

## **ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA DEI PENDII MEDIANTE UN APPROCCIO PROBABILISTICO**

Fabio Rollo

*Sapienza Università di Roma*

*fabio.rollo@uniroma1.it*

Sebastiano Rampello

*Sapienza Università di Roma*

*sebastiano.rampello@uniroma1.it*

### **Sommario**

Questo lavoro è finalizzato alla valutazione della prestazione sismica dei pendii mediante un approccio probabilistico a partire dal database sismico italiano aggiornato. Il principale vantaggio di questo approccio è quello di fornire un utile strumento di analisi dei pendii in condizioni sismiche in grado di portare in conto la variabilità dell'azione sismica sul territorio nazionale, nonché le diverse caratteristiche dei pendii. I risultati sono presentati in termini di curve di pericolosità, che mostrano la frequenza annua di superamento associata agli spostamenti permanenti indotti dal sisma nel pendio, a partire da un'analisi di pericolosità sismica di base e mediante una serie di relazioni semi-empiriche che legano gli spostamenti permanenti dei pendii a uno o più parametri sintetici del moto sismico. La procedura è stata implementata su scala regionale per produrre mappe di pericolosità per la regione dell'Irpinia, nel Sud Italia, caratterizzata da una severa sismicità. Le mappe di pericolosità ottenute rappresentano uno strumento utile per una valutazione speditiva della pericolosità sismica associata ai pendii e consentono una pianificazione su base regionale atta a identificare e monitorare le zone potenzialmente suscettibili di instabilità dei versanti a seguito di eventi sismici.

### **1. Introduzione**

I pendii naturali manifestano spesso instabilità a seguito o in concomitanza di un evento sismico, causando spesso ingenti danni a persone e cose. Per questo motivo negli ultimi anni sono stati condotti molti studi da parte della comunità scientifica geotecnica finalizzati a mitigare e prevenire tali catastrofici eventi.

La prestazione sismica di un pendio può essere descritta attraverso gli spostamenti permanenti scontati dallo stesso alla fine del terremoto, che possono essere valutati mediante sofisticati metodi di analisi (elementi finiti, elementi discreti, Material Point Method). Tuttavia, questi approcci richiedono caratterizzazioni geotecniche accurate e sono difficilmente applicabili per valutazioni su estese porzioni di territorio. In tal senso, il metodo degli spostamenti di Newmark (Newmark 1965), in cui il pendio è assimilato a un blocco rigido, rappresenta un buon compromesso tra accuratezza e semplicità di calcolo.

A partire dall'approccio alla Newmark, in letteratura sono state proposte varie relazioni semi-empiriche tra gli spostamenti permanenti del pendio e uno o più parametri sintetici del moto sismico; in esse le caratteristiche del pendio sono descritte sinteticamente dal coefficiente sismico critico (Jibson, 2007; Saygili & Rathje, 2008; Song *et al.*, 2017; Bray & Macedo, 2019; Cho & Rathje, 2020). Queste relazioni semi-empiriche possono essere combinate con un approccio probabilistico al fine di valutare la pericolosità sismica di un pendio associata a un determinato livello di spostamento (Rathje & Saygili, 2008; Bradley, 2012; Du & Wang, 2016; Cho & Rathje, 2020). I risultati dell'approccio

probabilistico sono illustrati sia in termini di curve di pericolosità che forniscono la frequenza media annua di superamento  $\lambda_d$  (o il periodo di ritorno  $T_r=1/\lambda_d$ ) per diversi livelli di spostamento di specifici siti, sia attraverso mappe di pericolosità per studi estesi su base regionale.

