UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

CORSO DI DOTTORATO IN METODI, MODELLI E TECNOLOGIE PER L'INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E MECCANICA
(DICEM)

Risposta sismica locale in condizioni geologiche complesse: il caso studio della Piana di Cassino

DOTTORANDO
Vincenzo Colagiacomo
vincenzo.colagiacomo@unicas.it

TUTOR
Prof. Geol. Michele Saroli
CO-TUTOR
Ing. Matteo Albano (INGV)
Prof. Geol. Matteo Fiorucci

COORDINATORE
Prof. Ing. Fabrizio Marignetti

XXXVIII Ciclo

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

CORSO DI DOTTORATO IN METODI, MODELLI E TECNOLOGIE PER L'INGEGNERIA

Data: 15/12/2025

Autore: **Vincenzo Colagiacomo**

Titolo: **Risposta sismica locale in condizioni geologiche complesse: il caso studio della Piana di Cassino**

Dipartimento: **DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E MECCANICA (DICEM)**

Si concede all'Università il permesso di diffondere e di far copiare per scopi non commerciali, a sua discrezione, il titolo di cui sopra su richiesta di privati o istituzioni.

Firma dell'autore

L'AUTORE SI RISERVA ALTRI DIRITTI DI PUBBLICAZIONE E NÉ LA TESI NÉ I SUOI ESTRATTI ESTESI POSSONO ESSERE STAMPATI O ALTRIMENTI RIPRODOTTI SENZA IL PERMESSO SCRITTO DELL'AUTORE.
L'AUTORE ATTESTA CHE È STATO OTTENUTO IL PERMESSO PER L'UTILIZZO DI QUALSIASI MATERIALE PROTETTO DA COPYRIGHT CHE APPARE IN QUESTA TESI (DIVERSO DA BREVE ESTRATTI CHE RICHIEDONO SOLO UN ADEGUATO RICONOSCIMENTO NELLA SCRITTURA SCORSA) E CHE TALE UTILIZZO È CHIARAMENTE RICONOSCIUTO.

ad Andrea:
hai iniziato adesso ad imparare, non smettere mai

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere la mia più profonda gratitudine al Professor Saroli per il suo sostegno prezioso e la sua guida illuminante durante il mio percorso di dottorato. La costante presenza e la disponibilità paziente sono state fondamentali nel corso di questa esperienza, guidandomi con saggezza attraverso ogni fase del mio percorso di studio e a lui sono grato per avermi coinvolto nell'affascinante mondo della ricerca, offrendomi l'opportunità di ampliare i miei orizzonti. Estendo i miei ringraziamenti anche al Dottor Ing. Albano e al Professor Fiorucci per il loro straordinario contributo al mio percorso. Al Dottor Albano, per aver condiviso preziose conoscenze, aver ispirato con sempre nuovi spunti questa ricerca ed aver arricchito notevolmente il mio lavoro, aprendo nuove prospettive nel mio campo di studio con le sue competenze. Al Professor Fiorucci, esprimo la mia più profonda gratitudine per essere stato un instancabile ed onnipresente aiuto e un prezioso mentore nel mio percorso. La sua competenza, il suo sostegno e i suoi preziosi consigli sono stati fondamentali per affrontare le sfide e per sviluppare le mie idee in modo più approfondito. Sono grato per il tempo che mi hanno dedicato, per la pazienza dimostrata e per l'incoraggiamento costante che mi ha fornito lungo il cammino. Il vostro contributo è stato determinante nella buona riuscita del mio progetto.

Sono grato a tutti voi per aver contribuito in modo significativo al mio percorso e alla mia crescita personale e accademica.

Dopo aver ringraziato chi mi ha supportato in questo percorso desidero ringraziare chi, in questo periodo, mi ha sopportato: mia moglie Anna.

Grazie di cuore per tutto, Enzo.

ABSTRACT

Integrating detailed geological models into civil and environmental engineering projects is fundamental for an informed infrastructure design and an accurate seismic risk assessment, particularly in complex geologic, tectonic and hydrogeological settings. This work illustrates the methodological approaches and practical applications for developing a geological model of the Cassino Plain, an intermontane basin of central Italy characterised by a significant seismic hazard and complex hydrogeological conditions. The area is affected by major infrastructures and plants, important healthcare and education services and a high population density. The study involves comprehensive geophysical, geological, hydrogeological and geotechnical analyses, combining borehole data, seismic ambient noise measurements, and advanced geostatistical techniques to delineate the bedrock's morphology and reconstruct a geological reference model. The Cassino Basin, formed during Pliocene-Pleistocene tectonic activity, features a complex horst-and-graben arrangement with varying thicknesses of Quaternary alluvial sediments resting on carbonate and arenaceous bedrock (Saroli et al., 2020). Past seismic events highlight the need for precise identification of the seismic bedrock to evaluate local seismic amplification phenomena effectively. This study integrated almost 400 boreholes, some of which extending to depths down to 350 m b.g.l., and more than 260 seismic ambient noise measurements to create a detailed 3D geometrical model of the bedrock. Seismic ambient noise data, analysed via Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR), revealed pronounced impedance contrasts and provided precise mapping of resonance frequencies, which correlated very well with the bedrock depth available from borehole data. Advanced geostatistical interpolation was utilised to transform scattered geophysical measurements into a coherent, spatially continuous map. This enabled the identification of the seismic bedrock surface and facilitated the estimation of sediment thickness through empirically derived relationships between resonant frequency and soil thickness (D'Amico et al., 2008; Van Noten et al., 2022). Virtual boreholes have been generated to augment physical subsurface investigations, which, together with real boreholes, significantly enhanced the resolution and reliability of the geological reference model of the basin. Available boreholes were further exploited to classify the Quaternary filling below the city centre, defining at least four lithological layers, characterised by specific geotechnical properties, and two different aquifers: a shallow multi-level hydrostratigraphic aquifer and a deep pressurised aquifer, which are mutually interconnected.

Starting from geological sections representing the complexity of the basin, a seismic stratigraphic model was reconstructed; this model, despite the limitations imposed by basin-scale modelling and the possibilities offered by calculation codes, well represents the seismic

behaviour of the area in the event of an earthquake. Six seismic cross-sections were built across the basin and along those sections six numerical analyses of local seismic response in a two-dimensional configuration and 117 analyses in a one-dimensional configuration were performed. The results were compared with the geological and structural settings of the area and a better correspondence of 2D analyses was verified. A comparison was also performed with respect to the results of the Level 3 Seismic Microzonation studies conducted in 1D mode on 4 seismostatigraphic vertical profiles; also in this case the 2D numerical simulations demonstrate a better correspondence to the complex geological conditions of the Cassino basin.

As part of the research activities, seismic noise measurements were performed for the first time on a sample of 12 buildings, in order to determine their fundamental vibration periods and derive an empirical correlation between this parameter and the height of each building (Gallipoli et. al, 2010). The correlation was then extended to the rest of the buildings in the urban area of Cassino. These values, compared with the fundamental periods of the foundation soils, provided an evaluation of the proneness of these structures to undergo the phenomenon of soil/building resonance.

The integrated model supports civil engineering by enhancing site-specific seismic hazard assessment and soil-structure interaction analysis. It proves the value of multidisciplinary geological modelling in reducing uncertainties and seismic risk in complex settings.

