

# CASSA DI ESPANSIONE DEL TORRENTE BAGANZA NEI COMUNI DI FELINO, SALA BAGANZA, COLLECCHIO E PARMA (PR-E-1047)

## PROGETTO ESECUTIVO

04	02/03/2021	Revisione per osservazioni Nota DGD n.21124 del 08-10-2020	MAGLIOCCHETTI	CASSANI	BERTERO
03	24/07/2020	Revisione per osservazioni DGD e validazione	MAGLIOCCHETTI	CASSANI	BERTERO
02	29/02/2020	Terza emissione	MAGLIOCCHETTI	CASSANI	BERTERO
00	15/05/2019	Prima emissione	MAGLIOCCHETTI	CASSANI	BERTERO
REV.	DATA	MODIFICHE	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZ.

## SISMICA RELAZIONE STUDIO SISMOTETTONICO

### ASSOCIAZIONE TEMPORANEA DI IMPRESE

MANDATARIA:

MANDANTI:



IL R.U.P.:

 Dott. Ing. Mirella Vergnani  
 (documento firmato digitalmente)

 Progettista responsabile integrazioni  
 prestazioni specialistiche e Direttore Tecnico  
 della mandataria.  
 Hydrodata S.p.A.  
 Ord. Ing. Torino N°7570L  
**Dott. Ing. Roberto Bertero**  
 (documento firmato digitalmente)

 Progettista/Progettisti responsabile elaborato  
 Rock Soil S.p.A.  
 Dott. Ing. Giovanna Cassani  
 Ord. Ing. Milano N°20997  
**Dott. Ing. Giovanna Cassani**  
 (documento firmato digitalmente)

 Progettista/Progettisti responsabile elaborato  
 Rock Soil S.p.A.  
 Dott. Fiorenza Pennino  
 Geologo specialista Albo N°1575 AP  
**Dott. Fiorenza Pennino**  
 (documento firmato digitalmente)


CODICE ELABORATO:

B	A	G	3	0	4	S	I	S	R	R	E	0	1	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

ID (1)

CAP. (2)

TIPO (3)

DOC. (4)

PROGR. (5-6) REV. (7)

SCALA

 MARZO  
2021

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE .....</b>	<b>7</b>
2.1	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL TERRITORIO .....	7
2.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOSTRUTTURALE DEL TERRITORIO .....	9
2.3	QUADRO GEODINAMICO .....	17
2.4	CARATTERIZZAZIONE SISMOTETTONICA .....	20
2.5	SISMICITÀ EMILIA ROMAGNA.....	21
2.6	SISMICITÀ STORICA DELLA PIANURA PADANA .....	23
2.7	DATI DI BASE DEGLI STUDI SISMOTETTONICI.....	36
2.7.1	<i>Domini sismotettonici in Italia.....</i>	<i>37</i>
2.8	ZONAZIONE SISMOGENETICA PROPOSTA .....	40
2.9	PRINCIPALI ZONE SISMOGENICHE .....	43
2.9.1	<i>Settore interno (Toscana occidentale e centrale).....</i>	<i>44</i>
2.9.2	<i>Fascia dei bacini intermontani (versante tirrenico della zona assiale della catena) .....</i>	<i>44</i>
2.9.3	<i>Versante Adriatico della zona assiale .....</i>	<i>45</i>
2.9.4	<i>Margini appenninico Padano .....</i>	<i>45</i>
2.9.5	<i>Zona dei fronti sepolti padani ed adriatici.....</i>	<i>46</i>
2.10	CRITERI DI DEFINIZIONE DELLE NUOVE ZONE SISMOGENETICHE .....	47
2.10.1	<i>Descrizione delle zone sismogenetiche individuate e riportate nella Tabella 1.....</i>	<i>49</i>
2.11	ZONAZIONE SISMOGENETICA Z2 PROPOSTA IN QUESTO STUDIO.....	53
2.12	SORGENTI SISMOGENETICHE DALLA BANCA DATI DISS .....	54
<b>3</b>	<b>ANALISI DELLA PERICOLOSITA' SISMICA – FAGLIAZIONE SUPERFICIALE .....</b>	<b>80</b>
3.1	FAGLIE CAPACI DALLA BANCA DATI ITHACA.....	81
3.1.1	<i>Considerazioni conclusive sull'area in esame .....</i>	<i>84</i>
<b>4</b>	<b>ANALISI DELLA PERICOLOSITA' SISMICA: SCUOTIMENTO ATTESO .....</b>	<b>101</b>
4.1	SITUAZIONE NORMATIVA E CATEGORIA DI SUOLO.....	101
4.2	PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS (PSHA) .....	104
4.3	ALBERO LOGICO .....	105
4.4	DEFINIZIONE DELLE SORGENTI: CATALOGO DEI TERREMOTI .....	107
4.4.1	<i>Omogeneizzazione delle scale di magnitudo.....</i>	<i>107</i>
4.4.2	<i>Eliminazione degli eventi doppi e “declustering” .....</i>	<i>107</i>
4.5	DEFINIZIONE DEGLI INTERVALLI DI COMPLETEZZA.....	108
4.6	DEFINIZIONE DELLE ZONE SISMOGENETICHE ZS .....	109
4.7	ZONAZIONE Z2 – DETERMINAZIONE DELLA PROFONDITÀ EFFICACE .....	111



4.7.1	<i>Simulazione numerica delle ZS</i>	111
4.8	MODELLO DI SISMICITÀ E MAGNITUDO MASSIMA	113
4.9	LEGGI DI ATTENUAZIONE	115
4.9.1	<i>Bindi et al. (2011)</i>	116
4.9.2	<i>Boore et al. (2014)</i>	117
4.9.3	<i>Akkar et al. (2014)</i>	118
4.9.4	<i>Cauzzi et al. (2015)</i>	119
4.9.5	<i>Massa et al. (2008)</i>	120
4.10	CURVE DI PERICOLOSITÀ: RIEPILOGO DELLE ANALISI EFFETTUATE E RISULTATI	121
4.11	FASE 1: SINTESI DEI RISULTATI	122
4.12	FASE 2: ANALISI DI SENSIBILITÀ - SINTESI DEI RISULTATI	125
4.12.1	<i>Max+0.3 e "b" non corretto</i>	125
4.12.2	<i>Intervalli di completezza globali</i>	127
<b>5</b>	<b>CONSIDERAZIONI E CONCLUSIONI FINALI</b>	<b>131</b>
5.1	CONSIDERAZIONI— RISCHIO SCUOTIMENTO SISMICO	131
5.1.1	<i>Influenza delle singole assunzioni sui risultati</i>	132
5.2	CONCLUSIONI ALL'ANALISI PSHA —	134
5.2.1.	RISCHIO SCUOTIMENTO SISMICO — SPETTRI ORIZZONTALI	134
5.2.2.	— RISCHIO SCUOTIMENTO SISMICO — SPETTRI VERTICALI	135
5.2.1.1	Risultati PSHA componente verticale (Bindi et al. 2011)	135
5.2.1.2	Valutazione dello spettro verticale secondo Newmark (1973)	136
<b>6</b>	<b>ALLEGATI</b>	<b>138</b>
6.1	INTERVALLI DI COMPLETEZZA	138
6.1.1	<i>ZS9 – Intervalli di completezza</i>	138
6.1.2	<i>Z2 – Intervalli di completezza</i>	156
6.1.3	<i>ZS9 – Analisi di sensitività – Intervalli di completezza globali</i>	167
6.2	PROFONDITÀ EFFICACE— ZONAZIONE Z2	168
6.3	TASSI DI SISMICITÀ	173
6.3.1	<i>Tassi di sismicità – ZS9</i>	173
6.3.2	<i>Tassi di sismicità – Z2</i>	181
6.3.3	<i>Tassi di sismicità – analisi di sensitività – intervalli di completezza globali</i>	186
6.4	SPETTRI DI RISPOSTA	194
6.4.1	<i>Spettri di risposta ZS9 – classe A</i>	194
6.4.1.1	Spettri di risposta ZS9 – classe A – Vr=50 anni – Tr=475 anni – Pr = 10%	194
6.4.1.2	Spettri di risposta ZS9 – classe A – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10%	194
6.4.1.3	Spettri di risposta ZS9 – classe A – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5%	195

6.4.2	<i>Spettri di risposta ZS9 – classe B</i> .....	195
6.4.2.1	Spettri di risposta ZS9 – classe B – Vr=50 anni – Tr=475 anni – Pr = 10% .....	195
6.4.2.2	Spettri di risposta ZS9 – classe B – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10% .....	196
6.4.2.3	Spettri di risposta ZS9 – classe B – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5% .....	196
6.4.3	<i>Spettri di risposta Z2 – classe A</i> .....	197
6.4.3.1	Spettri di risposta Z2 – classe A – Vr=50 anni – Tr=475 anni – Pr = 10%.....	197
6.4.3.2	Spettri di risposta Z2 – classe A – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10%.....	197
6.4.3.3	Spettri di risposta Z2 – classe A – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5%.....	197
6.4.4	<i>Spettri di risposta Z2 – classe B</i> .....	198
6.4.4.1	Spettri di risposta Z2 – classe B – Vr=50 anni – Tr=475 anni – Pr = 10% .....	198
6.4.4.2	Spettri di risposta Z2 – classe B – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10% .....	198
6.4.4.3	Spettri di risposta Z2 – classe B – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5% .....	199
6.4.5	<i>Spettri di risposta Z2_faglie – classe A</i> .....	200
6.4.5.1	Spettri di risposta Z2_faglie – classe A – Vr=50 anni – Tr=475 anni – Pr = 10% .....	200
6.4.5.2	Spettri di risposta Z2_faglie – classe A – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10% .....	200
6.4.5.3	Spettri di risposta Z2_faglie – classe A – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5% .....	201
6.4.6	<i>Spettri di risposta Z2_faglie – classe B</i> .....	201
6.4.6.1	Spettri di risposta Z2_faglie – classe B – Vr=50 anni – Tr=475 anni – Pr = 10% .....	201
6.4.6.2	Spettri di risposta Z2_faglie – classe B – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10% .....	202
6.4.6.3	Spettri di risposta Z2_faglie – classe B – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5% .....	202
6.4.7	<i>Spettri di risposta ALBERO LOGICO</i> .....	203
6.4.7.1	Spettro di risposta medio pesato – classe A – Vr=50 anni – Tr 475 anni – Pr = 10%.....	203
6.4.7.2	Spettro di risposta medio pesato – classe A – Vr=150 anni – Tr 1424 anni – Pr = 10%.....	204
6.4.7.3	Spettro di risposta medio pesato – classe A – Vr=150 anni – Tr 2475 anni – Pr = 5%.....	205
6.4.7.4	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=50 anni – Tr 475 anni – Pr = 10%.....	206
6.4.7.5	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 1424 anni – Pr = 10%.....	207
6.4.7.6	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 2475 anni – Pr = 5%.....	208
6.4.8	<i>Spettri di risposta della componente verticale ALBERO LOGICO (Mmax+0.3 e “b” non corretto)</i> .....	209
6.4.8.1	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 90 anni – Pr = 81%.....	209
6.4.8.2	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 151 anni – Pr = 63%.....	209
6.4.8.3	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 1424 anni – Pr = 10%.....	210
6.4.8.4	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 2475 anni – Pr = 5%.....	210
6.4.9	<i>Analisi di sensitività – Spettri di risposta – Mmax+0.3 &amp; “b” non modificato</i> .....	211
6.4.9.1	Spettro di risposta medio pesato – classe A – Vr=50 anni – Tr 475 anni – Pr = 10%.....	211
6.4.9.2	Spettro di risposta medio pesato – classe A – Vr=150 anni – Tr 90 anni – Pr = 81%.....	212
6.4.9.3	Spettro di risposta medio pesato – classe A – Vr=150 anni – Tr 151 anni – Pr = 63%.....	213
6.4.9.4	Spettro di risposta medio pesato – classe A – Vr=150 anni – Tr 1424 anni – Pr = 10%.....	214
6.4.9.5	Spettro di risposta medio pesato – classe A – Vr=150 anni – Tr 2475 anni – Pr = 5%.....	215
6.4.9.6	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=50 anni – Tr 475 anni – Pr = 10%.....	216
6.4.9.7	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 90 anni – Pr = 81%.....	217

6.4.9.8	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 151 anni – Pr = 63% .....	218
6.4.9.9	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 1424 anni – Pr = 10% .....	219
6.4.9.10	Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 2475 anni – Pr = 5% .....	220
6.4.10	<i>Analisi di sensitività - Spettri di risposta ZS9 – Magnitudo Mmax &amp; Mmax+0.3 – CONFRONTO</i> .....	221
6.4.10.1	Classe A - Spetto a Vr=50 anni, Tr=475 anni, Pr=10% .....	221
6.4.10.2	Classe A - Spetto a Vr=150 anni, Tr=1424 anni, Pr=10% .....	221
6.4.10.3	Classe A - Spetto a Vr=150 anni, Tr=2475 anni, Pr=5% .....	222
6.4.10.4	Classe B - Spetto a Vr=50 anni, Tr=475 anni, Pr=10% .....	222
6.4.10.5	Classe B - Spetto a Vr=150 anni, Tr=1424 anni, Pr=10% .....	223
6.4.10.6	Classe B - Spetto a Vr=150 anni, Tr=2475 anni, Pr=5% .....	223
6.4.11	<i>Analisi di sensitività - Spettri di risposta ZS9 – Intervalli di completezza globali – CONFRONTO</i> .....	224
6.4.11.1	Classe A - Spetto a Vr=50 anni, Tr=475 anni, Pr=10% .....	224
6.4.11.2	Classe A - Spetto a Vr=150 anni, Tr=1424 anni, Pr=10% .....	224
6.4.11.3	Classe A - Spetto a Vr=150 anni, Tr=2475 anni, Pr=5% .....	225
6.4.11.4	Classe B - Spetto a Vr=50 anni, Tr=475 anni, Pr=10% .....	225
6.4.11.5	Classe B - Spetto a Vr=150 anni, Tr=1424 anni, Pr=10% .....	225
6.4.11.6	Classe B - Spetto a Vr=150 anni, Tr=2475 anni, Pr=5% .....	226
6.5	TABELLE RIASSUNTIVE ANALISI DI SENSITIVITÀ .....	227
6.6	LEGGE DI ATTENUAZIONE DI MASSA ET AL. (2008) .....	229
6.7	FAGLIAZIONE SUPERFICIALE – BANCA DATI ITHACA .....	254
<b>7</b>	<b>RIFERIMENTI</b> .....	<b>255</b>

## 1 PREMESSA

La presente relazione recepisce quanto riportato nelle "Osservazioni Istruttorie sugli elaborati del P.E. aggiornato a Luglio 2020" documento redatto dalla *Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche*.

Nelle osservazioni al capitolo "3. ASPETTI SISMOTETTONICI E SISMICI" si dice che:

Nelle Osservazioni istruttorie sugli elaborati del Progetto Esecutivo Febbraio 2020 si osservava che:

*"Lo scenario risultante dalla citata Fase 1 e le conclusioni dello Studio sismotettonico non sono state poi prese esattamente a riferimento nella relazione sismica generale e nelle verifiche sismiche, senza che siano state esplicitate ulteriori considerazioni"*

Il nuovo studio conferma integralmente i contenuti dello studio sismotettonico febbraio 2020 integrandoli con una valutazione della pericolosità sismica (PSHA) per la componente verticale (§ 5.2.2.) derivata dalla GMPE di Bindi et al. 2011 (c.d. ITA10) nella condizione di analisi di sensibilità di Fase 2 ( $M_{max}+0.3$ ). L'analisi comparativa dei valori di PGAV stimati con la ITA10 con quelli ottenuti con il metodo proposto da Newmark (1973) esposti nella precedente versione dello studio sismotettonico, evidenzia per tutti i periodi T analizzati, ordinate spettrali ricavate con il metodo proposto da Newmark superiori a quelle derivate dalla ITA10: sono quindi confermati i valori di PGAV esposti nello studio febbraio 2020 (v. Tab. 15) ritenendo tale scelta a favore di sicurezza.

Tabella 15 – Valori di PGAV ottenuti dall'applicazione del rapporto di 2/3 valutato dallo studio di Newmark (1973)

	PGA <sub>v</sub> (g)			
	SLC	SLV	SLD	SLO
V = 2/3 H (Newmark (1973))	0.240	0.192	0.069	0.053

Il nuovo studio conferma, inoltre, che *"... per i soli manufatti, si definisce uno scenario di riferimento per le verifiche allo SLC in cui si sono rimosse alcune delle ipotesi cautelative alla base dello studio sismotettonico e citate in precedenza (magnitudo incrementata e b corretti): questo scenario fa riferimento alle risultanze della fase 1 dello studio (sintesi nel cap. 4.1) in cui lo spettro SLC è risultato meno gravoso di quello di Normativa. Le analisi sismiche pseudostatiche dei soli manufatti, per le quali si rimanda alle specifiche relazioni di calcolo, sono state quindi condotte considerando gli spettri di risposta allo SLC di Normativa"*.

Nelle proprie controdeduzioni i Progettisti precisano che la Relazione sismica generale (analisi di risposta sismica locale, v. p.to successivo) ha carattere di studio comparativo e non sostitutivo dei risultati dello studio sismotettonico: non sono espresse ulteriori considerazioni riguardo alla scelta degli input sismici utilizzati nelle verifiche sismiche delle opere (esplicitata per il metodo pseudostatico).

In questa revisione è stata eliminata la precisazione relativa ai soli manufatti per i quali si era deciso di eliminare alcune ipotesi cautelative alla base dello studio sismotettonico e si erano condotte le analisi pseudostatiche allo SLC secondo gli Spettri di Norma. Il riferimento anche per tali verifiche sarà quindi l'esito dello Studio Sismotettonico.

Il presente documento descrive il quadro geologico – geostrutturale e sismotettonico e lo studio simo-tettonico dell'area interessata dal progetto della Cassa di espansione del Torrente Baganza in base a quanto richiesto al p.to

C.7.7.1 delle Norme Tecniche di cui al D.M. 26/06/2014. Per la caratterizzazione dei suoli (categoria) alla luce di quanto richiesto da NTC2008 e per l'analisi di RSL si rimanda alla relazione sismica allegata al presente progetto.

La presente revisione è stata elaborata a seguito del parere specialistico del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, divisione Dighe del 27.06.2019 (n. registro 0016231) e come integrazione di quanto già emesso nella precedente emissione (spettri di accelerazione verticale e spettri di accelerazione orizzontale anche per gli stati limite SLD ed SLO).

Per quanto riguarda il primo aspetto si riporta il parere del Ministero evidenziando i seguenti stralci:

- *“il competente Ufficio ha giudicato i risultati ottenuti con le analisi denominate di II Fase estremamente cautelativi, per quanto derivati da un approccio metodologico concettualmente coerente con quanto indicato nelle linee guida emanate da questa Direzione Generale”.*
- *“lo studio può essere posto alla base delle verifiche sismiche e della progettazione”;*

Alla luce di quanto suggerito dalle linee guida infatti “devono essere prese in considerazione le incertezze relative a tutti i dati di input, anche per la valutazione di scenari deterministici, per evitare sottostime degli scuotimenti”.

Alla luce di ciò si ritiene che in generale gli spettri di riferimento a conclusione di questo studio siano quelli che assumono i richiesti margini di sicurezza (capitolo 6.4.9.) per tenere conto delle incertezze in gioco riscontrate durante le elaborazioni: in particolare si assumono come spettri di riferimento quelli compatibili con la scelta della magnitudo massima incrementata di 0.3, come suggerito dalle linee guida INGV, intervalli di completezza specializzati, valori di b non corretti, che corrispondono alle tre macro-voci che influenzano maggiormente l'esito dello studio come meglio specificato nel seguito.

Nel seguito viene fornito:

- un inquadramento del quadro geodinamico e dell'assetto geologico - strutturale dell'area di interesse,
- un'analisi dei dati contenuti nei principali data-base di carattere sismologico e sismotettonico
- ed infine, in particolare, una descrizione delle caratteristiche delle faglie attive e delle strutture sismogenetiche note in un'intorno dall'area di progetto.

L'analisi deriva sostanzialmente dallo studio dei seguenti documenti che costituiscono la più recente base conoscitiva sull'argomento:

- Carta sismotettonica e relative “Note illustrative” curata dal “Servizio geologico, sismico e dei suoli” della Regione Emilia-Romagna nell'anno 2004;
- banche dati DISS ed INGV e relative pubblicazioni concernenti la sismologia storica e sorgenti sismogenetiche;
- Linee Guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe (Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Roma);
- Pubblicazioni scientifiche curate dalla Regione Emilia Romagna relative all'assetto tettonico ed alla pericolosità sismica dell'Appennino Settentrionale e della Pianura Padana;
- Letteratura scientifica relativa agli Studi Sismotettonici della Regione Emilia Romagna e della Pianura Padana
- Dati relativi al Progetto Definitivo.



## 2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE

### 2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL TERRITORIO

L'area in esame si trova in Emilia Romagna e precisamente in Provincia di Parma nel territorio dei seguenti Comuni: Parma, Collecchio, Felino e Sala Baganza. I centri abitati più vicini sono:

- Sala Baganza, a sud-ovest dell'area di progetto;
- Casale di Felino (Comune di Felino), a sud-est dell'area di progetto;
- Carignano (Comune di Parma), a est dell'area di progetto.



Figura 1 – Inquadramento territoriale



Figura 2 – Inserimento dell'opera

Il territorio dell'Emilia-Romagna è costituito dal versante padano dell'Appennino settentrionale e dalla Pianura Padana a sud del Po; il limite regionale coincide per lunghi tratti con lo spartiacque appenninico verso sud e con il corso del Po verso nord (Figura 6).

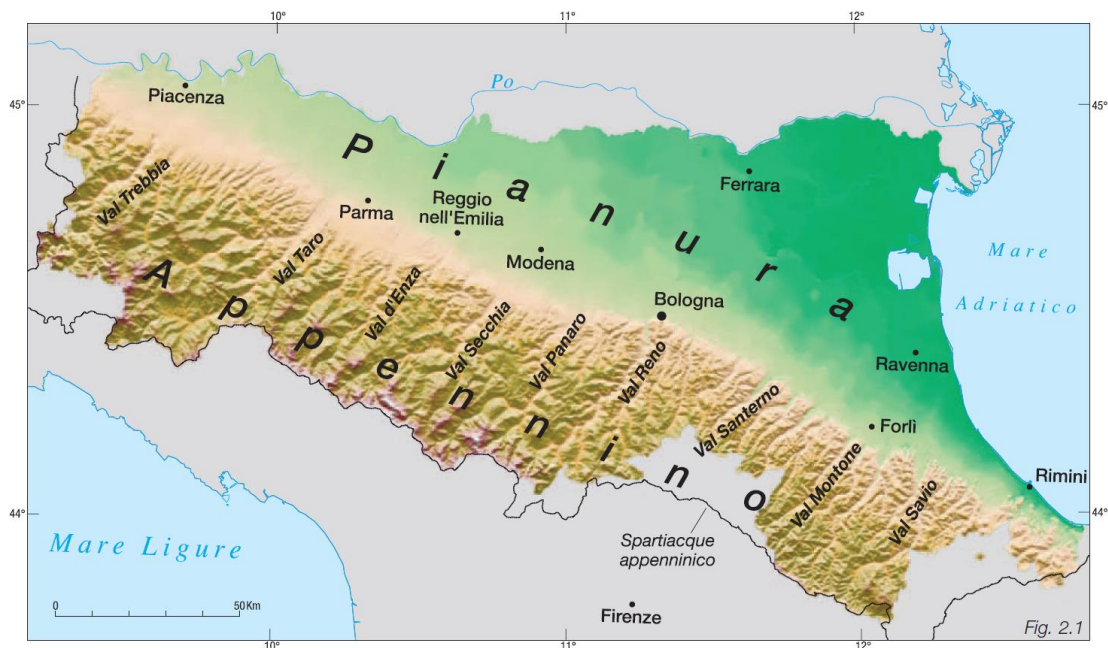


Figura 3 - Geografia fisica Emilia Romagna



## 2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOSTRUTTURALE DEL TERRITORIO

La Pianura Padana può essere considerata, in generale, come un'area di avanfossa che si è originata per la subduzione verso ovest della microplacca padano-adriatica al di sotto dell'orogene appenninico. La microplacca padano-adriatica, è delimitata dal fronte degli accavallamenti sud alpini a Nord e dinarici ad Est. La subduzione verso Ovest, in direzione opposta al flusso del mantello, provoca l'arretramento verso Est della placca in subduzione. Questo fenomeno (slab retreat) è responsabile della progressiva migrazione del sistema catena-avanfossa verso l'avampaese ed in parte della subsidenza a cui è sottoposta l'intera area (e.g., Royden, 1988; Doglioni, 1991; Scrocca et al., 2007). Nella parte meridionale della Pianura Padana, al di sotto della potente successione di sedimenti plio-pleistocenici, è ubicato il fronte dell'Appennino settentrionale, che non coincide con il fronte morfologico della catena. Tale fronte è costituito da un sistema a pieghe e sovrascorrimenti di età terziaria sviluppatosi al tetto della zona di subduzione (e.g., Pieri & Groppi, 1981; Bigi et al., 1992; Boccaletti et al., 2004; Cuffaro et al., 2010; Fantoni & Franciosi, 2010; Boccaletti et al., 2011).

I dati geologici attualmente disponibili sulle strutture sepolte della Pianura Padana derivano principalmente dai rilievi di sismica a riflessione, realizzati per la ricerca degli idrocarburi negli ultimi decenni (e.g., Pieri & Groppi, 1981; Pieri, 1983; Fantoni & Franciosi, 2010; Ghielmi et al., 2010).

I dati mostrano che le strutture tettoniche associate al fronte dell'Appennino settentrionale non presentano un andamento lineare, ma si organizzano in tre grandi archi (Figura 4 - L'area a progetto ricade all'interno delle Pieghe Emiliane.):

- 1) l'arco del Monferrato è il più occidentale, collocato tra Torino ed Alessandria;
- 2) l'arco delle Pieghe Emiliane, che si estende a nord di Piacenza;
- 3) l'arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole, attivo principalmente dal Pliocene superiore al Pleistocene, che si estende fino a nord di Ferrara e rappresenta l'elemento strutturale più esterno dell'Appennino settentrionale, sovrascorso sulla monoclinale pedalpina immergente verso sud-ovest.

L'arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole è, a sua volta, costituito da un complesso di strutture che può essere suddiviso in tre gruppi minori:

- le Pieghe Ferraresi, che sono quelle più esterne;
- le pieghe Romagnole, collocate verso l'interno della catena;
- le Pieghe Adriatiche, situate tra le Pieghe Romagnole e la monoclinale Adriatica.

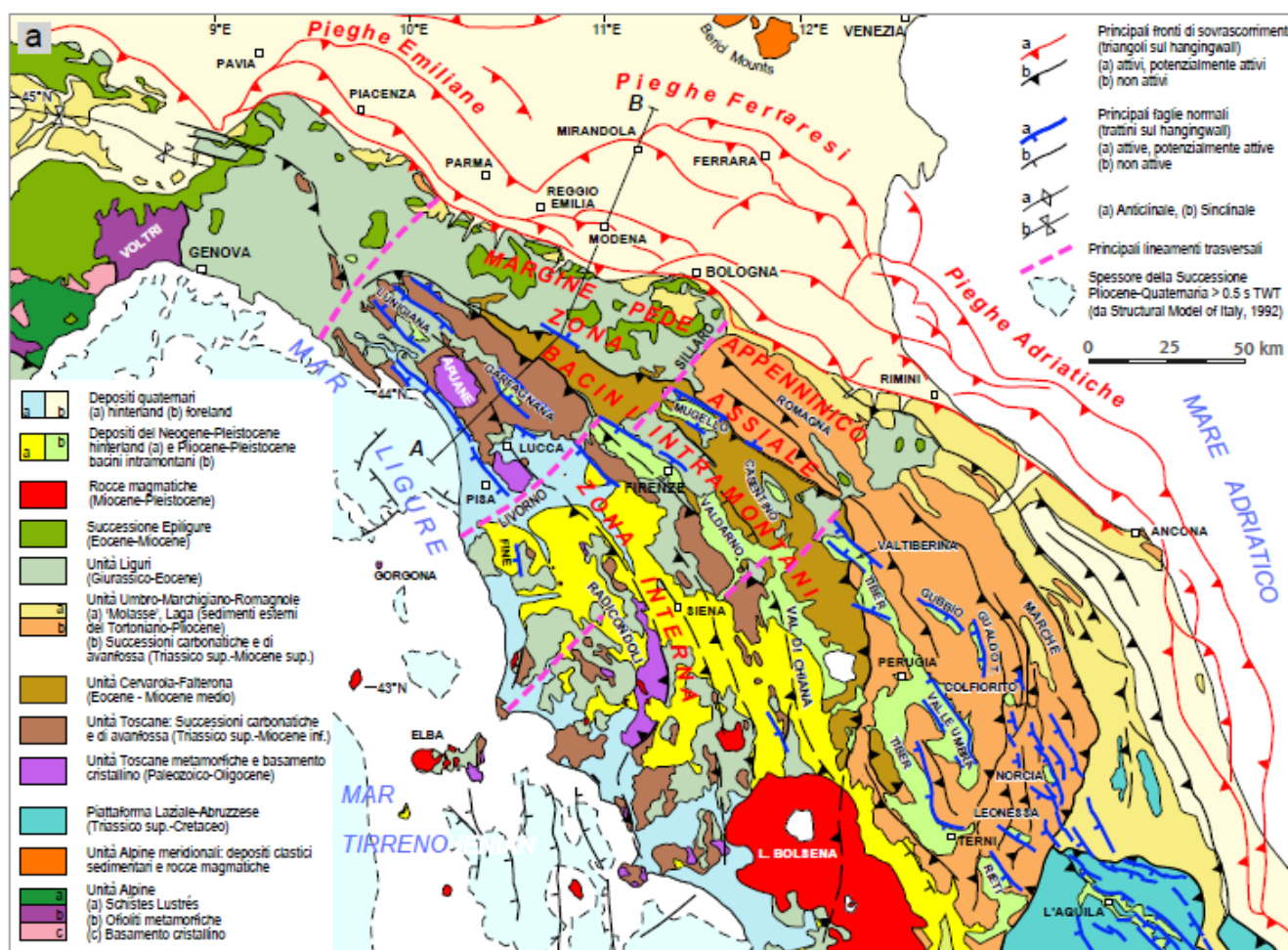


Figura 4 - L'area a progetto ricade all'interno delle Pieghe Emiliane.

Il bacino Padano è riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin-tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica. Sebbene la fase principale di compressione sia iniziata nel Messiniano, i primi sedimenti clastici si sono depositi nell'Oligocene superiore, con una provenienza principale dalle Alpi meridionali.

I depositi sin-tettonici di margine attivo poggiano su unità carbonatiche di età mesozoica e terziaria inferiore di margine passivo, costituite prevalentemente da rocce calcaree e dolomitiche il cui ambiente deposizionale varia da piana di marea-mare poco profondo fino a mare profondo.

La base della successione stratigrafica è invece costituita dal basamento ercinico e da formazioni continentali e di piattaforma del Permiano e del Triassico inferiore-medio, a cui si intercalano talora corpi vulcanici intra-sedimentari.

Il prisma di accrezione appenninico mostra piani di scollamento ubicati a differenti livelli stratigrafici: un piano di scollamento superficiale collocato entro la copertura silicoclastica terziaria alla base del Miocene ed uno più profondo ubicato alla base della successione carbonatica Trias superiore (Bally et al., 1985; Carminati et al., 2010). I due livelli di scollamento sono collegati da rampe che attraversano la successione carbonatica trasferendo il rigetto dal livello più profondo verso il livello più superficiale. Inoltre, alcuni ricercatori ipotizzano anche un coinvolgimento del basamento nella strutturazione della catena (e.g., Picotti & Pazzaglia, 2008; Fantoni & Franciosi, 2010; Boccaletti et al., 2011). Le strutture del fronte consistono in fault-related folds associate a piani di sovrascorrimento i cui angoli d'inclinazione sono mediamente tra i 20° e 30°, con valori tendenzialmente crescenti da Nord verso Sud. In prossimità

del margine pede-appenninico le superfici di sovrascorrimento sono infatti più inclinate, con angoli che arrivano anche a superare i 40° (Pieri, 1983; Bally et al., 1985; Castellarin et al., 1985; Carminati et al., 2010). La deformazione del settore padano dell'Appennino settentrionale ha avuto inizio nel Messiniano, con una fase di particolare intensità nel corso del Pliocene, ma l'insieme delle evidenze geologiche e geofisiche disponibili (descritte nel seguito) documenta in modo chiaro la perdurante attività di diverse fasce di sovrascorrimenti.

L'area in esame si trova ca 3-4 Km a sud dell'attuale cerniera strutturale (CS), a sua volta collocata a monte del fronte esterno delle Pieghe Emiliane. È importante ricordare, infatti, che a monte della CS attiva non si può creare nuovo spazio per la sedimentazione a carico della subsidenza tettonica. A monte della CS attiva la sedimentazione è consentita solo per riempire spazi geomorfologicamente esistenti e definiti. Questa dinamica sedimentaria, in particolare, è iniziata con la comparsa dell'apice di conoide del Torrente Baganza che registra l'ultima migrazione significativa della CS nel Pleistocene medio, portando uno sconvolgimento del reticolo idrografico precedente. La zona in esame è stata coinvolta in eventi tettonici recenti e questo è confermato dall'esame della carta geologica di sottosuolo del Foglio 199 e con l'ausilio di sezioni stratigrafiche di dettaglio create ad hoc per l'interpretazione di sottosuolo: si osserva che in concomitanza dell'area di studio sono presenti blande ondulazioni (antiformi e sinformi) che interessano la successione sedimentaria del Sintema di Costamezzana ed in parte condizionano l'assetto della base di AEI e di AES e la loro architettura deposizionale. Infatti all'interno di AES, a causa dall'assetto strutturale sopracitato, i cicli complessi di incisione fluviale (attivazione) e riempimento ghiaioso (disattivazione) che registrano le continue fluttuazioni del punto neutro, si giustappongono o si erodono, preservando a volte solo la parte basale del ciclo. In particolare nell'area di cava attuale sembra esserci, analizzando i sondaggi presenti, un ispessimento delle ghiaie che passano da una potenza minima di 4-5 m a nord ad uno spessore di circa 7-8 m verso sud; questo ispessimento potrebbe riflettere l'assetto strutturale dato che lo spessore minimo si trova in concomitanza di un asse di anticlinale sepolto.

Il territorio dell'Emilia-Romagna è costituito dal versante padano dell'Appennino settentrionale e dalla Pianura Padana a sud del Po; il limite regionale infatti coincide per lunghi tratti con lo spartiacque appenninico verso sud e con il corso del Po verso nord.

Pur essendo due ambienti geomorfologici ben distinguibili, l'Appennino e la Pianura Padana sono strettamente correlati (Figura 6). Il fronte della catena appenninica non coincide con il limite morfologico catena-pianura (margine appenninico-padano) ma è individuabile negli archi esterni delle Pieghe Emiliane e Ferraresi sepolte dai sedimenti quaternari padani (Figura 6).

Quindi, il vero fronte appenninico, che si trova circa all'altezza del Po, sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta (Figura 7).

Questo significa che l'evoluzione del territorio dell'Emilia-Romagna coincide con l'evoluzione del settore esterno della catena nord-appenninica.

L'Appennino settentrionale è una catena a thrusts facente parte del sistema alpino, formatosi in gran parte a spese della placca Adriatica per l'interazione fra le placche Africana ed Euroasiatica. Si tratta di un edificio formato da una pila di unità tettoniche riferibili a due principali domini (Figura 8):

- il dominio Ligure, i cui sedimenti si sono depositi originariamente su crosta oceanica (Liguridi s.l.)
- il dominio Tosco-Umbro-Marchigiano, rappresentato da successioni del margine continentale dell'Adria la cui età inizia a partire dal Triassico.



Dal punto di vista tettonico si possono riconoscere varie fasi che hanno portato alla costruzione dell'impianto strutturale attuale ed in particolare: una prima fase più antica che si sviluppa nel Terziario basso e raggiunge il suo apice nell'Eocene medio (fase Ligure); una seconda fase che si sviluppa nel Miocene inferiore medio (Burdigaliano).

L'evoluzione tettonica si sviluppa attraverso una serie di superfici di accavallamento, che portano alla sovrapposizione delle unità sedimentarie, che ricoprivano il fondo oceanico subdoto. A questi thrusts eocenici e burdigaliani sono correlabili deformazioni a carattere prevalentemente duttile, rappresentate da sistemi di pieghe, anche molto importanti.

Si può quindi considerare l'impianto strutturale di questa porzione di Appennino come un edificio a falde di ricoprimento sviluppatosi in più fasi.

Dal Cretaceo (circa 100 MA) fino ai giorni nostri la regione padana ed appenninica è stata soggetta ad alterne fasi di compressione e stasi tettoniche, instaurate dalle interazioni tra la placca africana e la placca euroasiatica e, più in dettaglio, dalla microplacca dell'Arco Appenninico Settentrionale e dalla microplacca Adriatica. A partire dall'Oligocene superiore inizia la formazione della catena dell'Appennino settentrionale attraverso il meccanismo di sovrascorrimento della microplacca dell'Arco Appenninico Settentrionale a scapito della microplacca Adriatica e della sua copertura sedimentaria, che instaura un processo di deformazione continentale polifasica. In particolare, nell'ambito di tale processo, si possono riconoscere due stadi compressivi principali:

- primo stadio compressivo: si sviluppa dall'Oligocene superiore al Pliocene inferiore, durante il quale è definita la strutturazione dell'arco dell'Appennino Settentrionale (stadio collisionale) e, in zona antistante (avanfossa padana), la delineazione del bacino perisuturale padano – adriatico (Bally e Snelson 1980); all'inizio del Pliocene tale bacino costituiva un grande golfo invaso dalle acque marine (propaggine occidentale del Mare Adriatico), limitato a nord dalle Alpi, a sud-ovest dagli Appennini e a nord-est dalle Dinaridi (Catena montuosa della Jugoslavia);
- secondo stadio compressivo: si sviluppa a partire dal Pliocene medio (circa 5,0 MA) in poi coinvolgendo anche il margine meridionale del bacino perisuturale padano nel processo di strutturazione della catena appenninica (in senso geografico dal margine appenninico settentrionale fino a circa l'asse del Fiume Po); il processo deformativo del margine meridionale del bacino perisuturale si sviluppa attraverso la formazione di sovrascorrimenti, faglie, duplicazioni e pieghe, in parte sepolte dalle coperture alluvionali quaternarie e in parte evidenti lungo il margine morfologico appenninico settentrionale.

Nell'epoca quaternaria, successivamente al pleistocene medio, la crescente estensione di terre emerse e soggette ad erosione consentì ai corsi d'acqua alpini ed appenninici di colmare di sedimenti il bacino padano conferendone l'attuale assetto e morfologia.

Il margine meridionale del bacino perisuturale padano è di tipo "complesso" (secondo Ricci Lucchi, 1986), perché interessato da sovrascorrimenti, faglie, duplicazioni, pieghe e bacini che si estendono da est ad ovest interessando per intero la pianura emiliana romagnola. In particolare nel sottosuolo antistante il margine morfologico dell'Appennino settentrionale, dal Piemonte meridionale fino al limite orientale della Romagna, seguendo poi l'allineamento Appennini – Mare Adriatico, sono presenti, a livello delle formazioni mesozoiche e mio-plioceniche (sepolte quindi da una più o meno spessa coltre alluvionale quaternaria), due serie principali di thrusts a sviluppo

sequenziale frontale. Essi costituiscono due sistemi di grandi pieghe asimmetriche con andamento anticlinalico, formatesi attraverso molteplici faglie inverse e sovrascorrimenti, immergenti verso sud/sud-ovest con inclinazioni comprese tra i 15° e i 30°, che racchiudono un bacino satellite ad esse parallelo.

In letteratura geologica queste zone di scollamento tettonico sono note come “External Thrust Front” (ETF), sull’allineamento di Cremona – Parma – Reggio Emilia – Correggio (RE) – Mirandola (MO) – Ferrara e Ravenna, e “Pedeapenninic Thrust Front” (PTF), lungo il margine morfologico dell’Appennino Settentrionale. Da nord a sud il margine meridionale del bacino perisuturale padano è quindi caratterizzato dalle seguenti strutture:

- 1. External Thrust Front (ETF): alto strutturale frutto dell’involuppo delle rampe frontali dei thrust sepolti, che esprime la zona di confine tra la Monoclinale pedealpina<sup>1</sup>, che si apre in direzione nord a partire dal fronte settentrionale dell’alto strutturale medesimo, e la regione “Apennines” (microplacca dell’arco Appenninico settentrionale) a sud;
- 2. bacino minore o satellite: depressione racchiusa a nord dall’alto strutturale dell’ETF e a sud dalle strutture embricate del PTF; si estende in zona antistante al margine morfologico dell’Appennino emiliano romagnolo con allungamento in direzione ovest/nord-ovest ed est/sud-est, presentandosi con geometrie non costanti che esprimono settori strutturalmente svincolati tra loro in relazione all’andamento planimetrico delle strutture sepolte associate all’External Thrust Front” (ETF) e al Pedeapenninic Thrust Front (PTF);
- 3. Pedeapenninic Thrust Front (PTF); esprime la zona di confine tra il margine morfologico appenninico e il suddetto bacino satellite.

Le suddette strutture sono l’espressione della collisione tettonica tra la microplacca dell’Arco Appenninico Settentrionale e la microplacca Adriatica. Le deformazioni formatesi e la parziale subduzione della microplacca adriatica sotto quella dell’Arco Appenninico Settentrionale sono causate dalle spinte nord-est vergenti, impresse dal movimento di convergenza tra la zolla africana ed europea a seguito dell’estensione dell’Oceano Atlantico (Livemore e Smith 1985).

L’External Thrust Front è suddiviso in tre margini planimetricamente arcuati, denominati da ovest verso est “Piemonte Folds”, “Emilia Folds” e “Ferrara Folds” (Figura 5). A sud delle “Ferrara Folds”, si estendono altri sistemi di thrust, sempre associati al meccanismo di deformazione delle precedenti, noti come “Romagna Folds” e “Adriatico Folds”. L’External Thrust Front è quindi caratterizzato da una serie di strutture ad arco, concave verso sud, che si raccordano in due zone di incrocio (Pavia e Reggio Emilia), dove il fronte appare notevolmente arretrato. Questo assetto strutturale è probabilmente dovuto alla presenza, nella crosta superiore padana, di zone con maggiore rigidità che hanno impedito lo scollamento delle successioni mesozoiche e terziarie dal basamento sottostante, bloccando in tal modo la traslazione verso nord (Bernini e Papani, 1987). Le principali cause sono imputabili alle manifestazioni magmatiche effusive, subvulcaniche ed epiplutoniche del Paleozoico, Trias medio e Terziario (in parte accertate nei pozzi profondi AGIP), verosimilmente responsabili delle maggiori anomalie magnetiche positive della Pianura Padana (Bolis et al., 1981). Le anomalie risultano, infatti, in larga misura coincidenti con le porzioni più arretrate dell’External Thrust Front e delle zone di incrocio fra gli archi. In particolare l’anomalia presente a sud del Lago di Garda, estesa dal Mantovano fino alla pianura parmense e reggiana, corrisponde alla zona di incrocio tra Emilia Folds” e “Ferrara Folds”, mentre l’anomalia presente nella zona di Pavia, estesa nella pianura pavese e allessandrina, corrisponde alla zona di incrocio tra “Emilia Folds” e “Piemonte Folds”.

Il Pedeapenninic Thrust Front è invece costituito da un margine discontinuo, planimetricamente parallelo al limite morfologico dell'Appennino settentrionale, segmentato da faglie trasversali, coincidenti con alcuni dei principali corsi d'acqua (Stirone, Taro, Enza, ecc.). Si tratta di una serie di thrusts e duplicazioni crostali che hanno determinato il sollevamento e il basculamento dei depositi affioranti nella fascia pedeappenninica. Le faglie trasversali al Pedeapenninic Thrust Front sono inoltre all'origine della suddivisione dell'Appennino settentrionale in settori a differente comportamento tettonico, responsabili altresì della traslazione differenziale dei vari settori dell'Appennino settentrionale come appunto testimoniano le rientranze del margine appenninico tra il F. Taro e il T. Enza e tra il F. Panaro e il F. Reno.

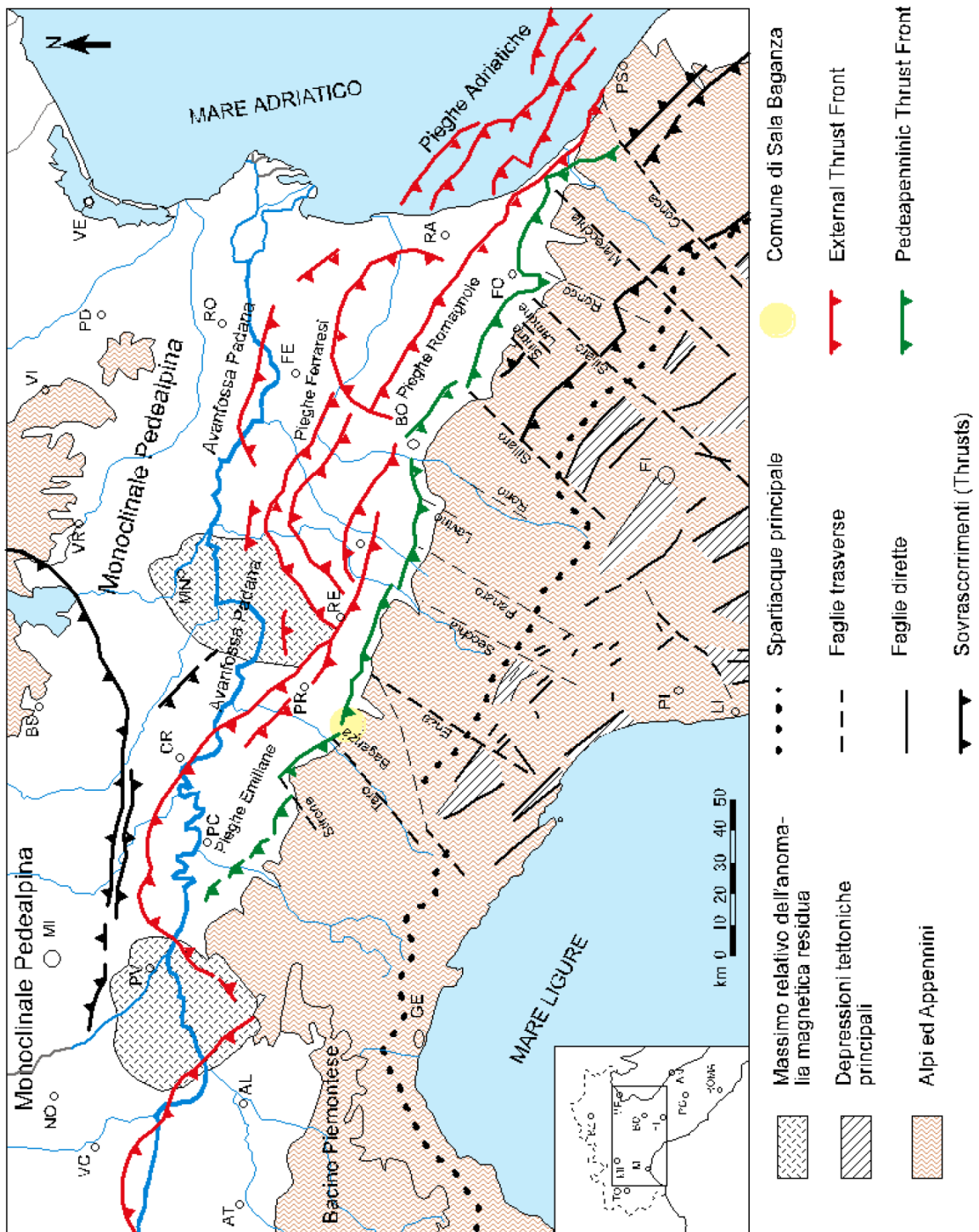


Figura 5

A questa serie di “thrust”, aventi direzione NW-SE, immersione del piano a SW e propagazione verso NE, si associano faglie trasversali al movimento dei thrust che in parte svincolano lateralmente le strutture. Di particolare



importanza nel quadro geodinamico del crinale appenninico reggiano-parmense risultano essere la linea Passo della Cisa - S.Polo d'Enza, la linea della Val Secchia, la linea della media Val Enza e soprattutto nell'area in esame la linea del Taro.

In particolare l'area in esame si trova sulla linea del Baganza e compresa tra i thrust ETF e PTF.

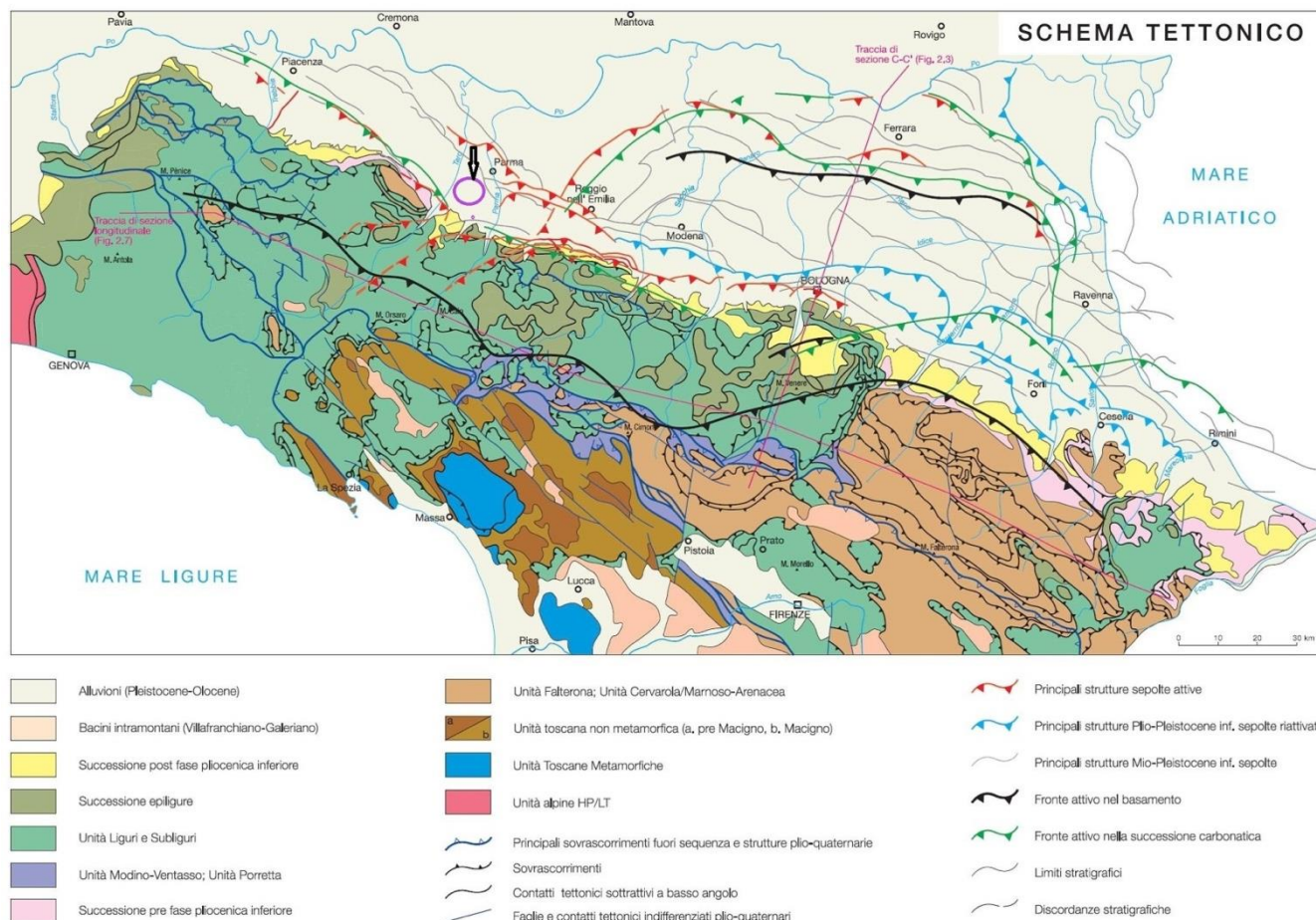


Figura 6 – Schema tettonico (da “Note Illustrative – Carta Sismotettonica Emilia Romagna, 2004) – (in viola è evidenziata l'area interessata dall'opera a progetto).

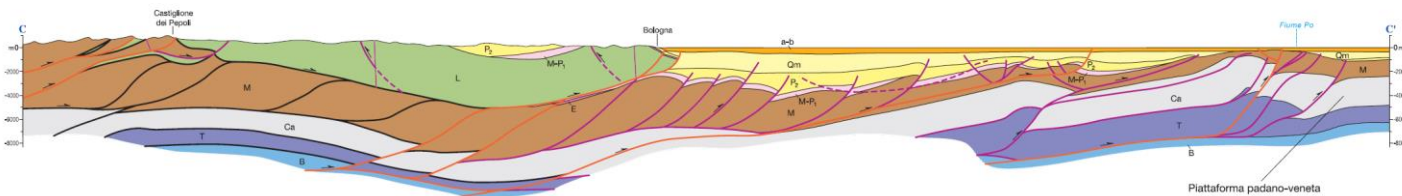


Figura 7 – Sezione geologica C-C', che attraversa il fronte appenninico e la Pianura Padana all'altezza di Bologna (da Carta Sismotettonica Emilia Romagna, 2004)



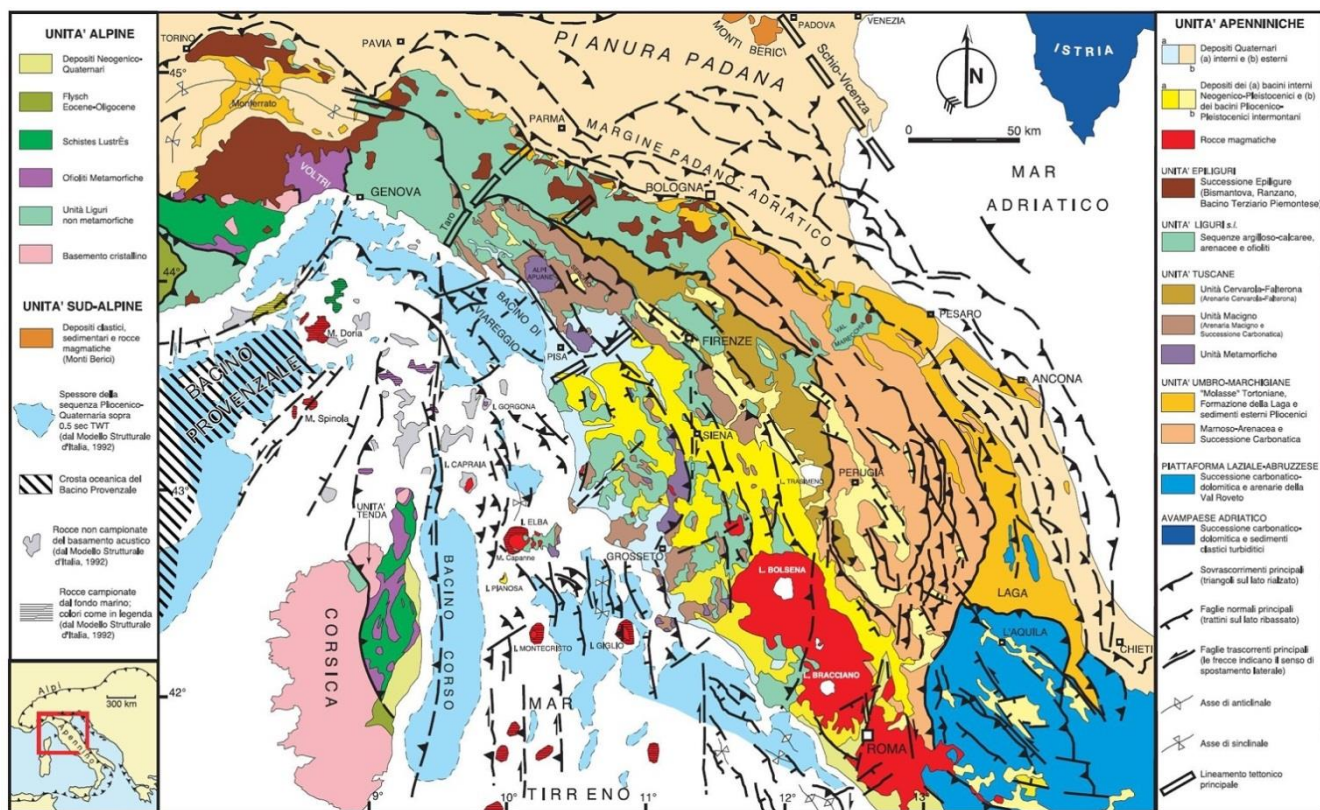


Figura 8 – Schema unità tettoniche

## 2.3 QUADRO GEODINAMICO

L'Appennino settentrionale (come meglio descritto al precedente paragrafo 2.2) è una catena a thrust che si è sviluppata a partire dall'Eocene superiore, come risultato della collisione tra la placca adriatica e il margine europeo (blocco Sardo-Corso), dopo la completa chiusura dell'oceano Ligure-Piemontese (Tetide occidentale) (Boccaletti et al., 1971).

La struttura principale della catena consiste in un impilamento di unità tettoniche NE-vergenti. Quelle geometricamente superiori sono anche le più vecchie e derivano dall'oceano Ligure-Piemontese, perciò dette unità Liguri, dove si sono formate tra il Giurassico e l'Eocene; queste sono sovrascorse sulle unità Toscane le quali si sono originate su un margine di tipo passivo tra il Triassico medio-superiore e il Miocene. L'evoluzione dell'Appennino settentrionale è stata inquadrata in differenti modelli geodinamici, i principali dei quali sono i seguenti:

- modelli di slab rollback/slab pull correlati ad una subduzione verso ovest della litosfera adriatica (e.g., Malinverno e Ryan, 1986; Doglioni, 1991; Faccenna et al., 2001; Lucente e Speranza, 2001; Carminati et al., 2012);
- modelli di slab detachment (Wortel e Spakman, 1992; Van der Meulen et al., 1999; Di Bucci e Mazzoli, 2002);
- risalita del mantello responsabile del regional bulge (D'Agostino et al., 2001),
- sovrascorrimenti alla scala di litosfera continentale (Finetti et al., 2005).

Altri modelli hanno proposto una transizione da una subduzione verso est della crosta della Tetide (Cretaceo-Eocene) a una subduzione verso ovest post-Eocene della litosfera della placca adriatica (Boccaletti et al., 1971; Doglioni et al., 1998; Marroni et al., 2001).

L'evoluzione post-collisionale (i.e., Miocene-Pliocene) dell'Appennino settentrionale è stata generalmente correlata ad un regime estensionale che ha interessato il settore interno dell'orogene conseguentemente all'apertura del Tirreno (e.g. Martini e Sagri, 1993). Ciò ha comportato la progressiva migrazione dei fronti compressivi verso est, nell'avampaese (e.g., Elter et al., 1975).

Altre interpretazioni propongono un'evoluzione più articolata, in cui le aree interne e di retroarco sono state nuovamente soggette a compressione, interrompendo il regime estensionale, tra circa 8,5 e 3,5 Ma (Bonini et al., 2014). Data la migrazione dell'orogenesi da ovest verso est, il settore occidentale (tirrenico) dell'Appennino settentrionale è generalmente indicato come interno mentre il settore orientale (padano-adriatico) è indicato come esterno.

Per quanto riguarda i principali aspetti geofisici, l'Appennino settentrionale è caratterizzato da una differenza di spessore crostale:

- per la zona interna si valuta uno spessore di circa 20÷25 km,
- per la zona esterna è stato valutato fino a 35÷45 km (Cassinis et al., 2005) (Figura 10).

Inoltre il settore interno è caratterizzato da un elevato flusso di calore ( $>100$  mW m<sup>-2</sup>; Della Vedova et al., 2001) e un'anomalia gravitativa di Bouguer positiva (Marson et al., 1998).

Anche la sismicità mostra caratteristiche piuttosto differenti in termini di cinematica e profondità ipocentrale, tra settore interno ed esterno:

- sismicità superficiale ( $<20$  km) con meccanismi focali prevalentemente estensionali nella zona interna e nella zona di crinale,
- eventi più profondi ( $\geq 20$  km) con meccanismi prevalentemente compressivi nella zona esterna.

I terremoti profondi compressivi ( $\geq 20$  km fino a 60÷90 km) sono stati variamente interpretati a seconda del modello geodinamico.

Generalmente, questi terremoti sono correlati alla subduzione della litosfera continentale adriatica sotto l'Appennino settentrionale (Figura 10). Altri modelli correlano parte di questa sismicità alla deformazione associata ai thrust attivi nella litosfera adriatica.

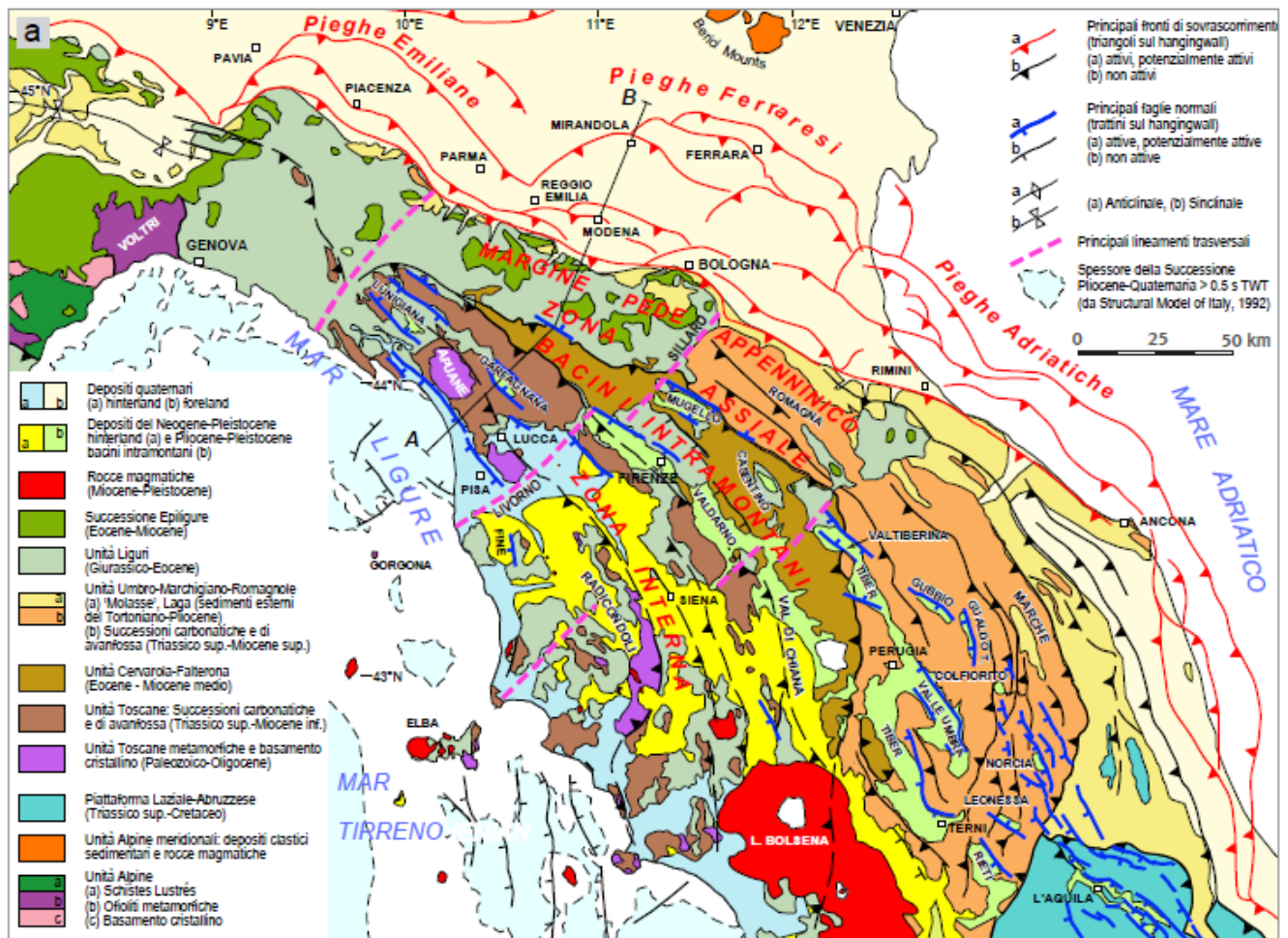


Figura 9 – Schema tettonico dell'Appennino settentrionale e della Pianura Padana

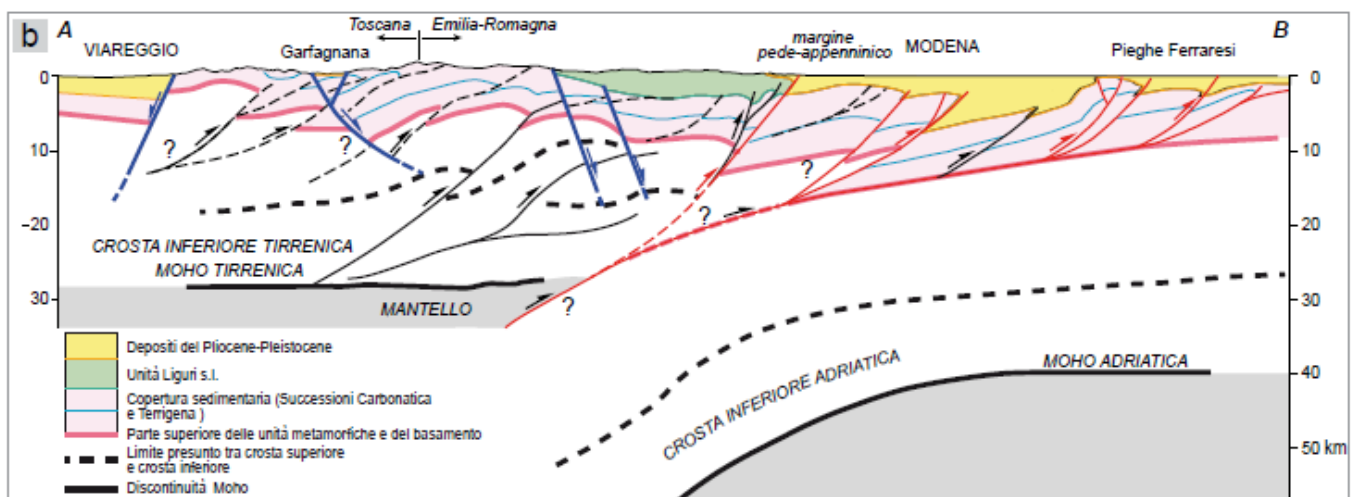


Figura 10 – Sezione geologica dal Mar Ligure al Po



## 2.4 CARATTERIZZAZIONE SISMOTETTONICA

Si riportano di seguito alcune considerazioni e definizioni desunte dalle “Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici” redatte dall'INGV.

Con il termine analisi sismotettonica si intende lo studio e l'individuazione delle strutture che generano terremoti (sorgenti sismogenetiche), in un quadro che consenta di valutarne anche le caratteristiche del rilascio nel tempo. Uno degli studi di riferimento per l'Italia è quello di Meletti et al. (2000), nel quale si descrive come si è proceduto per definire la zonazione sismogenetica (denominata ZS4) usata nelle stime di pericolosità sismica realizzate alla fine degli anni '90 (Slejko et al., 1998) nell'ambito del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT). Attraverso un successivo aggiornamento nel 2004 si è poi arrivati alla versione ZS9 (pubblicata da Meletti et al., 2008), posta alla base del modello di riferimento della pericolosità sismica MPS04-S1 (Gruppo di Lavoro MPS, 2004; Stucchi et al., 2011) in quanto studio sismotettonico elaborato a scala nazionale e con le migliori conoscenze allora disponibili.

L'analisi sismotettonica per strutture come le dighe implica la valutazione della *pericolosità sismica* che deve tenere conto del:

- *ground shaking hazard (rischio scuotimento sismico)*
- *surface faulting hazard (rischio fagliazione superficiale)*

Il pericolo rappresentato dalla fagliazione superficiale è più insidioso e potenzialmente più grave di quello rappresentato dal semplice scuotimento, per la semplice ragione che è più facile progettare una struttura antisismica che non una struttura in grado di resistere a deformazioni fragili permanenti delle sue fondazioni o – come nel caso in oggetto - delle aree di imposta di una diga.

Vista la componente fortemente soggettiva che caratterizza l'analisi devono essere valutati diversi elementi. Di seguito se ne fornisce un elenco ragionato:

- descrizione ad una scala regionale del quadro strutturale, termine con il quale si intende l'individuazione e descrizione degli elementi strutturali di primo ordine e la loro caratterizzazione in un contesto cinematico che dovrà essere coerente con le informazioni che derivano anche da dati geodetici;
- definizione delle strutture sismogenetiche che si ritiene siano presenti nell'area, delle loro caratteristiche geometriche e della loro cinematica, con descrizione della eventuale sismicità che si ritiene associata a ciascuna struttura e delle eventuali evidenze di carattere paleosismologico disponibili. Per ogni struttura deve essere indicata e giustificata la reale attività nonché il potenziale sismogenetico. Sulla base di questa analisi deve essere possibile definire la massima magnitudo attesa per la struttura;
- analisi della sismicità storica dell'area, utilizzando il catalogo di terremoti più aggiornato;
- analisi della sismicità strumentale più recente, limitandosi a quella registrata da reti sismiche efficienti;
- lo studio deve essere approfondito alla scala locale, tenuto conto che il modello di riferimento della pericolosità sismica da normativa viene elaborato a scala nazionale e dunque può non contenere quegli elementi di dettaglio che possono essere cruciali nella rivalutazione della pericolosità sismica per il sito in esame.

Nel sottosuolo della Regione Emilia-Romagna, sulla base di analisi integrate di dati geologici, geofisici, sismologici e geomorfologici, sono state riconosciute diverse strutture attive e capaci di generare terremoti.

Per la caratterizzazione sismotettonica dell'area in studio sono state utilizzate informazioni tratte da diverse banche dati e pubblicazioni scientifiche, tra cui in particolare quelle descritte di seguito.

- "Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, CPT15" (Rovida et al., 2015; <http://emidius.mi.ingv.it/CPT15>) che raccoglie i parametri dei terremoti italiani avvenuti dal 1000 al 2015.
- "Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani, DBMI11" (Locati et al., 2011; <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>) che riporta i dati degli studi macrosismici relativi a 1681 terremoti con effetti in territorio italiano dall'anno 1000 al 2006.
- "Catalogo della Sismicità Italiana, CSI 1.1" (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV dal 1981 al 2002.
- "Database Sismico Strumentale e Parametrico Italiano, ISIDe" (ISIDe Working Group, 2015; <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>), che fornisce i dati relativi ai terremoti che ricadono sul territorio nazionale e nelle regioni limitrofe registrati dal 2005.
- "Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna" (Boccaletti et al., 2004; <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/geologia/carta-sismotettonica-della-regione-emilia-romagna-in-scala-1-250.000>), con il relativo volume di Note Illustrative, descrive le principali strutture attive identificate nella Regione Emilia-Romagna.
- "Catalogo delle Faglie Capaci" (Michetti et al., 2000; ITHACA, 2015; <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>) che contiene la distribuzione territoriale e la caratterizzazione delle faglie capaci, corrispondenti a faglie per le quali è stata documentata o ritenuta possibile una dislocazione superficiale cosismica.
- "Database delle sorgenti sismogenetiche Italiane, DISS 3.2.0" (Basili et al., 2008; DISS Working Group, 2015) che rappresenta la banca dati parametrica delle potenziali sorgenti sismogenetiche di terremoti di magnitudo maggiore di 5.5, in Italia e nelle aree circostanti.

## 2.5 SISMICITÀ EMILIA ROMAGNA

La sismicità rappresenta uno strumento indispensabile per le analisi sismotettoniche e un utile supporto alla geologia strutturale, in quanto varie tipologie di dati sismici, ottenuti attraverso differenti metodologie, possono fornire indicazioni per l'identificazione e la caratterizzazione delle strutture geologicamente attive. Con il termine generico di "dati sismici", si intende tutto l'insieme delle informazioni disponibili sui terremoti avvenuti in passato, ottenute secondo metodi di analisi di tipo sia strumentale che non. I dati strumentali consistono essenzialmente in registrazioni del moto del terreno dalle quali è possibile ricavare l'ipocentro (in termini di latitudine, longitudine, profondità e relative incertezze), così come la dimensione (in termini di magnitudo o momento sismico) e la tipologia del meccanismo del terremoto (in termini di parametri di faglia o di tensore momento). I dati non strumentali, invece, consistono essenzialmente in informazioni sulla distribuzione spaziale degli effetti indotti dal terremoto sulle persone, sulle cose e sull'ambiente, dalle quali, attraverso la codifica di una scala macrosimica, è possibile ricavare la localizzazione, la magnitudo equivalente, le dimensioni fisiche ed anche l'orientazione della struttura sismogenetica.

Per cercare di valutare la potenzialità sismica di una zona è necessario avere una conoscenza più completa e dettagliata possibile dell'attività sismica passata. Questa informazione è di seguito suddivisa in sismicità storica e sismicità strumentale.



La prima si riferisce alle scosse principali avvenute dopo il 1000 in Emilia-Romagna e dintorni. La magnitudo o l'intensità sotto la quale le informazioni mancano o sono molto incomplete non è ben definibile, anche se è presumibile che questa soglia si abbassi progressivamente con il procedere del tempo, per la maggiore disponibilità ed attendibilità delle fonti storiche ed archivistiche civili, religiose e private. La stessa considerazione si può fare per le possibili lacune dei cataloghi dei terremoti, che diventano sempre più improbabili avvicinandosi al periodo attuale. Anche l'incertezza sulla localizzazione delle scosse nello spazio e nel tempo risente ovviamente della lontananza temporale. Questo vale in modo particolare per la profondità dei terremoti, che può essere molto difficilmente stimata senza un adeguato complesso di registrazioni strumentali attorno alla zona epicentrale. Per questo motivo, per la maggior parte delle scosse i cataloghi sismici non riportano la profondità dell'ipocentro.

La sismicità strumentale, disponibile solo per il periodo successivo al 1980, offre un quadro completo dell'attività sismica, in quanto riporta anche scosse di magnitudo molto piccola e fornisce anche informazioni attendibili sui dati ipocentrali, compresa la geometria della sorgente sismica (meccanismo focale) per i terremoti più importanti.

Tali localizzazioni ipocentrali derivano da dati strumentali della rete sismica nazionale integrata con i dati provenienti da misure effettuate con reti sismiche locali, relativi a terremoti avvenuti tra il 1981 e il 2003. Ogni terremoto è identificato da una serie di parametri quali il riferimento temporale, le coordinate geografiche e la profondità dell'ipocentro, la magnitudo, le incertezze relative alla localizzazione epicentrale.

I dati sono stati raggruppati in tre classi:

- 1) terremoti con magnitudo compresa tra 4 e 5  
( $4 \leq M < 5$ );
- 2) terremoti con magnitudo compresa tra 5 e 5.5  
( $5 \leq M < 5.5$ );
- 3) terremoti con magnitudo uguale o superiore a 5.5  
( $M \geq 5.5$ ).

È necessario osservare che, secondo quanto dichiarato dagli stessi autori, le localizzazioni ipocentrali del catalogo CSTI non sono adatte per analisi sismotettoniche di dettaglio (come ad es. la ricostruzione tridimensionale dei piani di faglia dalla distribuzione delle repliche di un evento principale) a causa delle incertezze sui parametri di localizzazione soprattutto per quanto attiene la profondità ipocentrale. Tuttavia, tali dati possono fornire un utile supporto all'interpretazione di spaccati geologico-strutturali in cui le principali ricostruzioni dell'andamento delle strutture tettoniche siano dedotti da altre informazioni. Ogni terremoto è stato rappresentato con un cerchio proporzionale alla magnitudo; la profondità ipocentrale corrisponde al centro del cerchio.

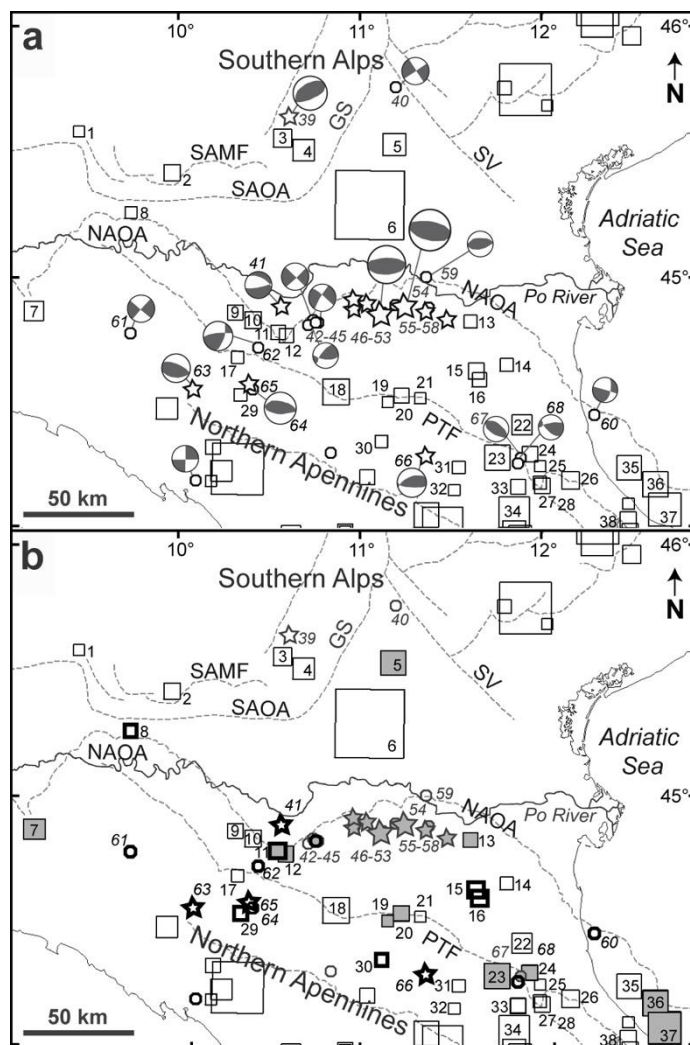


Figura 11 Terremoti storici e strumentali, CPTI15, Bollettino Sismico Italiano e ISiDe

## 2.6 SISMICITÀ STORICA DELLA PIANURA PADANA

Il terremoto in Emilia del maggio 2012 ha riacceso il dibattito scientifico sulla sismicità nella Pianura Padana. Già nel lontano 1117 e nel 1222 l'area intorno al Po fu teatro di eventi disastrosi. Altri terremoti si sono quindi succeduti fino ai giorni nostri e la loro indagine attenta, corredata dalle conoscenze sismotettoniche attuali, dovrebbe aiutare nella prevenzione dei rischi connessi al ripetersi di simili fenomeni. Il sollevamento tettonico del fronte appenninico sepolto, situato al di sotto delle potenti coltri alluvionali padane, valutato in circa un cm/anno, è la causa di diversi terremoti nell'area emiliana.

Di seguito si riporta un elenco dei principali eventi sismici che hanno caratterizzato il territorio emiliano.

- Il primo forte sisma padano di cui si ha notizia data addirittura ben 900 anni fa, il 3 gennaio 1117. Non è ancora chiaro quale possa essere l'origine sismotettonica di questo terremoto anche se molti autori propendono sull'ipotesi di una sorgente costituita da una faglia inversa giacente sotto i sedimenti alluvionali padani, probabilmente posizionata tra il Lago di Garda e le città di Verona e Vicenza, area in cui molti collocano l'epicentro. Studi e revisioni recenti confermano l'elevata intensità della Magnitudo associata a

questo evento, superiore a 6.5, valore che identifica il sisma come il più violento mai verificatosi nel nostro paese a Nord dell'Appennino.

- Le fonti storiche citano un terremoto nel 1343 di localizzazione incerta. In base ai dati macrosismici, alcuni autori collocano l'epicentro in corrispondenza della città di Ferrara, mentre altri in corrispondenza della zona che ha interessato la sequenza sismica emiliana del 2012 e altri ancora nelle colline reggiane-modenesi. Tale evento sebbene non sia stato opportunamente localizzato, nel quadro sismologico regionale, evidenzia la pericolosità sismica dell'area emiliana.
- Sempre fonti storiche riportano di un evento sismico dell'11 giugno 1438 (nel Parmense) con epicentro in Val di Taro. L'evento sembra abbia provocato lievi crolli a Parma e Castelnuevo e sia stato avvertito fino a Fidenza. La magnitudo stimata è 5.7 ca.
- L'11 agosto 1483 si riporta un evento sismico con magnitudo stimata di 5.7. Epicentro tra Cesena e Forlimpopoli con gravi danni a Forlì e crolli a Bertinoro e Cesena.
- Il 5 giugno 1501 è Modena a subire una forte distruzione a causa di una violenta scossa (magnitudo stimata 5.9), con epicentro localizzato a sud-ovest di Maranello. Si riporta di gravi danni a Modena con crolli parziali di chiese e mura (la torre del palazzo comunale, pericolante, viene parzialmente abbattuta e da allora è nota come "torre mozza"). Tra le località più colpite: Castelvetro, Maranello, Sassuolo, Montegibbio.
- Nel periodo compreso tra il 1504 ed il 1505, il terremoto più famoso e devastante fu quello di Bologna con scosse che si sono ripetute per mesi, fino al 19 maggio 1505. Le antiche cronache non sono concordi sulle date di inizio e di fine del fenomeno. Un cronista scrisse che ebbe inizio il 24 dicembre 1504 e fu un "orribile terremoto che distrusse parte della terra e della città di Bologna... Si fecero processioni e orazioni e dopo quaranta giorni cessò il divino castigo". Altri riferiscono dei danni gravi al palazzo dei Bentivoglio e a varie chiese importanti e la popolazione era terrorizzata.
- Il 16 e 17 novembre del 1570 il sisma colpisce ancora con epicentro a circa 14 km a Nord Est di Ferrara con una magnitudo stimata di 5.5. Il terremoto ha provocato anche una deviazione del corso del fiume Po e lo sciame sismico si protrasse sino al 1574. Si è ipotizzato che si siano verificate circa duemila scosse, concentrate per la maggior parte nei primi tre mesi dal sisma. Questo terremoto acquisisce particolare rilevanza alla luce di quanto accaduto nel maggio 2012 in Emilia ed il suo studio è stato approfondito recentemente, nell'articolo "Source Inversion of the 1570 Ferrara Earthquake and Definitive Diversion of the Po River (Italy)", di Sirovich e Pettenati, apparso sulla prestigiosa rivista "Journal of Geographic Research". Fu un sisma importante, paragonabile per diversi aspetti (compresi origine, cinematica ed ipocentro) a quello emiliano del maggio 2012, sviluppatosi 30-40 km più ad Ovest, di Magnitudo stimata 5.8.
- Evento sismico del 10 settembre 1584 con magnitudo stimata di 5.9 ed epicentro nei pressi del paese di Baroncioni. L'evento sismico è stato avvertito in Romagna e Toscana con gravi danni nella valle di Bagno di Romagna (semidistrutta), molti edifici lesionati a Santa Sofia, e San Piero.
- Evento sismico del 18 marzo 1624 con magnitudo stimata di 5.5 ed epicentro a nord di Argenta. Nonostante la magnitudo non sia stata elevatissima, gli effetti del sisma, amplificati dal fenomeno della liquefazione (uno dei primi casi accertati in Italia), hanno portato al crollo di molti edifici. Il fenomeno è inoltre associato ad uno tsunami "interno" (rarissimo caso nel nostro paese) con le acque della Valle Padusa (il cui residuo attuale sono le Valli di Comacchio) che rompono gli argini ed invadono la campagna circostante ed Argenta.

- Evento sismico del 22 marzo 1661 con magnitudo stimata di 5.8 ed epicentro a nord di Galeata. Il centro abitato maggiormente colpito è stato Civitella, sono stati registrati gravi danni a Galeata, Bagno, Pianetto, Santa Sofia, Montano, S. Piero, Rocca San Casciano. Crolli e danni minori in pianura: Predappio, Fiumana, Dovadola, Bertinoro, Forlì, Castrocaro.
- Evento sismico del 14 aprile 1672 con magnitudo stimata di 5.6 ed epicentro in mare, poco a sud di Rimini dove sono stati registrati gravi danni. L'evento è stato seguito da un leggero tsunami.
- Evento sismico dell'11 aprile 1688 con magnitudo stimata di 5.8 ed epicentro nei pressi di Cotignola, semidistrutta. Sono stati inoltre registrati gravi danni a Bagnacavallo e Russi e crolli minori a Forlì, Cesena e Bertinoro.
- Evento sismico del 19 ottobre 1768 con magnitudo stimata di 5.8 ed epicentro sull'Appennino, nei pressi di Santa Fiora. Distrutta Santa Sofia e presenza di danni a Forlì e Cesena.
- Evento sismico importante del giugno 1779 con la registrazione di un numero elevato di scosse, e registrazione di danni a numerosi edifici.
- Evento sismico del 4 aprile 1781 con magnitudo stimata di 5.9 ed epicentro nei pressi di Basiago. Gravi danni sono stati registrati a Brisighella e Faenza, crolli a Forlì, lesioni a Cesena e Forlimpopoli. Le Repliche sono proseguite fino a Natale.
- Evento sismico del 25 dicembre 1786 con magnitudo stimata di 5.7 ed epicentro nei pressi di Rimini. A Riccione gravemente lesionato il castello degli Agolanti. Crolli e/o danni di case e chiese sono stati registrati a Forlì e Cesena. L'evento è stato avvertito in tutta la Romagna.
- Evento sismico del 22 ottobre 1796 con magnitudo stimata di 5.6 ed epicentro a nord-ovest di Portonovo dove sono stati registrati numerosi crolli. Danni e/o lesioni sono stati registrate anche a Ferrara, Medicina, Bologna e Colognola. L'evento sismico è stato avvertito a Padova, Verona e Vicenza.
- Evento sismico del 9 dicembre 1818 con magnitudo stimata di 5.3. La scossa danneggiò alcune case e le chiese di Langhirano, Lesignano dé Bagni, San Michele di Tiorre e Arola, a Parma caddero molti comignoli, la scossa fu sentita fino ad Ancona e Milano.
- Evento sismico dell'11 settembre 1831 con magnitudo stimata di 5.5. la scossa registrò danni a Parma, Sorbolo, Reggio, Modena e Sassuolo.
- Evento sismico del 13 marzo 1832 con magnitudo stimata di 5.5. Le località più interessate furono Parma, Reggio, Castelnuovo di Sotto.
- Evento sismico del 4 Luglio 1834 con magnitudo stimata di 5.7. Furono registrati danni a Parma e S. Vitale di Baganza.
- Evento sismico del 17 marzo 1875 con magnitudo stimata di 5.8 ed epicentro a nord di Rimini. L'evento provocò gravi danni a Cervia, Cesenatico e Rimini (dove fu danneggiato seriamente il Tempio Malatestiano). Furono segnalate lesioni sulla costa da Pesaro fino a Ravenna e segnalati fenomeni di liquefazione. L'evento fu avvertito da Belluno fino a Roma. Fu inoltre registrato un modesto fenomeno di tsunami che invase le spiagge di Rimini, Cervia e Cesenatico mentre nel porto di Ancona si verificarono sensibili oscillazioni.
- Evento sismico del 4 marzo 1898 con magnitudo stimata di 5.4. La scossa fu sentita in una vasta area del Nord Italia con leggeri danni. I danni maggiori si registrarono nella vallata del torrente Parma. Tra le località più colpite furono Barbiano, Langhirano e Vidiana, dove alcune case e la chiesa risultarono inagibili.



- Evento sismico del 13 Gennaio 1909 con magnitudo di 5.5 ed epicentro nell'area compresa tra Bologna, Ferrara e Ravenna. Il terremoto fu avvertito in tutta l'Italia settentrionale, in gran parte di quella centrale con numerosi danni.
- Evento sismico del 17 maggio 1916 con magnitudo stimata di 5.8. questo evento si riferisce alla prima scossa importante di una sequenza che durerà sei mesi. L'epicentro era localizzato nei pressi di S. Lorenzo e provocò crolli importanti a Rimini, Riccione e Cattolica (a Rimini furono lesionati circa mille edifici). Danni furono registrati anche a Santarcangelo e Savignano, e lesioni in tutta la Romagna e nella valle del Metauro.
- Evento sismico del 16 agosto 1916 con magnitudo stimata di 5.9. Questo evento appartiene alla stessa sequenza sismica della precedente. Il sisma accentuò i danni provocati il 17 maggio con epicentro nei pressi di Scacciano. Parecchi crolli furono registrati a Riccione, ulteriori danni a Rimini, Pesaro, Cattolica, Fano, Saltara.
- Evento sismico del 10 novembre 1918 con magnitudo stimata di 5.8 ed epicentro nei pressi di Santa Sofia, il paese più colpito. Danni furono registrati anche a Galeata, Bagno, Civitella, lesioni a Predappio e Verghereto. Fu avvertito in tutta la Romagna, in particolare a Bertinoro.
- Evento sismico del 10-19 aprile 1929 con magnitudo stimata di 5.3 ed epicentro nella val Samoggia. Lo sciame sismico perdurò fino all'11 maggio.
- Evento sismico del 30 Dicembre 1967 con magnitudo stimata di 5.3 nell'area compresa tra Alfonsine e Longastrino. Furono registrati molti danni a chiese, qualche crollo di cornicioni e crepe in monumenti.
- Evento sismico del 15 luglio 1971 con magnitudo stimata di 5.6. Furono registrati danni in un'area ristretta compresa tra le province di Parma e di Reggio Emilia. Le zone più danneggiate si localizzarono sulle due sponde del torrente Enza, comprendendo i comuni di Casalbaroncolo, Casaltone, Noceto e Sorbolo.
- Evento sismico del 9 novembre 1983 con magnitudo stimata di 5.1 ed epicentro nell'area compresa tra Parma e Collecchio. A Parma il teatro Regio fu gravemente danneggiato.
- Evento sismico del 15 ottobre 1996 con magnitudo stimata di 5.4 ed epicentro a Correggio. Furono registrati danni a edifici, chiese e infrastrutture pubbliche. In totale 33 i comuni danneggiati.
- Evento sismico dell'8 e 10 maggio 2000 con magnitudo stimata di 4.5 ed epicentro a Faenza. Si succedettero una serie di scosse di media intensità ma giornaliere che provocarono molta paura ma nessun danno.
- Evento sismico del 14 Settembre 2003 con magnitudo stimata di 5.3 ed epicentro 30 km a sud rispetto a Bologna. Danni limitati, ma la scossa fu avvertita su tutta la regione
- Evento sismico del 23 Dicembre 2008 con magnitudo stimata di 5.1 ed epicentro nell'Appennino Parmense. Il danneggiamento più diffuso ha interessato alcune località minori del reggiano e del parmense lungo le sponde del torrente Baganza, fra i comuni di Felino, Sala Baganza e Calestano. L'unico centro abitato di dimensioni consistenti con danni significativi, è quello di Langhirano
- Evento sismico del 20 maggio 2012 con magnitudo di 6.0 (ore 4.03), ipocentro a circa 6 km di profondità ed epicentro nei pressi di Finale Emilia che subisce numerosi crolli e gravi lesioni. Ingenti danni sono segnalati anche a S. Felice sul Panaro (in particolare nel centro storico) ed a Mirandola. Crollati chiese e capannoni industriali. La zona più interessata tra le province di Modena e Ferrara.. Avvertito in tutto il nord Italia.
- Evento sismico del 29 maggio 2012 con magnitudo stimata di 5.8 (ore 9.00), ipocentro a circa 9 km di profondità ed epicentro nei pressi di Medolla, geograficamente più ad ovest del precedente. Ancora discussa

l'ipotesi se sia collegabile o meno al sisma del 20.05 (altra faglia?). Nuovi danni nelle aree già colpite il 20.05 (Mirandola, S. Felice) ma soprattutto in altri centri: Medolla (crollo di capannoni industriali), Cavezzo (75% degli edifici lesionati), S. Prospero, Novi di Modena. Lesioni rilevanti anche a Carpi, Cento, Ferrara, Poggio Rusco, Mantova, Modena.

Gli eventi sismici descritti sono tutti legati alla sismotettonica regionale. Nella Pianura Padana il contesto tettonico è regolato (come descritto in precedenza) dal movimento della microplacca Adria che scorre al di sotto della placca euroasiatica: movimento che ha iniziato a svilupparsi sin dal Terziario quando la collisione tra le due placche ha portato all'orogenesi appenninica in un ambiente paleogeografico dominato da un bacino marino, un vero e proprio oceano con tanto di dorsale, detto "Ligure-Piemontese". I movimenti tettonici, dovuti al progressivo scontro tra le placche, hanno portato alla chiusura del bacino, al sollevamento dell'orogene appenninico settentrionale ed alla formazione di strutture tettoniche profonde. Il movimento di Adria, tuttora in atto, concorre all'accumulo di energia ed al conseguente rilascio con la formazione di terremoti anche di grande intensità. Grazie ai profili sismici della zona, molti dei quali realizzati dall'AGIP, si evince che l'area di subduzione, ovvero la superficie inclinata per cui una placca scorre al di sotto dell'altra, detta "piano di Benioff", in questo caso si immerge di circa 70° in direzione sud-ovest, nel margine compreso tra Reggio Emilia e la valle del Reno. Una caratteristica essenziale del "piano di Benioff" è di essere sede privilegiata di terremoti.

Per quanto riguarda l'interpretazione del sisma del 1570 e del sisma del 2012, la chiave è rappresentata dalle cosiddette "pieghe ferraresi":

- In quest'area la tettonica compressiva ha determinato una serie di alti strutturali, associati a pieghe antiformali (ovvero con la convessità rivolta verso l'alto) controllate da sottostanti sovrascorrimenti, tra cui il più interessante pare il cosiddetto "alto di Mirandola". L'attività recente di tali strutture, già ipotizzata sulla base della sismicità storica e di indagini geomorfologiche, è stata confermata dall'intensa crisi sismica del maggio-giugno 2012. L'analisi dei dati sismologici, geodetici ed interferometrici suggerisce che la scossa del 20 maggio 2012 (Mw 5.8 ed ipocentro a circa 6 km di profondità) sia associata ad una faglia inversa del sistema ferrarese più esterno denominata "faglia media di Ferrara", mentre l'evento del 29 maggio 2012 (Mw 5.6 con ipocentro a circa 10 km) sia invece correlabile con l'anticlinale di Mirandola ("faglia di Mirandola"). Il movimento di queste faglie all'atto del sisma ha causato un sollevamento del terreno di circa 11 cm nell'area epicentrale.

È importante osservare che per questi terremoti non sono state riscontrate evidenti tracce in superficie delle fratture sismiche. Ciò concorda con l'analisi per cui le faglie inverse sepolte (o blind thrust), capaci di generare terremoti distruttivi ma con Magnitudo inferiore a 6.0 (proprio come accaduto nel 2012), spesso non raggiungono la superficie terrestre. Si tratta di fratture sismogenetiche particolarmente insidiose e difficilmente riconoscibili, sia col rilevamento geologico-strutturale che con le analisi geomorfologiche, perchè in zone di pianura producono spesso solo deboli anomalie della topografia o del reticolo idrografico.

Il sisma del 1570 ha invece prodotto gravi ripercussioni in superficie. Il suo ipocentro, posizionato nella parte più esterna del fronte appenninico sepolto e situato ad una profondità di circa 10 km, risulta perfettamente compatibile con le conoscenze sismotettoniche attuali. La sorgente sismogenetica, in base ad evidenze geologiche e indizi di

tettonica attuale, si estende dai fronti sepolti a nord di Ferrara verso porzioni più esterne, e prende il nome di “faglia esterna di Ferrara”.

Per completare il quadro sismotettonico in esame, è importante la valutazione dello spessore della crosta terrestre in Pianura Padana, tramite l'interpretazione delle numerose linee sismiche esplorate per la ricerca di idrocarburi integrate da sondaggi sismici profondi e dalle informazioni gravimetriche, condotte per l'intero territorio italiano con una certa regolarità sin dagli anni '50. La mappa mostra significative variazioni laterali dello spessore crostale che nel settore alpino raggiunge il valore massimo (oltre 50 km) nella porzione orientale mentre la crosta delle Alpi Occidentali appare ben più sottile. Per quanto riguarda la catena appenninica, si nota l'incremento dello spessore crostale da sud-ovest (settore interno o tirrenico) verso nord-est (settore esterno o padano). Tale incremento è segnato da bruschi salti, corrispondenti ai principali sovrascorrimenti appenninici che dunque, anche in funzione di questo parametro, risultano ben individuabili. Nella Pianura Padana lo spessore della crosta, è massimo in corrispondenza dell'Appennino (> 45 km) e diminuisce verso nord-est, per giungere a valori di 30-35 km.

Altrettanto importante è la distribuzione delle misure di flusso termico emesso dalla superficie terrestre. La caratteristica più evidente è l'ampia zona di flusso relativamente basso che va dal Torinese fino all'Adriatico. Ciò suggerisce che sotto tale zona la litosfera sia particolarmente “fredda” e quindi in grado di conservare le proprietà meccaniche elastico-fragili sino a varie decine di km di profondità. Questo fatto, non trascurabile, potrebbe spiegare la presenza di sorgenti sismiche piuttosto profonde in Pianura Padana ed in particolare in Emilia-Romagna.

Pertanto si può affermare che la Pianura Padana appare interessata da una sismicità non trascurabile, provocata principalmente dal sollevamento tettonico costante del fronte appenninico sepolto dove le strutture sismogenetiche, interne o più esterne, sono in grado di generare sismi di una certa intensità

I terremoti storici più rilevanti sono tratti dal catalogo parametrico dei Terremoti Italiani CPTI15. Il catalogo copre l'intero territorio italiano con porzioni delle aree e dei mari confinanti e riporta 4584 terremoti in un arco temporale compreso tra l'anno 1000 e l'anno 2014 e fornisce dati parametrici sia macro-sismici che strumentali relativi ai terremoti con magnitudo  $\geq 4.0$  (Figura 12).

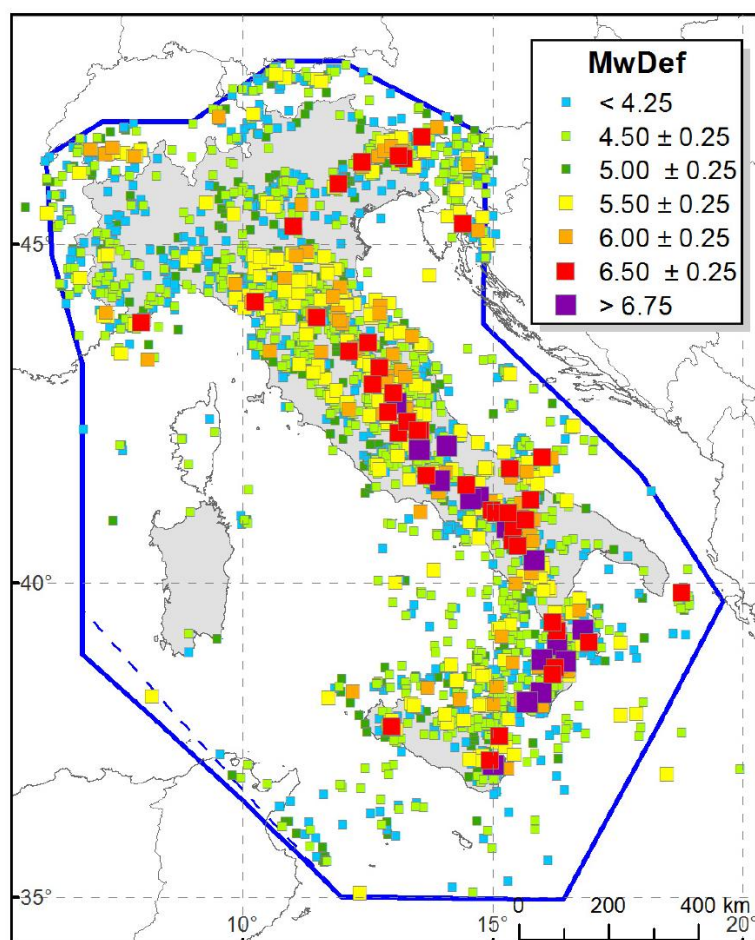


Figura 12 – Distribuzione geografica degli epicentri dei terremoti per classi di Mw (da CPTI15, INGV, 2016)

In particolare di seguito si riporta l'elenco dei terremoti che si sono succeduti nell'arco temporale 1000-2014 nell'intorno di circa 30 km dell'area a progetto, sulla base di quanto indicato dal catalogo CPTI15:



File downloaded from CPTI15 - DBMI15													
Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 - Database Macrosismico Italiano 2015													
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia													
List of user applied filters:													
User defined circular area centered in (lat, lon) 44.790, 10.241 with a radius of 31.31 km													
Listed entries 47													
N	Sect	Year	Mo	Da	EpicentralArea	MainRef	TLDef	DepDef	IoDef	TloDef	MwDef	ErMwDef	TMwDef
84	MA	1344	11	11	Parma	CFTI4med	MM		5	bx	4,16	0,46	Mdm
85	MA	1345	1	31	Pianura emiliana	ENEL985	MM		5-6	bx	4,4	0,46	Mdm
114	MA	1383	7	24	Parma	ENEL985	MM		4-5	bx	3,93	0,46	Mdm
140	MA	1409	11	15	Parma	CFTI4med	MM		7	bx	5,1	0,46	Mdm
159	MA	1438	6	11	Parmense	CFTI4med	MM		8	bx	5,56	0,46	Mdm
288	MA	1522	10	5	Pianura Padana	CFTI4med	MM		5	bx	4,71	0,4	Mdm
363	MA	1572	6	4	Parmense	ENEL985	MM		6	bx	4,63	0,46	Mdm
379	MA	1586	1	12	Parmense	MOLAL008	MM		5	bx	4,16	0,46	Mdm
443	MA	1628	11	4	Parma	CFTI4med	MM		6-7	bx	4,86	0,46	Mdm
480	MA	1653	4	19	Reggiano	CAMAL011b	MM		5-6	bx	4,4	0,46	Mdm
688	MA	1732	2	4	Parma	CFTI4med	MM		5-6	bx	4,65	0,35	Mdm
707	MA	1738	11	5	Emilia occidentale	ENEL985	MM		7	bx	5,1	0,46	Mdm
834	MA	1774	3	4	Parma	AMGNDT995	MM		5	bx	4,16	0,46	Mdm
1044	MA	1818	12	9	Parmense	CFTI4med	MM		7	bx	5,24	0,38	Mdm
1096	MA	1831	7	14	Reggiano	CFTI4med	MM		5-6	bx	4,6	0,37	Mdm
1097	MA	1831	9	11	Pianura emiliana	CFTI4med	MM		7-8	bx	5,48	0,26	Mdm
1111	MA	1832	3	13	Reggiano	CFTI4med	MM		7-8	bx	5,51	0,12	Mdm
1262	MA	1857	2	1	Parmense-Reggiano	AMGNDT995	MM		6-7	bx	5,11	0,21	Mdm
1521	MA	1886	10	15	Collecchio	ENEL985	MM		6	bx	4,7	0,2	Mdm
1652	MA	1895	5	12	Reggiano	CFTI4med	MM		4-5	bx	3,98	0,38	Mdm
1726	MA	1898	3	4	Parmense	CFTI4med	MM		7-8	bx	5,37	0,1	Mdm
1913	MA	1906	8	25	Parmense	CFTI4med	MM		5	bx	4,25	0,33	Mdm
2089	MA	1913	11	25	Appennino parmense	CASAL996	MM		4-5	bx	4,65	0,13	Wmim
2137	MA	1915	10	10	Reggiano	ENEL985	MM		6	bx	4,87	0,11	Wmim
2531	MA	1937	9	17	Parmense	CFTI4med	MI		7	bx	4,77	0,28	Mdm
2559	MA	1940	1	24	Appennino emiliano	ISS	II						
2563	MA	1940	5	1	Parmense	BCIS	II				5,06	0,24	InsC
2726	MA	1955	3	12	Parmense	CFTI4med	MM		5	bx	4,15	0,42	Mdm
2838	MA	1961	8	13	Parmense	CFTI4med	MM		5-6	bx	4,37	0,25	Mdm
2839	MA	1961	8	14	Parmense	CFTI4med	MM		5-6	bx	4,47	0,39	Mdm
2919	MA	1967	4	3	Reggiano	MOLAL008	MI		5	bx	4,44	0,18	Wmim
2964	MA	1968	6	7	Parmense	ISC	II	25					
2986	MA	1969	6	24	Parmense	CFTI4med	MI		5	bx	4,21	0,28	Wmim
3003	MA	1970	5	3	Parmense	MOLAL008	MI		4	bx	4,08	0,32	Wmim
3038	MA	1971	7	15	Parmense	CFTI4med	MI		8	bx	5,51	0,08	Wmim
3057	MA	1972	6	25	Parmense	ISC	II	49,6			4,01	0,23	InsC
3319	MA	1981	5	26	Reggiano	CFTI4med	MI		5	bx	3,75	0,21	Wmim
3380	MA	1983	11	9	Parmense	CFTI4med	MI		6-7	bx	5,04	0,1	InsO
3670	MA	1991	10	31	Emilia occidentale	CSTI1.1	IM	9,9	5	bx	4,33	0,1	Wmim
3836	MA	1997	5	12	Pianura emiliana	CSI1.1	IM	7,2	4-5	bx	3,68	0,13	Wmim
4315	MA	2007	5	9	Pianura emiliana	BSINGV	II	9,7			4,21	0,07	InsO
4320	MA	2007	7	30	Pianura emiliana	BSINGV	II	20,5			4,45	0,07	InsO
4358	MA	2008	12	23	Parmense	BSINGV	IM	22,9	6-7	bx	5,36	0,07	InsO
4359	MA	2008	12	23	Parmense	BSINGV	II	23,7			4,81	0,07	InsO
4360	MA	2008	12	23	Parmense	BSINGV	II	19,4			4,08	0,13	InsC
4361	MA	2008	12	25	Parmense	BSINGV	II	21,9			4,09	0,12	InsC
4467	MA	2012	1	25	Pianura emiliana	BSINGV	IM	29	5-6	bx	4,98	0,07	InsO
										medio	4,61		
										dev.st.	0,51		
										max	5,56		
										min	3,68		

Figura 13 – Elenco terremoti nell'intorno di 30 ca km dell'area a progetto

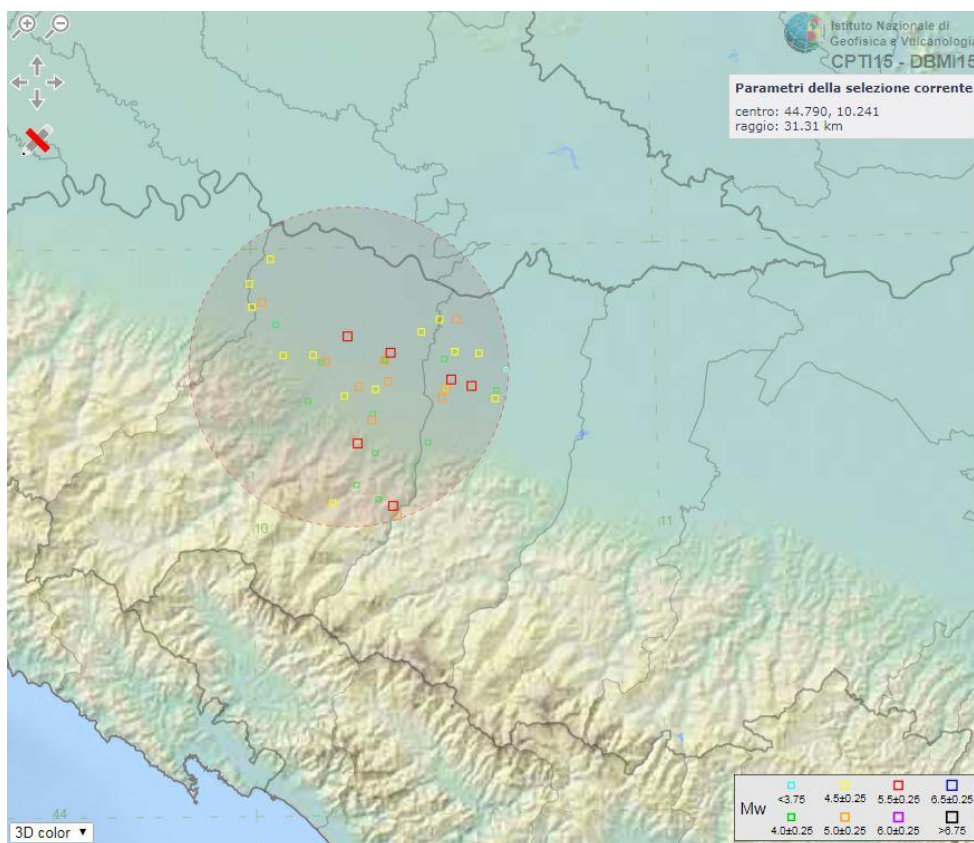


Figura 14 – Area presa in esame

Di seguito si riporta l'ubicazione di alcuni dei terremoti più intensi verificatisi nell'area in esame, con magnitudo  $\geq 5.0$  (estratti dal CPTI15):

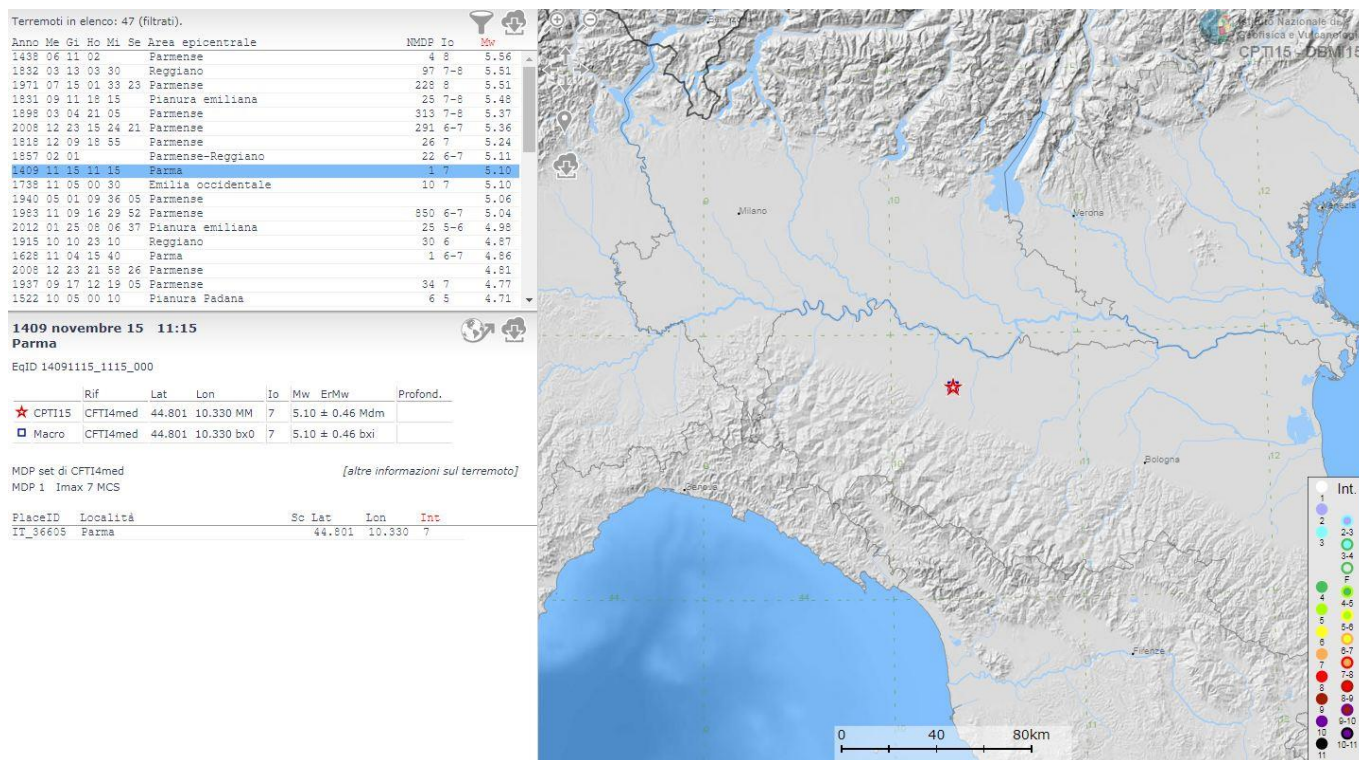


Figura 15 – Evento sismico del 15 novembre 1409 di Magnitudo 5.1

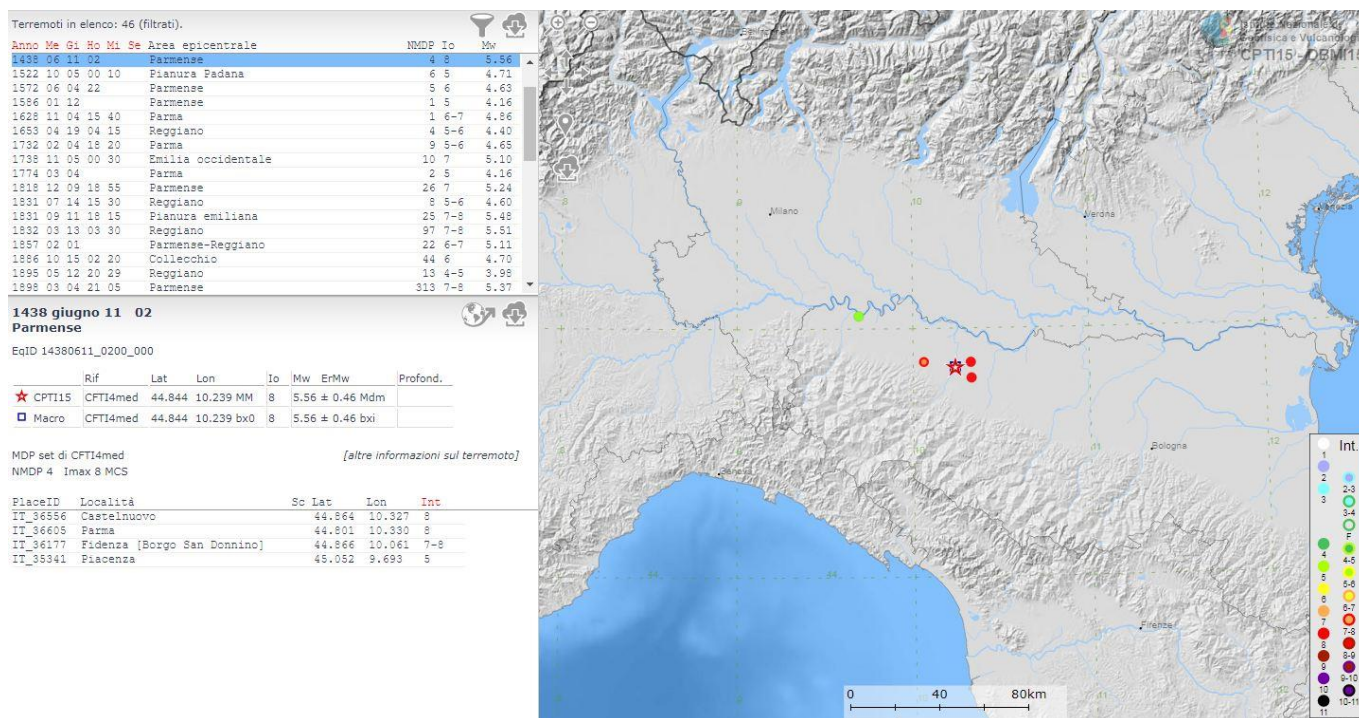


Figura 16 - Evento sismico del 11 giugno 1438 di Magnitudo 5.56



Terremoti in elenco: 47 (filtrati).

Anno	Me	Gi	Mo	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
1438	06	11	02			Parmense		4	5.56
1832	03	13	03	30		Reggiano		97	7-8
1971	07	15	01	39	23	Parmense		225	5
1931	09	11	18	15		Pianura emiliana		25	7-8
1896	03	04	21	05		Parmense		313	7-8
2008	12	23	15	24	21	Parmense		291	6-7
1818	12	09	18	55		Parmense		26	7
1857	02	01				Parmense-Reggiano		22	6-7
1409	11	15	11	15		Parma		1	7
1738	11	05	00	30		Emilia occidentale		10	7
1940	05	01	09	36	05	Parmense			5.06
1953	11	09	16	29	52	Parmense		950	6-7
2012	01	25	06	06	37	Pianura emiliana		25	5-6
1915	10	10	23	10		Reggiano		30	6
1628	11	04	15	40		Parma		1	6-7
2008	12	23	21	58	26	Parmense			4.81
1937	09	17	12	19	05	Parmense		34	7
1522	10	05	00	10		Pianura Padana		6	5

**1738 novembre 05 00:30**  
**Emilia occidentale**  
EqID 17381105\_0030\_000

Rif	Lat	Lon	Io	Mw	ErMw	Profond.
★ CPTI15	ENEL985	44.906	10.028	MM	7	5.10 ± 0.46 Mdm
□ Macro	ENEL985	44.906	10.028	bx0	7	5.10 ± 0.46 bxi

MDP set di ENEL, 1985 (ENEL985) [altre informazioni sul terremoto]  
NMDP 10 Imax 7 MCS

PlaceID	Località	Sc	Lat	Lon	Int
IT_36605	Parma		44.801	10.330	7
IT_35341	Piacenza		45.052	9.693	7
IT_36177	Fidenza [Borgo San Donnino]		44.866	10.061	7
IT_37545	Guastalla		44.921	10.654	6
IT_37630	Novellara		44.845	10.731	5-6
IT_23679	Verona		45.439	10.994	5
IT_37794	Reggio nell'Emilia		44.698	10.631	4-5
IT_13462	Milano		45.464	9.191	4
IT_33336	Genova		44.419	8.998	F
IT_19701	Mantova		45.158	10.794	3

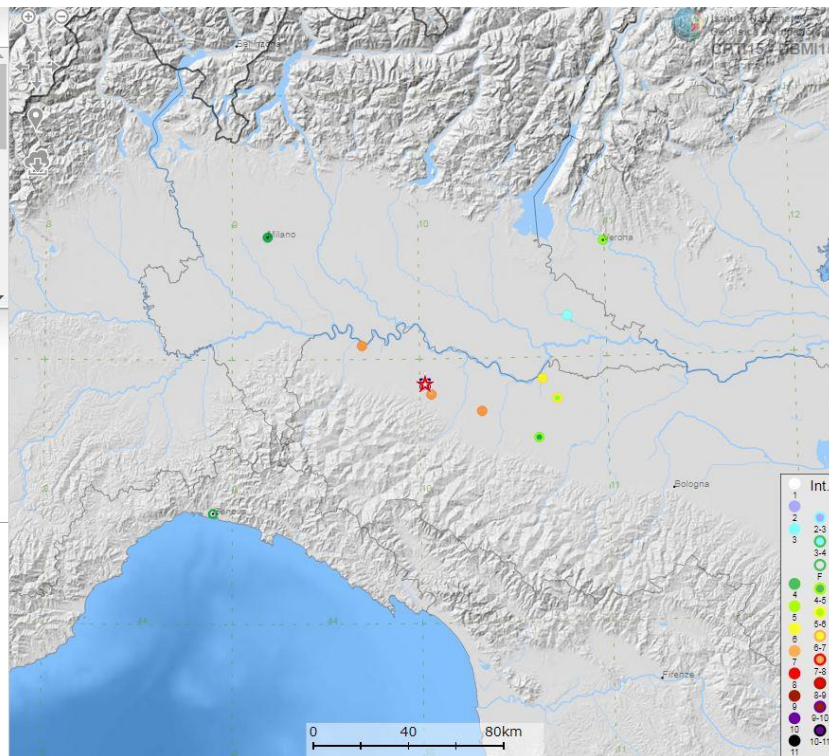


Figura 17 - Evento sismico del 5 novembre 1738 di Magnitudo 5.1

Terremoti in elenco: 47 (filtrati).

Anno	Me	Gi	Mo	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
1438	06	11	02			Parmense		4	5.56
1522	10	05	00	10		Pianura Padana		6	5
1572	06	04	22			Parmense		5	6
1896	01	12				Parmense		1	5
1628	11	04	15	40		Parma		1	6-7
1653	04	19	04	15		Reggiano		4	5-6
1732	02	04	18	20		Parma		9	5-6
1738	11	05	00	30		Emilia occidentale		10	7
1774	03	04				Parma		2	5
1818	12	09	18	55		Parmense		26	7
1831	07	14	15	30		Reggiano		8	5-6
1831	09	11	18	15		Pianura emiliana		25	7-8
1832	03	13	03	30		Reggiano		97	7-8
1857	02	01				Parmense-Reggiano		22	6-7
1896	10	15	02	20		Collecchio		44	6
1895	05	12	20	29		Reggiano		13	4-5
1895	03	04	21	05		Parmense		313	7-8

**1818 dicembre 09 18:55**  
**Parmense**  
EqID 18181209\_1855\_000

Rif	Lat	Lon	Io	Mw	ErMw	Profond.
★ CPTI15	CFTI4med	44.696	10.296	MM	7	5.24 ± 0.38 Mdm
□ Macro	CFTI4med	44.696	10.296	bx0	7	5.24 ± 0.38 bxi

MDP set di CFTI4med [altre informazioni sul terremoto]  
NMDP 26 Imax 7-8 MCS

PlaceID	Località	Sc	Lat	Lon	Int
IT_36283	Arola		44.672	10.285	7-8
IT_36299	Lesignano de' Bagni		44.643	10.299	7
IT_36267	Langhirano		44.614	10.268	6-7
IT_36605	Parma		44.801	10.330	6-7
IT_36162	San Michele di Tiorre		44.684	10.266	6-7
IT_38203	Carpi		44.784	10.885	6
IT_19701	Mantova		45.158	10.794	5-6
IT_07354	Buttigliera d'Asti		45.021	7.951	5
IT_37489	Correggio		44.771	10.779	5
IT_37545	Guastalla		44.921	10.654	5
IT_37794	Reggio nell'Emilia		44.698	10.631	5
IT_36290	Torrechiara	SS	44.656	10.278	5
IT_16874	Salo		45.606	10.522	4
IT_26814	Vicenza		45.548	11.546	4
IT_51088	Ancona		43.619	13.513	F

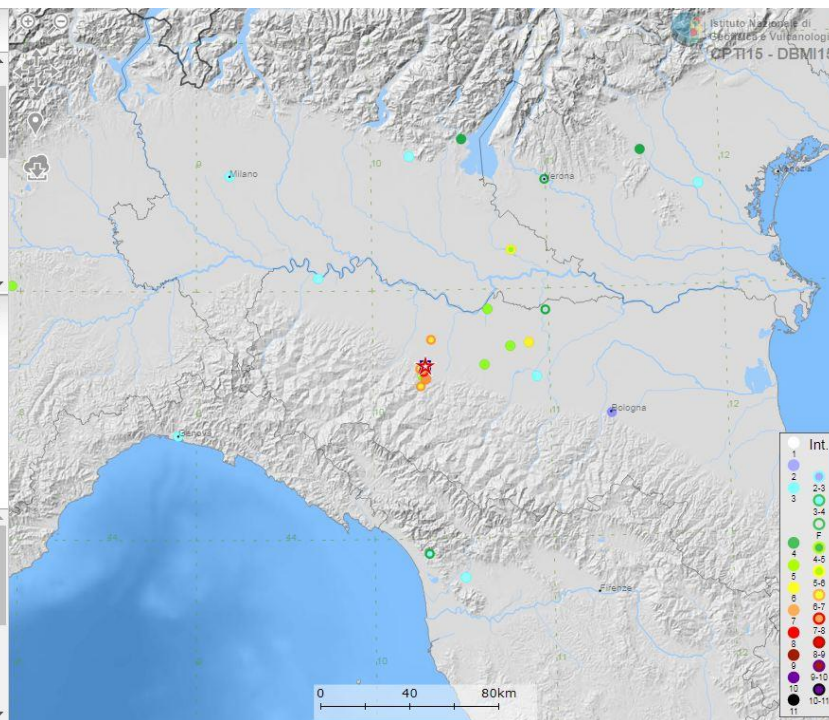


Figura 18 - Evento sismico del 9 dicembre 1818 di Magnitudo 5.24



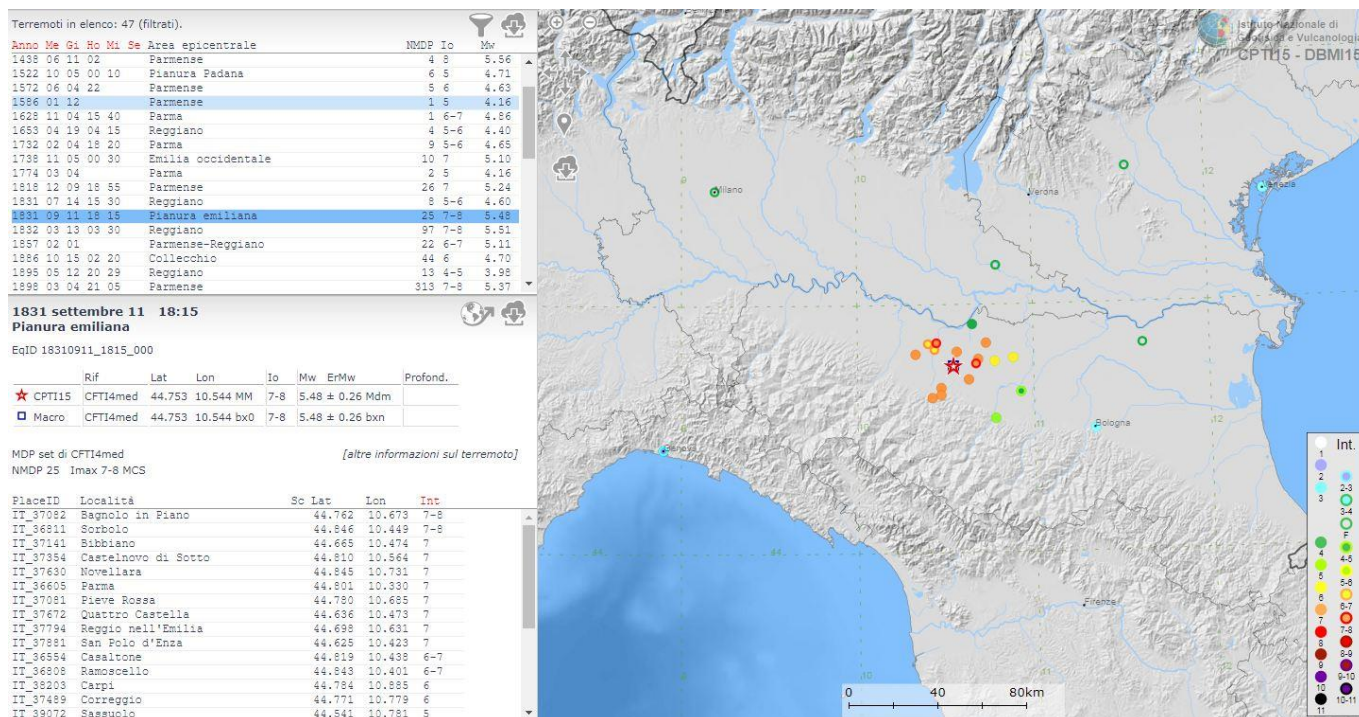


Figura 19 - Evento sismico del 11 settembre 1831 di Magnitudo 5.48

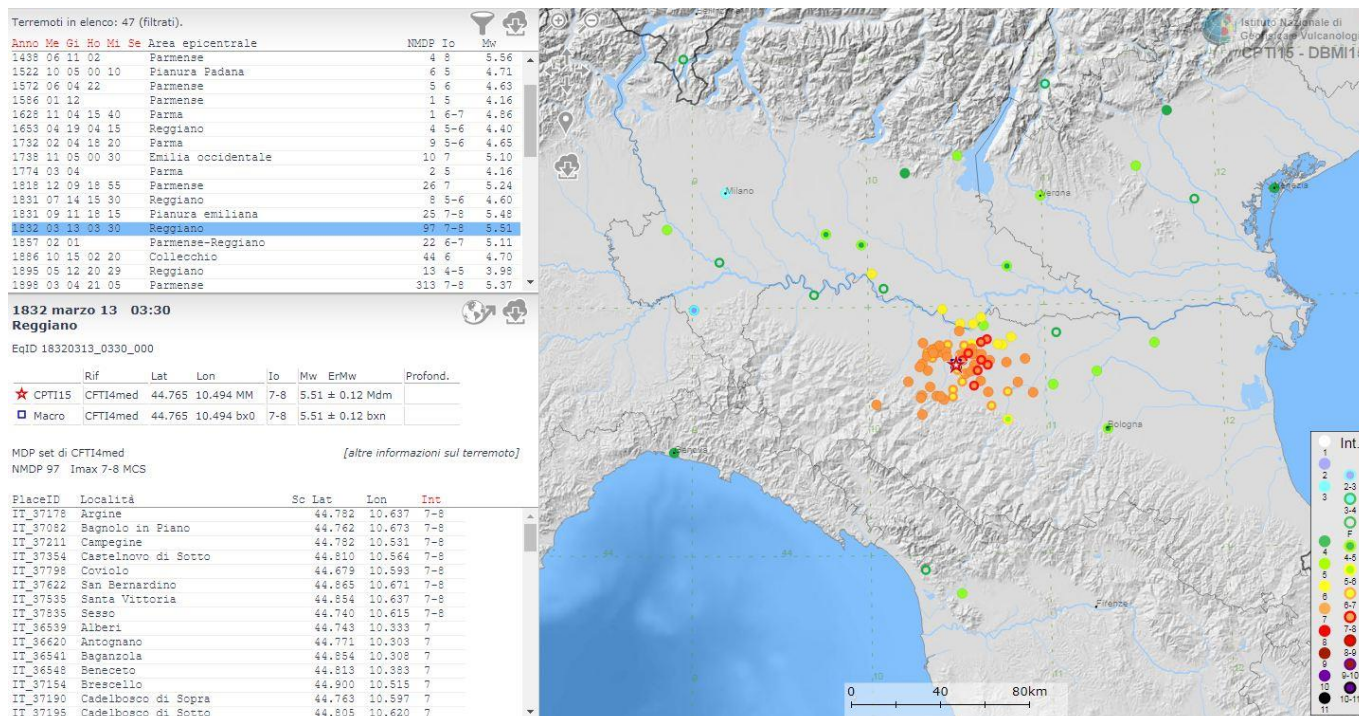


Figura 20 - Evento sismico del 13 marzo 1832 di Magnitudo 5.51



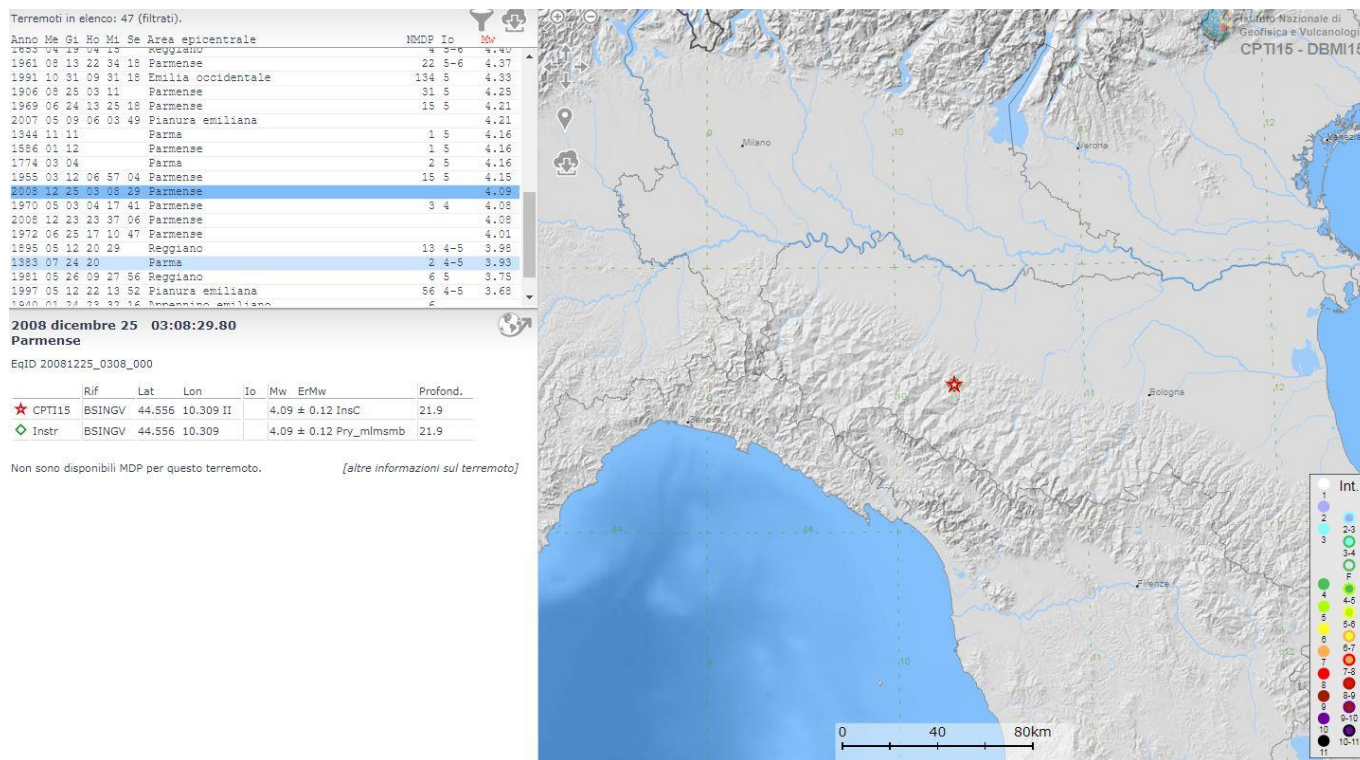


Figura 21 - Evento sismico del 23 dicembre 2008 di Magnitudo 5.36

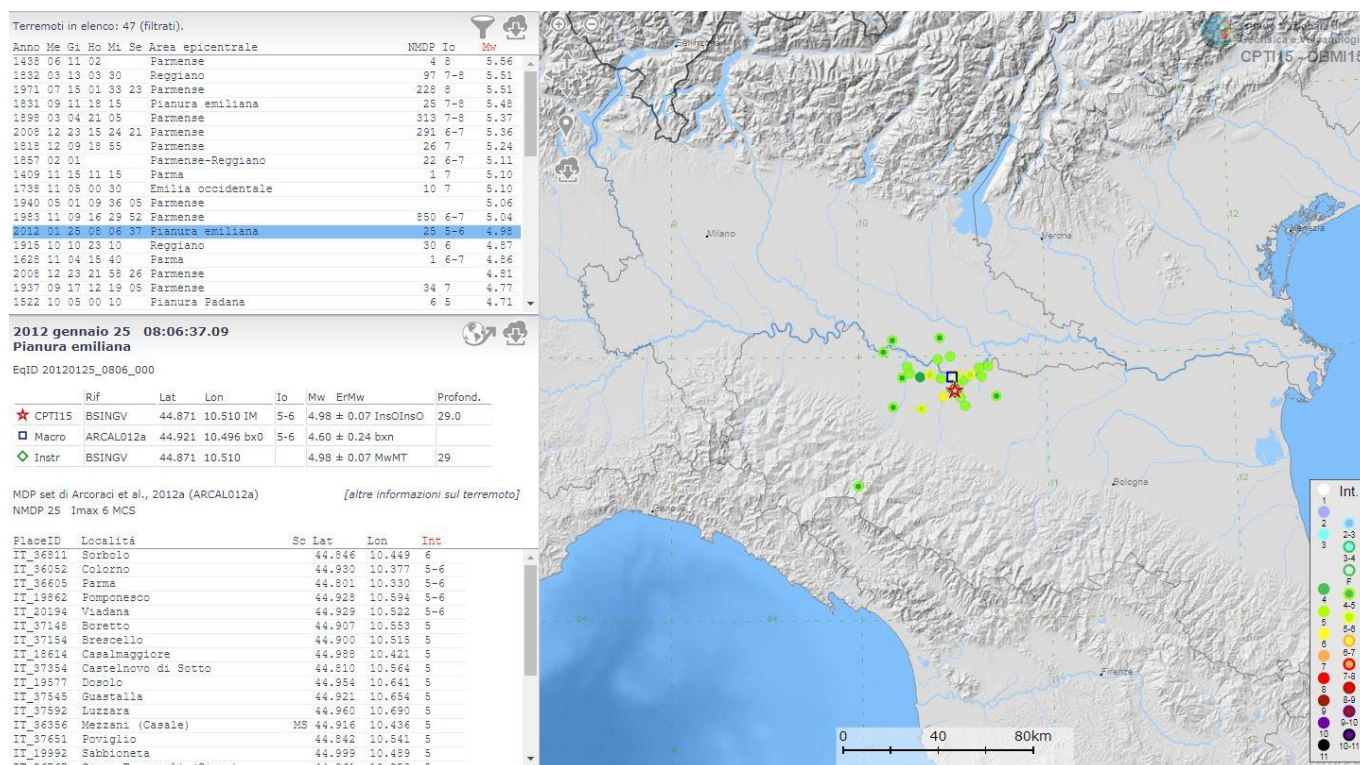


Figura 22 - Evento sismico del 25 gennaio 2012 di Magnitudo 4.98

## 2.7 DATI DI BASE DEGLI STUDI SISMOTETTONICI

### DATI GEOLOGICO-GEOFISICI

I classici dati geologico-geomorfologici di base sono informazioni indispensabili, frutto di almeno un secolo di rilevamenti di campagna, ma hanno la caratteristica di contenere un numero assai elevato di faglie che solo molto raramente corrispondono a faglie attive. Se prendiamo in considerazione l'ultima versione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15; Rovida et al., 2016), che copre una finestra temporale dall'anno Mille al 2014, vediamo che nell'ultimo sessantennio rappresentato nel catalogo (anni 1955-2014) si sono verificati 35 eventi sismici con  $M \geq 5.5$  in Italia. Tra questi l'unico terremoto che ha dato luogo a manifesta e condivisa fagliazione superficiale (la faglia dell'Irpinia del 23 novembre 1980, Mw 6.8) è stato generato da una faglia non rappresentata nelle carte geologiche; altri due eventi hanno generato rotture cosismiche superficiali non condivisa e/o non rappresentate nella cartografia geologica ufficiale (sequenza dell'Umbria-Marche del 1997 e il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009); e la restante trentina di eventi è stata generata da faglie cieche o profonde, o da faglie non presenti nella cartografia geologica tradizionale.

I dati geologici sono insostituibili ma debbono essere adeguatamente interpretati nell'ambito dell'analisi sismotettonica. La conoscenza della geologia consente di comprendere la posizione e le caratteristiche di quelle sorgenti sismogenetiche che stanno attualmente deformando il paesaggio italiano.

Uno studio che consenta l'individuazione di sorgenti sismogenetiche in un contesto così complesso quale quello italiano richiede inevitabilmente l'utilizzo di un approccio non convenzionale, con l'applicazione delle metodologie e delle tecniche della Geologia del terremoto e della Tectonic geomorphology. L'applicazione di queste tecniche ha consentito di individuare la faglia cieca responsabile del terremoto dell'Emilia del 29 maggio 2012 attraverso lo studio di anomalie del drenaggio posizionate in corrispondenza di un'anticlinale profonda in un'area pianeggiante priva di sismicità storica e strumentale nota (Burrato et al., 2003; 2012; <https://ingvterremoti.wordpress.com/2012/06/19/terremoto-in-pianura-padana-lindividuazione-geologica-delle-sorgenti-sismogenetiche/>).

Nel caso dell'individuazione della faglia di Mirandola del 2012, i dati geologico-geomorfologici sono, se possibile, sempre affiancati dai dati ottenuti attraverso le più recenti tecniche geofisiche.

### DATI DI STRESS E STRAIN

Lo stress è una grandezza fisica definita come la forza applicata per unità di area; e una roccia sottoposta a stress differenziale subisce delle deformazioni o cambiamenti della sua forma definiti strain. Conoscere il campo di stress attuale della litosfera fornisce informazioni sulle deformazioni in corso alle diverse scale (dal movimento delle placche sino alla scala regionale e locale). In Italia sono preponderanti quelle eterogeneità dello stress a scala locale (Pierdominici e Heidbach, 2012) che possono essere determinate dalla presenza di fagliazione attiva. Pertanto identificare le variazioni di stress consente una migliore comprensione dei meccanismi di fagliazione.

Le indagini per riconoscere il campo di stress attivo sono analisi geologico-strutturali, le osservazioni di allineamenti di bocche vulcaniche, l'ampia tipologia di misure di stress in situ; le indagini che vengono utilizzate nella mappa dello stress italiana sono le determinazioni dei meccanismi focali dei terremoti (indicatori dello strain e per questo motivo inseriti con basso fattore di qualità in accordo con la World Stress Map; <http://www.world-stress-map.org/>; rappresentano il 46% dei dati totali) e le analisi di breakouts in pozzo (che rappresentano il 49% dei dati totali).

La geodesia spaziale e lo sviluppo di reti GNSS (Global Navigation Satellite System) negli ultimi anni hanno avuto grande sviluppo e diffusione, consentendoci di avere misure sempre più accurate e significative dei movimenti della superficie terrestre e dei tassi di deformazione in corso (strain).

La deformazione in atto rappresenta l'evidenza che si sta accumulando energia elastica che potrebbe essere rilasciata da eventi sismici. La presenza di una fitta rete di stazioni operanti in Italia e ai suoi confini da più di dieci anni ci permette di disporre di dati omogenei con una decorosa risoluzione spaziale e tempi di osservazione "significativi". In Italia l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) è il principale ente di ricerca che si occupa anche della raccolta dei dati.

### DATI SISMOLOGICI STORICI E STRUMENTALI

Uno studio sismotettonico si basa inoltre sui cataloghi storici (e.g. Guidoboni et al., 2007; Rovida et al., 2016; Fig. 3) e strumentali (ISIDe working group, 2016).

In Italia si dispone di almeno un millennio di affidabili fonti scritte e iconografiche che documentano gli eventi sismici del nostro recente passato. Per poter confrontare i terremoti a partire dall'ultimo quarto dell'Ottocento è stata ideata da Mercalli, e perfezionata nel tempo, la ben nota scala di intensità, che consente di attribuire agli effetti sismici osservati in una data località un determinato grado di intensità. L'applicazione di un criterio qualitativo fisso per la valutazione degli effetti ha reso possibile delineare aree omogenee dal punto di vista dell'intensità macrosismica e avere una sorta di quadro della sismicità italiana e delle caratteristiche dei vari terremoti che si sono succeduti nel tempo e nello spazio.

Lo studio dei dati macrosismici di eventi del passato, alla luce delle attuali conoscenze geodinamiche, può consentire di "illuminare" la conoscenza di aree sismotettoniche altrimenti oscure per via dei lunghi tempi di ritorno. I dati macrosismici sono preziosi nel fornirci informazioni sulla presenza di sismicità, sull'energia sprigionata dagli eventi sismici e, talvolta, anche su alcune caratteristiche delle faglie che li hanno generati, come la loro profondità e la loro direzione rispetto al nord geografico.

L'utilizzo di informazioni sulla sismicità storica non consente l'individuazione della cinematica della faglia e può essere reso particolarmente complesso dalla presenza di aree necessariamente prive di effetti (quali, ad esempio, il mare o aree disabitate perché montuose o paludose) o, al contrario, di aree in cui si sommano gli effetti di danno di diversi terremoti vicini nel tempo e nello spazio.

Dal punto di vista strumentale oggi in Italia esiste una rete di monitoraggio con strumentazione all'avanguardia che ha avuto grande sviluppo soprattutto negli ultimi quindici anni. L'INGV ha installato e gestisce circa 400 stazioni sismiche su tutto il territorio nazionale dotate di strumenti che rilevano ogni minimo movimento del suolo e che inviano tale informazione in tempo reale alla Sala Operativa di Monitoraggio Sismico di Roma, dove, per 365 giorni l'anno, 24 ore su 24, i dati vengono analizzati da sismologi esperti e, in caso di terremoto, le informazioni fondamentali sull'evento (localizzazione ipocentrale, magnitudo e paesi vicini all'epicentro) vengono trasmesse in pochi minuti alla Protezione Civile.

#### **2.7.1 Domini sismotettonici in Italia**

##### DOMINIO DISTENSIVO



Il più recente e forte evento estensionale in Italia è quello dell'Irpinia del 23 novembre 1980, Mw 6.8, superiore come magnitudo anche ai recenti eventi estensionali del 2016 (Mw max 6.5). La sorgente sismogenetica responsabile del terremoto del 1980 è una delle faglie italiane più studiate (vedi DISS Working Group, 2015 e bibliografia citata) e ha creato i presupposti per l'inizio dei numerosi studi di geologia del terremoto in Italia. L'evento sismico del 1980 è il frutto di un processo di rottura multipla con tre sub-eventi attivatisi nell'arco temporale di 40 secondi; esiste un generale consenso relativamente ai parametri geometrici delle tre faglie che si sono attivate- nell'intervallo di tempo di 40 secondi.

Le tre strutture hanno le seguenti caratteristiche:

- hanno tutte cinematica normale e direzione appenninica (nordest-sudovest),
- immergono verso nordest nel caso delle faglie responsabili dei primi due sub- eventi (verificatisi a 0 e 20 sec) e verso sudovest nel caso della faglia del terzo sub-evento,
- sono prive di espressione geomorfologica di lungo termine, l'antitetica attivatasi a 40 sec è una faglia cieca mentre le altre due strutture hanno permesso il riconoscimento, per la prima volta in Italia, di fagliazione superficiale cosismica.

Quest'ultima caratteristica ha determinato lo sviluppo della paleosismologia in Italia.

L'evento estensionale del 1980 si è verificato in prossimità della cresta appenninica.

Anche i recenti eventi sismici del 2016 sono dovuti all'attivazione di un sistema di faglie normali con direzione appenninica e immersione verso sudovest localizzato al di sotto delle massime cime dell'Appennino Centrale.

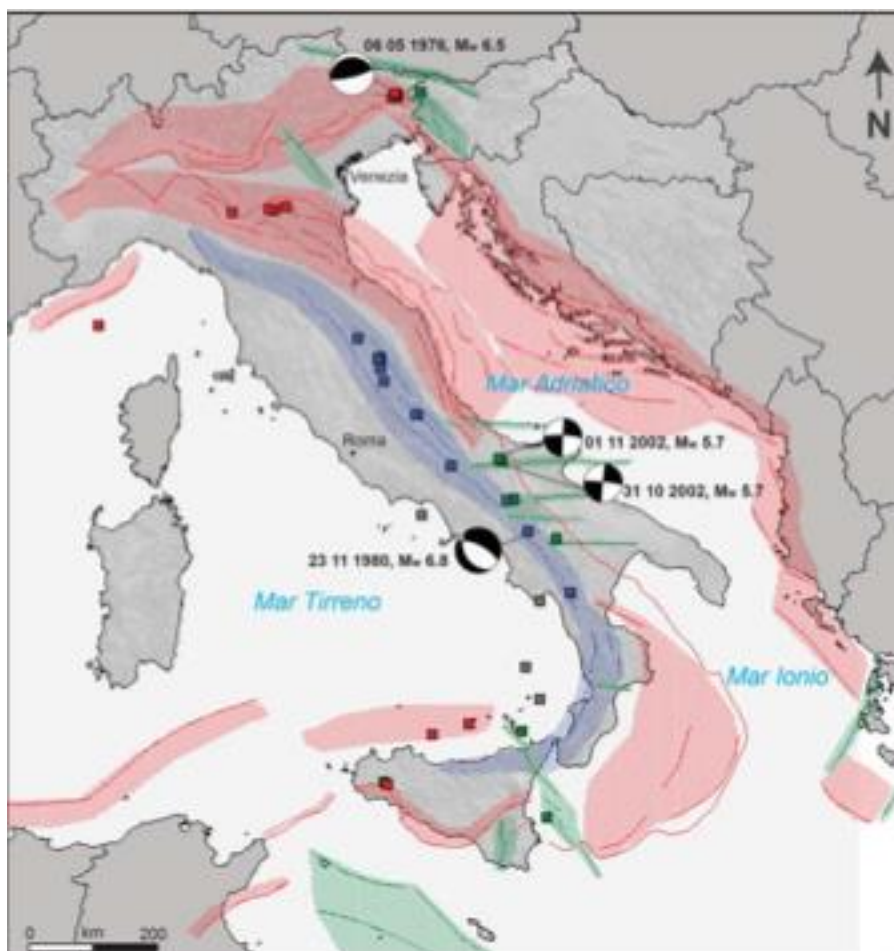


Figura 23 - Principali domini sismotettonici italiani. In rosso il dominio compressivo, in blu il dominio estensionale, in verde quello trascorrente. I quadrati colorati rappresentano gli eventi sismici differenziati per cinematica. Sono mostrati i meccanismi focali dei terremoti descritti nel testo.

### DOMINIO COMPRESSIVO

Il più forte e più recente evento compressivo in Italia è quello del Friuli del 6 maggio 1976, Mw 6.5, superiore come magnitudo agli eventi compressivi del 2012 (Mmax 6.1). Nel 1976 si è verificata una complessa sequenza sismica, in cui l'evento di maggio è stato seguito da numerose altre scosse, le due più forti delle quali (Mw 5.9 e 6.0) si sono verificate il 15 settembre.

Le strutture tettoniche responsabili dei principali eventi del 1976 sono i thrust ciechi del Sudalpino, osservati nei profili sismici e oggetto di numerose pubblicazioni (vedi DISS Working Group, 2015 e bibliografia citata). Queste strutture sismogenetiche sono vincolate dall'andamento della sismicità, dalla distribuzione spaziale degli aftershocks, dai dati provenienti dai meccanismi focali, dalle ripetute misure di livellazione e dai dati geologici.

L'evento del 6 maggio e i principali aftershocks sono stati generati da thrust ciechi a basso angolo, sud-vergenti, relativamente superficiali (2-7 km di profondità) mentre l'evento più forte del 15 settembre è stato generato da una struttura compressiva più profonda (6-11 km) localizzata a nord delle strutture precedenti e ritenuta un segmento del thrust Periadriatico (Burrato et al., 2008). Le livellazioni geodetiche hanno mostrato il sollevamento cosismico cumulato dovuto ai principali eventi della sequenza, per una lunghezza di circa 20 km, localizzato in corri-

delle aree di massimo danneggiamento. All'epoca della sequenza sono state descritte delle fratture cosismiche dovute a frane e/o a deformazione di estradosso.

La presenza di compressione attiva al fronte delle Alpi meridionali e al fronte appenninico (quest'ultima testimoniata dagli eventi emiliani del 2012 e dall'evento parmense del 1971) determina la crescita delle anticlinali - con conseguente deformazione delle superfici recenti e genesi di peculiari anomalie del drenaggio.

### DOMINIO TRASCORRENTE

I due più recenti eventi trascorrenti in Italia si sono verificati nell'ottobre-novembre 2002, entrambi con Mw 5.7. I due terremoti sono molto simili in termini di meccanismo focale e profondità ipocentrale e hanno attivato due segmenti limitrofi dello stesso sistema di faglia (DISS Working Group, 2015). Le profondità ipocentrali dei due eventi sono intorno ai 20 km; i meccanismi focali e l'analisi degli aftershocks indicano un movimento di trascorrenza destra lungo piani sub-verticali con direzione est-ovest. Il verificarsi di questi due eventi ha sorpreso la comunità scientifica in quanto si sono verificati in un'area, lontana dalla cresta appenninica e dai fronti dei thrust attivi, in cui non erano noti terremoti storici e strumentali e non erano state identificate faglie attive. Le sorgenti sismogenetiche responsabili di questi due eventi sono allineate tra loro e si trovano circa 50 km ad ovest di una struttura geologica ben nota ed evidente nel paesaggio, la Faglia della Mattinata O faglia della Valle Carbonara, gargano). Quest'ultima faglia è un'importante struttura crostale trascorrente, con direzione est-ovest e con una lunga storia tettonica (Di Bucci et al., 2010), la cui riattivazione come trascorrenza destra è cinematicamente consistente con l'estensione appenninica e la spinta verso NW della placca africana.

### **2.8 ZONAZIONE SISMOGENETICA PROPOSTA**

La zonazione sismogenica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; Meletti et al., 2008) è il riferimento attuale per gli studi di pericolosità sismica.