In questo studio si è valutata la pericolosità sismica dei pendii per diversi siti sul territorio italiano a partire dal database sismico recentemente aggiornato da Gaudio *et al.* (2020). Come descritto in dettaglio in Rollo & Rampello (2021), si sono impiegati due approcci probabilistici: nel primo (approccio scalare) si considera la sola accelerazione di picco  $PGA$  come parametro del moto sismico, nel secondo (approccio vettoriale) la coppia  $PGA$  e velocità di picco  $PGV$ . Sono stati adottati tali parametri del moto in quanto le leggi di attenuazione disponibili in letteratura che entrano nell'approccio probabilistico sono più comunemente disponibili per i soli parametri  $PGA$  e  $PGV$  e in quanto le analisi di pericolosità sismica di base sono tipicamente sviluppate in termini di accelerazione di picco. I risultati delle analisi sono mostrati in termini di curve di pericolosità, mettendo in evidenza gli effetti della categoria di sottosuolo del sito e del coefficiente sismico critico del pendio in esame. Infine si presentano le mappe di pericolosità che mostrano la distribuzione del periodo di ritorno a fissati livelli di spostamento per la zona dell'Irpinia.

## 2. Approccio probabilistico

L'approccio probabilistico impiegato fa uso di una serie di relazioni semi-empiriche che restituiscono il logaritmo naturale degli spostamenti  $d$  in funzione del logaritmo di uno o più parametri del moto sismico. In questo studio sono adottate le espressioni proposte da Ambraseys & Menu (1988). In particolare, considerando il solo parametro  $PGA$  (approccio scalare) si ha:

$$\ln(d) = a_0 + a_1 \ln\left(1 - \frac{k_y}{PGA}\right) + a_2 \ln\left(\frac{k_y}{PGA}\right) \quad (1)$$

dove  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  sono i coefficienti di regressione,  $k_y$  è il coefficiente sismico critico e  $d$  è espresso in cm. L'efficienza della relazione semi-empirica è descritto dalla deviazione standard del logaritmo naturale dello spostamento  $\sigma_{\ln}$  (Cornell & Luco, 2001). Il vantaggio dell'Eq. (1) è che rispetta le condizioni  $d \rightarrow \infty$  per  $k_y/PGA = 0$  e  $d = 0$  per  $k_y/PGA = 1$ , come atteso dall'ipotesi di blocco rigido. Per l'approccio scalare la frequenza annua di superamento si valuta attraverso la relazione:

$$\lambda_d(x) = \sum_i P[d > x | PGA_i] \times P[PGA_i] \quad (2)$$

dove  $P[d > x | PGA_i]$  è la probabilità che lo spostamento superi un determinato valore  $x$  per uno specifico valore di  $PGA$  e  $P[PGA_i]$  è la probabilità annua di accadimento di un determinato livello di  $PGA$ . Per il primo termine si assume una distribuzione di probabilità lognormale mentre il secondo termine si ottiene dalle curve di pericolosità in termini di  $PGA$  a partire dall'analisi di pericolosità sismica di base disponibile per il territorio italiano.

Nel caso della coppia di parametri del moto  $PGA$ ,  $PGV$  (approccio vettoriale), la relazione semi-empirica si generalizza nella forma:

$$\ln(d) = a_0 + a_1 \ln\left(1 - \frac{k_y}{PGA}\right) + a_2 \ln\left(\frac{k_y}{PGA}\right) + a_3 \ln(PGV) \quad (3)$$

e la frequenza annua di superamento è valutata attraverso la relazione:

$$\lambda_d(x) = \sum_i \sum_j P[d > x | PGA_i, PGV_j] \times P[PGA_i, PGV_j] \quad (4)$$

dove  $P[d > x | PGA_i, PGV_j]$  è la probabilità che lo spostamento superi un determinato valore  $x$  per uno specifico valore di  $PGA$  e  $PGV$  mentre il termine  $P[PGA_i, PGV_j]$  rappresenta la probabilità

congiunta di  $PGA$ ,  $PGV$ , calcolata secondo la procedura descritta da Rollo & Rampello (2021).

