

# ANALISI PROBABILISTICA *FAULT-BASED* DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA VOLTA ALLA DEFINIZIONE DI INPUT SISMICI: OSSERVAZIONI DOPO LA SEQUENZA SISMICA DEL 2016 IN ITALIA CENTRALE

A. Valentini<sup>1</sup>, B. Pace<sup>1</sup>, P. Boncio<sup>1</sup>, F. Visini<sup>2</sup>, A. Pagliaroli<sup>3</sup>, F. Pergalani<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara, CRUST-DiSPUter Department, Italy

<sup>2</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Pisa, Italy

<sup>3</sup> Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara, InGeo Department, Italy

<sup>4</sup> Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Italy

**Introduzione.** Le scosse principali di due importanti sequenze sismiche italiane, L'Aquila 2009 e Italia Centrale 2016, hanno distrutto diversi comuni del territorio, come L'Aquila, Amatrice, Poggio Pienze, Accumuli, Pescara del Tronto e Camerino. In aggiunta alle perdite economiche, questi eventi hanno causato anche centinaia di vittime (più di 600 negli ultimi 8 anni). Queste perdite potrebbero essere ridotte grazie all'utilizzo di strumenti che operino a diversa scala, da quella del singolo edificio (norme tecniche e programmi di riduzione della vulnerabilità sismica delle strutture) a quella urbana (Microzonazione Sismica). Questi strumenti hanno bisogno di una valutazione quantitativa degli effetti di sito, che può essere fatta grazie ad analisi numeriche che richiedono accelerogrammi reali come dato d'input. Le registrazioni reali devono essere selezionate in modo tale da essere coerenti con lo spettro di riferimento calcolato in condizioni di sito roccioso piano. In questo lavoro abbiamo condotto un'analisi probabilistica *fault-based* della pericolosità sismica per quattro comuni presenti in Italia centrale (Perugia, Norcia, L'Aquila e Sulmona), in modo tale da ottenere spettri a probabilità uniforme (UHS) da utilizzare come spettri di riferimento nella selezione di accelerogrammi reali spettro-compatibili.

**Analisi probabilistica della pericolosità sismica.** Quest'analisi è stata eseguita utilizzando due modelli di sismicità: il primo utilizza le faglie attive (*fault-based*), mentre il secondo utilizza il classico approccio *smoothed* (Frankel, 1995), con il catalogo storico (CPTI15; Rovida *et al.*, 2016) utilizzato per calcolare i tassi di sismicità (Fig. 1). Questi due modelli di sismicità sono alla fine combinati insieme in un singolo modello seguendo l'approccio proposto da Valentini *et al.* (2017). La geometria delle due sorgenti coinvolte durante la sequenza sismica del 2016 (Bove-Vettore e Gorzano) è stata rivista e modificata grazie ai dati geologici e sismologici collezionati dopo la sequenza (Chiaraluce *et al.*, 2017; Civico *et al.*, 2018). Utilizzando i dati geometrici e cinematici di ogni sorgente, abbiamo calcolato la massima magnitudo attesa e la distribuzione magnitudo-frequenza di ogni sorgente. Quest'ultima è stata valutata utilizzando un modello *time-dependent* che segue una distribuzione Brownian Passage Time (BPT; Matthews, *et al.*, 2002). Una volta calcolati i tassi di sismicità attesi per tutta la regione oggetto di studio e definito il nostro modello finale di sismicità, abbiamo utilizzato il codice OpenQuake (Pagani *et al.*, 2014) per eseguire le stime probabilistiche di pericolosità, per il calcolo degli UHS, e per le analisi di disaggregazione. Le relazioni empiriche di attenuazione utilizzate per svolgere questi calcoli sono state: (i) Bindi *et al.*, 2011; (ii) Cauzzi *et al.*, 2015; e (iii) Bindi *et al.*, 2014, combinate in albero logico con i pesi rispettivamente pari a 0.39, 0.27 e 0.34. La scelta di queste relazioni è coerente con la selezione e il *ranking* delle relazioni empiriche per la nuova mappa di pericolosità italiana (Lanzano *et al.*, 2017). L'analisi di disaggregazione è stata eseguita per individuare le sorgenti che maggiormente contribuiscono alla pericolosità sismica per quattro comuni in Italia centrale, in modo tale da individuare le coppie magnitudo-distanza (M-R) utili per la scelta degli accelerogrammi reali spettro-compatibili (Tab. 1).