Questa individua nell'Appennino settentrionale zone sismogeniche molto estese e a sviluppo prevalentemente longitudinale (Figura 24), parallele all'asse della catena, nonostante l'Appennino settentrionale sia caratterizzato anche da importanti zone di deformazione trasversali alla catena.

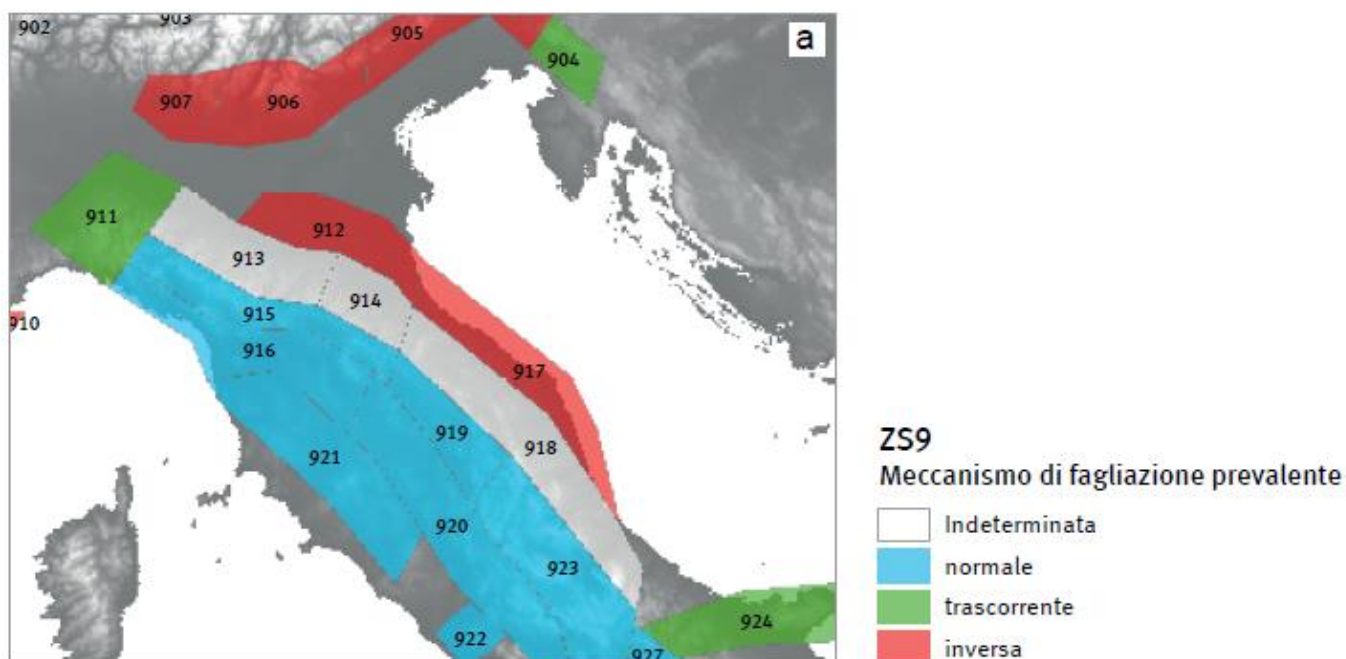


Figura 24 – Stralcio della zonazione sismogenetica ZS9 utilizzata (da Meletti e Valensise, 2004)

La precedente zonazione di riferimento, la ZS4 (Scandone e Stucchi, 2000), individuava zone meno estese, alcune delle quali a sviluppo trasversale rispetto all'asse della catena (Figura 25).

In entrambe, vaste aree della Pianura Padana non risultano comprese in nessuna delle due zonazioni sismogenetiche citate, sebbene siano noti anche in queste aree terremoti che hanno causato ingenti danni.

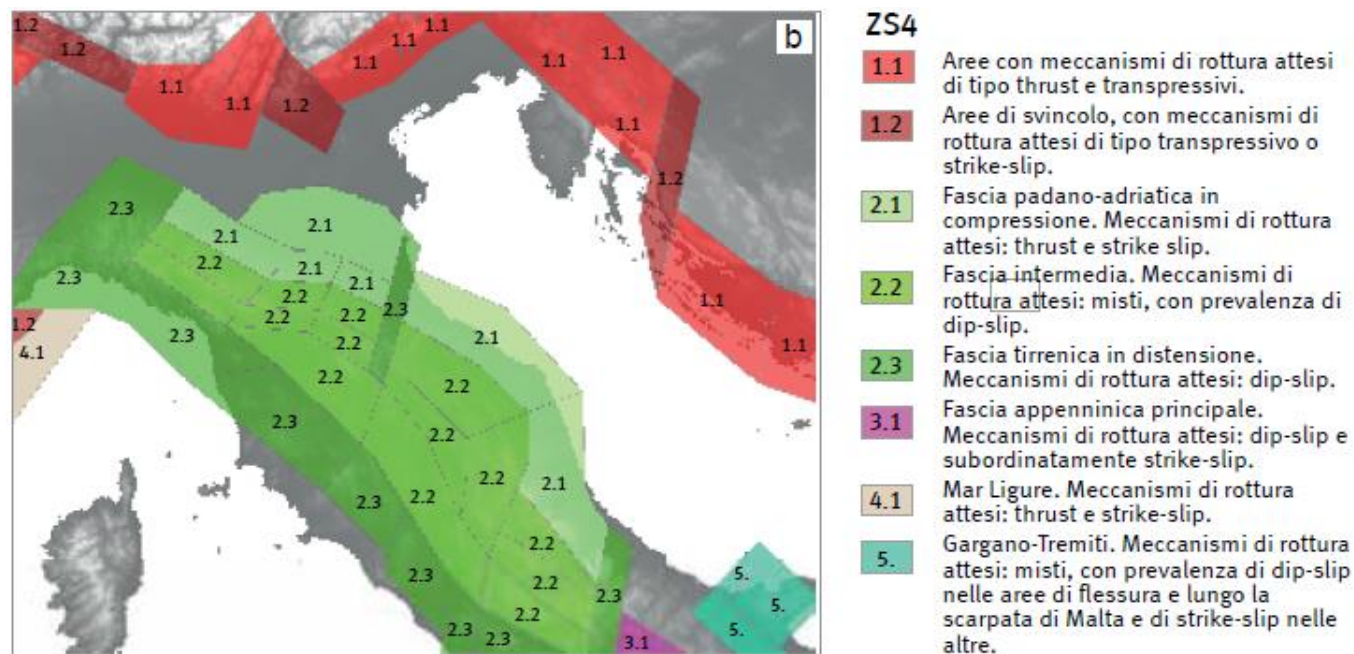


Figura 25 – Stralcio della zonazione sismogenetica ZS4 (da Scandone e Stucchi, 2000)

Dal 2004 fino al 2016, anche a seguito delle importanti sequenze sismiche che hanno interessato l'Italia centrale e settentrionale ed alla rilocalizzazione di alcuni terremoti storici, sono stati pubblicati vari lavori e nuovi dati (Boccaletti



et al., 2004, 2005, 2011; Basili et al., 2008; Sani et al., 2009; Fantoni e Franciosi, 2010; Locati et al., 2011; Rovida et al., 2011; Mantovani et al., 2011, 2013; Martelli, 2011; Rogledi, 2013; Vannoli et al., 2014; ISIDe Working Group, 2015; DISS Working Group, 2015) che hanno evidenziato la possibilità di una migliore definizione delle zone potenzialmente sismogenetiche dell'Appennino settentrionale, in particolare per il settore tosco-emiliano-romagnolo e per la Pianura Padana centrale ed orientale.

È stata quindi rivista e aggiornata la cartografia sismotettonica regionale pubblicata nel 2004 (Boccaletti et al., 2004).

La nuova carta sismotettonica regionale (Martelli et al., 2017a) è stata realizzata dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli in collaborazione con l'Istituto di Geoscienze e Georisorse, sezione di Firenze, del CNR, con il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze e con l'INGV, sezione di Bologna, considerando i dati geologici e sismologici di un'area molto più ampia del territorio regionale, al fine di riconoscere le strutture attive e potenzialmente attive capaci di influenzare la pericolosità sismica dell'Emilia-Romagna (Figura 26).

L'aggiornamento ha considerato come attive quelle strutture che mostrano chiare evidenze di influenza sull'evoluzione morfologica del paesaggio attuale o che hanno deformato orizzonti stratigrafici non più antichi di 450.000 anni, età attribuita al limite inferiore del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (RER & ENI-Agip, 1998; RL & ENI, 2002).

La superficie di base di questo sintema è stata assunta come riferimento per classificare il grado di attività delle strutture in quanto rappresenta il marker stratigrafico più rappresentato e meglio definito alla scala del territorio d'interesse.

Le strutture che presentano evidenze minori di influenza sull'evoluzione morfologica del paesaggio attuale o di deformazione degli orizzonti stratigrafici non più antichi di 450.000 anni sono state definite potenzialmente attive.

Per la cartografia delle faglie attive nelle zone non oggetto delle attività di revisione della carta sismotettonica regionale sono stati considerati i cataloghi ITHACA (ISPRA-SGI, 2010) e DISS 3.2 (DISS Working Group, 2015). Per la definizione di una zonazione sismogenetica finalizzata alla definizione della pericolosità sismica è stata considerata un'area ancora più ampia, che si estende per almeno circa 200 Km all'intorno dell'Appennino emiliano-romagnolo e risulta compresa tra il margine sud-alpino a nord e la Toscana meridionale, l'Umbria e le Marche a sud.

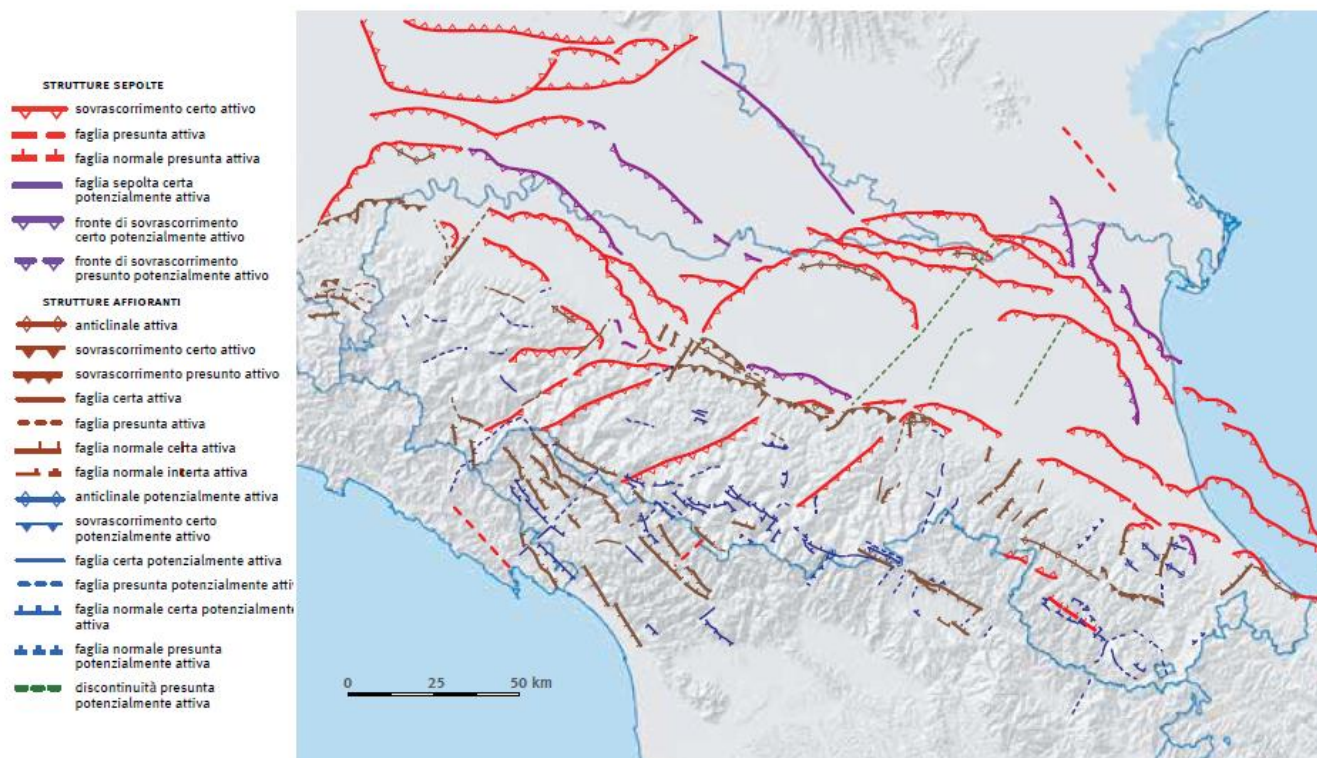


Figura 26 – Schema di sintesi delle strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riconosciute nell'appennino tosco-emiliano-romagnolo e nella Pianura Padana centrale ed orientale (da Martelli et al., 2017)

## 2.9 PRINCIPALI ZONE SISMOGENICHE

Sulla base delle strutture attive e potenzialmente attive riconosciute (come descritto al precedente paragrafo) e della distribuzione della sismicità storica e strumentale di seguito si riportano le 5 differenti fasce sismotettoniche che includono l'area di interesse per il progetto delle opere, ognuna caratterizzata, al proprio interno, da un regime sismico che può essere considerato omogeneo: da SW verso NE, sono:

- 1) settore interno (Toscana occidentale e centrale),
- 2) fascia dei bacini intermontani orientali (Toscana nordoccidentale e nordorientale, Umbria, Marche occidentali),
- 3) versante adriatico della zona assiale (Emilia-Romagna sud-occidentale e Marche orientali),
- 4) margine appenninico-padano,
- 5) zona dei fronti sepolti padani e adriatici.

La continuità longitudinale di queste fasce è localmente interrotta da fasce trasversali in cui sono state riconosciute strutture attive. Queste strutture trasversali giocano un ruolo importante nella distribuzione della sismicità e perciò sono state considerate nella nuova zonazione. Di seguito sono brevemente descritte le principali caratteristiche di ciascuna delle fasce individuate.

### 2.9.1 Settore interno (Toscana occidentale e centrale)

Comprende il bacino tirrenico e i numerosi bacini marini e continentali che si sono sviluppati nella Toscana occidentale e centrale a partire dal Miocene medio-superiore. Secondo il modello classico, la nascita di questi bacini è correlata con il regime estensionale mentre secondo altri modelli questi bacini si sono sviluppati in un regime compressivo che ha sostituito la componente estensionale durante l'ultima fase evolutiva del bacino tirrenico. La sismicità strumentale è generalmente limitata e caratterizzata da eventi superficiali ( $<10$  km) e di bassa magnitudo ( $M_w < 4$ ) (ISIDe Working Group INGV, 2015). Sono tuttavia noti alcuni eventi storici del 1414 ( $M_w \approx 5,6$ ), del 1558 ( $M_w \approx 5,8$ ), del 1846 ( $M_w \approx 5,9$ ) e del 1914 ( $M_w \approx 5,7$ ) che hanno rispettivamente interessato Radicondoli, la Val di Fine e la zona di Lucca. In generale gli eventi sismici sono concentrati in aree specifiche, in particolare nelle zone dei campi geotermici di Larderello e del M. Amiata, nei dintorni del lago di Bolsena, di Siena e a sud-ovest di Firenze; quest'ultima zona è stata interessata anche recentemente (nel dicembre 2014) da una nuova sequenza sismica (v. dataset TDMT in <http://cnt.rm.ingv.it/tdmt>; Scognamiglio et al., 2009). Le faglie potenzialmente attive individuate sono prevalentemente normali e localizzate in aree specifiche, come l'area costiera che limita le Alpi Apuane e il Monte Pisano dove le faglie sono prevalentemente orientate NW-SE. Faglie normali con orientazione simile sono state riconosciute anche a sud di Firenze. Inoltre, è importante citare la presenza di segmenti di faglia trasversali, cioè orientati circa NE-SW, localmente importanti, presenti nell'area a sud-est di Firenze, nei dintorni di Siena e lungo l'allineamento Livorno-Sillaro. Queste faglie trasversali possono essere caratterizzate da una componente trascorrente del movimento, come indicato da alcuni meccanismi focali, per esempio i moderati terremoti di settembre e dicembre 2014 rispettivamente localizzati a sud di Firenze e nel Casentino (v. dataset TDMT in <http://cnt.rm.ingv.it/tdmt>; Scognamiglio et al., 2009).

### 2.9.2 Fascia dei bacini intermontani (versante tirrenico della zona assiale della catena)

Comprende la fascia dei bacini continentali intermontani del versante tirrenico prossimi al crinale appenninico. Questa fascia è relativamente stretta nel settore nord-occidentale mentre si allarga verso sud-est. Da nord-ovest verso sud-est i principali bacini sono: la Lunigiana, la Garfagnana, il bacino di Pistoia-Prato-Firenze, il Mugello, il Valdarno Superiore, il Casentino, la Valtiberina, il bacino di Gubbio, la Valle Umbra, i bacini di Colfiorito, di Norcia, di Leonessa, di Rieti e di L'Aquila. Questa fascia è caratterizzata da una sismicità diffusa, con eventi generalmente superficiali (profondità  $<15\div20$  km), caratterizzati da prevalenti meccanismi focali estensionali. In questa zona si sono verificati alcuni degli eventi sismici più forti dell'area. In particolare, da nord-ovest a sud-est, gli eventi storici più importanti ( $M_w \geq 6,0$ ) sono:

- Garfagnana 1920 ( $M_w \approx 6,5$ ),
- Mugello 1919 ( $M_w \approx 6,3$ ),
- Valtiberina 1352 ( $M_w \approx 6,4$ ),
- Gualdo Tadino 1751 ( $M_w \approx 6,2$ ),
- Colfiorito 1279 ( $M_w \approx 6,3$ ),
- Valle Umbra 1832 ( $M_w \approx 6,3$ ),
- Norcia 1328 ( $M_w \approx 6,4$ ),
- Norcia 1703 ( $M_w \approx 6,7$ ),
- Leonessa 1298 ( $M_w \approx 6,2$ ),

- L'Aquila 1703 ( $M_w \approx 6,7$ ).

Anche recentemente questo settore è stato interessato da forti terremoti che hanno causato gravi danni in aree estese, in particolare le seguenti sequenze sismiche:

- Sequenza di Colfiorito ( $M_w \approx 6,0$ ) di settembre 1997,
- il terremoto di L'Aquila ( $M_w \approx 6,3$ ) dell'aprile 2009
- la sequenza sismica, tuttora in atto, che ha interessato la dorsale dell'Appennino centrale tra Amatrice, Norcia e Visso (24 agosto 2016,  $M_w = 6,0$ ; 30 ottobre 2016  $M_w = 6,5$ ).

I principali eventi sismici sono strettamente associati a sistemi di faglie normali orientate NW-SE che tipicamente bordano i bacini intermontani.

### 2.9.3 Versante Adriatico della zona assiale

Anche la zona assiale di catena del versante padano è caratterizzata da una sismicità diffusa, più profonda rispetto a quella della fascia dei bacini intermontani. In particolare, gli ipocentri spesso sono localizzati a profondità comprese tra 20 e 60 km, soprattutto nella zona nord-occidentale (Appennino emiliano centrale; ISIDe Working Group INGV, 2015). In questa fascia i forti terremoti sono meno frequenti rispetto alla zona dei bacini intermontani ed i più noti sono i terremoti con  $M_w \geq 6,0$  da nord-ovest a sud-est:

- Appennino romagnolo 1661 ( $M_w \approx 6,1$ ),
- Cagli 1781 ( $M_w \approx 6,4$ ),
- Fabriano 1741 ( $M_w \approx 6,2$ ),
- Appennino marchigiano 1799 ( $M_w \approx 6,1$ ) e 1873 ( $M_w \approx 6,0$ ).

Inoltre è importante ricordare la ricorrenza nell'Appennino romagnolo di terremoti  $M_w \approx 5,8 \div 5,9$ , come quelli del 1584, 1768 e 1918.

I meccanismi focali dei terremoti superficiali ( $< 15$  km) sono prevalentemente estensionali mentre i meccanismi focali dei terremoti più profondi ( $> 20$  km) sono compressivi.

La zona assiale nord-occidentale (Appennino emiliano centrale) presenta chiare evidenze morfologiche indicative di attività recente di faglie normali immergenti verso N-NE che deformano le precedenti strutture compressive.

Strutture e relazioni temporali analoghe sono state identificate anche nell'Appennino romagnolo. Nel database DISS 3.2 (DISS Working Group, 2015) una superficie di scorrimento profonda a basso angolo immergente verso SW (ITCS027) è considerata la sorgente sismogenetica dei forti terremoti storici che hanno colpito questo settore delle Marche. Questa struttura, ipotizzata affiorante lungo la costa marchigiana, è ritenuta proseguire verso nord-ovest nel sottosuolo dell'Appennino emiliano-romagnolo. In questo scenario, le faglie normali e i meccanismi focali estensionali potrebbero essere la risposta deformativa della porzione superficiale della crosta a sovrascorrimenti profondi, come già proposto per l'Appennino bolognese da Picotti e Pazzaglia (2008).

### 2.9.4 Margini appenninico Padano

Questo rappresenta il settore di transizione tra catena appenninica emersa e Pianura Padana. La sismicità strumentale è importante ma non molto frequente, a meno di concentrazioni locali dovute a sequenze sismiche



recenti, come ad esempio la sequenza sismica di Forlì-Faenza dell'aprile-maggio 2000 (ISIDe Working Group INGV, 2015).

I forti eventi storici non sono comuni e al massimo hanno raggiunto magnitudo  $M_w=6,0$ .

I terremoti più importanti sono:

- Sassuolo 1501 ( $M_w \approx 6,0$ )
- Faenza 1781 ( $M_w \approx 5,9$ ).

I meccanismi focali disponibili sono prevalentemente compressivi con assi orientati circa N÷NE, e profondità ipocentrali generalmente più profonde di 15÷20 Km.

Il margine pede-appenninico è caratterizzato dalla presenza di un sistema di thrust immergenti verso SW responsabile del rapido sollevamento della catena appenninica. Questo sistema di thrust può essere cartografato per oltre 300 km ed è caratterizzato da segmenti attivi che localmente raggiungono la superficie. Verso sud questo sistema di thrust continua con il sistema a pieghe e thrust della costa marchigiana. Quest'ultimo è caratterizzato da eventi sismici significativi, il più importante dei quali è il terremoto di Senigallia del 1930 ( $M_w \approx 5,8$ ).

### **2.9.5 Zona dei fronti sepolti padani ed adriatici**

Importanti sistemi di pieghe e thrust sepolti immergenti verso SSW÷SW, che in carta mostrano una tipica forma ad arco, sono presenti nel sottosuolo della Pianura Padana, a nord del margine pede-appenninico. Queste strutture hanno controllato la deposizione di spessori importanti di successioni di sedimenti marini di età compresa tra il Messiniano e il Pleistocene inferiore che hanno riempito i bacini di piggyback oggi sepolti dai depositi continentali di età Pleistocene medio-Olocene del Po e dei suoi affluenti. Queste dorsali sepolte (Pieghe Emiliane e Pieghe Ferraresi) sono i veri fronti della catena appenninica. Questi archi proseguono verso sud-est in Adriatico, lungo la costa romagnola e marchigiana (Pieghe Adriatiche), dove si uniscono alle pieghe e thrust della costa marchigiana, continuazione verso sud del sistema di thrust pede-appenninico. L'attività recente di questi fronti sepolti è manifestata dalla evidente deformazione dei depositi del Pleistocene medio-superiore, così come dall'attività sismica che in carta mostra una distribuzione arcuata perfettamente corrispondente con la localizzazione delle dorsali sepolte. La sismicità è generalmente superficiale (profondità ipocentrale  $\leq 10$  km) e gli epicentri si concentrano in specifici settori, soprattutto lungo le Pieghe Ferraresi, che anche recentemente sono state interessate da sequenze sismiche importanti, quali quella di Reggio Emilia dell'ottobre 1996 e quella di Finale Emilia-Mirandola del maggio 2012 (ISIDe Working Group INGV, 2015).

I precedenti terremoti della pianura emiliano-romagnola hanno una magnitudo macrosismica inferiore a  $M_w \approx 5,6$ . La scossa principale della sequenza sismica del 2012, stimata  $M_w=6,1$  è l'evento più forte mai registrato in questo settore. Altri eventi storici rilevanti, correlati con i thrust delle Pieghe Adriatiche sono quelli avvenuti in mare davanti alla costa di Rimini nel 1916 ( $M_{wmax}=6,1$  e  $M_{wmax}=6,0$ ). I meccanismi focali disponibili indicano nel tratto di arco orientato circa WNW-ESE una cinematica compressiva con assi P suborizzontali orientati circa N÷NE, come ad esempio nel caso della citata sequenza sismica dell'Emilia 2012. Nel tratto di rampa laterale orientata NE-SW, a nord-est di Reggio Emilia, i meccanismi focali indicano una consistente transpressione sinistra.

## 2.10 CRITERI DI DEFINIZIONE DELLE NUOVE ZONE SISMOGENETICHE

Le cinque fasce di territorio sopra descritte sono state ulteriormente distinte allo scopo di definire le zone sismogenetiche tenendo conto delle caratteristiche sismotettoniche riconosciute e far sì che abbiano dimensioni adeguate per l'analisi della pericolosità sismica. Le nuove zone sono state perimetrate e definite considerando le seguenti informazioni disponibili:

- distribuzione epicentrale dei terremoti, macrosismici e strumentali, in particolare quelli con  $M > 3,0$  (da CPTI15: Rovida et al., 2016; ISIDE ed eventuali altri dati INGV);
- magnitudo massima osservata/stimata;
- meccanismi focali (da European-Mediterranean RCMT catalog, <http://www.bo.ingv.it/RCMT/>; Pondrelli et al., 2011),
- profondità ipocentrale;
- geometria, tipologia e cinematica delle strutture attive e potenzialmente attive riconosciute (Boccaletti et al., 2004; catalogo ITHACA: ISPRA-SGI, 2010; Rogledi, 2013; DISS Working Group 2015; Martelli et al., 2017a).

Nella definizione dei limiti geografici le zone differiscono tra loro prevalentemente per geometria e tipologia delle strutture osservate, e quindi per il meccanismo di rottura ipotizzato, per la profondità degli ipocentri, per il numero e la magnitudo degli eventi osservati.

All'interno di ciascuna zona le condizioni sismotettoniche sono ritenute omogenee e per ciascuna di esse è stato proposto un meccanismo di rottura definito in base a:

- geometria del piano di rottura (intervallo della direzione di immersione e inclinazione),
- tipo di movimento (normale, inverso, trascorrente, misto),
- intervallo di profondità di rottura ipotizzata,
- magnitudo massima attesa coincidente con le magnitudo massime che ricadono all'interno della zona stessa, stimate da terremoti storici o determinate da dati strumentali.

Quando le differenze tra le nuove zone e quelle della ZS9 sono risultate minime, in termini di limiti geografici e caratteristiche sismotettoniche interne, i limiti e le definizioni adottati sono gli stessi delle zone ZS9.

Per alcune zone sono stati ritenuti possibili più meccanismi di rottura ed in questi casi (laddove possibile) sono state attribuite diverse stime percentuali di accadimento.

Le principali novità della zonazione proposta (Figura 27) consistono in:

- una suddivisione di alcune zone ZS9 molto estese (ad es. le zone 912, 915, 916, 921) che, a giudizio degli Autori, includono strutture sismogenetiche con differente geometria e meccanismo di rottura;
- l'introduzione di nuove zone comprendenti aree finora non considerate sismogenetiche, come ad esempio alcune aree della Pianura Padana centrale e della costa tirrenica;
- l'introduzione di zone trasversali all'asse della catena, motivate dalla presenza di strutture quaternarie orientate circa NE-SW, con componente trascorrente, che deformano le strutture appenniniche (con andamento NW-SE).

Di seguito si riporta una sintesi, in termini di caratteristiche sismotettoniche, delle nuove zone e le principali differenze rispetto alle zone ZS9, per una analisi della pericolosità sismica.

N.	Orientazione delle principali faglie attive	Geometrie principali (secondarie)	Profondità ipocentrale	M <sub>MAX</sub>	
				Osservato	Calcolato
1	NE-SW?	Trascorrente	?	5.7	5.93 ± -0.25
2	NE-SW(S/45-60)	Trascorrente (inversa)	5-30	5.5	5.71 ± -0.29
3	S-SSW/45	Inversa	5-15	6.1	5.94 ± -0.24
4	SW/30	Inversa	5-15	6.1	6.16 ± -0.21
5	S-SSW/15-30	Inversa	15-35	5.5	6.00 ± -0.53
6	S/45-60	Inversa	10-30	6	6.31 ± -0.29
7	N/65 (S/30)	Normale (Inversa)	5-10(>15)	5.5	5.61 ± -0.23
8	NE/60-70(60%)–SW/60-70(40%)-NE-SW	Normale (transtensiva destra)	5-15 (10-20)	6.5 (5.1)	6.50 ± -0.23
9	SW/65 (NE65)	Normale	5-15	5.4	6.28 ± -0.27
10	NNE-SSW (S/45-60)	Trascorrente (Inversa)	5-15 (15-35)	5.5	5.73 ± -0.30
11	NE-SW (SW/60-70)	Trascorrente (Normale)	5-15	5.7	6.12 ± -0.38
12	S/30-45	Inversa	5-35	6.1	6.23 ± -0.24
13	NE/65 (SSW 30)	Normale (Inversa)	3-10 (>15)	6	6.18 ± -0.22
14	SSW/60-70(60%) NNE/60-70(40%)	Normale	5-15	6.3	6.61 ± -0.29
15	SW/65 (NE-SW)	Normale (Trascorrente)	5-15	5.4	5.81 ± -0.37
16	WSW/60-70	Normale	5-15	5.9	6.43 ± -0.38
17	NNE-SSW (SSW/30)	Trascorrente (Inversa)	5-15 (15-25)	6	5.96 ± -0.26
18	NE-SW (SW/60-70?)	Trascorrente (Normale?)	5-15	5.8	6.00 ± -0.29
19	SW/60	Normale	5-15?	5.1	5.32 ± -0.20
20	SW/30	Inversa	10-35	6.4	6.61 ± -0.29
21	SW/45-65(60%) ENE/45-65(40%)	Normale	5-15	6.7(6.43)	6.46 ± -0.21
22	WSW/65	Normale	5-15	5.0	5.83 ± -0.40
23	WSW/65	Normale	5-15	5.7	5.97 ± -0.26
24	SW/30	Inversa	10-35	5.5(6.84)	7.20 ± -0.28
25	SW/50-70	Normale	5-15	7.1	7.06 ± -0.21
26	SW/60-70	Normale	5-15	5.5	5.65 ± -0.25
27	NW/60	Normale	5-15	5.5	5.65 ± -0.25
28	S/45	Inversa	5-30	5.5	5.86 ± -0.46
29	N/30	Inversa	5-15	6.0	6.03 ± -0.30
30	N/30	Inversa	5-15	6.0	5.93 ± -0.24
31	E/35	Inversa	5-15	6.0(5.43)	5.61 ± -0.23

Tabella 1 – Principali caratteristiche delle nuove zone sismogenetiche proposte per l'Appennino settentrionale



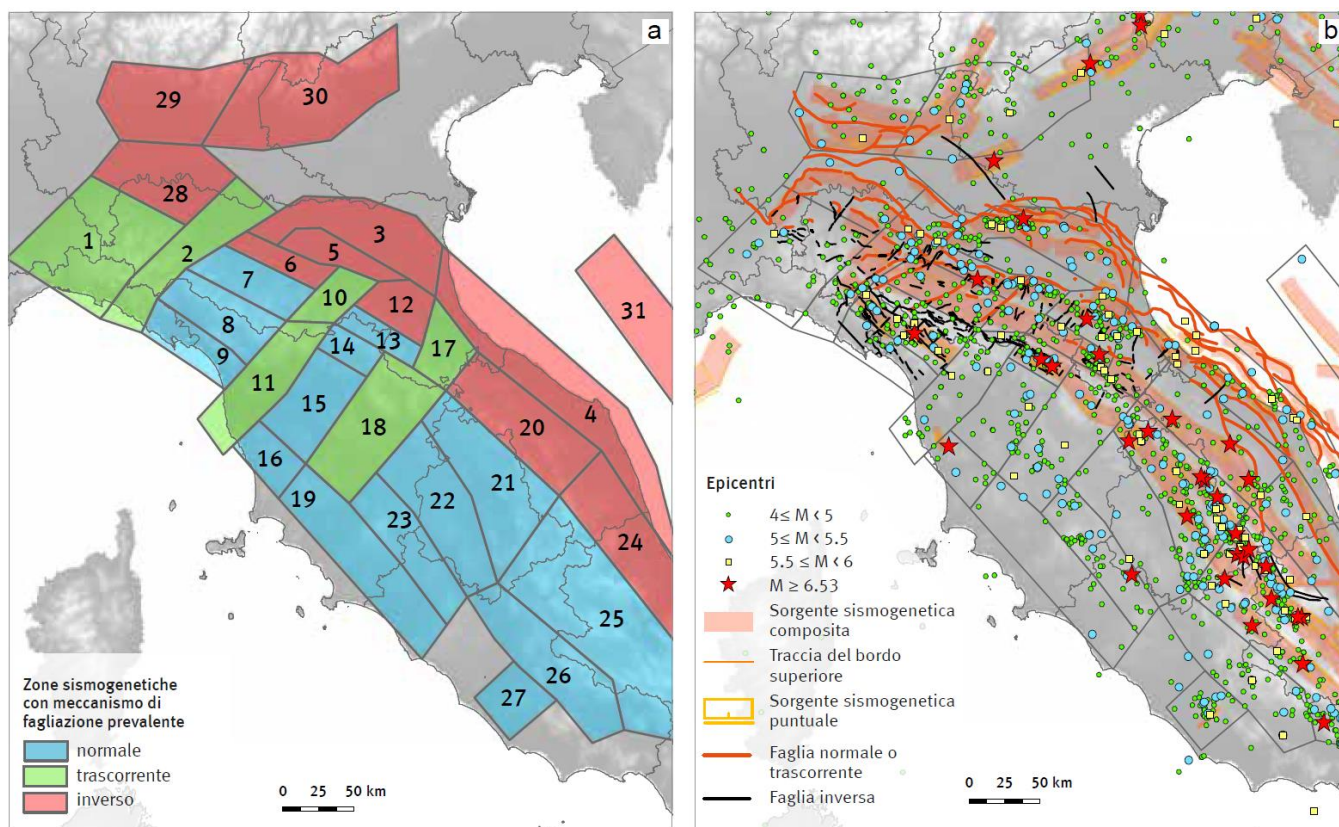


Figura 27 – La nuova zonazione sismogenetica proposta per l'Appennino settentrionale a sinistra; dati di riferimento a destra

### 2.10.1 Descrizione delle zone sismogenetiche individuate e riportate nella Tabella 1

Sulla base delle considerazioni sopra esposte e delle caratteristiche geodinamiche e sismotettoniche dell'Appennino settentrionale e della Pianura Padana centrale e orientale si descrive una nuova zonazione sismogenetica: le principali caratteristiche di ogni zona e le principali differenze o analogie rispetto alla ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; Meletti et al., 2008).

**Liguria (1)** Questa zona corrisponde al settore più occidentale dell'Appennino. E' una modifica dell'estensione areale della zona 911 della ZS9 a seguito dell'introduzione delle zone Pieghe Emiliane e Taro-Enza; le caratteristiche sismotettoniche sono quelle della zona 911 della ZS9, con fagliazione prevalentemente di tipo trascorrente lungo strutture trasversali; la magnitudo massima osservata è  $M \approx 5,7$ .

**Taro-Enza (2)** Zona estesa dal Mar Ligure (Liguria di Levante) al Po, caratterizzata dalla presenza di importanti elementi tettonici trasversali all'asse della catena, con componente di movimento trascorrente, che interrompono e dislocano le strutture "appenniniche". Le profondità ipocentrali sono talora elevate ( $>30$  km). Lungo il margine appenninico e in corrispondenza del settore orientale delle Pieghe Emiliane si ritengono probabili sovrascorrimenti attivi. La direzione di compressione (assi P) è in ogni caso circa N-S. La magnitudo storica massima è  $M \approx 5,5$ . Corrisponde alla parte occidentale delle zone 913, 915 e 916 della ZS9; la parte settentrionale non era compresa in nessuna zona della ZS9.

**Pieghe Ferraresi (3)** Questa zona comprende l'insieme dei fronti delle Pieghe Ferraresi ed ha caratteristiche simili a quelle indicate per la zona 912 della ZS9 (meccanismi compressivi, direzione di compressione, assi P, circa N-S,

piani immergenti verso sud di 45°) ma estensione minore per l'introduzione della zona "Nonantola-Budrio". La profondità degli ipocentri è prevalentemente compresa tra 5 e 15 km; la magnitudo massima registrata è  $M=6,1$ , ed è relativa alla recente sequenza sismica del maggio 2012. E' di fatto la zona settentrionale della zona 912 della ZS9. La suddivisione della zona 912 della ZS9 nelle due zone "Pieghe Ferraresi" e "Nonantola- Budrio" è motivata dal tentativo di considerare separatamente la zona dei fronti delle Pieghe Ferraresi, territorio caratterizzato da eventi storici importanti e numerose evidenze di attività tettonica recente, dalla zona di sinforme interposta tra le Pieghe Ferraresi e le Pieghe Romagnole - thrust pede-appenninico, settore caratterizzato da minore frequenza di terremoti, per lo più di bassa e media intensità, e da poche evidenze di attività tettonica recente.

Nonantola – Budrio (5) Zona compresa tra le Pieghe Ferraresi e il margine appenninico (Pieghe Romagnole - thrust pede-appenninico) caratterizzata da bassa sismicità e rare evidenze di attività tettonica recente. Corrisponde alla parte meridionale della zona 912 della ZS9 (v. zona Pieghe Ferraresi); i terremoti attesi sono compressivi e profondi ( $>10$  km), con direzione di compressione (assi P) circa N-S, lungo piani a basso angolo (di fatto corrisponde alla zona di flat delle Pieghe Ferraresi) immergenti verso sud. La magnitudo storica massima è  $M\approx 5,5$ .

Pieghe Adriatiche (4) Corrisponde alla zona 917 della ZS9, leggermente modificata nei limiti nord-occidentali. Le caratteristiche sismotettoniche assunte sono quelle già indicate per la zona 917 della ZS9, vale a dire deformazione lungo thrust attivi immergenti verso SW. Evidenze geomorfologiche indicano la presenza di anticlinali di crescita attive lungo la costa adriatica (Vannoli et al., 2014). La magnitudo storica massima è  $M\approx 6,1$ . Margine Emiliano (6) Zona caratterizzata da numerose evidenze geologiche di attività tettonica recente, collegate essenzialmente al thrust pede-appenninico, e frequenti terremoti di forte intensità; i terremoti di questa zona sono prevalentemente compressivi, con direzione di compressione (assi P) circa N-S, piani immergenti verso sud di 45°-60°, con ipocentri a profondità variabili, per lo più tra 10 e 30 km; la magnitudo storica massima è  $M\approx 6$ . Corrisponde al settore centro-settentrionale della zona 913 della ZS9.

Appennino Emiliano (7) Zona caratterizzata da terremoti di minore intensità, sia compressivi, generalmente a profondità compresa tra 15 e 35 km, con direzione di compressione (assi P) circa N-S, sia estensionali, per lo più a profondità minore di 15 km; la magnitudo storica massima è  $M\approx 5,5$ . Corrisponde al settore centro-meridionale della zona 913 della ZS9.

Garfagnana (8) Zona caratterizzata da eventi sismici frequenti, talora di elevata magnitudo ( $M>6,0$ ), comprendente i bacini toscani della Lunigiana e della Garfagnana e il crinale appenninico toscano-emiliano tra le valli dei fiumi Parma e Panaro. Le principali strutture tettoniche con evidenze di attività recente sono faglie estensionali immergenti a SW e NE e strutture trasversali, orientate NE-SW e ENE-WSW, con cinematica probabile transtensiva destra. Gli ipocentri sembrano concentrarsi a profondità comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è  $M\approx 6,5$ . Corrisponde alla zona occidentale della zona 915 della ZS9.

Settore costiero nord occidentale (9) Zona estesa dalla provincia di La Spezia alla Versilia, caratterizzata da sismicità poco frequente e per lo più di bassa intensità. Le faglie quaternarie o potenzialmente attive identificate sono estensionali orientate circa NW- SE, prevalentemente immergenti verso SW; nel bacino di Sarzana è presente una struttura potenzialmente attiva immergente verso NE. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è  $M\approx 5,4$ . Corrisponde alla parte costiera (nord-occidentale) della zona 916 della ZS9.

Reno – Setta (10) Zona che si estende dal crinale toscano-emiliano al margine appenninico bolognese, caratterizzata da una minore frequenza di terremoti, generalmente di media intensità, e da strutture trasversali alla catena con componente trascorrente. La profondità degli ipocentri è molto variabile, da 5 a 35 km, con gli eventi estensionali concentrati nella porzione più superficiale ( $< 15$  km). Lungo il margine appenninico sono presenti evidenze di attività di strutture compressive, con direzione di massima compressione (assi P) circa N-S, fortemente immergenti verso sud ( $45^{\circ}$ - $60^{\circ}$ ); in questo settore gli ipocentri si concentrano a profondità comprese tra 15 e 35 km. La magnitudo storica massima è  $M \approx 5,5$ . Corrisponde al settore orientale della zona ZS9 913, compreso tra le valli dei fiumi Reno e Sillaro.

Pistoia – Pisa (11) Comprende la piana di Pisa e la bassa valle dell'Arno, il settore occidentale del bacino di Firenze-Prato-Pistoia e l'Appennino pistoiese. Questa zona è caratterizzata da strutture orientate prevalentemente NE-SW, non sempre ben caratterizzate dal punto di vista cinematico, e da strutture subverticali orientate NW-SE, immergenti a SW, con cinematica normale. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è  $M \approx 5,7$ . Corrisponde al settore centrale delle zone 915 e 916 della ZS9.

Margine Romagnolo (12) Zona caratterizzata da terremoti frequenti, anche di elevata intensità, con evidenze di movimenti prevalentemente compressivi, con direzione di massima compressione (assi P) circa N-S. Profondità degli ipocentri variabili, per lo più comprese tra 5 e 25 km, talora anche maggiori, fino a 35 km, lungo piani immergenti verso sud di  $30^{\circ}$ - $45^{\circ}$ . La magnitudo massima storica è  $M \approx 6,1$ . Corrisponde circa alla parte settentrionale della zona 914 della ZS9.

Appennino Romagnolo (13) Zona caratterizzata da terremoti frequenti, anche di elevata intensità, con evidenze di movimenti prevalentemente compressivi e trascorrenti, lungo piani immergenti a sud di  $10^{\circ}$ - $30^{\circ}$ , con profondità ipocentrali per lo più comprese tra 15 e oltre 20 km, e movimenti estensionali lungo piani con direzione circa NW-SE immergenti verso NE, con profondità ipocentrali superficiali comprese tra 5 e 15 km (per lo più  $< 10$  km). La magnitudo storica massima è  $M \approx 6,0$ . Corrisponde circa alla parte meridionale della zona 914 della ZS9.

Mugello (14) Zona caratterizzata da frequente ed elevata sismicità e da evidenze di deformazioni recenti lungo strutture prevalentemente estensionali orientate NW-SE, immergenti sia a SW che a NE; alle estremità occidentale e orientale del bacino del Mugello sono presenti strutture orientate NE-SW non chiaramente caratterizzate cinematicamente. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km. La magnitudo massima storica è  $M \approx 6,3$ . Corrisponde al settore orientale della zona 915 della ZS9.

Firenze – Volterra (15) Zona comprendente il settore della Toscana centro-settentrionale esteso dal bacino di Volterra alla zona centrale e orientale del bacino di Firenze-Prato-Pistoia, caratterizzato da bassa sismicità e da faglie normali orientate NW-SE prevalentemente immergenti a SW; sono presenti faglie orientate NE-SW con cinematica trascorrente, sia destra che sinistra. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è  $M \approx 5,4$ . Corrisponde al settore centro-orientale della zona 916 e a parte del settore settentrionale della zona 921 della ZS9.

Val di Fine (16) Comprende il settore della Toscana costiera di Orciano e della Val di Cecina in cui è stato localizzato l'epicentro macrosismico del forte terremoto del 14 agosto 1846, con magnitudo stimata  $M \approx 5,9$ ; corrisponde a parte del settore settentrionale della zona 921 della ZS9. Le strutture considerate attive sono le faglie normali orientate NNW-SSE che delimitano la parte orientale del bacino della val di Fine. Le profondità ipocentrali sono ipotizzate tra 5 e 15 km.



Savio – Marecchia (17) Zona che si estende tra le valli dei fiumi Savio e Marecchia, dal crinale tosko-romagnolo al margine appenninico cesenate e riminese, caratterizzata da strutture tettoniche trasversali alla catena, con componente trascorrente, e da strutture di sovrascorrimento in corrispondenza del margine appenninico, con direzione di massima compressione N-S. Le profondità ipocentrali sono comprese tra 5 e 15 km, lungo strutture subverticali trasversali alla catena, e tra 15 e 25 km, lungo piani immergenti verso sud. La magnitudo storica massima è  $M=6,0$ . Corrisponde alle estremità sud-orientali delle zone 914 e 915 e a quelle nordoccidentali delle zone 918 e 919 della ZS9.

Casentino - Valdarno – Siena (18) Ampia zona a sviluppo trasversale estesa dal bacino di Siena al Casentino, caratterizzata da faglie orientate circa NE-SW a cinematica prevalente transtensiva destra, in particolare nel settore nord-orientale; sono presenti faglie normali potenzialmente attive orientate NW-SE immergenti a SW. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km. La magnitudo storica massima è  $M\approx 5,8$ . Corrisponde ai settori orientali delle zone 915, 916, all'estremità nord-occidentale della zona 920 e a parte del settore centrale della zona 921 della ZS9.

Litorale Tosco-Laziale (19) Comprende la costa tirrenica tra la Val di Cecina e Civitavecchia - S. Marinella, non inclusa in nessuna zona della ZS9, e la parte sud-occidentale della zona 921 della ZS9. Questa zona è caratterizzata da poche faglie potenzialmente attive orientate sia in direzione NW-SE, con presunta cinematica estensionale, sia orientate in direzione trasversale NE-SW, con cinematica prevalente trascorrente e normale. Parte della sismicità è collegata con il campo geotermico di Larderello. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è  $M\approx 5,1$ .

Marche Settentrionali (20) Corrisponde alla parte settentrionale della zona 918 della ZS9 modificata nei limiti geografici dell'estremità nordoccidentale. La zona è caratterizzata da frequenti eventi sismici, anche di elevata intensità, correlati all'attività di thrust immergenti verso SW. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 10 e 35 km. La magnitudo storica massima è  $M\approx 6,4$ .

Umbria (21) Corrisponde alla zona 919 della ZS9, modificata nei limiti nord-occidentali e sudorientali. E' caratterizzata da sismicità frequente, non di rado di elevata intensità; è in questa zona che si è sviluppata la sequenza sismica dell'Umbria-Marche iniziata nel settembre 1997 ( $M_{wmax}\approx 6,0$ ) e proseguita fino alla primavera 1998. Le strutture principali con evidenze di attività sono faglie estensionali immergenti prevalentemente verso W e SW. Nell'area meridionale sono presenti faglie ad andamento NNE-SSW a cinematica prevalente transtensiva destra. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è  $M\approx 6,7$ .

Trasimeno (22) Corrisponde alla parte settentrionale della zona 920 della ZS9, caratterizzata da sismicità poco frequente e di intensità medio-bassa; non sono state riconosciute faglie potenzialmente attive. La magnitudo storica massima è  $M\approx 5,0$ .

Amiata – Bolsena (23) Zona che si estende dall'alta valle dell'Ombrone al lago di Vico, corrispondente alla parte sud-orientale della zona 921 della ZS9. Comprende l'apparato vulcanico del M. Amiata e la provincia magmatica romana che include il lago di Bolsena. In questo settore sono state identificate poche faglie quaternarie o potenzialmente attive, con direzione NNW-SSE e cinematica prevalentemente estensionale. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è  $M\approx 5,7$ .

Abruzzo (24) Comprende il settore esterno dell'Appennino marchigiano-abruzzese. E' caratterizzata da una sismicità che può essere definita media per frequenza e intensità. Le strutture sismogeniche sono thrust immergenti verso

SW. Le profondità ipocentrali sono in media localizzate tra 10 e 35 km. La magnitudo storica massima è  $M \approx 5,5$ . Corrisponde alla parte meridionale della zona 918 della ZS9.

Appennino Abruzzese (25) Corrisponde alla zona 923 della ZS9 con lievi modifiche dei limiti nord-occidentali. La zona è caratterizzata da frequente ed elevata sismicità e da faglie normali immergenti a SW. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è  $M \approx 7,1$ .

Appennino Laziale (26) Corrisponde alla parte meridionale della zona 920 della ZS9. Le caratteristiche sismotettoniche interne assunte sono quelle della zona 920 della ZS9, vale a dire meccanismi di fagliazione prevalentemente estensionali. La magnitudo storica massima è  $M \approx 5,5$ .

Colli Albani (27) Corrisponde alla zona 922 della ZS9 ed è centrata sui Colli Albani. E' caratterizzata da sismicità associate all'attività di faglie normali, orientate NE-SW, immergenti verso NW, come documentato nel DISS 3.2 (Basili et al., 2008; DISS Working Group 2015). La magnitudo massima attesa è  $M = 5,6$  (DISS Working Group 2015).

Pieghe Emiliane (28) Comprende i fronti compressivi più occidentali delle Pieghe Emiliane e del margine appenninico-padano, dove sono state riconosciute anche strutture trascorrenti; la direzione di compressione (assi P) è comunque circa N-S. Le strutture principali immergono verso sud di  $45^\circ$ ; la profondità degli ipocentri è variabile tra 5 e 30 km. La magnitudo storica massima è  $M = 5,5$ . La parte settentrionale di questa zona non era compresa in nessuna zona ZS9, quella meridionale ricadeva in parte nel settore settentrionale della zona 911 della ZS9. Per il calcolo della pericolosità sismica, oltre alle zone sopra descritte, si è reso necessario considerare anche altre zone sismogeniche limitrofe, potenzialmente in grado di influenzare la pericolosità sismica dell'area considerata:

Fronti Sudalpini Lombardi (29) Corrisponde alla zona 907 della ZS9, modificata fino a comprendere i principali eventi occidentali e lo sviluppo dei fronti sepolti del margine sud-alpino lombardo; sono state assunte le stesse caratteristiche sismotettoniche della zona 907 della ZS9 (deformazione lungo thrust S-vergenti attivi immergenti verso nord). La magnitudo massima attesa è  $M = 6$  (DISS Working Group 2015).

Fronti Sudalpini veneti occidentali (30) Corrisponde alla zona 906 della ZS9; sono state quindi assunte le stesse caratteristiche sismotettoniche della zona 906 della ZS9 (deformazione lungo thrust S-vergenti attivi immergenti verso nord). La magnitudo massima attesa è  $M = 6$  (DISS Working Group 2015).

Medio Adriatico (31) Comprende i terremoti principali dell'Adriatico centrale; quest'area non è compresa in nessuna zona della ZS9. Le strutture sismogeniche sono considerate thrust immergenti verso ENE, con profondità ipocentrali comprese tra 5 e 15 km. La magnitudo massima attesa è  $M = 6$  (DISS Working Group 2015).

## **2.11 ZONAZIONEISMOGENETICA Z2 PROPOSTA IN QUESTO STUDIO**

La storia sismica conosciuta di una zona permette di identificare solo una piccola parte delle faglie che si sono sviluppate durante la sua evoluzione geologica. Pertanto è necessario sfruttare nel modo più efficace tutte le informazioni attualmente disponibili, al fine di riconoscere la reale potenzialità delle strutture sismogenetiche, anche nei settori dove non sono storicamente documentate attivazioni sismiche importanti. In particolare, è necessario effettuare un'attenta valutazione del quadro tettonico attuale e delle sue possibili connessioni con l'attività sismica (Figura 28).

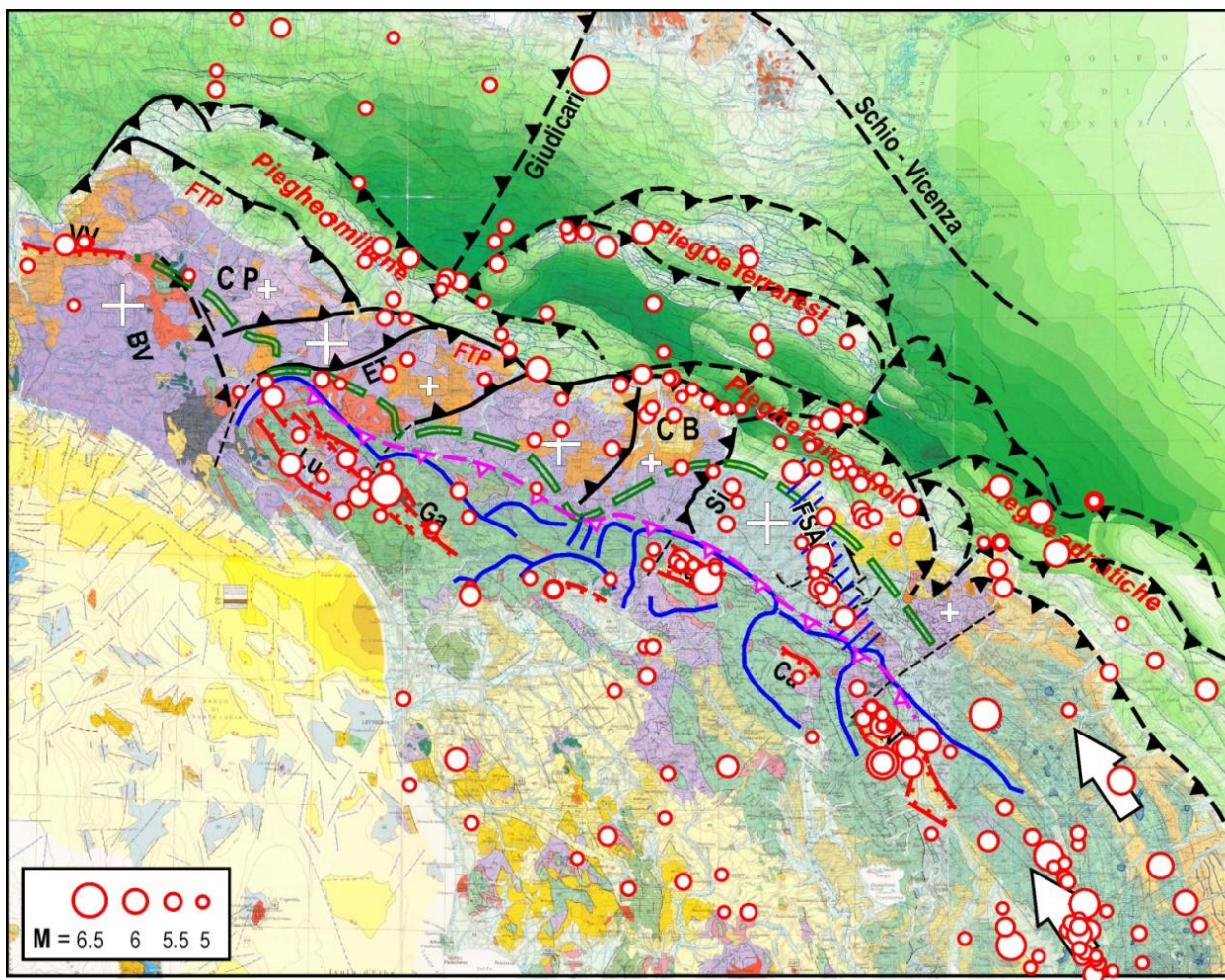


Figura 28 Schema tettonico e terremoti storici principali dall'anno 1000 (Guidoboni e Comastri, 2005; Rovida et alii, 2011). La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo secondo la scala riportata nella figura.

## 2.12 SORGENTI SISMOGENETICHE DALLA BANCA DATI DISS

Nel Database delle sorgenti sismogenetiche Italiane DISS 3.2.0 (Basili et al., 2008; DISS Working Group, 2015) sono state individuate una serie di sorgenti sismogenetiche per l'area di interesse (Figura 29, Figura 30, Figura 31).



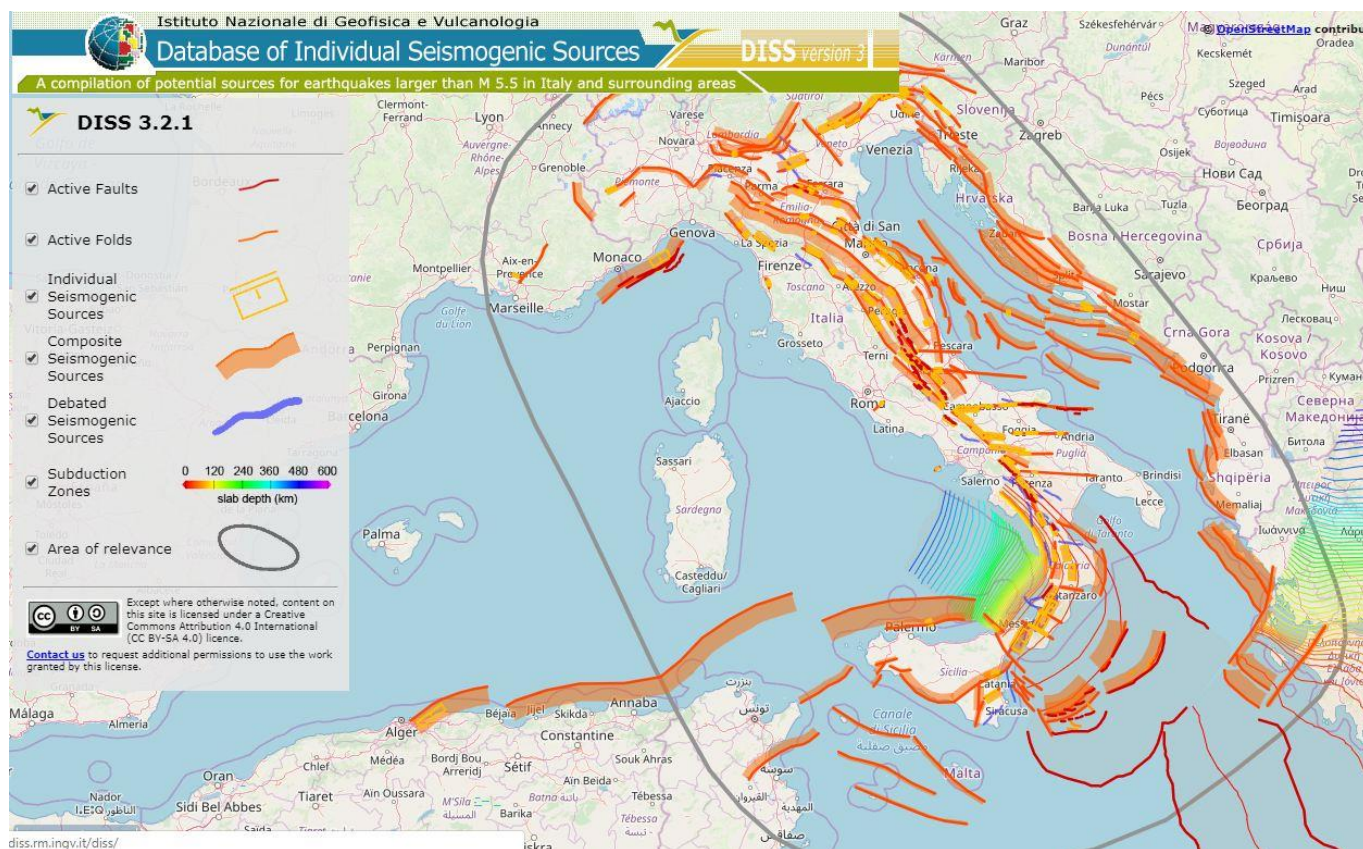


Figura 29

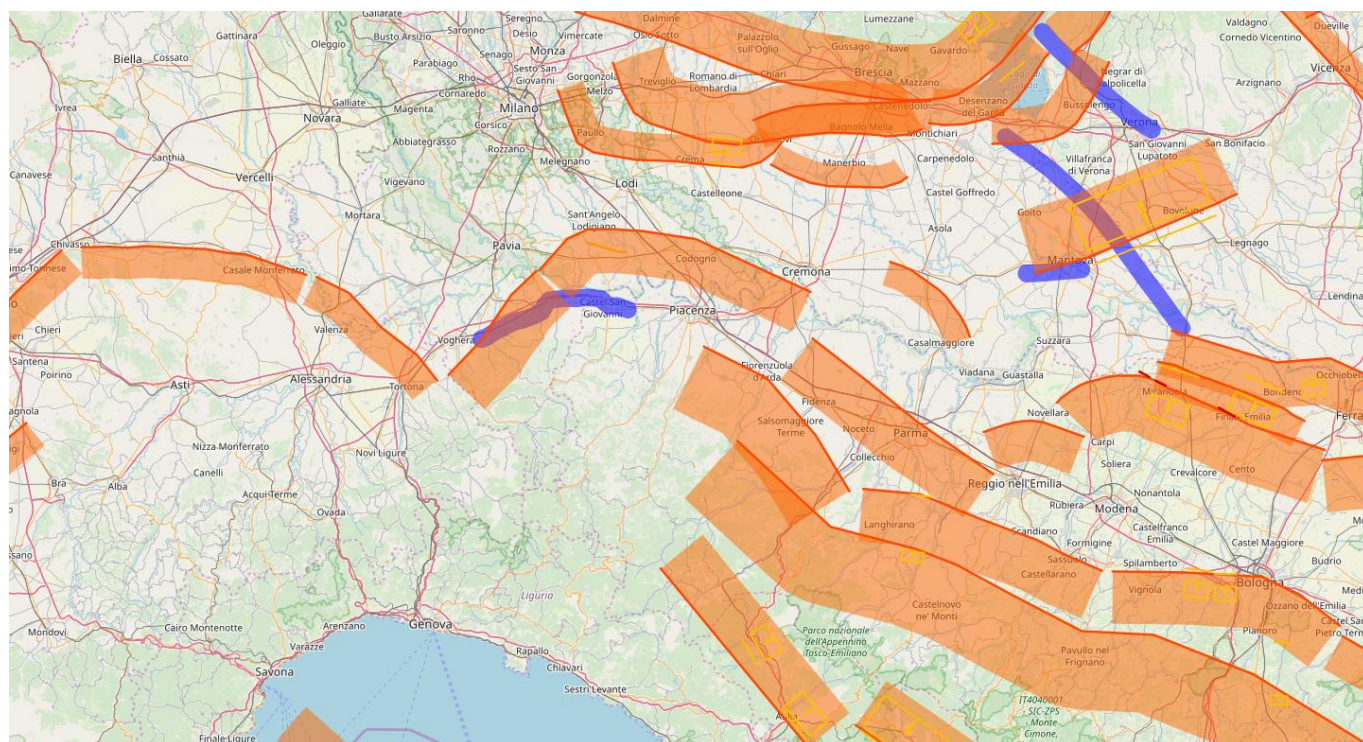


Figura 30



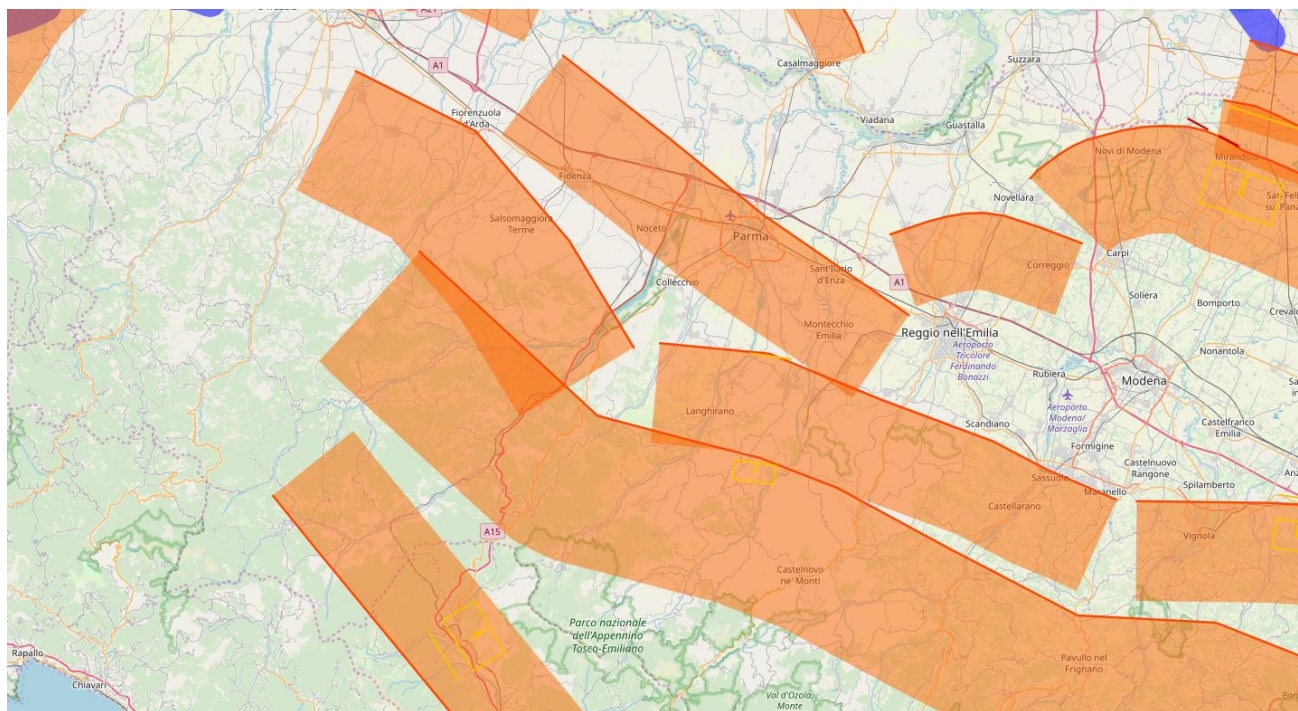


Figura 31

Si tratta di sorgenti individuali (individual sources) e di sorgenti composite (composite sources).

Le sorgenti sismogenetiche rilevate ed analizzate sono riferite alla zonazione ZS9, presa come riferimento e modificata per l'area a progetto (Figura 32), Z2.

In base a ciò si è definita la seguente zonazione di riferimento denominata Z2 (OGS – Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - *Analisi 3d della pericolosità sismica dell'appennino settentrionale - Proposta di nuova zonazione sismogenetica e analisi della pericolosità sulla base di un modello 3D delle sorgenti sismiche*, 2017):

- ZS\_511
- ZS\_512
- ZS\_513
- ZS\_514
- ZS\_515
- ZS\_516
- ZS\_517
- ZS\_913new
- ZS\_915new
- ZS\_916new.

Per ciascuna zona sono state riportate le caratteristiche parametriche principali della sorgente sismogenetica (cfr. singole tabelle) e l'immagine di riferimento.

In allegato sono riportate le singole schede di ciascuna sorgente sismogenetica individuata e considerata.



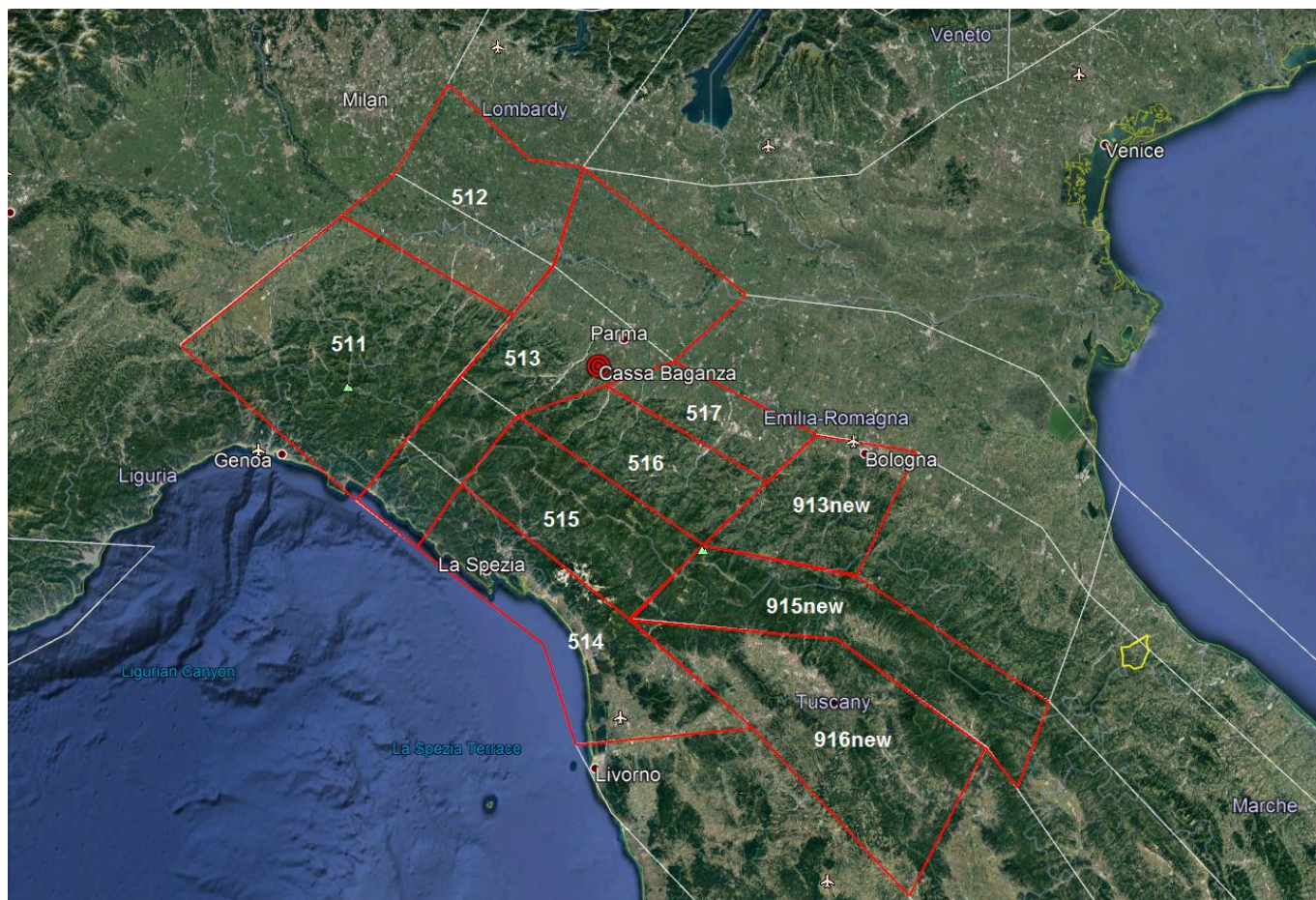


Figura 32 - zonazione Z2

#### ZS\_511

Sono state individuate n. 2 sorgenti sismogenetiche (Composite Sources):

SORGENTI SISMOGENICHE		Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT MIN	RECURRENT MAX	MAX MAGNITUDE
ZS	ID			lat/lon	KM	KM	KM	KM	°	°	°	°	°	°	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
511	ITCS018		RIVANAZZANO - STRADELLA				2	8	30	50	20	45	60	90		0,2	0,54			5,5
511	ITCS180		EASTERN MONFERRATO				1	8	115	150	40	50	80	120		0,1	0,5			5,5

#### ZS\_512

Sono state individuate n. 6 sorgenti sismogenetiche (Composite Sources) e n. 1 sorgente individuale:

Relative sources		ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT MIN	RECURRENT MAX	MAX MAGNITUDE
ZS	ID		lat/lon	KM	KM	KM	KM	°	°	°	°	°	°	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
512	ITCS002					6	13	250	340	25	40	80	100		0,1	0,5			6
	ITCS115					2	6	215	340	25	50	80	100		0,1	0,5			6
	ITCS104			45,399,79	6,5	4,7	2,5	5,8	275	45	90	80	100	0,5	0,1	0,5	1000	5000	5,7
	ITCS116					2,5	5,5	230	300	25	40	80	100		0,1	0,5			5,5
	ITCS044					2	7	30	115	20	40	80	100		0,48	0,54			5,5
	ITCS045					2	10	110	150	20	40	80	100		0,24	0,63			5,5
	ITCS018					2	8	30	50	20	45	60	90		0,2	0,54			5,5

**ZS\_513**

Sono state individuate n. 7 sorgenti sismogenetiche (Composite Sources) e n. 10 sorgenti individuali:

	Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT E MIN	RECURRENT E MAX	MAX MAGNITUDE
ZS9	ID		lat/lon	KM	KM	KM	KM	*	*	*	*	*	*	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
513	ITCS009	BUSSETO-CAVRIAGO				2	8	120	140	20	40	90	120		0,16	0,53			5,6
	ITCS112	PIADENA				2,5	6	110	150	25	45	80	100		0,23	0,91			5,5
	ITCS049	CAMPEGINE-CORREGGIO				3	10	70	110	30	50	80	100		0,04	0,16			5,5
	ITCS046	LANGHIRANO-SASSUOLO				2	8	95	120	20	40	80	100		0,24	0,63			5,9
	ITCS027	BORE-MONTEFELTRO-FABRIANO-LAGA				12	22	90	160	20	55	70	110		0,1	0,5			6,2
	ITIS047	CAGLI	43,58/12,48	17,2	7,5	17	20,8	130		30		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	6,2
	ITIS048	FABRIANO	43,38/12,94	13	9	14	17,1	135		20		90		0,55	0,1	0,5	1100	5500	6,2
	ITIS049	CAMERINO	43,16/13,10	8	6	14	16,1	160		20		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,8
	ITCS055	SARNANO	43,05/13,14	9,5	7,5	14	16,6	160		20		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	6
	ITCS058	LOIANO	44,25/11,40	4	3,4	16,4	19,1	94		53		107		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,3
	ITIS135	NEVIANO DEGLI ARDUINI	44,55/10,33	4,9	3,9	18,5	21,7	98		55		79		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,4
	ITCS47	CASTELVETRO DI MODENA-CASTEL S. PIETRO TERME				2	8	85	135	20	40	80	100		0,24	0,63			6
	ITIS091	CASALECCHIO DI RENO	44,47/11,24	5	3,9	2	4,2	90		35		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,5
	ITIS103	CRESPPELLANO	44,48/11,16	5,6	4,3	2	4,5	98		30		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,6
	ITCS026	LUNIGIANA				1	10	310	330	30	45	260	280		0,1	1			6
	ITIS067	AULLA	44,22/10,03	9	7	1	5,5	320		40		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,8
	ITIS067	AULLA	44,22/10,03	9	7	1	5,5	320		40		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,8
	ITIS085	PONTREMOLI	44,37/9,91	7,1	5,9	2	5,9	329		42		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,7

**ZS\_514**

Sono state individuate n. 1 sorgente sismogenetica (Composite Sources) e n. 2 sorgenti individuali:

	Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT E MIN	RECURRENT E MAX	MAX MAGNITUDE
ZS9	ID		lat/lon	KM	KM	KM	KM	*	*	*	*	*	*	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
514	ITCS026	LUNIGIANA				1	10	310	330	30	45	260	280		0,1	1			6
	ITIS067	AULLA	44,22/10,03	9	7	1	5,5	320		40		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,8
	ITIS085	PONTREMOLI	44,37/9,91	7,1	5,9	2	5,9	329		42		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,7

**ZS\_515**

Sono state individuate n. 3 sorgenti sismogenetiche(Composite Sources) e n. 10 sorgenti individuali:

	Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT E MIN	RECURRENT E MAX	MAX MAGNITUDE
ZS9	ID		lat/lon	KM	KM	KM	KM	*	*	*	*	*	*	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
515	ITCS026	LUNIGIANA				1	10	310	330	30	45	260	280		0,1	1			6
	ITIS067	AULLA	44,22/10,03	9	7	1	5,5	320		40		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,8
	ITIS085	PONTREMOLI	44,37/9,91	7,1	5,9	2	5,9	329		42		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,7
	ITCS027	BORE-MONTEFELTRO-FABRIANO-LAGA				12	22	90	160	20	55	70	110		0,1	0,5			6,2
	ITIS047	CAGLI	43,58/12,48	17,2	7,5	17	20,8	130		30		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	6,2
	ITIS048	FABRIANO	43,38/12,94	13	9	14	17,1	135		20		90		0,55	0,1	0,5	1100	5500	6,2
	ITIS049	CAMERINO	43,16/13,10	8	6	14	16,1	160		20		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,8
	ITIS055	SARNANO	43,05/13,14	9,5	7,5	14	16,6	160		20		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	6
	ITIS058	LOIANO	44,25/11,40	4	3,4					53		107		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,3
	ITIS135	NEVIANO DEGLI ARDUINI	44,55/10,33	4,9	3,9					55		79		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,4
	ITCS083	GARFAGNANA				1	10	300	310	30	45	260	280		0,1	1			6,4
	ITIS050	GARFAGNANA NORTH	44,18/10,32	18	11,3	1	8,3	305		40		270		0,79	0,1	1	790	7900	6,4
	ITIS051	GARFAGNANA SOUTH	44,07/10,52	15	10	1	7,4	307		40		270		0,38	0,1	1	380	3800	6,1

**ZS\_516**

Sono state individuate n. 2 sorgenti sismogenetiche(Composite Sources) e n. 6 sorgenti individuali:

	Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT E MIN	RECURRENT E MAX	MAX MAGNITUDE
ZS9	ID		lat/lon	KM	KM	KM	KM	*	*	*	*	*	*	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
516	ITCS027	BORE-MONTEFELTRO-FABRIANO-LAGA				12	22	90	160	20	55	70	110		0,1	0,5			6,2
	ITIS047	CAGLI	43,58/12,48	17,2	7,5	17	20,8	130		30		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	6,2
	ITIS048	FABRIANO	43,38/12,94	13	9	14	17,1	135		20		90		0,55	0,1	0,5	1100	5500	6,2
	ITIS049	CAMERINO	43,16/13,10	8	6	14	16,1	160		20		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,8
	ITIS055	SARNANO	43,05/13,14	9,5	7,5	14	16,6	160		20		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	6
	ITIS058	LOIANO	44,25/11,40	4	3,4	16,4	19,1	94		53		107		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,3
	ITIS135	NEVIANO DEGLI ARDUINI	44,55/10,33	4,9	3,9	18,5	21,7	98		55		79		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,4
	ITCS046	LANGHIRANO-SASSUOLO				2	8	95	120	20	40	80	100		0,24	0,63			5,9

**ZS\_517**

Sono state individuate n. 3 sorgenti sismogenetiche(Composite Sources) e n. 2 sorgenti individuali:

	Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT MIN	RECURRENT MAX	MAX MAGNITUDE
ZS9	ID		lat/lon	KM	KM	KM	KM	°	°	°	°	°	°	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
517	ITCS009	BUSSETO-CAVRIAGO				2	8	120	140	20	40	90	120		0.16	0.53			5.6
	ITCS046	LANGHIRANO-SASSUOLO				2	8	95	120	20	40	80	100		0.24	0.63			5.9
	ITCS47	CASTELVETRO DI MODENA-CASTEL S. PIETRO TERME				2	8	85	135	20	40	80	100		0.24	0.63			6
	ITIS091	CASALECCHIO DI RENO	44,47/11,24	5	3,9	2	4,2	90		35		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,5
	ITIS103	CRESPPELLANO	44,48/11,16	5,6	4,3	2	4,5	98		35		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,6

## ZS\_913new

Sono state individuate n. 2 sorgenti sismogenetiche(Composite Sources) e n. 2 sorgenti individuali:

	Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT MIN	RECURRENT MAX	MAX MAGNITUDE
ZS9	ID		lat/lon	KM	KM	KM	KM	°	°	°	°	°	°	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
913 NEW	ITCS027	BORE-MONTEFELTRO-FABRIANO-LAGA				12	22	90	160	20	55	70	110		0,1	0,5			
	ITIS047	CAGLI	43,58/12,48	17,2	7,5	17	20,8	130	30	90		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	5,4
	ITIS048	FABRIANO	43,38/12,94	13	9	14	17,1	135	20	90		90		0,55	0,1	0,5	1100	5500	6,2
	ITIS049	CAMERINO	43,16/13,10	8	6	14	16,1	160	20	90		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,8
	ITCS055	SARNANO	43,05/13,14	9,5	7,5	14	16,6	160	20	90		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	6
	ITCS058	LOIANO	44,25/11,40	4	3,4	16,4	19,1	94	53			107		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,3
	ITIS135	NEVIANO DEGLI ARDUINI	44,55/10,33	4,9	3,9	18,5	21,7	98	55			79		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,4
	ITCS47	CASTELVETRO DI MODENA-CASTEL S. PIETRO TERME				2	8	85	135	20	40	80	100		0,24	0,63			
	ITIS091	CASALECCHIO DI RENO	44,47/11,24	5	3,9	2	4,2	90	35			90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,5
	ITIS103	CRESPPELLANO	44,48/11,16	5,6	4,3	2	4,5	98	35			90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,6

## ZS\_915new

Sono state individuate n. 3 sorgenti sismogenetiche(Composite Sources) e n. 16 sorgenti individuali:

	Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT MIN	RECURRENT MAX	MAX MAGNITUDE
ZS9	ID		lat/lon	KM	KM	KM	KM	°	°	°	°	°	°	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
915 NEW	ITCS037	MUGELLO-CITTA'CASTELLO-LEONESSA				0,5	0,8	280	330	25	40	260	280		0,1	1			6,2
	ITIS060	BASTIA	43,04/12,59	6,2	4	2	4	330	30	270		270		0,2	0,1	1	200	2000	5,4
	ITIS061	FOLIGNO	42,97/12,66	10,2	6	2	5	330	30	270		270		0,35	0,1	1	350	3500	5,8
	ITIS062	TREVI	42,86/12,72	7	4,5	2	4,3	330	30	270		270		0,25	0,1	1	250	2500	5,5
	ITIS063	MONTERCHI	43,48/12,18	9,1	7	0,5	4	315	30	270		270		0,35	0,1	1	350	3500	5,8
	ITIS064	ANGHIARI	43,55/12,09	9,1	7	0,5	4	315	30	270		270		0,35	0,1	1	350	3500	5,8
	ITIS076	POPPI	43,7/11,8	9	7	1	4,5	326	30	270		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,8
	ITIS086	MUGELLO EAST	43,96/11,47	14	9,8	0,6	6,9	298	40			270		0,45	0,1	1	450	4500	6,2
	ITIS087	MUGELLO WEST	44,01/11,33	9	7	1	4,5	301	30			270		0,3	0,1	1	300	3000	5,9
	ITCS027	BORE-MONTEFELTRO-FABRIANO-LAGA				12	22	90	160	20	55	70	110		0,1	0,5			6,2
	ITIS047	CAGLI	43,58/12,48	17,2	7,5	17	20,8	130	30	90		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	5,4
	ITIS048	FABRIANO	43,38/12,94	13	9	14	17,1	135	20	90		90		0,55	0,1	0,5	1100	5500	6,2
	ITIS049	CAMERINO	43,16/13,10	8	6	14	16,1	160	20	90		90		0,4	0,1	0,5	800	4000	5,8
	ITCS055	SARNANO	43,05/13,14	9,5	7,5	14	16,6	160	20	90		90		0,5	0,1	0,5	1000	5000	6
	ITCS058	LOIANO	44,25/11,40	4	3,4	16,4	19,1	94	53			107		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,3
	ITIS135	NEVIANO DEGLI ARDUINI	44,55/10,33	4,9	3,9	18,5	21,7	98	55			79		0,3	0,1	0,5	600	3000	5,4
	ITCS083	GARFAGNANA				1	10	300	310	30	45	260	280		0,1	1			6,4
	ITIS050	GARFAGNANA NORTH	44,18/10,32	18	11,3	1	8,3	305	40	270		270		0,79	0,1	1	790	7900	6,4
	ITIS051	GARFAGNANA SOUTH	44,07/10,52	15	10	1	7,4	307	40			270		0,38	0,1	1	380	3800	6,1

## ZS\_916new

Sono state individuate n. 1 sorgente sismogenetica (Composite Sources) e n. 8 sorgenti individuali:

	Relative sources	ID	LOCATION	LENGTH	WIDTH	MIN DEPTH	MAX DEPTH	STRIKE MIN	STRIKE MAX	DIP MIN	DIP MAX	RAKE MIN	RAKE MAX	SLIP PER EVENT	SLIP RATE MIN	SLIP RATE MAX	RECURRENT MIN	RECURRENT MAX	MAX MAGNITUDE
ZS9	ID		lat/lon	KM	KM	°	°	°	°	°	°	°	°	m	mm/y	mm/y	y	y	Mw
916 NEW	ITCS037	MUGELLO-CITTA'CASTELLO-LEONESSA				0,5	0,8	280	330	25	40	260	280		0,1	1			6,2
	ITIS060	BASTIA	43,04/12,59	6,2	4	2	4	330	30	270		270		0,2	0,1	1	200	2000	5,4
	ITIS061	FOLIGNO	42,97/12,66	10,2	6	2	5	330	30	270		270		0,35	0,1	1	350	3500	5,8
	ITIS062	TREVI	42,86/12,72	7	4,5	2	4,3	330	30	270		270		0,25	0,1	1	250	2500	5,5
	ITIS063	MONTERCHI	43,48/12,18	9,1	7	0,5	4	315	30	270		270		0,35	0,1	1	350	3500	5,8
	ITIS064	ANGHIARI	43,55/12,09	9,1	7	0,5	4	315	30	270		270		0,35	0,1	1	350	3500	5,8
	ITIS076	POPPI	43,7/11,8	9	7	1	4,5	326	30	270		270		0,3	0,1	1	300	3000	5,8
	ITIS086	MUGELLO EAST	43,96/11,47	14	9,8	0,6	6,9	298	40			270		0,45	0,1	1	450	4500	6,2
	ITIS087	MUGELLO WEST	44,01/11,33	9	7	1	4,5	301	30			270		0,3	0,1	1	300	3000	5,9

Di seguito si riportano le immagini delle sorgenti sismogenetiche rilevate all'interno delle singole zone:



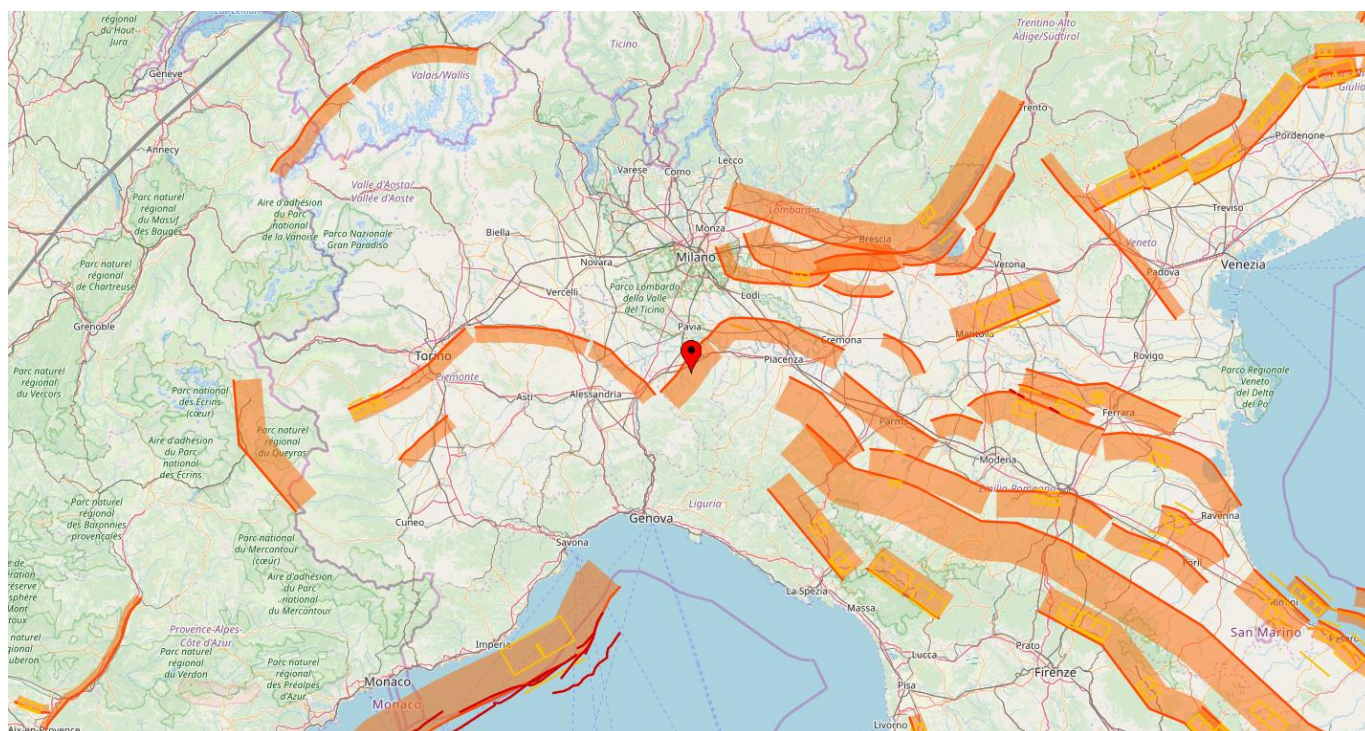


Figura 33 - Rivanazzano – Stradella

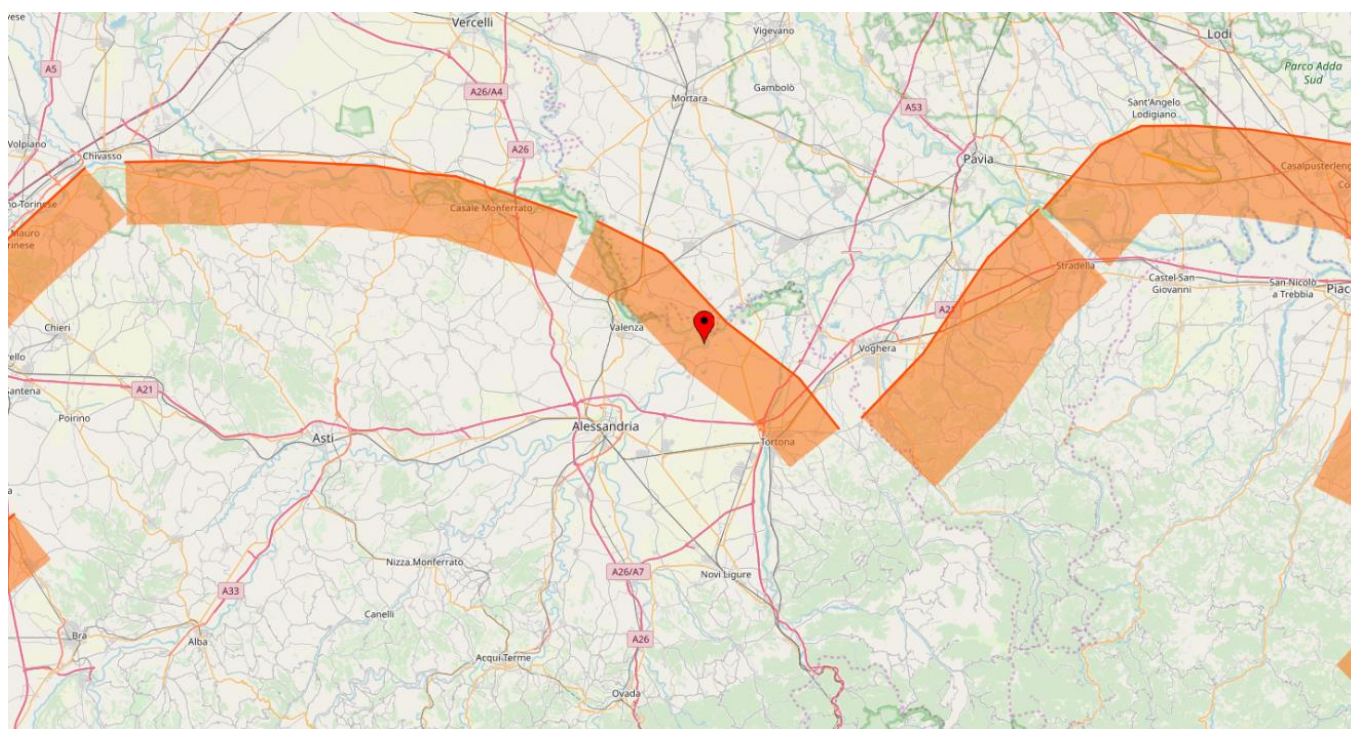


Figura 34 - Eastern Monferrato



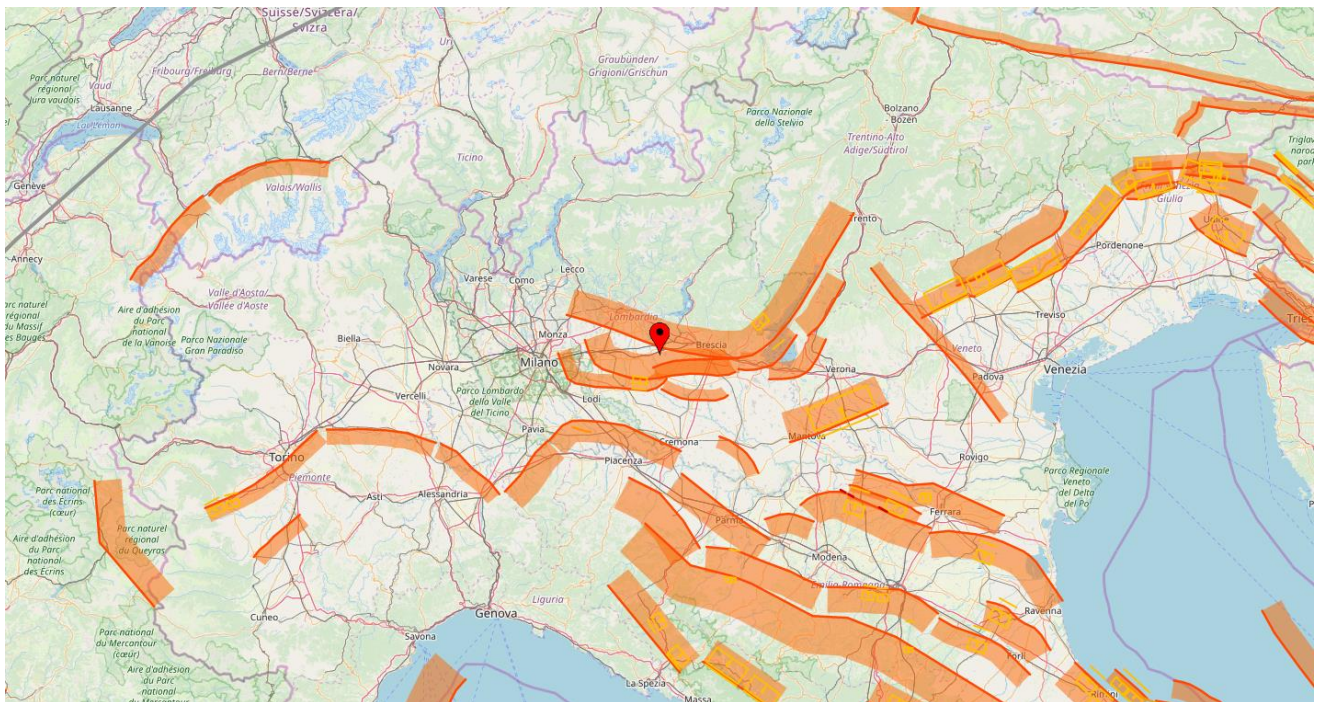


Figura 35 - Western S-Alps external thrust deep

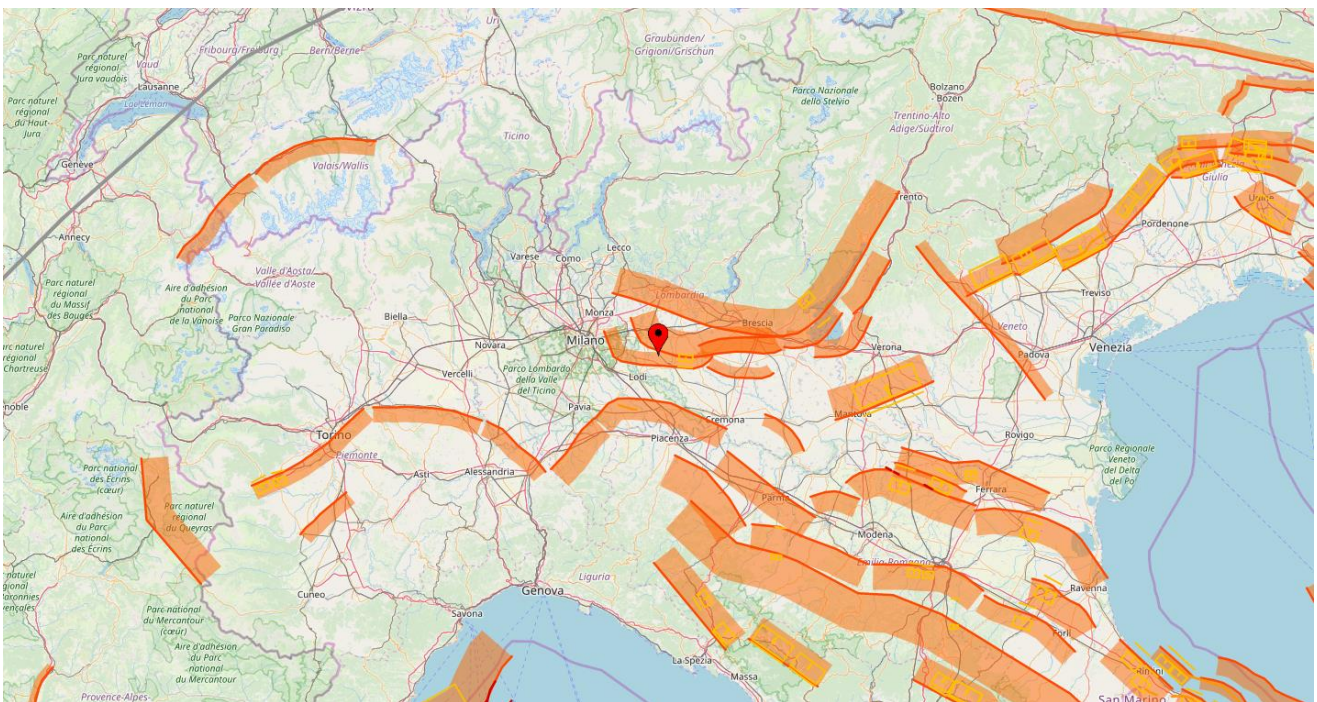


Figura 36 - Western S-Alps external thrust shallow deep



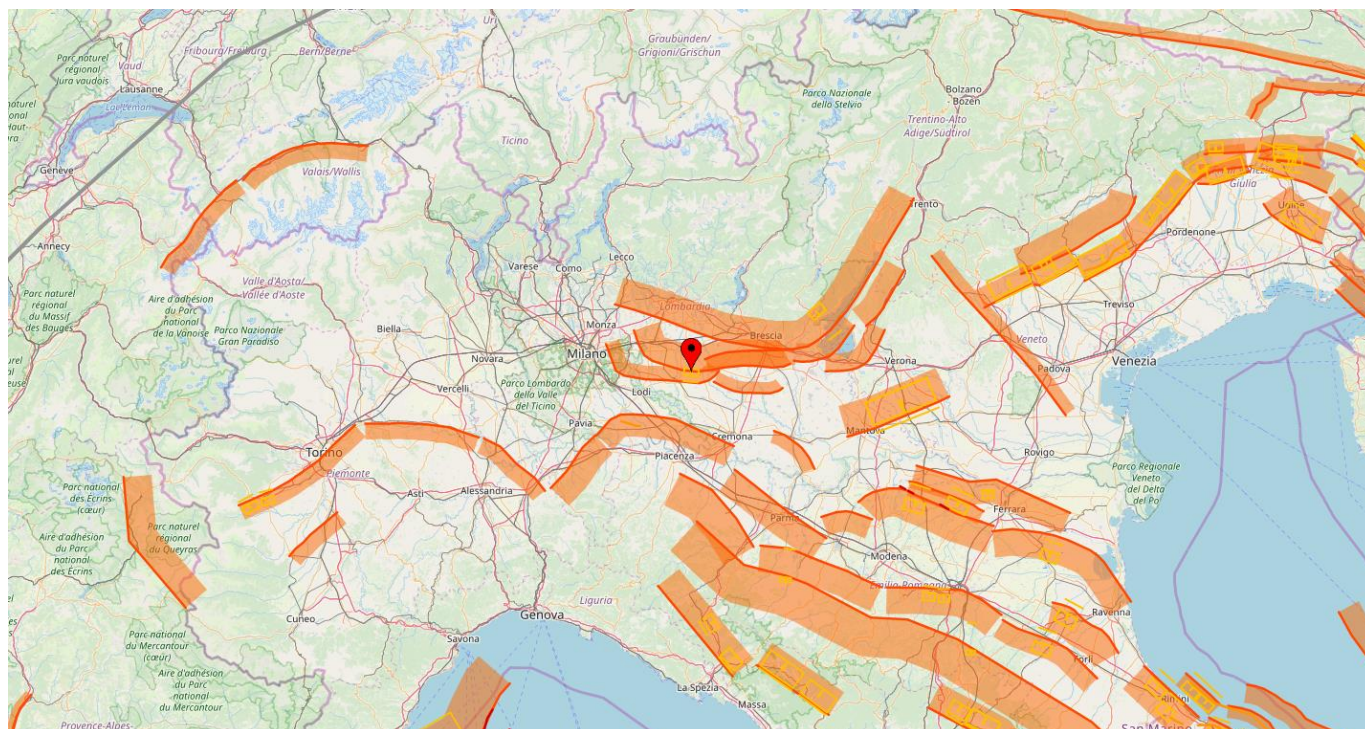


Figura 37 - Romanengo

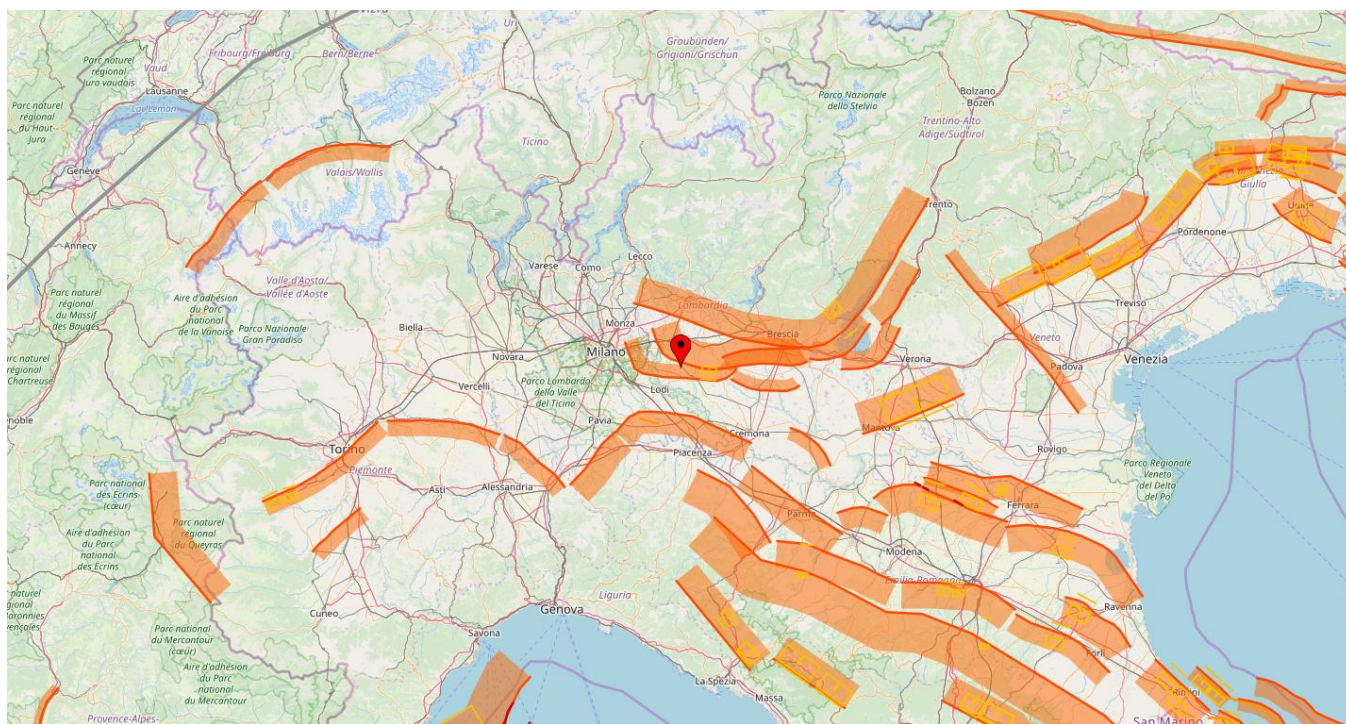
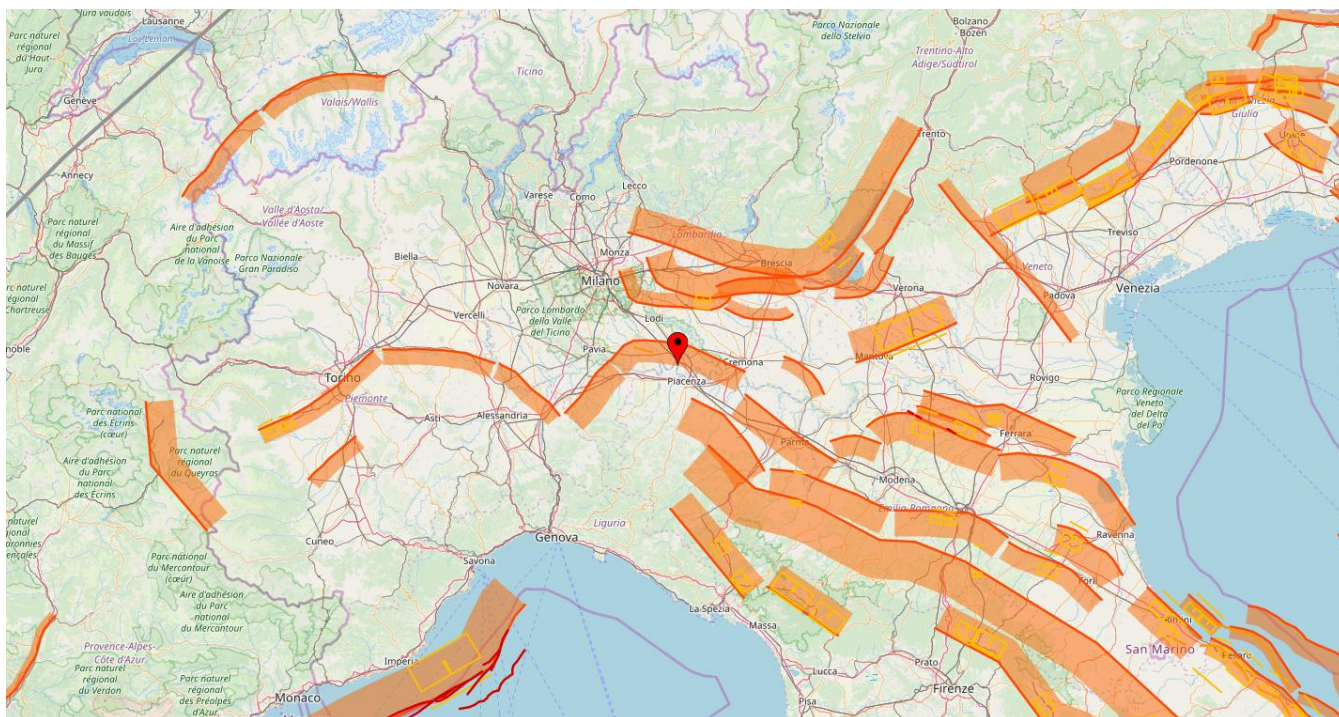
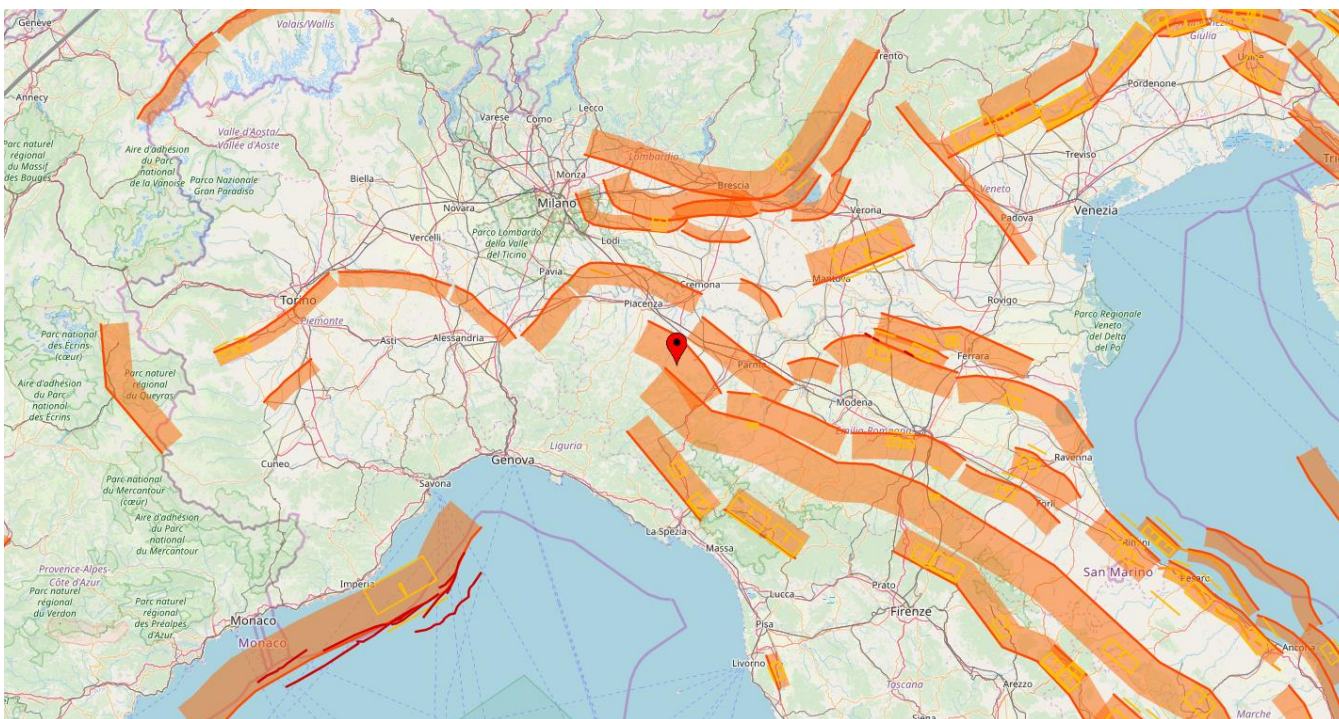


Figura 38 - Western S-Alps external shallow deep





**Figura 39 - Portalbera Cremona**



**Figura 40 - San Giorgio Piacentino – Fornovo di Taro**



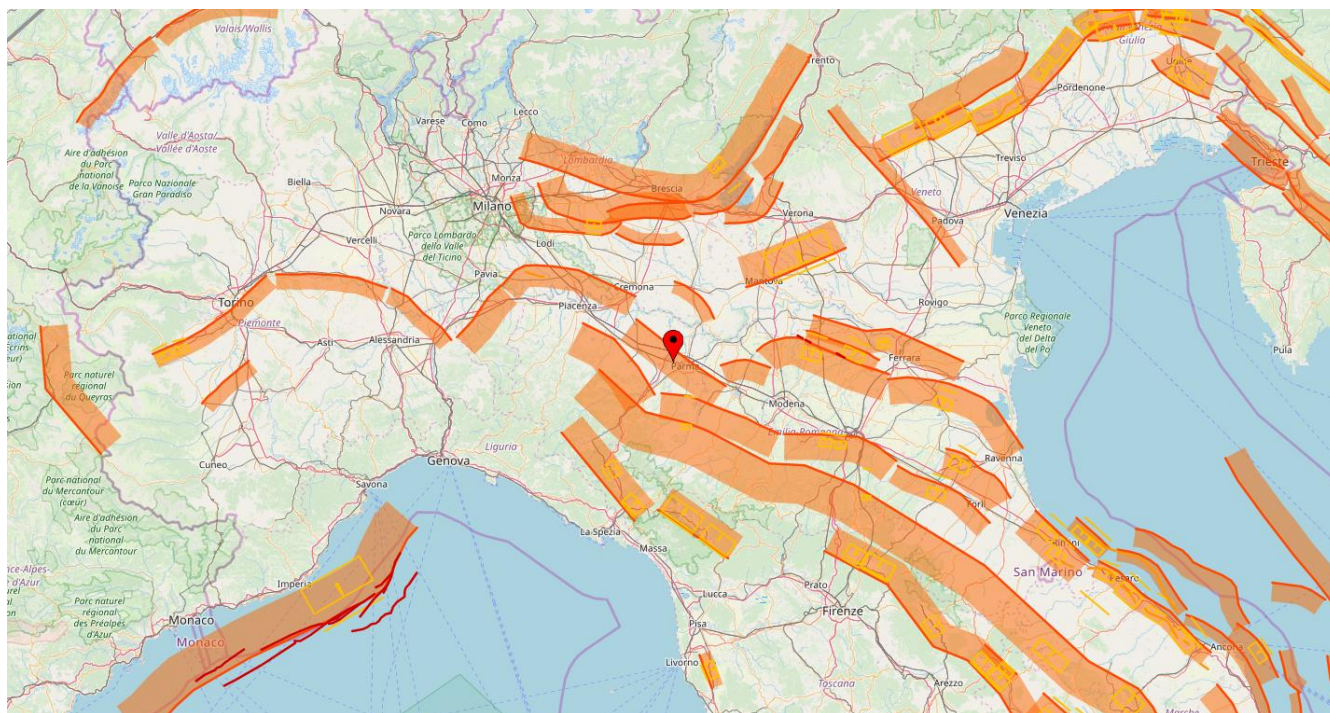


Figura 41 - Busseto – Caviago

Tra le sorgenti sismogenetiche rilevate, per l'area in esame risulta di particolare importanza la struttura ITCS009 Busseto – Caviago (Figura 41), la cui profondità è compresa tra 2 e 8 Km circa.

Questa importante sorgente sismogenetica si trova nella zona a cavallo della città di Reggio Emilia (a sud-est) e della città di Parma (a nord-ovest) e sembra sia stata la responsabile di numerosi eventi sismici:

- 5 novembre 1738 (magnitudo 5.4, Parma)
- 11 giugno 1438 (magnitudo 5.6, Parmense)
- 15 luglio 1971 (magnitudo 5.6, Parmense)
- 13 marzo 1832 (magnitudo 5.6, Reggiano)
- 11 settembre 1831 (magnitudo 5.5, Reggiano)
- Sismicità in corrispondenza dell'intera regione nel periodo compreso tra il secondo semestre del 1991 ed il primo semestre del 1992 (con magnitudo comprese tra 4.5 e 5.0).

Le principali caratteristiche di questa struttura sono basate su dati geologici proposti e desunti dai vari autori specialistici mentre la magnitudo 5.6 si basa sul terremoto di massima intensità verificatosi nell'area.



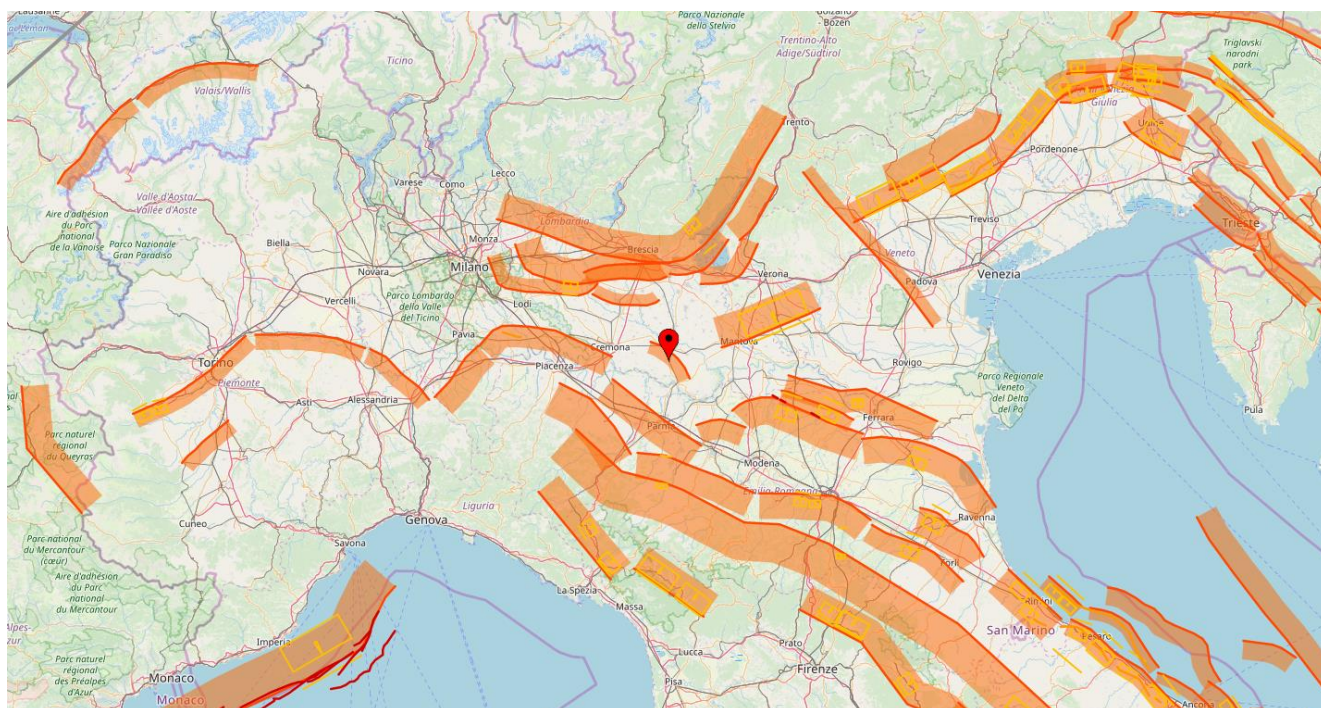


Figura 42 - Piacenza

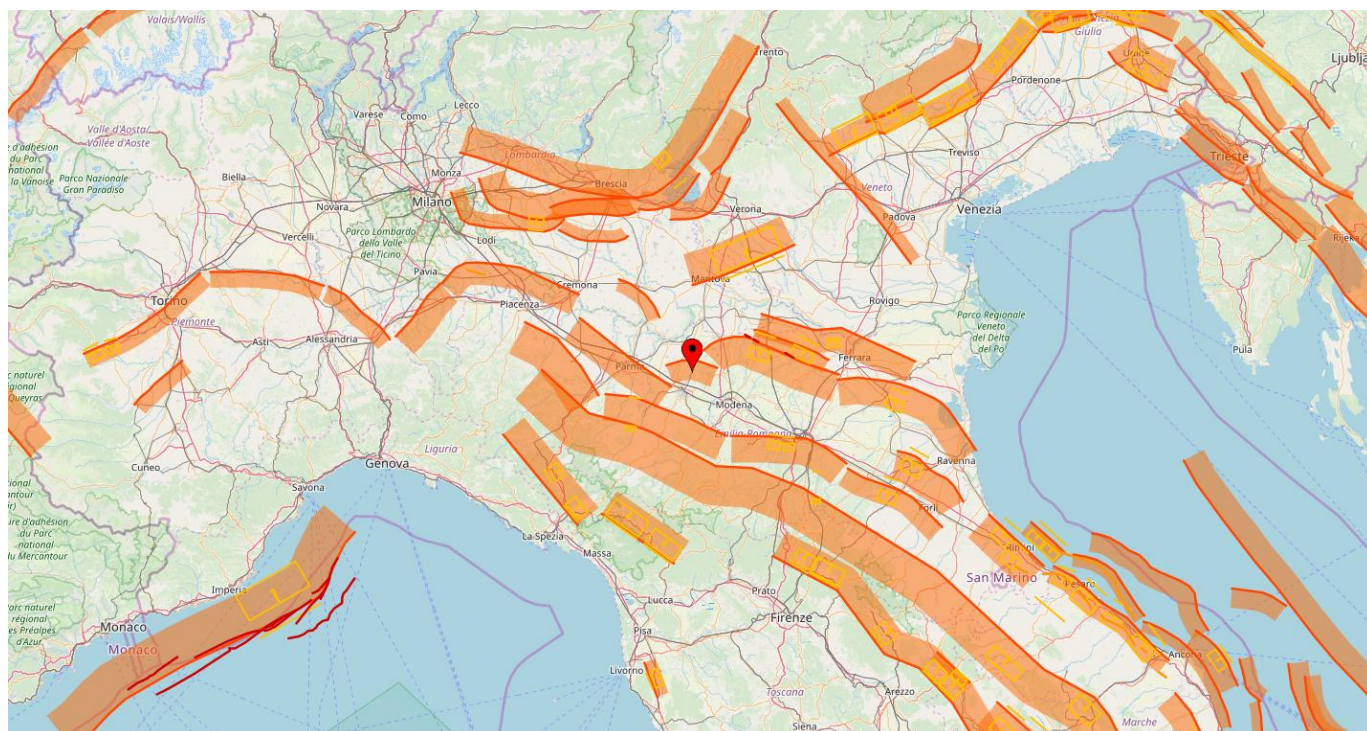
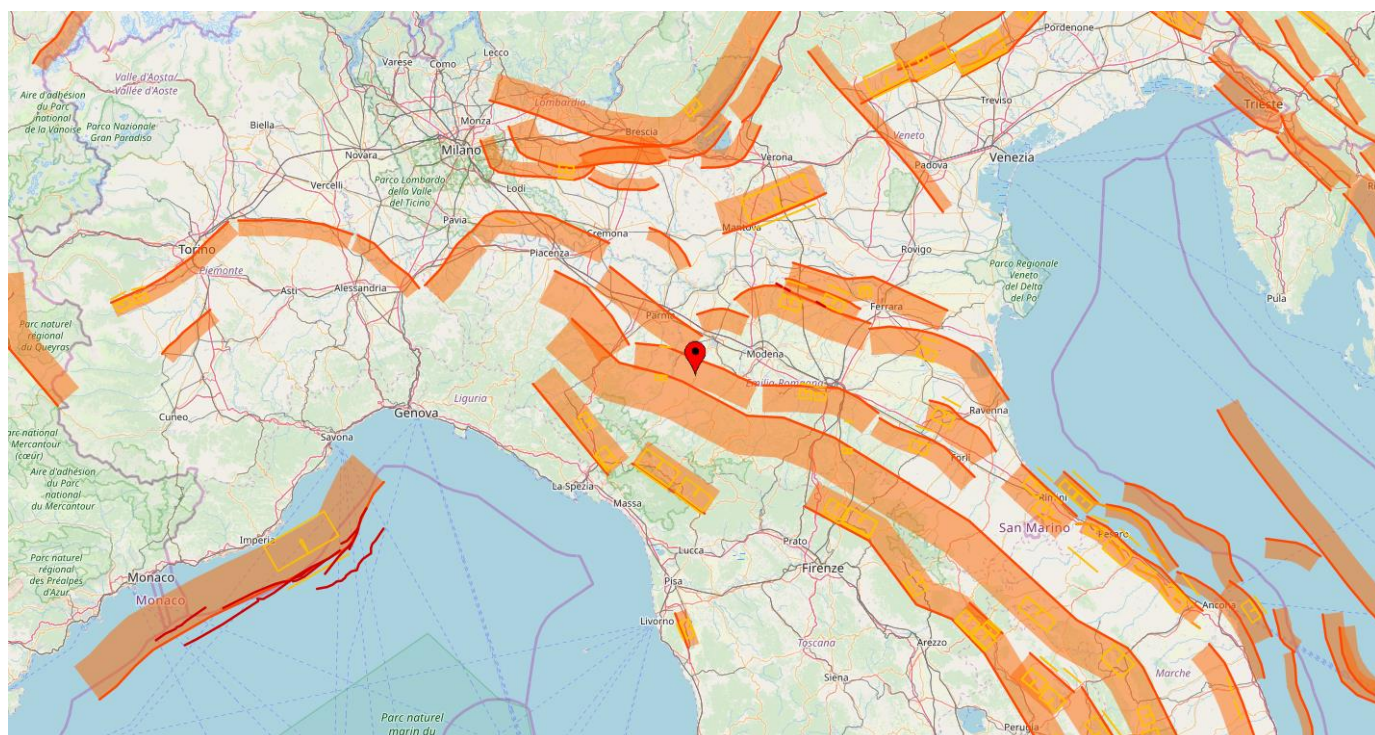
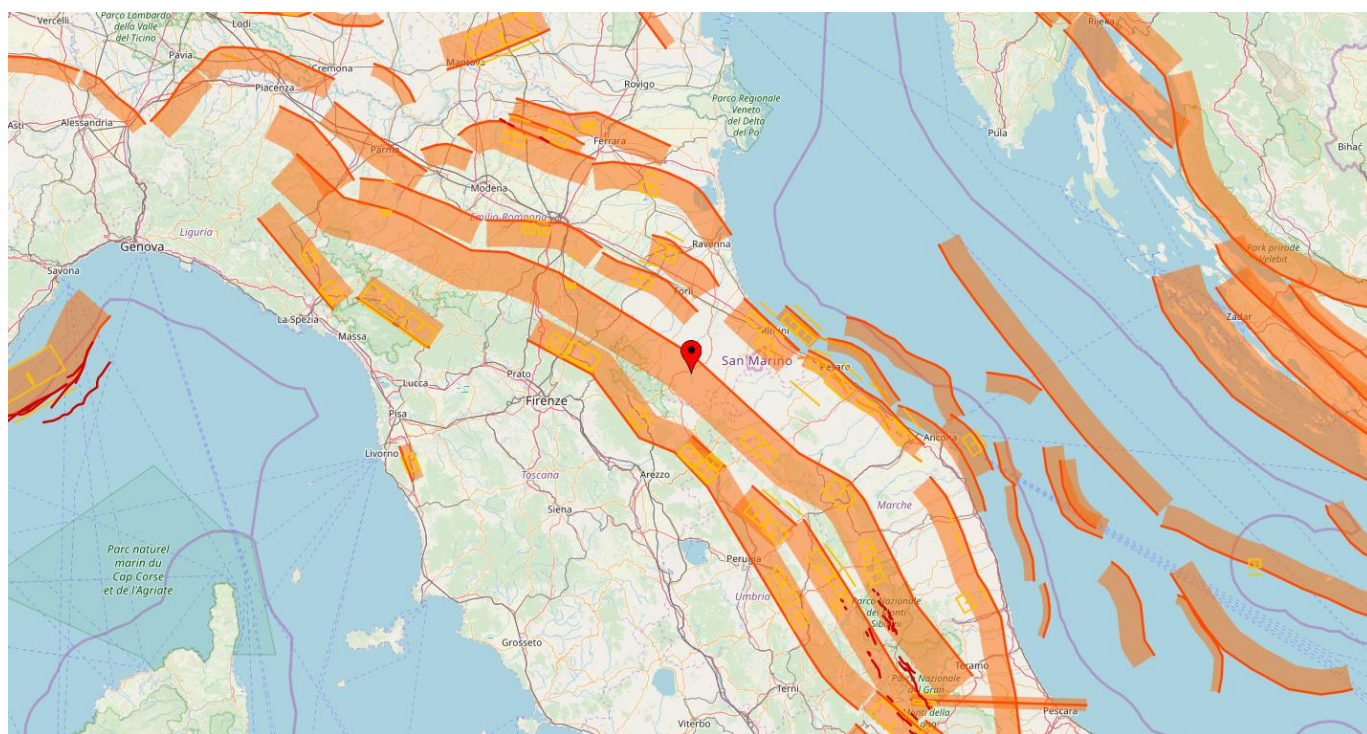


Figura 43 - Campegine – Correggio





**Figura 44 – Langhirano – Sassuolo**



**Figura 45 - Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga**



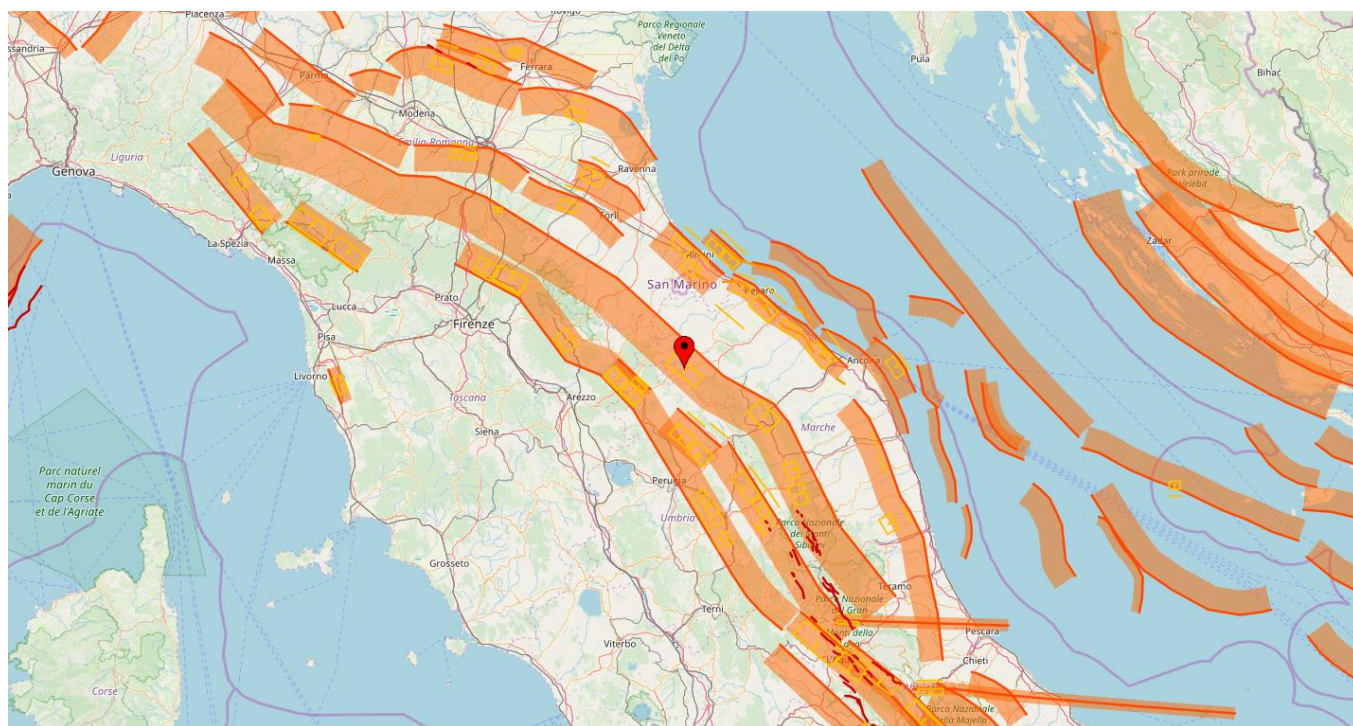


Figura 46 - Cagli

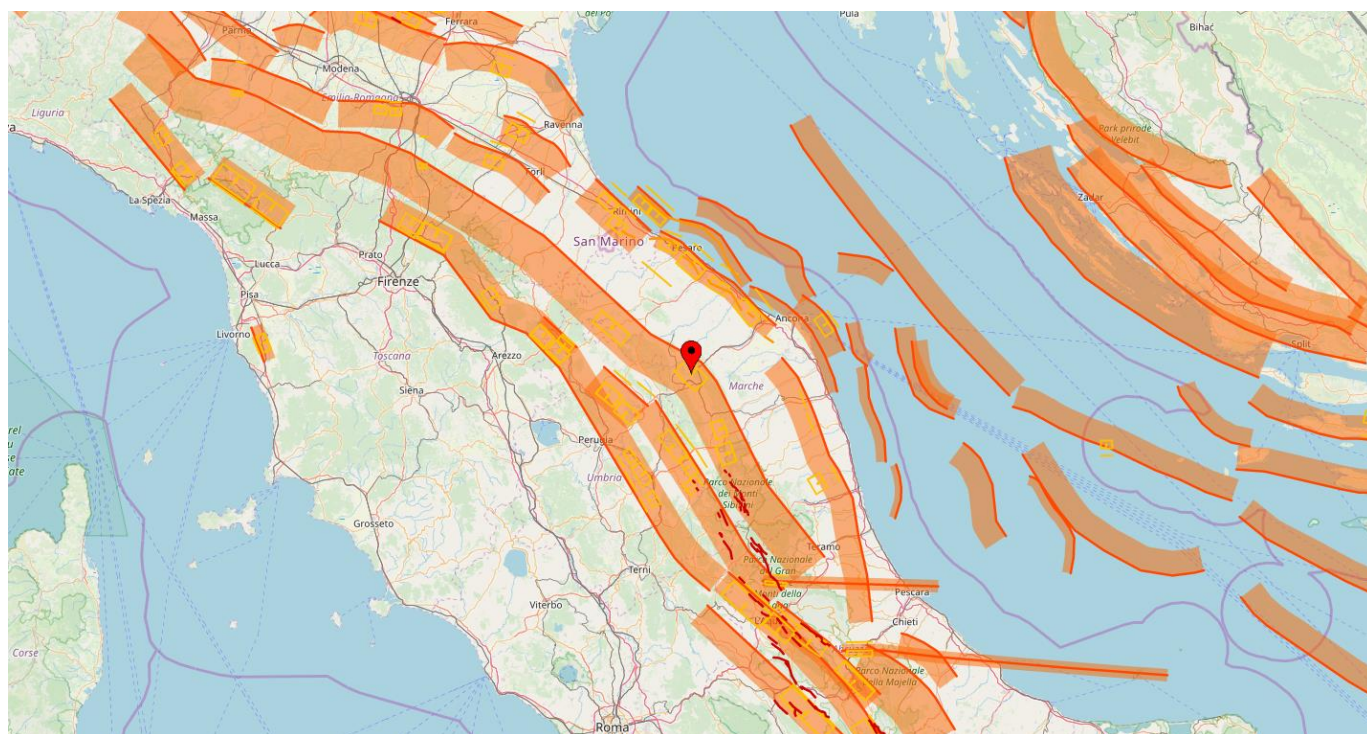


Figura 47 - Fabriano



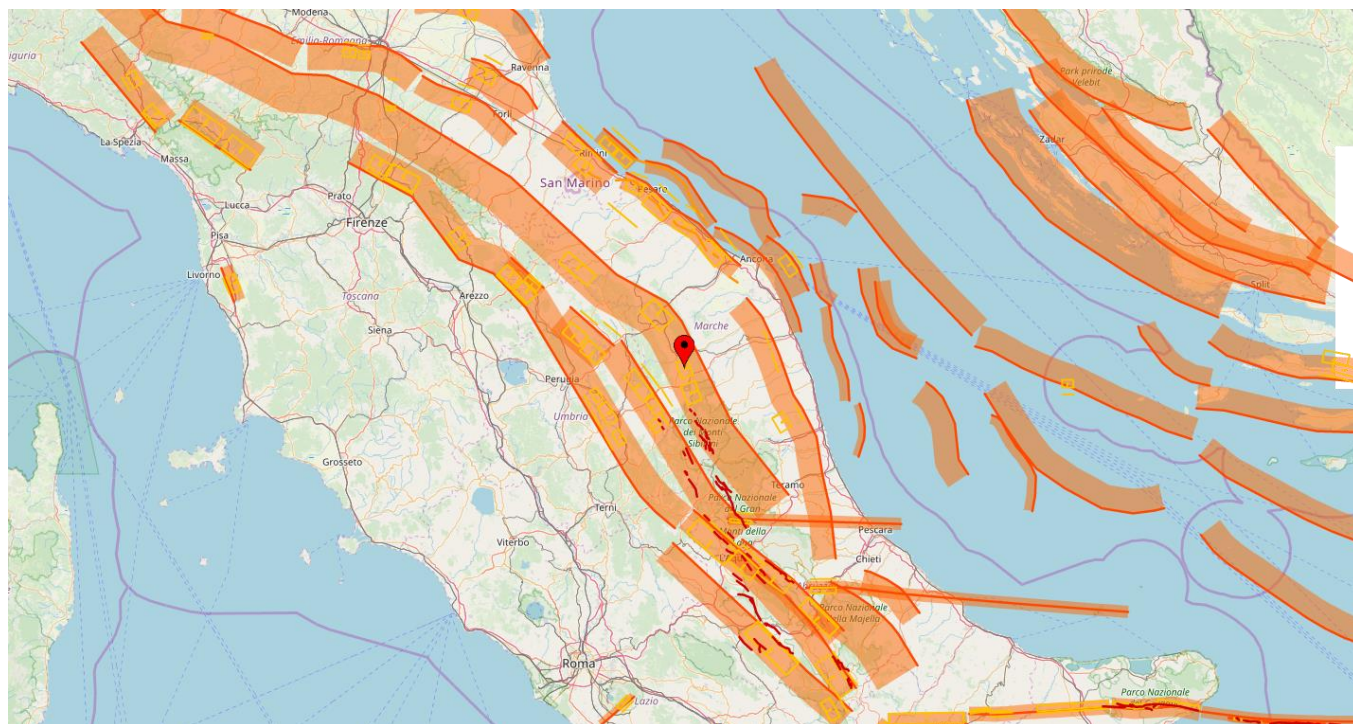


Figura 48 - Camerino

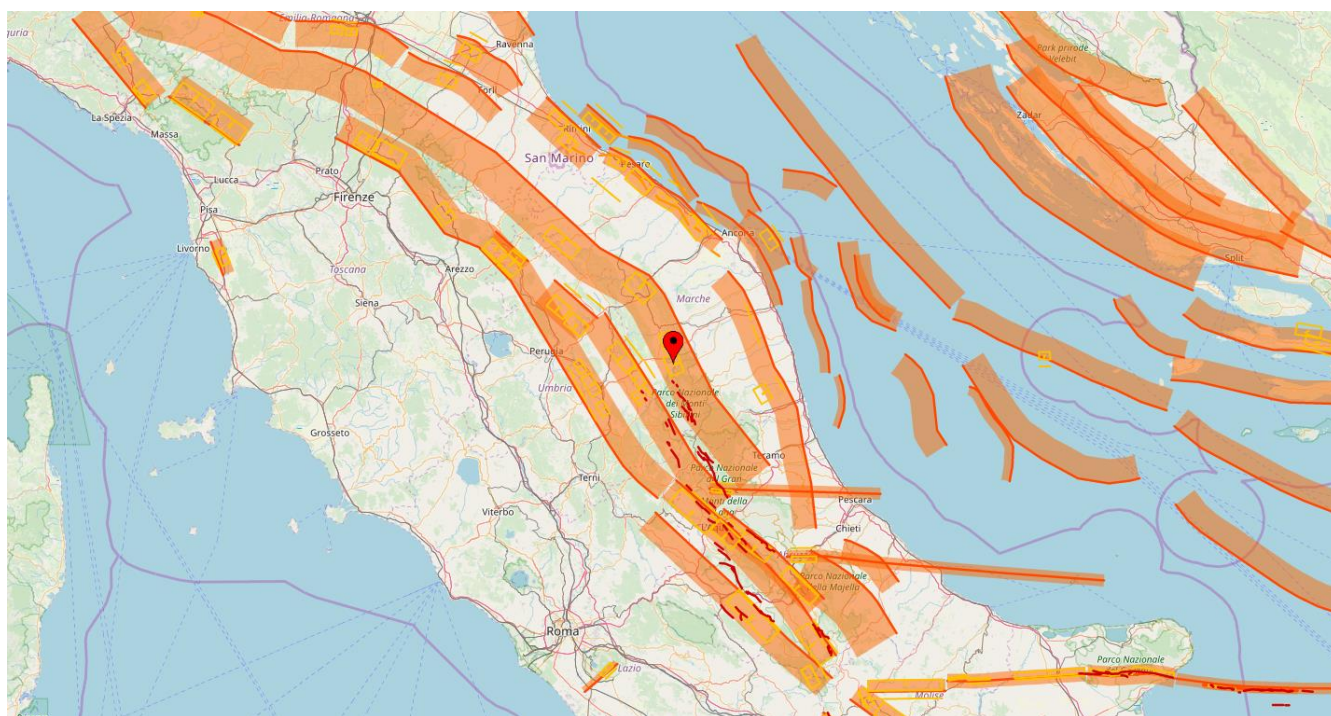
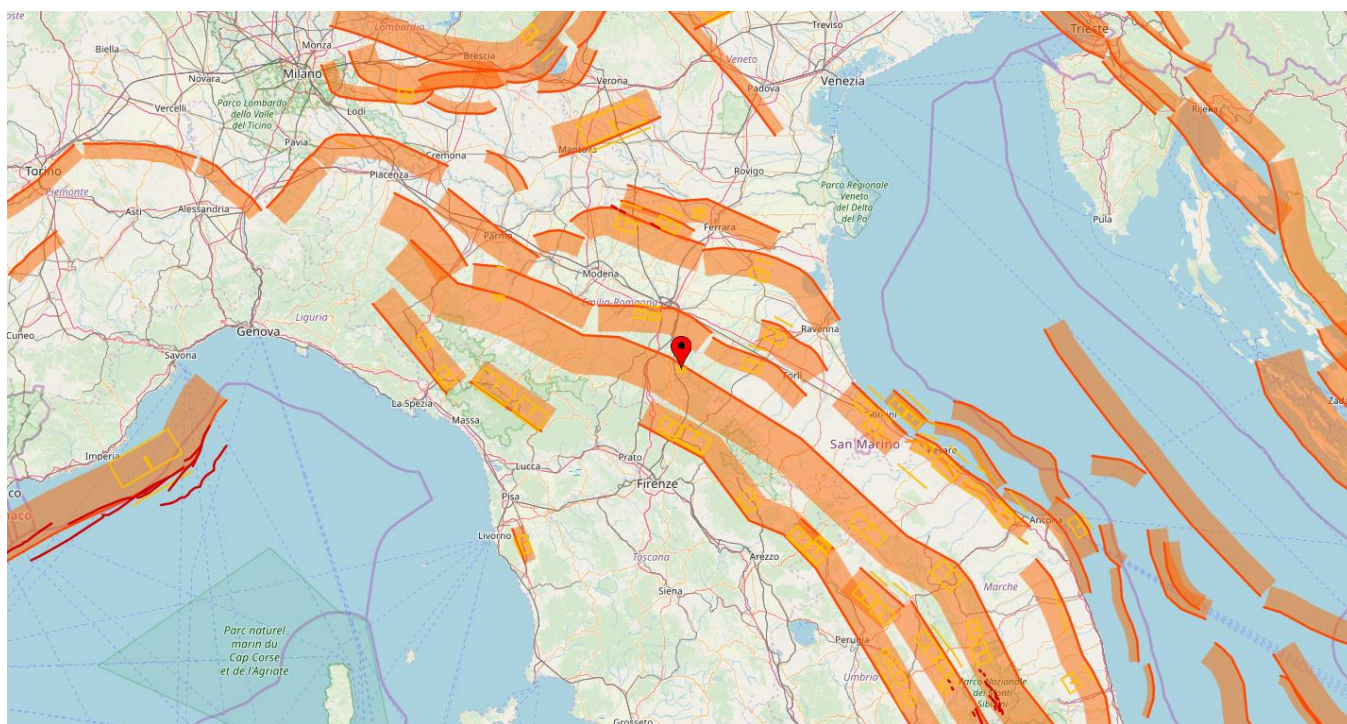
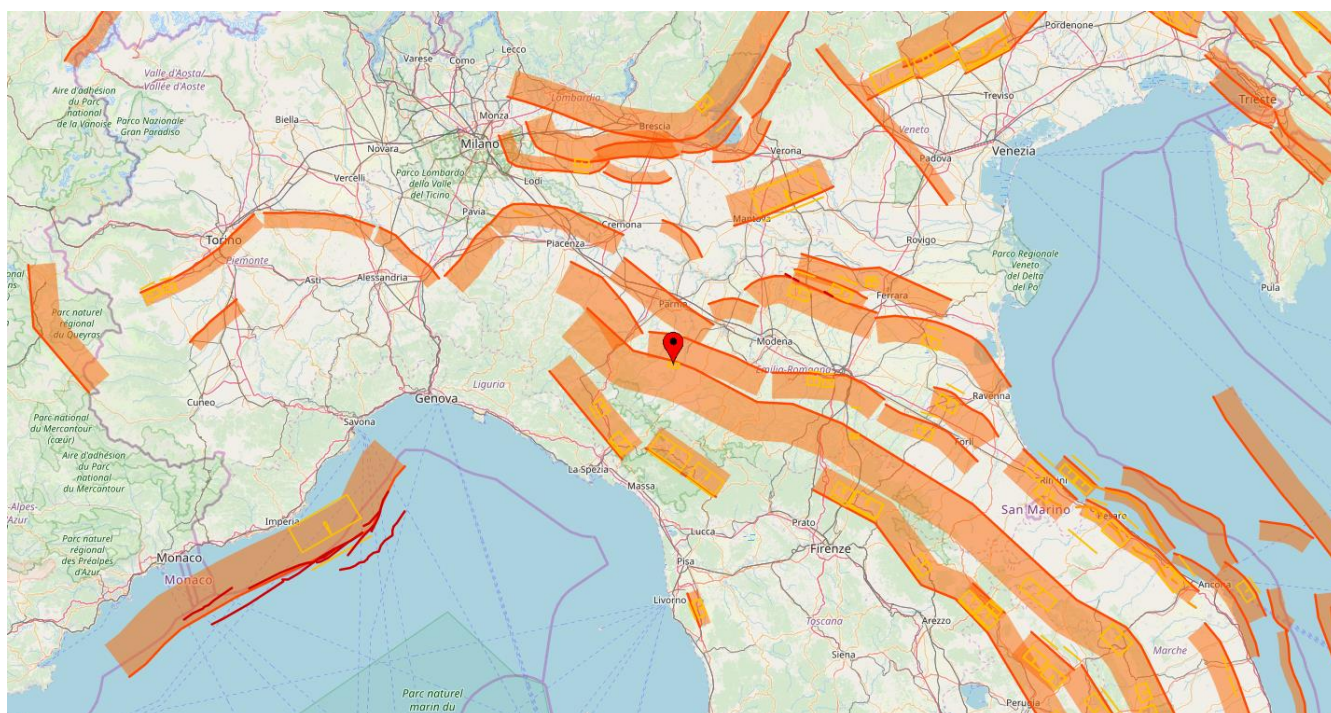