### 3. Risultati dell'approccio probabilistico

I risultati dell'approccio probabilistico sono sintetizzati dapprima in termini di curve di pericolosità, che riportano la frequenza annua di superamento in funzione degli spostamenti permanenti del pendio. Gli spostamenti permanenti sono stati valutati attraverso l'approccio di Newmark secondo lo schema di pendio indefinito per diversi valori del coefficiente sismico critico  $k_y = 0.08, 0.1, 0.12, 0.15$ . Tali valori corrispondono a un pendio indefinito di inclinazione compresa tra  $5^\circ$  e  $20^\circ$  e angolo di resistenza a taglio del terreno  $\phi' = 22^\circ - 28^\circ$ . La Tabella 1 riporta i coefficienti di regressione delle relazioni semi-empiriche utilizzate considerando spostamenti maggiori di  $0.0001$  cm. Tali valori sono stati considerati, nonostante siano di scarso interesse da un punto di vista ingegneristico, per calibrare opportunamente le relazioni semi-empiriche quando i valori di  $PGA$  si avvicinano a  $k_y$ . I coefficienti delle relazioni semi-empiriche sono stati inoltre specializzati per portare in conto l'effetto delle diverse categorie di sottosuolo delle stazioni di registrazione nell'approccio probabilistico.

Tabella 1. Coefficienti di regressione per le diverse categorie di sottosuolo

Categoria sottosuolo	Parametri	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$\sigma_{ln}$
Tutte	$PGA$ (g)	-1.365	2.075	-2.409	-	1.027
	$PGA$ (g), $PGV$ (cm/s)	-3.358	2.094	-0.830	1.401	0.572
A	$PGA$ (g)	-2.016	1.931	-3.008	-	0.979
	$PGA$ (g), $PGV$ (cm/s)	-3.501	2.019	-1.188	1.285	0.642
B	$PGA$ (g)	-1.595	1.984	-2.376	-	0.989
	$PGA$ (g), $PGV$ (cm/s)	-3.379	2.108	-0.662	1.441	0.550
C	$PGA$ (g)	0.697	2.270	-2.183	-	1.066
	$PGA$ (g), $PGV$ (cm/s)	-3.446	2.045	-0.954	1.417	0.551

L'impiego del modello a due parametri riduce significativamente la deviazione standard associata agli spostamenti calcolati rispetto all'approccio scalare. Infatti, come atteso, la coppia di parametri  $PGA$ ,  $PGV$  è più rappresentativa del database sismico rispetto alla sola  $PGA$ .

Per illustrare i risultati sotto forma di curve di pericolosità e per mettere in luce l'effetto del coefficiente sismico critico e della categoria di sottosuolo nei risultati, si riportano le curve di pericolosità ottenute per il sito di Amatrice.

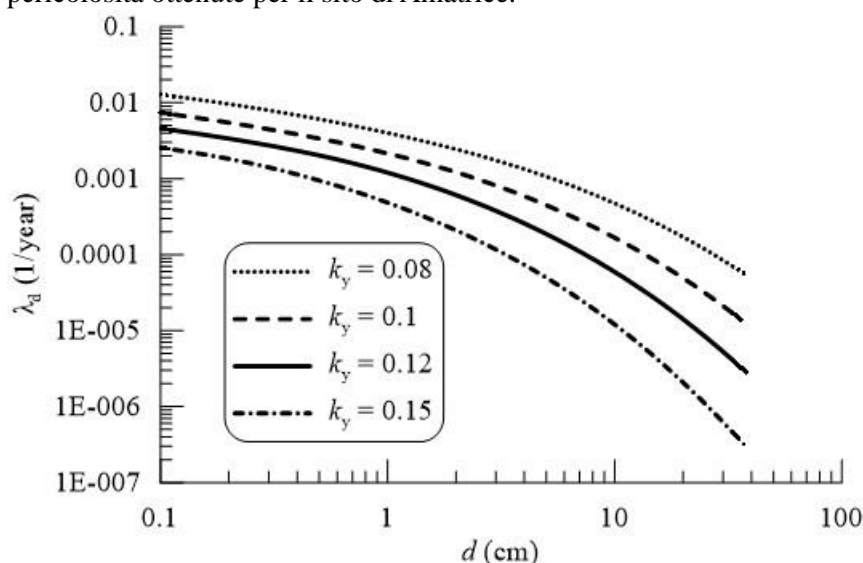


Fig 1. Approccio scalare: effetto del coefficiente sismico critico per il sito di Amatrice

