

Pasquale Cito
Le dighe e le azioni sismiche
10 Aprile 2024, Napoli

Grandi dighe in Italia



https://www.dighe.eu/dati/grandi_dighe_italiane.htm

(Alcune delle)
grandi dighe
gestite da ENEL
greenpower
S.p.A.



Contenuti

Come si definiscono le azioni sismiche per una verifica sismica?

Come si caratterizza la pericolosità sismica (dei siti) delle grandi dighe?

Approccio prestazionale alla definizione delle azioni sismiche

1. Sono definiti, secondo la norma, quattro obiettivi prestazionali (e.g., soglie di spostamento) o stati limite: SLO, SLD, SLV e SLC.
2. A seconda dell'obiettivo prestazionale, si determina l'azione sismica di interesse: essa si determina a partire dalla intensità dello scuotimento sismico (tipicamente in termini di pseudo-accelerazione spettrale) che, al sito della costruzione, ha una certa probabilità di essere superata nella vita di riferimento della struttura o, analogamente, periodo di ritorno (T_r).

Approccio prestazionale alla definizione delle azioni sismiche

3. Come associare la probabilità di superamento (P_{vr}) della intensità di progetto (o periodo di ritorno) agli obiettivi prestazionali?

Terremoto	P_{vr}	SLO	SLD	SLV	SLC
Frequente					
Occasionale					
Raro					
Molto raro					

$$T_r = - \frac{V_n \cdot C_u}{\log(1 - P_{vr})}$$

$$T_r = 30 \text{yr}$$

$$T_r = 50 \text{yr}$$

$$T_r = 475 \text{yr}$$

$$T_r = 975 \text{yr}$$

**Struttura ordinaria
con $V_n \cdot C_u = 50 \text{yr}$**

4. Come associare al periodo di ritorno il valore della intensità dello scuotimento di progetto al sito della costruzione?

Spettro (elastico) di norma

Analisi probabilistica di pericolosità sismica

Forse non tutti sanno che..

Lo spettro elastico di norma deriva, di fatto, dalla analisi probabilistica di pericolosità sismica.

1. Identificazione delle coordinate geografiche del sito:



Diga di Castel San Vincenzo (Isernia), 14.05°E 41.65°N

2. Identificazione del periodo di ritorno (T_r): $T_r = - \frac{V_n \cdot C_u}{\log(1 - P_{vr})}$

3. Costruzione dello spettro (f) **Periodi di ritorno due volte quelli per strutture ordinarie**

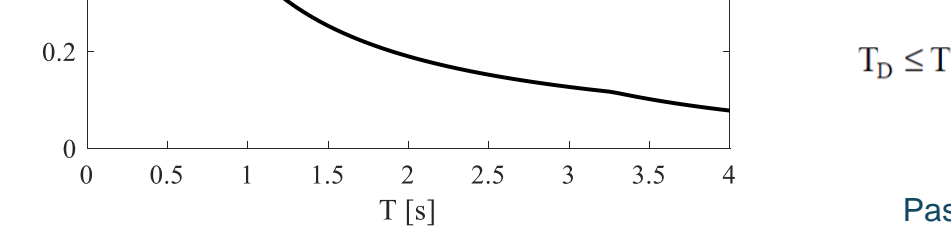
$T_r=1950yr$
Allegato A NTC: parametri dello spettro

$V_n=50yr$
 $C_u=2$

P_{vr} dipende dallo stato limite

Stato limite	P_{vr}	$T_r[yr]$
SLO	0.81	60
SLD	0.63	101
SLV	0.1	950
SLC	0.05	1950

ID	LON	LAT	TR = 30			TR = 50			TR = 72			TR = 101		
			ag	F0	T*c	ag	F0	T*c	ag	F0	T*c	ag	F0	T*c
13111	6.5448	45.1340	0.263	2.500	0.180	0.340	2.510	0.210	0.394	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13333	6.5506	45.0850	0.264	2.490	0.180	0.341	2.510	0.210	0.395	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13555	6.5564	45.0350	0.264	2.500	0.180	0.340	2.510	0.200	0.393	2.550	0.220	0.466	2.500	0.240
13777	6.5621	44.9850	0.263	2.500	0.180	0.338	2.520	0.200	0.391	2.550	0.220	0.462	2.510	0.240
12890	6.6096	45.1880	0.284	2.460	0.190	0.364	2.510	0.210	0.431	2.500	0.220	0.509	2.480	0.240



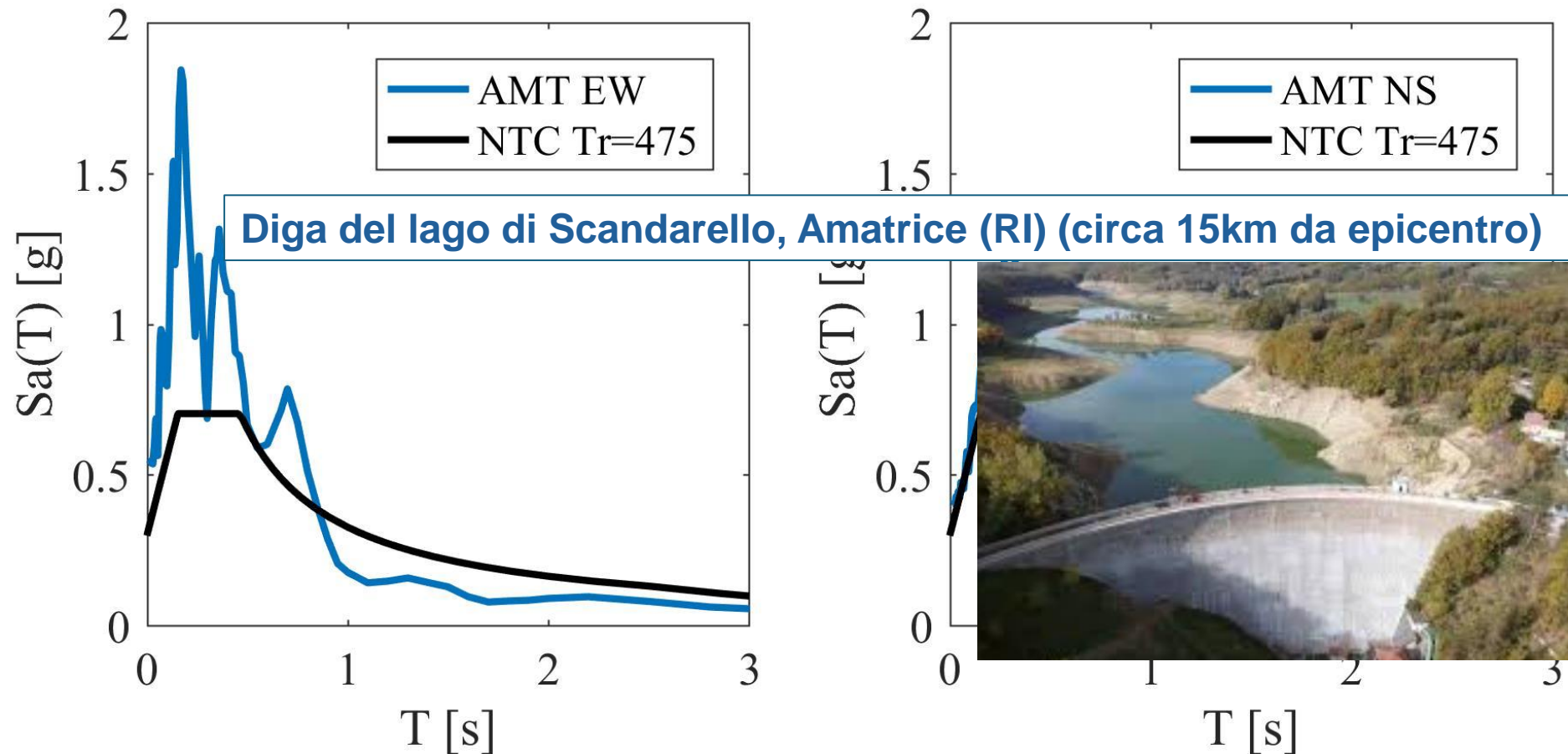
$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$
 T_B, T_C, T_D

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Amatrice 30.10.2016 ($M_w=6.5$, $R=10\text{km}$)



Lo spettro di norma non è lo spettro di nessun (vero) terremoto.

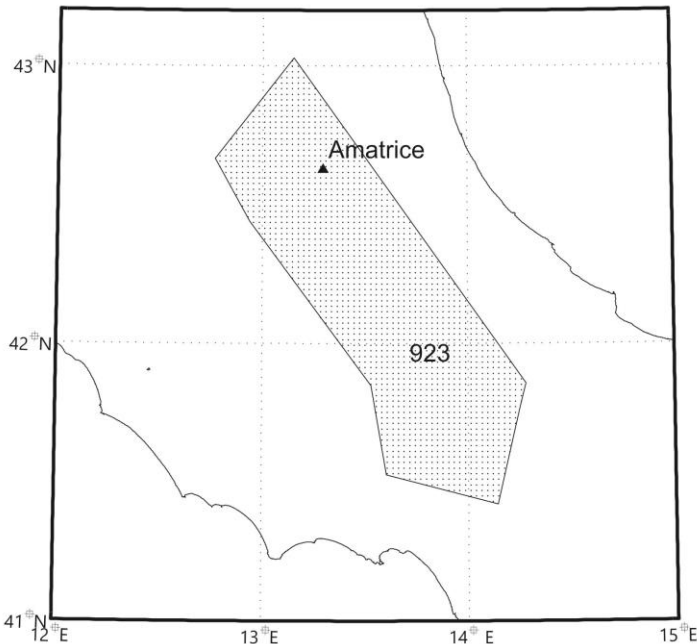
La analisi probabilistica di pericolosità sismica:

1. Sotto determinate ipotesi, consente di associare un periodo di ritorno a un valore di pseudo-accelerazione spettrale (e.g., 0.1g).
2. Il risultato principale della analisi è, infatti, una funzione che associa a un valore di pseudo-accelerazione spettrale, sa , un numero, $\lambda_{Sa(T)>sa}$, che rappresenta il tasso dei terremoti che superano tale valore.
3. Il reciproco del tasso di superamento è il periodo di ritorno dei terremoti che superano la soglia di pseudo-accelerazione.
4. Per il sito della diga, l'intensità corrispondente al periodo di ritorno di progetto (e.g., 1950 yr) non è nota: la analisi di pericolosità va sviluppata per diversi valori di pseudo-accelerazione, per poi cercare quella al periodo di ritorno richiesto.