Figura 49 - Sarnano



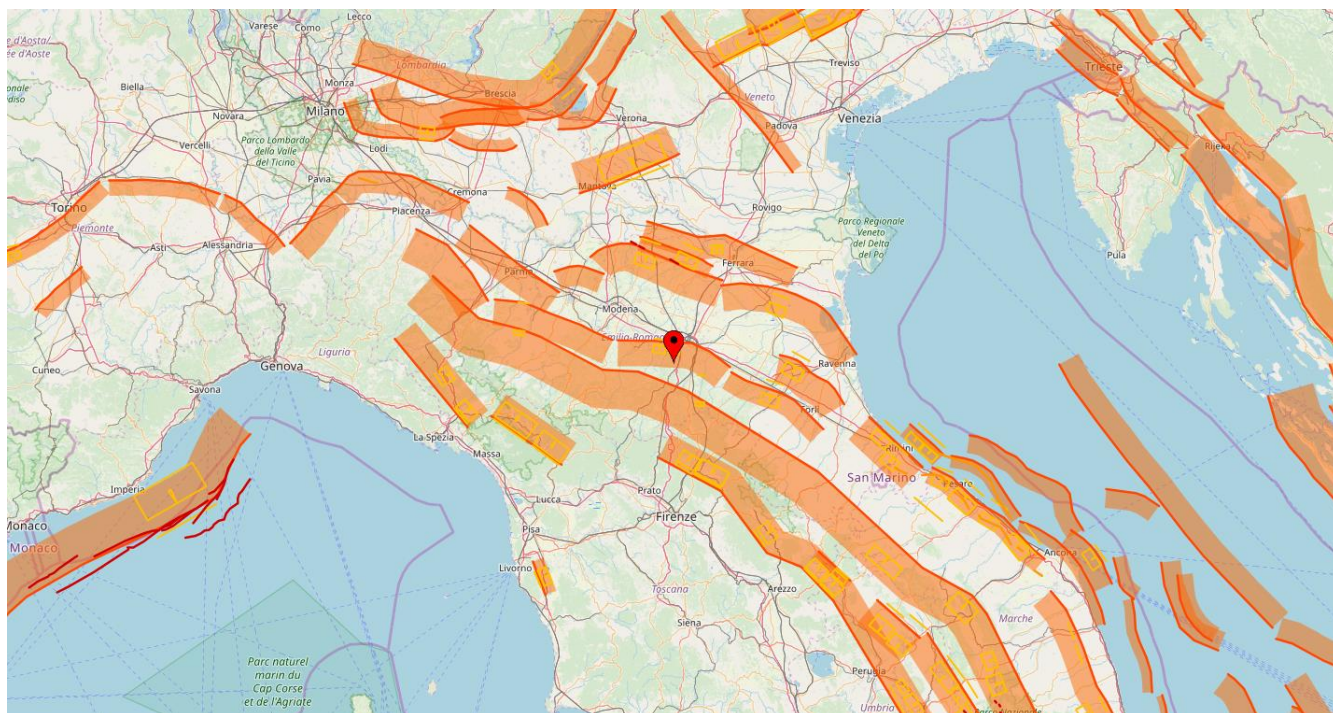


**Figura 50 - Loiano**

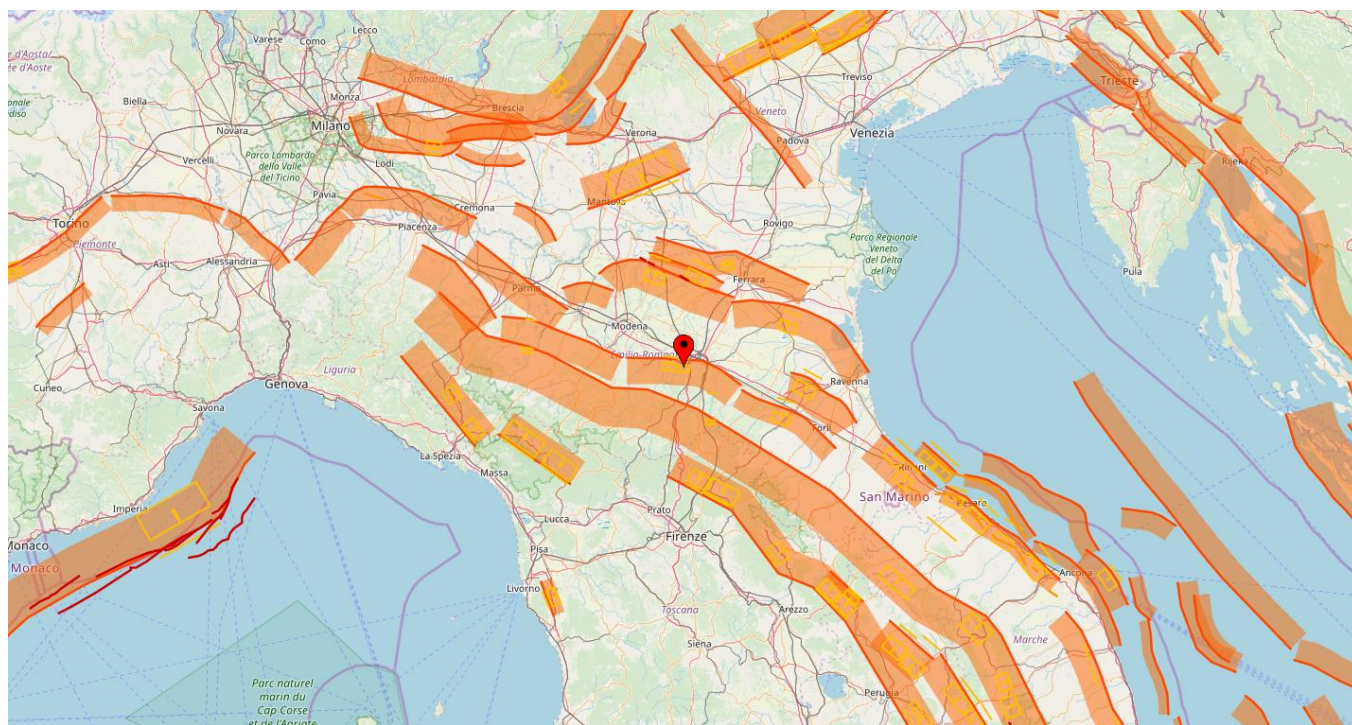


**Figura 51 - Neviano degli Arduini**



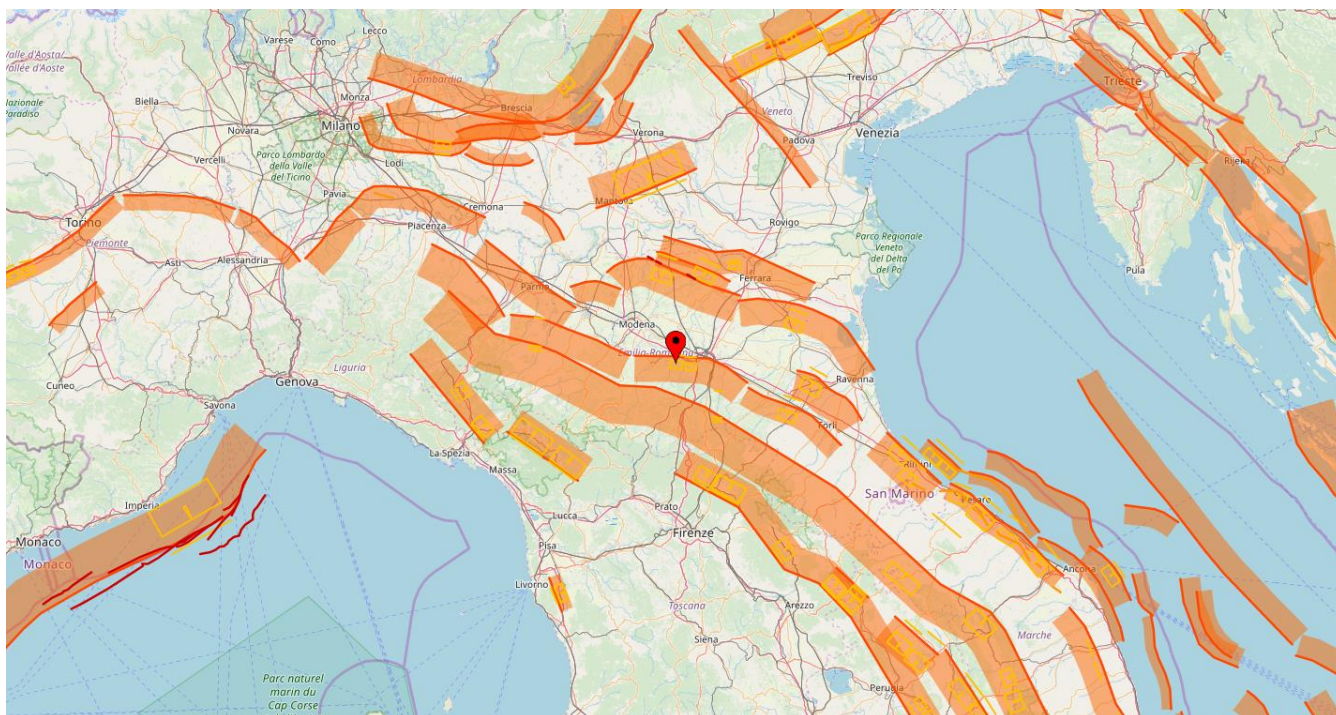


**Figura 52 - Castelvetro di Modena-Castel S. Pietro Terme**

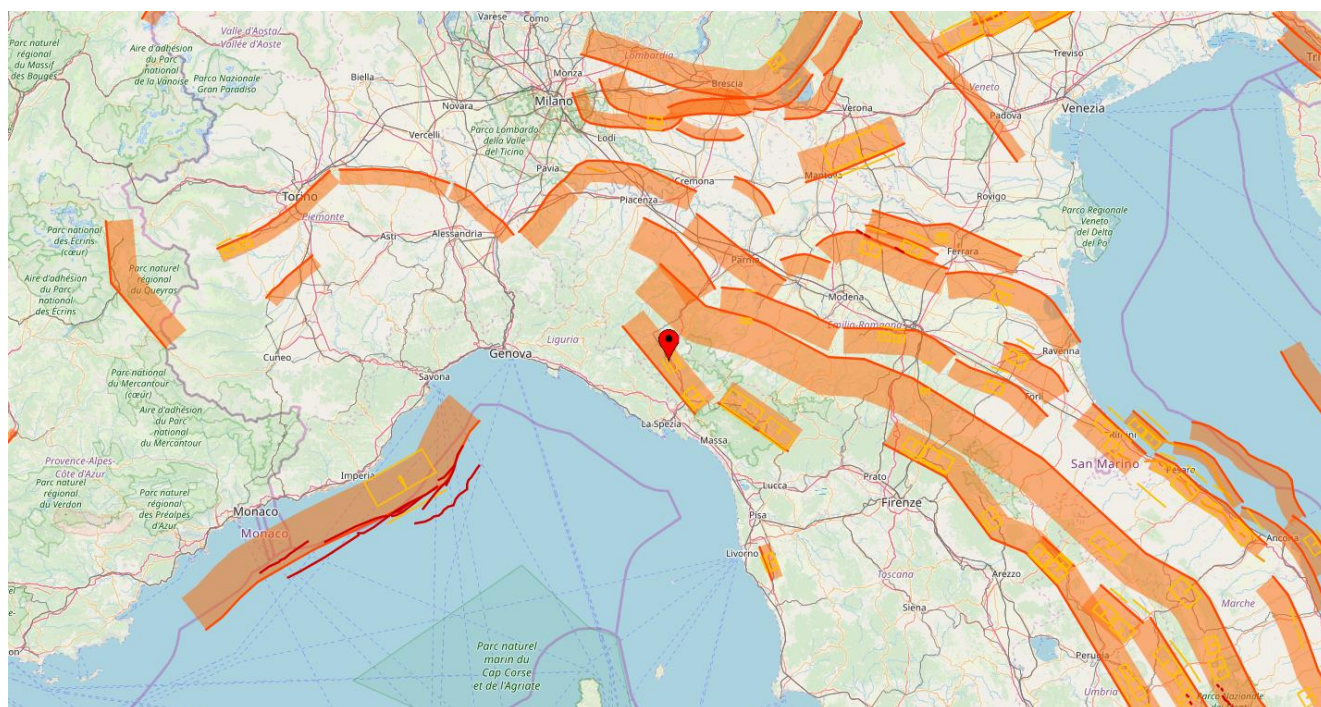


**Figura 53- Casalecchio di Reno**



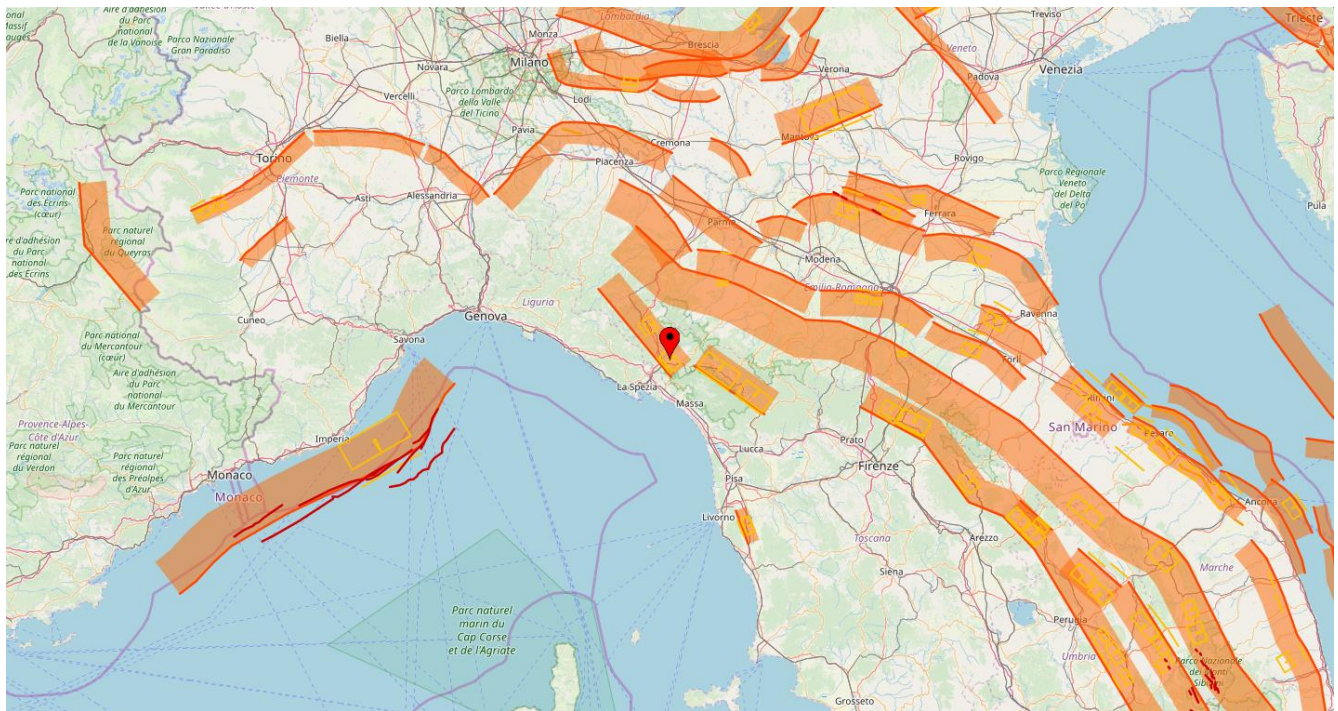


**Figura 54- Crespellano**

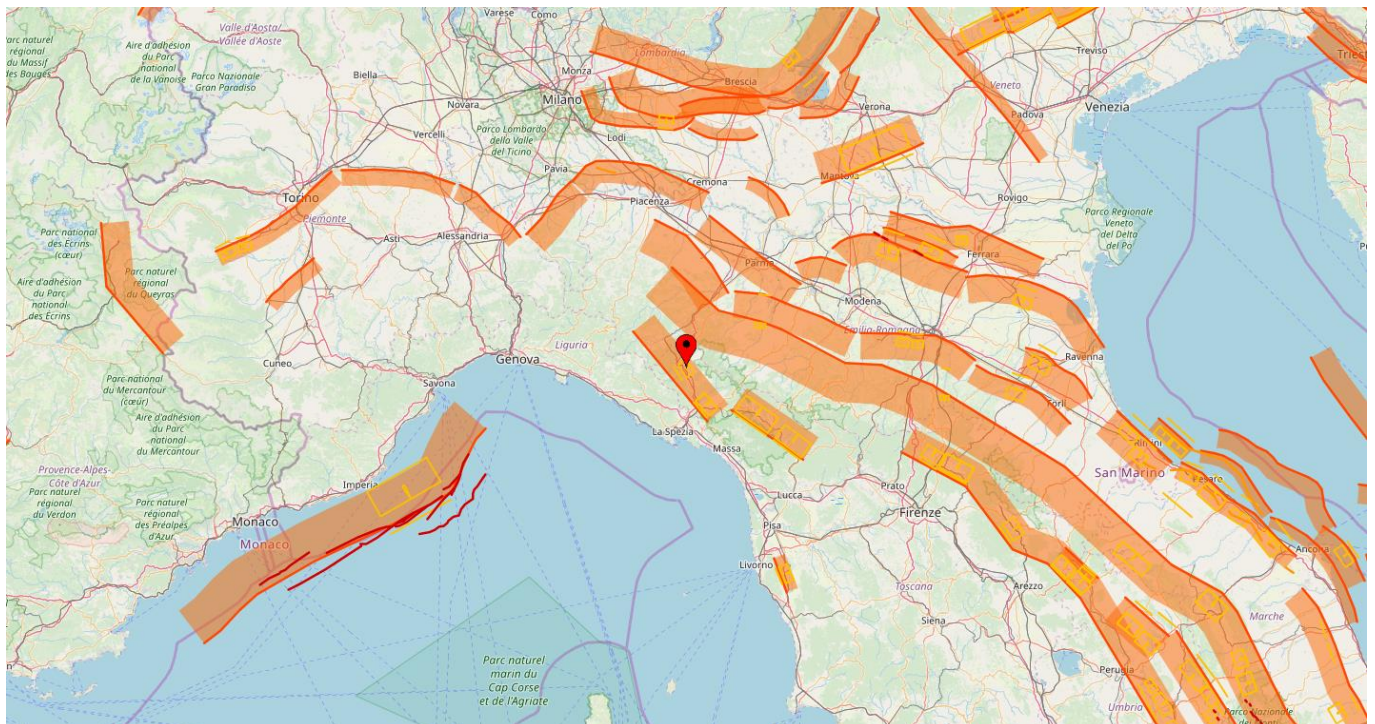


**Figura 55- Lunigiana**



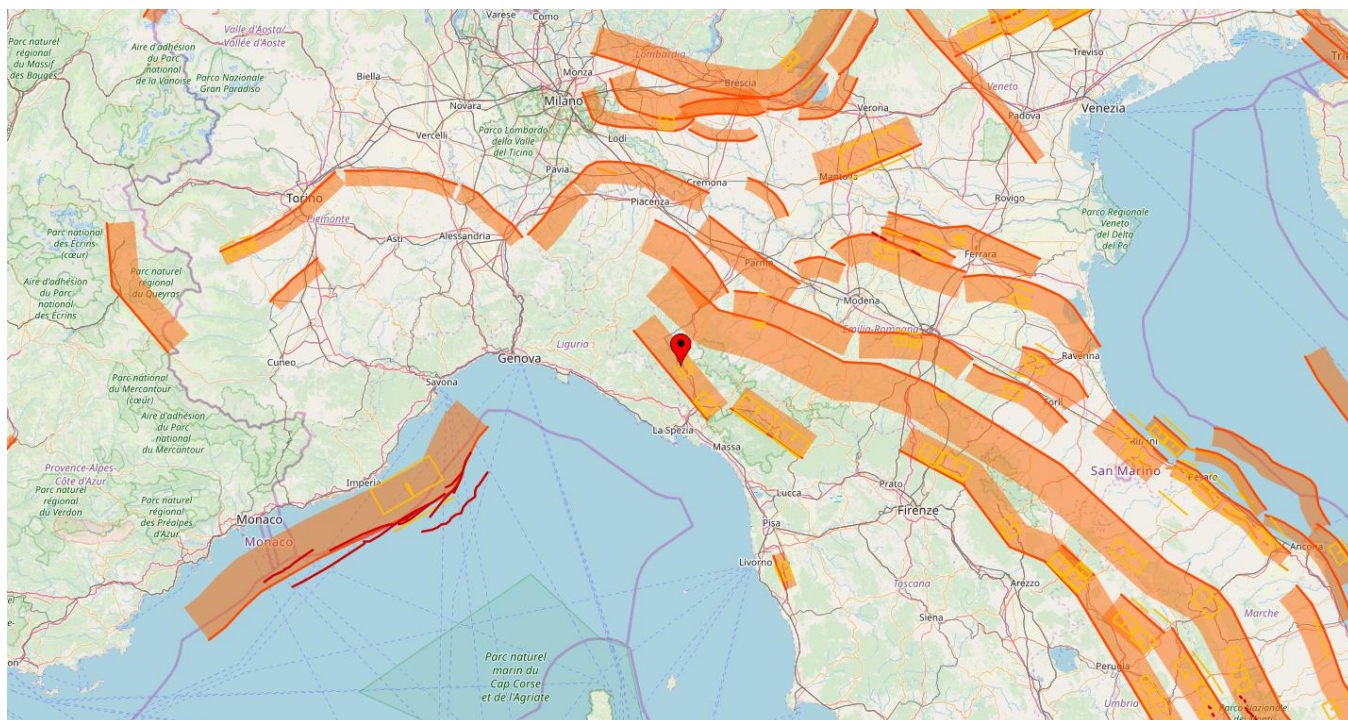


**Figura 56 - Aulla**

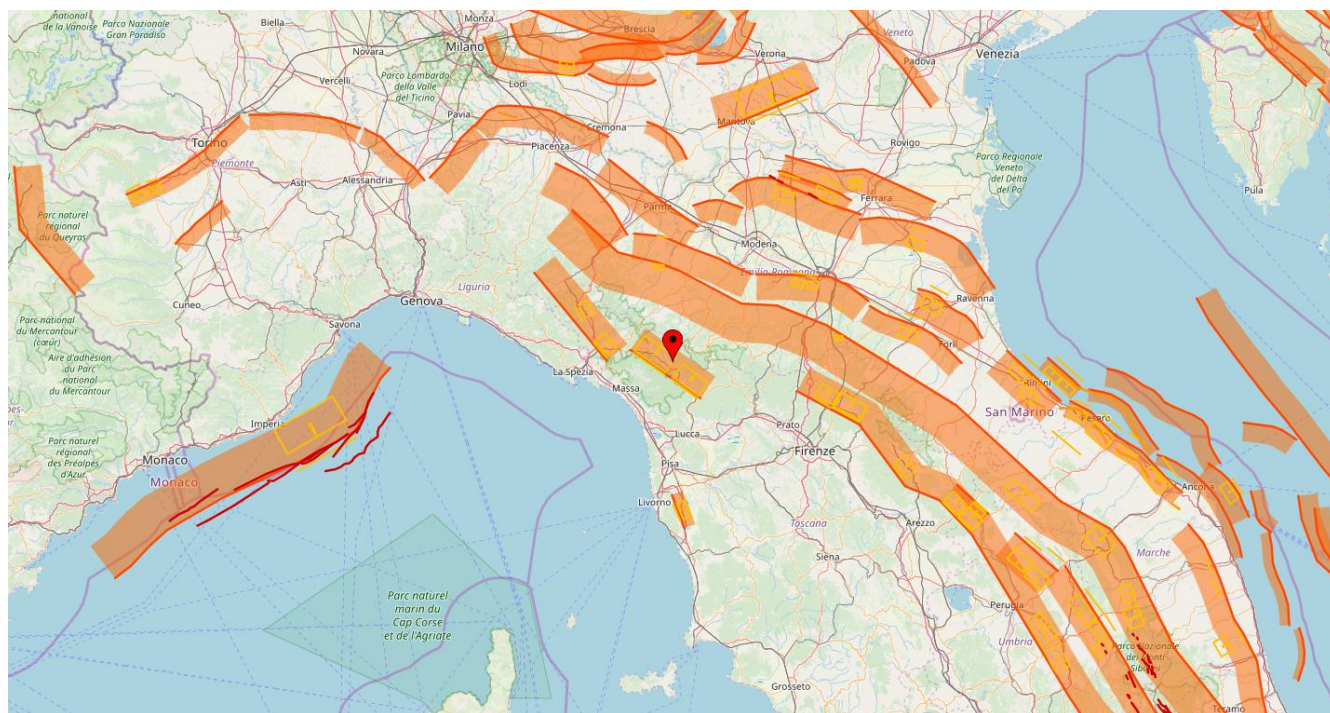


**Figura 57 - Pontremoli**



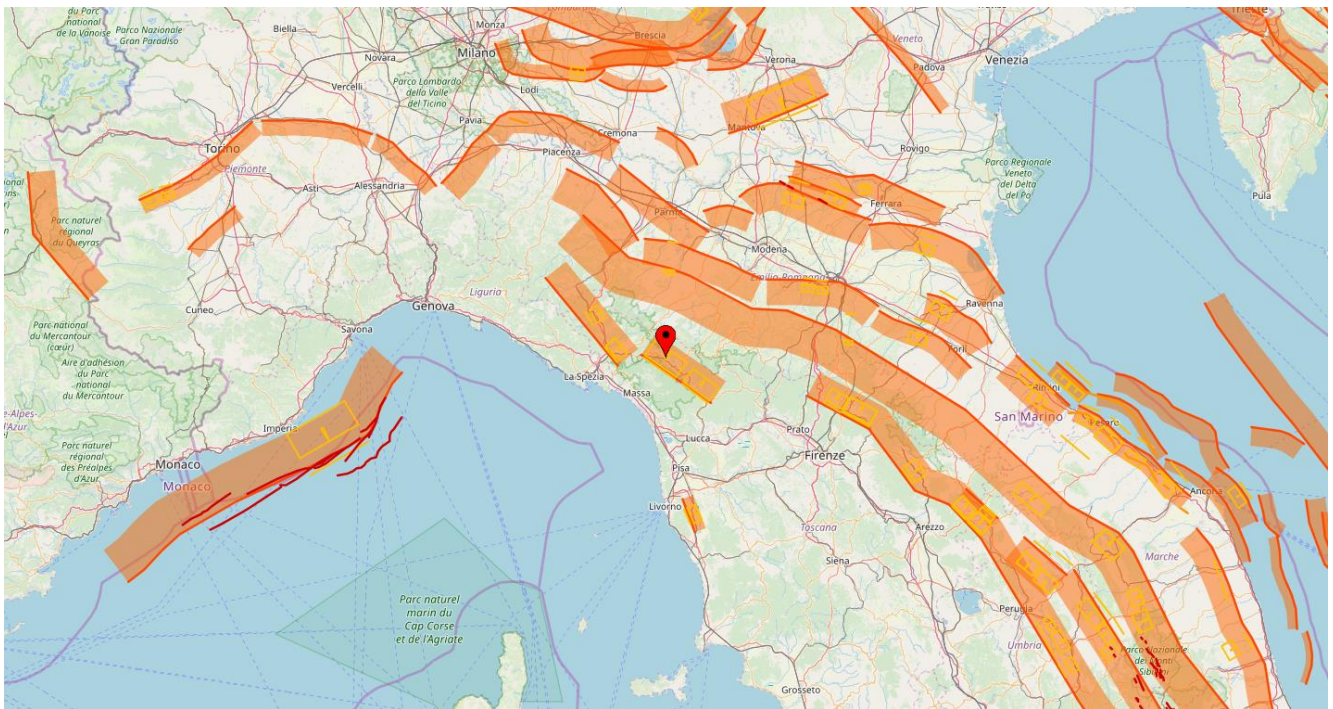


**Figura 58 - Lunigiana**

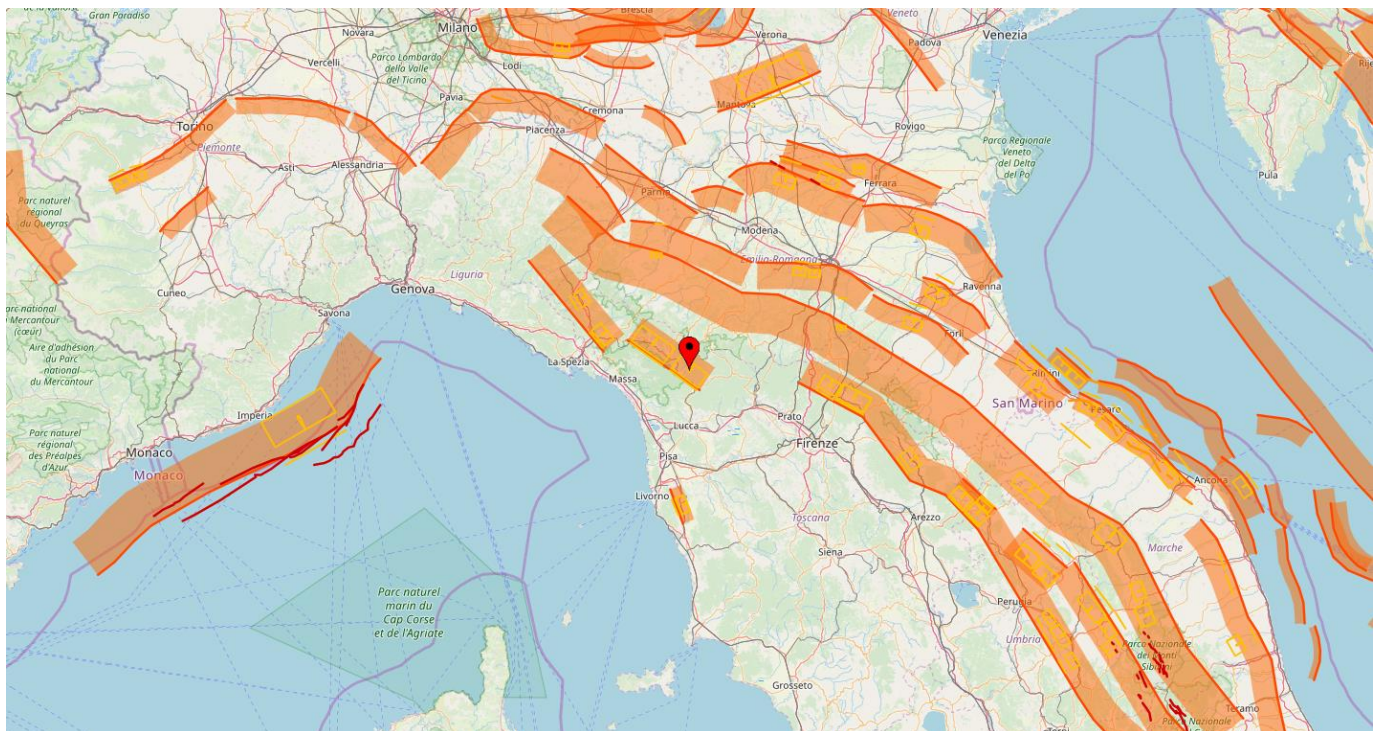


**Figura 59 - Garfagnana**



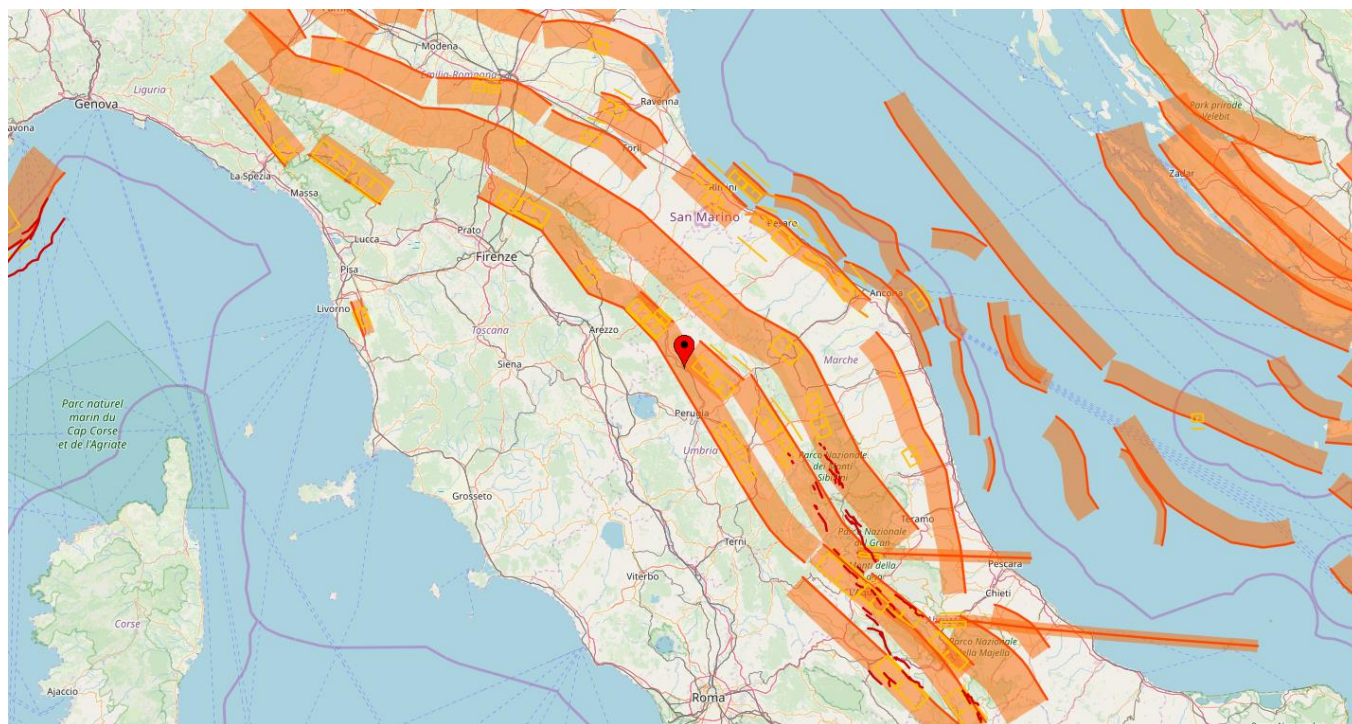


**Figura 60 - Garfagnana North**

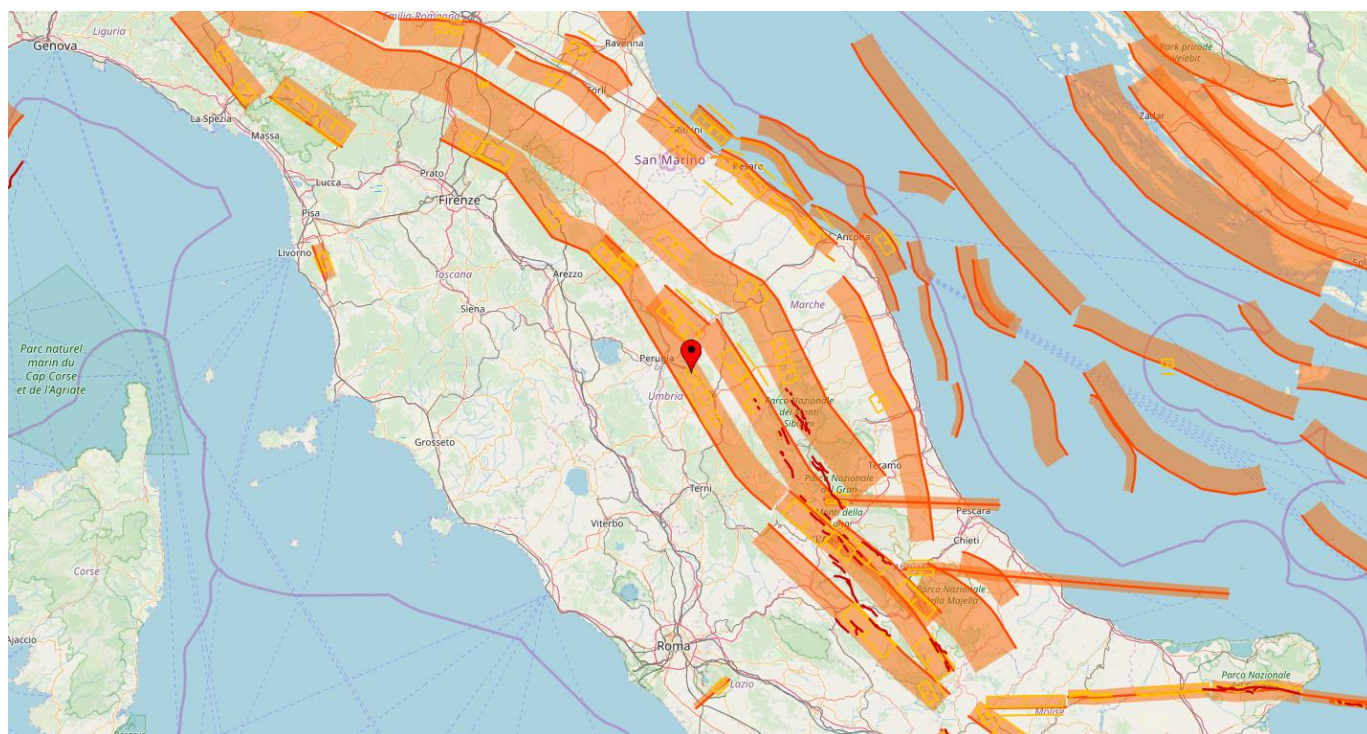


**Figura 61 - Garfagnana South**





**Figura 62 - Mugello-Città di Castello-Leonessa**



**Figura 63 - Bastia**



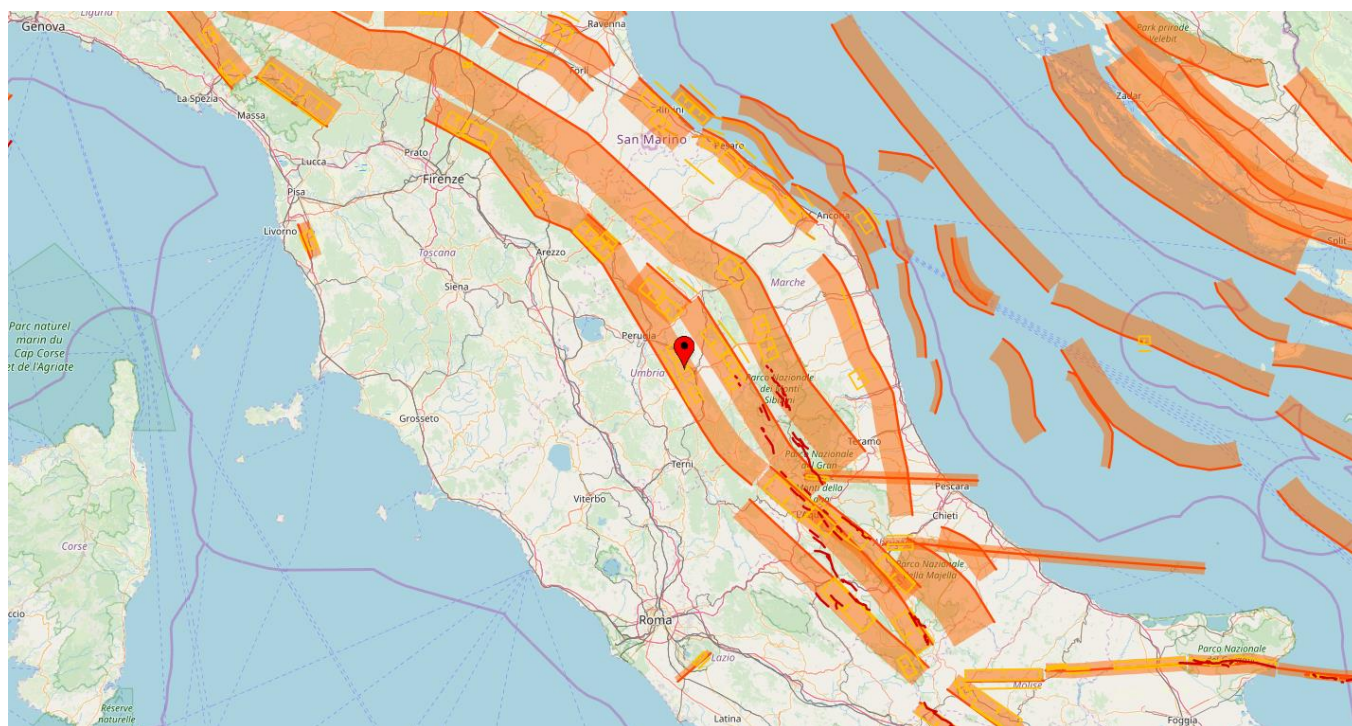


Figura 64 - Foligno

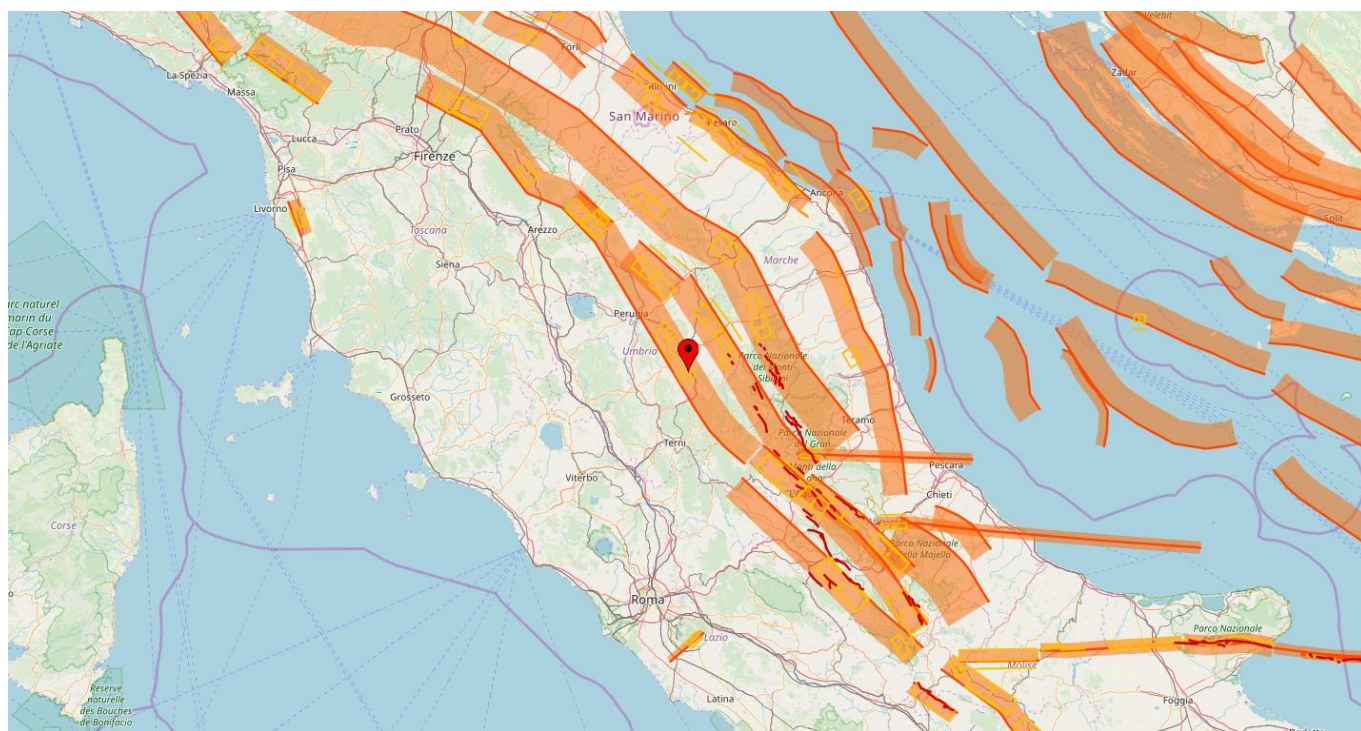
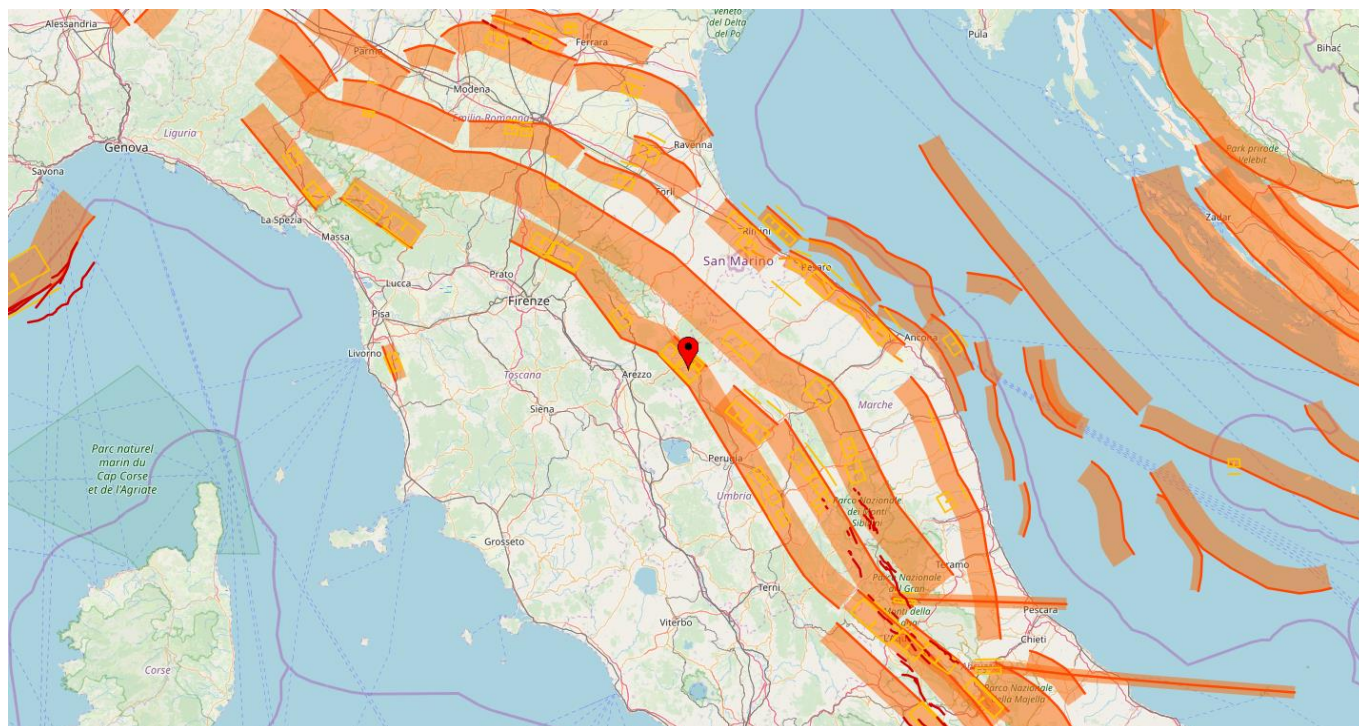
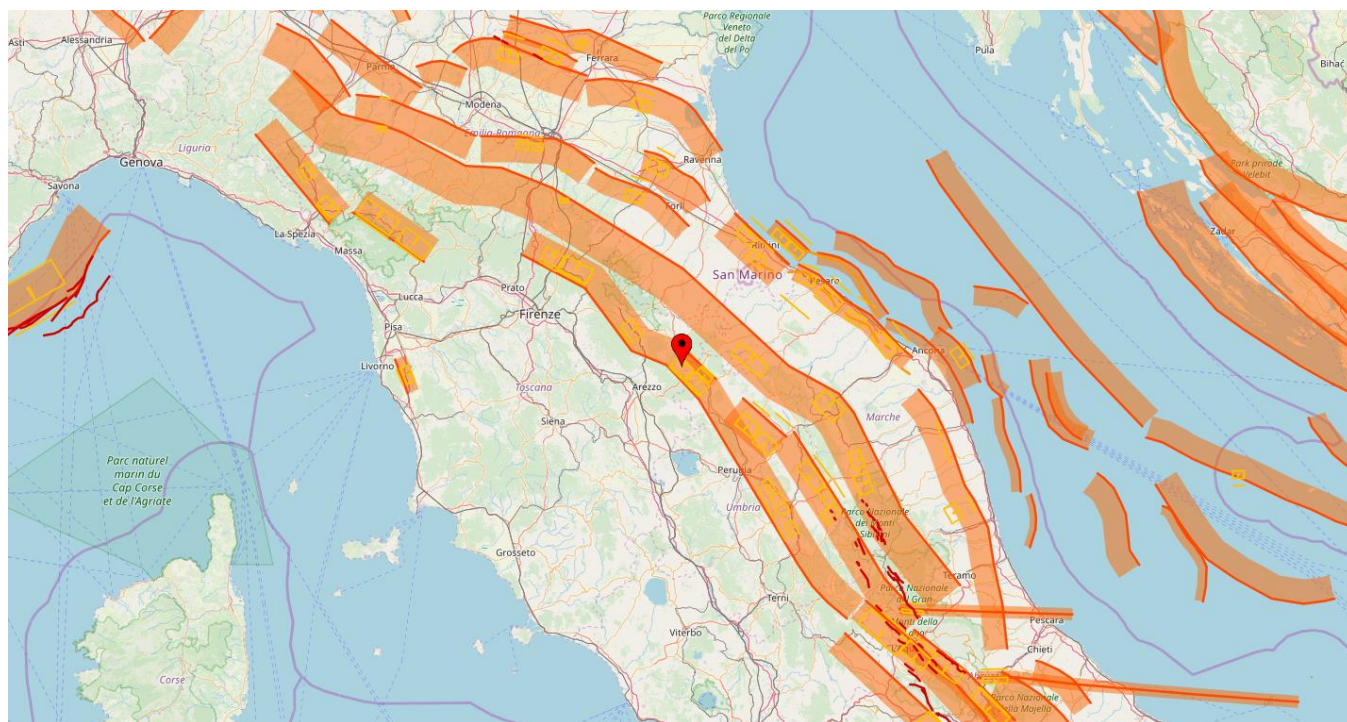


Figura 65 - Trevi



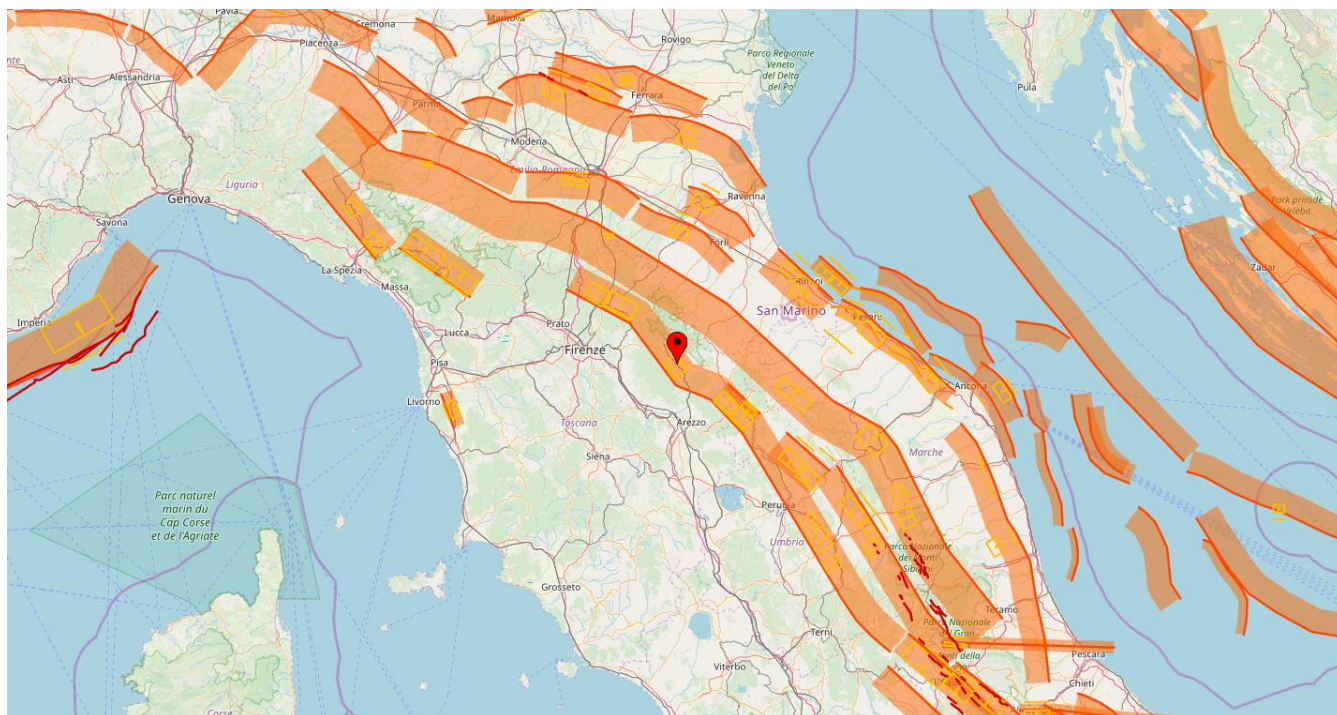


**Figura 66 - Monterchi**

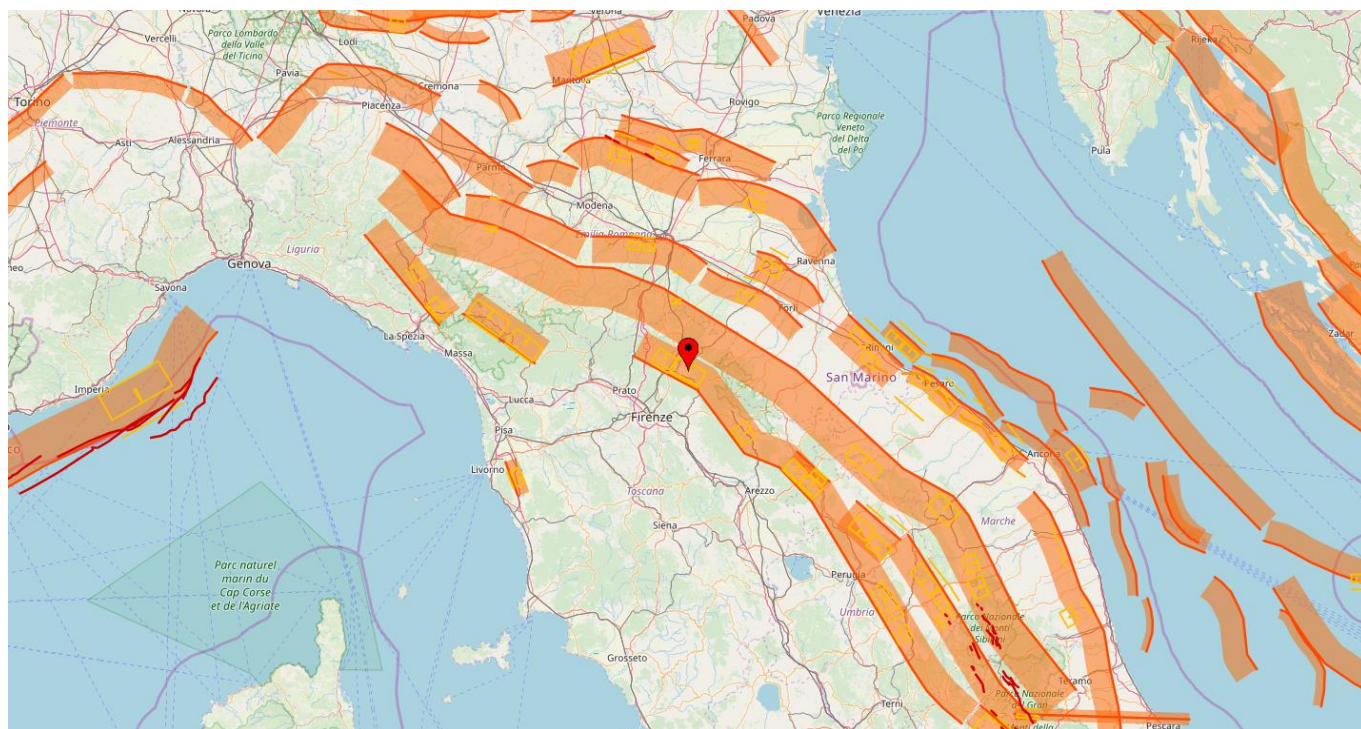


**Figura 67 - Anghiari**





**Figura 68 - Poppi**



**Figura 69 - Mugello East**



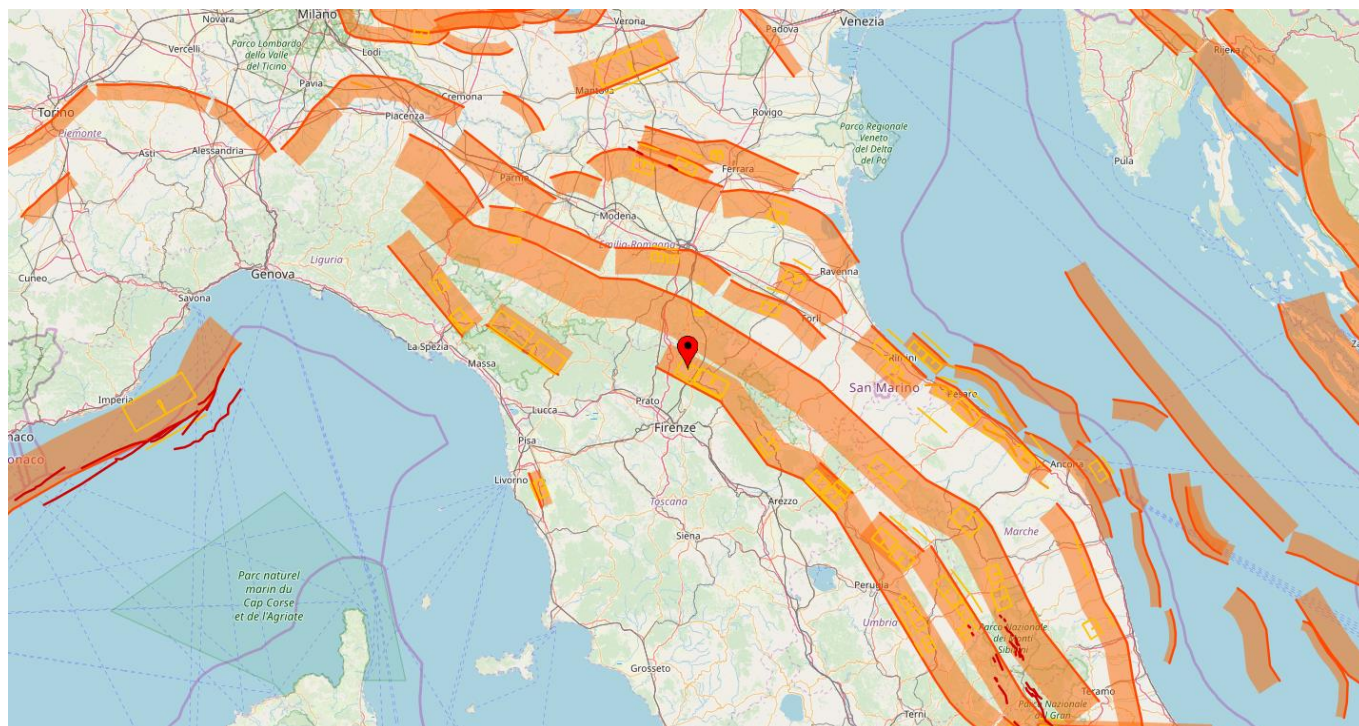


Figura 70 - Mugello West

### 3 ANALISI DELLA PERICOLOSITA' SISMICA – FAGLIAZIONE SUPERFICIALE

La sismotettonica è la disciplina che si occupa di studiare i rapporti tra la sismicità e la tettonica, al fine di individuare e caratterizzare le sorgenti sismiche ed il potenziale sismogenetico delle strutture geologiche attive in una determinata area.

Il tema della fagliazione superficiale e dell'importanza di questa tematica per la progettazione delle infrastrutture crebbe di importanza a partire dagli studi ed approfondimenti successivi al terremoto dell'Irpinia del 1980.

Il terremoto dell'Irpinia, Magnitudo 6,9, fu il più devastante rispetto ai terremoti del Belice del 1968 e del Friuli del 1976 e, come questi ultimi episodi, anche in questo caso il terremoto non era ricollegabile a faglie note ed individuate in superficie. In base a queste considerazioni si aprì una nuova fase di studio di tettonica attiva in Italia a cui si dedicarono ricercatori di ENEA, CNR, INGV e varie altre Università italiane.

Questi studi portarono ad alcune importanti conclusioni:

- La tettonica lungo la zona appenninica è giovane dal punto di vista geologico, pari a circa un milione di anni, mentre, le faglie attive per poter dare una impronta al territorio hanno necessità di alcuni milioni di anni, per manifestarsi ed intersecare la superficie topografica, ed in alcuni casi restano cieche (blind fault)
- La geologia di terreno è invece caratterizzata da faglie legate a sistemi preesistenti ormai estinti
- In base a queste considerazioni si è evidenziato che la maggior parte delle sorgenti sismogenetiche italiane non intersecano la superficie topografica ma permangono "blind faults".

La Pianura Padana rappresenta un "unicum geologico" perché caratterizzata da una potente successione sedimentaria che nasconde la zona di contatto tra i "thrust" (faglie con movimento di tipo inverso o reverse fault) delle Alpi Meridionali a nord e quelli dell'Appennino Settentrionale, a Sud. Questo significa che le catene montuose, osservabili nella parte esposta, proseguono con porzioni sepolte sotto il territorio della Pianura Padana.

Pertanto, al di sotto della potente successione di sedimenti che caratterizzano la Pianura Padana esistono strutture tettoniche (faglie capaci) attive e capaci di generare terremoti.

E' stato rilevato che i terremoti della Pianura Padana hanno una caratteristica comune: anche i terremoti più superficiali non producono la rottura della superficie topografica.

Nell'area emiliana storicamente si sono osservati i seguenti eventi importanti:

- Sequenza sismica di Ferrara nel 1570,
- Sequenza sismica di Argenta nel 1624,
- Terremoti di Bologna del 1929,
- La sequenza sismica dell'Emilia del 2012 che ha riattivato faglie sepolte.

Di seguito si riportano le caratteristiche individuate sulla base della banca dati ITHACA.



### 3.1 FAGLIE CAPACI DALLA BANCA DATI ITHACA

Il database del progetto ITHACA (ITaly HAZard from CApable faults; Michetti et al., 2000; ITHACA, 2015), contiene informazioni riguardo le strutture tettoniche attive in Italia, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali.

Il progetto si occupa in modo particolare delle faglie capaci, definite come faglie che potenzialmente possono creare deformazione in superficie.

L'Italia è una delle regioni di maggiore mobilità tettonica del Mediterraneo, e quindi a più alto tasso di sismicità. Molti terremoti storici hanno avuto effetti catastrofici (e.g., i terremoti del 1693 in Sicilia orientale, 1783 in Calabria, 1805 in Molise, 1908 a Messina e 1915 nel Fucino) raggiungendo intensità MCS di XI grado (Magnitudo circa o leggermente superiore a 7). Studi paleosismologici hanno consentito di caratterizzare le faglie responsabili di molti di questi terremoti, dimostrando che dislocazioni tardo pleistoceniche-oloceniche hanno interessato molte strutture considerate in passato completamente inattive.

La stima della pericolosità legata ai terremoti, in particolare alla fagliazione superficiale che spesso l'accompagna per magnitudo  $\geq 6$ , è un tema molto importante, specialmente in aree densamente popolate ed industrializzate come il territorio italiano. Di conseguenza, la conoscenza approfondita e la precisa collocazione spaziale delle faglie attive, in special modo di quelle stimate in grado di produrre una significativa deformazione tettonica permanente in superficie (faglie capaci), assume un ruolo chiave per la mitigazione del rischio. A questo scopo, il Servizio Geologico d'Italia - ISPRA ha sviluppato il progetto ITHACA (ITaly HAZard from CApable faults), che sintetizza le informazioni disponibili sulle faglie capaci che interessano il territorio italiano.

ITHACA è uno strumento fondamentale per: a) analisi di pericolosità ambientale e sismica, b) comprensione dell'evoluzione recente del paesaggio, c) pianificazione territoriale e d) gestione delle emergenze di Protezione Civile. Può essere inoltre di supporto alla ricerca scientifica nell'ambito dell'analisi dei processi geodinamici.

Le faglie capaci vengono mappate e caratterizzate in ITHACA sulla base dei dati disponibili in letteratura, dopo una attenta revisione critica.





**ISPRA**

## ITHACA - CATALOGO DELLE FAGLIE CAPACI

ISPRA-Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia

Info Help

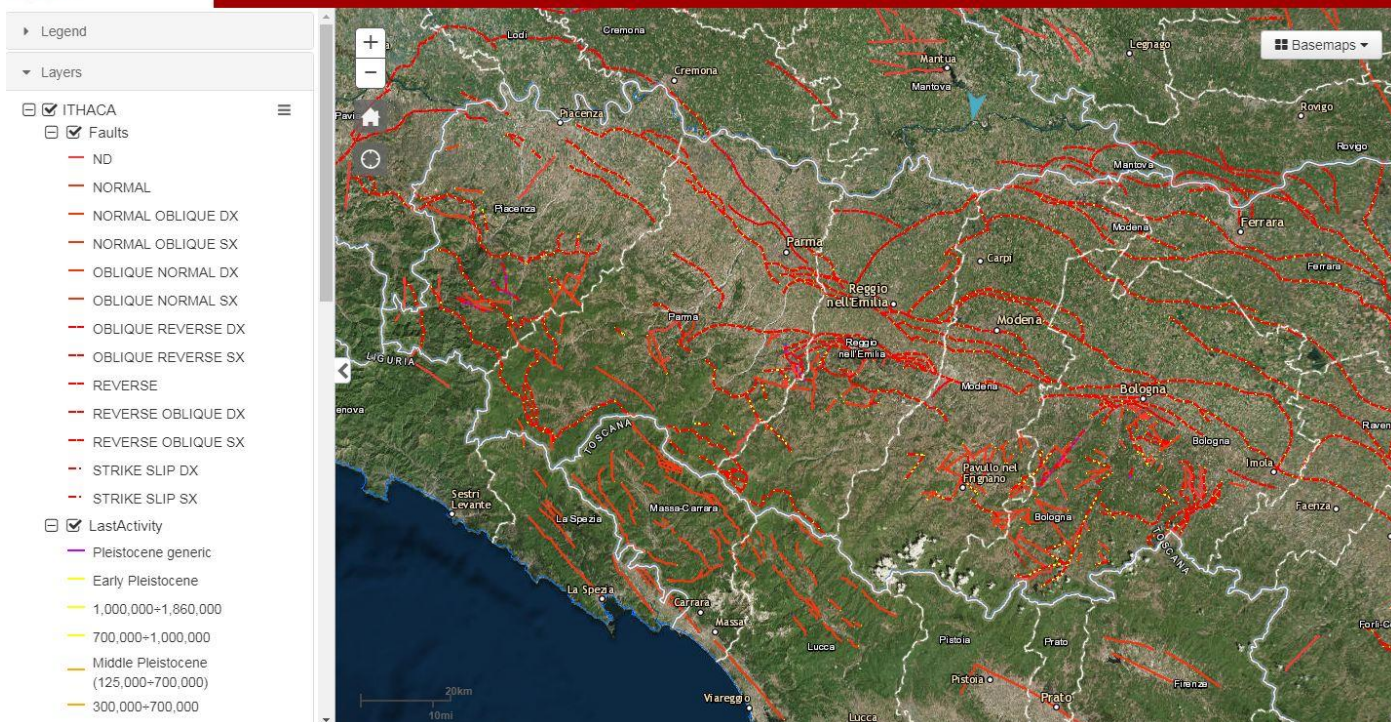


Figura 71



**ISPRA**

## ITHACA - CATALOGO DELLE FAGLIE CAPACI

ISPRA-Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia

Info Help

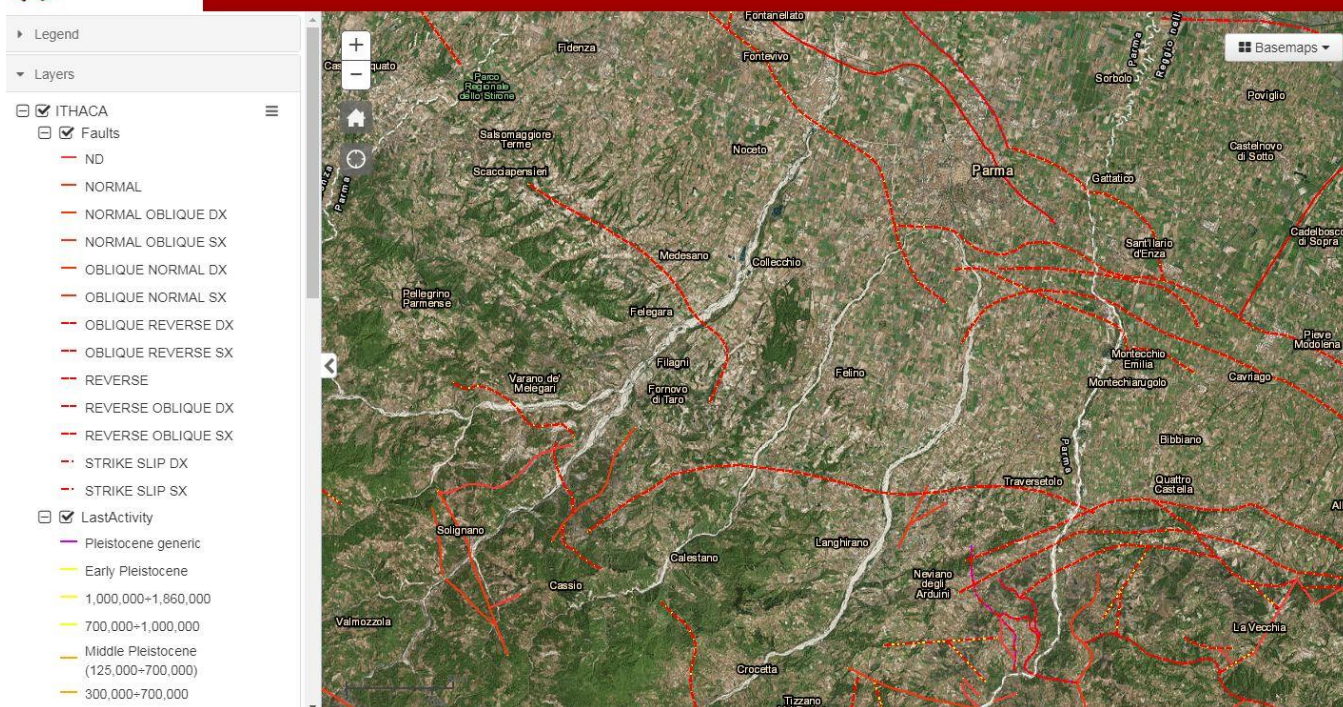


Figura 72





Figura 73 Il cerchio nero indica l'area dell'opera a progetto

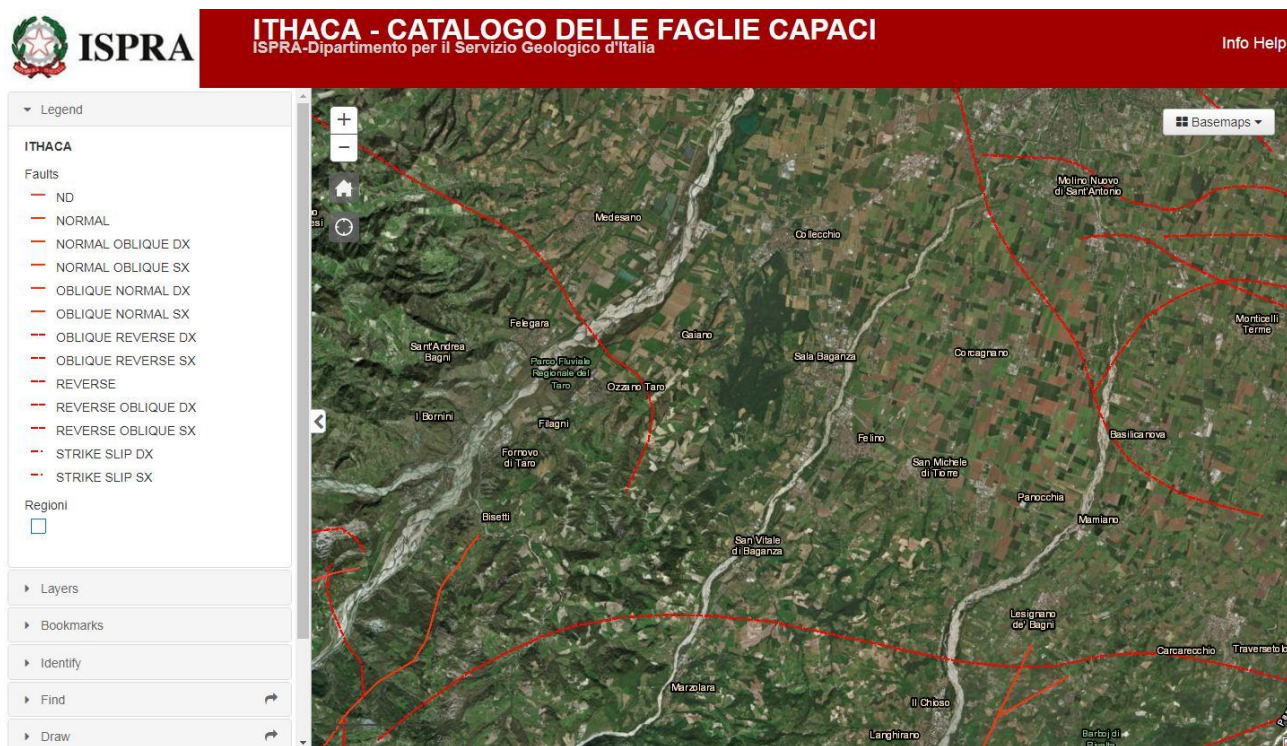


Figura 74



### 3.1.1 Considerazioni conclusive sull'area in esame

Di seguito si riporta l'elenco delle principali Faglie Capaci individuate in corrispondenza del settore in esame con il dettaglio delle principali caratteristiche:

CODICE	ID	SISTEMA	AVERAGE STRIKE	DIP	DIP DIRECTION	LENGTH	DEPTH	LOCATION RELIABILITY	KINEMATICS	LAST ACTIVITY	LITHO CUT	SLIP RATE	MAX CREDIBLE MAGNITUDE
90400	SORAGNA	PIACENZA - PARMA	135	40	SW	17	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,5
90401	S.SECONDO PARMENSE	PARMA - REGGIO	140	0	SW	17	0	250000	REVERSE	PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,5
90402	PARMA	PIACENZA - PARMA	125	0	SW	23	0	250000	REVERSE	HISTORICAL, MIN. 3000	ALLUVIAL DEP.	0	6,7
90403	S.PANCRAZIO PARMENSE	PIACENZA - PARMA	140	0	SW	21	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,6
90405	S.ILARIO D'ENZA-PARMA	PARMA - REGGIO	120	0	SSW	13	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,2
90406	GAZZARO - PARMA	PARMA - REGGIO	100	0	SSW	12	0	250000	REVERSE	300,000-700,000	ALLUVIAL DEP.	0	6,3
90407	PARMA-REGGIO	PARMA - REGGIO	110	0	SSW	27	0	250000	REVERSE	300,000-700,000	ALLUVIAL DEP.	0	6,7
90408	MONTECCHIO EMILIA	PARMA - REGGIO	110	0	SSW	16	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,5
90410	CAVRIAGO-REGGIO EMILIA	PARMA - REGGIO	105	20	SSW	16	0	250000	REVERSE	300,000-700,000	ALLUVIAL DEP.	0	6,6
90414	CAVRIAGO-REGGIO EMILIA	PARMA - REGGIO	125	20	SSW	18	0	250000	REVERSE	300,000-700,000	ALLUVIAL DEP.	0	6,6
90415	S.PANCRAZIO PARMENSE	PIACENZA - PARMA	130		SW	12	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,6
90416	PARMA-REGGIO	PIACENZA - PARMA	135		SSW	11	0	250000	REVERSE	LATE PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	0
90500	TRAVERSETOLO	APPENNINIC FOOTHILL	95	45	SSW	10	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,2
90501	MEDESANO	APPENNINIC FOOTHILLS	140	55	SSW	18	2,5	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,5
90503	MONTE BOSSO	APPENNINIC FOOTHILL	85	45	SSW	20	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,6
90500	TRAVERSETOLO	APPENNINIC FOOTHILL	95	45	SSW	10	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	6,2
90516	PARMA-REGGIO	APPENNINIC FOOTHILL	100	0	S	5	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE	ALLUVIAL DEP.	0	5,9
90580	CASTELMOZZANO-M.VITELLO	APPENNINIC FOOTHILL	110		S	19	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE		0	6,6
90586	QUATTRO CASTELLA-REGGIO EMILIA	APPENNINIC FOOTHILL	100		SSW	20		250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	EVAPORITES	0	6,6
90700	CASTELNUOVO	CASTELNUOVO	100	0	SSW	15	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE		0	
90900	NOVELLARA-REGGIO EMILIA	MODENA ARC	40	0	SE	15	0	250000	REVERSE	HISTORICAL, MIN. 3000	ALLUVIAL DEP.	0	5,4
93723	S.POLO D'ENZA-REGGIO EMILIA	APPENNINIC FOOTHILL	75		S	14		250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	EVAPORITES	0	6,4
93724	VEZZANO SUL CROSTOLO-REGGIO EMILIA	APPENNINIC FOOTHILL	105		SW	10		250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	EVAPORITES	0	6,2
93731	M. ROSSO	APPENNINIC FOOTHILLS		55	SSW	8	3	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	EVAPORITES	0	6,1
93733	T.PARMA EST	APPENNINIC FOOTHILL	240		NW	2	0	250000	NORMAL	PLEISTOCENE		0	5,4
93737	BEDOGNO	APPENNINIC FOOTHILL	80	55	S	12	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE	EVAPORITES	0	6,3
93740	MONTE CASSIO	APPENNINIC FOOTHILL	135		SW	4	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE		0	5,7
93741	FORNOVO-MONTE CASSIO	APPENNINIC	50		ESE	8	0	250000	NORMAL	EARLY PLEISTOCENE		0	6,1
93742	FIUME TARO	APPENNINIC FOOTHILL	165	40	W	0	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE		0	5,7
93743	TORRENTE CENO	APPENNINIC FOOTHILL	115		NNE	8	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE		0	6,1

Tabella 2 – Elenco principali caratteristiche Faglie Capaci nell'intorno dell'opera

CODICE	ID	SISTEMA	MAX CREDIBLE MAGNITUDE	SURFACE EVIDENCE	TECTONIC ENVIRON.	STIMA RISCHIO FAGL.SUP.	EVIDENCE FOR CAPABILITY
90400	SORAGNA	PIACENZA - PARMA	6,5			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90401	S.SECONDO PARMENSE	PARMA - REGGIO	6,5			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90402	PARMA	PIACENZA - PARMA	6,7			basso	EARTHQUAKE
90403	S.PANCRAZIO PARMENSE	PIACENZA - PARMA	6,6			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90405	S.ILARIO D'ENZA-PARMA	PARMA - REGGIO	6,2			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90406	GAZZARO - PARMA	PARMA - REGGIO	6,3			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90407	PARMA-REGGIO	PARMA - REGGIO	6,7			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90408	MONTECCHIO EMILIA	PARMA - REGGIO	6,5			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90410	CAVRIAGO-REGGIO EMILIA	PARMA - REGGIO	6,6			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90414	CAVRIAGO-REGGIO EMILIA	PARMA - REGGIO	6,6			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90415	S.PANCRAZIO PARMENSE	PIACENZA - PARMA	6,6			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90416	PARMA-REGGIO	PIACENZA - PARMA	0		PLATE BOUNDARY	basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90500	TRAVERSETOLO	APPENNINIC FOOTHILL	6,2			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90501	MEDESANO	APPENNINIC FOOTHILLS	6,5			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90503	MONTE BOSSO	APPENNINIC FOOTHILL	6,6			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90500	TRAVERSETOLO	APPENNINIC FOOTHILL	6,2			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90516	PARMA-REGGIO	APPENNINIC FOOTHILL	5,9			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90580	CASTELMOZZANO-M.VITELLO	APPENNINIC FOOTHILL	6,6			basso	
90586	QUATTRO CASTELLA-REGGIO EMILIA	APPENNINIC FOOTHILL	6,6			basso	
90700	CASTELNUOVO	CASTELNUOVO			PLATE BOUNDARY	basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90900	NOVELLARA-REGGIO EMILIA	MODENA ARC	5,4	SUBMARINE			
93723	S.POLO D'ENZA-REGGIO EMILIA	APPENNINIC FOOTHILL	6,4			basso	
93724	VEZZANO SUL CROSTOLO-REGGIO EMILIA	APPENNINIC FOOTHILL	6,2			basso	
93731	M. ROSSO	APPENNINIC FOOTHILL	6,1			basso	
93733	T.PARMA EST	APPENNINIC FOOTHILL	5,4			medio	
93737	BEDOGNO	APPENNINIC FOOTHILL	6,3			basso	
93740	MONTE CASSIO	APPENNINIC FOOTHILL	5,7			basso	
93741	FORNOVO-MONTE CASSIO	APPENNINIC	6,1			medio	
93742	FIUME TARO	APPENNINIC FOOTHILL	5,7			basso	
93743	TORRENTE CENO	APPENNINIC FOOTHILL	6,1			basso	

Tabella 3 - Elenco principali caratteristiche delle Faglie Capaci nell'intorno dell'opera e stima rischio Fagliazione superficiale

La Tabella 2 e la Tabella 3 riportano i dati salienti delle faglie capaci individuate nell'intorno dell'area interessata dall'opera a progetto.

L'esame delle "faglie capaci" esaminate per l'area in esame per l'opera a progetto ha evidenziato infatti che su 30 faglie "capaci" esaminate solo una ha prodotto la rottura della superficie topografica.



L'analisi di dettaglio di ogni singola faglia esaminata, sulla scorta di quanto definito dalle "Linee Guida" INGV ha consentito di concludere che, alla luce dei dati attualmente disponibili, la posizione dell'opera a progetto esclude un interessamento di fagliazione superficiale. In sintesi l'analisi di fagliazione superficiale condotta, pur essendo una analisi preliminare di primo livello, in base ai dati oggi disponibili esclude il rischio e pertanto non si ritengono necessari approfondimenti di secondo livello.

Le immagini riportano il dettaglio di ubicazione della singola faglia, in allegato sono riportati le schede di dettaglio di ogni singola faglia (Bancadati ITHACA – CATALOGO DELLE FAGLIE CAPACI).

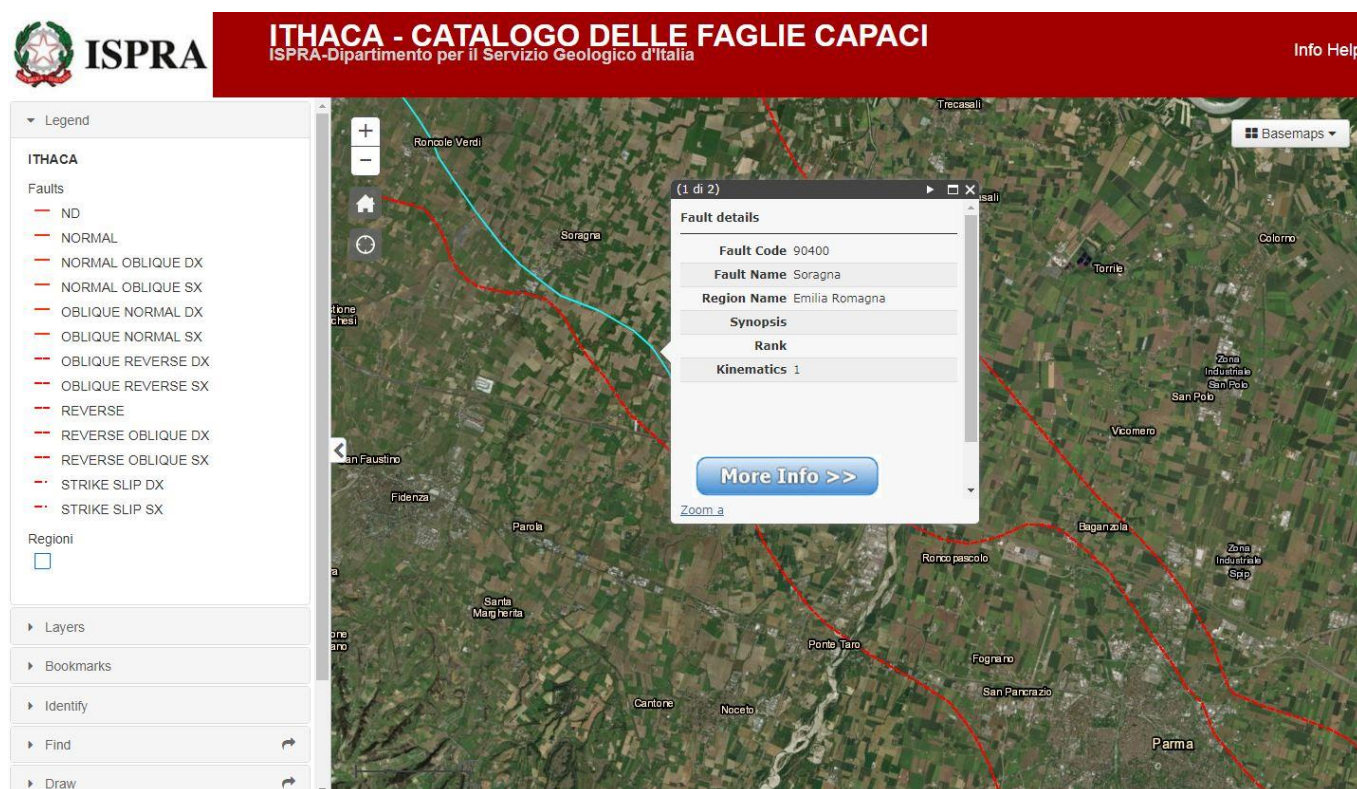


Figura 75 - Faglia Capace 90400





Figura 76 - Faglia Capace 90401

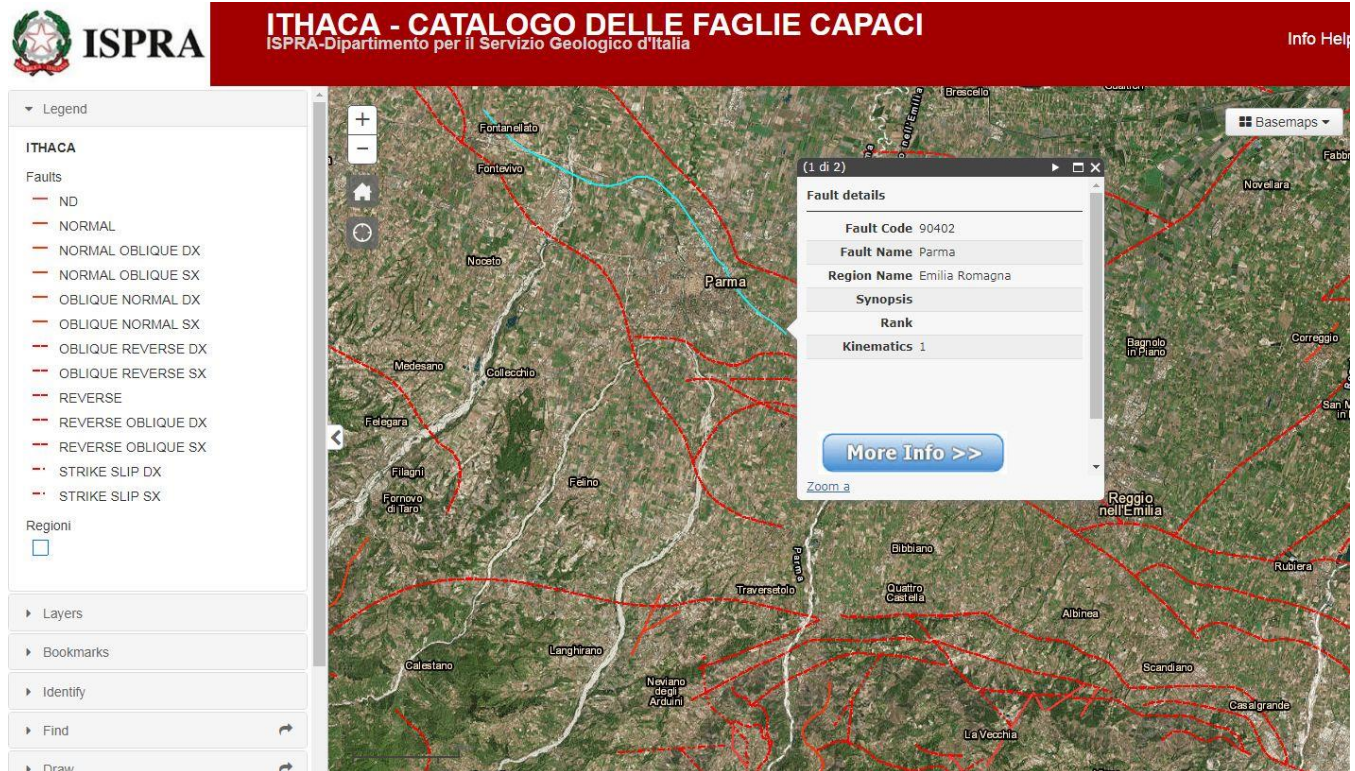


Figura 77 - Faglia Capace 90402



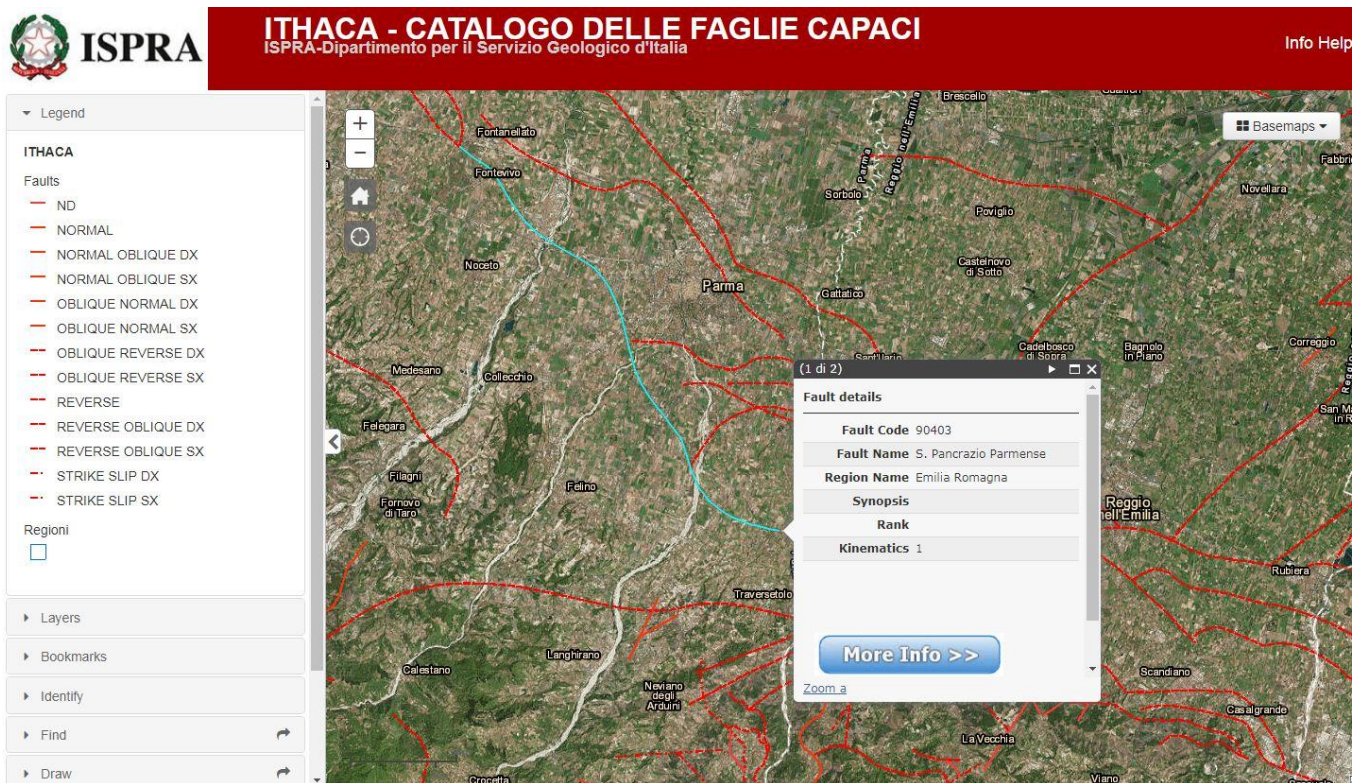


Figura 78 - Faglia Capace 90403



Figura 79 - Faglia Capace 90405





Figura 80 - Faglia Capace 90406



Figura 81 - Faglia Capace 90407



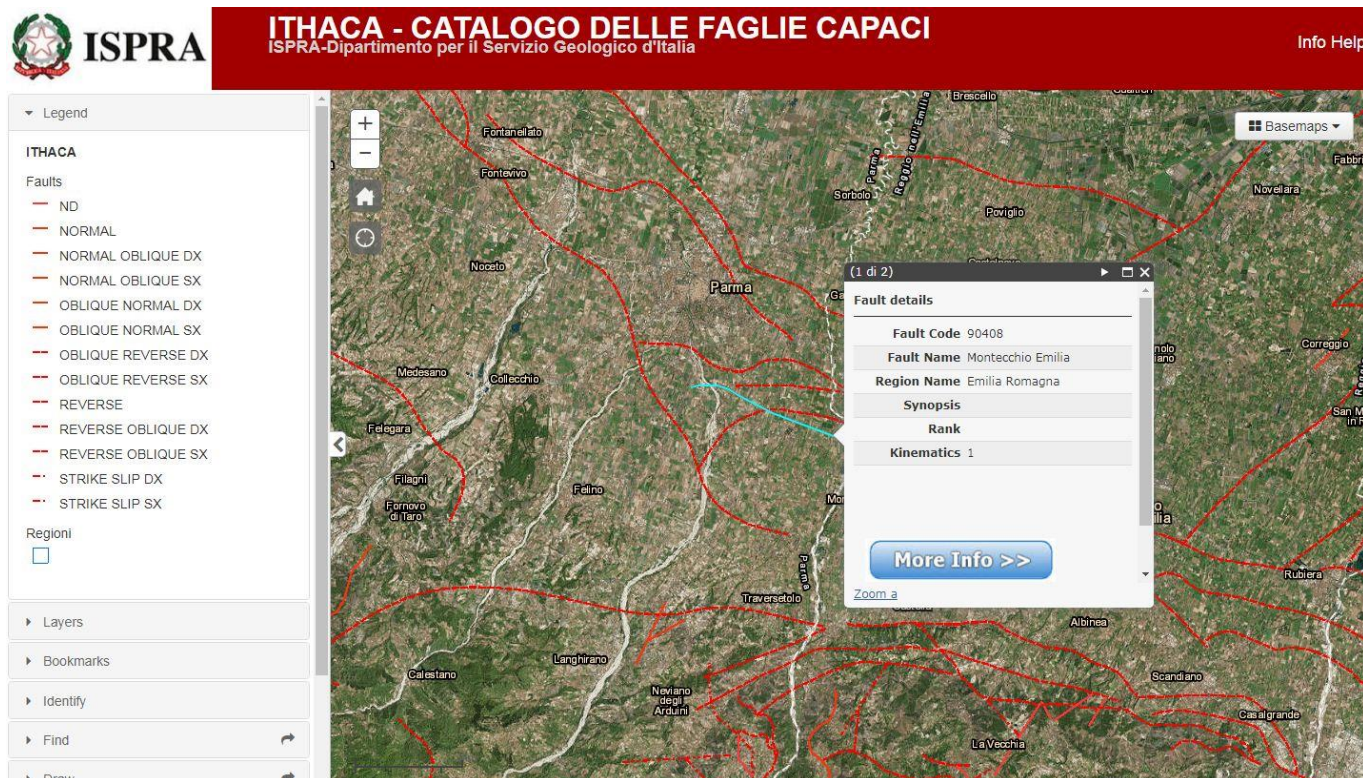


Figura 82 - Faglia Capace 90408



Figura 83 - Faglia Capace 90410



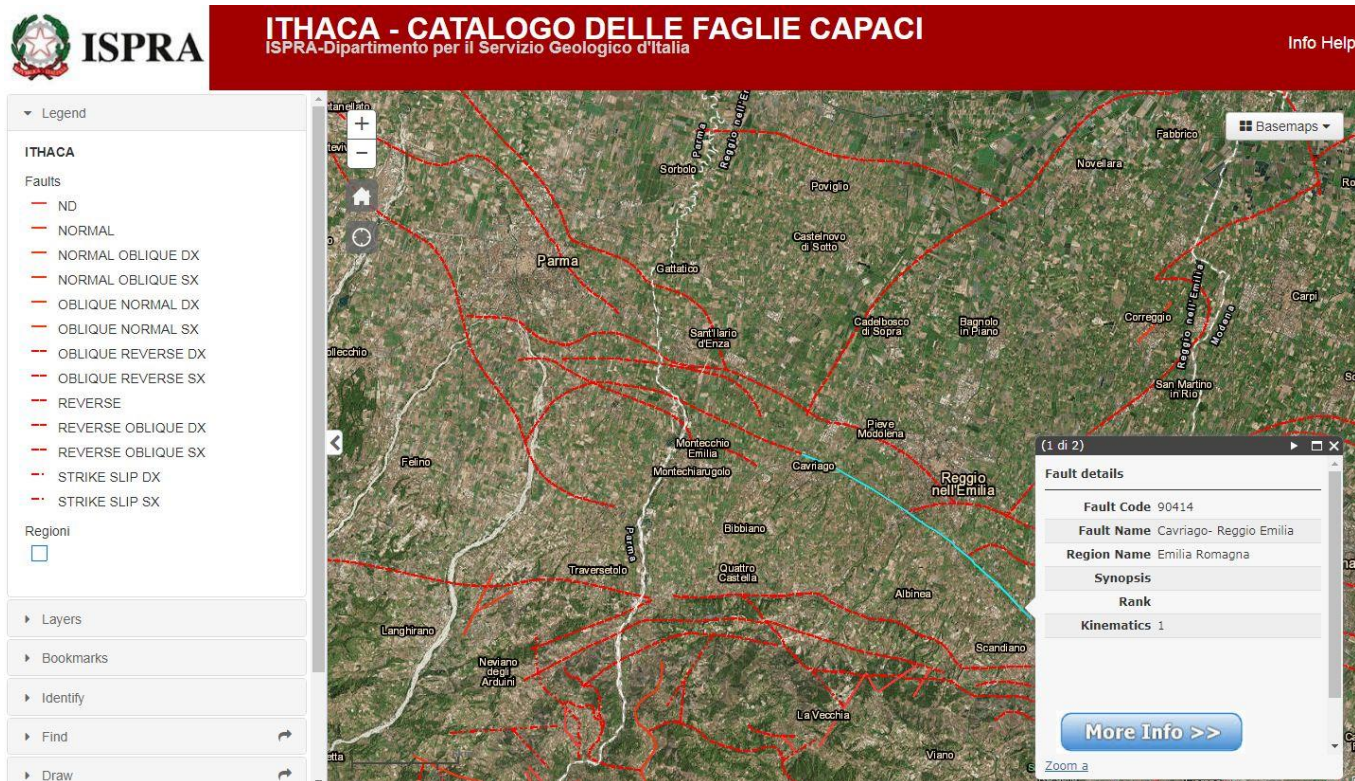


Figura 84 - Faglia Capace 90414

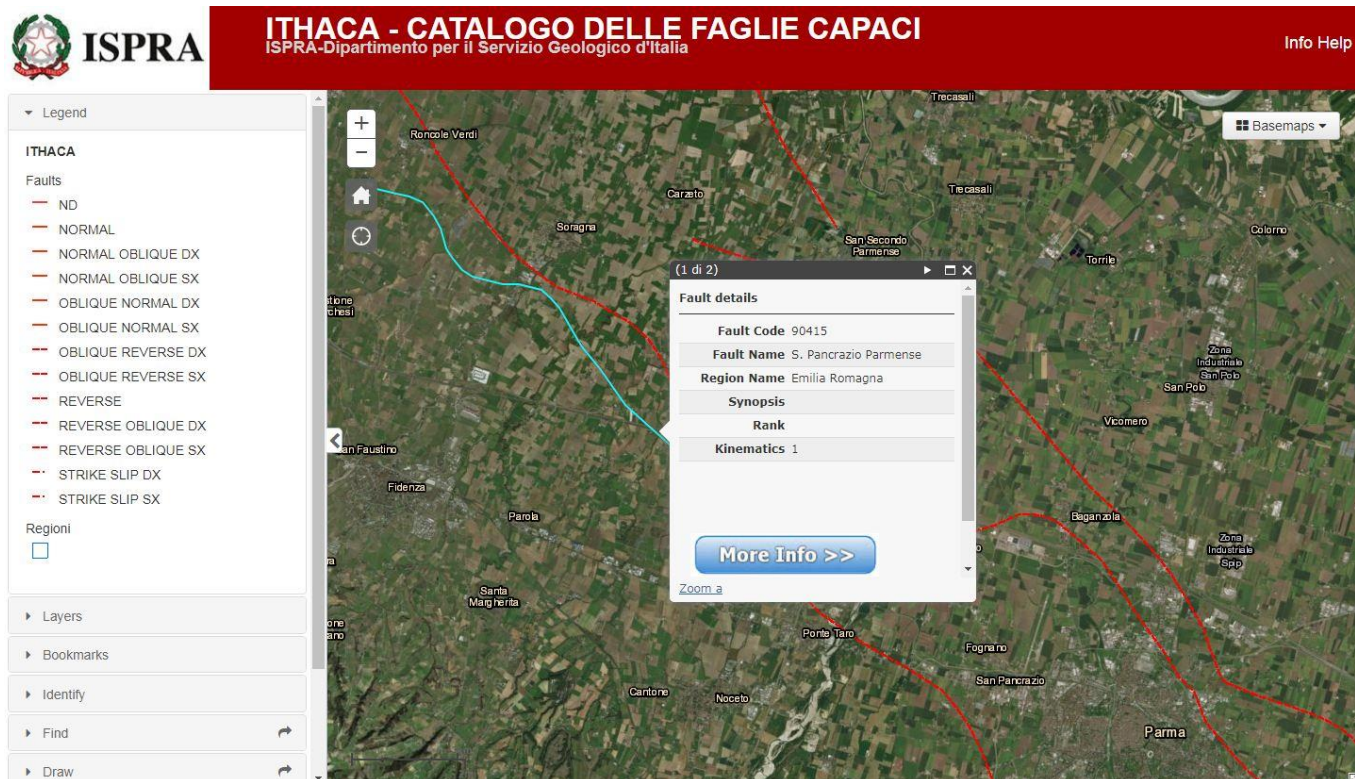


Figura 85 - Faglia Capace 90415



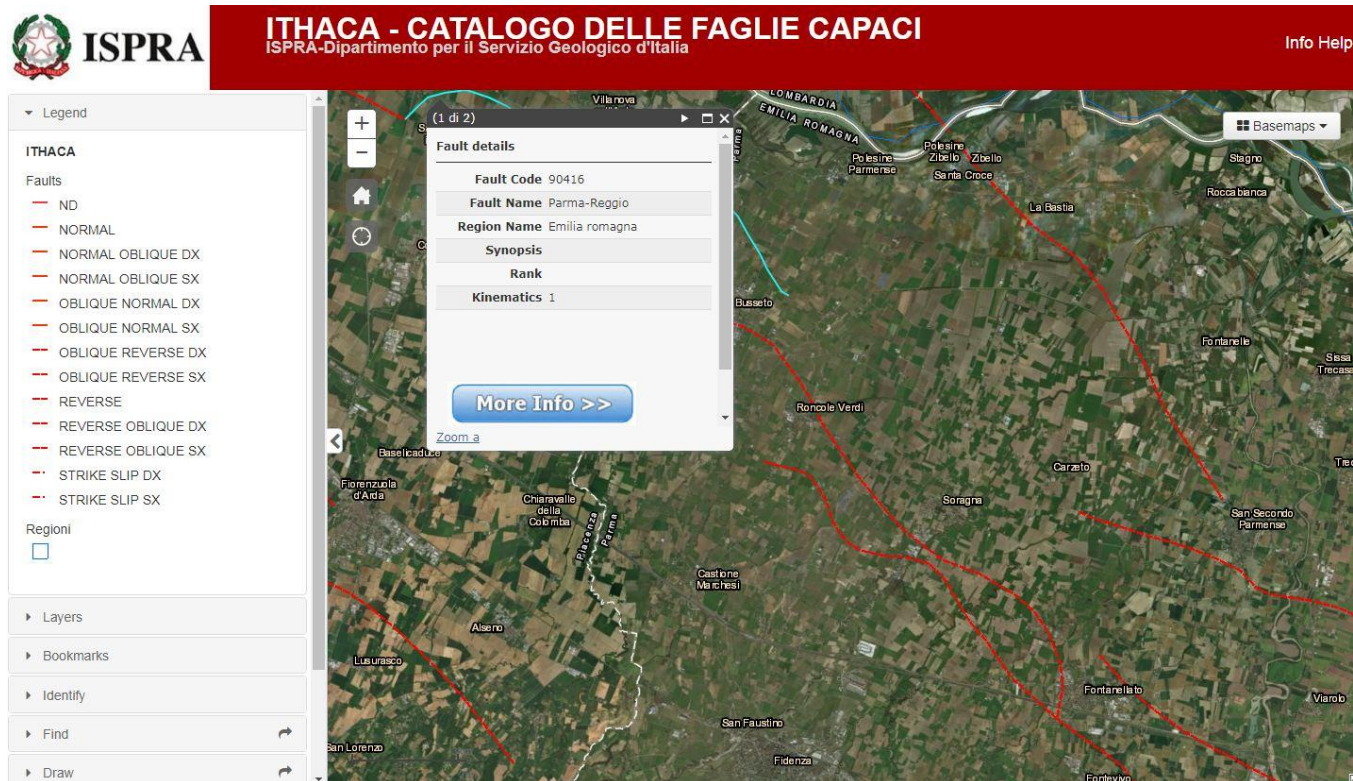


Figura 86 – Faglia Capace 90416



Figura 87 - Faglia Capace 90500



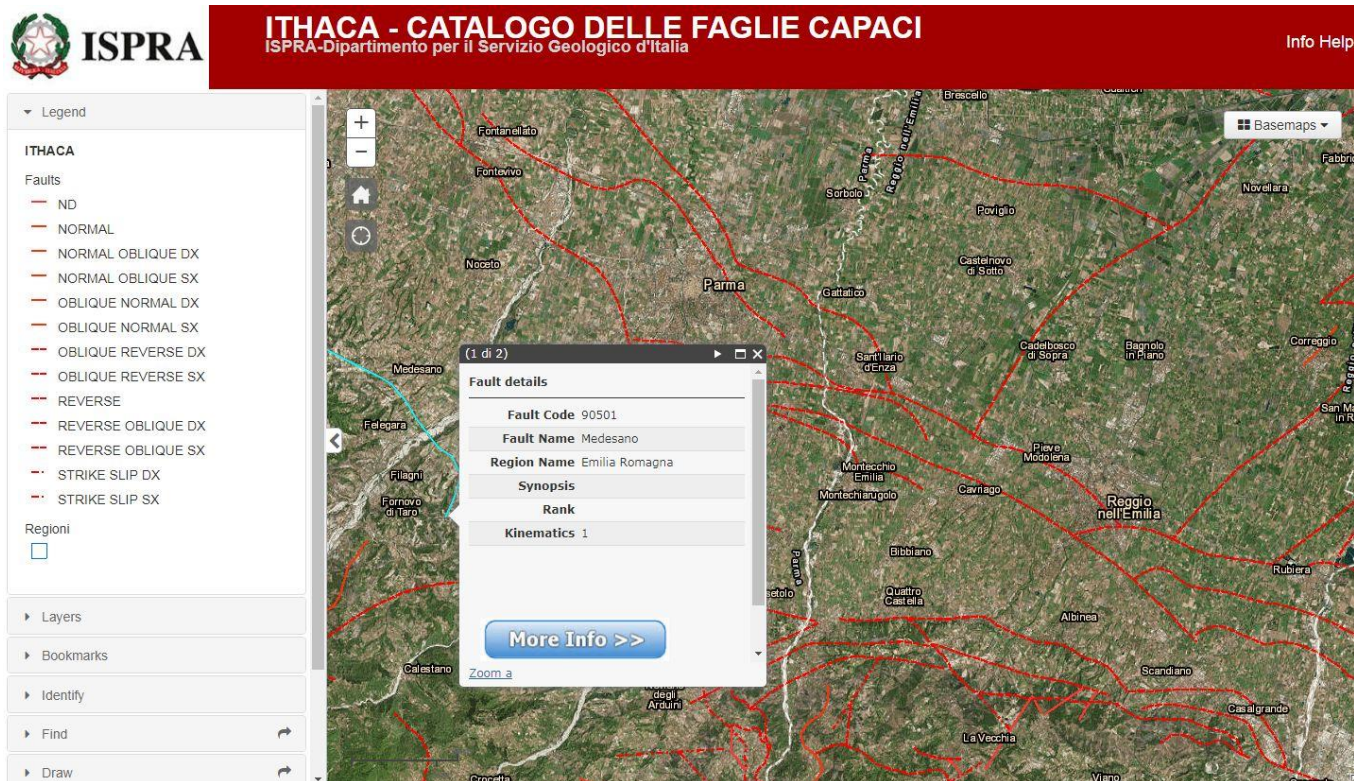


Figura 88 - Faglia Capace 90501

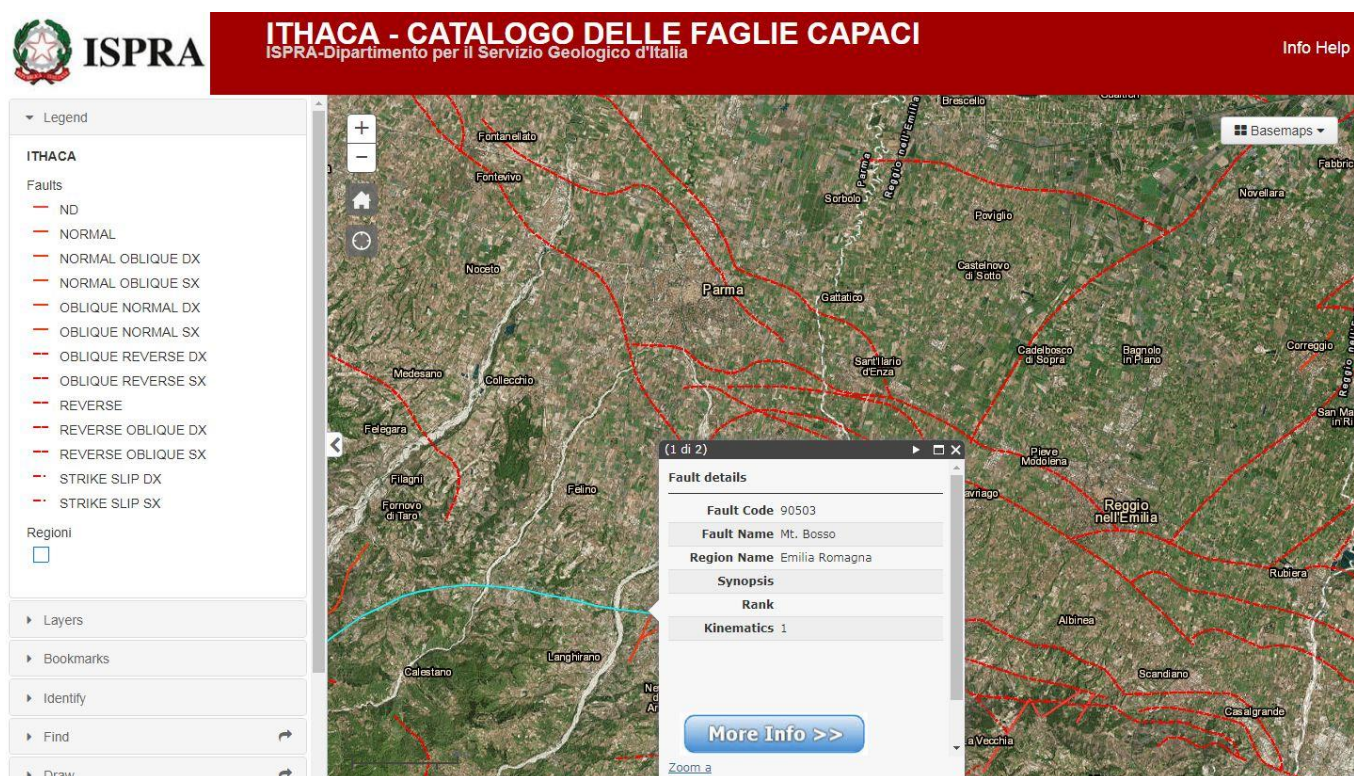


Figura 89 - Faglia Capace 90503



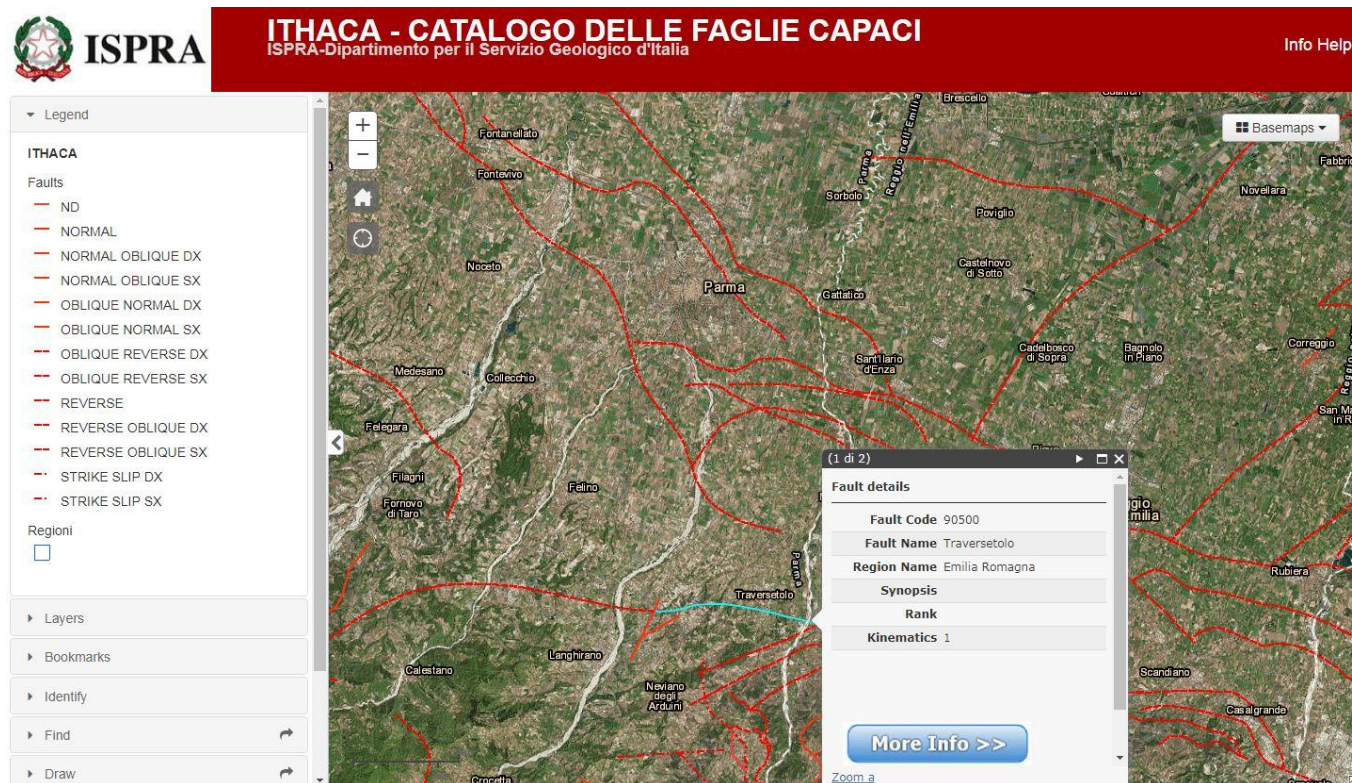


Figura 90 - Faglia Capace 90510

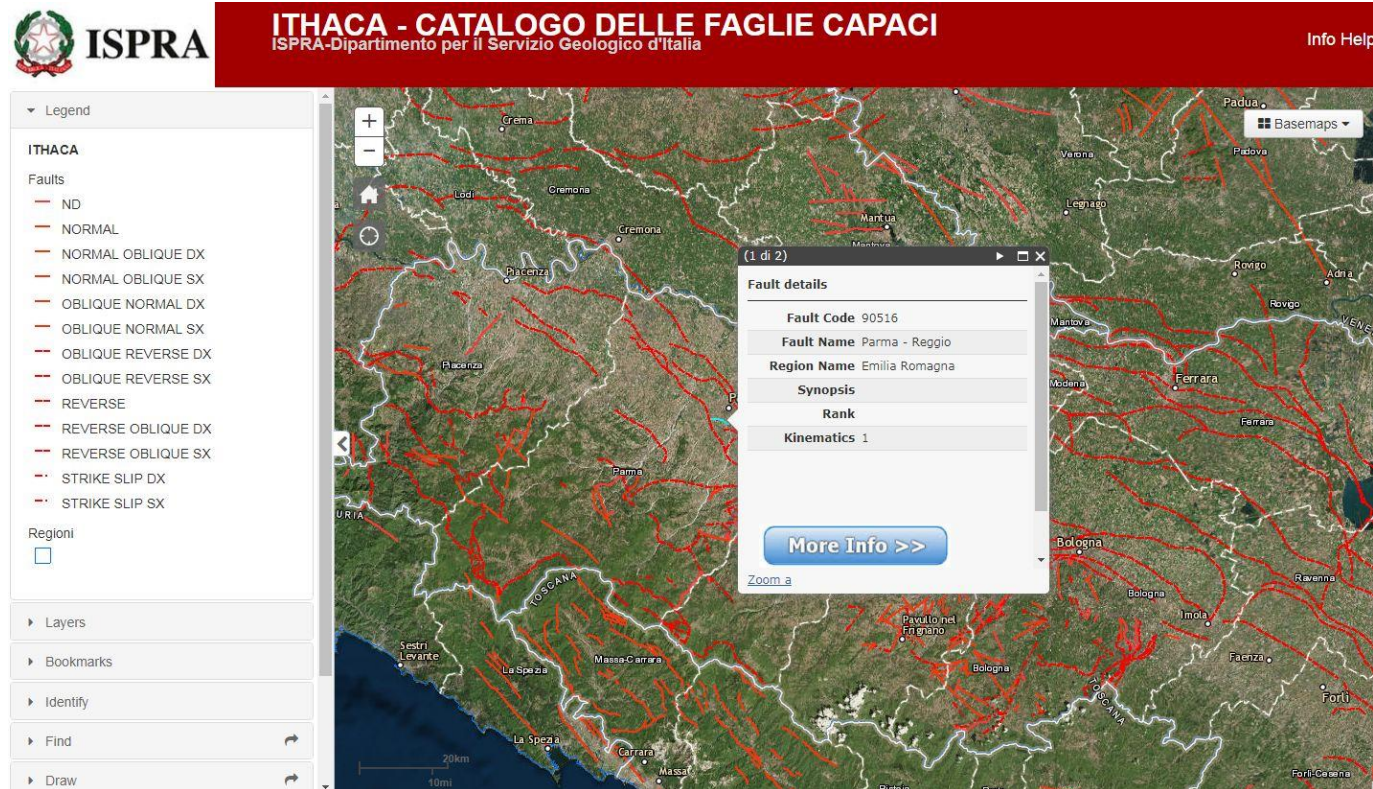


Figura 91 – Faglia Capace 90516



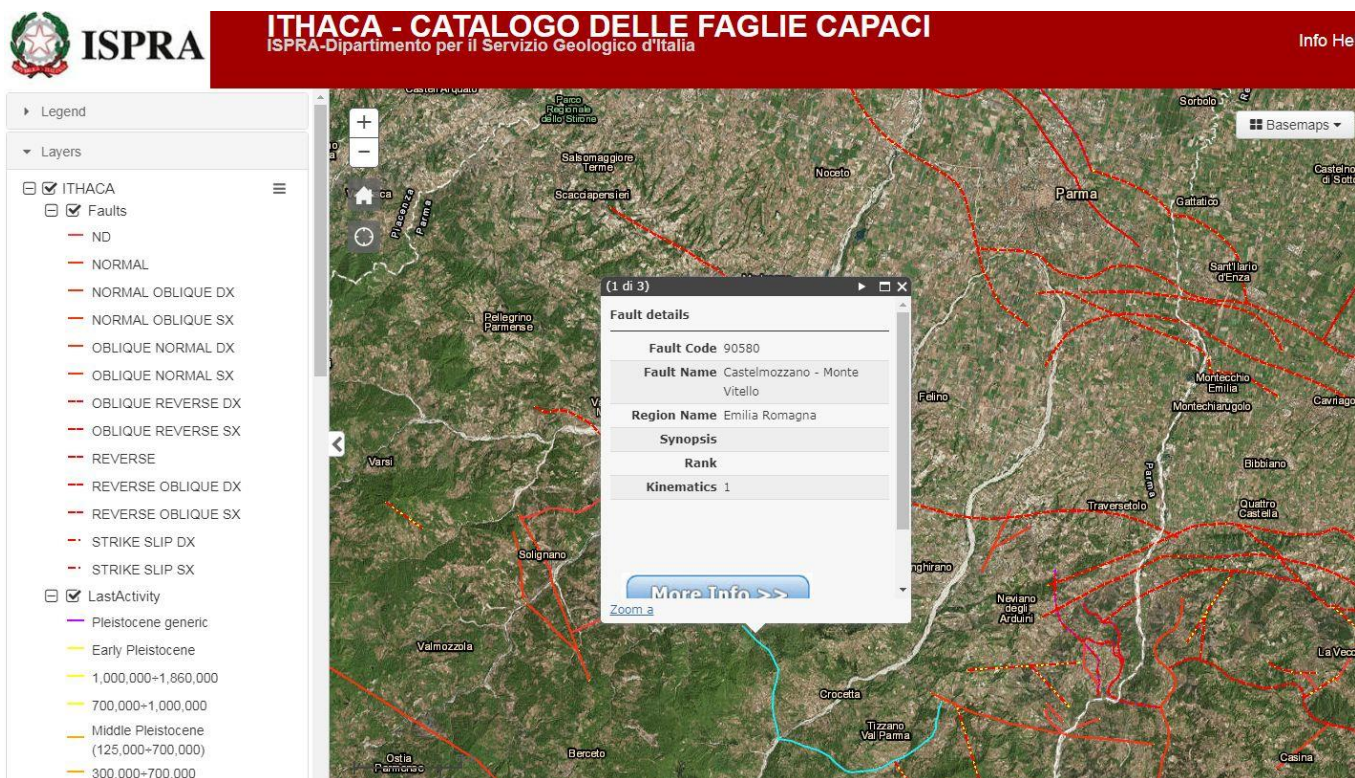


Figura 92 - Faglia Capace 90580

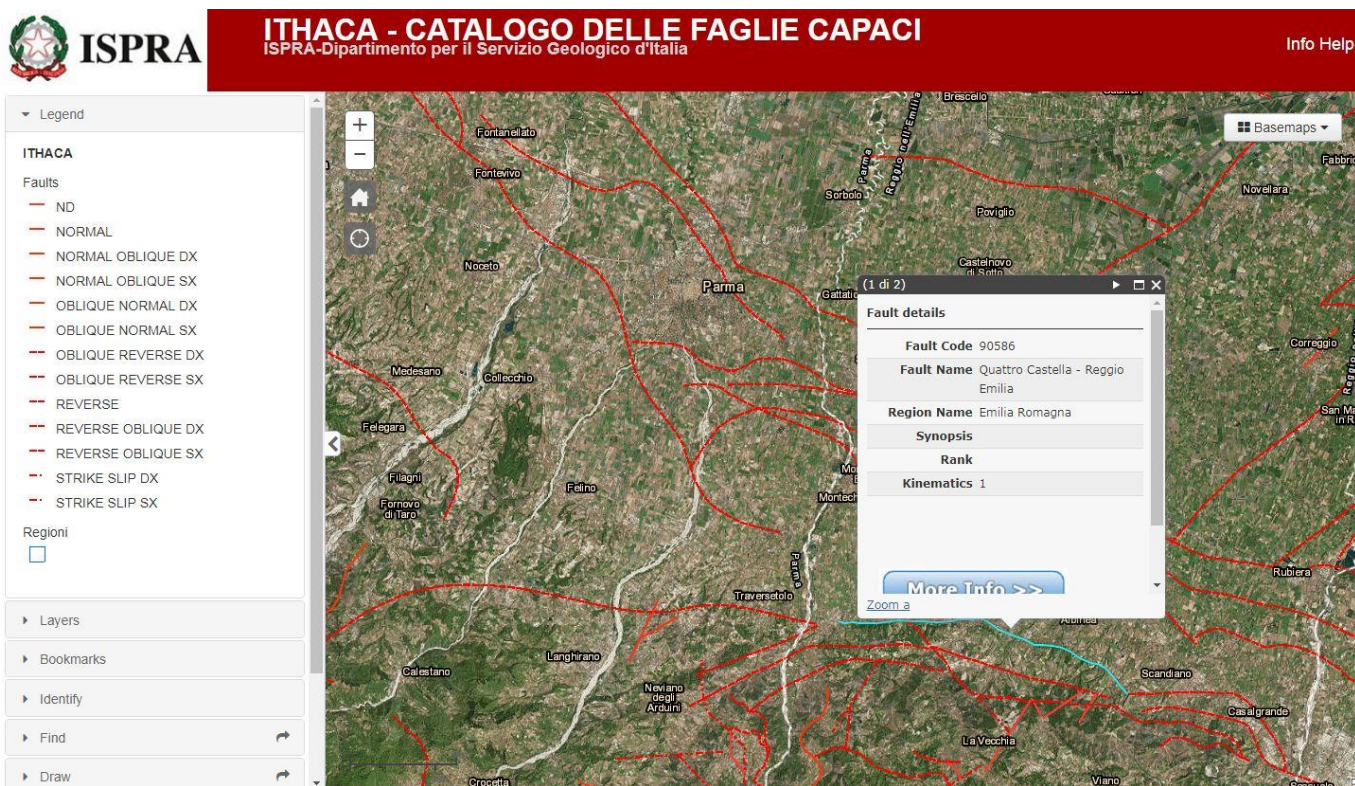


Figura 93 - Faglia Capace 90586



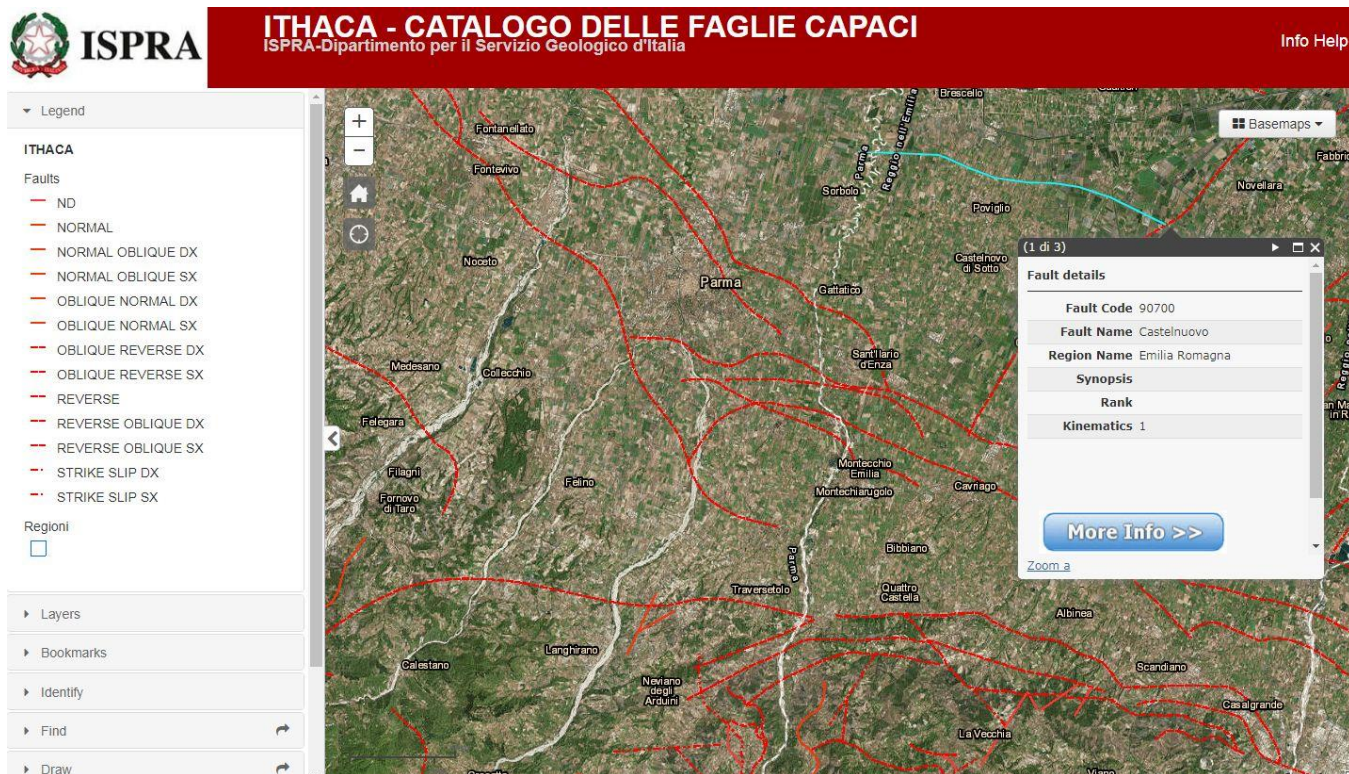


Figura 94 - Faglia Capace 90700

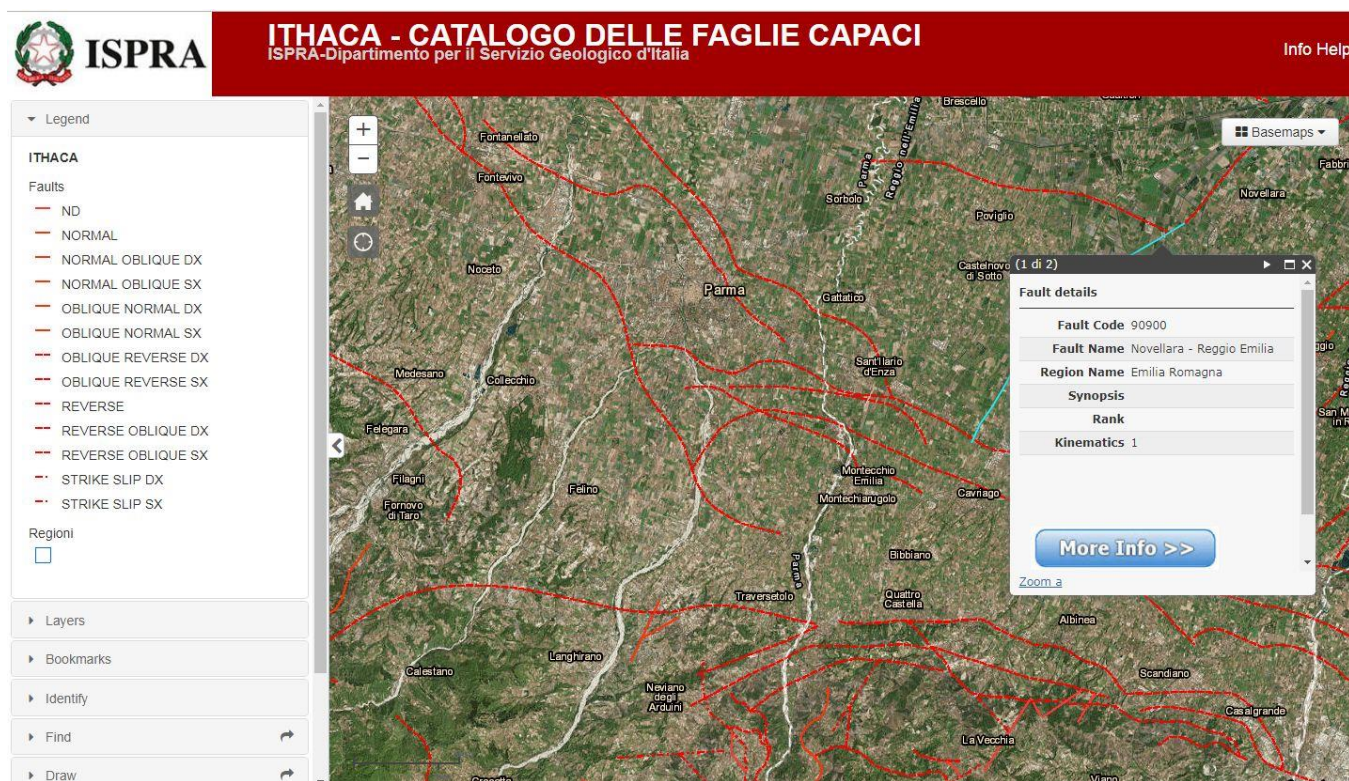


Figura 95 - Faglia Capace 90900



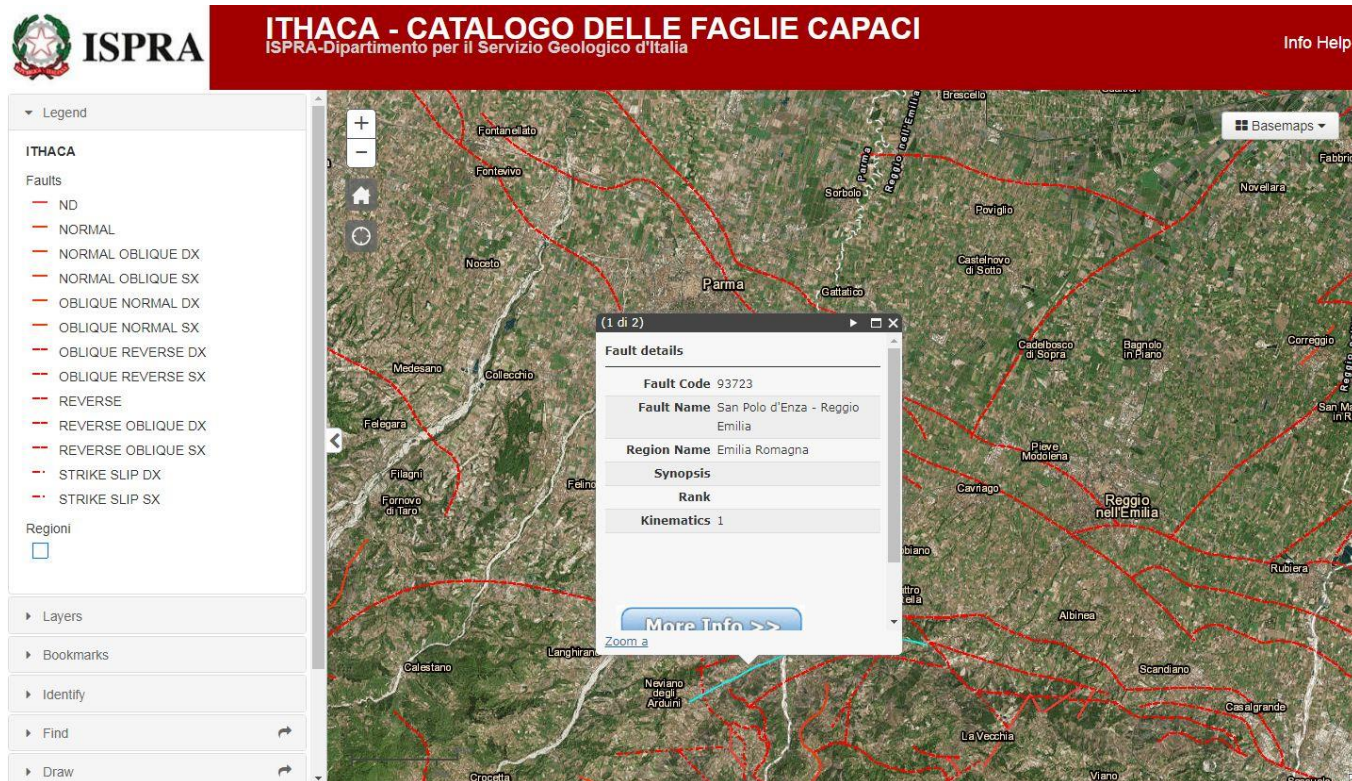


Figura 96 - Faglia Capace 93723

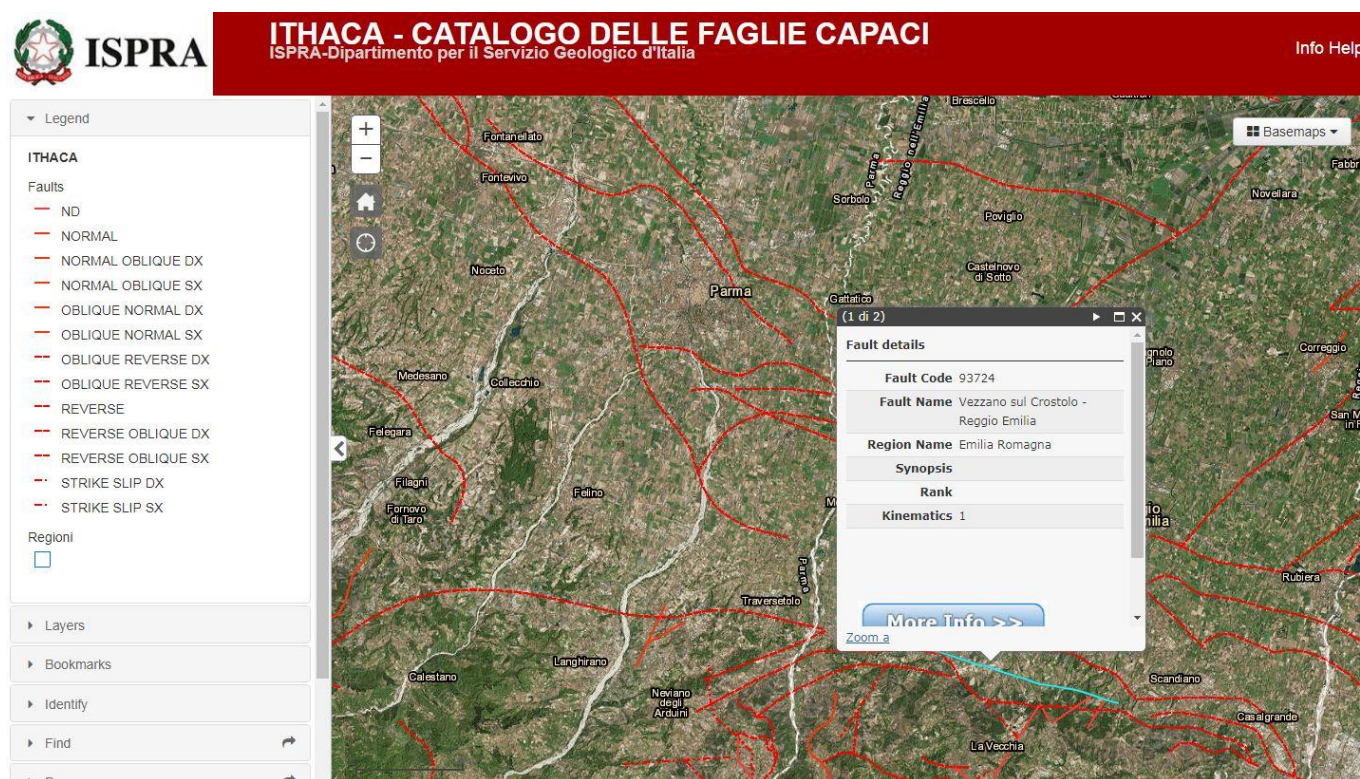


Figura 97 - Faglia Capace 93724



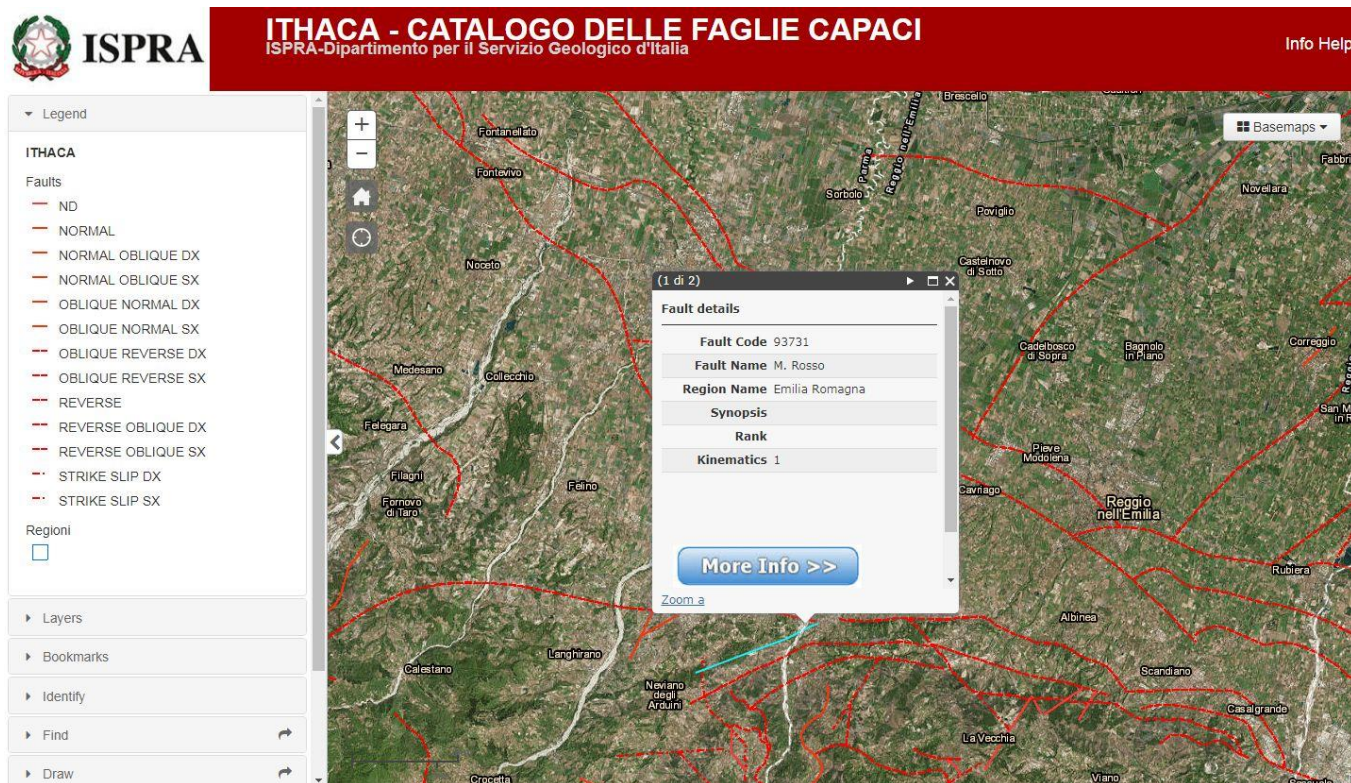


Figura 98 - Faglia Capace 93731

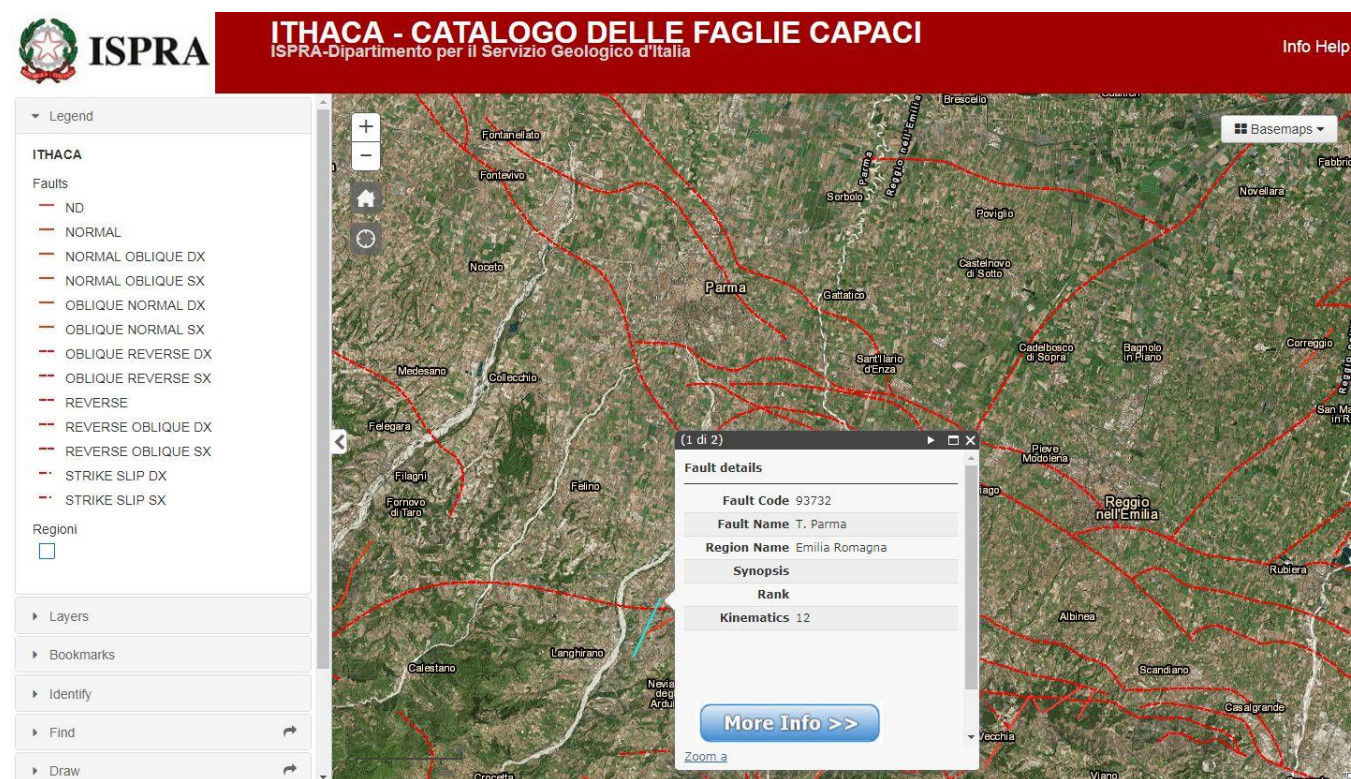


Figura 99 - Faglia Capace 93732



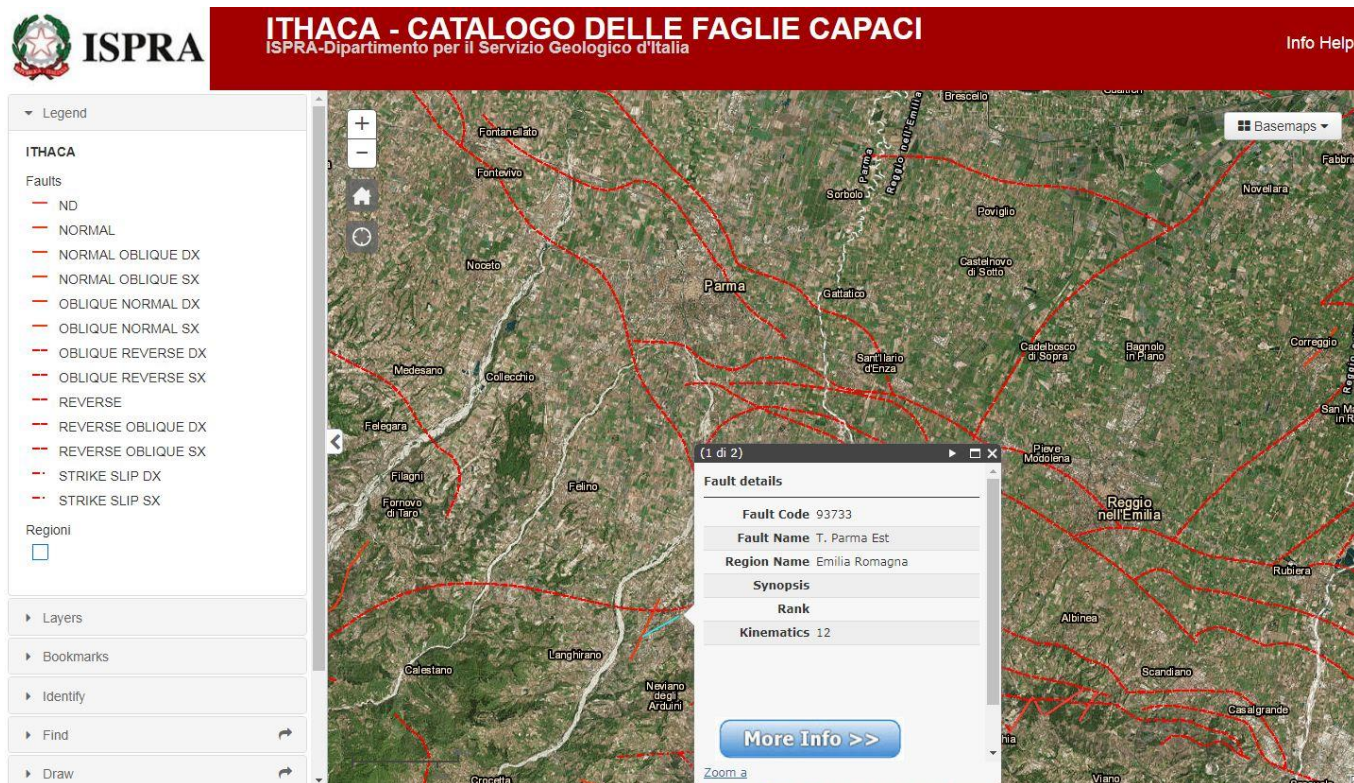


Figura 100 - Faglia Capace 93733

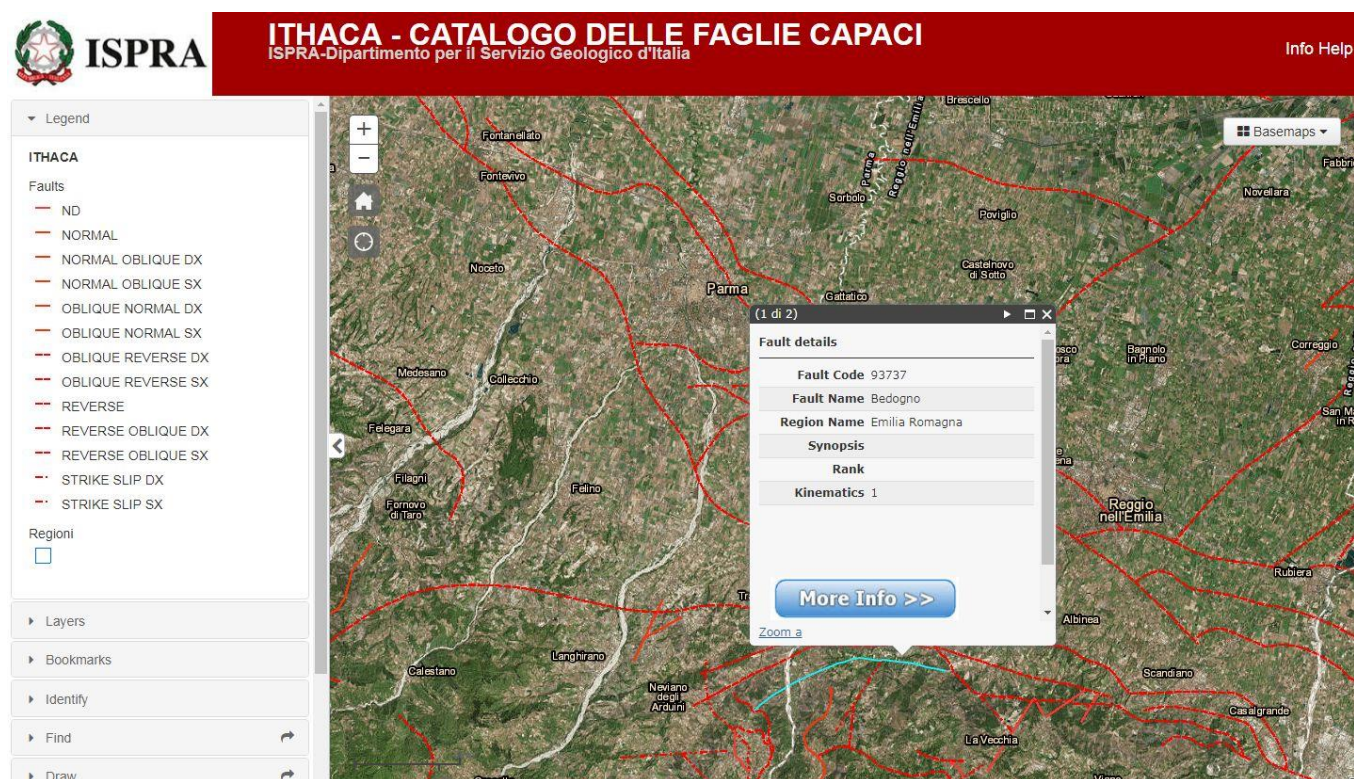


Figura 101 - Faglia Capace 93737



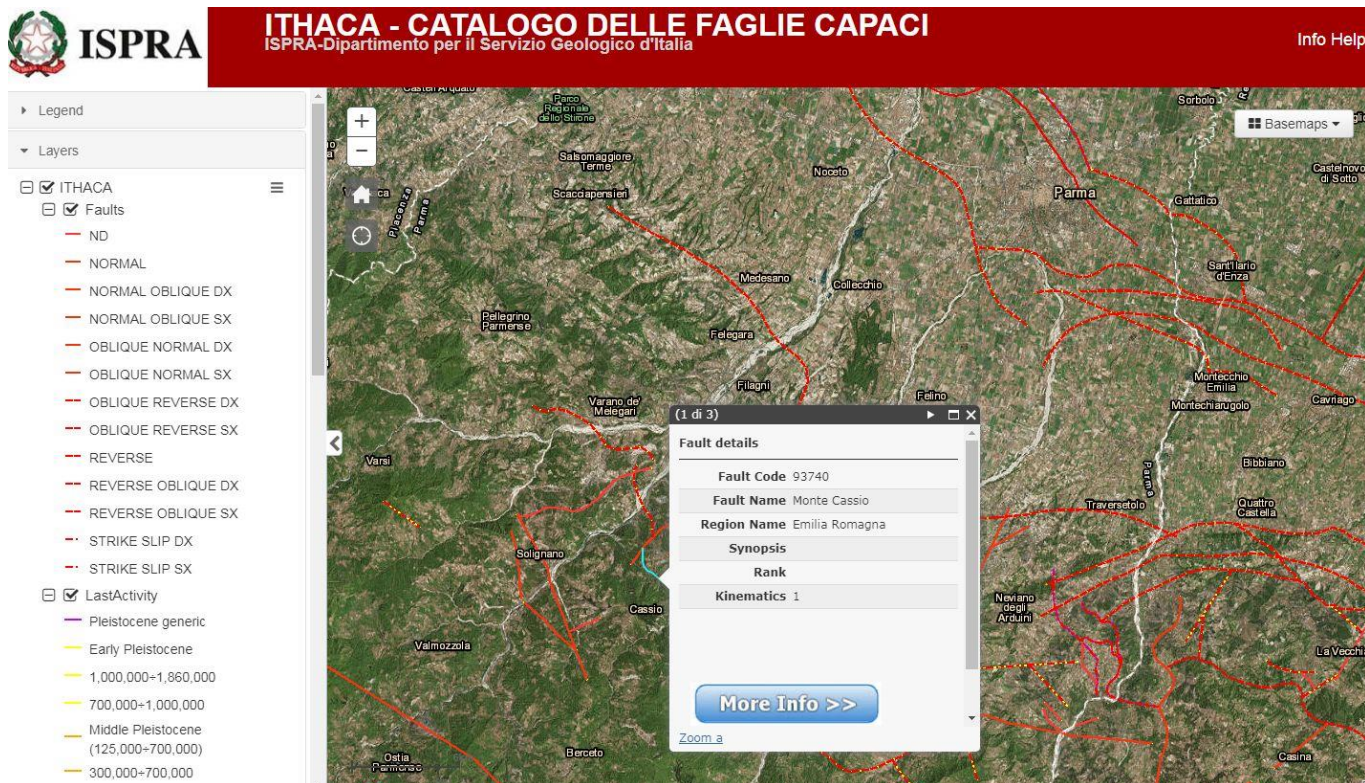


Figura 102 - Faglia Capace 93740

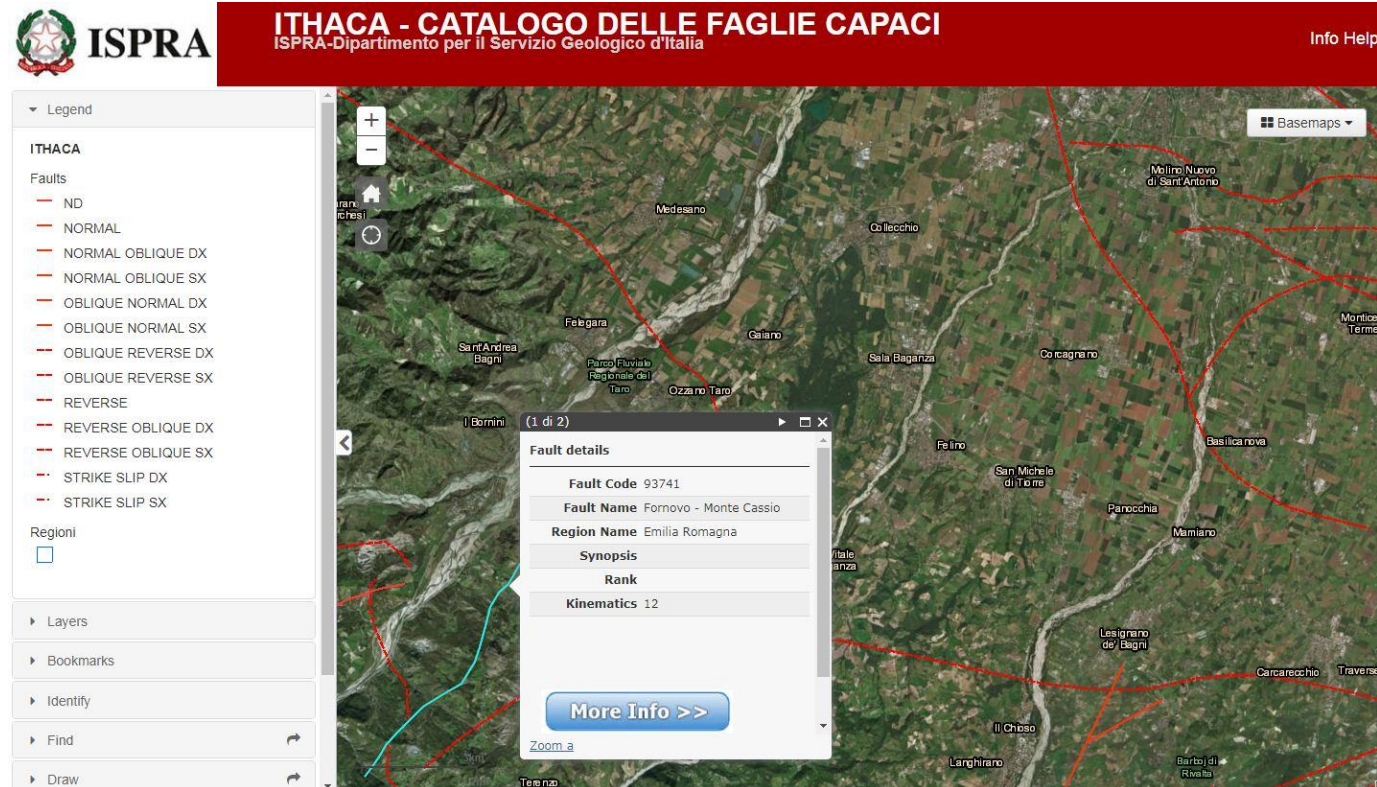


Figura 103 - Faglia Capace 93741



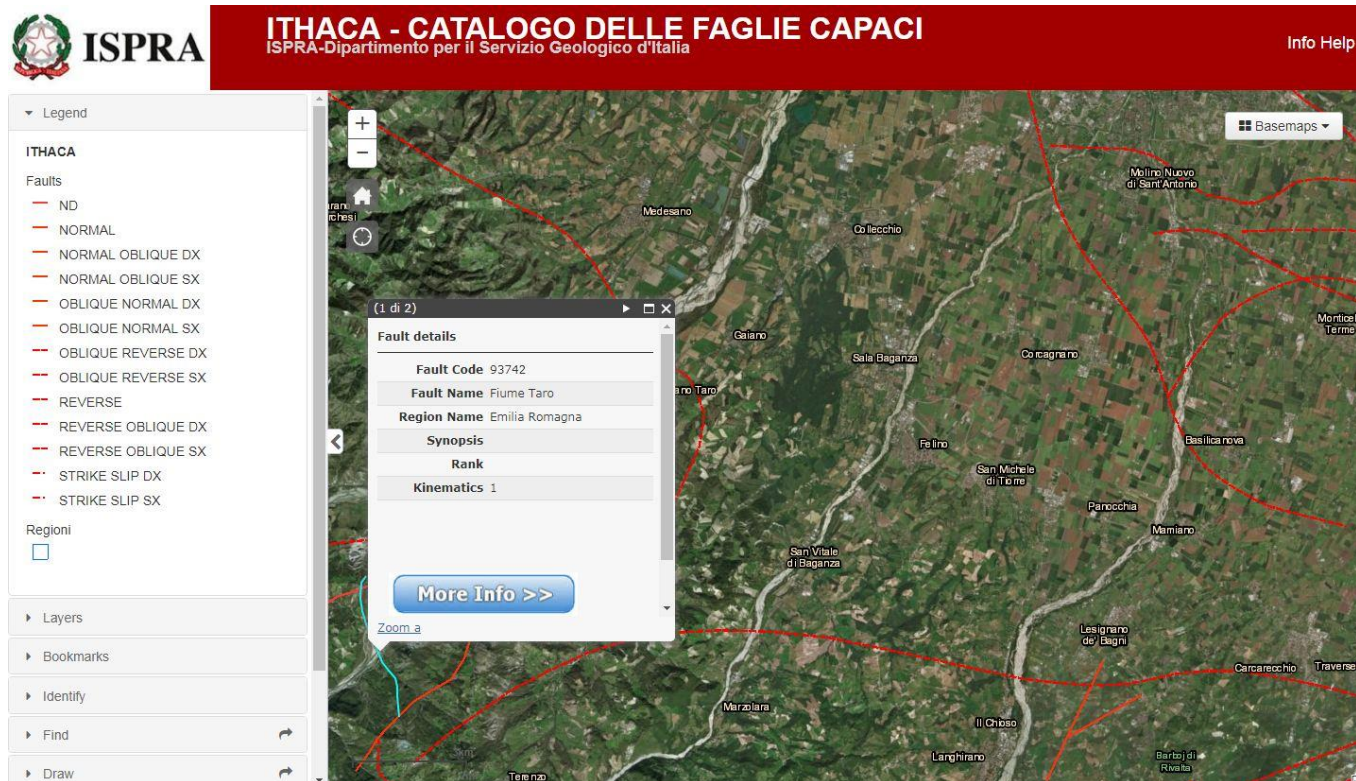


Figura 104 - Faglia Capace 93742

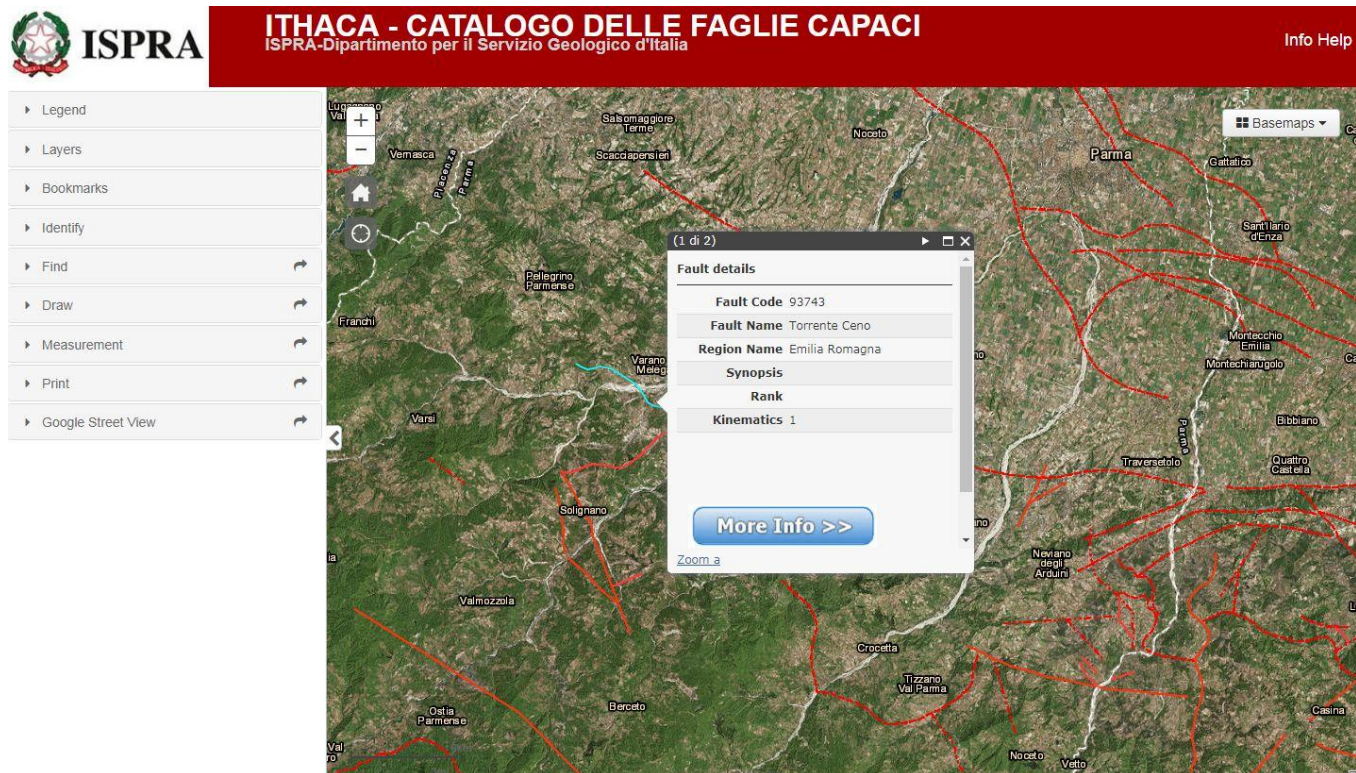


Figura 105 - Faglia Capace 93743



## 4 ANALISI DELLA PERICOLOSITA' SISMICA: SCUOTIMENTO ATTESO

### 4.1 SITUAZIONE NORMATIVA E CATEGORIA DI SUOLO

I valori di pericolosità sismica di riferimento per il sito in esame, riportati in dettaglio nelle figure successive, sono caratterizzati da valori di PGA nella classe 0.15-0.175

Il punto di griglia più vicino all'impianto di Cassa Baganza è indicato in Figura.