Come si evince dalla Fig. 1, a spostamenti crescenti, associati a eventi meno probabili, è associata una

frequenza annua di superamento inferiore. L'effetto del coefficiente sismico critico entra direttamente nelle relazioni semi-empiriche nelle Eq. (1) - (3). Dalla Fig. 1 emerge chiaramente che più il pendio è stabile (ovvero maggiore è  $k_y$ ), minore è la frequenza annua di superamento associata a un dato spostamento. Le curve di pericolosità sono ottenute attraverso l'approccio scalare per i diversi valori di  $k_y$  esaminati.

La Fig. 2 illustra le curve di pericolosità calcolate attraverso l'approccio scalare per il sito di Amatrice e  $k_y = 0.1$ , distinguendo le tre categorie di sottosuolo A, B e C. Si nota che le frequenze annue più elevate si ottengono per terreni deformabili (categoria C), ovvero il modello prevede spostamenti maggiori a un fissato tempo di ritorno. Questo è coerente con il fatto che gli accelerogrammi registrati su depositi deformabili sono più ricchi in basse frequenze rispetto a quelli registrati su roccia, producendo spostamenti maggiori nel pendio. Meno chiaro è il risultato ottenuto per la classe A, per la quale ci si aspettano gli spostamenti minori. Il risultato ottenuto si può attribuire al fatto che per tale categoria circa il 50% delle registrazioni con  $PGA > 0.2$  g sono caratterizzate da un periodo medio  $T_m > 0.4$  s, il che può spiegare gli spostamenti calcolati inaspettatamente alti.

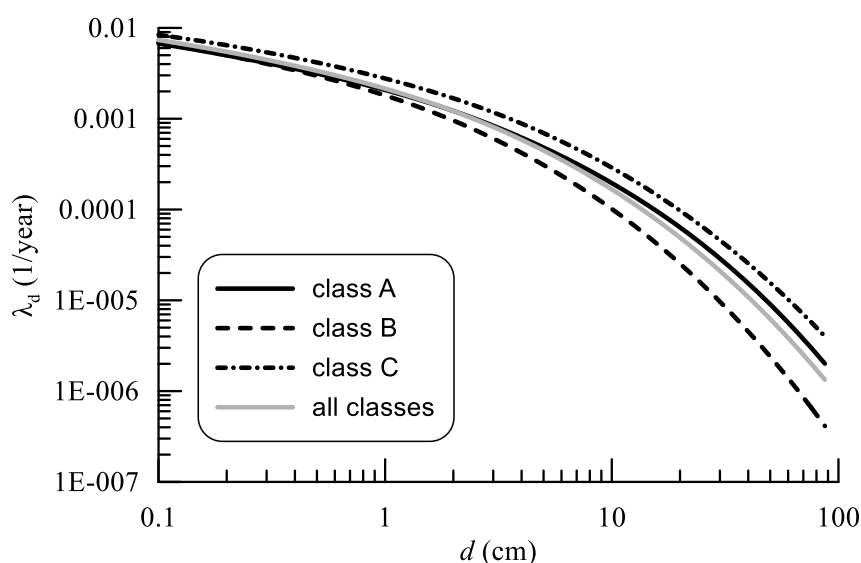


Fig 2. Approccio scalare: effetto della categoria di sottosuolo sulle curve di pericolosità per il sito di Amatrice

