

Diga Casalbuono e schema idrico di connessione idraulica ai comprensori irrigui del Vallo di Diano, dell'Alto Bussento e della Piana del Sele - 1° lotto

STUDIO DI FATTIBILITÀ DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI



Cliente:



Il direttore esecuzione del contratto:

Ing. Mariano Lucio Alliegro
(Ordine Ingegneri SALERNO n. 2382)

Il responsabile unico del procedimento:

Ing. Domenico Macellaro
(Ordine Ingegneri SALERNO n. 3630)

Mandataria:



Mandati:



Il progettista:

Ing. Carlo Silvestri
(Ordine Ingegneri MILANO n. 20345A)

Codice documento:

2022.0305.002-GEO-R02

Titolo:

STUDIO SISMOTETTONICO PRELIMINARE

Rev.	Data	Redatto	Verificato	Approvato	Descrizione
2					
1	06.02.2024	G. Rusconi	C. Cremer G. Crosta	C. Silvestri	Seconda emissione
0	22.12.2023	G. Rusconi	C. Cremer G. Crosta	C. Silvestri	Prima emissione

INDICE

1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	5
2	INQUADRAMENTO SISMOTETTONICO E GEOLOGICO	6
2.1	Faglia capace e fagliazione superficiale	7
3	STUDIO PROBABILISTICO DI PERICOLOSITÀ SISMICA	13
3.1	Introduzione	13
3.1.1	Banche dati sismologiche	13
3.1.2	Banche dati geologiche e geofisiche	18
3.2	Metodologia dello studio probabilistico	21
3.2.1	Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale	22
3.3	Raccolta dati	23
3.3.1	Catalogo dei terremoti	23
3.4	Zone sismogenetiche DISS	24
3.5	Zonazione sismica ZS9	33
3.6	Intervalli di completezza	35
3.7	Legge di Gutenberg-Richter	37
3.8	GMPE	38
3.8.1	Bindi et al., 2011	39
3.8.2	Akkar et al., 2014	41
3.8.3	Boore et al., 2014	42
3.8.4	Cauzzi et al., 2015	44
3.9	R-CRISIS	46
3.10	Calcolo degli spettri di risposta orizzontali e analisi ad albero logico	47
3.11	Calcolo degli spettri di risposta verticali ed analisi ad albero logico	63
4	CONCLUSIONI	67
5	BIBLIOGRAFIA	68
6	APPENDICE	72
6.1	Spettri di risposta orizzontali – tempo di ritorno 2475 anni	72
6.2	Spettri di risposta orizzontali – tempo di ritorno 150 anni	80
6.3	Spettri di risposta verticali – tempo di ritorno 2475 anni	88

6.4 Spettri di risposta verticali – tempo di ritorno 150 anni

90

2 INQUADRAMENTO SISMOTETTONICO E GEOLOGICO

L'area di studio fa parte degli Appennini meridionali, i quali da un punto di vista tettonico sono il risultato del sollevamento avvenuto nel Neogene e Quaternario, in seguito alla subduzione della placca oceanica al di sotto della placca Adria. Sono riconosciute 4 unità tettoniche maggiori; a partire dalla più alta alla più bassa si riconoscono le seguenti unità:

- Unità interne derivanti dalla tettonizzazione del settore oceanico e crostale transizionale, le quali includono unità ofiolitiche della falda ligure e unità bacinali poste tra la Tetide e la crosta continentale Adria.
- Piattaforma appenninica formata da successioni carbonatiche.
- Unità Lagonegro e Sannio-Molise formate da successioni pelagiche e depositi flyschoidi estremamente deformati
- Unità della piattaforma Pugliese formate da carbonati di acque poco profonde e anidriti.

La deformazione orogenica iniziata nel Miocene inferiore ha coinvolto le Unità Interne, seguite dalla Piattaforma Appenninica nel Serravalliano-Tortoniano, dalle Unità Lagonegro e Sannio-Molise nel Tortoniano e dalle unità della piattaforma Pugliese nel Pliocene inferiore. A partire dalla fase post Tortoniana, i settori interni e centrali degli Appennini Meridionali hanno iniziato a registrare una fase estensionale, portando alla formazione di due cinture di deformazione coesistenti, una di tipo compressivo con inspessimento della crosta al fronte della catena e una di tipo estensionale con allungamento lungo il retro della catena.

L'area di studio fa parte del sistema di faglie normali Campania-Lucania (CLEFS), formato da tre grandi allineamenti, ognuno dei quali comprende un sistema di faglie trascorrenti coniugate NW-SE con relativi bacini associati. In particolar modo l'area di Casalbuono fa parte della porzione posta a sud della CLEFS, formata da un sistema di faglie con immersione a est (Brozzetti et al., 2011).

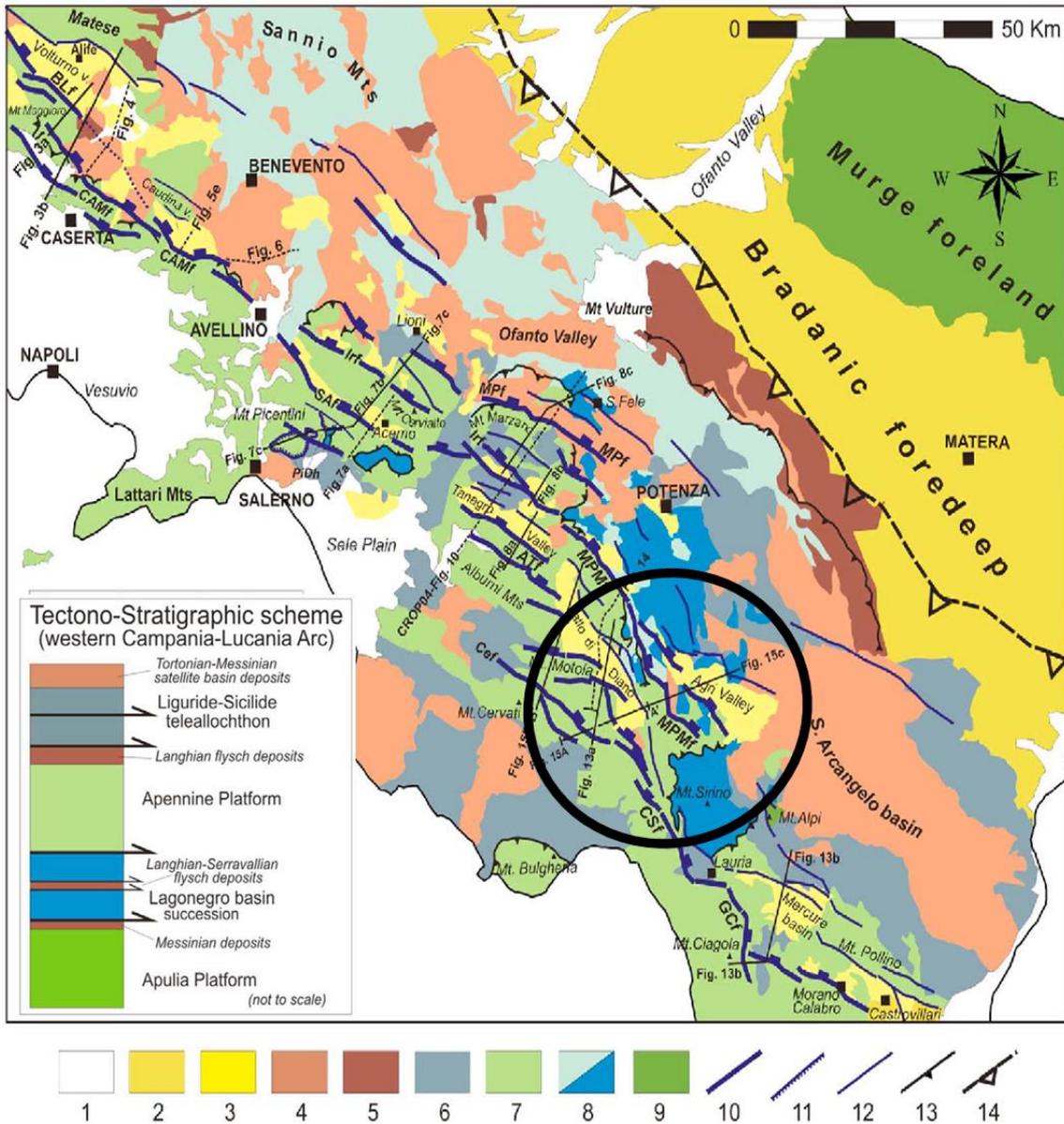


Figura 2: 1) depositi vulcanici e alluvionali recenti (Pleistocene medio-olocene); 2) depositi continentali dei bacini intramontani (Pleistocene-olocene); 3) depositi tardo orogenici (tardo pliocene -pleistocene inferiore); 4) depositi sinorogenici (miocene inferiore -pleistocene inferiore); 5) depositi di avanfossa (langhiniano-tortoniano); 6) unità alloctone dei domini liguri (giurassico medio- miocene inferiore); 7) carbonati della piattaforma appenninica (tardo triassico-miocene inferiore); 8) depositi marnosi e calcareo silicei del bacino Lagonegro (triassico medio- miocene medio); 9) unità carbonatiche della piattaforma pugliese (giurassico-tardo miocene); 10) faglie principali con immersione ad est della CLEFS; 11) traccia superficiale del distacco a basso angolo dei monti picentini; **12) faglie normali quaternarie con immersione ad ovest**; 13) faglie inverse; 14) fronte sepolto della catena appenninica. (Brozzetti et al., 2011)

2.1 Faglia capace e fagliazione superficiale

Nell'area di interesse per il presente studio è segnalata la presenza di una faglia capace, ovvero la faglia Casalbuno-Monte Cervaro, definita sulla base dello studio di Bronzetti et al. (2011). La traccia di tale faglia, come mostrata nella seguente figura, è stata fornita dal dott. Di Manna (ISPRA), sulla base dell'aggiornamento del database ITHACA previsto nei prossimi mesi. Tale struttura presenta una direzione (strike) di 160°, con

immersione a WSW ed un cinematismo normale. Non vi sono informazioni relative all'inclinazione, profondità, alla magnitudo massima associata ad essa e ai parametri di scorrimento; l'ultima attività registrata è riferibile al Pleistocene. Nel database ITHACA alla faglia di Casalbuono è associata una bassa affidabilità ed è attribuito un basso grado di studio.

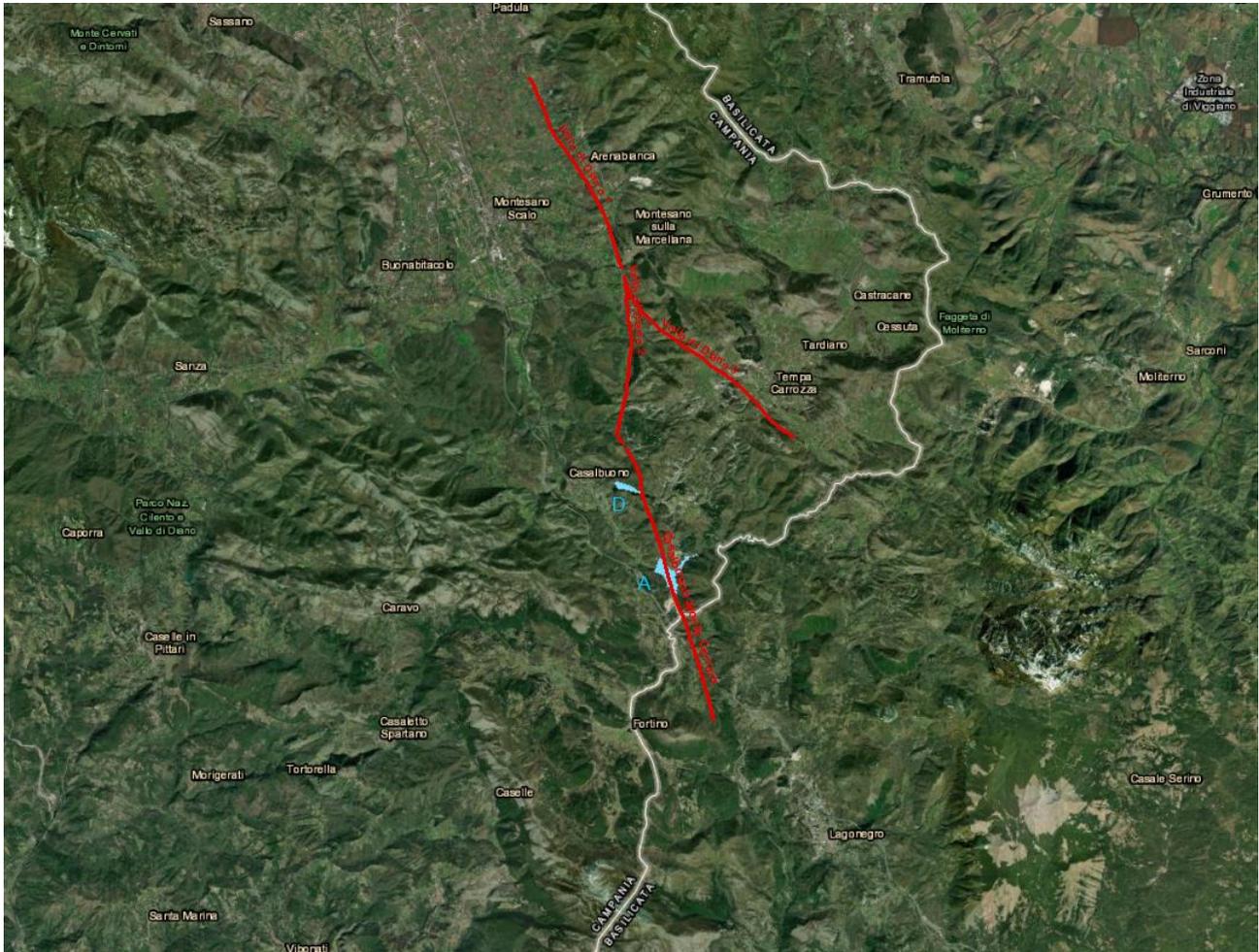


Figura 3: Traccia della faglia capace presente nell'area di Casalbuono come da aggiornamento database ITHACA (aggiornamento in corso) con indicazione della posizione degli invasi A e D

Come definito nel lavoro di Brozzetti et al. (2011) l'area fa parte della porzione sud del sistema di faglie normali Campania-Lucania (CLEFS), costituita da un set di faglie ad echelon che dislocano le creste dei monti posti ad ovest del Vallo di Diano, con una strike N120°E. Le analisi strutturali confermano la presenza di tre sistemi maggiori di faglie di tipo estensionale, che causano il progressivo abbassamento verso nord-est della piattaforma appenninica.

Nella sezione 13a e 15c della figura 2 (Brozzetti et al., 2011) è schematizzato il sistema ad horst e graben, che evidenzia il ruolo principale delle faglie normali immergenti ad est sulle faglie antitetiche immergenti a sud-ovest.

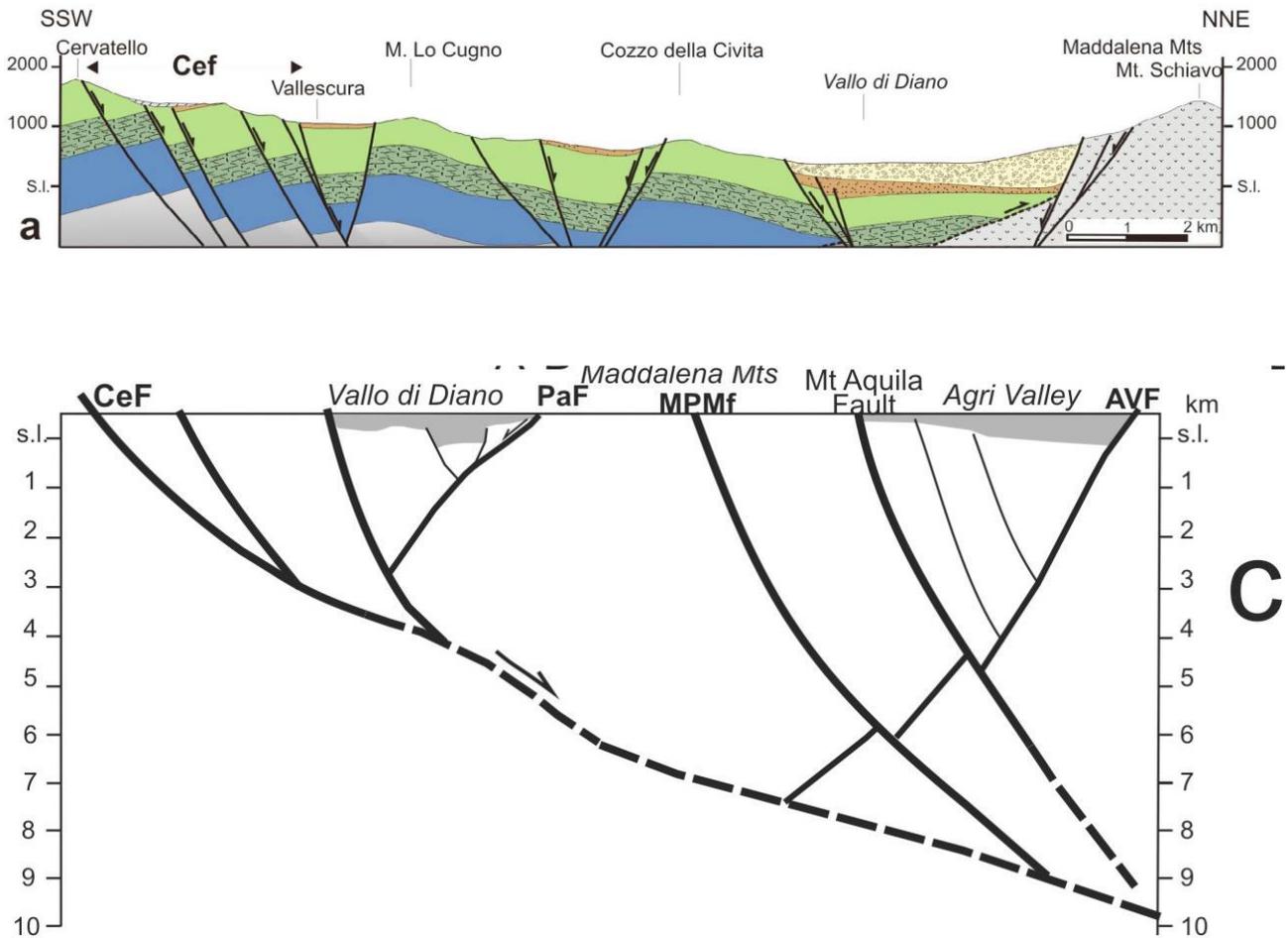


Figura 4: Sezione 13a e 15 c da Brozzetti et al. (2011). Nello schema è rappresentato il sistema ad Horst e graben che caratterizza l'area sud del Vallo di Diano.

Il sistema di faglie normali Campania-Lucania (CLEFS) ha un forte controllo sulla distribuzione della sismicità nell'area della Campania-Lucania. La porzione ovest presenta una scarsa attività sismica, con terremoti superficiali (profondità < 15 km) a bassa magnitudo. La porzione ad est presenta una sismicità alta, caratterizzata da terremoti nella crosta superiore generati da un sistema di faglie normali e transtensionali con direzione NW-SE. In quest'area prevalgono terremoti con magnitudo < 5.5, tuttavia sono stati registrati terremoti ad alta magnitudo.

Nel progetto SAPTEX (Southern Apennine Tomographic Experiment) realizzato da INGV, è stata indagata l'area dall'Irpinia fino alla valle di Agri attraverso un database di eventi localizzati e selezionati. Dalle analisi sono stati confermati: un tipo di cinematiso estensionale concentrato nella crosta superiore, l'occorrenza preferenziale di sequenze microsismiche lungo le aree sorgenti e l'approfondimento degli ipocentri da SW verso NE.

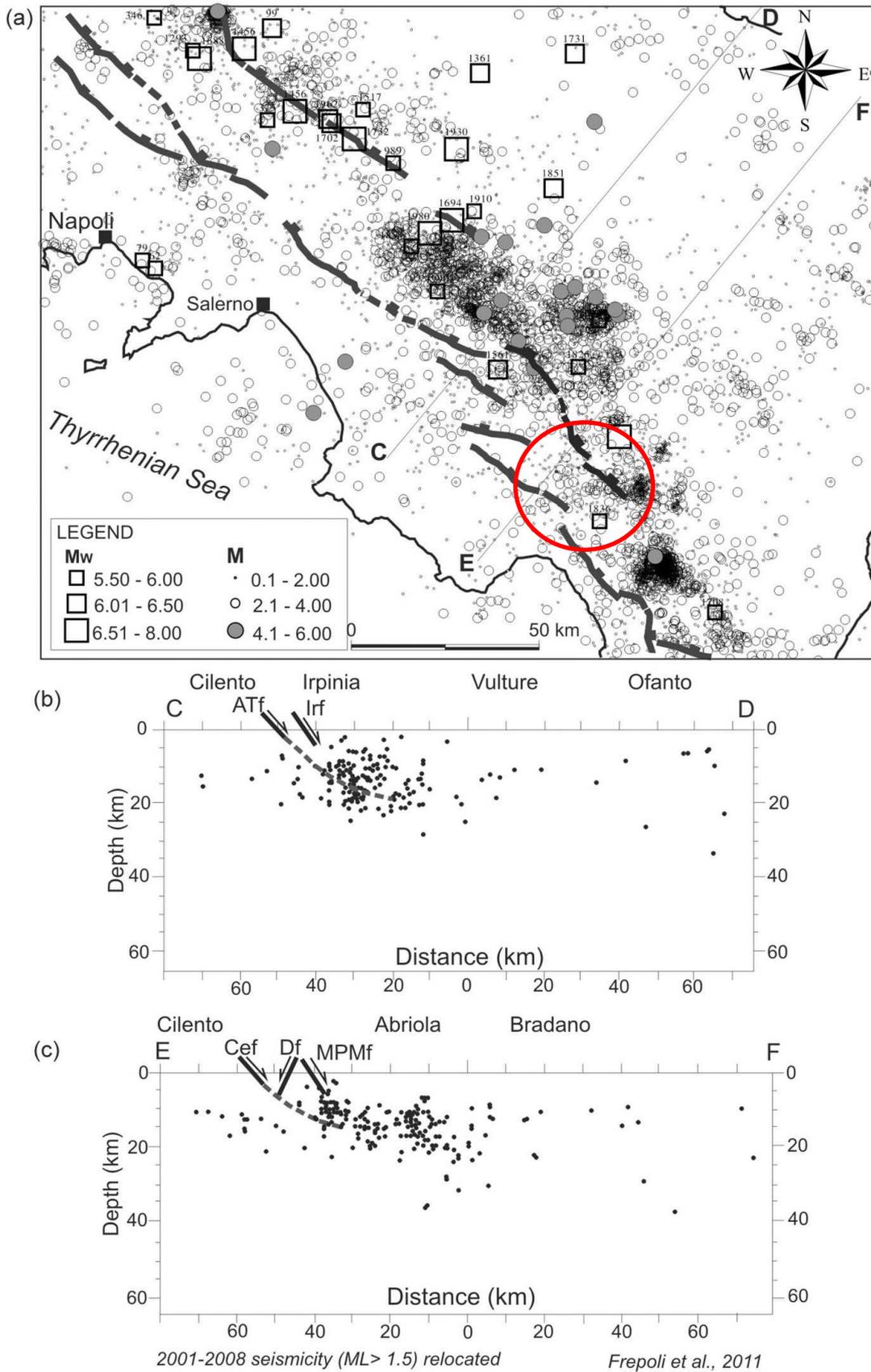


Figura 5: Mappa della relazione tra CLEFS (sistema di faglie normali Campania-Lucania) e sismicità. Il posizionamento degli epicentri dei terremoti strumentali proviene dal catalogo della sismicità italiana del periodo 1981-2002 [Castello et al., 2006]; gli epicentri di terremoti storici sono invece tratti da INGV [2004]

Nell'area di studio, la trattazione delle faglie superficiali non presenta un alto livello di approfondimento, di fatto non esistono ad oggi delle linee guida redatte in relazione alla progettazione ed esercizio di opere ed infrastrutture critiche. I principali documenti che trattano di tale argomento sono il "*Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams*" pubblicato dal *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) nel 2005, dove il tema della fagliazione superficiale è comunque trattato in maniera poco approfondita. E' inoltre disponibile la pubblicazione sul tema della pericolosità sismica in siti con centrali nucleari prodotta dalla *International Atomic Energy Agency* (IAEA)(2000). Anche in questo caso il tema è trattato in un'ottica generale senza indicazioni specifiche. In Italia il tema delle faglie capaci è discusso nel documento di "Protezione Civile in materia di Microzonazione Sismica", creato ai fini della progettazione urbanistica e non ai fini di analisi di pericolosità per fagliazione superficiale associata a grandi infrastrutture. La fagliazione superficiale in Italia è stata affrontata in seguito al terremoto dell'Irpinia del 1980 e a partire dal 2000 sono stati definiti e ricercati i motivi che rendono di difficile individuazione lo studio e la ricerca di evidenze di fagliazione superficiale. Secondo Valensise e Pantosti (2001b) le ragioni di tali difficoltà per l'area appenninica sono legate alla giovane età della catena appenninica, al tempo necessario affinché le faglie attive possano lasciare traccia e manifestarsi in modo fragile, alla presenza di numerose faglie cieche.

Il database nazionale nel quale sono registrate le faglie superficiali è il database ITHACA, sviluppato da ISPRA, nel quale è definita come faglia capace una faglia che sicuramente ha causato deformazione in superficie o in prossimità di essa, nell'intervallo Pleistocene superiore – Presente, ovvero in un intervallo di tempo < 125 ka (Pleistocene Superiore).

Nel dettaglio ITHACA definisce faglia capace:

- Una faglia è definita capace quando ritenuta in grado di produrre, entro un intervallo di tempo di interesse per la società, una deformazione/dislocazione della superficie del terreno, e/o in prossimità di essa.
- La deformazione attesa può essere sia una dislocazione ben definita lungo un piano di rottura (*fault displacement/offset*) che una deformazione distribuita (*warping*).
- La riattivazione attesa viene definita in funzione del regime tettonico in atto, rispetto al quale deve essere compatibile. Elementi secondari possono però mostrare rotture "anomale", ad esempio movimenti compressivi in un ambiente distensivo, a causa di geometrie locali delle strutture riattivate.

In letteratura la fagliazione superficiale è stata affrontata attraverso la *Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis* (PFDHA) sviluppato nel 2003. In tale documento vengono utilizzati due livelli differenti; il primo è basato sull'utilizzo di relazioni di "attenuazione della dislocazione", mentre il secondo è basato sulle caratteristiche della faglia oggetto di studio. Tuttavia, come definito nel paragrafo 2.5 Criteri di stima della Surface Faulting Hazard nelle Linee-guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe, "*Nel caso della fagliazione superficiale non esiste - o comunque è quasi impossibile definire - una distribuzione di valori di dislocazione che sia statisticamente significativa, il che rende inaffidabile le stime probabilistiche che si possono ottenere con il PFDHA. A queste critiche si può aggiungere l'osservazione che il PFDHA richiede una quantità e una qualità dei dati di ingresso che difficilmente si riesce ad ottenere per le faglie italiane, per tutte le ragioni e incertezze che sono state descritte in precedenza*".

Attraverso le informazioni reperibili sul database è possibile valutare in che direzione varia le probabilità di osservare fagliazione superficiale. Nelle linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe sono definiti i parametri da considerare, quali: orientazione della faglia, cinematica, geometria tridimensionale della faglia (larghezza, profondità minima e pendenza del piano di faglia) desumibile dal database DISS (Database of Individual Seismogenic Sources versione 3.3.0, 2021), distribuzione dello *slip rate* lungo il piano di faglia, posizione della diga rispetto alla sorgente sismogenetica e magnitudo massima.

Comparando il database ITHACA con il database DISS, al fine di ricostruire la geometria tridimensionale della faglia e ricostruire il campo degli sforzi rispetto all'orientazione della faglia, si osserva corrispondenza con l'orientazione e cinematiso della faglia capace e le sorgenti sismogenetiche del DISS 3.3.0. Rimendiello-Mormanno ed Irpinia-Val d'Agri (par.3.4).

Un elemento fondamentale da considerare è la posizione della diga rispetto al piano di faglia. Per strutture posizionate sull'*hanging wall*, come nel caso della diga di Casalbuono, aumenta la probabilità di fagliazione secondaria. Inoltre, un aspetto da considerare è l'orientamento della faglia rispetto alla struttura in analisi; questo è uno degli elementi che influisce significativamente sulla rottura o danneggiamento dell'opera. Come descritto nelle linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe, il caso peggiore si verifica quando la struttura tettonica è orientata perpendicolarmente all'opera, poiché potrebbe essere tagliata bruscamente (caso della diga di Shihkang, Taiwan, fortemente danneggiata dal Chi Chi earthquake nel 1999). Una condizione di parallelismo potrebbe ridurre in maniera sostanziale l'impatto di un forte terremoto.

Date le incertezze relative alle caratteristiche, al posizionamento della faglia ed alle attività legate ad essa, si ritiene necessario lo sviluppo di uno studio specializzato per valutare la presenza di evidenze di fagliazione superficiale legate da attività cosismica primaria o secondaria.

Tramite applicazione dell'approccio sviluppato da vari autori sarebbe inoltre possibile valutare, sulla base dei dati disponibili, la probabilità di fagliazione secondaria così come quella di osservare determinati spostamenti massimi in funzione della magnitudo attesa.

3 STUDIO PROBABILISTICO DI PERICOLOSITÀ SISMICA

3.1 Introduzione

La pericolosità sismica è definita come la stima dello scuotimento atteso in una determinata area in un certo periodo di tempo. Nel presente studio la pericolosità sismica del sito sarà affrontata secondo un approccio probabilistico, tramite il quale è definito un livello di scuotimento entro una determinata probabilità di verificarsi e di essere superato entro un prefissato intervallo di tempo. Lo studio e la caratterizzazione sismotettonica dell'area sono avvenuti a partire dalla consultazione di dataset esistenti sul territorio nazionale e della letteratura disponibile.

Come elencato nelle “*Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe (INGV)*”, sono state consultate le banche dati sismologiche (CPTI15, DMBI15, CFTI5MED, ISIDe) e le banche dati geologiche e geofisiche (DISS e ITHACA), create con lo scopo di fornire una base dati su cui sia possibile costruire la caratterizzazione sismogenetica di una determinata area.

Ai fini dello studio sismotettonico di un'area è necessario individuare e definire delle zone sismogenetiche e delle strutture che generano terremoti. In particolar modo nel presente elaborato sono state selezionate le zone sismogenetiche con le loro relative caratteristiche in termini di dimensione, geometria, orientazione e cinematiso principale. Sono stati raccolti dati derivanti da evidenze geologiche, tettoniche e dalla presenza di terremoti e/o strutture raccolte nei principali database nazionali. L'analisi e lo studio probabilistico sono stati effettuati considerando come base di partenza la metodologia utilizzata per l'individuazione delle ZS9. Per lo svolgimento dello studio e l'analisi di pericolosità è stato utilizzato il software open-source R-CRISIS v20 (Ordaz, 1986) e giunto alla sua sesta edizione nel 2020 (<http://www.r-crisis.com/>).

3.1.1 Banche dati sismologiche

Per la caratterizzazione sismica dell'area sono state consultate diverse banche dati gestite dall'INGV. È stato consultato il portale INGV-Centro Nazionale dei Terremoti, che ha sostituito il precedente ISIDe a partire dal 1 marzo 2017, nel quale sono riportati gli eventi sismici recenti rilevati strumentalmente.

Sono stati individuati 6332 sismi con magnitudo > 2 registrati a partire dal 1985 fino al 1 agosto 2023 entro un raggio di 100 km dall'area di studio; i sismi aventi magnitudo maggiore di 4 risultano essere 44, con una magnitudo massima di 5.4 nell'area del Golfo di Policastro.