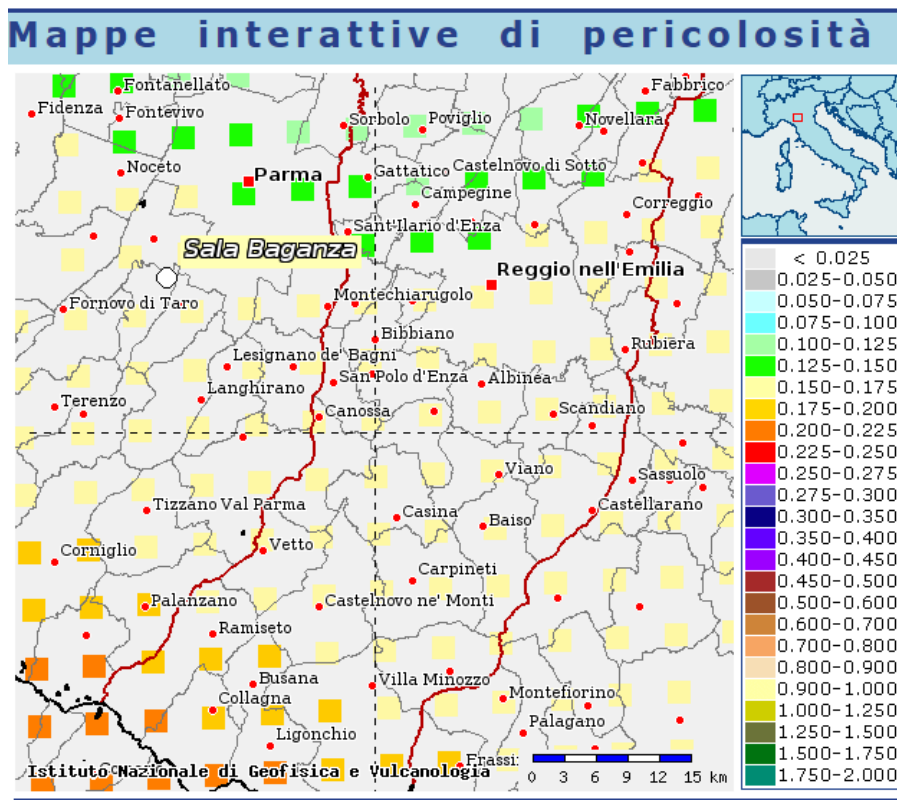


Figura 106 - Dettaglio dei valori di pericolosità di riferimento (PGA al 10% di eccedenza in 50 anni) della normativa in vigore (MPS04), sui punti della griglia di calcolo.

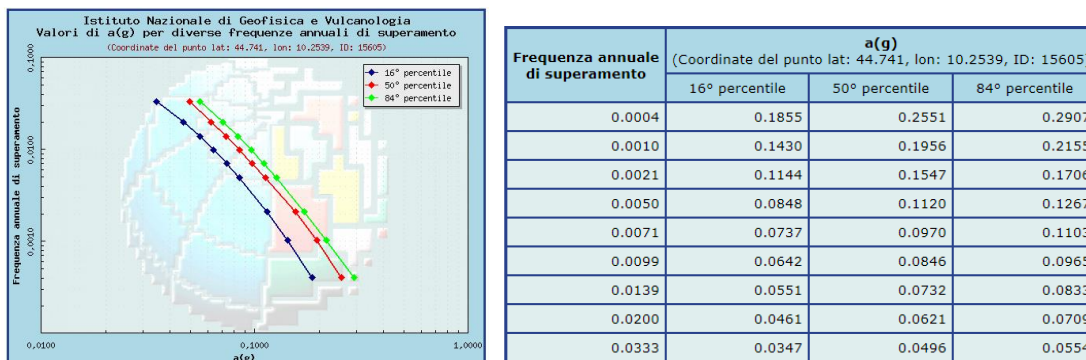


Figura 107 - Grafico e tabella di pericolosità (MPS04) in PGA, sul nodo di griglia più vicino; fonte dati <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>. La frequenza annuale di superamento di 0.0021 corrisponde al valore di riferimento di 10% in 50 anni.

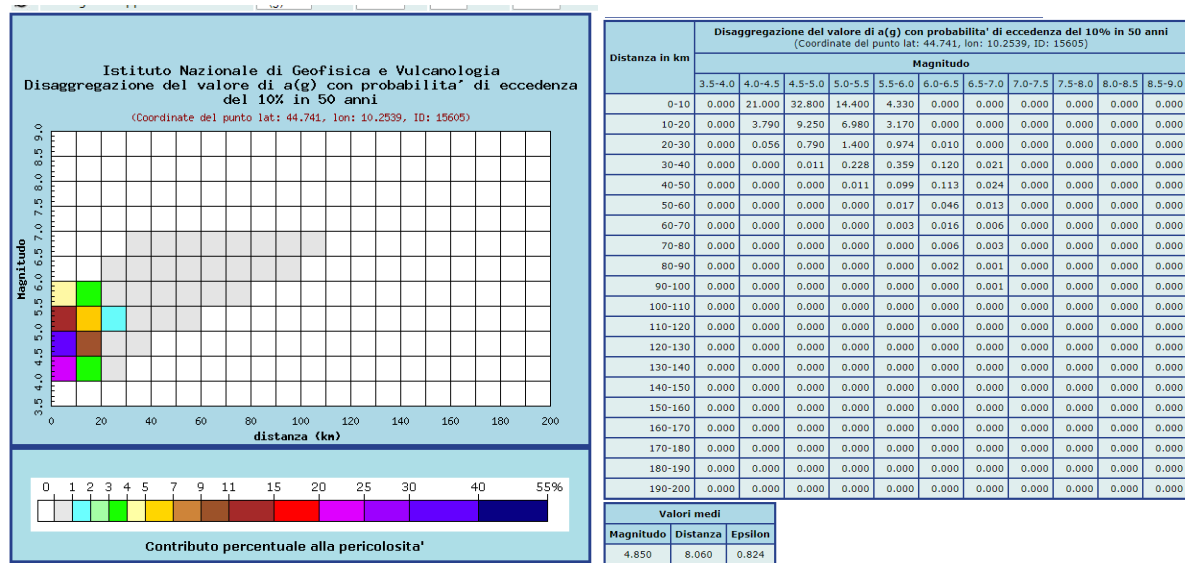


Figura 108 - Grafico e tabella di disaggregazione della pericolosit  (MPS04) sul nodo di griglia pi  vicino relativo al valore di riferimento del 10% in 50 anni; fonte dati <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>.

Con riferimento alla Nuova Normativa Dighe (DM 2014), il periodo di riferimento,  $V_R$ , per l'azione sismica   definito in funzione della vita nominale,  $V_N$ , e del coefficiente d'uso,  $C_U$ , dalla relazione:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

dove:

$$V_N = 100 \text{ anni,}$$

$$\text{Classe d'uso III } (C_U=1.5)$$

da cui:

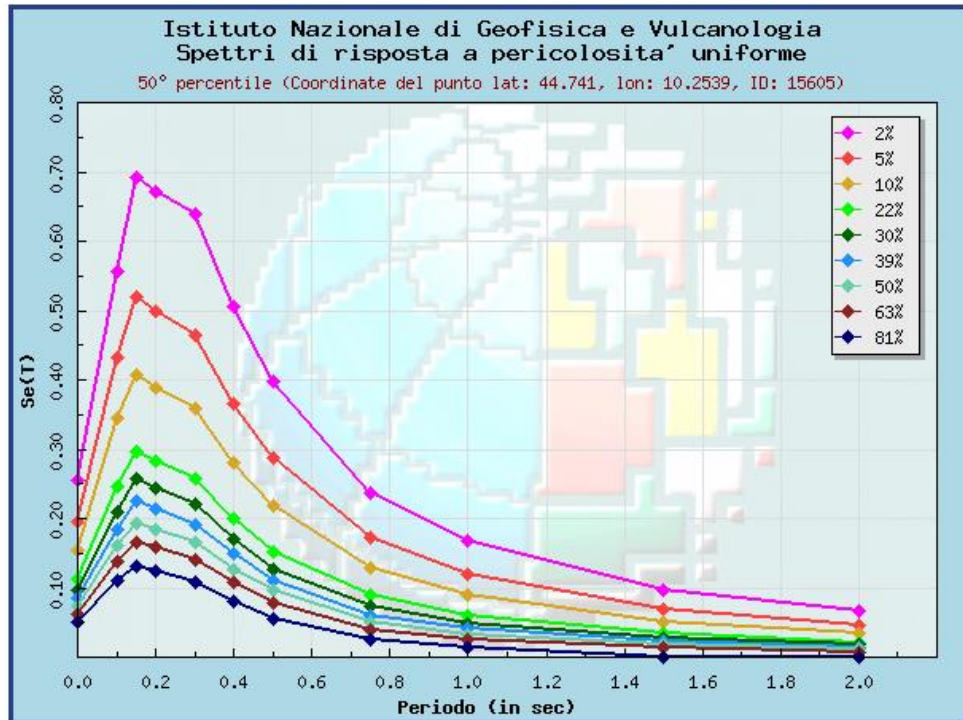
$$V_R = 150 \text{ anni}$$

Pertanto, le soglie di probabilit  di eccedenza  $P_{VR}$  definite nelle NTC08 fanno riferimento ai periodi di ritorno ( $T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR})$ ) dell'azione sismica agente per ciascuno degli stati limite prefissati, come in Tabella. con  $P_{VR50}$  viene indicata la soglia di probabilit  di eccedenza equivalente ai  $T_R$  nel caso in cui il periodo di osservazione sia predefinito a 50 anni.

Stati limite	SLO Operativit�	SLD Danno	SLV Salvaguardia della Vita	SLC Prevenzione del Collasso
$P_{VR}$ (%)	81	63	10	5
$T_R$	90	151	1424	2475
$P_{VR50}$ (%)	42	28	3.6	2



In Figura sono riportati gli spettri di normativa per diversi periodi di ritorno. Solo gli spettri al 2% e al 30% di probabilità di eccedenza in 50 anni corrispondono esattamente ai periodi di ritorno di interesse per l'impianto, rispettivamente dello stato limite SLC e SLD.



Prob. di ecc. in 50 anni	Spettri di risposta a pericolosità uniforme 50° percentile (Coordinate del punto lat: 44.741, lon: 10.2539, ID: 15605)										
	Periodo (in sec)										
	0.00	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00
2%	0.2551	0.5556	0.6921	0.6709	0.6386	0.5058	0.3972	0.2369	0.1682	0.0975	0.0659
5%	0.1956	0.4326	0.5196	0.4982	0.4652	0.3652	0.2878	0.1726	0.1206	0.0682	0.0463
10%	0.1547	0.3453	0.4072	0.3891	0.3579	0.2804	0.2175	0.1295	0.0907	0.0509	0.0341
22%	0.1120	0.2467	0.2960	0.2829	0.2566	0.1994	0.1513	0.0892	0.0609	0.0344	0.0218
30%	0.0970	0.2103	0.2565	0.2445	0.2212	0.1708	0.1272	0.0736	0.0490	0.0279	0.0178
39%	0.0846	0.1844	0.2243	0.2149	0.1916	0.1488	0.1106	0.0607	0.0403	0.0228	0.0147
50%	0.0732	0.1613	0.1940	0.1849	0.1652	0.1260	0.0956	0.0496	0.0324	0.0174	0.0107
63%	0.0621	0.1379	0.1654	0.1589	0.1397	0.1073	0.0778	0.0392	0.0254	0.0130	0.0074
81%	0.0496	0.1110	0.1309	0.1234	0.1086	0.0813	0.0562	0.0262	0.0143	0.0000	0.0000

Figura 109 - Spettro a pericolosità uniforme a diversi valori di probabilità di eccedenza in 50 anni, come ottenuto da risultati di pericolosità (MPS04) sul nodo di griglia più vicino; fonte dati <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>.

Per quanto riguarda la categoria di suolo nella zona in esame, le indagini sismiche (MASW e DH) effettuate nel Progetto Definitivo evidenziano velocità VS30 (NTC2008) generalmente comprese fra 500 e 600m/s per cui la categoria di suolo è B.

## 4.2 PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS (PSHA)

Con pericolosità sismica si intende una stima dello scuotimento atteso in una certa area in un certo periodo di tempo. È pertanto una valutazione dell'accadimento di un fenomeno naturale ed è chiaro che in questa valutazione devono essere presi in considerazione tutti i terremoti che possono verificarsi in un intorno rispetto al sito di interesse, tali da provocarvi un risentimento significativo.

La stima della pericolosità sismica si basa su analoghi elementi di input. In primo luogo occorre identificare le sorgenti sismogenetiche che possono produrre scuotimenti al sito, valutarne il rilascio di terremoti, utilizzare una o più relazioni di attenuazione del moto del suolo per determinare lo scuotimento al sito data la magnitudo, la distanza sorgente-sito e il tipo di suolo. In questo tipo di valutazione, sia per la criticità delle applicazioni che ne conseguiranno, sia per le ampie incertezze nella definizione degli elementi di input, grande attenzione deve essere riservata al trattamento delle incertezze (epistemiche ed aleatorie) che possono condurre a risultati molto diversi tra loro. In questo contesto per la stima della pericolosità sismica si seguirà *l'approccio probabilistico (PSHA)*.

Nella Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) le probabilità associate al verificarsi di ogni possibile scenario sismico caratterizzato da una propria magnitudo e distanza vengono combinate al fine di calcolare la pericolosità sismica di un determinato luogo.

L'approccio probabilistico utilizzato in questo studio fa riferimento al *metodo di Cornell* (1938) che tiene conto delle incertezze legate alla localizzazione, magnitudo, processo di accadimento degli eventi sismici, dipendenza dalla distanza e dalle condizioni di sito.

In generale l'analisi si sviluppa nelle seguenti macro-fasi:

1. individuazione delle zone sismogenetiche e dati delle relative sorgenti sismogenetiche (cataloghi)
2. individuazione per ogni zona della legge di ricorrenza, cioè una relazione ottenuta dalla regressione dei dati reali che associa ad ogni magnitudo il tasso di occorrenza medio ovvero il numero di sismi annui ai quali corrisponde una magnitudo almeno pari a quella considerata.
3. individuazione all'interno di ogni zona della distribuzione probabilistica della sua sismicità.
4. determinazione del processo stocastico di accadimento degli eventi sismici
5. determinazione delle relazioni di attenuazione per studiare la propagazione dell'evento sismico a partire da ciascuna zona sismogenetica fino al sito in esame..
6. combinazione di tutte le informazioni relative alle diverse zone e quantificazione della probabilità che uno o più parametri rappresentativi del moto del suolo superino un determinato valore di soglia nel luogo oggetto di studio dati tutti i possibili sismi.

Il codice di calcolo adottato per la stima della pericolosità sismica è *Crisis* (Ordaz et al.).

Nei modelli di pericolosità sismica che si basano su un approccio probabilistico è oggi prassi comune utilizzare diversi modelli di sorgenti alternativi tra loro, che vengono poi combinati in una struttura ad *albero logico*. Lo scopo è quello di ottenere una stima più affidabile che consideri le molte incertezze legate alla definizione delle sorgenti sismogenetiche.



#### 4.3 ALBERO LOGICO

L'albero logico adottato è in questo caso costituito da 3 rami principali, per ogni ramo si avrà una suddivisione in termini di zonazioni e cataloghi utilizzati, modelli di sismicità ed infine leggi di attenuazione. Verranno quindi utilizzati i seguenti dati:

- 2 zonazioni sismiche: una basata sulle sorgenti sismogenetiche della ZS9 (Meletti e Valensise 2004 – ramo ZS9), ed una zonazione sismica alternativa disegnata appositamente per il presente progetto e poi trattata in due modi differenti (prima esclusivamente in termini di area source e successivamente anche in termini di area plane);
- un unico approccio per la definizione del modello sismicità (tassi di sismicità tramite la Relazione di Gutenberg-Richter (GR));
- un solo approccio per la definizione della magnitudo massima per quanto riguarda Z1 e Z2 area source (magnitudo del più forte evento riportato nel catalogo dei terremoti), mentre per quanto riguarda Z2 area planes si utilizzerà la media delle magnitudo massime rilevate all'interno dei sistemi di fagliazione selezionati in ogni singola zona;
- 5 relazioni di attenuazione (GMPE) per il picco di accelerazione orizzontale (PGA) e per le ordinate spettrali con T da 0 a 2 sec; due sono di carattere globale (Cauzzi et al., (2015) e Boore et al. (2014)), una valida per Europa e Medio Oriente (Akkar et al., 2014), una a italiana (Bindi et al., 2011) ed infine una a scala regionale (Massa et al. 2008);
- Al fine di ricavare lo spettro finale, si utilizzeranno i pesi riportati nel seguito:
  - In termini di Zonazione verrà dato un peso del 40% alla Z1 e del 30% ad entrambe le zonazioni Z2;
  - In termini di GMPE si darà un peso maggiore del 30% alla legge di attenuazione di Bindi et al. 2011, del 25% alla legge di Massa 2008 et al. e del 15% ad Akkar et al. 2014, Boore et al. 2014 e a Cauzzi et al. 2015.

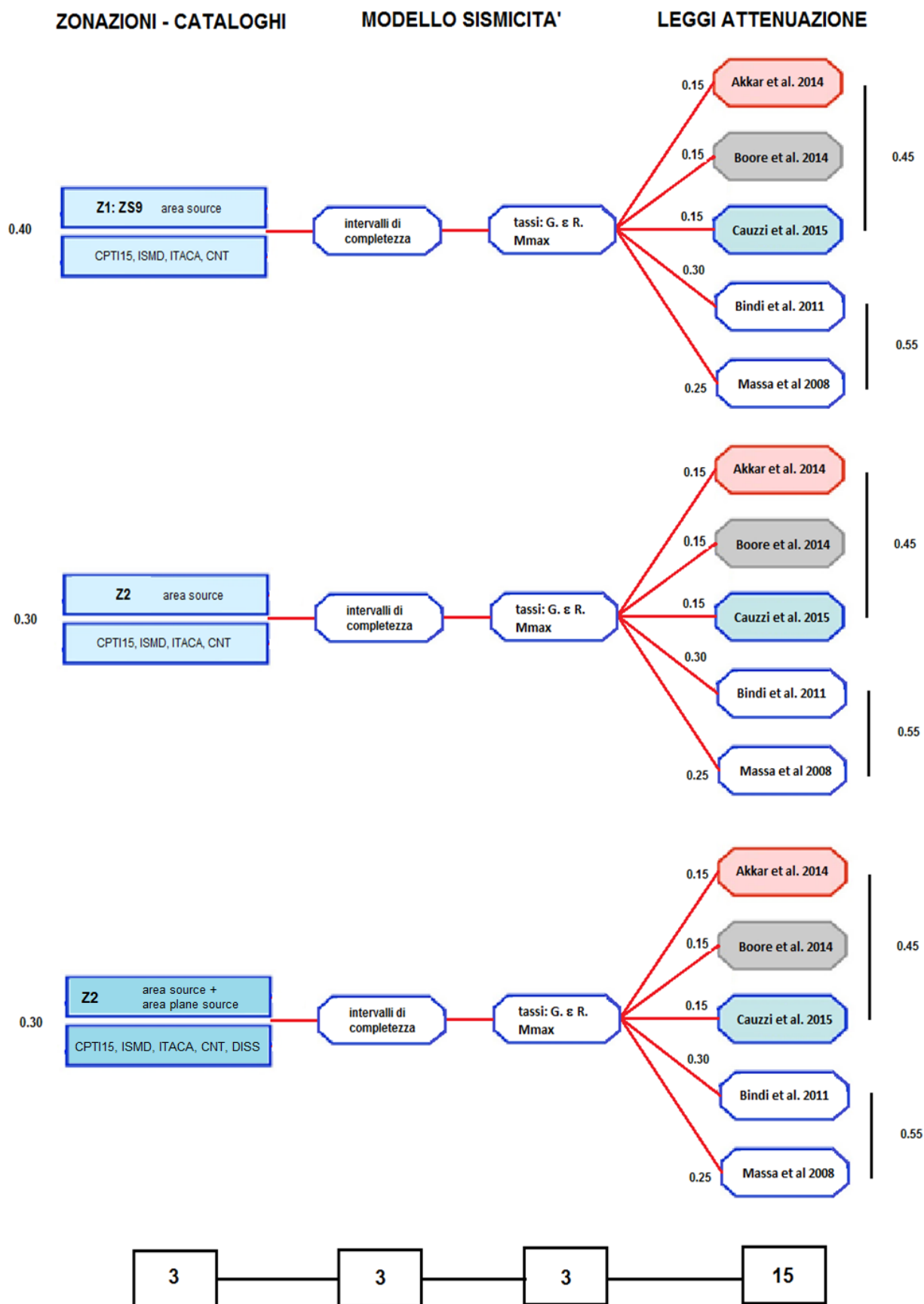


Figura 110 - Albero logico - zonazioni Z1=ZS9 e alternativa proposta Z2;



#### 4.4 DEFINIZIONE DELLE SORGENTI: CATALOGO DEI TERREMOTI

La base di ogni analisi di pericolosità sismica è costituita dal catalogo dei terremoti riguardanti la zona studiata. Maggiori sono le informazioni acquisite sui terremoti del passato, migliori e più stabili saranno le stime di pericolosità sismica calcolata.

Nella preparazione del catalogo di terremoti si è pensato di definire un insieme di dati il più avanzato e omogeneo possibile, comune ad ogni ramo dell'albero logico, costruito quindi a partire dalla combinazione dei cataloghi disponibili che quindi non sono stati considerati alternativi fra loro.

Tabella 4 - *Cataloghi di base utilizzati*

Tipo Catalogo	Nome	Copertura temporale	Scala magnitudo
<b>Storico</b>	CPTI15	1005-2019	Mw
<b>Strumentale</b>	CNT	1985-2019	ML, Mw, Md
<b>Strumentale</b>	ISMD	2012-2019	ML, Mw
<b>Strumentale</b>	ITACA	1972-2017	ML, Mw

Per quanto riguarda la parte storica del catalogo dei terremoti è stata adottato il catalogo di riferimento Italiano nella sua ultima versione CPTI15 (Rovida et al., 2016). Il catalogo CPTI15 costituisce la parte portante della base di dati sulla quale sono stati eseguiti i calcoli di pericolosità sismica. L'integrazione con i dati strumentali è considerata necessaria per integrare il catalogo finale e completarlo anche nelle magnitudo basse.

Una delle ipotesi alla base della PSHA e l'indipendenza degli eventi sismici, per questo motivo il catalogo oltre ad essere completo non deve contenere i record doppi. Pertanto nelle aree di sovrapposizione temporale dei cataloghi si sono individuati ed eliminati i record identici.

##### 4.4.1 Omogeneizzazione delle scale di magnitudo

Come magnitudo guida è stato assunto Mw. Le relazioni di conversione utilizzate sono (Rapporto conclusivo Gruppo di lavoro 2004 - App1):

$$M_w = 0.812(\pm 0.032)M_L + 1.145(\pm 0.154) \quad (3.0 < M_L < 7.5, \text{ s.d. } 0.25)$$

La Magnitudo Richter ML chiamata anche Magnitudo Locale, è ottenuta a partire dall'ampiezza massima delle oscillazioni registrate da un sismometro standard, chiamato Wood-Anderson, particolarmente sensibile a onde sismiche con frequenza relativamente elevata di circa 1 Hz.

##### 4.4.2 Eliminazione degli eventi doppi e "declustering"

La distribuzione spazio temporale dei terremoti in una zona è tipicamente disomogenea: gli eventi si raggruppano in sequenze sismiche spazio-temporali. In una sequenza la magnitudo massima è associata all'evento principale. Le repliche o i precursori all'evento principale sono contenuti in tale sequenza.

Come già esplicitato per alimentare un calcolo di pericolosità sismica di tipo probabilistico è necessario che il catalogo di terremoti contenga solamente eventi indipendenti e quindi deve riguardare solio i principali. L'operazione deputata a questo aspetto è definita "declustering" e mira a ripulire il catalogo da tutti gli eventi definiti repliche o "aftershocks" e precursori o "foreshocks". C'è da dire inoltre che gli eventi principali e quelli secondari (repliche o precursori) sarebbero caratterizzati da distribuzioni probabilistiche diverse.

Il procedimento scelto si basa sulla definizione di finestre spazio / tempo (vedi tabella nel seguito) variabili in funzione della magnitudo del terremoto principale, e la rimozione dei terremoti "più piccoli" all'interno di queste finestre che seguono o precedono il terremoto principale. Si è scelto adottare la procedura ed i parametri standard definiti da Gardner and Knopoff (1974) elaborata per la California meridionale.

Secondo tale procedura la durata  $T$  della sequenza di repliche, contata a partire dal primo evento della sequenza stessa (che può essere un precursore) può essere stimata secondo tale relazione:

$$\text{Log } T = a_1 M + b_1$$

In maniera analoga l'estensione spaziale (area circolare di raggio  $L$ ) è data da:

$$\text{Log } L = a_2 M + b_2$$

I valori per classi di magnitudo sono forniti dagli Autori in forma tabellare

Tabella 5 – *Finestre spazio- temporali* - Gardner and Knopoff (1974)

WINDOW ALGORITHM FOR AFTERSHOCKS

$M$	$L$ (km)	$T$ (days)
2.5	19.5	6.
3.0	22.5	11.5
3.5	26.	22.
4.0	30.	42.
4.5	35.	83.
5.0	40.	155.
5.5	47.	290.
6.0	54.	510.
6.5	61.	790.
7.0	70.	915.
7.5	81.	960.
8.0	94.	985.

La procedura di "declustering" è stata effettuata sull'intero catalogo, composto della parte storica e della parte strumentale. La distribuzione temporale, per vari periodi di tempo, del catalogo così elaborato e adottato per lo studio è riportata in allegato.

#### 4.5 DEFINIZIONE DEGLI INTERVALLI DI COMPLETEZZA

Come noto l'impatto sui tassi di sismicità e quindi sui valori delle accelerazioni massime attese degli intervalli di completezza è considerevole: nello specifico determina un divario fra il numero reale di terremoti contenuti in 1000 anni di catalogo e quello virtuale stimato nello stesso periodo con i tassi teorici. Uno dei motivi è che per i terremoti



di medio bassa intensità i cataloghi risultano essere incompleti: infatti quanto più si risale indietro nel tempo tanto più scarse diventano le notizie e solo gli eventi più disastrosi vengono riportati.

Per ridurre tale divario furono elaborati (Gruppo di lavoro 2004) degli insiemi di intervalli di completezza denominati rispettivamente CO4-2 e CO4-4 definiti utilizzando rispettivamente un approccio storico ed uno statistico.

In questo studio la valutazione degli intervalli di completezza del catalogo scelto è stata specificatamente effettuata con approccio statistico. Il metodo utilizzato, per ogni zona sismogenetica, è di tipo *visuale-cumulativo* e prevede:

- si assemblano per ogni zona sismogenetica i dati provenienti dal catalogo (si vedrà successivamente anche una ipotesi in cui la completezza verrà valutata in modo univoco per tutte le zone, prendendo quindi in considerazione la globalità degli eventi sismici;
- si definiscono le *classi di magnitudo* con  $\Delta M_k$  costante tipicamente compreso fra 0.5 ed 1 (in questo studio è 0.5);
- si definisce  $M_{min} = m_0$  in base a considerazioni ingegneristiche (in questo studio  $M_{min}=3.5$ );
- per ogni classe di magnitudo, adottando un intervallo temporale opportuno, si costruisce un grafico avente in ascisse il tempo in anni dall'inizio del catalogo, ed in ordinate il numero cumulato di eventi;
- dati i grafici ottenuti per ogni classe di magnitudo si considerano completi i periodi più recenti in cui l'andamento è ben approssimato da una retta, cioè da una pendenza media costante. In genere è riconoscibile un brusco cambio di pendenza in corrispondenza di una certa data che segna quindi l'inizio dell'intervallo temporale di completezza.

Nell'analisi di sensibilità è stato ripetuto lo stesso approccio elaborando i dati dell'intero catalogo (completezza globale) anziché quelli specifici di ogni zona; ciò determina una diversa determinazione delle finestre di completezza a causa del numero superiore di dati a disposizione.

In allegato si riportano i grafici e le tabelle relativi alle finestre di completezza per classi di magnitudo.

#### 4.6 DEFINIZIONE DELLE ZONE SISMOGENETICHE ZS

Ai fini del calcolo della pericolosità si può ricorrere alla definizione di aree indipendenti fra loro che in base agli studi geologici e sismotettonici pregressi si ritengono omogenee e cioè caratterizzate da tassi sismici uniformi. Esse si ottengono in base a considerazioni geologiche e sismologiche. Nella definizione di ZS si assume che i terremoti di magnitudo medio-alta siano tutti equiprobabili in ogni punto della stessa zona. Essa delimita in realtà alcune faglie maggiori e numerose faglie minori caratterizzate da processi di rilascio dell'energia molto diversi fra loro per cui i tassi che si associano uniformemente alla stessa zona rappresentano in realtà una stima media.

Per lo studio in oggetto sono state utilizzate due zonazioni sismogenetiche:

1. La prima zonazione è l'attuale zonazione sismogenetica nazionale ZS9 adottata anche come zonazione di riferimento e collegata con la pericolosità sismica di normativa nazionale MPS04 (Stucchi et al., 2011). La zonazione ZS9 è stata pubblicata nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004). Il numero complessivo di zone è 36.
2. La seconda zonazione adottata nello studio in esame è alternativa e riguarda un approfondimento dell'area al contorno di Sala Baganza per un raggio di circa 100Km. Tale approfondimento si traduce in un rimodellamento per forma ed area (minore) delle zone della ZS9 e l'integrazione di alcune di esse nell'area della Pianura Padana.

Essa è stata definita appositamente in corrispondenza dell'Appennino settentrionale, Pianura Padana centrale, Adriatico centro-settentrionale, Mar Ligure e alto Tirreno: discretizza maggiormente ed integra localmente la ZS9 con l'obiettivo di ottenere un maggiore dettaglio nella valutazione della pericolosità sismica dell'area studiata identificando caratteristiche strutturali maggiormente omogenee all'interno di tali zone.

Infatti all'interno di ogni zona le condizioni sismotettoniche sono ritenute omogenee; per ogni zona è stato quindi proposto un meccanismo di rottura definito da:

- geometria del piano di rottura (range direzione di immersione e inclinazione),
- tipo di movimento (normale, inverso, trascorrente, misto),
- profondità di rottura ipotizzata (range),
- magnitudo massima attesa (sulla base delle magnitudo massime osservate)

Alla seconda zonazione è stato dato un peso complessivo pari a 60% mentre alla prima un peso del 40%.

La seconda zonazione è stata poi sdoppiata a generare un terzo ramo per tenere conto della diversa simulazione degli elementi sorgente così come meglio specificato nel seguito.

Tabella 6 – Zone sismogenetiche della zonazione ZS2

Zonazione 2 – zone modificate/integrative	Geometria	Meccanismo	Profondità (km)	Magnitudo
<b>512 - Pieghe Emiliane</b>	S-SSW/45	Thrust	5 - 30	5.5
<b>511</b>	v. zona ZS9 911			
<b>513 - Taro - Enza</b>	NE-SW (S/45°-60°)	Strike-slip (thrust)	5 - 30	5.6
<b>517 - Margine Emiliano</b>	S/45°-60°	Thrust	10 - 30	6
<b>516 - Appennino Emiliano</b>	N/75° S/45°-60°	Normal Thrust	5 - 10 10 - 35	5.5
<b>515 - Garfagnana</b>	NE/60-70 (60%) SW/60-70 (40%) NE-SW	Normal Normal Transtens. dx	5 - 15 10 - 20	6.5-5.1
<b>514 - Settore costiero nord occidentale toscano</b>	SW/60-70 WSW/60-70	Normal	5 - 15	5.9



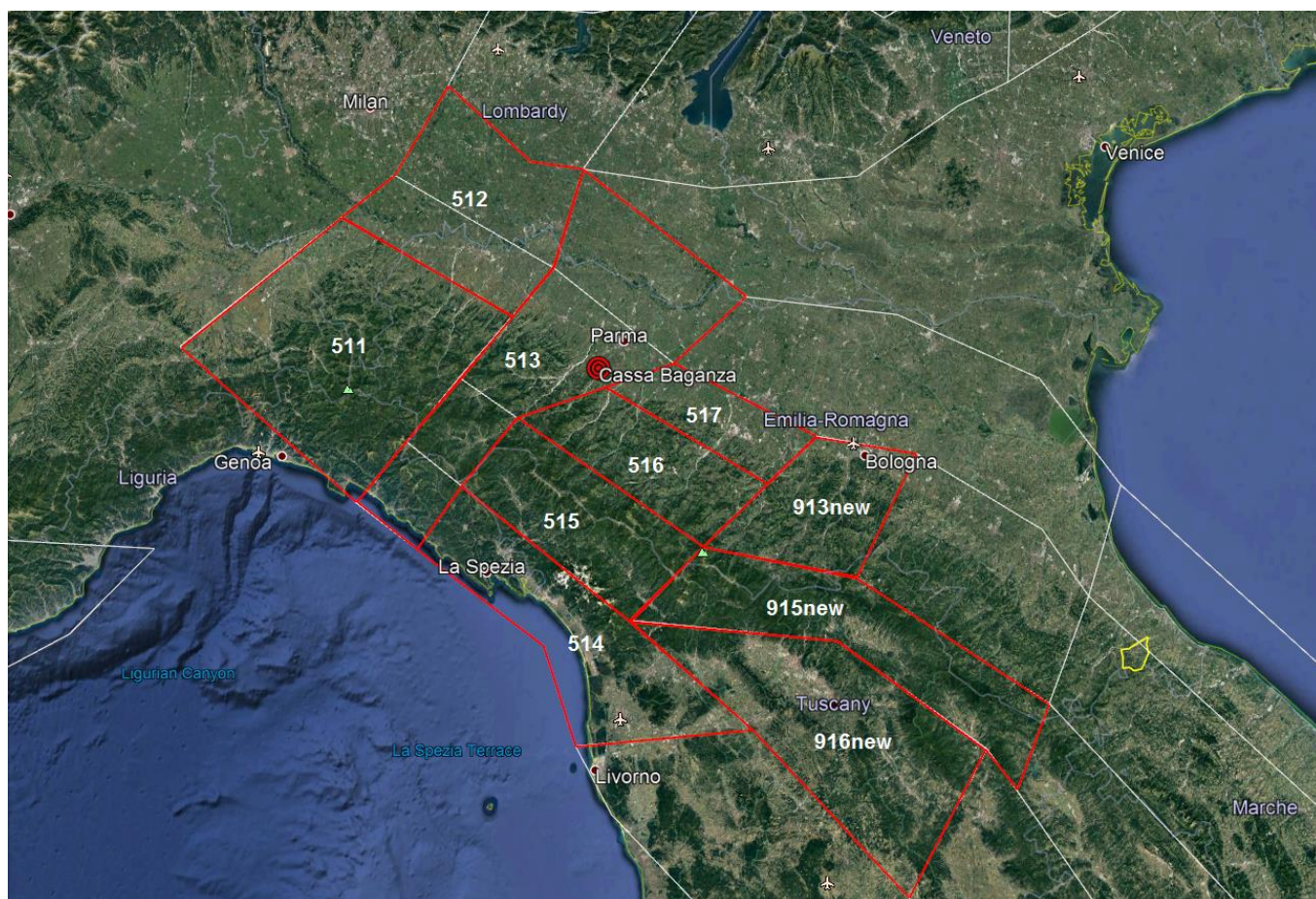


Figura 111 – Particolare delle zone aggiunte per la zonazione sismogenetica ZS2

È inoltre importante precisare come si sia tenuto conto della sorgente sismogenetica presente nel DISS v.3.2.1 “Busseto-Cavriago”, ritenuta potenzialmente responsabile di due eventi sismici importanti nel 1831 e nel 1832 con una potenziale di magnitudo massima pari a 5.6 Mw. Tale sorgente ricade all’interno della zona sismogenetica ZS2 513.

#### 4.7 ZONAZIONE Z2 – DETERMINAZIONE DELLA PROFONDITÀ EFFICACE

Per quanto riguarda le nuove zone sismogenetiche individuate nella zonazione Z2, si rende necessario determinare la profondità ipocentrale specifica per ogni singola zona. Si è quindi riportato un grafico per ogni ZSS (vedasi capitolo “Allegati”) in cui si mostra la frequenza di accadimento degli eventi (assoluta e relativa) relazionata con la profondità ipocentrale. Per ogni singola ZSS è stata assunta quindi la profondità corrispondente al massimo valore di frequenza relativa.

##### 4.7.1 Simulazione numerica delle ZS

In generale la ZS può essere un volume, un’area o una faglia. Se la profondità focale degli eventi sismici ricade entro un intervallo limitato di chilometri si assume in pratica una profondità costante e la ZS è simulata come un’area poligonale piana a quella profondità. Se le profondità sono molto eterogenee si possono definire più piani sorgente contenuti nella stessa ZS.

Per la prima e seconda zonazione ogni ZS è stata simulata nel programma Crisis come “*area source*” planare poligonale. Per questi elementi geometrici il programma prevede un tipo di comportamento in cui le aree di rottura sono cerchi la cui area è correlata all'ampiezza attraverso dei parametri K1 e K2 per cui si ha:

$$A = K_1 \exp(K_2 M) \quad (A \text{ in Km}^2) \quad (1)$$

con K1 e K2 definiti come segue:

Model	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
Brune (1970)	0.00381	1.15130
Singh et al. (1980)	0.00564	1.15130
Wells and Coppersmith (1994) Strike-slip	0.01100	1.03616
Wells and Coppersmith (1994) Reverse	0.00571	1.12827
Wells and Coppersmith (1994) Normal	0.02072	0.94406
Wells and Coppersmith (1994) All	0.01015	1.04768

Le aree di rottura sono contenute nel piano dell’“*area source*” stessa. Se l’“*area source*” è un piano orizzontale (ovvero, tutti i suoi vertici hanno la stessa profondità), i piani di rottura saranno orizzontali. Se l’“*area source*” è un piano verticale, i cerchi che rappresentano le rotture saranno contenuti in un piano verticale. Se la geometria dell’area è complessa (cioè è un’area non planare), il piano di rottura sarà quello del triangolo in cui è contenuto l’ipocentro corrispondente.

#### Zonazione Z2 – *area plane sources*

Per la seconda zonazione però le ZS sono state simulate anche come “*area planes*” in cui le aree di rottura sono dei piani preferenziali che hanno un orientamento fornito dall’utente. L’orientamento dei piani di rottura delle sorgenti può essere assegnato mediante la direzione e l’immersione dei piani virtuali che verranno generati.

Nel seguito si riportano i dati assegnati ad ogni ZS (ramo Z2 – *area plane sources*), derivati dai parametri presenti sulla banca dati DISS e da elaborazioni statistiche, ovvero si sono presi i valori medi di “DIP”, “STRIKE”, “DEPTH” ed “ASPECT RATIO”. Si è preso il valore di magnitudo medio dei massimi registrati in ciascuna zona.

Tabella 7 – Parametri “*area plane source*” ricavati dai dati DISS

ZSS – Z2	DEPTH	STRIKE	DIP	Aspect Ratio	Max Magnitude
	(Km)	(°)	(°)	(-)	
511	4.75	86.25	38.75	0.7	5.5
512	5.3	189.34	34.11	0.72	5.67
513	9.67	155.14	37.64	0.7	5.77
514	4.23	324.83	41.16	0.8	5.83
515	11.28	238.64	41.09	0.68	5.96
516	15.58	130.12	47.5	0.66	5.87
517	4.27	114.63	33	0.77	5.72
913_new	13.1	130.75	47.5	0.68	5.82
915_new	8.31	254.49	39.2	0.68	5.91
916_new	2.67	321.94	35.27	0.71	5.82



#### 4.8 MODELLO DI SISMICITÀ E MAGNITUDO MASSIMA

L'albero logico prevede a seguire la definizione di un modello di distribuzione della magnitudo  $M$  dei terremoti. La distribuzione di probabilità della magnitudo per una data zona  $ZS$  si traduce nella definizione della frequenza relativa di accadimento dei terremoti; è quindi necessario definire la legge di ricorrenza valida per ogni zona omogenea  $ZS$ . Il rapporto frequenza – magnitudo si definisce attraverso la *relazione di Gutenberg e Richter*:

$$\log v = a - bM$$

Per ogni zona  $ZS$ , definito un intervallo  $\Delta M_i$  compreso fra 0.2 e 0.4 (diverso da quello usato per l'analisi di completezza; pari a 0.2 in questo studio), considerando per esso il valore iniziale  $M_i$  come rappresentativo, si calcola il valore del numero dei terremoti  $v_i$  con  $M > M_i$  per cui:

$$v_i = \sum_{k=1 \dots N} n_{ik} / T_{ck}$$

con  $T_{ck}$  si definisce l'intervallo di completezza della relativa classe di magnitudo  $k$ ,  $N$  è il numero di classi di magnitudo,  $n_{ik}$  è il numero di terremoti con  $M > M_i$  compresi nella classe  $k$ , non compresi nelle classi superiori.

Riportando in un grafico sulle ascisse i valori di  $M_i$  degli intervalli di magnitudo ed in ascissa in scala logaritmica i valori  $v_i$ , si ottengono dei punti il cui andamento è approssimabile con la relazione di Gutenberg e Richter. Al valore di  $b$  della relazione può essere associato un comportamento fisico: il valore oscilla generalmente intorno ad 1, per cui se risulta inferiore ad esso significa che nella zona prevalgono i terremoti di forte magnitudo, viceversa se il valore è di poco maggiore di 1.

La relazione di Gutenberg e Richter può essere scritta come

$$v(M) = e^{(\alpha - \beta M)}$$

dove  $\alpha = a \ln 10$  e  $\beta = b \ln 10$ .

Si definisce poi la deviazione standard delle pendenze dei valori rispetto alla pendenza media  $\beta$  e il relativo coefficiente di variazione  $CV$ , richiesto dal programma Crisis, dato dal rapporto fra la deviazione standard e la relativa media.

La distribuzione di probabilità  $F_M(m)$  è data da:

$$F_M(m) = 1 - e^{-\beta(m-m_0)}$$

La relativa densità di probabilità è

$$f_M(m) = dF_M(m) / dm = \beta \exp(-\beta(m-m_0))$$

Tale distribuzione, troncata inferiormente ( $m_0$ ) sarebbe teoricamente illimitata superiormente ma la fisica del problema (dimensioni faglie) implica la necessità di definire la *magnitudo massima*, per ogni zona  $ZS$ . per cui la distribuzione di probabilità si riscrive, normalizzando la densità, come:

$$F_M(m) = 1 - e^{-\beta(m-m_0)} / 1 - e^{-\beta(m_1-m_0)}$$

Come anche specificato nelle Linee Guida sugli studi sismo-tettonici dell'INGV: *“nell’approccio probabilistico, la massima magnitudo determina insieme ai tassi di sismicità gli scuotimenti attesi per vari periodi di ritorno; è quindi una scelta relativamente meno critica, in quanto per i periodi di ritorno più lunghi (dai 1.000 anni in su) gioca comunque un ruolo determinante. La massima magnitudo viene, come in questo studio, tradizionalmente posta uguale alla magnitudo del più forte evento riportato nel catalogo dei terremoti associato ad una data ZS. C’è per da considerare che, per quanto ricchi di dati, il catalogo dei terremoti e il database delle faglie non sono da considerarsi completi; per questo motivo in genere si applicano dei “coefficienti di sicurezza”, che consistono nell’aumentare la massima magnitudo derivata dal dato sismologico e dal dato geologico di un valore fissato a priori; per esempio nell’ambito del progetto europeo SHARE (Woessner et al., 2013) è stato considerato un coefficiente pari a 0.3, come in questo studio (analisi di sensibilità), scelto in base all’incertezza media sulla stima della magnitudo nei cataloghi dei terremoti”*

La distribuzione di G&R è valida per regioni estese nell’ipotesi in cui le sorgenti (faglie) risultino indipendenti fra di loro per cui perde di validità nel caso in cui, in una ZS, oltre una certa soglia di M, predomini l’attività di una singola sorgente collegata ad altre.

La probabilità che eventi sismici si succedano in una determinata zona ZS è definita da un *processo stocastico di Poisson* per cui:

- Il numero di eventi in una zona in un intervallo temporale è indipendente da quello di un altro intervallo distinto da esso,
- La probabilità di verificarsi di un singolo evento in un intervallo di tempo piccolo ( $t, t + \Delta t$ ) è pari a  $\lambda \Delta t$  essendo  $\lambda$  il tasso di occorrenza del processo di Poisson
- La probabilità del verificarsi di più di un evento nell’intervallo predetto è trascurabile

La probabilità Poissoniana che il numero di eventi occorsi nell’intervallo temporale  $(0, t)$  sia pari a  $K$  è:

$$P(Nt=k) = (\lambda t)^k e^{-\lambda t} / K!$$

La distribuzione Poissoniana è quindi di tipo esponenziale.

Inoltre il processo di Poisson è privo di memoria, per cui, nell’ipotesi che fino all’istante  $\tau=t$  non si siano verificati eventi, la probabilità (condizionata) che l’evento successivo avvenga nel successivo intervallo temporale  $dt$  è data dalla cosiddetta “funzione di rischio immediato”  $\phi_\tau(t)$ . Essa si ottiene da:

$$P(\tau < t + d\tau / \tau > t) = P(t < \tau < t + dt) / P(\tau > t) = f_\tau(t) dt / (1 - F_\tau(t))$$

per cui:

$$\phi_\tau(t) = f_\tau(t) / (1 - F_\tau(t))$$

che per una distribuzione Poissoniana coincide con  $\lambda$ .

Ciò ha come conseguenza che, se il processo è privo di memoria, *la distribuzione dei tempi di intercorrenza tra terremoti è indipendente da quella della magnitudo* per cui si ha che:



$$P((\tau < t) \cap M > m) = P(\tau < t) \times P(M > m) = F_t(t) \times (1 - F_M(m))$$

Essendo  $v(m, t)$  il numero di eventi di magnitudo  $M > m$  nell'intervallo  $(0, t)$  si ha:

$$v(m, t) = \lambda t (1 - F_M(m))$$

per  $t=1$  anno si ha:

$$v(m) = \lambda t e^{(-\beta(m-m_0))}$$

Si è ottenuta la relazione di G&R e si è dimostrato quindi che la relazione di G&R implica una distribuzione esponenziale della magnitudo insieme ad un processo degli eventi di tipo Poissoniano.

I valori dei coefficienti “b” ed “a” e i rispettivi grafici della distribuzione di Gutenberg e Richter vengono riportati in allegato. Bisogna precisare come, per i calcoli utilizzati in tale relazione, si sono considerati valori del parametro “b” compresi tra 0.80 e 1.20 (si vedranno successivamente all'interno del capitolo “Analisi di sensitività” gli effetti di considerare un valore di “b” esterno a tale range).

#### 4.9 LEGGI DI ATTENUAZIONE

Un fondamentale nel calcolo della pericolosità sismica è il modello di attenuazione dello scuotimento del suolo. Per stimare la pericolosità sismica al sito di interesse deve essere considerato lo scuotimento che tutte le sorgenti che sono state identificate possono produrre. Occorre pertanto utilizzare una relazione che descriva lo scuotimento atteso (es: accelerazione) in funzione della magnitudo  $M$  del terremoto, della distanza  $R$  sorgente-sito e del tipo di suolo.

Esistono in letteratura centinaia di relazioni empiriche note con il nome di GMPE (Ground Motion Prediction Equations) che assumono una forma del tipo  $Y(M, R) = c_1 + c_2 M - c_3 f(R)$ .

Tali relazioni fanno però riferimento ad aree geografiche e a contesti geodinamici diversi e sono spesso caratterizzate da diverse forme funzionali. Vanno quindi selezionate le GMPE che si ritengono più consone all'ambito di applicazione (contesto geodinamico, *dataset* di riferimento, intervalli di magnitudo definiti, ecc.) tra quelle più recentemente pubblicate.

L'impatto delle GMPE sulla stima della pericolosità sismica è dimostrato in molti studi. Trattandosi comunque di modelli empirici, la cui incertezza è molto elevata, è ormai prassi consolidata l'utilizzo di più modelli da combinare in un approccio ad albero logico. Per lo stesso motivo deve essere preso in considerazione non solo il valore medio predetto da un certo modello, bensì il valore che si ottiene considerando anche l'incertezza (deviazione standard) associata.

Come esplicitato nelle “Linee Guida per la redazione degli studi sismotettonici dell'INGV” le quattro relazioni, combinate in questo studio con diversi pesi nella struttura ad albero logico, sono le seguenti:

- *Bindi et al. (2011)*
- *Akkar et al. (2014)*
- *Boore et al. (2014)*

- *Cauzzi et al. (2015)*

Inoltre è stata utilizzata una relazione proposta per una scala più locale (Italia centro-settentrionale) ritenuta valida per la zona di Parma, proposta da *Massa et al (2008)*.

Pubblicazione di riferimento	Area	Range di Mw	Range di distanza (km)	Range di periodo (s)	Tipo di distanza (R)	Classi di sito
Bindi et al. (2011)	Italia	4.1 - 6.9	0 - 200	0.04 - 2.0	RJB, Repi (M<5)	5 classi
Boore et al. (2014)	Globale	3.0 - 7.9	0 - 400	0.01 - 10	RJB	Vs30
Akkar et al. (2014)	Europa e Medio Oriente	4.7 - 7.6	0 - 200	0.01 - 4	RJB, Repi, Rhypo	Vs30
Cauzzi et al. (2015)	Globale	4.5 - 7.9	0 - 150	0.02 - 10	Rrup	Vs30
Massa et al. (2008)	Italia centro settentrionale	3.5 - 6.3	0 - 100	0.1 - 1.5	Repi	2 classi

Nota tale legge è possibile calcolare la probabilità totale, estesa ad ogni zona ZS, che si abbia un terremoto che produca l'evento  $Y > y$  proveniente da una generica distanza  $r$  dal sito, considerata come variabile aleatoria, e quindi caratterizzata da una funzione densità di probabilità  $f_R(r)$ :

$$P(Y > y)_{ZS} = \int_{ZS} P(Y > y / R=r) f_R(r) dr$$

in cui  $P(Y > y)$  dipende dalla forma della legge di attenuazione; per cui nel caso generico in cui essa sia pari a:

$$Y(M, R) = c_1 + c_2 M - c_3 f(R)$$

assume la forma (per  $M > m_0$ ):

$$P(Y > y / R=r) = G(r) C e^{(-\beta/c^2 y)}$$

con:

$$C = e^{(\beta (c_1/c_2 + m_0))}$$

$$G(r) = r^{(-\beta c_3/c_2)}$$

#### 4.9.1 Bindi et al. (2011)

L'espressione utilizzata è:



$$\begin{aligned}\log_{10} Y &= e_1 + F_D + F_M + F_S + F_{sof} \\ F_D &= [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \log_{10} \left( \sqrt{R_{JB}^2 + h^2} / R_{ref} \right) \\ &\quad - c_3 \left( \sqrt{R_{JB}^2 + h^2} - R_{ref} \right) \\ F_M &= \begin{cases} b_1(M - M_h) + b_2(M - M_h)^2 & \text{for } M \leq M_h \\ b_3(M - M_h) & \text{otherwise} \end{cases} \\ F_S &= s_j C_j \\ F_{sof} &= f_j E_j\end{aligned}$$

Y è espressa in cm/sec<sup>2</sup>

$e_1 = 3.672$ ,  $c_1 = -1.940$ ,  $c_2 = 0.413$ ,  $h = 10.322$ ,  $c_3 = 1.34 \cdot 10^{-4}$ ,  $b_1 = -0.262$ ,  $b_2 = -0.0707$ ,  $s_A = 0$ ,  $s_B = 0.162$ ,  $s_C = 0.240$ ,  $s_D = 0.105$ ,  $s_E = 0.570$ ,  $f_1 = -5.03 \cdot 10^{-2}$ ,  $f_2 = 0.105$ ,  $f_3 = -5.44 \cdot 10^{-2}$ ,  $f_4 = 0$ ,  $\sigma = 0.337$  per PGA orizzontale

$e_1 = 3.511$ ,  $c_1 = -1.741$ ,  $c_2 = 0.324$ ,  $h = 9.052$ ,  $c_3 = 1.28 \cdot 10^{-3}$ ,  $b_1 = 9.04 \cdot 10^{-3}$ ,  $b_2 = -0.0270$ ,  $s_A = 0$ ,  $s_B = 0.167$ ,  $s_C = 0.204$ ,  $s_D = 0.190$ ,  $s_E = 0.350$ ,  $f_1 = -7.09 \cdot 10^{-2}$ ,  $f_2 = 7.79 \cdot 10^{-2}$ ,  $f_3 = -6.96 \cdot 10^{-3}$ ,  $f_4 = 0$ , and  $\sigma = 0.314$  per PGA verticale

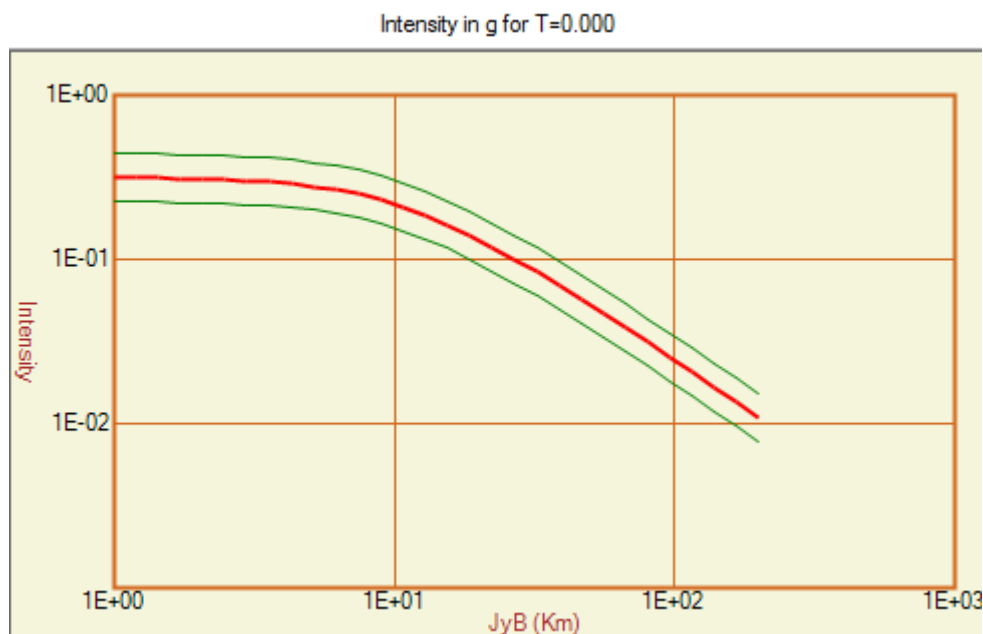


Figura 112 – Relazione di attenuazione di Bindi et al. 2011, sull'asse verticale si riporta l'intensità espressa in g, mentre sull'asse orizzontale le distanze JyB espressa in Km (T=0.00 sec)

#### 4.9.2 Boore et al. (2014)

L'espressione utilizzata è:

$$\begin{aligned}
 \ln Y &= F_E + F_P + F_S \\
 F_E &= \begin{cases} e_0 U + e_1 SS + e_2 NS + e_3 RS + e_4 (M_w - M_h) + e_5 (M - M_h)^2 & M \leq M_h \\ e_0 U + e_1 SS + e_2 NS + e_3 RS + e_6 (M_w - M_h) & M > M_h \end{cases} \\
 F_P &= [c_1 + c_2 (M_w - M_{ref})] \ln(R/R_{ref}) + (c_3 + \Delta c_3)(R - R_{ref}) \\
 R &= \sqrt{r_{jb}^2 + h^2} \\
 F_S &= \ln(F_{lin}) + \ln(F_{nl}) + F_{\delta z_1}(\delta z_1) \\
 \ln(F_{lin}) &= \begin{cases} c \ln\left(\frac{V_{s,30}}{V_{ref}}\right) & V_{s,30} \leq V_c \\ c \ln\left(\frac{V_c}{V_{ref}}\right) & V_{s,30} > V_c \end{cases} \\
 \ln(F_{nl}) &= f_1 + f_2 \ln\left(\frac{PGA_r + f_3}{f_3}\right) \\
 f_2 &= f_4 [\exp\{f_5(\min(V_{s,30}, 760) - 360)\} - \exp f_5(760 - 360)] \\
 F_{\delta z_1} &= \begin{cases} 0 & T < 0.65 \\ f_6 \delta z_1 & T \geq 0.65 \text{ \& } \delta z_1 \leq f_7/f_6 \\ f_7 & T \leq 0.65 \text{ \& } \delta z_1 > f_7/f_6 \end{cases} \\
 \delta z_1 &= z_1 - \mu_{z1} \\
 \ln(\mu_{z1}) &= \begin{cases} \frac{-7.15}{4} \ln\left(\frac{V_{s,30}^4 + 570.94^4}{1360^4 + 570.94^4}\right) & \text{for California} \\ \frac{-5.23}{2} \ln\left(\frac{V_{s,30}^2 + 412.39^2}{1360^2 + 412.39^2}\right) & \text{for Japan} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Y è espressa in g

Mref = 4.5, Rref = 1 km, Vref = 760m/s, PGAr è la PGA media for roccia (i.e. Vs30 = Vref), e0 = 0.4473, e1 = 0.4856, e2 = 0.2459, e3 = 0.4539, e4 = 1.4310, e5 = 0.05053, e6 = -0.1662, Mh = 5.5, c1 = -1.134, c2 = 0.1917, c3 = -0.008088, h = 4.5, c3China;Turkey = 0.0028576, c3Italy;Japan = -0.0025500, c = -0.6, Vc = 1500m/s, f1 = 0, f3 = 0.1, f4 = -0.15, f5 = -0.00701, f6 = -9.9 and f7 = -9.9.

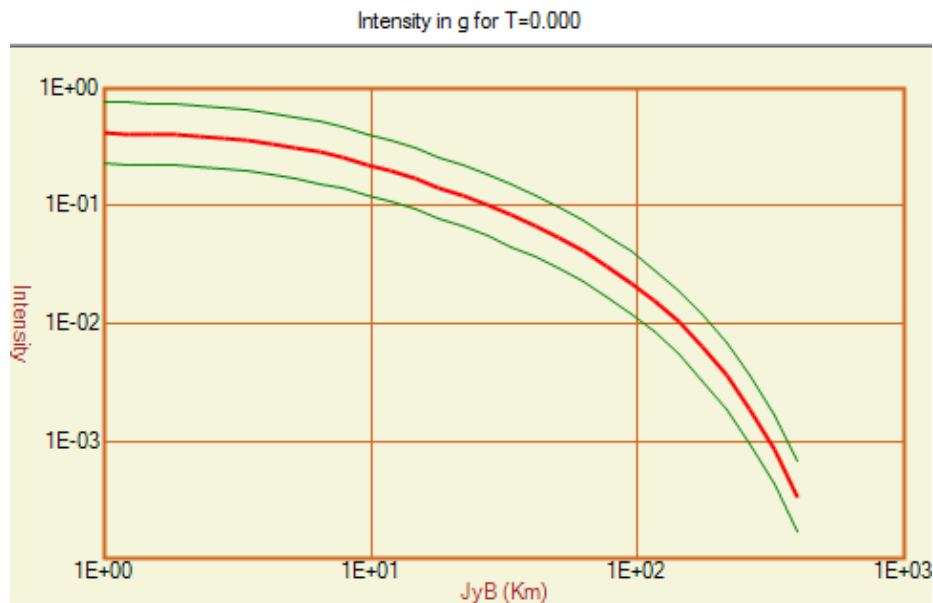


Figura 113 – Relazione di attenuazione di Boore et al. 2014, sull'asse verticale si riporta l'intensità espressa in g, mentre sull'asse orizzontale le distanze JyB espressa in Km (T=0.00 sec)

#### 4.9.3 Akkar et al. (2014)

L'espressione utilizzata è:

$$\begin{aligned}
 \ln Y &= \ln Y_{REF} + \ln S \\
 \ln Y_{REF} &= \begin{cases} a_1 + a_2(M - 6.75) + a_3(8.5 - M)^2 + [a_4 + a_5(M - 6.75)] \ln \sqrt{R^2 + a_6^2} + a_8 F_N + a_9 F_R & M_w \leq 6.75 \\ a_1 + a_7(M - 6.75) + a_3(8.5 - M)^2 + [a_4 + a_5(M - 6.75)] \ln \sqrt{R^2 + a_6^2} + a_8 F_N + a_9 F_R & M_w > 6.75 \end{cases} \\
 \ln S &= \begin{cases} b_1 \ln(V_{s,30}/V_{REF}) + b_2 \ln\left[\frac{PGA_{REF} + c(V_{s,30}/V_{REF})^n}{(PGA_{REF} + c)(V_{s,30}/V_{REF})^n}\right] & V_{s,30} \leq V_{REF} \\ b_1 \ln\left[\frac{\min(V_{s,30}, V_{CON})}{V_{REF}}\right] & V_{s,30} > V_{REF} \end{cases}
 \end{aligned}$$



Y è espressa in g

$a_8 = -0.1091$ ,  $a_9 = 0.0937$ ,  $a_2 = 0.0029$ ,  $a_5 = 0.2529$ ,  $a_6 = 7.5$  and  $a_7 = -0.5096$  per tutte le distanze metriche

$a_1 = 1.85329$ ,  $a_3 = -0.02807$ ,  $a_4 = -1.23452$ ,  $s = 0.7121$  per rjb;

$a_1 = 2.52977$ ,  $a_3 = -0.05496$ ,  $a_4 = -1.31001$ ,  $s = 0.7312$  per repi;

$a_1 = 3.26685$ ,  $a_3 = -0.04846$ ,  $a_4 = -1.47905$ ,  $s = 0.7347$  per rhypo;

$V_{REF} = 750\text{m/s}$ ,  $V_{CON} = 1000\text{m/s}$ ,  $b_1 = -0.41997$ ,  $b_2 = -0.28846$ ,  $c = 2.5$  and  $n = 3.2$

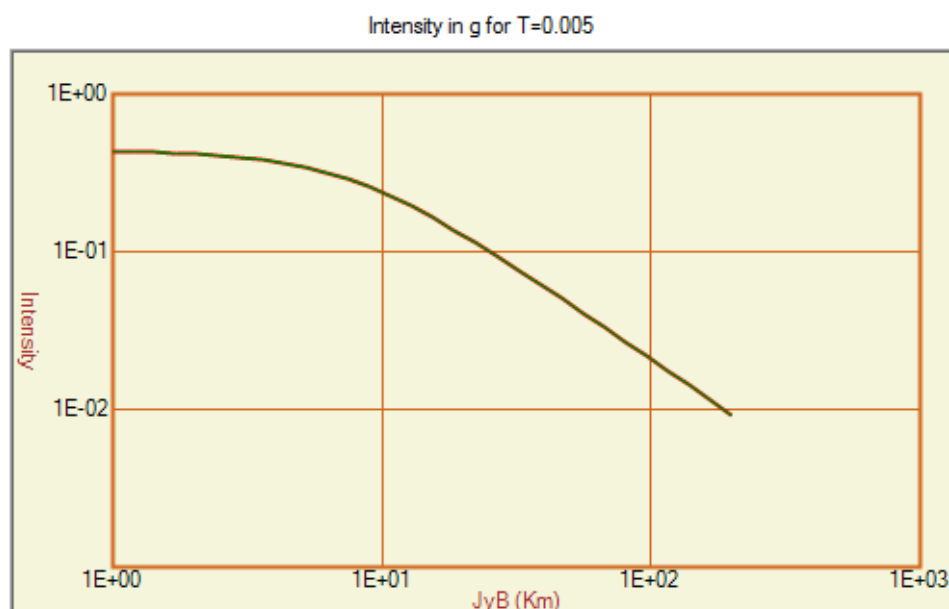


Figura 114 – Relazione di attenuazione di Akkar et al. 2014, sull'asse verticale si riporta l'intensità espressa in g, mentre sull'asse orizzontale le distanze JyB espressa in Km (T=0.00 sec)

#### 4.9.4 Cauzzi et al. (2015)

L'espressione utilizzata è:

$$\begin{aligned}
 \log_{10} y &= f_M + f_R + f_S + f_{SOF} \\
 f_M &= c_1 + m_1 M_w + m_2 M_w^2 \\
 f_R &= (r_1 + r_2 M_w) \log_{10}(r_{rup} + r_3) \\
 f_S &= \begin{cases} s_B S_B + s_C S_C + s_D S_D & \text{or alternatively} \\ b_V \log_{10} \left( \frac{V_{s,30}}{V_A} \right) & \text{or alternatively} \\ b_{V800} \log_{10} \left( \frac{V_{s,30}}{800} \right) \end{cases} \\
 f_{SOF} &= f_N F_N + f_R F_R + f_{SS} F_{SS}
 \end{aligned}$$

Y è espressa in cm

$c_1 = -2.19617$ ,  $m_1 = 0.52375$ ,  $m_2 = -0.06094$ ,  $r_1 = -3.80190$ ,  $r_2 = 0.35508$ ,  $r_3 = 11.64156$ ,  $s_B = 0.21070$ ,  $s_C = 0.28251$ ,  $s_D = 0.28288$ ,  $b_V = -0.31007$ ,  $b_{V800} = -0.70244$ ,  $V_A = 2319.18598$ ,  $f_N = -0.02411$ ,  $f_R = 0.07246$ ,  $f_{SS} = -0.05632$ ,  $\sigma = 0.34071$ .

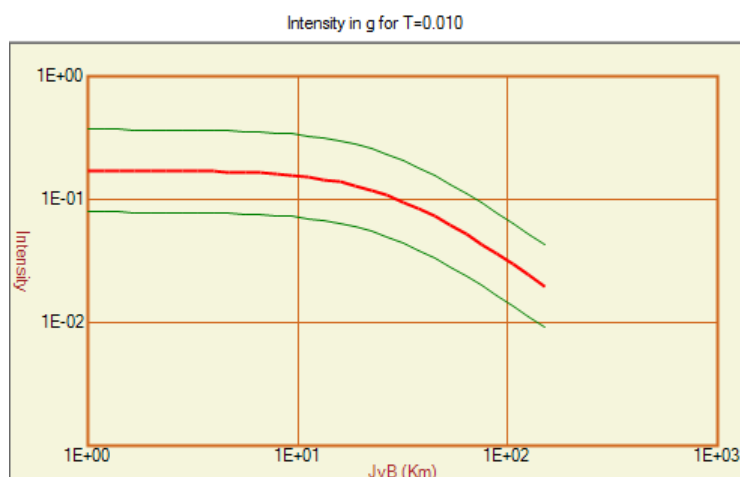


Figura 115 – Relazione di attenuazione di Cauzzi et al. 2015, sull'asse verticale si riporta l'intensità espressa in g, mentre sull'asse orizzontale le distanze JyB espressa in Km (T=0.00 sec)

#### 4.9.5 Massa et al. (2008)

L'espressione utilizzata è:

$$\log_{10}(Y) = a + b M + c \log(R^2 + h^2)^{0.5} + d1 SA + d2 S(B+C) \pm \sigma$$

con SA=1 per suoli rigidi e S(B+C) per suoli soffici.

Y è espressa in g

Si riportano di seguito i valori dei parametri anche in funzione dei periodi spettrali e relativa deviazione standard.

parameter	a	error	b	error	c	error	d1 stiff	d2 soft	$\sigma$
PGHA	-3.2191	±0.16	0.7194	±0.025	-1.7521	±0.075	0.1780	–	±0.282
PGHV	-4.1967	±0.14	0.8561	±0.022	-1.7270	±0.065	0.1774	–	±0.248
PGHD	-3.9474	±0.14	1.0047	±0.023	-1.7293	±0.066	0.1726	–	±0.232
SA – 0.1	-2.7799	±0.14	0.6380	±0.028	-1.7075	±0.073	0.1254	–	±0.351
SA – 0.3	-4.0539	±0.11	0.8595	±0.023	-1.5138	±0.059	0.2338	–	±0.261
SA – 0.5	-4.7976	±0.11	0.9854	±0.023	-1.5097	±0.058	0.2259	–	±0.274
SA – 0.7	-5.2896	±0.12	0.9862	±0.022	-1.4544	±0.059	0.1936	–	±0.271
SA – 0.9	-5.4916	±0.12	0.9694	±0.024	-1.4638	±0.062	0.1342	–	±0.268
SA – 1.1	-5.6916	±0.11	1.0141	±0.023	-1.5366	±0.060	0.1332	–	±0.264
SA – 1.3	-5.8083	±0.11	1.0055	±0.024	-1.5575	±0.060	0.1430	–	±0.263
SA – 1.5	-5.8847	±0.12	0.9889	±0.022	-1.5766	±0.058	0.1547	–	±0.259



#### 4.10 CURVE DI PERICOLOSITÀ: RIEPILOGO DELLE ANALISI EFFETTUATE E RISULTATI

Le analisi effettuate seguono l'approccio probabilistico e secondo l'albero logico precedentemente descritti.

Nella fase 1 vengono di volta in volta effettuate delle assunzioni che sono implicitamente contenute nello schema dell'albero logico.

Nella fase 2 è stata replicata l'analisi secondo lo schema dell'albero logico considerando però la variabilità di alcuni fattori che notoriamente possono influenzare l'esito delle analisi:

- *Scelta della Magnitudo massima* (in fase 1 non aumentata, poi aumentata di 0.3 come suggerito dalle Linee Guida)
- *Valori di b derivanti dall'espressione di G&R*: (in fase 1 corretti perché comunque fatti ricadere all'interno dell'intervallo 0.8-1.2, poi non corretti)
- *Finestre di completezza*: (in fase 1 determinate dai cataloghi degli eventi riferiti specificatamente ad ogni zona sismogenetica adottata, poi sui cataloghi globali)

Di seguito si sintetizzano i fattori di variabilità delle analisi che sono implicitamente contenuti nell'albero logico e quelli invece che si riferiscono agli elementi modificati nella fase 1 e fase 2, nell'ambito dell'analisi di sensitività proposta.

<b>ASSUNZIONI/VARIABILITA'</b>	
<b>INTERVALLI DI COMPLETEZZA</b>	<b><i>Completezza specializzata</i></b>
	<b><i>Completezza globale</i></b>
<b>SIMULAZIONE DELLE ZONE SISMOGENETICHE</b>	<b><i>Zonazione ZS9</i></b>
	<b><i>Zonazione ZS2</i></b>
	<b><i>Area sources - ZS2</i></b>
	<b><i>Area plane - ZS2</i></b>
<b>MAGNITUDO MASSIMA</b>	<b><i>Mmax e b (G&amp;R)</i></b>
	<b><i>Mmax+0.3 e b (G&amp;R)</i></b>
<b>LEGGI DI ATTENUAZIONE</b>	<b><i>GMPE Globali</i></b>
	<b><i>GMPE Europee</i></b>
	<b><i>GMPE Italiane</i></b>
	<b><i>GMPE Regionali</i></b>

Nelle conclusioni si analizzeranno i pesi di ciascuno di tali elementi, in relazione alle incertezze in gioco, sui risultati e in termini di scostamento dallo spettro di Normativa. Ciò è importante in quanto, come definito nell'ambito delle Linee Guida dell'INGV *devono essere prese in considerazione le incertezze relative a tutti i dati di input, anche per la valutazione di scenari deterministici, per evitare sottostime degli scuotimenti.*

#### 4.11 FASE 1: SINTESI DEI RISULTATI

Dalle curve di pericolosità (riportate in allegato) sono stati estratti i valori di scuotimento (in termini di PGA), che sono riportati nella tabella successiva, riferiti alle 2 tipologie di terreno considerate (classi A e B), calcolati relativamente ai 2 periodi di ritorno di interesse di 1424 (SLV), 2475 (SLC) e per confronto anche 475 anni. Nella tabella vengono quindi anche riportati i valori ricavabili da NTC2008.

Si può vedere che il valore calcolato nell'ambito del presente studio è più basso di quello di Normativa.

<b>CONFRONTO TRA MEDIE PESATE RAMI &amp; NTC2008</b>				
<b>Zonazione</b>	<b>Categoria di Suolo</b>	<b>Tr (anni) - Pr (%)</b>	<b>PGA (g) - NTC2008</b>	<b>PGA (g) - Mmax</b>
<b>Media Pesata</b>	Classe A	475 - 10	0.156	0.110
<b>Media Pesata</b>	Classe A	1424 - 10	0.219	0.174
<b>Media Pesata</b>	Classe A	2475 - 5	0.256	0.213
<b>Media Pesata</b>	Classe B	475 - 10	0.187	0.134
<b>Media Pesata</b>	Classe B	1424 - 10	0.259	0.232
<b>Media Pesata</b>	Classe B	2475 - 5	0.292	0.284

Le figure riportate all'interno del capitolo "Allegati" (si riportano di seguito esclusivamente i grafici maggiormente significativi) illustrano, per ciascuno dei 3 periodi di ritorno considerati, gli spettri UHS ottenuti dalle diverse relazioni applicate ai 3 modelli di zonazione; viene anche rappresentato lo spettro medio ottenuto come media pesata dei vari spettri individuali dell'albero logico. Da evidenziare che è qui usata la media, e non la mediana (50esimo percentile) come adottato in MPS04.

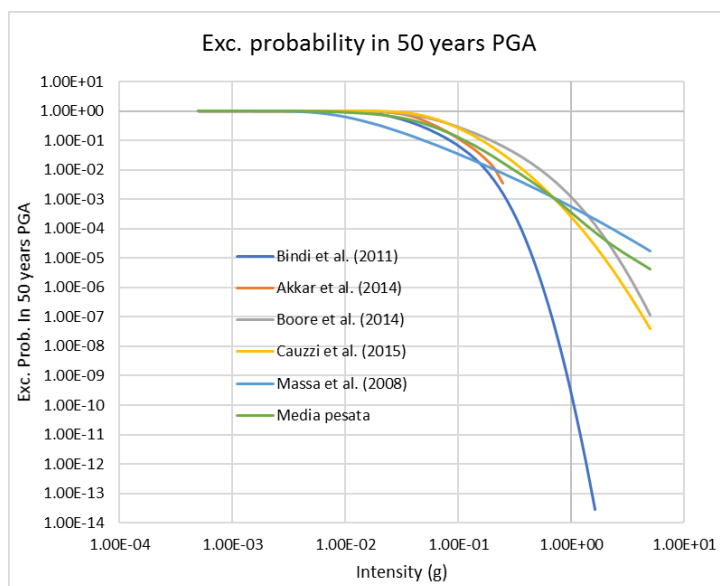


Figura 116 – Curve di pericolosità sismica per il sito di Cassa Baganza



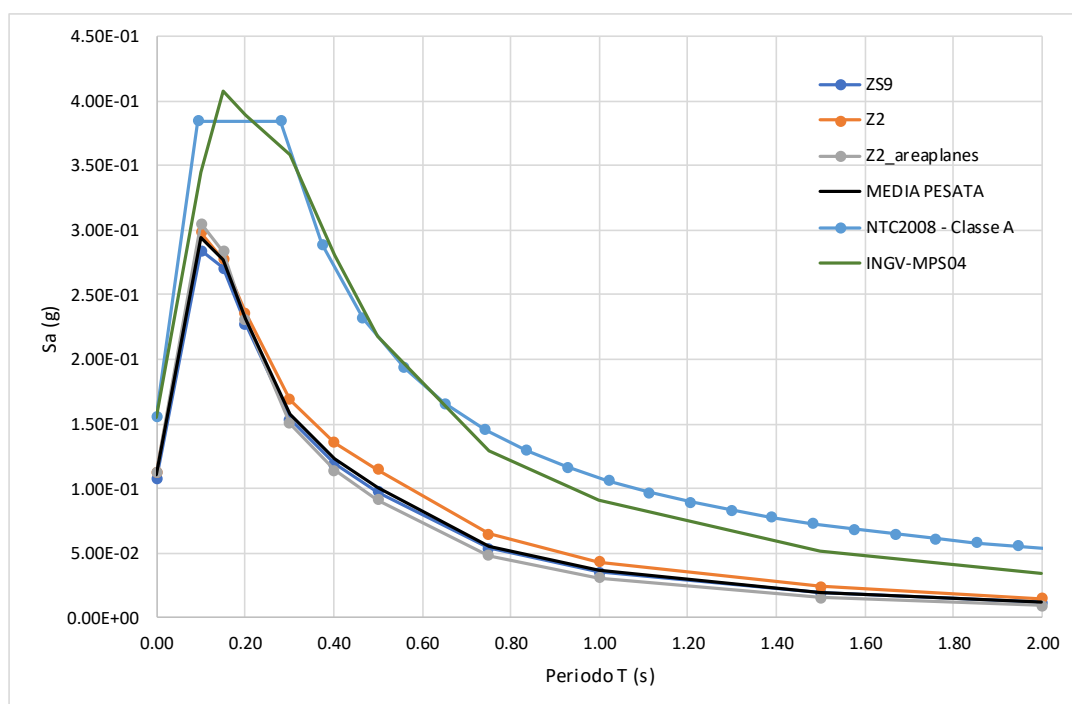


Figura 117 – Confronto tra lo spettro UHS ricavato dall'ALBERO LOGICO, lo spettro di normativa e lo spettro MPS04 per  $V_r=50$  anni,  $T_r=475$  anni e  $P_r=10\%$

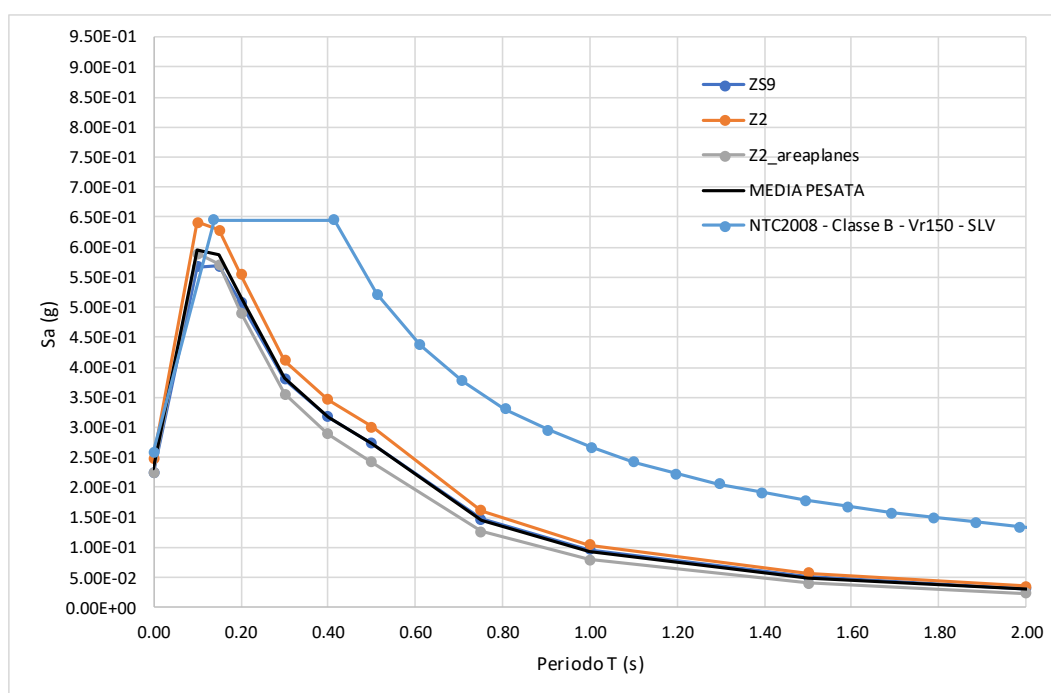


Figura 118 – Confronto tra lo spettro UHS ricavato dall'ALBERO LOGICO e lo spettro di normativa per  $V_r=150$  anni,  $T_r=1424$  anni e  $P_r=10\%$

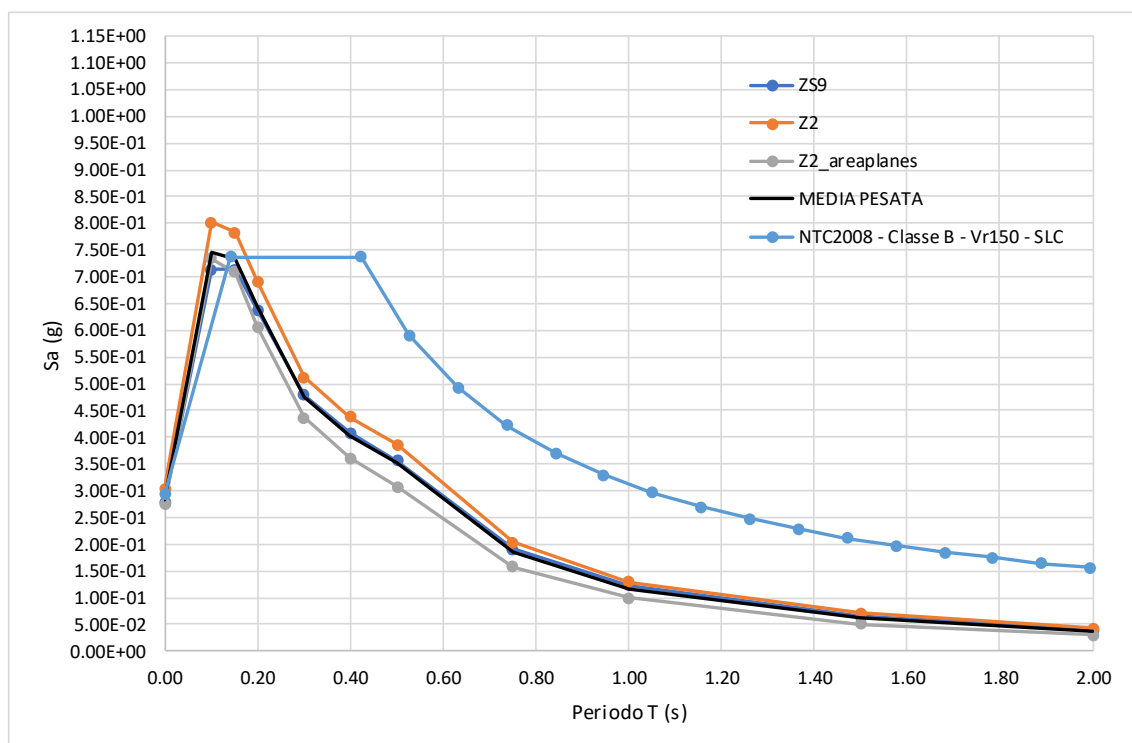


Figura 119 – Confronto tra lo spettro UHS ricavato dall'ALBERO LOGICO e lo spettro di normativa per Vr=150 anni, Tr=2475 anni e Pr=5%

La dispersione delle curve di pericolosità è chiaramente visibile negli allegati mentre è meno evidente tra le medie pesate riferibili ai tre rami. Si evidenzia una forte variabilità fornita dalle leggi di attenuazione con particolare riferimento a quelle globali ed inoltre un forte aumento dei valori all'aumentare della categoria di suolo da A a B, tanto più sensibile quanto più ci si riferisce alle leggi di attenuazione globali. I valori degli spettri tendono ad essere in alcuni casi superiori a quello di Normativa per periodi entro 0.2s mentre successivamente risultano sempre sensibilmente inferiori.

Il valore del periodo del modo di vibrare principale delle dighe in terra può essere determinato secondo la relazione:

$$T_1 = \frac{2.6 H}{V_s}$$

Dove H varia da 4 m a circa 15 m, mentre Vs del materiale dell'arginatura è compreso tra 200 e 300 m/s. Si ottiene dunque un periodo proprio compreso tra 0.05 e 0.20 sec.

Il confronto con i valori di normativa si riportano nella tabella seguente. Si osserva come tutti i valori di Sa(g) a T=0.05 sec e T=0.20 sec si mantengano sotto i rispettivi valori NTC2008 per il suolo di categoria A, mentre per la categoria B si ha un superamento a T=0.05 sec.



<b>CONFRONTO TRA MEDIE PESATE RAMI &amp; NTC2008</b>						
<b>Zonazione</b>	<b>Categoria di Suolo</b>	<b>Tr (anni) - Pr (%)</b>	<b>T=0.05 sec (g) - NTC2008</b>	<b>T=0.05 sec (g) - Mmax</b>	<b>T=0.20 sec (g) - NTC2008</b>	<b>T=0.20 sec (g) - Mmax</b>
<b>Media Pesata</b>	Classe A	475 - 10	0.278	0.202	0.384	0.231
<b>Media Pesata</b>	Classe A	1424 - 10	0.386	0.326	0.547	0.374
<b>Media Pesata</b>	Classe A	2475 - 5	0.449	0.406	0.645	0.466
<b>Media Pesata</b>	Classe B	475 - 10	0.290	0.239	0.461	0.289
<b>Media Pesata</b>	Classe B	1424 - 10	0.399	0.414	0.646	0.517
<b>Media Pesata</b>	Classe B	2475 - 5	0.450	0.515	0.737	0.645

#### 4.12 FASE 2: ANALISI DI SENSIBILITA' - SINTESI DEI RISULTATI

Sono state eseguite inoltre diverse analisi di sensitività al fine di valutare l'influenza sui risultati ottenuti dei differenti parametri in gioco. In particolare ci si è focalizzati sull'effetto dell'aumento di magnitudo massima di 0.3 suggerita dalle "Linee Guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe"; inoltre vengono adottati valori di "b" della relazione di Gutenberg & Richter non modificati rispetto all'analisi statistica in modo da non essere necessariamente contenuti nel range 0.80-1.20.

Un ulteriore studio di sensitività è stato condotto assumendo intervalli di completezza "globali" e riferendoli quindi a tutto il catalogo dei dati, questo porta ad avere un impatto sui tassi di sismicità calcolati. Questo caso è stato effettuato per confronto solo nel primo ramo dell'albero logico.

##### 4.12.1 Max+0.3 e "b" non corretto

In tale caso si considerano le Magnitudo massime valutate come precedentemente esplicitato e come riportato in allegato e si aggiunge un valore di 0.3, valore consigliato dalle "Linee Guida degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe". A differenza di quanto riportato in precedenza, non si impone il range di valori di "b" della relazione di Gutenberg&Richter.

Si ottengono così i seguenti valori di PGA (valutati per tutte le tipologie di zonazione e categorie di suolo A e B) i grafici in forma estesa degli spettri UHS sono riportati in allegato.

Tabella 8 – Confronto tra i valori di PGA ottenuti da: NTC2008, Magnitudo Massima, Magnitudo Massima + 0.3 e "b" non compresi tra 0.80 e 1.20

<b>CONFRONTO TRA <u>MmaxE</u> <u>Mmax+0.3</u></b>					
<b>Zonazione</b>	<b>Categoria di Suolo</b>	<b>Tr (anni) - Pr (%)</b>	<b>PGA (g) - NTC2008</b>	<b>PGA (g) - Mmax</b>	<b>PGA (g) - Mmax+0.3</b>
<b>ZS9</b>	Classe A	475 - 10	0.156	0.107	0.127
<b>ZS9</b>	Classe A	90 - 81	0.082	-	0.050
<b>ZS9</b>	Classe A	151 - 63	0.101	-	0.067
<b>ZS9</b>	Classe A	1424 - 10	0.219	0.172	0.207
<b>ZS9</b>	Classe A	2475 - 5	0.256	0.213	0.261
<b>ZS9</b>	Classe B	475 - 10	0.187	0.140	0.170

CONFRONTO TRA <i>MmaxE</i> <i>Mmax+0.3</i>					
Zonazione	Categoria di Suolo	Tr (anni) - Pr (%)	PGA (g) - NTC2008	PGA (g) - Mmax	PGA (g) - Mmax+0.3
ZS9	Classe B	90 - 81	0.098	-	0.069
ZS9	Classe B	151 - 63	0.121	-	0.090
ZS9	Classe B	1424 - 10	0.259	0.225	0.283
ZS9	Classe B	2475 - 5	0.292	0.278	0.357
Z2	Classe A	475 - 10	0.156	0.112	0.147
Z2	Classe A	90 - 81	0.082	-	0.064
Z2	Classe A	151 - 63	0.101	-	0.085
Z2	Classe A	1424 - 10	0.219	0.176	0.235
Z2	Classe A	2475 - 5	0.256	0.215	0.293
Z2	Classe B	475 - 10	0.187	0.159	0.204
Z2	Classe B	90 - 81	0.098	-	0.091
Z2	Classe B	151 - 63	0.121	-	0.119
Z2	Classe B	1424 - 10	0.259	0.247	0.327
Z2	Classe B	2475 - 5	0.292	0.304	0.406
Z2 - faglie	Classe A	475 - 10	0.156	0.112	0.136
Z2 - faglie	Classe A	90 - 81	0.082	-	0.058
Z2 - faglie	Classe A	151 - 63	0.101	-	0.077
Z2 - faglie	Classe A	1424 - 10	0.219	0.174	0.217
Z2 - faglie	Classe A	2475 - 5	0.256	0.212	0.270
Z2 - faglie	Classe B	475 - 10	0.187	0.145	0.155
Z2 - faglie	Classe B	90 - 81	0.098	-	0.080
Z2 - faglie	Classe B	151 - 63	0.121	-	0.105
Z2 - faglie	Classe B	1424 - 10	0.259	0.226	0.254
Z2 - faglie	Classe B	2475 - 5	0.292	0.274	0.320

Si nota come i valori di  $S_a$  ottenuti con l'aumento della magnitudo massima di 0.3 risultano, specialmente per la categoria di suolo B e per Z2, molto più elevati rispetto a quanto ottenuto con l'applicazione all'interno dell'analisi PSHA della sola magnitudo massima e ammettendo un range di valori di "b" compreso tra 0.80 e 1.20.

Si riportano i confronti tra spettri medi dei 3 rami principali.

Tabella 9 – Confronto tra i valori di PGA per le medie pesate tra i rami dell'albero logico, ottenuti da: NTC2008, Magnitudo Massima, Magnitudo Massima + 0.3 e "b" non compresi tra 0.80 e 1.20

CONFRONTO TRA MEDIE PESATE RAMI <i>MmaxE</i> <i>Mmax+0.3</i>					
Zonazione	Categoria di Suolo	Tr (anni) - Pr (%)	PGA (g) - NTC2008	PGA (g) - Mmax	PGA (g) - Mmax+0.3
Media Pesata	Classe A	475 - 10	0.156	0.110	0.136
Media Pesata	Classe A	90 - 81	0.082	-	0.057



<b>Media Pesata</b>	Classe A	151 - 63	0.101	-	0.076
<b>Media Pesata</b>	Classe A	1424 - 10	0.219	0.174	0.235
<b>Media Pesata</b>	Classe A	2475 - 5	0.256	0.213	0.268
<b>Media Pesata</b>	Classe B	475 - 10	0.187	0.134	0.176
<b>Media Pesata</b>	Classe B	90 - 81	0.098	-	0.080
<b>Media Pesata</b>	Classe B	151 - 63	0.121	-	0.103
<b>Media Pesata</b>	Classe B	1424 - 10	0.259	0.232	0.288
<b>Media Pesata</b>	Classe B	2475 - 5	0.292	0.284	0.361

In classe B e soprattutto allo SLC si evidenzia un sensibile aumento del valore di PGA (0.361) rispetto a quello derivato dalle analisi precedenti e rispetto a quello di Normativa. Gli spettri evidenziano valori nettamente superiori a quelli di Normativa per periodi fino a 0.2s.

Come nel paragrafo precedente, si riportano i confronti effettuati per i periodi propri della diga in terra, valutati essere compresi tra 0.05 e 0.20 sec.

<b>CONFRONTO TRA MEDIE PESATE RAMI &amp; NTC2008</b>						
<b>Zonazione</b>	<b>Categoria di Suolo</b>	<b>Tr (anni) - Pr (%)</b>	<b>T=0.05 sec (g) - NTC2008</b>	<b>T=0.05 sec (g) - Mmax+0.3</b>	<b>T=0.20 sec (g) - NTC2008</b>	<b>T=0.20 sec (g) - Mmax+0.3</b>
<b>Media Pesata</b>	Classe A	475 - 10	0.278	0.245	0.384	0.297
<b>Media Pesata</b>	Classe A	90 - 81	0.150	0.101	0.202	0.123
<b>Media Pesata</b>	Classe A	151 - 63	0.183	0.135	0.248	0.161
<b>Media Pesata</b>	Classe A	1424 - 10	0.386	0.431	0.547	0.551
<b>Media Pesata</b>	Classe A	2475 - 5	0.449	0.493	0.645	0.638
<b>Media Pesata</b>	Classe B	475 - 10	0.290	0.308	0.461	0.403
<b>Media Pesata</b>	Classe B	90 - 81	0.155	0.136	0.242	0.174
<b>Media Pesata</b>	Classe B	151 - 63	0.190	0.180	0.298	0.230
<b>Media Pesata</b>	Classe B	1424 - 10	0.399	0.513	0.646	0.684
<b>Media Pesata</b>	Classe B	2475 - 5	0.450	0.649	0.737	0.875

Si evidenzia dunque un superamento dei valori di  $S_a$  (g) di normativa per i periodi di riferimento  $T = 0.05$  sec e  $T = 0.20$  sec e classi di suolo (A e B).

#### 4.12.2 Intervalli di completezza globali

Si analizzano di seguito le diversità evidenziate nel considerare una completezza globale o una completezza specializzata per ogni singola zona ZSS. Si fa poi un raffronto tra le finestre di completezza utilizzate nel presente lavoro e quelle invece implementate per la zonizzazione sismogenetica ZS9 (MPS04).

Come mostrato nella seguente tabella sono presenti delle differenze, legate soprattutto al fatto che gli intervalli di completezza specializzati utilizzati nelle precedenti analisi sono realizzati con meno eventi sismici rispetto alla

completezza globale, ma si ritiene vi sia una corrispondenza piuttosto marcata tra i due intervalli di completezza per la maggior parte delle classi di magnitudo.

Tabella 10 – Confronto tra intervalli di completezza specializzato per ogni zona (valore medio delle zone) e globale

Condizione	ANNO COMPLETEZZA (media tra gli intervalli di completezza specializzati)	ANNO COMPLETEZZA (completezza globale)
M $\geq$ 3.0	1897	1900
M $\geq$ 3.5	1884	1800
M $\geq$ 4.0	1853	1750
M $\geq$ 4.5	1786	1700
M $\geq$ 5.0	1584	1550
M $\geq$ 5.5	1416	1450
M $\geq$ 6.0	1298	1300
M $\geq$ 6.5	1285	1005

Si riportano inoltre i confronti tra gli intervalli di completezza ottenuti per ogni zona nel presente lavoro e quelli (sia storici che statistici) implementati per lo studio MPS04.

Tabella 11 – Confronto tra intervalli di completezza specializzati (ZS9 e Z2) e intervalli di completezza storici (MPS04)

Nome ZS (Completezza storica)		MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2
		4.76	4.50	4.99	5.00	5.45	5.50	5.91	6.00	6.14	6.00	6.60	6.50
Grigioni - Valtellina	903	1871	1800	1871	1300	1700	1300	1530	1300	1300	1300	1300	1295
Friuli - Veneto Orientale	905	1836	1850	1836	1700	1530	1700	1300	1500	1300	1500	1100	1301
Garda - Veronese	906	1836	1875	1836	1700	1530	1200	1300	1183	1300	1183	1100	1183
Bergamasco	907	1836	1800	1836	1100	1530	1065	1300	1065	1300	1065	1100	1065
Nizza - Sanremo	910	1871	1700	1871	1575	1700	1575	1530	1564	1300	1564	1300	1564
Savona - Valle Scrivia	911	1871	1850	1871	1600	1700	1541	1530	1541	1300	1541	1300	1541
Dorsale Ferrarese	912	1836	1875	1836	1400	1530	1234	1300	1234	1300	1234	1100	1234
Appennino Emiliano-Romagnolo	913	1836	1800	1836	1800	1530	1450	1300	1174	1300	1174	1100	1174
Forlivese	914	1836	1800	1836	1700	1530	1600	1300	1194	1300	1194	1100	1194
Garfagnana - Mugello	915	1871	1725	1871	1475	1650	1475	1530	1464	1300	1464	1300	1464
Versilia-Chianti	916	1871	1800	1871	1450	1530	1300	1300	1148	1300	1148	1200	1148
Rimini - Ancona	917	1836	1850	1836	1850	1650	1650	1530	1269	1530	1269	1200	1269
Medio-Marchigiana/Abruzzese	918	1871	1700	1871	1600	1650	1600	1530	1600	1530	1600	1300	1384
Val Tiberina	919	1871	1700	1871	1700	1530	1700	1300	1246	1300	1246	1200	1246
Trasimeno-Ceccano	920	1871	1750	1871	1700	1650	1005	1300	1005	1300	1005	1200	1005
Etruria	921	1871	1700	1871	1700	1530	1300	1300	1276	1300	1276	1200	1276



Tabella 12 – Confronto tra intervalli di completezza specializzati (ZS9 e Z2) e intervalli di completezza statistici (MPS04)

Nome ZS (Completezza statistica)		MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2	MPS04	ZS9/Z2
		4.76	4.50	4.99	5.00	5.45	5.50	5.91	6.00	6.14	6.00	6.60	6.50
<b>Grigioni - Valtellina</b>	<b>903</b>	<b>1910</b>	1800	<b>1871</b>	1300	<b>1700</b>	1300	<b>1530</b>	1300	<b>1530</b>	1300	<b>1300</b>	1295
<b>Friuli - Veneto Orientale</b>	<b>905</b>	<b>1910</b>	1850	<b>1871</b>	1700	<b>1700</b>	1700	<b>1530</b>	1500	<b>1530</b>	1500	<b>1400</b>	1301
<b>Garda - Veronese</b>	<b>906</b>	<b>1910</b>	1875	<b>1871</b>	1700	<b>1700</b>	1200	<b>1530</b>	1183	<b>1530</b>	1183	<b>1400</b>	1183
<b>Bergamasco</b>	<b>907</b>	<b>1910</b>	1800	<b>1871</b>	1100	<b>1700</b>	1065	<b>1530</b>	1065	<b>1530</b>	1065	<b>1400</b>	1065
<b>Nizza - Sanremo</b>	<b>910</b>	<b>1910</b>	1700	<b>1871</b>	1575	<b>1700</b>	1575	<b>1530</b>	1564	<b>1530</b>	1564	<b>1300</b>	1564
<b>Savona - Valle Scrivia</b>	<b>911</b>	<b>1910</b>	1850	<b>1871</b>	1600	<b>1700</b>	1541	<b>1530</b>	1541	<b>1530</b>	1541	<b>1300</b>	1541
<b>Dorsale Ferrarese</b>	<b>912</b>	<b>1910</b>	1875	<b>1871</b>	1400	<b>1700</b>	1234	<b>1530</b>	1234	<b>1530</b>	1234	<b>1400</b>	1234
<b>Appennino Emiliano-Romagnolo</b>	<b>913</b>	<b>1910</b>	1800	<b>1871</b>	1800	<b>1700</b>	1450	<b>1530</b>	1174	<b>1530</b>	1174	<b>1400</b>	1174
<b>Forlivese</b>	<b>914</b>	<b>1910</b>	1800	<b>1871</b>	1700	<b>1700</b>	1600	<b>1530</b>	1194	<b>1530</b>	1194	<b>1400</b>	1194
<b>Garfagnana - Mugello</b>	<b>915</b>	<b>1920</b>	1725	<b>1871</b>	1475	<b>1700</b>	1475	<b>1700</b>	1464	<b>1530</b>	1464	<b>1300</b>	1464
<b>Versilia-Chianti</b>	<b>916</b>	<b>1920</b>	1800	<b>1871</b>	1450	<b>1700</b>	1300	<b>1700</b>	1148	<b>1530</b>	1148	<b>1300</b>	1148
<b>Rimini - Ancona</b>	<b>917</b>	<b>1920</b>	1850	<b>1871</b>	1850	<b>1700</b>	1650	<b>1700</b>	1269	<b>1530</b>	1269	<b>1300</b>	1269
<b>Medio-Marchigiana/Abruzzese</b>	<b>918</b>	<b>1920</b>	1700	<b>1871</b>	1600	<b>1700</b>	1600	<b>1700</b>	1600	<b>1530</b>	1600	<b>1300</b>	1384
<b>Val Tiberina</b>	<b>919</b>	<b>1920</b>	1700	<b>1871</b>	1700	<b>1700</b>	1700	<b>1530</b>	1246	<b>1530</b>	1246	<b>1300</b>	1246
<b>Trasimeno-Ceccano</b>	<b>920</b>	<b>1920</b>	1750	<b>1871</b>	1700	<b>1700</b>	1005	<b>1700</b>	1005	<b>1530</b>	1005	<b>1300</b>	1005
<b>Etruria</b>	<b>921</b>	<b>1920</b>	1700	<b>1871</b>	1700	<b>1700</b>	1300	<b>1700</b>	1276	<b>1530</b>	1276	<b>1300</b>	1276

Nella maggior parte dei casi gli intervalli di completezza specializzati risultano essere del medesimo ordine di grandezza e ben approssimano quelli della MPS04. Le differenze sono dovute al differente numero di dati trattato nelle due analisi e ai cataloghi utilizzati (ed aggiornamento degli stessi) per estrapolare gli intervalli.

L'analisi PSHA è stata quindi ripetuta esclusivamente per la zonazione sismica ZS9 (primo ramo albero logico) per la categoria di suolo A e B utilizzando degli intervalli di completezza su scala globale (ovvero utilizzando tutti i dati presenti nei cataloghi e non riferendosi a quelli contenuti alla singola ZS). Questo ha portato ad una differente valutazione degli spettri UHS, che vengono di seguito riportati (in allegato si riportano i grafici in forma estesa).

Dalla tabella e dal grafico seguente risulta quindi come i valori di PGA (ZS9-Classe A e B) dell'elaborazione fatta con intervalli di completezza specifici e globali risultano inferiori a quelli dello spettro di normativa. Si ha inoltre che i valori di PGA ottenuti dall'analisi conseguente all'imposizione di intervalli di completezza specifici sono superiori a quelli ottenuti con completezza "globale".

Tabella 13 – Confronto tra i valori di PGA ottenuti da: NTC2008, intervalli di completezza specifici per ogni ZS, intervalli di completezza globali

<b>CONFRONTO TRA <u>COMPLETEZZA SPECIALIZZATA</u> E <u>COMPLETEZZA GLOBALE</u></b>				
Categoria di Suolo	Tr (anni) - Pr (%)	PGA (g) - NTC2008	PGA (g) - Media Pesata	
			Completezza Specializzata	Completezza Globale
Classe A	475 - 10	0.156	0.107	0.107
Classe A	1424 - 10	0.219	0.172	0.172
Classe A	2475 - 5	0.256	0.213	0.213
Classe B	475 - 10	0.187	0.140	0.119
Classe B	1424 - 10	0.259	0.225	0.195
Classe B	2475 - 5	0.292	0.278	0.244

L'analisi evidenzia una moderata diminuzione dei valori di PGA rispetto a quelli determinati dall'analisi precedente.

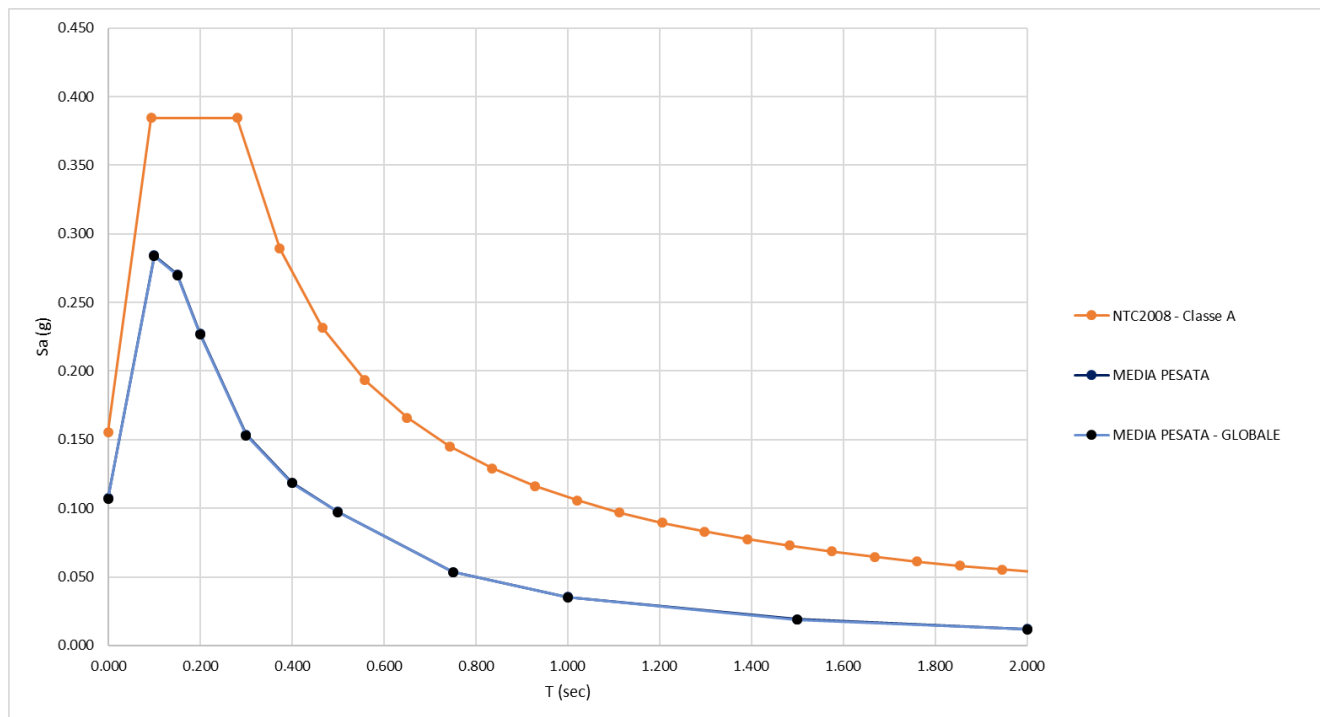


Figura 120 – Confronto tra UHS ottenuto con intervalli di completezza specifici per ogni ZSS e UHS ricavato da intervalli di completezza valutati globalmente – Classe A – Spetto a  $V_r=50$  anni,  $T_r=475$  anni,  $P_r=10\%$

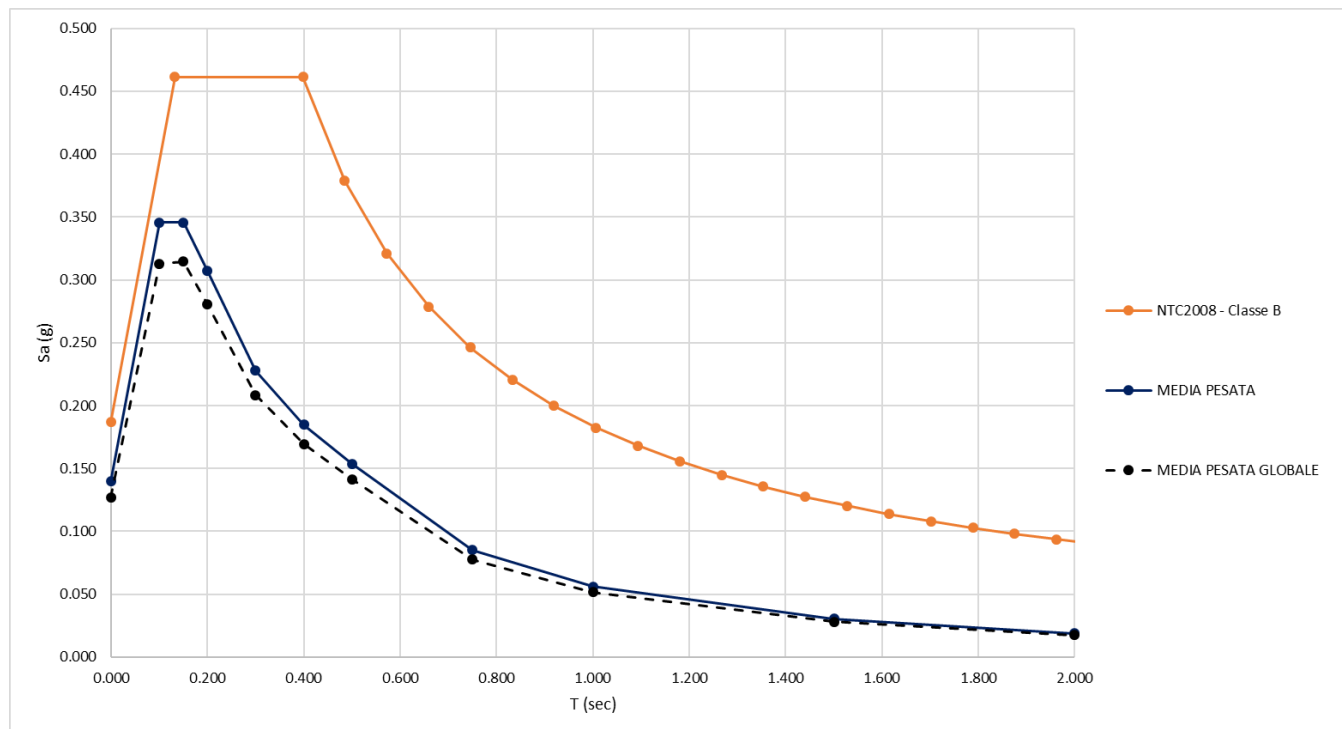


Figura 121 – Confronto tra UHS ottenuto con intervalli di completezza specifici per ogni ZSS e UHS ricavato da intervalli di completezza valutati globalmente – Classe B – Spetto a  $V_r=50$  anni,  $T_r=475$  anni,  $P_r=10\%$



## 5 CONSIDERAZIONI E CONCLUSIONI FINALI

### 5.1 CONSIDERAZIONI– RISCHIO SCUOTIMENTO SISMICO

Per l'opera della Cassa di Espansione del Torrente Baganza è stata stimata la pericolosità sismica (PSHA) in termini di PGA ed accelerazione spettrale (AS) per il periodo di ritorno di 475 anni, standard di riferimento per la progettazione sismica, e per i periodi di ritorno di 1424 e 2475 anni, corrispondenti rispettivamente allo Stato Limite di Vita (SLV) e allo Stato Limite di Collasso (SLC).

L'analisi ha evidenziato una sensibilità (elevata o moderata, ma mai trascurabile) dei risultati nei confronti delle ipotesi/scelte assunte.

Di seguito si riporta una sintesi del peso sui risultati, in termini di scostamento dallo spettro di Normativa, delle variabilità assunte nell'ambito di questo studio.

	ASSUNZIONI/VARIABILITA'		Variabilità del risultato ( <i>S<sub>a</sub></i> )	
			ELEVATA	MODERATA
<i>Analisi di sensibilità</i>	INTERVALLI DI COMPLETEZZA	<i>Completezza specializzata</i>		
		<i>Completezza globale</i>		
<i>Albero logico</i>	SIMULAZIONE DELLE ZONE SISMOGENETICHE	<i>Zonazione ZS9</i>		
		<i>Zonazione ZS2</i>		
		<i>Area sources - ZS2</i>		
		<i>Area plane - ZS2</i>		
<i>Analisi di sensibilità</i>	MAGNITUDO MASSIMA	<i>Mmax e b (G&amp;R)</i>		
		<i>Mmax+0.3 e b (G&amp;R)</i>		
<i>Albero logico</i>	LEGGI DI ATTENUAZIONE	<i>GMPE Globali</i>		
		<i>GMPE Europee</i>		
		<i>GMPE Italiane</i>		
		<i>GMPE Regionali</i>		

La maggiore sensibilità che si è desunta dalle analisi di sensibilità si riferisce ai seguenti elementi:

- Scelta della magnitudo massima
- Correzione dei valori b di G&R
- Leggi di attenuazione e classe di suolo
- Scelta dei intervalli di completezza

Un aumento della magnitudo massima di 0.3 come suggerito dalle linee guida INGV fa aumentare sensibilmente gli spettri, in particolare in categoria B e quindi la PGA, soprattutto allo SLC. Valori di magnitudo massima non aumentati forniscono invece spettri e valori di PGA inferiori a quelli di Normativa soprattutto in classe di suolo A.

La scelta delle leggi di attenuazione modifica radicalmente tutti i risultati con valori notevolmente superiori a quelli di Normativa (soprattutto in classe di suolo B) nel caso si adottino leggi di natura globale (elaborate con dati provenienti

da tutto il mondo), nonostante si sia dato più peso a quelle italiane e locali. Tale circostanza è legata all'uso di relazioni di attenuazione (GMPE) su scala globale, europea, nazionale e regionale, più recenti ed aggiornate rispetto a quelle utilizzate per la mappa MPS04.

C'è da dire al proposito che le leggi nazionali, benché calate nel contesto locale e più aggiornate di quelle utilizzate per la mappa MPS04, non sono però recenti al pari di quelle globali, pertanto tale scelta non è da considerarsi del tutto conservativa.

Si riporta di seguito la tabella esplicativa (confronto completo per la sola zonazione ZS9) delle principali analisi di sensitività mostrate precedentemente.

Tabella 14 – Confronto per la ZS9 tra i valori di PGA ottenuti da: NTC2008, intervalli di completezza specifici per ogni ZSS, intervalli di completezza globali, Mmax e Mmax+0.3

CONFRONTO TRA $M_{max}/M_{max+0.3}$ E COMPLETEZZA GLOBALE/SPECIALIZZATA						
Zonazione	Categoria di Suolo	Tr (anni) - Pr (%)	PGA (g) - NTC2008	Completezza Globale	Completezza Specializzata	
				PGA (g) - Mmax	PGA (g) - Mmax	PGA (g) - Mmax+0.3
ZS9	Classe A	475 - 10	0.156	0.107	0.107	0.127
ZS9	Classe A	1424 - 10	0.219	0.172	0.172	0.207
ZS9	Classe A	2475 - 5	0.256	0.213	0.213	0.261
ZS9	Classe B	475 - 10	0.187	0.119	0.140	0.170
ZS9	Classe B	1424 - 10	0.259	0.195	0.225	0.283
ZS9	Classe B	2475 - 5	0.292	0.244	0.278	0.357

Una sensibilità moderata, ma non trascurabile, si è invece riscontrata nei confronti dei seguenti elementi comunque analizzati nell'ambito della struttura ad albero logico:

- Zonazione specifica
- Modellazione delle sorgenti

Come si è precedentemente descritto, il calcolo della pericolosità sismica è basato sia sulla zonazione ZS9, che sulla zonazione Z2 (OGS) (per una percentuale superiore, pari al 60%), quest'ultima, con zone più piccole, tiene in considerazione le caratteristiche omogenee locali delle sorgenti sismogenetiche.

### 5.1.1 Influenza delle singole assunzioni sui risultati

Di seguito si evidenzia quali siano le variabilità nei confronti della normativa (in termini di accelerazione spettrale  $S_a$ , per i valori di  $T=0.00$  sec e  $T=0.15$  sec) per le varie casistiche affrontate.

Le variabilità sono quindi valutate esclusivamente per la classe di suolo B e per i tempi di ritorno ( $T_r$ ) 475 anni, 1424 anni e 2475 anni. Le tabelle a cui si riferiscono i commenti di seguito riportati vengono riportate negli allegati.

#### Intervalli di completezza



Si evidenzia quindi come la “completezza globale” fornisce dei valori di  $\Delta Sa$  negativi e minori rispetto a quanto valutato con la “completezza specializzata”, quindi considerando intervalli di completezza valutati globalmente si può parlare di una “sottostima” dei parametri di scuotimento del suolo.

Avendo valutato quindi la metodologia che comprende l’uso di intervalli di completezza “specializzata” come maggiormente conservativa si è deciso di applicarla per ottenere lo scuotimento sismico al sito.

#### Zonazioni sismogenetiche

Le considerazioni che si vanno ad esporre sono le medesime sia per le variabilità evidenziate in termini di PGA, che per un periodo spettrale di  $T=0.15$  sec (periodo scelto poiché coincidente al picco di maggior intensità delle accelerazioni spettrali).

Confrontando le variabilità calcolate per le 3 zonazioni, si può affermare che i valori maggiori di  $\Delta Sa$  (e quindi positivi e superiori allo spettro di normativa) si sono ottenuti per la “ZS2 – Area source”, che quindi risulta essere la componente che maggiormente incide sul risultato finale in termini di scuotimento del suolo.

L'utilizzo inoltre della zonazione sismogenetica ZS2 rispetto alla ZS9 risulta essere conservativa per quanto riguarda la metodologia di implementazione "area source" poiché prevede la suddivisione in zone di dimensioni ridotte nell'intorno del sito di interesse, con quindi meno dispersione dei dati.

#### Magnitudo massima e valori di $b$ di G&R

Un aspetto che incide sul risultato in termini di  $Sa$  (g) è sicuramente la determinazione della magnitudo massima attesa, all'interno " *Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe* " si prescrive la maggiorazione della magnitudo massima di 0.3, tale aspetto è stato valutato come conservativo e conforme al documento citato redatto dall'INGV, quindi non si è ritenuto opportuno trascurarlo.

Concentrandosi quindi sulla completezza specializzata, si evidenzia uno scarto netto, in tutte le tre le zonazioni sismogenetiche, tra i valori di  $\Delta Sa$  ottenuti con la maggiorazione della magnitudo massima di 0.3. Inoltre si rilevano valori di variabilità positiva, quindi spettri che superano il valore di normativa NTC2008.

#### Leggi di attenuazione

Per quanto riguarda le leggi di attenuazione si sono considerate quelle consigliate dalle " *Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe* ", nonostante non siano le più aggiornate (si fermano infatti al massimo all'anno 2015) alcune di queste forniscono valori cautelativi, specialmente le GMPE a livello globale, poiché, sebbene si riferiscano ad aree geografiche distanti dal territorio italiano, riescono a cogliere i principali aspetti del moto sismico grazie alla loro calibrazione su un numero più elevato di dati.

Si può valutare infatti (prendendo come riferimento il caso di “ $M_{max}+0.3$  e  $b$  non corretto”) come le leggi di attenuazione di Akkar et al. (2014), Boore et al. (2014) e Cauzzi et al. (2015) forniscano  $\Delta Sa$  positivi per tutte e tre le zonazioni utilizzate. Si specifica inoltre che tali GMPE sono di origine Globale ed Europea. Mentre si hanno variazioni di accelerazione spettrale minori (anche negative) se si considerano le GMPE di Bindi et al. 2011 e Massa et al. 2008, quindi leggi di attenuazione di origine nazionale e regionale.

## 5.2 CONCLUSIONI ALL'ANALISI PSHA –

### 5.2.1. RISCHIO SCUOTIMENTO SISMICO – SPETTRI ORIZZONTALI

Si è riscontrata una sensibilità dei risultati rispetto ad alcune assunzioni, più elevata per alcune scelte (scelta magnitudo massima, leggi di attenuazione, finestre di completezza, valori di b di G&R); al proposito bisogna tenere conto di quanto suggerito dalle Linee Guida INGV, per cui *“devono essere prese in considerazione le incertezze relative a tutti i dati di input, anche per la valutazione di scenari deterministici, per evitare sottostime degli scuotimenti”*

Le assunzioni effettuate rispecchiano le incertezze in gioco e relative ai dati di input o alle leggi assunte: alcune di queste incertezze sono state gestite attraverso una struttura ad albero logico altre attraverso un'analisi di sensibilità.

Si riporta al proposito il parere Ministero evidenziando i seguenti stralci:

- *“il competente Ufficio ha giudicato i risultati ottenuti con le analisi denominate di II Fase estremamente cautelativi, per quanto derivati da un approccio metodologico concettualmente coerente con quanto indicato nelle linee guida emanate da questa Direzione Generale”.*
- *“lo studio può essere posto alla base delle verifiche sismiche e della progettazione”;*

Alla luce di quanto suggerito dalle linee guida infatti *“devono essere prese in considerazione le incertezze relative a tutti i dati di input, anche per la valutazione di scenari deterministici, per evitare sottostime degli scuotimenti”.*

Alla luce di ciò si ritiene che in generale gli spettri di riferimento a conclusione di questo studio siano quelli che assumono i richiesti margini di sicurezza (capitolo 6.4.9. e tabella seguente) per tenere conto delle incertezze in gioco riscontrate durante le elaborazioni: in particolare si assumono come spettri di riferimento quelli compatibili con la scelta della magnitudo massima incrementata di 0.3, come suggerito dalle linee guida INGV, intervalli di completezza specializzati, valori di b non corretti, che corrispondono alle tre macro-voci che influenzano maggiormente l'esito dello studio come meglio specificato nel seguito..

Categoria di Suolo	Tr (anni) - Pr (%)	PGA (g)
Classe A	475 - 10	0.136
Classe A	90 – 81 (SLO)	0.057
Classe A	151 – 63 (SLD)	0.076
Classe A	1424 - 10 (SLV)	0.235
Classe A	2475 - 5 (SLC)	0.268
Classe B	475 - 10	0.176
Classe B	90 – 81 (SLO)	0.080
Classe B	151 – 63 (SLD)	0.103
Classe B	1424 - 10 (SLV)	0.288
Classe B	2475 - 5 (SLC)	0.361

Tale scelta non corrisponde all'involuppo dei massimi valori in quanto come discusso in precedenza l'influenza degli altri fattori quali ad esempio le leggi di attenuazione e le diverse zonazioni risultano pesate nell'ambito della struttura ad albero logico per cui non vengono considerati come valori quelli massimi riscontrati bensì quelli pesati.



## 5.2.2. – RISCHIO SCUOTIMENTO SISMICO – SPETTRI VERTICALI

Congruentemente con quanto concluso nel capitolo precedente si effettua il calcolo degli spettri verticali nelle ipotesi precedentemente esposte.

La componente verticale del moto del suolo per strutture critiche ed impianti speciali, come la diga in esame, deve essere considerata nel caso della progettazione sismica. Tale componente del moto solitamente non viene considerata nella progettazione sismica delle strutture standard.

In linea con quanto specificato all'interno dei codici normativi esistenti (NTC2008), l'entità della componente verticale del moto sismico assume un valore compreso tra 1/2 e 2/3 il valore della componente orizzontale.

La normativa suggerisce dunque la scalatura della forma spettrale ( $S_a$ ), originariamente derivata dalla componente orizzontale, con un rapporto medio V/H di 2/3. Tale rapporto è stato originariamente proposto da Newmark et al. (1973) (Newmark, N. M. (1973). *A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra*. Washington D.C.).

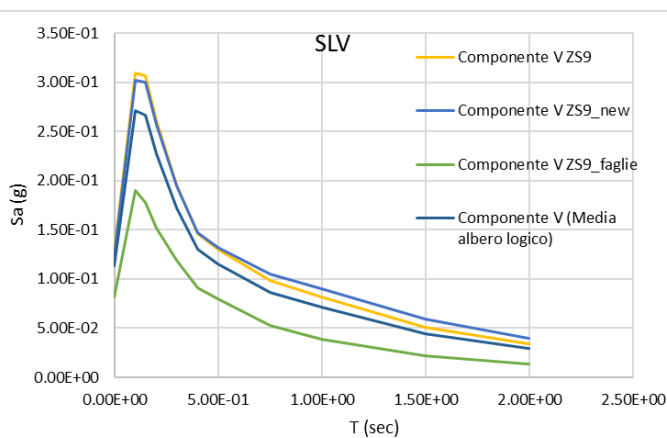
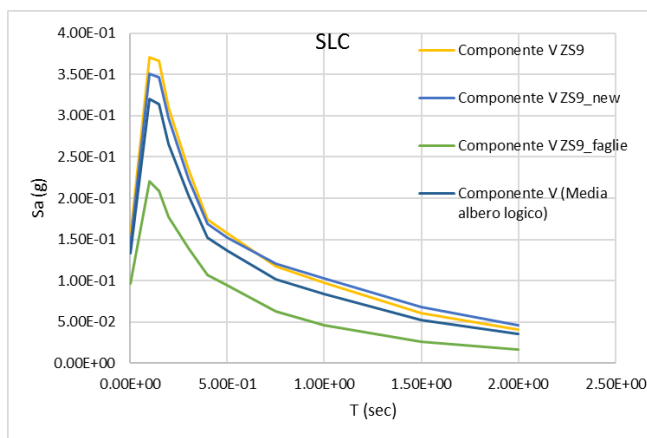
Nel presente lavoro, al fine di verificare che il rapporto tra componente verticale e orizzontale del moto sia pari a 2/3, si è realizzata la valutazione della pericolosità sismica (PSHA) per la componente verticale adottando come campione di esempio la GMPE di Bindi et al. 2011 nella sua formulazione calibrata sulle componenti verticali del moto nella condizione di  $M_{max}+0.3$  e "b" non corretto.

### 5.2.1.1 Risultati PSHA componente verticale (Bindi et al. 2011)

Si mostrano dunque nelle figure seguenti i risultati dell'analisi PSHA per quanto riguarda la componente verticale del moto utilizzando la GMPE di Bindi et al. (2011) calibrata sulle componenti verticali del moto.

L'analisi porta alla valutazione di valori massimi di accelerazione verticale ( $PGA_v$ ) pari a:

	$PGA_v$ (g)			
	SLC	SLV	SLD	SLO
<b>ZS9</b>	0.154	0.128	0.046	0.035
<b>ZS2</b>	0.144	0.124	0.053	0.041
<b>ZS2_areaplanes</b>	0.096	0.082	0.034	0.026
<b>MEDIA PESATA</b>	0.134	0.113	0.045	0.034



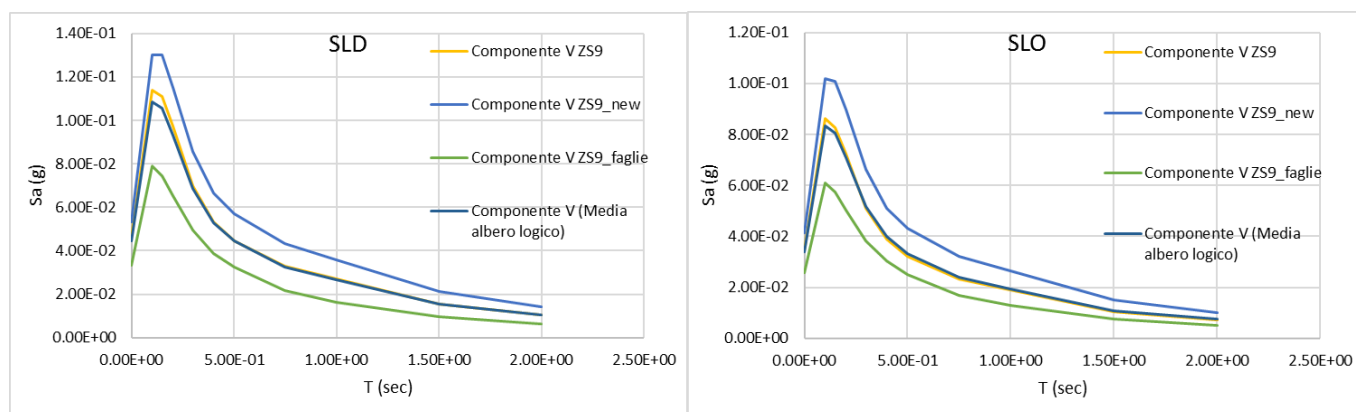


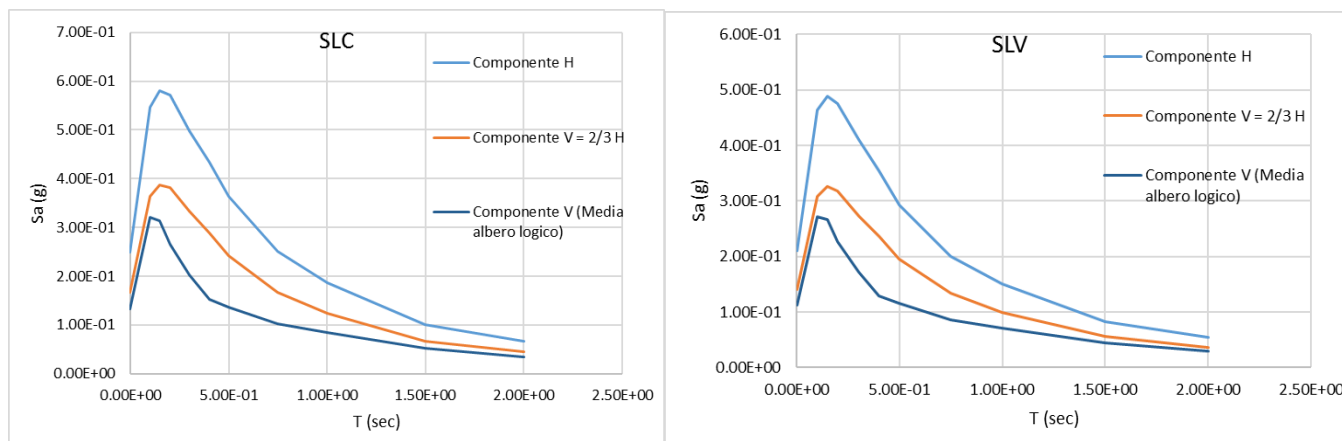
Figura 122 – Spettri inerenti alle componenti verticali del moto sismico derivati dall’analisi PSHA eseguita tramite la GMPE di Bindi et al. (2011) per SLC, SLV, SLD, SLO

### 5.2.1.2 Valutazione dello spettro verticale secondo Newmark (1973)

Al fine di confermare quanto affermato dallo studio di Newmark et al. (1973) si mostra il confronto con lo spettro della componente orizzontale abbattuto del rapporto pari a 2/3.

Dalle figure e dalla tabella seguente si evidenzia come per tutti i valori di periodo  $T$  i valori di ordinata spettrale calcolata tramite PSHA specifica siano inferiori a quelli ottenuti con il rapporto 2/3, mostrando dunque come tale fattore ricavato dallo studio di Newmark (1973) sia a favore di sicurezza ed in linea con le Norme Tecniche 2008.

	PGA <sub>v</sub> (g)			
	SLC	SLV	SLD	SLO
<b>MEDIA PESATA (Bindi et al. (2011))</b>	0.134	0.113	0.045	0.034
<b>V = 2/3 H (Newmark (1973))</b>	0.166	0.140	0.053	0.040





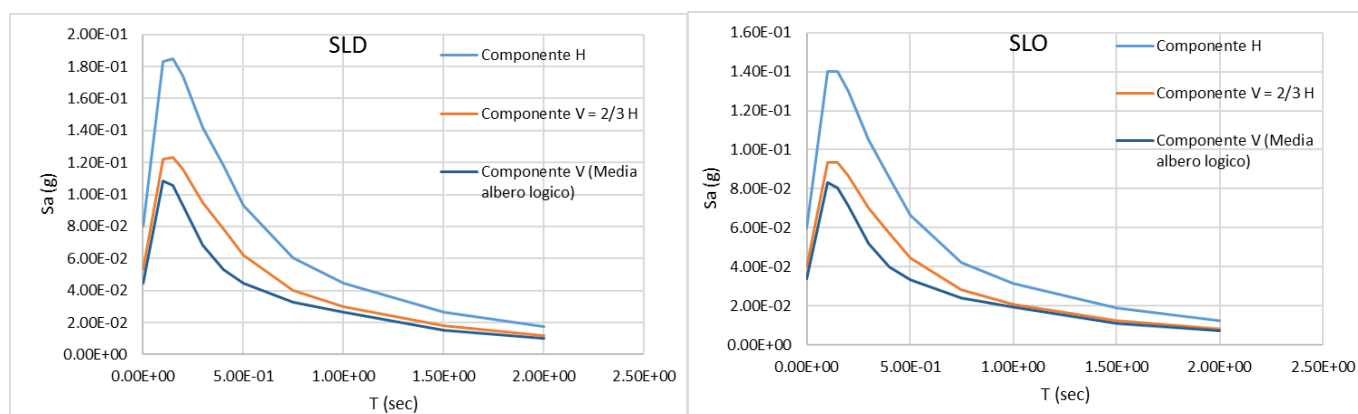


Figura 123 – Confronto tra spettro medio ottenuto da analisi PSHA e tramite fattore riduttivo di 2/3 proposto da Newmark (1973) per SLC, SLV, SLD, SLO

Si riportano pertanto in allegato i grafici che mostrano gli spettri della componente verticale del moto desunti dal presente studio, ovvero gli spettri medi orizzontali derivati dalla media pesata descritta nell'albero logico, moltiplicata per il rapporto 2/3 confermato in tale capitolo. Si riportano quindi di seguito i valori di  $PGA_v$  ottenuti per la classe di suolo B e la condizione di analisi  $M_{max}+0.3$  e "b" non corretto, per tutti e quattro gli stati limite.