SOMMARIO

L'integrazione di modelli geologici di dettaglio nei progetti di ingegneria civile e ambientale è fondamentale per una progettazione consapevole delle infrastrutture e una valutazione accurata del rischio sismico, in particolare in contesti geologici, tettonici e idrogeologici complessi. In questo lavoro vengono illustrati gli approcci metodologici e le applicazioni pratiche per lo sviluppo di un modello geologico della Piana di Cassino, un bacino intermontano dell'Italia centrale caratterizzato da una significativa pericolosità sismica e da complesse condizioni idrogeologiche. L'area è interessata da importanti infrastrutture e impianti industriali, importanti servizi sanitari e scolastici e un'elevata densità abitativa. Lo studio analizza indagini geofisiche, geologiche, idrogeologiche e geotecniche, combinando dati di sondaggio, misurazioni del rumore ambientale sismico e tecniche geostatistiche avanzate per delineare la morfologia del substrato roccioso e ricostruire un modello geologico di riferimento. Il bacino di Cassino, formatosi durante l'attività tettonica del Pliocene-Pleistocene, presenta una complessa conformazione a horst e graben con spessori variabili di sedimenti alluvionali quaternari che poggiano su un substrato carbonatico e arenaceo (Saroli et al., 2020). Gli eventi sismici passati evidenziano la necessità di un'identificazione precisa del substrato sismico per valutare efficacemente i fenomeni di amplificazione sismica locale. I dati sul rumore ambientale sismico, analizzati tramite la tecnica Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR), hanno rivelato contrasti di impedenza pronunciati e hanno fornito una mappatura precisa delle frequenze di risonanza, che sono risultate molto ben correlate con la profondità del substrato roccioso disponibile dai dati dei fori di sondaggio. È stata utilizzata l'interpolazione geostatistica avanzata per trasformare le misurazioni geofisiche diffuse in una mappa coerente e spazialmente continua. Ciò ha consentito l'identificazione della superficie del substrato sismico e ha facilitato la stima dello spessore dei sedimenti attraverso relazioni derivate empiricamente tra frequenza di risonanza e spessore delle coperture (D'Amico et al., 2008; Van Noten et al., 2022). Sono stati generati in questo modo dei sondaggi virtuali per potenziare il set delle indagini dirette del sottosuolo, che, insieme ai fori di sondaggio reali, hanno migliorato significativamente la risoluzione e l'affidabilità del modello di riferimento geologico del bacino. I fori disponibili sono stati poi sfruttati per classificare il riempimento quaternario al di sotto del centro urbano, definendo almeno quattro strati litologici, caratterizzati da specifiche proprietà geotecniche, e due diversi acquiferi: un acquifero idrostratigrafico multilivello superficiale e un acquifero profondo in pressione che risultano reciprocamente interconnessi.

Da sezioni geologiche rappresentative della complessità del bacino è stato ricostruito un modello sismostratigrafico che, pur con i limiti imposti da una modellazione a scala di bacino e dalle possibilità offerte dai codici di calcolo, potesse rappresentare il comportamento sismico

dell'area in caso di terremoto. Sono state realizzate 6 sezioni sismostratigrafiche attraverso il bacino, lungo le quali sono state eseguite altrettante analisi numeriche di risposta sismica locale in configurazione bidimensionale e 117 analisi in configurazione monodimensionale. Sono stati confrontati i risultati ottenuti con l'assetto geologico e strutturale dell'area e si è verificata la migliore rispondenza delle analisi condotte con modellazione 2D. Un confronto è stato eseguito anche rispetto ai risultati delle analisi dello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 condotte in modalità 1D su 4 verticali sismostratigrafiche; anche in questo caso le simulazioni numeriche 2D dimostrano una migliore rispondenza alle condizioni geologiche complesse del bacino di Cassino.

Nell'ambito delle attività di ricerca sono state eseguite per la prima volta delle misure di microtremore sismico a stazione singola su un campione di 12 edifici, per determinarne i periodi fondamentali di vibrazione e arrivare a derivare una relazione empirica tra questo parametro e l'altezza di ciascun edificio (Gallipoli et. al, 2010). Questa relazione è stata estesa al resto degli edifici del centro urbano di Cassino. I valori così ottenuti, confrontati con i periodi fondamentali dei terreni di fondazione, hanno fornito una stima della propensione di queste strutture a subire il rischioso fenomeno della risonanza terreno/struttura.

Il modello integrato supporta l'ingegneria civile migliorando la valutazione del rischio sismico sito-specifico e l'analisi dell'interazione suolo-struttura. Dimostra il valore della modellazione geologica multidisciplinare nel ridurre le incertezze e il rischio sismico in contesti complessi.

INDICE

Ringraziamenti I
Abstract II
Sommario IV
Lista delle figure VIII
Lista delle tabelle XX
Capitolo 1. Introduzione 1
1.1 Obiettivi della ricerca 1
1.2 Stato dell'arte 4
1.2.1 Evoluzione della normativa sismica in Italia 7
1.2.2 Pericolosità sismica di base 9
1.2.3 Effetti di sito e risposta sismica locale 11
Capitolo 2. Inquadramento geologico 18
2.1 Inquadramento geologico regionale 18
2.2 Assetto geologico e strutturale del bacino di Cassino 26
2.3 Idrogeologia del bacino di Cassino 28
2.4 Pericolosità sismica di base dell'area 31
2.4.1 Sorgenti sismogeniche 31
2.4.2 Faglie attive e capaci 35
2.4.3 Eventi di riferimento 37
2.4.4 Classificazione sismica del comune di Cassino 44
2.4.5 Parametri sismici da NTC 2018 45
Capitolo 3. Dati e metodi 48
3.1 Raccolta delle indagini dell'area di studio 48
3.1.1 Sondaggi geognostici 49
3.1.2 Prove penetrometriche 50
3.1.3 Dati di laboratorio 51
3.1.4 Dati geofisici da misure di microtremore sismico a stazione singola 53

3.1.5 Dati geofisici da sismica di superficie e in foro 55
3.1.6 Dati idrogeologici 58
3.2 Geodatabase 59
3.3 Modello geologico dell'area di studio 65
3.3.1 Modello geologico alla scala di bacino 65
3.3.2 Modello geologico alla scala del centro urbano 76
3.4 Modellazione sismica 1D e 2D dell'area di studio 79
3.5 Analisi numeriche di risposta sismica locale mono e bi-dimensionali 85
3.5.1 Software utilizzati 86
3.5.2 Scelta dell'input sismico 93
3.5.3 Parametrizzazione dei sismostrati 105
3.5.4 Simulazioni numeriche 113
3.6 Misure di microtremore su edifici 117
3.6.1 Scelta della tipologia di edifici 117
3.6.2 Specifiche delle misure eseguite 118
Capitolo 4. Risultati 121
4.1 Stima dei fattori di amplificazione 121
4.1.1 Fattori di amplificazione da modellazione 1D 123
4.1.2 Fattori di amplificazione da modellazione 2D 130
4.2 Costruzione carta dei fattori di amplificazione del centro urbano di Cassino 136
4.3 Risultati delle misure sugli edifici 144
Capitolo 5. Discussione 151
5.1 Correlazioni con il modello geologico 151
5.2 Confronto tra i risultati delle analisi numeriche 1D e 2D 158
5.3 Confronto con i risultati della microzonazione sismica del comune di Cassino 170
5.4 Confronto con risultati ottenuti in altri studi 180
5.5 Considerazioni in rapporto al pericolo di risonanza terreno-struttura 186
Conclusioni 187
Bibliografia 193
Appendice A A.1

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1.1 - Localizzazione dell'area di studio: in rosso i limiti amministrativi dei comuni di Cassino, Sant'Elia Fiumerapido e Cervaro, in giallo l'area del bacino di Cassino, in blu il tracciato della faglia di "San Pietro Infine"..... 3

Figura 1.2 - Diagramma di flusso delle attività di ricerca..... 4

Figura 1.3 - Spettri di risposta a pericolosità uniforme riferite a una probabilità di superamento PVR del 10% in un periodo di 50 anni per coordinate ricadenti nel centro dell'abitato di Cassino (http://esse1-gis.mi.ingv.it/)..... 10

Figura 1.4 - Spettri di risposta elastici in accelerazione per la componente orizzontale secondo NTC18; confronto tra le diverse categorie di suolo per uno stesso sito di coordinate ricadenti nel centro dell'abitato di Cassino (dati estratti con l'applicativo Spettri di risposta – ver. 1.03 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici)..... 12

Figura 1.5 - Classificazione di un sito in categorie topografiche e relativi coefficienti di amplificazione, come previsti in NTC 2018 (da Foti et al., 2009)..... 12

Figura 1.6 - Spettri di risposta elastici in accelerazione per la componente orizzontale secondo NTC18; confronto tra le diverse categorie topografiche per un sito caratterizzato da un suolo di categoria B, di coordinate ricadenti nel centro dell'abitato di Cassino (dati estratti con l'applicativo Spettri di risposta – ver. 1.03 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici) 13