**Definizione degli input sismici sismo- e spettro- compatibili.** L'UHS calcolato per il 10% di probabilità di eccedenza nei prossimi 50 anni è stato utilizzato come spettro obiettivo per la selezione di sette accelerogrammi reali per i quattro siti di indagine. La selezione degli accelerogrammi è stata effettuata su banche date mondiali ed europee (PEER, <https://ngawest2.berkeley.edu/>; ESM, <http://esm.mi.ingv.it>) utilizzando le coppie M-R ottenute dalle analisi di disaggregazione (Tab. 1). La scelta dei sette accelerogrammi spettro-compatibili è stata

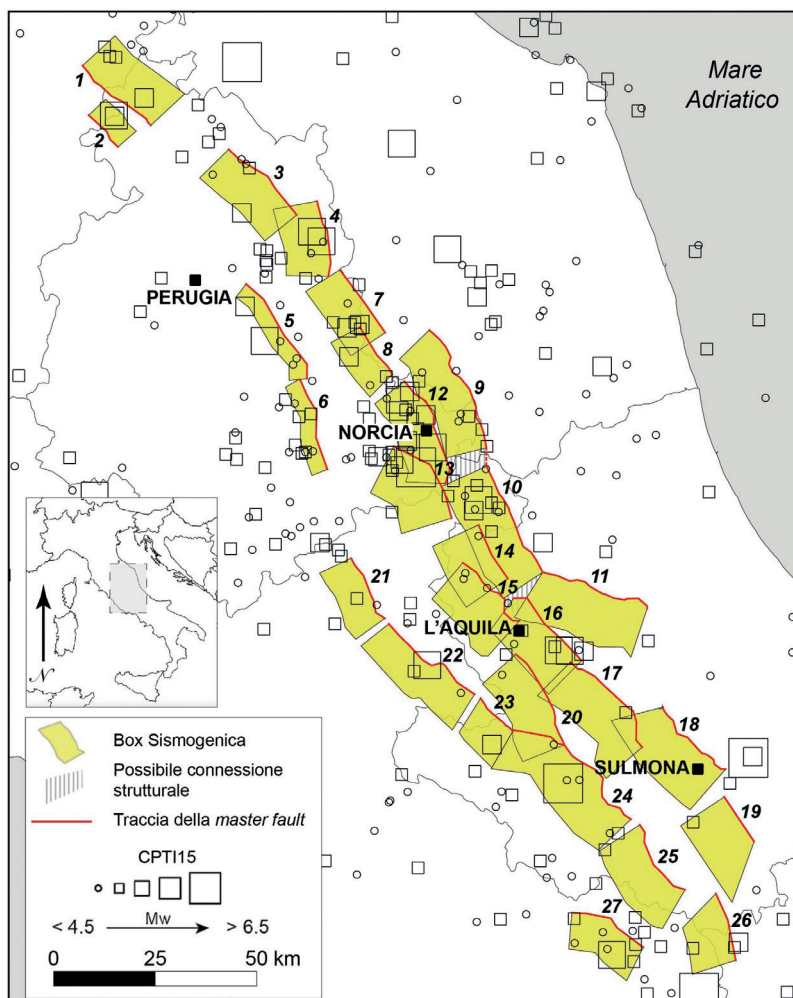


Fig. 1 - Mappa dell'area studiata dove sono riportate tutte le sorgenti sismogeniche individuali utilizzate in questo lavoro, il catalogo storico dei terremoti (CPTI15) e l'ubicazione dei quattro siti (Perugia, Norcia, L'Aquila e Sulmona) dove sono state eseguite le analisi di disaggregazione e le valutazioni di pericolosità sismica.

Tab. 1 - Coppie magnitudo (M) – distanza (R) utilizzate per la selezione degli accelerogrammi reali spettro-compatibili.

Sito	Latitudine	Longitudine	M min	M max	Rmin (km)	Rmax (km)
L'Aquila	42.350	13.390	6.1	7.0	9.5	29
Norcia	42.790	13.100	5.3	6.6	5.8	11.7
Perugia	43.110	12.390	5.55	5.95	5	15
Sulmona	42.050	13.930	6.1	6.9	7.8	20.5

eseguita secondo la procedura proposta da Pagliaroli e Lanzo (2008), automatizzabile mediante il software *In-Spector* (Acunzo *et al.*, 2014). Oltre alle coppie M-R, sono stati considerati anche i seguenti criteri: i) preferenza di una componente della stessa stazione di registrazione, ii) preferenza di una sola registrazione dello stesso evento, iii) preferenza di eventi coerenti con il modello sismotettonico estensionale alla base della pericolosità, iv) preferenza di registrazioni