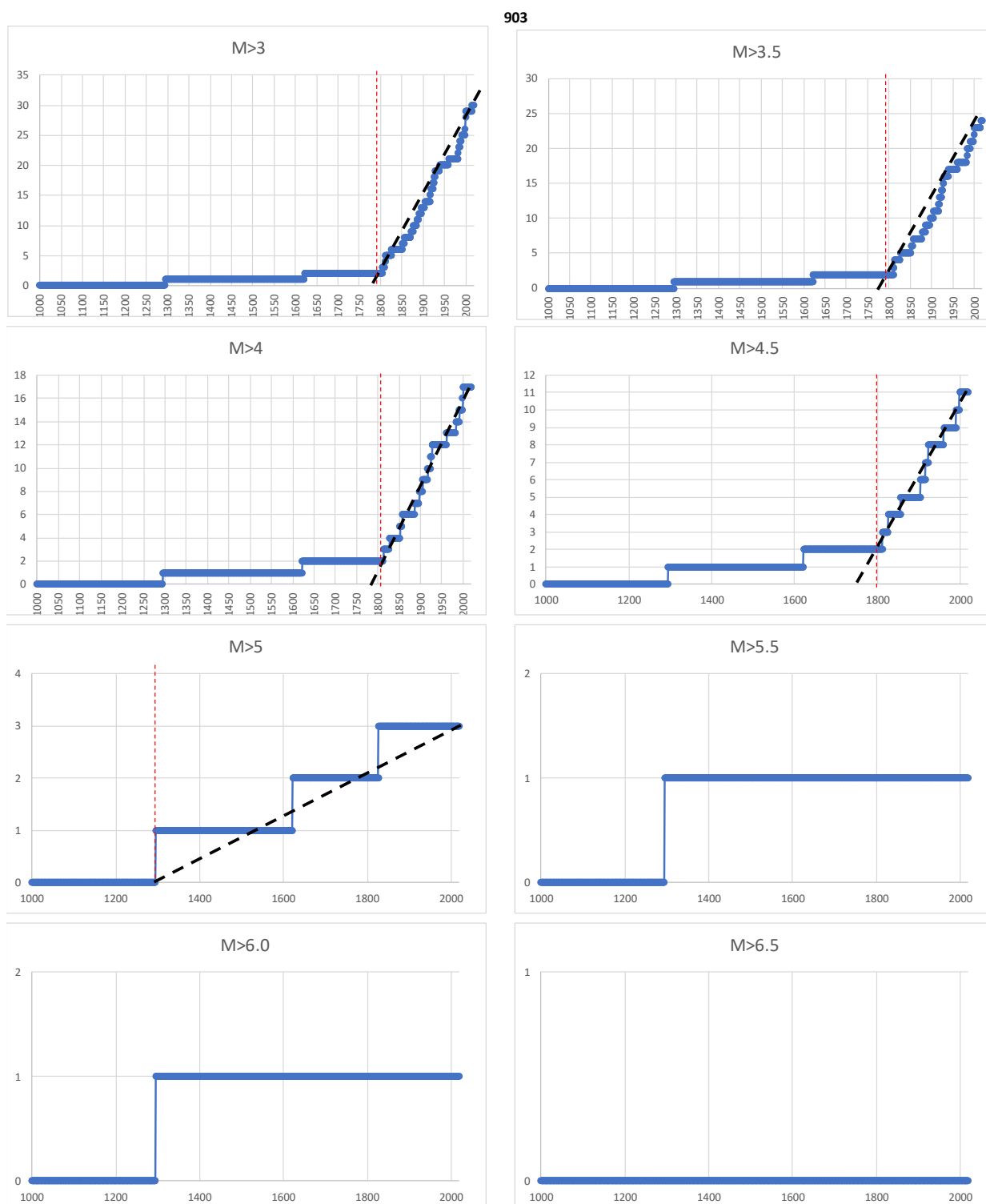
Tabella 15 – Valori di  $PGA_v$  ottenuti dall'applicazione del rapporto di 2/3 valutato dallo studio di Newmark (1973)

	$PGA_v$ (g)			
	SLC	SLV	SLD	SLO
<b>V = 2/3 H (Newmark (1973))</b>	0.240	0.192	0.069	0.053

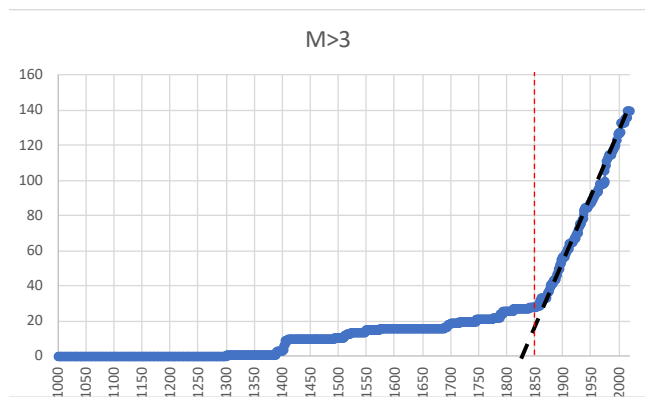
## 6 ALLEGATI

### 6.1 INTERVALLI DI COMPLETEZZA

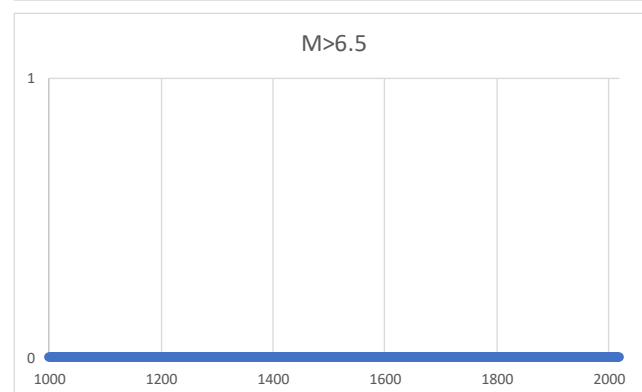
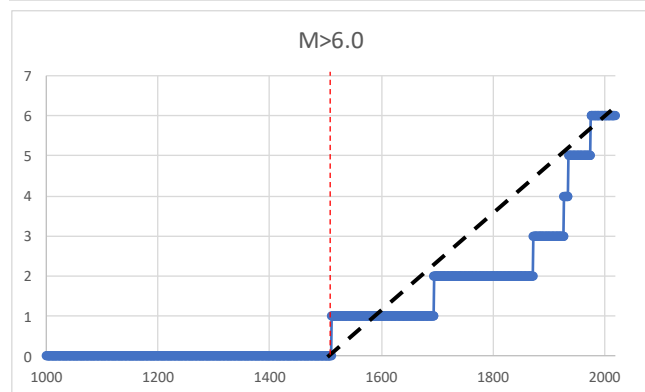
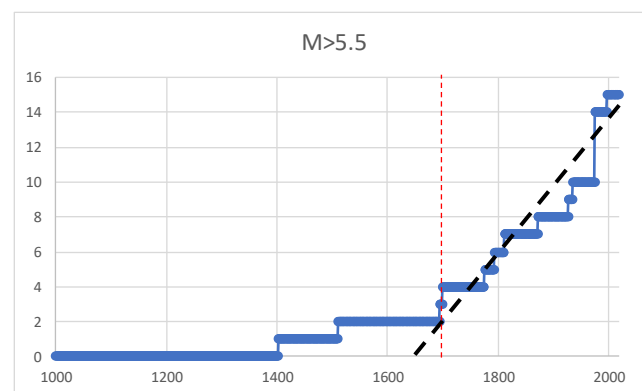
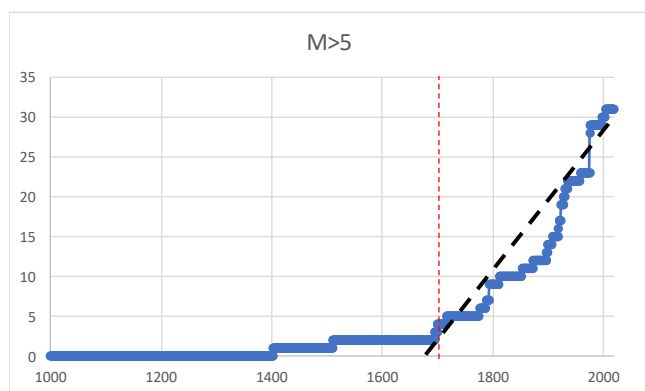
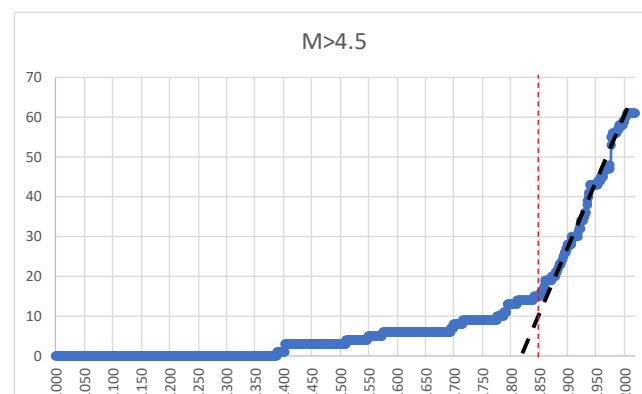
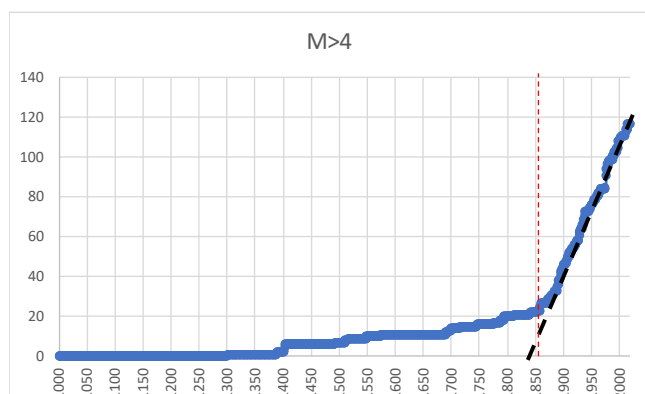
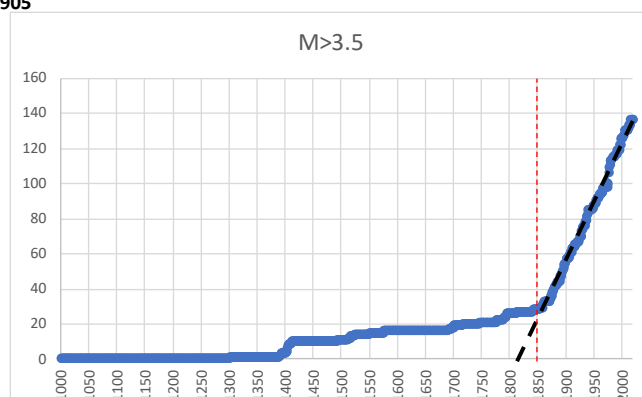
#### 6.1.1 ZS9 – Intervalli di completezza

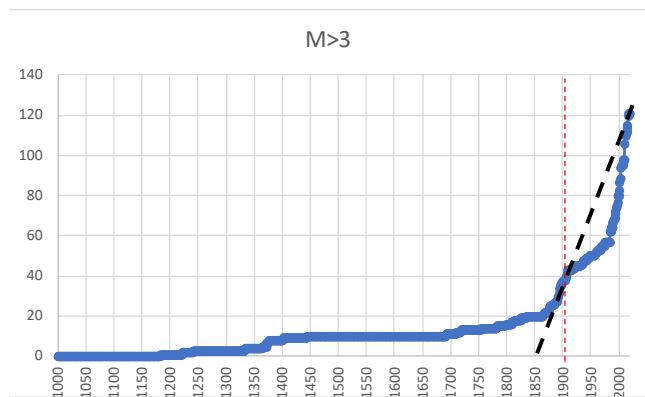




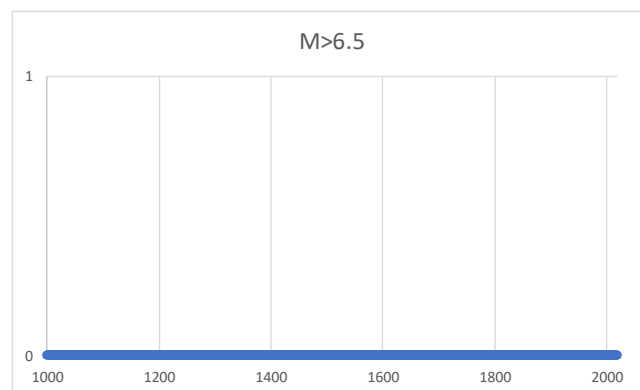
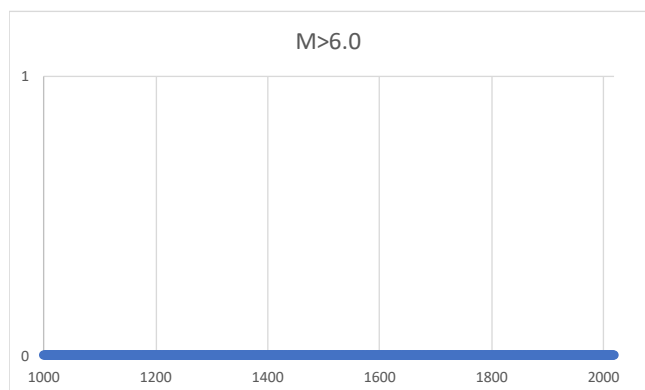
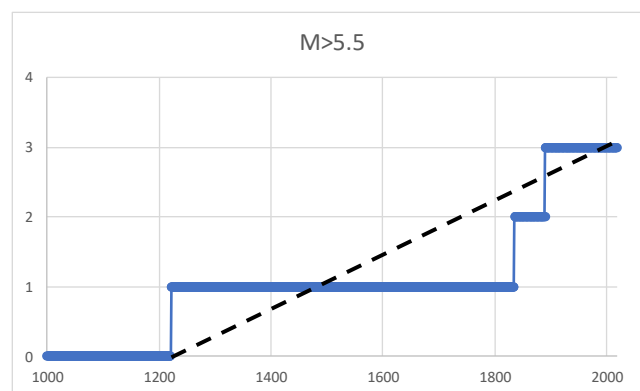
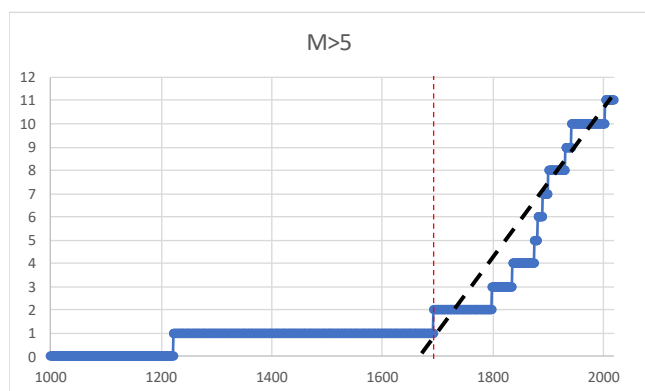
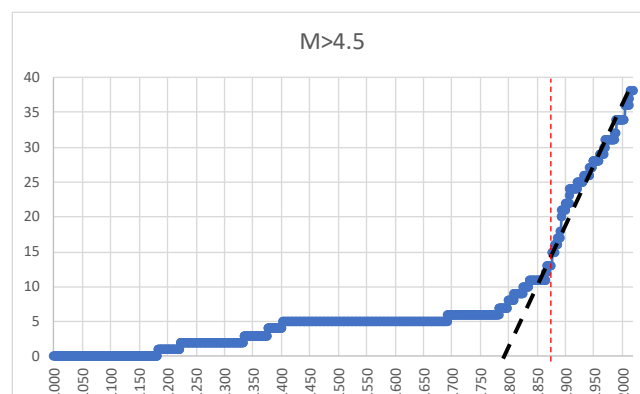
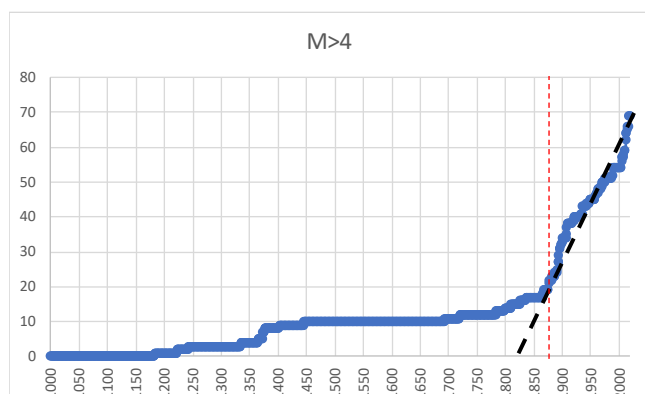
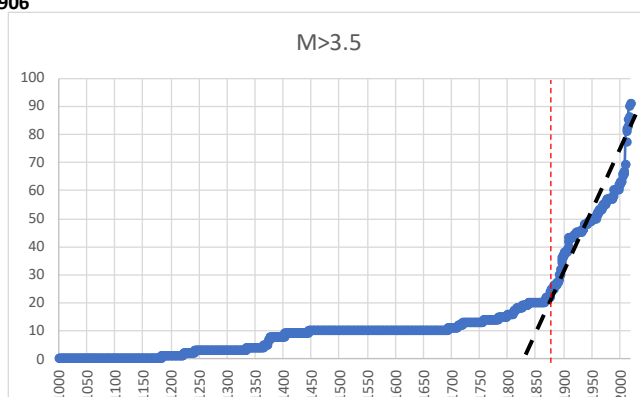


905

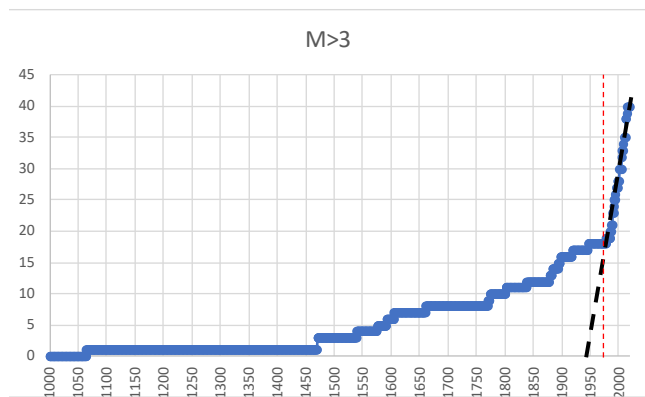




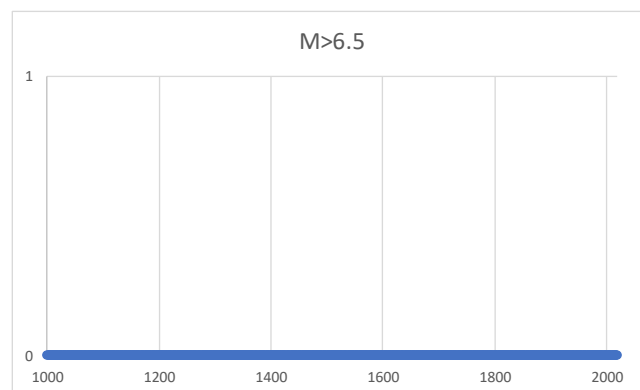
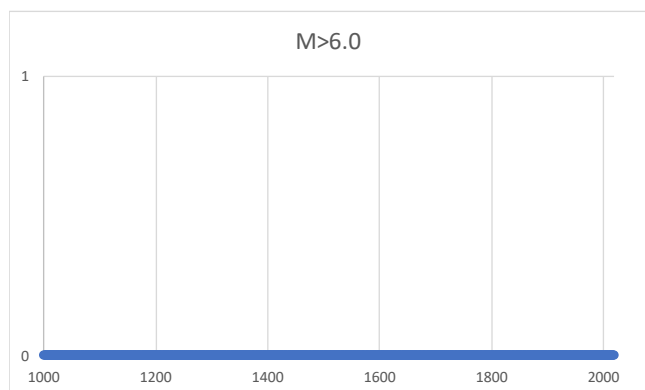
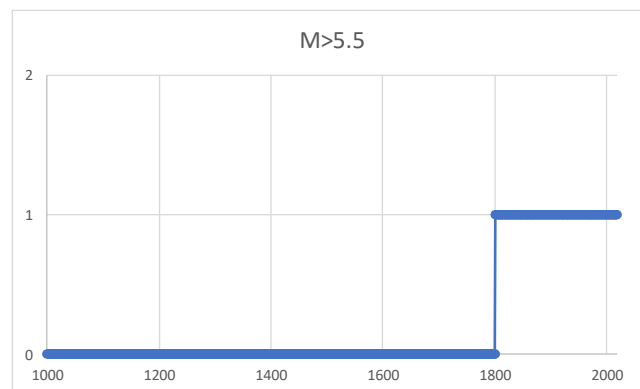
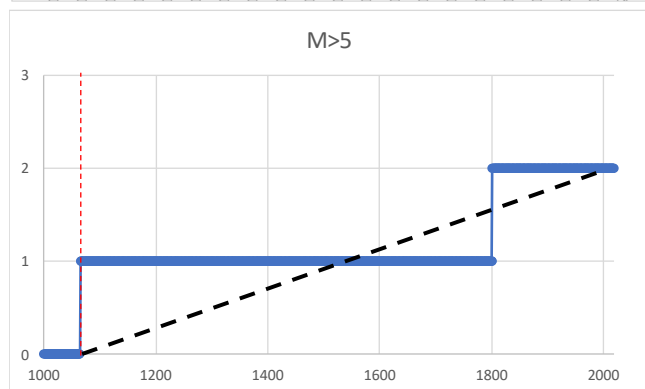
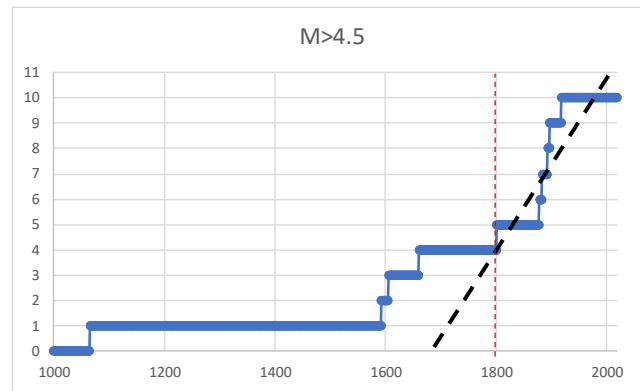
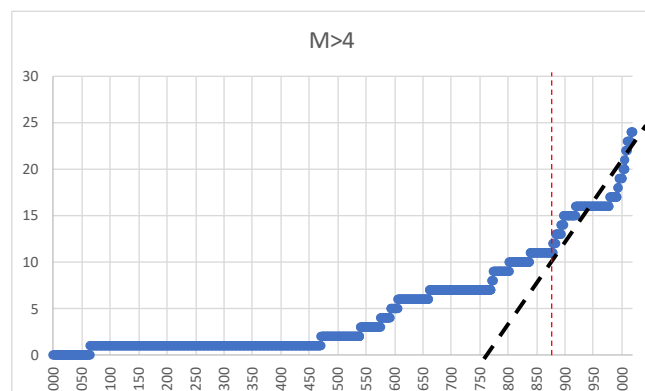
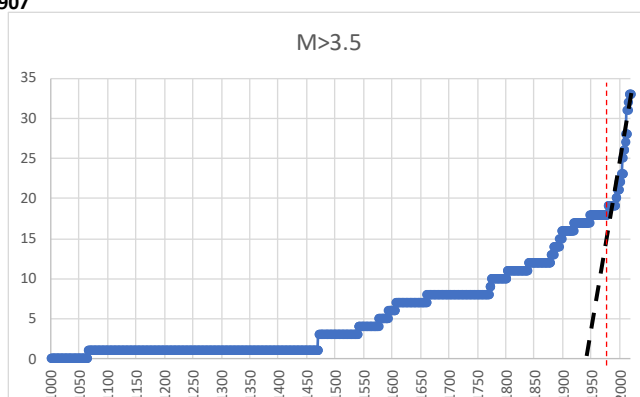
906

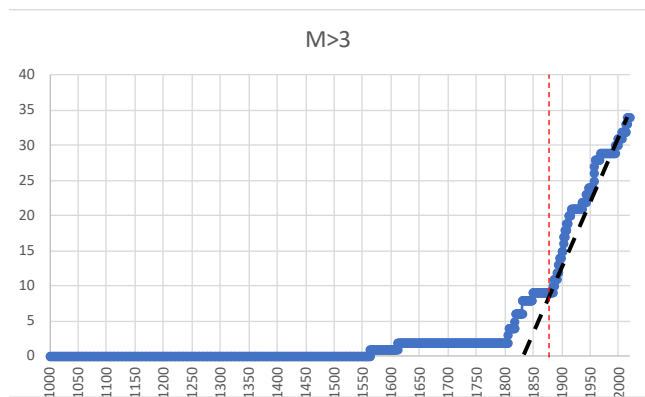




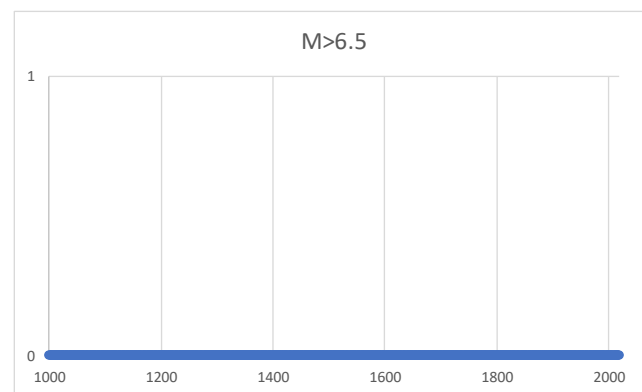
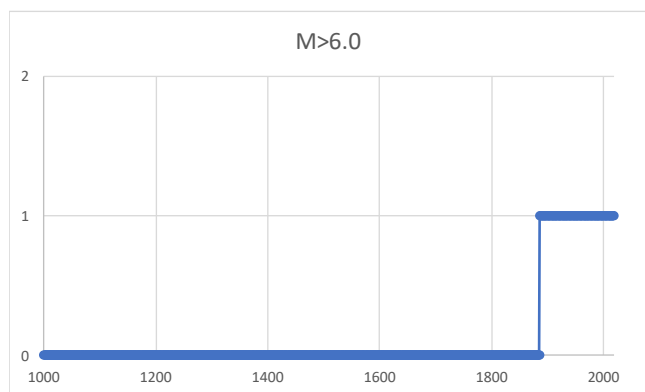
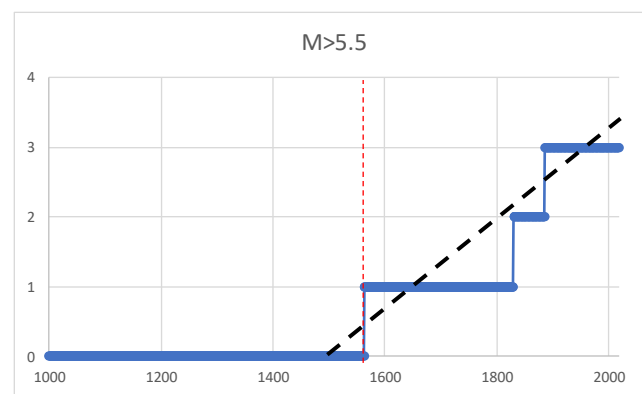
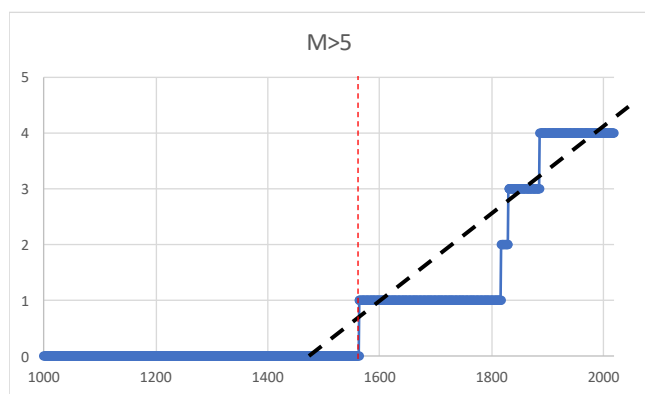
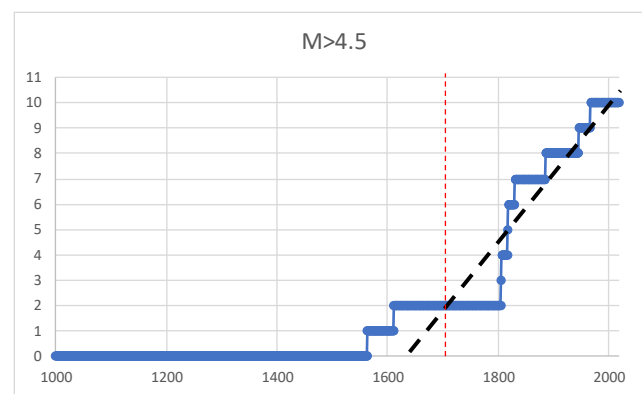
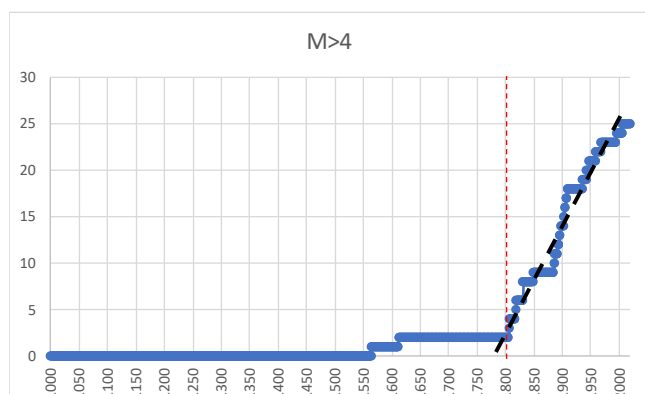
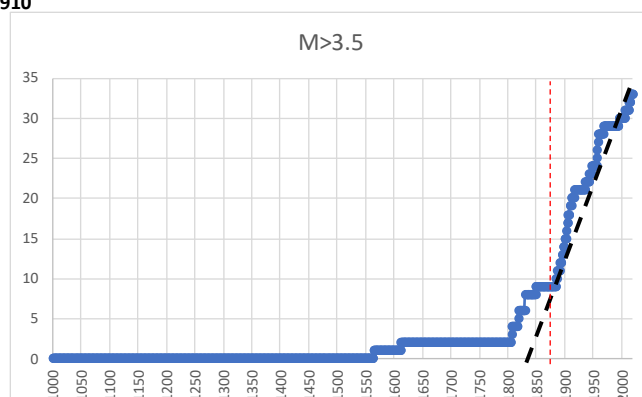


907

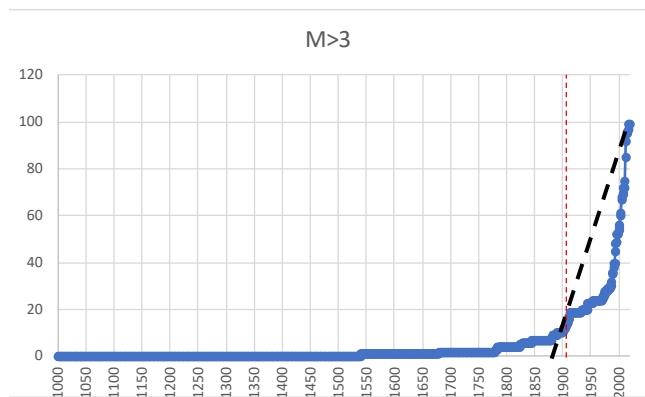




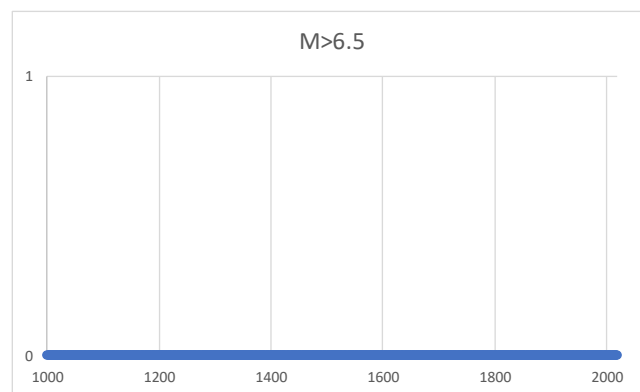
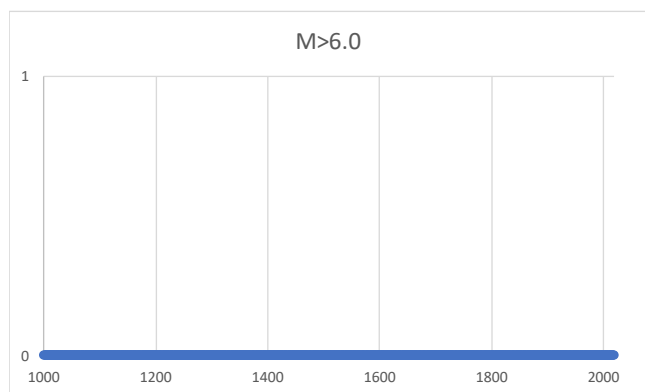
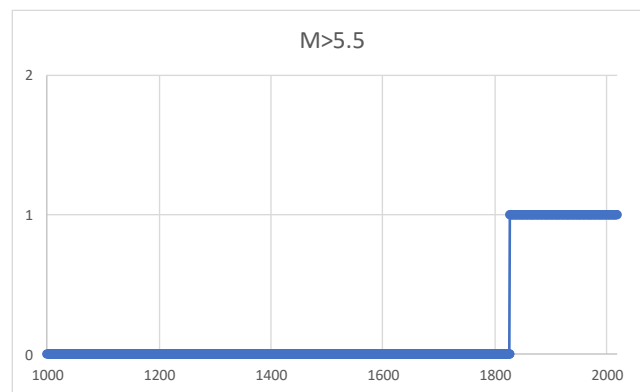
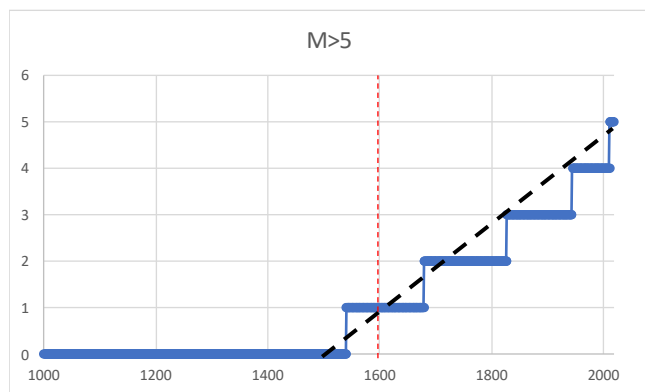
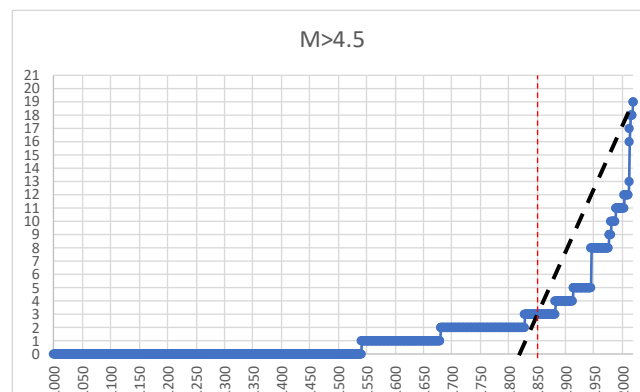
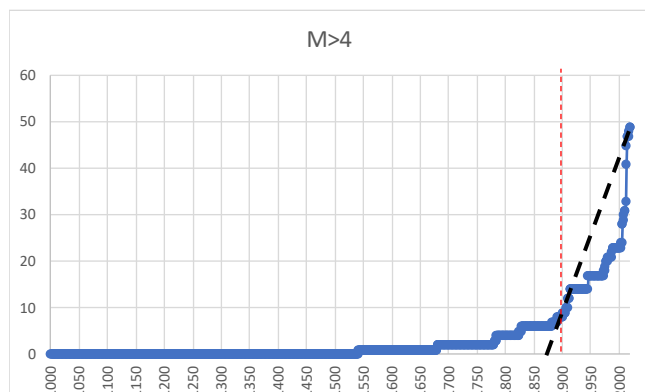
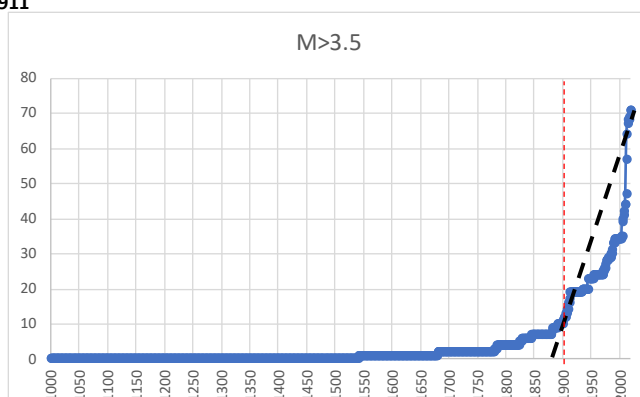
910



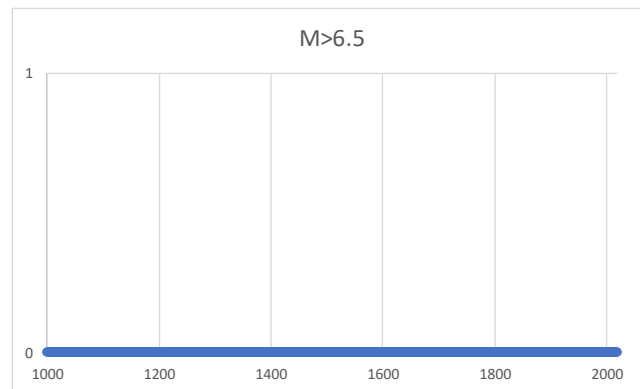
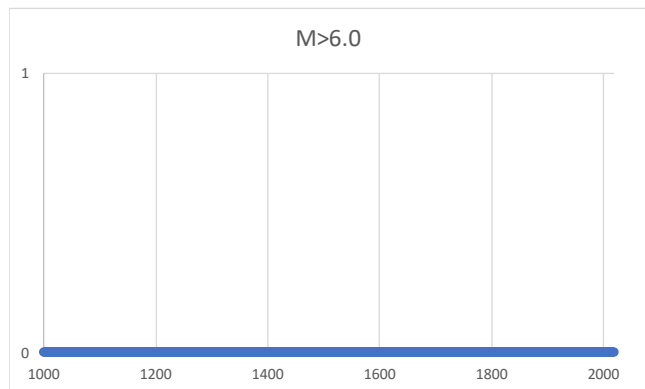
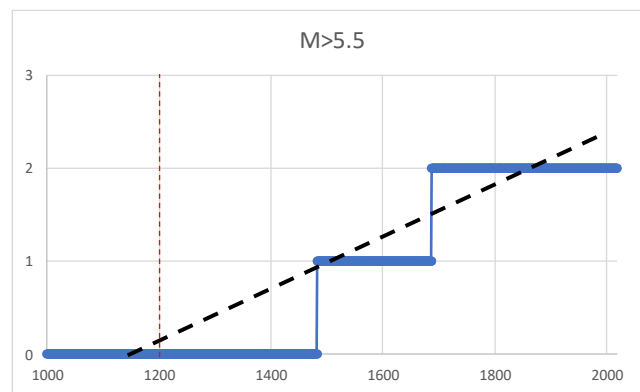
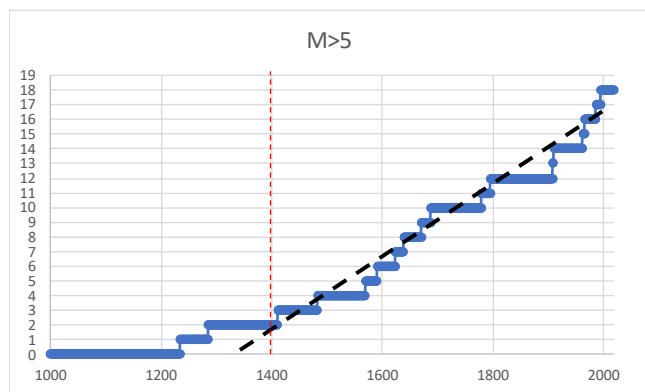
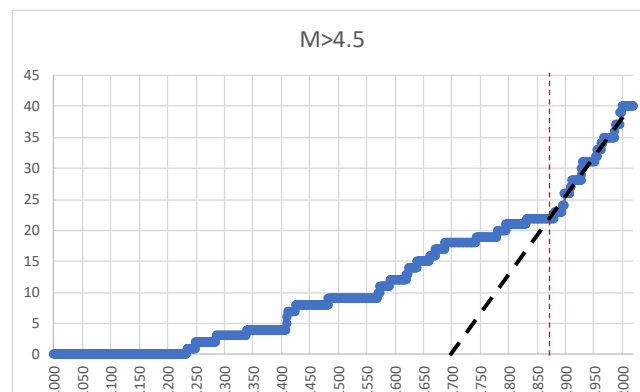
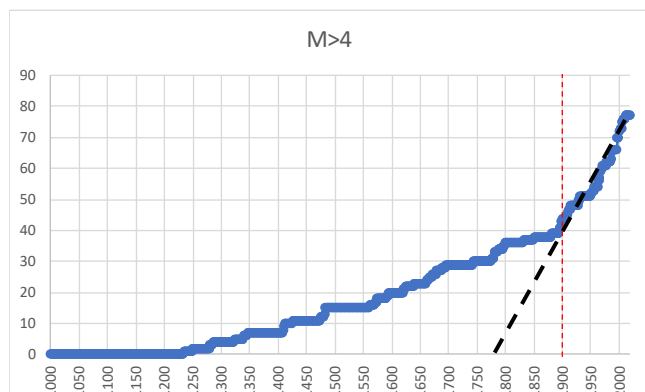
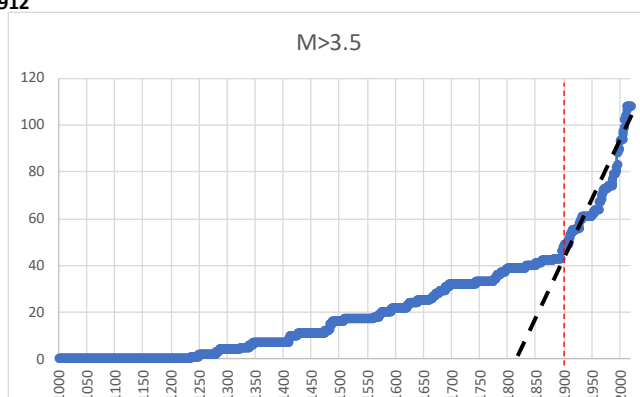
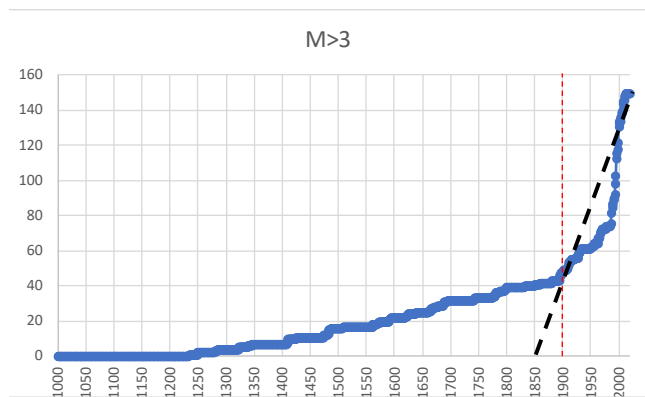




911

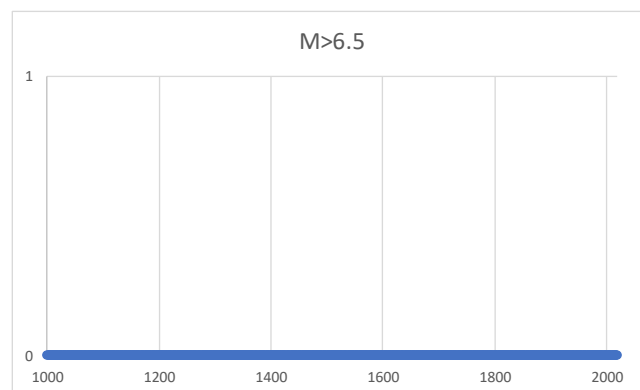
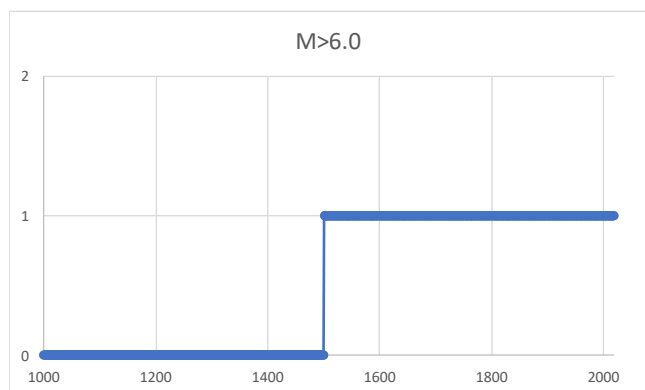
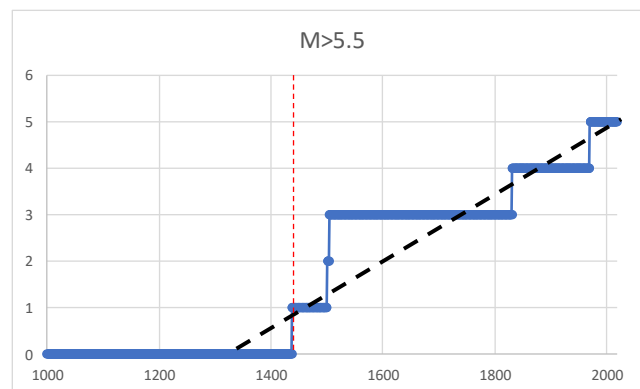
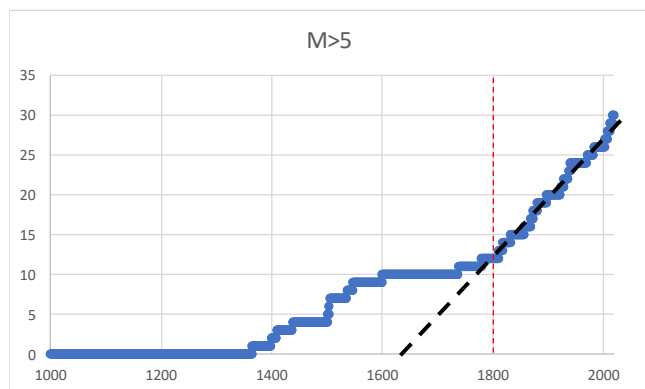
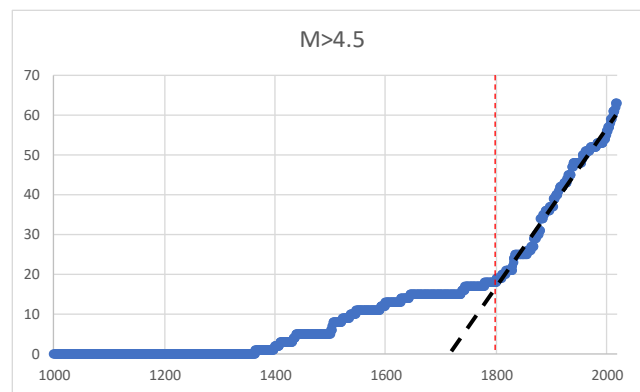
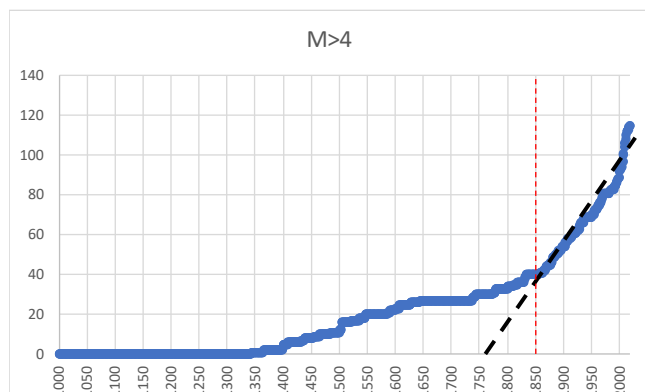
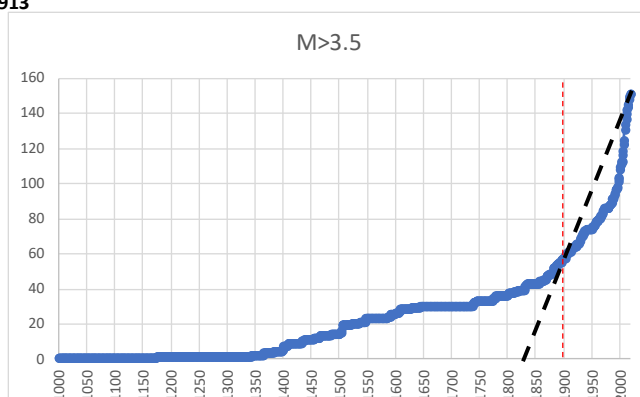
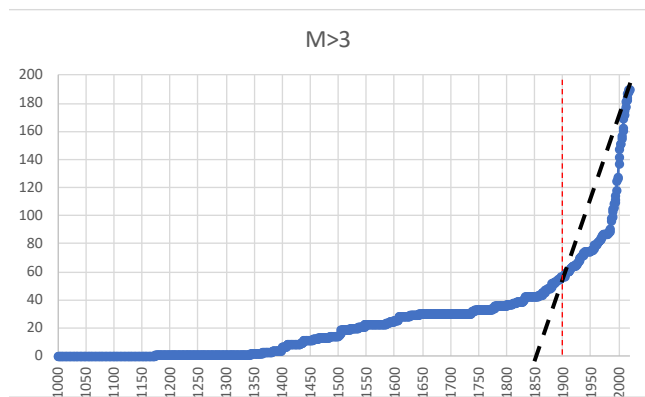


912

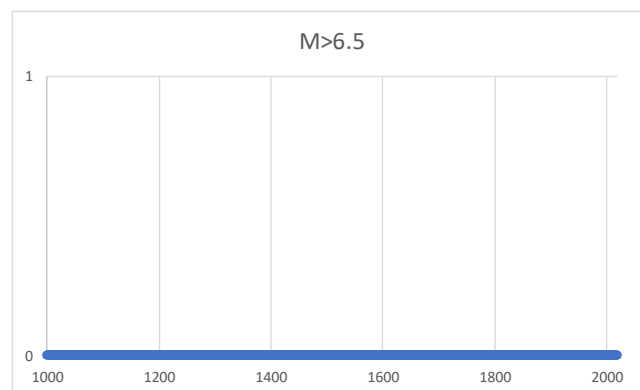
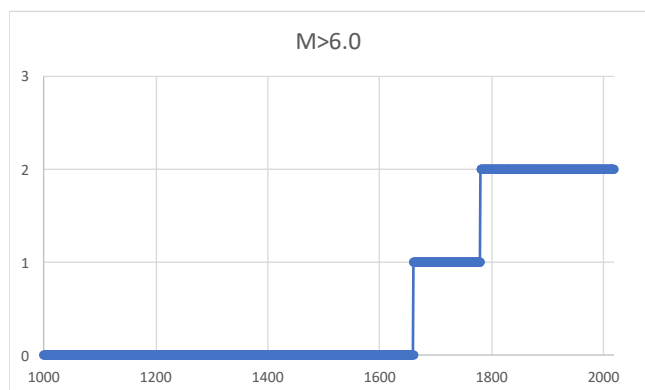
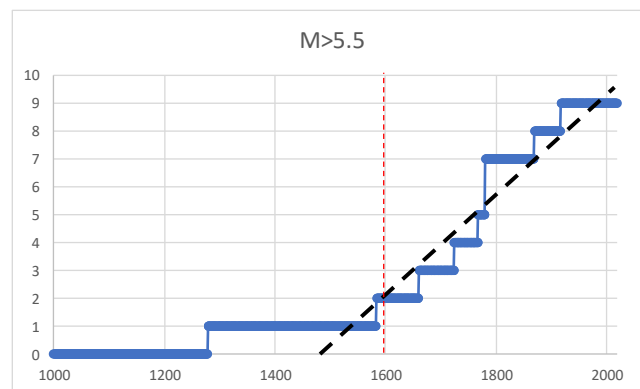
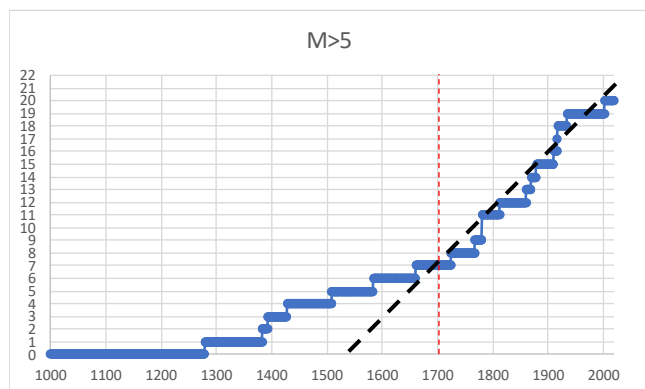
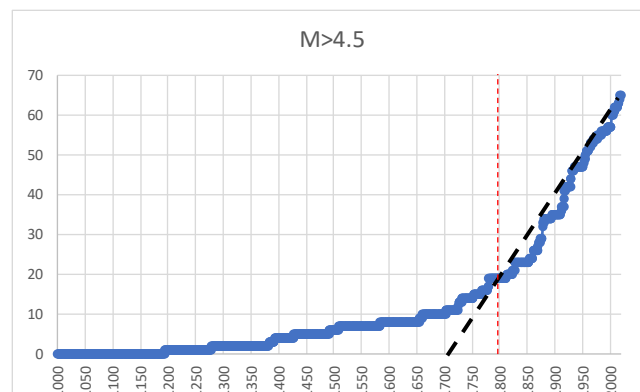
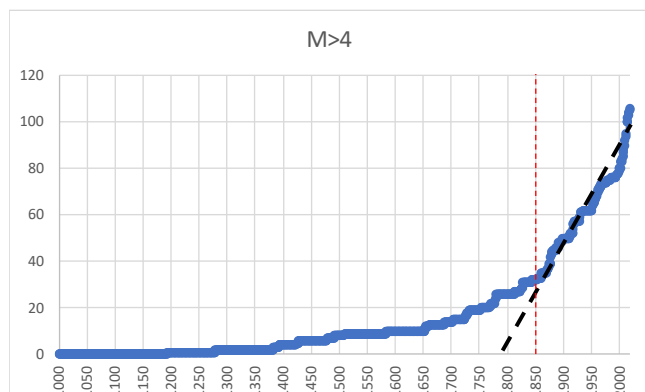
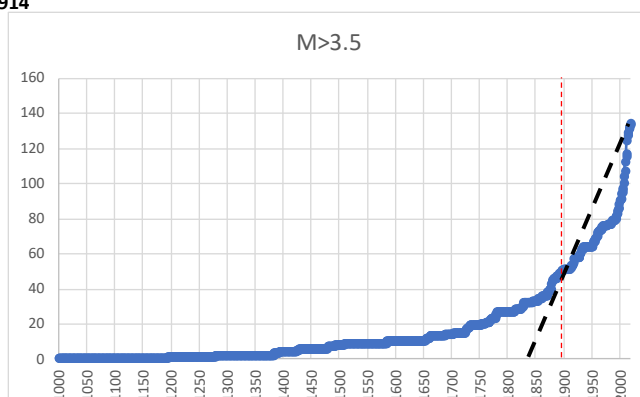
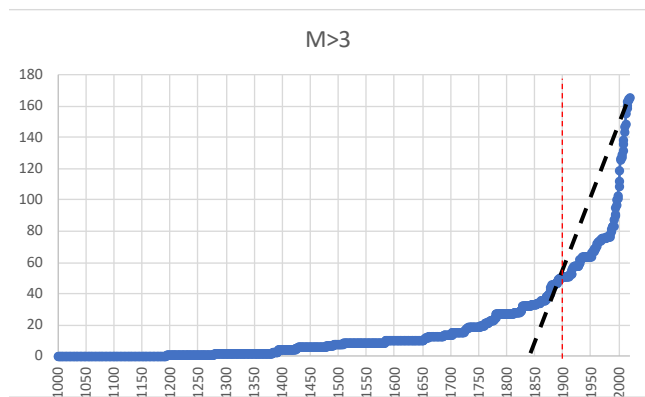




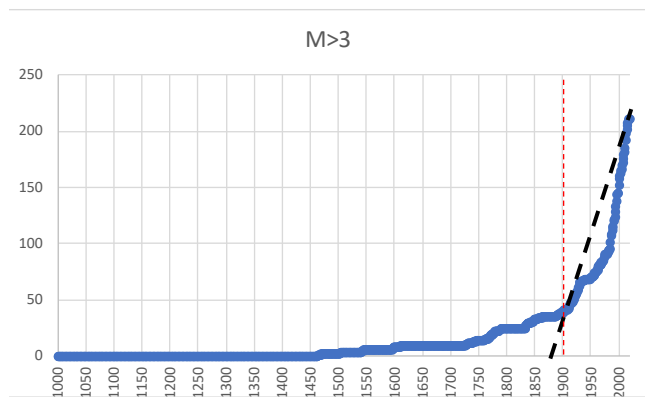
913



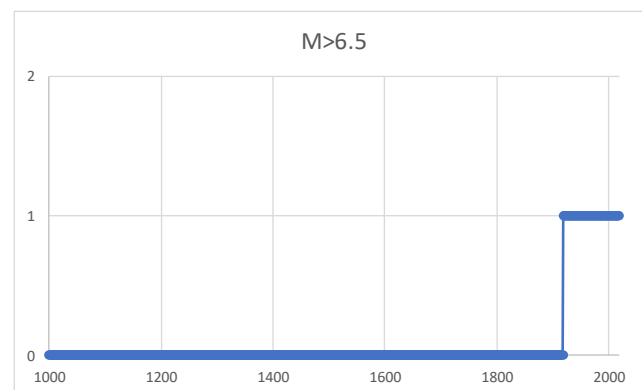
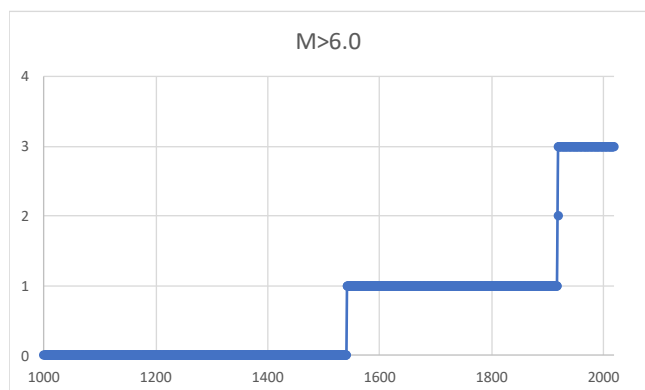
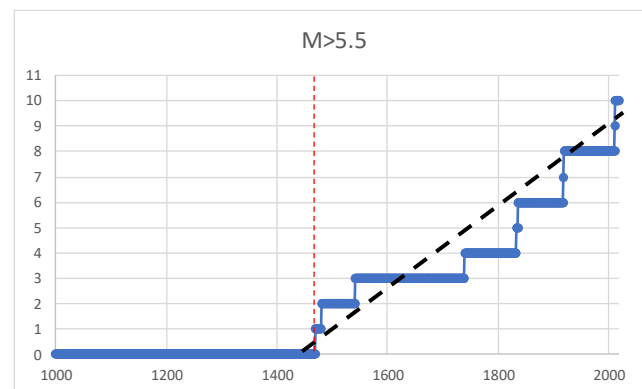
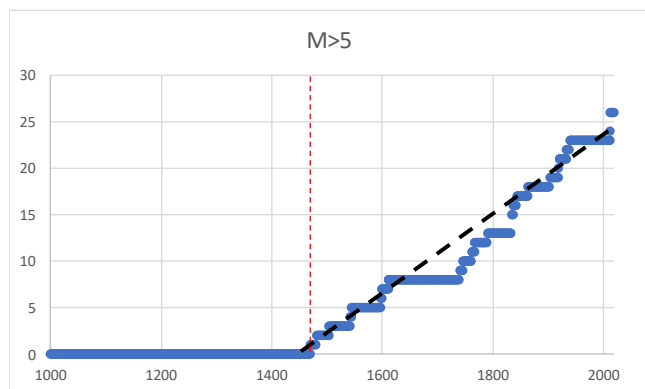
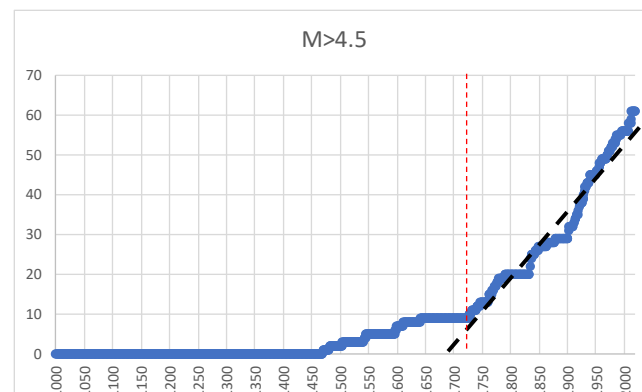
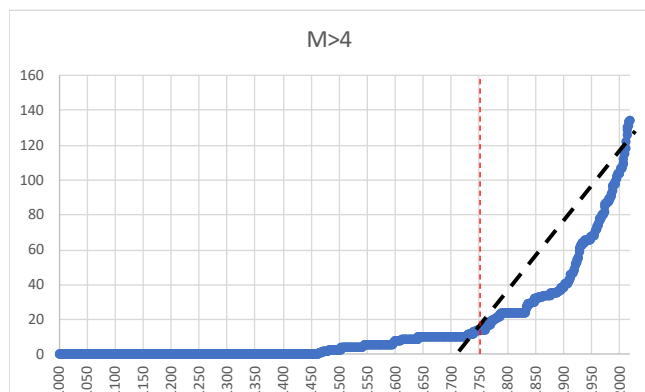
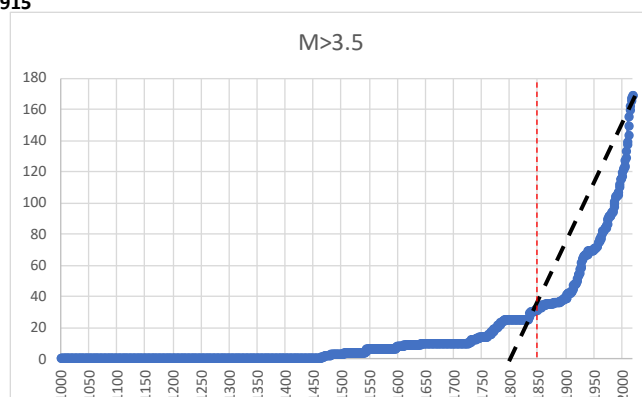
914

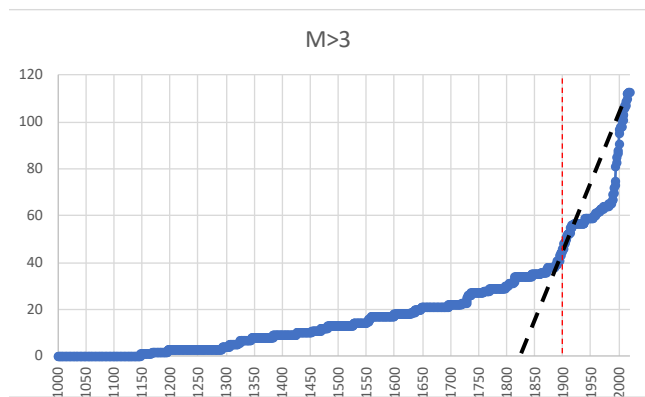




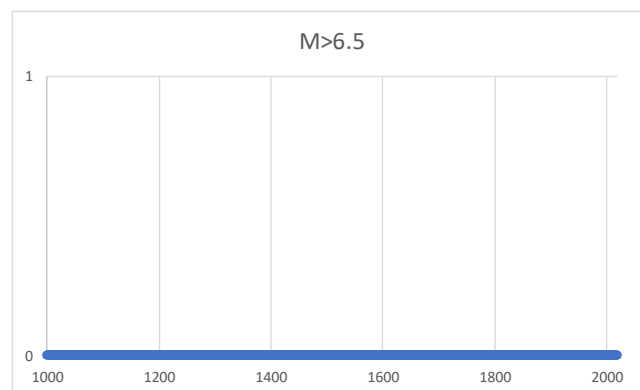
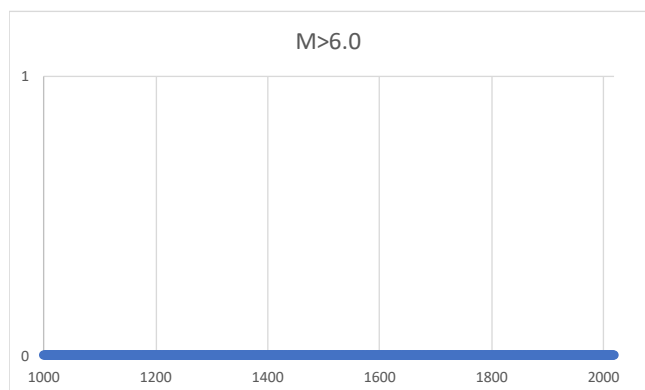
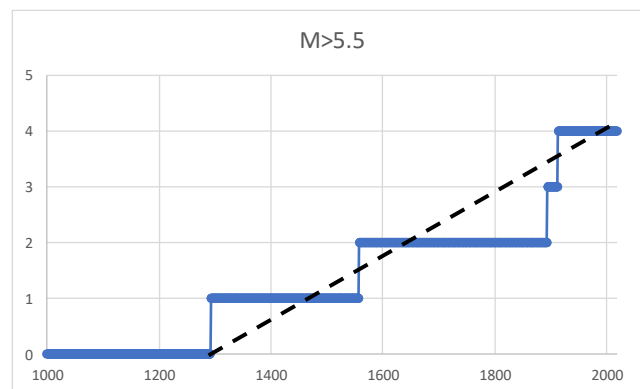
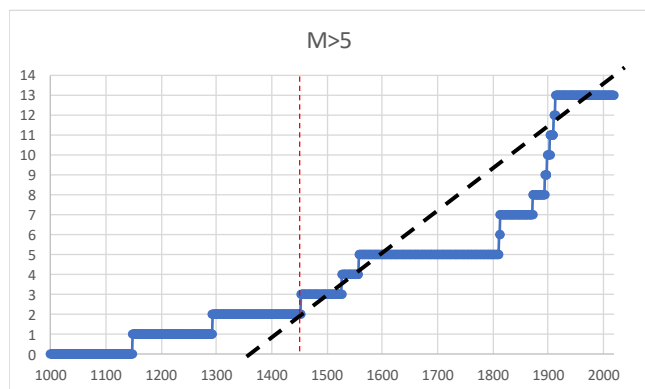
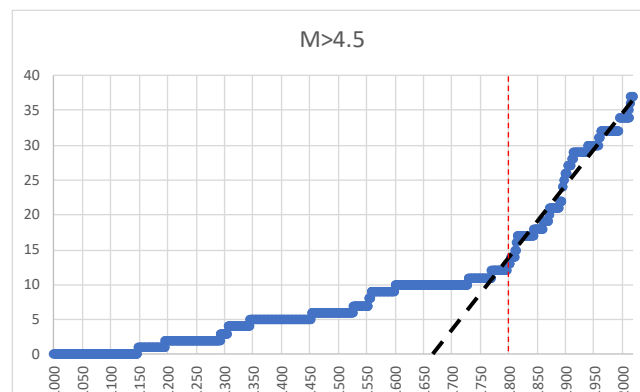
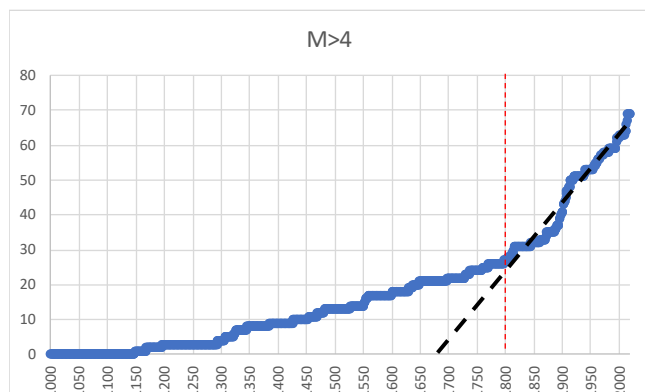
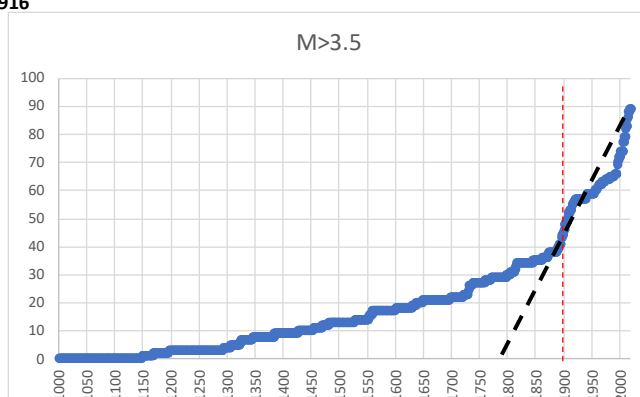


915

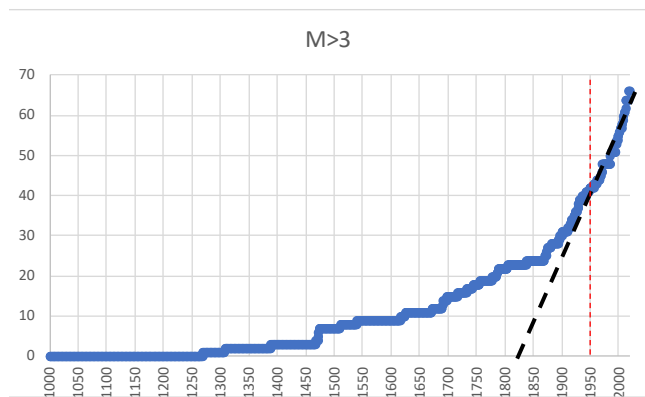




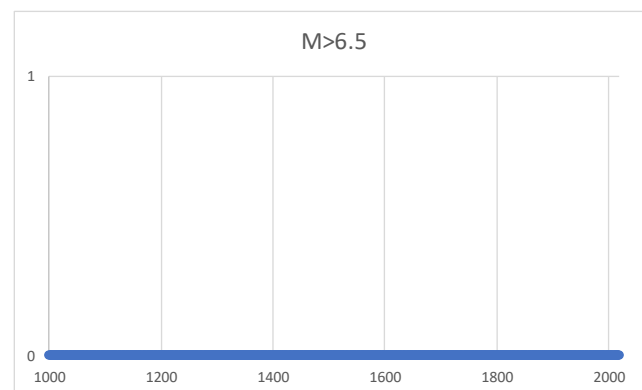
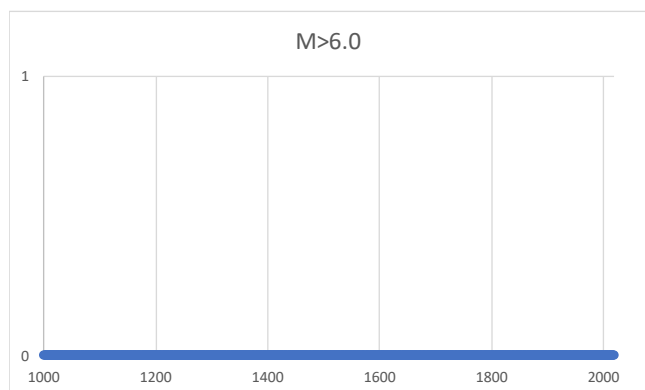
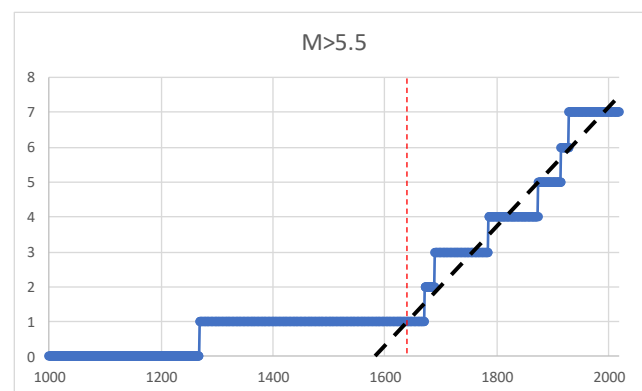
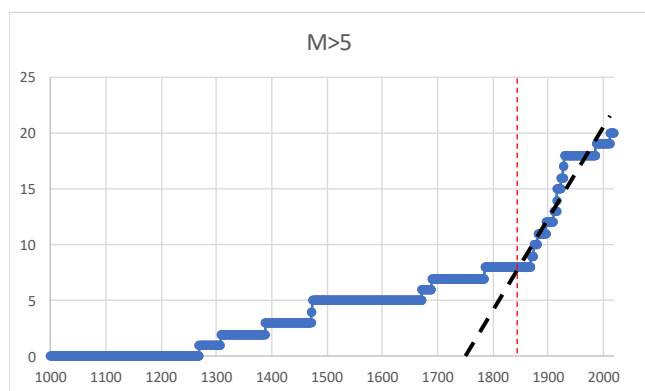
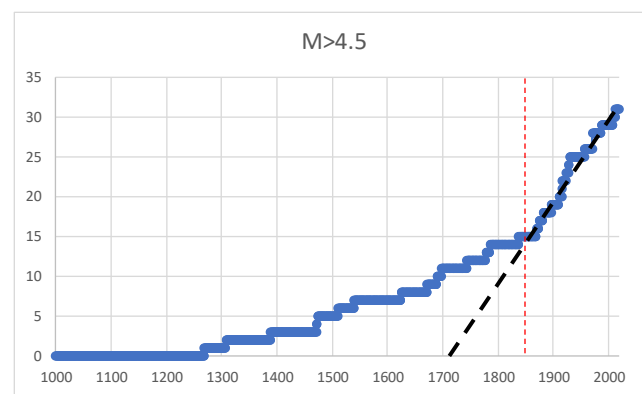
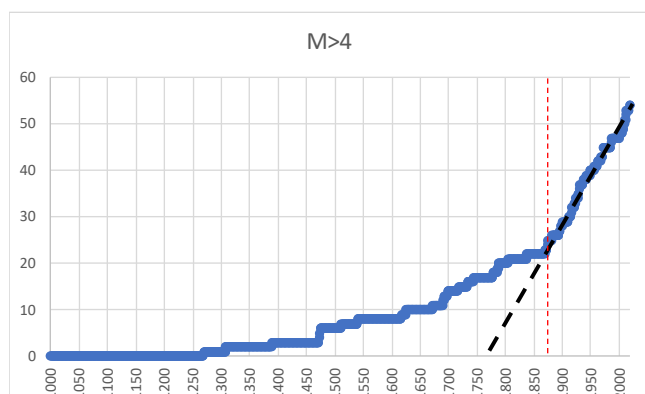
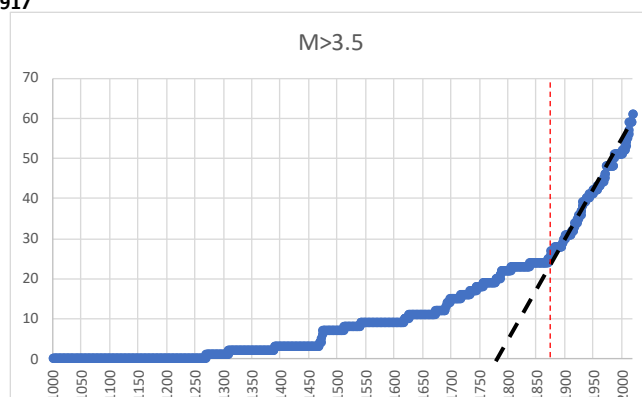
916



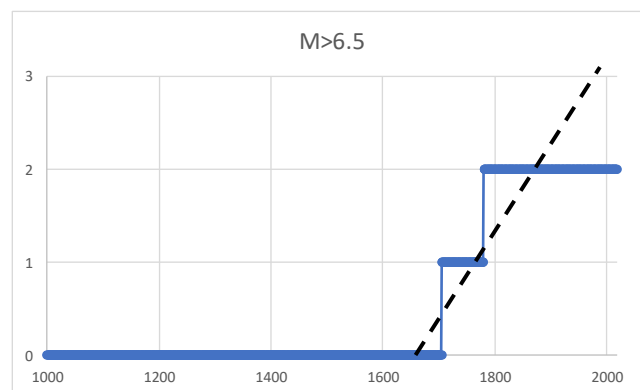
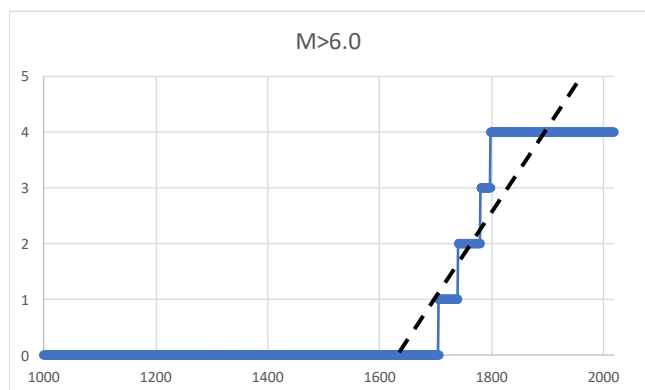
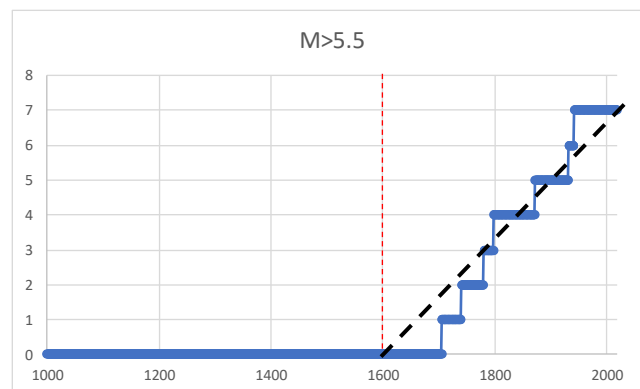
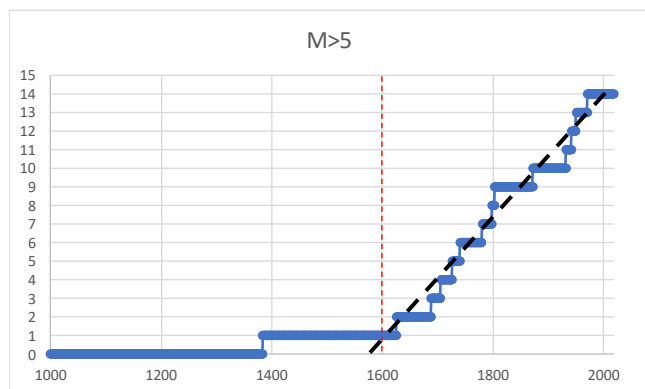
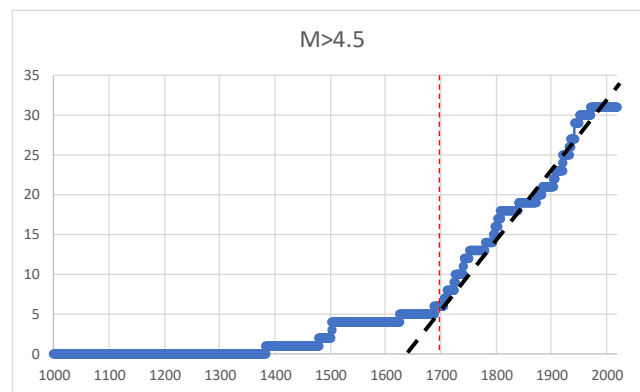
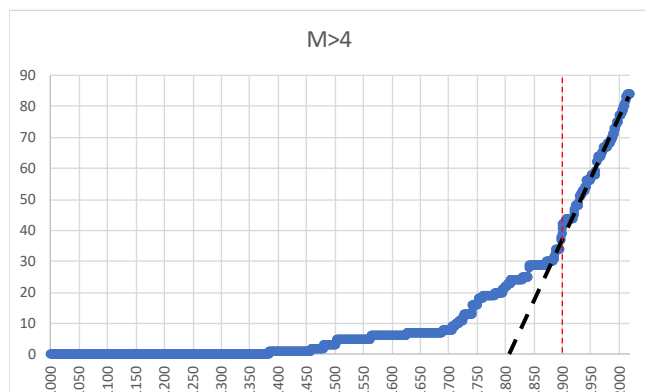
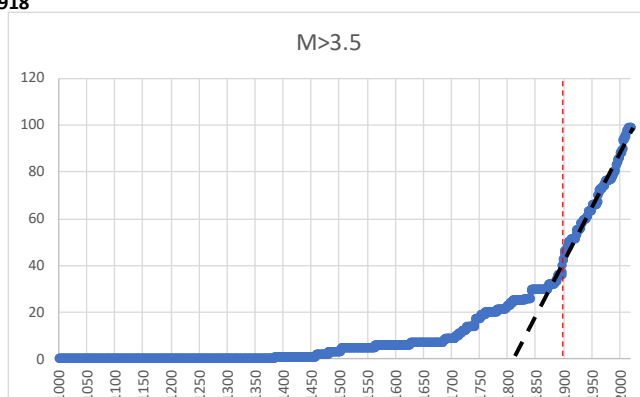
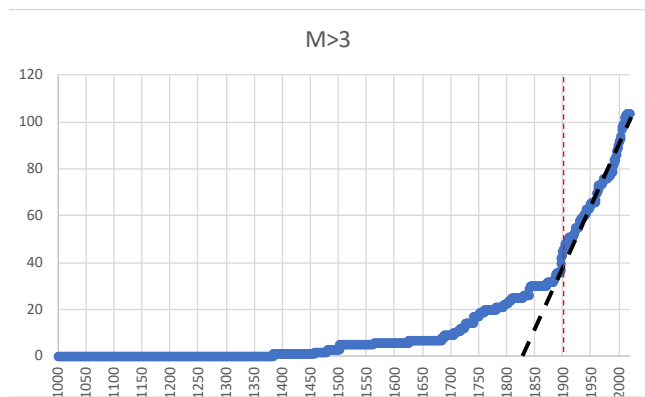




917

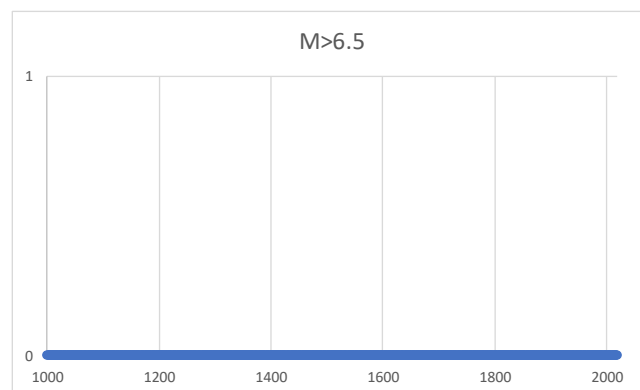
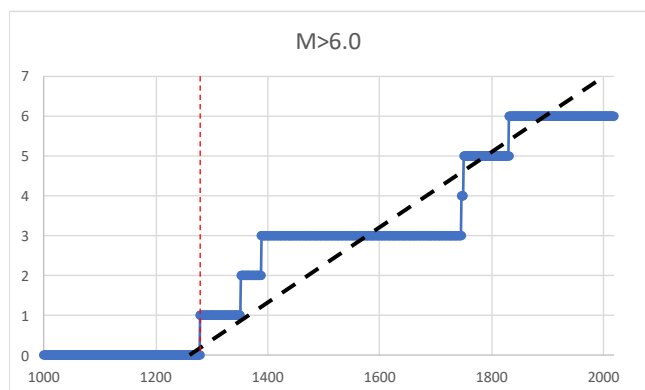
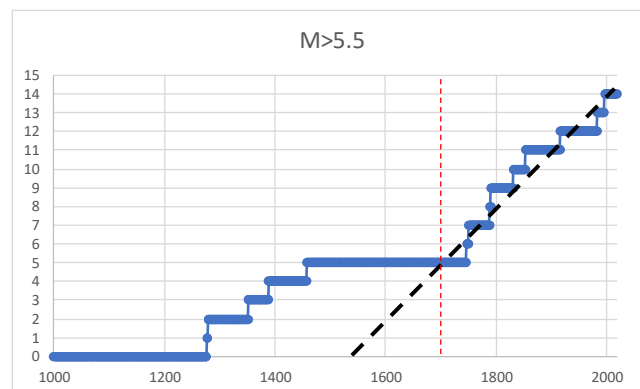
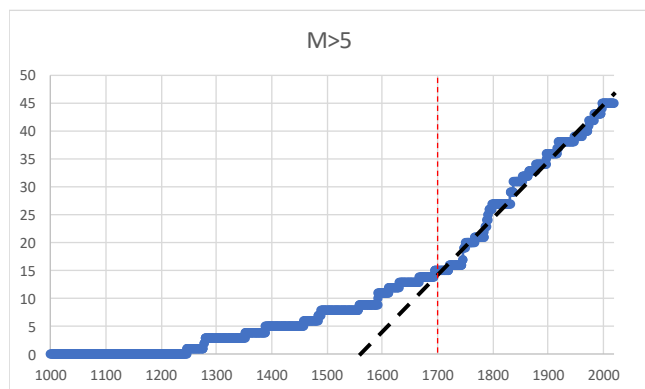
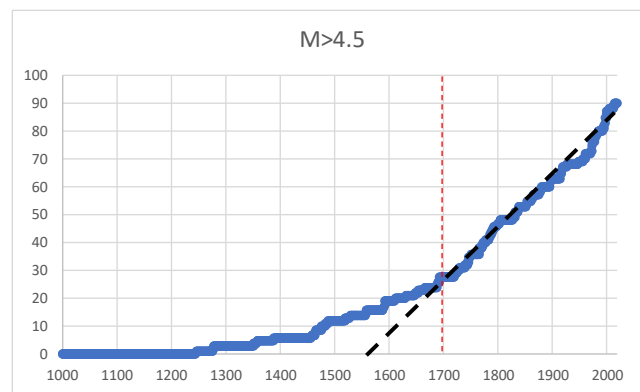
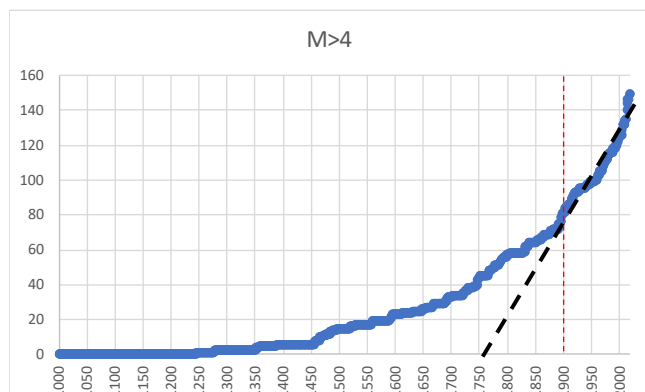
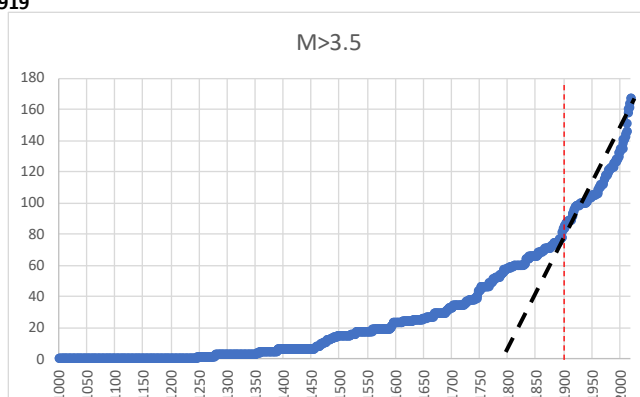
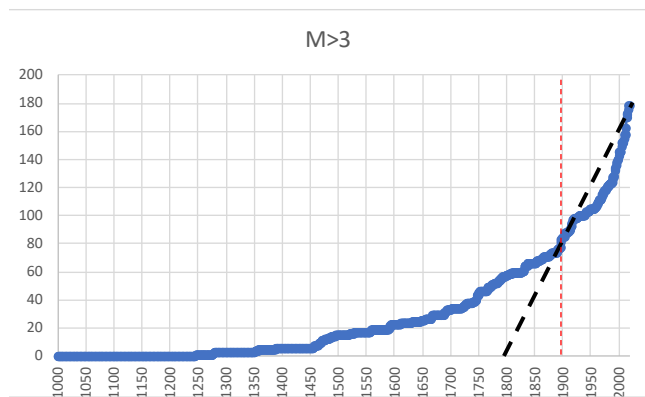


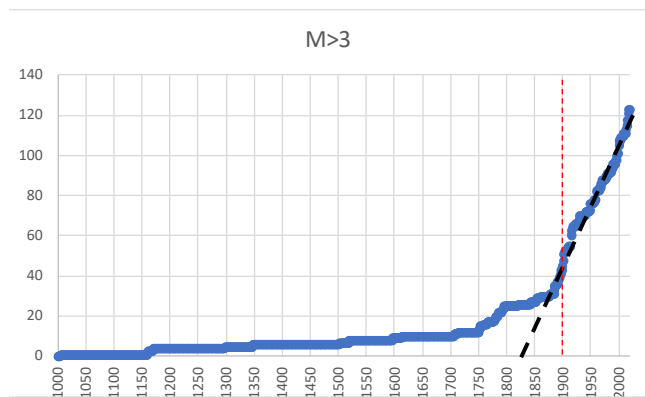
918



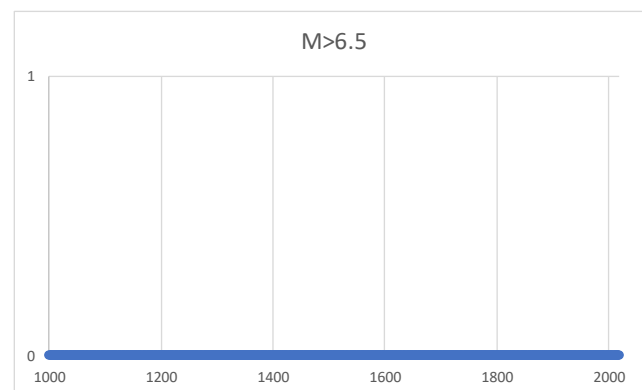
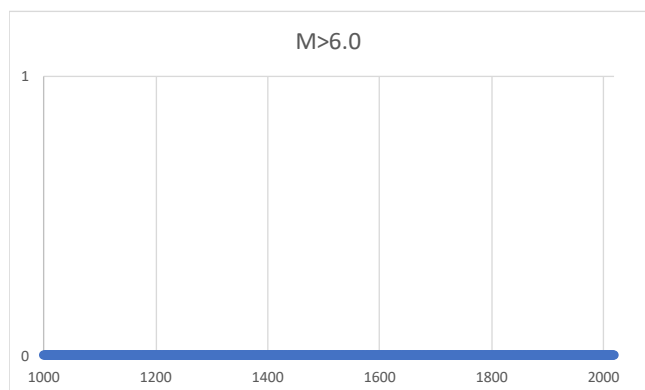
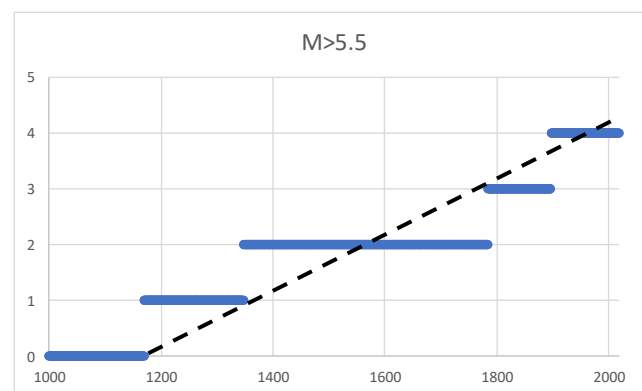
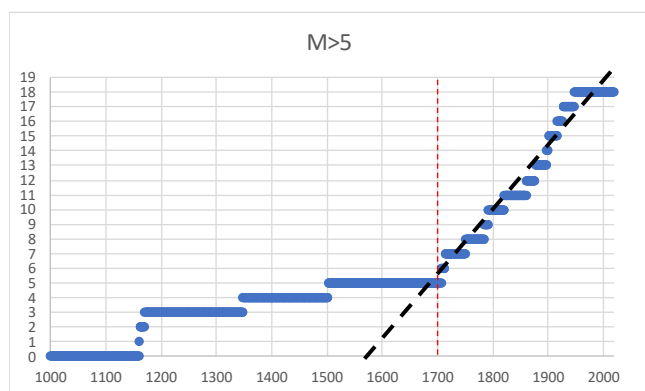
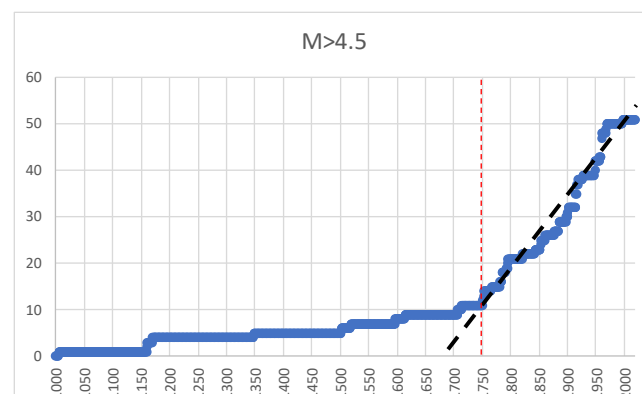
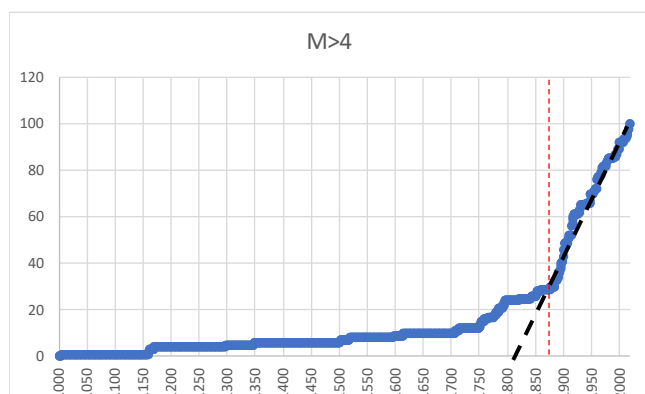
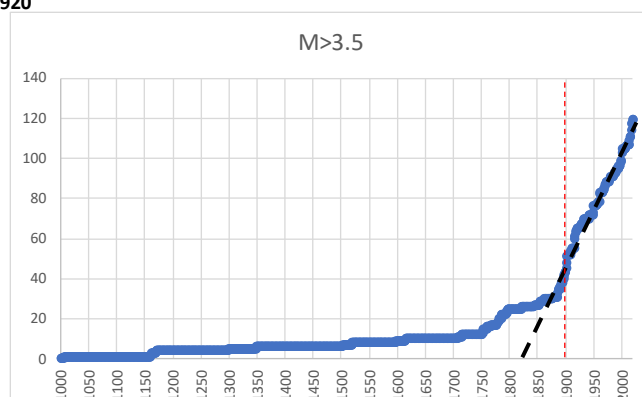


919



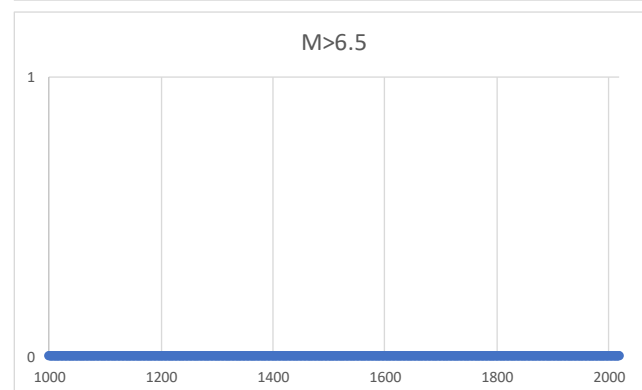
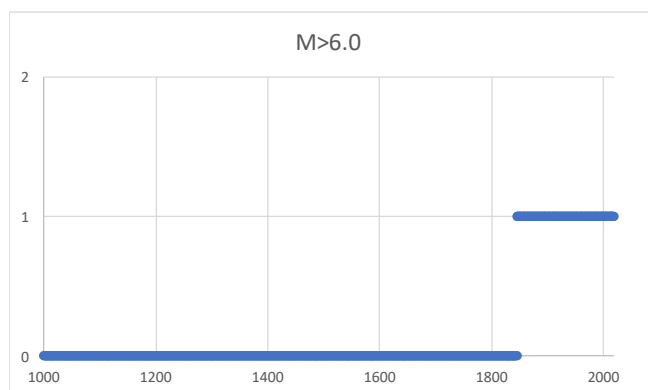
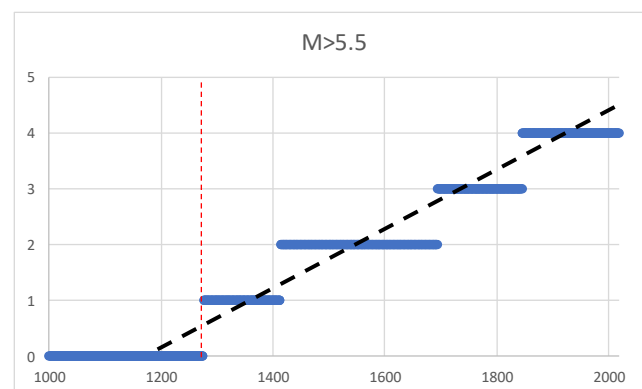
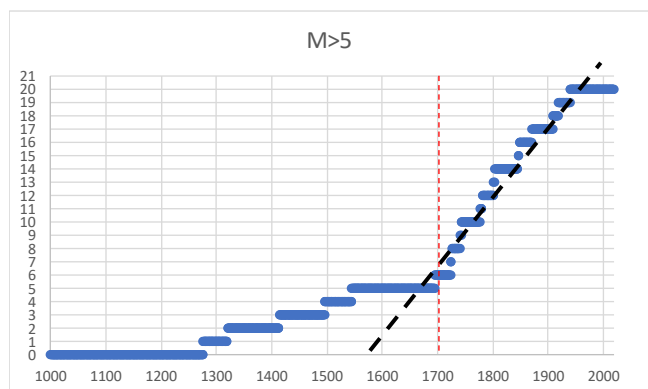
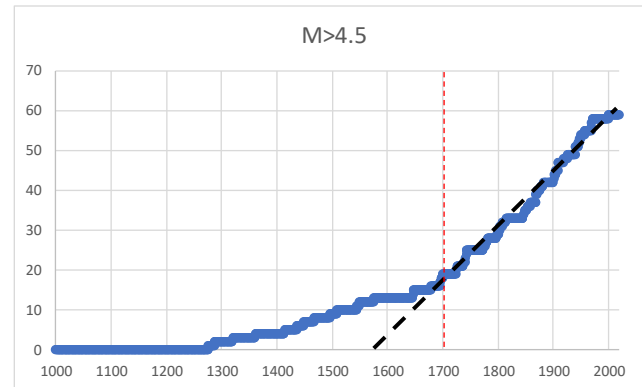
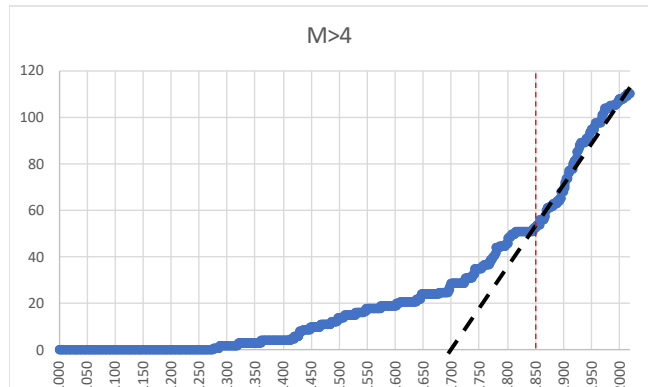
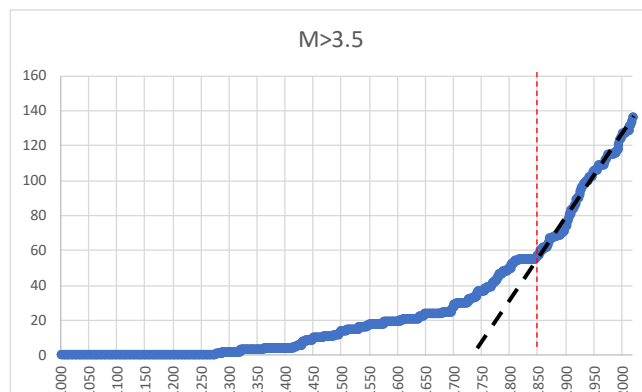
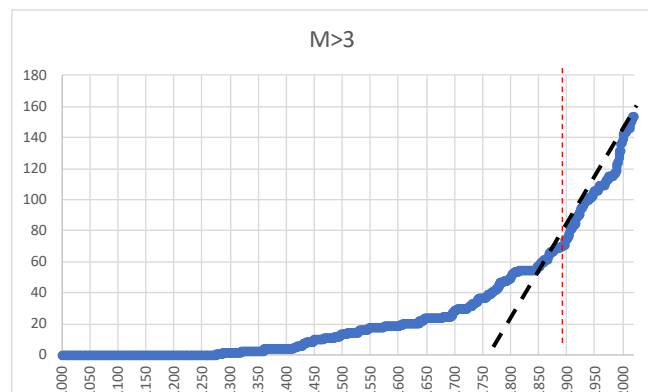


920





921



Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	903	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	905
M≥3.0	1800	219		M≥3.0	1850	169	
M≥3.5	1800	219		M≥3.5	1850	169	
M≥4.0	1800	219		M≥4.0	1850	169	
M≥4.5	1800	219		M≥4.5	1850	169	
M≥5.0	1300	719		M≥5.0	1700	319	
M≥5.5	1300	719		M≥5.5	1700	319	
M≥6.0	1300	719		M≥6.0	1500	519	
M≥6.5	1295	724		M≥6.5	1301	718	

Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	906	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	907
M≥3.0	1900	119		M≥3.0	1975	44	
M≥3.5	1875	144		M≥3.5	1975	44	
M≥4.0	1875	144		M≥4.0	1875	144	
M≥4.5	1875	144		M≥4.5	1800	219	
M≥5.0	1700	319		M≥5.0	1100	919	
M≥5.5	1200	819		M≥5.5	1065	954	
M≥6.0	1183	836		M≥6.0	1065	954	
M≥6.5	1183	836		M≥6.5	1065	954	

Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	910	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	911
M≥3.0	1875	144		M≥3.0	1900	119	
M≥3.5	1875	144		M≥3.5	1900	119	
M≥4.0	1800	219		M≥4.0	1900	119	
M≥4.5	1700	319		M≥4.5	1850	169	
M≥5.0	1575	444		M≥5.0	1600	419	
M≥5.5	1575	444		M≥5.5	1541	478	
M≥6.0	1564	455		M≥6.0	1541	478	
M≥6.5	1564	455		M≥6.5	1541	478	

Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	912	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	913
M≥3.0	1900	119		M≥3.0	1900	119	
M≥3.5	1900	119		M≥3.5	1900	119	
M≥4.0	1900	119		M≥4.0	1850	169	
M≥4.5	1875	144		M≥4.5	1800	219	
M≥5.0	1400	619		M≥5.0	1800	219	
M≥5.5	1200	819		M≥5.5	1450	569	
M≥6.0	1234	785		M≥6.0	1174	845	
M≥6.5	1234	785		M≥6.5	1174	845	

Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	914	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	915
M≥3.0	1900	119		M≥3.0	1900	119	
M≥3.5	1900	119		M≥3.5	1850	169	
M≥4.0	1850	169		M≥4.0	1750	269	
M≥4.5	1800	219		M≥4.5	1725	294	
M≥5.0	1700	319		M≥5.0	1475	544	
M≥5.5	1600	419		M≥5.5	1475	544	
M≥6.0	1194	825		M≥6.0	1464	555	
M≥6.5	1194	825		M≥6.5	1464	555	

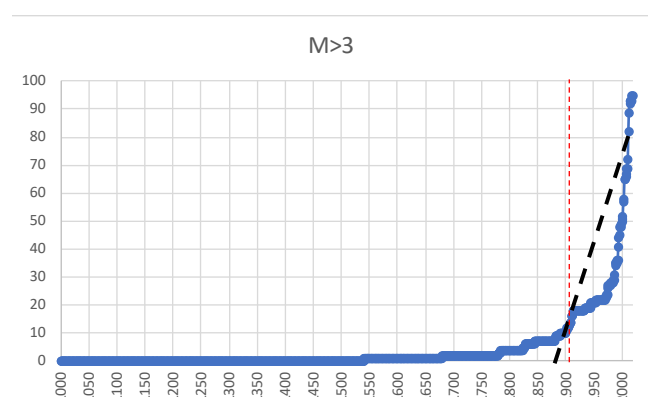
Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	916	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	917
M≥3.0	1900	119		M≥3.0	1950	69	
M≥3.5	1900	119		M≥3.5	1875	144	
M≥4.0	1800	219		M≥4.0	1875	144	
M≥4.5	1800	219		M≥4.5	1850	169	
M≥5.0	1450	569		M≥5.0	1850	169	
M≥5.5	1300	719		M≥5.5	1650	369	
M≥6.0	1148	871		M≥6.0	1269	750	
M≥6.5	1148	871		M≥6.5	1269	750	



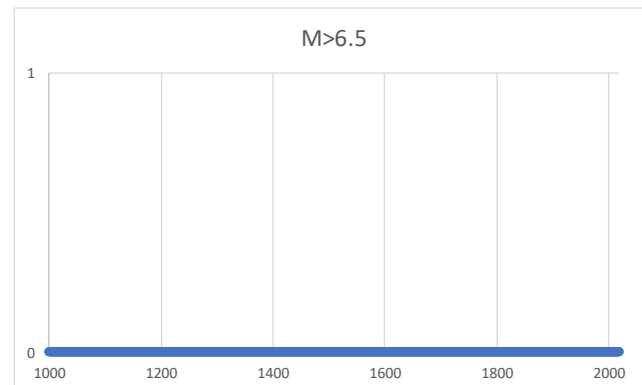
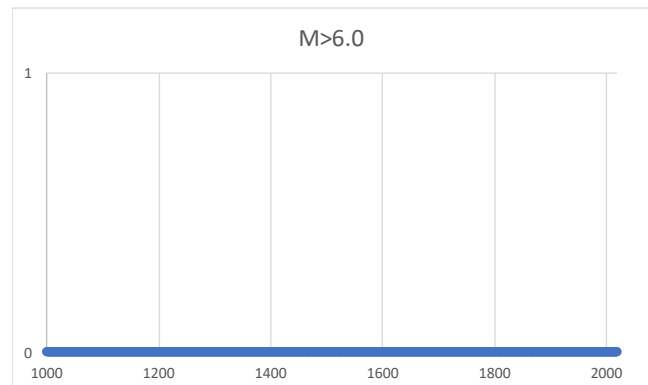
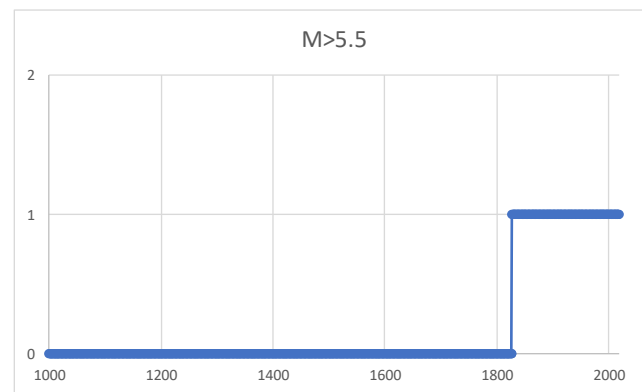
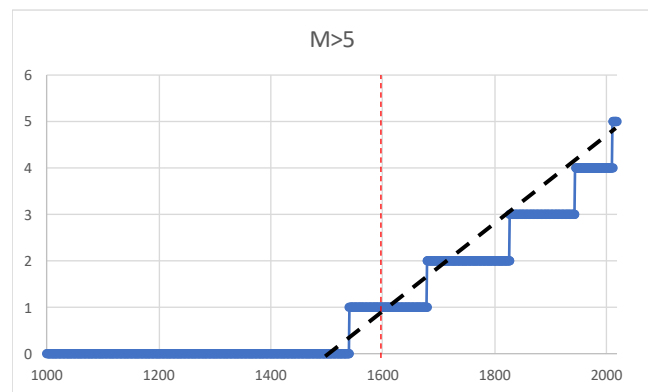
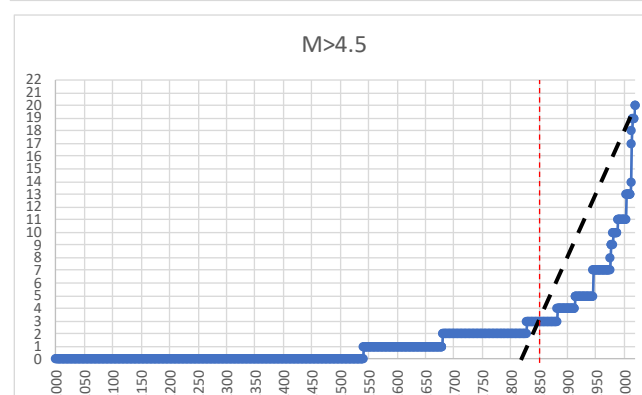
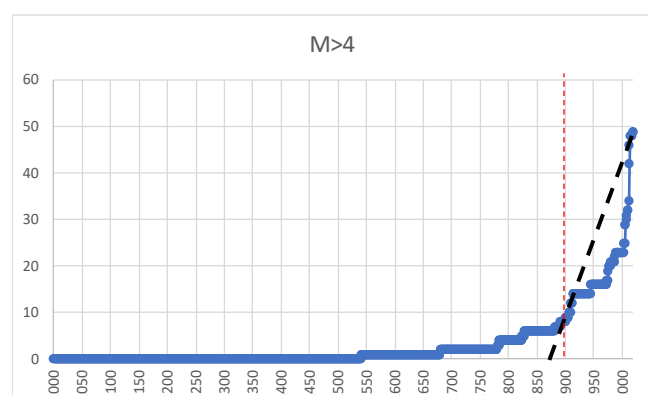
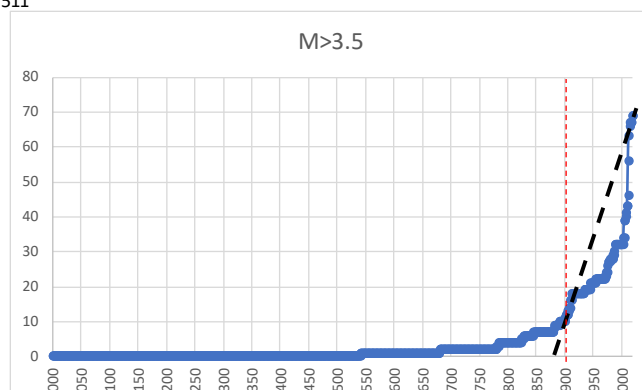
Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	918	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	919
M $\geq$ 3.0	1900	119		M $\geq$ 3.0	1900	119	
M $\geq$ 3.5	1900	119		M $\geq$ 3.5	1900	119	
M $\geq$ 4.0	1900	119		M $\geq$ 4.0	1900	119	
M $\geq$ 4.5	1700	319		M $\geq$ 4.5	1700	319	
M $\geq$ 5.0	1600	419		M $\geq$ 5.0	1700	319	
M $\geq$ 5.5	1600	419		M $\geq$ 5.5	1700	319	
M $\geq$ 6.0	1600	419		M $\geq$ 6.0	1246	773	
M $\geq$ 6.5	1600	419		M $\geq$ 6.5	1246	773	

Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	920	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	921
M $\geq$ 3.0	1900	119		M $\geq$ 3.0	1900	119	
M $\geq$ 3.5	1900	119		M $\geq$ 3.5	1850	169	
M $\geq$ 4.0	1875	144		M $\geq$ 4.0	1850	169	
M $\geq$ 4.5	1750	269		M $\geq$ 4.5	1700	319	
M $\geq$ 5.0	1700	319		M $\geq$ 5.0	1700	319	
M $\geq$ 5.5	1005	1014		M $\geq$ 5.5	1300	719	
M $\geq$ 6.0	1005	1014		M $\geq$ 6.0	1276	743	
M $\geq$ 6.5	1005	1014		M $\geq$ 6.5	1276	743	

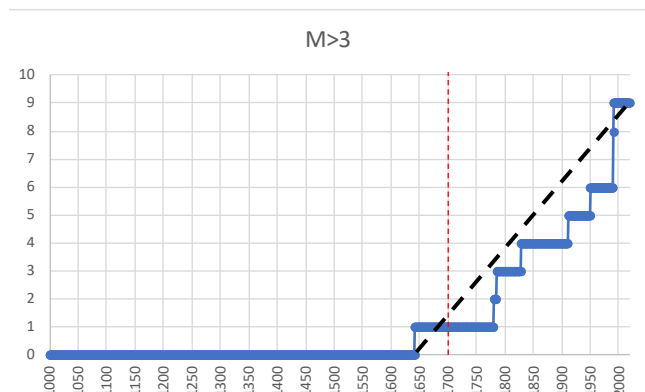
## 6.1.2 Z2 – Intervalli di completezza



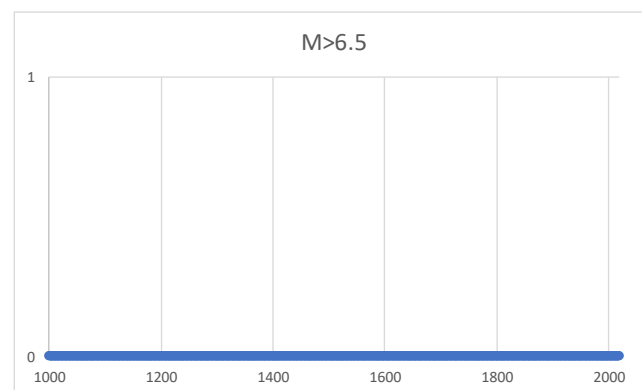
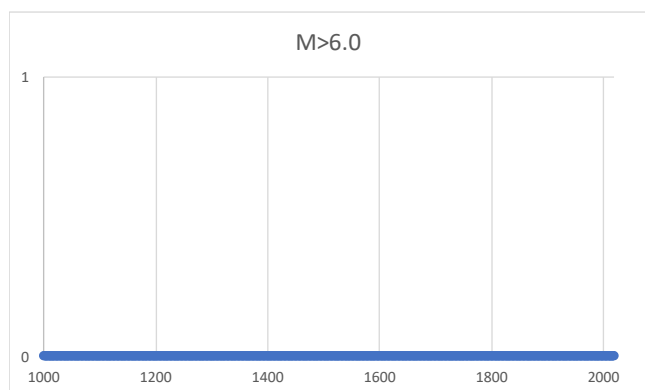
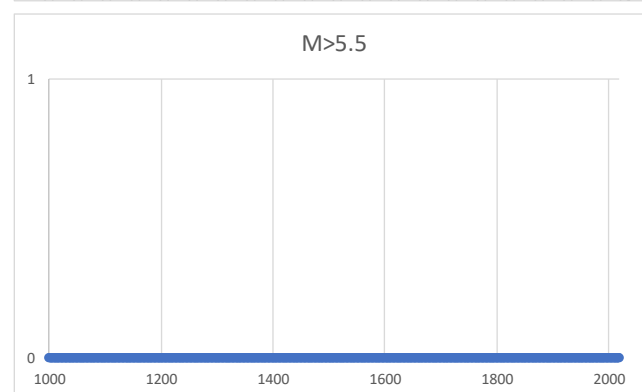
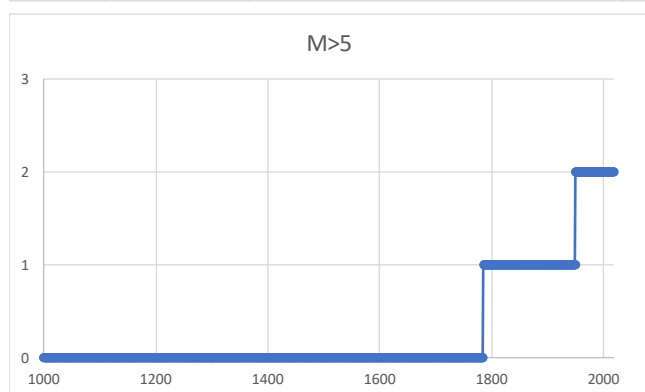
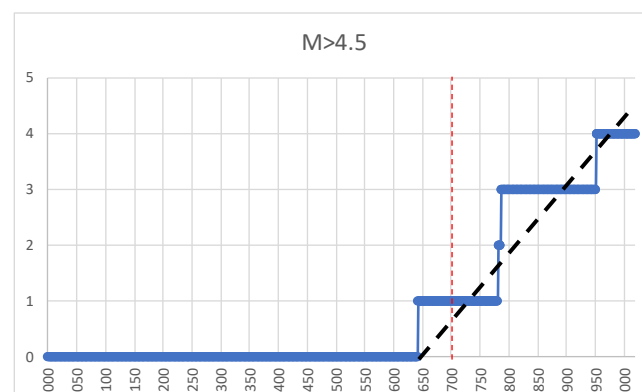
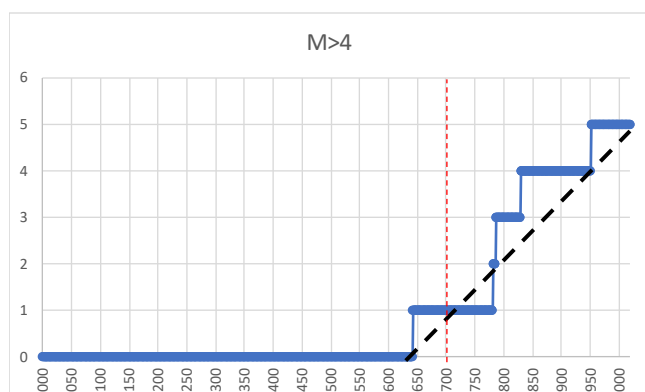
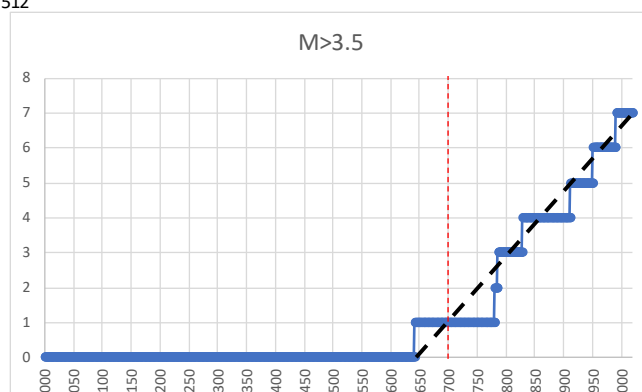
511

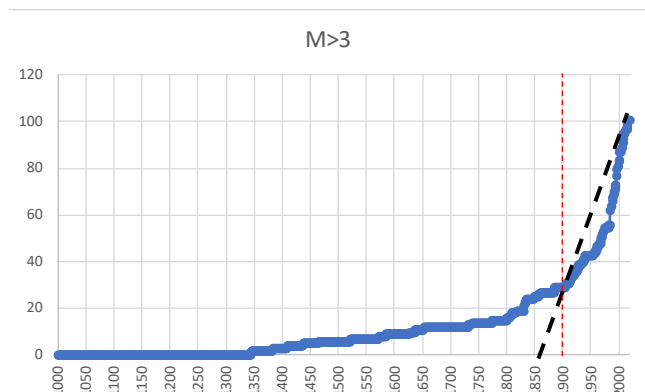




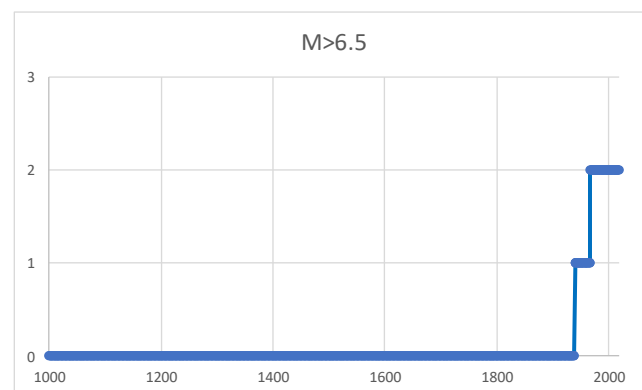
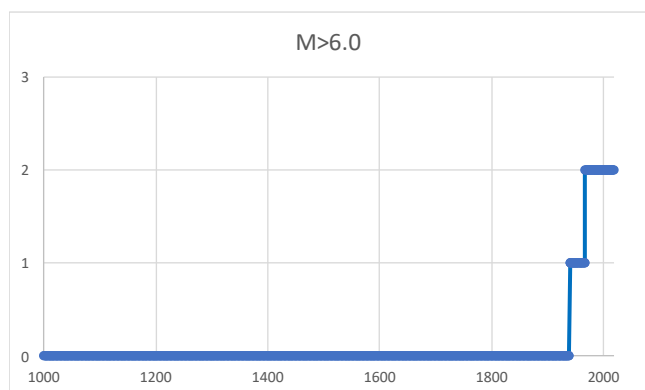
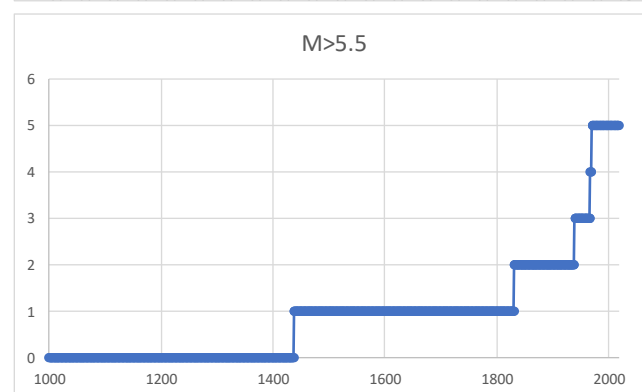
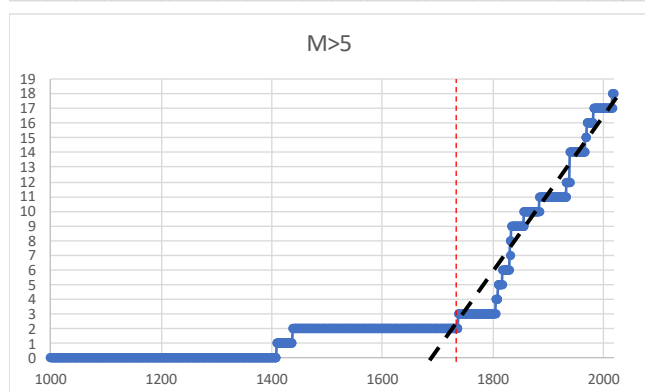
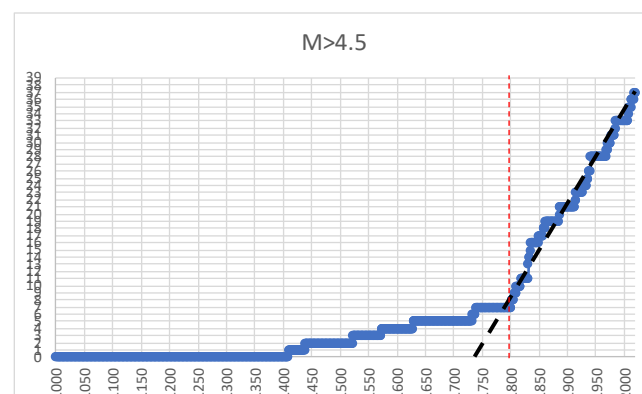
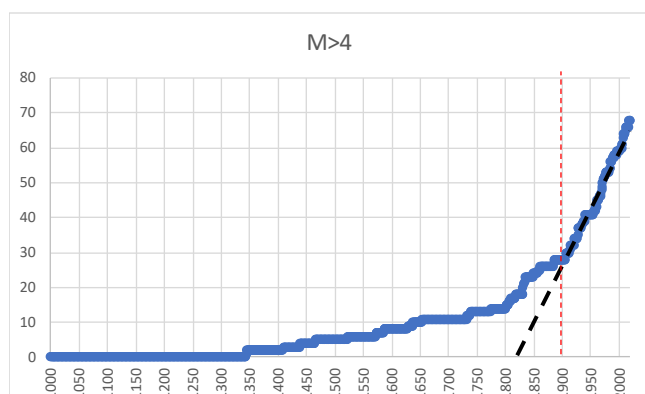
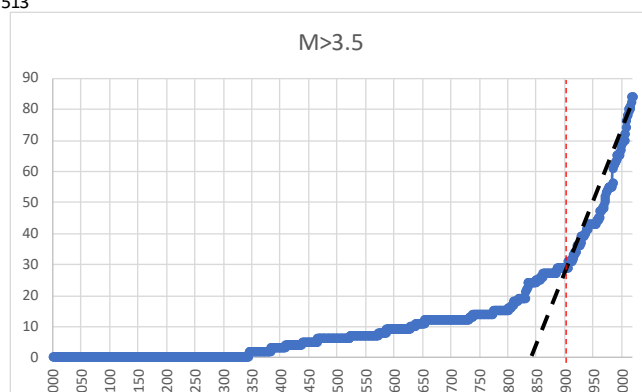


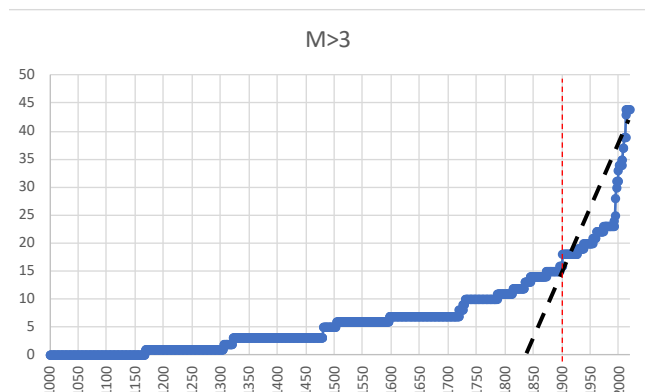
512



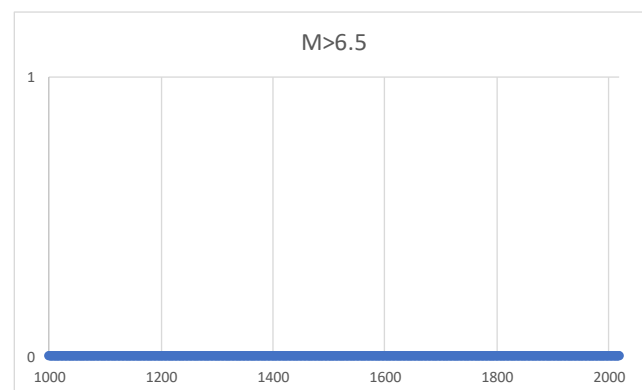
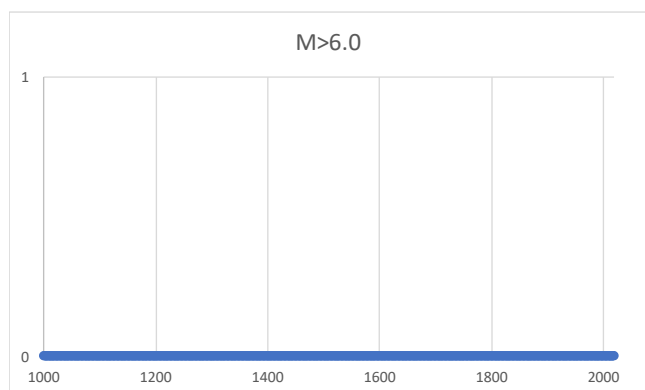
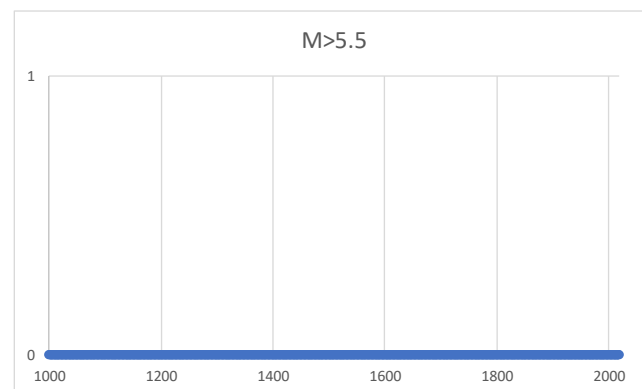
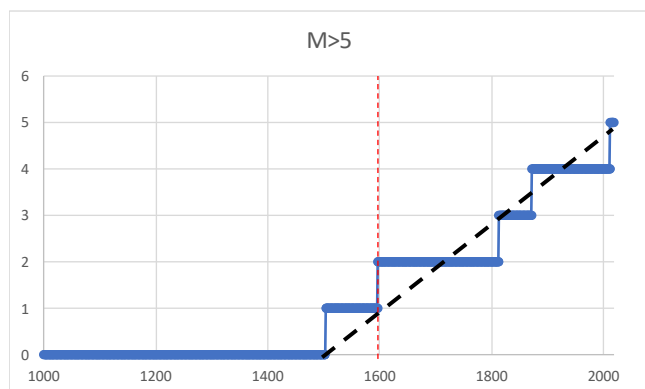
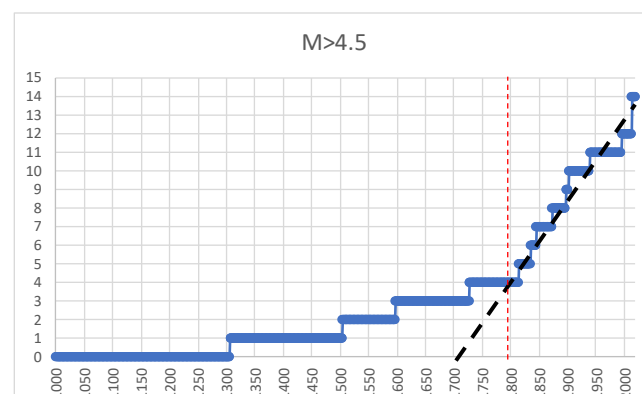
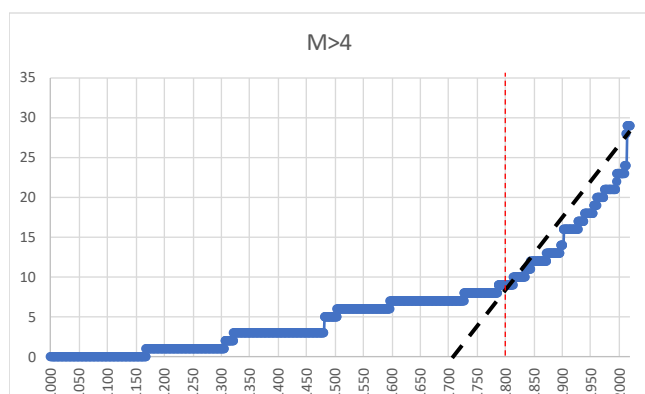
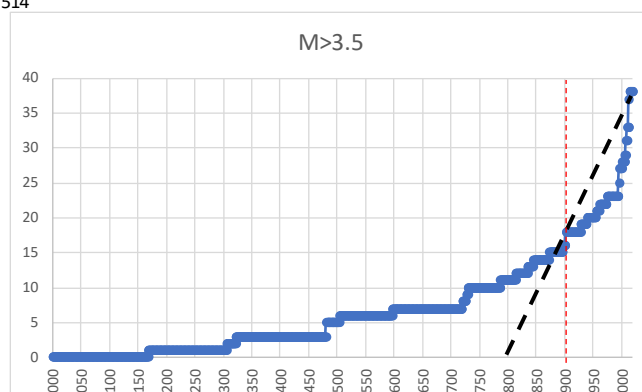


513

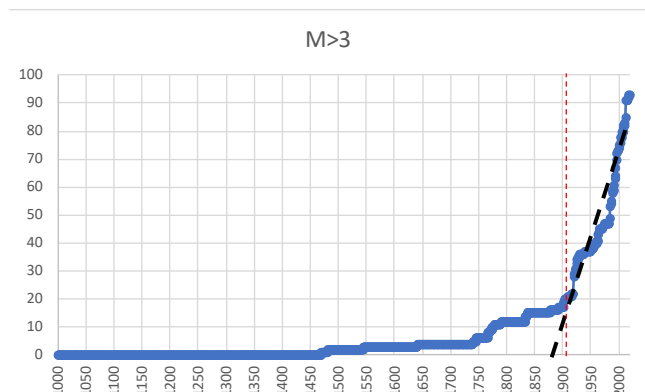




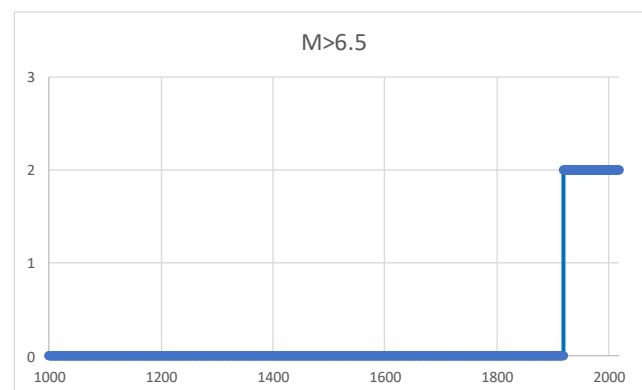
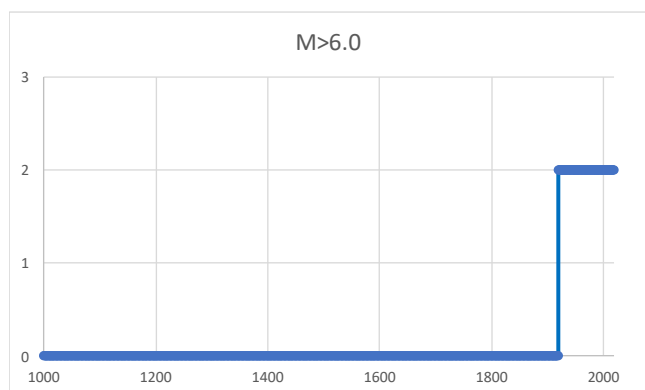
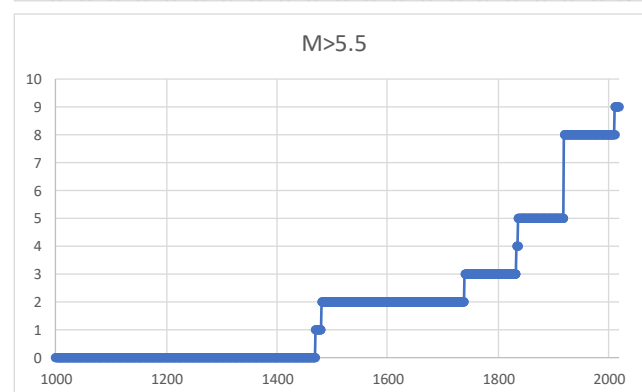
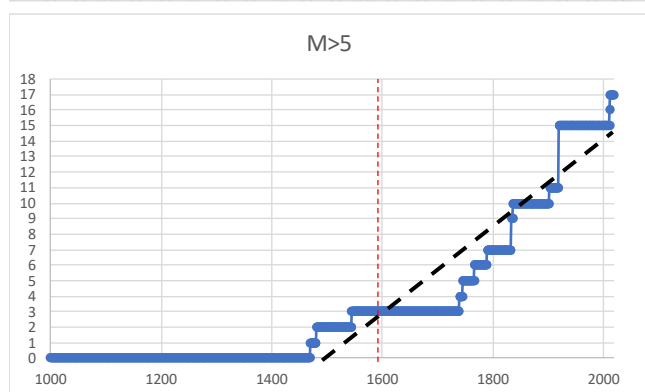
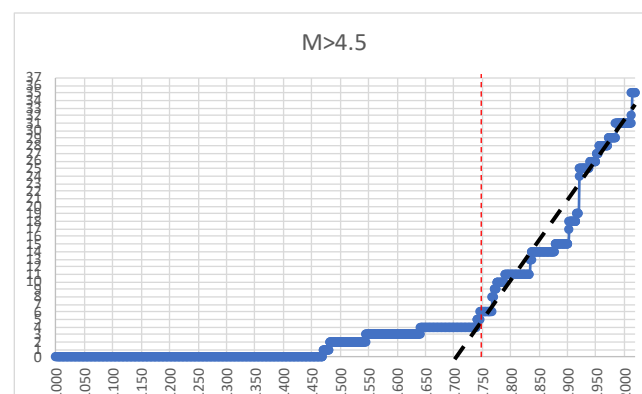
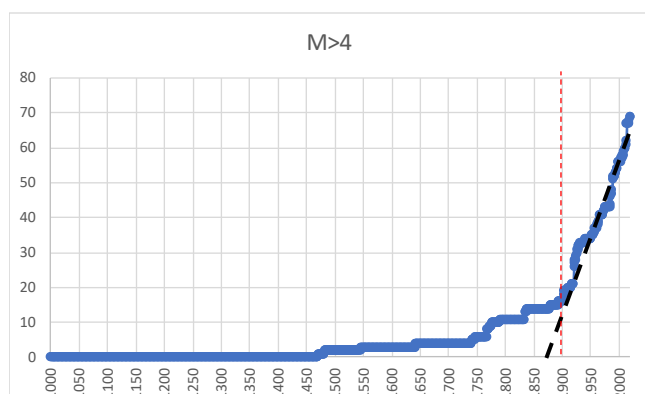
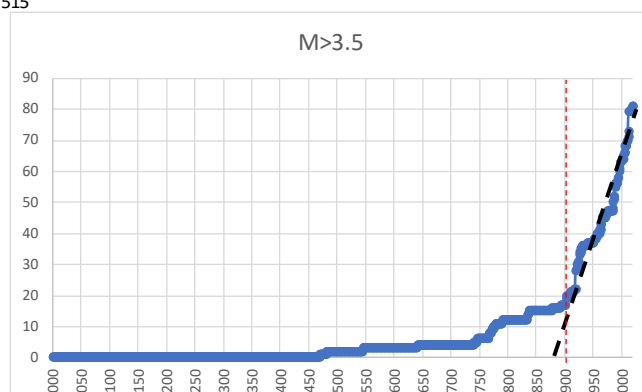
514

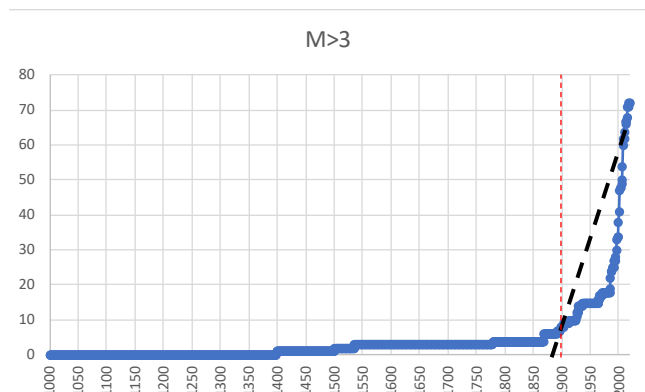




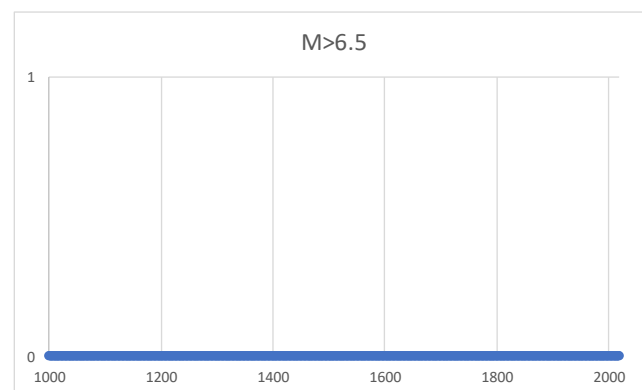
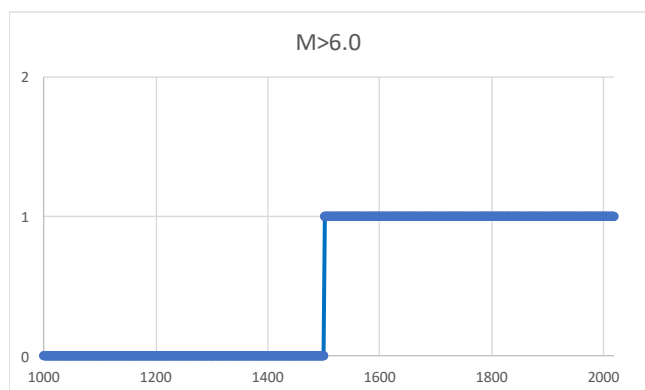
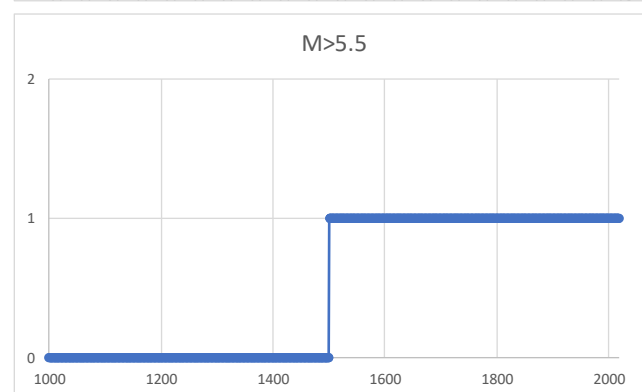
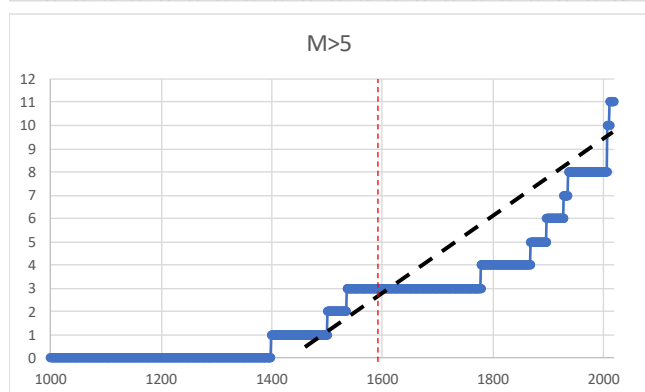
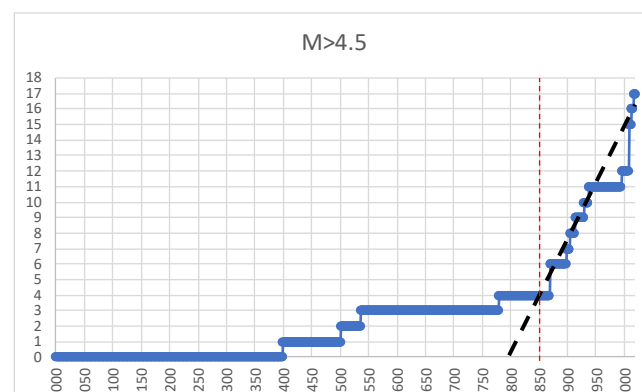
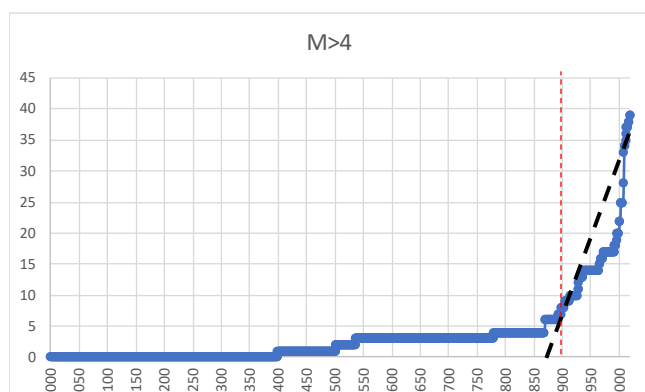
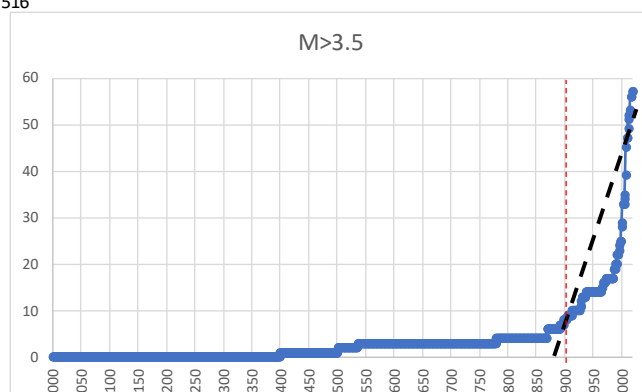


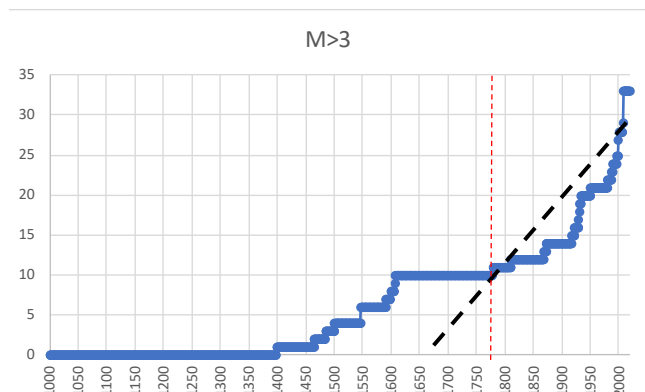
515



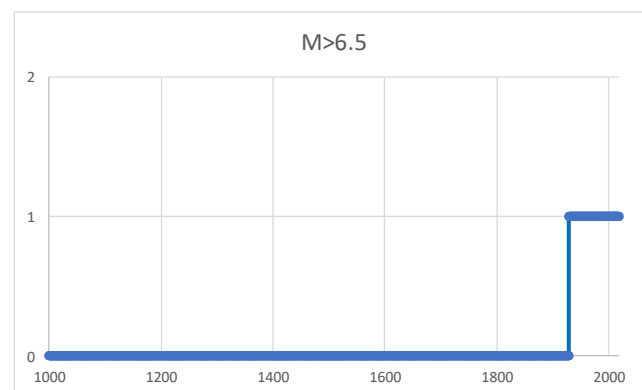
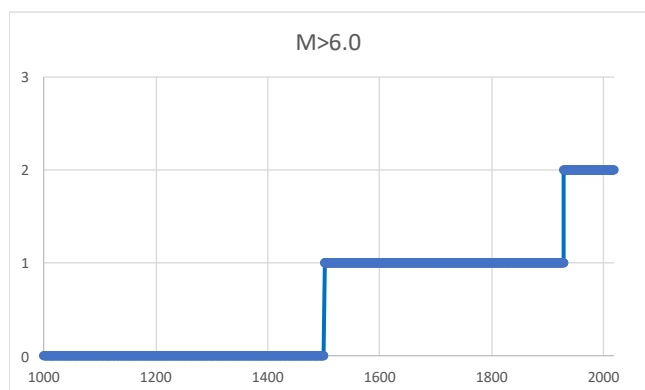
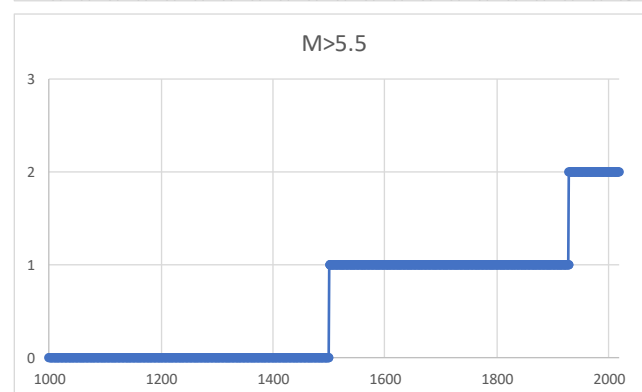
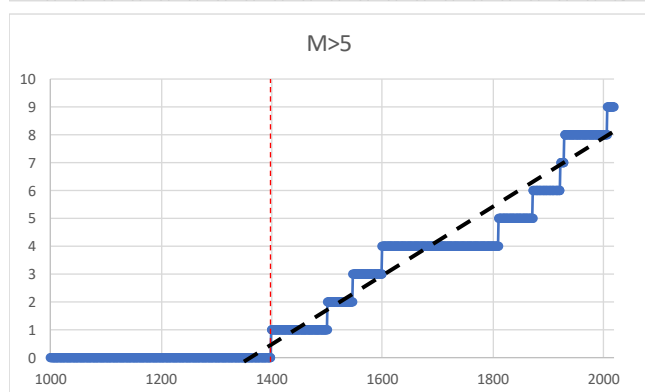
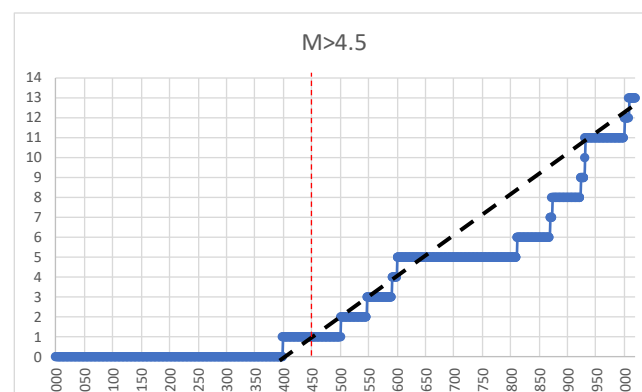
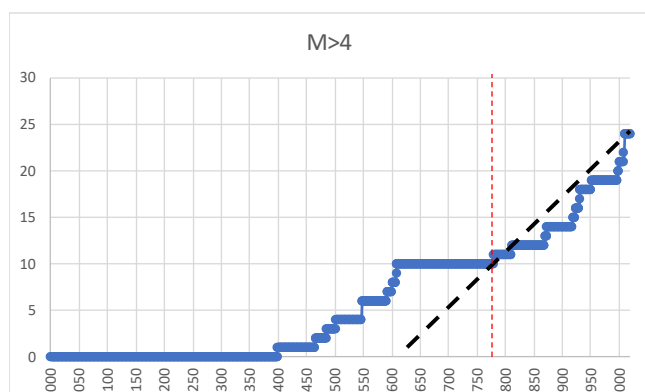
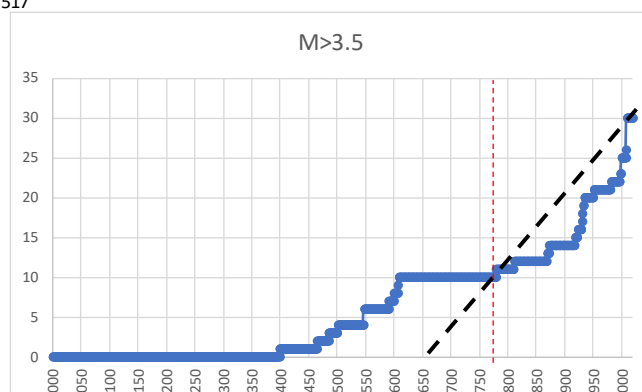


516



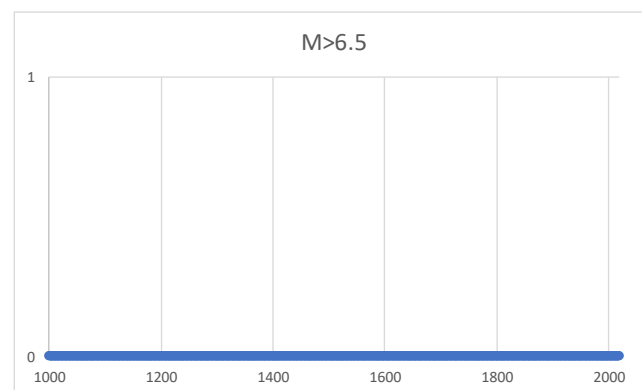
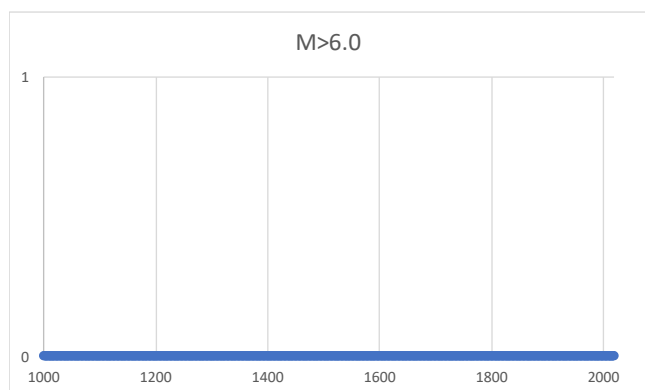
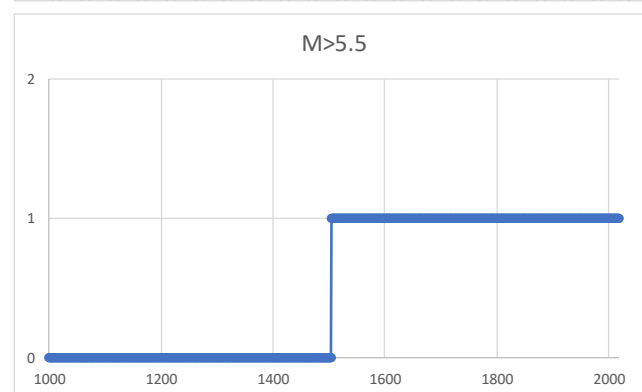
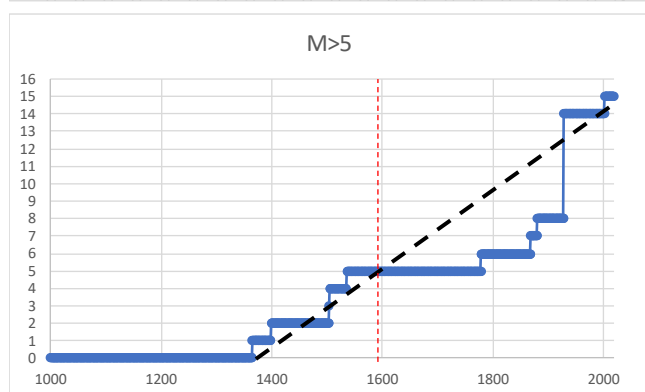
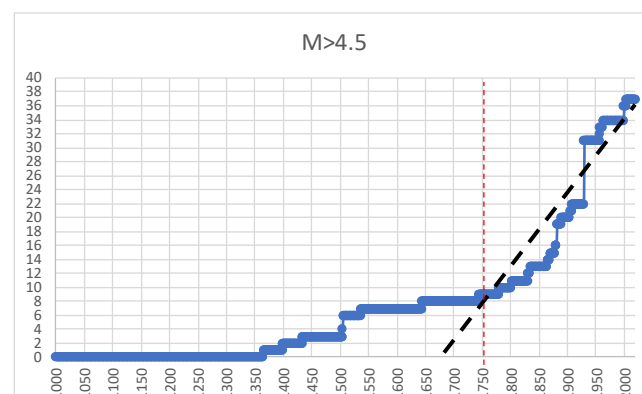
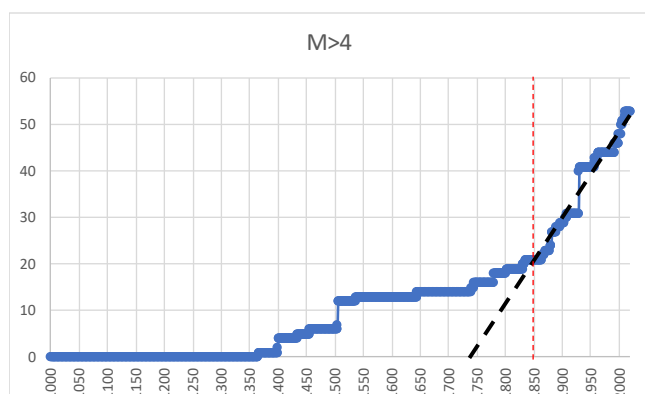
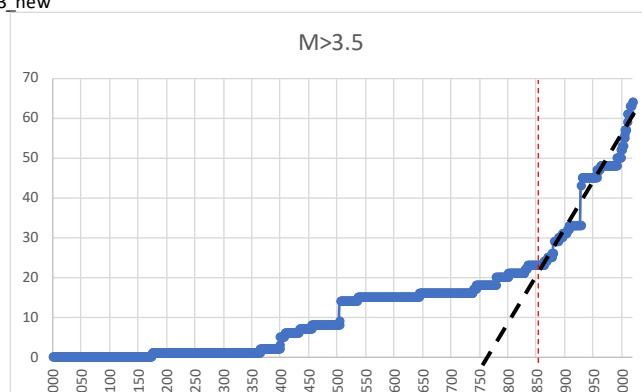
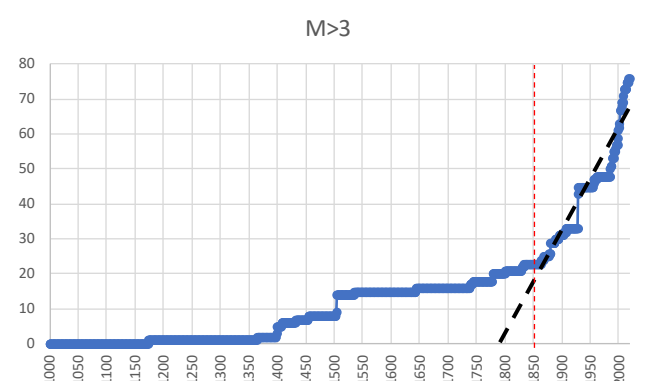


517

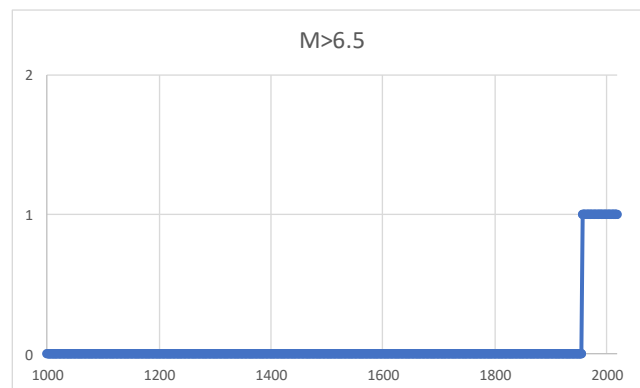
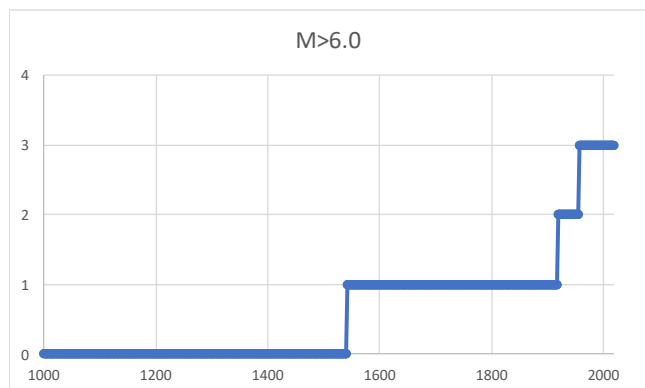
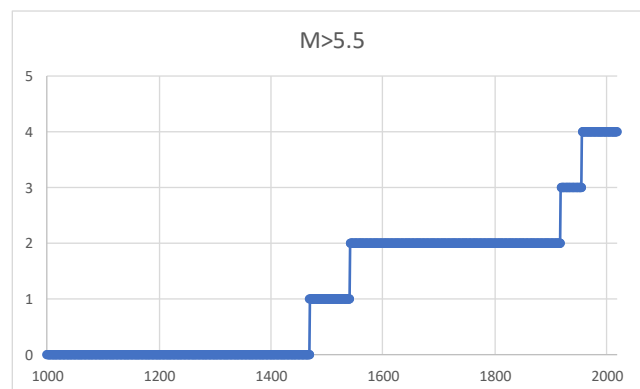
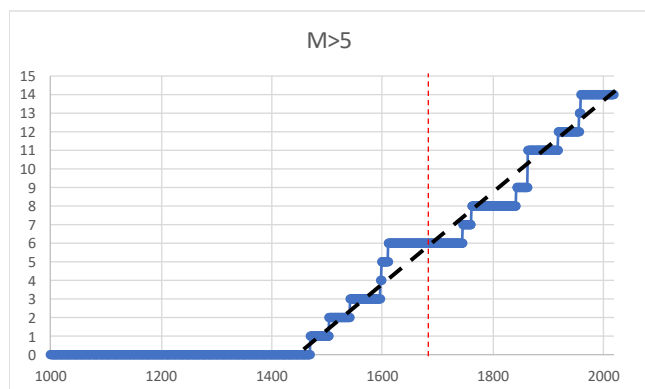
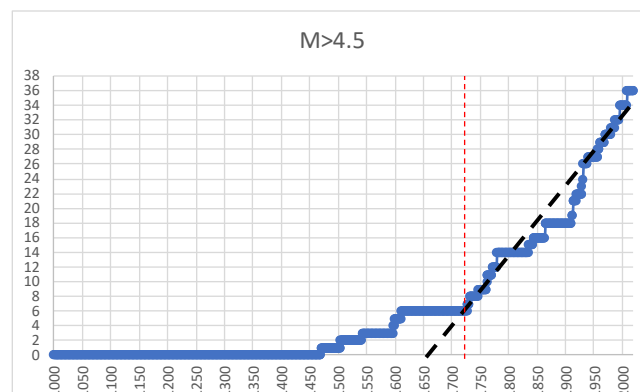
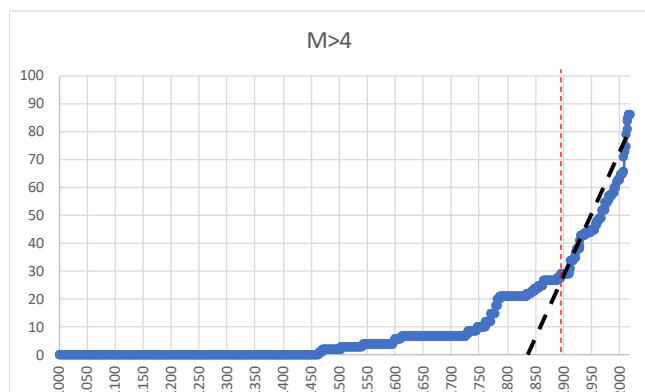
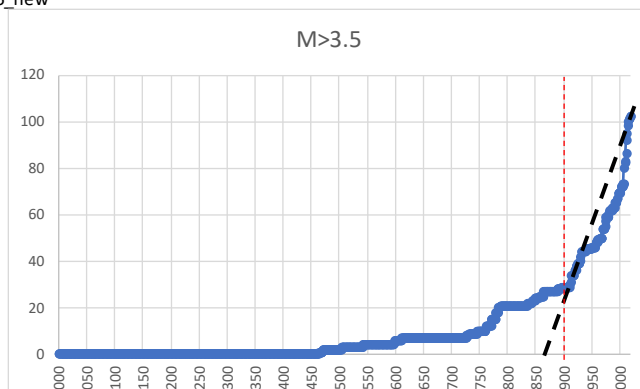
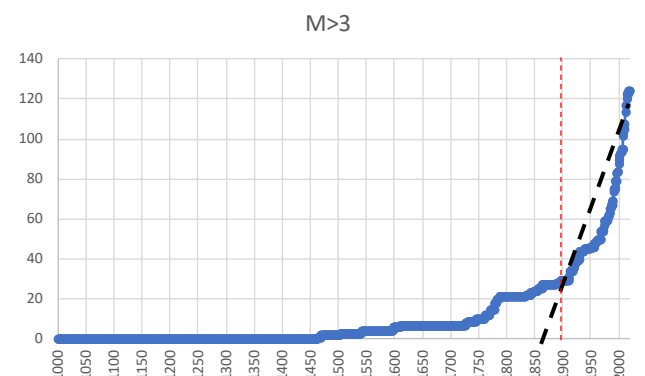