Figura 1.7 - Schema esplicativo dei fattori che possono influenzare la propagazione di un segnale sismico dalla sorgente alla superficie libera (da Panzera et al., 2013 – Figura 1.a)... 13

Figura 1.8 - Scenari di risposta sismica locale (da Panzera et al., 2013 – Figura 1.b)..... 14

Figura 1.9 - Modello di riferimento per amplificazione sismica monodimensionale 14

Figura 1.10 - Modello esplicativo del contrasto di impedenza tra bedrock e soft-soil 15

Figura 1.11 - Configurazione monodimensionale con i parametri del singolo strato che caratterizzano il modello: spessore dello strato i-esimo (H_i), densità dello strato i-esimo (ρ_i), funzione di variazione del modulo di taglio dello strato i-esimo (G_i), funzione di variazione del coefficiente di smorzamento dello strato i-esimo (D_i), velocità delle onde di taglio dello strato i-esimo (V_{Si}) 15

Figura 1.12 – Livelli deformativi ed aspetti del comportamento meccanico dei terreni..... 16

Figura 1.13 - Fattori morfologici influenti sull'amplificazione (Pergalani et al., 2020) 16

Figura 2.1 - Schema geologico-strutturale del margine tirrenico centro-settentrionale della penisola italiana. Con il cerchio rosso è evidenziata la localizzazione delle aree di studio. (Mattei et al., 2008) 19

Figura 2.2 - Stralcio della Carta geologica d'Italia F. 160, scala 1:100000. Legenda: 1: strato sub-orizzontale; 2: strato poco inclinato; 3: strato molto inclinato; 4: strato sub-verticale; 5: strato rovesciato; 6: faglia diretta/inversa; 7: faglia diretta/inversa presunta; 8: faglia trascorrente; 9: sovrascorrimento; 10: area di studio. formazioni continentali: a2: alluvioni sciolte attuali, a1: suoli argillosi e limosi, dt: detriti di falda, qr: terre rosse, a: alluvioni antiche terrazzate, m: conoidi cementate (Olocene); tr_2: travertino, lt: alternanza di limi e tufi, ls: limi e sabbie, lc: limi calcarei p: (Pliocene); Formazioni marine: Conglomerati poligenici (Pliocene); ce: Argille varicolori (Messiniano-Tortoniano); M^{5-4}: Argille e argille marnose con intercalazioni di arenarie con livelli ed intercalazioni di brecciole calcaree (Mc^4)e marne a orbuline (Mm^4) (Messiniano-Tortoniano); M^{4-3}: Calcari marnosi e marne (Tortoniano-Elveziano); M^{4-2}: Calcari a briozoi e litotamni (Tortoniano – Langhiano); M^{2-1}; Calcareniti bianche (Langhiano – Aquitaniano); PC^{2-1}-C^6: Calcari bianchi e avana (Montiano/Daniano-Cenomaniano); PC^1-Cd^6: Calcari detritici e calcareniti (Daniano-Cenomaniano); C^{6-4}:Calcari nocciola (Cenomaniano inf.-Aptiano); C^{7-4}: Diaspri varicolori (Turoniano-Aptiano); Cbr^{7-4}:Brecce calcaree (Turoniano- Aptiano); C^3-G^5: Calcari nocciola bianchi e grigi (Cretacico inf.-Dogger); C^3- Go^5: Calcari nocciola bianchi e grigi (Cretacico inf.-Dogger); G^{4-2}: Calcari biancastri (Lias sup.-med.); G^{2-1}: Dolomie bianche e grigie (Lias inf.) 21

Figura 2.3 - Schema dei rapporti stratigrafici: 1) Alluvioni sciolte recenti; 2) Detrito di falda, coni di detrito ed eluvi Detrito di falda; 3) Terre rosse miste a depositi eluvio-colluviali; 4) Conoidi attuali e conoide antiche; 5) Limi argilloso-sabbioso grigio-bruno (Pleistocene med.-sup.); (6) Travertino (Pleistocene med.-sup.) ; 7) Limi bianco avorio-avana e sabbie (Pleistocene inf.- med.); 8) Piroclastiti (Pleistocene inf.-sup.); 9) Tufi Grigi (Pleistocene med.-sup.); 10) Puddinghe poligeniche (Pliocene inf.-Messiniano Lago Mare); 11) Argille varicolori (Messiniano); 12) Complesso argilloso-arenaceo (Tortoniano-Messiniano); 13) Marne a orbulina (Tortoniano inf.); 14) Calcari marnosi (Tortoniano inf.); 15) Calcari a briozoi e litotamni (Burdigaliano Serravalliano); 16) Complesso calcareo (Paleocene-Dogger); 17) Calcari bianchi e nocciola (Lias medio sup.); 18) Dolomie bianche e grigie (Lias inf.) 22

Figura 2.4 - Rapporti stratigrafici tra il travertino e la facies lacustre tardiva definiti da (Devoto, 1965). Legenda: l2: ciclo lacustre tipico; l3: ciclo lacustre tardivo; tr: travertino tipico 26

Figura 2.5 - Mappa geologica del bacino di Cassino e dell'area di studio interessata dalla modellazione geologica. Le sigle in rosso indicano la nomenclatura delle faglie principali del bacino: CC) Faglia Caira-Cassino; CT) Faglia Cassino-Monte Trocchio; MT) Faglia di Monte Trocchio; SPI) Faglia Atina-S. Pietro Infine 27

Figura 2.6 - Stralcio della carta idrogeologica dell'Italia centrale centrata nell'area di Cassino (Boni et al., 1986) 29

Figura 2.7 - Sezioni geologiche e idrogeologiche del bacino di Cassino (modificata da Saroli et al., 2020) 30

Figura 2.8 – Stralcio della Carta della Sismicità in Italia dal 1999 al 2024 (Pignone et al., 2024); nel quadrato rosso l'area del cassinate 31

Figura 2.9 – Stralcio mappa delle sorgenti sismogeniche redatta da INGV (DISS v3.3.1, 2025); nel rettangolo rosso l'area di interesse. Con le lettere A e B sono indicati i sistemi descritti nel

testo. I rettangoli gialli indicano le proiezioni sulla superficie delle sorgenti sismogeniche individuali (IIS); in arancione le proiezioni sulle superficie delle sorgenti sismogeniche composite (CSS); le linee rosse individuano le faglie attive 33

Figura 2.10 – Faglie di San Pietro Infine e delle Aquae Iuliae (catalogo ITHACA, 2019); nel riquadro bianco l'area del bacino di Cassino..... 36

Figura 2.11 – Grafico di distribuzione temporale degli eventi relativi alla località Cassino (DBMI15 v4.0) 39

Figura 2.12 – Grafico di distribuzione temporale degli eventi relativi alla località Montecassino (DBMI15 v4.0) 40

Figura 2.13 – Grafico di distribuzione temporale degli eventi relativi alla località Caira (DBMI15 v4.0) 41

Figura 2.14 - Massime intensità registrate per il comune di Cassino (DBMI15 v4.0), con evidenziati i principali eventi 41

Figura 2.15 - Mappe del risentimento macrosismico relative agli eventi elencati in tabella 2.9 (CPTI15 v4.0); nel quadrato rosso l'area del bacino di Cassino 42

Figura 2.16 – Zonazione sismica della Regione Lazio (D.G.R. n. 387/2009); nell'ovale nero il comune di Cassino..... 49

Figura 2.17 – Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale MPS04-S1 (2004); nel rettangolo blu l'area di interesse..... 45

Figura 2.18 - Applicativo "Spettri di risposta-ver1.0.3"; Fase 1: individuazione della pericolosità del sito: tramite l'inserimento delle coordinate del sito è possibile ricavare la tabella di valori dei parametri a_g, F_0, T_C* per i 9 periodi di ritorno T_R di riferimento..... 46

Figura 2.19 - Applicativo "Spettri di risposta-ver1.0.3"; Fase 2: scelta della strategia di progettazione: inserendo V_N e cu si ottengono i periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (V_R) e da questi i relativi parametri a_g, F_0, T_C* per ciascuno stato limite 46