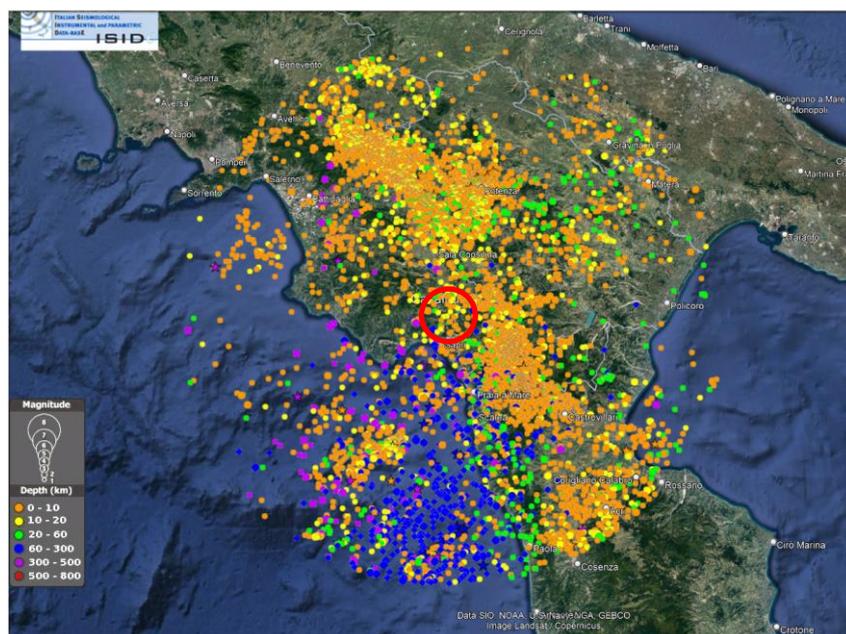


Figura 6: Terremoti registrati nel periodo 1985-2021 in un raggio di 100 km dall'area di studio (<http://cnt.rm.ingv.it>). Nel cerchio rosso è indicata l'area di studio.

Tabella 1: Sismi con $M > 4$ registrati nel periodo 1985-2023 in un raggio di 100 km dall'area di studio

Magnitudo	Data	Localizzazione evento	Distanza (km)
4	08/08/1995	10 km N Corigliano Calabro (CS)	91
4	30/03/2000	2 km NW Rose (CS)	104
4	03/09/2004	2 km S Ruoti (PZ)	52
4.1	29/10/2016	3 km NE Aieta (CS)	33
4.3	21/09/2019	3 km NE Cicerale (SA)	48
5	09/09/1998	3 km NW Rotonda (PZ)	40
4	14/12/2014	3 km SE Albanella (SA)	53
5.2	25/10/2012	3 km SE Mormanno (CS)	48
4.2	23/07/1986	3 km W Potenza (PZ)	46
4	29/05/1995	4 km E San Martino d'Agri (PZ)	35
4.5	26/05/1991	4 km N Potenza (PZ)	50
4.4	05/05/1990	4 km N Potenza (PZ)	51
4.5	03/04/1996	4 km NE Balvano (PZ)	53
4.3	28/05/2012	4 km NW Morano Calabro (CS)	53
4.3	24/02/2020	4 km W Castiglione Cosentino (CS)	107
4.1	28/08/1990	5 km NW Vaglio Basilicata (PZ)	55
4.1	18/04/2002	5 km SW Picerno (PZ)	43
4.6	01/12/2007	6 km NE Aieta (CS)	31
5	05/05/1990	6 km NE Potenza (PZ)	52

4	06/06/2014	7 km NW Morano Calabro (CS)	50
5.2	01/05/2023	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	97
4.6	16/10/2012	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	62
4.4	08/01/1986	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	101
4.4	16/10/2015	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	89
4.3	11/08/2017	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	105
4.1	08/09/1986	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	90
4.1	21/03/1994	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	62
4	15/08/1986	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	92
4	02/08/2015	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	66
4	16/02/2018	Costa Calabria nord-occidentale (Cosenza)	51
4.2	03/03/2004	Costa Cilentana (Salerno)	61
4	04/11/2011	Costa Cilentana (Salerno)	72
4.5	22/06/2006	Costa Ionica Cosentina (Cosenza)	98
5.4	31/10/2022	Golfo di Policastro (Salerno, Potenza)	39
4.4	22/02/2007	Golfo di Policastro (Salerno, Potenza)	29
4.1	06/01/2016	Golfo di Policastro (Salerno, Potenza)	44
4.6	14/11/2003	Golfo di Salerno (Salerno)	96
4.4	25/10/2019	Tirreno Meridionale (MARE)	63
4.3	02/09/2013	Tirreno Meridionale (MARE)	82
4.2	09/09/2019	Tirreno Meridionale (MARE)	101
4.1	28/08/1992	Tirreno Meridionale (MARE)	75
4.1	23/11/2009	Tirreno Meridionale (MARE)	76
4	29/12/2022	Tirreno Meridionale (MARE)	104
4	29/12/2022	Tirreno Meridionale (MARE)	104

Al fine di raccogliere informazioni riguardo la sismicità storica dell'area sono state consultate le banche-dati disponibili sul territorio nazionale. Il Catalogo dei forti terremoti in Italia (CFTI5Med) è una raccolta di grandi terremoti italiani realizzato attraverso la collaborazione tra INGV e SGA pubblicato nel 1995 (Boschi et al. 1995) e integrato ed innovato nel 2018 con la nuova versione CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018; Guidoboni et al., 2019).

Di seguito si riportano i grandi terremoti storici verificatisi in prossimità dell'area di studio:

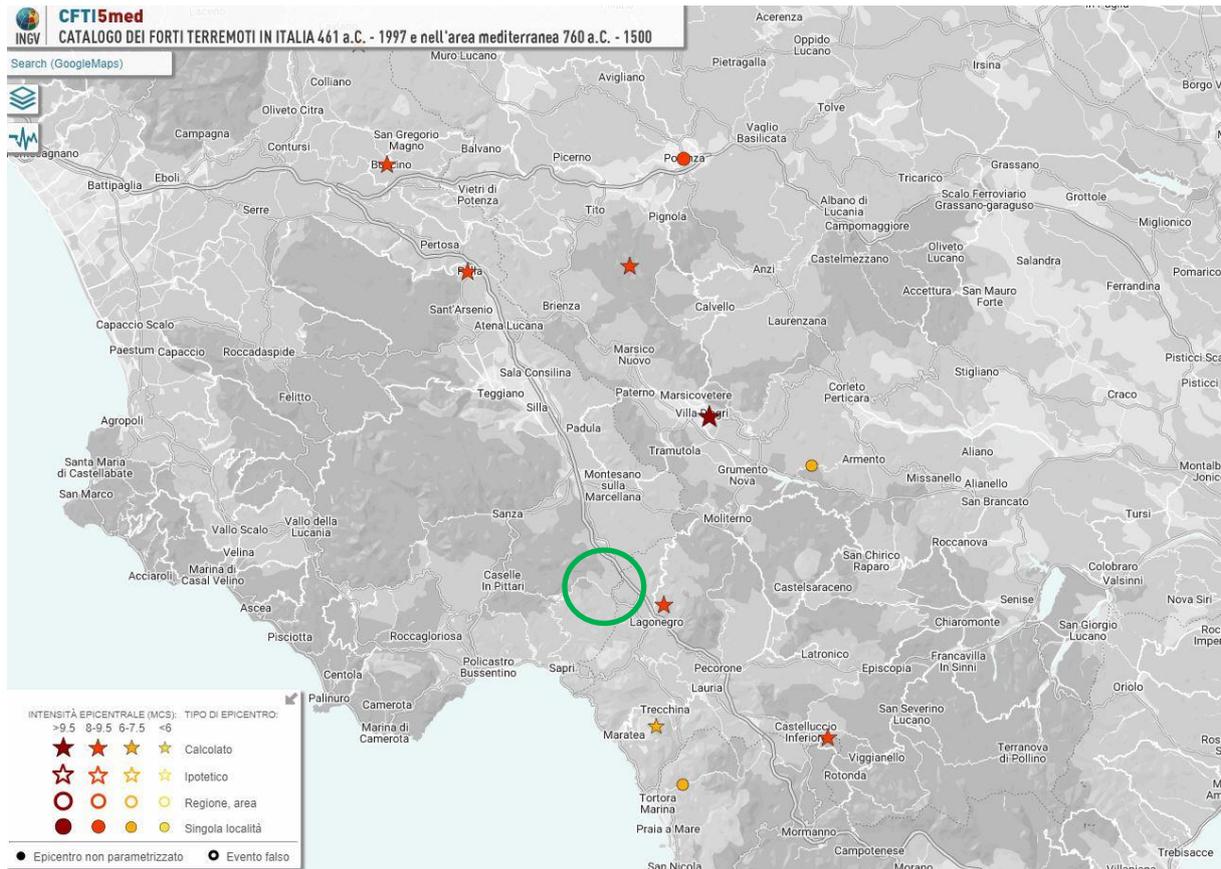


Figura 7: Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (CFTI5) (<http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>); in verde è indicata l'area di studio.

I terremoti storici con intensità massima registrati nelle vicinanze dell'area di studio (cerchio verde nella figura precedente) sono quelli del 1857, con una magnitudo equivalente di 7 (area di Mariscovetere) ad una distanza di circa 17 km dall'area di studio, e quello del 1836, con una magnitudo equivalente di 6 (area di Lagonegro) ad una distanza di circa 8 km dall'area di studio.

È stato esaminato il Database Macrosismico Italiano (DBMI15) (Locati et al., 2021) che contiene i dati di intensità macrosismica, il cui scopo principale è quello di fornire una base dati per la determinazione dei parametri epicentrali dei terremoti (localizzazione e stima della magnitudo) per la compilazione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) (Rovida et al., 2020; Rovida et al., 2021). Questi dati consentono di elaborare le storie sismiche in diverse località, espresse in termini di gradi di intensità macrosismica.

Per il sito in esame è stata utilizzata la storia sismica del comune di Casalbuono, sono dunque raccolti i sismi avvenuti a partire dall'anno 1000 d.C., in cui sono segnalate l'intensità massima e la relativa Magnitudo all'epicentro.

Di seguito si riportano in tabella i sismi storici relativi al comune di Casalbuono. Sono riportati 20 terremoti, 10 dei quali con Magnitudo maggiore di 5.

Tabella 2: Sismi storici riportati entro il catalogo DMBI15 relativi alla serie storica del comune di Casalbuono

Intensità	Data	EpicentralArea	Latitudine	Longitudine	Magnitudo
8	20 11 1836	Appennino lucano	40.142	15.776	5.86
6	16 12 1857	Basilicata	40.352	15.842	7.12
2-3	28 5 1894	Pollino	39.995	16.036	5.01
4	8 9 1905	Calabria centrale	38.811	16	6.95
5	23 7 1930	Irpinia	41.068	15.318	6.67
NF	3 7 1955	Golfo di Policastro	40.093	15.595	4.19
4	21 3 1982	Golfo di Policastro	39.841	15.747	5.23
4	5 1 1984	Lagonegrese	40.087	15.719	4.09
5-6	12 1 1988	Cilento	40.308	15.461	4.52
3	29 5 1989	Appennino lucano	40.542	15.733	4.34
4	5 5 1990	Potentino	40.738	15.741	5.77
3-4	26 5 1991	Potentino	40.689	15.821	5.08
NF	3 4 1996	Irpinia	40.661	15.454	4.9
NF	5 6 1996	Val d'Agri	40.274	15.884	3.3
NF	26 3 1998	Appennino umbro-marchigiano	43.145	12.809	5.26
NF	8 11 1998	Appennino lucano	40.049	15.844	3.8
NF	17 5 2001	Tirreno meridionale	38.959	15.529	4.97
NF	18 4 2002	Appennino lucano	40.584	15.546	4.34
3-4	3 3 2004	Tirreno meridionale	39.85	15.235	4.55
NF	5 5 2004	Isole Eolie	38.547	14.792	5.42



Figura 8: Sismi storici relativi al comune di Casalbuono (DBMI15-CPTI15) (<https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>)

Il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) racchiude al suo interno i dati parametrici, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4 nella finestra temporale 1000-2020. La versione CPTI15 rappresenta la quarta versione del catalogo, preceduta dal catalogo CPTI99 pubblicato nel 1999 realizzato con lo scopo di omogenizzare l'analisi dei parametri relativi a tutti i terremoti e raccogliere i dati derivati da diversi cataloghi.

La seconda versione del catalogo CPTI04 è stata realizzata nel 2004 ed è stata utilizzata per la realizzazione della Mappa di Pericolosità Sismica italiana MPS04. La terza versione CPTI11 è stata pubblicata nel 2011, nel quale è stato realizzato un aggiornamento dei dati macrosismici e strumentali. I dettagli relativi al presente catalogo sono riportati nel paragrafo 3.3.1.

3.1.2 Banche dati geologiche e geofisiche

Le banche dati geologiche-geofisiche contengono al loro interno la raccolta di dati e strutture che potrebbero generare dei terremoti.

Si distinguono due diversi database: il primo *DISS* (Database of Individual Seismogenic Source) realizzato da INGV tra il 1997 e il 2000 contribuisce a definire la base per la valutazione della pericolosità da scuotimento, in termini di definizione di magnitudo attesa e della distribuzione dei terremoti; la seconda banca dati *ITHACA* (*ITaly Hazard from Capable faults*) realizzata da ISPRA nel 2000, nel quale sono censite le faglie attive in grado di dare spostamenti superficiali.

Nella seguente immagine sono riassunte le principali caratteristiche delle due raccolte.

	ITHACA	DISS
Obiettivo primario	Censire e parametrizzare le faglie attive e capaci presenti sul territorio nazionale	Censire e parametrizzare le sorgenti sismogenetiche presenti sul territorio nazionale
Contenuto informativo	E' una compilazione di dati originali e di dati pubblicati (non necessariamente rivisti)	Contiene solo ipotesi di sorgente sismogenetica certificate dagli autori del <i>database</i> stesso
Completezza	Non necessariamente completa: sono mappate solo faglie di superficie e in terraferma (salvo eccezioni)	Non <i>completa</i> attraverso le <i>Individual Sources</i> . Punta ad essere <i>completa</i> attraverso le <i>Composite Sources</i>
Tipo di rappresentazione	Bidimensionale (di dettaglio)	Tridimensionale (semplificata)
Rapporti con sismicità	Occasionalmente associa faglie a terremoti	Associa faglie a terremoti attraverso le <i>Individual Sources</i>
Utilizzo	Può essere base di partenza per studi di microzonazione e indagini di geologia di superficie, ma non per analisi di scuotimento	Serve per analisi di scuotimento o per modelli tettonici e geodinamici, ma non può essere base di partenza per microzonazione sismica
Accessibilità	Via Web-GIS e servizi WFS	Via Web-GIS e Google Earth (servizi WFS in corso di implementazione)
Ultima versione /indirizzo web	Aggiornamenti semestrali non agganciati a un numero di versione - http://sgi.isprambiente.it/geoportal/catalog/content/project/ithaca.page	Aggiornamenti periodici a cadenze non regolari – Versione attuale: 3.2.0 del giugno 2015. http://diss.rm.ingv.it/diss/

Figura 9: Caratteristiche principali delle banche dati geologiche e geofisiche DISS e ITHACA (tratto dalla documentazione Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe)

Il database DISS (*Database of individual Seismogenic Sources*) dell'INGV (allora APAT) fornisce informazioni sulla pericolosità da scuotimento. Nel database sono individuate le Sorgenti Sismogeniche Individuali (ISS), ideate per descrivere nel dettaglio faglie responsabili di forti terremoti già avvenuti e le Sorgenti Sismogeniche Composite (CSS), definite come struttura dedotta basata su dati geologici della superficie e del sottosuolo regionali. Le CSS rispetto alle ISS presentano una minore accuratezza sia nella loro descrizione spaziale che nella parametrizzazione. Per ciascuna zona sismogenica contenuta nel database sono definite la geometria nelle tre dimensioni, la cinematica delle faglie e dei sistemi di faglia, ed infine la massima magnitudo attesa. Nel DISS sono contenute unicamente le principali strutture tettoniche, che possono generare terremoti.

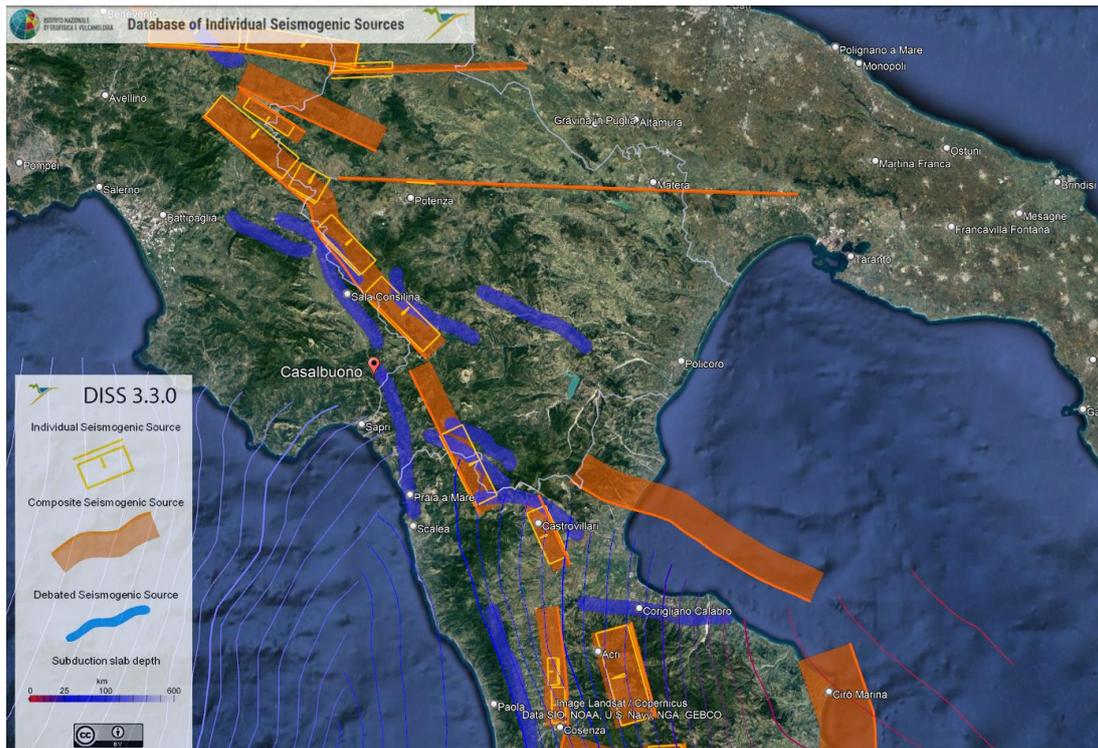


Figura 10: Estratto dal database DISS (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>)

La seconda banca-dati geologica e geofisica è costituita dal database ITHACA (*ITaly Hazard from Capable faults*) gestita da ISPRA (in precedenza APAT) nel quale sono raccolte le faglie attive che possono partecipare a terremoti, sia come sorgente primaria e sia come elementi rimobilizzati passivamente. Il database ITHACA è costruito al fine della valutazione del *surface faulting hazard*, ovvero la pericolosità da fagliazione superficiale; la raccolta fornisce informazioni delle strutture tettoniche superficiali e in particolar modo sulle faglie capaci, definite come faglie attive che possono determinare una deformazione in superficie o in prossimità di essa. Questo database per sua stessa natura risulta essere “incompleto” poiché non sono riportate le faglie cieche e le faglie in mare.

I dati delle faglie capaci sono stati forniti per le vie brevi da ISPRA; si tratta di dati che saranno pubblicati nei prossimi mesi



Figura 11: Faglie Capaci poste in prossimità dell'area, fornite da ISPRA (in corso di pubblicazione)

3.2 Metodologia dello studio probabilistico

Lo studio probabilistico della sismicità è stato realizzato utilizzando un approccio alla Cornell (Cornell, 1968; Bender e Perkins, 1987) già utilizzato in altre iniziative nazionali in Europa e nel mondo, nonché nella redazione della carta della pericolosità sismica MPS04 d'Italia (Stucchi et al, 2004). L'approccio si articola principalmente in 5 fasi:

- **Fase 1:** Identificazione e descrizione delle sorgenti sismiche, rappresentate e definite attraverso delle zone sismogenetiche.
- **Fase 2:** Definizione dei modelli di ricorrenza della magnitudo per ciascuna sorgente attraverso relazioni magnitudo-frequenza (Gutenberg-Richter)
- **Fase 3:** Stima della probabilità di superare un certo scuotimento del suolo, attraverso relazioni di attenuazione (GMPE)
- **Fase 4:** Calcolo della curva di pericolosità e dello spettro di risposta derivato dalla combinazione e dall'analisi di tutte le zone sorgenti in corrispondenza del punto indagato
- **Fase 5:** Introduzione della componente di ricorrenza, considerando diversi tempi di ritorno

In particolare, è stato adottato un approccio ad albero logico (*logic tree*) finalizzato all'esplorazione delle incertezze epistemiche riferibili a:

- Determinazione degli intervalli di completezza dei cataloghi;
- Determinazione dei tassi di sismicità;
- Tipo di relazione di attenuazione del moto sismico e attribuzione areale delle relazioni a carattere regionale.

Nel presente documento sono definite le sorgenti sismogenetiche costruite da aree e poligoni, definiti sulla base di evidenze geologiche e tettoniche, secondo parametri geometrici e parametrici, e dalla raccolta dei

terremoti registrati in cataloghi macrosismici e strumentali. In particolar modo, come illustrato nel seguito, il catalogo storico utilizzato per l'analisi è il catalogo CPTI15 v4.0, il più aggiornato ad oggi disponibile, pubblicato nel 2021. Per la zonazione sismogenetica è stato utilizzato il catalogo DISS 3.3.0, pubblicato nel dicembre 2021 ed il catalogo ZS9.

Nell'approccio probabilistico per la definizione della pericolosità sismica è richiesta la definizione dei tassi di sismicità tramite una relazione magnitudo-frequenza. La stima dei tassi da associare a ciascuna zona sorgente è attribuita attraverso la parametrizzazione derivata dai cataloghi di terremoti, sui quali deve essere effettuata una valutazione di completezza, i quali variano in funzione della magnitudo e dell'area geografica. La descrizione della completezza di un catalogo è necessaria al fine di ottenere i tassi di sismicità, che sono definiti come la frequenza di eventi sismici con una determinata magnitudo. Nella pratica il numero di magnitudo per ciascuna classe di magnitudo (avente un passo pari a 0.23 nel presente studio) è normalizzata rispetto alla finestra temporale di completezza. I tassi di sismicità sono infine utilizzati per ottenere una distribuzione di magnitudo-frequenza per ciascuna zona sismogenica secondo la legge di Gutenberg –Richter.

Dopo aver definito e parametrizzato tutte le sorgenti, la pericolosità di scuotimento del suolo è descritta attraverso le relazioni empiriche GMPE (*Ground Motion Prediction Equation*), utilizzate al fine di prevedere lo scuotimento atteso da una zona sorgente in funzione della magnitudo e della distanza della sorgente. In letteratura esistono molteplici equazioni GMPE, proposte per diverse aree geografiche, contesti geodinamici, intervalli di magnitudo e range di distanza.

Al fine di gestire ed esplorare l'incertezza legata all'utilizzo di modelli di attenuazione empirici, è utilizzato un approccio ad albero logico. Un albero logico (*logic tree*) è costruito come una struttura ramificata. Alla radice dell'albero ci sono diversi rami, ciascuno dei quali rappresenta un aspetto specifico di incertezza o un modello alternativo. Questi rami possono rappresentare diversi tipi di sorgenti sismiche, modelli di ricorrenza dei terremoti, equazioni di previsione del movimento del suolo (GMPE) o altri parametri rilevanti.

3.2.1 Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale

La carta della pericolosità MPS04 di riferimento per il territorio italiano è stata realizzata nel 2004 dal INGV con approccio probabilistico.

Per la redazione della carta di pericolosità MPS04, venne svolto un ampio studio volto ad aggiornare le informazioni richieste per la stima della pericolosità sismica, in particolare:

- Una nuova zonazione sismogenetica (ZS9) a partire alla precedente zonazione ZS4;
- Una versione aggiornata del catalogo CPTI (CPTI04);
- Una verifica delle relazioni di attenuazione;
- Nuovi insiemi di intervalli di completezza.

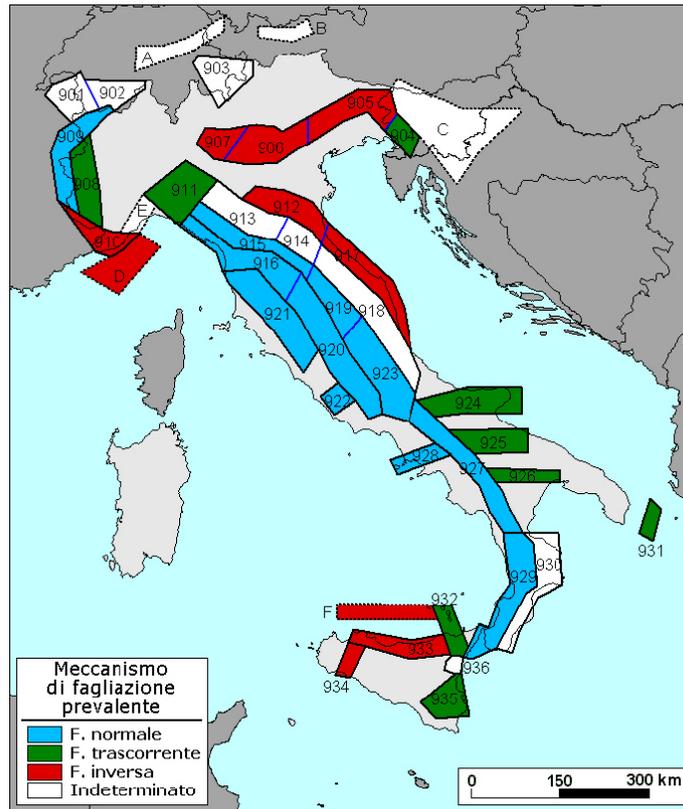


Figura 12: Meccanismo di fagliazione prevalente atteso per le diverse ZS9 (2004)

La metodologia adottata per la realizzazione della carta MPS04 è stata consultata e utilizzata come base per il presente studio.

3.3 Raccolta dati

3.3.1 Catalogo dei terremoti

Per la definizione delle caratteristiche di sismicità regionale è stato utilizzato il database CPTI15, realizzato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) il quale presenta le seguenti caratteristiche:

- Copertura temporale, estesa a tutto il 2020;
- Il database macrosismico di riferimento (DBMI15 versione 3.0; Locati et al., 2021), significativamente aggiornato;
- I dati strumentali considerati, nuovi e/o aggiornati;
- Le soglie di ingresso dei terremoti, abbassate a intensità massima 5 o magnitudo 4.0 ;
- La determinazione dei parametri macrosismici, basata su una nuova calibrazione dell'algoritmo Boxer;
- Le magnitudo strumentali, che comprendono un nuovo set di dati e nuove relazioni di conversione.

Il database contiene in totale 4694 terremoti avvenuti sul territorio nazionale e con porzioni delle aree e dei mari confinanti, nella finestra temporale 1000-2020.

3.4 Zone sismogenetiche DISS

Sono state selezionate le zone sorgenti inserite nel catalogo DISS 3.3.0 (<http://diss.rm.ingv.it/>), in particolare modo sono state utilizzate le seguenti Sorgenti Sismogenetiche Composite (CSS) elencate in tabella con le relative caratteristiche geometriche e cinematiche. A ciascuna zona sismogenetica sono associati i terremoti del catalogo CPTI15 posti all'interno dei poligoni DISS utilizzati nello studio. I sismi contenuti nel database CPTI15 sono stati confrontati e integrati con i terremoti presenti nei database CFTI5med e ISiDe, al fine di implementare i calcoli e i parametri della relazione Magnitudo-Frequenza Gutenberg Richter.

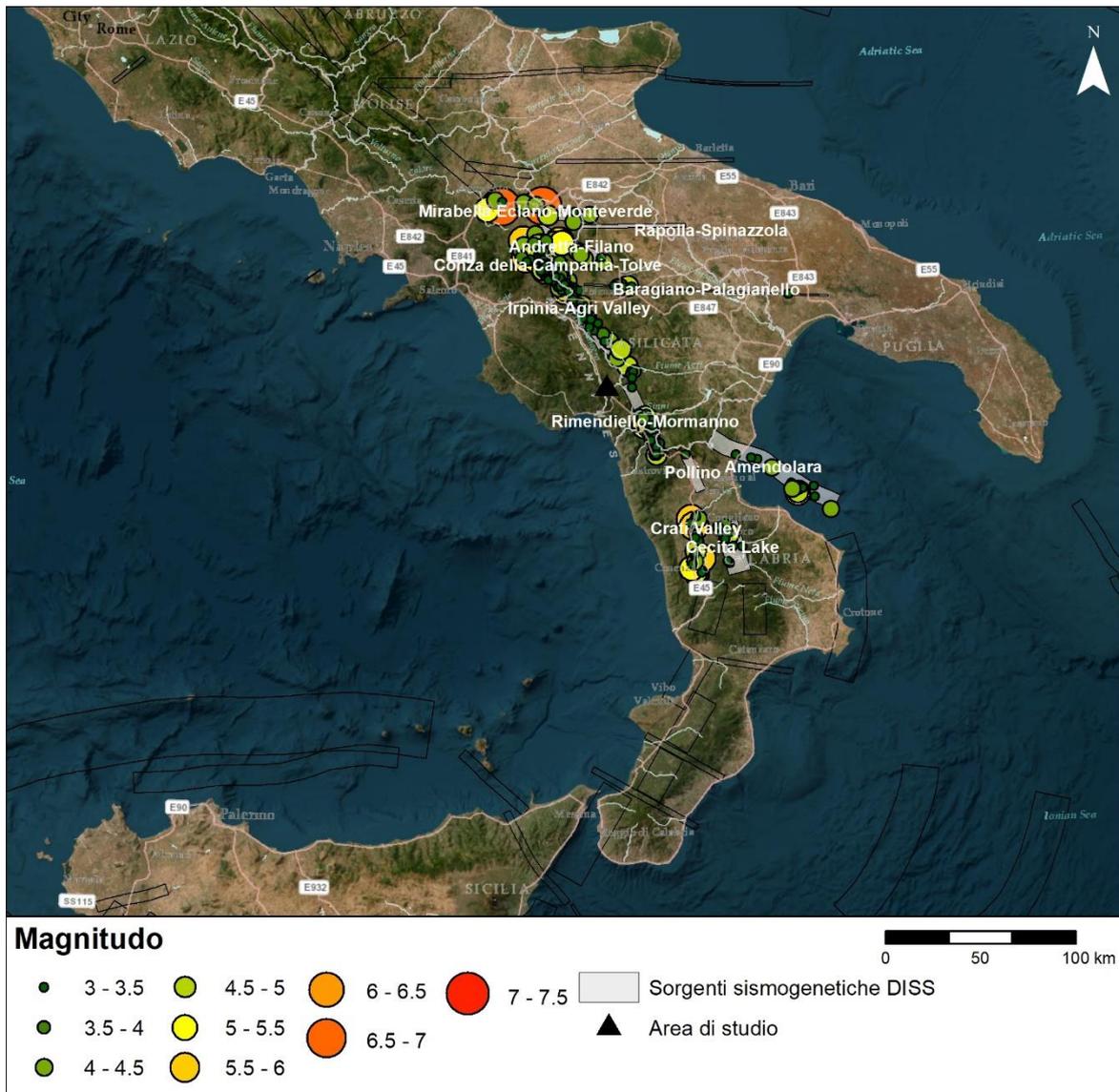


Figura 13: Zone sismogenetiche DISS e terremoti utilizzati nello studio probabilistico di pericolosità sismica

IDSource	Zone DISS	Contesto geodinamico	Strike mean	Dip mean (°)	M Max	Min Dep (km)	Max Dep (km)
ITCS038	Rimendiello-Mormanno	normal	335	60	6.6	1	12
ITCS033	Pollino	normal	160	60	6.4	1	10
ITCS104	Amendolara	sovrascorrimento	290	45	6.7	1	10
ITCS015	Crati Valley	normal	180	55	6.6	1	10
ITCS176	Cecita Lake	normal	170	50	7.1	1	15
ITCS034	Irpinia-Agri Valley	normal	310	60	6.8	1	14
ITCS005	Baragiano-Palagianello	strike-slip	90	85	7.4	13	22
ITCS087	Conza della Campania-Tolve	normal	125	70	6.5	1	12
ITCS063	Andretta-Filano	strike-slip	295	60	7	2	15
ITCS084	Mirabella Eclano-Monteverde	strike-slip	280	65	6.9	1	16
ITCS089	Rapolla-Spinazzola	strike-slip	270	80	7	12	23

3.4.1.1 ITCS038 Rimendiello-Mormanno

La sorgente sismogenetica Rimendiello-Mormanno si trova a cavallo dell'Appennino meridionale tra la Basilicata e la Calabria, lungo l'alta valle del Sinni sul fianco occidentale del Monte Pollino. Questa sorgente è costituita da un sistema di faglie normali ad alto angolo, immerso a NE, lungo il principale asse estensionale dell'Appennino meridionale. I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostrano una distribuzione sparsa della sismicità: a nord-ovest, si sono verificati i terremoti del 2 gennaio 1831 (Mw 5.5, Lagonegro), e del 20 novembre 1836 (Mw 5.8, Basilicata meridionale), mentre il settore sudorientale è stato interessato dai terremoti del 9 settembre 1998 (Mw 5.7, Appennino Calabro-Lucano), e del 26 gennaio 1708 (Mw 5.6, Pollino). Questa Sorgente è considerata come il tratto meridionale dell'asse distensivo NW-SE dell'Appennino meridionale, poco prima dell'Arco Calabro a sud del Monte Pollino. Lo strike di questa sorgente è basato sulle strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati geologici e considerazioni geometriche. Il rake indica un cinematiso estensivo, basato su dati geologici. La profondità minima e massima sono basate su dati geologici. Lo slip-rate è stato dedotto da osservazioni geologiche in strutture adiacenti che condividono lo stesso ambiente tettonico con la sorgente sismogenetica Rimendiello-Mormanno.

Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	LD	Based on geological data from De Martini (1996).
Max depth [km]	12.0	EJ	Based on geological data.
Strike [deg] min... max	325...345	LD	Based on geological data from De Martini (1996).
Dip [deg] min... max	55...65	LD	Based on geological data from De Martini (1996).
Rake [deg] min... max	260...280	LD	Based on geological data from De Martini (1996).
Slip Rate [mm/y] min... max	0.1000... 1.0000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	6.6	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.2 ITCS033 – Pollino

La sorgente sismogenetica Pollino si trova a cavallo dell'Appennino meridionale tra la Basilicata e la Calabria, lungo la valle del Coscile R., sul fianco meridionale del Monte Pollino. Questa sorgente è formata da un sistema di faglie normali ad alto angolo, immerso a SW, lungo il principale asse estensionale dell'Appennino meridionale. I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostrano una scarsa distribuzione di sismicità in quest'area fatta eccezione del terremoto del 26 gennaio 1708 (Mw 5.6, Pollino), avvenuto appena a nord dell'area. Questa sorgente mostra l'inversione di polarità tra l'asse estensionale dell'Appennino meridionale immerso in NE e il sistema di faglie normali immerse a W che si dipartono dal fianco meridionale del Monte Pollino lungo la spalla occidentale del massiccio della Sila. I dati paleosismologici di Cinti et al (1997, 2002) hanno permesso di descrivere la faglia normale di Castrovillari, che costituisce il nucleo di questa sorgente. Gli stessi autori ritengono che la faglia del Pollino, a nord di questa sorgente, funga da barriera strutturalmente alla propagazione N della faglia di Castrovillari. Lo strike di questa sorgente è basato sulle strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati geologici e considerazioni geometriche. Il rake indica un cinematiso estensivo, basato su dati geologici. La profondità minima e massima sono basate su dati geologici. Lo slip-rate è stato dedotto da dati paleosismologici.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	LD	Based on geological data from Cinti et al. (1995).
Max depth [km]	10.0	LD	Based on geological data.
Strike [deg] min... max	150...170	LD	Based on geological data from Cinti et al. (1995).
Dip [deg] min... max	55...65	LD	Based on geological data from Cinti et al. (1995).
Rake [deg] min... max	260...280	EJ	Assumed from geological and seismotectonic considerations.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.2000... 0.6000	LD	Based on long-term geological markers.
Max Magnitude [Mw]	6.4	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.3 ITCS104 Amendolara

La sorgente sismogenetica Amendolara si trova a cavallo dell'area costiera e offshore del Golfo di Taranto meridionale, al confine tra la Basilicata e Calabria. Questa sorgente è composta da un sovrascorrimento con vergenza SSW, opposta a quella della fascia di sovrascorrimento dell'Appennino Meridionale. L'espressione batimetrica di questo confine nel Mar Jonio è data dalla Scarpata Apula. La recente attività di questo sistema è testimoniata dalla deformazione dei terrazzi marini del Pleistocene superiore affioranti lungo la linea di costa (Santoro et al., 2013) e dalla fagliazione e ripiegamento di correlativi depositi offshore lungo la Dorsale di Amendolara (Ferranti et al., 2009; Ferranti et al., 2012). I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostrano una bassa sismicità caratterizzata da piccola magnitudo ed eventi sparsi che seguono approssimativamente un andamento E-W parallelamente alla costa meridionale del Golfo di Taranto. L'unica eccezione è data dal terremoto del 24 aprile 1836 (Mw 6.2, Calabria Settentrionale), al quale fu associato un'onda di maremoto che inondò la costa settentrionale della Calabria. Altre scosse potenzialmente associate a questa sorgente sono quelle del 11 dicembre 1824 (Mw 5.4, Rossano), del 12 giugno 1917 (Mw 5.5, Mar Ionio) e del 13 aprile 1988 (Mw 4.6, Costa Calabria). Tutti questi eventi sono stati avvertiti o hanno prodotto danni nelle zone costiere circostanti il Golfo di Taranto, suggerendo possibili origini offshore. Lo strike di questa sorgente è basato sulle strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati geologici, interpretazioni di linee sismiche e modellazioni numeriche. Il rake indica un cinematismo compressivo, basato su dati geologici e sismologici. La profondità minima e massima sono basate su dati geologici, interpretazioni di linee sismiche e modellazioni numeriche. Lo slip-rate è stato calcolato attraverso modellazioni numeriche e l'elevazione di terrazzi marini.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	OD	Interpretation of seismic lines and numerical modeling.
Max depth [km]	10.0	OD	Interpretation of seismic lines and numerical modeling.
Strike [deg] min... max	280...300	OD	Derived from mapping of the fault system.
Dip [deg] min... max	40...50	OD	Interpretation of seismic lines and numerical modeling.
Rake [deg] min... max	65...90	EJ	Inferred from regional stress orientation and structural considerations.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.5000... 0.9000	OD	Analytical modeling of growth strata and marine terrace elevation.
Max Magnitude [Mw]	6.7	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.4 ITCS015 Crati Valley

La Valle del Crati è orientata N-S e delimitata su entrambi i lati da faglie normali. Alcune di queste sono riconosciute come attive in letteratura (Tansi et al., 2005; 2007). Osservazioni geologiche e geomorfologiche (ad esempio: Carobene e Damiani, 1985; Molin et al., 2004; Tansi et al., 2005), la deformazione della parte superiore del substrato metamorfico (insieme alle unità pleistoceniche sovrastanti) e le anomalie del radon sono coerenti con l'ipotesi di attività sulle faglie immerse a ovest sul fianco orientale della valle. Sei terremoti di magnitudo compresa tra 5.5 e 5.9 si sono verificati nella Valle del Crati, tra il 1767 e il 1913, in un arco temporale inferiore a un paio di secoli. È presente anche sismicità minore con magnitudo compresa tra 4 e 5.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	EJ	Inferred from geological and seismological observations.
Max depth [km]	10.0	EJ	Inferred from geological and seismological observations.
Strike [deg] min... max	160...200	EJ	Inferred from geological observations.
Dip [deg] min... max	40...70	EJ	Inferred from geological observations.
Rake [deg] min... max	260...280	EJ	Inferred from geological and seismological data.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.4000... 1.0000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	6.6	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.5 ITCS176 Cecita Lake

La sorgente sismogenetica si trova a cavallo del versante settentrionale e centrale del Massiccio della Sila nella Calabria centrale (Sila Greca e Sila Grande). Il Massiccio della Sila è un altopiano montuoso che raggiunge i 1500 m sul livello del mare e che sovrasta la subduzione ionica (Faccenna et al., 2005). Questa

sorgente è una faglia normale immersa a WSW situata ad est del principale asse estensionale che corre lungo l'Appennino. I cataloghi storici (Guidoboni et al., 2007; Rovida et al., 2016) mostrano una notevole concentrazione di terremoti dannosi attorno a quest'area. Questi terremoti calabresi sono tra i più forti nella lunga storia sismica italiana (Guidoboni et al., 2007; Rovida et al., 2016). In particolare, la regione sudoccidentale del Massiccio della Sila è stata colpita dall'evento del 27 marzo 1638 (Mw 7.1; Calabria centrale), la regione orientale dall'evento del 25 aprile 1836 (Mw 6.2; Calabria settentrionale), e la regione meridionale dall'evento dell'8 Giugno 1638 (Mw 6,8; Crotonese). I cataloghi strumentali (e.g. ISIDe Working Group, 2016) mostrano una distribuzione sparsa di sismicità intermedia (Mw ca. 4) avente profondità comprese tra 10 e 20 km nel Massiccio della Sila, e.g. Eventi del 23 luglio 1955 (Mw 4,6), 30 marzo 1991 (Mw 4,0), 27 aprile 1996 (Mw 4,8), 26 aprile 2007 (Mw 4,0) e 28 dicembre 2014 (Mw 4,3). Lo strike di questa sorgente è basato su osservazioni geologiche. L'inclinazione è definita sulla base di dati geologici. Il rake indica un cinematiso estensivo, basato su considerazioni geodinamiche. La profondità minima e massima sono basate su dati geologici e su considerazioni geologiche e sismiche su scala regionale. Lo slip-rate è stato dedotto da dati geodinamici regionali.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	LD	Based on geological observations.
Max depth [km]	15.0	EJ	Inferred from geological and seismological considerations.
Strike [deg] min... max	160...180	LD	Based on geological observations.
Dip [deg] min... max	40...60	EJ	Inferred from geological considerations.
Rake [deg] min... max	260...280	EJ	Inferred from geological and tectonic considerations.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.7000... 1.2000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	7.1	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.6 ITCS034 Irpinia-Agri Valley

La sorgente sismogenetica si estende a cavallo di un tratto dell'Appennino meridionale tra l'Irpinia e la Basilicata. Questa sorgente costituisce il settore centrale meridionale del grande sistema di faglie normali ad alto angolo, immerso a NE, dell'Appennino meridionale. I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) evidenziano una notevole sismicità distruttiva all'interno dell'area. Da nord a sud questi terremoti sono: 8 settembre 1694 (Mw 6.9, Irpinia-Basilicata), il noto terremoto multiplo del 23 novembre 1980 (Mw 6.9, Irpinia-Basilicata), 9 aprile 1853 (Mw 5.9, Irpinia), 19 agosto 1561 (Mw 6.4, Vallo di Diano -anche se di localizzazione incerta), 1 febbraio 1826 (Mw 5.7, Basilicata), e il noto terremoto multiplo del 16 dicembre 1857 (Mw 7.0, Basilicata). Lo strike di questa sorgente è basato su strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati geologici e considerazioni geometriche. Il rake indica un cinematiso estensivo, basato su considerazioni geologiche e dati sismologici. La profondità minima e massima sono basate su dati geologici e sismici. Lo slip-rate è stato dedotto da osservazioni geologiche nelle strutture adiacenti, che condividono lo stesso ambiente tettonico.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	LD	Based on geological and seismological data from various authors.
Max depth [km]	14.0	LD	Based on geological and seismological data from various authors.
Strike [deg] min... max	300...320	LD	Based on geological and seismological data from various authors.
Dip [deg] min... max	50...70	LD	Based on geological and seismological data from various authors.
Rake [deg] min... max	260...280	LD	Based on geological and seismological data from various authors.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.1000... 1.0000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	6.8	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.7 ITCS005 Baragiano-Palagianello

La sorgente sismogenetica si estende a cavallo dell'area compresa tra la Basilicata e la Puglia ed appartiene al sistema trascorrente obliquo-laterale destro che interessa la parte centrale e quella promontorio dell'Adriatico meridionale. Questa sorgente è quasi verticale, con immersione a S. I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostrano una serie di sismicità intermedie in questa regione. Il settore occidentale dell'area fu colpito da alcuni terremoti, tra cui quelli del 13 febbraio 1963 (Mw 5.3, Tito), e del 6 agosto 1954 (Mw 5.3, Pietragalla). L'area è nota soprattutto per la sequenza di Potentino del 5 maggio 1990-26 maggio 1991 (Mw 5.8 e 5.2, rispettivamente). Si ritiene che questa sorgente sia formata da un profondo sistema di faglie cieche E-W, facenti parte del meccanismo tettonico che sembra caratterizzare l'intero dominio sismogenetico ad est della dorsale appenninica meridionale, e forse anche di quelle centrali. Lo strike di questa sorgente è basato su strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati sismici e considerazioni geometriche. Il rake indica un cinematiso trascorrente destro, basato su dati sismologici. La profondità minima e massima sono basate su dati geologici e sismici. Lo slip-rate è stato dedotto da considerazioni geodinamiche dell'ambiente tettonico di cui è facente parte la sorgente sismogenetica.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	13.0	OD	Derived from seismological data.
Max depth [km]	22.0	OD	Derived from seismological data.
Strike [deg] min... max	80...100	LD	Based on focal mechanisms.
Dip [deg] min... max	80...90	LD	Based on focal mechanisms.
Rake [deg] min... max	170...190	LD	Based on focal mechanisms.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.1000... 0.5000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	7.4	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.8 ITCS087 Conza della Campania-Tolve

La sorgente sismogenetica si estende lungo un tratto dell'Appennino meridionale dell'Irpinia, poco a nord dell'alta valle del Sele. Questa sorgente è un sistema di faglie normali ad alto angolo, immerso a SW, appena ad est del principale asse estensionale dell'Appennino meridionale. I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) evidenziano una notevole sismicità distruttiva all'interno dell'area. Questi terremoti sono l'8 settembre 1694 (Mw 6.9, Irpinia-Basilicata) e il noto terremoto multiplo del 23 novembre 1980 (Mw 6.9, Irpinia-Basilicata). Lo strike di questa sorgente è basato su strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati geologici e considerazioni geometriche. Il rake indica un cinematismo estensivo, basato su considerazioni geologiche e dati sismologici. La profondità minima e massima sono basate su dati geologici e sismici. Lo slip-rate è stato dedotto da dati paleosismici.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	OD	Based on seismological data.
Max depth [km]	12.0	OD	Inferred from depth of major earthquakes of the region.
Strike [deg] min... max	115...135	OD	Based on seismological and macroseismic data.
Dip [deg] min... max	60...80	OD	Based on seismological data.
Rake [deg] min... max	260...280	OD	Based on seismological data.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.4000... 0.6000	EJ	Inferred from paleoseismology.
Max Magnitude [Mw]	6.5	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.9 ITCS063 Andretta-Filano

La sorgente sismogenetica si trova a cavallo dell'area compresa tra le regioni Campania e Basilicata, appena a sud del vulcano Vulture, e appartiene al sistema trascorrente obliquo-laterale destro che interessa l'avampaese dell'Adriatico centrale e meridionale. Questa sorgente è quasi verticale, con immersione a N. I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostrano una scarsa sismicità intermedia in questa regione ma è stata colpita da due delle più forti terremoti della storia sismica italiana. Si tratta dei terremoti dell'8 settembre 1694 (Mw 6,9) e dei ben noti terremoti dell'Irpinia-Basilicata del 23 novembre 1980 (Mw 6,9). La zona fu interessata anche dall'evento del 7 giugno 1910 (Mw 5.9, Irpinia-Basilicata). Lo strike di questa sorgente è basato su strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati geologici e considerazioni geometriche. Il rake indica un cinematismo destro trascorrente, basato su dati sismologici. La profondità minima e massima sono basate su dati geologici. Lo slip-rate è stato dedotto da considerazioni geodinamiche basate sull'ambiente tettonico a cui appartiene la sorgente sismogenetica.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	2.0	EJ	Inferred from upper depth of instrumental major earthquakes in the region.
Max depth [km]	15.0	EJ	Inferred from lower depth of instrumental major earthquakes in the region.
Strike [deg] min... max	285...305	OD	Based on macroseismic and seismological data.
Dip [deg] min... max	40...80	EJ	Inferred from fault plane of instrumental major earthquakes in the region.
Rake [deg] min... max	230...250	EJ	Inferred from fault plane of instrumental major earthquakes in the region.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.1000... 1.0000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	7.0	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.10 ITCS084 Mirabella Eclano-Monteverde

La sorgente sismogenetica si trova nella regione interna della Campania e appartiene al sistema trascorrente obliquo-laterale destro che interessa l'Adriatico centrale e meridionale. Questa sorgente è quasi verticale, con Immersione a N. I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostrano una notevole concentrazione di terremoti catastrofici in questa regione. Da ovest verso est, questi sono: il terremoto multiplo avvenuto il 21 agosto 1962 (Mw 6.2, Irpinia); terremoti del 14 marzo 1702 (Mw 6.3, Sannio-Irpinia), del 29 novembre 1732 (Mw 6.6, Irpinia), del 989 d.C. (Mw 6.0, Irpinia), e del 23 luglio 1930 (Mw 6.7, Irpinia). Lo strike di questa sorgente è basato su strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati sismici e considerazioni geometriche. Il rake indica un cinematismo destro trascorrente, basato su dati sismologici. La profondità minima e massima sono basate su dati sismici e dati di terreno. Lo slip-rate è stato dedotto da considerazioni geodinamiche basate sull'ambiente tettonico a cui appartiene la sorgente sismogenetica.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	OD	Based on seismological and geological data.
Max depth [km]	16.0	OD	Based on seismological and macroseismic data.
Strike [deg] min... max	270...290	OD	Based on seismological and macroseismic data.
Dip [deg] min... max	55...75	OD	Based on seismological data.
Rake [deg] min... max	230...250	OD	Based on seismological data.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.1000... 1.0000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	6.9	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.4.1.11 ITCS089 Rapolla-Spinazzola

La sorgente sismogenetica, situata nell'area compresa tra la Campania e la Puglia, è definita da un sistema trascorrente obliquo-laterale destro che interessa l'avampese centro-meridionale dell'Adriatico. Questa sorgente è quasi verticale con immersione a N. I cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di

Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostrano una scarsa sismicità intermedia in questa regione, fatta eccezione per il terremoto distruttivo che ha interessato il settore occidentale il 14 agosto 1851 (Mw 6.3, Basilicata). Si ritiene che questa sorgente sia un profondo sistema di faglie cieche E-O, parte del meccanismo tettonico che sembra caratterizzare l'intero dominio sismogenetico ad est della dorsale appenninica meridionale. Lo strike di questa sorgente è basato su strutture mappate. L'inclinazione è definita sulla base di dati sismici e considerazioni geometriche. Il rake indica un cinematismo destro trascorrente, basato su dati sismologici. La profondità minima e massima sono basate su dati di terreno. Lo slip-rate è stato dedotto da considerazioni geodinamiche basate sull'ambiente tettonico a cui appartiene la sorgente sismogenetica.

PARAMETRIC INFORMATION			
Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	12.0	EJ	Inferred from upper depth of instrumental major earthquakes in the region.
Max depth [km]	23.0	EJ	Inferred from lower depth of instrumental major earthquakes in the region.
Strike [deg] min... max	260...280	OD	Based on macroseismic and geophysical data.
Dip [deg] min... max	70...90	OD	Based on macroseismic and geophysical data.
Rake [deg] min... max	170...190	OD	Estimated from rake of instrumental major earthquakes in the region.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.1000... 0.5000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	7.0	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

3.5 Zonazione sismica ZS9

La zonazione ZS9 (2004) è stata sviluppata sulle basi della precedente zonazione ZS4 realizzata nel 2004, in seguito alla rivalutazione e aggiornamento di determinate zone sismogenetiche. A ciascuna zona ZS9 è associata una profondità, che corrisponde all'intervallo di profondità entro il quale si sviluppano la maggior parte dei terremoti, e meccanismo di fagliazione, definito come il principale cinematismo che si presume caratterizzerà i terremoti futuri. La realizzazione della ZS9 è stata basata sulle zone DISS aggiornate (DISS 2.0) al momento della realizzazione della carta ZS9, sulla distribuzione dei terremoti presenti nel catalogo CPTI2. Le geometrie delle ZS9 sono caratterizzate da un'incertezza gestita attraverso due differenti approcci: il primo è la capacità di far dialogare tra di loro le ZS9 e i terremoti contenuti nel catalogo CPTI; il secondo è l'utilizzo di bordi morbidi, per ottenere un passaggio progressivo tra due diverse zone ZS9 e aree di background.

Le sorgenti sismogenetiche ZS9 utilizzate per lo studio fanno parte del gruppo delle sorgenti dell'Appennino Meridionale e dell'avanpaese Apulo (925, 926, 927, 928) e dell'arco Calabro (929, 930), in particolar modo le sorgenti sismogenetiche selezionate sono le seguenti elencate in tabella:

Nome ZS	ZS9	Profondità (km)	Magnitudo massima	Cinematismo
Ofanto	925	13	6.83	Trascorrente
Matera	926	13	6.14	Trascorrente
Sannio-Irpinia-Basilicata	927	10	7.06	Normale
Ischia-Vesuvio	928	3	5.91	Normale
Calabria tirrenica	929	10	7.29	Normale
Calabria ionica	930	10	6.6	Indeterminato

La zona sorgente 925 è definita da un contesto geodinamico di tipo trascorrente, include la sorgente del terremoto del 1930, ad andamento WNW-ESE in Valensise e Pantosti (2001). La zona 926, come la precedente, si trova in un contesto dinamico di tipo trascorrente, avente un andamento di tipo E-W e definita sulla base dei terremoti di magnitudo medio-bassa tra cui gli eventi di Potenza del 1990 e 1991 (Fracassi et al., 2003). La zona sorgente 927 è presenta un cinematismo di tipo normale, la quale comprende l'area del massimo rilascio di energia legata alla distensione che ha interessato l'Appennino meridionale (es. Patacca et al., 1990). L'ultima zona appartenente al gruppo dell'appenino meridionale è la sorgente 928 avente un cinematismo di tipo normale. Le restanti due aree situate in Calabria sono la zona 929 e 930. La zona 929, a sismicità maggiore, comprende la Calabria e lo stretto di Messina, è contraddistinta da un contesto geodinamico di tipo estensivo con cinematismo normale, ad essa sono associati i terremoti di Messina e la sequenza del 1783. La Calabria ionica (930) presenta valori di sismicità inferiori, ad essa sono associati solamente 4 terremoti con una magnitudo maggiore di 6, con valore massimo associato all'evento del 1638.

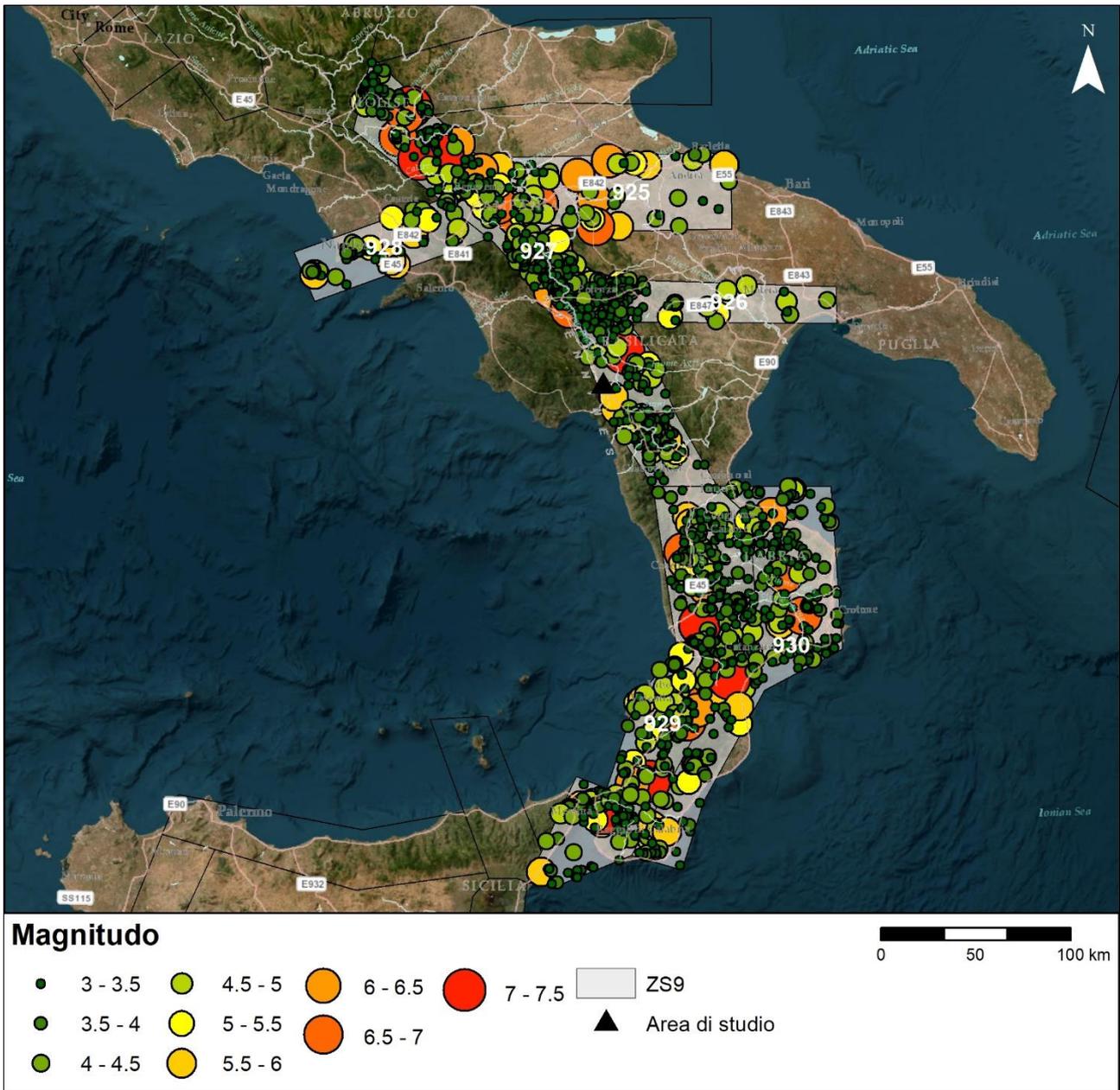


Figura 14: Zone sismogenetiche ZS9 e terremoti registrati nel database CPT115 utilizzati nello studio probabilistico di pericolosità sismica

3.6 Intervalli di completezza

La stima del tasso AR utilizzata per la definizione della relazione magnitudo-frequenza richiede la definizione dell'intervallo di completezza per ciascuna classe di Magnitudo. Il tasso di sismicità è dunque definito come la frequenza di terremoti di una certa magnitudo per una sorgente normalizzata rispetto al tempo e quindi rispetto al periodo in cui il catalogo è considerato completo, ottenuto dividendo il numero di eventi riportati nel catalogo nella finestra di completezza con la lunghezza della finestra di completezza.

Non è stato possibile valutare in modo significativo la completezza dell'intervallo per le zone DISS, visto l'esiguo numero di terremoti. Per questo motivo, sono stati adottati gli intervalli di completezza del MPS04 e adattati alle zone DISS, secondo un criterio di vicinanza e contesto geodinamico.

ZS9	Nome DISS associata
925	Andretta-Filano
	Mirabella Eclano-Monteverde
	Rapolla-Spinazzola
926	Baragiano-Palagianello
927	Pollino
	Irpinia-Agri Valley
	Rimendiello-Mormanno
	Conza della Campania-Tolve
928	-
929	Crati Valley
	Cecita Lake
930	Amendolara

La pericolosità sismica MPS04 è stata utilizzata per estrarre gli intervalli di completezza dei cataloghi in modo consistente e significativo. Nelle tabelle 3 e 4 sono riportati gli anni di inizio dell'intervallo di completezza con il metodo storico (CO-04.2) e il metodo statistico (CO-04.4).

Tabella 3: Intervalli di completezza "storici" (CO-04.2) per ZS e classi di M

Nome ZS	ZS9	Mw classi											
		4.76	4.99	5.22	5.45	5.68	5.91	6.14	6.37	6.6	6.83	7.06	7.29
		±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115
Ofanto	925	1871	1871	1787	1787	1787	1530	1530	1400	1400	1400	1400	1400
Matera	926	1871	1871	1787	1787	1787	1530	1530	1400	1400	1400	1400	1400
Sannio-Irpinia-Basilicata	927	1895	1895	1787	1787	1787	1530	1530	1530	1400	1400	1400	1400
Ischia-Vesuvio	928	1871	1871	1787	1787	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Calabria tirrenica	929	1895	1895	1787	1787	1787	1787	1530	1530	1400	1400	1400	1400
Calabria ionica	930	1895	1895	1787	1787	1787	1787	1530	1530	1400	1400	1400	1400

Tabella 4: Intervalli di completezza "statistici" (CO-04.4) per ZS e classi di M.

Nome ZS	Mw classi												
	ZS9	4.76	4.99	5.22	5.45	5.68	5.91	6.14	6.37	6.6	6.83	7.06	7.29
		±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115	±0.115
Ofanto	925	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1400	1400	1400
Matera	926	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1400	1400	1400
Sannio-Irpinia-Basilicata	927	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1400	1400	1400
Ischia-Vesuvio	928	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1300	1300	1300
Calabria tirrenica	929	1920	1895	1895	1787	1787	1787	1787	1530	1530	1400	1400	1400
Calabria ionica	930	1920	1895	1895	1787	1787	1787	1787	1530	1530	1400	1400	1400

3.7 Legge di Gutenberg-Richter

Lo studio di pericolosità probabilistico richiede la definizione di un modello sismico attraverso una legge di magnitudo-frequenza. Nel presente studio è stata applicata la legge di Gutenberg-Richter che esprime la probabilità di avere terremoti entro una determinata magnitudo con un tasso di accadimento medio annuale o di occorrenza λ_{Mw} .

La legge di Gutenberg – Richter descrive la relazione magnitudo-distanza, attraverso la seguente equazione:

$$\log_{10} \lambda_{Mw} = a - b \cdot Mw$$

$$\lambda_{Mw} = 10^{(a-b \cdot Mw)}$$

ove:

λ_{Mw} = frequenza di terremoti con magnitudo superiore a Mw;

b = frequenza relativa di accadimento dei terremoti più forti (e quindi più sporadici) rispetto a quelli più deboli (più frequenti);

a = sismicità totale della regione a cui essa è riferita (10^a definisce l'accadimento annuale medio di terremoti aventi magnitudo maggiore o uguale a zero).