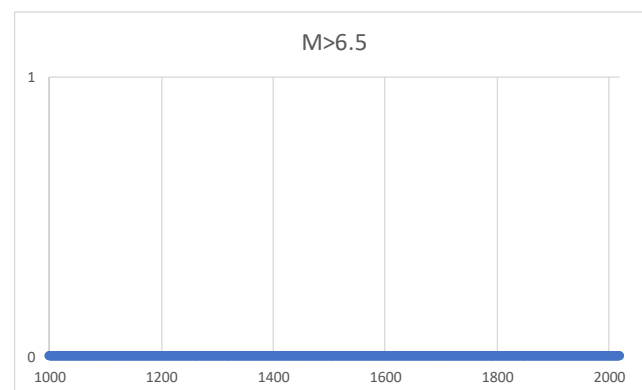
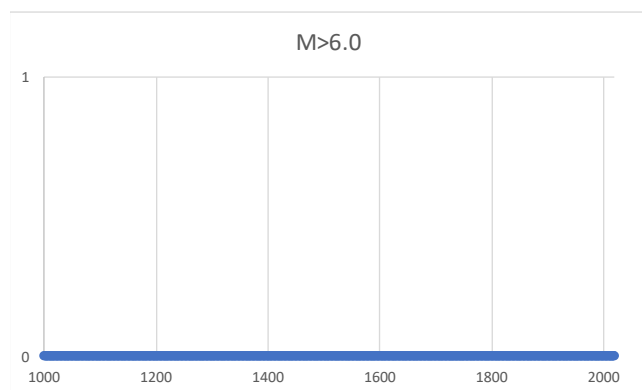
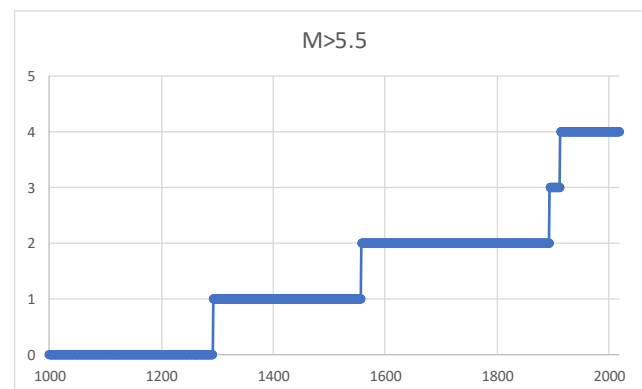
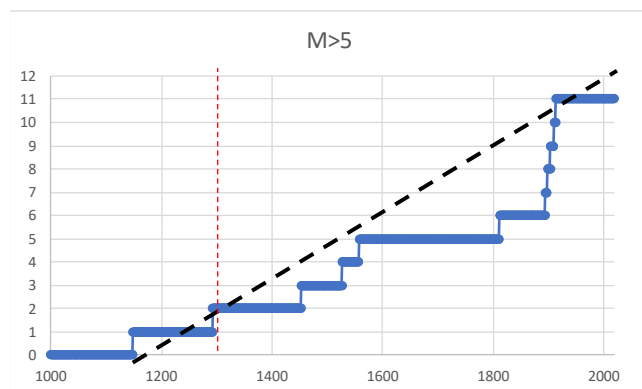
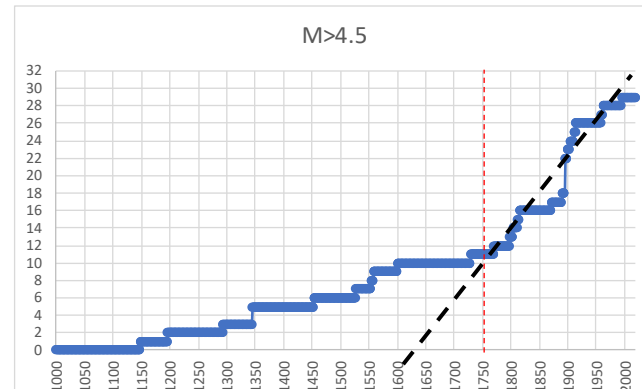
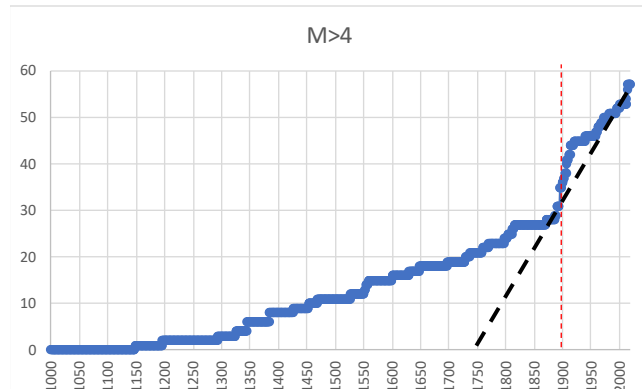
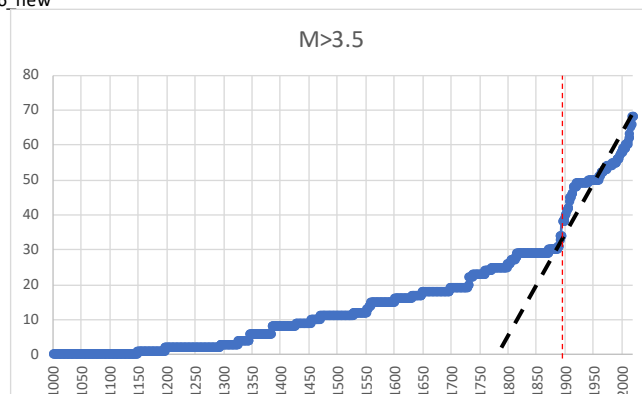
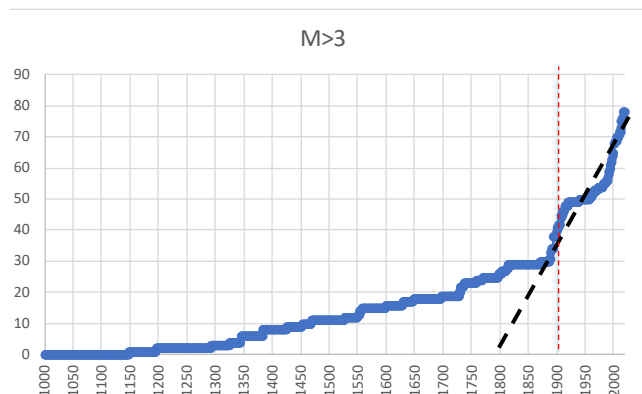
913\_new



915\_new



916\_new





Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	511	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	512
M $\geq$ 3.0	1900	119		M $\geq$ 3.0	1700	319	
M $\geq$ 3.5	1900	119		M $\geq$ 3.5	1700	319	
M $\geq$ 4.0	1900	119		M $\geq$ 4.0	1700	319	
M $\geq$ 4.5	1850	169		M $\geq$ 4.5	1700	319	
M $\geq$ 5.0	1600	419		M $\geq$ 5.0	1600	419	
M $\geq$ 5.5	1541	478		M $\geq$ 5.5	1600	419	
M $\geq$ 6.0	1541	478		M $\geq$ 6.0	1600	419	
M $\geq$ 6.5	1541	478		M $\geq$ 6.5	1600	419	

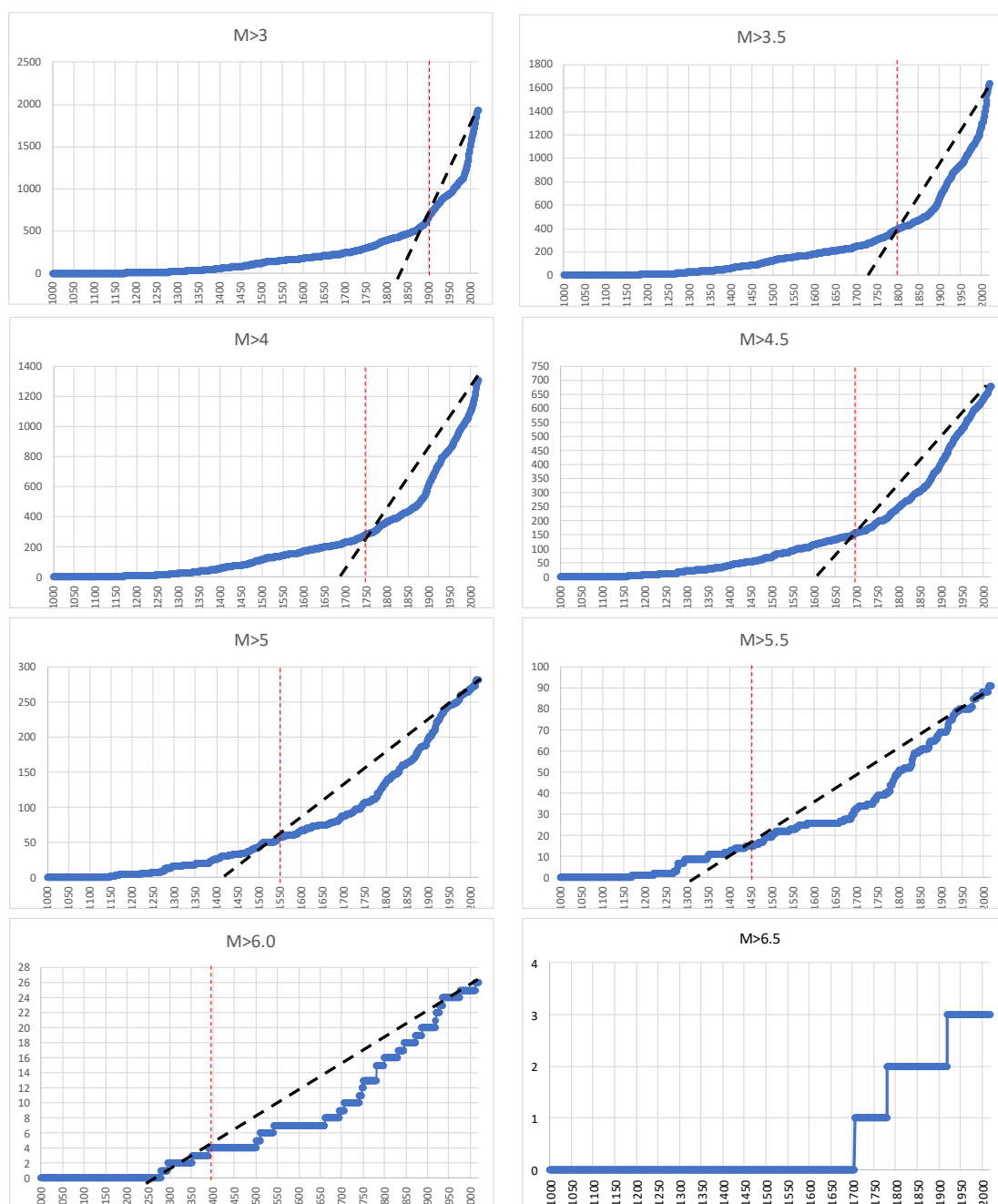
Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	513	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	514
M $\geq$ 3.0	1900	119		M $\geq$ 3.0	1900	119	
M $\geq$ 3.5	1900	119		M $\geq$ 3.5	1900	119	
M $\geq$ 4.0	1900	119		M $\geq$ 4.0	1800	219	
M $\geq$ 4.5	1800	219		M $\geq$ 4.5	1800	219	
M $\geq$ 5.0	1750	269		M $\geq$ 5.0	1600	419	
M $\geq$ 5.5	1344	675		M $\geq$ 5.5	1168	851	
M $\geq$ 6.0	1344	675		M $\geq$ 6.0	1168	851	
M $\geq$ 6.5	1344	675		M $\geq$ 6.5	1168	851	

Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	515	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	516
M $\geq$ 3.0	1900	119		M $\geq$ 3.0	1900	119	
M $\geq$ 3.5	1900	119		M $\geq$ 3.5	1900	119	
M $\geq$ 4.0	1900	119		M $\geq$ 4.0	1900	119	
M $\geq$ 4.5	1750	269		M $\geq$ 4.5	1850	169	
M $\geq$ 5.0	1600	419		M $\geq$ 5.0	1600	419	
M $\geq$ 5.5	1470	549		M $\geq$ 5.5	1399	620	
M $\geq$ 6.0	1470	549		M $\geq$ 6.0	1399	620	
M $\geq$ 6.5	1470	549		M $\geq$ 6.5	1399	620	

Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	517	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	913_new
M $\geq$ 3.0	1775	244		M $\geq$ 3.0	1850	169	
M $\geq$ 3.5	1775	244		M $\geq$ 3.5	1850	169	
M $\geq$ 4.0	1775	244		M $\geq$ 4.0	1850	169	
M $\geq$ 4.5	1450	569		M $\geq$ 4.5	1750	269	
M $\geq$ 5.0	1399	620		M $\geq$ 5.0	1600	419	
M $\geq$ 5.5	1399	620		M $\geq$ 5.5	1174	845	
M $\geq$ 6.0	1399	620		M $\geq$ 6.0	1174	845	
M $\geq$ 6.5	1399	620		M $\geq$ 6.5	1174	845	

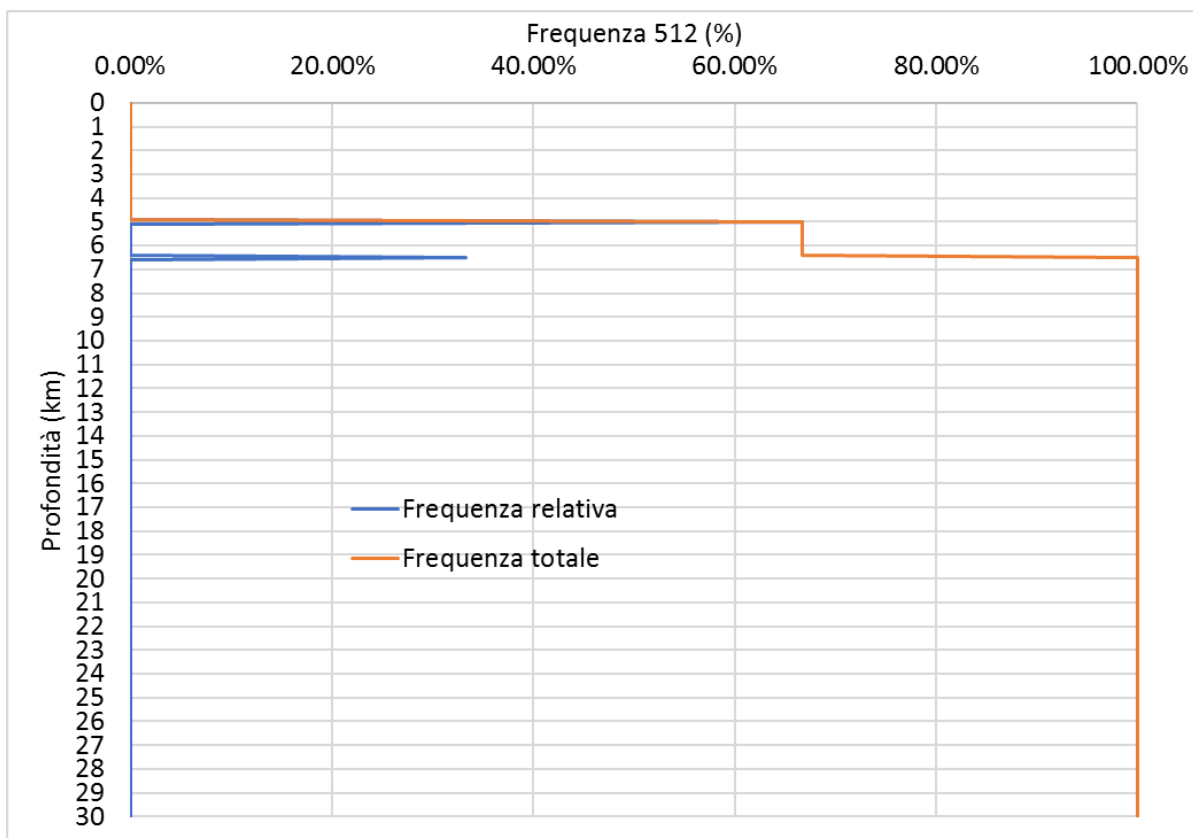
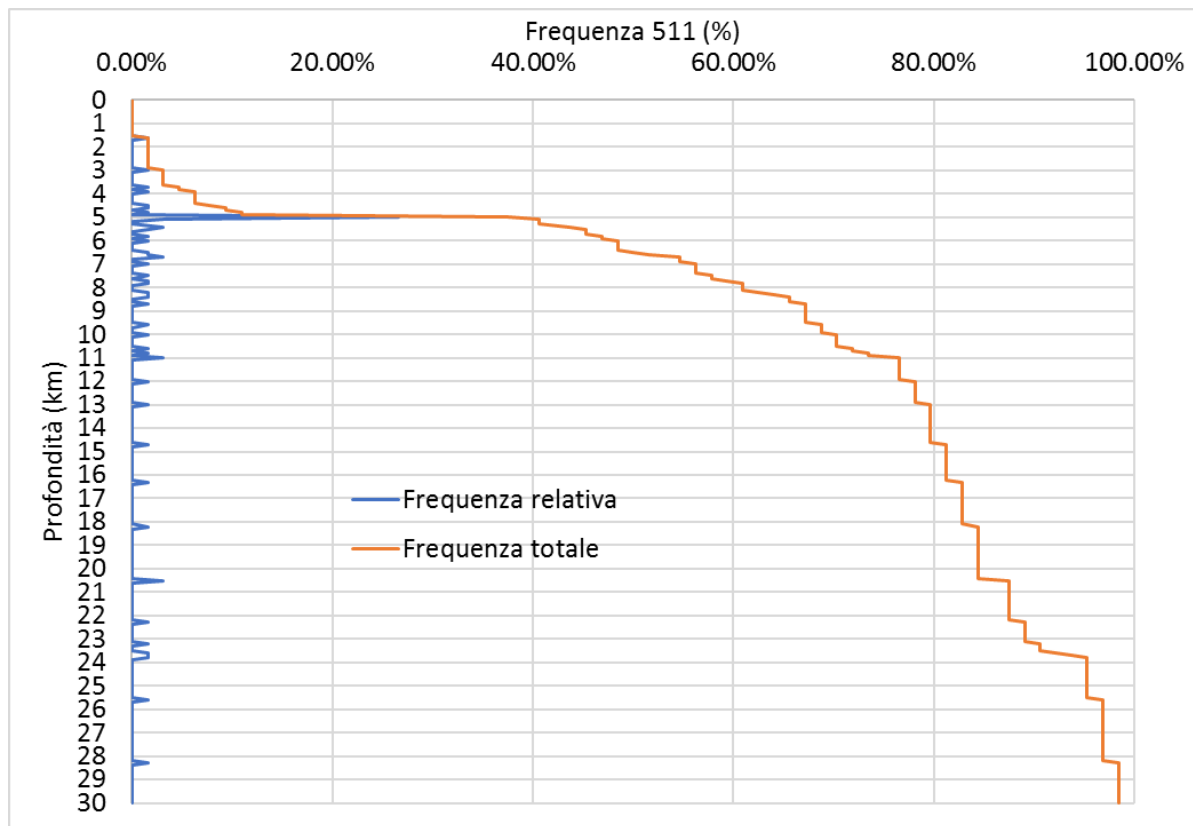
Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	915_new	Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza	916_new
M $\geq$ 3.0	1900	119		M $\geq$ 3.0	1900	119	
M $\geq$ 3.5	1900	119		M $\geq$ 3.5	1900	119	
M $\geq$ 4.0	1900	119		M $\geq$ 4.0	1900	119	
M $\geq$ 4.5	1725	294		M $\geq$ 4.5	1750	269	
M $\geq$ 5.0	1700	319		M $\geq$ 5.0	1600	419	
M $\geq$ 5.5	1464	555		M $\geq$ 5.5	1293	726	
M $\geq$ 6.0	1464	555		M $\geq$ 6.0	1148	871	
M $\geq$ 6.5	1464	555		M $\geq$ 6.5	1148	871	

### 6.1.3 ZS9 – Analisi di sensitività – Intervalli di completezza globali

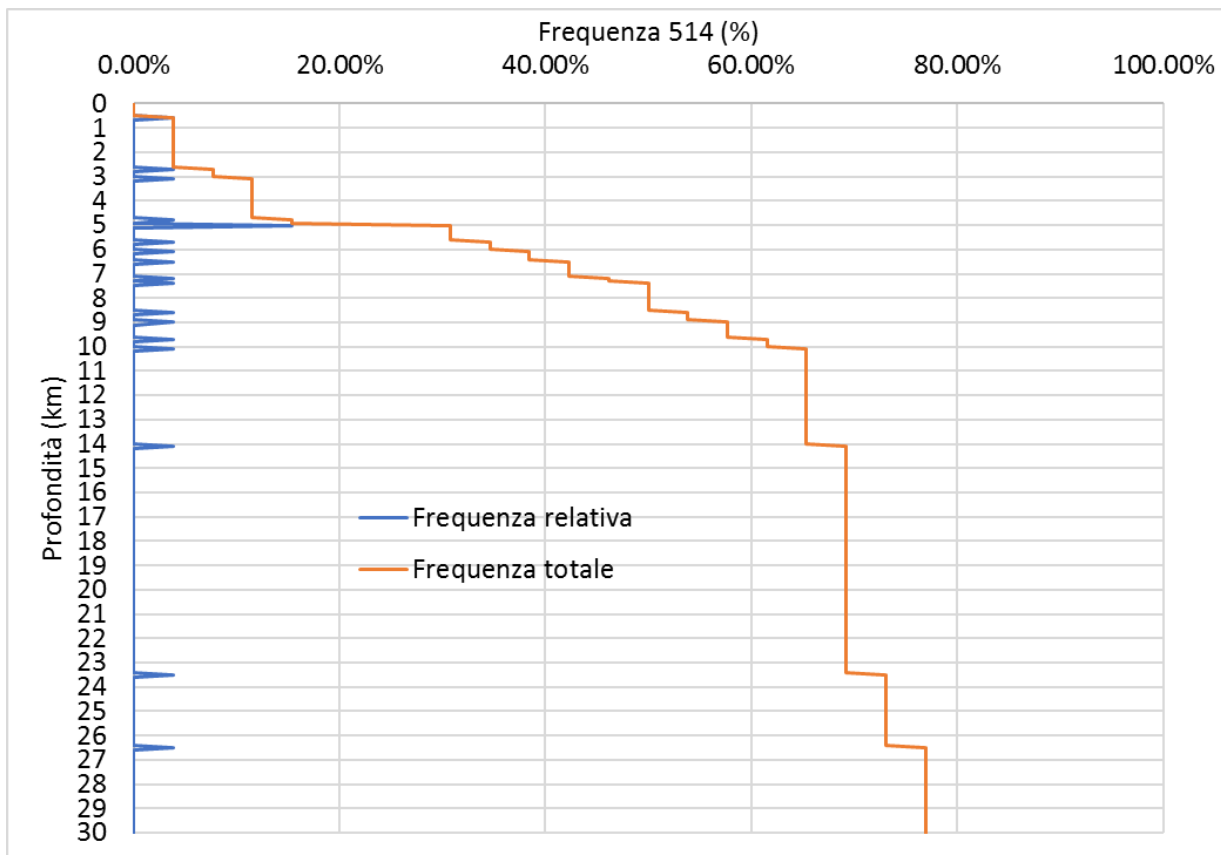
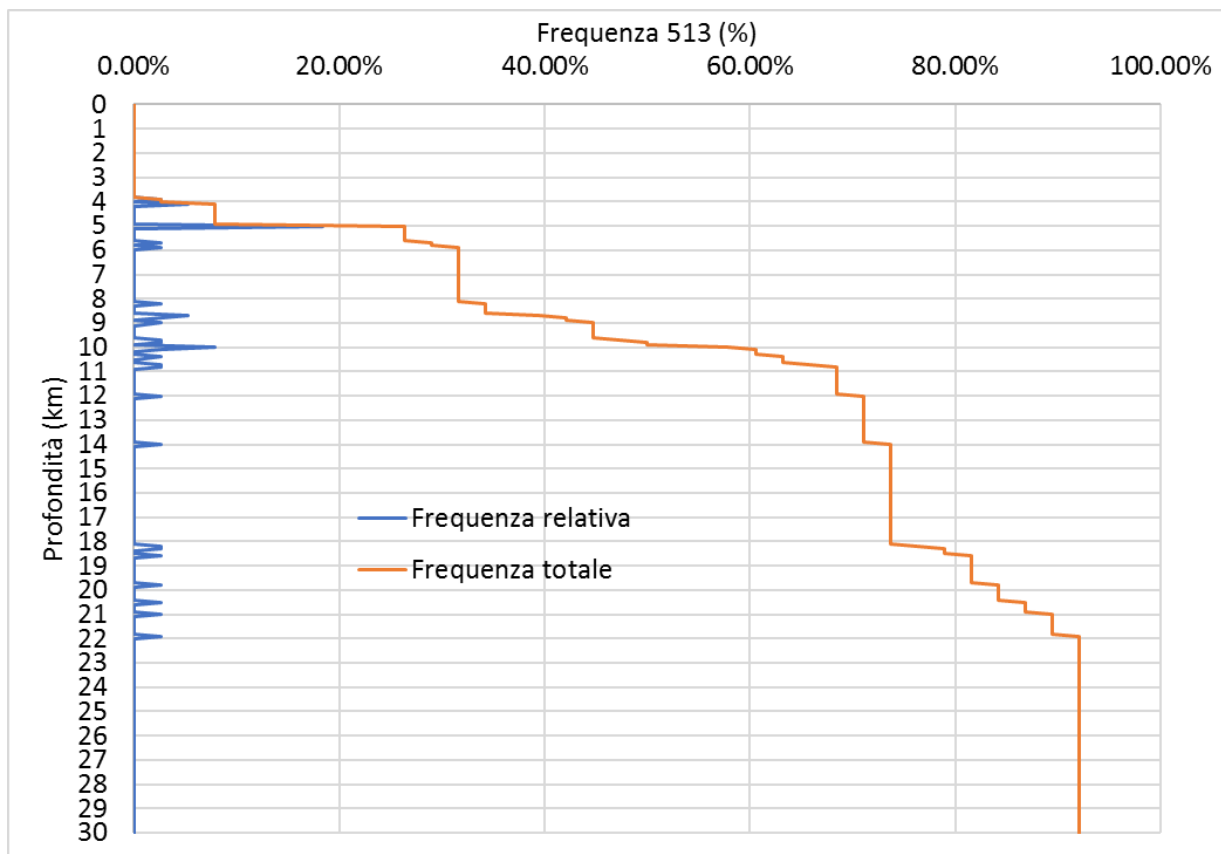


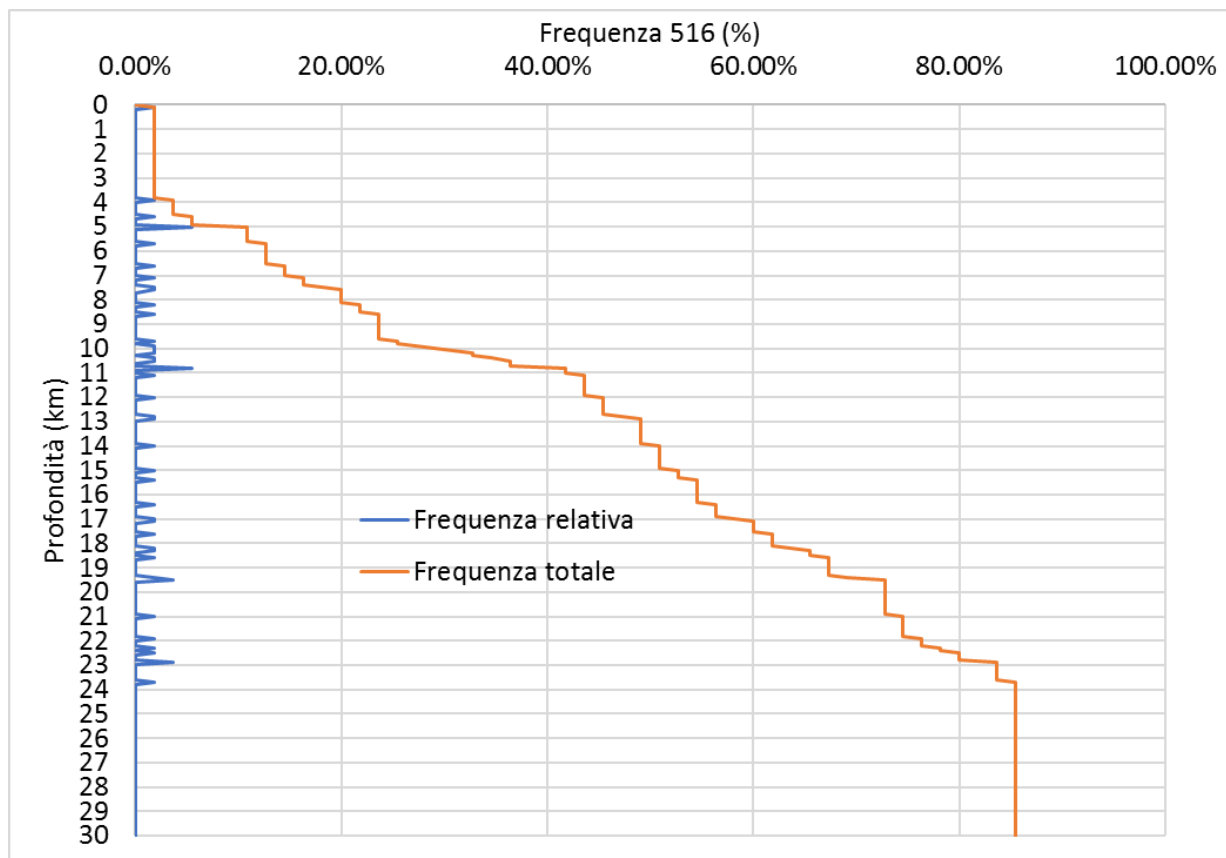
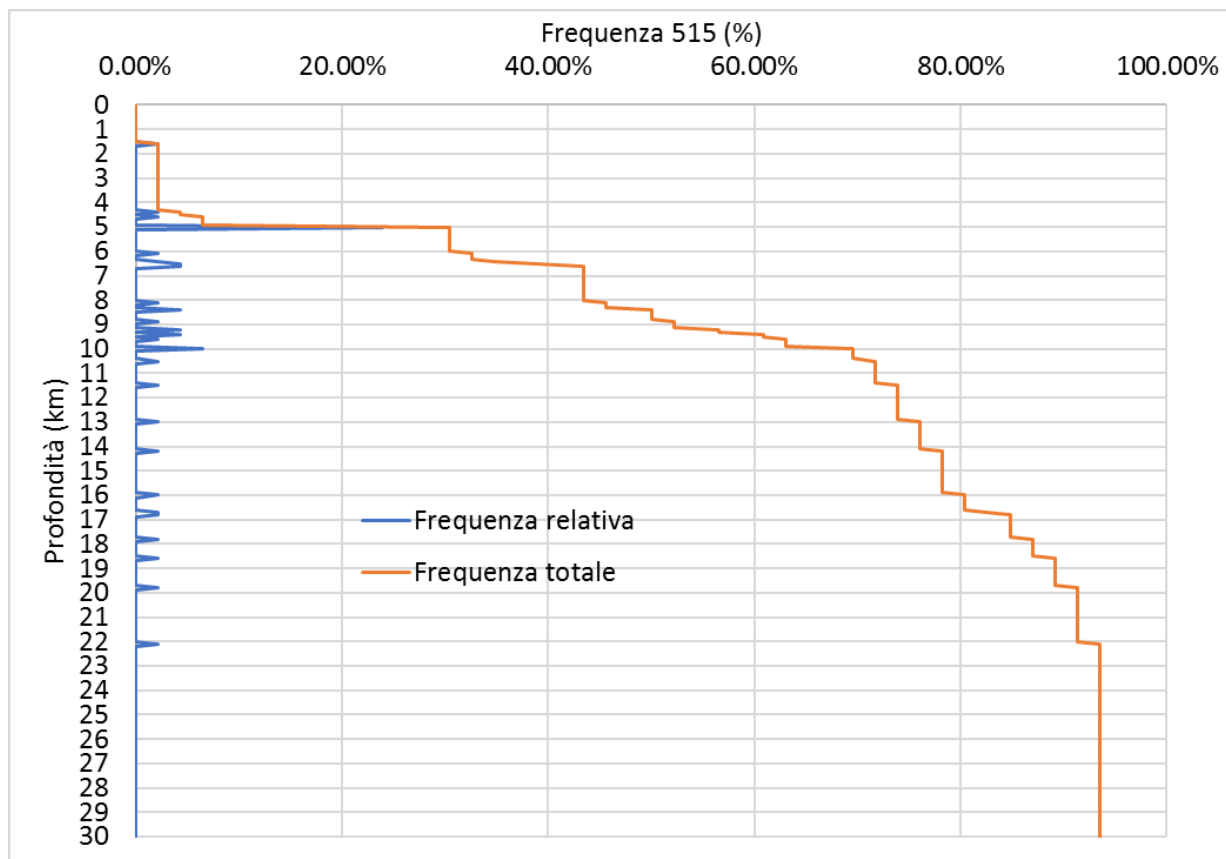
Condizione	ANNO COMPLETEZZA	Intervallo di completezza
$M \geq 3.0$	1900	119
$M \geq 3.5$	1800	219
$M \geq 4.0$	1750	269
$M \geq 4.5$	1700	319
$M \geq 5.0$	1550	469
$M \geq 5.5$	1450	569
$M \geq 6.0$	1300	719
$M \geq 6.5$	1005	1014

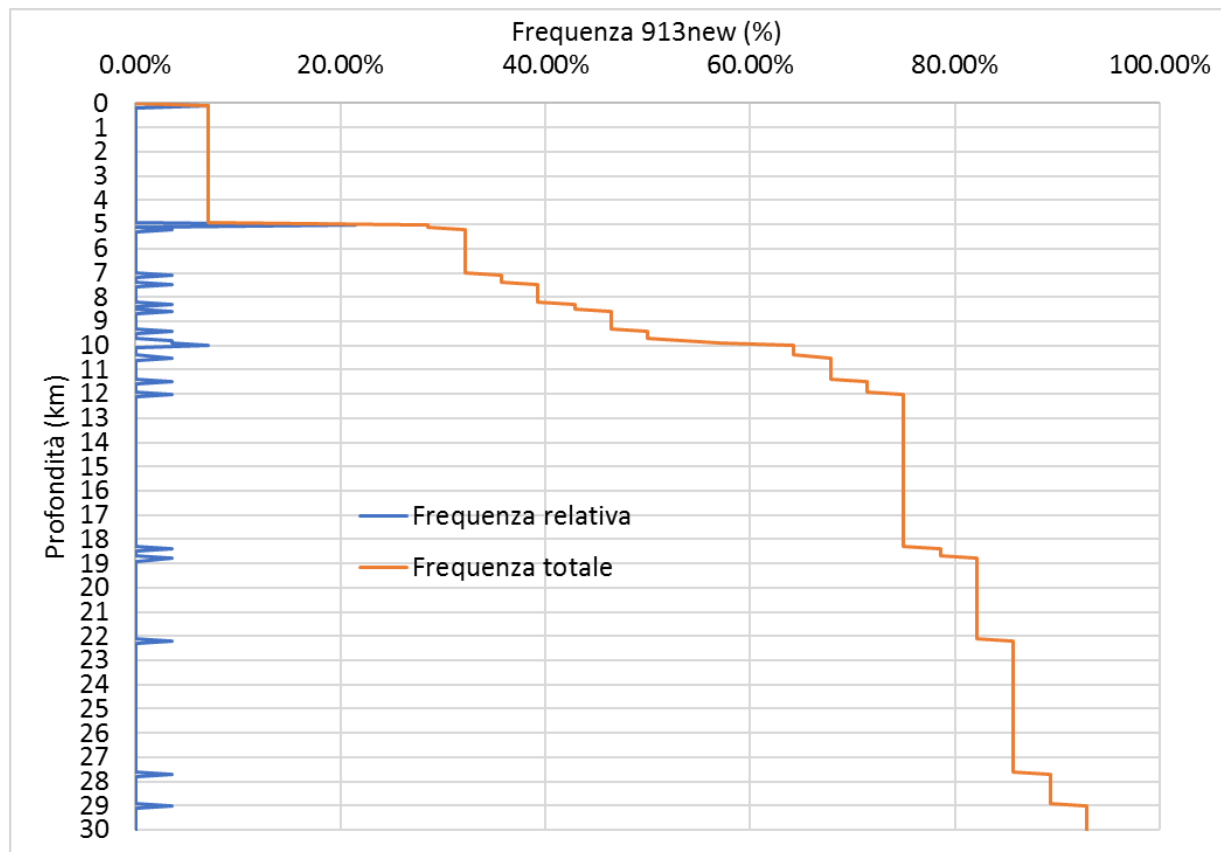
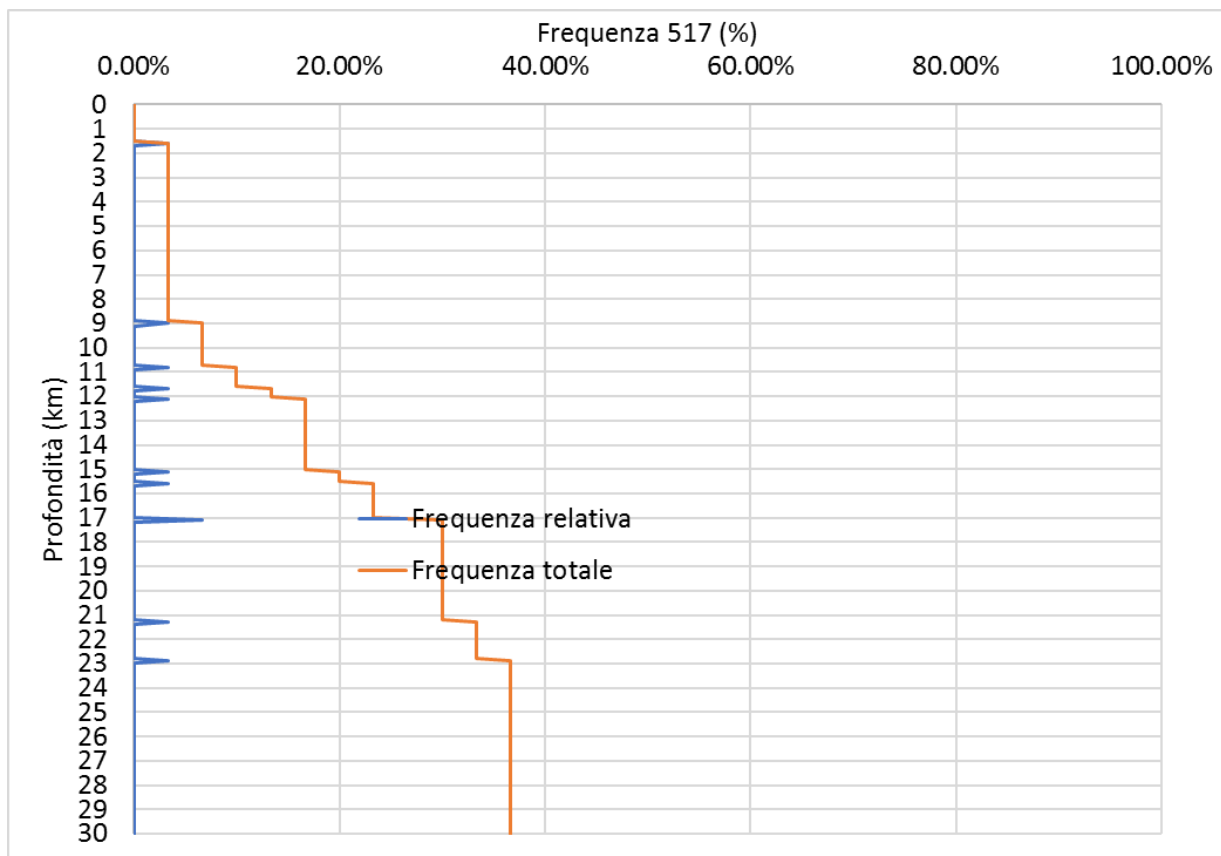
## 6.2 PROFONDITÀ EFFICACE– ZONAZIONE Z2



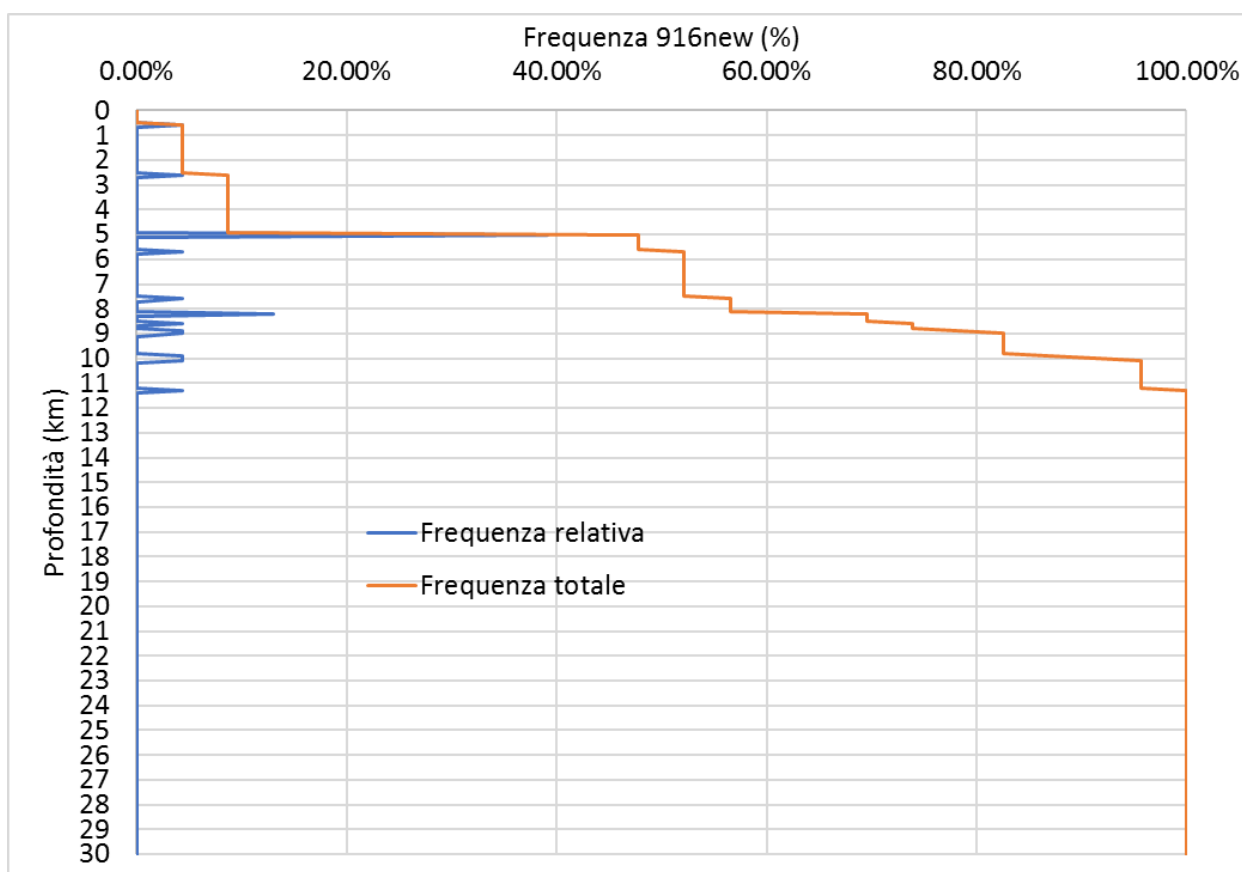
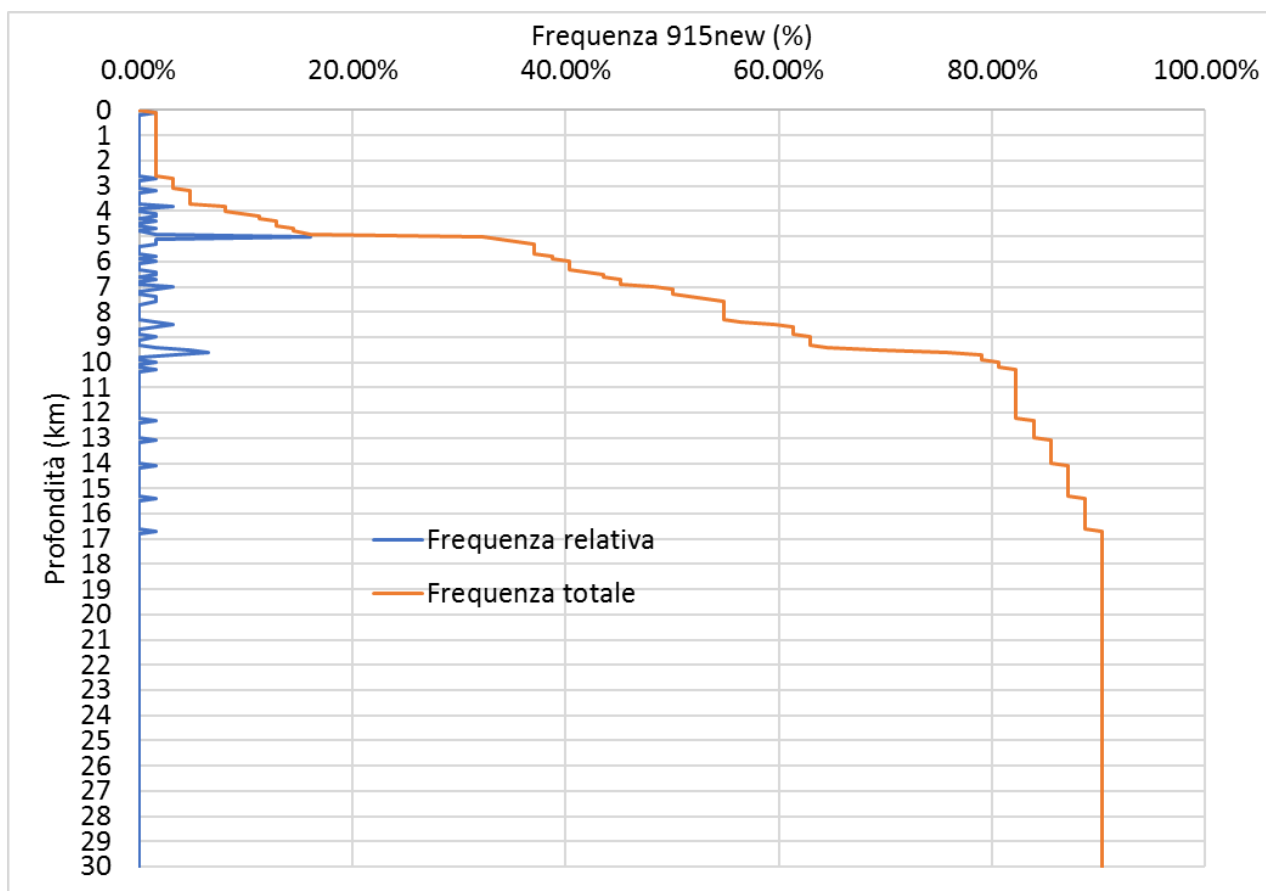






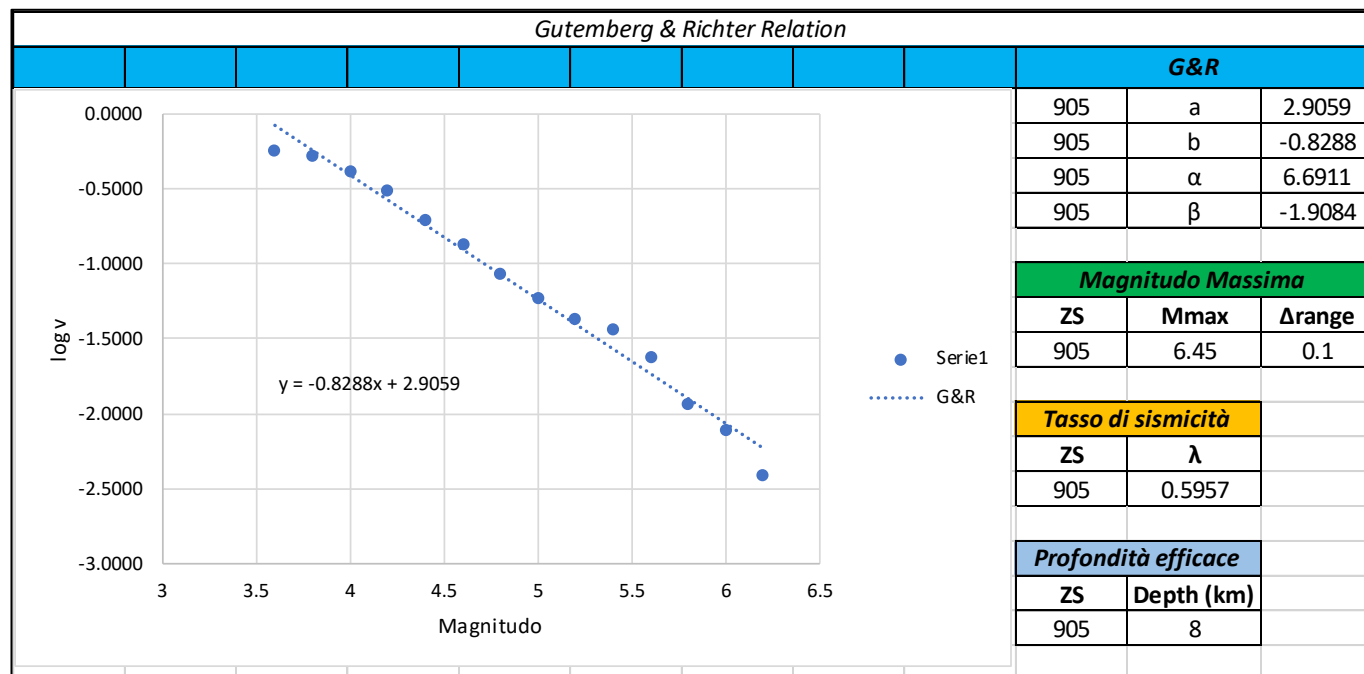
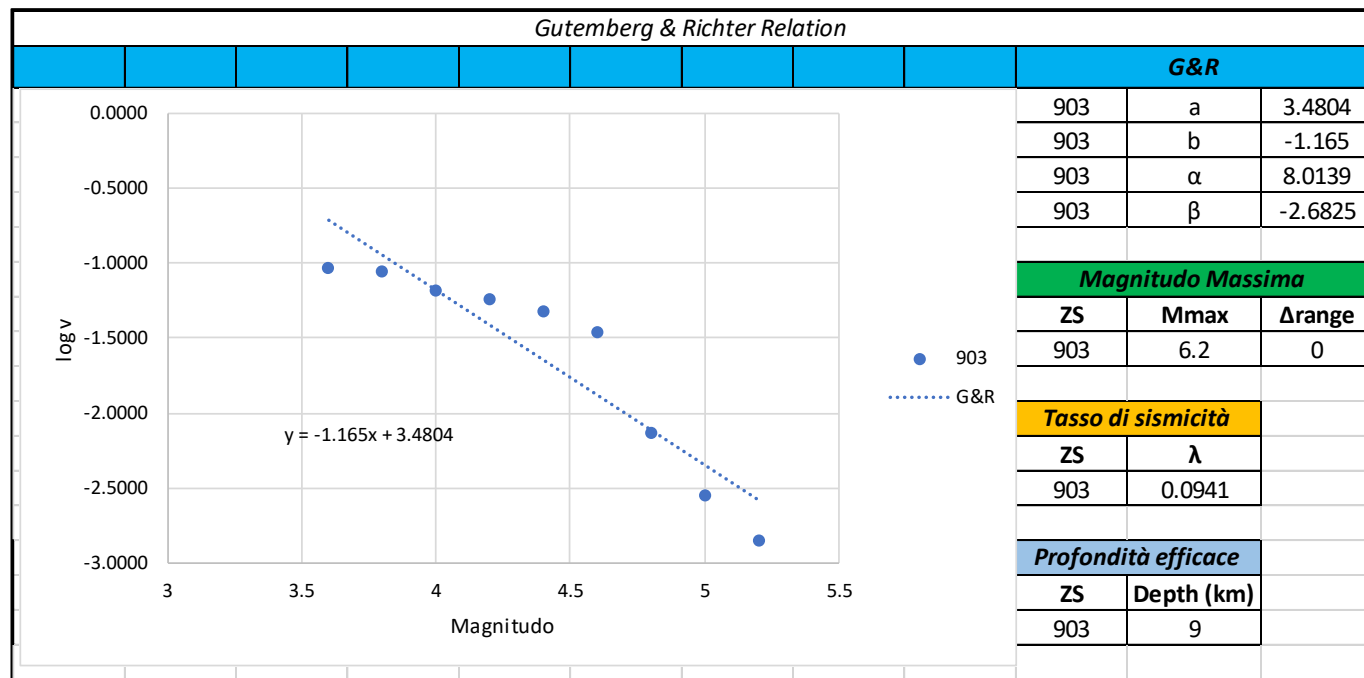


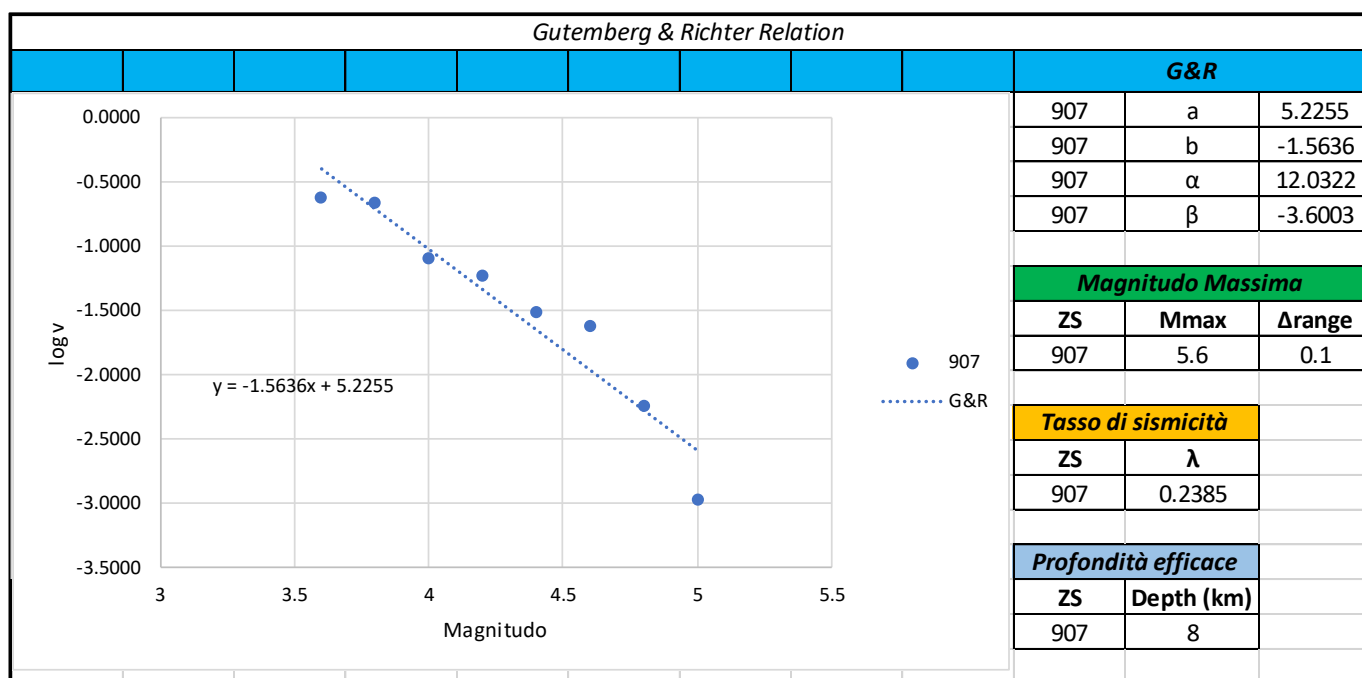
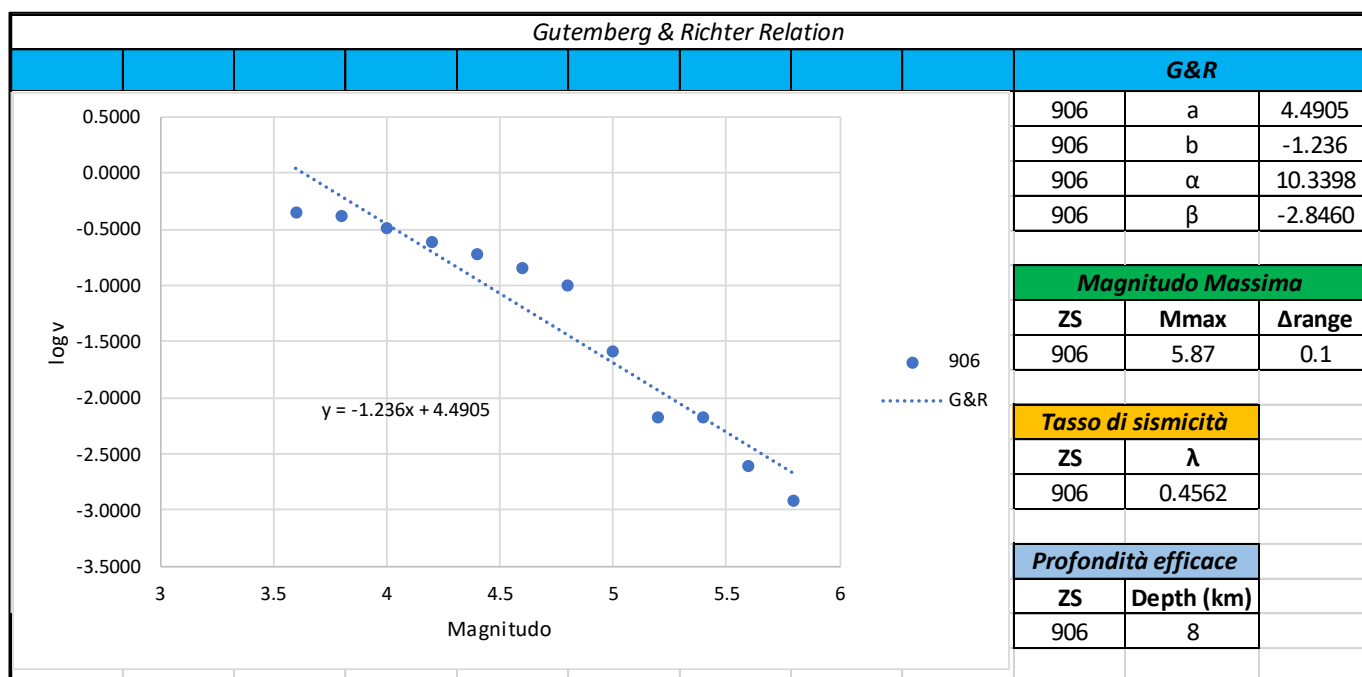




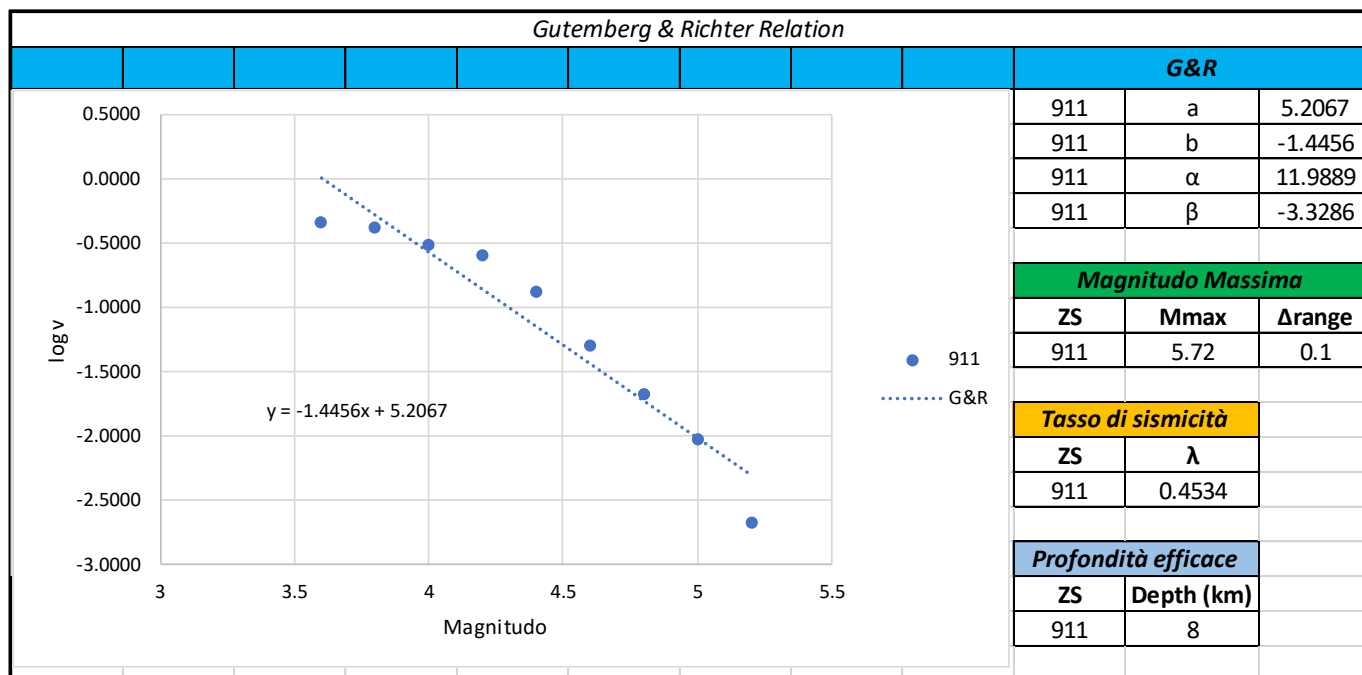
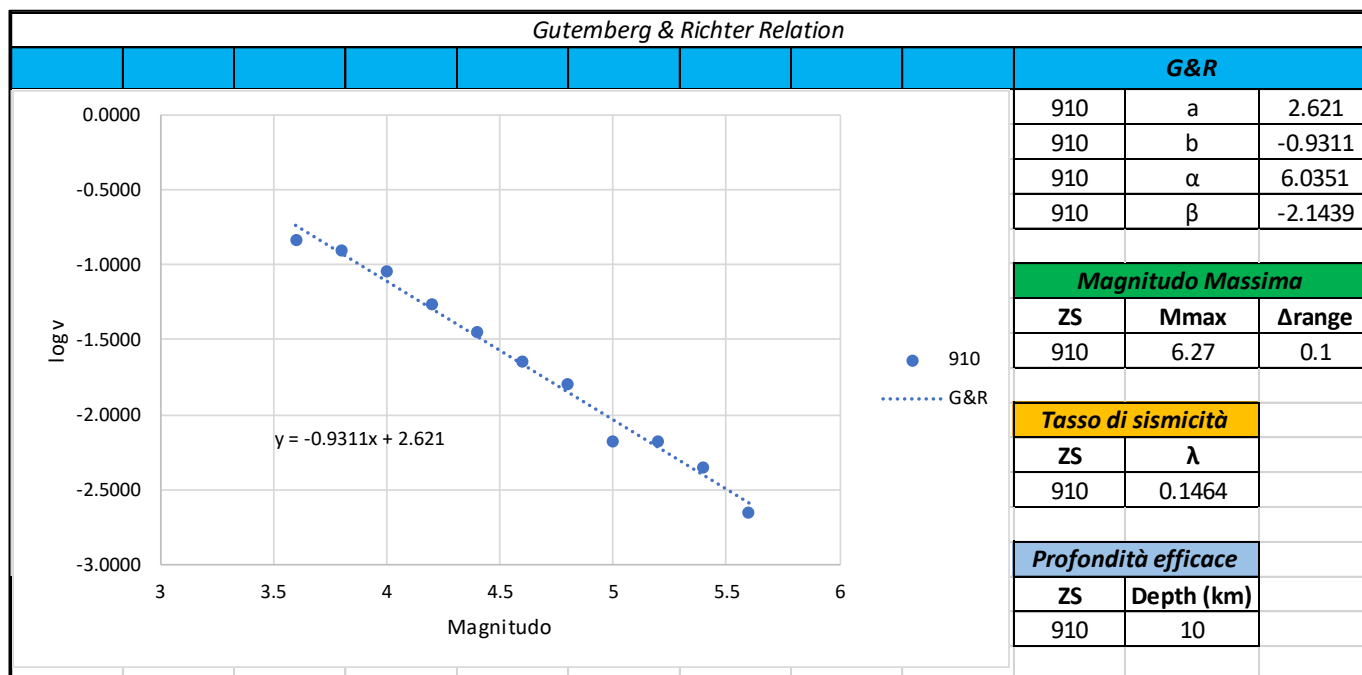
## 6.3 TASSI DI SISMICITÀ

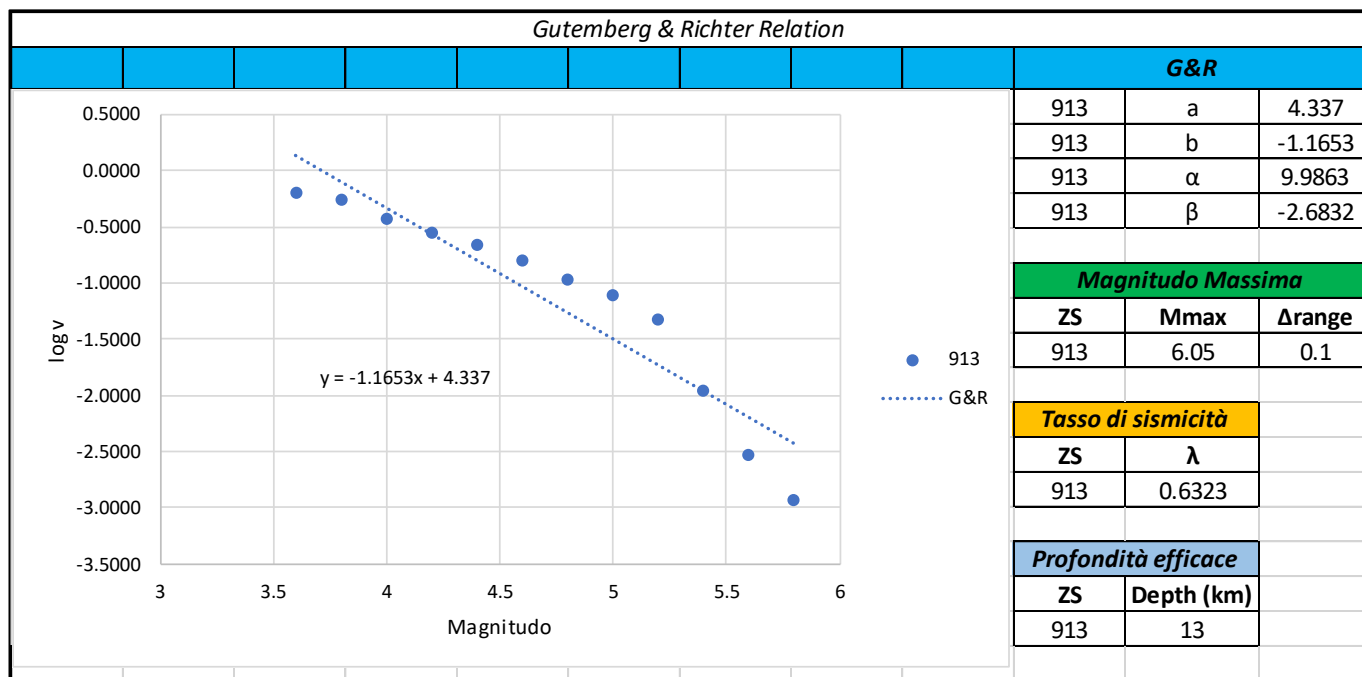
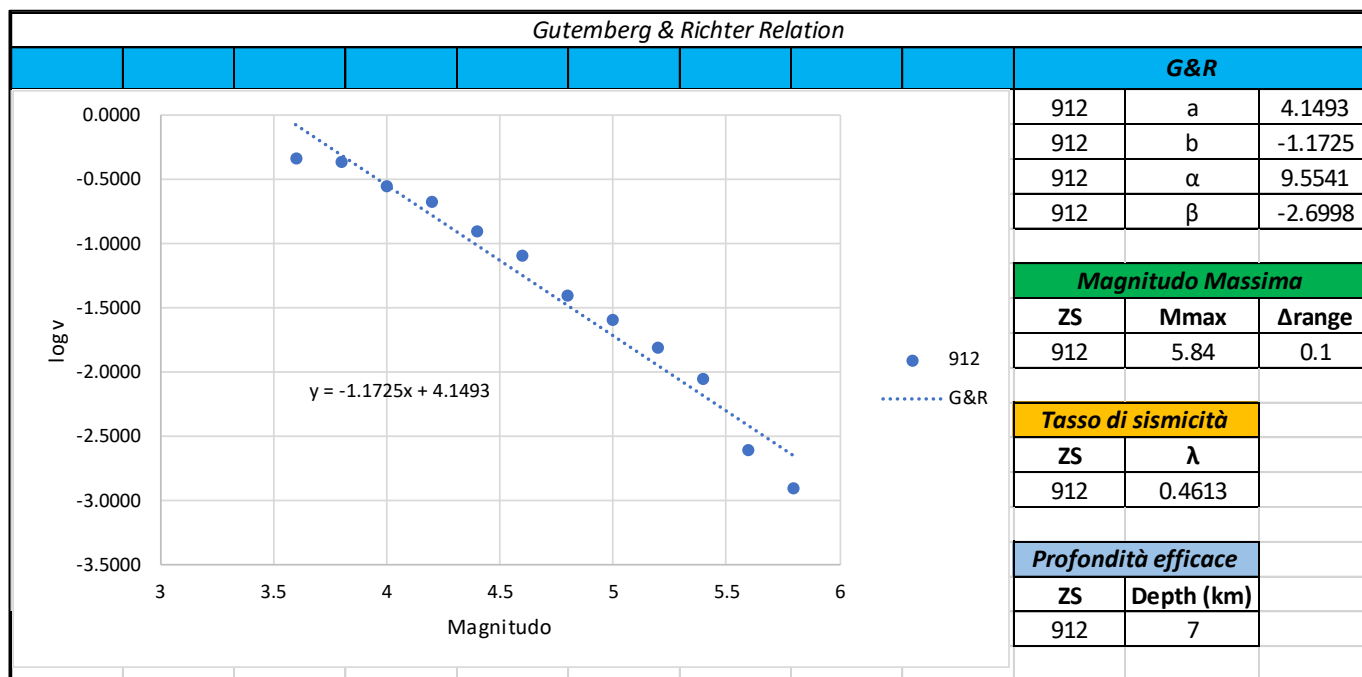
### 6.3.1 Tassi di sismicità – ZS9

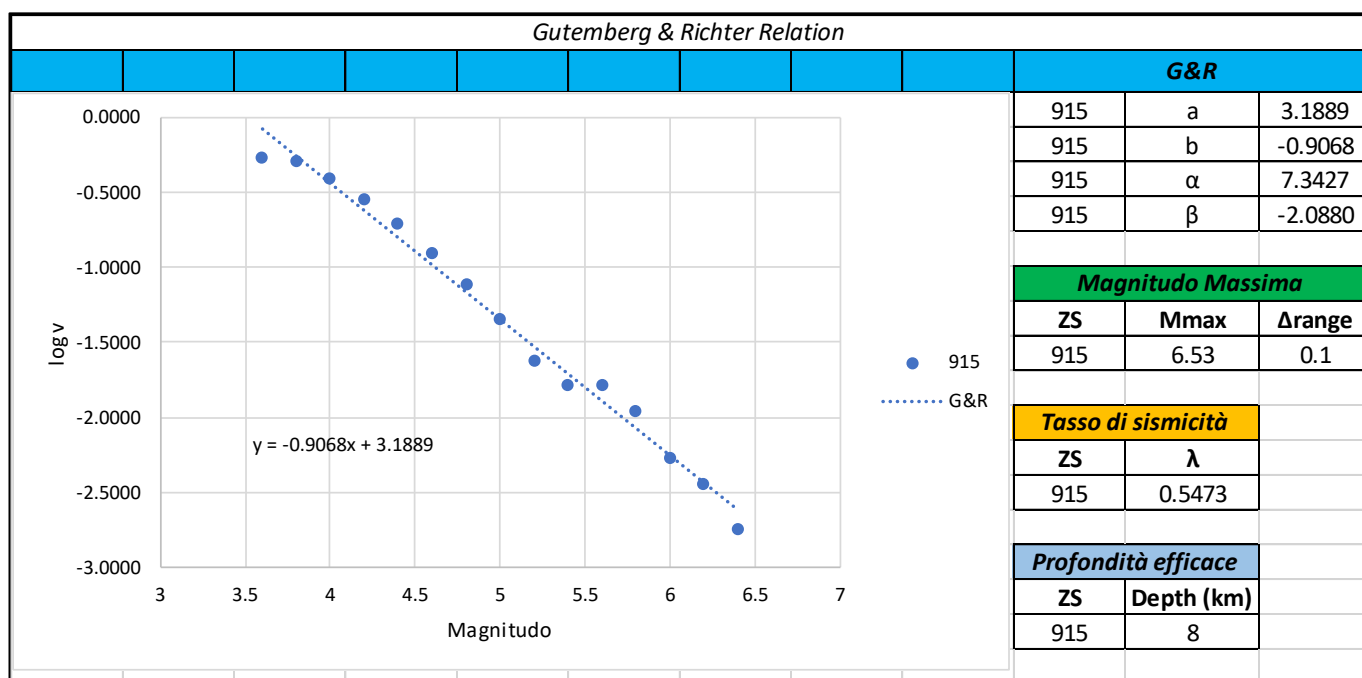
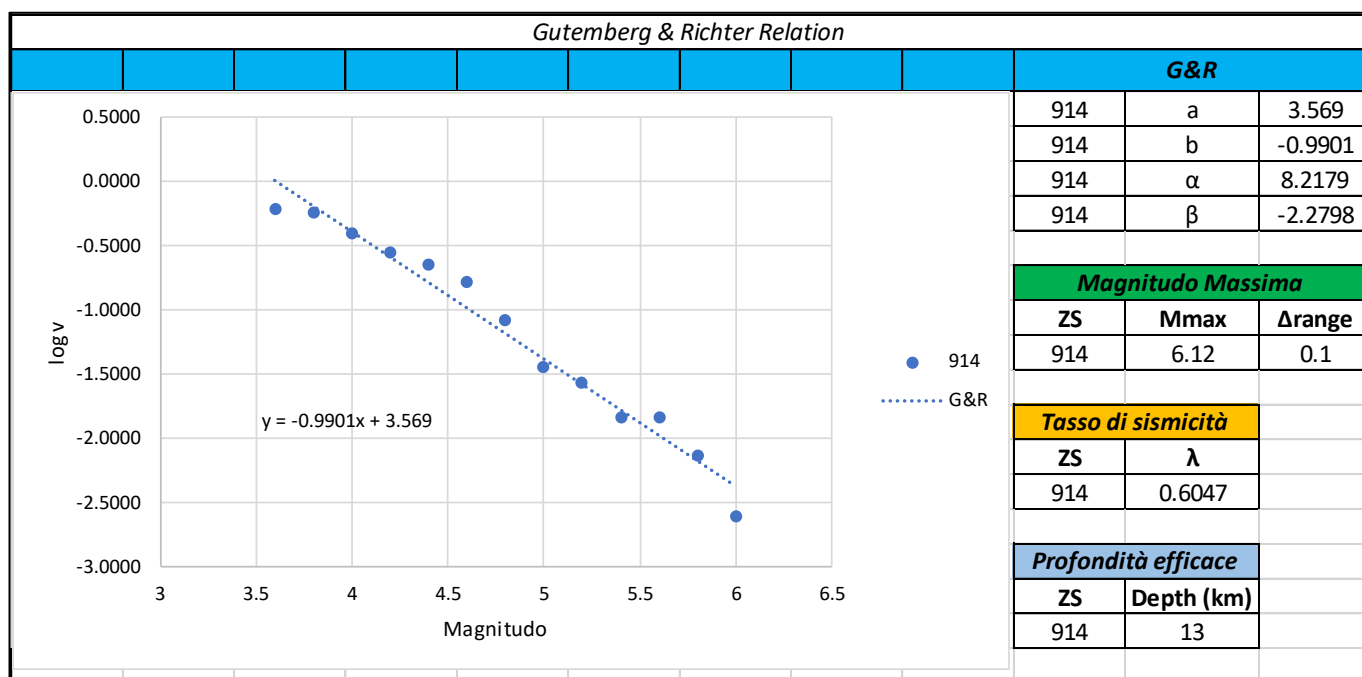




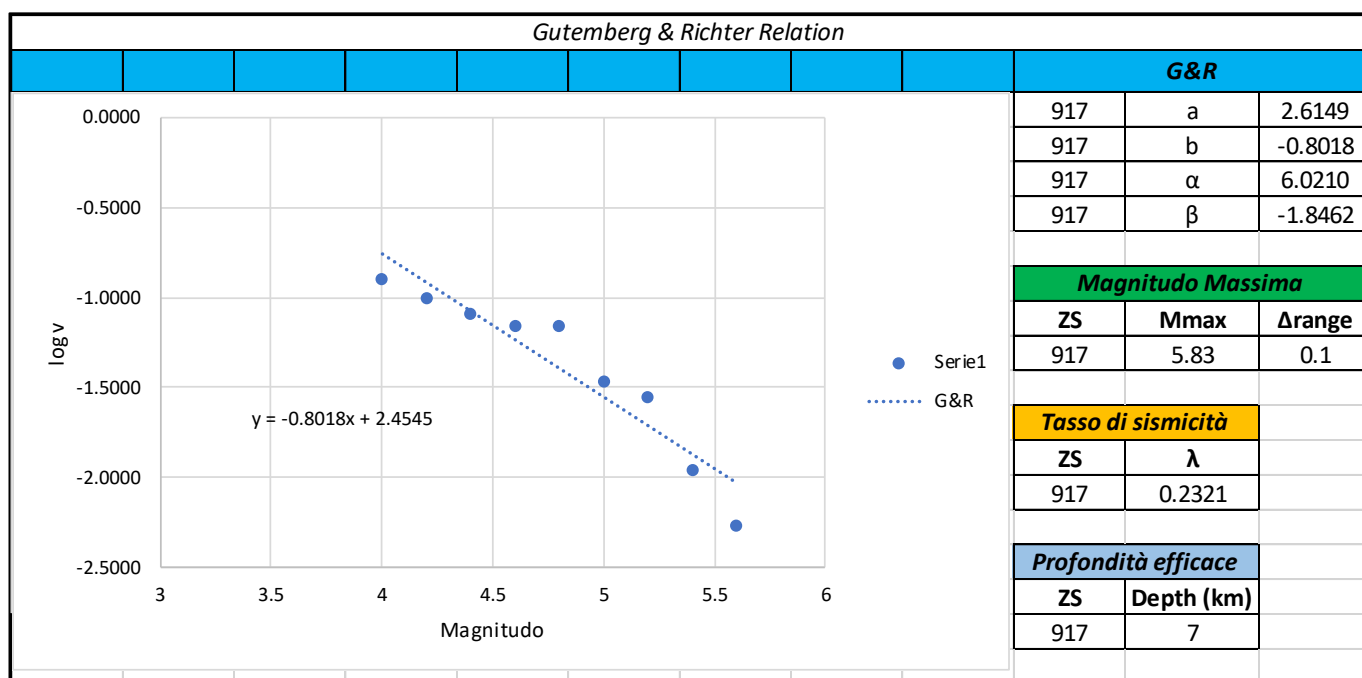
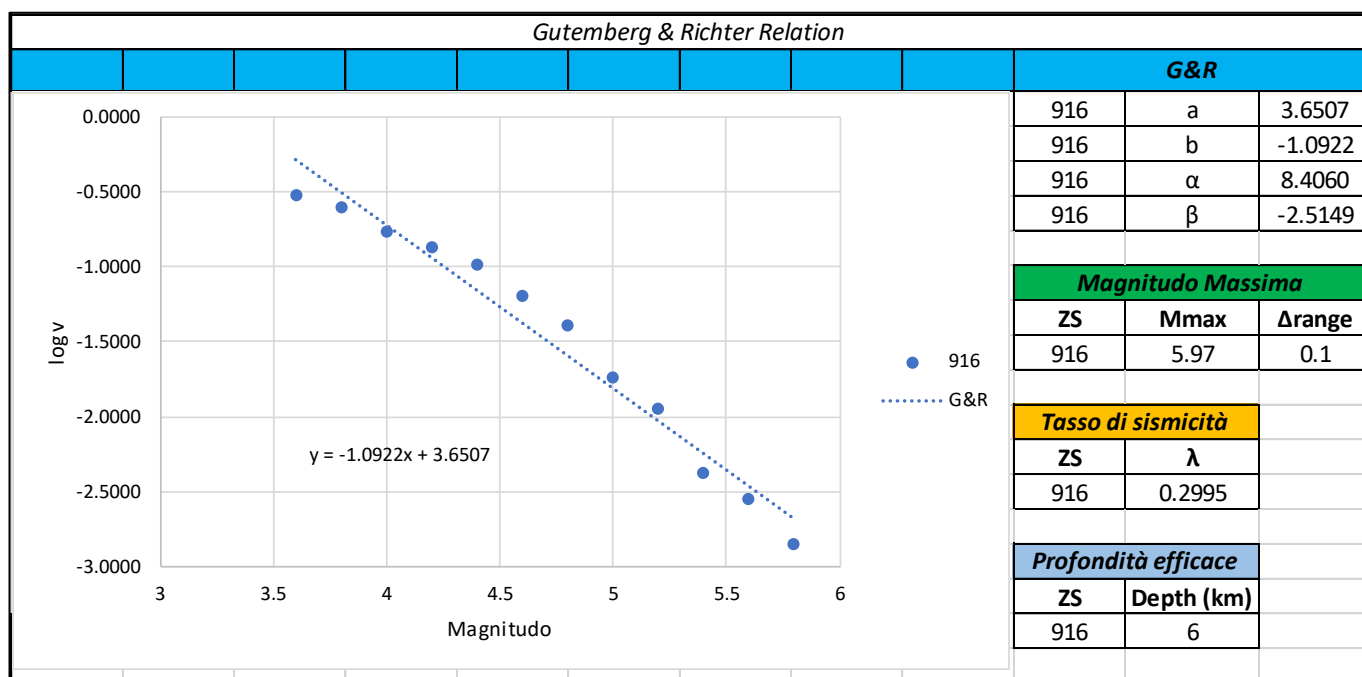


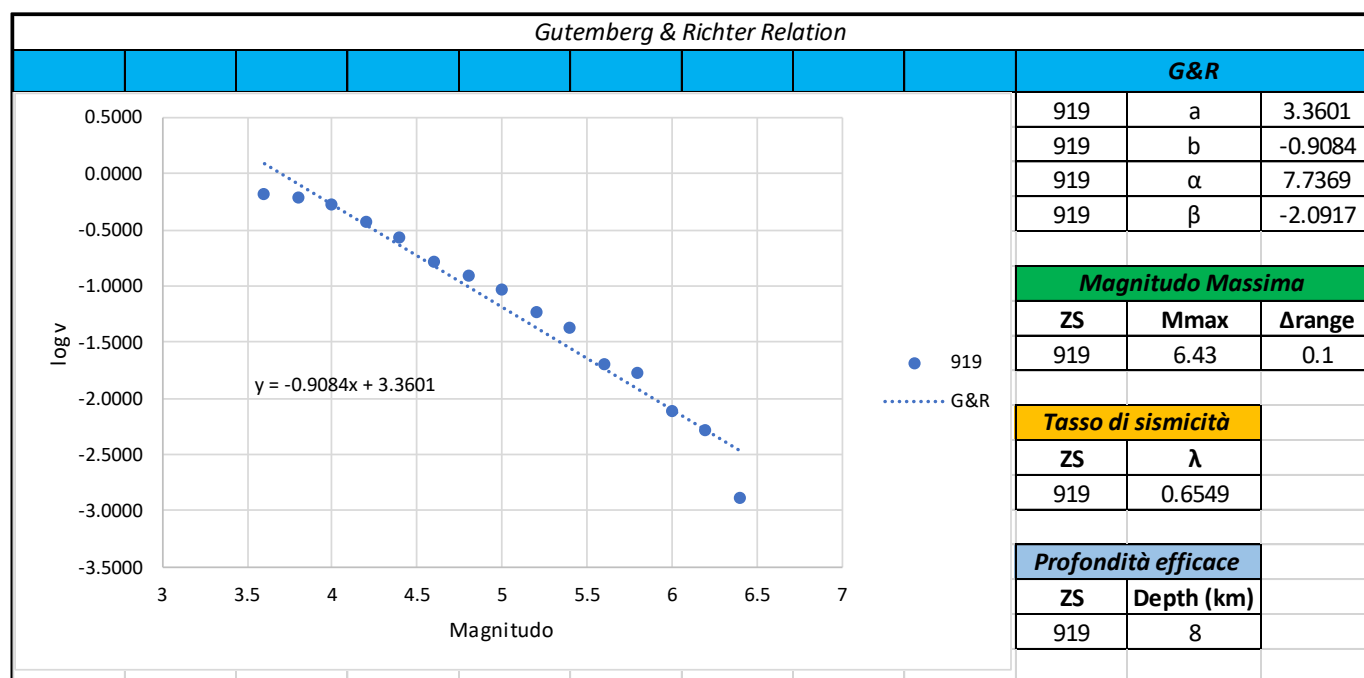
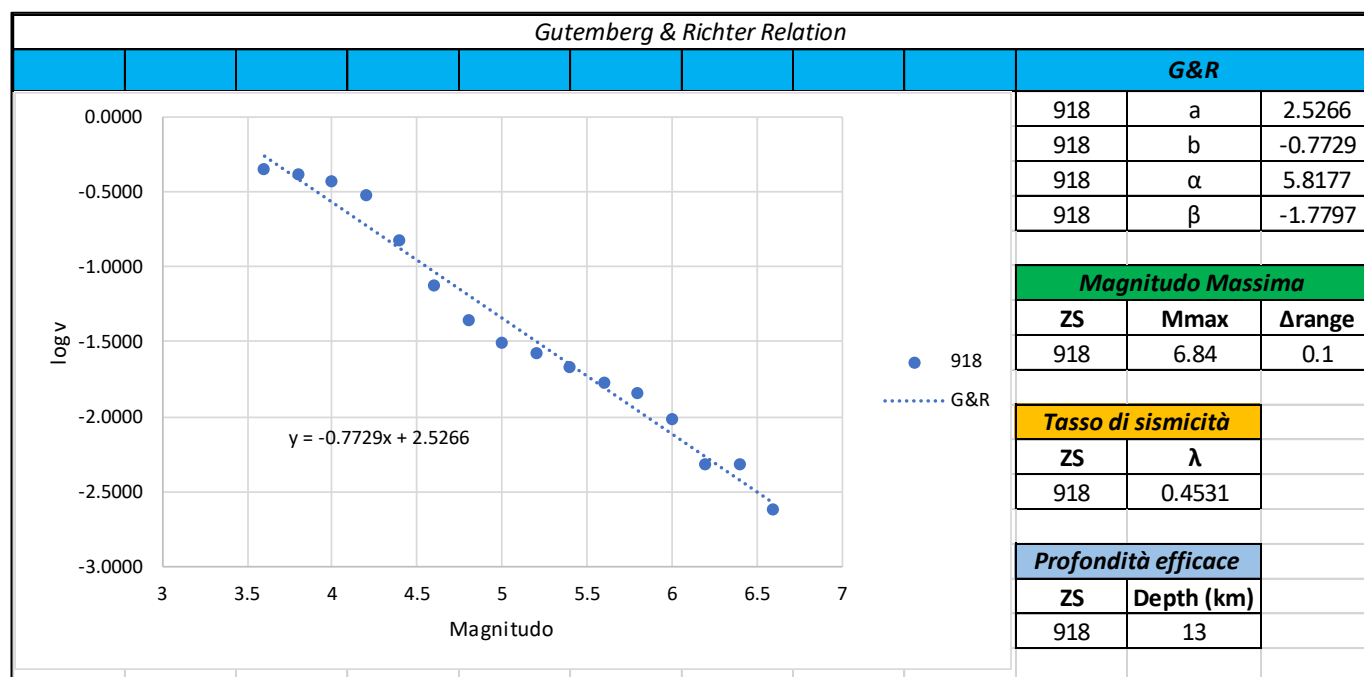


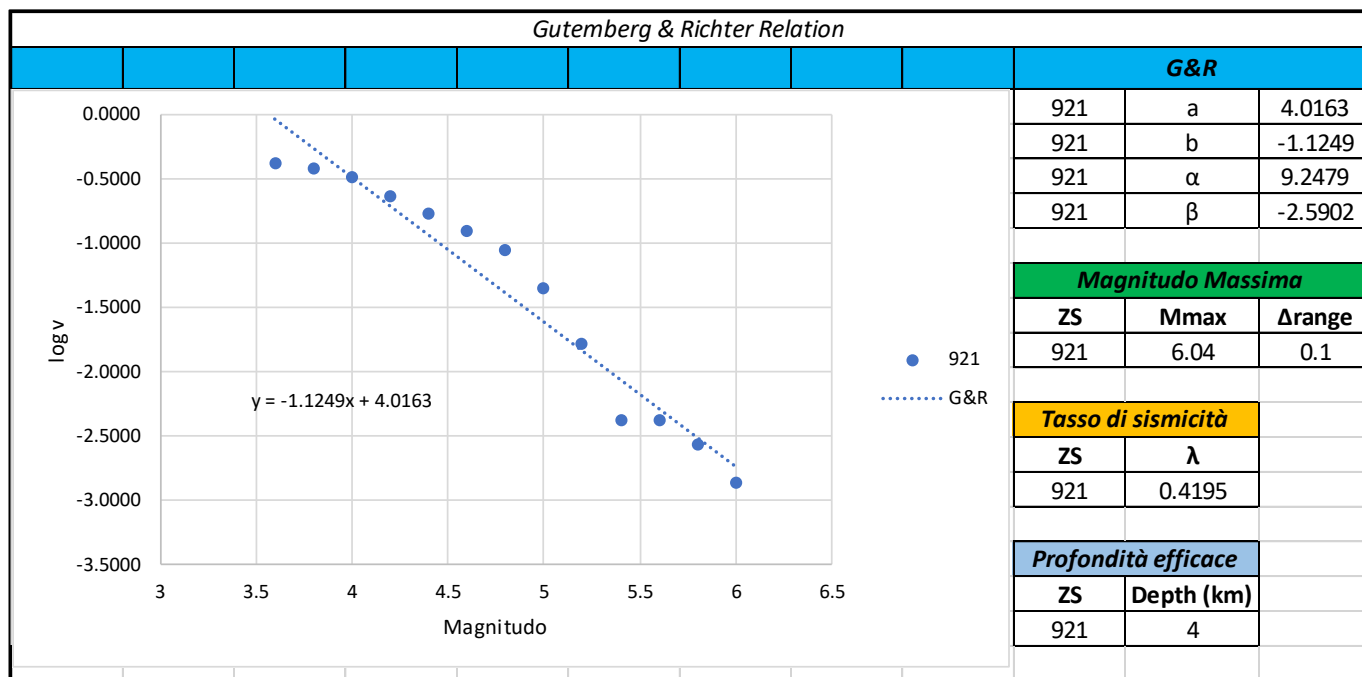
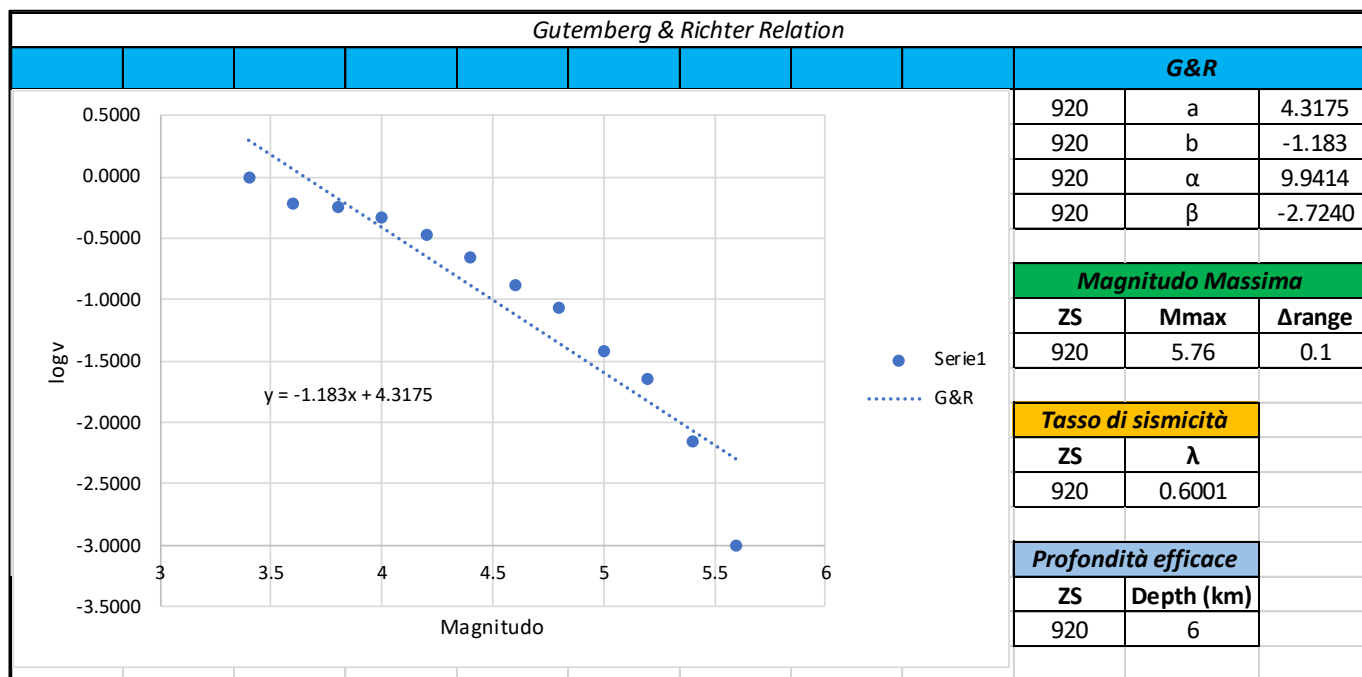






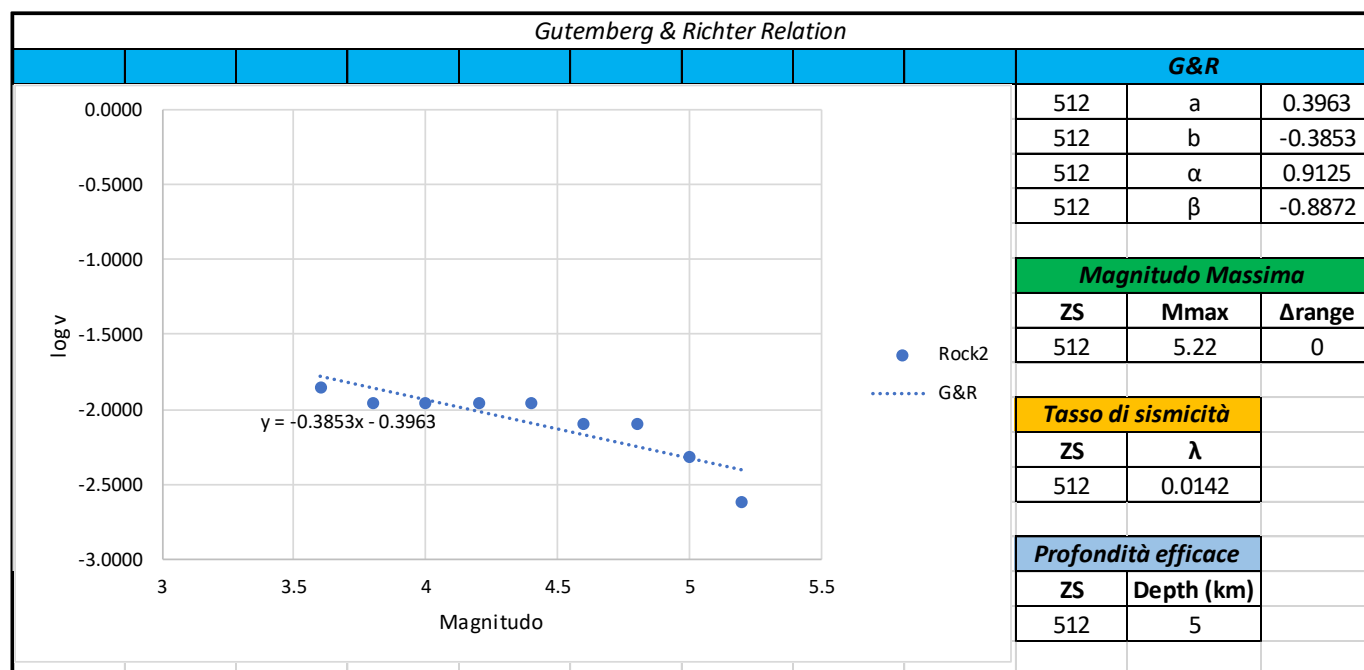
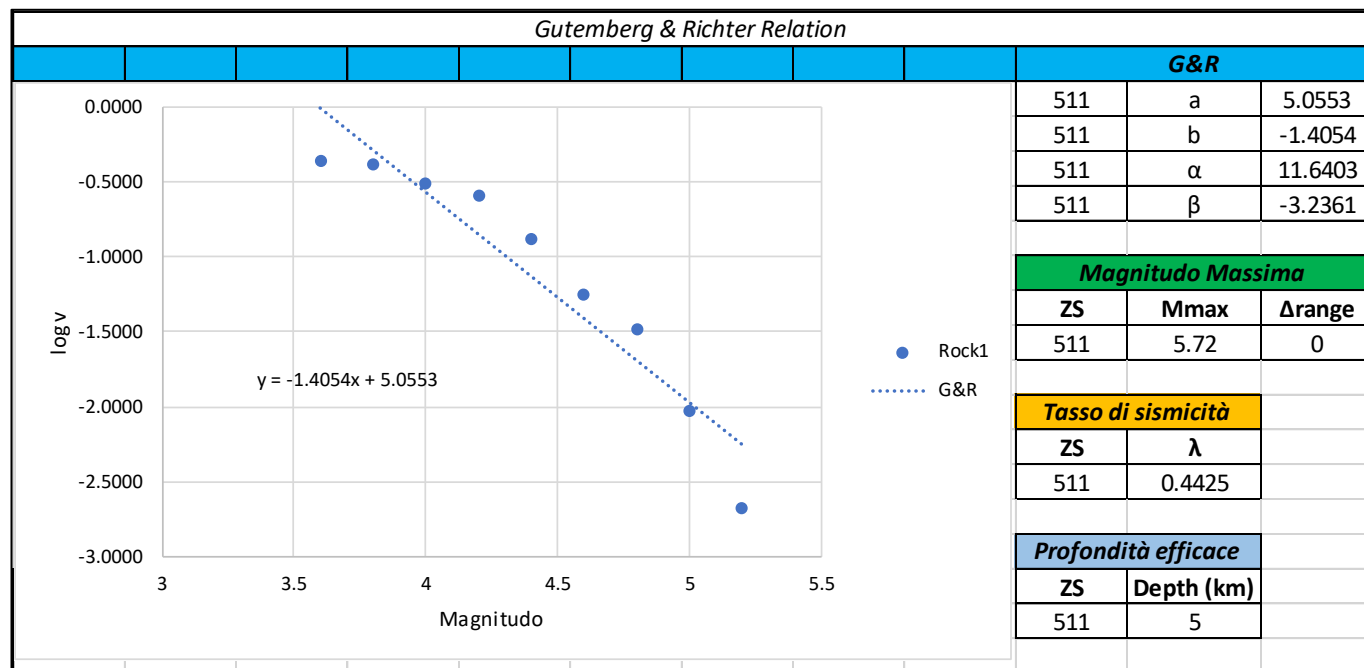


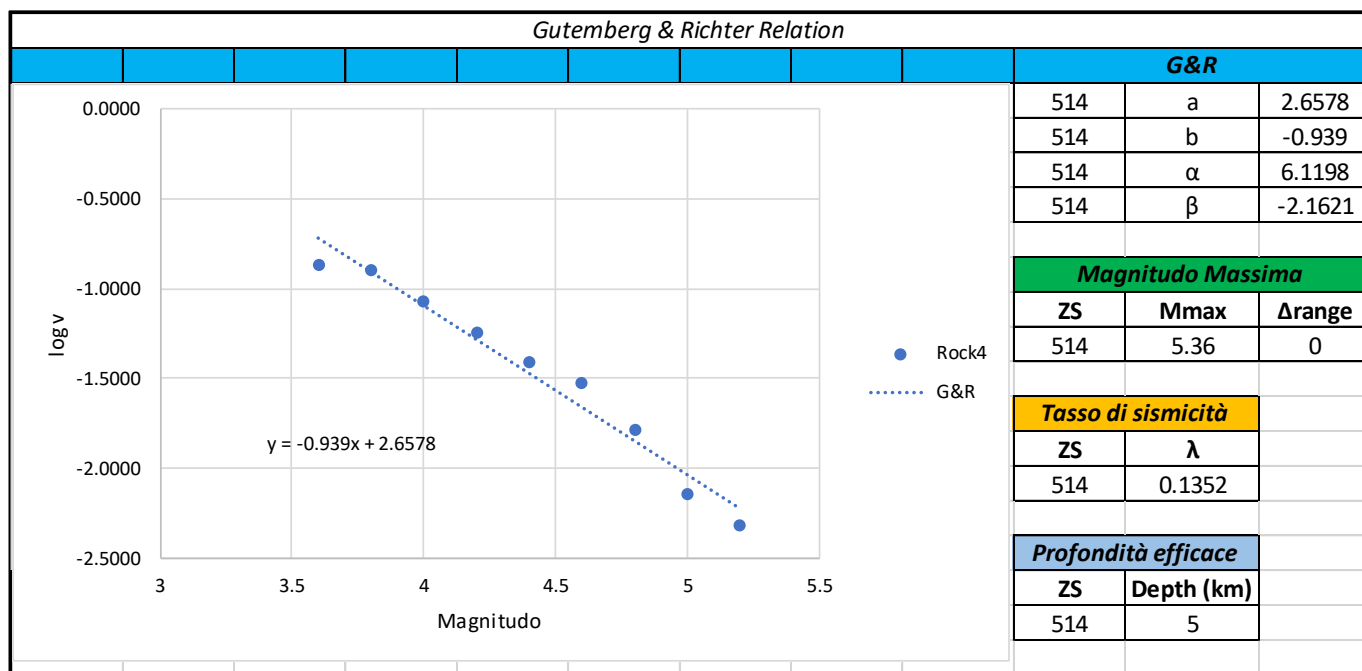
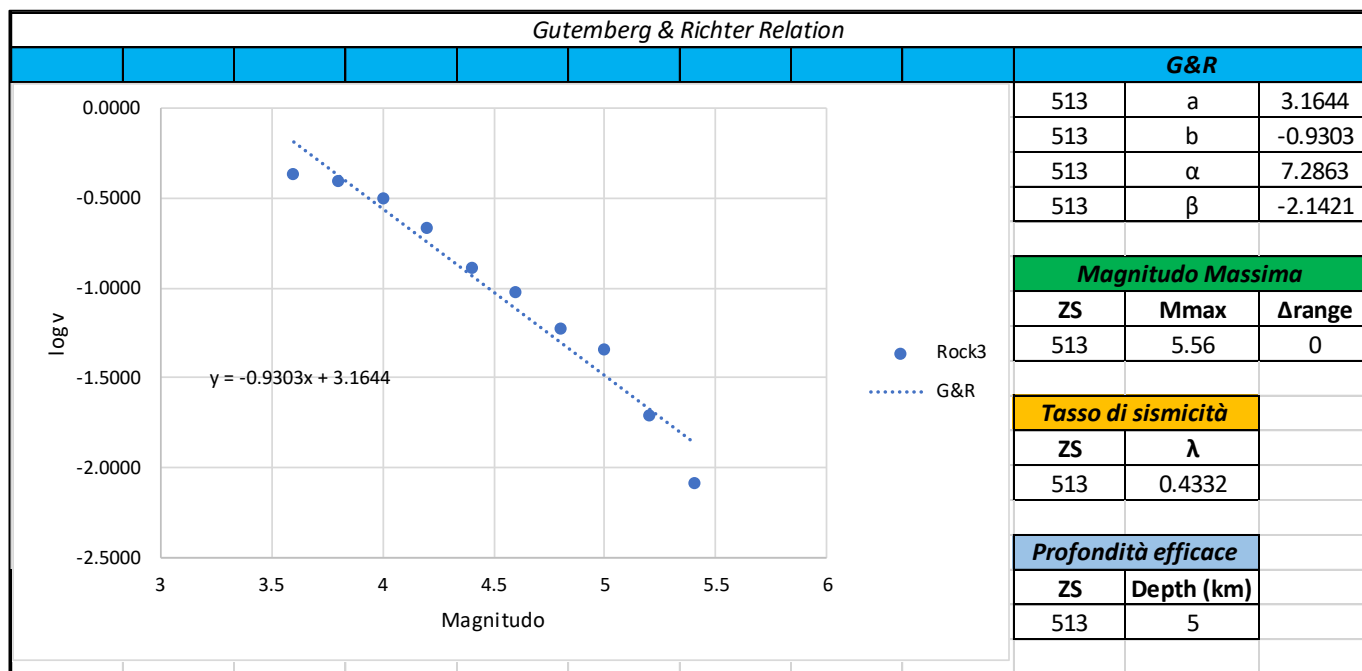


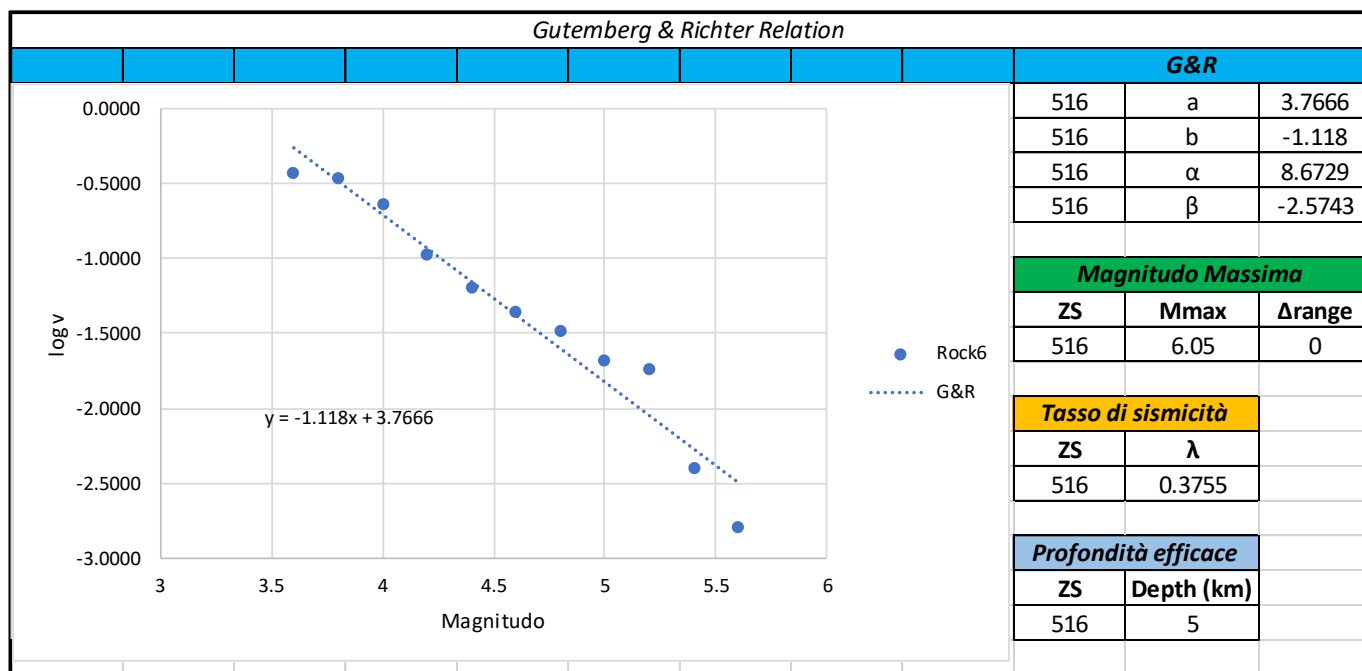
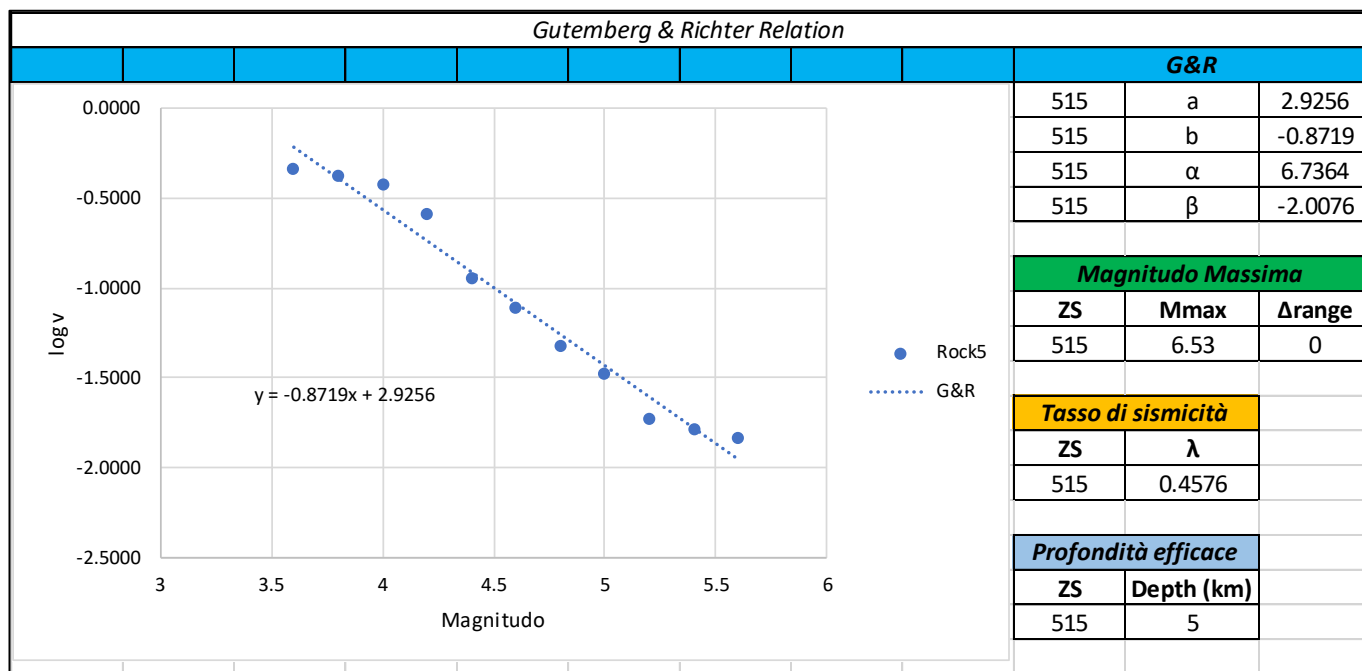




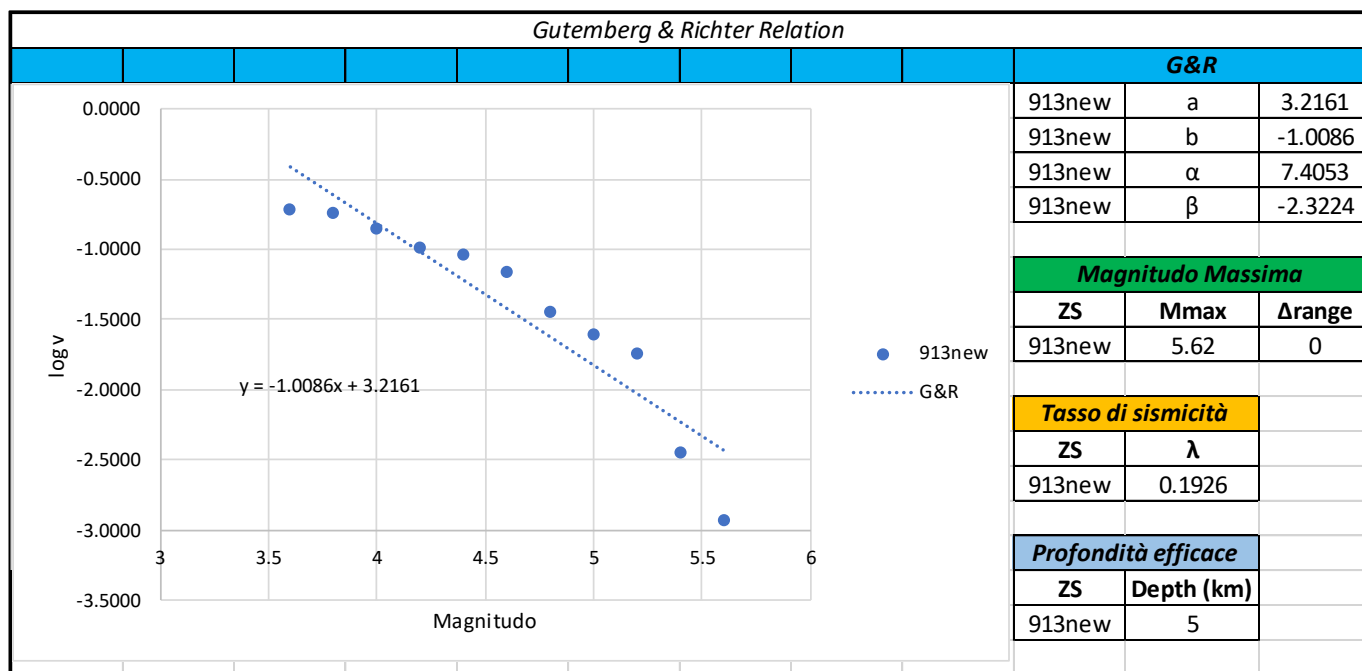
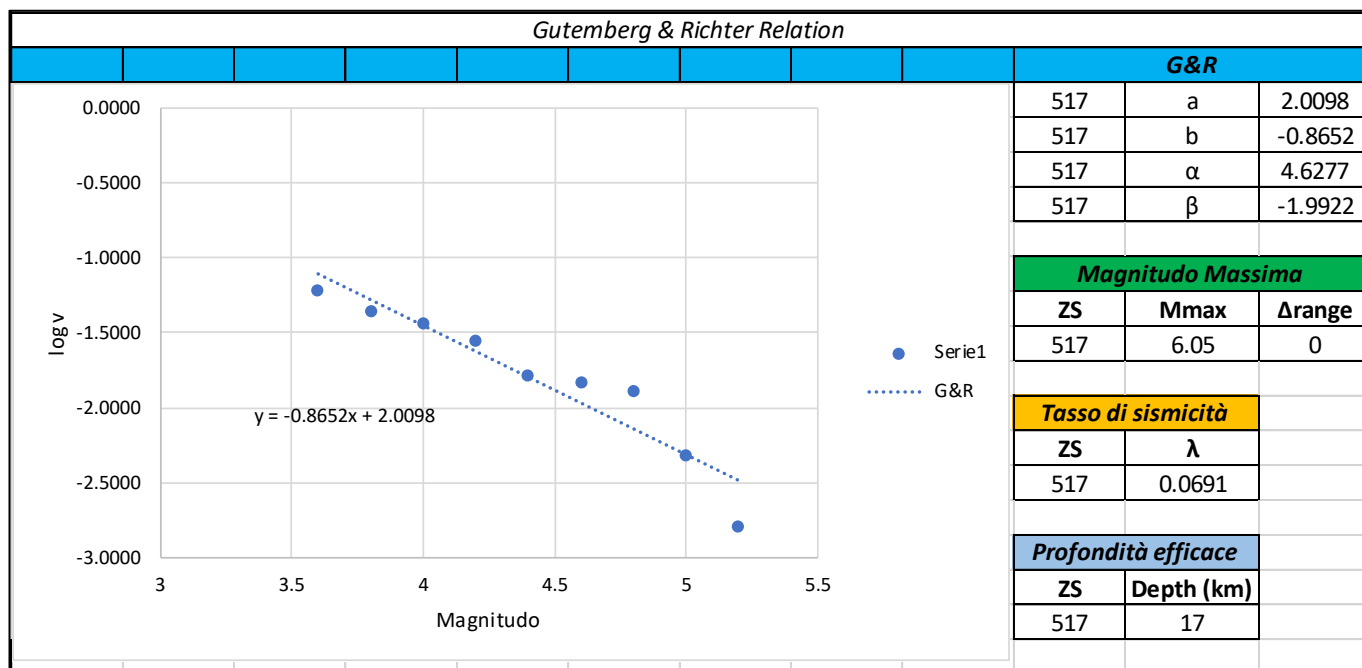
### 6.3.2 Tassi di sismicità – Z2

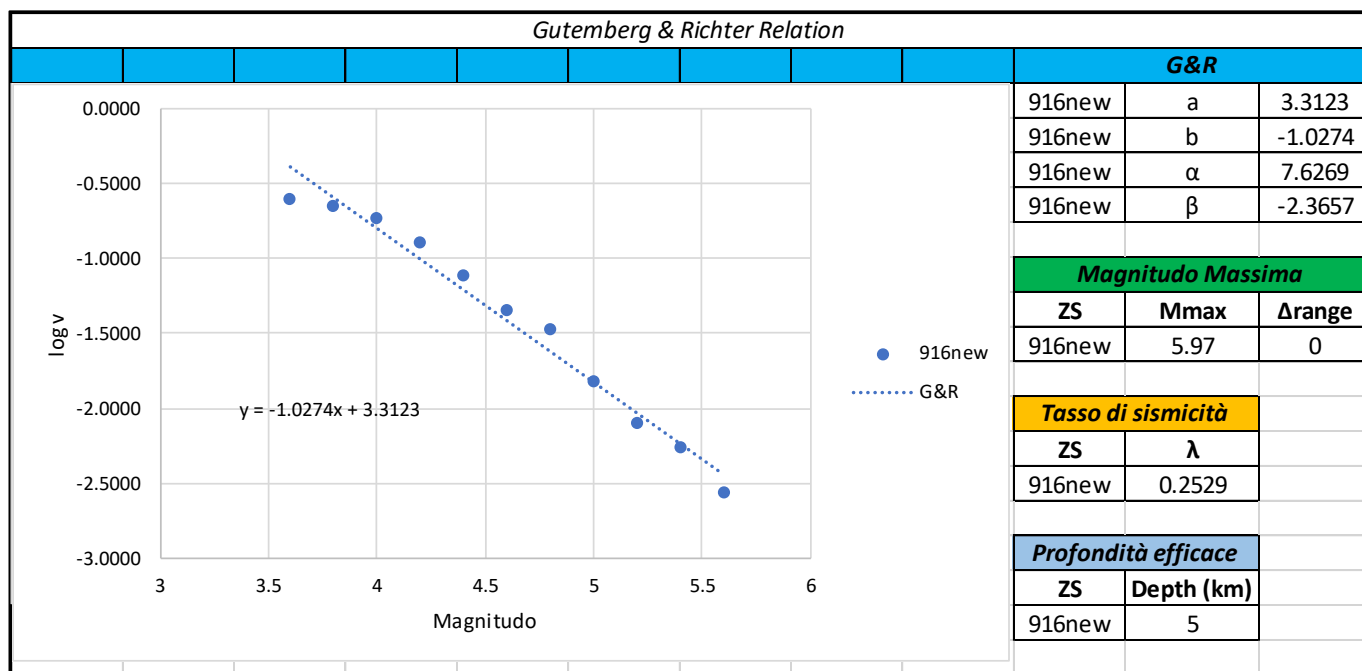
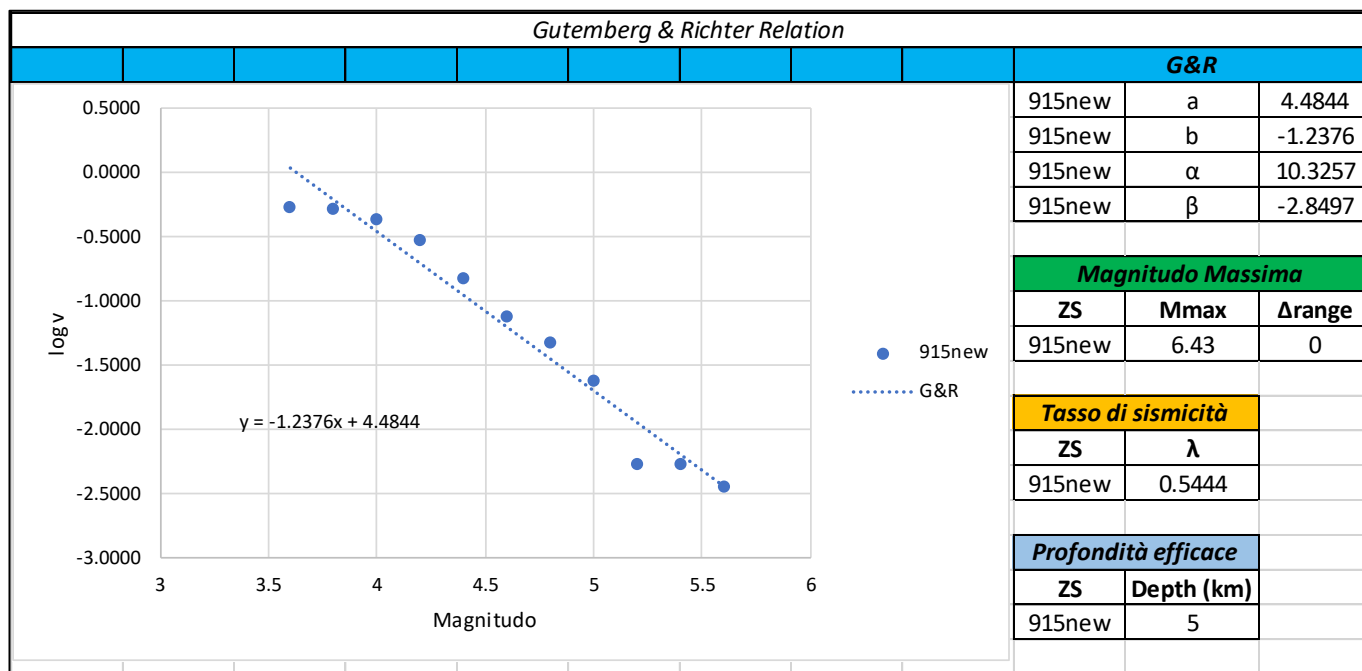




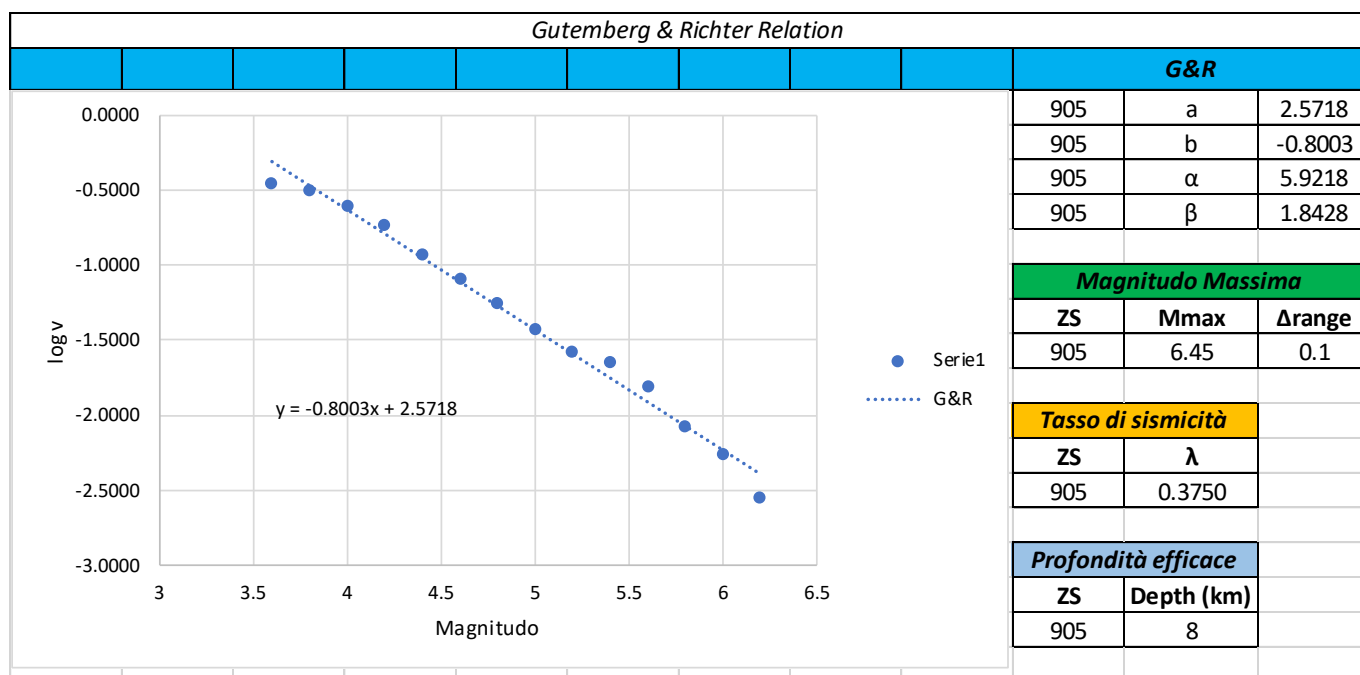
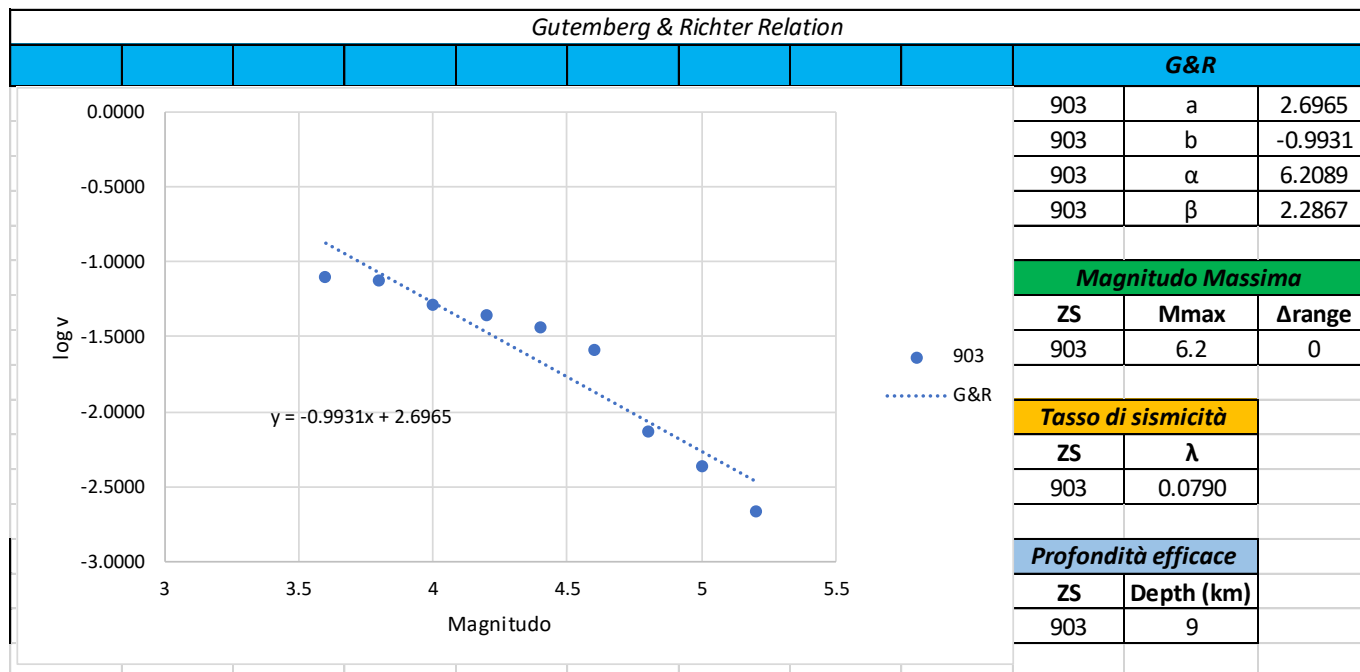




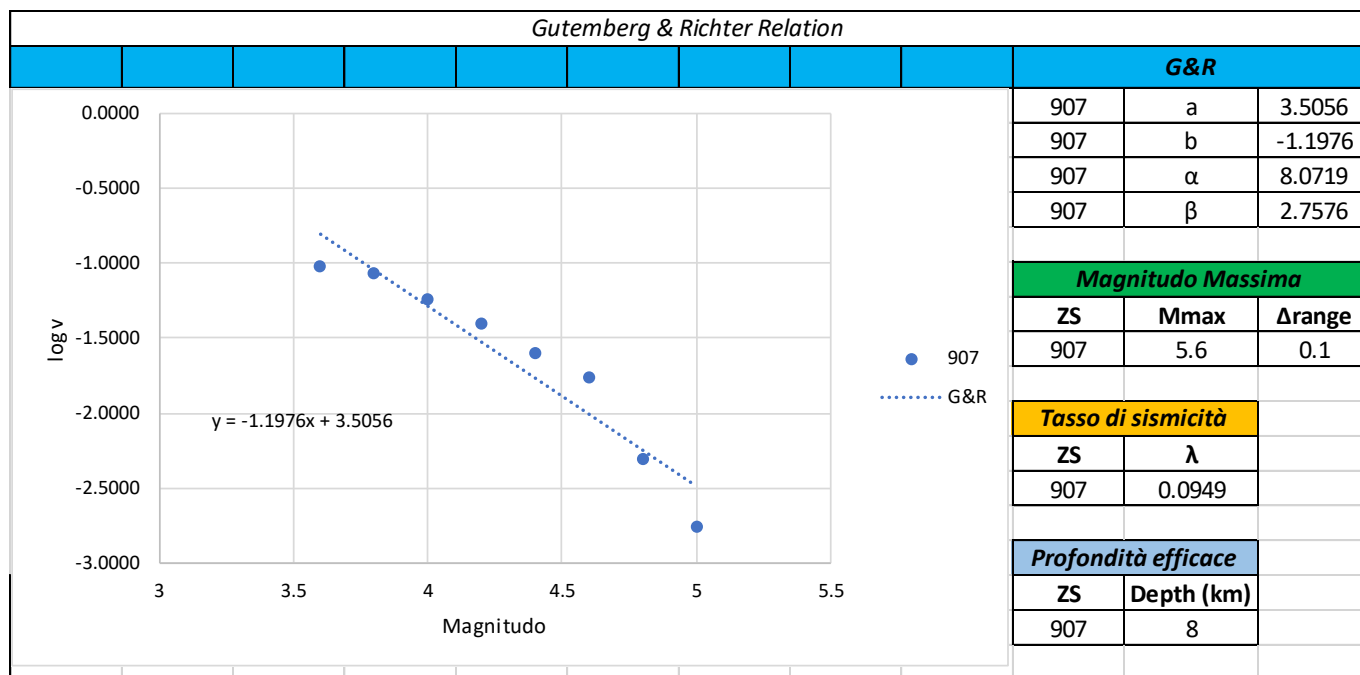
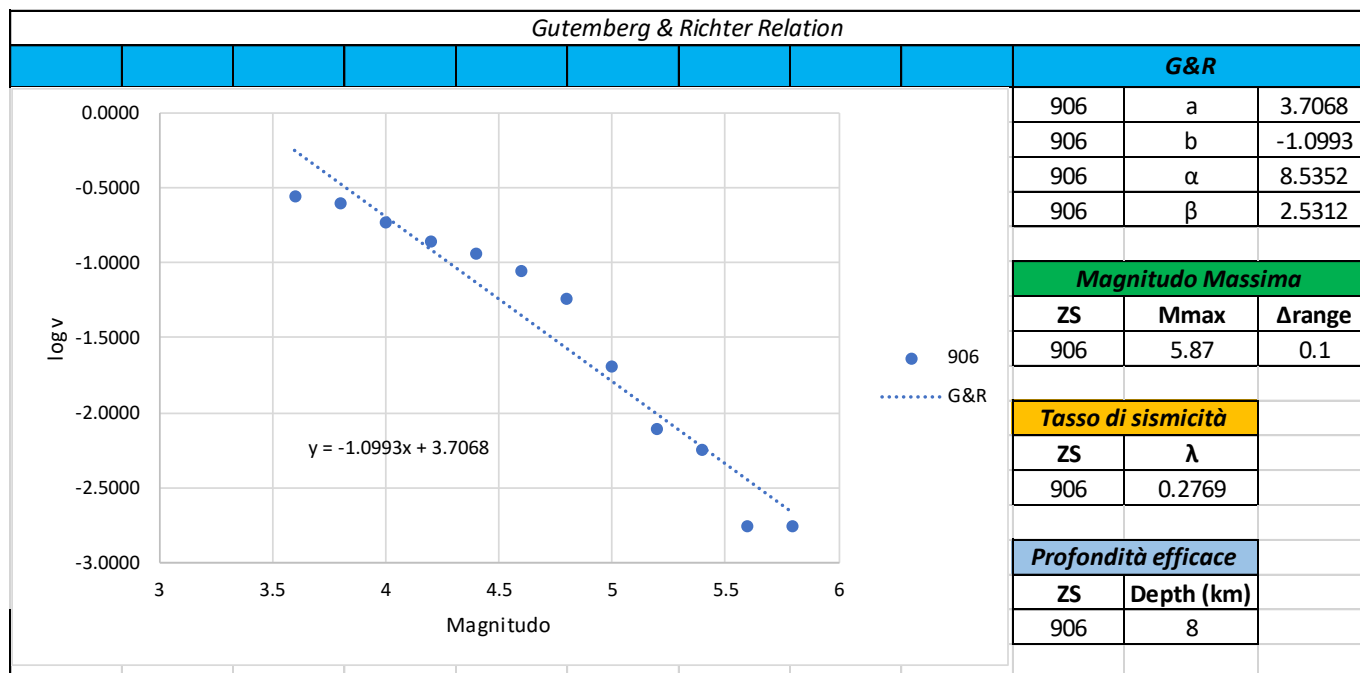


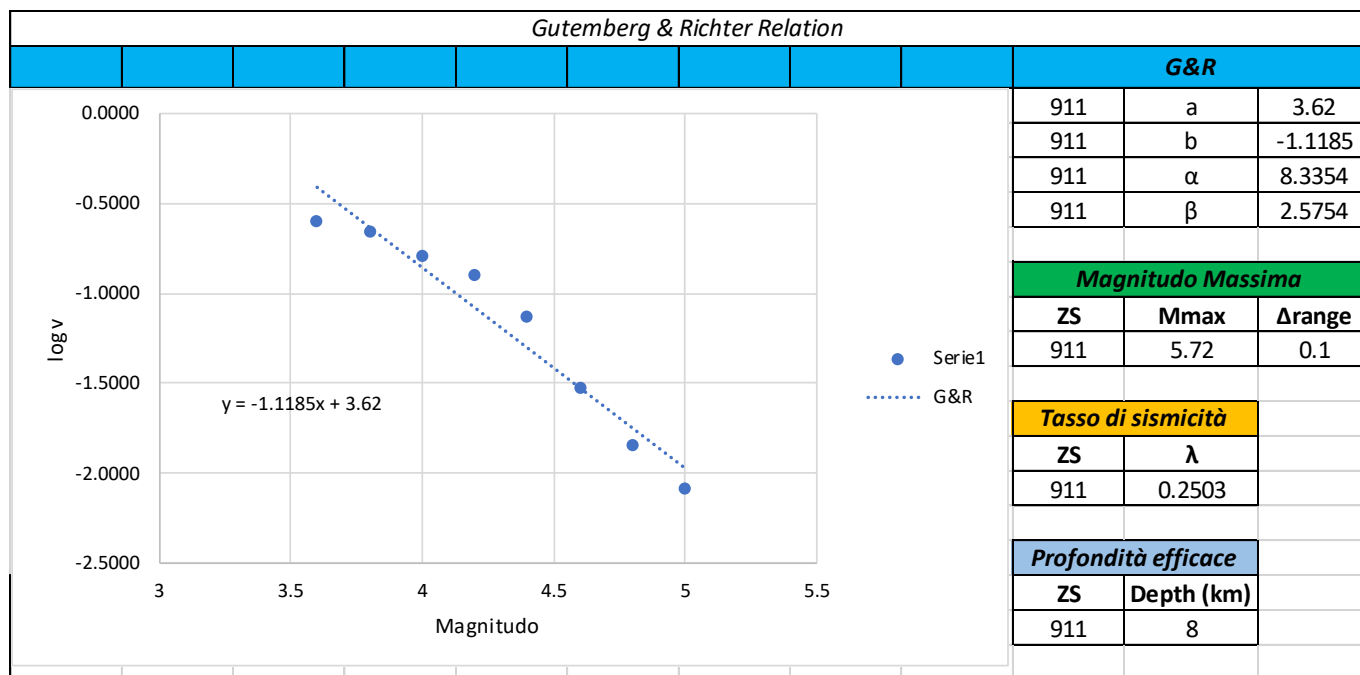
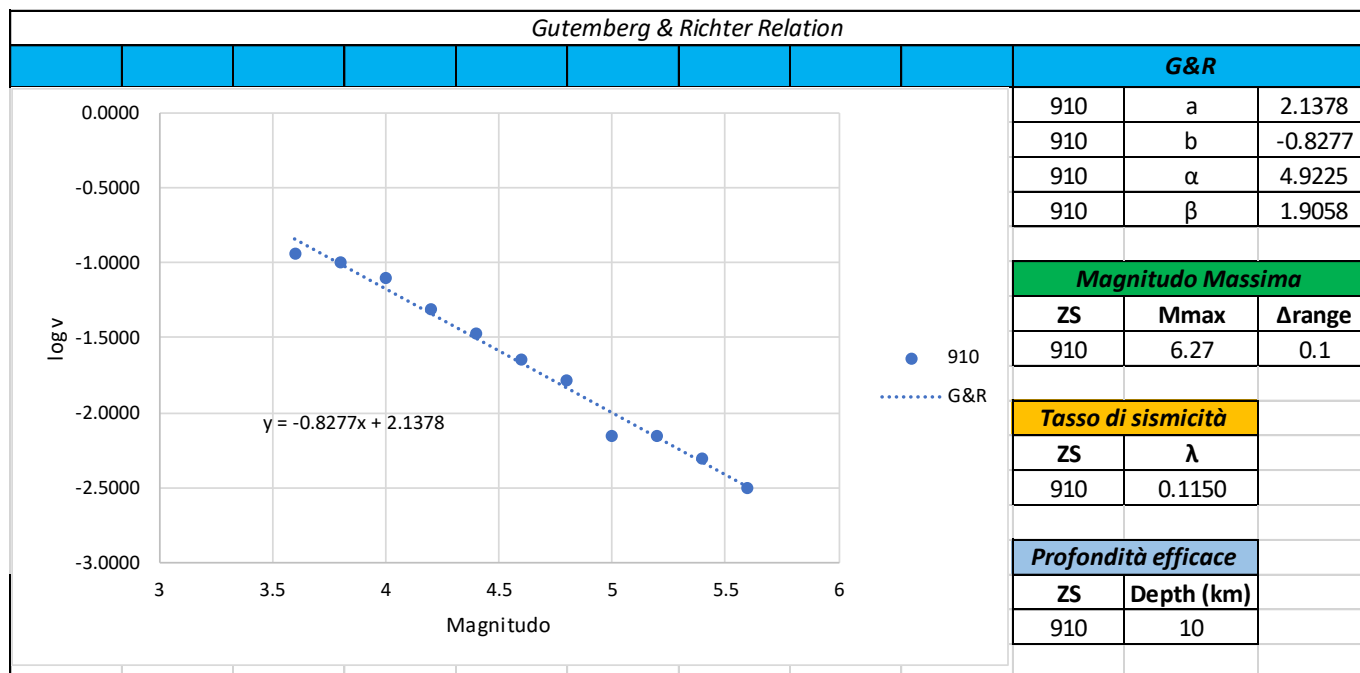


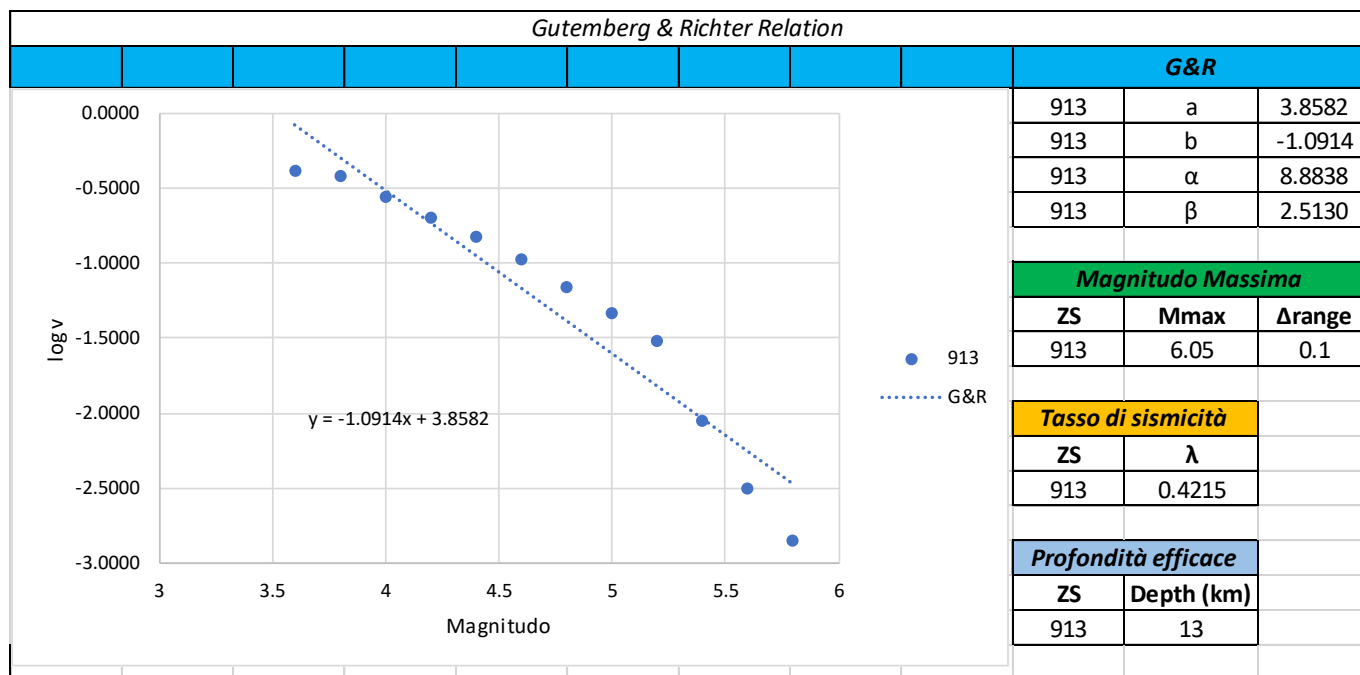
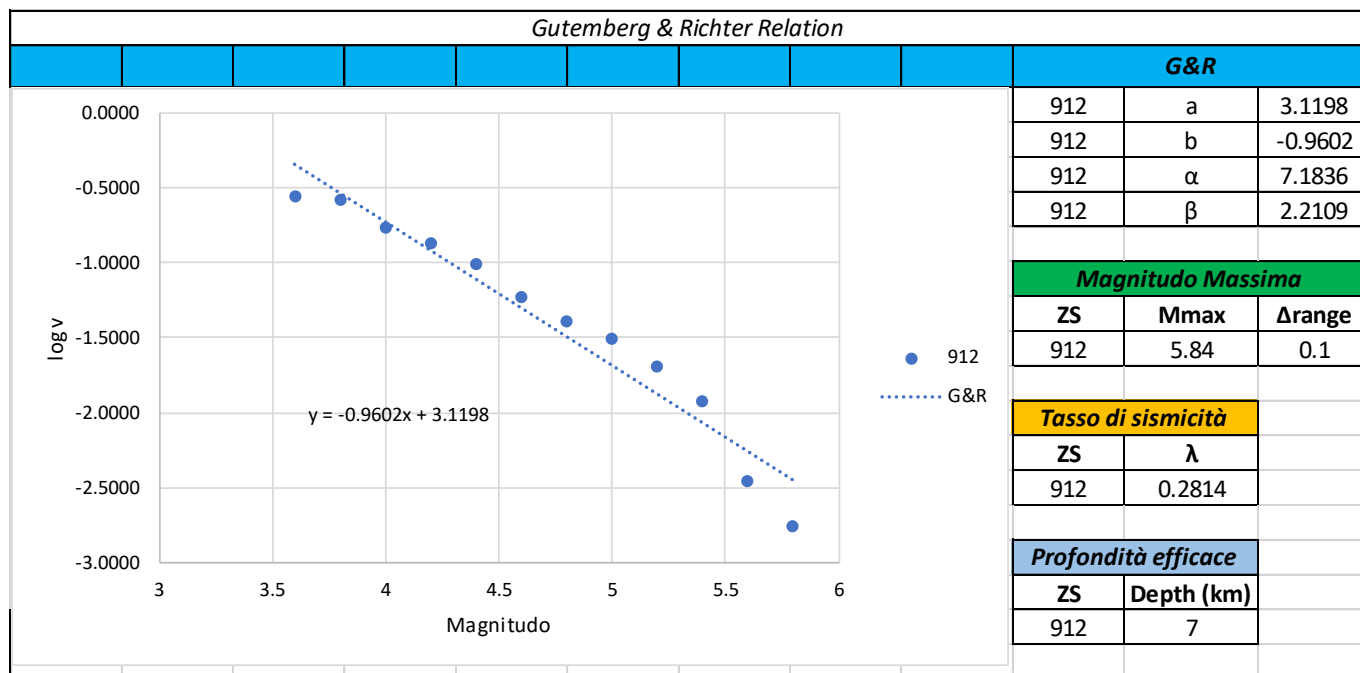
### 6.3.3 Tassi di sismicità – analisi di sensitività – intervalli di completezza globali



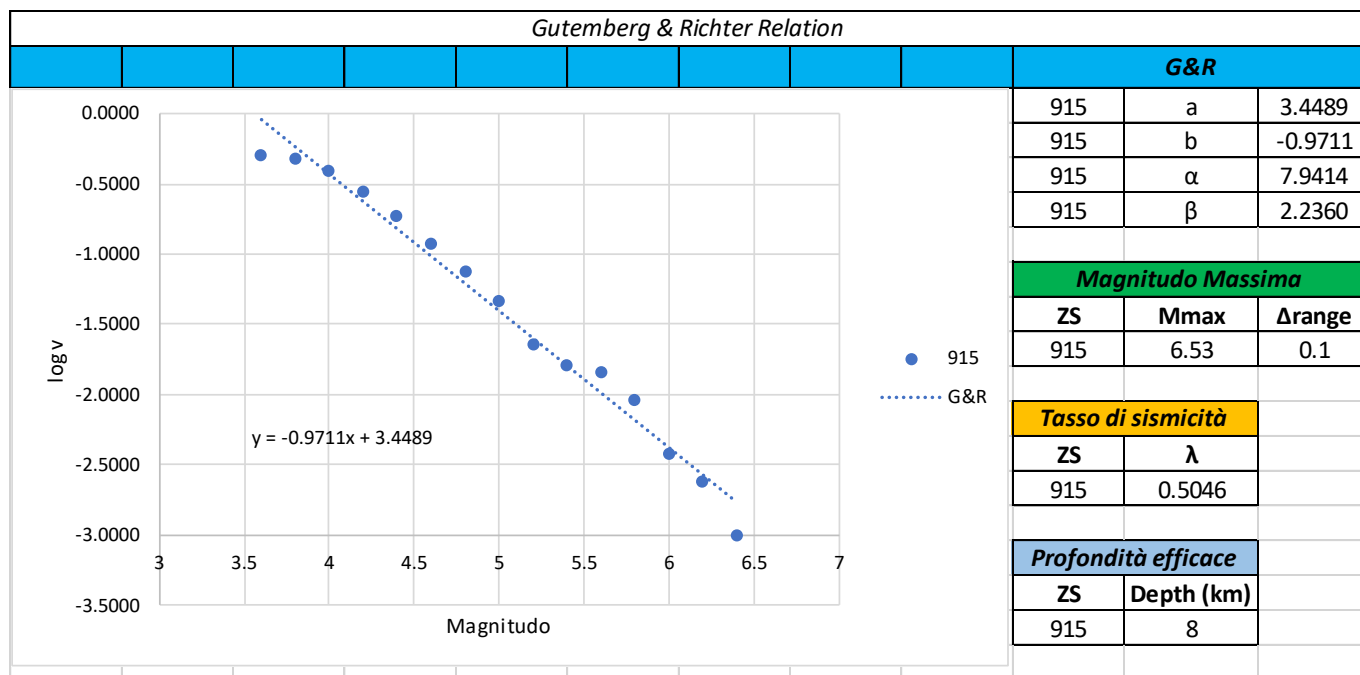
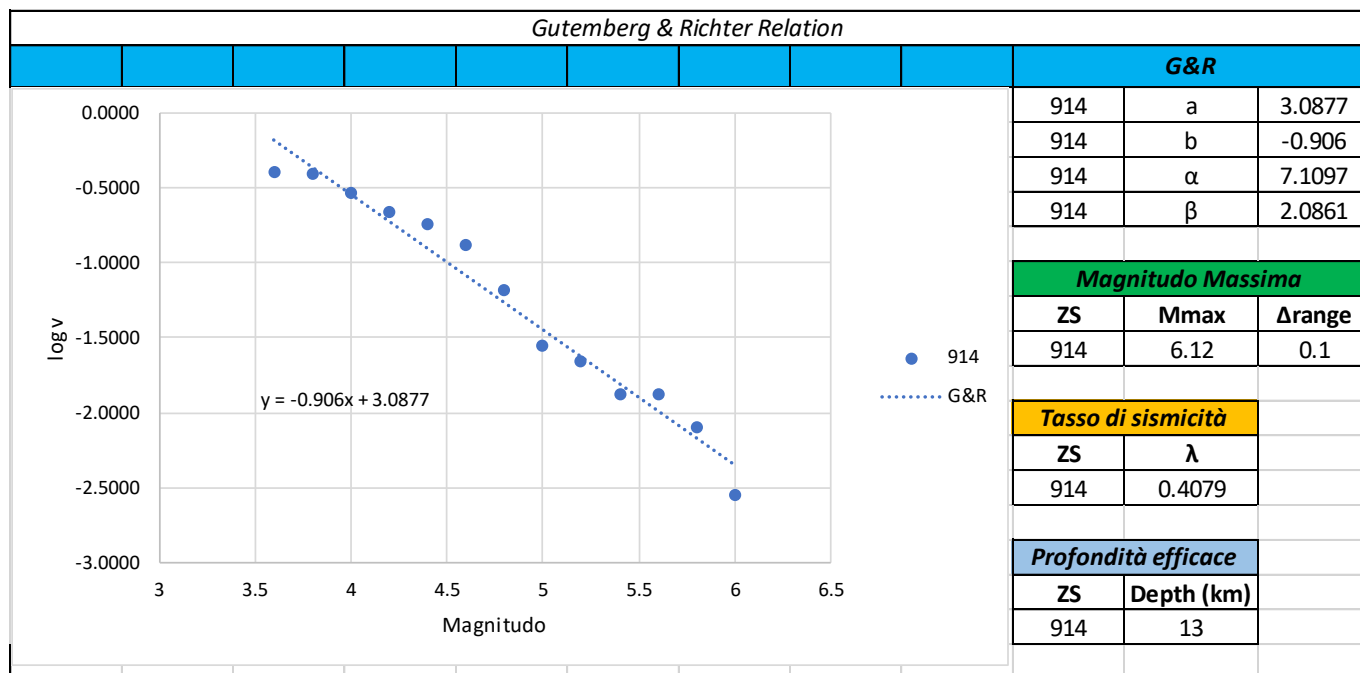