La Fig. 3 mette a confronto le curve di pericolosità ottenute con l'approccio scalare e l'approccio vettoriale per il sito di Amatrice, per  $k_y = 0.1$ , al variare delle categorie di sottosuolo delle stazioni di registrazione dei segnali sismici disponibili. L'approccio vettoriale restituisce in ogni caso valori della frequenza annua di superamento minori rispetto a quelli ottenuti con l'approccio scalare per l'intero intervallo di spostamenti considerato nelle analisi, riducendo in tal modo la pericolosità associata al pendio. Ad esempio, con riferimento al caso in cui si considerano tutte le classi di sottosuolo insieme, per una probabilità di superamento del 10% in 50 anni (tempo di ritorno  $T_r = 475$  anni) gli spostamenti sono pari a 1.0 cm e 0.65 cm utilizzando rispettivamente l'approccio scalare e quello vettoriale, mentre per una probabilità del 2% in 50 anni ( $T_r = 2475$  anni) gli spostamenti sono rispettivamente di 5.2 cm e 4.0 cm. Questo risultato è coerente con il fatto che il modello vettoriale ( $PGA$ ,  $PGV$ ) restituisce deviazioni standard e spostamenti medi inferiori rispetto a quanto calcolato con il modello a singolo parametro  $PGA$ . Inoltre, analogamente a quanto mostrato in Fig. 2, le curve di pericolosità ottenute per la categoria di sottosuolo C restituiscono spostamenti maggiori a parità di frequenza annua di superamento rispetto a quanto ottenuto per terreni di categoria B. Tuttavia è interessante notare che gli effetti della categoria di sottosuolo sulle curve di pericolosità sono meno marcati nel caso in cui si impieghi l'approccio vettoriale rispetto a quello scalare.