OBIETTIVO: costruire una curva che associ, a diversi valori di pseudo-accelerazione spettrale, il tasso (annuale) dei terremoti che, al sito, causano il superamento: curva di pericolosità sismica.

Per fare una analisi probabilistica di pericolosità sismica serve, essenzialmente:

1. Catalogo dei terremoti
2. Modello di sorgente (parametri sismici calibrati sulla base del catalogo)
3. Modello di predizione dello scuotimento al sito



1. e 2.

Consentono di calcolare il tasso dei terremoti che occorrono ad una certa distanza (R) dal sito e con una certa magnitudo (M), $\nu_{M=m,R=r}$.

Il tasso dei terremoti con $\{M = m, R = r\}$ che, al sito, causano $Sa(T) > sa$, $\lambda_{Sa(T) > sa, M=m, R=r}$ è una frazione di $\nu_{M=m, R=r}$.

3.

Consente di calcolare $\lambda_{Sa(T) > sa, M=m, R=r} = \nu_{M=m, R=r} \cdot P[Sa(T) > sa | M = m, R = r]$

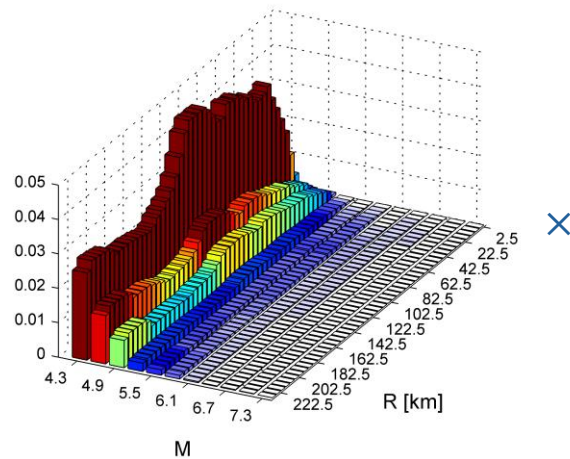
4. Tenere conto di tutte le possibili coppie magnitudo-distanza:

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \sum_M \sum_R \lambda_{Sa(T) > sa, M=m, R=r}$$

Pasquale Cito

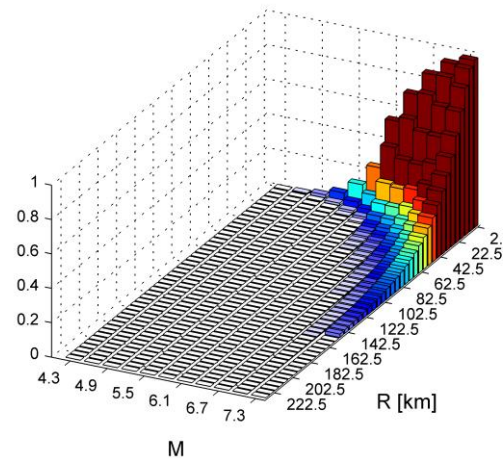
1. e 2.

$$v_{M=m,R=r}$$

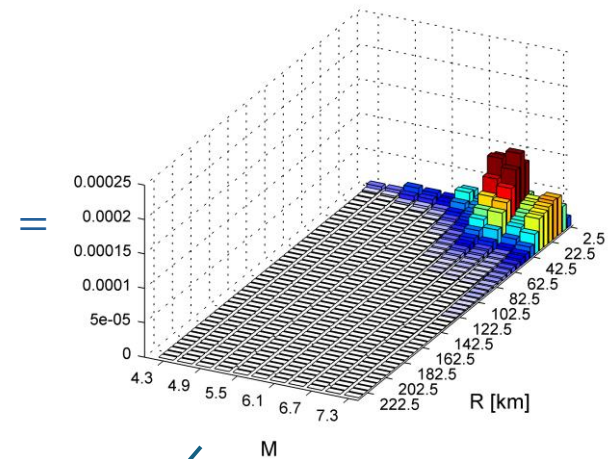


3.

$$P[Sa(T) > sa | M = m, R = r]$$

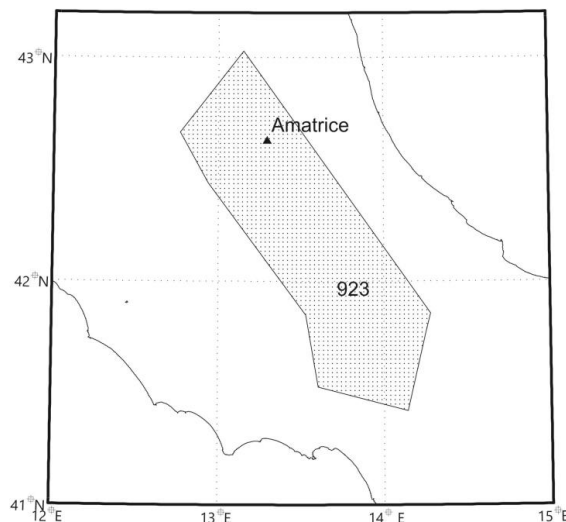


$$\lambda_{Sa(T)>sa,M=m,R=r}$$



4.

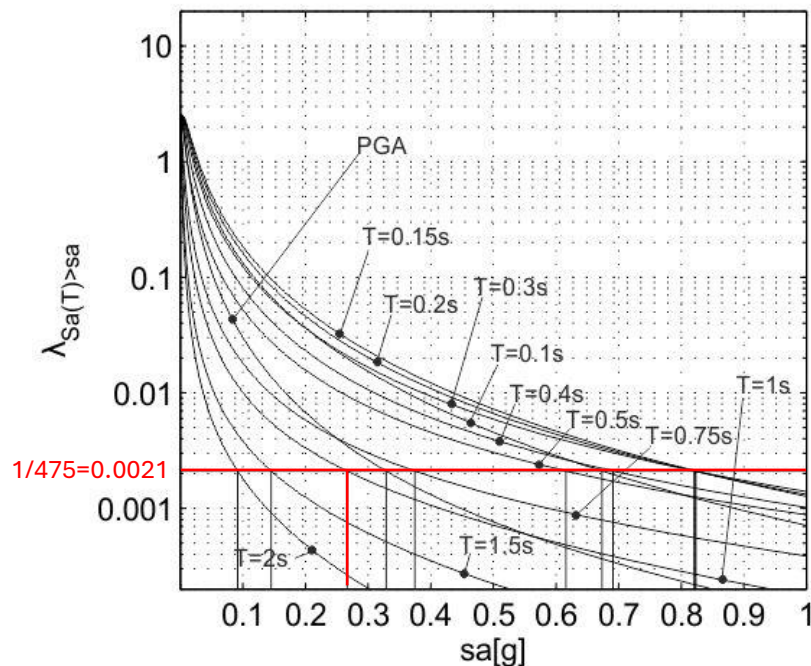
$$\begin{aligned} \lambda_{Sa(T)>sa} &= \sum_M \sum_R \lambda_{Sa(T)>sa,M=m,R=r} \\ &= \sum_M \sum_R v_{M=m,R=r} \cdot P[Sa(T) > sa | M = m, R = r] \end{aligned}$$



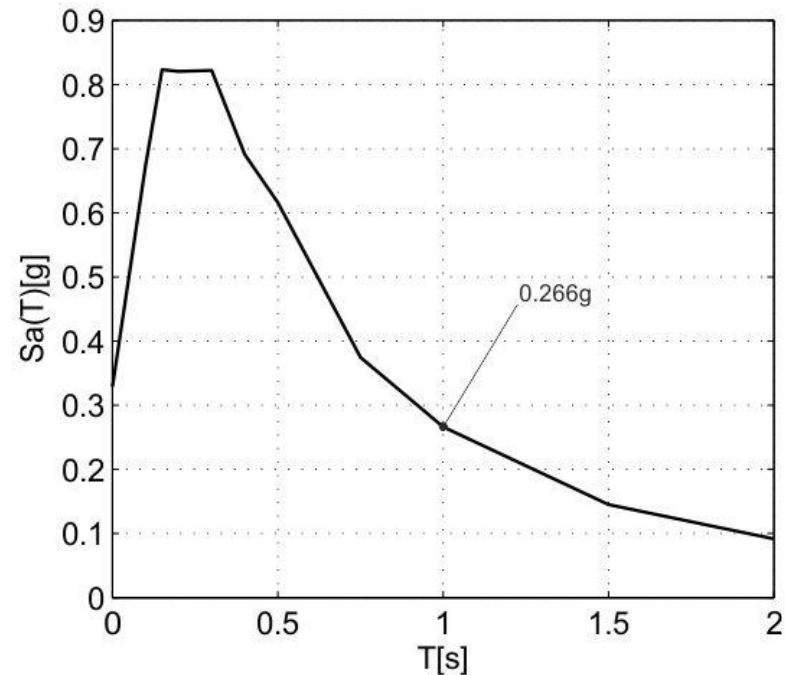
Ripetendo il calcolo per diversi valori di sa , e diagrammando i valori di $\lambda_{Sa(T)>sa}$ si ottiene la curva di pericolosità sismica al sito.

Fissato il periodo di ritorno, si ricava il valore di sa corrispondente.