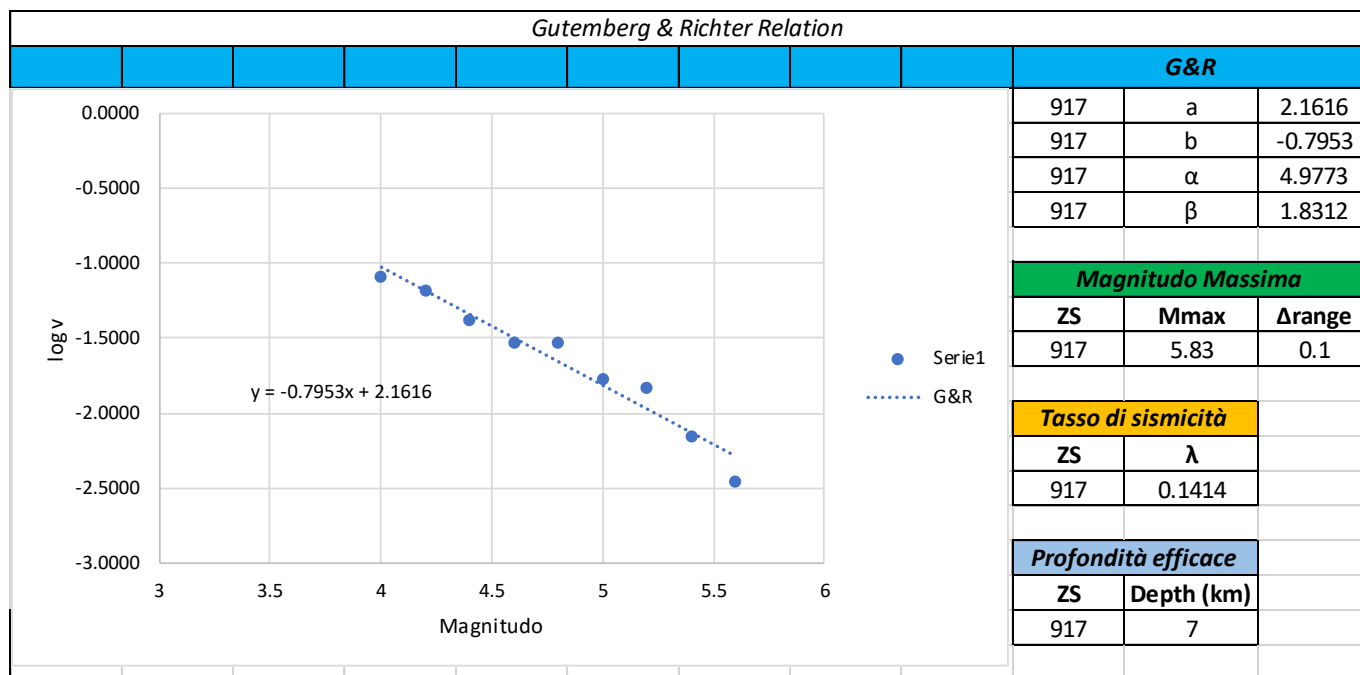
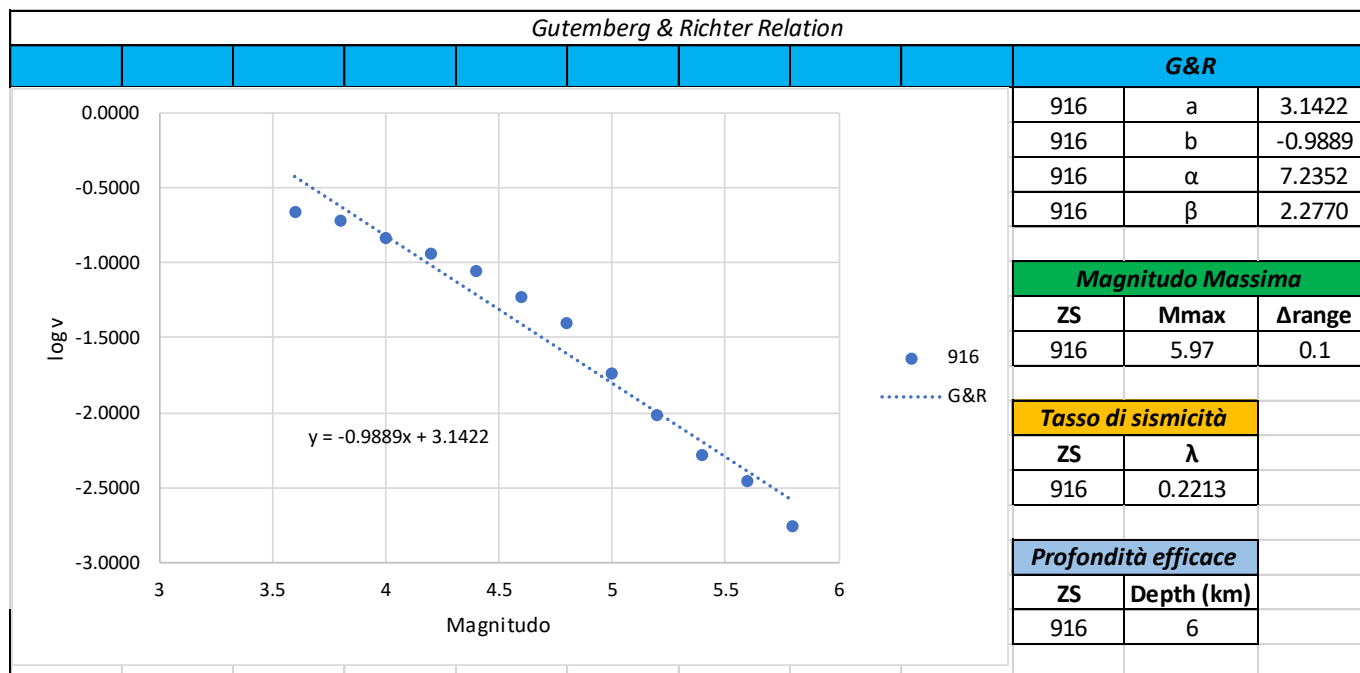


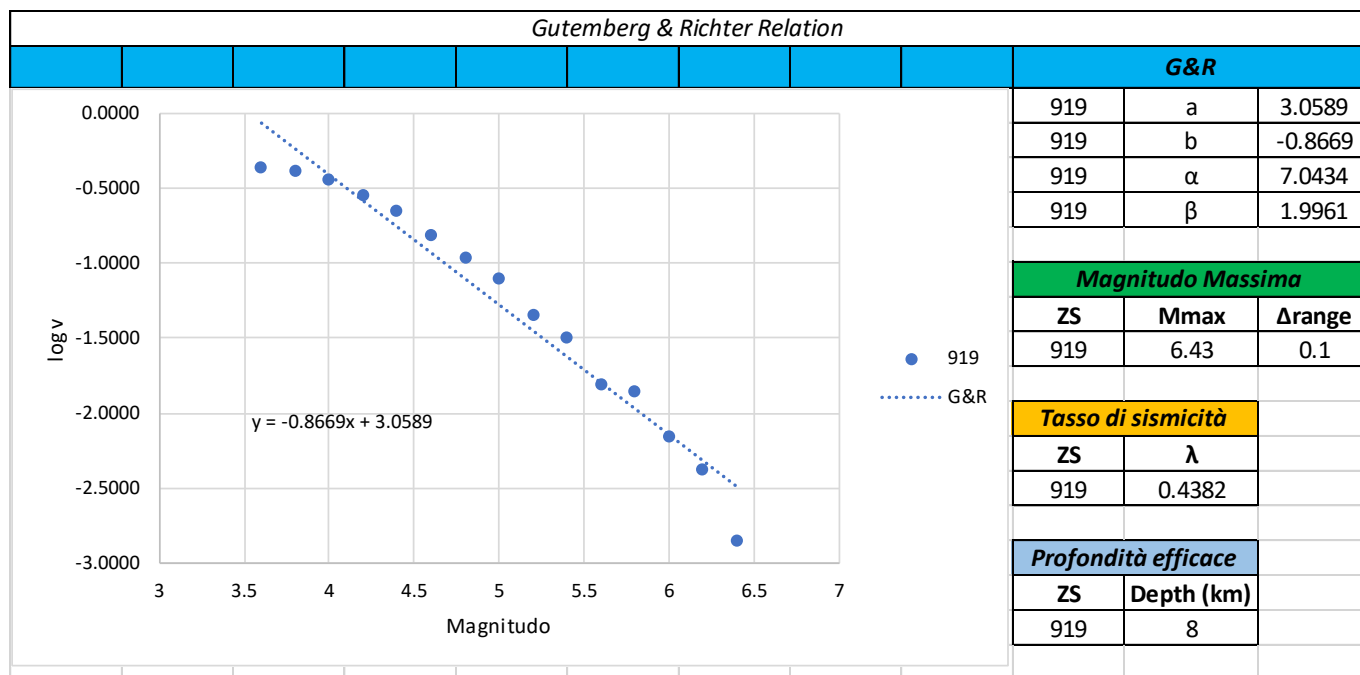
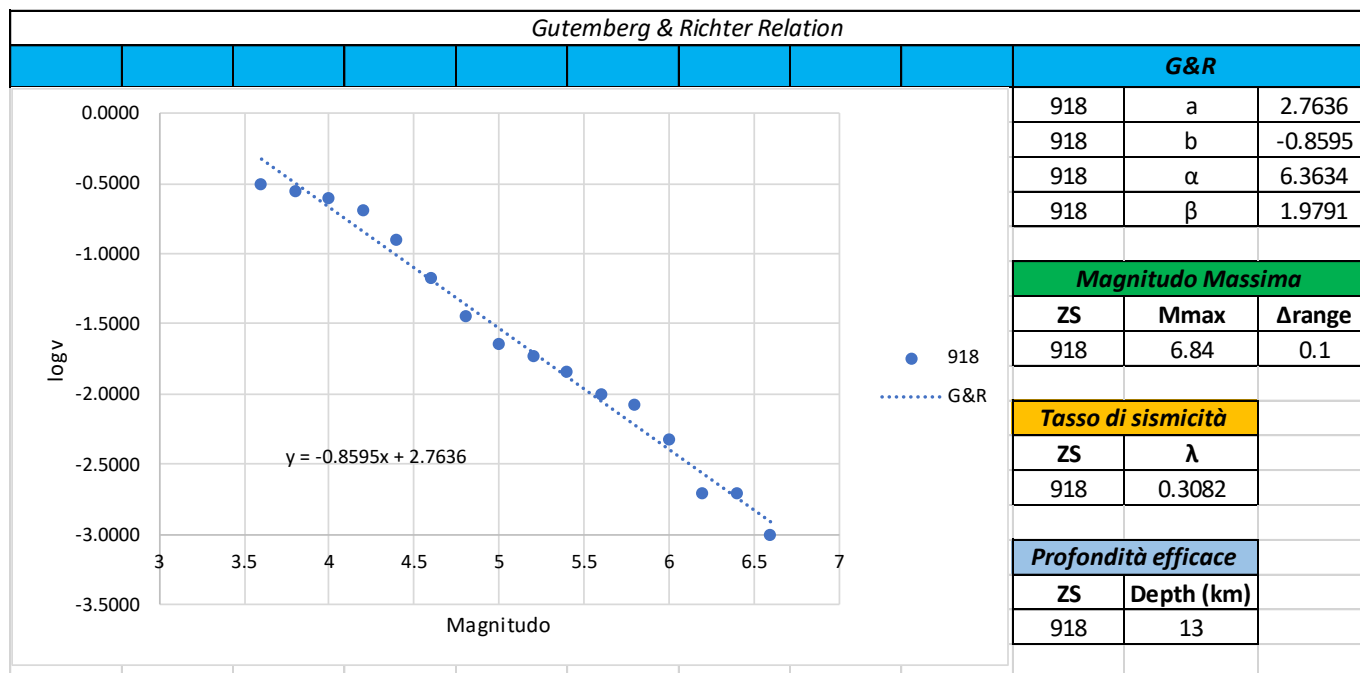




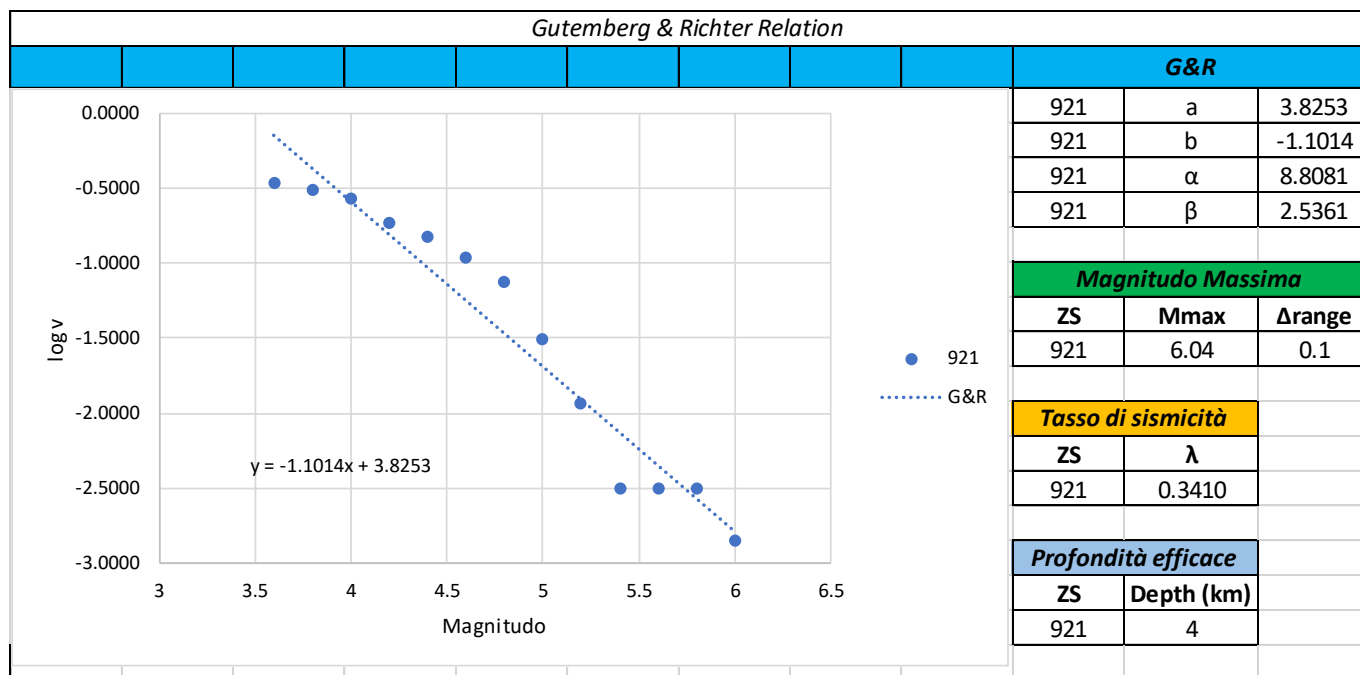
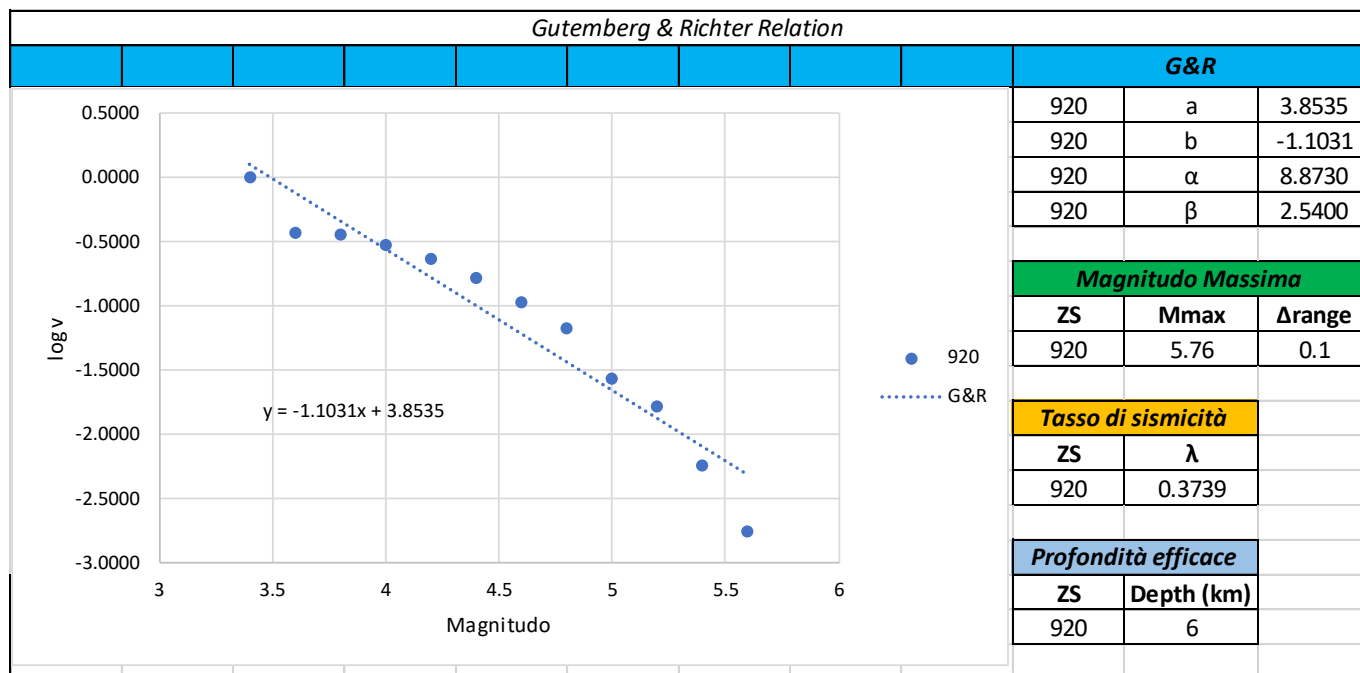








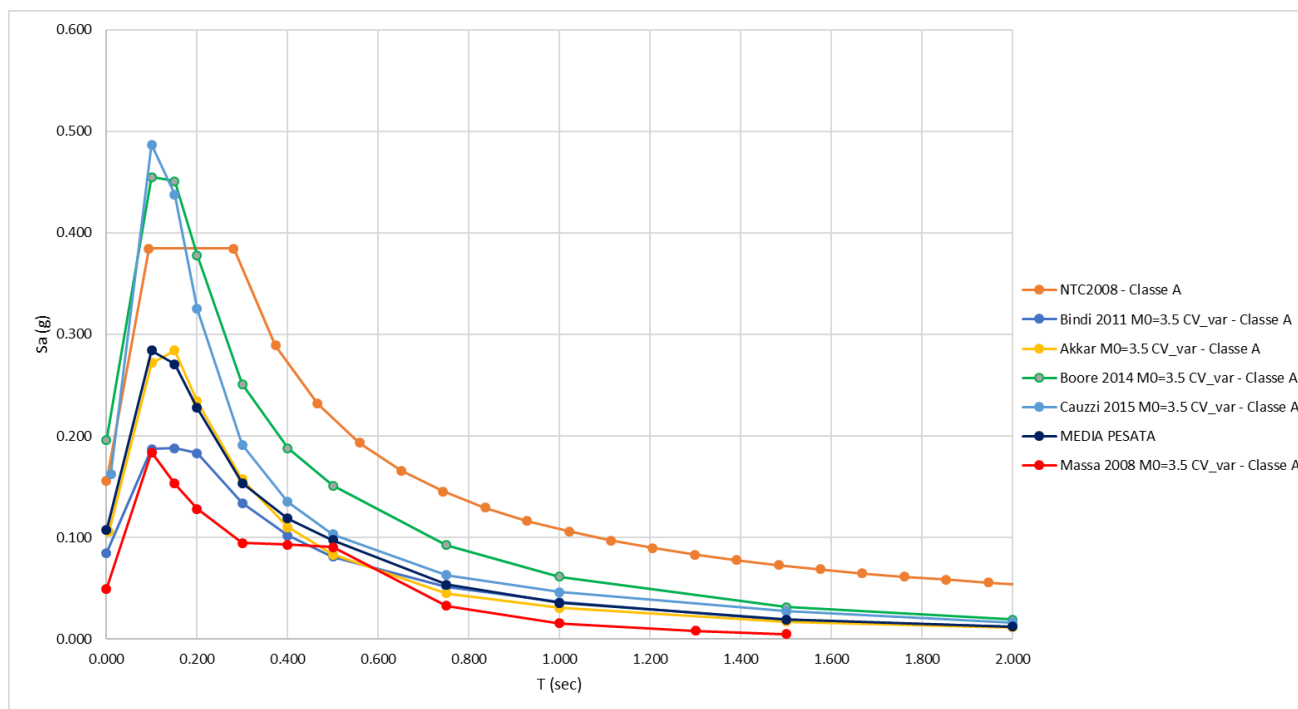




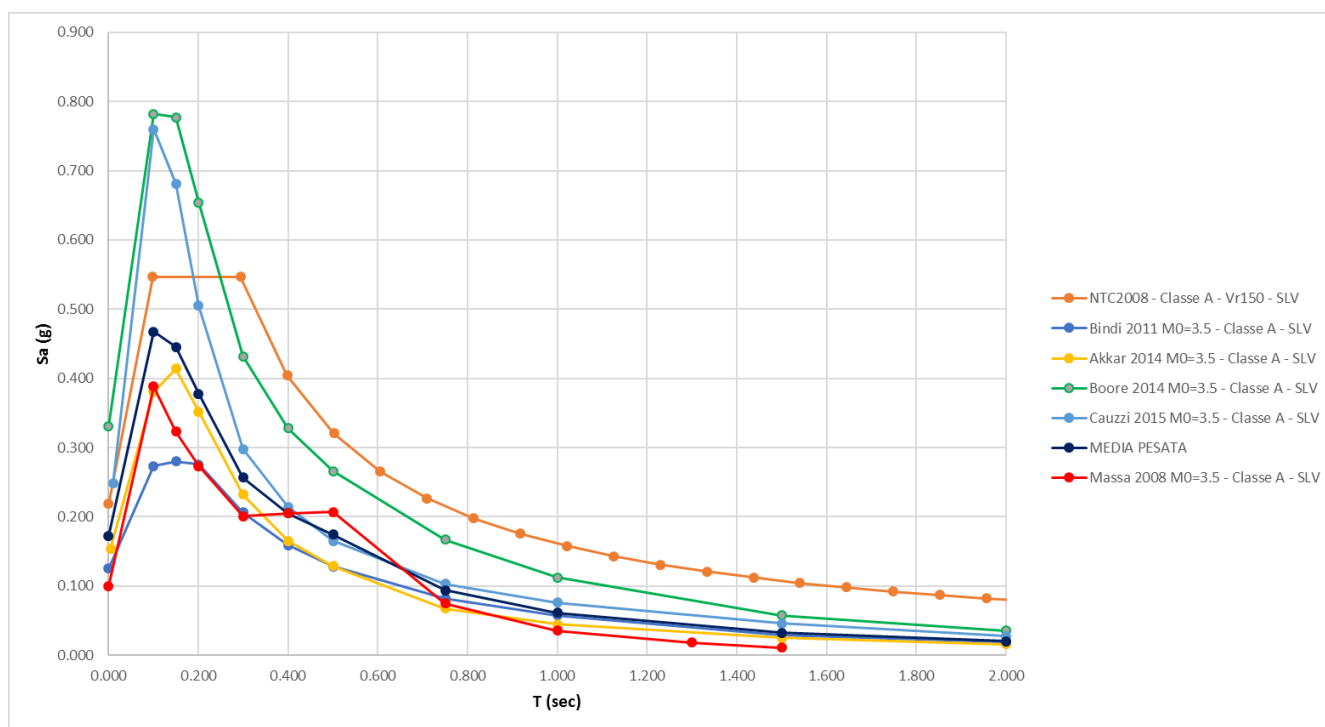
## 6.4 SPETTRI DI RISPOSTA

### 6.4.1 Spettri di risposta ZS9 – classe A

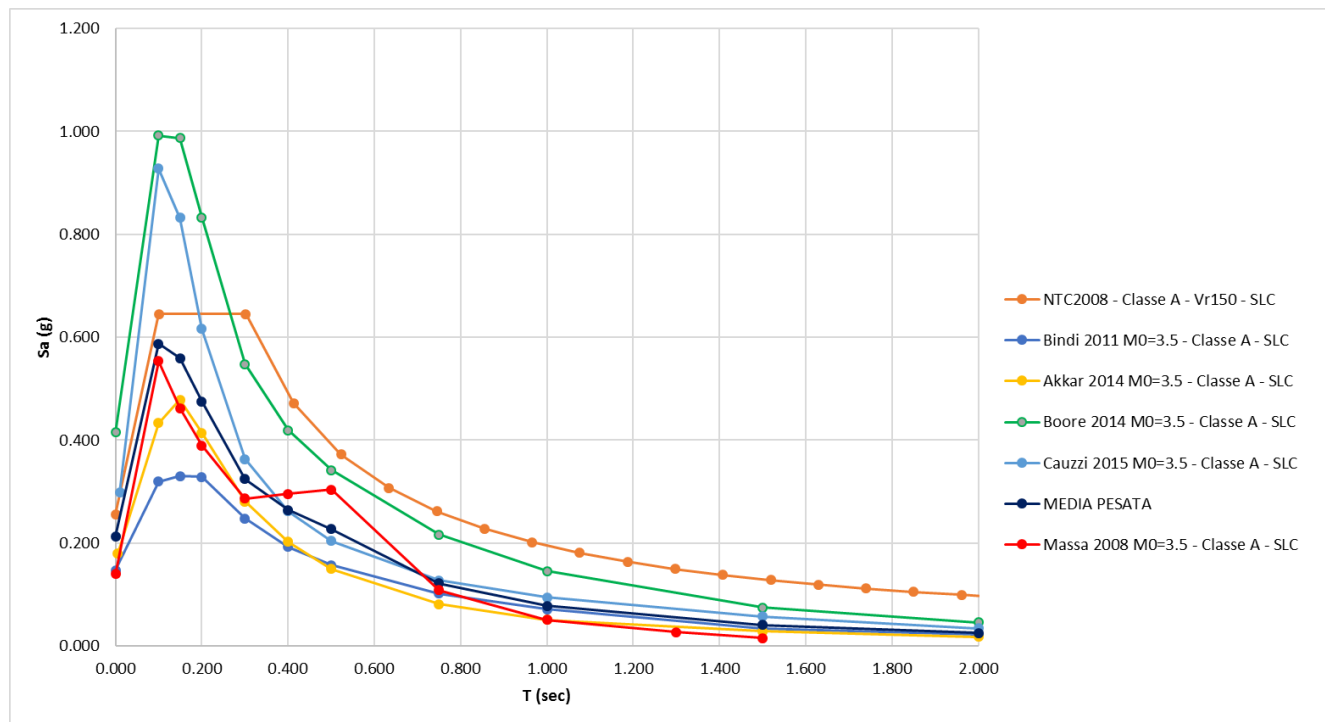
#### 6.4.1.1 Spettri di risposta ZS9 – classe A – $V_r=50$ anni – $T_r=475$ anni – $Pr = 10\%$



#### 6.4.1.2 Spettri di risposta ZS9 – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r=1424$ anni – $Pr = 10\%$

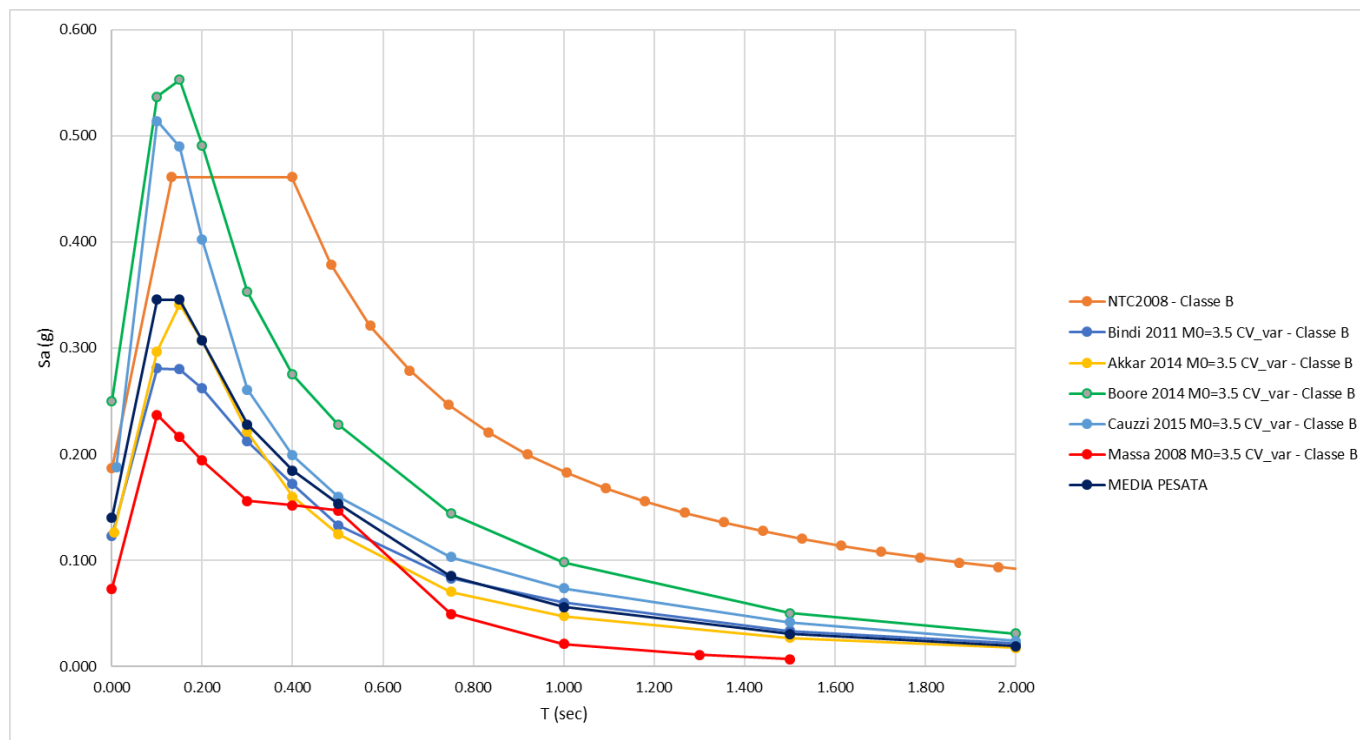


#### 6.4.1.3 Spettri di risposta ZS9 – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r=2475$ anni – $Pr = 5\%$



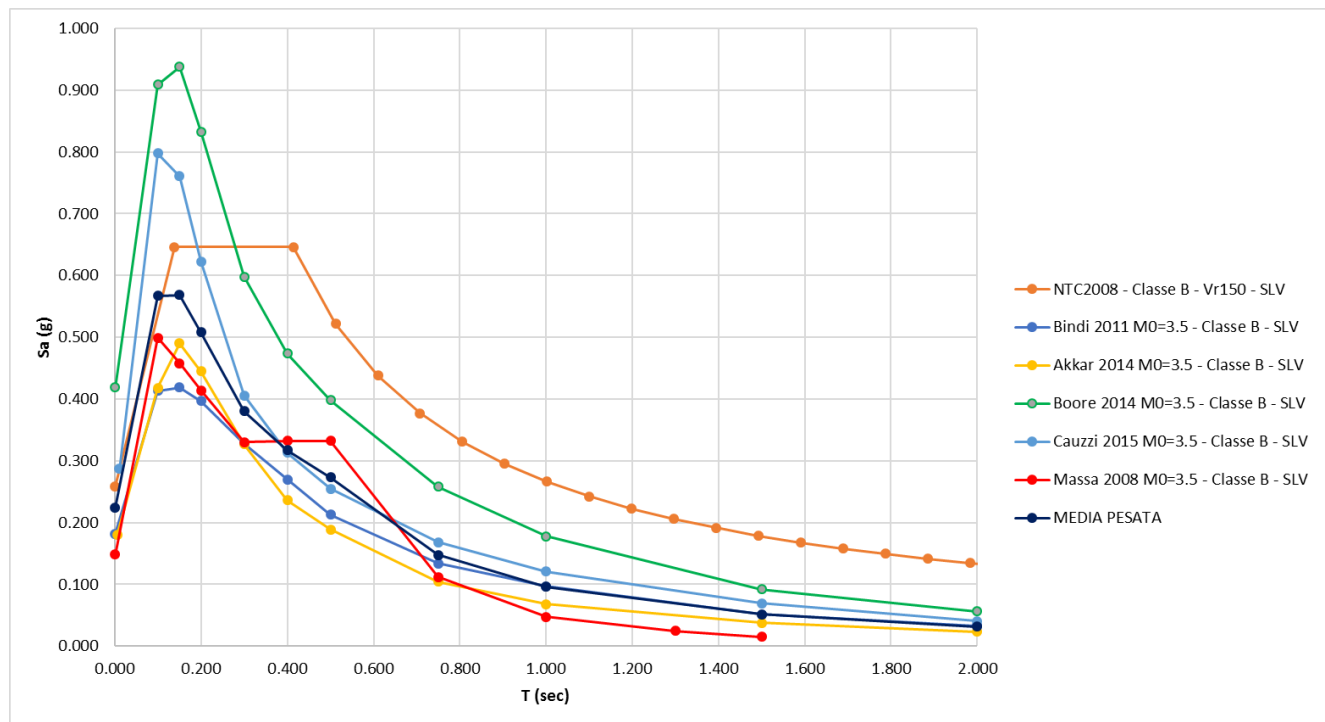
#### 6.4.2 Spettri di risposta ZS9 – classe B

##### 6.4.2.1 Spettri di risposta ZS9 – classe B – $V_r=50$ anni – $T_r=475$ anni – $Pr = 10\%$

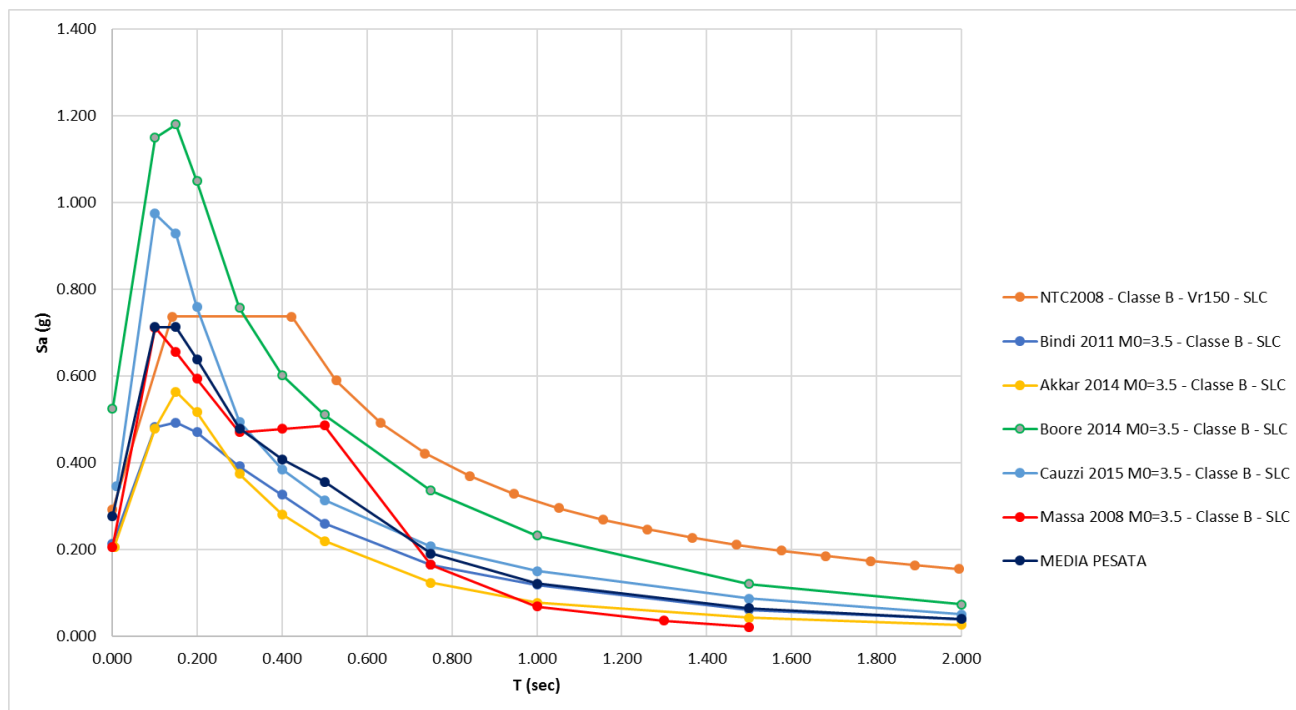




#### 6.4.2.2 Spettri di risposta ZS9 – classe B – $V_r=150$ anni – $T_r=1424$ anni – $Pr = 10\%$

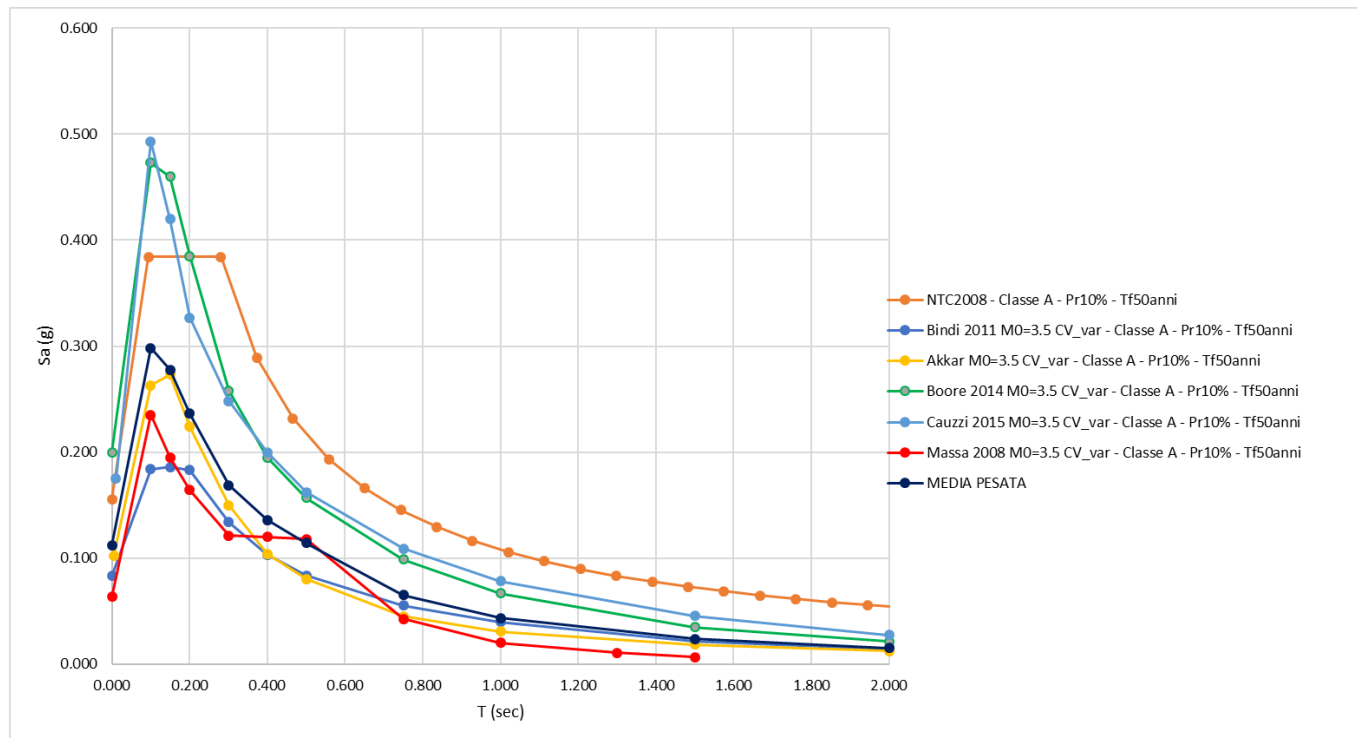


#### 6.4.2.3 Spettri di risposta ZS9 – classe B – $V_r=150$ anni – $T_r=2475$ anni – $Pr = 5\%$

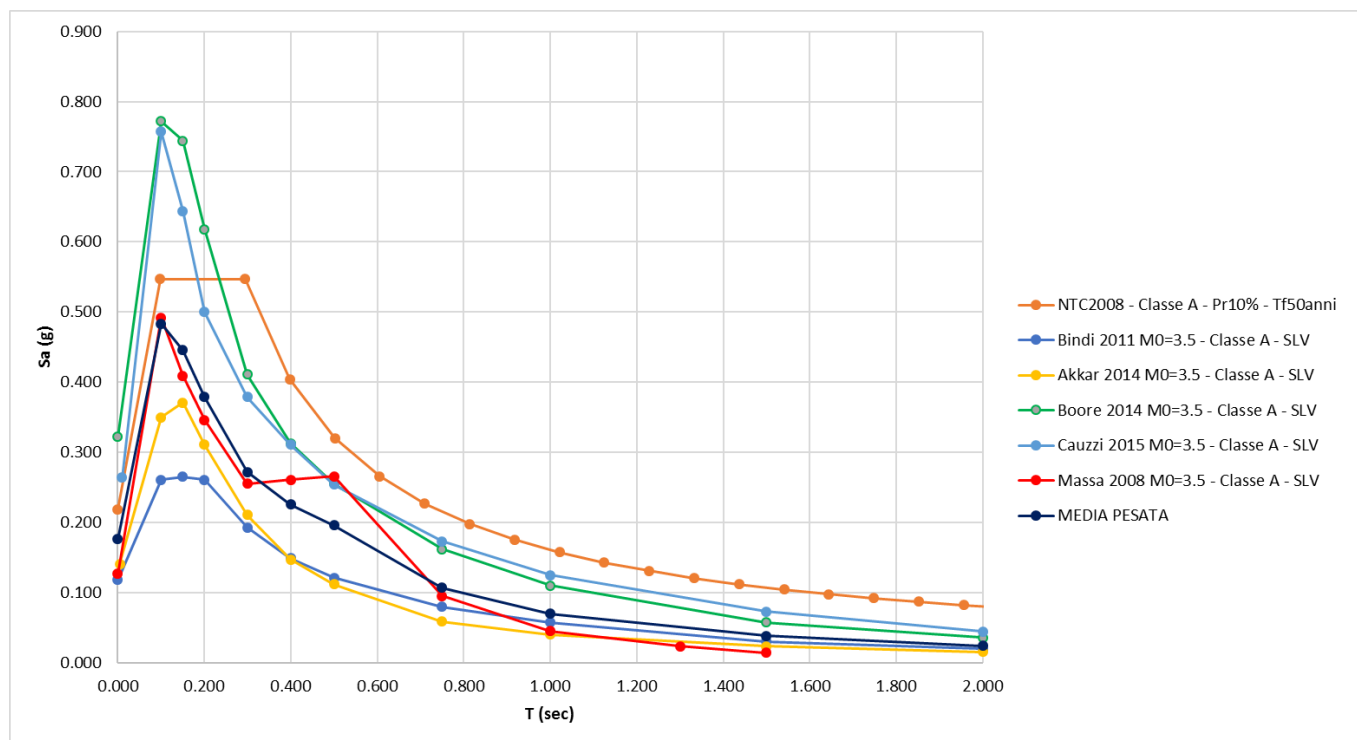


### 6.4.3 Spettri di risposta Z2 – classe A

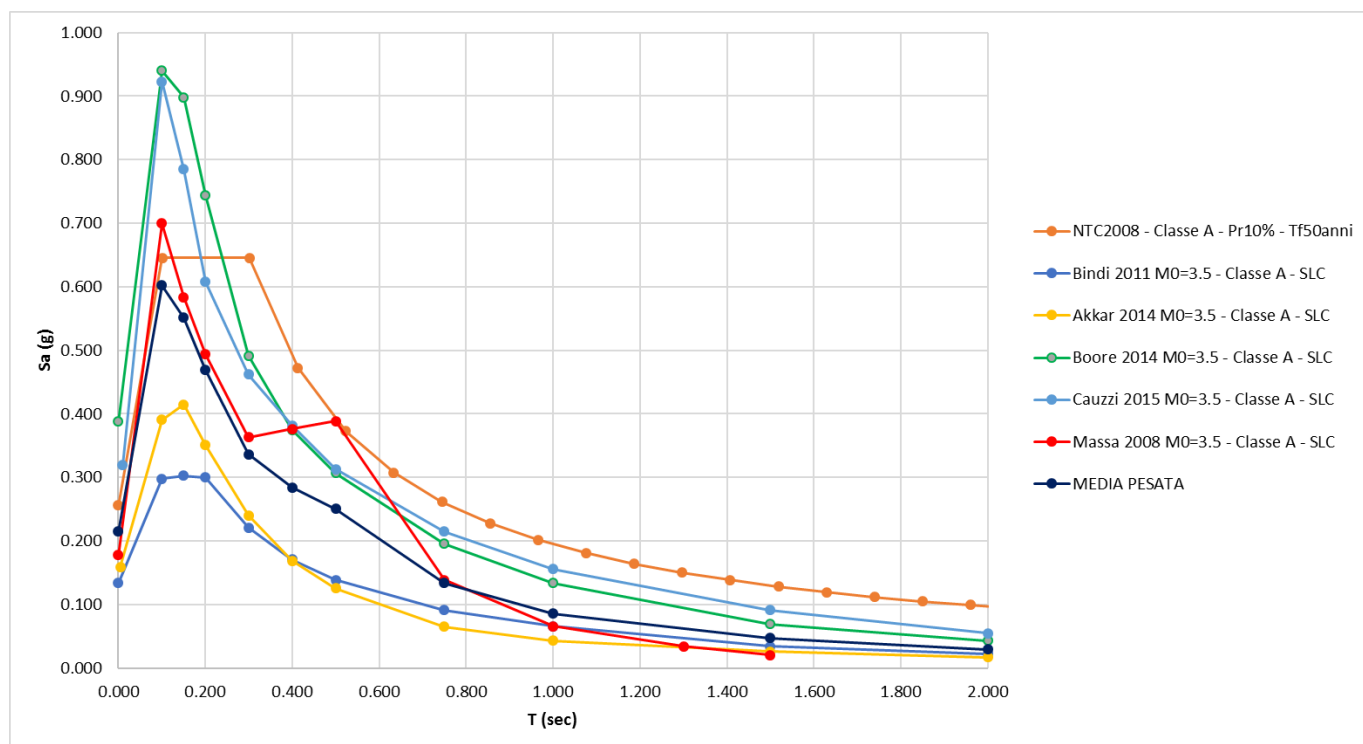
#### 6.4.3.1 Spettri di risposta Z2 – classe A – Vr=50 anni – Tr=475 anni – Pr = 10%



#### 6.4.3.2 Spettri di risposta Z2 – classe A – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10%

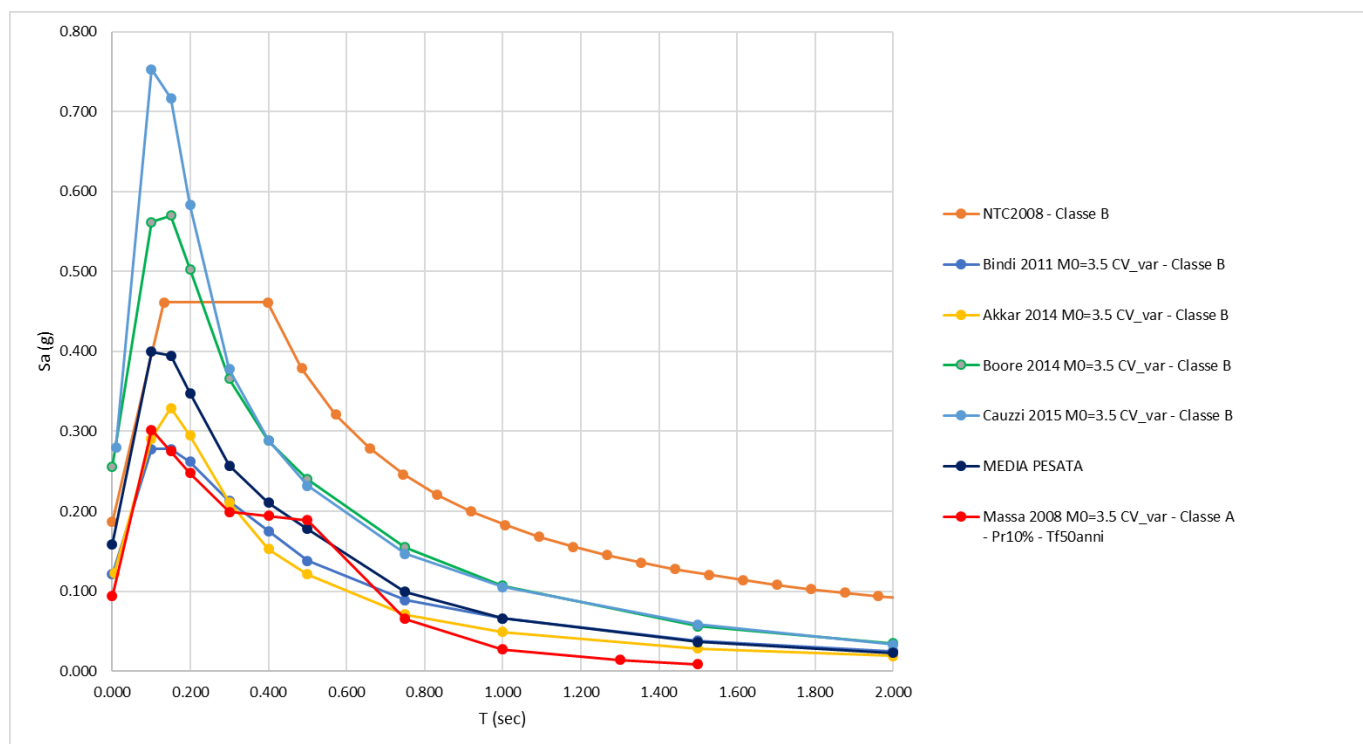


#### 6.4.3.3 Spettri di risposta Z2 – classe A – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5%



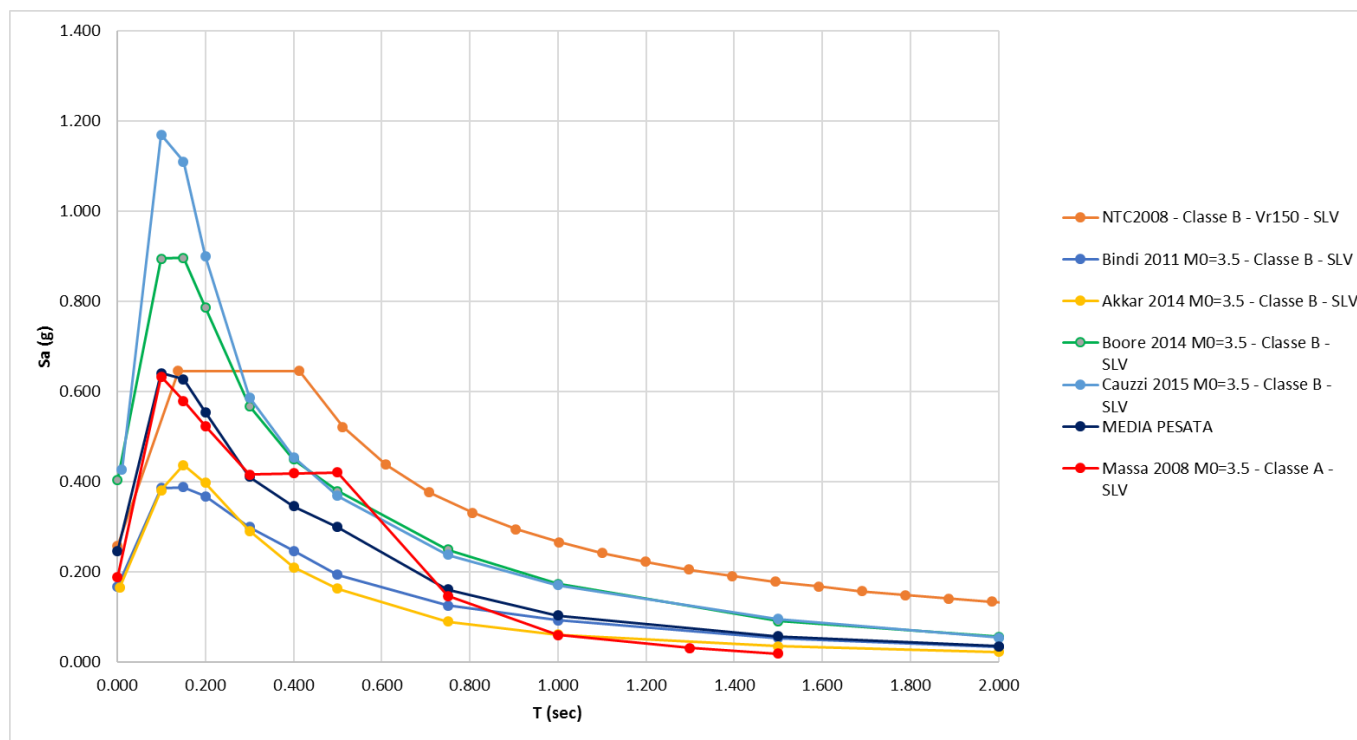
#### 6.4.4 Spettri di risposta $Z_2$ - classe B

##### 6.4.4.1 Spettri di risposta $Z_2$ - classe B - $V_r=50$ anni - $T_r=475$ anni - $Pr = 10\%$

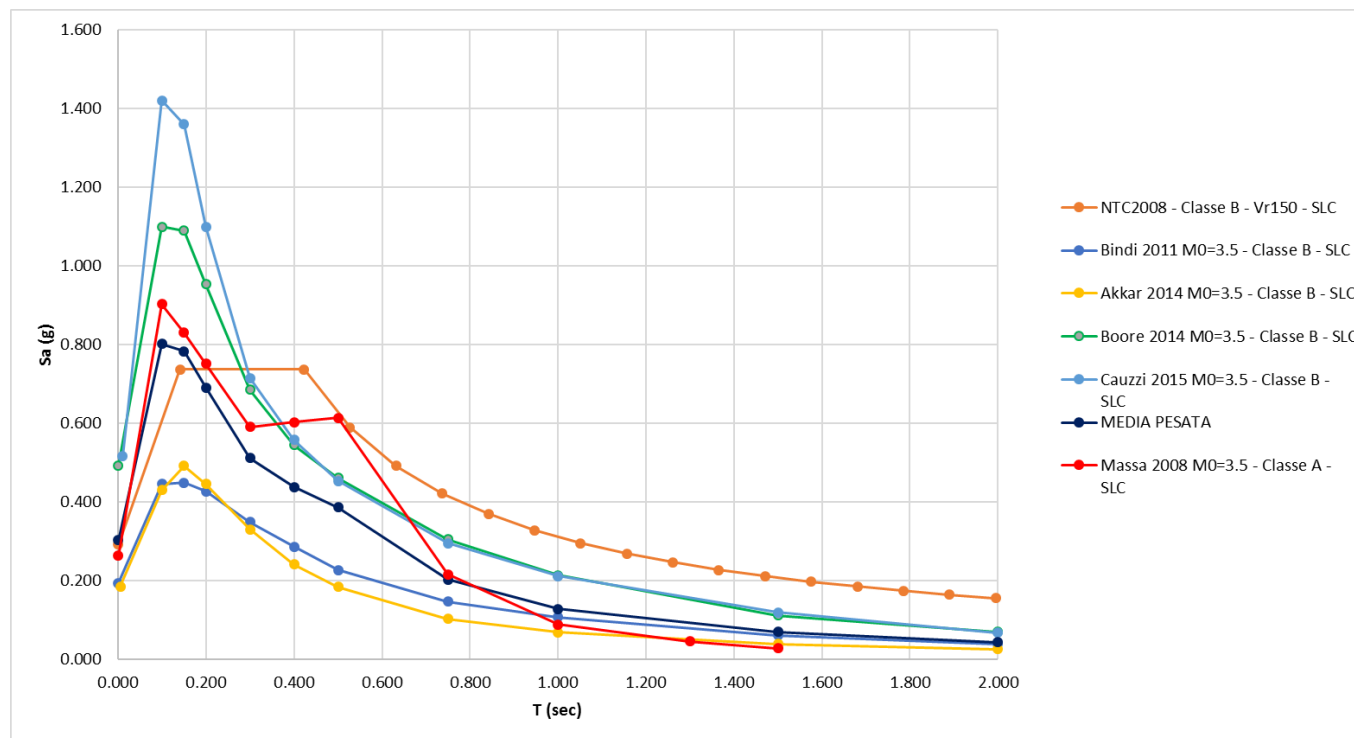


##### 6.4.4.2 Spettri di risposta $Z_2$ - classe B - $V_r=150$ anni - $T_r=1424$ anni - $Pr = 10\%$



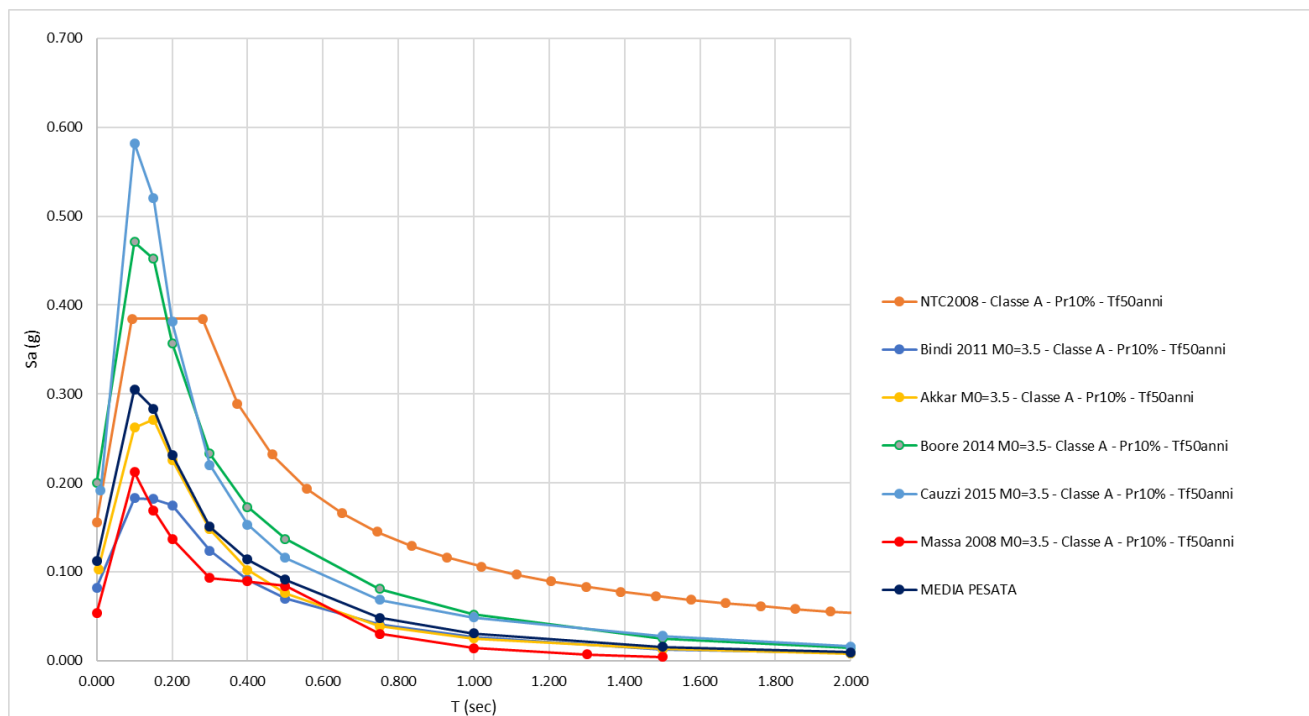


#### 6.4.4.3 Spettri di risposta Z2 – classe B – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5%

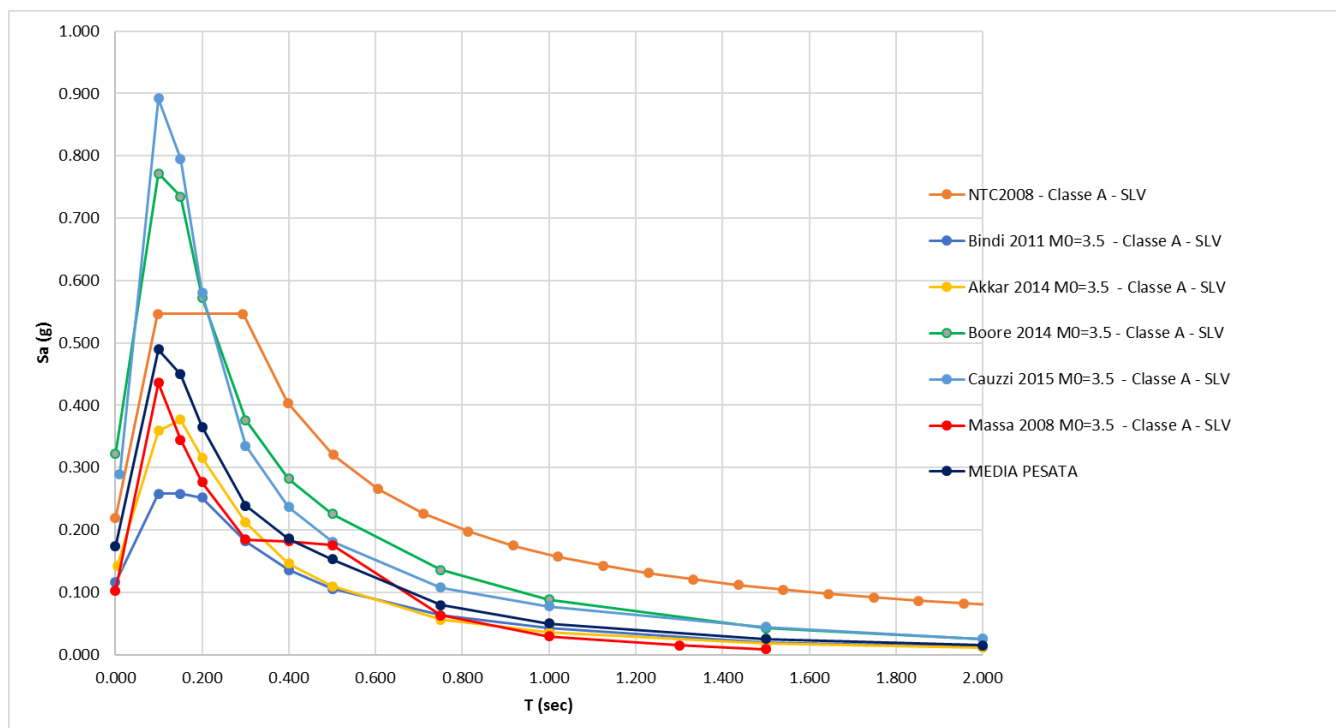


## 6.4.5 Spettri di risposta Z2\_faglie – classe A

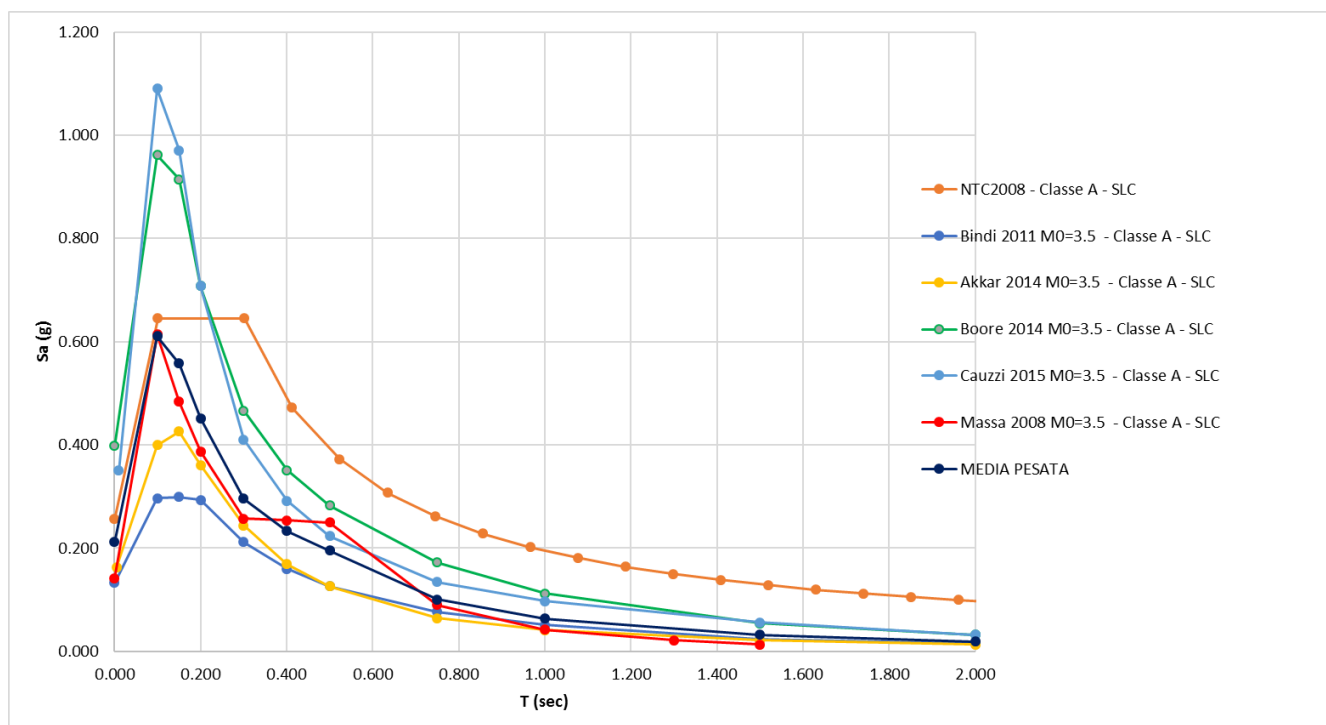
### 6.4.5.1 Spettri di risposta Z2\_faglie – classe A – Vr=50 anni – Tr=475 anni – Pr = 10%



### 6.4.5.2 Spettri di risposta Z2\_faglie – classe A – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10%

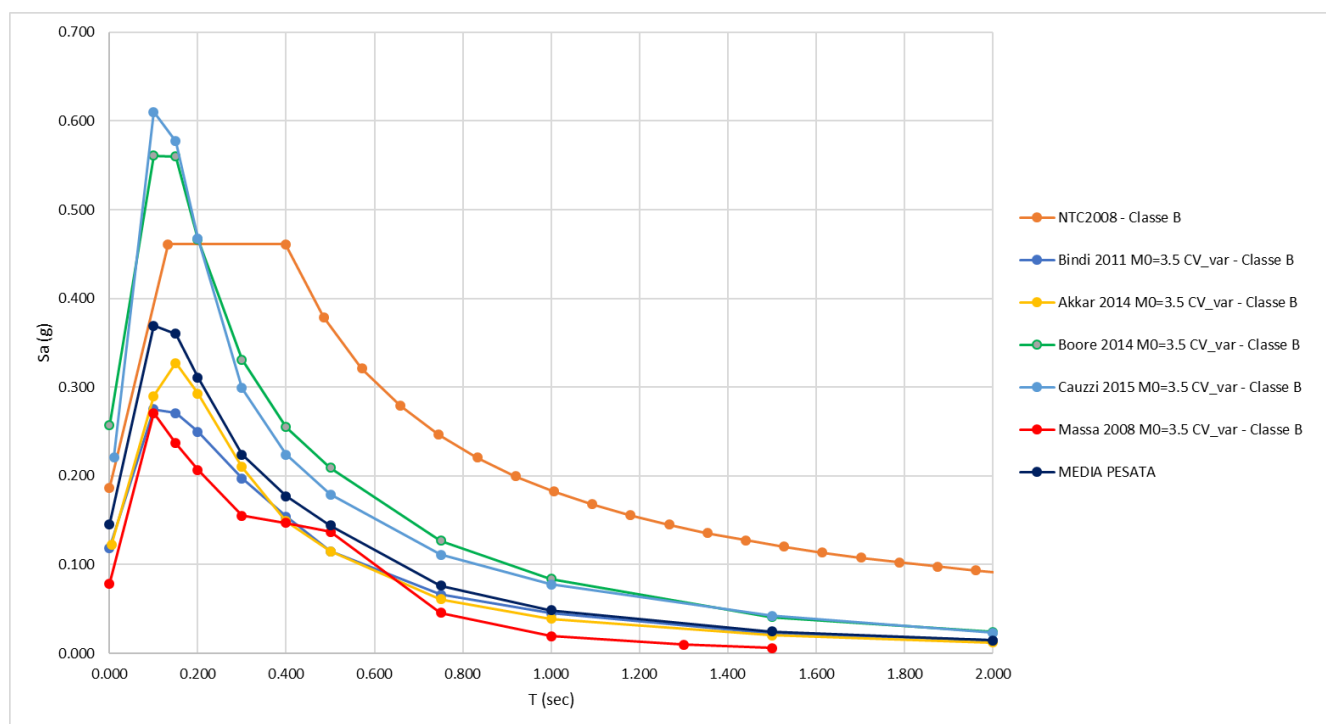


#### 6.4.5.3 Spettri di risposta Z2\_faglie – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r=2475$ anni – $Pr = 5\%$



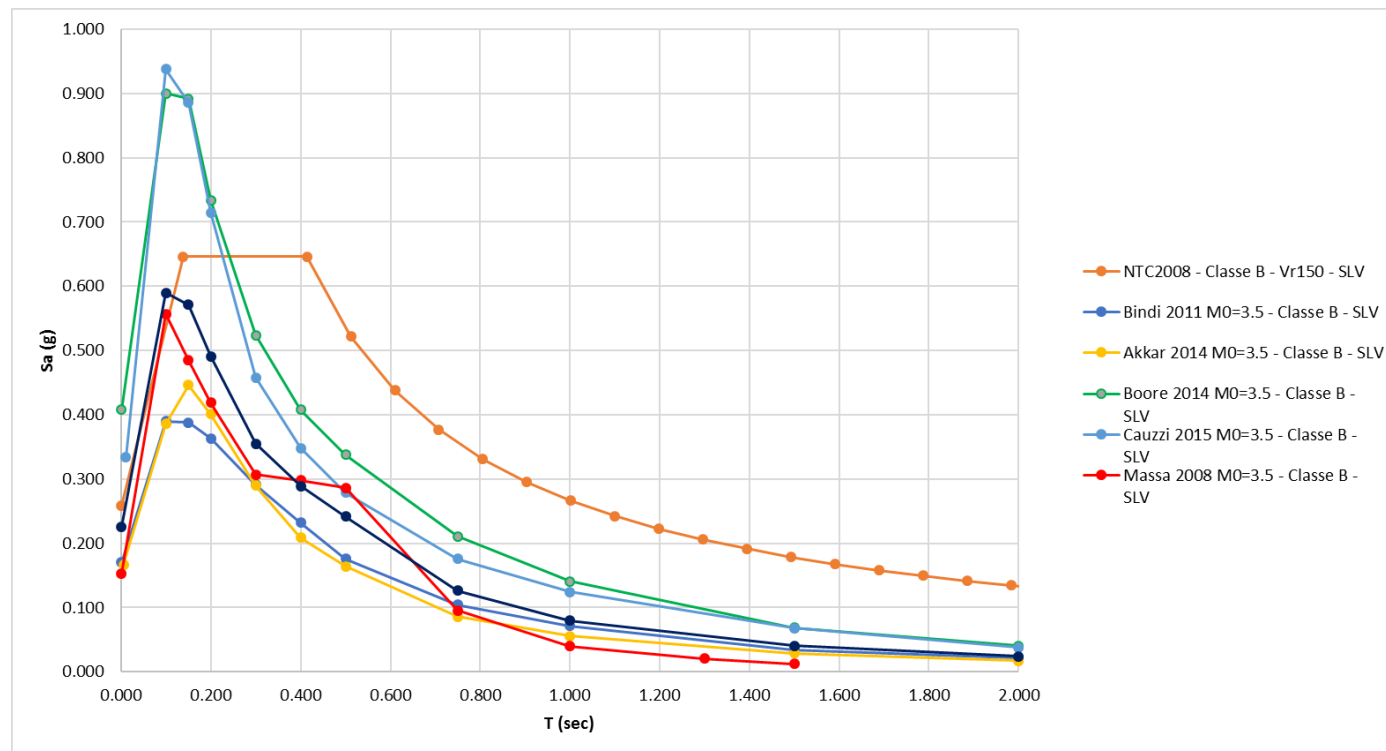
#### 6.4.6 Spettri di risposta Z2\_faglie – classe B

##### 6.4.6.1 Spettri di risposta Z2\_faglie – classe B – $V_r=50$ anni – $T_r=475$ anni – $Pr = 10\%$

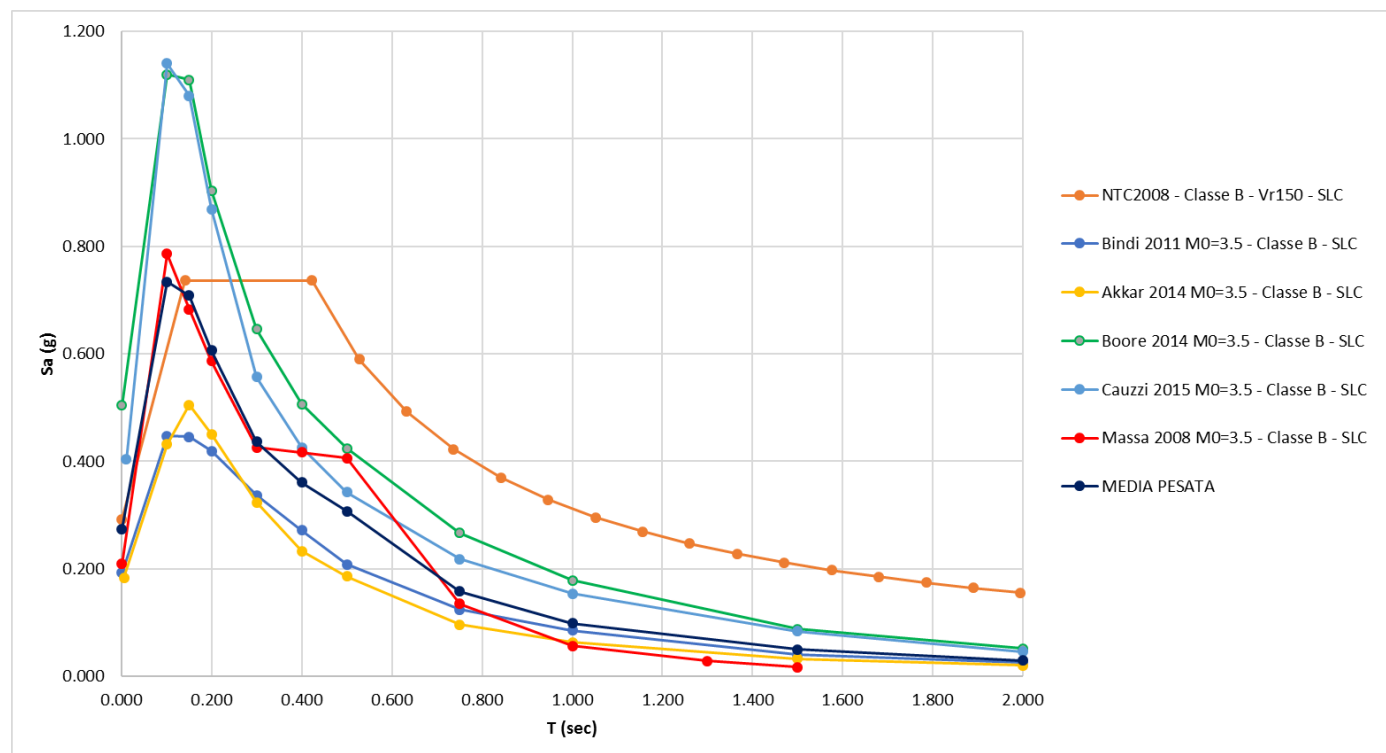




**6.4.6.2** Spettri di risposta Z2\_faglie – classe B – Vr=150 anni – Tr=1424 anni – Pr = 10%



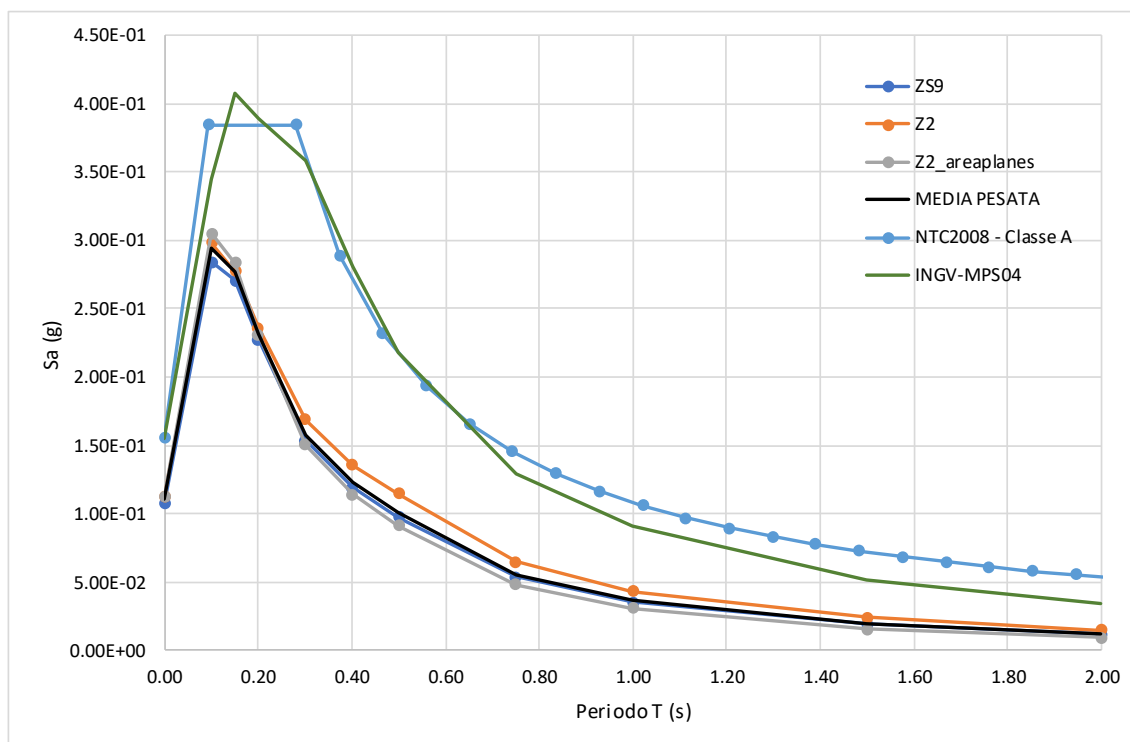
**6.4.6.3** Spettri di risposta Z2\_faglie – classe B – Vr=150 anni – Tr=2475 anni – Pr = 5%



## 6.4.7 Spettri di risposta ALBERO LOGICO

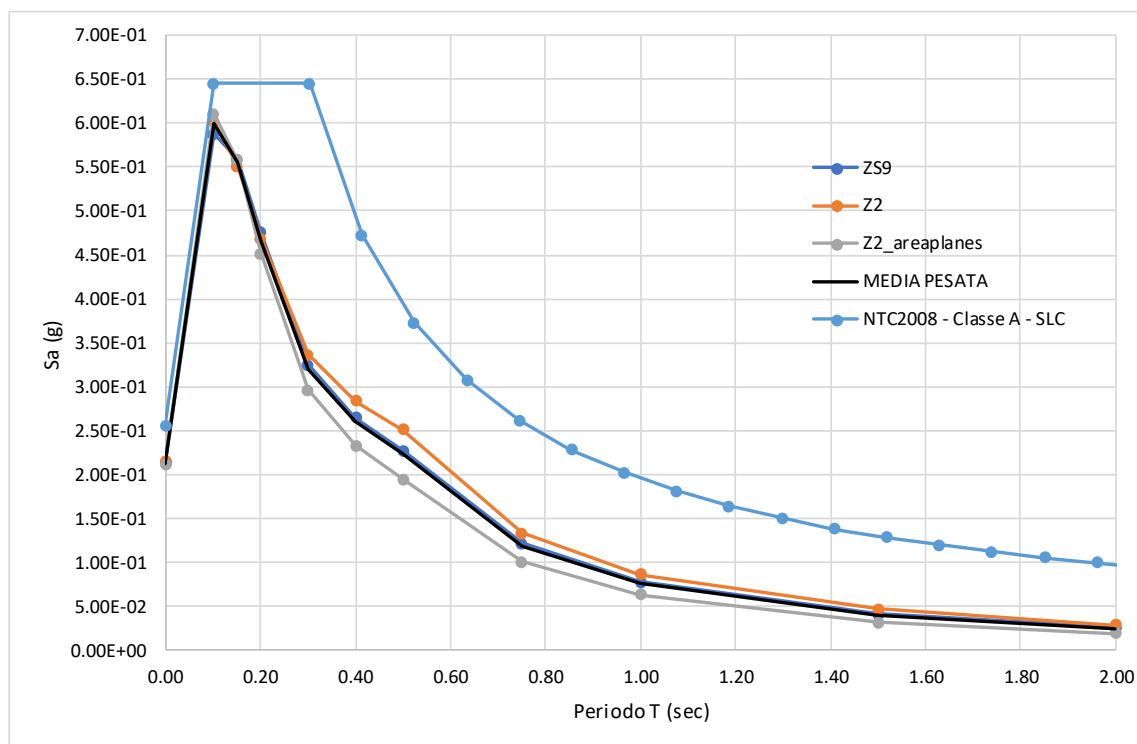
### 6.4.7.1 Spettro di risposta medio pesato – classe A – $V_r=50$ anni – $T_r$ 475 anni – $Pr = 10\%$

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	1.07E-01	4.00E-01	0.00E+00	1.12E-01	3.00E-01	0.00E+00	1.12E-01	3.00E-01	1.10E-01
1.00E-01	2.84E-01	4.00E-01	1.00E-01	2.98E-01	3.00E-01	1.00E-01	3.05E-01	3.00E-01	2.95E-01
1.50E-01	2.71E-01	4.00E-01	1.50E-01	2.78E-01	3.00E-01	1.50E-01	2.83E-01	3.00E-01	2.76E-01
2.00E-01	2.27E-01	4.00E-01	2.00E-01	2.36E-01	3.00E-01	2.00E-01	2.31E-01	3.00E-01	2.31E-01
3.00E-01	1.54E-01	4.00E-01	3.00E-01	1.69E-01	3.00E-01	3.00E-01	1.51E-01	3.00E-01	1.57E-01
4.00E-01	1.19E-01	4.00E-01	4.00E-01	1.36E-01	3.00E-01	4.00E-01	1.14E-01	3.00E-01	1.22E-01
5.00E-01	9.75E-02	4.00E-01	5.00E-01	1.14E-01	3.00E-01	5.00E-01	9.13E-02	3.00E-01	1.01E-01
7.50E-01	5.37E-02	4.00E-01	7.50E-01	6.50E-02	3.00E-01	7.50E-01	4.81E-02	3.00E-01	5.54E-02
1.00E+00	3.55E-02	4.00E-01	1.00E+00	4.32E-02	3.00E-01	1.00E+00	3.06E-02	3.00E-01	3.63E-02
1.50E+00	1.90E-02	4.00E-01	1.50E+00	2.38E-02	3.00E-01	1.50E+00	1.56E-02	3.00E-01	1.94E-02
2.00E+00	1.19E-02	4.00E-01	2.00E+00	1.50E-02	3.00E-01	2.00E+00	9.46E-03	3.00E-01	1.21E-02



#### 6.4.7.2 Spettro di risposta medio pesato – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r$ 1424 anni – $Pr = 10\%$

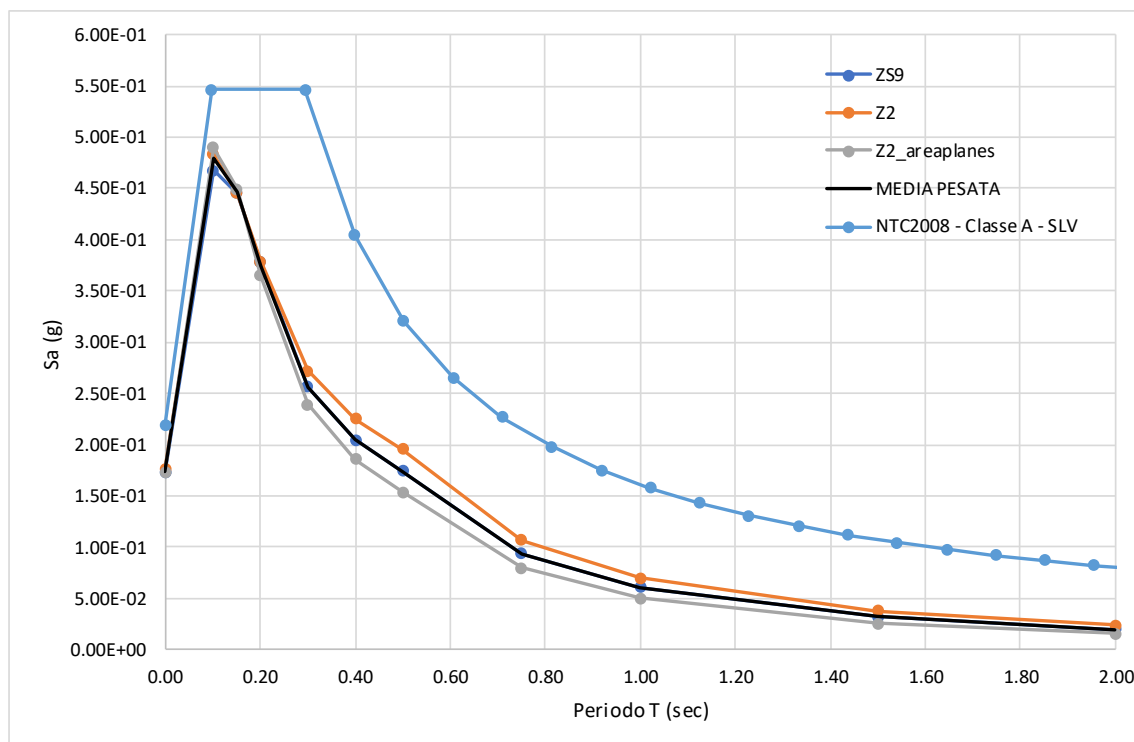
ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	2.13E-01	4.00E-01	0.00E+00	2.15E-01	3.00E-01	0.00E+00	2.12E-01	3.00E-01	2.13E-01
1.00E-01	5.87E-01	4.00E-01	1.00E-01	6.03E-01	3.00E-01	1.00E-01	6.10E-01	3.00E-01	5.99E-01
1.50E-01	5.59E-01	4.00E-01	1.50E-01	5.52E-01	3.00E-01	1.50E-01	5.58E-01	3.00E-01	5.56E-01
2.00E-01	4.76E-01	4.00E-01	2.00E-01	4.69E-01	3.00E-01	2.00E-01	4.51E-01	3.00E-01	4.66E-01
3.00E-01	3.25E-01	4.00E-01	3.00E-01	3.36E-01	3.00E-01	3.00E-01	2.96E-01	3.00E-01	3.20E-01
4.00E-01	2.65E-01	4.00E-01	4.00E-01	2.84E-01	3.00E-01	4.00E-01	2.33E-01	3.00E-01	2.61E-01
5.00E-01	2.28E-01	4.00E-01	5.00E-01	2.51E-01	3.00E-01	5.00E-01	1.95E-01	3.00E-01	2.25E-01
7.50E-01	1.22E-01	4.00E-01	7.50E-01	1.34E-01	3.00E-01	7.50E-01	1.01E-01	3.00E-01	1.19E-01
1.00E+00	7.80E-02	4.00E-01	1.00E+00	8.61E-02	3.00E-01	1.00E+00	6.33E-02	3.00E-01	7.60E-02
1.50E+00	4.12E-02	4.00E-01	1.50E+00	4.71E-02	3.00E-01	1.50E+00	3.20E-02	3.00E-01	4.02E-02
2.00E+00	2.55E-02	4.00E-01	2.00E+00	2.93E-02	3.00E-01	2.00E+00	1.93E-02	3.00E-01	2.48E-02





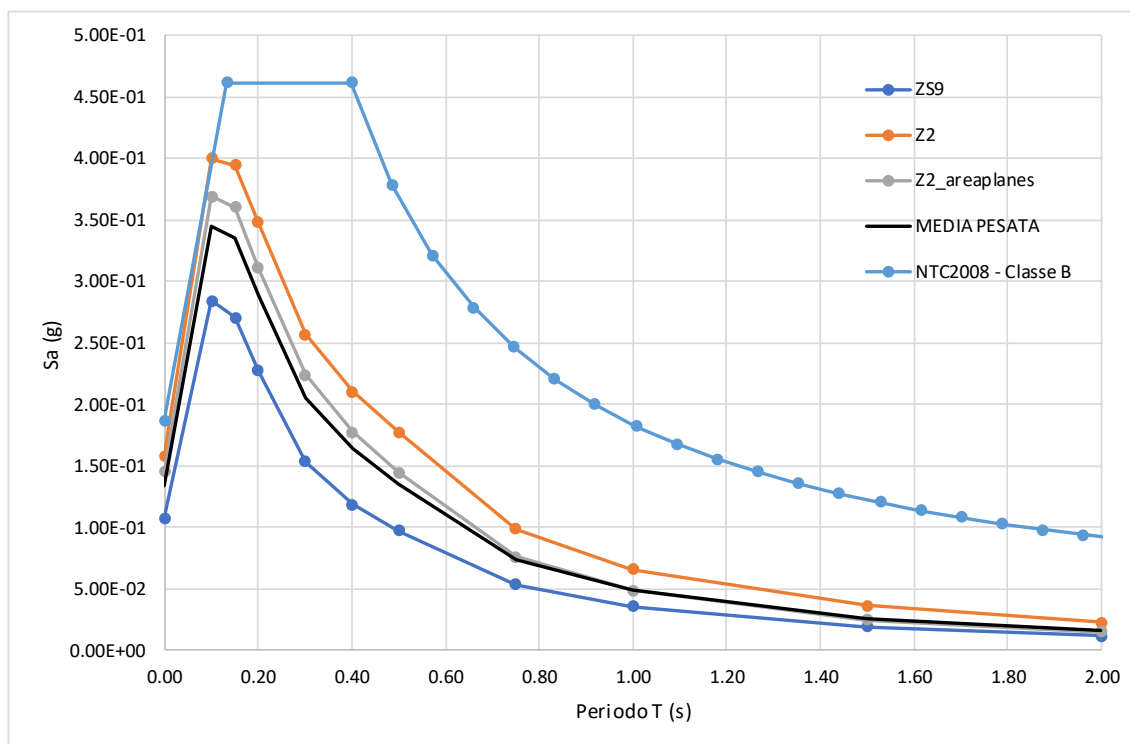
### 6.4.7.3 Spettro di risposta medio pesato – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r$ 2475 anni – $Pr = 5\%$

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	1.72E-01	4.00E-01	0.00E+00	1.76E-01	3.00E-01	0.00E+00	1.74E-01	3.00E-01	1.74E-01
1.00E-01	4.67E-01	4.00E-01	1.00E-01	4.83E-01	3.00E-01	1.00E-01	4.90E-01	3.00E-01	4.79E-01
1.50E-01	4.46E-01	4.00E-01	1.50E-01	4.46E-01	3.00E-01	1.50E-01	4.50E-01	3.00E-01	4.47E-01
2.00E-01	3.78E-01	4.00E-01	2.00E-01	3.79E-01	3.00E-01	2.00E-01	3.65E-01	3.00E-01	3.74E-01
3.00E-01	2.56E-01	4.00E-01	3.00E-01	2.72E-01	3.00E-01	3.00E-01	2.39E-01	3.00E-01	2.56E-01
4.00E-01	2.05E-01	4.00E-01	4.00E-01	2.26E-01	3.00E-01	4.00E-01	1.86E-01	3.00E-01	2.05E-01
5.00E-01	1.74E-01	4.00E-01	5.00E-01	1.96E-01	3.00E-01	5.00E-01	1.53E-01	3.00E-01	1.74E-01
7.50E-01	9.39E-02	4.00E-01	7.50E-01	1.07E-01	3.00E-01	7.50E-01	7.99E-02	3.00E-01	9.36E-02
1.00E+00	6.09E-02	4.00E-01	1.00E+00	6.97E-02	3.00E-01	1.00E+00	5.03E-02	3.00E-01	6.03E-02
1.50E+00	3.23E-02	4.00E-01	1.50E+00	3.82E-02	3.00E-01	1.50E+00	2.55E-02	3.00E-01	3.20E-02
2.00E+00	2.01E-02	4.00E-01	2.00E+00	2.39E-02	3.00E-01	2.00E+00	1.54E-02	3.00E-01	1.98E-02



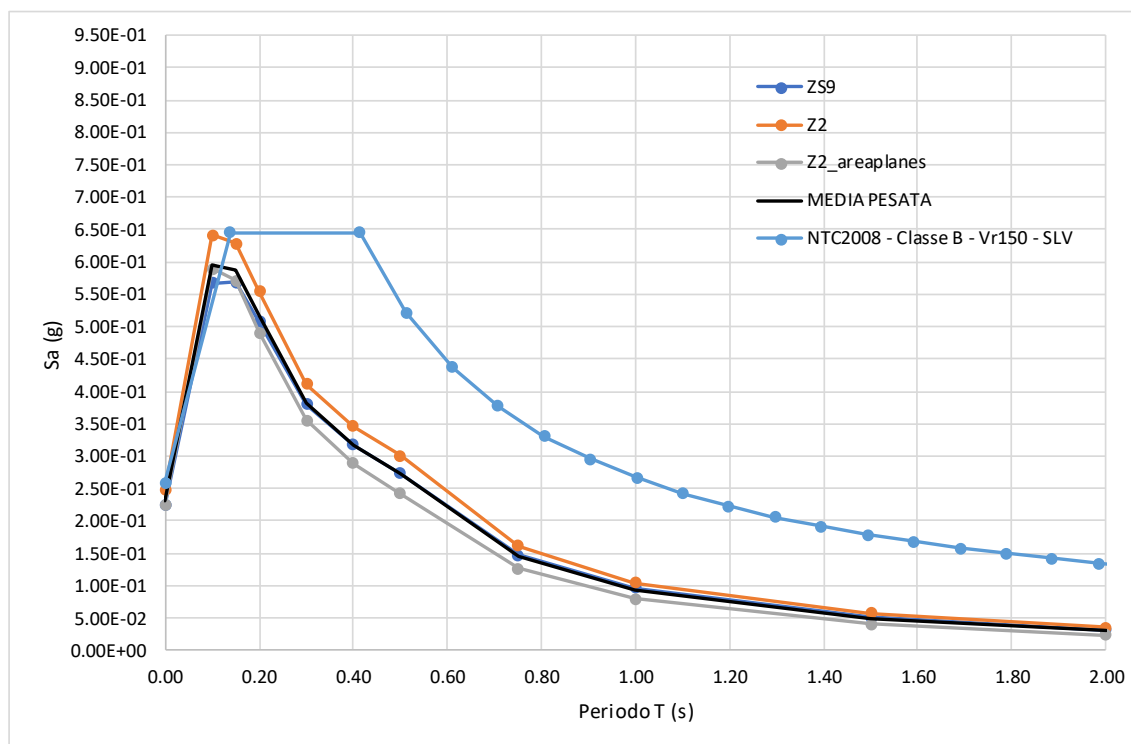
#### 6.4.7.4 Spettro di risposta medio pesato – classe B – $V_r=50$ anni – $T_r$ 475 anni – $Pr = 10\%$

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	1.07E-01	4.00E-01	0.00E+00	1.59E-01	3.00E-01	0.00E+00	1.45E-01	3.00E-01	1.34E-01
1.00E-01	2.84E-01	4.00E-01	1.00E-01	4.00E-01	3.00E-01	1.00E-01	3.69E-01	3.00E-01	3.44E-01
1.50E-01	2.71E-01	4.00E-01	1.50E-01	3.95E-01	3.00E-01	1.50E-01	3.60E-01	3.00E-01	3.35E-01
2.00E-01	2.27E-01	4.00E-01	2.00E-01	3.48E-01	3.00E-01	2.00E-01	3.11E-01	3.00E-01	2.89E-01
3.00E-01	1.54E-01	4.00E-01	3.00E-01	2.57E-01	3.00E-01	3.00E-01	2.24E-01	3.00E-01	2.06E-01
4.00E-01	1.19E-01	4.00E-01	4.00E-01	2.11E-01	3.00E-01	4.00E-01	1.77E-01	3.00E-01	1.64E-01
5.00E-01	9.75E-02	4.00E-01	5.00E-01	1.78E-01	3.00E-01	5.00E-01	1.44E-01	3.00E-01	1.36E-01
7.50E-01	5.37E-02	4.00E-01	7.50E-01	9.90E-02	3.00E-01	7.50E-01	7.61E-02	3.00E-01	7.40E-02
1.00E+00	3.55E-02	4.00E-01	1.00E+00	6.57E-02	3.00E-01	1.00E+00	4.85E-02	3.00E-01	4.84E-02
1.50E+00	1.90E-02	4.00E-01	1.50E+00	3.64E-02	3.00E-01	1.50E+00	2.48E-02	3.00E-01	2.60E-02
2.00E+00	1.19E-02	4.00E-01	2.00E+00	2.25E-02	3.00E-01	2.00E+00	1.49E-02	3.00E-01	1.60E-02



#### 6.4.7.5 Spettro di risposta medio pesato – classe B – $V_r=150$ anni – $T_r$ 1424 anni – $Pr = 10\%$

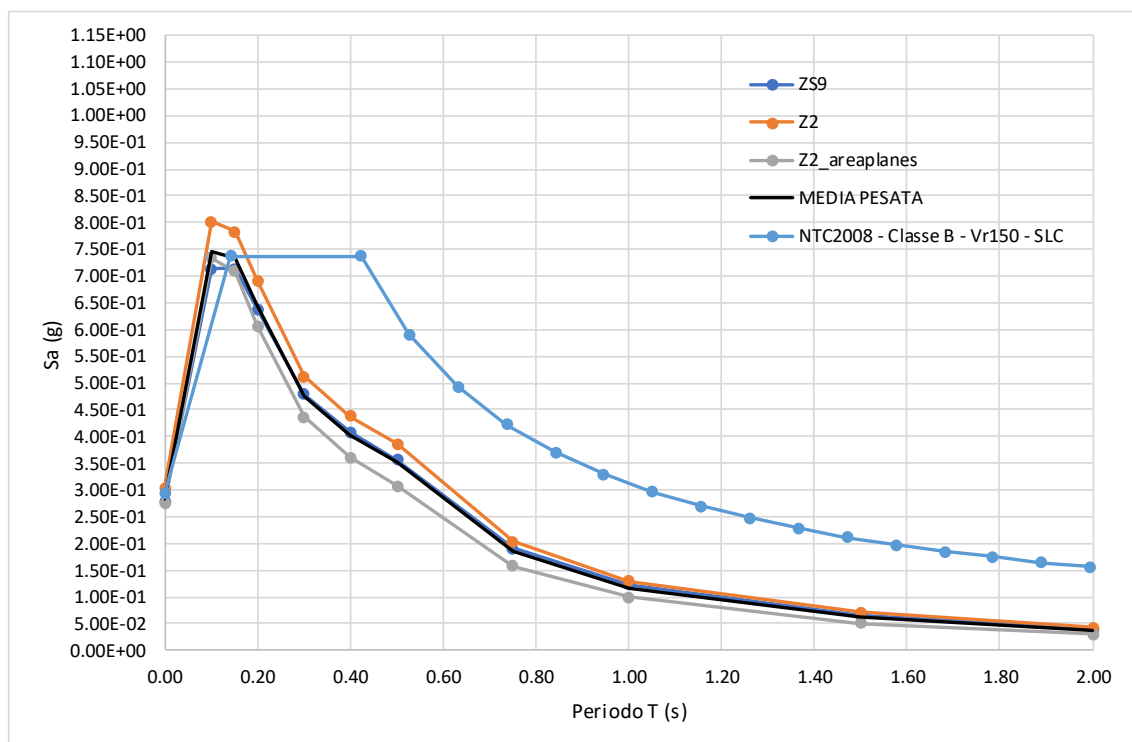
ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	2.25E-01	4.00E-01	0.00E+00	2.47E-01	3.00E-01	0.00E+00	2.26E-01	3.00E-01	2.32E-01
1.00E-01	5.67E-01	4.00E-01	1.00E-01	6.41E-01	3.00E-01	1.00E-01	5.90E-01	3.00E-01	5.96E-01
1.50E-01	5.69E-01	4.00E-01	1.50E-01	6.28E-01	3.00E-01	1.50E-01	5.71E-01	3.00E-01	5.87E-01
2.00E-01	5.08E-01	4.00E-01	2.00E-01	5.54E-01	3.00E-01	2.00E-01	4.91E-01	3.00E-01	5.17E-01
3.00E-01	3.81E-01	4.00E-01	3.00E-01	4.11E-01	3.00E-01	3.00E-01	3.55E-01	3.00E-01	3.82E-01
4.00E-01	3.17E-01	4.00E-01	4.00E-01	3.46E-01	3.00E-01	4.00E-01	2.89E-01	3.00E-01	3.17E-01
5.00E-01	2.73E-01	4.00E-01	5.00E-01	3.00E-01	3.00E-01	5.00E-01	2.41E-01	3.00E-01	2.72E-01
7.50E-01	1.48E-01	4.00E-01	7.50E-01	1.61E-01	3.00E-01	7.50E-01	1.26E-01	3.00E-01	1.45E-01
1.00E+00	9.58E-02	4.00E-01	1.00E+00	1.04E-01	3.00E-01	1.00E+00	7.94E-02	3.00E-01	9.33E-02
1.50E+00	5.14E-02	4.00E-01	1.50E+00	5.74E-02	3.00E-01	1.50E+00	4.02E-02	3.00E-01	4.98E-02
2.00E+00	3.17E-02	4.00E-01	2.00E+00	3.53E-02	3.00E-01	2.00E+00	2.40E-02	3.00E-01	3.05E-02





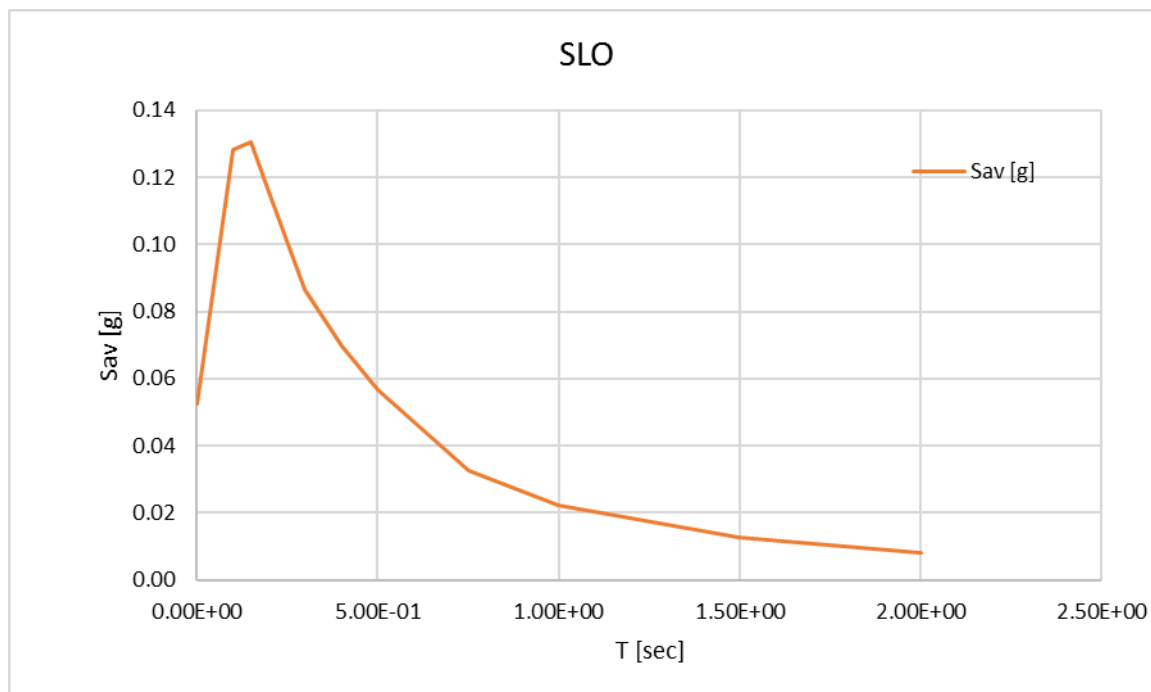
**6.4.7.6 Spettro di risposta medio pesato – classe B –  $V_r=150$  anni –  $T_r$  2475 anni –  $Pr = 5\%$** 

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	2.78E-01	4.00E-01	0.00E+00	3.04E-01	3.00E-01	0.00E+00	2.74E-01	3.00E-01	2.84E-01
1.00E-01	7.13E-01	4.00E-01	1.00E-01	8.02E-01	3.00E-01	1.00E-01	7.34E-01	3.00E-01	7.46E-01
1.50E-01	7.13E-01	4.00E-01	1.50E-01	7.84E-01	3.00E-01	1.50E-01	7.09E-01	3.00E-01	7.33E-01
2.00E-01	6.39E-01	4.00E-01	2.00E-01	6.91E-01	3.00E-01	2.00E-01	6.06E-01	3.00E-01	6.45E-01
3.00E-01	4.79E-01	4.00E-01	3.00E-01	5.12E-01	3.00E-01	3.00E-01	4.37E-01	3.00E-01	4.76E-01
4.00E-01	4.08E-01	4.00E-01	4.00E-01	4.39E-01	3.00E-01	4.00E-01	3.61E-01	3.00E-01	4.03E-01
5.00E-01	3.56E-01	4.00E-01	5.00E-01	3.87E-01	3.00E-01	5.00E-01	3.07E-01	3.00E-01	3.51E-01
7.50E-01	1.91E-01	4.00E-01	7.50E-01	2.04E-01	3.00E-01	7.50E-01	1.58E-01	3.00E-01	1.85E-01
1.00E+00	1.22E-01	4.00E-01	1.00E+00	1.29E-01	3.00E-01	1.00E+00	9.91E-02	3.00E-01	1.17E-01
1.50E+00	6.51E-02	4.00E-01	1.50E+00	7.06E-02	3.00E-01	1.50E+00	5.02E-02	3.00E-01	6.23E-02
2.00E+00	4.01E-02	4.00E-01	2.00E+00	4.34E-02	3.00E-01	2.00E+00	3.00E-02	3.00E-01	3.81E-02

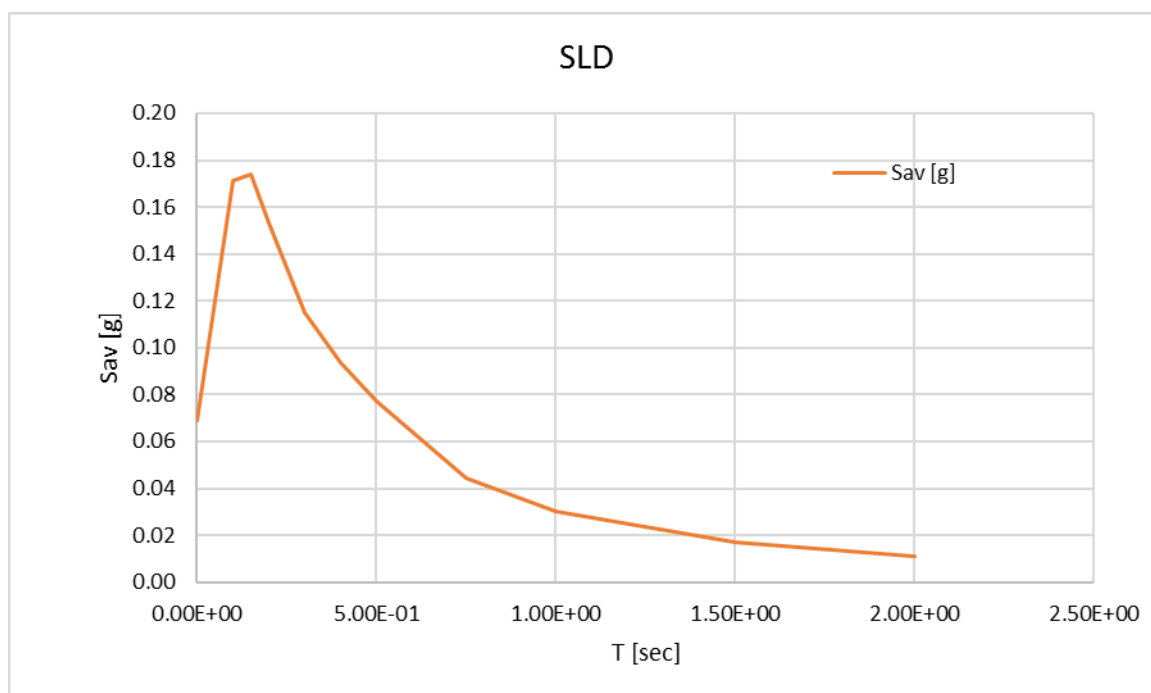


#### 6.4.8 Spettri di risposta della componente verticale ALBERO LOGICO (Mmax+0.3 e "b" non corretto)

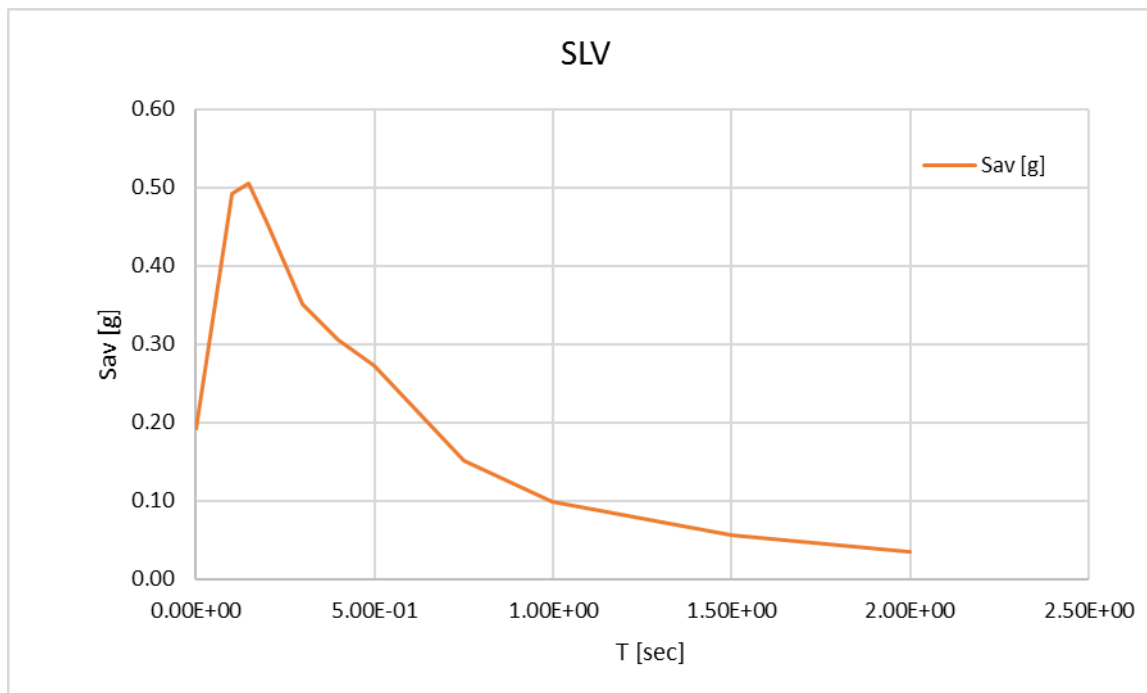
##### 6.4.8.1 Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 90 anni – Pr = 81%



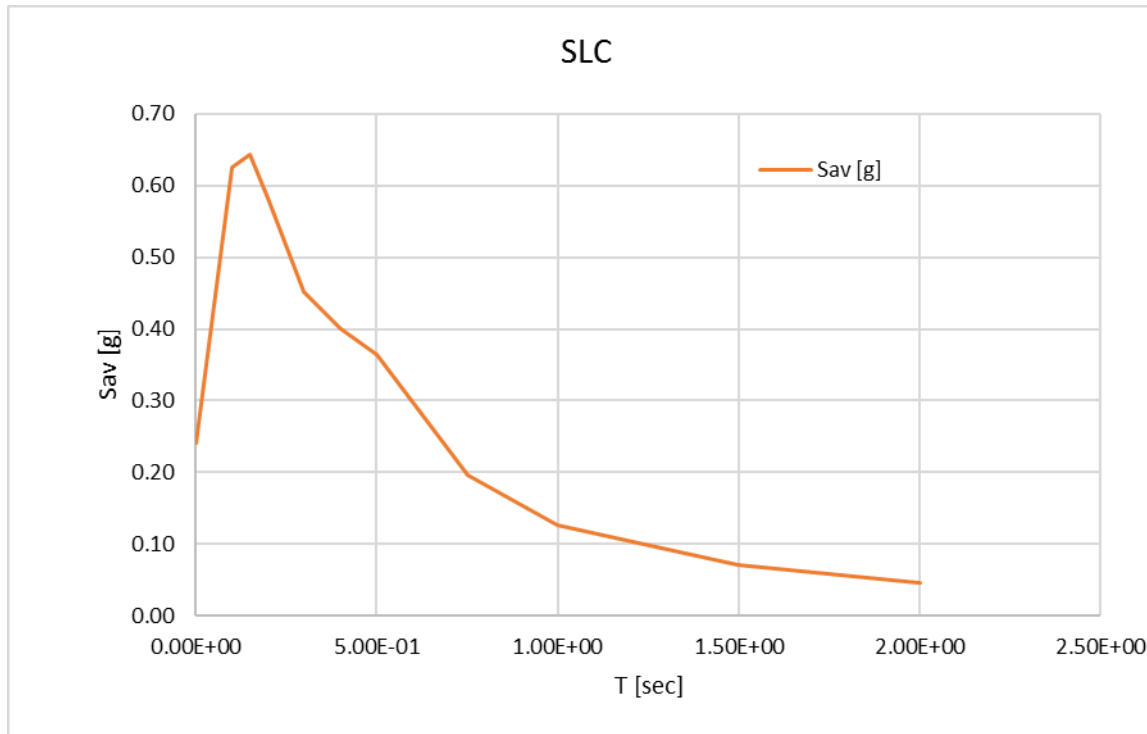
##### 6.4.8.2 Spettro di risposta medio pesato – classe B – Vr=150 anni – Tr 151 anni – Pr = 63%



**6.4.8.3** Spettro di risposta medio pesato – classe B –  $V_r=150$  anni –  $T_r$  1424 anni –  $Pr = 10\%$



**6.4.8.4** Spettro di risposta medio pesato – classe B –  $V_r=150$  anni –  $T_r$  2475 anni –  $Pr = 5\%$

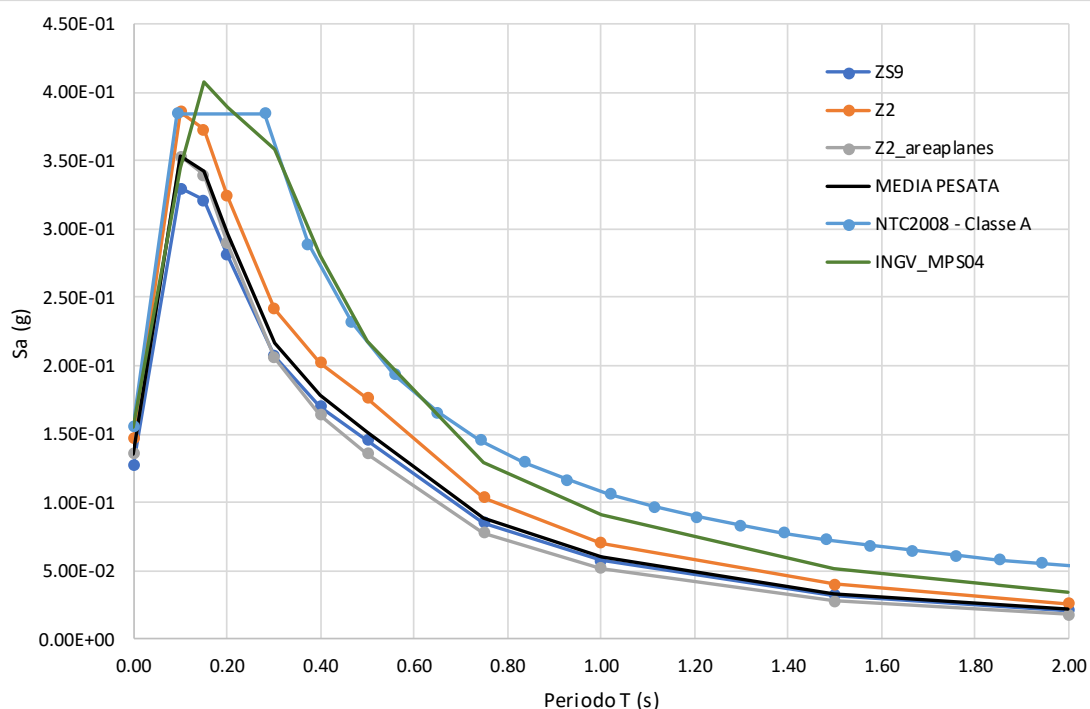




#### 6.4.9 Analisi di sensitività – Spettri di risposta – $M_{max}+0.3$ & “b” non modificato

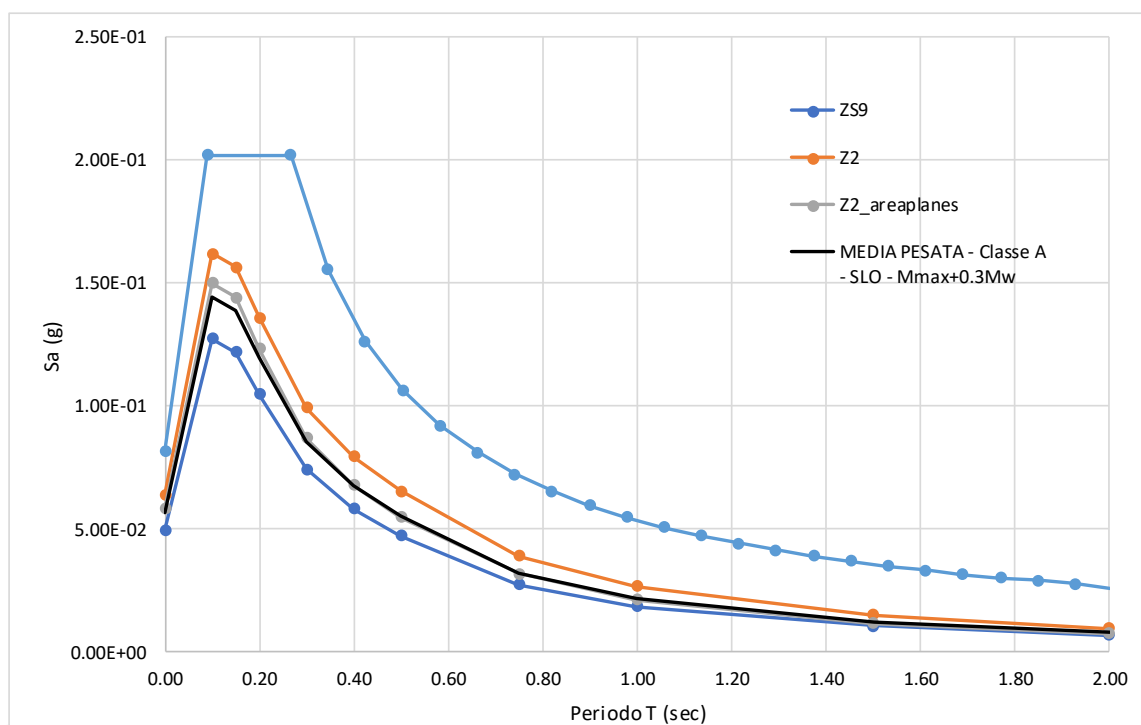
##### 6.4.9.1 Spettro di risposta medio pesato – classe A – $V_r=50$ anni – $T_r$ 475 anni – $Pr = 10\%$

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	1.27E-01	4.00E-01	0.00E+00	1.47E-01	3.00E-01	0.00E+00	1.36E-01	3.00E-01	1.36E-01
1.00E-01	3.30E-01	4.00E-01	1.00E-01	3.86E-01	3.00E-01	1.00E-01	3.53E-01	3.00E-01	3.54E-01
1.50E-01	3.21E-01	4.00E-01	1.50E-01	3.73E-01	3.00E-01	1.50E-01	3.40E-01	3.00E-01	3.42E-01
2.00E-01	2.81E-01	4.00E-01	2.00E-01	3.24E-01	3.00E-01	2.00E-01	2.90E-01	3.00E-01	2.97E-01
3.00E-01	2.07E-01	4.00E-01	3.00E-01	2.42E-01	3.00E-01	3.00E-01	2.06E-01	3.00E-01	2.17E-01
4.00E-01	1.70E-01	4.00E-01	4.00E-01	2.02E-01	3.00E-01	4.00E-01	1.64E-01	3.00E-01	1.78E-01
5.00E-01	1.46E-01	4.00E-01	5.00E-01	1.76E-01	3.00E-01	5.00E-01	1.36E-01	3.00E-01	1.52E-01
7.50E-01	8.53E-02	4.00E-01	7.50E-01	1.03E-01	3.00E-01	7.50E-01	7.77E-02	3.00E-01	8.84E-02
1.00E+00	5.76E-02	4.00E-01	1.00E+00	7.03E-02	3.00E-01	1.00E+00	5.16E-02	3.00E-01	5.96E-02
1.50E+00	3.23E-02	4.00E-01	1.50E+00	4.01E-02	3.00E-01	1.50E+00	2.80E-02	3.00E-01	3.33E-02
2.00E+00	2.09E-02	4.00E-01	2.00E+00	2.59E-02	3.00E-01	2.00E+00	1.77E-02	3.00E-01	2.14E-02



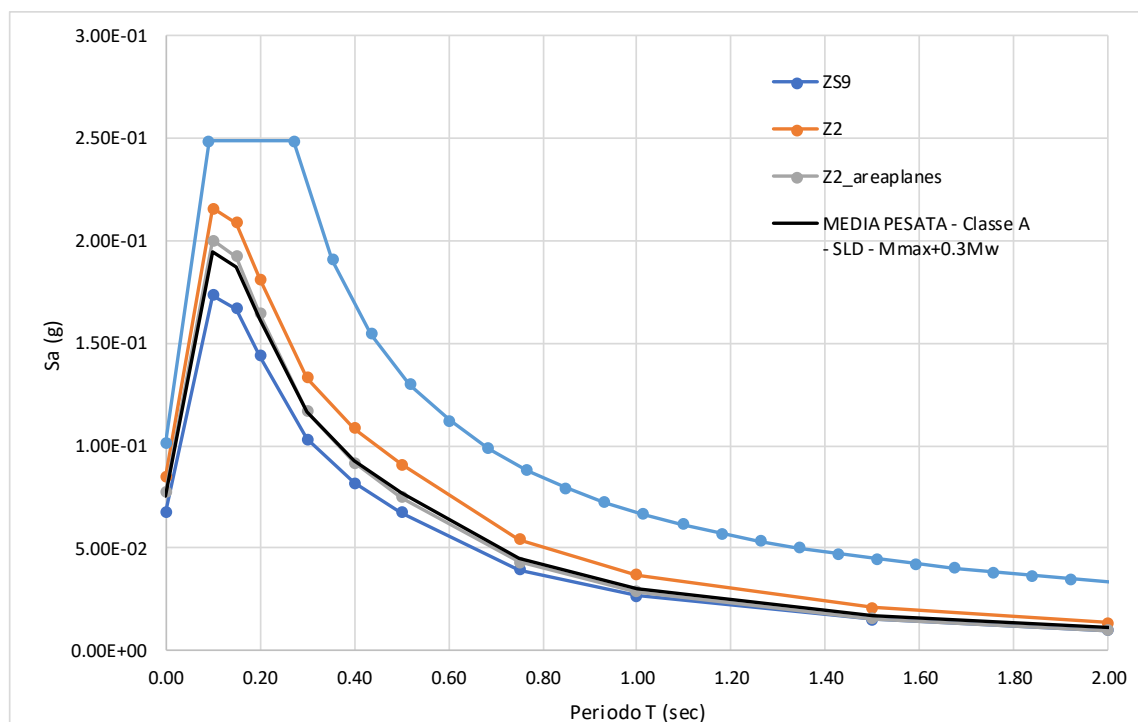
#### 6.4.9.2 Spettro di risposta medio pesato – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r$ 90 anni – $Pr = 81\%$

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	4.98E-02	4.00E-01	0.00E+00	6.40E-02	3.00E-01	0.00E+00	5.84E-02	3.00E-01	5.66E-02
1.00E-01	1.27E-01	4.00E-01	1.00E-01	1.62E-01	3.00E-01	1.00E-01	1.50E-01	3.00E-01	1.45E-01
1.50E-01	1.22E-01	4.00E-01	1.50E-01	1.57E-01	3.00E-01	1.50E-01	1.44E-01	3.00E-01	1.39E-01
2.00E-01	1.05E-01	4.00E-01	2.00E-01	1.36E-01	3.00E-01	2.00E-01	1.23E-01	3.00E-01	1.20E-01
3.00E-01	7.45E-02	4.00E-01	3.00E-01	9.92E-02	3.00E-01	3.00E-01	8.71E-02	3.00E-01	8.57E-02
4.00E-01	5.82E-02	4.00E-01	4.00E-01	7.95E-02	3.00E-01	4.00E-01	6.80E-02	3.00E-01	6.75E-02
5.00E-01	4.71E-02	4.00E-01	5.00E-01	6.56E-02	3.00E-01	5.00E-01	5.49E-02	3.00E-01	5.50E-02
7.50E-01	2.75E-02	4.00E-01	7.50E-01	3.91E-02	3.00E-01	7.50E-01	3.18E-02	3.00E-01	3.23E-02
1.00E+00	1.87E-02	4.00E-01	1.00E+00	2.67E-02	3.00E-01	1.00E+00	2.13E-02	3.00E-01	2.18E-02
1.50E+00	1.05E-02	4.00E-01	1.50E+00	1.50E-02	3.00E-01	1.50E+00	1.17E-02	3.00E-01	1.22E-02
2.00E+00	6.76E-03	4.00E-01	2.00E+00	9.60E-03	3.00E-01	2.00E+00	7.41E-03	3.00E-01	7.81E-03



### 6.4.9.3 Spettro di risposta medio pesato – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r$ 151 anni – $Pr = 63\%$

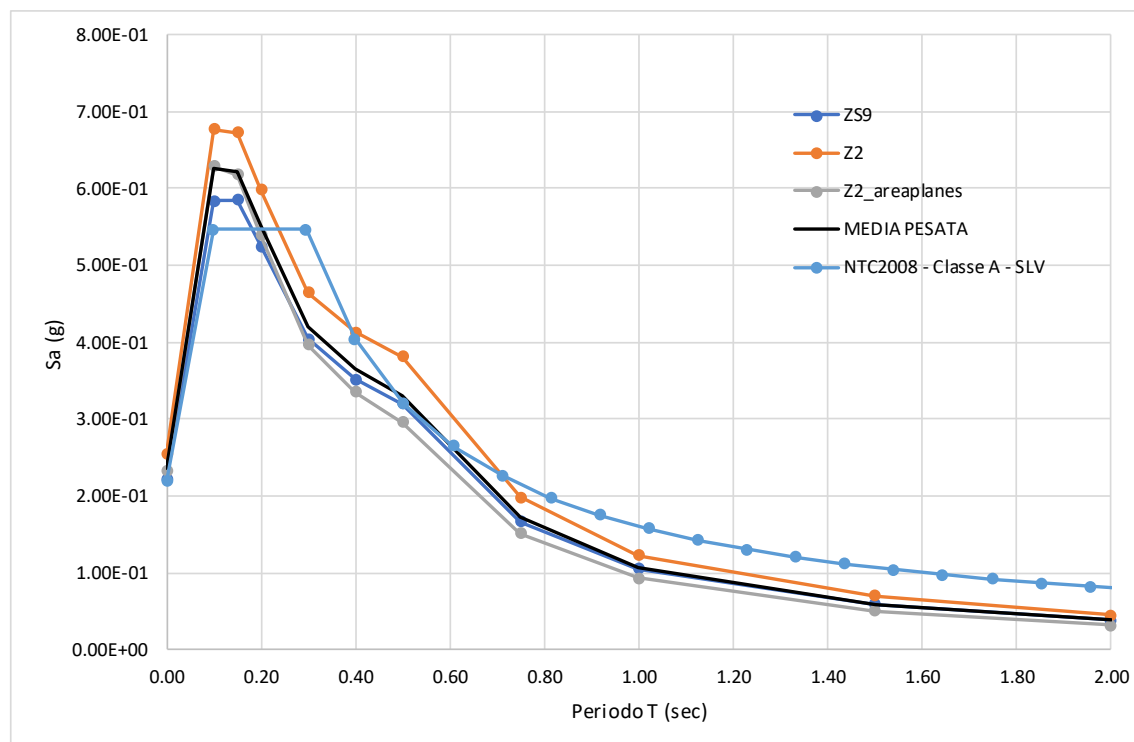
ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	6.75E-02	4.00E-01	0.00E+00	8.46E-02	3.00E-01	0.00E+00	7.72E-02	3.00E-01	7.55E-02
1.00E-01	1.73E-01	4.00E-01	1.00E-01	2.16E-01	3.00E-01	1.00E-01	2.00E-01	3.00E-01	1.94E-01
1.50E-01	1.67E-01	4.00E-01	1.50E-01	2.09E-01	3.00E-01	1.50E-01	1.92E-01	3.00E-01	1.87E-01
2.00E-01	1.44E-01	4.00E-01	2.00E-01	1.81E-01	3.00E-01	2.00E-01	1.65E-01	3.00E-01	1.61E-01
3.00E-01	1.03E-01	4.00E-01	3.00E-01	1.33E-01	3.00E-01	3.00E-01	1.17E-01	3.00E-01	1.16E-01
4.00E-01	8.19E-02	4.00E-01	4.00E-01	1.08E-01	3.00E-01	4.00E-01	9.15E-02	3.00E-01	9.27E-02
5.00E-01	6.76E-02	4.00E-01	5.00E-01	9.08E-02	3.00E-01	5.00E-01	7.47E-02	3.00E-01	7.67E-02
7.50E-01	3.95E-02	4.00E-01	7.50E-01	5.43E-02	3.00E-01	7.50E-01	4.30E-02	3.00E-01	4.50E-02
1.00E+00	2.68E-02	4.00E-01	1.00E+00	3.71E-02	3.00E-01	1.00E+00	2.87E-02	3.00E-01	3.05E-02
1.50E+00	1.51E-02	4.00E-01	1.50E+00	2.10E-02	3.00E-01	1.50E+00	1.57E-02	3.00E-01	1.70E-02
2.00E+00	9.77E-03	4.00E-01	2.00E+00	1.35E-02	3.00E-01	2.00E+00	9.95E-03	3.00E-01	1.09E-02





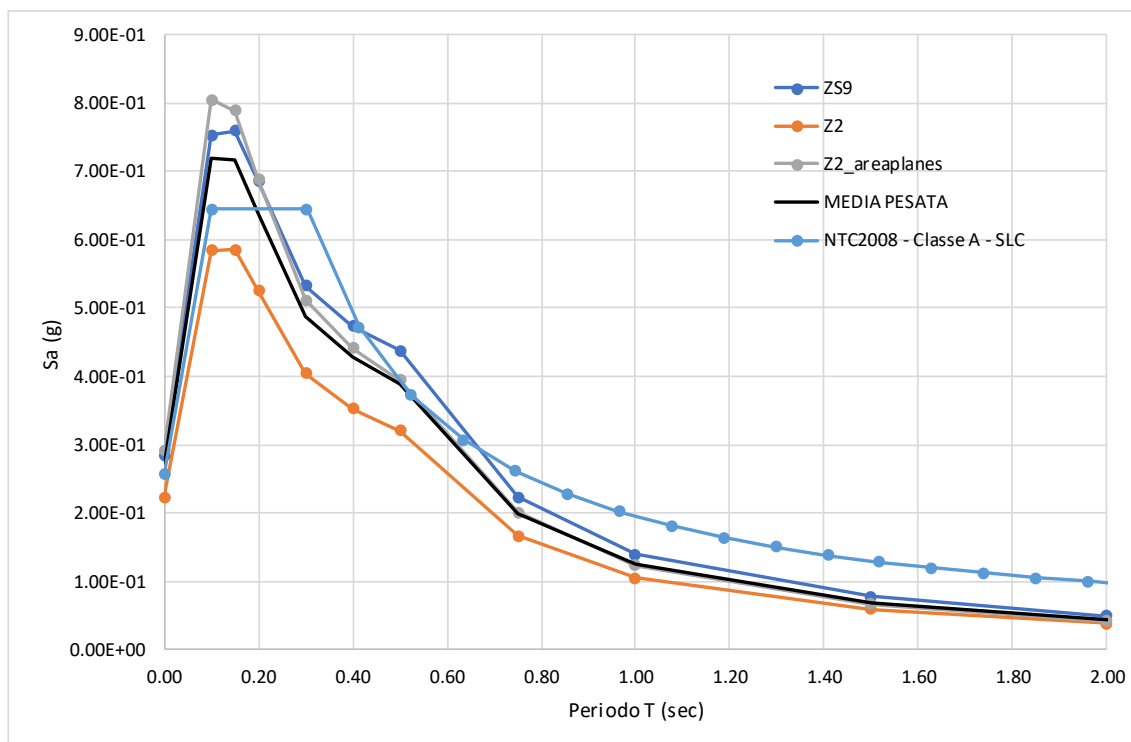
#### 6.4.9.4 Spettro di risposta medio pesato – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r$ 1424 anni – $Pr = 10\%$

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	2.23E-01	4.00E-01	0.00E+00	2.55E-01	3.00E-01	0.00E+00	2.32E-01	3.00E-01	2.35E-01
1.00E-01	5.84E-01	4.00E-01	1.00E-01	6.77E-01	3.00E-01	1.00E-01	6.29E-01	3.00E-01	6.26E-01
1.50E-01	5.85E-01	4.00E-01	1.50E-01	6.73E-01	3.00E-01	1.50E-01	6.17E-01	3.00E-01	6.21E-01
2.00E-01	5.25E-01	4.00E-01	2.00E-01	5.99E-01	3.00E-01	2.00E-01	5.39E-01	3.00E-01	5.51E-01
3.00E-01	4.04E-01	4.00E-01	3.00E-01	4.65E-01	3.00E-01	3.00E-01	3.97E-01	3.00E-01	4.20E-01
4.00E-01	3.52E-01	4.00E-01	4.00E-01	4.14E-01	3.00E-01	4.00E-01	3.36E-01	3.00E-01	3.66E-01
5.00E-01	3.20E-01	4.00E-01	5.00E-01	3.81E-01	3.00E-01	5.00E-01	2.96E-01	3.00E-01	3.31E-01
7.50E-01	1.67E-01	4.00E-01	7.50E-01	1.98E-01	3.00E-01	7.50E-01	1.52E-01	3.00E-01	1.72E-01
1.00E+00	1.05E-01	4.00E-01	1.00E+00	1.23E-01	3.00E-01	1.00E+00	9.34E-02	3.00E-01	1.07E-01
1.50E+00	5.89E-02	4.00E-01	1.50E+00	7.03E-02	3.00E-01	1.50E+00	5.00E-02	3.00E-01	5.96E-02
2.00E+00	3.80E-02	4.00E-01	2.00E+00	4.53E-02	3.00E-01	2.00E+00	3.15E-02	3.00E-01	3.82E-02



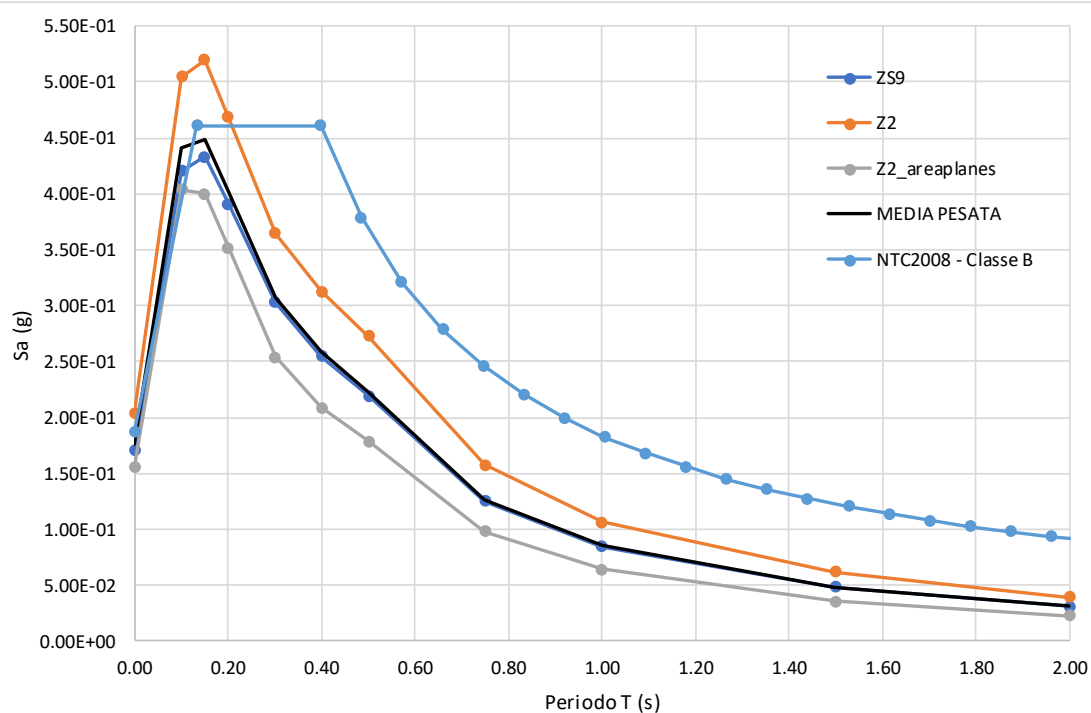
#### 6.4.9.5 Spettro di risposta medio pesato – classe A – $V_r=150$ anni – $T_r$ 2475 anni – $Pr = 5\%$

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	2.83E-01	4.00E-01	0.00E+00	2.23E-01	3.00E-01	0.00E+00	2.91E-01	3.00E-01	2.68E-01
1.00E-01	7.53E-01	4.00E-01	1.00E-01	5.84E-01	3.00E-01	1.00E-01	8.05E-01	3.00E-01	7.18E-01
1.50E-01	7.60E-01	4.00E-01	1.50E-01	5.85E-01	3.00E-01	1.50E-01	7.89E-01	3.00E-01	7.16E-01
2.00E-01	6.86E-01	4.00E-01	2.00E-01	5.25E-01	3.00E-01	2.00E-01	6.88E-01	3.00E-01	6.38E-01
3.00E-01	5.32E-01	4.00E-01	3.00E-01	4.04E-01	3.00E-01	3.00E-01	5.12E-01	3.00E-01	4.88E-01
4.00E-01	4.73E-01	4.00E-01	4.00E-01	3.52E-01	3.00E-01	4.00E-01	4.41E-01	3.00E-01	4.27E-01
5.00E-01	4.38E-01	4.00E-01	5.00E-01	3.20E-01	3.00E-01	5.00E-01	3.95E-01	3.00E-01	3.90E-01
7.50E-01	2.24E-01	4.00E-01	7.50E-01	1.67E-01	3.00E-01	7.50E-01	2.01E-01	3.00E-01	2.00E-01
1.00E+00	1.39E-01	4.00E-01	1.00E+00	1.05E-01	3.00E-01	1.00E+00	1.24E-01	3.00E-01	1.24E-01
1.50E+00	7.73E-02	4.00E-01	1.50E+00	5.89E-02	3.00E-01	1.50E+00	6.67E-02	3.00E-01	6.86E-02
2.00E+00	4.97E-02	4.00E-01	2.00E+00	3.80E-02	3.00E-01	2.00E+00	4.22E-02	3.00E-01	4.39E-02



**6.4.9.6 Spettro di risposta medio pesato – classe B –  $V_r=50$  anni –  $T_r$  475 anni –  $Pr = 10\%$** 

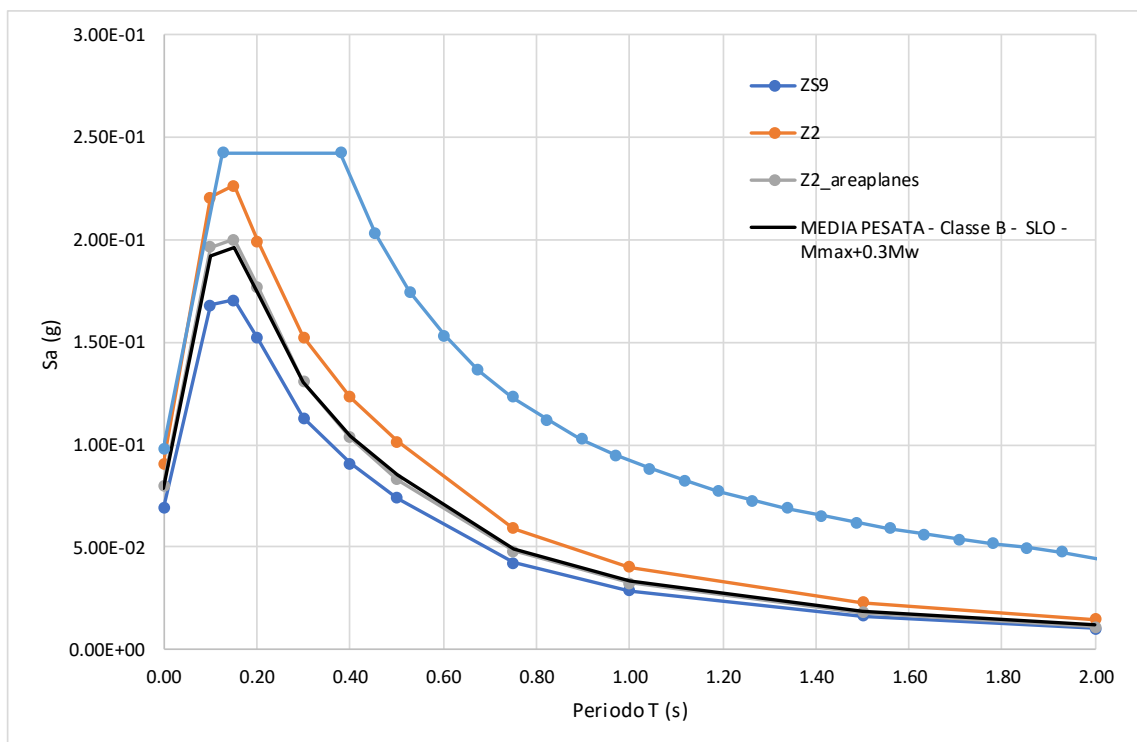
ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	1.70E-01	4.00E-01	0.00E+00	2.04E-01	3.00E-01	0.00E+00	1.55E-01	3.00E-01	1.76E-01
1.00E-01	4.21E-01	4.00E-01	1.00E-01	5.05E-01	3.00E-01	1.00E-01	4.04E-01	3.00E-01	4.41E-01
1.50E-01	4.33E-01	4.00E-01	1.50E-01	5.20E-01	3.00E-01	1.50E-01	4.00E-01	3.00E-01	4.49E-01
2.00E-01	3.91E-01	4.00E-01	2.00E-01	4.69E-01	3.00E-01	2.00E-01	3.52E-01	3.00E-01	4.03E-01
3.00E-01	3.03E-01	4.00E-01	3.00E-01	3.65E-01	3.00E-01	3.00E-01	2.54E-01	3.00E-01	3.07E-01
4.00E-01	2.55E-01	4.00E-01	4.00E-01	3.12E-01	3.00E-01	4.00E-01	2.08E-01	3.00E-01	2.58E-01
5.00E-01	2.19E-01	4.00E-01	5.00E-01	2.72E-01	3.00E-01	5.00E-01	1.79E-01	3.00E-01	2.23E-01
7.50E-01	1.25E-01	4.00E-01	7.50E-01	1.58E-01	3.00E-01	7.50E-01	9.83E-02	3.00E-01	1.27E-01
1.00E+00	8.47E-02	4.00E-01	1.00E+00	1.06E-01	3.00E-01	1.00E+00	6.41E-02	3.00E-01	8.50E-02
1.50E+00	4.84E-02	4.00E-01	1.50E+00	6.17E-02	3.00E-01	1.50E+00	3.55E-02	3.00E-01	4.85E-02
2.00E+00	3.08E-02	4.00E-01	2.00E+00	3.92E-02	3.00E-01	2.00E+00	2.24E-02	3.00E-01	3.08E-02





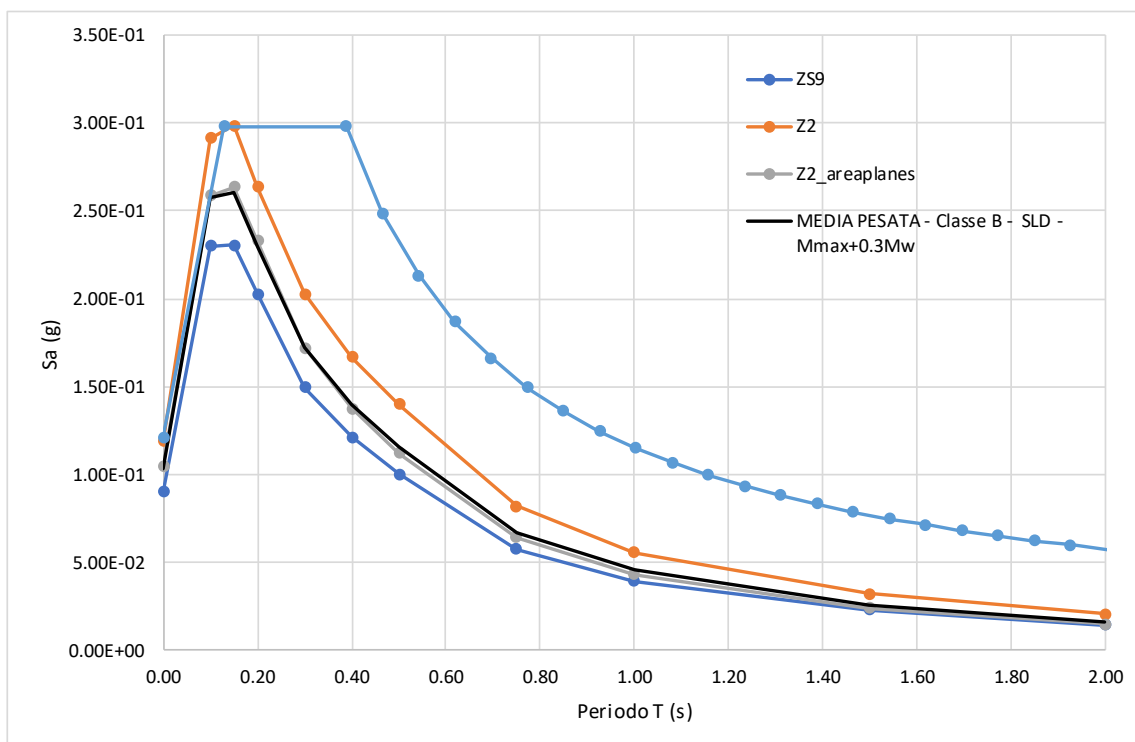
**6.4.9.7 Spettro di risposta medio pesato – classe B –  $V_r=150$  anni –  $T_r$  90 anni –  $Pr = 81\%$** 

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	6.90E-02	4.00E-01	0.00E+00	9.08E-02	3.00E-01	0.00E+00	8.03E-02	3.00E-01	0.08
1.00E-01	1.68E-01	4.00E-01	1.00E-01	2.21E-01	3.00E-01	1.00E-01	1.96E-01	3.00E-01	1.92E-01
1.50E-01	1.71E-01	4.00E-01	1.50E-01	2.26E-01	3.00E-01	1.50E-01	2.00E-01	3.00E-01	1.96E-01
2.00E-01	1.52E-01	4.00E-01	2.00E-01	1.99E-01	3.00E-01	2.00E-01	1.77E-01	3.00E-01	1.74E-01
3.00E-01	1.13E-01	4.00E-01	3.00E-01	1.52E-01	3.00E-01	3.00E-01	1.30E-01	3.00E-01	1.30E-01
4.00E-01	9.08E-02	4.00E-01	4.00E-01	1.23E-01	3.00E-01	4.00E-01	1.03E-01	3.00E-01	1.04E-01
5.00E-01	7.38E-02	4.00E-01	5.00E-01	1.02E-01	3.00E-01	5.00E-01	8.32E-02	3.00E-01	8.50E-02
7.50E-01	4.24E-02	4.00E-01	7.50E-01	5.93E-02	3.00E-01	7.50E-01	4.81E-02	3.00E-01	4.92E-02
1.00E+00	2.89E-02	4.00E-01	1.00E+00	4.05E-02	3.00E-01	1.00E+00	3.26E-02	3.00E-01	3.35E-02
1.50E+00	1.65E-02	4.00E-01	1.50E+00	2.31E-02	3.00E-01	1.50E+00	1.81E-02	3.00E-01	1.89E-02
2.00E+00	1.04E-02	4.00E-01	2.00E+00	1.48E-02	3.00E-01	2.00E+00	1.12E-02	3.00E-01	1.20E-02



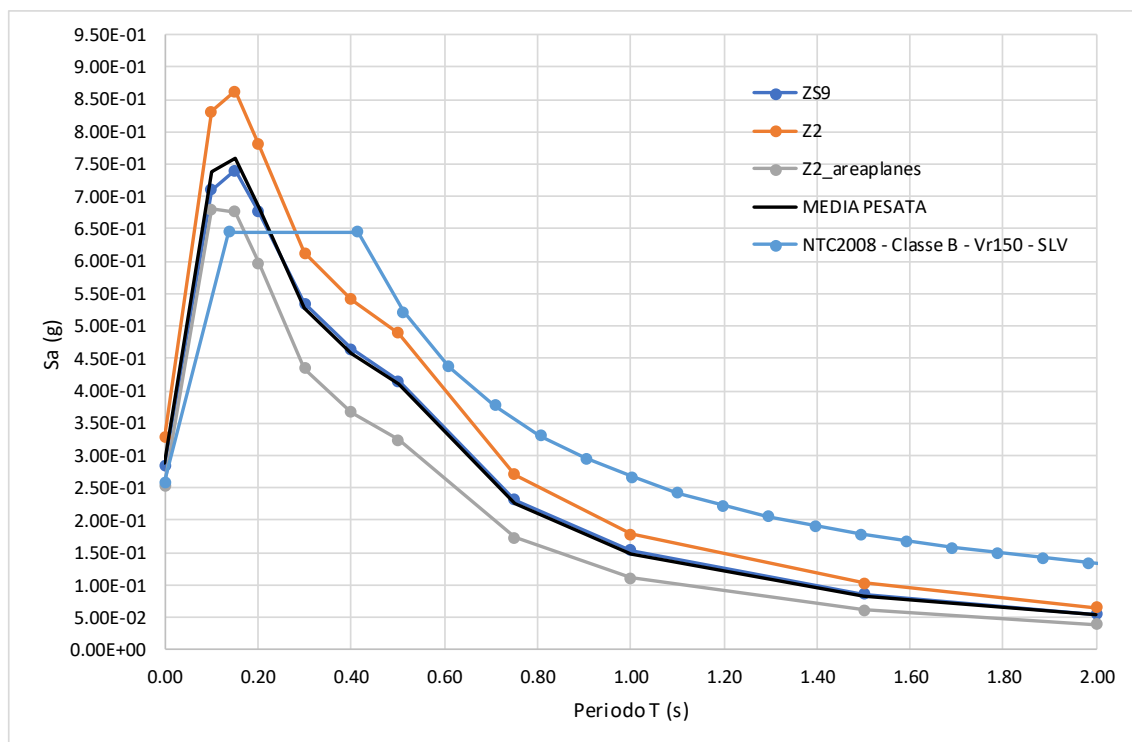
**6.4.9.8 Spettro di risposta medio pesato – classe B –  $V_r=150$  anni –  $T_r$  151 anni –  $Pr = 63\%$** 