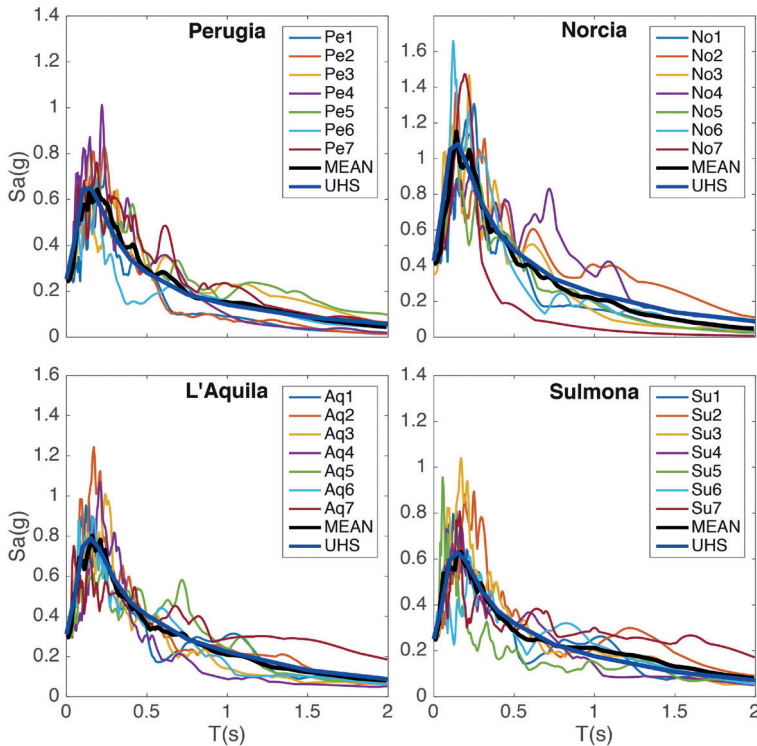


Fig. 2 - Spettri di risposta degli accelerogrammi reali selezionati per i quattro siti, dove  $T$  è il periodo in secondi e  $Sa$  è l'accelerazione spettrale in g. La linea nera rappresenta la media dei sette spettri, mentre quella blu rappresenta l'UHS utilizzato come spettro obiettivo.

*pulse-like*, data la vicinanza dei siti alle sorgenti. Questi criteri ci hanno permesso di scegliere sette accelerogrammi reali per ogni sito d'indagine, spettro-compatibili in media con lo spettro obiettivo (Fig. 2).

**Discussioni.** Per discutere ed evidenziare le differenze tra il nostro approccio con quello che è alla base della normativa sismica italiana (MPS04; Stucchi *et al.*, 2011), abbiamo confrontato gli UHS calcolati per il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni ottenuti con i due diversi approcci (Fig. 3a). Per valutare l'impatto delle conoscenze geologiche e paleosismologiche acquisite dopo la sequenza sismica del 2016, abbiamo inoltre confrontato la pericolosità al sito di Norcia, tenendo in considerazione le variazioni dei parametri geometrici e cinematici delle sorgenti coinvolte nella sequenza. La Fig. 3a ci mostra come con il nostro approccio otteniamo UHS sensibilmente più gravosi, specie per periodi  $<0.3s$ , rispetto a quelli ottenuti dalla mappa sismica nazionale. Queste differenze sono dovute essenzialmente a due motivi: i) le diverse relazioni empiriche di attenuazione utilizzate, e ii) i differenti approcci e dati di input utilizzati per condurre le analisi. Meletti *et al.* (2016) mostrano come con le recenti relazioni di attenuazione si ha una stima della pericolosità maggiore, per periodi di accelerazione spettrale pari a  $0.3s$ , rispetto a quella che si ottiene con quelle utilizzate nel modello nazionale (MPS04). Le differenze inoltre sono dovute anche ai diversi cataloghi utilizzati (CPTI04 in MPS04, CPTI15 più faglie in questo lavoro) e ai diversi approcci. La mappa nazionale, infatti, è ottenuta seguendo il classico approccio Cornell (1968), dove i tassi di sismicità sono spalmati su ampie zone sismogeniche. Non a caso, gli UHS provenienti da MPS04 per i comuni di L'Aquila, Sulmona e Norcia sono molto simili tra di loro perché questi tre comuni ricadono all'interno della stessa zona sismogenica. Con l'approccio utilizzato in questo lavoro, invece, riusciamo a modellare e a discriminare una differente distribuzione spaziale e un diverso *pattern* delle stime