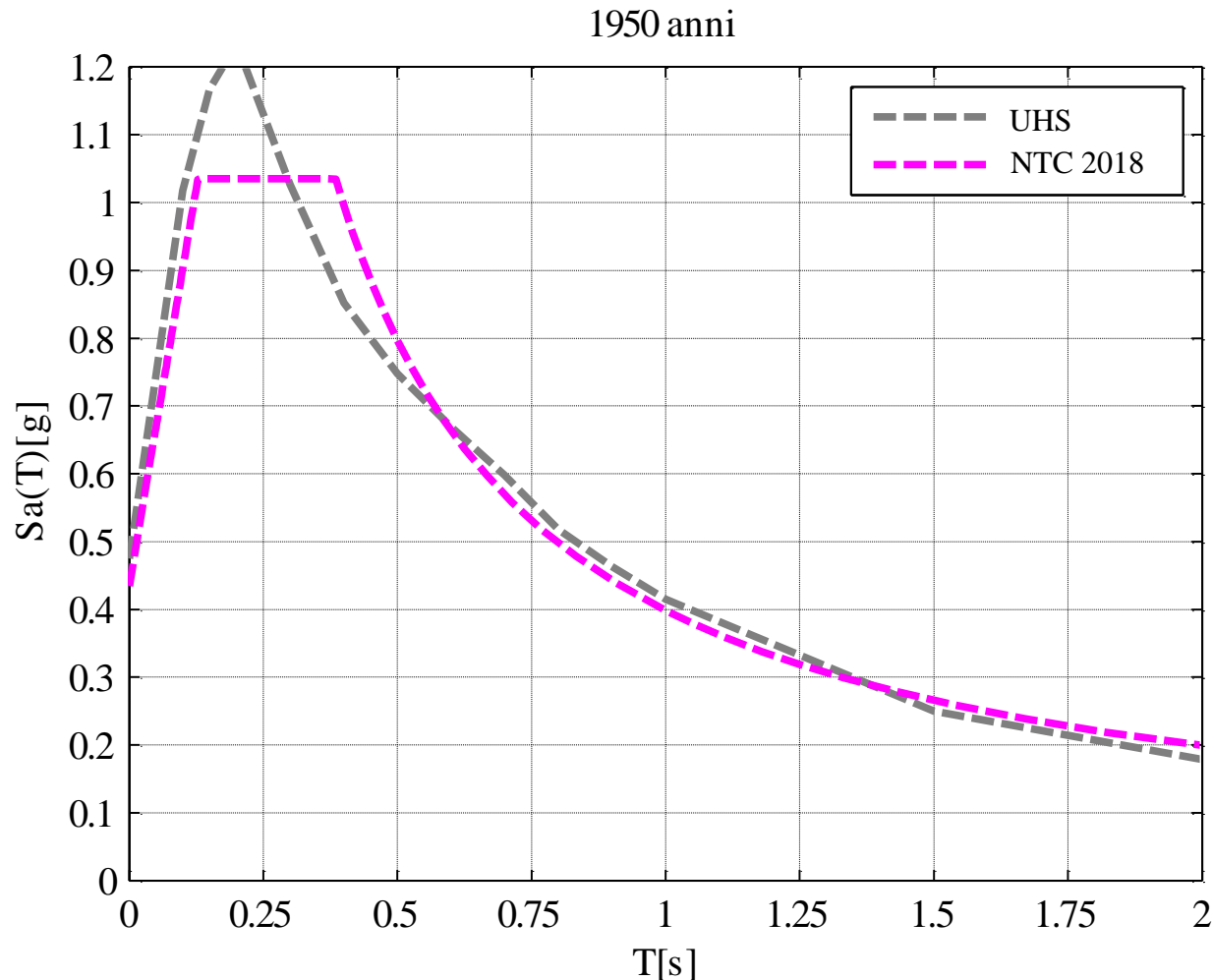
Ripetendo il calcolo per diversi periodi di vibrazione, si ottiene lo spettro a pericolosità uniforme che fornisce le azioni sismiche di progetto.



Curve di pericolosità per Amatrice

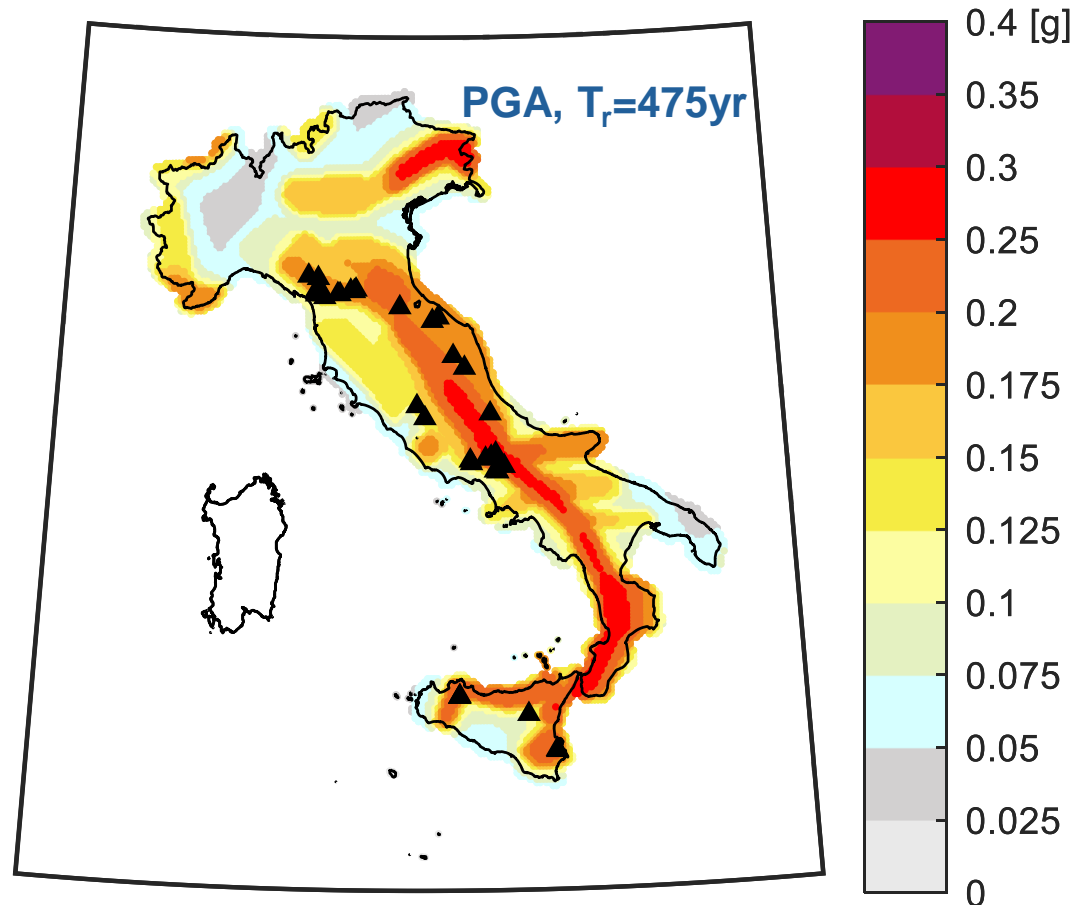


Spettro a pericolosità uniforme (le cui ordinate sono superate mediamente ogni 475 anni).



Lo spettro di norma approssima lo spettro a pericolosità uniforme (UHS; uniform hazard spectrum), un risultato della analisi probabilistica di pericolosità sismica.

Le azioni sismiche di progetto alla scala nazionale sono tipicamente rappresentate in forma di mappe di pericolosità sismica per fissato periodo di vibrazione e periodo di ritorno.



I siti delle dighe si trovano in zone a pericolosità da medio-alta a alta.

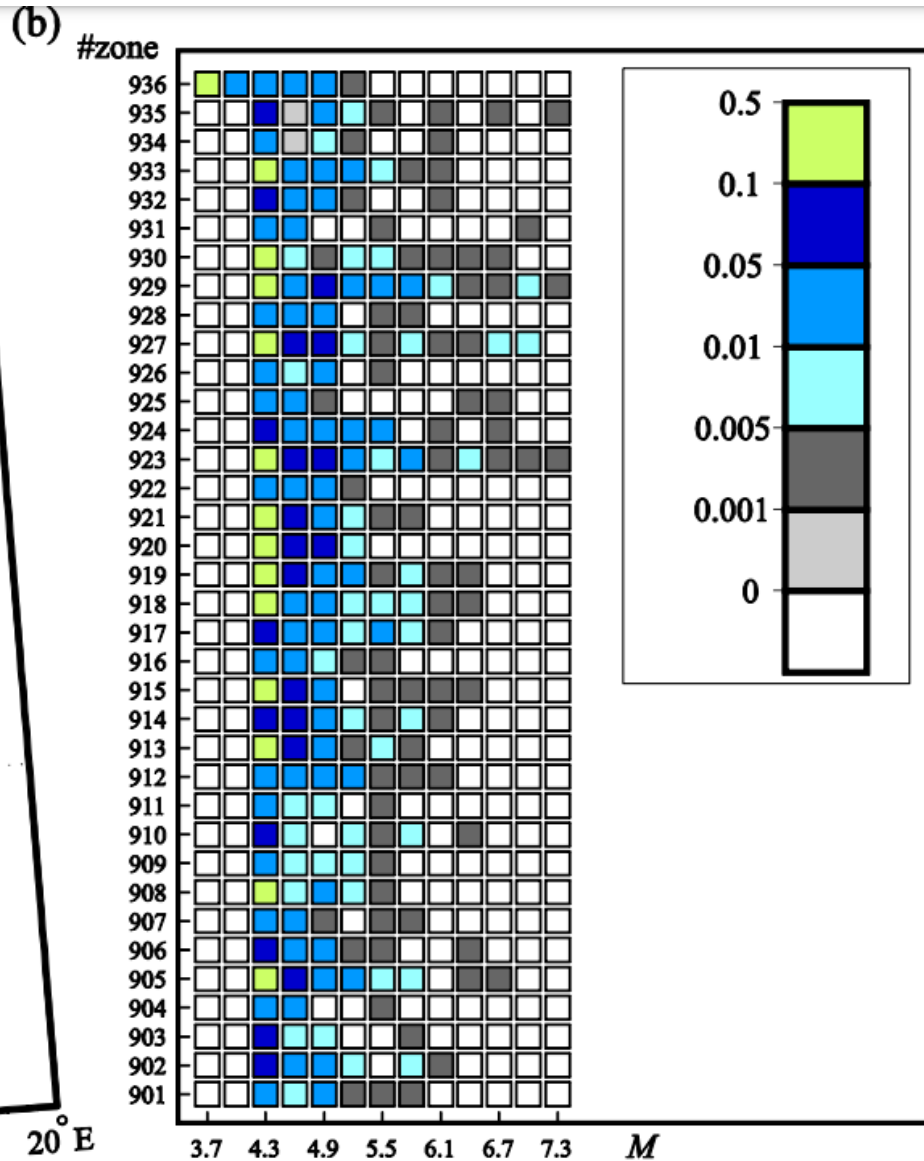
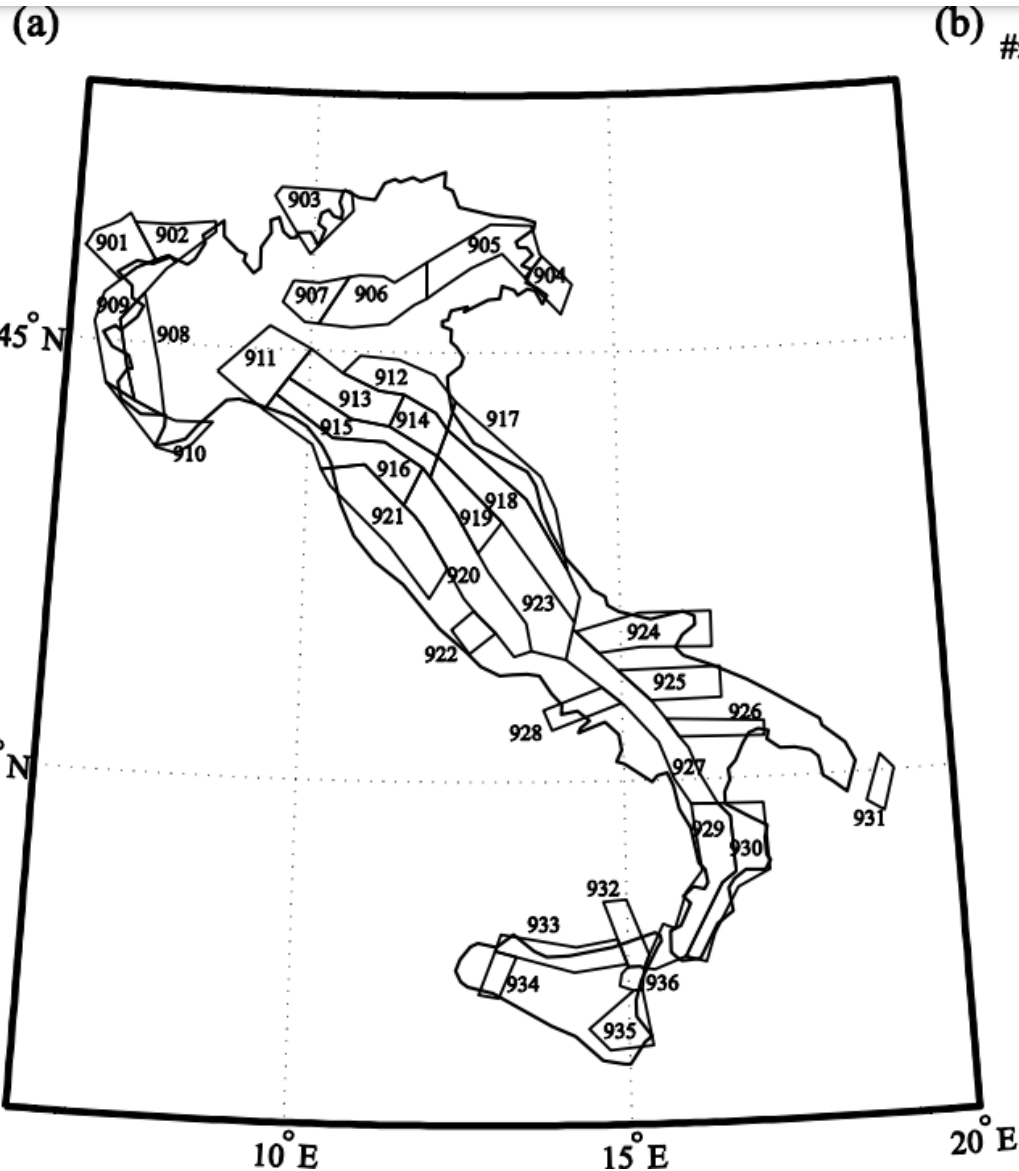
I principali (e più recenti) modelli di pericolosità per l'Italia per la caratterizzazione delle azioni sismiche di progetto