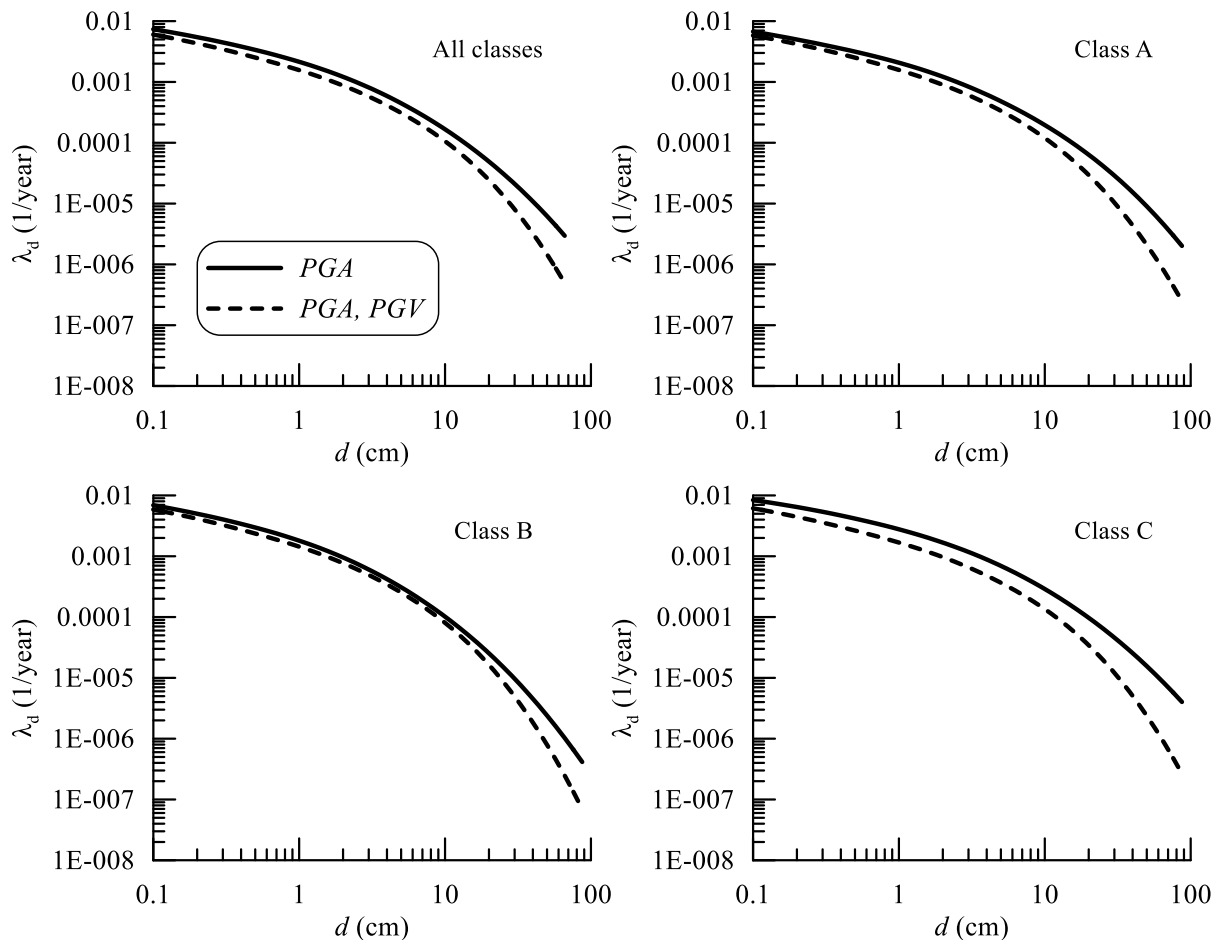


Fig 3. Curve di pericolosità per Amatrice e  $k_y=0.1$ : confronto tra approccio scalare e vettoriale

Infine sono state prodotte una serie di mappe utili a identificare la pericolosità sismica associata a un pendio per la zona dell'Irpinia, nella regione Campania, in sud Italia. L'area considerata, situata all'incirca a 50 km da Napoli, ha un'estensione di  $40 \times 40 \text{ km}^2$ , è attraversata dalla catena montuosa degli Appennini ed è una zona caratterizzata da una elevata pericolosità sismica. Il modello impiegato in queste analisi tiene conto di tutte le categorie di sottosuolo insieme. Infatti, data l'incertezza associata alla variabilità dei depositi presenti su scala regionale, risulta più conveniente non separare gli effetti delle categorie di sottosuolo nelle relazioni semi-empiriche per gli spostamenti.

Le mappe di pericolosità mostrano le isolinee del periodo di ritorno  $T_r$  associato a un fissato livello di spostamento e a uno specifico coefficiente sismico critico. È importante notare che le mappe non considerano la morfologia della regione e la reale distribuzione dei pendii nella stessa. Tuttavia, è possibile fornire diverse mappe di pericolosità al variare del coefficiente sismico critico, in modo che si possano agevolmente impiegare per una valutazione preliminare della pericolosità sismica della regione per diversi scenari di frana, ognuno caratterizzato da diversi valori del coefficiente sismico critico. Le mappe sono state sviluppate a partire da entrambi gli approcci probabilistici scalare e vettoriale. A titolo di esempio, la Fig. 4 mostra le isolinee del periodo di ritorno per i due approcci, considerando un valore di spostamento  $d = 15 \text{ cm}$  e  $k_y = 0.1$ . Le coordinate indicate negli assi si riferiscono alla direzione Est e Nord secondo il sistema di riferimento WGS84. Come atteso, i periodi di ritorno sono minori nel caso di approccio scalare rispetto a quanto ottenuto con quello vettoriale, dimostrando ancora una volta che l'approccio vettoriale tende a ridurre la pericolosità sismica associata ai pendii in quanto descrive in maniera più accurata le caratteristiche del moto sismico. La variabilità spaziale di  $T_r$  è chiaramente associata alla pericolosità sismica di base del territorio

considerato: infatti i valori più elevati si riscontrano nella zona a Sud-Ovest, dove gli Appennini degradano verso le pianure che si affacciano sul mare.