I parametri a e b sono ottenuti attraverso una regressione lineare in un piano semi-logaritmico $\log \lambda_{Mw} - Mw$. Nel software R-CRISIS per la definizione dei parametri sismici delle zone sorgenti è utilizzato il modello di Gutenberg Richter modificato (Cornell and Vanmarke, 1969) secondo il quale il tasso di eccedenza per un terremoto con una data magnitudo è pari a:

$$(M) = \lambda_0 \frac{\exp(-\beta M) - \exp(-\beta M_U)}{(\exp(-\beta M_0) - \exp(-\beta M_U))} \quad M_0 \leq M \leq M_U$$

λ_0 : Tasso di superamento della Magnitudo soglia M_0

$$\beta = \ln(10)b$$

M_U Magnitudo massima associata ad una sorgente sismica

Zona sismogenetica	Mw	STORICI					STATISTICI				
		a	b	Beta	M(0)	$\lambda(0)$	a	b	Beta	M(0)	$\lambda(0)$
ZS925	6.83	2.77	0.78	1.80	4.4	0.16	3.19	0.84	1.93	4.4	0.23
Andretta-Filano	7	1.09	0.55	1.27	4.4	0.05	1.53	0.61	1.40	4.4	0.07
Mirabella Eclano-Monteverde	6.9	1.86	0.65	1.50	4.4	0.06	2.29	0.72	1.66	4.4	0.09
Rapolla-Spinazzola	7	0.56	0.88	2.03	4.2	0.02	0.62	1.29	2.97	4.2	0.03
ZS926	6.14	5.17	1.34	3.09	4.4	0.12	6.02	1.49	3.43	4.4	0.17
Baragiano-Palagianello	7.4	3.36	1.01	2.33	4.4	0.04	4.2	1.16	2.67	4.4	0.06
ZS927	7.06	3.64	0.83	1.91	4.4	0.86	3.9	0.86	1.98	4.4	1.07
Pollino	6.4	1.59	0.70	1.61	3.3	0.02	1.98	0.77	1.77	3.3	0.03
Irpinia-Agri Valley	6.8	2.66	0.75	1.73	4.4	0.16	2.93	0.79	1.82	4.4	0.20
Rimendiello-Mormanno	6.6	3.66	1.02	2.35	4.0	0.09	4.1	1.1	2.53	4.0	0.11
Conza della Campania-Tolve	6.5	0.85	0.51	1.17	4.5	0.05	1.12	0.55	1.27	4.5	0.06
ZS928	5.91	3.33	0.93	2.14	4.4	0.09	3.7	0.98	2.26	4.4	0.13
ZS929	7.29	3.89	0.88	2.03	4.4	0.77	4.1	0.91	2.10	4.4	0.96
Crati Valley	6.6	3.23	0.94	2.16	4.4	0.08	3.67	1.01	2.33	4.4	0.10
Cecita Lake	7.1	14	3.38	7.78	3.7	0.05	14.09	3.38	7.78	3.7	0.06
ZS930	6.6	2.59	0.72	1.66	4.4	0.22	2.8	0.75	1.73	4.4	0.27
Amendolara	6.7	2.75	0.88	2.03	4.3	0.05	2.61	0.83	1.91	4.3	0.06

3.8 GMPE

I modelli di attenuazione del moto del suolo GMPE (*Ground Motion Prediction Equation*) sono utilizzati nelle analisi di pericolosità sismica, al fine di descrivere lo scuotimento atteso di una zona sorgente in funzione della magnitudo e della distanza della sorgente. In letteratura esistono molteplici equazioni GMPE, proposte per diverse aree geografiche, contesti geodinamici, intervalli di magnitudo e range di distanza.

Nel presente studio sono state considerate 4 relazioni GMPE, come richiesto nelle “Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe” e riportate nella seguente tabella:

GMPE	Area	Range Mw	Range di distanza (km)	Contesto geodinamico
Bindi et al., 2011	Italia	4.1-6.9	0-200	All/Unspecified
Akkar et al., 2014	Europa e Medio oriente	4.7-7.6	0-200	Strike-slip, Reverse, Normal
Boore et al., 2014	Globale	3-7.9	0-400	Strike-slip, Normal, Reverse,
Cauzzi et al., 2015	Globale	4.5-7.9	0-150	Strike-slip, Normal, Reverse

L’analisi probabilistica è stata eseguita attraverso il software R-CRISIS, tramite il quale sono state ricavati i modelli di attenuazione del suolo secondo le 4 leggi GMPE utilizzate nel presente studio. Il codice consente di effettuare una valutazione di pericolosità sismica tenendo conto della probabilità di eccedenza, delle caratteristiche di attenuazione del suolo e della distribuzione geografica dei terremoti, per diversi tempi di ritorno. Il codice ha permesso infine di ottenere lo spettro di accelerazione del suolo nell’area di studio utilizzando un approccio ad albero logico.

Di seguito sono descritte brevemente le leggi di ciascuna delle 4 GMPE utilizzate e le loro caratteristiche, per una completa comprensione delle leggi si rimanda ai lavori originali:

- *Bindi, D., F. Pacor, L. Luzi, R. Puglia, M. Massa, G. Ameri e R. Paolucci (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database.*
- *Akkar, S., M. A. Sandikkaya e J. J. Bommer (2014). Empirical ground-motion models for point- and extend-ed-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East.*
- *Boore, D. M., J. P. Stewart, E. Seyhan e G. M. Atkinson (2014). NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes, Earthq.*
- *Cauzzi, C., E. Faccioli, M. Vanini e A. Bianchini (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records.*

3.8.1 Bindi et al., 2011

La relazione di Bindi et al., 2011 è stata sviluppata per il territorio italiano utilizzando 1213 registrazioni di relative a 218 terremoti, in un range di magnitudo compresa tra 4.1 e 6.9. L’equazione è stata sviluppata utilizzando principalmente terremoti generati da faglie normali nell’area centrale e sud degli appennini con profondità focale < 20 km; sono stati inoltre utilizzati terremoti generati da faglie con cinematisimo inverso nell’area nord-est delle Alpi e nord degli Appennini e terremoti generati da faglie trascorrenti nel sud Italia.

La formula sviluppata nel lavoro di Bindi è la seguente:

$$\log_{10} Y = e_1 + F_D(R,M) + F_M(M) + F_S + F_{SOF}$$

Dove:

Y: PGA in cm/s²

e₁: termine costante

F_D(R,M): Funzione di distanza

$$F_D(R,M) = [c_1 + c_2 \left(\frac{\sqrt{R_{JB}^2 + h^2}}{R_{ref}} \right) - c_3 \left(\sqrt{R_{JB}^2 + h^2} - R_{ref} \right)]$$

F_M(M): Funzione di Magnitudo

$$F_M = \begin{cases} b_1(M + M_h) + b_2(M + M_h)^2 & \text{for } M \leq M_h \\ b_3(M + M_h) & \text{otherwise} \end{cases}$$

F_S: funzione di amplificazione del sito

F_{sof}: Correzione per stile di fagliazione

I parametri M_{ref}, M_h e R_{ref} sono determinati attraverso l'analisi.

I parametri e₁, c₁, c₂, c₃, b₁, b₂, b₃, σ e i parametri funzione di sito e fagliazione sono tabulati nel lavoro di Bindi et al., 2011.

La deviazione standard σ per la relazione di Bindi varia tra 0.34 e 0.38 log₁₀, ricavata per ogni periodo attraverso un'analisi di bootstrap.

I parametri delle equazioni sono derivati nel lavoro di Bindi sia per la valutazione delle componenti orizzontali e verticali. Nella relazione di Bindi sono considerate le classificazioni di sito EC8 e lo stile di fagliazione è preso in considerazione tramite la scelta dei coefficienti. Nell'equazione è stata implementata la relazione magnitudo-frequenza attraverso l'introduzione nel dataset di dati che vincolano il movimento del suolo della sorgente vicina, essi sono stati derivati grazie alla registrazione del terremoto dell'Aquila del 2009 con magnitudo 6.3. In seguito all'introduzione di questo terremoto lo scuotimento atteso è aumentato significativamente nelle vicinanze di una faglia. L'estensione dell'intervallo di distanza considerato (200km) e l'introduzione dell'attenuazione anelastica si traduce in una rapida attenuazione del movimento ad alta frequenza dopo 30 km sia per la componente orizzontale che verticale. Inoltre l'introduzione della classificazione del suolo per le V_{S30} consente di paragonare i risultati con le forme spettrali dell'Eurocode8 e con la normativa nazionale.

3.8.2 Akkar et al., 2014

La relazione di Akkar et al., (2014) è stata sviluppata per l'Europa e il Medio oriente utilizzando 1041 registrazioni di componenti orizzontali relative a 221 terremoti, in un range di magnitudo compresa tra 4.7 e 7.6 e con una profondità focale compresa tra 0-29 km. La relazione deriva dall'elaborazione di dati dall'Italia, Turchia e Grecia, nei quali sono inclusi dati anche derivati da scosse di assestamento oltre che alla scossa principale. Tale equazione è applicabile in contesti geodinamici con cinematismi trascorrenti, inversi e normali.

$$\ln(Y) = \ln[Y_{REF}(M_w, R, Sof)] + \ln[S(V_{s30}, PGA_{REF})] + \varepsilon\sigma$$

dove:

$\ln(Y_{REF})$ rappresenta la funzione legata alla Magnitudo e Distanza

$$\ln(Y_{REF}) = \begin{cases} a_1 + a_2(M_w + c_1) + a_3(8.5 + M_w)^2 + [a_4 + a_5(M_w + c_1)] \ln\left(\sqrt{R^2 + a_6^2}\right) + \\ a_8 F_N + a_9 F_R + S & \text{for } M_w \leq c_1 \\ a_1 + a_7(M_w - c_1) + a_3(8.5 - M_w)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \ln\left(\sqrt{R^2 + a_6^2}\right) + \\ a_8 F_N + a_9 F_R + S & \text{for } M_w > c_1 \end{cases}$$

$\ln(S)$ rappresenta la funzione di amplificazione di sito

$$\ln(S) = \begin{cases} b_1 \ln\left(\frac{V_{s30}}{V_{REF}}\right) + b_2 \ln\left[\frac{PGA_{REF} + c\left(\frac{V_{s30}}{V_{REF}}\right)^n}{PGA_{REF} + c\left(\frac{V_{s30}}{V_{REF}}\right)^n}\right] & \text{for } V_{s30} \leq V_{REF} \\ b_1 \ln\left[\frac{\min(V_{s30}, V_{CON})}{V_{REF}}\right] & \text{for } V_{s30} > V_{REF} \end{cases}$$

$V_{REF}=750$ m/s

$V_{CON}=1000$ m/s

F_N e F_R sono variabili che indicano il tipo di fagliazione.

I parametri $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, c_1, b_1, b_2, \sigma$ sono tabulati nel lavoro di Akkar et al., (2014).

Il modello include una risposta di sito non-lineare e può essere applicato a siti con valori di V_{s30} compresi in un range di 150-1200 m/s. Questa legge permette di ottenere i valori di PGA, PGV e l'ordinata spettrale di accelerazione orizzontale per periodi compresi tra 0.01 e 4 s. Nella relazione di Akkar è assunto un sigma omoschedastico (a varianza costante per diverse osservazioni campionarie), poiché non vi sono sufficienti

dati per grandi terremoti che permettano di ottenere una stima robusta dei valori di sigma maggiormente sofisticata

3.8.3 Boore et al., 2014

La relazione di Boore et al., (2014) è stata sviluppata su scala globale utilizzando 15000 registrazioni di componenti orizzontali relative a 350 terremoti, in un range di magnitudo compresa tra 3 e 7.9. Tale equazione è applicabile in contesti geodinamici con cinematismi trascorrenti, normali e inversi. La relazione è derivata da:

8500 registrazioni provenienti da 210 eventi con meccanismo focale trascorrente

1000 registrazioni provenienti da 40 eventi con meccanismo focale normale

5500 registrazioni provenienti da 100 eventi con meccanismo focale inverso

La relazione di Boore è derivata da dati provenienti da California, Taiwan, Giappone, Cina, Italia, Grecia, Turchia, e Alaska ed utilizza le V_{s30} per la caratterizzazione di sito. Per la creazione della GMPE sono stati escluse registrazioni senza entrambe le componenti orizzontali, i terremoti avvenuti su crosta oceanica e in regioni stabili; onde S, secondi inneschi, tracce rumorose e registrazioni con time-step problematici.

La relazione di Boore presenta la seguente forma:

$$\ln Y = F_E(M, mech) + F_P(R_{JB}, M, region) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M, region, z_i) + \epsilon_n \sigma(M, R_{JB}, V_{S30})$$

$F_E(M, mech)$: funzione di sorgente legata alla magnitudo e al tipo di fagliazione

$$F_E(M, mech) = \begin{cases} e_0 U + e_1 SS + e_2 NS + e_3 RS + e_4 (M - M_h) + e_5 (M - M_h)^2 & M \leq M_h \\ e_0 U + e_1 SS + e_2 NS + e_3 RS + e_6 (M - M_h) & M > M_h \end{cases}$$

U, SS, NS, RS rappresentano rispettivamente il tipo di fagliazione non specificato, trascorrente, normale e inverso

$F_P(R_{JB}, M, region)$: funzione percorso legata alla magnitudo ed alla distanza

$$F_P(R_{JB}, M, region) = [c_1 + c_2 (M - M_{ref})] \ln \left(\frac{R}{R_{REF}} \right) + (c_3 + \Delta c_3) (R - R_{REF})$$

$$R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2}$$

I parametri $e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, c_1, c_2, c_3, \Delta c_3, M_{ref}, R_{ref}$ e h sono coefficienti nel modello di Boore et al., 2014

$F_S(V_{S30}, R_{JB}, M, region, z_1)$: funzione del sito

$$FS(V_{S30}, R_{JB}, M, region, z_1) = \ln(F_{lin}) + \ln(F_{nl}) + F_{\delta z_1}(\delta z_1)$$

F_{lin} rappresenta la componente lineare dell'amplificazione del sito che descrive la scalatura dello scuotimento con le V_{S30} , F_{nl} rappresenta la componente non lineare dell'amplificazione del sito e $F_{\delta z_1}$ rappresenta gli effetti della profondità del bacino

$$\ln(F_{lin}) = \begin{cases} c \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{ref}}\right) & V_{S30} \leq V_c \\ c \ln\left(\frac{V_c}{V_{ref}}\right) & V_{S30} > V_c \end{cases}$$

$$\ln(F_{nl}) = f_1 + f_2 \ln((PGA_r + f_3)/f_3)$$

$$f_2 = f_4 [\exp\{f_5(\min(V_{S30}, 760) - 360)\} - \exp\{f_5(760 - 360)\}]$$

$$F_{\delta z_1}(\delta z_1) = \begin{cases} 0 & T < 0.65 \\ f_6 \delta z_1 & T \geq 0.65, \delta z_1 \leq f_7/f_6 \\ f_7 & T \geq 0.65, \delta z_1 > f_7/f_6 \end{cases}$$

$$\delta z_1 = z_1 - \mu_{z1}(V_{S30})$$

V_{ref} : 760 m/s

I parametri $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7$ sono coefficienti del modello.

La deviazione standard (σ) è funzione della variabilità tra diversi eventi (τ) e la variabilità di un evento (ϕ)

$$\sigma(M, R_{JB}, V_{S30}) = \sqrt{\varphi^2(M, R_{JB}, V_{S30}) + \tau^2(M)}$$

La variabilità tra diversi eventi (τ) è data da

$$\tau(M) = \begin{cases} \tau_1 & M \leq 4.5 \\ \tau_1 + (\tau_2 - \tau_1)(M - 4.5) & 4.5 < M < 5.5 \\ \tau_2 & M \geq 5.5 \end{cases}$$

la variabilità di un evento (ϕ) è data da

$$\varphi(M, R_{JB}, V_{S30}) = \begin{cases} \varphi(M, R_{JB}) & V_{S30} \geq V_2 \\ \varphi(M, R_{JB}) + \Delta\varphi_R \left(\frac{\ln\left(\frac{V_2}{V_{S30}}\right)}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} \right) & V_1 \leq V_{S30} \leq V_2 \\ \varphi(M, R_{JB}) - \Delta\varphi_V & V_{S30} \leq V_1 \end{cases}$$

$$\varphi(M, R_{JB}) = \begin{cases} \varphi(M) & R_{JB} \leq R_1 \\ \varphi(M) + \Delta\varphi_R \left(\frac{\ln\left(\frac{R_{JB}}{R_1}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \right) & R_1 < R_{JB} \leq R_2 \\ \varphi(M) - \Delta\varphi_R & R_{JB} > R_2 \end{cases}$$

$$\varphi(M) = \begin{cases} \varphi_1 & M \leq 4.5 \\ \varphi_1 + (\varphi_2 - \varphi_1)(M - 4.5) & 4.5 < M < 5.5 \\ \varphi_2 & M > 5.5 \end{cases}$$

3.8.4 Cauzzi et al., 2015

La relazione di Cauzzi et al., (2015) è stata sviluppata su scala globale utilizzando 1880 registrazioni di componenti orizzontali relative a 98 terremoti, in un range di magnitudo compresa tra 4.5 e 7.9 con profondità focale < 20 km. Tale equazione è applicabile in contesti geodinamici con cinematismi trascorrenti, normali e inversi. In particolar modo sono stati utilizzati terremoti con meccanismo di fagliazione:

Faglie normali 20 terremoti

Faglie trascorrenti 43 terremoti

Faglie inverse 26 terremoti

$$\log_{10} y = f_M + f_R + f_S + f_{SOF} + \varepsilon$$

Dove la funzione della magnitudo e della distanza sono espresse rispettivamente:

$$f_M = c_1 + m_1 M_W + m_2 M_W^2$$

$$f_R = (r_1 + r_1 M_W) \log_{10}(R_{RUP} + r_3)$$

La componente di amplificazione di sito è definita attraverso 3 alternative

$$f_S = s_B S_B + s_C S_C + s_C S_C$$

$$f_S = b_V \log_{10} \left(\frac{V_{S30}}{V_A} \right)$$

$$f_S = b_{V800} \log_{10} \left(\frac{V_{S30}}{800} \right)$$

Lo stile di fagliazione è espresso nella seguente formula

$$f_{SOF} = f_N F_N + f_R F_R + f_{SS} F_{SS}$$

I parametri $c_1, m_1, m_2, r_1, r_2, r_3, s_B, s_C, s_D, b_V, b_{V800}, V_A, f_N, f_R, f_{SS}$ sono coefficienti numerici del modello funzione del periodo.

La deviazione standard è funzione della variabilità tra diversi eventi (τ) e la variabilità di un evento (ϕ).

$$\sigma = \sqrt{\phi^2 + \tau^2}$$

3.9 R-CRISIS

Le analisi PHSA sono state realizzate con il software R-CRISIS nella versione 2020 (Odrasz et. al, 2021). I calcoli della probabilità di eccedenza e dello spettro di risposta sono realizzati su una griglia di punti, posti ad una distanza di 0.05° in latitudine e longitudine. Le geometrie delle sorgenti sismogenetiche possono essere rappresentate come aree, “*areaplanes*”, linee o punti. Le caratteristiche delle sorgenti sismogenetiche ZS9 (par. 3.5) sono definite come delle aree alle quali è associata una profondità; in questo studio è attribuita a ciascuna sorgente la profondità efficace, nella quale è registrato il maggior numero di terremoti (Zonazione sismogenetica ZS9–App. 2). Le caratteristiche delle sorgenti sismogenetiche DISS (par. 3.4) sono state definite attraverso delle “*areaplanes*” per le quali, oltre che alla profondità minima e massima, è noto lo *strike* e l’inclinazione. Ad entrambi i gruppi di sorgenti sono attribuiti dei valori di rottura K, forniti dal modello sulla base degli studi di Wells & Coppersmith.

Dopo la definizione delle geometrie delle sorgenti sono stati definiti attribuiti a ciascuna di esse i parametri di sismicità ricavati dalla legge di Gutenberg-Richter, come definito nel paragrafo 3.7. L’ultimo passaggio consiste nella definizione delle GMPE, per le quali è richiesto di indicare la tipologia di terreno o le V_{s30} , ricavate in questa fase dello studio dalla mappa nazionale realizzata nello studio di Mori et al., 2020 “*A new Vs30 map for Italy based on the seismic microzonation dataset*”. Per il sito di interesse del presente studio è utilizzato un valore medio di 452 m/s^2 .

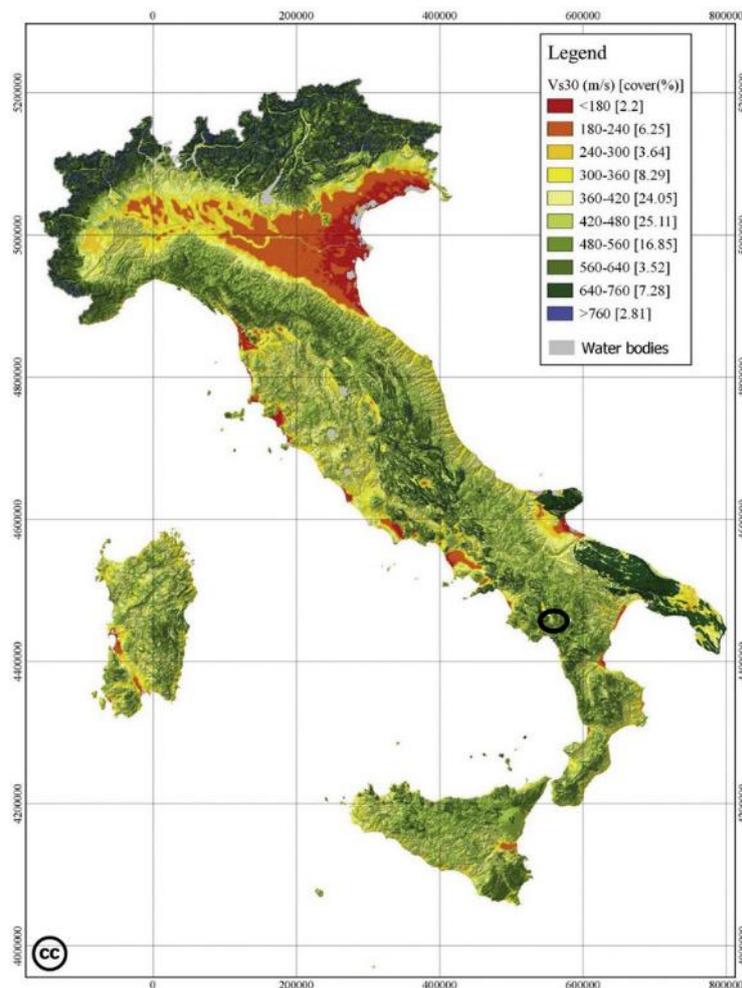


Figura 15: Carta delle Vs30 (Mori et al., 2020)

3.10 Calcolo degli spettri di risposta orizzontali e analisi ad albero logico

La definizione della pericolosità sismica richiede di ipotizzare in che area e che entità avrà un futuro terremoto. Come si evince dai precedenti capitoli la previsione dell'area e della magnitudo di un terremoto è accompagnata da un grado di incertezza. Secondo quanto descritto nel SSHAC (1997) l'incertezza si divide in epistemica e aleatoria; la prima è legata alla conoscenza di un dato fenomeno ed è quindi affrontata tramite la raccolta di dati e la continua attività di ricerca; il secondo è legato alla variabilità intrinseca di un fenomeno stocastico, cioè casuale e quindi non può essere ridotta. La variabilità aleatoria è affrontata attraverso l'introduzione della deviazione standard, definita in ciascuna delle GMPE. La variabilità epistemica legata alla definizione della pericolosità sismica è gestita attraverso un approccio ad albero logico tramite il quale è possibile attribuire dei pesi a ciascuna delle leggi utilizzate al fine di arrivare ad ottenere l'accelerazione del suolo in corrispondenza dell'area di studio per diversi tempi di ritorno. L'utilizzo dell'albero logico permette di attribuire, in ogni step dell'analisi, il valore numerico, il parametro o il modello migliore, scegliendo il peso dato a ciascuna combinazione.

L'albero ideato per il presente studio (fig. 11) è caratterizzato da due rami definiti da due differenti tipi di sorgenti, il primo costituito dalle sorgenti DISS e ZS9. Questi due rami a loro volta sono distinti in serie storica e statistica in funzione dell'intervallo di completezza, dai quali sono ricavati i parametri sismici attraverso la legge di Gutenberg Richter per entrambe le serie per ciascuna delle zone sorgenti. Infine alle 4 diverse combinazioni ottenute, sono applicate le 4 GMPE descritte nel paragrafo 3.8, arrivando così ad ottenere un albero logico a 16 rami.

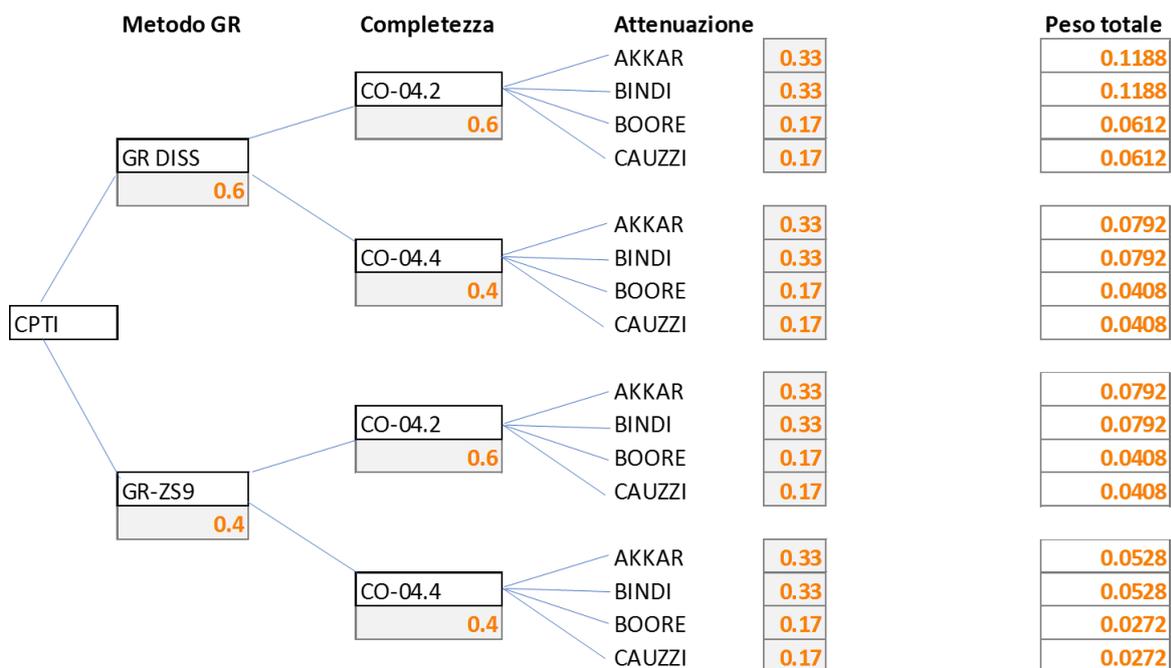


Figura 16: Albero logico utilizzato per la definizione della pericolosità sismica

La somma dei pesi attribuiti ai 16 rami deve essere pari a 1. I pesi attribuiti sono inferiori per le ZS9 poiché queste accomunano diverse zone DISS, provocando una distribuzione ed una amplificazione spaziale maggiori dei valori di magnitudo massima. Inoltre il database DISS è definito sulla base di studi più recenti.

Infine alle leggi di Bindi e Akkar è dato un peso maggiore poiché queste derivano da serie di dati derivati da registrazioni in Italia e nel bacino del Mediterraneo, inoltre sono state sviluppate considerando un maggior numero di terremoti legati a contesti geodinamici di tipo normale come quello dell'area di interesse. Al contrario delle leggi di Boore e Cauzzi che derivano da dati globali, sono state create utilizzando principalmente terremoti in contesti geodinamici di tipo trascorrente.

Di seguito si riportano gli spettri dei rami (singole GMPE) ottenuti dall'analisi ad albero logico per un tempo di ritorno di 2475 anni.

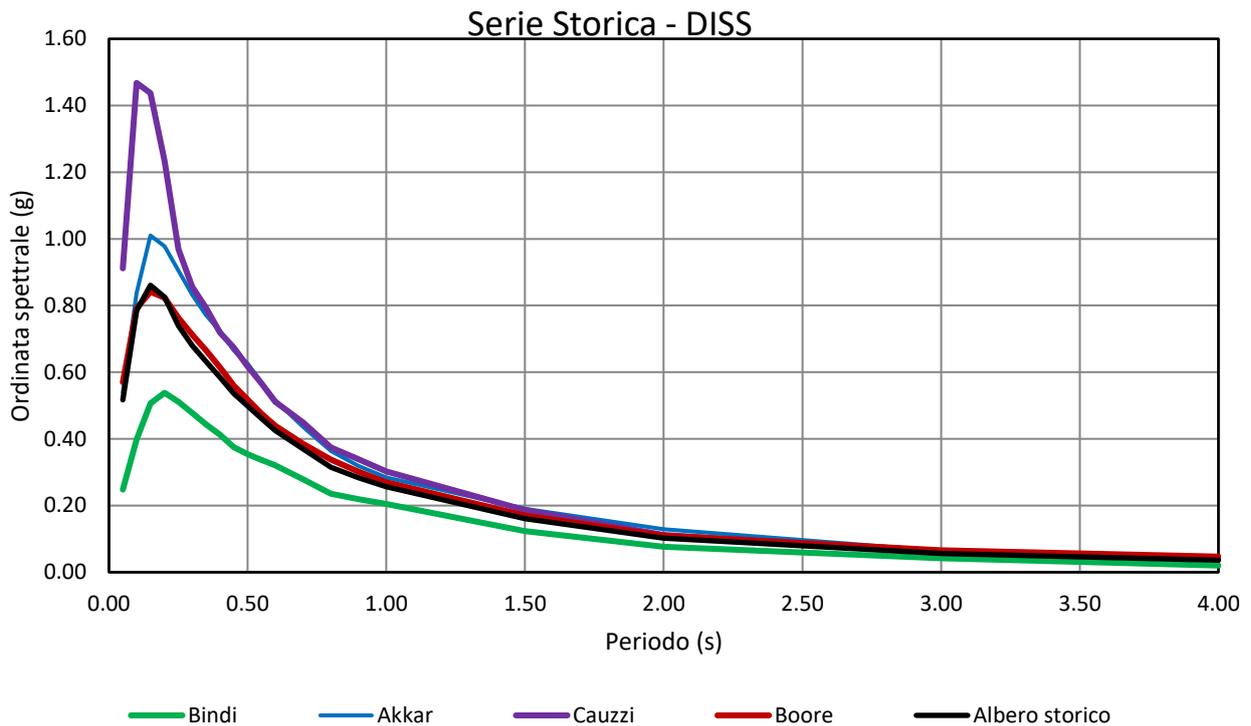


Figura 17: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie storica del catalogo DISS** per un tempo di ritorno di 2475 anni

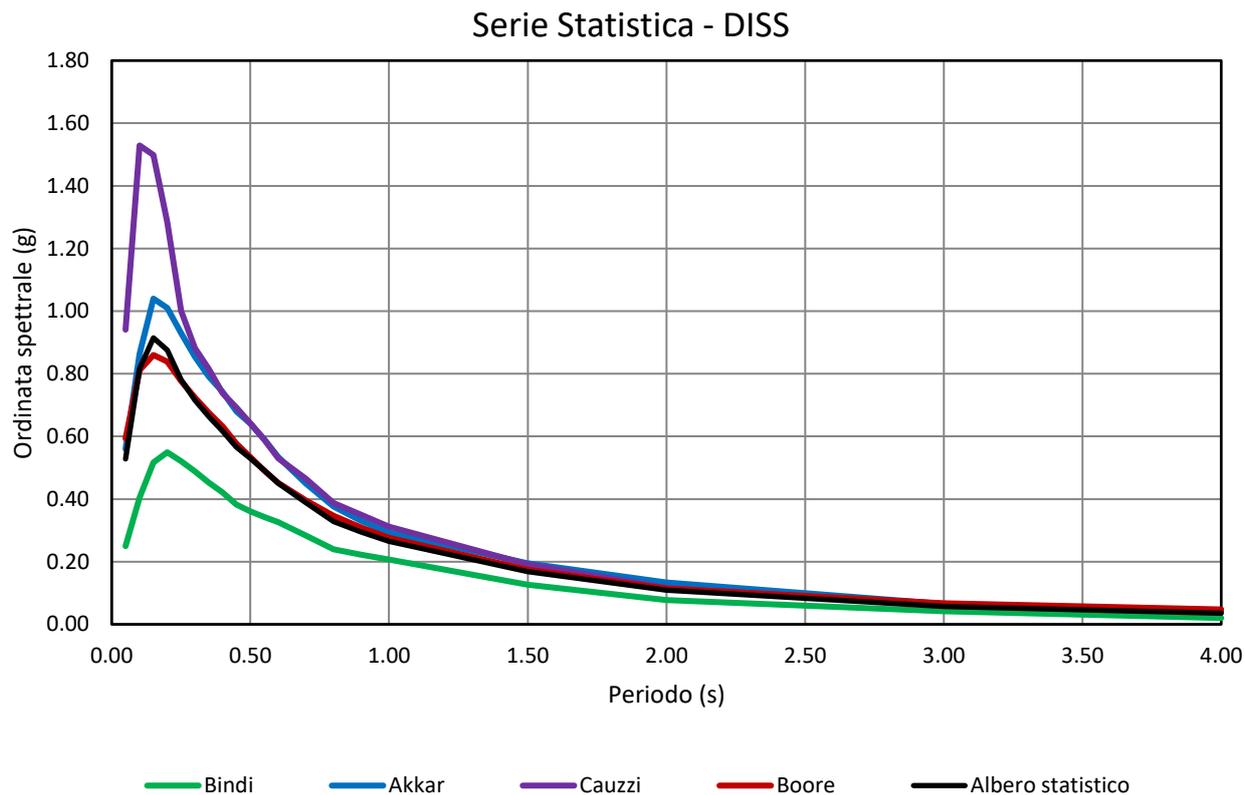


Figura 18: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie statistica del catalogo DISS** per un tempo di ritorno di 2475 anni

In entrambi i grafici si osserva che la legge che presenta un'ordinata spettrale maggiore è quella di Cauzzi e quella con ordinata spettrale minore è quella di Bindi. Infine nell'analisi combinata dei rami appartenenti al ramo principale DISS si osserva che la serie storica presenta valori leggermente inferiori rispetto alla serie statistica.