MPS04 (Stucchi et al., 2011): modello alla base della analisi di pericolosità sismica su cui si basano gli spettri forniti dalla norma italiana.

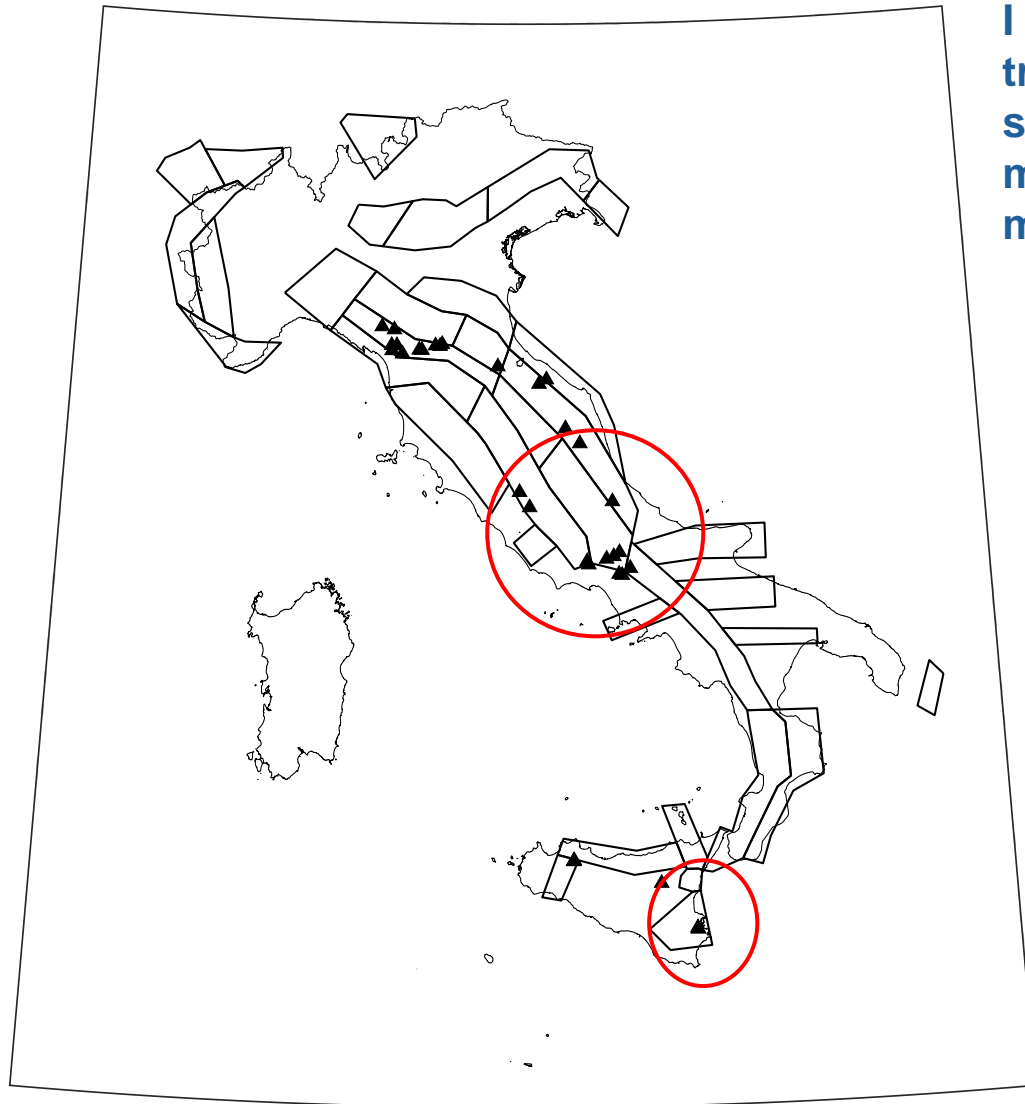
MPS19 (Meletti et al., 2021): modello proposto come possibile aggiornamento di MPS04.

ESHM20 (Danciu et al., 2021): modello a scala europeo su cui si basano le mappe di pericolosità sismica che accompagneranno la prossima generazione dello Eurocodice8.

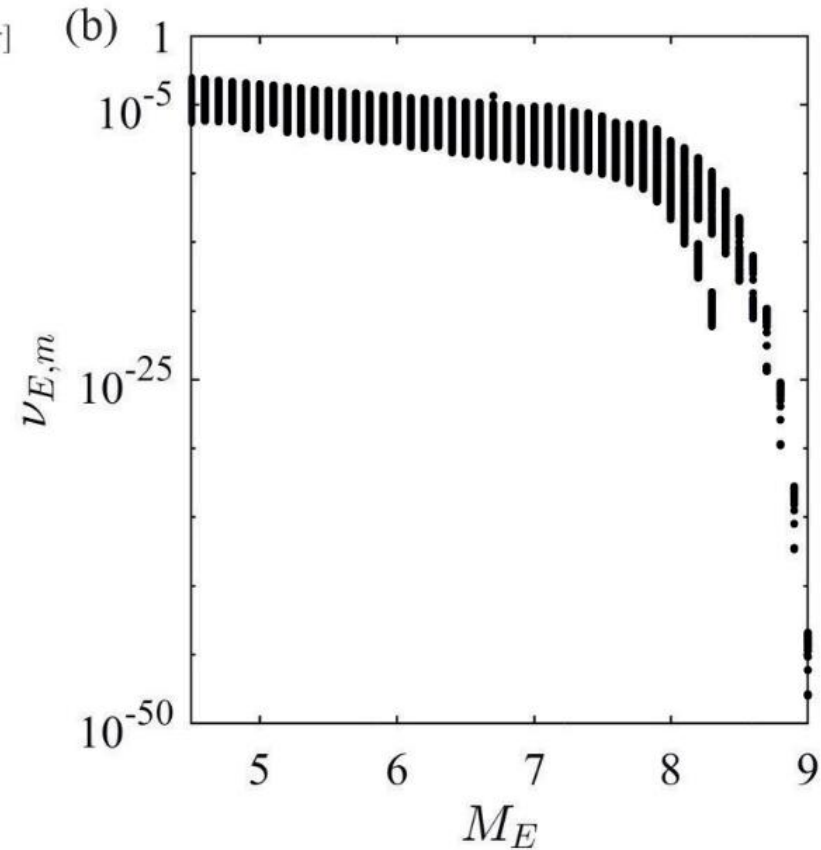
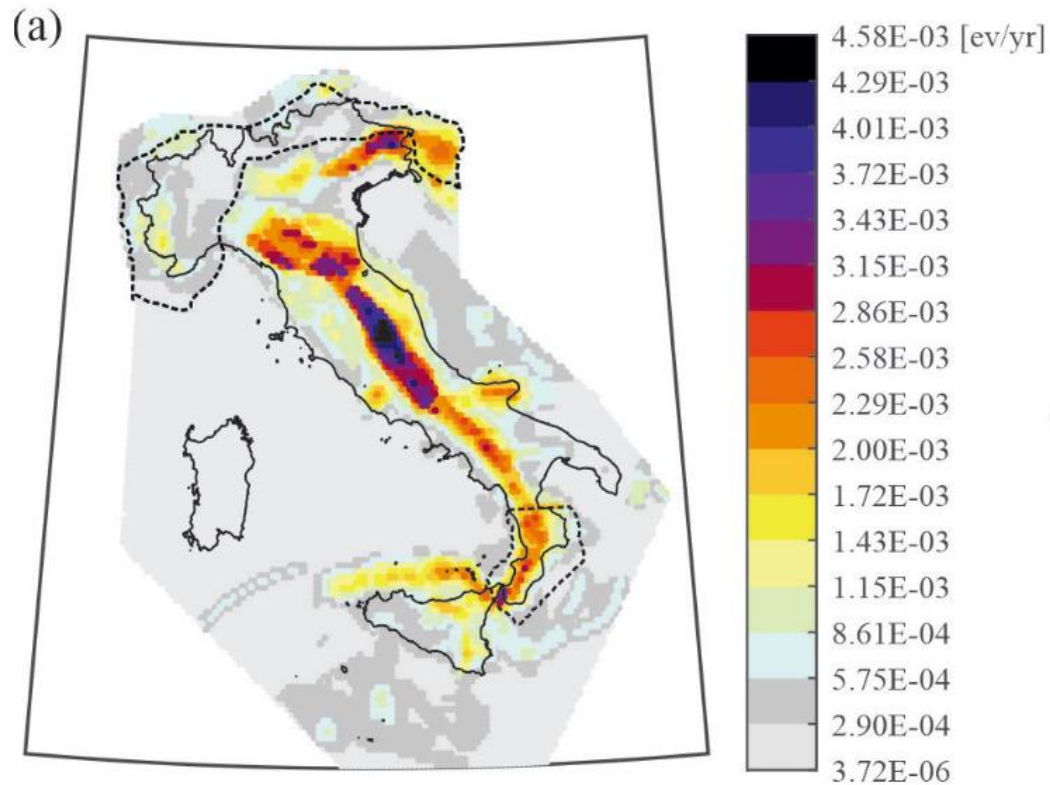
Questi modelli adottano diversi cataloghi, sorgenti, e modelli di previsione dello scuotimento. Pertanto, è atteso che, fissato il periodo di ritorno, l'azione di progetto sia diversa da modello a modello.