Figura 2.20 - Applicativo "Spettri di risposta-ver1.0.3"; Fase 3: determinazione dello spettro di progetto: inserendo V_N e c_U si ottengono i periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (V_R) e da questi i relativi parametri a_g, F_0, T_C* per ciascuno stato limite 47

Figura 3.1 - Localizzazione dei sondaggi e delle misure di microtremore sismico nell'area studio di Cassino..... 48

Figura 3.2 - Numero di sondaggi disponibili nel dataset del bacino di Cassino divisi per classi di profondità da p.c. 49

Figura 3.3 - Esempi di due stratigrafie di sondaggio. a) Sondaggio superficiale che attraversa i sedimenti del complesso continentale e complesso vulcanico nel centro urbano di Cassino. b) Sondaggio profondo che raggiunge sia il complesso marino di piattaforma carbonatica sia il complesso marino delle unità flyschoidi argilloso-arenacee con argille varicolori nel centro urbano di Cassino 50

Figura 3.4 - Localizzazione delle prove penetrometriche nell'area di studio di Cassino distinte per tipologia 51

Figura 3.5 - Numero di prove penetrometriche disponibili nel dataset del bacino di Cassino divise per tipologia 51

Figura 3.6 – Localizzazione dei sondaggi dai quali sono stati prelevati i campioni per analisi di laboratorio. I numeri indicano l'identificativo univoco del sondaggio riportato nella prima colonna di Tab. 3.1 come "BH_ID" 52

Figura 3.7 - Localizzazione delle misure di microtremore nell'area studio di Cassino; a) distribuzione delle misure alla scala di bacino con passo di campionamento di 600 m; b) distribuzione delle misure alla scala del centro urbano con passo di campionamento di 150 m 54

Figura 3.8 - Esempio di analisi HVNR della misura di microtremore ID 117.1323. a) curva dei rapporti spettrali H/V e frequenza di picco f_0; b) analisi di direzionalità dell'onda della stessa misura 55

Figura 3.9 - Localizzazione dei fori di sondaggio nei quali sono state eseguite prove sismiche tipo down hole (DH) e dei siti nei quali sono state eseguite prove sismiche di superficie tipo MASW (indicate nell'immagine tramite il centroide dello stendimento) 56

Figura 3.10 - Indagine MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves); a) schema di esecuzione ed acquisizione della prova; b) profili di Vs determinati dopo l'elaborazione dei dati acquisiti: insieme dei modelli "possibili" (linee verdi), modello medio (linea rossa tratteggiata), modello con migliore approssimazione (linea blu) 57

Figura 3.11 - Indagine DH (down-hole). a) schema di esecuzione ed acquisizione della prova; b) profili di Vp e Vs determinati dopo l'elaborazione dei dati acquisiti: profilo di velocità delle onde P in rosso, profilo di velocità delle onde S in verde 58

Figura 3.12 – Esempio di omogeneizzazione e digitalizzazione di una stratigrafia di sondaggio poco profondo. a) stratigrafia proveniente dal database del progetto di Microzonazione Sismica di Livello 1 (Scarascia Mugnozza et al., 2012) con descrizione dei litotipi attraversati in fase di scavo; b) assegnazione della chiave primaria (BH_ID B130) e digitalizzazione della stratigrafia nelle schede "TAB_Borehole" e "TAB_Lithology" secondo una litostratigrafia comune; c) sondaggio digitalizzato secondo le litologie definite per il bacino di Cassino..... 62

Figura 3.13 - Esempio di omogeneizzazione e digitalizzazione di una stratigrafia di sondaggio profondo. a) stratigrafia proveniente dal database del progetto di Microzonazione Sismica di Livello 1 (Scarascia Mugnozza et al., 2012) con descrizione dei litotipi attraversati in fase di scavo; b) assegnazione della chiave primaria (BH_ID B022) e digitalizzazione della stratigrafia nelle schede "TAB_Borehole" e "TAB_Lithology" secondo una litostratigrafia comune; c) sondaggio digitalizzato secondo le litologie definite per il bacino di Cassino..... 62

Figura 3.14 - Esempio di omogeneizzazione e digitalizzazione di una stratigrafia di sondaggio profondo. a) stratigrafia proveniente dal database del progetto di Microzonazione Sismica di Livello 1 (Scarascia Mugnozza et al., 2012) con descrizione dei litotipi attraversati in fase di scavo; b) assegnazione della chiave primaria (BH_ID B020) e digitalizzazione della stratigrafia

nelle schede “TAB_Borehole” e “TAB_Lithology” secondo una litostratigrafia comune; c) sondaggio digitalizzato secondo le litologie definite per il bacino di Cassino..... 63

Figura 3.15 - Localizzazione delle tracce di sezione preliminari svolte nell’area studio del centro urbano di Cassino 63

Figura 3.16 - Esempio di sezione geologica di correlazione preliminare dei sondaggi per il caso studio di Cassino..... 64

Figura 3.17 - Localizzazione dei domini di modellazione per l’area studio del bacino di cassino. In mappa sono evidenziate le sigle delle faglie: CC) Faglia Caira-Cassino; CT) Faglia Cassino-Monte Trocchio; SPI) Faglia Atina-S. Pietro infine..... 66

Figura 3.18 - Localizzazione dei sondaggi geognostici utilizzai per identificare la porzione di complesso marino di piattaforma carbonatica (c) che risulta rialzata rispetto al resto del bacino; il poligono in rosso delimita i confini preliminari della struttura (la numerazione indentifica la chiave BH_ID con cui sono stati catalogati i sondaggi nel geodatabase) 67

Figura 3.19 – Stratigrafie dei sondaggi indicati in figura 3.14 (la numerazione indentifica la chiave BH_ID con cui sono stati catalogati i sondaggi nel geodatabase) 67

Figura 3.20 - Schematizzazione della variazione di ampiezza delle componenti orizzontali e verticale dell’onda SH al passaggio dal bedrock ai terreni di copertura; questa variazione si riflette sul rapporto spettrale H/V che risulta tanto più marcato quanto maggiore è il contrasto di impedenza all’interfaccia tra le due litologie (Nakamura, 1989, 2000, 2008)..... 68

Figura 3.21 - Localizzazione delle stazioni di misure di microtremore realizzate nell’area studio del bacino di Cassino e analizzate con la tecnica HVNR per identificare la frequenza fondamentale del complesso continentale e complesso vulcanico (l) 69

Figura 3.22 – Processo di correlazione tra profondità del bedrock individuato nei sondaggi (H) e frequenza fondamentale dei terreni da misure di microtremore (f_0) ai fini della determinazione dei coefficienti della relazione di Ibs-von Seht e Wohlenberg (1999)..... 70

Figura 3.23 - Curva di correlazione della distribuzione delle coppie di valori H ed f_0 relativa ai depositi del bacino di Cassino 71

Figura 3.24 - Andamento del tetto del bedrock sismico nel bacino di Cassino; l’elaborazione è stata eseguita con “*surfit* 3.0” utilizzando come dati di input i dati dei sondaggi e le profondità stimate dalle misure di microtremore sismico. Le quote sono indicate in metri sul livello del mare. Le linee rosse tratteggiate indicano le faglie inserite nella modellazione: faglia Caira-Cassino (CC), faglia Cassino-M. Trocchio (CT), faglia Atina-San Pietro Infine (SPI); FM1, FM2, FM3, FM4 ed FM5 sono faglie inserite per rispettare le evidenze geologico-stratigrafiche 72

Figura 3.25 - a) mappa di distribuzione dei valori di periodo di vibrazione T ottenuti da misure di microtremore ($T=1/f_0$); b) mappa dei valori di deviazione standard associati all’interpolazione; c) particolare della mappa dei valori di T che evidenzia la particolare condizione dell’area Terme Varroniane/Borgo Mastronardi: i valori di T relativamente bassi indicano un substrato a quote prossime alla superficie. I pallini blu localizzano alcune emergenze sorgentizie del gruppo del F. Gari..... 73