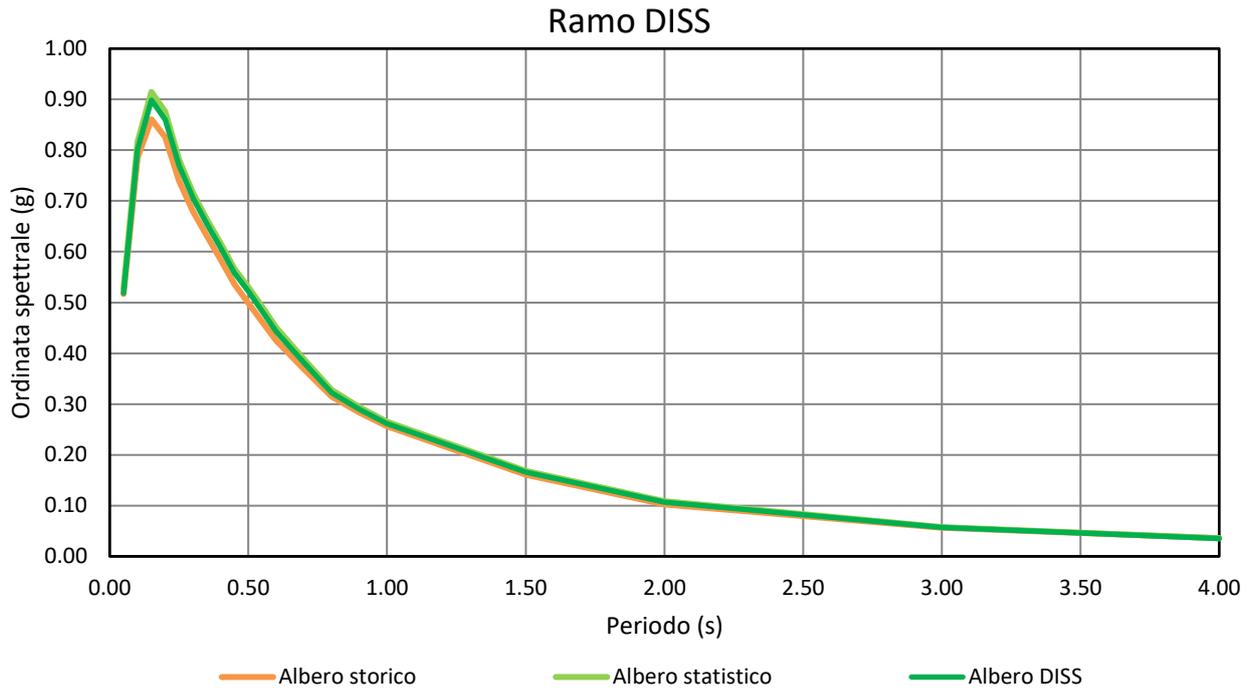


Figura 19: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie storica e statistica degli alberi logici del catalogo DISS** per un tempo di ritorno di 2475 anni

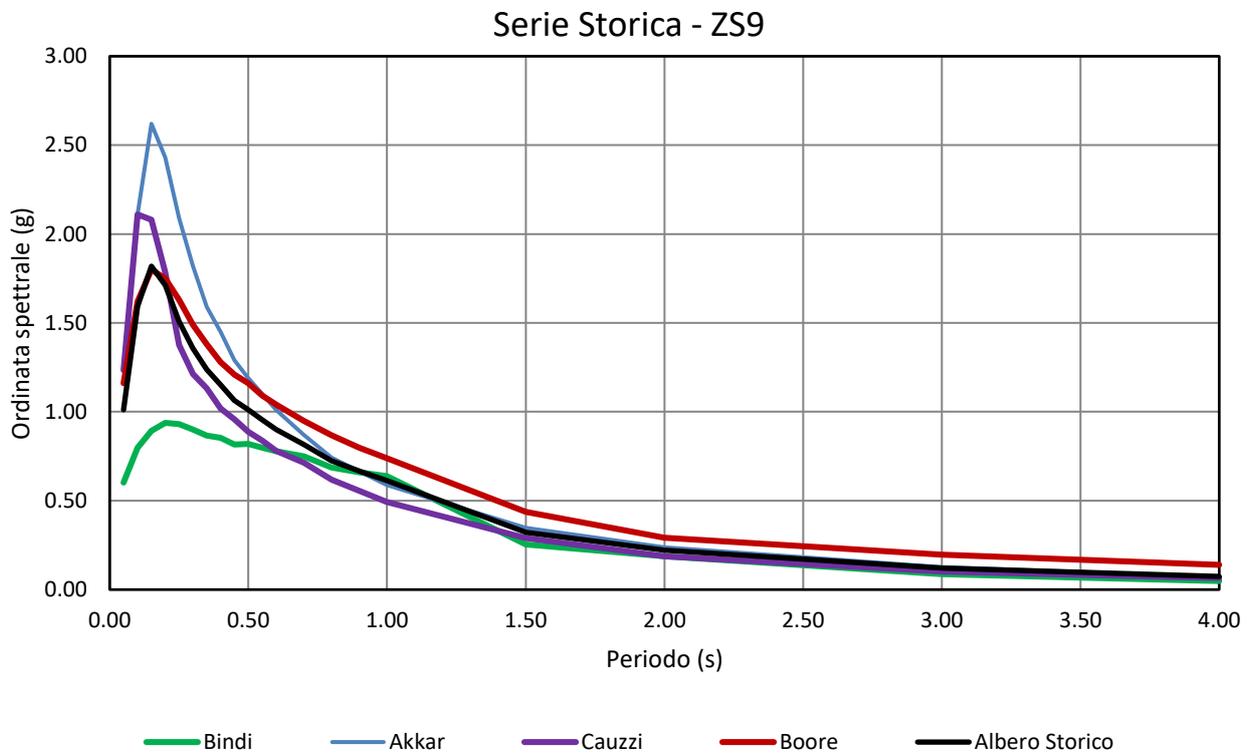


Figura 20: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie storica del catalogo ZS9** per un tempo di ritorno di 2475 anni

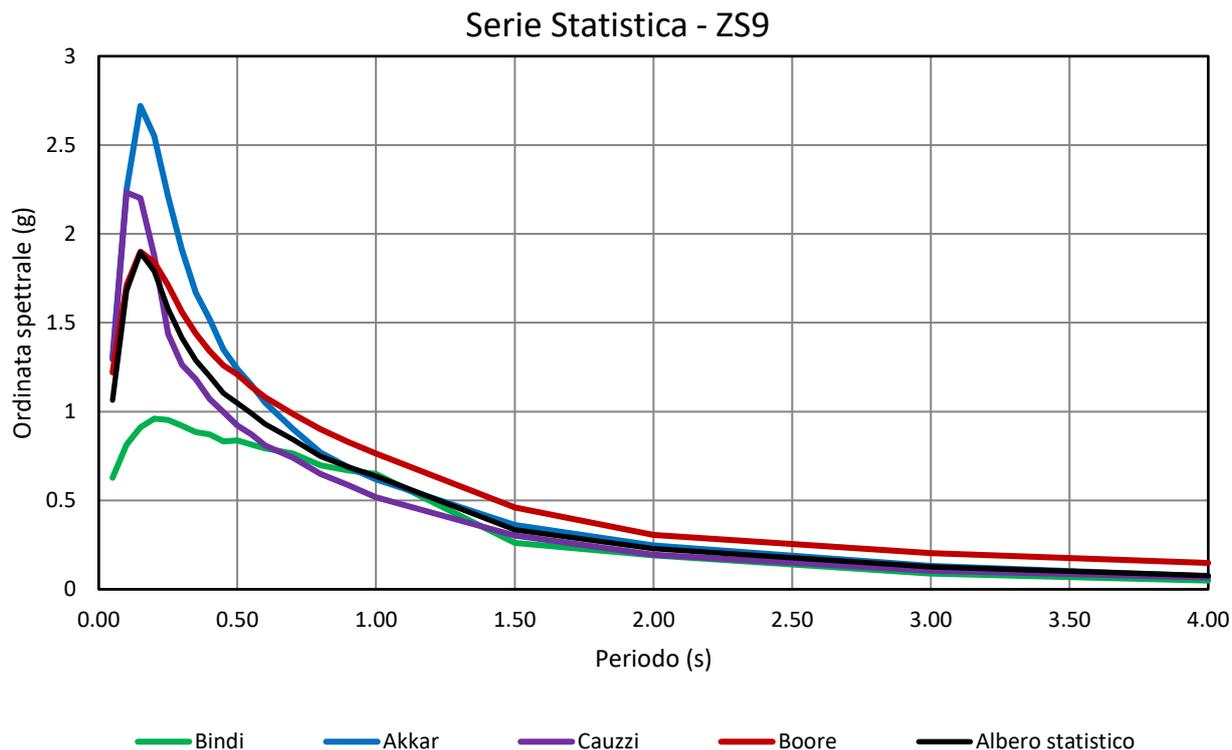


Figura 21: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie statistica del catalogo ZS9** per un tempo di ritorno di 2475 anni

Nelle sorgenti ZS9 si osserva che la legge con ordinata spettrale minore è quella di Bindi, come da analisi con sorgenti DISS, e con ordinata spettrale maggiore è quella di Akkar, diversamente da quanto osservato con le sorgenti DISS in cui i valori massimi sono stati registrati attraverso l'utilizzo della legge di Cauzzi.

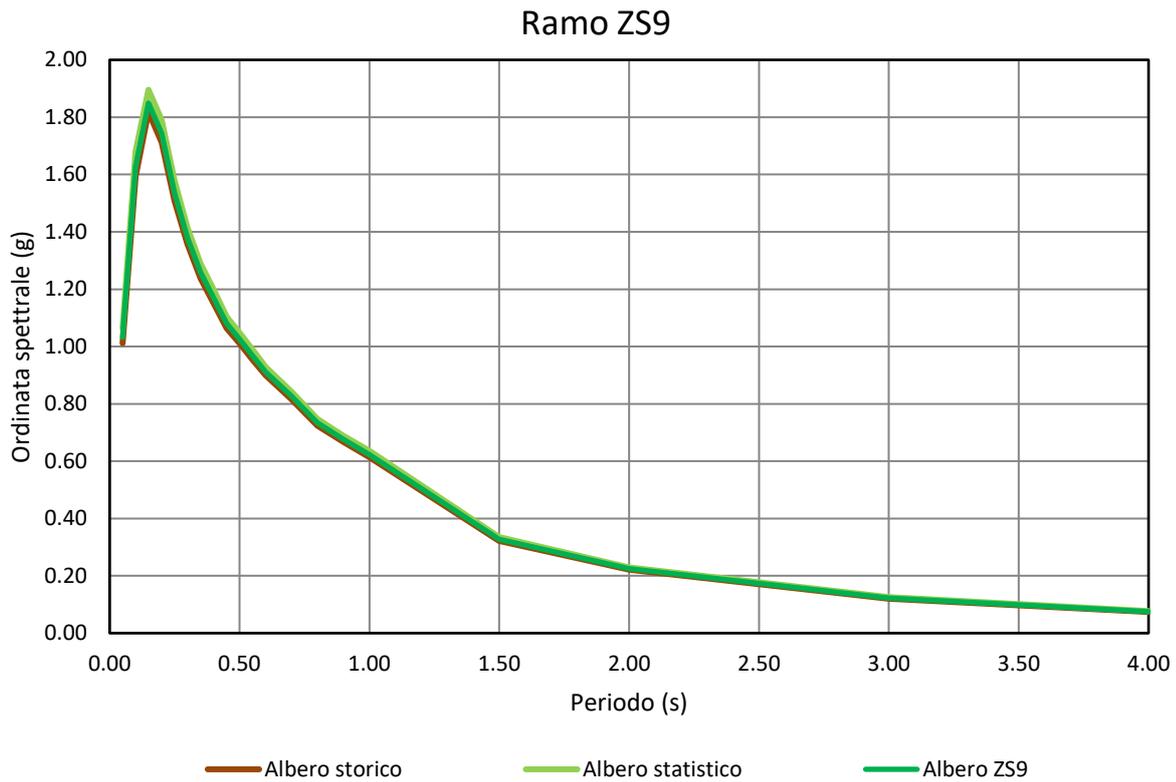


Figura 22: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie storica e statistica degli alberi logici del catalogo ZS9** per un tempo di ritorno di 2475 anni

Infine è riportato lo spettro derivante dall'analisi ad albero logico, derivato dalla combinazione dei 16 rami, per un tempo di ritorno di 2475 anni.

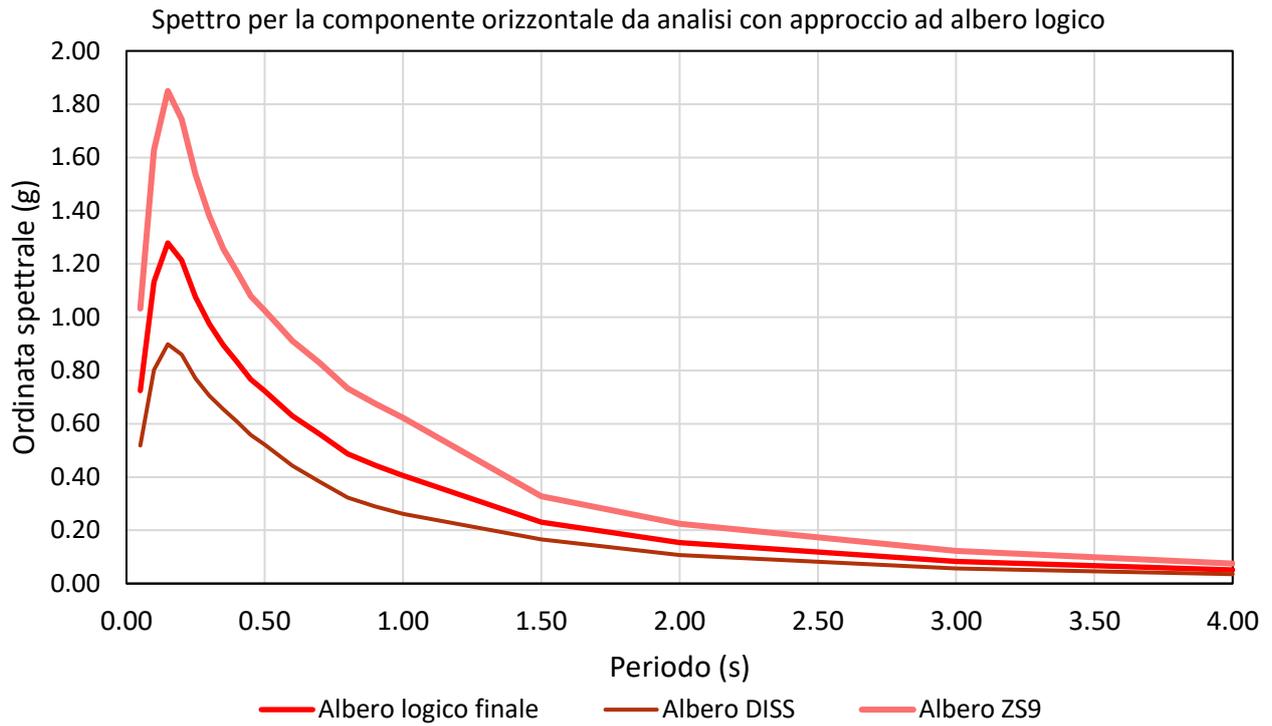


Figura 23: Spettri di risposta per la componente orizzontale derivati dall'**analisi ad albero logico completa** per un tempo di ritorno di **2475** anni. Lo spettro "Albero logico finale" rappresenta lo spettro derivante dalla combinazione di tutti i 16 rami.

Di seguito si riportano gli spettri dei rami (single GMPE) ottenuti dall'analisi ad albero logico per un tempo di ritorno di 150 anni.

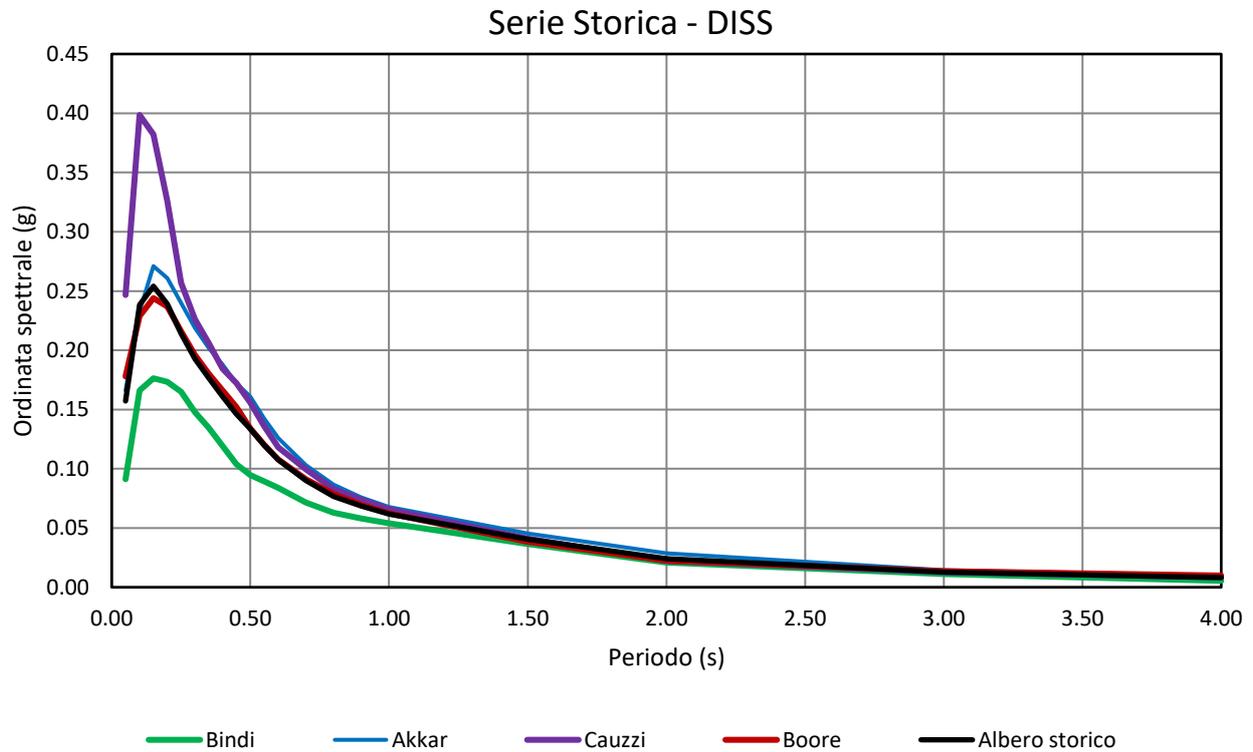


Figura 24: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie storica del catalogo DISS** per un tempo di ritorno di 150 anni

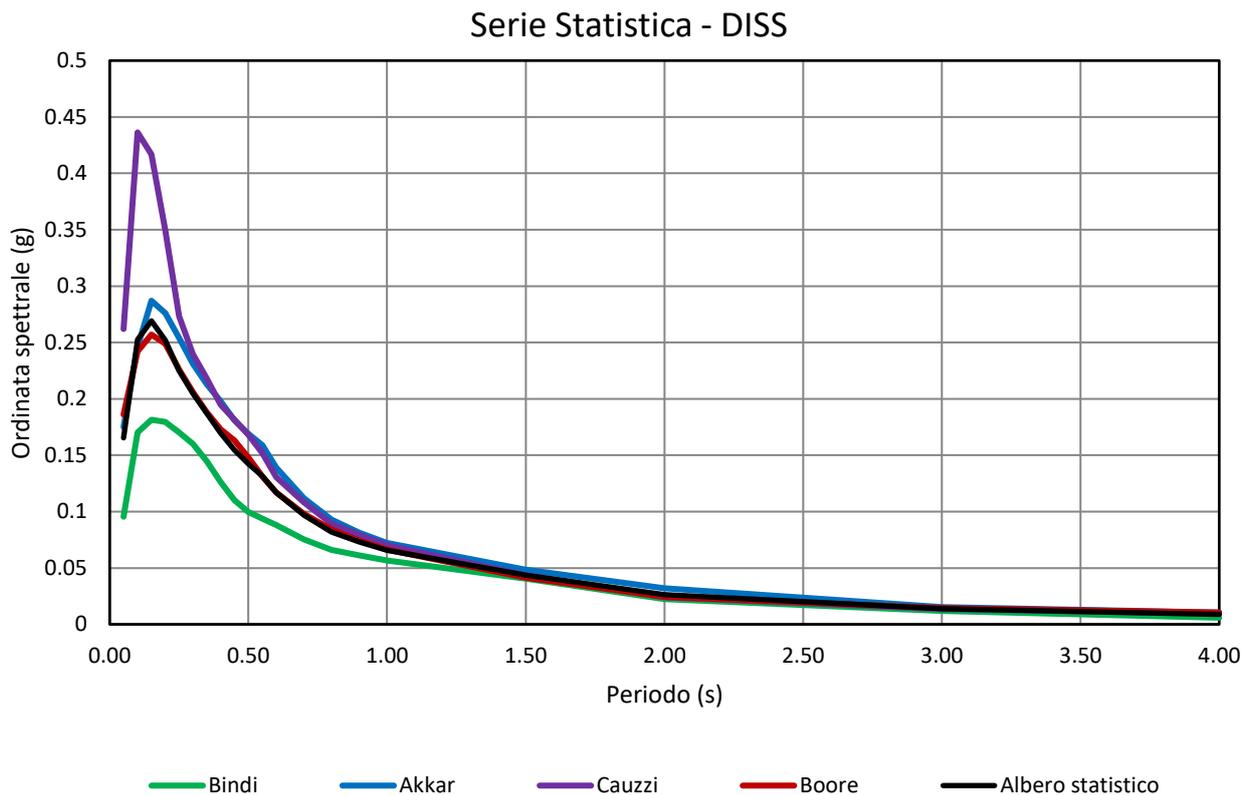


Figura 25: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie statistica del catalogo DISS** per un tempo di ritorno di 150 anni

In entrambi i grafici si osserva che la legge che presenta un'ordinata spettrale maggiore è quella di Cauzzi e quella con ordinata spettrale minore è quella di Bindi. Infine nell'analisi combinata dei rami appartenenti al ramo principale DISS si osserva che la serie storica presenta valori leggermente inferiori rispetto alla serie statistica.

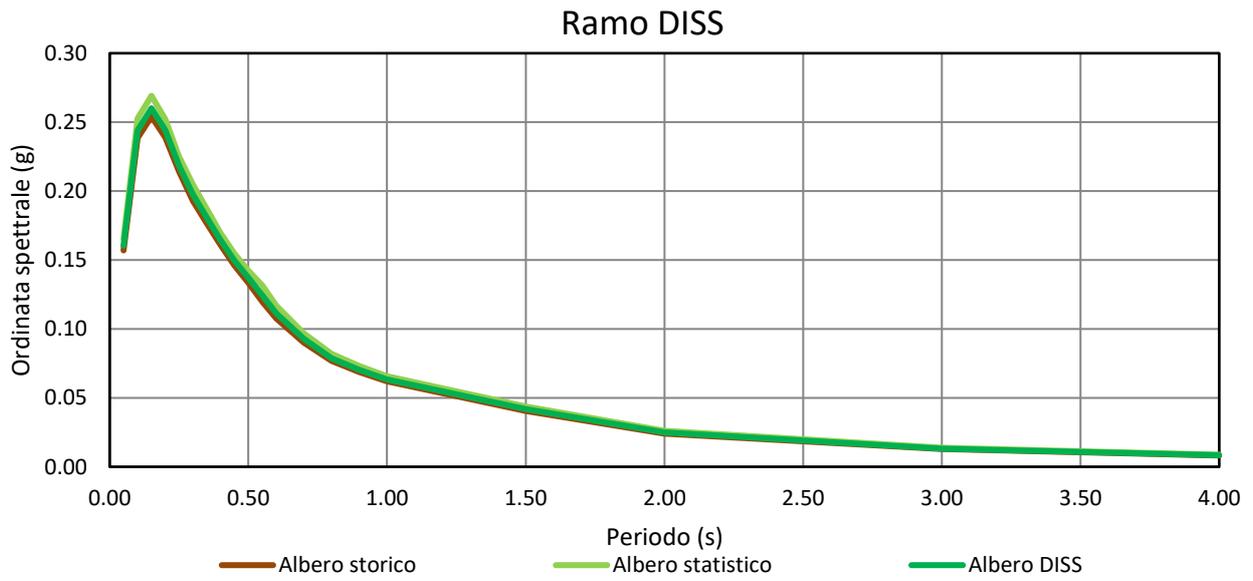


Figura 26: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie storica e statistica degli alberi logici del catalogo DISS** per un tempo di ritorno di 150 anni

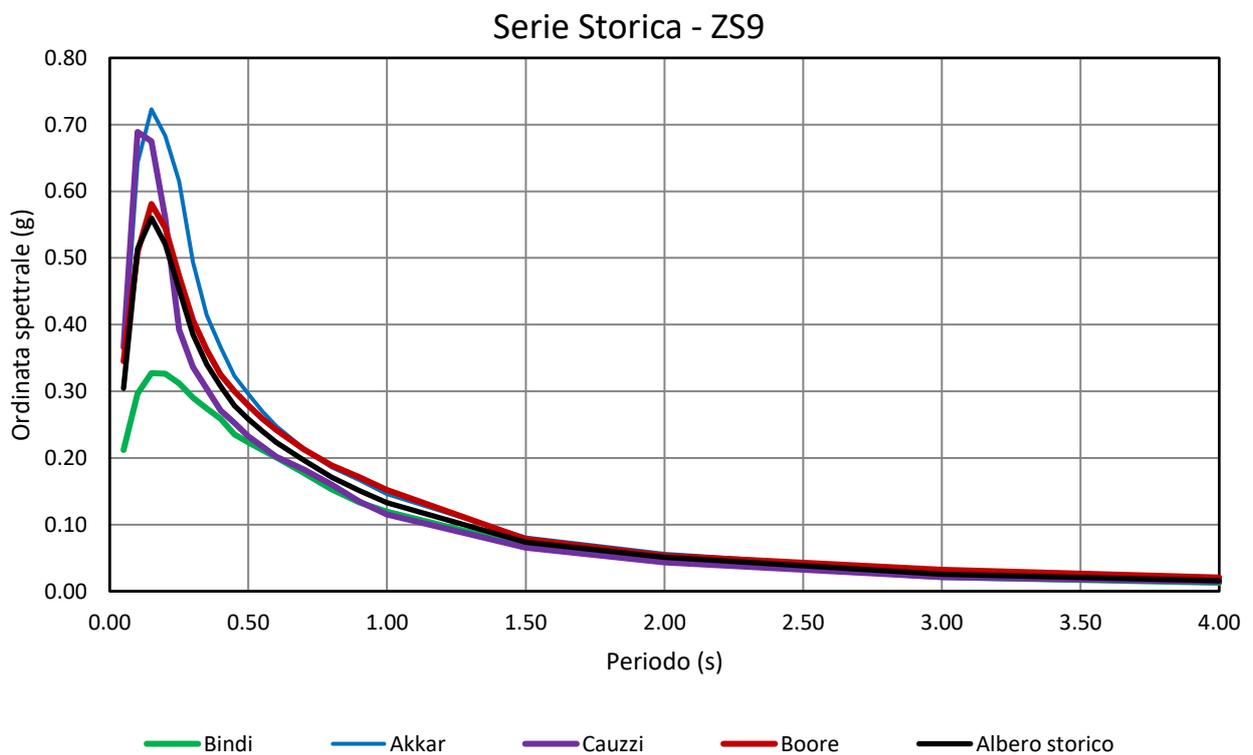


Figura 27: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie storica del catalogo ZS9** per un tempo di ritorno di 150 anni

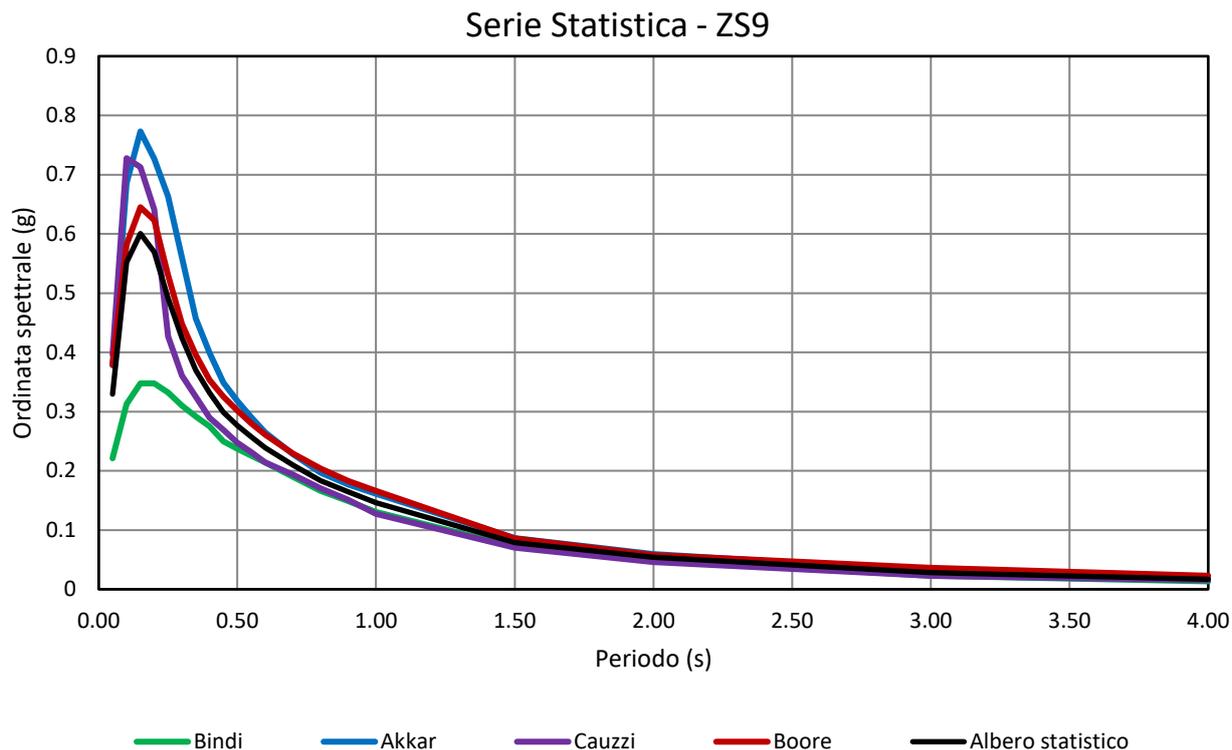


Figura 28: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie statistica del catalogo ZS9** per un tempo di ritorno di 150 anni

Nelle sorgenti ZS9 si osserva che la legge con ordinata spettrale minore è quella di Bindi, come da analisi con sorgenti DISS, e con ordinata spettrale maggiore è quella di Akkar, diversamente da quanto osservato con le sorgenti DISS in cui i valori massimi sono stati registrati attraverso l'utilizzo della legge di Cauzzi.

