenuti dai due set di intervalli di completezza illustrati in Fig. 6 (sinistra: PS4; destra: base storica).

L'adozione di criteri di questo tipo porterebbe ad un numero totale di terremoti distruttivi persi nell'ordine di 30-35. Questa cifra sembra abbastanza accettabile; infatti, anche se non si hanno ancora sufficienti conoscenze per fissare dei limiti superiori, sotto il profilo storico sembra possibile ipotizzare - in via del tutto preliminare - che, a partire dal 1200, possano mancare all'appello non più di 15-20 terremoti distruttivi, distribuiti prevalentemente nell'Italia Centro-meridionale e nell'intervallo 1200-1600. Più difficili sono invece le valutazioni riguardanti il periodo 1000-1200, dove dovrebbero nascondersi i rimanenti 15 eventi.

Questo lavoro è stato scritto utilizzando idee e materiali che provengono da una ricerca intrapresa con Alessandro Rebez, cui vanno i nostri sinceri ringraziamenti.

Riferimenti

- Albarelo D., Bosi V., Bramerini F., Lucantoni A., Naso G., Peruzza L., Rebez A., Sabetta F., Slejko D., (2000): Pericolosità sismica del territorio nazionale: carte di consenso GNDT e SSN. In questo volume.
- Albarelo D., Rebez A., Slejko D. (1995): Caratterizzazione della sismicità nel calcolo della pericolosità sismica. *Atti del 14° Convegno Nazionale GNGTS*, Esagrafica, Roma, 551 - 554.
- Camassi R., Stucchi M. (1997): NT4.1.1, un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno. *GNDT*, Milano, 95 pp., <http://emidius.itim.mi.cnr.it/NT>.

- Galadini F., Galli P. (1999): The Holocene paleoearthquakes on the 1915 Avezzano earthquake faults (Central Italy): implications for active tectonics in Central Apennines. *Tectonophysics*, **308**, 143-170.
- Meletti C., Patacca E., Scandone P. (2000): Construction of a seismotectonic model: the case of Italy. *Pageoph*, **157**, 11-35.
- Pantosti D., Schwartz D.P., Valensise G. (1993): Paleoseismology along the 1980 surface rupture of the Irpinia fault: Implications for earthquake recurrence in the Southern Apennines, Italy. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 6561-6577.
- Pantosti D., D'Addezio G., Cinti F.R., (1996): Paleoseismicity of the Ovindoli-Pezza fault, central Apennines, Italy: a history including a large, previously unrecorded earthquake in the Middle Ages (860-1300 A.D.). *Journal of Geophysical Research*, **101**, 5937-5959.
- Slejko D., Peruzza L., Rebez A. (1998): Seismic hazard maps of Italy. *Ann. di Geof.*, **41**, 183-214.
- Tinti S., Mulargia F. (1985): Completeness analysis of a Seismic Catalogue. *Ann. Geophys.*, **3**, 407-414.