Figura 3.26 - Schema riassuntivo della modellazione geologica del bacino di Cassino: a) in verde il complesso marino di piattaforma carbonatica costituito da calcari e dolomie; b) in arancione il complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori; c) in giallo il complesso lago-mare costituito da puddinghe allotigene cementate; d) in azzurro il complesso continentale e complesso vulcanico costituito da depositi alluvionali e lacustri di natura limoso-argillosa e argilloso-limosi con intercalazioni e lenti sabbiose e ghiaiose e affioramenti travertinosi di origine idro-termale (nella figura e). Da Rompato (2024) modificato 75

Figura 3.27 - Localizzazione dell'area di modellazione e ubicazione delle tracce delle sezioni delle figure seguenti..... 75

Figura 3.28 - Sezioni per la modellazione geologica a scala del centro urbano di Cassino (tracce delle sezioni in Figura 3.28): a) sezione AA'; b) sezione BB'; c) sezione CC'. Le sezioni evidenziano le alternanze di litotipi nel complesso continentale e complesso vulcanico (esagerazione verticale 3x) 77

Figura 3.29 - Sezioni per la modellazione geologica a scala del centro urbano di Cassino (tracce delle sezioni in Figura 3.28): a) sezione DD'; b) sezione EE'; c) sezione FF'. Le sezioni evidenziano le alternanze di litotipi nel complesso continentale e complesso vulcanico (esagerazione verticale 3x) 78

Figura 3.30 - Ubicazione delle sezioni di modellazione sismica 80

Figura 3.31 – Sezione geologica S_2. Nel particolare si evidenzia l'elevata variabilità dei depositi superficiali rispetto a quelli a maggiori profondità dovuta alla minore definizione delle indagini profonde..... 81

Figura 3.32 – Particolare della parte superficiale della sezione S_2: viene evidenziata la qualità della discretizzazione del dominio eseguita dal software LSR2D col metodo agli elementi finiti, con diversi settori in arancione (qualità mediocre) 82

Figura 3.33 - Evoluzione nella modellazione della sezione S_2: a) modello con un unico sismostrato comprendente tutte le litologie del Complesso continentale e complesso vulcanico; b) modello a 2 sismostrati con distinzione tra depositi alluvionali e depositi lacustri; c) modello a 3 sismostrati con ulteriore suddivisione dei depositi alluvionali; d) modello a 4 sismostrati con distinzione tra due livelli all'interno dei depositi lacustri 83

Figura 3.34 - Fattori di amplificazione restituiti nei punti di controllo della sezione S_2 dall'analisi numerica delle 4 modellazioni di Figura 3.34: a) 1 sismostrato, b) 2 sismostrati, c) 3 sismostrati, d) 4 sismostrati. Solo la configurazione ad un sismostrato mostra un risultato generale che si discosta dagli altri 84

Figura 3.35 - Ubicazione dei punti di controllo (pallini rossi) della modellazione 2D, cui corrispondono le verticali della modellazione 1D..... 85

Figura 3.36 - Scenari in cui valutare la risposta sismica locale (Lanzo & Silvestri, 1999)..... 86

Figura 3.37 - Coppia molla-smorzatore del modello Kelvin-Voigt (Nori e Di Marcantonio, 2014)..... 89

Figura 3.38 - Schematizzazione del modello agli elementi finiti implementato nel codice di calcolo LSR2D 92

Figura 3.39 - Modello 2D con frontiere laterali riflettenti a) prossime o b) lontane e frontiere laterali c) assorbenti (Pergalani et al., 2020) 92

Figura 3.40 - Pagina http://esse1-gis.mi.ingv.it/ con impostazione dei parametri di ricerca come da tabella 3.8 94

Figura 3.41 - Grafico di disaggregazione per la lettura del contributo delle diverse sorgenti sismogenetiche alla pericolosità di base 95

Figura 3.42 - REXELweb: scheda per l'individuazione del sito di interesse considerato pianeggiante (topografia T1) e su suolo rigido (categoria di sito A) 96

Figura 3.43 - REXELweb: scheda per l'inserimento dei parametri di disaggregazione e del periodo di ritorno (475 anni); a destra gli spettri target (verticale e orizzontale) definiti con i criteri di ricerca 96

Figura 3.44 - REXELweb: scheda per l'inserimento delle tolleranze di ricerca e della numerosità del set di accelerogrammi; nel grafico a destra sono riportati gli spettri selezionati (in grigio) in funzione dei criteri di ricerca e dello spettro target (in azzurro) e lo spettro medio (in nero) degli spettri selezionati 96

Figura 3.45 - REXELweb: figura di spettro-compatibilità, con indicazione (linee tratteggiate verticali) dell'intervallo di periodo della ricerca (T1/T2), delle tolleranze inferiore e superiore dell'accelerazione (curve azzurre tratteggiate), del set di accelerogrammi selezionati (in grigio) e del loro spettro medio (curva continua nera) 97

Figura 3.46 – Ubicazioni delle indagini utilizzate per la caratterizzazione dei sismostrati .. 105

Figura 3.47 – Variabilità dei valori a) del peso di volume e b) dell'indice di plasticità tra i campioni elencati in tabella 3.18 106

Figura 3.48 – Variabilità dei valori di velocità delle onde di taglio V_S utilizzate per caratterizzare a) il sismostrato "AL_1" e b) il sismostrato "AL_2" 107

Figura 3.49 - Curva di correlazione della distribuzione delle coppie di valori V_S e z relativa alle indagini MASW e DH nei depositi del bacino di Cassino ed elencate nelle tabelle 3.19 e 3.20) 110

Figura 3.50 - Curve di decadimento G/G_0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): Vucetic & Dobry, PI = 30 111

Figura 3.51 - Curve di decadimento G/G_0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): Vinale, 1988 112

Figura 3.52 - Curve di decadimento G/G_0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): Pergalani et al., 1999 112

Figura 3.53 - Curve di decadimento G/G_0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): Vucetic & Dobry, PI = 15 112

Figura 3.54 - Curve di decadimento G/G_0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): lineare elastico (smorz. 0.5%) 112

Figura 3.55 - Sezioni sismostratigrafiche modellate con LSR2D. I pallini rossi indicano la posizione dei punti di controllo; ai confini sinistro e destro di ciascuna sezione sono visibili le colonne free-field imposte 114

Figura 3.56 - Confronto tra la discretizzazione eseguita in LSR2D con mesh ad elementi a) triangolari o b) quadrangolari (in uno stesso tratto della sezione S_1 e nelle medesime condizioni di modellazione): la qualità di ciascun risultato è indicata dal colore degli elementi come specificato nella leggenda in alto a sinistra delle immagini 116

Figura 3.57 - Impostazioni per la restituzione dei risultati in STRATA 117

Figura 3.58 - Ubicazione degli edifici sui quali sono state eseguite misure di rumore sismico 118

Figura 3.59 - Strumentazione utilizzata per le misure di rumore sismico sugli edifici 119

Figura 3.60 - Grafico a dispersione delle coppie di valori altezza (H)/periodo fondamentale (T) dell'edificio ottenute in diversi lavori (in Gallipoli et al., 2010) 119

Figura 3.61 - Confronto tra diverse correlazioni tra altezza (H) e periodo fondamentale (T) dell'edificio (in Gallipoli et al., 2023) 120

Figura 4.1 - Grafico per la determinazione dei fattori di amplificazione nei tre periodi di riferimento (Punto 1 sulla sezione S_1). La curva nera rappresenta lo spettro medio in accelerazione di input, la curva blu lo spettro medio in accelerazione di output. Per il calcolo dei fattori di amplificazione viene eseguito il rapporto tra gli integrali delle due curve negli intervalli di periodo 0.1-0.5 s (riquadro azzurro), 0.4-0.8 s (riq. rosso) e 0.7-1.1 s (riq. verde) 122

Figura 4.2 - Numerazione dei punti di controllo (pallini rossi) 123

Figura 4.3 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 1D 124

Figura 4.4 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 1D 125

Figura 4.5 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 1D 126

Figura 4.6 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 1D 127

Figura 4.7 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 1D 129

Figura 4.8 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 1D 130

Figura 4.9 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 2D 131

Figura 4.10 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 2D 132

Figura 4.11 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 2D 133

Figura 4.12 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 2D 134

Figura 4.13 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 2D 134

Figura 4.14 - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 2D 136

Figura 4.15 - Legenda della Carta di Microzonazione Sismica per le zone stabili e stabili suscettibili di amplificazioni locali (da Standard di rappresentazione e archiviazione informatica ver. 4.2, 2020) 137