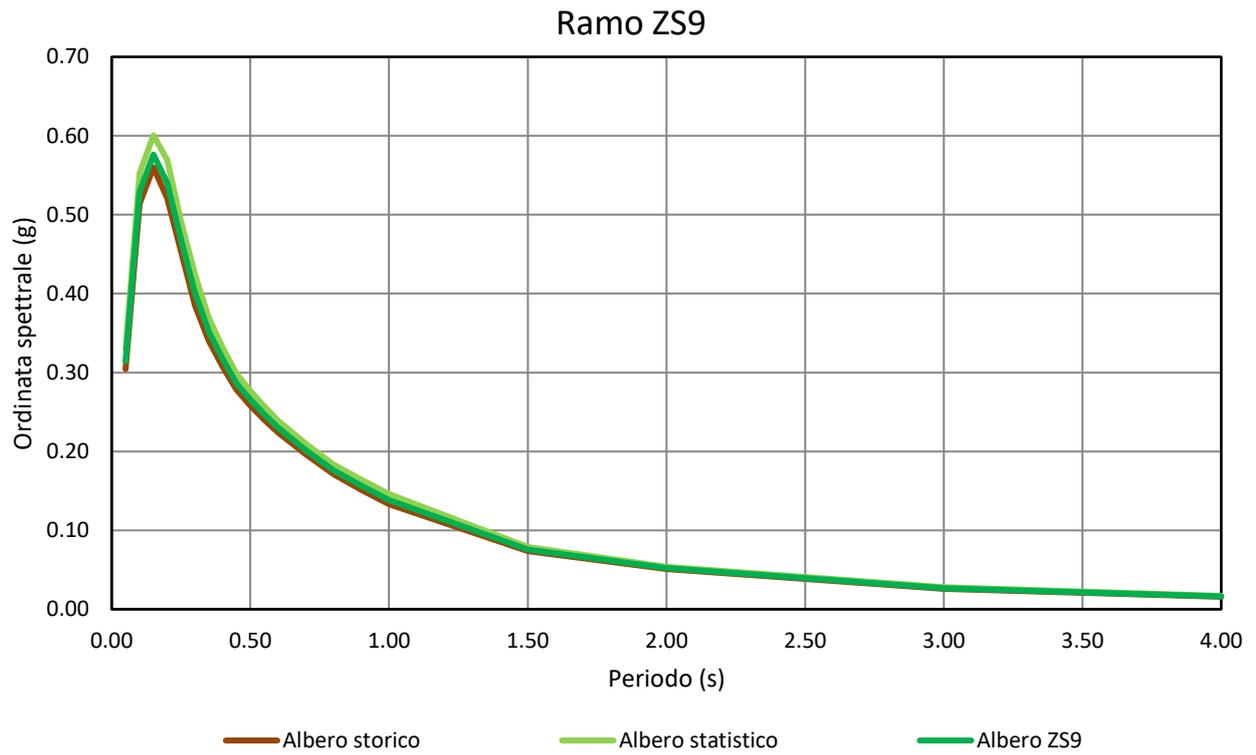


Figura 29: Spettri di risposta per le componenti orizzontali della **serie storica e statistica degli alberi logici del catalogo ZS9** per un tempo di ritorno di 150 anni

Infine è riportato lo spettro derivante dall'analisi ad albero logico, derivato dalla combinazione dei 16 rami, per un tempo di ritorno di 150 anni.

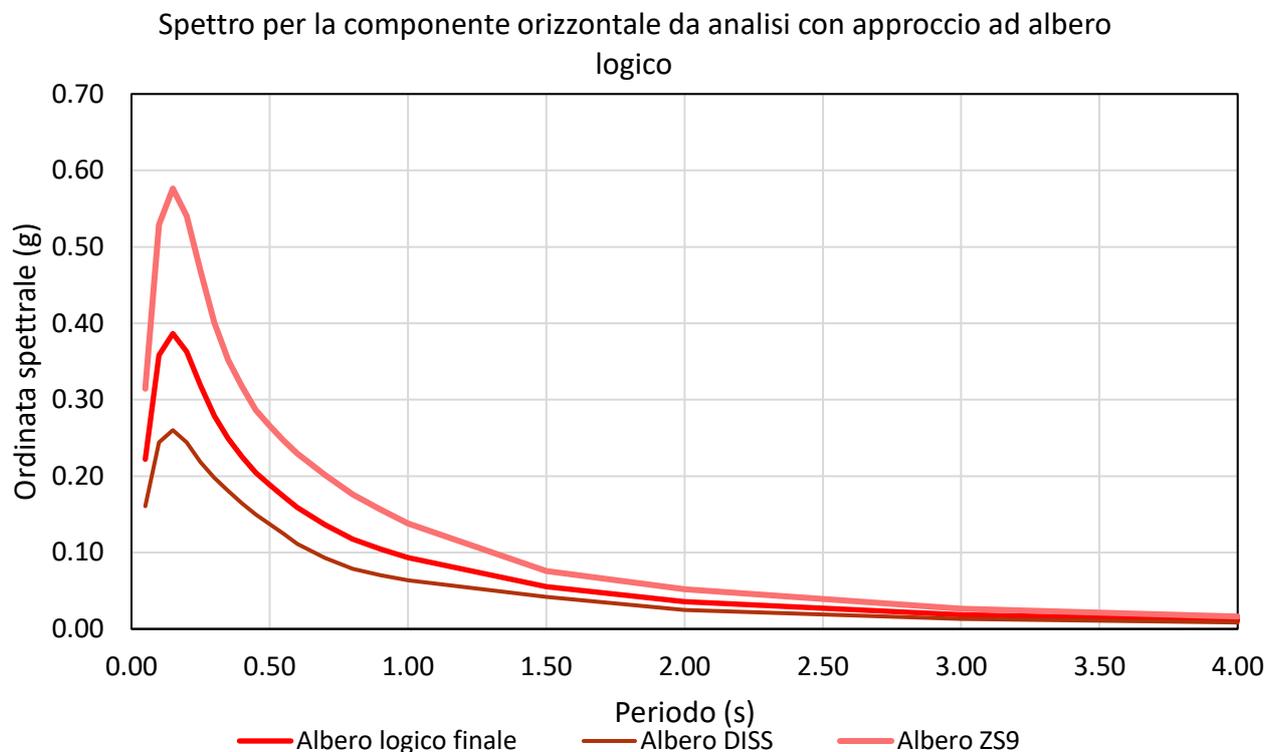


Figura 30: Spettri di risposta per la componente orizzontale derivati dall'**analisi ad albero logico completa** per un tempo di ritorno di **150** anni. Lo spettro "Albero logico finale" rappresenta lo spettro derivante dalla combinazione di tutti i 16 rami.

Si riportano in seguito i grafici e le tabelle degli spettri derivanti dall'analisi ad albero logico a 16 rami per i tempi di ritorno di 150 e 2475 anni, per la componente orizzontale.

Spettro per la componente orizzontale da analisi con approccio ad albero logico		
	Tr 150	Tr 2475
Periodo	Ordinata spettrale (g)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.22	0.72
0.10	0.36	1.13
0.15	0.39	1.28
0.20	0.36	1.21
0.25	0.32	1.08
0.30	0.28	0.98
0.35	0.25	0.90
0.40	0.23	0.83
0.45	0.20	0.77
0.50	0.19	0.72
0.55	0.17	0.68
0.60	0.16	0.63
0.70	0.14	0.56
0.80	0.12	0.49
0.90	0.10	0.44
1.00	0.09	0.41
1.50	0.06	0.23
2.00	0.04	0.15
3.00	0.02	0.08
4.00	0.01	0.05

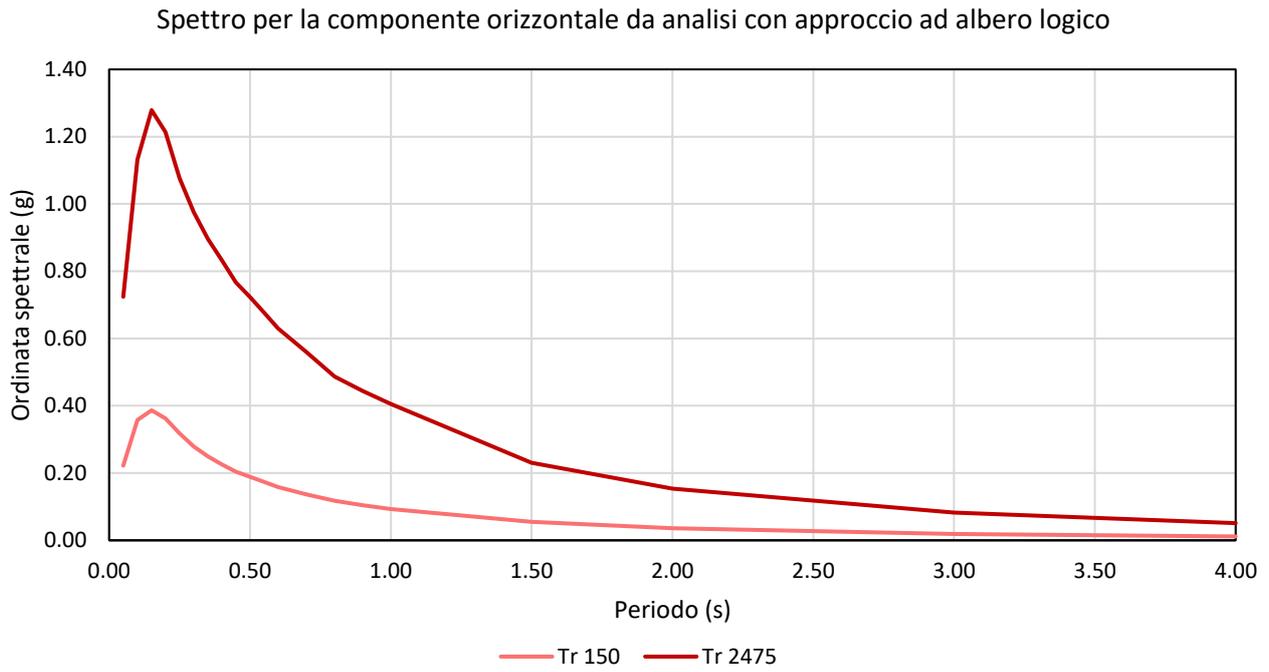


Figura 31: Spettri di risposta per la componente orizzontale per un tempo di ritorno di 150 e 2475 anni

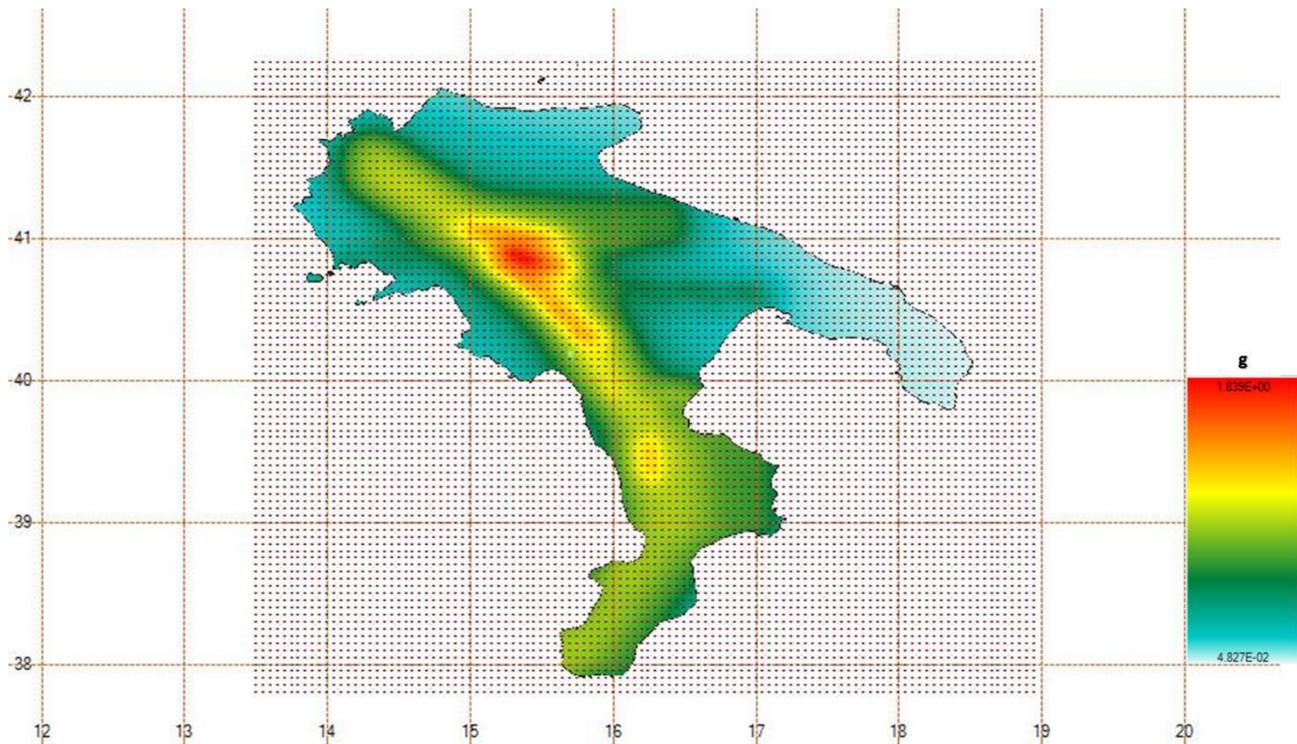


Figura 32: Carta delle ordinate spettrali derivata dall'analisi ad albero logico per la componente orizzontale ad un periodo di 0.4 s per un tempo di ritorno di 2475 anni

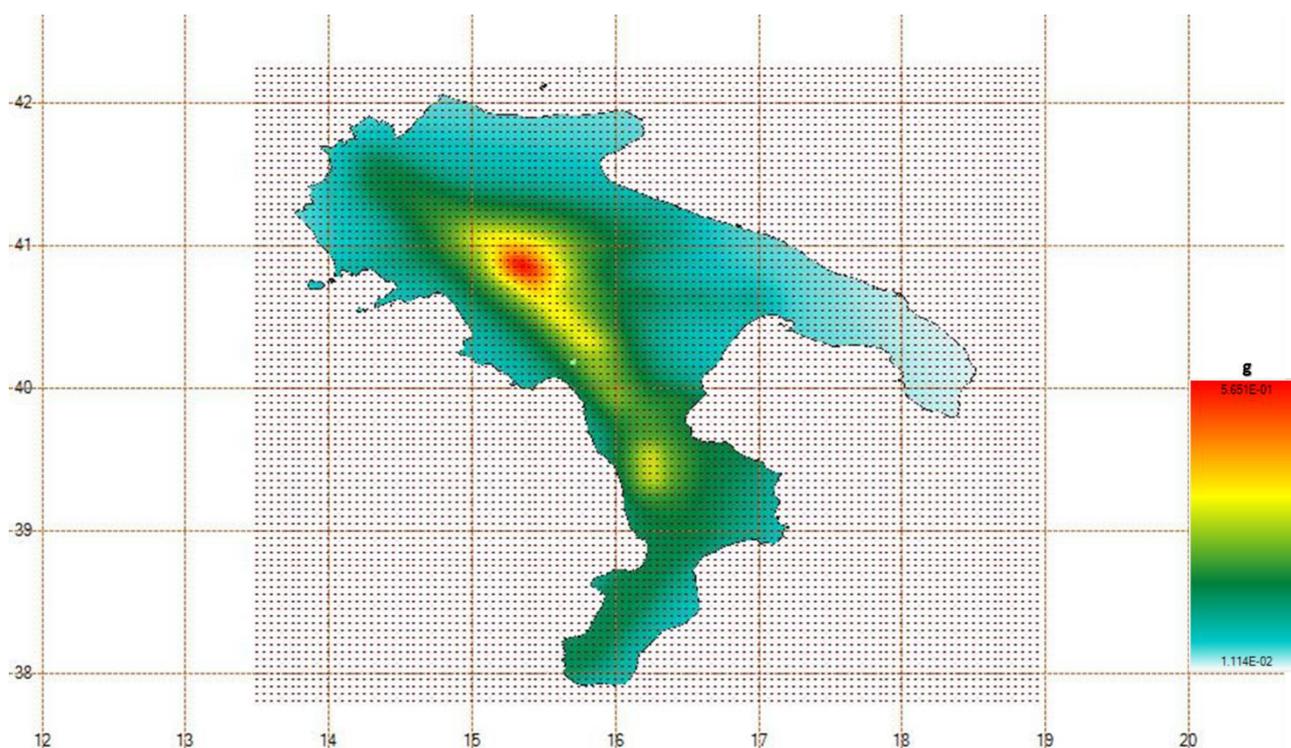


Figura 33: Carta delle ordinate spettrali derivata dall'analisi ad albero logico per la componente orizzontale ad un periodo di 0.4 s per un tempo di ritorno di 2475 anni

Come osservato nei precedenti grafici, i valori maggiori di accelerazione si osservano per le analisi realizzate con le sorgenti sismogenetiche ZS9, poiché l'area di interesse è posta direttamente al di sopra della sorgente sismogenetica 927 Sannio-Irpinia-Basilicata. Nei modelli con sorgente sismogenetica DISS l'elevato picco di accelerazione, osservabile in particolar modo nello spettro derivato nella relazione di Cauzzi, è dato dalla vicinanza con la sorgente sismogenetica Rimendiello-Mormanno posta a circa 8-10 km dall'area di interesse. Si precisa che la relazione di Cauzzi e quella di Boore sono state definite in contesti geodinamici prevalentemente di tipo trascorrente, quindi differente rispetto al contesto dell'area di studio. Gli spettri derivanti dalla relazione di Bindi, sviluppata sulla base di sismi italiani in un contesto geodinamico di tipo normale, presentano dei valori di accelerazione inferiori.

Inoltre il valore elevato del picco di accelerazione registrato per tempi di ritorno di 2475 anni è derivato da un approccio allo studio sismotettonico di tipo conservativo, fin dalla scelta della magnitudo minima utilizzata per definire le relazioni magnitudo-frequenza Gutenberg-Richter, pari a 4.4 per la maggior parte delle sorgenti sismogenetiche.

3.11 Calcolo degli spettri di risposta verticali ed analisi ad albero logico

È stata definita infine la componente di accelerazione del suolo verticale attraverso la legge di Bindi, la quale permette la valutazione della componente verticale. L'analisi è stata svolta sempre con un approccio ad albero logico utilizzando come zone sorgenti le zone sismogenetiche DISS e le ZS9.

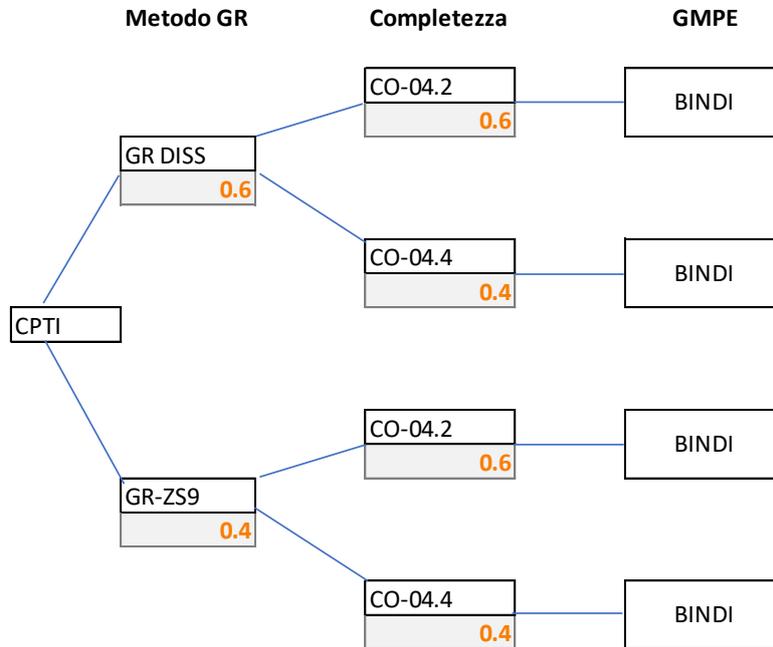


Figura 34: Albero logico per la valutazione della componente verticale

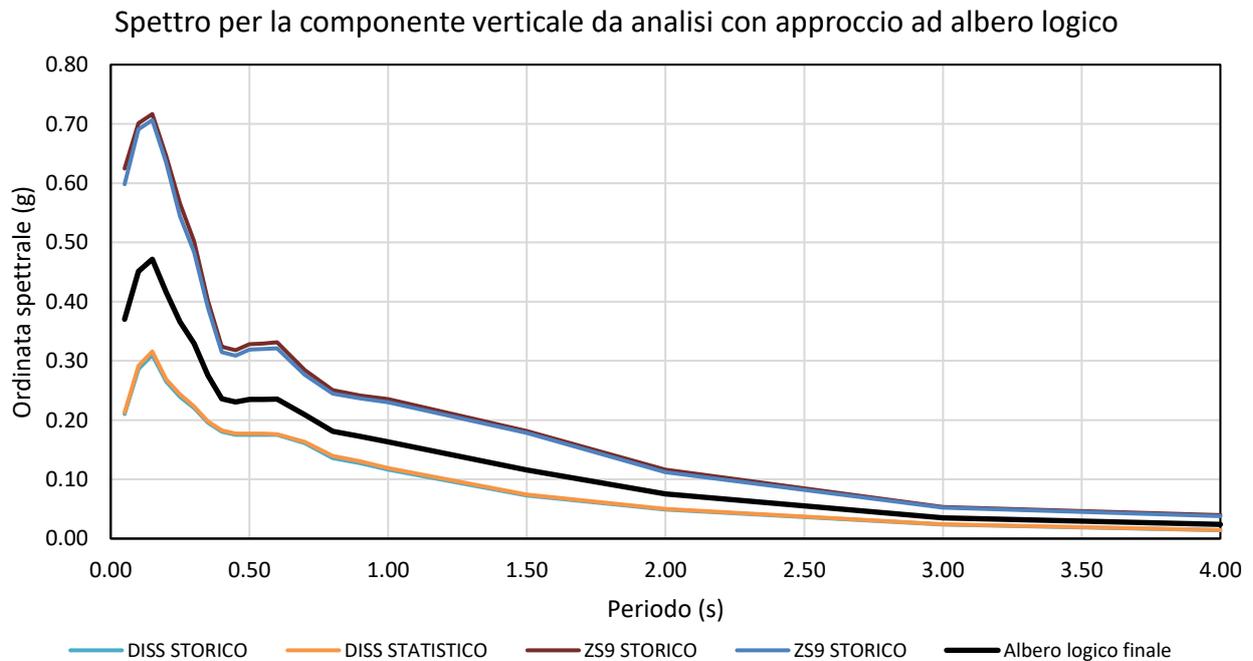


Figura 35: Spettri di risposta per la componente verticale definiti tramite la legge di Bindi per un tempo di ritorno di **2475** anni

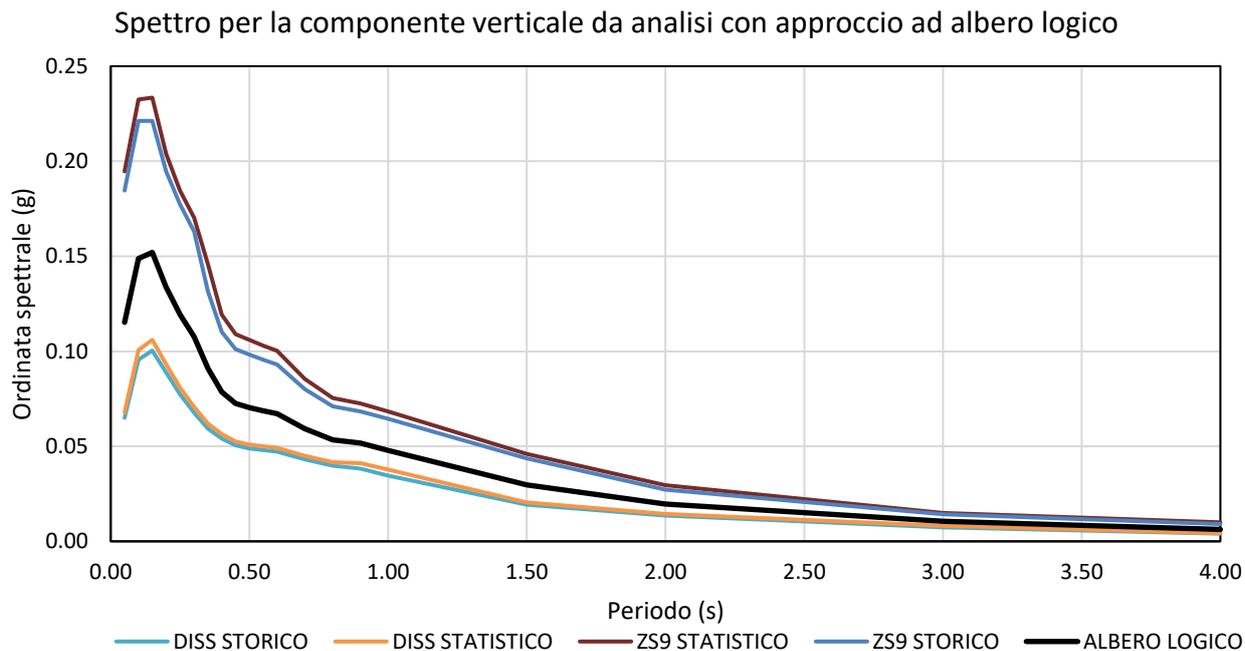


Figura 36: Spettri di risposta per la componente verticale definiti tramite la legge di Bindi per un tempo di ritorno di **150** anni

Spettro per la componente orizzontale da analisi con approccio ad albero logico		
	Tr 150	Tr 2475
Periodo	Ordinata spettrale (g)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.12	0.37
0.10	0.15	0.45
0.15	0.15	0.47
0.20	0.13	0.42
0.25	0.12	0.37
0.30	0.11	0.33
0.35	0.09	0.28
0.40	0.08	0.24
0.45	0.07	0.23
0.50	0.07	0.23

0.55	0.07	0.24
0.60	0.07	0.24
0.70	0.06	0.21
0.80	0.05	0.18
0.90	0.05	0.17
1.00	0.05	0.16
1.50	0.03	0.12
2.00	0.02	0.08
3.00	0.01	0.04
4.00	0.01	0.02

Spettro per la componente orizzontale da analisi con approccio ad albero logico

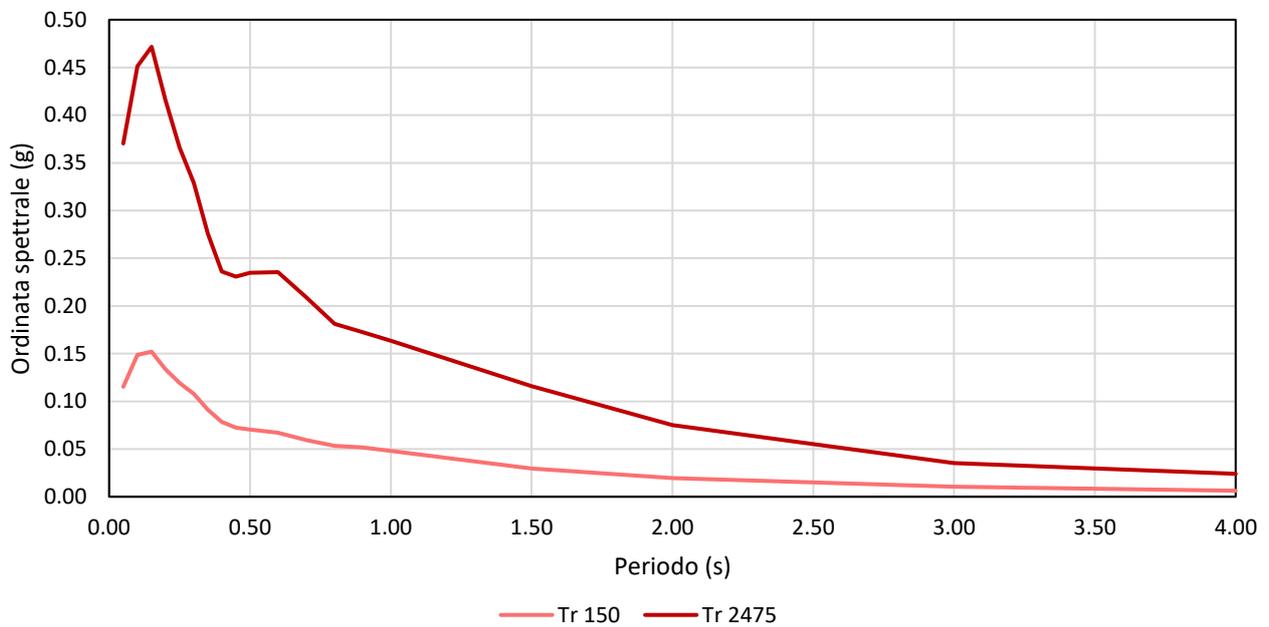


Figura 37: Spettri di risposta per la componente verticale per un tempo di ritorno di 150 e 2475 anni

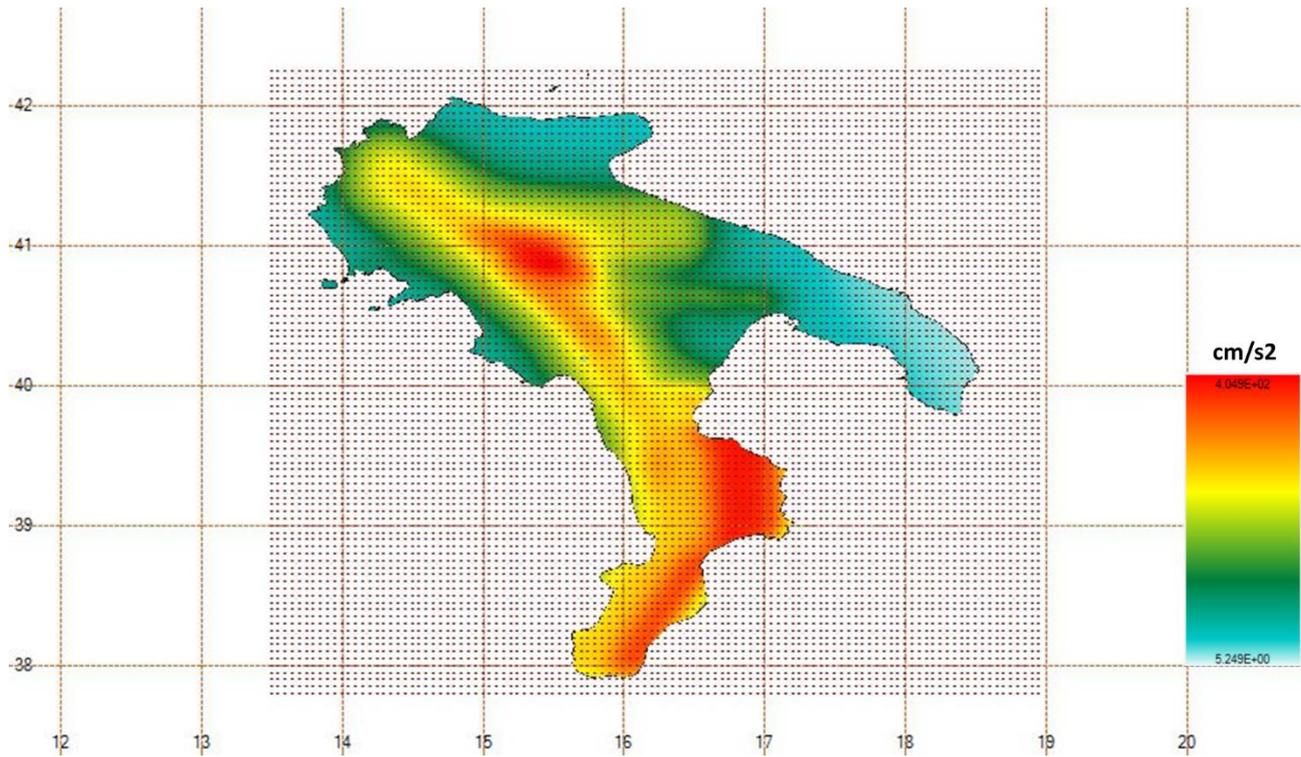


Figura 38: Carta delle ordinate spettrali derivata dall'analisi ad albero logico per la componente verticale ad un periodo di 0.4 s per un tempo di ritorno di 2475 anni

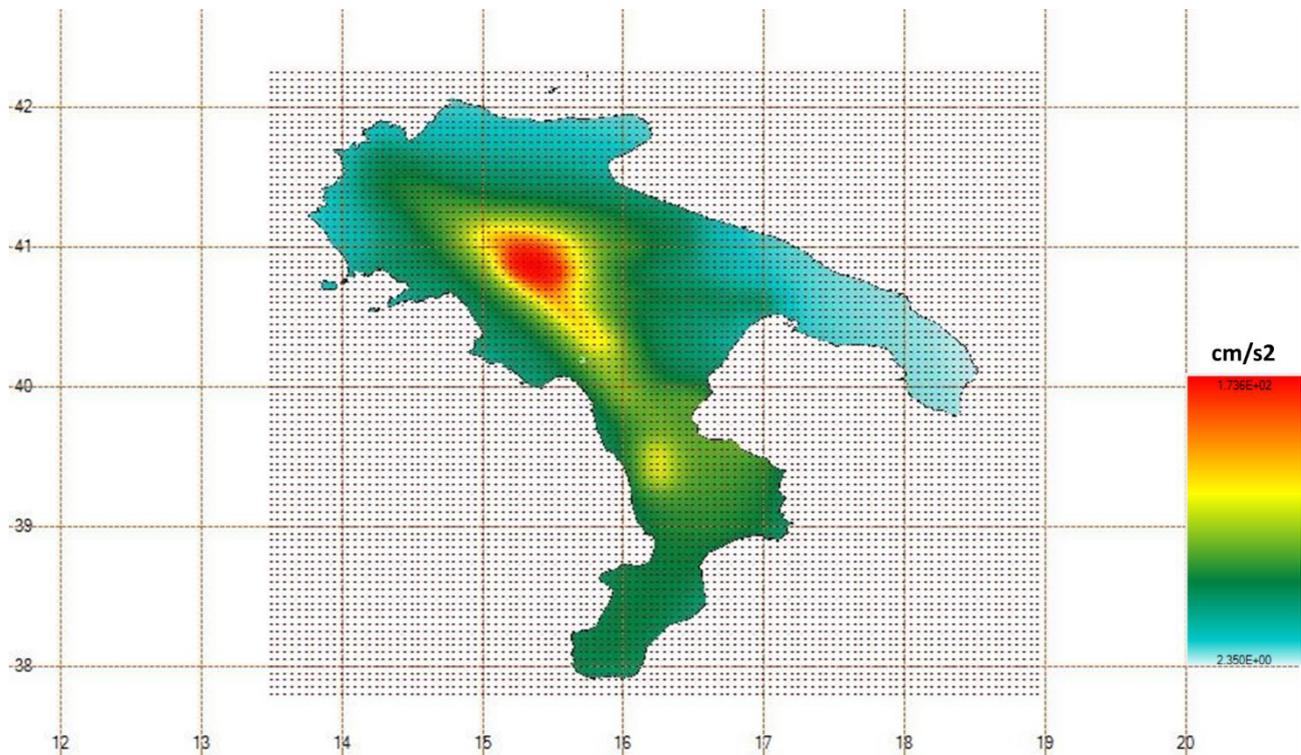


Figura 39: Carta delle ordinate spettrali derivata dall'analisi ad albero logico per la componente verticale ad un periodo di 0.4 s per un tempo di ritorno di 150 anni

4 CONCLUSIONI

Il presente studio sismotettonico è stato realizzato al fine di una valutazione preliminare della pericolosità sismica in corrispondenza dell'area dove è in progetto la realizzazione della Diga di Casalbuono.