MPS04 (Meletti et al., 2008)

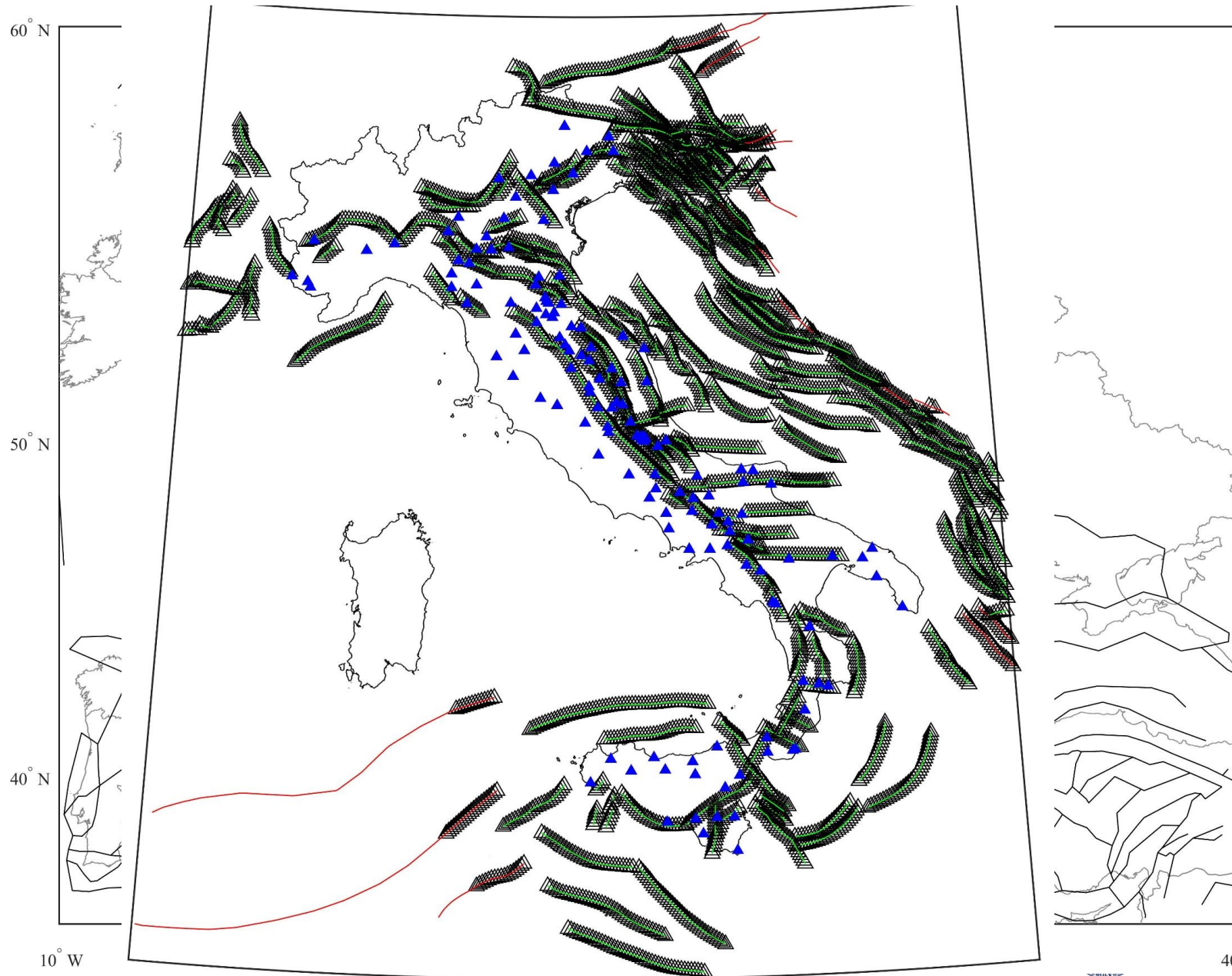
MPS04 (Meletti et al., 2008)



I siti delle circa quaranta dighe si trovano in prossimità di zone sismogenetiche con magnitudo massima che può essere anche maggiore di 7.3.

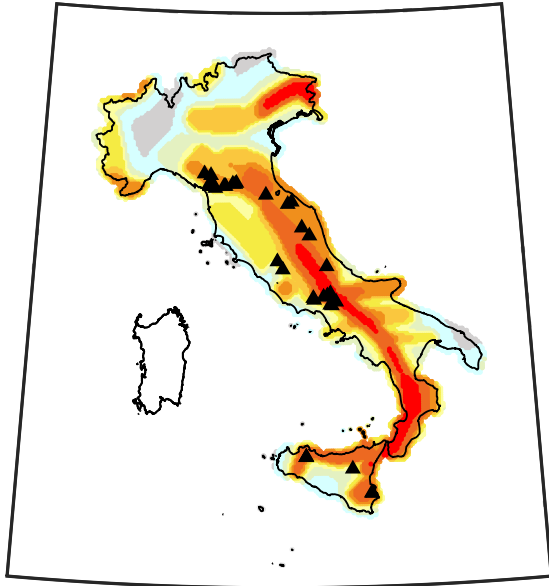
MPS19 (Meletti et al., 2021)

ESHM20 (Danciu et al., 2021)

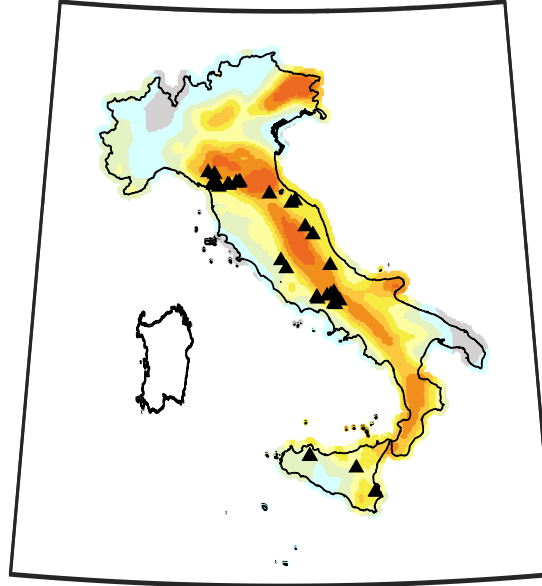


Modelli a confronto – mappe di pericolosità sismica (PGA, $T_r=475\text{yr}$)

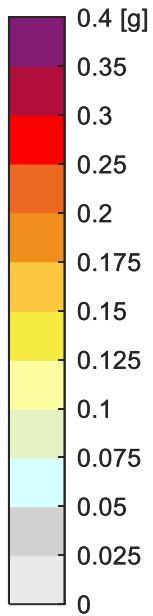
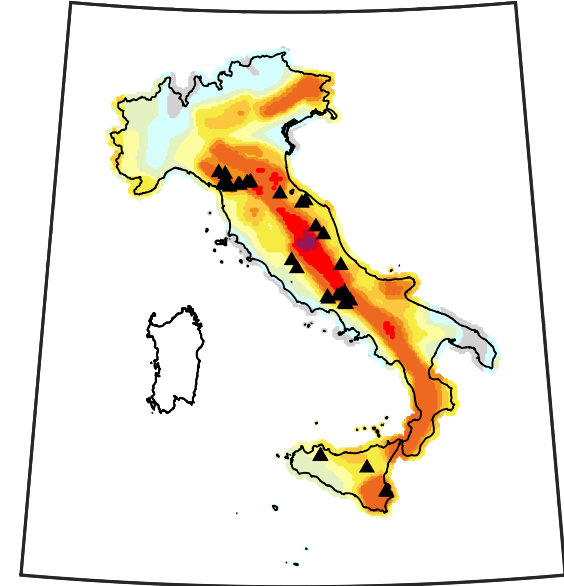
MPS04