Figura 4.16 - Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.1-0.5 s, calcolati con modellazione 1D 138

Figura 4.17 - Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.4-0.8 s, calcolati con modellazione 1D 139

Figura 4.18 - Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.7-1.1 s, calcolati con modellazione 1D 140

Figura 4.19 - Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.1-0.5 s, calcolati con modellazione 2D 141

Figura 4.20 - Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.4-0.8 s, calcolati con modellazione 2D 142

Figura 4.21 - Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.7-1.1 s, calcolati con modellazione 2D 143

Figura 4.22 - Edifici sui quali sono state eseguite misure di microtremore sismico: a) ubicazione edificio con codice identificativo della misura e b) altezze in metri degli edifici 144

Figura 4.23.a – Spettri delle tre componenti delle misure eseguite sugli edifici; misure da VC000 a VC005 145

Figura 4.23.b – Spettri delle tre componenti delle misure eseguite sugli edifici; misure da VC006 a VC011 146

Figura 4.23.c – Spettri delle tre componenti delle misure eseguite sugli edifici; misura VC012 147

Figura 4.24 - Risultati dell'indagine (pallini verdi) posti a confronto con i dati esposti in Gallipoli et al., 2010 148

Figura 4.25 - Risultati dell'indagine (pallini verdi) posti a confronto con i dati esposti in Gallipoli et al., 2023 148

Figura 4.26 - Carta delle aree nelle quali la differenza ΔT tra il periodo fondamentale di vibrazione della struttura e il periodo fondamentale del terreno risulta maggiore di 0.4 o minore o uguale a 0.4 150

Figura 5.1 - Confronto tra le carte dei fattori di amplificazione calcolati con modellazione 1D (a sinistra) e 2D (a destra) relativi all'intervallo di periodo 0.1-0.5 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto. I numeri bianchi nelle figure indicano le faglie commentate nel testo 152

Figura 5.2 - Confronto tra le carte dei fattori di amplificazione calcolati con modellazione 1D (a sinistra) e 2D (a destra) relativi all'intervallo di periodo 0.4-0.8 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto. I numeri bianchi nelle figure indicano le faglie commentate nel testo 153

Figura 5.3 - Confronto tra le carte dei fattori di amplificazione calcolati con modellazione 1D (a sinistra) e 2D (a destra) relativi all'intervallo di periodo 0.7-1.1 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto. I numeri bianchi nelle figure indicano le faglie commentate nel testo 153

Figura 5.4 - Sezione S_1: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA 154

Figura 5.5 - Sezione S_2: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA 155

Figura 5.6 - Sezione S_3: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA 155

Figura 5.7 - Sezione S_4: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA 156

Figura 5.8 - Sezione S_5: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA 156

Figura 5.9 - Sezione S_6: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA 157

Figura 5.10 - Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione 2D e 1D relativi all'intervallo di periodo 0.1-0.5 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto 163

Figura 5.11 - Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione 2D e 1D relativi all'intervallo di periodo 0.4-0.8 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto 164

Figura 5.12 - Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione 2D e 1D relativi all'intervallo di periodo 0.7-1.1 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto 165

Figura 5.13 - Modello dimensionale prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi 2D e 1D (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.1-0.5 s 167

Figura 5.14 - Modello dimensionale prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi 2D e 1D (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.4-0.8 s 168

Figura 5.15 - Modello dimensionale prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi 2D e 1D (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.7-1.1 s 169

Figura 5.16 - Area del comune di Cassino interessata dallo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 171

Figura 5.17 - Carta di microzonazione sismica del comune di Cassino: stralci relativi ai tre intervalli di periodo per l'area del centro urbano 172

Figura 5.18 – Individuazione di un'area di sovrapposizione tra RSL ed MS3: a sinistra la posizione dei punti di controllo da RSL rispetto all'area di approfondimento di MS3, a destra l'area corrispondente ai soli punti di controllo RSL ricadenti nell'area MS3 173

Figura 5.19 - Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione da RSL e da MS3 relativi all'intervallo di periodo 0.1-0.5 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto 173

Figura 5.20 - Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione da RSL e da MS3 relativi all'intervallo di periodo 0.4-0.8 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto 174

Figura 5.21 - Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione da RSL e da MS3 relativi all'intervallo di periodo 0.7-1.1 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto 174

Figura 5.22 - Approccio prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi RSL e MS3 (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.1-0.5 s 179

Figura 5.23 - Approccio prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi RSL e MS3 (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.4-0.8 s 179

Figura 5.24 - Approccio prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi RSL e MS3 (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.7-1.1 s 180

Figura 5.25 - Ubicazione dei comuni presentati nella pubblicazione e illustrazione delle relative configurazioni geologiche/morfologiche; da Pagliaroli et al. (2020), fig. 1 181

Figura 5.26 - a) Carta litotecnica dell'area di Capitignano e b) sezione BB' usata per la modellazione numerica; da Pagliaroli et al. (2020), fig. 12 182

Figura 5.27 - a) Sezione litotecnica BB'; b) modellazione numerica del sottosuolo; c) fattori di amplificazione 2D per siti selezionati sulla sezione ogni 30 m (linee nera, arancio e blu) e fattori di amplificazione 1D per i siti A, B e C sulla sezione (quadrati neri per l'intervallo 0.1-0.5 s,

cerchio arancio per l'intervallo 0.4-0.8 s, triangoli blu per l'intervallo 0.7-1.1 s); da Pagliaroli et al. (2020), fig. 14 modificata 183

Figura 5.28 - Le aree di studio di 1) Preturo-Sassa e 2) Bazzano-Monticchio; le linee tratteggiate corrispondono alle sezioni illustrate nell'articolo; da Tallini et al. (2024), fig. 1 184

Figura 5.29 - Valori dei fattori di amplificazione calcolati attraverso la modellazione 2D per l'area Preturo-Sassa lungo la sezione BB'; i simboli a rombo rappresentano i valori dei FA calcolati con le simulazioni 1D nei punti indicati con le lettere da A ad E; da Tallini et al. (2024), fig. 10 185

Figura 5.30 - Valori dei fattori di amplificazione calcolati attraverso la modellazione 2D per l'area Bazzano-Monticchio lungo la sezione CC'; i simboli a rombo rappresentano i valori dei FA calcolati con le simulazioni 1D; da Tallini et al. (2024), fig. 11 185

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1.1 – Categorie di sottosuolo che permettono l'approccio semplificato (da NTC 2018, Tabella 3.2.II) 11

Tabella 2.1 – Informazioni sulla sorgente sismogenica composita ITCS081 Venafro (DISS v3.3.1, 2025) 33

Tabella 2.2 – Informazioni sulla sorgente sismogenica individuale ITIS138 Aquae Iuliae (DISS v3.3.1, 2025) 34

Tabella 2.3 – Informazioni sulla sorgente sismogenica composita ITCS025 Salto Lake-Ovindoli-Barrea (DISS v3.3.1, 2025) 34

Tabella 2.4 – Informazioni sulla sorgente sismogenica individuale ITIS028 Barrea (DISS v3.3.1, 2025) 35

Tabella 2.5 – Informazioni sulla faglia San Pietro Infine e sulla faglia della Aquae Iuliae dal catalogo ISPRA (ITHACA Working Group, 2019) 37

Tabella 2.6 – Elenco degli eventi relativi alla località Cassino (DBMI15 v4.0) 37

Tabella 2.7 – Elenco degli eventi relativi alla località Montecassino (DBMI15 v4.0) 39

Tabella 2.8 – Elenco degli eventi relativi alla località Caira (DBMI15 v4.0) 40

Tabella 2.9 – Riepilogo degli eventi di particolare rilevanza per il territorio del bacino di Cassino (DBMI15 v4.0) 41