La pericolosità sismica è stata definita attraverso la stima dello scuotimento atteso considerato un determinato tempo di ritorno (150 e 2475 anni), utilizzando un approccio ad albero logico. L'analisi per la definizione dello scuotimento atteso si è articolata in una prima fase di raccolta dati dei sismi contenuti nelle banche dati sismologiche (CPTI15, DBMI15, CFTI5MED, ISIDe) e definizione delle sorgenti sismogenetiche contenute nelle banche dati (DISS, ITHACA, ZS9). I dati estratti dalle banche dati sismologiche sono stati utilizzati per definire la relazione magnitudo-distanza, secondo la Legge di Gutenberg-Richter, per ciascuna delle zone sismogenetiche considerate. In particolar modo sono state utilizzate nell'albero logico le sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS 3.3.0 e le sorgenti ZS9.

Il risultato finale dello studio sismotettonico è consistito nella definizione di uno spettro di risposta orizzontale e verticale, derivato dalla combinazione di diverse GMPE (*Ground Motion Prediction Equations*) in uno schema ad albero logico.

L'approccio probabilistico utilizzato nel presente studio ha permesso di affrontare l'incertezza legata all'utilizzo di modelli empirici. In particolar modo sono state ridotte le incertezze epistemiche legate alla conoscenza e disponibilità di dati attraverso un approccio ad albero logico tramite il quale è possibile attribuire dei pesi a ciascuna legge utilizzata. L'incertezza aleatoria, ovvero quella intrinseca al fenomeno stocastico stesso, è affrontata tenendo in considerazione la deviazione standard di ciascuna GMPE.

Gli spettri di risposta nelle analisi per la componente orizzontale DISS di tipo storico e statistico mostrano un andamento simile, con valori leggermente maggiori per la serie statistica. L'ordinata spettrale con accelerazione maggiore è quella di Cauzzi e quella con ordinata spettrale minore è quella di Bindi. Nell'analisi per le sorgenti sismogenetiche ZS9 la serie statistica presenta dei valori di accelerazione leggermente maggiori, con valori di accelerazione maggiore per la relazione di Akkar e minori per la relazione di Bindi.

Nelle fasi successive della progettazione una volta definite le proprietà della struttura in costruzione e del sito dove sarà realizzata, gli spettri di risposta potranno essere calcolati per i tempi di ritorno definiti sulla base delle caratteristiche della diga come definito da normativa e confrontati con gli spettri da NTC.

Infine, per la fagliazione superficiale (faglia capace) in una fase successiva sarà possibile definire secondo diversi modelli la probabilità di rottura secondaria e la distribuzione degli spostamenti attesi al fine di verificarne la relazione con le opere in progetto sia in termini di posizionamento che di orientazione rispetto alla faglia capace.

5 BIBLIOGRAFIA

- Akkar, S., e J. J. Bommer (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81(2), 195-206.
- Akkar, S., M. A. Sandıkkaya e J. J. Bommer (2014). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bull. Earthquake Eng.*, 12(1), 359–387, doi: 10.1007/s10518-013-9461-4.
- Ambraseys, N. N., e K. A. Simpson (1996). Prediction of vertical response spectra in Europe, *EESD*, vol. 25, 401-412.
- Ambraseys, N. N., K. A. Simpson e J. J. Bommer (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 371-400.
- Basili, R., G. Valensise, P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M. M. Tiberti e E. Boschi (2008). The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, *Tectonophysics*, 447, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014.
- Basili, R., Kastelic, V., Valensise, G., and DISS Working Group (2009). DISS3 tutorial series: Guidelines for compiling records of the Database of Individual Seismogenic Sources, version 3, *Rapporti Tecnici INGV*,. 108, 20 pp., <http://portale.ingv.it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/archivio/rapporti-tecnici-2009/>.
- Basili R, D'Amico V., Meletti C., Valensise G., *Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Roma
- Bindi, D., F. Pacor, L. Luzi, R. Puglia, M. Massa, G. Ameri e R. Paolucci (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bull. Earthquake Eng.*, 9(6), 1899–1920, doi:10.1007/s10518-011-9313-z.
- Bindi, D., M. Massa, L. Luzi, G. Ameri, F. Pacor, R. Puglia e P. Augliera (2014). Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5 %-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. *Bull. Earthquake Eng.*, 12(1), 391–430, doi:10.1007/s10518-013-9525-5.
- Bommer, J.J., J. Douglas e F. O. Strasser (2003). Style-of-faulting in ground-motion prediction equations. *Bulletin of Earthquake Engineering* 1, 171-203.
- Boore, D. M. (2010). Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(4), 1830–1835, doi:10.1785/0120090400.
- Boore, D. M., J. P. Stewart, E. Seyhan e G. M. Atkinson (2014). NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes, *Earthq. Spectra*, 30(3), 1057–1085, doi:10.1193/070113EQS184M.
- Boschi, E., E. Guidoboni, G. Ferrari, G. Valensise e P. Gasperini (1997). *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990*. Istituto Nazionale di Geofisica e SGA editori, Bologna, 644 pp..

- Brozzetti, F. (2011). The Campania-Lucania Extensional Fault System, southern Italy: A suggestion for a uniform model of active extension in the Italian Apennines. *Tectonics*, 30(5).
- Cauzzi, C., e E. Faccioli (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology* 12, 453–475.
- Cauzzi, C., E. Faccioli, M. Vanini e A. Bianchini (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bull. Earthquake Eng.* 13, 1587-1612.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2015). Linee-guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC), Versione 1.0, 55 pp. (http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Linee_Guida_Faglie_Atтиве_Capaci_2016.pdf).
- Gasparini, P., Stucchi, M., & Vannucci, G. Zonazione sismogenetica ZS9–App. 2 al Rapporto Conclusivo.
- Gruppo di Lavoro CPTI (1999). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 1 (CPTI99, luglio 1999). ING-GNDT-SGA-SSN, Bologna, 92 pp. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>.
- Gruppo di Lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04). INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>.
- Gruppo di Lavoro MPS (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 pp. + 5 appendici.
- Guerrieri, L., Leoni, G., Blumetti, A. M., & Comerci, V. (2014, September). Fault Displacement Hazard in urban areas in Italy: a first assessment. In *Proceedings of the 5th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology (PATA)* (pp. 21-27).
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018) - CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>
- Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area, *Scientific Data* 6, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>
- IAEA (1987) An Introduction to Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis in Site Evaluation for Existing Nuclear Installations. IAEA-TECDOC-1987, 147 pp.
- IAEA (2010) Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations. IAEA-SSG-9, 80 pp.
- ISIDe Working Group (2016). ISIDe version 1.0, doi: 10.13127/ISIDe.
- Locati, M., R. Camassi, A. Rovida, E. Ercolani, F. Bernardini, V. Castelli, C. H. Caracciolo, A. Tertulliani, A. Rossi, R. Azzaro, S. D'Amico, S. Conte, E. Rocchetti (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, doi: 10.6092/INGV.IT-DBMI15.

- Locati, M., Camassi, R., Rovida, A., Ercolani, E., Bernardini, F., Castelli, V., ... & Rocchetti, E. (2021). Italian Macroseismic Database (DBMI15). Version, 3, 3228.
- Luzi, L., S. Hailemichael, D. Bindi, F. Pacor, F. Mele e 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
- Meletti, C., F. Galadini, G. Valensise, M. Stucchi, R. Basili, S. Barba, G. Vannucci e E. Boschi (2008). A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory, *Tectonophysics*, 450, 85–108, doi: 10.1016/j.tecto.2008.01.003.
- Meletti, C., A. Rovida, V. D'Amico e M. Stucchi M. (2014). Modelli di pericolosità sismica per l'area italiana: "MPS04-S1" e "SHARE". *Progettazione Sismica*, 5(1), 15-25, doi: 10.7414/PS.5.1.15-25
- Michetti, A. M., L. Serva e E. Vittori (2000) ITHACA. Italy Hazard from Capable Faults: a database of active faults of the Italian onshore territory. CD-ROM e note esplicative, pubblicata da APAT, Roma.
- Mori, F., Mendicelli, A., Moscatelli, M., Romagnoli, G., Peronace, E., & Naso, G. (2020). A new Vs30 map for Italy based on the seismic microzonation dataset. *Engineering Geology*, 275, 105745.
- Ordaz M. and Salgado-Gálvez M.A. (2020). R-CRISIS v20 Validation and Verification Document. ERN Technical Report. Mexico City, Mexico.
- Pacor, F., R. Paolucci, L. Luzi, F. Sabetta, A. Spinelli, A. Gorini, M. Nicoletti, S. Marcucci, L. Filippi e M. Dolce (2011). Overview of the Italian strong motion database ITACA 1.0. *Bull. Earthquake Eng.*, 9(6), 1723–1739. Doi: 10.1007/s10518-011-9327
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P., Antonucci A., 2022. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (2020). The Italian earthquake catalogue CPTI15. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(7), 2953-2984. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00818-y>
- Sabetta, F., e A. Pugliese (1996). Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86(2), 337-352.
- Santulin, M., D'Amico, M., Lanzano, G., Puglia, R., Felicetta, C., Tiberti, M. M., ... & Russo, E. ANALISI DI PERICOLOSITÀ SISMICA OTTENUTA UTILIZZANDO MODELLI DI ATTENUAZIONE IBRIDI SVILUPPATI NELL'AMBITO DEL PROGETTO HYPSTHER.
- Slejko, D., L. Peruzza e A. Rebez (1998). The seismic hazard maps of Italy. *Ann. Geophys*, 41 (2), 183-214.
- Slejko, D. Elementi di calcolo della pericolosità sismica
- Stucchi, M., C. Meletti, V. Montaldo, H. Crowley, G. M. Calvi e E. Boschi (2011). Seismic Hazard Assessment (2003–2009) for the Italian Building Code. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101 (4), 1885–1911.

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.

Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., Ramelli, A. R., Ake, J. P., Slemmons, D. B., McCalpin J.P., Doser D.I., Fridrich, C.I., Swan F.H., Rogers A.M., Yount C.J., Anderson L.W., Smith K.D., Bruhn R.L. Knuepfer P.L.K., Smith R.B., dePolo C.M., O'Leary D.W., Coppersmith K.J., Pezzopane S.K., Schwartz D.P., Whitney J.W., Olig S.S. & Toro, G. R. (2003). A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra*, 19, 191.

6 APPENDICE

6.1 Spettri di risposta orizzontali – tempo di ritorno 2475 anni

DISS STORICO - BINDI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.25
0.1	0.40
0.15	0.51
0.2	0.54
0.25	0.51
0.3	0.48
0.35	0.44
0.4	0.41
0.45	0.38
0.5	0.35
0.55	0.34
0.6	0.32
0.7	0.28
0.8	0.24
0.9	0.22
1	0.20
1.5	0.12
2	0.08
3	0.04
4	0.02

DISS STORICO - AKKAR	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.54
0.1	0.84
0.15	1.01
0.2	0.98
0.25	0.91
0.3	0.83
0.35	0.77
0.4	0.72
0.45	0.67
0.5	0.63
0.55	0.57
0.6	0.52
0.7	0.44
0.8	0.36
0.9	0.32
1	0.28
1.5	0.19
2	0.13
3	0.06
4	0.04

DISS STORICO - CAUZZI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.91
0.1	1.47
0.15	1.44
0.2	1.23
0.25	0.97
0.3	0.86
0.35	0.79
0.4	0.72
0.45	0.67
0.5	0.62
0.55	0.57
0.6	0.51
0.7	0.45
0.8	0.37
0.9	0.34
1	0.30
1.5	0.19
2	0.11
3	0.06
4	0.04

DISS STORICO - BOORE	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.57
0.1	0.79
0.15	0.84
0.2	0.82
0.25	0.76
0.3	0.71
0.35	0.67
0.4	0.62
0.45	0.56
0.5	0.52
0.55	0.48
0.6	0.44
0.7	0.39
0.8	0.34
0.9	0.30
1	0.27
1.5	0.17
2	0.11
3	0.07
4	0.05

DISS STATISTICO - BINDI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.25
0.1	0.40
0.15	0.52
0.2	0.55
0.25	0.52
0.3	0.49
0.35	0.45
0.4	0.42
0.45	0.38
0.5	0.36
0.55	0.34
0.6	0.33
0.7	0.28
0.8	0.24
0.9	0.22
1	0.21
1.5	0.13
2	0.08
3	0.04
4	0.02

DISS STATISTICO - AKKAR	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.56
0.1	0.86
0.15	1.04
0.2	1.01
0.25	0.93
0.3	0.85
0.35	0.79
0.4	0.74
0.45	0.68
0.5	0.64
0.55	0.59
0.6	0.53
0.7	0.45
0.8	0.38
0.9	0.33
1	0.29
1.5	0.20
2	0.13
3	0.07
4	0.04

DISS STATISTICO - CAUZZI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.94
0.1	1.53
0.15	1.50
0.2	1.28
0.25	1.00
0.3	0.88
0.35	0.82
0.4	0.74
0.45	0.69
0.5	0.64
0.55	0.59
0.6	0.53
0.7	0.46
0.8	0.39
0.9	0.35
1	0.31
1.5	0.19
2	0.12
3	0.06
4	0.04

DISS STATISTICO - BOORE	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.59
0.1	0.81
0.15	0.86
0.2	0.84
0.25	0.78
0.3	0.72
0.35	0.68
0.4	0.63
0.45	0.58
0.5	0.53
0.55	0.49
0.6	0.45
0.7	0.40
0.8	0.35
0.9	0.31
1	0.28
1.5	0.17
2	0.11
3	0.07
4	0.05

ZS9 STORICO - BINDI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.60
0.1	0.80
0.15	0.89
0.2	0.94
0.25	0.93
0.3	0.90
0.35	0.87
0.4	0.85
0.45	0.82
0.5	0.82
0.55	0.80
0.6	0.78
0.7	0.75
0.8	0.69
0.9	0.66
1	0.64
1.5	0.25
2	0.19
3	0.09
4	0.05

ZS9 STORICO - AKKAR	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	1.23
0.1	2.11
0.15	2.62
0.2	2.43
0.25	2.09
0.3	1.82
0.35	1.59
0.4	1.45
0.45	1.29
0.5	1.19
0.55	1.10
0.6	1.01
0.7	0.87
0.8	0.74
0.9	0.67
1	0.59
1.5	0.35
2	0.24
3	0.13
4	0.07

ZS9 STORICO - CAUZZI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	1.23
0.1	2.11
0.15	2.08
0.2	1.78
0.25	1.38
0.3	1.21
0.35	1.13
0.4	1.02
0.45	0.96
0.5	0.89
0.55	0.84
0.6	0.78
0.7	0.71
0.8	0.62
0.9	0.56
1	0.49
1.5	0.29
2	0.19
3	0.10
4	0.06

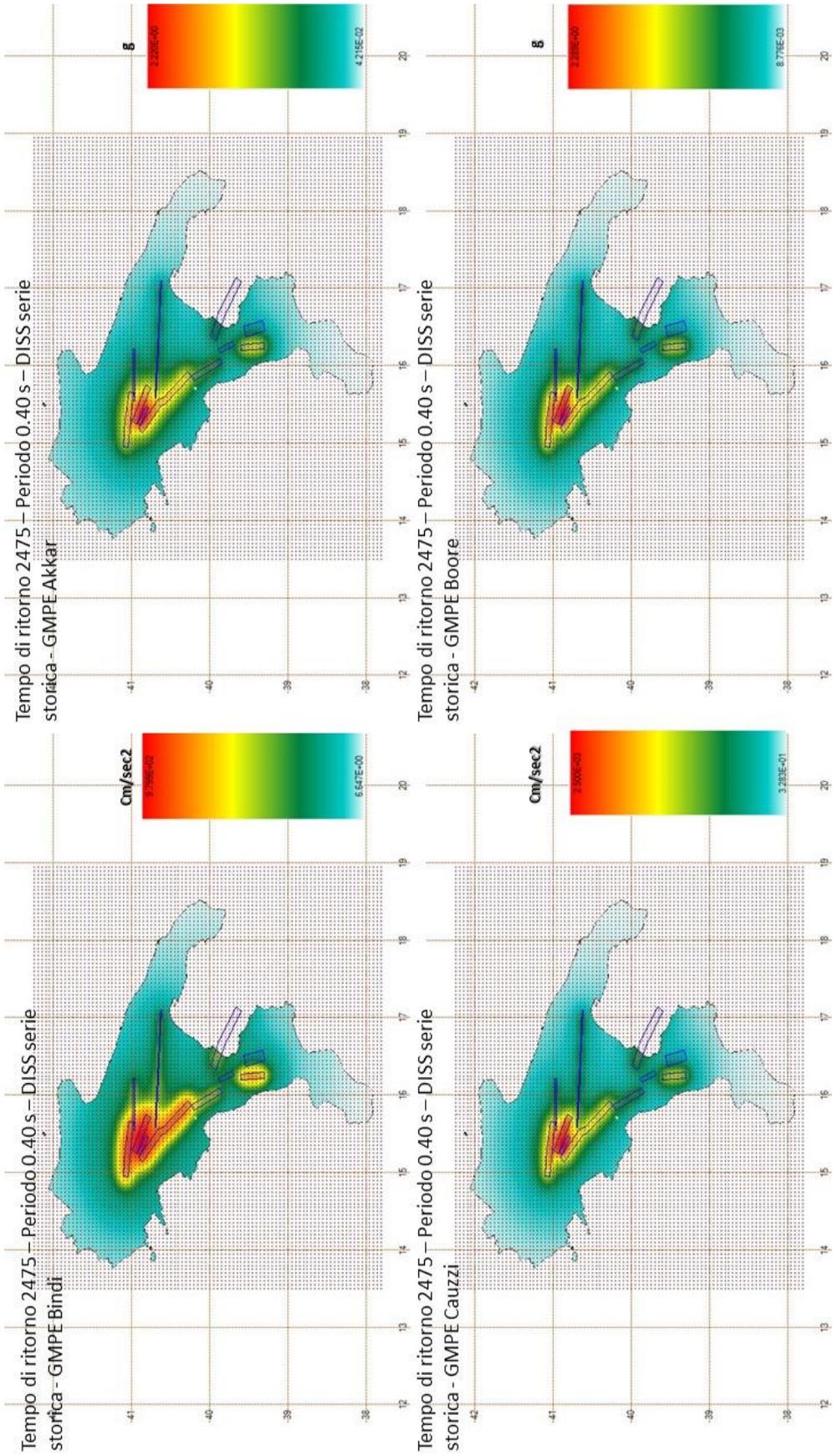
ZS9 STORICO - BOORE	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	1.16
0.1	1.62
0.15	1.80
0.2	1.75
0.25	1.63
0.3	1.49
0.35	1.38
0.4	1.28
0.45	1.21
0.5	1.16
0.55	1.09
0.6	1.04
0.7	0.95
0.8	0.87
0.9	0.80
1	0.74
1.5	0.44
2	0.29
3	0.20
4	0.14

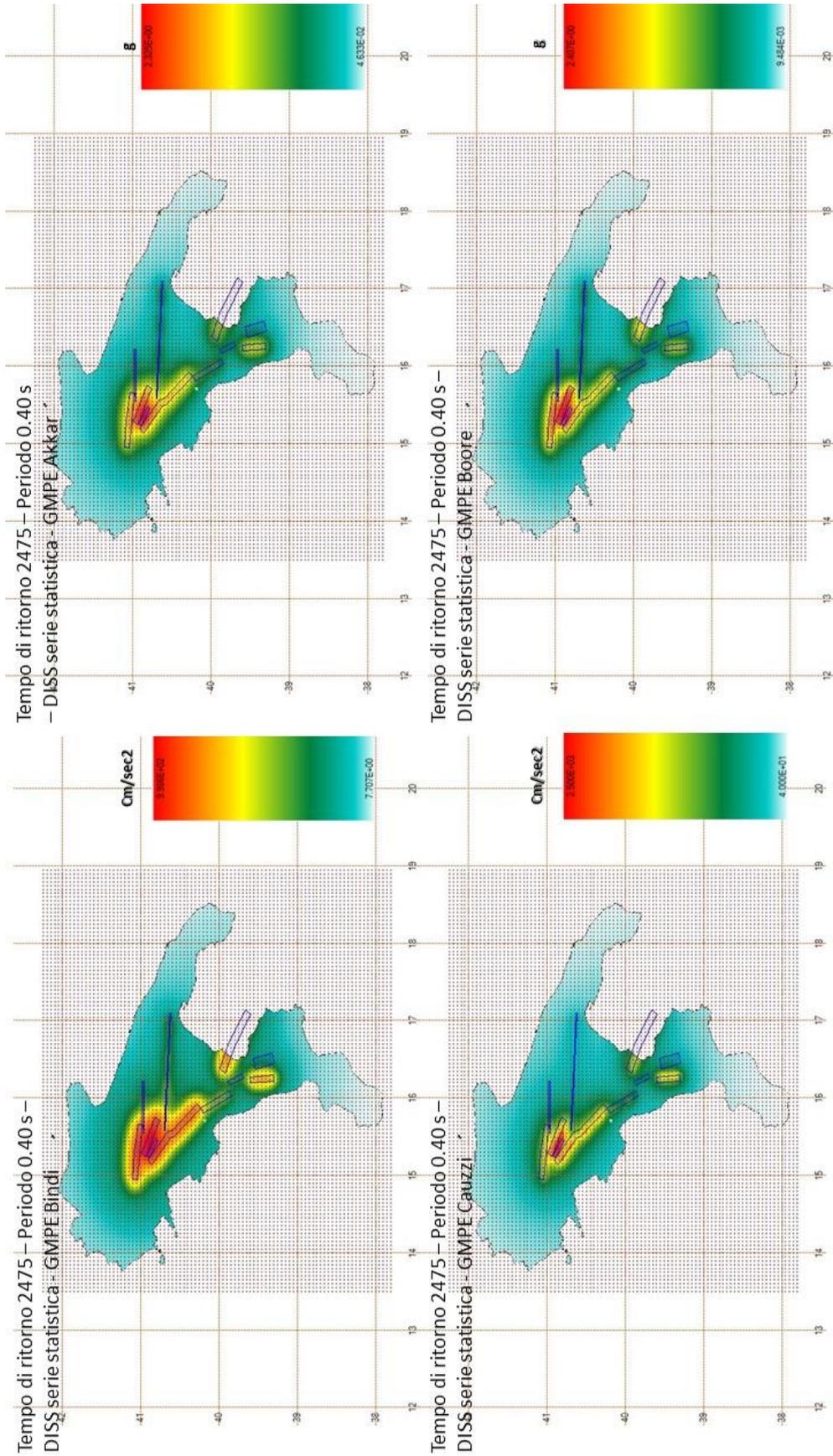
ZS9 STATISTICO - BINDI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.63
0.1	0.81
0.15	0.91
0.2	0.96
0.25	0.95
0.3	0.92
0.35	0.88
0.4	0.87
0.45	0.83
0.5	0.84
0.55	0.81
0.6	0.79
0.7	0.76
0.8	0.70
0.9	0.67
1	0.65
1.5	0.26
2	0.19
3	0.09
4	0.05

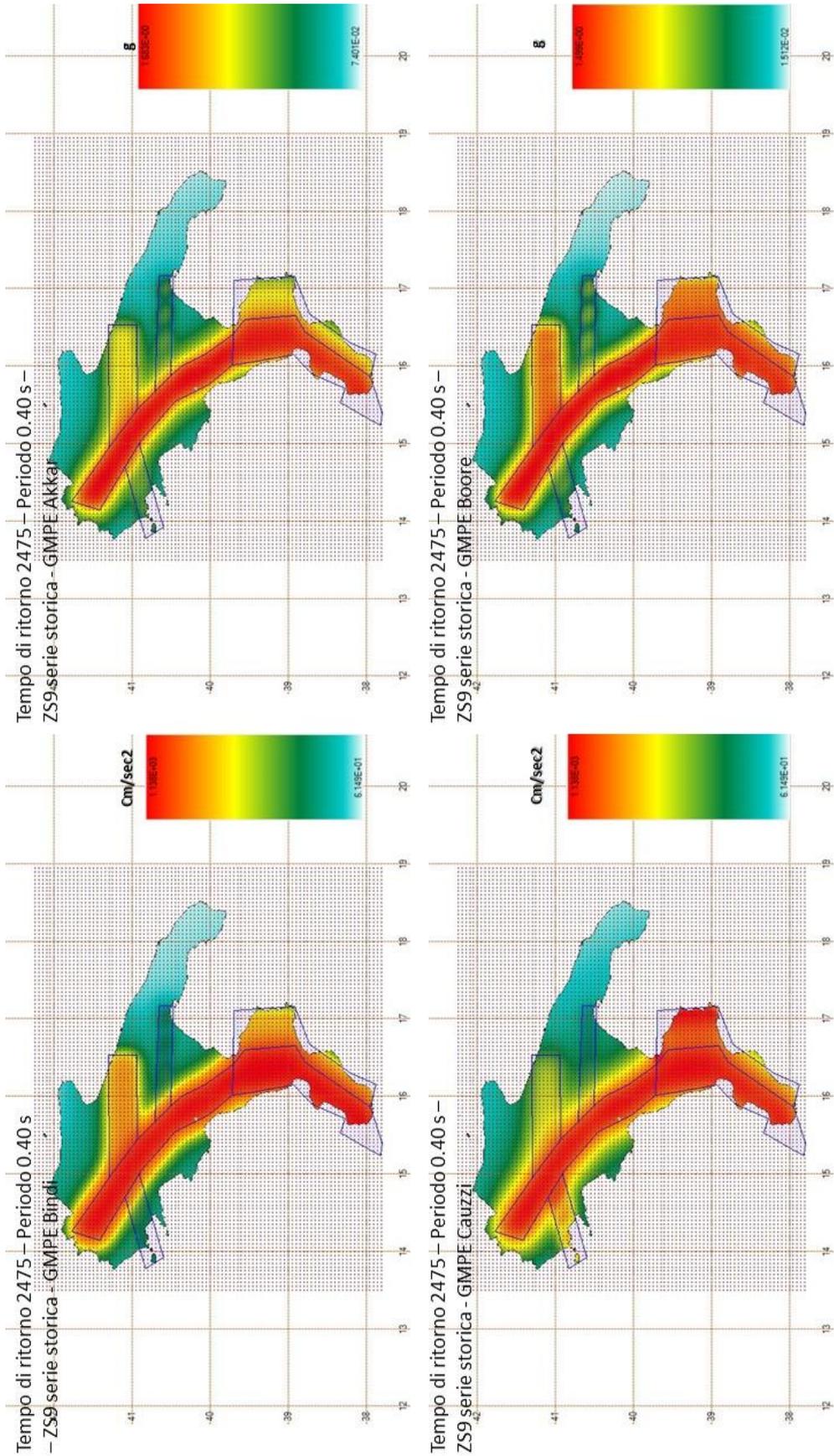
ZS9 STATISTICO - AKKAR	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	1.30
0.1	2.25
0.15	2.72
0.2	2.55
0.25	2.21
0.3	1.91
0.35	1.67
0.4	1.52
0.45	1.35
0.5	1.24
0.55	1.15
0.6	1.05
0.7	0.90
0.8	0.77
0.9	0.69
1	0.62
1.5	0.36
2	0.25
3	0.13
4	0.07