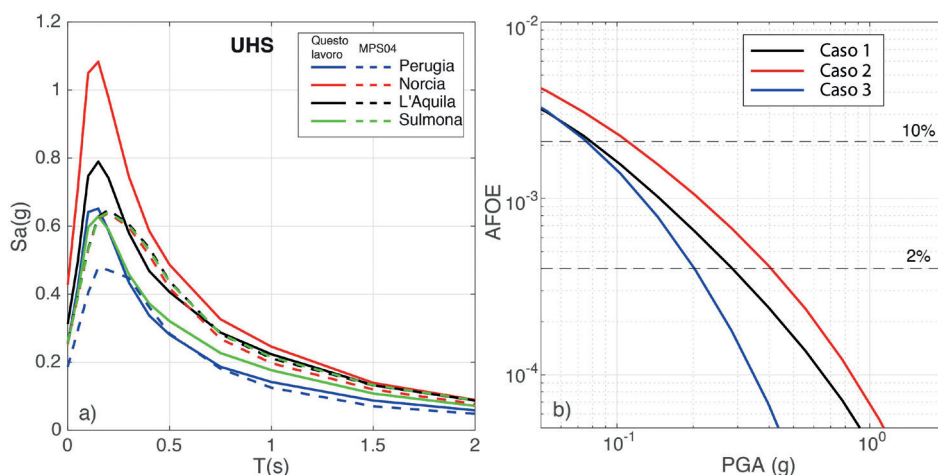


Fig. 3 - a) UHS calcolati per i quattro siti seguendo l'approccio proposto in questo lavoro (linee intere) e gli UHS calcolati da MPS04 (linee tratteggiate). In ascissa i valori del periodo ( $T$ ) in secondi e in ordinata i valori di accelerazione spettrale ( $S_a$ ) in g. b) Curve di pericolosità calcolate a Norcia tenendo conto dei tre casi descritti nel testo. Le curve sono state calcolate tenendo conto solo delle sorgenti riattivate durante la sequenza sismica del 2016 (Bove-Vettore e Gorzano). Le linee orizzontali tratteggiate rappresentano il 10 e 2% di probabilità di eccedenza nei prossimi 50 anni. In ordinata sono riportati i valori di frequenza annuale di eccedenza (AFOE) e in ascissa i valori di accelerazione orizzontale di picco (GA) in g.

di pericolosità. La Fig. 3b ci mostra le curve di pericolosità per il sito di Norcia, calcolate per tre diversi casi: 1) prima della sequenza sismica, 2) prima della sequenza sismica ma con le nuove conoscenze, e 3) dopo la sequenza sismica. Essendo questo un approccio *time-dependent*, un ruolo chiave è giocato anche dal tempo trascorso dall'ultimo evento. Nei primi due casi questo parametro è uguale a  $\sim 1700$  anni, mentre nell'ultimo caso è uguale a 2 anni. Inoltre, nel secondo e terzo caso, abbiamo utilizzato i nuovi dati paleosismologici raccolti dopo la sequenza sismica (Galli *et al.*, 2017). Questi sono stati utilizzati per ricalcolare il tempo medio di ricorrenza e il coefficiente di variazione (CoV) della sorgente sismogenica Bove-Vettore. Il CoV è uguale a: 1.24 (caso 1), 0.33 (caso 2), e 0.39 (caso 3). Il valore del CoV in un approccio *time-dependent* ha un impatto importante poiché questo valore guida le curve di distribuzione e di conseguenza si hanno diverse probabilità di occorrenza. La Figura 3b, dove sono riportate le curve di hazard calcolate nei tre casi, mostra chiaramente come una migliore conoscenza della sorgente, in special modo nei dati paleosismologici, possa avere un importante impatto nelle stime della pericolosità.

**Conclusioni.** Un approccio *fault-based* e *time-dependent* può dare una visione migliore, in termini di risoluzione spaziale ed estensione della finestra temporale di osservazione utile per la ricorrenza degli eventi di magnitudo maggiore, rispetto a un approccio *time-independent* e basato sulla zonazione sismogenica. Sempre in questo tipo di approccio inoltre, le conoscenze delle sorgenti sismogeniche possono avere un impatto importante sui risultati finali e devono essere prese attentamente in considerazione in modo tale da evitare delle stime di pericolosità sbagliate. Si ritiene che l'approccio qui presentato, nonostante i limiti e le incertezze, sia da raccomandare per la selezione di accelerogrammi reali spettro-compatibili finalizzata a simulazioni numeriche, in regioni dove le conoscenze sulle faglie attive siano abbastanza estese.

## Bibliografia

Acunzo, G., A. Pagliaroli, & G. Scasserra. (2014). In-Spector: un software di supporto alla selezione di accelerogrammi naturali spettrocompatibili per analisi geotecniche e strutturali. *NGGTS, volume 2*, 107-114, ISBN: 978-88-940442-2-5.