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	9.00E-02	4.00E-01	0.00E+00	1.19E-01	3.00E-01	0.00E+00	1.05E-01	3.00E-01	0.103
1.00E-01	2.30E-01	4.00E-01	1.00E-01	2.92E-01	3.00E-01	1.00E-01	2.59E-01	3.00E-01	2.57E-01
1.50E-01	2.31E-01	4.00E-01	1.50E-01	2.99E-01	3.00E-01	1.50E-01	2.63E-01	3.00E-01	2.61E-01
2.00E-01	2.03E-01	4.00E-01	2.00E-01	2.64E-01	3.00E-01	2.00E-01	2.33E-01	3.00E-01	2.30E-01
3.00E-01	1.50E-01	4.00E-01	3.00E-01	2.03E-01	3.00E-01	3.00E-01	1.72E-01	3.00E-01	1.72E-01
4.00E-01	1.21E-01	4.00E-01	4.00E-01	1.67E-01	3.00E-01	4.00E-01	1.38E-01	3.00E-01	1.40E-01
5.00E-01	1.00E-01	4.00E-01	5.00E-01	1.40E-01	3.00E-01	5.00E-01	1.12E-01	3.00E-01	1.16E-01
7.50E-01	5.76E-02	4.00E-01	7.50E-01	8.20E-02	3.00E-01	7.50E-01	6.44E-02	3.00E-01	6.69E-02
1.00E+00	3.95E-02	4.00E-01	1.00E+00	5.58E-02	3.00E-01	1.00E+00	4.33E-02	3.00E-01	4.55E-02
1.50E+00	2.29E-02	4.00E-01	1.50E+00	3.20E-02	3.00E-01	1.50E+00	2.39E-02	3.00E-01	2.59E-02
2.00E+00	1.44E-02	4.00E-01	2.00E+00	2.07E-02	3.00E-01	2.00E+00	1.49E-02	3.00E-01	1.64E-02



#### 6.4.9.9 Spettro di risposta medio pesato – classe B – $V_r=150$ anni – $T_r$ 1424 anni – $Pr = 10\%$

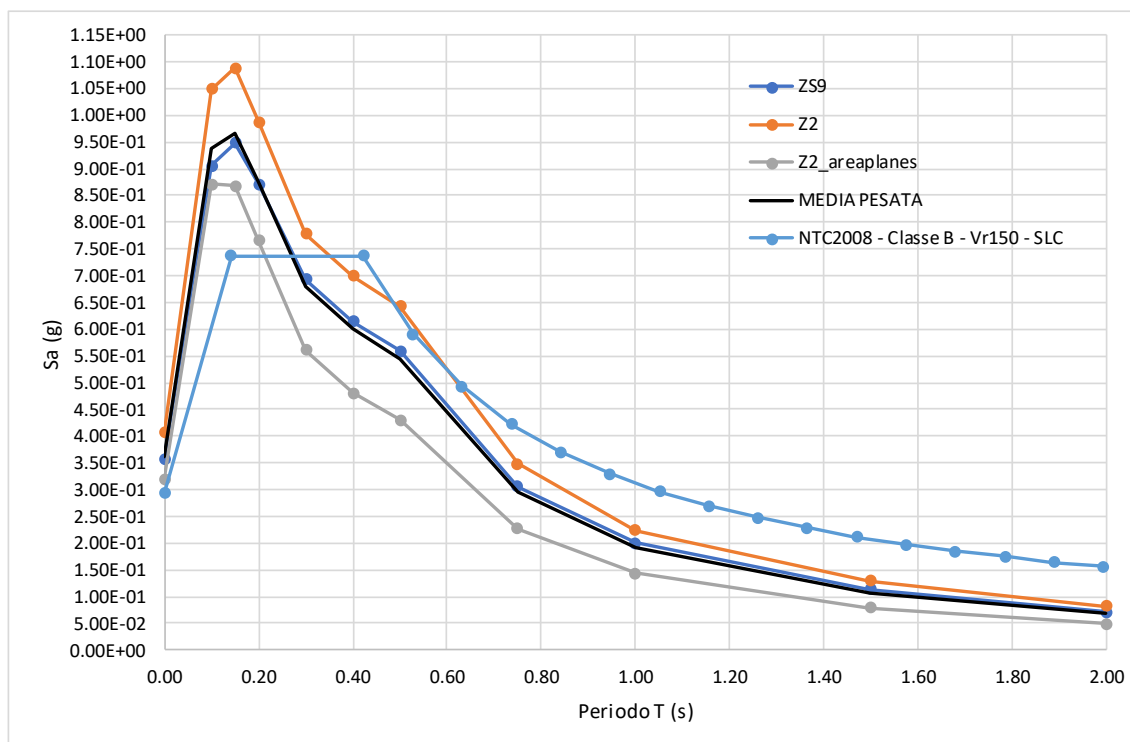
ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	2.83E-01	4.00E-01	0.00E+00	3.27E-01	3.00E-01	0.00E+00	2.54E-01	3.00E-01	2.88E-01
1.00E-01	7.10E-01	4.00E-01	1.00E-01	8.32E-01	3.00E-01	1.00E-01	6.80E-01	3.00E-01	7.38E-01
1.50E-01	7.40E-01	4.00E-01	1.50E-01	8.63E-01	3.00E-01	1.50E-01	6.77E-01	3.00E-01	7.58E-01
2.00E-01	6.77E-01	4.00E-01	2.00E-01	7.80E-01	3.00E-01	2.00E-01	5.97E-01	3.00E-01	6.84E-01
3.00E-01	5.34E-01	4.00E-01	3.00E-01	6.13E-01	3.00E-01	3.00E-01	4.35E-01	3.00E-01	5.28E-01
4.00E-01	4.65E-01	4.00E-01	4.00E-01	5.41E-01	3.00E-01	4.00E-01	3.67E-01	3.00E-01	4.58E-01
5.00E-01	4.15E-01	4.00E-01	5.00E-01	4.89E-01	3.00E-01	5.00E-01	3.24E-01	3.00E-01	4.10E-01
7.50E-01	2.31E-01	4.00E-01	7.50E-01	2.71E-01	3.00E-01	7.50E-01	1.73E-01	3.00E-01	2.26E-01
1.00E+00	1.53E-01	4.00E-01	1.00E+00	1.78E-01	3.00E-01	1.00E+00	1.11E-01	3.00E-01	1.48E-01
1.50E+00	8.66E-02	4.00E-01	1.50E+00	1.03E-01	3.00E-01	1.50E+00	6.12E-02	3.00E-01	8.39E-02
2.00E+00	5.51E-02	4.00E-01	2.00E+00	6.53E-02	3.00E-01	2.00E+00	3.86E-02	3.00E-01	5.32E-02





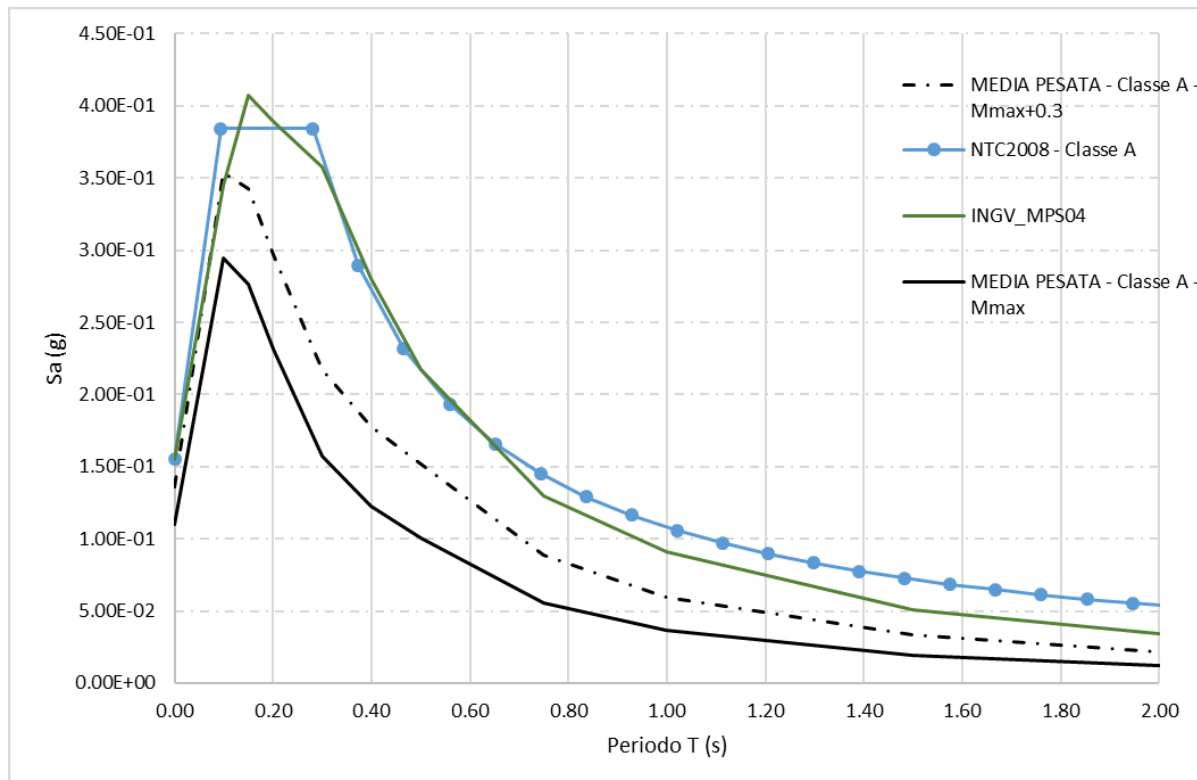
**6.4.9.10 Spettro di risposta medio pesato – classe B –  $V_r=150$  anni –  $T_r$  2475 anni –  $Pr = 5\%$** 

ZS9			Z2			Z2_areaplanes			MEDIA PESATA
T	Sa - Medio	PESO ZS9	T	Sa - Medio	PESO Z2	T	Sa - Medio	PESO Z2_areaplanes	Sa
0.00E+00	3.57E-01	4.00E-01	0.00E+00	4.06E-01	3.00E-01	0.00E+00	3.20E-01	3.00E-01	3.61E-01
1.00E-01	9.06E-01	4.00E-01	1.00E-01	1.05E+00	3.00E-01	1.00E-01	8.70E-01	3.00E-01	9.38E-01
1.50E-01	9.48E-01	4.00E-01	1.50E-01	1.09E+00	3.00E-01	1.50E-01	8.68E-01	3.00E-01	9.66E-01
2.00E-01	8.72E-01	4.00E-01	2.00E-01	9.87E-01	3.00E-01	2.00E-01	7.66E-01	3.00E-01	8.75E-01
3.00E-01	6.94E-01	4.00E-01	3.00E-01	7.78E-01	3.00E-01	3.00E-01	5.61E-01	3.00E-01	6.79E-01
4.00E-01	6.15E-01	4.00E-01	4.00E-01	6.99E-01	3.00E-01	4.00E-01	4.81E-01	3.00E-01	6.00E-01
5.00E-01	5.59E-01	4.00E-01	5.00E-01	6.43E-01	3.00E-01	5.00E-01	4.30E-01	3.00E-01	5.45E-01
7.50E-01	3.06E-01	4.00E-01	7.50E-01	3.47E-01	3.00E-01	7.50E-01	2.27E-01	3.00E-01	2.95E-01
1.00E+00	2.00E-01	4.00E-01	1.00E+00	2.23E-01	3.00E-01	1.00E+00	1.44E-01	3.00E-01	1.90E-01
1.50E+00	1.13E-01	4.00E-01	1.50E+00	1.29E-01	3.00E-01	1.50E+00	7.90E-02	3.00E-01	1.08E-01
2.00E+00	7.18E-02	4.00E-01	2.00E+00	8.16E-02	3.00E-01	2.00E+00	4.97E-02	3.00E-01	6.81E-02

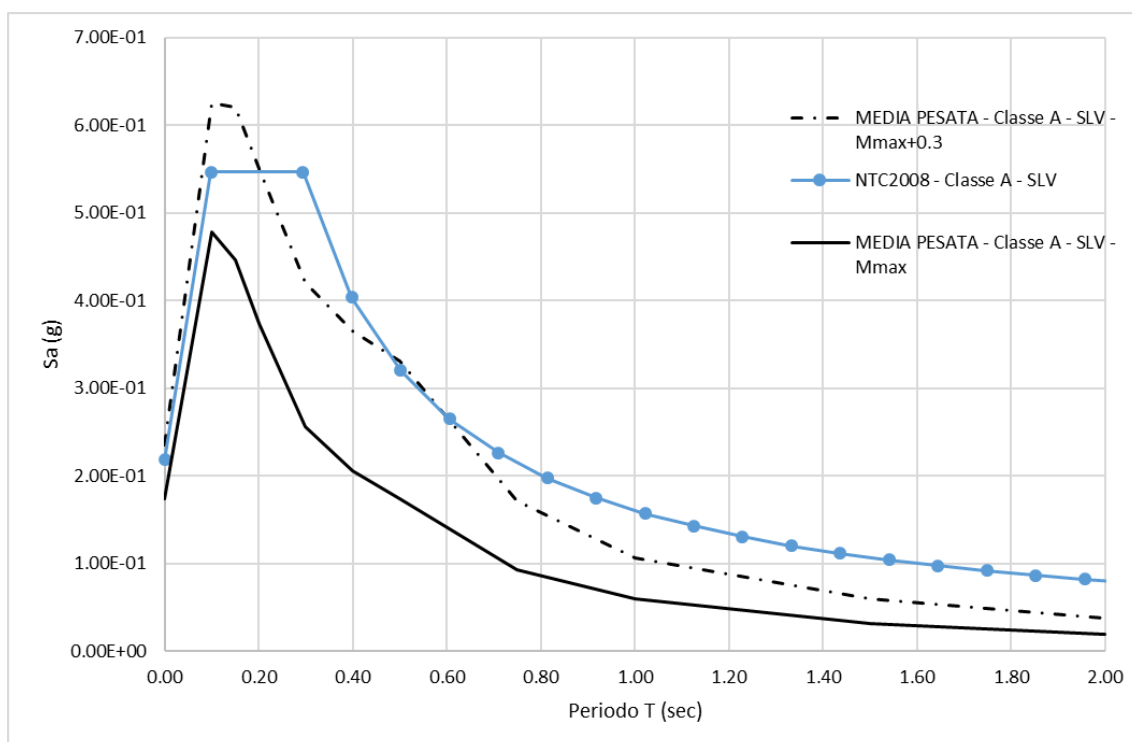


#### 6.4.10 Analisi di sensitività - Spettri di risposta ZS9 – Magnitudo Mmax & Mmax+0.3 – CONFRONTO

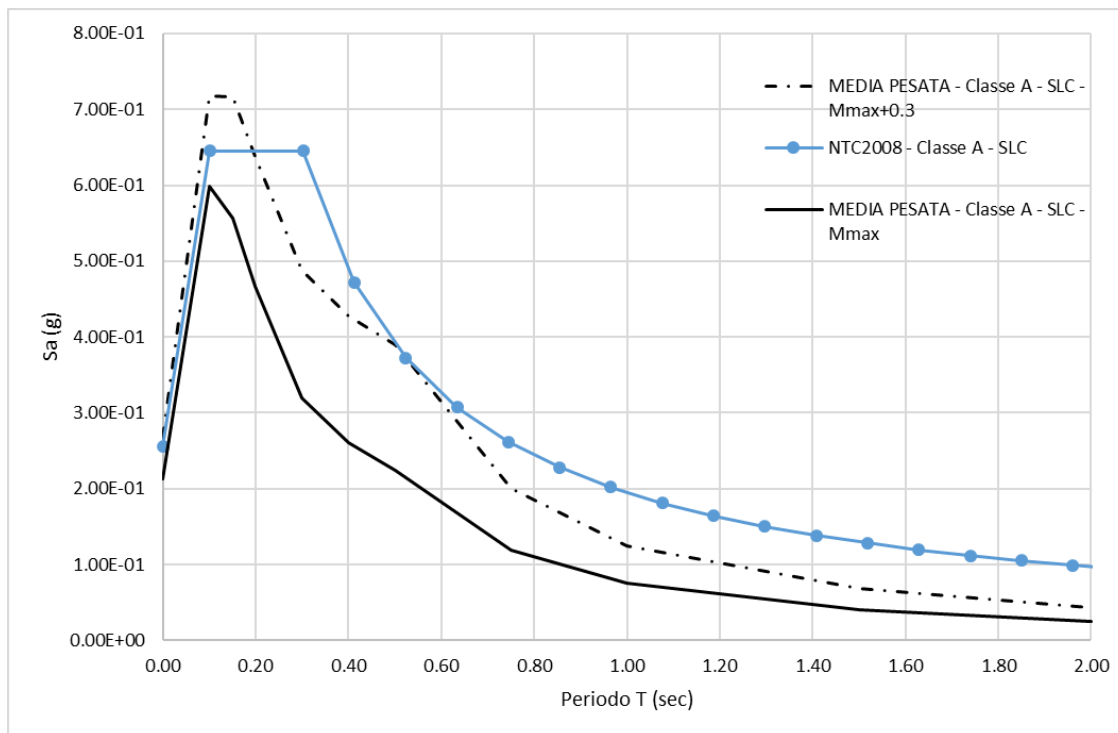
##### 6.4.10.1 Classe A - Spetto a $V_r=50$ anni, $T_r=475$ anni, $Pr=10\%$



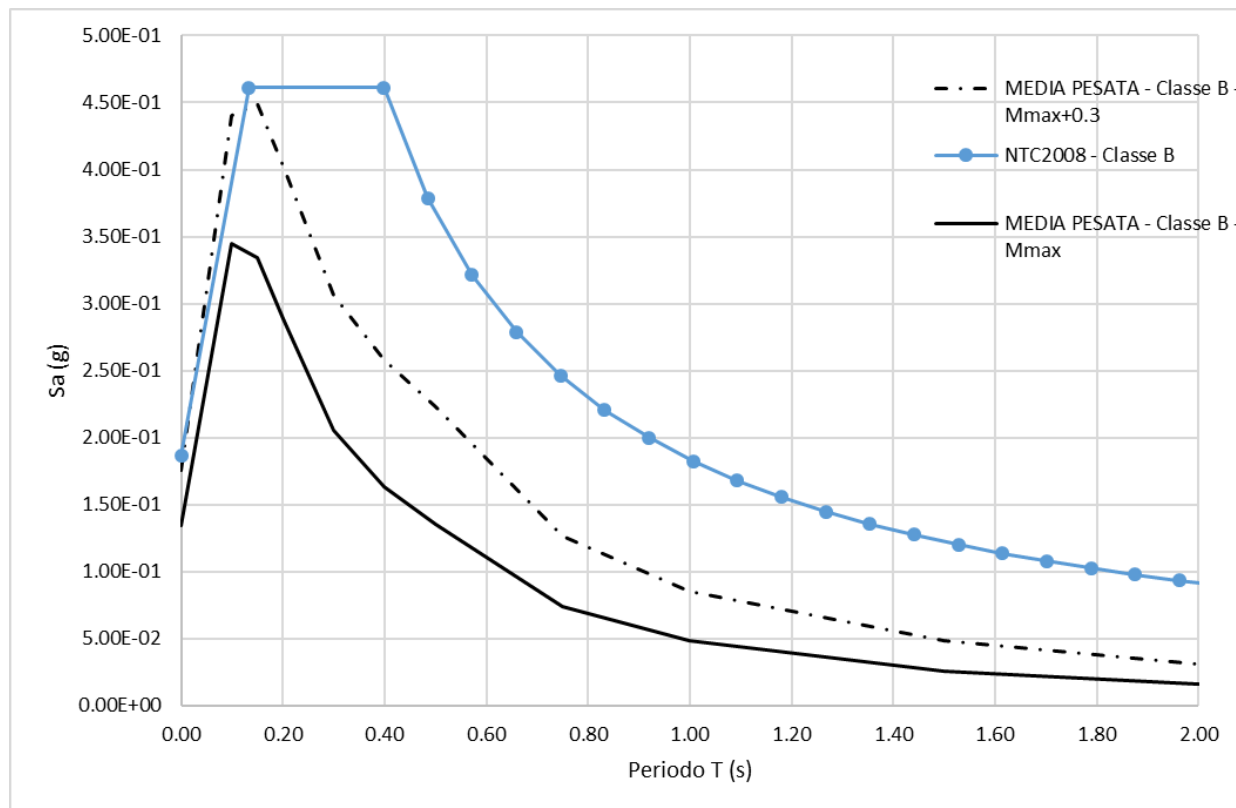
##### 6.4.10.2 Classe A - Spetto a $V_r=150$ anni, $T_r=1424$ anni, $Pr=10\%$



**6.4.10.3** Classe A - Spetto a  $V_r=150$  anni,  $T_r=2475$  anni,  $Pr=5\%$

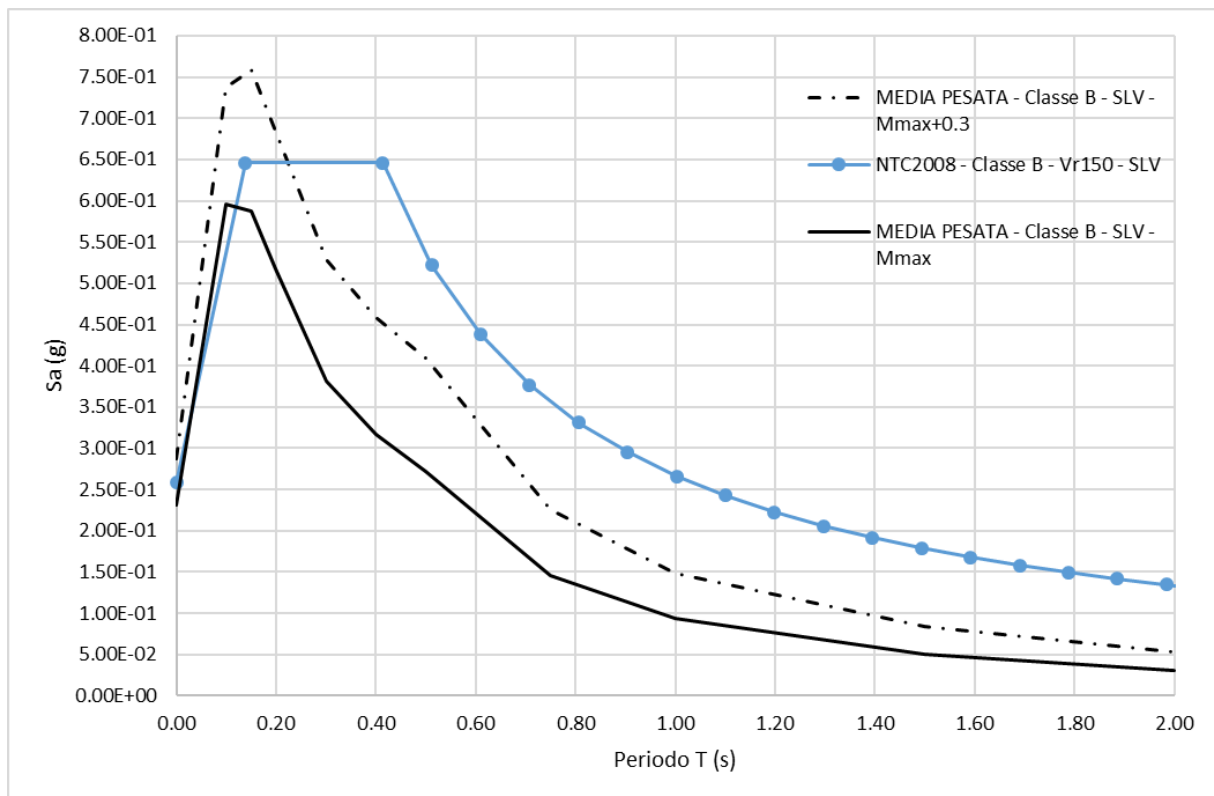


**6.4.10.4** Classe B - Spetto a  $V_r=50$  anni,  $T_r=475$  anni,  $Pr=10\%$

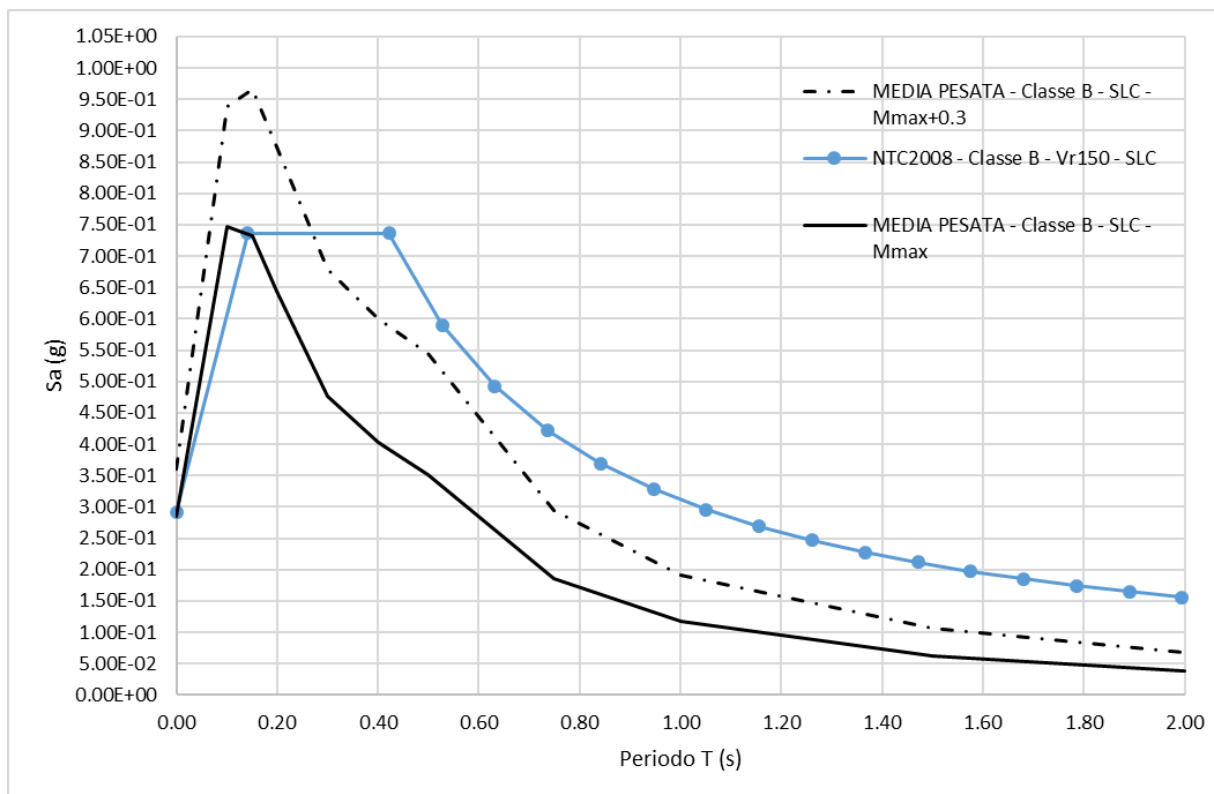




**6.4.10.5** Classe B - Spetto a  $V_r=150$  anni,  $T_r=1424$  anni,  $Pr=10\%$

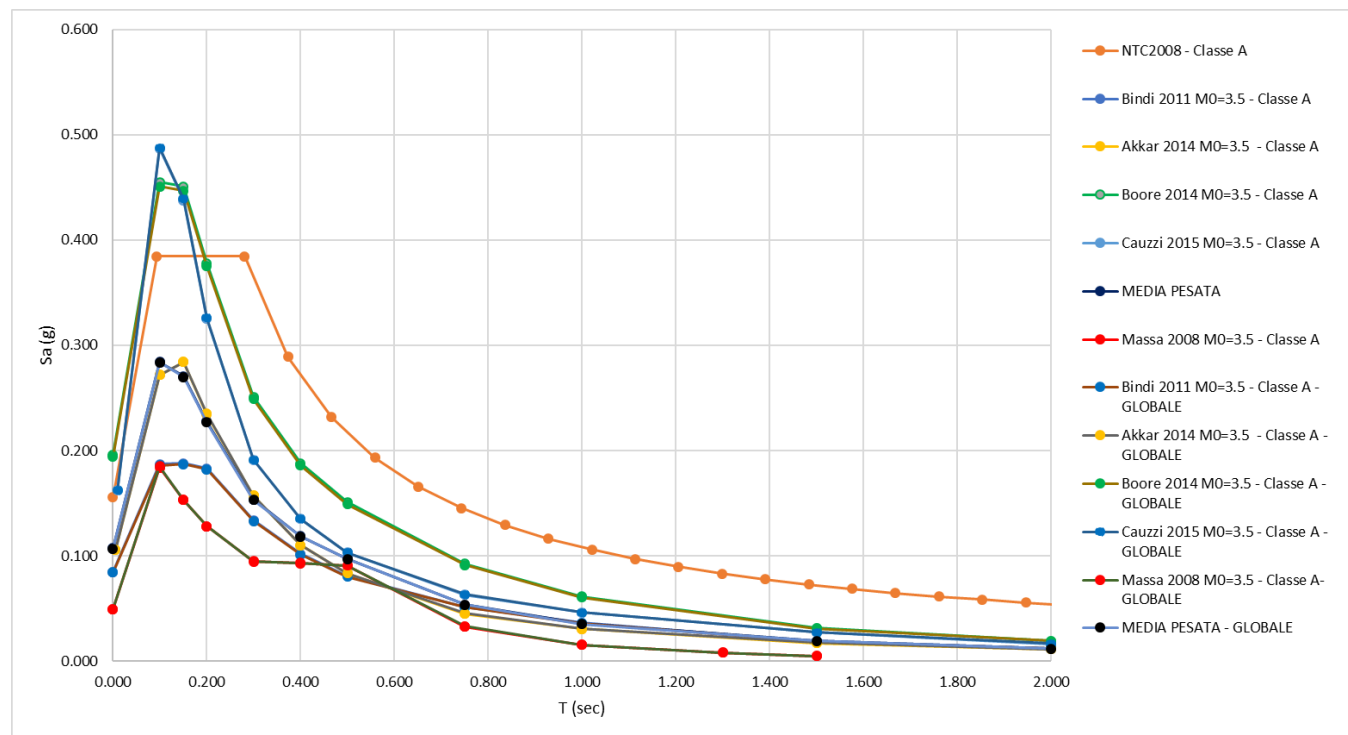


**6.4.10.6** Classe B - Spetto a  $V_r=150$  anni,  $T_r=2475$  anni,  $Pr=5\%$

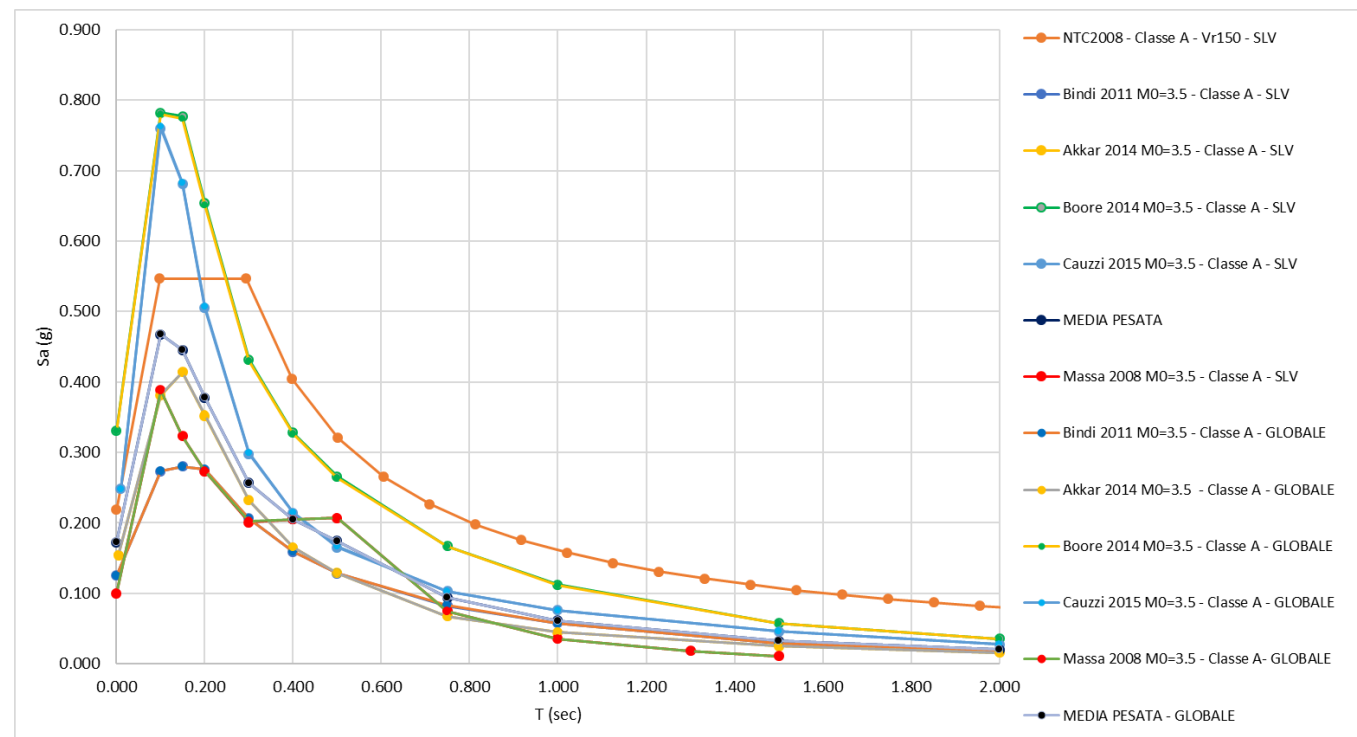


#### 6.4.11 Analisi di sensitività - Spettri di risposta ZS9 – Intervalli di completezza globali – CONFRONTO

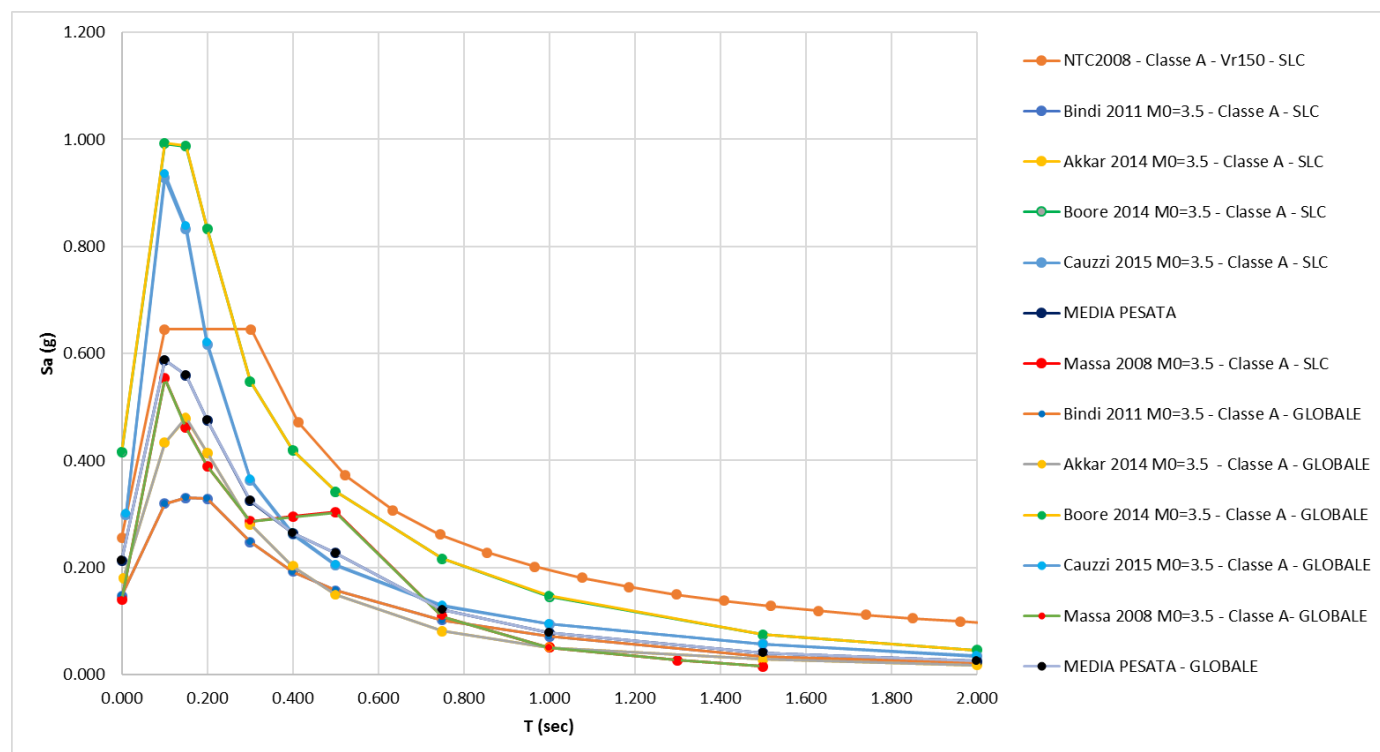
##### 6.4.11.1 Classe A - Spetto a $V_r=50$ anni, $T_r=475$ anni, $Pr=10\%$



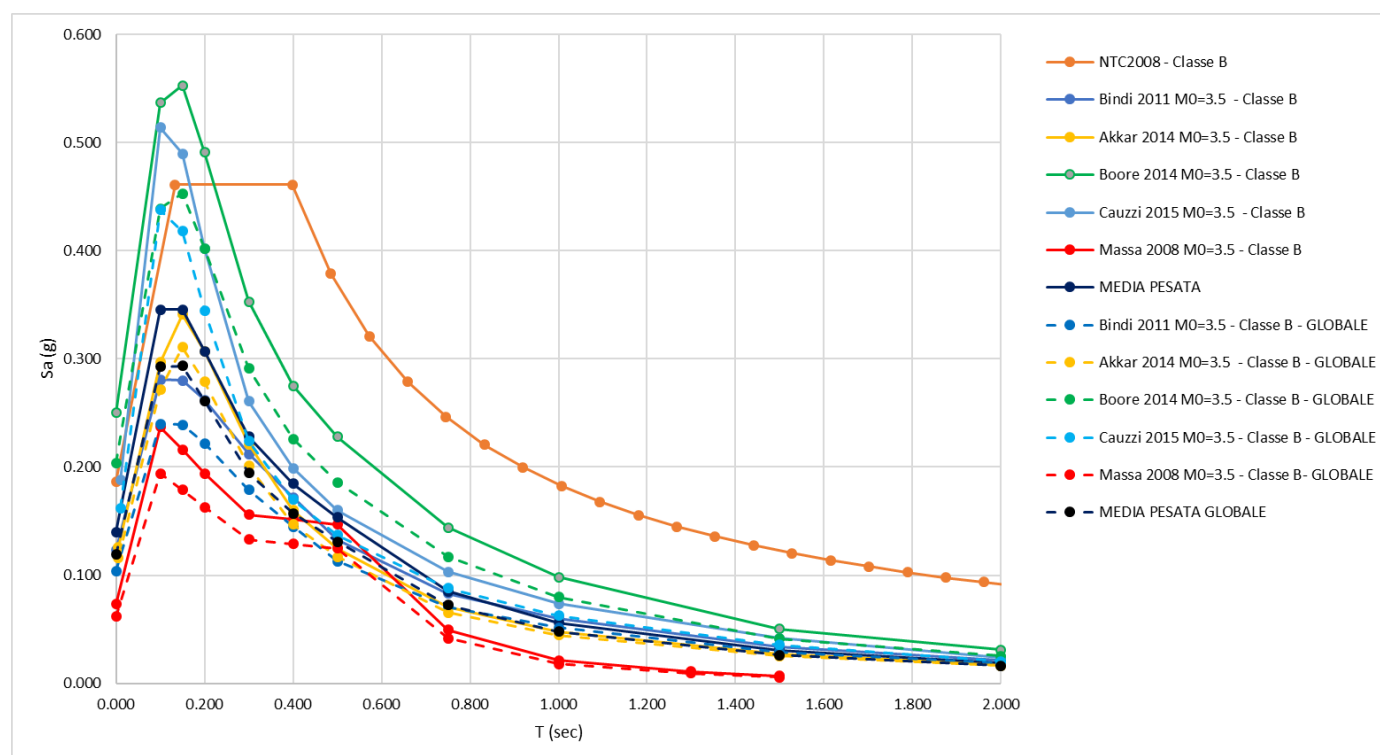
##### 6.4.11.2 Classe A - Spetto a $V_r=150$ anni, $T_r=1424$ anni, $Pr=10\%$



#### 6.4.11.3 Classe A - Spetto a $V_r=150$ anni, $T_r=2475$ anni, $Pr=5\%$

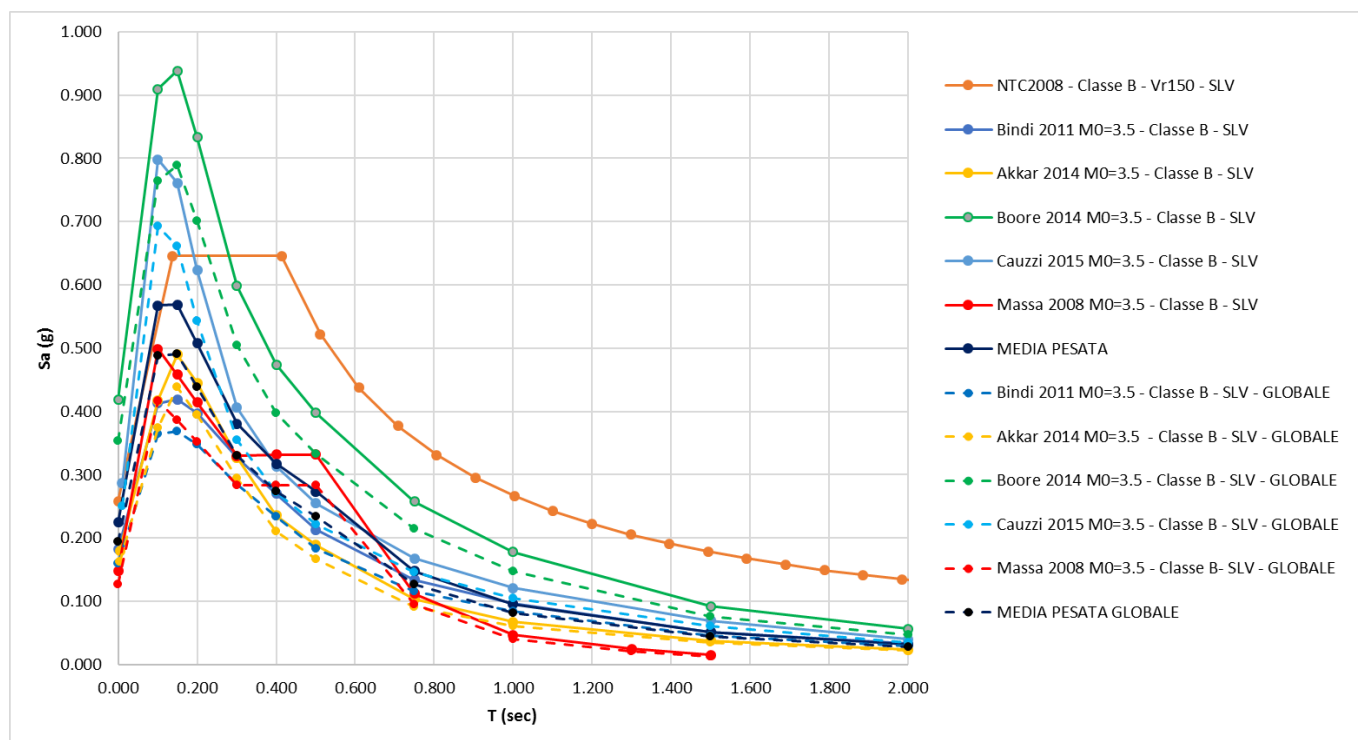


#### 6.4.11.4 Classe B - Spetto a $V_r=50$ anni, $T_r=475$ anni, $Pr=10\%$

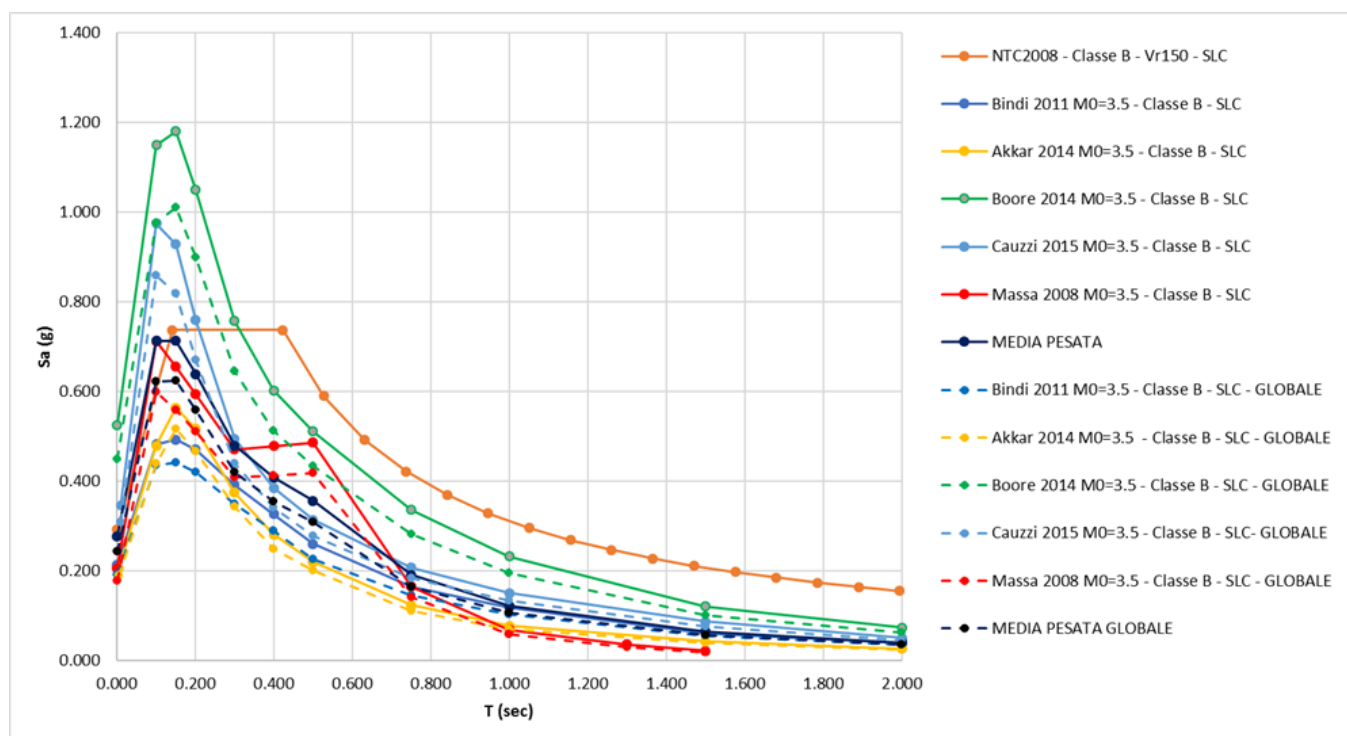


#### 6.4.11.5 Classe B - Spetto a $V_r=150$ anni, $T_r=1424$ anni, $Pr=10\%$





#### 6.4.11.6 Classe B - Spetto a $V_r=150$ anni, $T_r=2475$ anni, $P_r=5\%$



## 6.5 TABELLE RIASSUNTIVE ANALISI DI SENSITIVITÀ

ZONAZIONE SISMOGENETICA	Tr (anni)	$\Delta$ PGA (g) rispetto a NTC2008			$\Delta$ Sa (g) - T=0.15sec - rispetto a NTC2008		
		Completezza Specializzata		Completezza Globale	Completezza Specializzata		Completezza Globale
		Mmax+0.3 e "b" non corretto	Mmax & "b" corretto	Mmax & "b" corretto + Completezza Globale	Mmax+0.3 e "b" non corretto	Mmax & "b" corretto	Mmax & "b" corretto + Completezza Globale
ZS9 - Area source	475	-0.016	-0.080	-0.068	-0.028	-0.191	-0.167
	1424	+0.025	-0.034	-0.064	+0.094	-0.077	-0.155
	2475	+0.065	-0.015	-0.048	+0.211	-0.024	-0.113
ZS2 - Area source	475	+0.017	-0.028	-	+0.058	-0.067	-
	1424	+0.069	-0.011	-	+0.217	-0.018	-
	2475	+0.114	+0.011	-	+0.352	+0.047	-
ZS2 - Area plane source	475	-0.032	-0.041	-	-0.061	-0.101	-
	1424	-0.004	-0.033	-	+0.031	-0.074	-
	2475	+0.027	-0.018	-	+0.131	-0.028	-

ZONAZIONE SISMOGENETICA	GMPE	Tr (anni)	$\Delta PGA$ (g) rispetto a NTC2008			$\Delta Sa$ (g) - T=0.15sec - rispetto a NTC2008		
			Completezza Specializzata		Completezza Globale	Completezza Specializzata		Completezza Globale
			Mmax+0.3 e "b" non corretto	Mmax & "b" corretto	Mmax & "b" corretto + Completezza Globale	Mmax+0.3 e "b" non corretto	Mmax & "b" corretto	Mmax & "b" corretto + Completezza Globale
ZS9 - Area source	Bindi et al. (2011)	475	-0.048	-0.064	-0.083	-0.139	-0.181	-0.222
		1424	-0.049	-0.076	-0.098	-0.157	-0.227	-0.277
		2475	-0.043	-0.079	-0.100	-0.156	-0.244	-0.295
	Akkar et al. (2014)	475	+0.034	-0.061	-0.071	+0.184	-0.120	-0.150
		1424	+0.097	-0.078	-0.096	+0.414	-0.156	-0.207
		2475	+0.149	-0.085	-0.103	+0.583	-0.173	-0.221
	Boore et al (2014)	475	+0.089	+0.063	+0.017	+0.159	+0.092	-0.008
		1424	+0.206	+0.160	+0.095	+0.414	+0.292	+0.143
		2475	+0.288	+0.232	+0.158	+0.603	+0.443	+0.273
	Cauzzi et al. (2015)	475	+0.023	+0.001	-0.025	+0.079	+0.029	-0.043
		1424	+0.064	+0.028	-0.007	+0.204	+0.115	+0.015
		2475	+0.104	+0.054	+0.016	+0.313	+0.192	+0.082
	Massa et al. (2008)	475	-0.096	-0.113	-0.125	-0.198	-0.245	-0.282
		1424	-0.064	-0.110	-0.131	-0.054	-0.188	-0.259
		2475	-0.014	-0.085	-0.113	+0.132	-0.081	-0.178
ZS2 - Area source	Bindi et al. (2011)	475	-0.041	-0.066	-	-0.121	-0.183	-
		1424	-0.049	-0.090	-	-0.157	-0.258	-
		2475	-0.054	-0.098	-	-0.179	-0.288	-
	Akkar et al. (2014)	475	+0.049	-0.065	-	+0.219	-0.132	-
		1424	+0.104	-0.093	-	+0.434	-0.209	-
		2475	+0.152	-0.106	-	+0.593	-0.245	-
	Boore et al (2014)	475	+0.119	+0.069	-	+0.239	+0.109	-
		1424	+0.223	+0.146	-	+0.474	+0.251	-
		2475	+0.295	+0.201	-	+0.633	+0.353	-
	Cauzzi et al. (2015)	475	+0.135	+0.093	-	+0.359	+0.256	-
		1424	+0.237	+0.168	-	+0.644	+0.464	-
		2475	+0.305	+0.225	-	+0.823	+0.623	-
	Massa et al. (2008)	475	-0.066	-0.093	-	-0.112	-0.186	-
		1424	-0.004	-0.069	-	+0.125	-0.066	-
		2475	+0.071	-0.028	-	+0.393	+0.093	-
ZS9 - Area plane source	Bindi et al. (2011)	475	-0.087	-0.068	-	-0.237	-0.190	-
		1424	-0.113	-0.088	-	-0.318	-0.258	-
		2475	-0.121	-0.099	-	-0.348	-0.291	-
	Akkar et al. (2014)	475	+0.003	-0.065	-	+0.079	-0.134	-
		1424	+0.043	-0.091	-	+0.233	-0.199	-
		2475	+0.084	-0.108	-	+0.373	-0.232	-
	Boore et al (2014)	475	+0.032	+0.070	-	+0.051	+0.099	-
		1424	+0.110	+0.149	-	+0.237	+0.246	-
		2475	+0.169	+0.212	-	+0.383	+0.373	-
	Cauzzi et al. (2015)	475	+0.070	+0.034	-	+0.207	+0.116	-
		1424	+0.133	+0.075	-	+0.384	+0.240	-
		2475	+0.184	+0.117	-	+0.523	+0.343	-
	Massa et al. (2008)	475	-0.085	-0.108	-	-0.161	-0.224	-
		1424	-0.053	-0.105	-	-0.008	-0.161	-
		2475	-0.007	-0.083	-	+0.173	-0.054	-



## 6.6 LEGGE DI ATTENUAZIONE DI MASSA ET AL. (2008)

*Journal of Earthquake Engineering*, 00:1–25, 2007  
 Copyright © A.S. Elnashai & N.N. Ambraseys  
 ISSN: 1363-2469 print / 1559-808X online  
 DOI: 10.1080/13632460701232675



### Site Classification Assessment for Estimating Empirical Attenuation Relationships for Central-Northern Italy Earthquakes

M. MASSA, S. MARZORATI, E. D'ALEMA, D. DI GIACOMO,  
 and P. AUGLIERA

5

*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Italy*

*The aim of this article is to investigate the ground motion attenuation of the most industrialized and populated regions of Italy, evaluating the capability of different approaches to estimate site dependent models. The 5.2 magnitude earthquake on November 24, 2004 shocked the areas of Northern Italy producing damage of about 215 million euros. The data set, including 243 earthquakes of local magnitude up to 5.2, has been collected in the period December 2002–October 2005 by 30 three-component seismic stations managed by Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Milano (INGV-MI). Empirical attenuation relationships have been estimated for horizontal peak ground velocity (PGHV), acceleration (PGA), displacement (PGHD), and for response spectral acceleration (SA) for periods between 0.1 and 1.5 s. To estimate suitable attenuation models, in particular for sites characterized by thick sedimentary geological formations, a soil discrimination based on EU8 code can lead to wrong evaluations. On the contrary, a classification based on H/V spectral ratios of seismic ambient noise (NHV) allows the models to fit better real and predicted data and to reduce the uncertainties of the process. For each receiver, NHV have been strengthened by additional H/V spectral ratio of earthquake data (EHV), calculated considering different portions of the analysed signals. In order to validate the PGHA attenuation relationship for greater magnitudes, accelerometric records, relative to Central-Northern Italy strong motions occurring in the last 30 years, have been collected and superimposed to our attenuation curves.*

**Keywords** Attenuation; Waveform Analyses; H/V Spectral Ratio

#### 1. Introduction

25

The estimate of reliable ground motion attenuation relationships represents one of the most important tasks in seismic hazard assessment [Cornell, 1968]. The most common method to evaluate seismic hazard, related to ground shaking, is to make use of predictive ground motion models. The empirical attenuation relationships are usually models expressed as mathematical functions relating the ground motion parameters to the source properties, the propagation medium and the local site geology. In the last years, several studies concerning the ground motion attenuation relationships have been accomplished; nowadays, many predictive equations, estimated from strong motion recordings, are available both for Italian regions [Bindi *et al.*, 2006, from the Umbria-Marche earthquakes; Bragato and Slejko, 2005, from the Eastern Alps earthquakes; Sabetta and Pugliese, 1987, 1996, from the Italian earthquakes] and for wider regions [e.g., Ambraseys *et al.*, 1996 a,b, 2005 a,b, from Europe earthquakes; Atkinson and Boore, 1997, from Eastern North

Received 23 March 2006; accepted 11 January 2007.

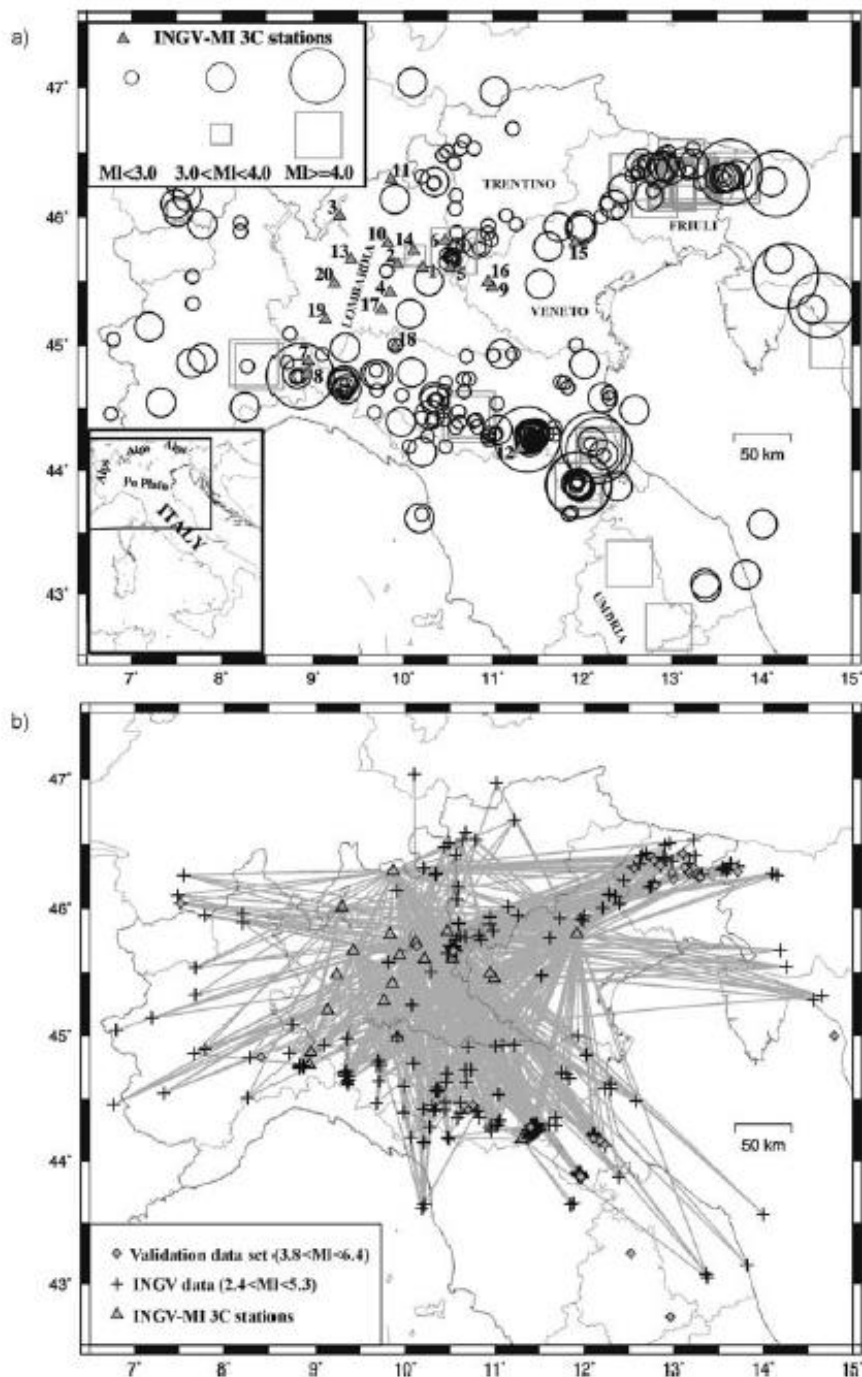
Address correspondence to M. Massa, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Milano, via Bassini 15, 20133 Milano, Italy; E-mail: massa@mi.ingv.it

America earthquakes; Boore *et al.*, 1993, 1994, from Western North America earthquakes; Campbell, 1985, 1997, from both North America and worldwide earthquakes; Sadig *et al.*, 45 1997, from Western North America earthquakes; Toro *et al.*, 1997, from Eastern and Central North America earthquakes]. Although almost all the attenuation relations are calibrated using strong motion data, the non negligible weight of low magnitude events on seismic hazard evaluation has also been recognized [Reiter, 1990]. In particular, for industrial and highly populated areas, as pointed out by Campbell [1989], small events may be of interest from an engineering point of view; indeed, even if they do not produce peak ground acceleration able to compromise well-engineered structures, they can compromise more sensitive components, such as mechanical and electrical equipment of industrial plants. This consideration leads to the conclusion that well-calibrated attenuation relationships, spanning from weak motions [Campbell, 1989, from Eastern North America earthquakes; Costa *et al.*, 1998, from Friuli earthquakes; Theodulidis, 1998, from Greece earthquakes; Frisenda *et al.*, 2005, from North-Western Italy earthquakes; Dost *et al.*, 2004, from Netherlands earthquakes] to strong motions, are necessary. The calibration of regional attenuation relationships represents an important assessment in order both to compile seismic hazard map at local scale (often requested by public administration) and to estimate shaking scenarios relative to a particular source, especially in the case in which no records are available in the near field. Furthermore, the influence of regional crustal structures on the ground motion, in particular in the middle and in the far-field (distances greater than 50 km), has been demonstrated [Suhadolc and Chiaruttini, 1987]. In this article the ground motion attenuation of the most populated and industrial areas of Central-Northern Italy has been investigated analyzing a data set composed both of weak and strong motion recordings (Fig. 1a). In this area the attenuation characteristics are largely unknown due both to low seismicity and to the lack (for the past) of instrumental coverage. Moderate seismic events, occurring in this area in the last years (i.e., November 25, 2004 Salò earthquake,  $M_I=5.2$ ; September 14, 2003 Monghidoro earthquake,  $M_I=5.0$ ; April 11, 2003 Novi Ligure earthquake,  $M_I=4.7$ ; August 21, 2000 Acqui Terme earthquake,  $M_I=5.1$ , URL: [www.ingv.it](http://www.ingv.it)), document and confirm the presence of a non negligible seismic activity. In particular, the November 25, 2004 Salò earthquake ( $M_I=5.2$ ) has been the strongest event to shock the Lombardia region in the last decades. On the basis of the official data provided by the Lombardia Region authorities, this earthquake, felt on the whole North-Italy area, strongly affected 66 municipalities close to the epicentral area, damaging about 3,700 buildings (involving about 2,500 people) and 300 churches, for an approximate damage evaluation of 215 million euros. It is worth noting that in the past the area under study was shocked by several energetic events such as the October 30, 1901 Salò earthquake ( $I_0=VIII$  MCS; Camassi and Stucchi, 1996). At present, for the area under study, only attenuation relationships (for frequencies ranging from 1.0–20 Hz) estimated by Castro *et al.* [1993], based on six earthquakes with magnitude ranging from 2.5–3.6 and hypocentral distances between 23 and 125 km, are available. The results reported in the seismic hazard map of Italy [Gruppo di lavoro, 2004] show that the area under study appears to be characterized by predictable horizontal acceleration peaks ranging from 0.150–0.175 g. These results have been obtained by applying the Ambraseys *et al.* [1996 a,b] and Sabetta and Pugliese [1996] empirical PGHA attenuation relationships. In this article the attenuation curves, calculated for peak ground accelerations (PGHA), velocities (PGHV), displacements (PGHD), and spectral accelerations (SA), have been estimated starting from a data set including 243 local earthquakes (about 3,500 waveforms) of local magnitude ranging from 2.5–5.2, occurring in the period of December 2002–October 2005. The regressions, performed in order to obtain both site and no site dependent ground motion prediction equations, have been implemented by using a simple model, function of



XXXXX

3 4



**FIGURE 1** Map showing the locations of the seismic events (black circles) recorded by INGV-MI stations (grey triangles) in the period December 2002–October 2005. The epicentral coordinates of all strong motions used as comparison (grey squares), and reported in Table 2, are also shown. b) Ray paths between the events included in the dataset (black crosses) and the INGV-MI 3C stations.



magnitude, distances and site geology, and considering weak and strong motion recordings characterized by hypocentral distances up to 300 km. The evaluation of site coefficients has been performed both by following the site classification reported in the EU8 code [ENV, 2002] and by evaluating the site response using simple NHV [Nakamura, 1989] and EHV analysis.

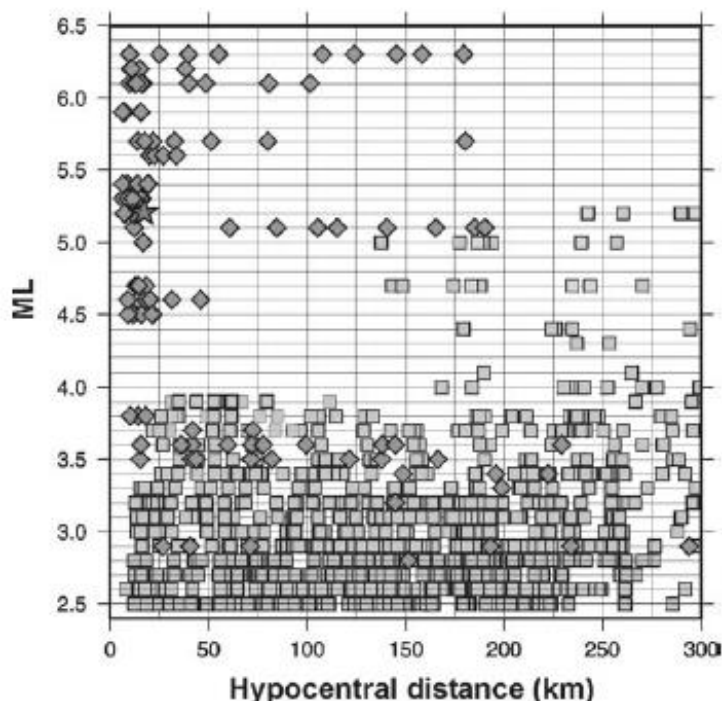
## 2. Data and Data Processing

Since December 2002, the seismicity of the study area (longitude ranging from about 9°E to 12°E50' and latitude ranging from about 44°N to 46°N) has been continuously monitored by 30 velocimetric stations (working in different periods) installed, as showed in Fig. 1a, in 20 different sites. In the past, this area was poorly monitored: at the end of 2002 the Lombardia Region was covered by only 3 RSNC (National Centralized Seismic Network, URL: [www.ingv.it](http://www.ingv.it)) velocimetric stations and one RAN (National Accelerometric Network, URL: [www.protezionecivile.it](http://www.protezionecivile.it)) accelerometric station, all equipped with vertical sensors. At present, the INGV-MI network (Fig. 1a) consists of 9 digital three-component seismometers (equipped with 4 Nanometrics Trillium 40, with flat response between 0.025 and 50 Hz, 4 Lennartz LE3D-5s, with a flat response between 0.2 and 40 Hz, and 1 Lennartz LE3D-lite with a flat response between 1 and 80 Hz) located in the core of the area of interest. Starting from May 2005 the network has been further developed by the installation of three Kinematics-Episensor accelerometers in the sites indicated in Fig. 1a by numbers 14, 19, and 20. The sensors are coupled both with Lennartz Mars88-MC (URL: [www.lennartzelectronic.de](http://www.lennartzelectronic.de)) and Reftek 130 (URL: [www.reftek.com](http://www.reftek.com)). The data acquisition has been performed at a sampling rate of 62.5 samples/sec, so that a minimum antialias cutoff of 25 Hz has been guaranteed. The main features of all seismic stations are reported in Table 1. The epicenters of the events used in this study to calibrate the attenuation relationships are shown in Fig. 1a. In order to calculate reliable focal coordinates, the arrival times of the events recorded by INGV-MI network (in particular related to the great amount of weak motions occurred in the study area) have been added to the information coming from the INGV-CNT data set, so that all earthquakes have been re-localized. The data have been selected a priori on the basis of local magnitude, in order to discard the events characterized by  $M_l < 2.5$ , and hypocentral distances greater than 300 km. The local magnitude is calculated using an  $M_l$  scale calibrated for Central-Northern Italy region by Augliera *et al.* [2004], following the approach proposed by Spallarossa *et al.* [2002]. In Figs. 1b and 2, the source-stations ray-paths and the distribution of the recordings versus distance (for different magnitudes) are shown. In the same figures the information related to the strong motions, occurred in Central-Northern Italy in the last 30 years and used as comparison (see Table 2) are also reported. The small number of earthquakes with  $M_l$  values greater than 4.0, and in particular greater than 5.0, are a consequence of the intrinsic characteristics of the North Italy seismicity. The seismic events characterized by  $M_l < 4.0$  ensure a completeness of information for all distances (0–300 km), whereas at short distances there are few recordings for events of  $M_l > 4.0$ . In order to reduce the natural noise only the recordings characterized by a signal to noise ratio greater than 10 dB have been selected. The final outcome is a data set composed of 2,126 high-quality horizontal velocimetric waveforms, recorded between December 2002 and October 2005, related to 243 earthquakes with local magnitude spanning from 2.5–5.2 and hypocentral distances up to 300 km. Starting from the selected signals both peak ground horizontal accelerations and peak ground horizontal displacements have been obtained. The waveforms have been a priori base-line corrected, the effect of the instrument response removed and band pass filtered between 0.5–25 Hz; finally, the velocimetric signals have

**TABLE 1** Description of the stations considered in this study. The grey cells indicate the INGV-MI stations working nowadays

ID	Station code	Site	Lat (°)	Long (°)	Elevation (m)	Installation date	Removal date	Rec (Hz) x2	Sensor	EU8 soil category	H/V noise (mean 0.1-1 s)	H/V quakes (mean 0.1-1 s)	Dummy Coeff. Site Effect	Mag residuals
1	MIS5	Concesio	45,6062	10,2155	210	12/05/02	03/11/03	18	Mark L4-3D	C	-	-	1	0,20
2	M161	Capriolo	45,6375	9,9338	253	12/16/02	03/12/03	17	Mark L4-3D	B	-	-	0	-0,15
3	MIS0	Perledo	46,0107	9,2910	219	02/18/03	05/27/03	54	Mark L4-3D	A	1,12	1,28	0	-0,31
4	SONC	Soncino	45,4123	9,8554	90	03/06/03	06/3/004	34	Mark L4-3D	B	-	-	1	+0,074
5	MIS2	Salò	45,6080	10,5260	123	02/27/03	03/11/03	13	Mark L4-3D	B	-	-	1	+0,073
6	BAG3	Bagolino	45,8228	10,4664	807	09/16/04	05/12/03	60	LE-3D/5sec	A	1,40	1,43	0	-0,12
6	BAG0	Bagolino	45,8217	10,4678	767	03/12/03	05/12/03	14	Mark L4-3D	A	1,40	1,43	0	-0,12
6	BAG2	Bagolino	45,8228	10,4664	807	05/12/03	09/16/04	118	Mark L4-3D	A	1,40	1,43	0	-0,12
7	SARE	Sarezzano	44,8705	8,9429	284	05/13/03	05/20/03	8	Mark L4-3D	A	-	-	0	-0,010
8	SARD	Sandigliano	44,7707	8,9276	340	06/05/03	06/11/03	8	Mark L4-3D	A	-	-	0	-0,007
9	VER2	Verona	45,3970	10,9609	174	11/26/03	06/29/04	5	Mark L4-3D	A	1,32	1,65	0	-0,016
9	VER0	Verona	45,4546	10,9941	174	06/17/03	11/26/03	46	Mark L4-3D	A	1,32	1,65	0	-0,016
10	GAZZ	Gazzaniga	45,7986	9,8290	475	07/15/03	10/14/03	15	Mark L4-3D	A	-	-	1	+0,040
11	MAL3	Malenco	46,2918	9,8636	2030	07/15/04	09/04/03	28	LE-3D/5sec	A	1,61	1,88	1	+0,028
11	MAL5	Malenco	46,2914	9,8650	2030	03/14/03	07/15/04	22	Mark L4-3D	A	1,61	1,88	1	+0,028
11	MAL2	Malenco	46,2918	9,8636	2030	07/28/03	07/15/04	49	Mark L4-3D	A	1,61	1,88	1	+0,028
12	OGGI	Monghidoro	44,1773	11,2988	970	09/15/03	10/28/03	35	Mark L4-3D	A	-	-	1	+0,34
13	MER2	Merate	45,6725	9,4182	350	05/03/04	05/03/04	32	Trillium	B	2,03	1,41	1	+0,16
13	MER4	Merate	45,6725	9,4182	350	10/23/03	05/03/04	24	Mark L4-3D	B	2,03	1,41	1	+0,16
13	MER8	Merate	45,6725	9,4182	350	10/25/05	05/03/04	8	Episensor	B	-	-	1	-
14	MAR2	Marone	45,7397	10,1175	600	03/24/04	03/24/04	84	Trillium	A	1,49	1,76	1	+0,084
14	MAR0	Marone	45,7397	10,1175	600	03/24/03	03/24/04	73	Mark L4-3D	A	1,49	1,76	1	+0,084
14	M166	Marone	45,7397	10,1175	600	12/05/02	03/25/03	24	Mark L4-3D	A	1,49	1,76	1	+0,084
15	ASO2	Asolo	45,8049	11,9180	221	05/13/04	05/13/04	71	LE-3D/Lite	A	2,36	2,52	1	+0,12
15	ASOL	Asolo	45,8049	11,9180	221	03/04/03	05/13/04	76	Mark L4-3D	A	2,36	2,52	1	+0,12
16	NEGR	Negrar	45,4976	10,9482	167	06/29/04	05/13/04	43	LE-3D/5sec	A	1,21	1,57	0	-0,030
17	CTLE	Castellone	45,2763	9,7622	66	09/21/04	10/08/04	22	LE-3D/5sec	C	1,21	2,10	0	-0,082
18	CORT	Cortemaggiore	44,9905	9,9075	52	06/30/04	10/08/04	14	LE-3D/5sec	C	-	-	0	-0,15
18	COR2	Cortemaggiore	44,9905	9,9076	52	05/26/05	06/23/05	13	Trillium	C	-	-	0	-0,15
19	PAV1	Pavia	45,2026	9,1349	82	06/12/05	06/12/05	18	Trillium	B	-	-	1	+0,58
19	PAV8	Pavia	45,2026	9,1349	82	06/12/05	06/12/05	18	Episensor	B	-	-	1	-
20	LAB2	Milano	45,4803	9,2321	125	05/30/05	05/30/05	25	Trillium	B	-	-	1	+0,48
20	LAB1	Milano	45,4803	9,2321	125	05/30/05	05/30/05	25	Episensor	B	-	-	1	-





**FIGURE 2** Distribution of earthquakes included in the INGV-MI data set versus hypocentral distance (light grey squares), for magnitude ranging from 2.5–5.2. The strong motions used as comparison (grey diamonds) are also reported. The gray star indicate the November 24, 2004 Salò earthquake (MI=5.2) recorded from the Gavardo RAN accelerometric station.

been differentiated and integrated. Both recorded and derived waveforms are then visually checked in order to avoid biasing peaks coming from both saturated signals and the application of analytical processes on the background noise. To check the reliability of the calculated peak ground accelerations, the recordings of stations LAB2 (Nanometrics Trillium 40 broadband sensor) and LAB1 (Kinometrics-Episensor accelerometer), either located in the same site (station 19, see Table 1), have been analyzed: the derived acceleration values have been compared to those recorded by the accelerometer corrected for the instrumental response and band pass filtered in the same frequency range of the velocimeter [Frisenda *et al.*, 2005]. Finally, the accuracy of the results has been verified by overlapping real and derived seismograms (Fig. 3). The response spectra has been calculated for the component with the larger peak ground acceleration, using a standard damping of 5% [Bindi *et al.* 2006]; considering a cut-off pass band filter of 0.5 Hz, the analyzed periods (Table 3) range from 0.1 to 1.5 s [Boore and Bommer, 2005].

### 3. No Site Dependent Model

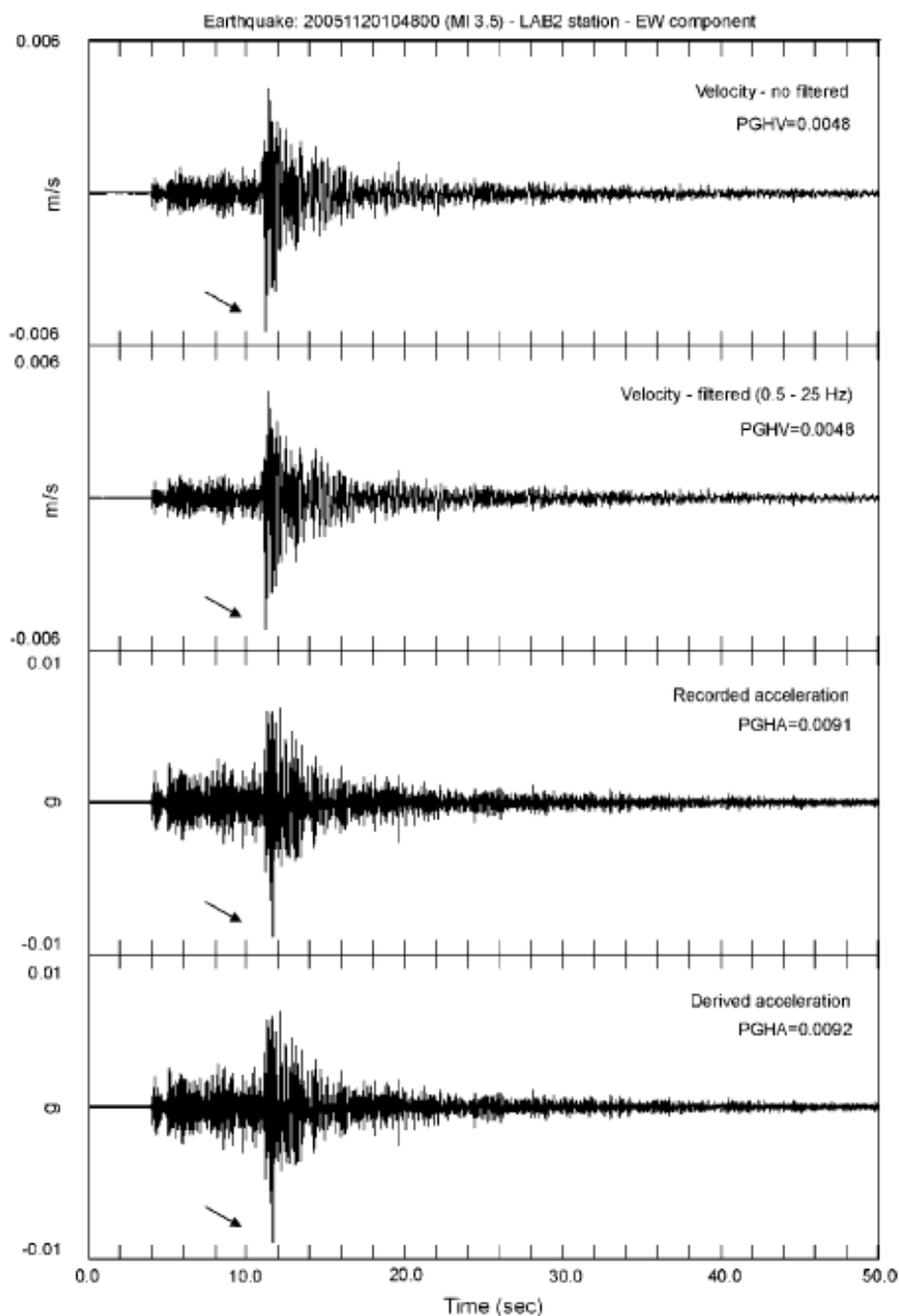
The general functional for modeling the attenuation of the ground motion, adopted in this study, is represented by the expression

$$\text{Log}_{10}(Y) = a + f_1(M) + f_2(R) \pm \sigma \quad (1)$$



**TABLE 2** Available strong motion data used as comparisons

yyyy/mm/dd	hh:mm:ss	region	lat (°)	lon (°)	depth (km)	MI	Source
1976/05/06	20:00:13	Eastern Alps	46.292	13.253	7.0	6.3	<i>Bragato and Slejko, 2005; Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1976/05/07	00:23:49	Eastern Alps	46.245	13.269	9.0	5.0	<i>Bragato and Slejko, 2005</i>
1976/05/09	00:53:44	Eastern Alps	46.245	13.295	9.0	5.6	<i>Bragato and Slejko, 2005; Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1976/05/11	22:44:01	Eastern Alps	46.258	12.985	6.0	5.3	<i>Bragato and Slejko, 2005; Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1976/09/11	16:31:11	Eastern Alps	46.286	13.160	3.0	5.4	<i>Bragato and Slejko, 2005; Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1976/09/11	16:35:03	Eastern Alps	46.277	13.175	12.0	5.7	<i>Bragato and Slejko, 2005; Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1976/09/15	03:15:19	Eastern Alps	46.291	13.153	5.0	6.2	<i>Bragato and Slejko, 2005; Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1976/09/15	09:21:19	Eastern Alps	46.318	13.119	8.0	6.1	<i>Bragato and Slejko, 2005; Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1977/09/16	23:48:08	Eastern Alps	46.280	12.980	8.0	5.3	<i>Bragato and Slejko, 2005; Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1979/09/10	21:35:00	Central Apennines	42.730	12.960	6.0	5.9	<i>Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1984/04/29	05:02:03	Central Apennines	43.250	12.520	7.0	5.2	<i>Sabetta and Pugliese, 1987</i>
1998/04/12	10:55:32	Eastern Alps	46.324	13.678	15.2	5.7	<i>Bragato and Slejko, 2005</i>
2000/08/21	17:14:28	Western Po Plain	44.830	8.412	10.0	5.1	<i>Frisenda et al., 2005</i>
2002/02/14	03:18:02	Eastern Alps	46.426	13.100	11.2	5.1	<i>Bragato and Slejko, 2005</i>
2004/11/24	22:59:00	Northern Po Plain	45.670	10.540	10.0	5.2	<i>Pergalani et al., 2005</i>



**FIGURE 3** Examples of seismograms recorded from LAB2 velocimetric station and LAB1 accelerometric station, both installed in the same site. The recordings reported in this figure are related to the November 20, 2005 earthquake (MI=3.5).

TABLE 3 Regression coefficients for PGHA, PGHV, PGHD, and SA

equation	parameter	a	error	b	error	c	error	d1 stiff	d2 soft	$\sigma$
5	PGHA	-3.2176	±0.17	0.7749	±0.028	-1.7908	±0.078	0.2560	-0.0854	±0.312
5	PGHV	-4.1898	±0.16	0.8778	±0.026	-1.7211	±0.071	0.2570	-0.0076	±0.268
5	PGHD	-3.9542	±0.16	0.9729	±0.023	-1.6479	±0.069	0.2460	0.0683	±0.261
6	PGHA	-3.2191	±0.16	0.7194	±0.025	-1.7521	±0.075	d soil	-	±0.282
6	PGHV	-4.1967	±0.14	0.8561	±0.022	-1.7270	±0.065	0.1780	-	±0.248
6	PGHD	-3.9474	±0.14	1.0047	±0.023	-1.7293	±0.066	0.1774	-	±0.232
6	SA - 0.1	-2.7799	±0.14	0.6380	±0.028	-1.7075	±0.073	0.1726	-	±0.351
6	SA - 0.3	-4.0539	±0.11	0.8595	±0.023	-1.5138	±0.059	0.1254	-	±0.261
6	SA - 0.5	-4.7976	±0.11	0.9854	±0.023	-1.5097	±0.058	0.2338	-	±0.274
6	SA - 0.7	-5.2896	±0.12	0.9862	±0.022	-1.4544	±0.059	0.2259	-	±0.271
6	SA - 0.9	-5.4916	±0.12	0.9694	±0.024	-1.4638	±0.062	0.1936	-	±0.268
6	SA - 1.1	-5.6916	±0.11	1.0141	±0.023	-1.5366	±0.060	0.1342	-	±0.264
6	SA - 1.3	-5.8083	±0.11	1.0055	±0.024	-1.5575	±0.060	0.1332	-	±0.263
6	SA - 1.5	-5.8847	±0.12	0.9889	±0.022	-1.5766	±0.058	0.1430	-	±0.259
								0.1547	-	



where  $Y$  is the ground motion parameter to be predicted (PGHA value expressed in g, PGHV value expressed in m/s and PGHD value expressed in cm),  $f_1(M)$  is a function of local magnitude,  $f_2(R)$  is a function of distance, and  $\sigma$  is the standard deviation of the random variable  $\text{Log}_{10}(Y)$ . In this step, no terms which take into account the site geology have been introduced. Many forms of the functions in Eqn. (1) have been tested in the literature for many regions of the world [Sabetta and Pugliese 1996; Atkinson and Boore, 1997; Boore et al. 1997; Sadigh et al., 1997; Ambraseys et al., 2005a,b; Bragato and Slejko, 2005]. In this study, the coefficient  $a$  of Eqn. (1) represents the larger of the two horizontal peak values from an individual recording [Sabetta and Pugliese, 1987; Ambraseys et al., 1996 a,b; Bindi et al., 2006]. Other authors calculate the coefficient  $a$  both as the maximum value of the running vectorial composition of the horizontal time series [Bragato and Slejko, 2005] and as geometric mean of the two horizontal components (i.e., the mean of the logarithm, Campbell, 1997). In our case, some tests performed by using different approaches lead to obtain horizontal peak values characterized by no significant discrepancies; furthermore, such results demonstrate that the amplitude values relative to the horizontal components, such as considered in this article, are not affected by bias due to the orientation of the sensors installed in the field [Boore et al., 2006]. Following several attenuation relationships performed starting from weak and strong motions occurred in the Italian regions in the last decades, the first function of Eqn. (1) has been implemented (in different times) both as

$$f_1(M) = (bM)$$

[e.g., Sabetta and Pugliese, 1987; 1996; Bindi et al., 2006] and

$$f_1(M) = (bM) + (cM^2)$$

[e.g., Frisenda et al., 2005; Bragato and Slejko, 2005]. In our case, the introduction in the source term of a further coefficient  $c$  does not allow us to improve the uncertainties of the process. Therefore, in the ground motion model a function  $f_1(M)$  characterized by a constant magnitude scaling, with  $dY/dM$  equal to  $b$ , has been finally used.

In order to investigate the attenuation due to the geometrical spreading (geometrical attenuation) and to the material damping and scattering (anelastic attenuation), the propagation function  $f_2(R)$  has been initially formulated as

$$f_2(R) = c\text{Log}_{10}(R) + dR$$

in which  $c\text{Log}_{10}(R)$  represents the geometrical attenuation and  $dR$  represents the anelastic attenuation. As demonstrated in previous studies [e.g., Sabetta and Pugliese 1987; Frisenda et al 2005], the anelastic coefficient  $d$  has not been found to be statistically significant, with a positive value very close to zero, so that it has been removed, and the propagation function has been reduced to  $c\text{Log}_{10}(R)$ . The proposed ground motion estimation equation is

$$\text{Log}_{10}(Y) = a + bM_L + c\text{Log}_{10}(R) \pm \sigma \quad (2)$$

where  $R$ , expressed in km, represents the hypocentral distance. Because the dimensions of the rupture surface for small events are usually smaller than the distances to

XXXXX

11

recording stations, the use of a hypocentral distance will not introduce significant bias into the attenuation relationships [Sadigh *et al.*, 1997].

Dissimilarly, in other studies the propagation term has been modelled as

$$c \text{Log}_{10} \sqrt{(R^2_{\text{epi}} + h^2)}. \quad (3)$$

In the case of data set characterized by high magnitude events recorded at distances of the order of the source dimension,  $h$  is a further parameter [Idriss, 1978; Campbell, 1981] to be estimated through regression;  $h$  is also introduced in the predicting model with the aim to incorporate all the factors (e.g., finite strength of the rock) that tend to limit the motion near the source, a property referred to as saturation with distance [McGuire, 1977; Joyner and Boore, 1981; Bolt and Abrahamson, 1982]. In our model, the introduction of a propagation term as reported in Eqn. (3) leads to relevant errors in the estimation of parameters  $h$  (both for PGHA, PGHV, and PGHD) with the result of a strong underestimation of the recorded data for distances lower than 50 km.

The regression of Eqn. (2) has finally been performed by the implementation of the nonlinear least-squares Marquardt-Levenberg algorithm [Press *et al.*, 1992] to determine the coefficients  $a$ ,  $b$ , and  $c$ , without taking into account the site responses. The variable  $\sigma$ , representing the standard deviation of the random variable  $\log_{10}(Y)$ , has been obtained with a least square analysis. Considering the available data set, the use of different regression techniques (e.g., maximum likelihood approach) leads to very similar results. In many papers the dependence of the results with respect to the adopted regression methods has been demonstrated. Indeed, in cases of data set characterized by high values of magnitude ( $M > 6.0$ ) and short distances ( $< 100$  km) [e.g., Fukushima and Tanaka, 1990], an ordinary least squares analysis seems to lead, with respect to the use of the maximum likelihood approach, to biased results, underestimating the decay rate of the peak acceleration values with distance (higher coefficients “ $c$ ” and lower coefficients “ $b$ ,” Joyner and Boore, 1993).

#### 4. Site-dependent Model

In order to take into account the local site effects, the ground motion model has been further developed through the introduction, by different approaches, of a function  $f_3(S)$ ; thus, Eq. (1) can be re-written as

$$\text{Log}_{10}(Y) = a + f_1(M) + f_2(R) + f_3(S) \pm \sigma. \quad (4)$$

In order to evaluate the site responses, a first attempt has been performed by grouping the seismic stations in three soil categories (A, B, and C) following the classification reported in the EU8 code (after draft of May 2002, ENV, 2002):

- A. rock,  $V_s$  (i.e., mean propagation velocity within the first 30 m of depth and relative to the shear waves)  $> 800$  m/s: Marine clay or other rocks (Lower Pleistocene and Pliocene), Volcanic rock and deposits (station number 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16; see Table 1).
- B. stiff soil,  $360 < V_s < 800$  m/s: Colluvial, alluvial, lacustrine, beach, fluvial terraces, glacial deposits, and clay (Middle-Upper Pleistocene). Sand and loose conglomerate (Pleistocene and Pliocene). Travertine (Pleistocene and Holocene) (station number 2, 4, 5, 13, 19, 20; see Table 1).

C. soft soil,  $V_s < 360$  m/s: Colluvial, alluvial, lacustrine, beach, and fluvial terraces deposits (Holocene) (station number 1, 17, 18, see Table 1). 245

The grouping of the stations into a particular class has been made following the results reported in Bordini *et al.* [2003] in which, on the base of the geological information of the 1:500.000 Italian Geological Map, the Italian regions have been grouped into three classes A, B, and C according to EU8 provisions. In the area close to the seismic stations, the errors associated to the 1:500.000 scale have been checked by comparing this map with 250 very detailed geological maps (scale 1:10.000 and 1:5.000). From such a comparison no significant differences has been observed. Following the EU8 code, 833 horizontal peaks recorded on rock, 163 horizontal peaks recorded on stiff soil, and 67 horizontal peaks recorded on soft soil have been obtained. In this case the function  $f_3(S)$  assumes the form 255

$$f_3(S) = \sum_{i=1}^{N_d} d_i \text{class}(S, i)$$

where  $\text{class}(S, i)$  is equal to 1 if site  $S$  is in class  $i$  and equal to 0 otherwise,  $N_d$  is the number of classes and  $d_i$  is a class coefficient to estimate through regression. Equation (2) can be re-written as

$$\text{Log}_{10}(Y) = a + bM_L + c\text{Log}(R) + d_1 S_{\text{stiff}} + d_2 S_{\text{soft}} \pm \sigma, \quad (5)$$

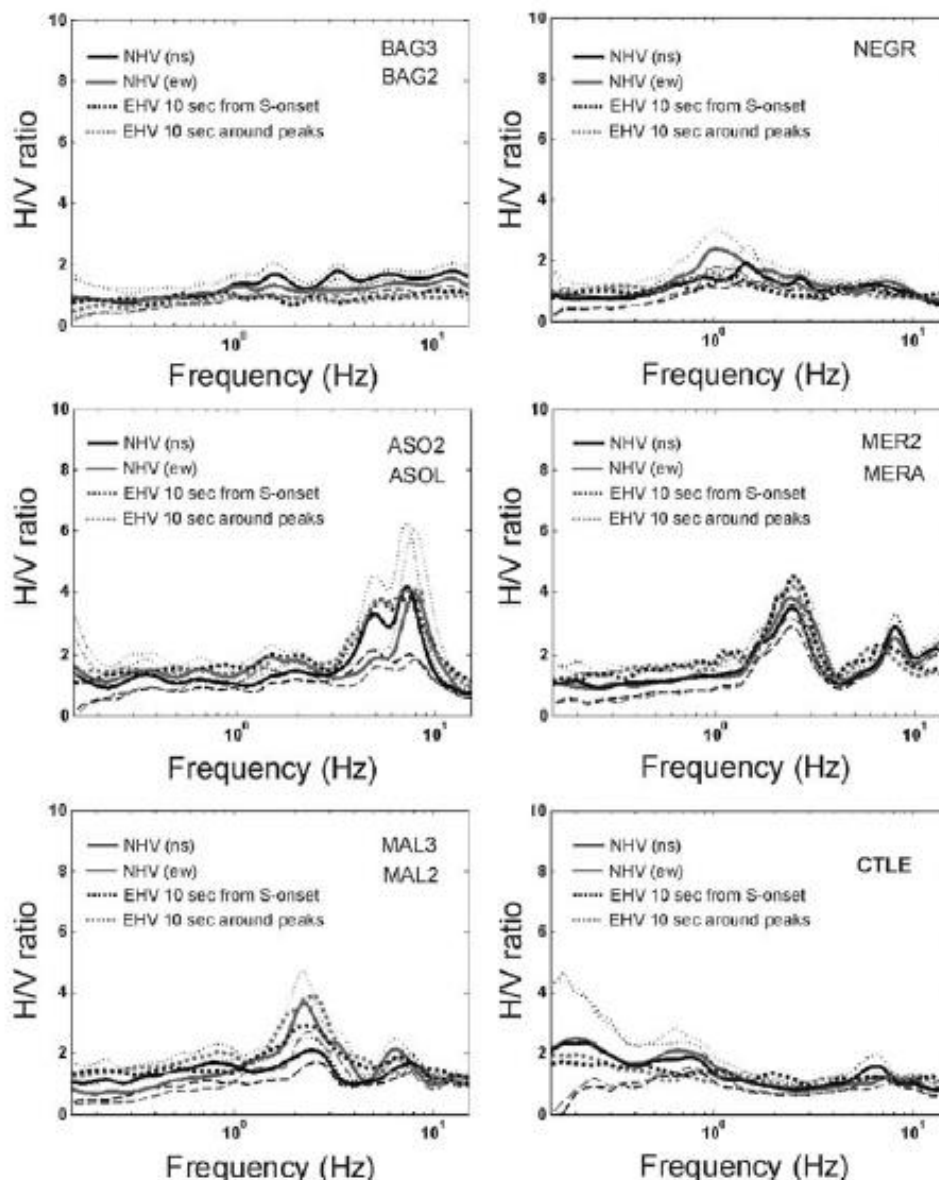
where  $S_{\text{stiff}}$  and  $S_{\text{soft}}$  are equal to 1 for stiff and soft soil, respectively, and 0 otherwise. The values of coefficients  $d_1$  and  $d_2$  have been determined by multiple nonlinear regressions: at 260 each step the coefficients  $a$ ,  $b$ , and  $c$  of Eq. (2) (both for PGHA, PGHV, and PGHD) have been obtained and then, repeating the process, the residuals have been used to estimate  $d_1$  and  $d_2$ , which in turn have been used to correct the values  $\text{Log}_{10}(Y)$ . In our case, it is worth noting that, both CTLE and CORT (same site of COR2, see Table 1) stations, installed in the core of the Po Plain and included in EU8 "C" soil category (Table 1), do not suffer 265 amplification phenomena. As shown in the bottom right panel of Fig. 4, CTLE station (same results, not reported here, have been obtained for CORT station), located on very thick sedimentary formations (that exceeded 1,000 m) is characterized by negligible amplification factors (lower than 2) at frequencies lower than 1 Hz. Higher harmonics may be strongly damped by thick sedimentary covers [Parolai *et al.*, 2004]. Moreover, 270 even in the presence of shallow sedimentary formations, the degree of stiffness, which characterized the sediments at local scale, can lead to obtain anomalous overestimation of  $V_{s,30}$  values. The analysis of the regional data sets suggest that, although broad geologic classifications can be used to develop site factors for large regionally mixed data sets, individual recording sites can have site factors that significantly depart from these average 275 trends [Campbell, 1989].

Considering the remarks reported above, in order to carefully evaluate the site responses relative to our network, a simple but more objective NHV analysis has been computed. The microtremors recordings were processed by the Nakamura technique [Nakamura, 1989] taking into account signals recorded for each site in different noise conditions (both night and day). The signals were filtered by a band-pass filter ranging from 0.2–20 Hz and divided in time windows of 40 s. In this way it was possible to obtain statistic H/V spectral ratios in which the media and the standard deviation ( $\pm 1\sigma$ ) have been 280



XXXXX

13



**FIGURE 4** Examples of site responses calculated by Nakamura technique: the CTLE station is installed in the center of the Po Plain. Grey and black solid lines represent the mean of NS/Z and EW/Z, respectively, obtained averaging the results of spectral ratios calculated on a meaningful number of windows noise of 40 s; dashed and dotted lines represent  $\pm$  one standard deviation. For comparison, the results of EHV analysis are also reported: for each station solid and dashed black lines represent, respectively, the results of the H/V analysis (averaging the results derived by all available recordings and meaning the horizontal components) computed selecting, for each seismograms, both 10 s of window starting from the S-phase onset and 10 s of the S-phase window including the maximum horizontal peak.

computed (Fig. 4). In order to overcome the numerical instability that affects the H/V spectral ratios, an Hanning smoothing window has finally been applied [Press *et al.*, 285 1992]. Since many studies (i.e., Parolai *et al.*, 2004) show that Nakamura method is able to furnish reliable values of the dominant frequency of a site, even if in some cases it could underestimate the amplification factors, the results obtained by NHV have been compared to those coming from EHV. The Fourier spectra of seismic signals were computed considering time windows of 10 s (cosine tapering 10%) starting from the picking of the S 290 waves. In this case a band-pass filter ranging from 0.5–25 Hz, and an Hanning smoothing window with a half-width of 0.5 Hz has been applied. In the few cases in which the first 10 s of the S-phase did not include the recorded peak, the H/V spectral ratios have been recalculated considering 10 s of signal surrounding the maximum horizontal value. In Fig. 4, it is possible to observe some examples of the convergence between the results obtained 295 calculating spectral ratios considering 10 s of seismic signals, selected starting both from the S-phase onset and from the surrounding of the maximum horizontal peaks.

In order to strengthen the results coming from both NHV and EHV, considering all seismograms recorded at each site, station magnitude residuals have been estimated. For each waveform recorded by a 3C station, zero to peak amplitude of synthetic Wood-Anderson 300 instruments have been calculated by convolving displacement signals (previously obtained by integrating velocimetric seismograms) with the standard Wood-Anderson torsion seismograph response. Station magnitudes for each recording have been computed without applying station corrections and averaging the horizontal components in a single measurement. For each station the mean magnitude residuals have been obtained comparing single-station magnitude versus event magnitude and then averaging the results. 305 As shown in the top panel of Fig. 5 and as reported in Table 1, the residuals confirm for each analyzed station the results of NHV analysis. It is worth noting as some stations included in class “A” of EU8 (e.g., MAL3 and in particular, ASO2) are characterized by positive values of station magnitude residuals (overestimation) and seem to show site effects in the frequency range of interest (1–10 Hz), with amplification factor ranging between 3.5 and 4.5; on the contrary CTLE station, included in class “C” of EU8 shows both negative values of station magnitude residuals (underestimation) and absence of amplification phenomena. As already suggested in recent studies [Parolai *et al.*, 2004; Qamar *et al.*, 2003] differences in station magnitude can be directly related to different local site responses. 315

As final test the magnitude residuals have been compared to the station  $\text{Log}Y$  residuals (for PGHA, PGHV, and PGHD), calculated through a regression performed considering all horizontal peaks (1063 values for each  $\text{Log}Y$ ) and using the simple model reported in Eq. (2), without considering any site classification (Fig. 5, bottom panel). The agreement between the results of the analyses described above allows us to consider more reliable a site classification which distinguishes only rock sites and soil sites. In Table 1 for each station the dummy soil coefficients are reported: coefficients equal to 0 indicate rock site in which the noise analysis give amplification factors lower than 2 for all considered frequencies. On the basis of NHV results, 422 horizontal peaks recorded on rock and 641 horizontal amplified peaks have been obtained. Then, Eq. (2) can be re-written as 325

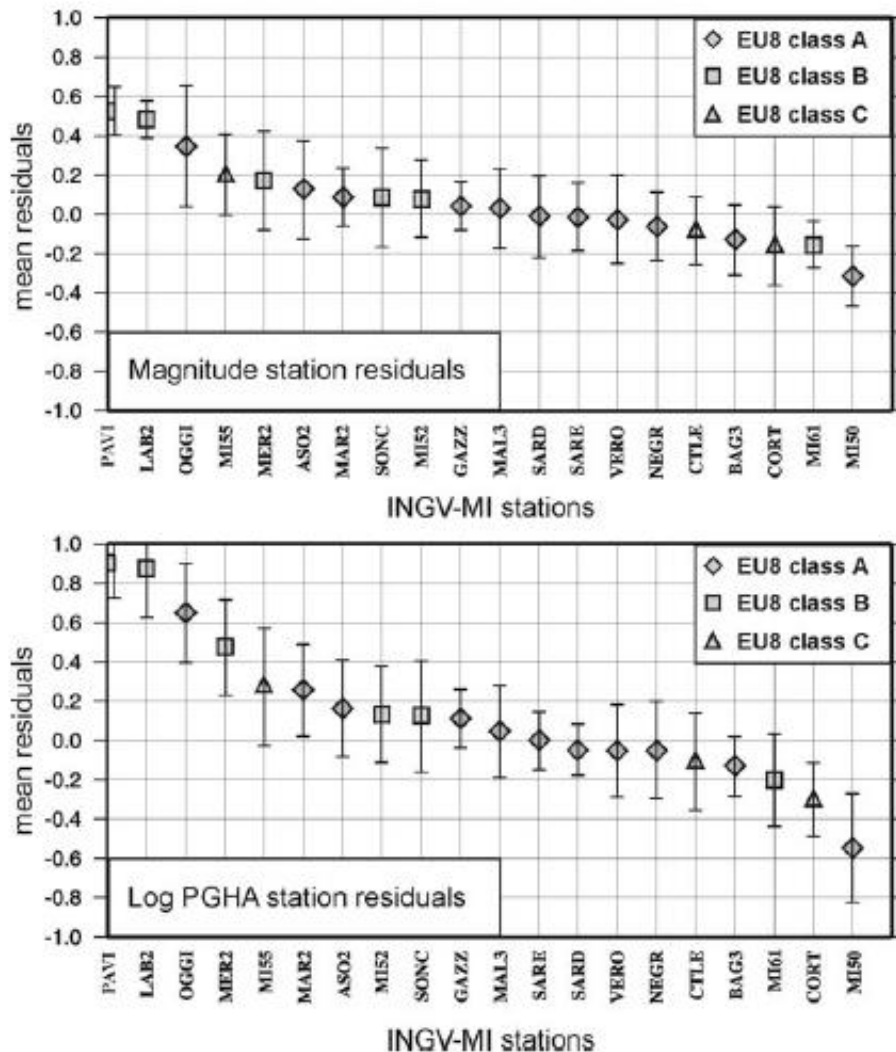
$$\text{Log}_{10}(Y) = a + bM_L + c\text{Log}(R) + dS \pm \sigma \quad (6)$$

where  $S$  is equal to 1 for soil and 0 otherwise (see Table 1). The value of the coefficient  $d$  has been determined by a non-linear regression (LSQR algorithm; Paige and Saunders, 1982), starting from values of the coefficients  $a$ ,  $b$ , and  $c$  previously estimated through the regression of 422 horizontal peaks (for PGHA, PGHV, and PGHD) recorded on rock. Also, for 330



XXXX

15



**FIGURE 5** (Top panel) Mean station magnitude residuals; (bottom panel) Mean *Log-PGHA* residuals, calculated comparing, for each station, real data with respect to those obtained through a regression performed including all horizontal peaks (1,063 values for each *LogY*) and using the simple model reported in Eq. (2), without any site discrimination. The vertical bars represent the standard deviations. Similar results (agreement between magnitude and *LogY* residuals) have been obtained both for velocity and displacement.

“site dependent models,” the variable  $\sigma$ , representing the standard deviation of the random variable  $\text{Log}_{10}(Y)$ , has been obtained by a least square analysis.

In our case (i.e., agreement between the results coming from HV spectral ratios calculated both on seismic ambient noise and on local earthquakes; see Fig. 4), an evaluation of site responses based on spectral ratio calculated on microtremors, allows us to consider our models as predictive models for both rock and soil sites: indeed measurements of background noise recordings are cheap and quick to collect and spread the range of validity

335

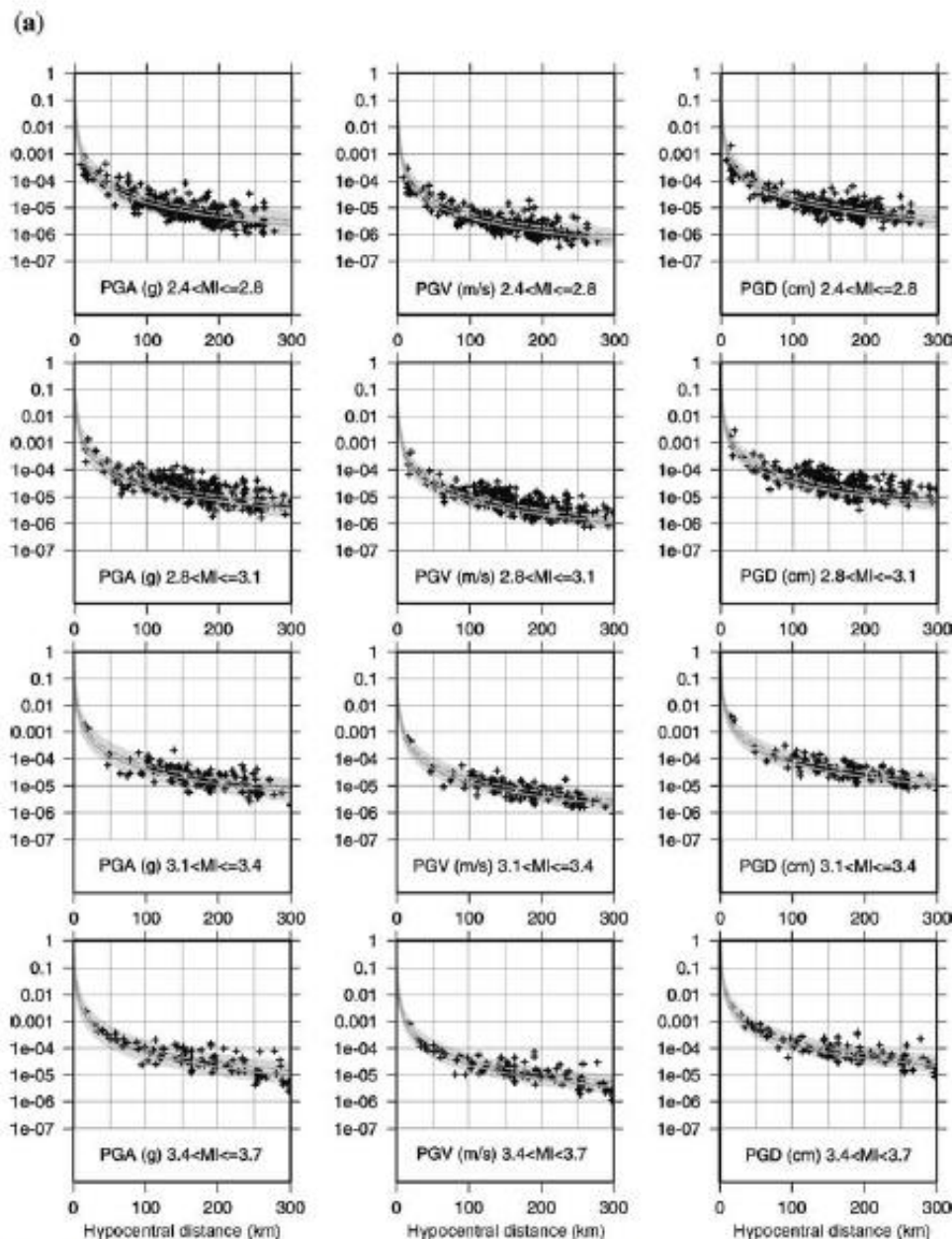


of the proposed attenuation relationships for any site in which the estimation of ground shaking scenarios is necessary. It is worth noting that for estimating rock and soil site through a background noise analysis, the spectral ratio results coming from sensors installed near urban areas must always be carefully verified by computing the same analysis on earthquakes in order to avoid amplifications due to industrial plants and/or building free oscillations. The computed spectral ratios have been also used to test the method proposed by Bragato and Slejko [2005]. To detect the capability of this approach, the average H/V ratios in the interval 0.1–1.0 s has been computed for each station considering both Nakamura and receiver function techniques. For our dataset (see Table 1) the computation of the average H/V ratios over very large frequency intervals could lead to underestimating the real site amplifications by smoothing meaningful peaks. As an example, the Merate station (number 13 in Table 1), applying the Bragato and Slejko [2005] approach, appears as the second best site of our network, especially considering the average H/V ratios on receiver functions (1.41). On the contrary, as shown in Figs. 4 and 5, all receivers located in this site are characterized, with respect to the other stations that present greater values of the average H/V ratios (see sites number 6, 11, and 15 in Table 1), by signals that show non negligible amplification peaks at frequencies ranging from 2–3 Hz. This remark is in agreement both with magnitude and  $\text{Log}_{10}(Y)$  residuals calculated for each station (Fig. 5).

## 5. Ground Motion Prediction Equations for Central-Northern Italy Earthquakes

Table 3 summarizes the coefficients obtained for Eqs. (5) and (6) described in the previous paragraph. The attenuation parameters have been estimated for PGHA, PGHV, PGHD, and SA by using hypocentral distances and local magnitudes calculated for each event included in the data set. For SA attenuation models, 8 periods ranging from 0.1–1.5 s have been considered. As shown in Table 3 (see  $\sigma$  values), Eq. (5), based on the EU8 soil classification, does not allow us, for all  $\text{Log}_{10}(Y)$ , to estimate  $d$  coefficients able to give models in agreement with the real data both for stiff and soft soils. Such a result, though it depends on the uneven representation of the soil classes in the data set (the small number of records collected by the stations included in the classes B and C of the EU8 code does not allow us to provide a reliable sampling of magnitude with respect to distance), is similar to that of previous studies [Ambraseys et al., 1996 a,b; Lee and Anderson, 2000; Bragato and Slejko, 2005], which did not obtain any improvement of  $\sigma$  with the introduction of similar soil classification. Taking into account these remarks, in order to provide the most reliable attenuation relationships for the study area, Eq. (6) has been chosen as final models.

Figures 6a and 6b show the distribution of PGHA (expressed in g), PGHV (expressed in m/s), and PGHD (expressed in cm) values versus hypocentral distance (km), for different classes of local magnitude ranging from 2.5–5.2. Peak ground accelerations and peak ground displacements have been obtained by the procedure, described in the previous paragraphs, and applied to the horizontal components of velocimetric records. In the same figures the attenuation curves, obtained by the regression of Eq. (6), are plotted; for each magnitude range, the curves both for rock and soil data (solid and dotted gray lines) are reported. In the bottom left panel of Fig. 6b (grey star), it is possible to note the strong agreement between the real PGHA value (0.071 g, Pergalani et al., 2005), related to the November 24, 2004 Salò earthquake ( $M_L=5.2$ ) recorded by the RAN accelerometric station of Gavardo (located 14 km from the epicenter; hypocentral distance of 17 km), and the PGHA attenuation curve; the same consideration is valid for the PGHV value (0.032



**FIGURE 6 a)** Plot of the attenuation curves (solid and dashed grey lines represent, respectively, the “no site dependent model” and the “site dependent model”), calculated for the events recorded by the INGV-MI stations, obtained inverting our PGHA (expressed in g) (left panels), PGHV (expressed in m/s) (central panels), and PGHD (expressed in cm) (right panels) data set and using Eq. (6) (the coefficient are reported in Table 3). For each panel the curves refer to the central magnitude value in the panel. The light grey strip represents the standard deviations. b) Same as Fig. 6a but for different classes of magnitude. Since there is a lack of high magnitude records, the data with MI greater than 4.6 have been grouped. The grey stars reported in the bottom panels (for PGHA and PGHV) represent the peaks recorded by Gavardo accelerometric station.



(b)

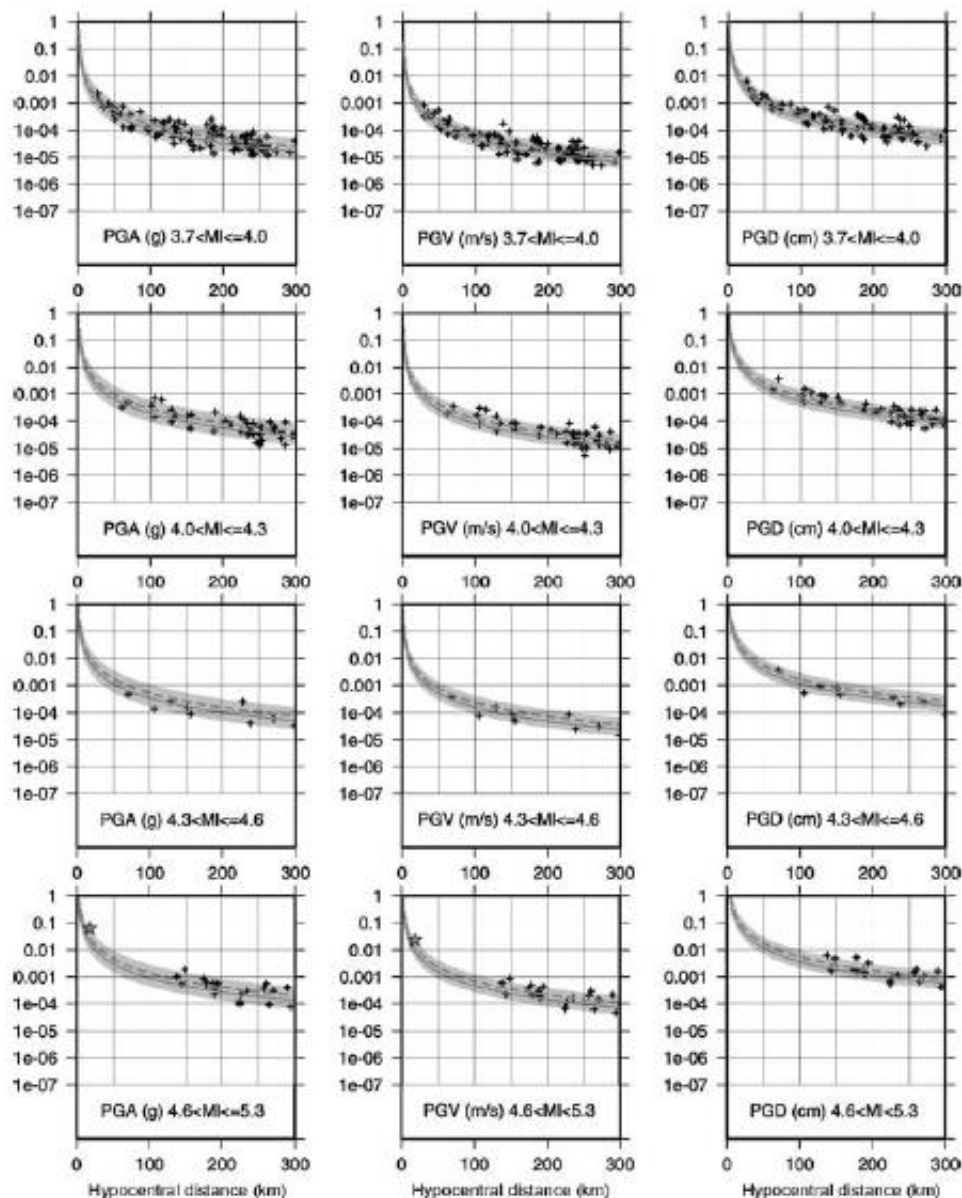
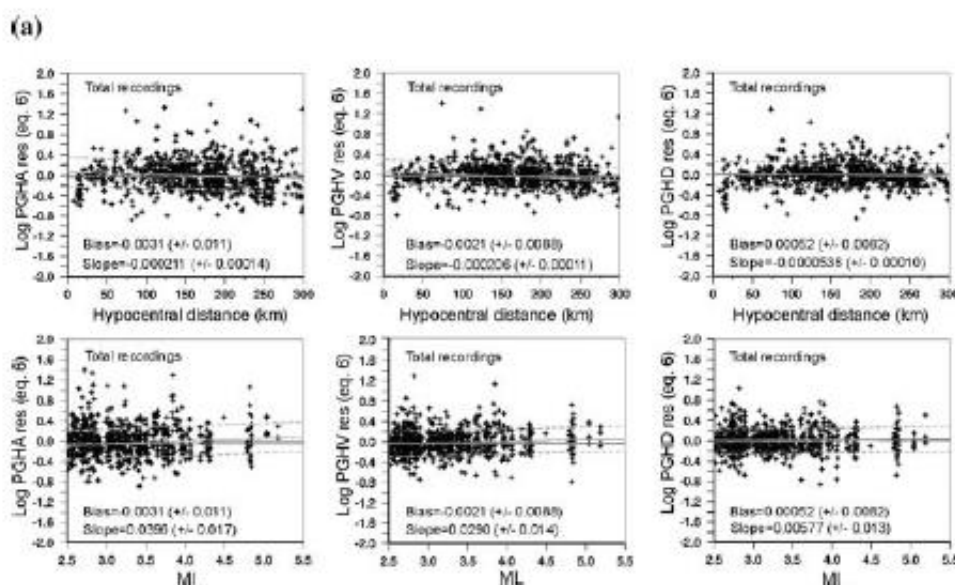


FIGURE 6 (Continued).

m/s, Pergalani *et al.*, 2005). Despite the lack of recordings in the near field, it is possible to observe that the distribution of the data shows seismic events with a local magnitude lower than 3.0 characterized by a strong decrease of peak values for distances up to 50 km. With respect to the relations calibrated for strong motions [Ambraseys *et al.*, 1996 a,b, 390 2005 a,b; Sabetta and Pugliese, 1987], the obtained attenuation models appear, in particular for the propagation term, more in agreement to other relations provided by using both weak and strong motions [Bragato and Slejko, 2005; Frisenda *et al.*, 2005]; it is worth



noting that both PGHA, PGHV, and PGHD models are characterized by geometrical  
attenuation coefficients  $c$  higher than the unity, reflecting the great percentage of low  
magnitude events included in the available data set. The values of coefficients  $b$  for the  
magnitude term are higher than those obtained by Sabetta and Pugliese [1987], Ambraseys  
*et al.* [1996 a,b, 2005 a,b] and most of the worldwide attenuation relationships derived for  
magnitudes higher than 5.5 ( $b$  generally lower than 0.5); on the contrary,  $b$  values obtained  
in this work reflect, as suggested both by Frisenda *et al.* [2005] and Bindi *et al.* [2006] for  
ground models derived considering  $M_L$  up to 6.0, a strong dependence of PGHA, PGHV,  
and PGHD on magnitude (even though for the displacement there are no relations for  
comparison). In order to evaluate the distribution of residuals relative to Eq. (6) and its  
central tendency the approach of Spudich *et al.* [1999] has been followed. The residuals  
(for PGHA, PGHV, PGHD, and SA) are defined as the difference between the logarithms  
of the observed and predicted values, and they are assumed to be normally distributed.  
Spudich *et al.* [1999] defined the bias between observed and expected ground-motion  
parameters as the mean value of the residual distribution; furthermore, they also character-  
ized the residuals using basic variables such as the slope of the best fitting line through a  
subset of residuals as a function of magnitude  $M$  or distance  $R$  (slope( $M$ ) and slope( $R$ ),  
respectively). Bias and slopes obtained for PGHA, PGHV, and PGHD are shown in Fig. 7a:  
for both local magnitude and hypocentral distance no significant trend is detected, with the  
exception of a slight underestimation of predicted values for short distances and high



**FIGURE 7** a) Residuals for PGHA, PGHV, and PGHD (logarithm for observations minus logarithm of predictions) estimated by the regressions performed considering Eq. (6) and calculated versus both local magnitude and hypocentral distance (considering both rock and soil recordings). Thick dark grey lines represent bias, light grey solid and dashed lines represent the residuals best fit and the standard deviations, respectively. b) Means (solid grey lines) and standard deviations (dashed grey lines) of PGHA (logarithm for observations minus logarithm of predictions) for different magnitude/distance classes. For each class the bias is also indicated (thick light grey solid lines).

20

M. Massa et al.

(b)

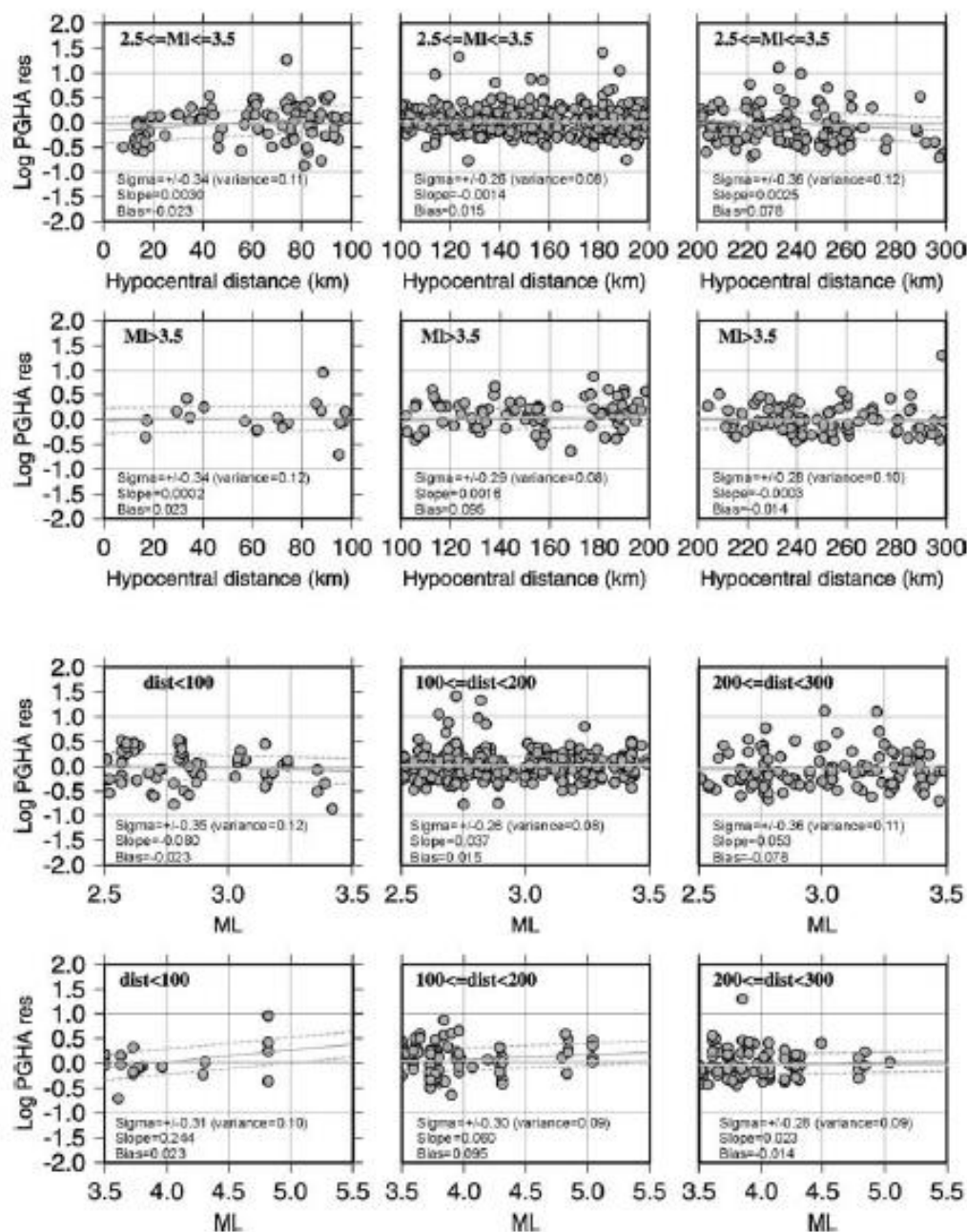
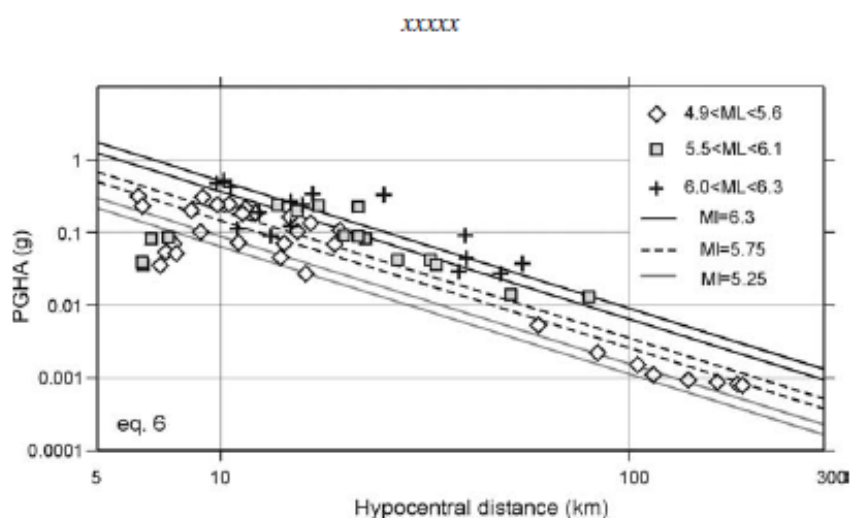


FIGURE 7 (Continued)

magnitudes. These results are confirmed by considering several sub-groups of data: the same computations have been performed in order to detect bias coming from a wrong coverage 415 of data in distance (for different magnitude values) and to check if the final results have been affected by possible effect of non-triggering stations [Bragato, 2004]. In Fig. 7b, the results obtained for  $\text{Log}_{10}$  PGHA residuals for different magnitude and distance classes are shown. Very similar results (not reported here) have been obtained both for PGHV and PGHD.





**FIGURE 8** Comparison between PGHA attenuation curves obtained using Eq. (6) (for each magnitude the higher curve represents the “site-dependent” models), calculated for magnitudes 5.25, 5.75, and 6.3, and 69 PGHA related to the main strong seismic events occurred in North Central Italy in the last 30 years (see Table 2). For each event of Table 2, the hypocentral distances have been calculated.

No comparison with other empirical attenuation curves have been reported: at present, predictive attenuation models for wide areas [Ambraseys *et al.*, 1996 a,b, 2005 a,b for European earthquakes; Sabetta and Pugliese, 1996, for Italian strong motions] have been estimated by using different independent variables (i.e., JB distance and/or epicentral distance). In Fig. 8, comparisons between 69 PGHA, relative to strong motions with MI ranging from 5.0–6.3 (see Table 2) occurred in Central-Northern Italy in the last 30 years, and our PGHA attenuation curve, plotted for magnitude 5.25, 5.75, and 6.3, are shown. Although the attenuation models described by Eq. (6) must be considered predictive for the area ranging about from 8°30'E to 13°00'E and from 44°0'N to 46°30'N for earthquakes of MI up to 5.0 and for distances higher than 15 km, they are also able to provide, on the basis of the comparison shown in Fig. 8, reliable predictions both for higher MI (up to 6.0) and lower distances (down to 10 km). For distances less than 5 km the model leads to incorrect results (no data are available); it is worth noting that in the near field the use of attenuation models presented in this study and in other studies are not able to take into account the non linear physical process in the neighborhood of the hypocentral area. Moreover, at present in Italy the lack of available accelerometric data recorded by trustworthy digital sensors at very short distances (less than 10 km) represents an unsolved problem.

## 6. Conclusions

In this article, starting from a data set of 2,126 selected horizontal velocimetric records, attenuation relationships from Central-Northern Italy earthquakes have been defined. In order to estimate the ground motion attenuation of the study area (Fig. 1), the regression procedures have been implemented in order to analyze acceleration, velocity, and displacement peak variations with respect to the local magnitude, hypocentral distance, and local site geology. The analyses have been performed by using seismic events with MI values ranging from 2.5–5.2. The attenuation relationships obtained for PGHA, PGHV, PGHD, and SA, estimated both for rock and soil sites, are represented by Eq. (6) (Table 3).



The results in Figs. 6a and 6b show a strong agreement between empirical curves and both recorded (PGHV) and derived (PGHA and PGHD) data. The main conclusions of this study can be summarized as follows:

- Concerning attenuation relationships, the validity range is very important because it is very easy to overestimate or underestimate ground shaking parameters using the attenuation relationships without distinction. In this work the validity range of the predicted values (PGHA, PGHV, PGHD, and SA) is: local magnitude up to 5.0 and hypocentral distance less than 300 km. As it is shown in Figs. 7a and 7b, Eqs. 6 (see Table 3) can lead to an underestimation of the predictive values considering magnitude greater than 5.0 recorded at short distances.
- The ground motion predictive equations obtained in this article could represent a useful tool in the hazard assessment related to the most industrialized and populated areas of Italy. These regions, although are characterised by a poor rate of seismicity, represent areas potentially able to suffer energetic and harmful seismic events (e.g., the most recent is November 24, 2004 Salò earthquake,  $M_I=5.2$  – damage of about 215 million euros);
- The reliability of attenuation models are strongly influenced by the level of accuracy in the estimation of soil coefficients; as demonstrated also in other works, soil classifications without accurate investigations performed at local scale (e.g., drillings, down-holes, bore-holes, seismic refraction tests), are not able to account for site effects (Table 3), leading to wrong results. Each region exhibited strong systematic differences in recorded accelerations at some sites that was not always related to obvious differences in surface geology. The results for specific recording sites demonstrate the complex nature of site response and clearly show the importance of including reliable site effects in the prediction of ground motion. Simple geologic classifications are believed to be appropriate for statistically characterizing site effects for relatively large, regionally mixed groups of recording sites;
- Since the distribution of records with respect to the EU8 classes (small number of records, in particular for class C) the available data set does not allow us to perform reliable regressions taking into account a subdivision of stations based on the EU8 code; in spite of this remark, the spectral analysis (in particular for the stations CTLE and CORT located in the center of the Po Plain) points out as such a classification can lead to wrong site response evaluations;
- The proposed sites discrimination based on background noise analyses allows us to perform a simple but more objective evaluation of site responses, leading to an increase of the quality of the results both in terms of fitting between real and predicted data and in term of standard deviation of the process (Figs. 6a, 6b; Table 3). Such a site discrimination allows us to satisfactorily sample the considered distance range (with respect to magnitude) both for rock and soil sites;
- Site coefficients evaluated from ambient noise measurements, fast and easy to collect, allow to spread the range of validity of the proposed attenuation relationships for any site in which the estimation of ground shaking scenarios is necessary.

## References

- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K., and Smit, P. M. [2005a] "Equations for estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration," *Bulletin of Earthquake Engineering* 3, 1–53.

- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K., and Smit, P. M. [2005b] "Equations for estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: vertical peak ground acceleration and spectral acceleration," *Bulletin of Earthquake Engineering* **3**, 55–73. 495
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., and Bommer, J. J. [1996a] "Prediction of horizontal response spectra in Europe," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **25**, 371–400.
- Ambraseys, N. N. and Simpson, K. A. [1996b] "Prediction of vertical response spectra in Europe," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **25**, 401–412. 500
- Atkinson, G. M. and Boore, D. M. [1997] "Some comparison between recent ground-motion relations," *Seismological Research Letters*, **68**, 24–40.
- Augliera, P., D'Alema, E., Marzorati, S., Bindi, D., Maistrello, M., and Gassi, A. [2004] "The 2003 data set of seismic waveforms recorded in Lombardia and Veneto regions (Northern Italy): site selection and MI scale calibration," *Abstracts of XXIX General Assembly of ESC*, Potsdam September 2004, 60. 505
- Bindi, D., Luzi, L., Pacor, F., Franceschina, G., and Castro, R. R. [2006] "Ground motion prediction from empirical attenuation relationships versus recorded data: the case of the 1997–98 Umbria-Marche (Central Italy) strong motion data-set," *Bulletin of the Seismological Society America*, in press. 510
- Bolt, B. A. and Abrahamson, N. A. [1982] "New attenuation relations for peak and expected accelerations of strong ground motion" *Bulletin of the Seismological Society America* **72**, 2307–2321.
- Bordoni P., De Rubeis V., Doumaz F., Luzi L., Margheriti L., Marra F., Moro M, Sorrentino D, and Tosi P. [2003] "Geological class map," in *terremoti probabili in Italia tra l'anno 2000 e 2030: elementi per la definizione di priorità degli interventi di riduzione del rischio sismico, Annex I, Task 3.2, 3–4 pp.*, GNDT Proj., Rome. 515
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., and Abrahamson, A. [2006] "Orientation-independent measures of ground motion," *Bulletin of the Seismological Society America* **96**(4), 1502–1511.
- Boore, D. M. and Bommer, J. J. [2005] "Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **25**, 93–115. 520
- Boore, D. M., Joyner, W. B., and Fumal, T. E. [1997] "Equation for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American earthquakes: a summary of recent works," *Seismological Research Letters* **68**(1), 128–153.
- Boore, D. M., Joyner, W. B., and Fumal, T. E. [1994] "Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American earthquakes, an interim report part 2," *U.S. Geological Survey Open File report*, 94–127. 525
- Boore, D. M., Joyner, W. B., and Fumal, T. E. [1993] "Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American earthquakes, an interim report," *U.S. Geological Survey Open File Report*, 93–509.
- Bragato, P. L. and Slejko, D. [2005] "Empirical ground-motion attenuation relations for the Eastern Alps in the magnitude range 2.5–6.3," *Bulletin of the Seismological Society America*, **95**(1), 252–276. 530
- Bragato, P. L. [2004] "Regression analysis with truncated samples and its application to ground-motion attenuation studies," *Bulletin of the Seismological Society America*, **94**(4), 1369–1378.
- Camassi, R. and Stucchi, M. [1996] "NT4.1, un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno (a parametric catalogue of damaging earthquakes in the Italian area)," *CNR-GNDT, Zingoltecnica Nuova*, 66. 535
- Campbell, K. W. [1997] "Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity and pseudo-absolute acceleration response spectra," *Seismological Research Letters*, **68**(1), 154–180. 540
- Campbell, K. W. [1989] "The difference of peak horizontal acceleration on magnitude, distance, and site effects for small-magnitude earthquakes in California and eastern North America," *Bulletin of the Seismological Society America*, **79**, 1311–1341.
- Campbell, K. W. [1985] "Strong-motion attenuation relations: a ten year prospective," *Earthquake Spectra* **1**, 759–804. 545
- Campbell, K. W. [1981] "Near source attenuation of peak horizontal acceleration," *Bulletin of the Seismological Society America*, **71**, 2011–2038.



- Castro, R. R., Pacor, F., and Petrangaro, C. [1993] "Confronto tra diversi metodi per la stima dell'attenuazione delle onde sismiche applicati nelle regioni Lombardia e Sicilia," *Atti XII Convegno, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida*, 179–192. 550
- Cornell, C. A. [1968] "Engineering seismic risk analysis," *Bulletin of the Seismological Society of America* **58**, 1583–1606.
- Costa, G., Suhadolc, P., and Panza, G. F. [1998] "The Friuli (NE Italy) accelerometric network: analysis of low-magnitude high-quality digital accelerometric data for seismological and engineering applications," *Proc. Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, May 31–June 4, published on CD-ROM, 435. 555
- Dost, B., Van Eck, T., and Haak, H. [2004] "Scaling of peak ground acceleration and peak ground velocity recorded in Netherlands," *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata* **43**(3), 153–168.
- ENV 1998, EUROCOD 8 [2002] "Design provisions for the earthquake resistance of structures. Seismic action and general requirements of structures," *CEN/TC 250*, Draft, May 2002. 560
- Frisenda, M., Massa, M., Spallarossa, D., Ferretti, G., and Eva, C. [2005] "Attenuation relationship for low magnitude earthquakes using standard seismometric records," *Journal of Earthquake Engineering*, **9**(1), 23–40.
- Fukushima Y. and Tanaka T. [1990] "A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan," *Bulletin of the Seismological Society of America* **80**, 757–783. 565
- Gruppo di lavoro [2004] "Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'ordinanza PCM 3274 del 20 Marzo 2003," Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, 65.
- Idriss, I. M. [1978] "Characteristics of earthquake ground motions," *Proc. Of ASCE Speciality Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena, California, **3**, 1151–1265. 570
- Joyner, W. B. and Boore, D. M. [1993] "Methods for regression analysis of strong-motion data," *Bulletin of the Seismological Society of America* **83**(2), 469–487.
- Joyner, W. B. and Boore, D. M. [1981] "Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California," *Bulletin of the Seismological Society of America* **71**, 2011–2038. 575
- Lee, W. B. and Anderson, J. G. [2000] "Potential for improving ground-motion relations in Southern California by incorporating various site parameters," *Bulletin of the Seismological Society of America* **90**(6b), 170–186.
- McGuire, R. K. [1977] "Seismic design spectra and mapping procedures relations," *Journal of Geotechnical Engineering Structural Dynamics* **5**, 211–234. 580
- Nakamura, Y. [1989] "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface," *Rep. Railway Tech. Res. Inst., Jpn*, **30**(1), 25–33.
- Paige, C. C. and Saunders, M. A. [1982] "LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares," *ACM Transactions on Mathematical Software*, **8**, 1. 585
- Parolai, S., Bindi, D., Baumbach, M., Grosser, H., Milkereit, C., Karakisa, S., and Zumbul, S. [2004] "Comparison of different site response technique using aftershocks of the 1999 Izmit earthquake," *Bulletin of the Seismological Society of America* **94**(3), 1096–1108.
- Pergalani, F., Compagnoni, M., and Petrini, V. [2005] "Confronti tra l'utilizzo di accelerogrammi generati e registrati nella valutazione dei fenomeni di amplificazione sismica in Lombardia," *Ingegneria Sismica*, Anno **XXII**(3), 36–51. 590
- Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., and Flannery, B. [1992] *Numerical Recipes in C: The art of Scientific Computing*, Cambridge: Cambridge University.
- Qamar, A., Wright, A., and Thomas, G. [2003] "Using local magnitude scale to determine seismic site response in the Pacific Northwest," *Abstract, Eos. Trans. AGU*, **84** (46). 595
- Reiter, L. [1990] *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insight*, New York: Columbia University Press, p. 254.
- Sabetta, F. and Pugliese, A. [1996] "Estimation of response spectra and simulation of non-stationary earthquake ground motion," *Bulletin of the Seismological Society of America* **86**, 337–352.
- Sabetta, F. and Pugliese, A. [1987] "Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records," *Bulletin of the Seismological Society of America* **77**, 1491–1513. 600



- Sadigh, K., Chang, C. Y., Egan, J. A., Makdisi, F., and Youngs, R. R. [1997] "Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data," *Seismological Research Letters* **68**(1), 180–189.
- Spallarossa, D., Bindi, D., Augliera, P., and Cattaneo, M. [2002] "An MI scale in North-western Italy," *Bulletin of the Seismological Society of America* **92**, 2205–2216. 605
- Spudich, P., Joyner, W. B., Lindh, A. G., Boore, D. M., Margaris, B. M., and Fletcher, J. B. [1999] "SEA99: a revised ground motion prediction for use in extensional tectonic regimes," *Bulletin of the Seismological Society of America* **89**, 1156–1170.
- Suhadolc P. and Chiaruttini, C. [1987] "A theoretical study of the dependence of the peak ground acceleration on source and structure parameters," In: Erdik, M. and Toksoz, M., Eds. *Strong Ground Motion Seismology*, D. Reidel Publishing Company, 143–183. 610 [1]
- Theodulidis, N. P. [1998] "Peak ground acceleration attenuation of small earthquakes; analysis of Euroseist, Greece, data," *The effects of surface geology on seismic motion; recent progress and new horizon on ESG study*; Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (Editors). Rotterdam, Balkema. 615 [2]
- Toro, G. R., Abrahamson, N. A. and Schneider, J. F. [1997] "Model of strong ground motion from earthquake in Central and Eastern North America: best estimates and uncertainties," *Seismological Research Letters* **68**(1), 41–57. [3]

## 6.7 FAGLIAZIONE SUPERFICIALE – BANCA DATI ITHACA

CODICE	ID	SISTEMA	AVERAGE STRIKE	DIP	DIP DIRECTION	LENGTH	DEPTH	LOCATION RELIABILITY	KINEMATICS	LAST ACTIVITY
90400	SORAGNA	PIACENZA - PARMA	135	40	SW	17	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
90401	S.SECONDO PARMENSE	PARMA - REGGIO	140	0	SW	17	0	250000	REVERSE	PLEISTOCENE
90402	PARMA	PIACENZA - PARMA	125	0	SW	23	0	250000	REVERSE	HISTORICAL, MIN. 3000
90403	S.PANCRAZIO PARMENSE	PIACENZA - PARMA	140	0	SW	21	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
90405	S.ILARIO D'ENZA-PARMA	PARMA - REGGIO	120	0	SSW	13	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
90406	GAZZARO - PARMA	PARMA - REGGIO	100	0	SSW	12	0	250000	REVERSE	300.000-700.000
90407	PARMA-REGGIO	PARMA - REGGIO	110	0	SSW	27	0	250000	REVERSE	300.000-700.000
90408	MONTECCHIO EMILIA	PARMA - REGGIO	110	0	SSW	16	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
90410	CAVRIAGO-REGGIO EMILIA	PARMA - REGGIO	105	20	SSW	16	0	250000	REVERSE	300.000-700.000
90414	CAVRIAGO-REGGIO EMILIA	PARMA - REGGIO	125	20	SSW	18	0	250000	REVERSE	300.000-700.000
90415	S.PANCRAZIO PARMENSE	PIACENZA - PARMA	130		SW	12	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
90416	PARMA-REGGIO	PIACENZA - PARMA	135		SSW	11	0	250000	REVERSE	LATE PLEISTOCENE
90500	TRAVERSETOLO	APPENNINIC FOOTHILL	95	45	SSW	10	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
90501	MEDESANO	APPENNINIC FOOTHILLS	140	55	SSW	18	2.5	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
90503	MONTE BOSSO	APPENNINIC FOOTHILL	85	45	SSW	20	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
90500	TRAVERSETOLO	APPENNINIC FOOTHILL	95	45	SSW	10	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
90516	PARMA-REGGIO	APPENNINIC FOOTHILL	100	0	S	5	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
90580	CASTELMOZZANO-M.VITELLO	APPENNINIC FOOTHILL	110		S	19	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
90586	QUATTRO CASTELLA-REGGIO EMILIA	APPENNINIC FOOTHILL	100		SSW	20		250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
90700	CASTELNUOVO	CASTELNUOVO	100	0	SSW	15	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
90900	NOVELLARA-REGGIO EMILIA	MODENA ARC	40	0	SE	15	0	250000	REVERSE	HISTORICAL, MIN. 3000
93723	S.POLO D'ENZA-REGGIO EMILIA	APPENNINIC FOOTHILL	75		S	14		250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
93724	VEZZANO SUL CROSTOLO-REGGIO EM	APPENNINIC FOOTHILL	105		SW	10		250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
93731	M. ROSSO	APPENNINIC FOOTHILLS		55	SSW	8	3	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
93733	T.PARMA EST	APPENNINIC FOOTHILL	240		NW	2	0	250000	NORMAL	PLEISTOCENE
93737	BEDOGNO	APPENNINIC FOOTHILL	80	55	S	12	0	250000	REVERSE	MIDDLE PLEISTOCENE
93740	MONTE CASSIO	APPENNINIC FOOTHILL	135		SW	4	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
93741	FORNOVO-MONTE CASSIO	APPENNINIC	50		ESE	8	0	250000	NORMAL	EARLY PLEISTOCENE
93742	FIUME TARO	APPENNINIC FOOTHILL	165	40	W	0	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE
93743	TORRENTE CENO	APPENNINIC FOOTHILL	115		NNE	8	0	250000	REVERSE	EARLY PLEISTOCENE

CODICE	ID	LITHO CUT	SLIP RATE	MAX CREDIBLE MAGNITUDE	SURFACE EVIDENCE	TECTONIC ENVIRON.	STIMA RISCHIO FAGL.SUP.	EVIDENCE FOR CAPABILITY
90400	SORAGNA	ALLUVIAL DEP.	0	6.5			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90401	S.SECONDO PARMENSE	ALLUVIAL DEP.	0	6.5			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90402	PARMA	ALLUVIAL DEP.	0	6.7			basso	EARTHQUAKE
90403	S.PANCRAZIO PARMENSE	ALLUVIAL DEP.	0	6.6			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90405	S.ILARIO D'ENZA-PARMA	ALLUVIAL DEP.	0	6.2			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90406	GAZZARO - PARMA	ALLUVIAL DEP.	0	6.3			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90407	PARMA-REGGIO	ALLUVIAL DEP.	0	6.7			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90408	MONTECCHIO EMILIA	ALLUVIAL DEP.	0	6.5			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90410	CAVRIAGO-REGGIO EMILIA	ALLUVIAL DEP.	0	6.6			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90414	CAVRIAGO-REGGIO EMILIA	ALLUVIAL DEP.	0	6.6			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90415	S.PANCRAZIO PARMENSE	ALLUVIAL DEP.	0	6.6			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90416	PARMA-REGGIO	ALLUVIAL DEP.	0	0		PLATE BOUNDARY	basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90500	TRAVERSETOLO	ALLUVIAL DEP.	0	6.2			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90501	MEDESANO	ALLUVIAL DEP.	0	6.5			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90503	MONTE BOSSO	ALLUVIAL DEP.	0	6.6			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90500	TRAVERSETOLO	ALLUVIAL DEP.	0	6.2			basso	DISPLACEMENTS OF MIDDLE-LATE PLEISTOCENE DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90516	PARMA-REGGIO	ALLUVIAL DEP.	0	5.9			basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90580	CASTELMOZZANO-M.VITELLO		0	6.6			basso	
90586	QUATTRO CASTELLA-REGGIO EMILIA	EVAPORITES	0	6.6			basso	
90700	CASTELNUOVO		0			PLATE BOUNDARY	basso	DISPLACEMENTS OF QUATERNARY DEPOSITS AND/OR LAND FORMS
90900	NOVELLARA-REGGIO EMILIA	ALLUVIAL DEP.	0	5.4	SUBMARINE			
93723	S.POLO D'ENZA-REGGIO EMILIA	EVAPORITES	0	6.4			basso	
93724	VEZZANO SUL CROSTOLO-REGGIO EM	EVAPORITES	0	6.2			basso	
93731	M. ROSSO	EVAPORITES	0	6.1			basso	
93733	T.PARMA EST		0	5.4			medio	
93737	BEDOGNO	EVAPORITES	0	6.3			basso	
93740	MONTE CASSIO		0	5.7			basso	
93741	FORNOVO-MONTE CASSIO		0	6.1			medio	
93742	FIUME TARO		0	5.7			basso	
93743	TORRENTE CENO		0	6.1			basso	

## 7 RIFERIMENTI

- Roberto Basili, Vera D'Amico, Carlo Meletti e Gianluca Valensise, “Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe”, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Roma.
- Abrahamson, N. A.; 1992: *Non-stationary spectral matching*, Seismol. Res. Lett. 63, 30.
- Ambraseys N.N., Simpson K.A. and Bommer J.J.; 1996: *Prediction of horizontal response spectra in Europe*. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 25, 371-400.
- Braga F.; 2008: *pericolosità sismica, azioni sismiche, progettazione prestazionale, effetti locali nella normativa tecnica italiana 2008*. Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria sismica ANIDIS. Presentazione PPT.
- Cauzzi C. and Faccioli E.; 2008: *Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records*. J. Seismol., 12, 453-475, doi 10.1007/s10950-008- 9098-y.
- DISS Working Group; 2010: *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italia.
- CFTI5Med: Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (CFTI), <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>;
- DBMI15 - Database Macrosismico Italiano, <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>;
- CPTI15 – Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015, [https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query\\_eq/](https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/);
- INGV-Centro Nazionale Terremoti, <http://cnt.rm.ingv.it/>;
- ISMD – INGV Strong Motion Data, <http://ismd.mi.ingv.it/>;
- ITHACA – ITaly HAZard from CApable faults, <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>;
- Gruppo di Lavoro MPS; 2004: *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 30 marzo 2003*. Rapporto conclusivo per il Dipartimento di Protezione Civile. INGV. Milano-Roma: 65.
- Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatis, A., McCoy, E., and Mendis, R.; 2006: *An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets*, J. Earthquake Eng. 10, 67–89.
- Halldorsson B., and Papageorgiou A.S.; 2005: *Calibration of the Specific Barrier Model to Earthquakes of Different Tectonic Regions*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 4, pp. 1276–1300, August 2005, doi: 10.1785/0120040157
- Lilhanand, K., Tseng, W.S.; 1987: *Generation of synthetic time histories compatible with multiple damping design response spectra*, SMiRT-9. Lausanne, Switzerland, K2/10, pp. 105–110.
- Lilhanand, K., Tseng, W.S.; 1988: *Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping design spectra*. In: Proceedings of the 9th WCEE, vol.II. Tokyo-Kyoto, Japan, pp. 819–824.
- Kijko A. and Graham G.; 1998: *Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: estimation of maximum regional magnitude Mmax*. Pure Appl. Geophys., 152, 413-442.



- Luzi, L., S. Hailemichael, D. Bindi D., F. Pacor, F. Mele, and F. Sabetta; 2008: *ITACA (Italian ACcelerometric Archive): A Web Portal for the Dissemination of Italian Strong-motion Data*, Seismological Research Letters, 79(5), 716–722. Doi: 10.1785/gssrl.79.5.716
- Mucciarelli M., Spinelli A., Pacor F.; 2004: *Un programma per la generazione di accelerogrammi sintetici "fisici" adeguati alla nuova normativa*, "Proceedings of XI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Genova, Italy.
- Newmark, N.M., Blume, J.A. and Kapur, K.K.; 1973: "Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants", Journal of the Power Division, Proceedings of ASCE, Vol. 99, No. PO2, pp. 287–303.
- NTC; 2008: *Spettri-NTCver.1.0.3.xls*, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (creato il 20/06/2008) ([http://www.cslp.it/cslp/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_details&gid=3280&Itemid=165](http://www.cslp.it/cslp/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=3280&Itemid=165))
- OGS – Istituto nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - Analisi 3d della pericolosità sismica dell'appennino settentrionale - Proposta di nuova zonazione sismogenetica e analisi della pericolosità sulla base di un modello 3D delle sorgenti sismiche (2017)
- Ordaz M., Aguilar A. and Arboleda J.; 2012: *CRISIS 4.2 Program for computing seismic hazard*. UNAM, Mexico City.
- Sabetta F. and Pugliese A.; 1996: *Estimation of response spectra and simulation of nonstationarity earthquake ground motion*. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 337-352.
- Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (ordinanza PCM 20.03.03, n.3274) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
- Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., G. Ameri and R. Paolucci, *Ground Motion Prediction Equations Derived from the Italian Strong Motion Database*
- John Douglas, *Ground motion prediction equations 1964-2018*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde
- van Stiphout, T., J. Zhuang, and D. Marsan (2012), *Seismicity declustering, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, doi:10.5078/corssa-52382934. Available at <http://www.corssa.org>.
- J. K. Gardner and L. Knopoff, "Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, poissonian?", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64 October 1974 No. 5
- Ezio Faccioli e Roberto Paolucci (2005), *Elementi di Sismologia applicata all'Ingegneria*, Pitagora Editrice Bologna