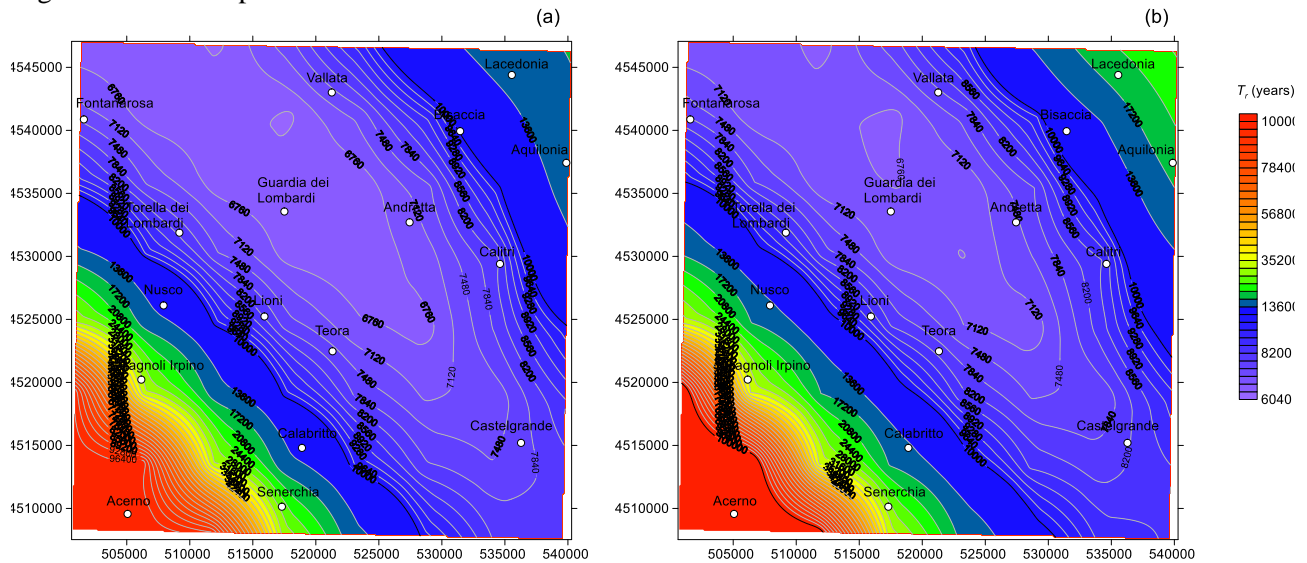


Fig 4. Mappe di pericolosità per l'Irpinia per  $d=15$  cm e  $k_y = 0.1$ : (a) approccio scalare, (b) approccio vettoriale

## Bibliografia

- Ambraseys, N. N., & Menu, J. M. (1988). Earthquake-induced ground displacements. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 16(7), 985-1006.
- Bradley, B. A. (2012). The seismic demand hazard and importance of the conditioning intensity measure. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(11), 1417-1437.
- Bray, J. D., & Macedo, J. (2019). Procedure for estimating shear-induced seismic slope displacement for Shallow Crustal Earthquakes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 145(12), 04019106.
- Cho, Y., & Rathje, E. M. (2020). Displacement hazard curves derived from slope-specific predictive models of earthquake-induced displacement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 138, 106367.
- Cornell C. A., Luco, N. (2001). Ground motion intensity measures for structural performance assessment at near-fault sites: In *Proceedings of the U.S.-Japan joint workshop and third grantees meeting, U.S.-Japan cooperative research on urban earthquake disaster mitigation*. Seattle: Washington.
- Du, W., Wang, G. (2016). A one-step Newmark displacement model for probabilistic seismic slope displacement hazard analysis. *Engineering Geology*, 205, 12-23.
- Gaudio, D., Rauseo, R., Masini, L., & Rampello, S. (2020). Semi-empirical relationships to assess the seismic performance of slopes from an updated version of the Italian seismic database. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(14), 6245-6281.
- Jibson, R. W. (2007). Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering geology*, 91(2-4), 209-218.
- Newmark, N. M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15(2), 139-160.
- Rathje, E. M., Saygili, G. (2008). Probabilistic seismic hazard analysis for the sliding displacement of slopes: scalar and vector approaches. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6), 804-814.
- Rollo, F., & Rampello, S. (2021). Probabilistic assessment of seismic-induced slope displacements: an application in Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 4261-4288.
- Saygili, G., Rathje, E. M. (2008). Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(6), 790-803.
- Song, J., Gao, Y., Rodriguez-Marek, A., Feng, T. (2017). Empirical predictive relationships for rigid sliding displacement based on directionally-dependent ground motion parameters. *Engineering Geology*, 222, 124-139.