- Bindi, D., F. Pacor, L. Luzi, R. Puglia, M. Massa, G. Ameri, & R. Paolucci (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bull Earthquake Eng*, 9(6), 1899–1920, doi:10.1007/s10518-011-9313-z.
- Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., & Augliera, P. (2014). Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5 %- damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset (Vol. 12, p. 391, 2014). *B. Earthq. Eng.*, 12, 431–448, 2014.
- Cauzzi, C., E. Faccioli, M. Vanini, & A. Bianchini (2015). Updated predictive equations for broad-band (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bull Earthquake Eng*, doi:10.1007/s10518-014-9685-y.
- Chiaraluce, L., Di Stefano, R., Tinti, E., Scognamiglio, L., Michele, M., Casarotti, E., et al. (2017). The 2016 Central Italy Seismic Sequence: A First Look at the Mainshocks, Aftershocks, and Source Models. *Seismological Research Letters*, 88(3), 757–771. <https://doi.org/10.1785/0220160221>
- Civico, R., Pucci, S., Villani, F., Pizzimenti, L., De Martini, P. M., Nappi R., & the Open EMERGEO Working Group. (2018) Surface ruptures following the 30 October 2016  $M_w$  6.5 Norcia earthquake, central Italy. *Journal of Maps*, 14:2, 151-160, DOI: 10.1080/17445647.2018.1441756
- Cornell, C.A. (1968) Engineering Seismic Risk Analysis. *Bull Seism Soc Am* 58, No. 5, 1583-1606.
- Frankel A.; 1995: *Simulating strong motions of large earthquakes using recordings of small earthquakes: the Loma Prieta mainshock as a test case*. Bulletin of the Seismological Society of America, **85**(4), 1144–1160.
- Galli, P., Galderisi, A., Peronace, E., Giaccio, B., Hajadas, I., Messina, P., & Polpetta, F. (2017). Quante volte figliola? Confessioni sibylline di una giovane faglia. *GNGTS, volume 36*, 41-45, ISBN: 978-88-940442-8-7
- Lanzano, G., Luzi, L., Rotondi, R., Varini, E., & Marzocchi, W. (2017). Selection and ranking of the ground motion prediction equations for the new Italian hazard map (MPS16). *GNGTS, volume 36*, 282-285, ISBN: 978-88-940442-8-7
- Matthews, M. V., Ellsworth, W. L., & Reasenber, P. A. (2002). A Brownian model for recurrent earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, 2233–2250.
- Meletti, C., Visini, F., D'Amico, V., & Rovida, A. (2016). Seismic hazard in Central Italy and the 2016 Amatrice earthquake. *Annals of Geophysics*, DOI: 10.4401/AG-7248.
- Pagani, M., D. Monelli, G. Weatherill, L. Danciu, H. Crowley, V. Silva, P. Henshaw, L. Butler, M. Nastasi, L. Panzeri, M. Simionato, and D. Vigano (2014). OpenQuake-engine: An open hazard (and risk) software for the Global Earthquake Model, *Seismological Research Letters*, 85(3): 1-13.
- Pagliaroli, A., & Lanzo, G. (2008). Selection of real accelerograms for the seismic response analysis of the historical town of Nicastro (Southern Italy) during the March 1638 Calabria earthquake. *Engineering Structures*, 30(8), 2211–2222. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.06.002>
- Rovida, A., Locati, M., Camassi, R., Lolli, B., & Gasperini P. (2016). CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>
- 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(4), 1885–1911. <https://doi.org/10.1785/0120100130>
- Valentini, A., Visini, F., & Pace, B. (2017). Integrating faults and past earthquakes into a probabilistic seismic hazard model for peninsular Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(11), 2017–2039. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2017-2017>

## COMPARISON OF TWO CLUSTERING ALGORITHMS FOR THE CHARACTERIZATION OF EARTHQUAKE CLUSTERS

E. Varini<sup>1</sup>, A. Peresan<sup>2</sup>, R. Rotondi<sup>1</sup>, S. Gentili<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche "Enrico Magenes", CNR, Milano, Italy

<sup>2</sup> National Institute of Oceanography and Experimental Geophysics. CRS-OGS, Udine, Italy

Earthquake clusters are prominent in the spatio-temporal distribution of any seismic catalog; they commonly show different patterns and complexities that are deemed to be strictly inherent to the physical properties of the seismic region. Identification and characterization of earthquake clusters are challenging and important tasks in order to disclose the underlying