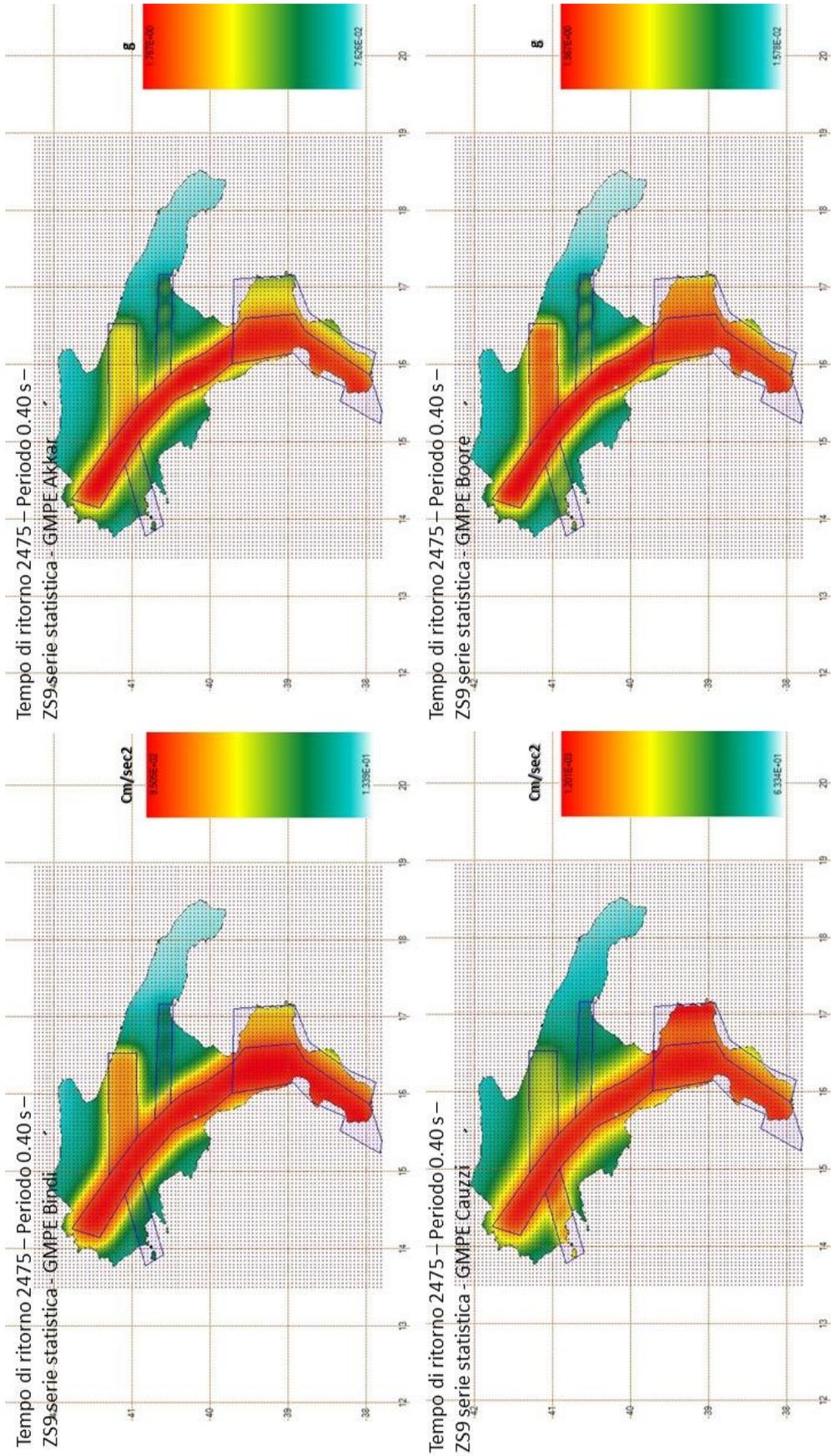
ZS9 STATISTICO - CAUZZI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	1.29
0.1	2.23
0.15	2.20
0.2	1.88
0.25	1.44
0.3	1.26
0.35	1.18
0.4	1.07
0.45	1.00
0.5	0.92
0.55	0.87
0.6	0.81
0.7	0.74
0.8	0.65
0.9	0.59
1	0.52
1.5	0.30
2	0.19
3	0.10
4	0.07

ZS9 STATISTICO - BOORE	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	1.22
0.1	1.71
0.15	1.90
0.2	1.84
0.25	1.71
0.3	1.56
0.35	1.44
0.4	1.34
0.45	1.26
0.5	1.21
0.55	1.14
0.6	1.08
0.7	0.99
0.8	0.90
0.9	0.83
1	0.76
1.5	0.46
2	0.31
3	0.20
4	0.15









6.2 Spettri di risposta orizzontali – tempo di ritorno 150 anni

DISS STORICO - BINDI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.09
0.1	0.17
0.15	0.18
0.2	0.17
0.25	0.17
0.3	0.15
0.35	0.13
0.4	0.12
0.45	0.10
0.5	0.09
0.55	0.09
0.6	0.08
0.7	0.07
0.8	0.06
0.9	0.06
1	0.05
1.5	0.04
2	0.02
3	0.01
4	0.01

DISS STORICO - AKKAR	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.17
0.1	0.23
0.15	0.27
0.2	0.26
0.25	0.24
0.3	0.22
0.35	0.20
0.4	0.19
0.45	0.17
0.5	0.16
0.55	0.14
0.6	0.13
0.7	0.10
0.8	0.09
0.9	0.08
1	0.07
1.5	0.05
2	0.03
3	0.01
4	0.01

DISS STORICO - CAUZZI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.25
0.1	0.40
0.15	0.38
0.2	0.33
0.25	0.26
0.3	0.23
0.35	0.21
0.4	0.18
0.45	0.17
0.5	0.16
0.55	0.14
0.6	0.12
0.7	0.10
0.8	0.08
0.9	0.07
1	0.07
1.5	0.04
2	0.02
3	0.01
4	0.01

DISS STORICO - BOORE	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.18
0.1	0.23
0.15	0.24
0.2	0.24
0.25	0.22
0.3	0.20
0.35	0.18
0.4	0.17
0.45	0.15
0.5	0.13
0.55	0.12
0.6	0.11
0.7	0.09
0.8	0.08
0.9	0.07
1	0.06
1.5	0.04
2	0.02
3	0.01
4	0.01

DISS STATISTICO - BINDI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.10
0.1	0.17
0.15	0.18
0.2	0.18
0.25	0.17
0.3	0.16
0.35	0.14
0.4	0.13
0.45	0.11
0.5	0.10
0.55	0.09
0.6	0.09
0.7	0.08
0.8	0.07
0.9	0.06
1	0.06
1.5	0.04
2	0.02
3	0.01
4	0.01

DISS STATISTICO - AKKAR	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.18
0.1	0.25
0.15	0.29
0.2	0.28
0.25	0.25
0.3	0.23
0.35	0.21
0.4	0.20
0.45	0.18
0.5	0.17
0.55	0.16
0.6	0.14
0.7	0.11
0.8	0.09
0.9	0.08
1	0.07
1.5	0.05
2	0.03
3	0.02
4	0.01

DISS STATISTICO - CAUZZI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.26
0.1	0.44
0.15	0.42
0.2	0.35
0.25	0.27
0.3	0.24
0.35	0.22
0.4	0.19
0.45	0.18
0.5	0.17
0.55	0.15
0.6	0.13
0.7	0.11
0.8	0.09
0.9	0.08
1	0.07
1.5	0.04
2	0.02
3	0.01
4	0.01

DISS STATISTICO - BOORE	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.19
0.1	0.24
0.15	0.26
0.2	0.25
0.25	0.23
0.3	0.21
0.35	0.19
0.4	0.17
0.45	0.16
0.5	0.15
0.55	0.13
0.6	0.12
0.7	0.10
0.8	0.08
0.9	0.07
1	0.07
1.5	0.04
2	0.02
3	0.01
4	0.01

ZS9 STORICO - BINDI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.21
0.1	0.30
0.15	0.33
0.2	0.33
0.25	0.31
0.3	0.29
0.35	0.27
0.4	0.26
0.45	0.24
0.5	0.22
0.55	0.21
0.6	0.20
0.7	0.18
0.8	0.15
0.9	0.13
1	0.12
1.5	0.07
2	0.05
3	0.02
4	0.01

ZS9 STORICO - AKKAR	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.34
0.1	0.64
0.15	0.72
0.2	0.68
0.25	0.62
0.3	0.49
0.35	0.41
0.4	0.37
0.45	0.32
0.5	0.30
0.55	0.27
0.6	0.25
0.7	0.21
0.8	0.19
0.9	0.17
1	0.15
1.5	0.08
2	0.06
3	0.03
4	0.02

ZS9 STORICO - CAUZZI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.37
0.1	0.69
0.15	0.67
0.2	0.56
0.25	0.39
0.3	0.34
0.35	0.30
0.4	0.27
0.45	0.25
0.5	0.23
0.55	0.22
0.6	0.20
0.7	0.18
0.8	0.16
0.9	0.13
1	0.12
1.5	0.07
2	0.04
3	0.02
4	0.01

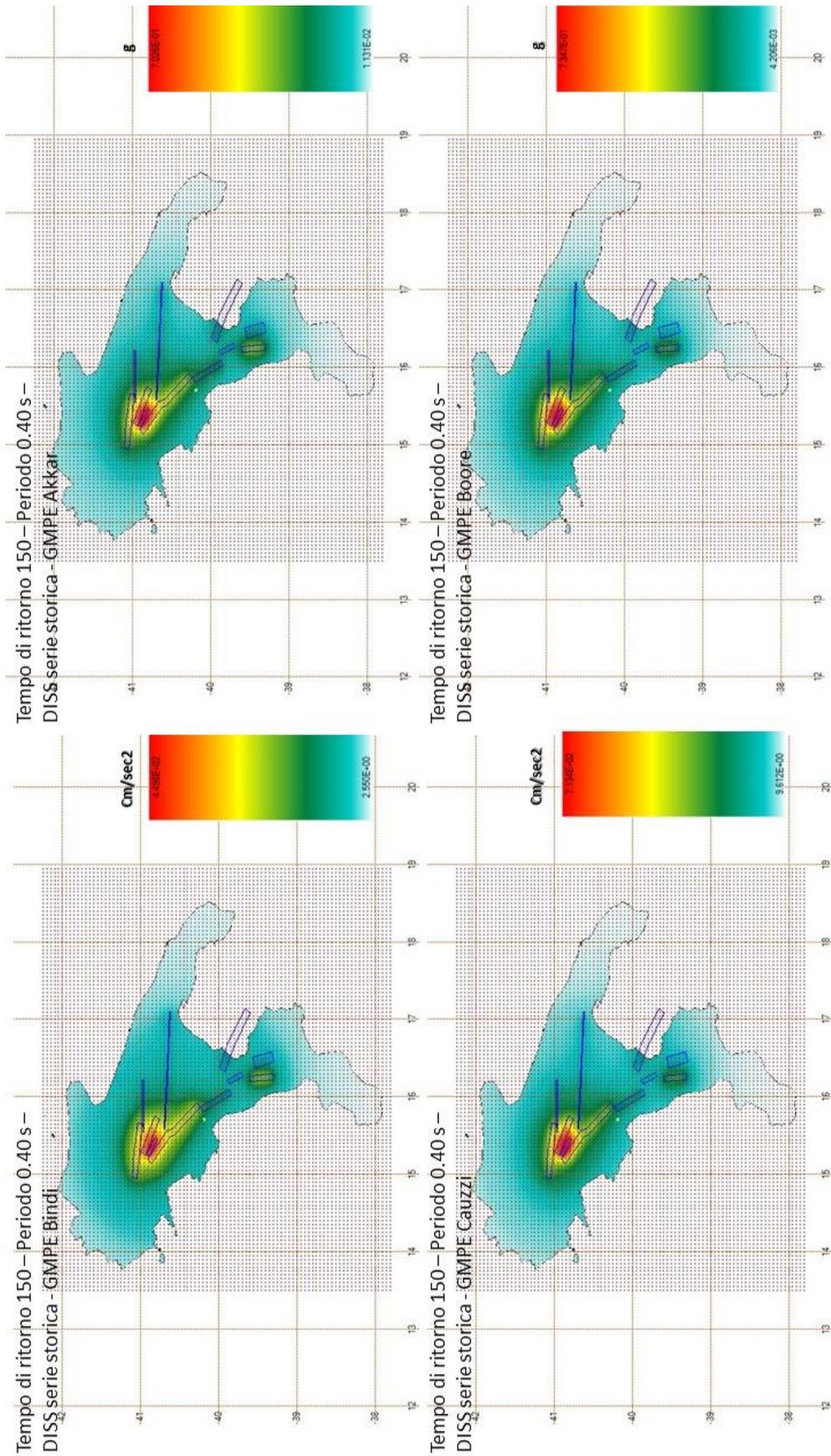
ZS9 STORICO - BOORE	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.35
0.1	0.51
0.15	0.58
0.2	0.55
0.25	0.47
0.3	0.41
0.35	0.36
0.4	0.33
0.45	0.30
0.5	0.28
0.55	0.26
0.6	0.24
0.7	0.21
0.8	0.19
0.9	0.17
1	0.15
1.5	0.08
2	0.05
3	0.03
4	0.02

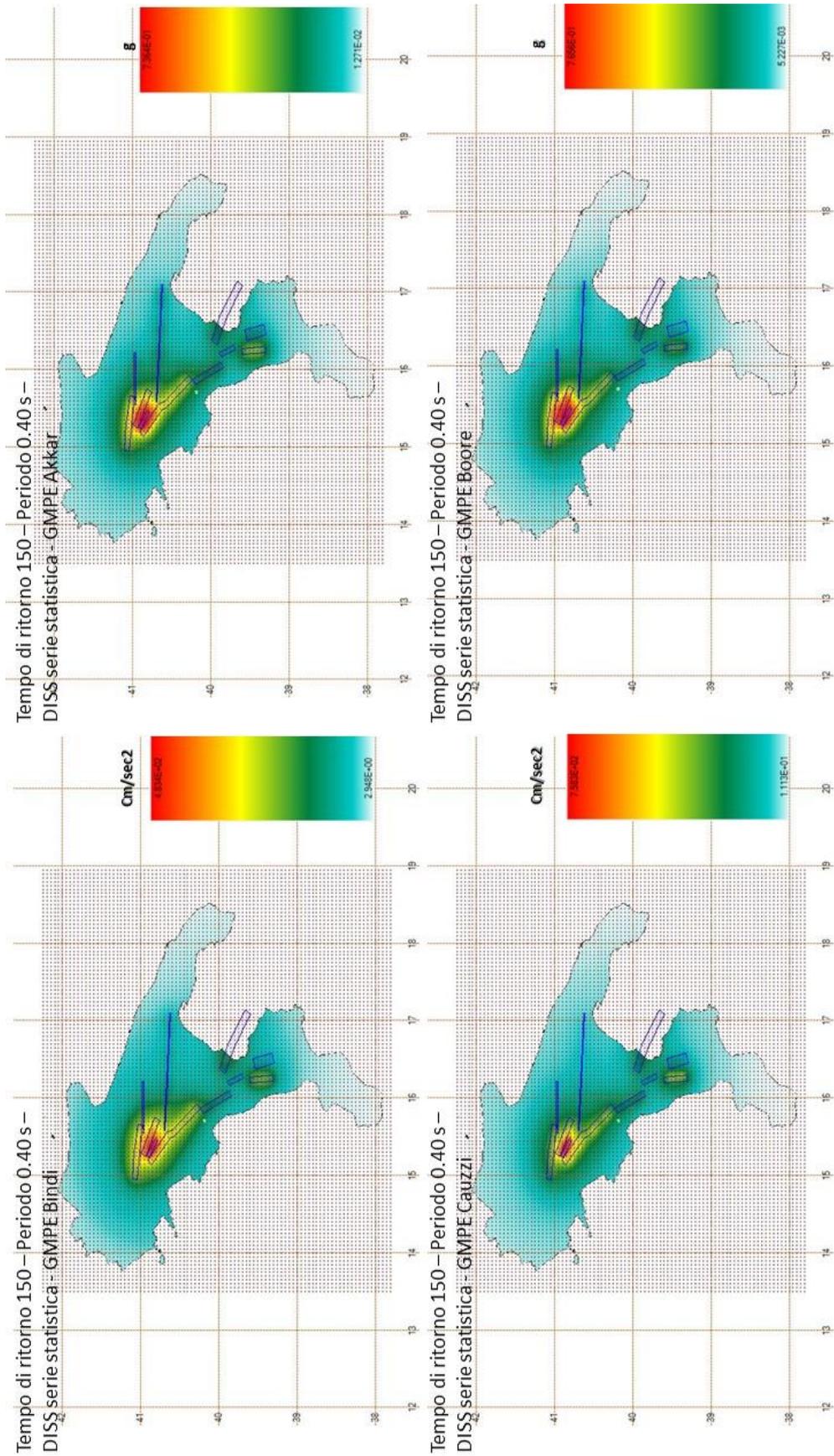
ZS9 STATISTICO - BINDI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.22
0.1	0.31
0.15	0.35
0.2	0.35
0.25	0.33
0.3	0.31
0.35	0.29
0.4	0.28
0.45	0.25
0.5	0.24
0.55	0.23
0.6	0.21
0.7	0.19
0.8	0.17
0.9	0.15
1	0.13
1.5	0.07
2	0.05
3	0.02
4	0.01

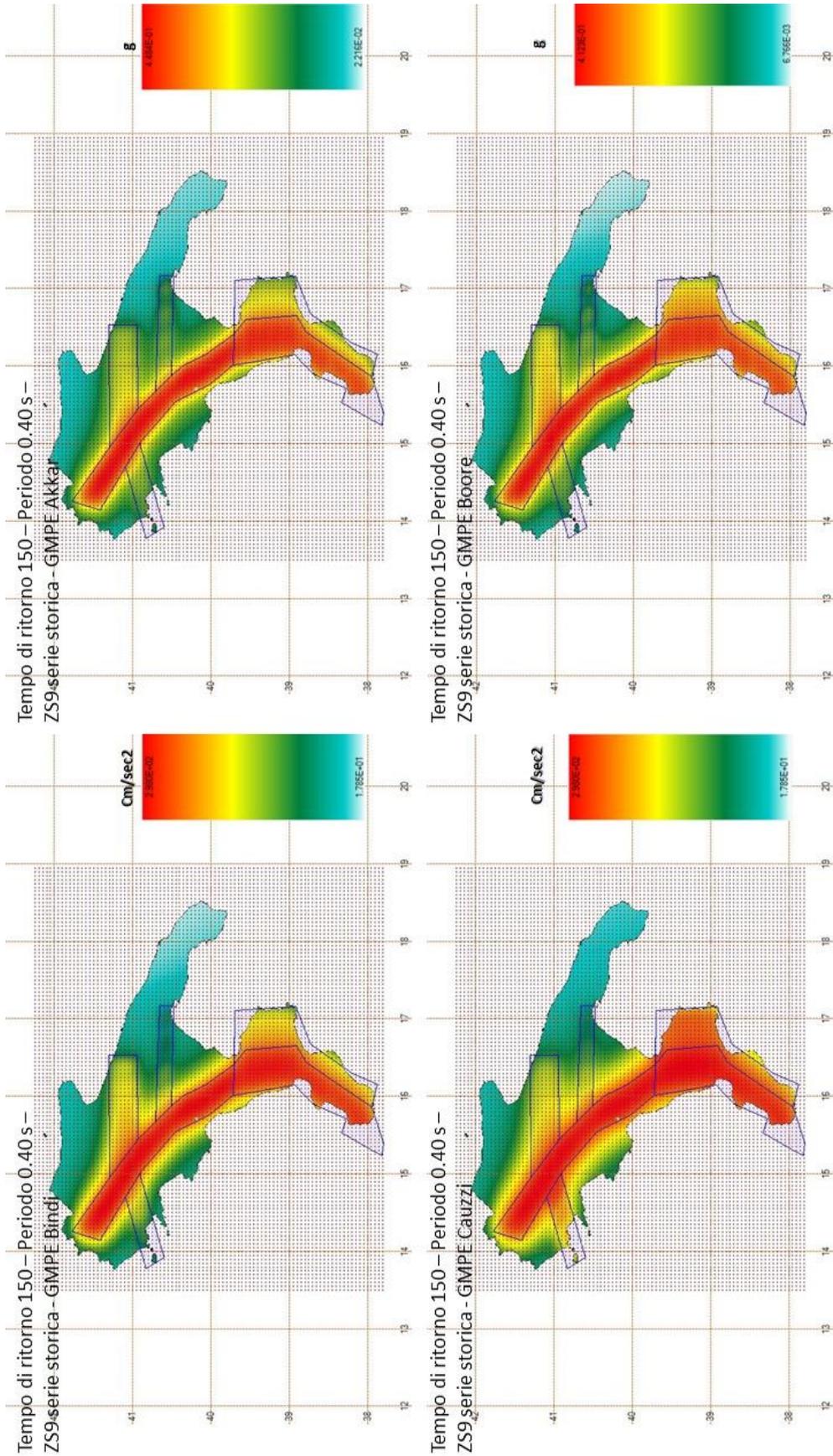
ZS9STATISTICO - AKKAR	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.38
0.1	0.69
0.15	0.77
0.2	0.73
0.25	0.66
0.3	0.56
0.35	0.46
0.4	0.40
0.45	0.35
0.5	0.32
0.55	0.29
0.6	0.27
0.7	0.23
0.8	0.20
0.9	0.18
1	0.16
1.5	0.09
2	0.06
3	0.03
4	0.02

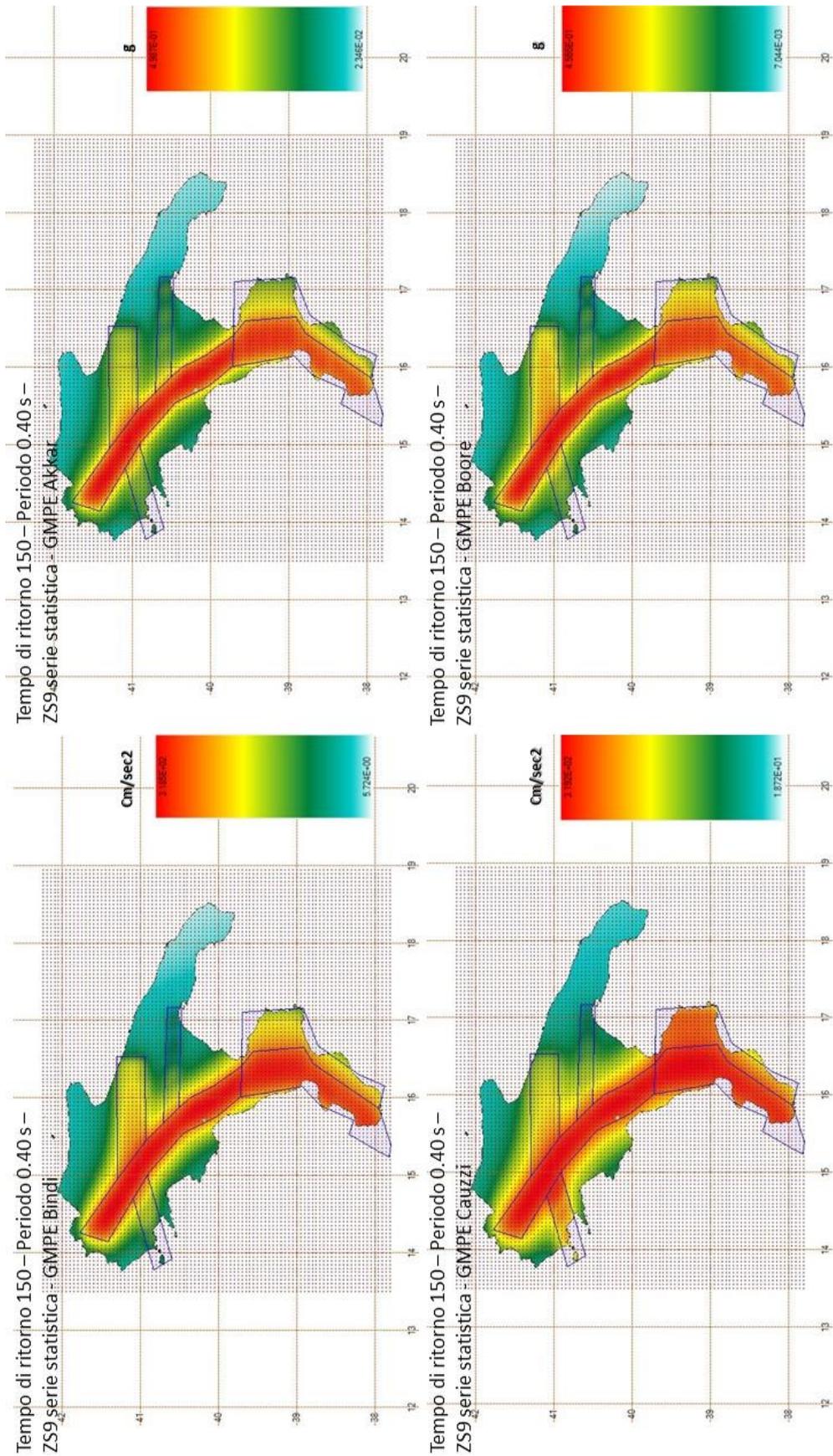
ZS9 STATISTICO - CAUZZI	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.40
0.1	0.73
0.15	0.71
0.2	0.64
0.25	0.43
0.3	0.36
0.35	0.33
0.4	0.29
0.45	0.27
0.5	0.25
0.55	0.23
0.6	0.21
0.7	0.19
0.8	0.17
0.9	0.15
1	0.13
1.5	0.07
2	0.05
3	0.02
4	0.02

ZS9 STATISTICO - BOORE	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.38
0.1	0.58
0.15	0.65
0.2	0.62
0.25	0.53
0.3	0.45
0.35	0.40
0.4	0.35
0.45	0.33
0.5	0.30
0.55	0.28
0.6	0.26
0.7	0.23
0.8	0.20
0.9	0.18
1	0.17
1.5	0.09
2	0.06
3	0.04
4	0.02









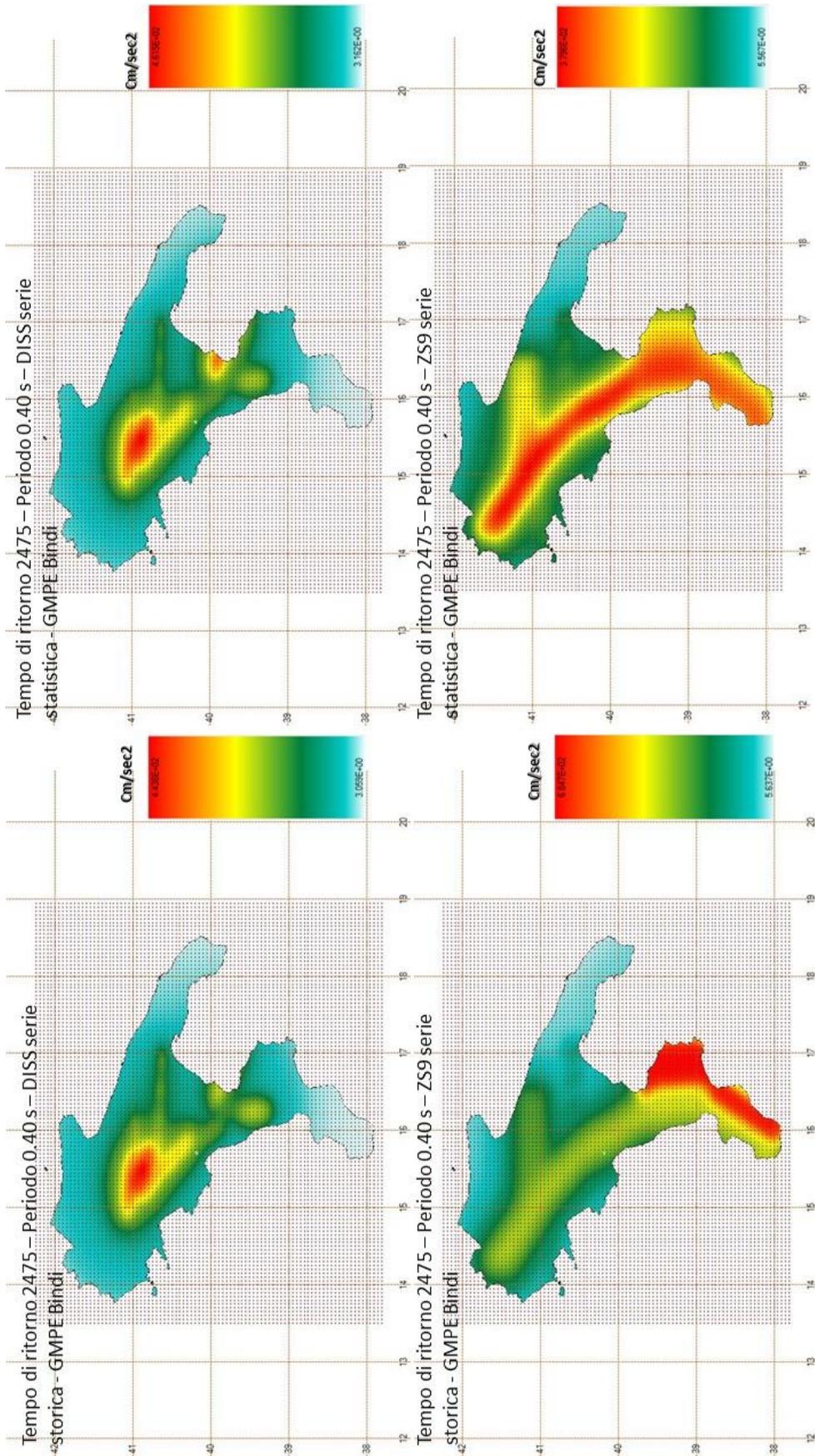
6.3 Spettri di risposta verticali – tempo di ritorno 2475 anni

DISS STORICO	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.21
0.1	0.29
0.15	0.31
0.2	0.27
0.25	0.24
0.3	0.22
0.35	0.20
0.4	0.18
0.45	0.18
0.5	0.18
0.55	0.18
0.6	0.18
0.7	0.16
0.8	0.14
0.9	0.13
1	0.12
1.5	0.07
2	0.05
3	0.02
4	0.01

DISS STATISTICO	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.21
0.1	0.29
0.15	0.32
0.2	0.27
0.25	0.24
0.3	0.22
0.35	0.20
0.4	0.18
0.45	0.18
0.5	0.18
0.55	0.18
0.6	0.18
0.7	0.16
0.8	0.14
0.9	0.13
1	0.12
1.5	0.07
2	0.05
3	0.02
4	0.01

ZS9 STORICO	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.60
0.1	0.69
0.15	0.71
0.2	0.64
0.25	0.54
0.3	0.48
0.35	0.39
0.4	0.31
0.45	0.31
0.5	0.32
0.55	0.32
0.6	0.32
0.7	0.28
0.8	0.24
0.9	0.24
1	0.23
1.5	0.18
2	0.11
3	0.05
4	0.04

ZS9 STATISTICO	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.62
0.1	0.70
0.15	0.72
0.2	0.65
0.25	0.57
0.3	0.50
0.35	0.40
0.4	0.32
0.45	0.32
0.5	0.33
0.55	0.33
0.6	0.33
0.7	0.28
0.8	0.25
0.9	0.24
1	0.24
1.5	0.18
2	0.12
3	0.05
4	0.04



6.4 Spettri di risposta verticali – tempo di ritorno 150 anni

DISS STORICO	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.07
0.1	0.10
0.15	0.10
0.2	0.09
0.25	0.08
0.3	0.07
0.35	0.06
0.4	0.05
0.45	0.05
0.5	0.05
0.55	0.05
0.6	0.05
0.7	0.04
0.8	0.04
0.9	0.04
1	0.03
1.5	0.02
2	0.01
3	0.01
4	0.00

DISS STATISTICO	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.07
0.1	0.10
0.15	0.11
0.2	0.09
0.25	0.08
0.3	0.07
0.35	0.06
0.4	0.06
0.45	0.05
0.5	0.05
0.55	0.05
0.6	0.05
0.7	0.04
0.8	0.04
0.9	0.04
1	0.04
1.5	0.02
2	0.01
3	0.01
4	0.00

ZS9 STORICO	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.18
0.1	0.22
0.15	0.22
0.2	0.19
0.25	0.18
0.3	0.16
0.35	0.13
0.4	0.11
0.45	0.10
0.5	0.10
0.55	0.10
0.6	0.09
0.7	0.08
0.8	0.07
0.9	0.07
1	0.06
1.5	0.04
2	0.03
3	0.01
4	0.01

ZS9 STATISTICO	
Periodo (s)	Ordinata spettrale (g)
0.05	0.19
0.1	0.23
0.15	0.23
0.2	0.20
0.25	0.18
0.3	0.17
0.35	0.15
0.4	0.12
0.45	0.11
0.5	0.11
0.55	0.10
0.6	0.10
0.7	0.09
0.8	0.08
0.9	0.07
1	0.07
1.5	0.05
2	0.03
3	0.01
4	0.01