Tabella 2.10 – Zone sismiche del territorio della Regione Lazio 44

Tabella 2.11 – Parametri sismici di base determinati per l'area di studio 46

Tabella 3.1 - Tabella riassuntiva delle proprietà fisiche e meccaniche delle litologie rinvenute nel bacino di Cassino 52

Tabella 3.2 - Profondità da p.c. della falda relativa all'acquifero carbonatico profondo individuata in sondaggio (i valori di profondità negativi indicano un livello piezometrico che risale al di sopra per p.c.) 58

Tabella 3.3 - Profondità da p.c. della falda relativa all'acquifero multifalda superficiale individuata in sondaggio 59

Tabella 3.4 - Architettura del foglio TAB_Site. La colonna Site_ID rappresenta l'identificativo del sito di indagine (chiave primaria); gli altri campi contengono informazioni descrittive del sito e informazioni sul tipo e numero delle indagini realizzate 60

Tabella 3.5 - Architettura del foglio TAB_Borehole. La colonna BH_ID rappresenta l'identificativo del singolo sondaggio (chiave primaria per il collegamento con le tabelle delle

singole prove relative al sondaggio); gli altri campi contengono informazioni su quota s.l.m. e profondità del sondaggio, sulla falda e sulle prove eseguite e i campioni prelevati 60

Tabella 3.6 - Architettura del foglio TAB_Penetrometer. La colonna PN_ID rappresenta l'identificativo della singola prova (chiave primaria per il collegamento con la tabella PN_Data) 64

Tabella 3.7 - Elenco dei principali codici di calcolo per analisi numeriche di risposta sismica locale, suddivisi per caratteristiche (MDOF = modello a masse concentrate; F.E.M. = modello agli elementi finiti; F.D.M. = modello alle differenze finite 88

Tabella 3.8 - Parametri di ricerca per la procedura di disaggregazione 94

Tabella 3.9 - Contributo in termini di magnitudo e distanza delle sorgenti sismogenetiche alla pericolosità di base dell'area di studio 95

Tabella 3.10 – Set degli accelerogrammi di input estratti da REXELweb 97

Tabella 3.11 – Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (1)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso) 98

Tabella 3.12 – Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (2)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso) 99

Tabella 3.13 – Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (3)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso) 100

Tabella 3.14 – Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (4)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso) 101

Tabella 3.15 – Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (5)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso) 102

Tabella 3.16 – Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (6)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso) 103

Tabella 3.17 – Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (7)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso) 104

Tabella 3.18 – Tabella riassuntiva dei valori del peso di volume (γ_n) e dell'indice di plasticità (PI) dei campioni utilizzati per caratterizzare il sismostrato "AL" 106

Tabella 3.19 – Tabelle riassuntiva dei valori delle velocità delle onde di taglio VS da a) indagini MASW e b) prove down hole utilizzati per caratterizzare il sismostrato "AL_1" 107

Tabella 3.20 – Tabelle riassuntiva dei valori delle velocità delle onde di taglio VS da a) indagini MASW e b) prove down hole utilizzati per caratterizzare il sismostrato “AL_2” 108

Tabella 3.21 - Tabelle riassuntiva dei valori del peso di volume (γn) disponibili per la caratterizzazione del sismostrato “At” 109

Tabella 3.22 - Tabelle riassuntiva dei valori delle velocità delle onde di taglio VS da a) prove down hole e b) indagini MASW utilizzati per caratterizzare il sismostrato “LP” 110

Tabella 3.23 - Parametrizzazione dei sismostrati 111

Tabella 3.24 - Riepilogo dei dati della pericolosità sismica di base 113

Tabella 3.25 – Elenco dei punti di controllo (PC) di ogni sezione e distanza di ciascuno dall’origine della sezione stessa 115

Tabella 4.1 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 1D 124

Tabella 4.2 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 1D 125

Tabella 4.3 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 1D 126

Tabella 4.4 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 1D 127

Tabella 4.5 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 1D 128

Tabella 4.6 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 1D 129

Tabella 4.7 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 2D 130

Tabella 4.8 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 2D 131

Tabella 4.9 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 2D 132

Tabella 4.10 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 2D 133

Tabella 4.11 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 2D 135

Tabella 4.12 – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 2D 135

Tabella 4.13 – Risultati delle misure di microtremore sismico eseguite sugli edifici. Freq_N è la frequenza di vibrazione lungo la direzione della dimensione maggiore dell’edificio; Freq_E è la frequenza di vibrazione lungo la direzione della dimensione minore dell’edificio; Freq_min

è il valore minore tra Freq_N e Freq_E, cui corrisponde T_max, il periodo di vibrazione maggiore; T_terr è il periodo del terreno di fondazione in corrispondenza dell'edificio..... 147

Tabella 4.14 – Percentuale cumulata di edifici con differenze entro 0.5 s tra i periodi fondamentali del terreno e delle strutture 149

Tabella 5.1 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 2D e 1D..... 158

Tabella 5.2 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 2D e 1D..... 159

Tabella 5.3 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 2D e 1D..... 160

Tabella 5.4 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 2D e 1D..... 160

Tabella 5.5 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 2D e 1D..... 161

Tabella 5.6 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 2D e 1D..... 162

Tabella 5.7 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati nei 97 punti considerati e relativi ai valori determinati nella presente ricerca (RSL) e nello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3); P=0.1-0.5 s..... 175

Tabella 5.8 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati nei 97 punti considerati e relativi ai valori determinati nella presente ricerca (RSL) e nello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3); P=0.4-0.8 s..... 176

Tabella 5.9 - Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati nei 97 punti considerati e relativi ai valori determinati nella presente ricerca (RSL) e nello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3); P=0.7-1.1 s..... 177

Capitolo 1. INTRODUZIONE

1.1 Obiettivi della ricerca

La propagazione delle onde sismiche dalla sorgente (ipocentro del sisma) fino ad un determinato punto di interesse sarebbe regolata dalla sola legge di attenuazione dell'ampiezza del moto sismico con la distanza se le stesse si propagassero in un mezzo (il substrato) teoricamente rigido, omogeneo ed isotropo. Questa condizione si verifica in quello che viene definito bedrock sismico (formazioni geologiche che presentano velocità delle onde di taglio maggiori di 800 m/s).

Quando le onde sismiche si trovano ad attraversare mezzi a rigidezza minore (c.d. terreni di copertura), il moto sismico subisce delle modificazioni in termini di amplificazione o di deamplificazione. Ulteriori modifiche del moto sismico si registrano in condizioni geologiche complesse (stratificazione non piano-parallela, morfologia non pianeggiante, prossimità dei bordi di una valle). L'analisi di risposta sismica locale studia e quantifica l'entità delle modificazioni cui è soggetto il moto sismico in questi contesti, anche in funzione delle opere esistenti o da realizzare.

L'obiettivo della ricerca qui presentata è stato quello di studiare il comportamento sismico in un contesto geologico complesso attraverso analisi numeriche di risposta sismica locale.

In generale definiamo una situazione geologica come complessa quando si ha:

- eterogeneità litologica: presenza di litotipi molto diversi tra loro (alluvionali, vulcanici, flysch, depositi colluviali, riempimenti antropici, ecc.) anche su piccola scala;
- stratigrafia irregolare: alternanze rapide di strati, spessori variabili, depositi discontinui o localizzati
- tessitura strutturale complessa: faglie, pieghe, sistemi di fratture, contatti tettonici o erosivi;
- assetto geomorfologico articolato: pendii, terrazzi, incisioni fluviali, rilievi collinari o montuosi che influenzano la distribuzione dei sedimenti e il comportamento sismico;
- condizioni idrogeologiche variabili: presenza di falde superficiali, variazioni di saturazione, zone carsiche.

Nel contesto specifico della microzonazione sismica, quando definiamo un'area di studio come complessa intendiamo che:

- il sottosuolo non può essere rappresentato con modelli semplificati monodimensionali (tipo colonna stratigrafica regolare), ma richiede approcci 2D o 3D;

- la risposta sismica locale è condizionata da forti contrasti di impedenza laterali e verticali, che amplificano o modificano le onde sismiche in modo non lineare e non uniforme;
- l'incertezza nei dati geologici e geotecnici è più alta, quindi è necessario integrare rilievi geologici, geofisici e perforazioni;
- in documenti e linee guida internazionali (es. microzonazione sismica in Italia, ma anche *site response analysis* a livello internazionale) il termine viene usato proprio per segnalare criticità nella modellazione e la necessità di un approccio integrato multidisciplinare.