MPS19

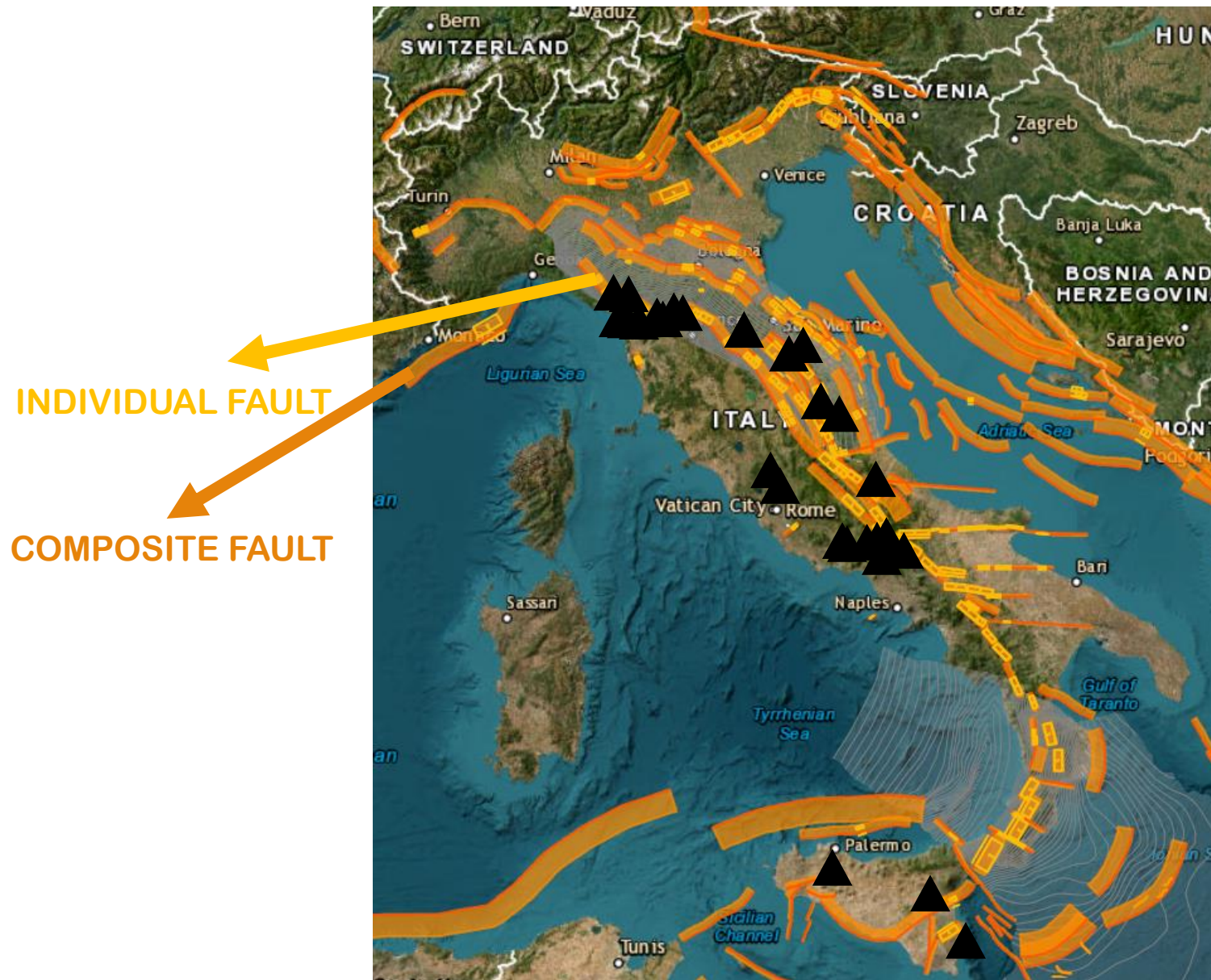


ESHM20



Secondo ciascun modello, la maggioranza dei siti delle dighe si trovano in zone a pericolosità da medio-alta a alta.

Faglie – Database DISS (<https://diss.ingv.it/diss330/dissmap.html>)



Faglie

Per (i siti delle) dighe in prossimità di faglie, la valutazione della pericolosità sismica dovrebbe tenere conto di:

- 1. Direttività della rottura:** può determinare uno scuotimento del suolo, in termini di velocità, caratterizzato da un forte impulso nei primi secondi del sisma.
- 2. Spostamento permanente del suolo:** prodotto dalla rottura di faglia, può indurre danni significativi alla diga.

1. Modifica del modello di predizione dello scuotimento (in termini di S_a) per tenere conto delle caratteristiche impulsive, che dipendono essenzialmente dalla magnitudo.
2. Ad esempio, calcolo del numero di anni che mediamente intercorre tra due eventi che causano uno spostamento permanente maggiore di una certa soglia.



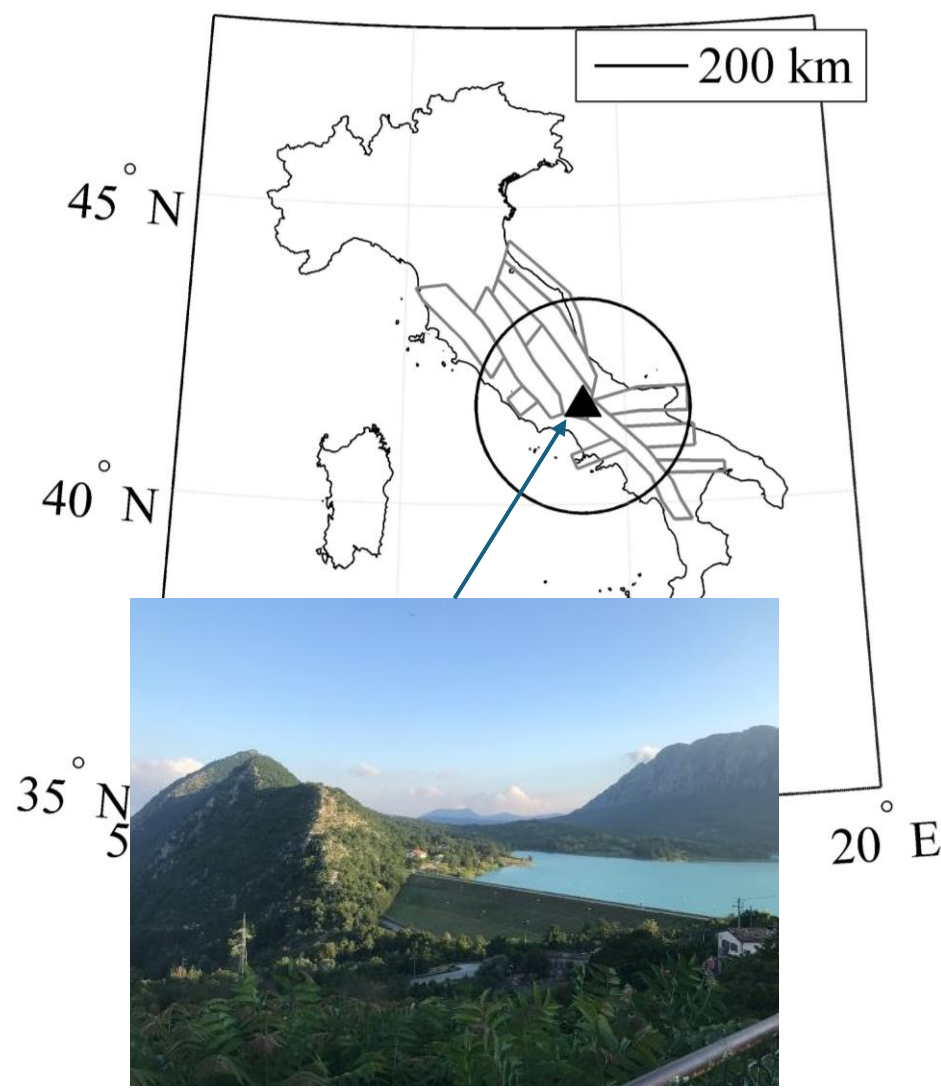
Source: **Cengiz Zabci** @CengizZabci



Source: **Cengiz Zabci** @CengizZabci

Definizione delle azioni sismiche di progetto via APPS.

Diga di Castel San Vincenzo (Isernia)



Modello di sorgente:

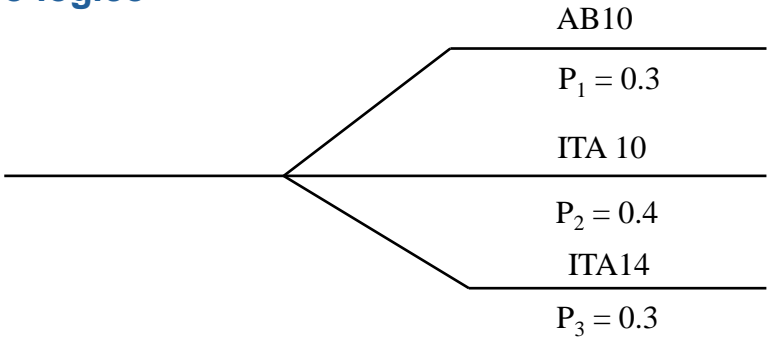
- Zone secondo modello di Meletti et al. (2008)
- Tassi e distribuzione di magnitudo calibrati su catalogo italiano

Modelli di predizione dello scuotimento:

- Akkar & Bommer (2010) (AB 10) – ricavata su dati europei e del medio oriente.
- Bindi et al. (2011) (ITA 10) – ricavata su dati italiani;
- Bindi et al. (2014) (ITA 14) – ricavata su dati europei.

Legge di attenuazione	Range Mw	Range Rjb
Akkar and Bommer (2010) – AB10	5 - 7.6	0 - 100km
Bindi et al. (2011) – ITA10	4 - 6.9	0 - 200km
Bindi et al. (2014) – ITA14	4 - 7.6	0 - 300km

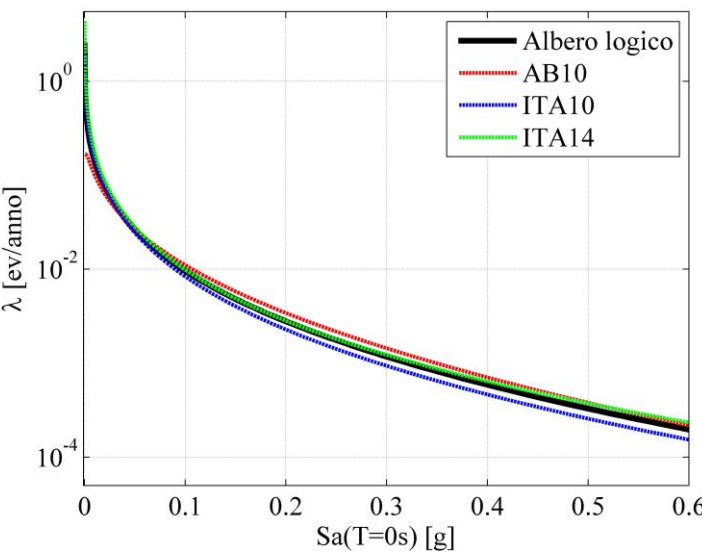
Albero logico



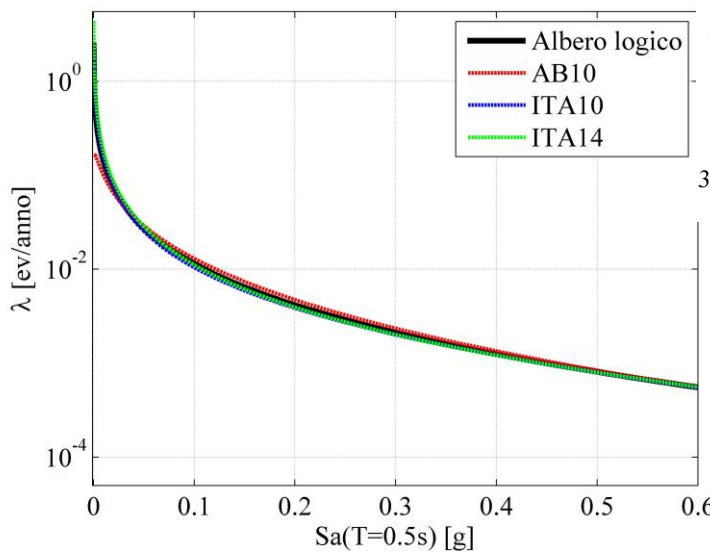
Definizione delle azioni sismiche di progetto via APPS.

Diga di Castel San Vincenzo (Isernia)

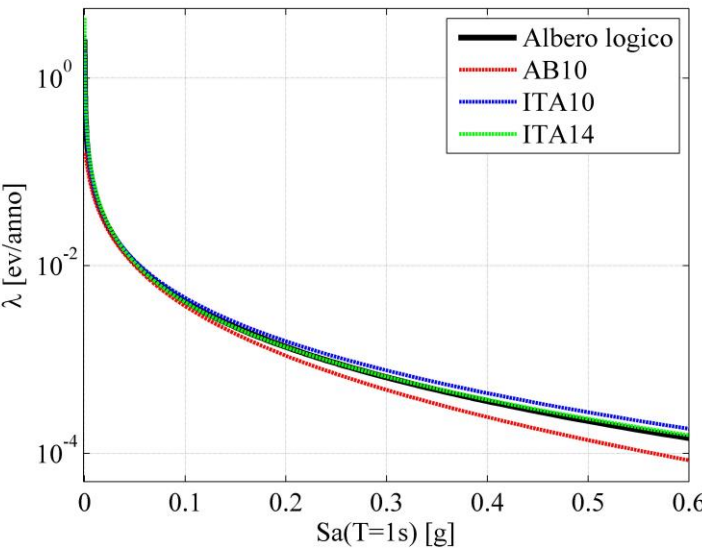
Curva di hazard - CASTEL S. VINC.



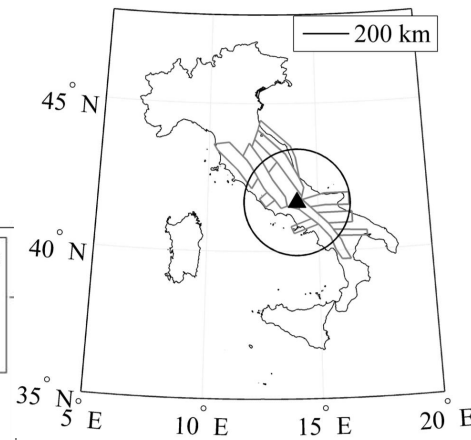
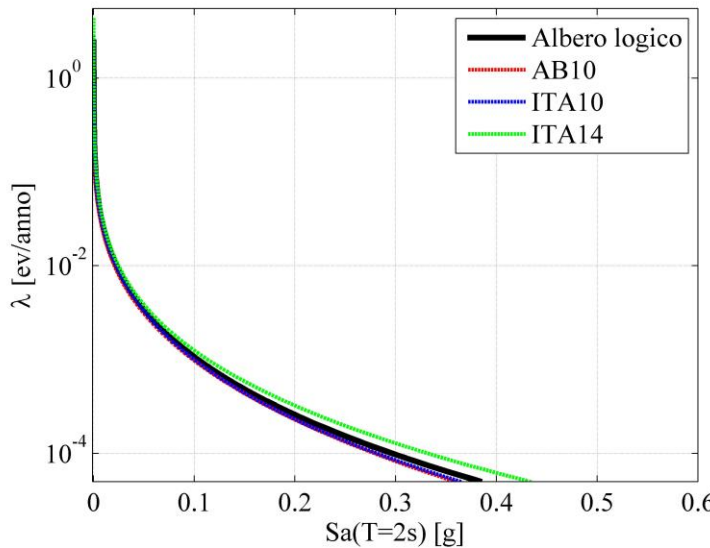
Curva di hazard - CASTEL S. VINC.



Curva di hazard - CASTEL S. VINC.



Curva di hazard - CASTEL S. VINC.



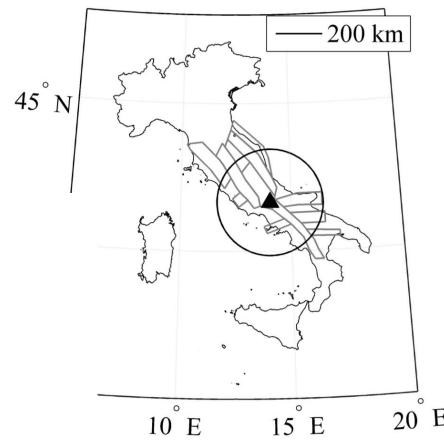
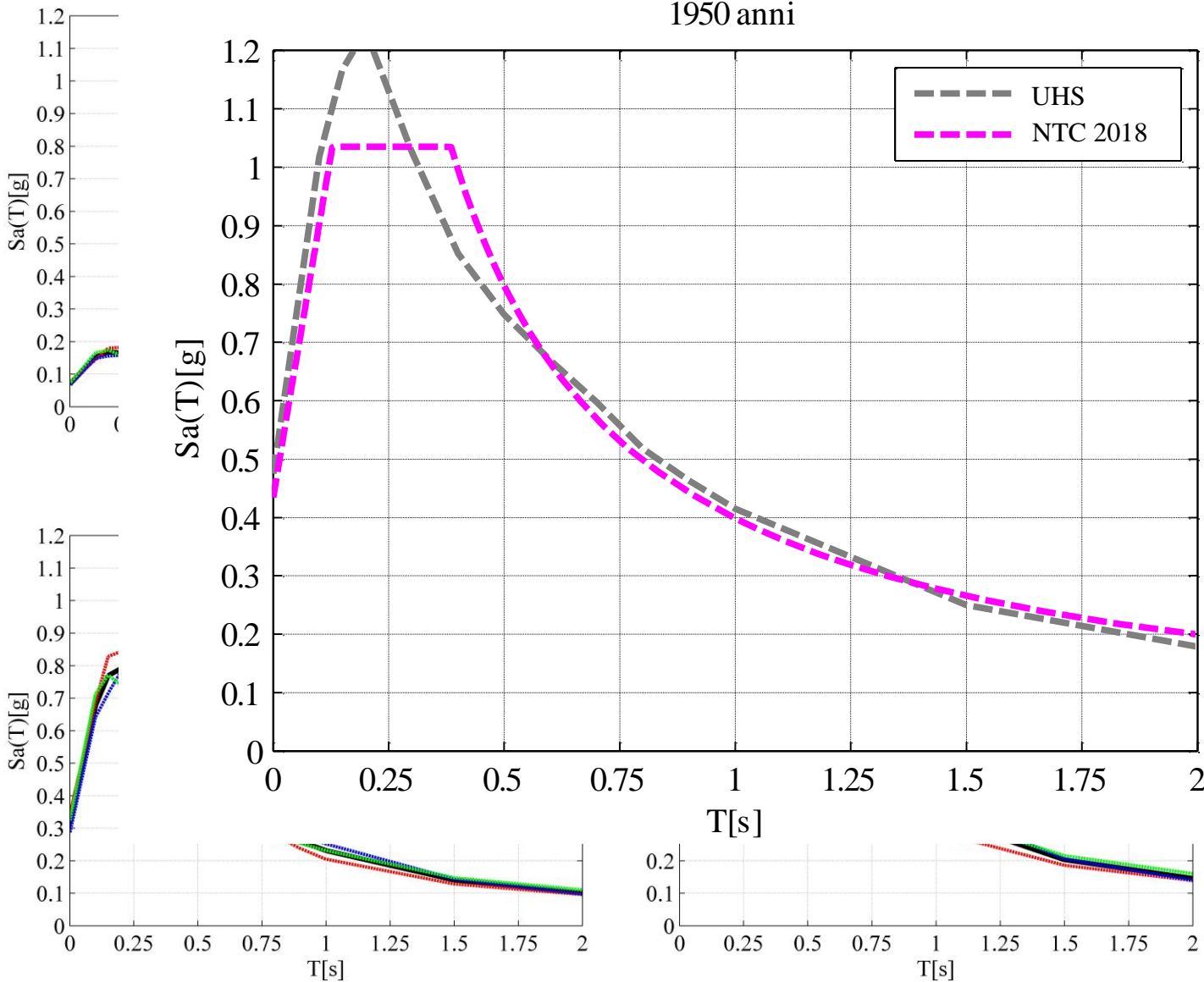
Definizione delle azioni sismiche di progetto via APPS.

Diga di Castel San Vincenzo (Isernia)

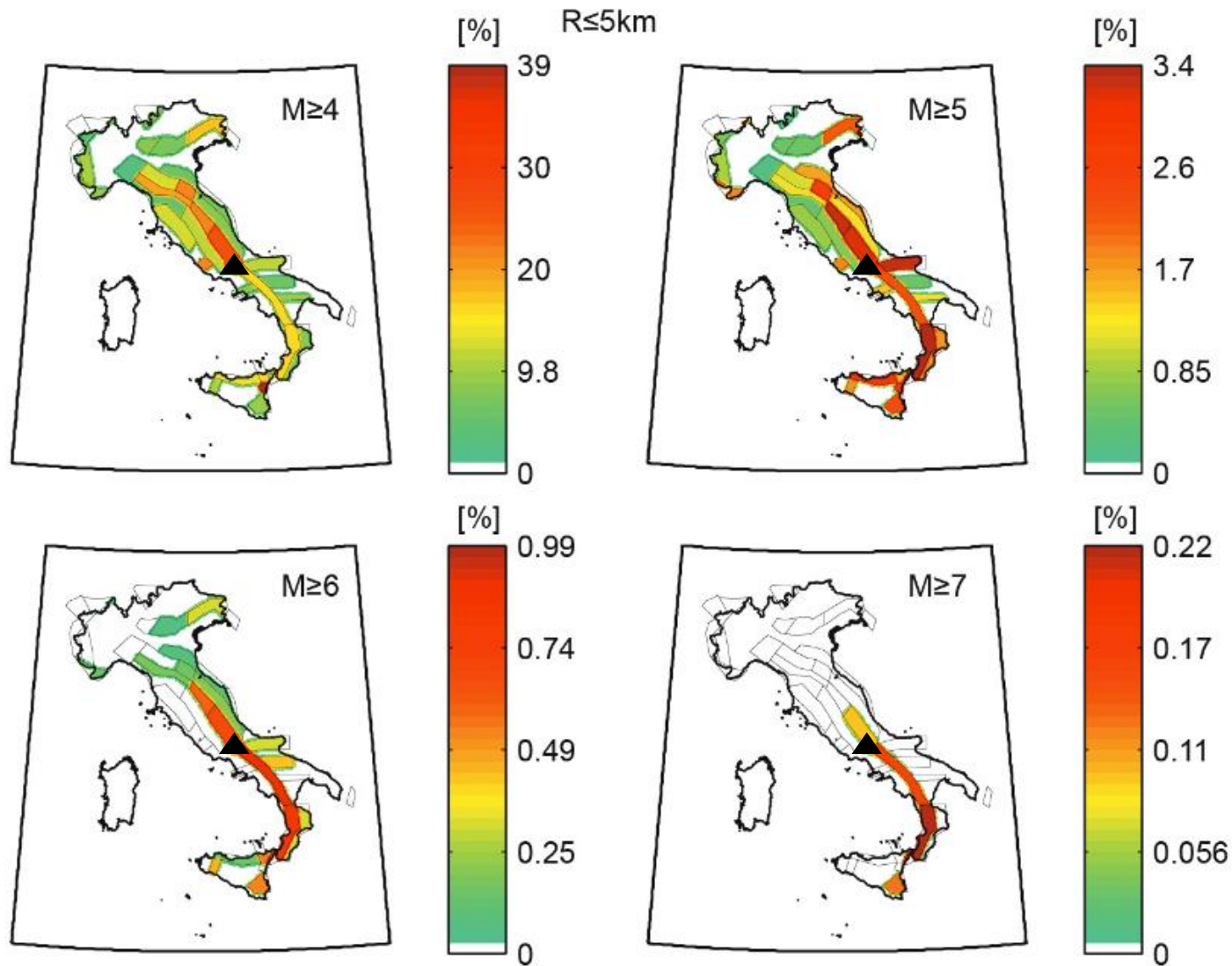
UHS - CASTEL S. VINC. T=60

UHS - CASTEL S. VINC. T=101

1950 anni

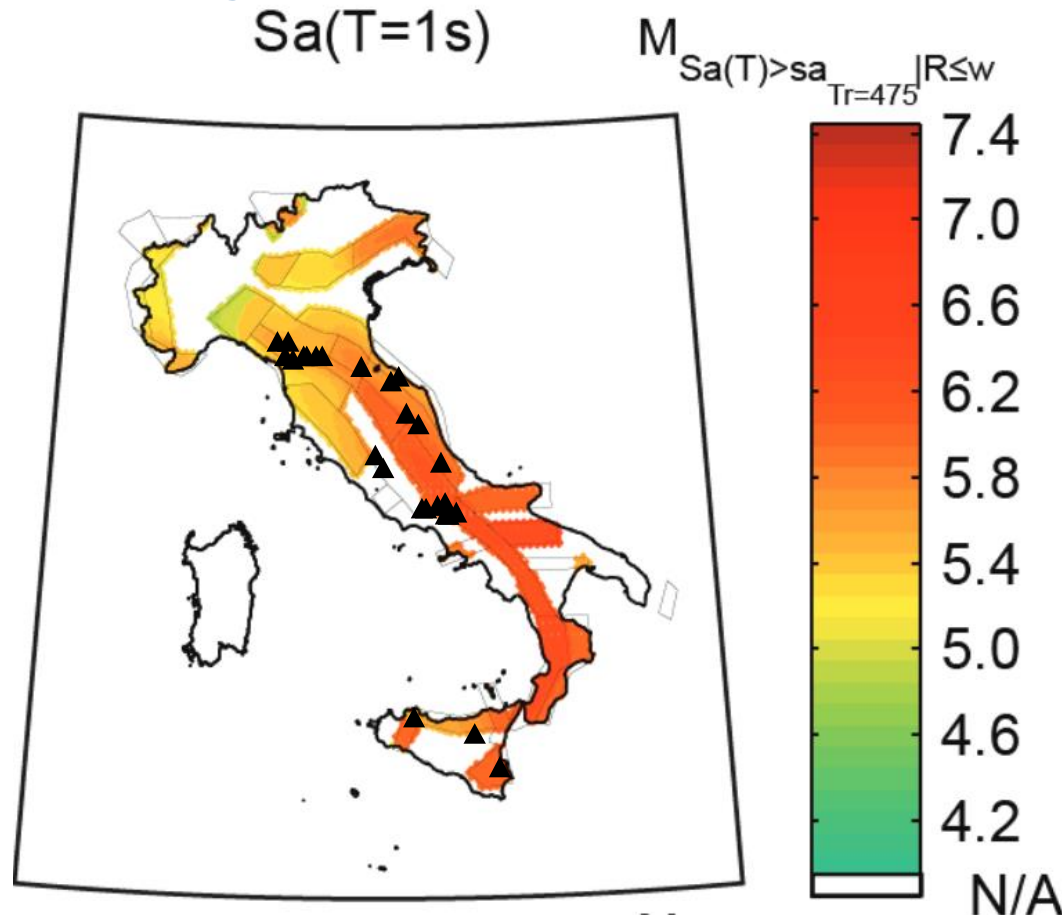


Probabilità di occorrenza di un terremoto entro 5km in 50 anni.



Terremoti forti

Magnitudo minima dei terremoti che, se occorrono entro 5km dal sito, causano probabilmente il superamento delle azioni di progetto.

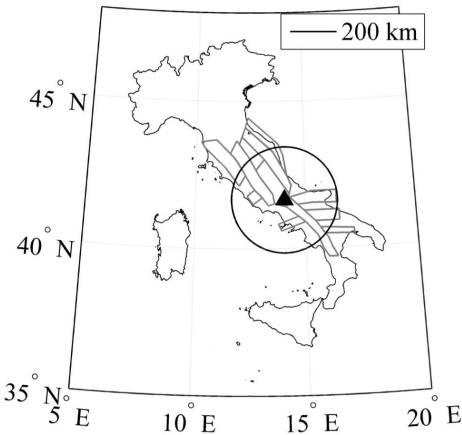


Ai siti delle dighe, una magnitudo maggiore di 5 è richiesta per osservare, più probabilmente che non, il superamento dell'ordinata $Sa(T=1s)$ con $T_r=475yr$.

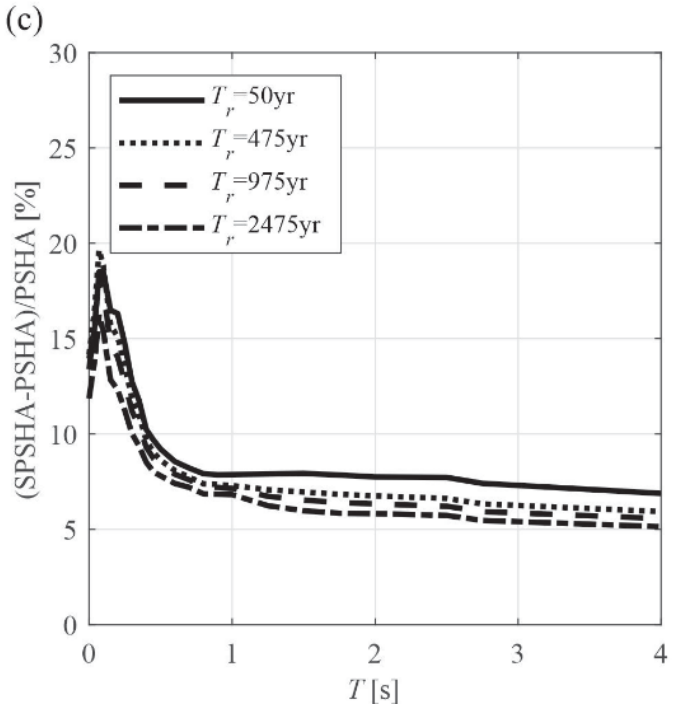
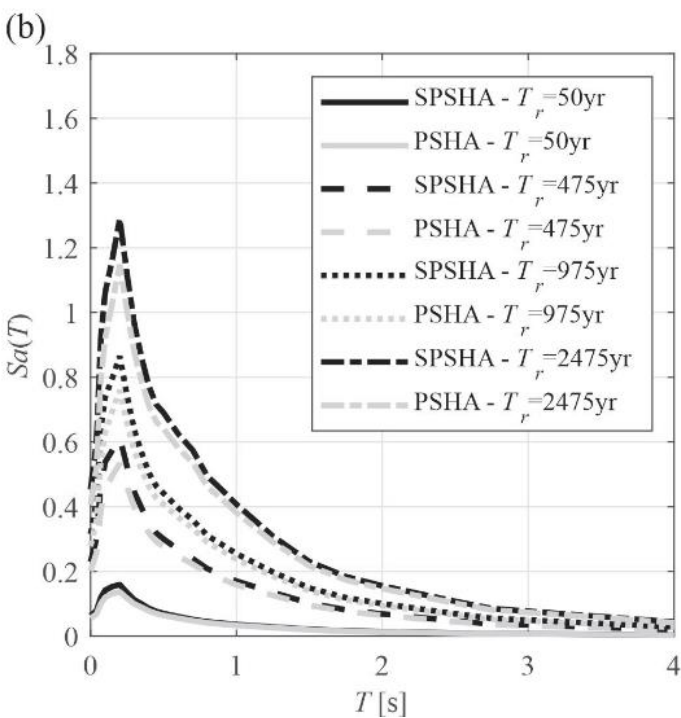
Definizione delle azioni sismiche tenendo conto delle repliche

La analisi di pericolosità tiene conto solo dei terremoti principali.

E' possibile tenere conto dell'effetto delle repliche nella definizione delle azioni sismiche (Iervolino et al., 2014)



Incrementi per la diga di Castel San Vincenzo



Da Chioccarelli, Cito, Iervolino, Visini, 2021).

Iervolino I., Giorgio M., Polidoro B. (2014) Sequence-based probabilistic seismic hazard analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(2): 1006-1012.

Chioccarelli E., Cito P., Visini F., Iervolino I. (2021) Sequence-based hazard analysis for Italy considering a grid seismic source model. Annals of Geophysics, 64, 2, SE214.

Pasquale Cito
Le dighe e le azioni sismiche
10 Aprile 2024, Napoli