La scelta dell'area sulla quale eseguire questa ricerca è caduta sul bacino di Cassino (Fig. 1.1) per la presenza di diversi elementi che concorrono ad accrescere il livello di pericolosità sismica e quindi delle conseguenze in caso di eventi sismici:

- presenza di un bedrock geologico e sismico eterogeneo sia perché disarticolato da numerose faglie, sia perché costituito da diverse litologie (calcari di piattaforma carbonatica, brecce calcaree cementate, flysch marnoso-arenacei);
- presenza della faglia denominata "San Pietro Infine" censita nel catalogo ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults) e riconosciuta come attiva e capace nel tratto compreso tra Atina e San Pietro Infine (Maceroni et al., 2022; Saroli et al., 2003; Smeraglia et al., 2018);
- presenza di depositi di copertura caratterizzati da natura e spessori molto variabili sia in senso verticale che lateralmente;
- presenza di una potente falda acquifera carbonatica che alimenta i depositi granulari più superficiali e di più falde sovrapposte all'interno dei terreni di copertura, con livello di rinvenimento prossimo al piano campagna;
- presenza di depositi potenzialmente liquefacibili a causa della loro granulometria e della falda a quote relativamente superficiali.

È stato quindi necessario dapprima raccogliere tutti i dati disponibili, sia di letteratura che da indagini geologiche, geotecniche e sismiche realizzate nell'area, quindi, tramite la loro analisi, omogeneizzazione ed interpretazione, costruire un modello geologico della Piana di Cassino dal quale estrarre profili verticali e sezioni sismostratigrafiche da utilizzare nelle analisi numeriche di risposta sismica. Tutti i dati delle indagini sono stati raccolti in un geodatabase relazionale appositamente realizzato.

Tali analisi sono state condotte in configurazione sia monodimensionale che bidimensionale ed è stato eseguito un raffronto tra i risultati ottenuti nelle due modalità, definendone l'entità dello scostamento in termini di fattori di amplificazione, per valutarne l'applicabilità in contesti diversi. Con questo confronto è infatti possibile mettere in evidenza le condizioni di amplificazione dovute a particolari condizioni geomorfologiche o strutturali, piuttosto che alla semplice condizione stratigrafica, ed approfondire i relativi aspetti.

È stata poi operata una valutazione di questi risultati in relazione a quelli derivanti dallo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3, realizzato dal Comune di Cassino (FR) e

recentemente validato dalla Commissione Tecnica del Dipartimento Nazionale di Protezione Civile.

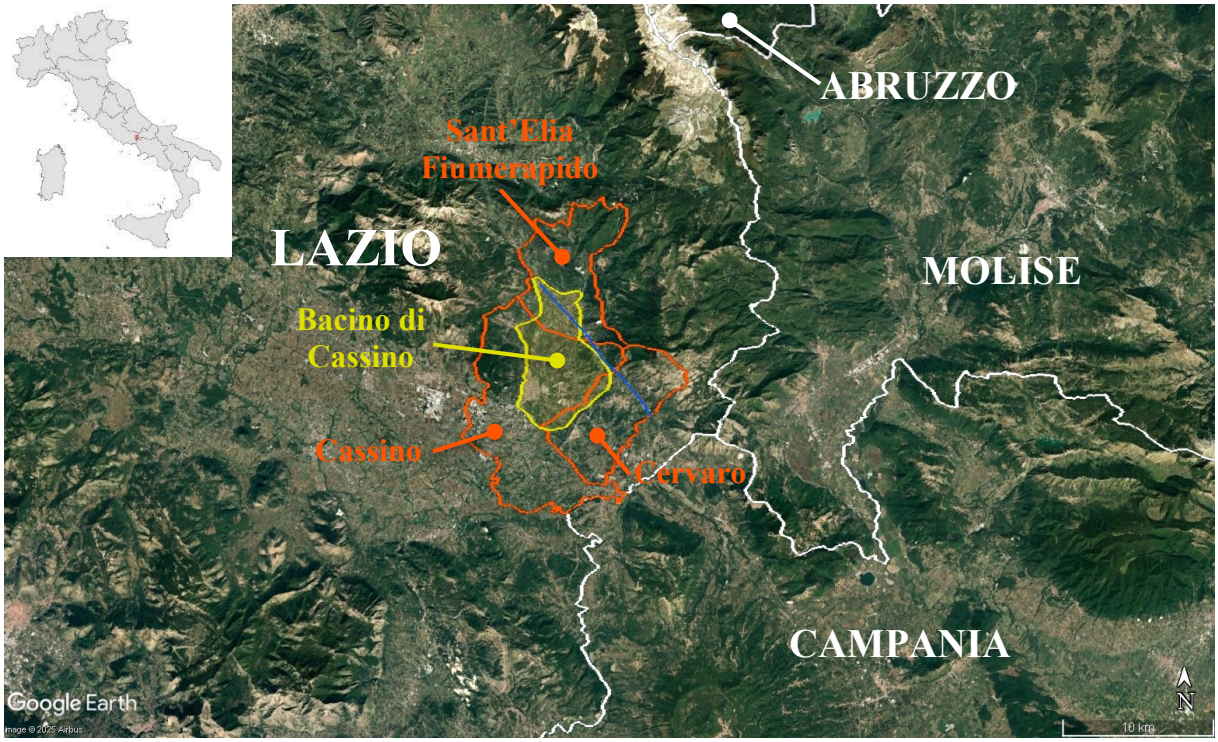


***Fig. 1.1** – Localizzazione dell'area di studio: in rosso i limiti amministrativi dei comuni di Cassino, Sant'Elia Fiumerapido e Cervaro, in giallo l'area del bacino di Cassino, in blu il tracciato della faglia di "San Pietro Infine"*

Infine, i risultati ottenuti dalle analisi numeriche sono stati posti a confronto con i dati forniti dall'approccio semplificato di normativa (NTC18, Norme Tecniche per le Costruzioni, Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 17 gennaio 2018) per valutare l'applicabilità di quest'ultimo in quei contesti geologici definiti complessi e che hanno impatto sul costruito esistente, di recente realizzazione e da realizzare.

La scelta dei codici di calcolo più appropriati, sia dal punto di vista del tipo di analisi eseguita (alle tensioni totali, alle tensioni efficaci, con modelli reologici a comportamento lineare equivalente o con modelli a comportamento non lineare) che per il tipo e il numero di algoritmi implementati, ma anche per il tipo di interfaccia più o meno *user friendly* proposto, nel caso di questo progetto è ricaduta sul software STRATA (Kottke & Rathje, 2008) per le analisi monodimensionali e sul software LSR2D della azienda Stacec s.r.l. per le modellazioni bidimensionali.

Ulteriore elemento di studio è stato quello di verificare l'eventuale corrispondenza tra le frequenze di risonanza dei depositi della Piana di Cassino e le frequenze di oscillazione caratteristiche degli edifici del centro urbano di Cassino. A tal fine è stata condotta una campagna di misure di frequenza su una serie di edifici scelti in base a specifiche caratteristiche (altezza, forma, tipologia costruttiva).

Dal punto di vista delle ricadute applicative si ritiene che questo progetto possa essere determinante nell'indirizzare future scelte progettuali per quanto riguarda determinate tipologie costruttive nel territorio del Comune di Cassino, ma anche in aree limitrofe nelle medesime

condizioni geologiche, generalmente non riconoscibili attraverso le sole indagini di tipo puntuale.

Non meno importante può risultare l'applicazione ai fini di protezione civile. Attualmente le linee guida per la realizzazione dei Piani di Protezione Civile prevedono di ipotizzare degli scenari di rischio. Di conseguenza, la conoscenza di aree nelle quali siano attesi effetti di amplificazione bidimensionali, può essere utile per la previsione di scenari di rischio più realistici in pianificazioni di questo tipo.

Le fasi di realizzazione dell'attività di ricerca sono schematizzate nel seguente diagramma di flusso.

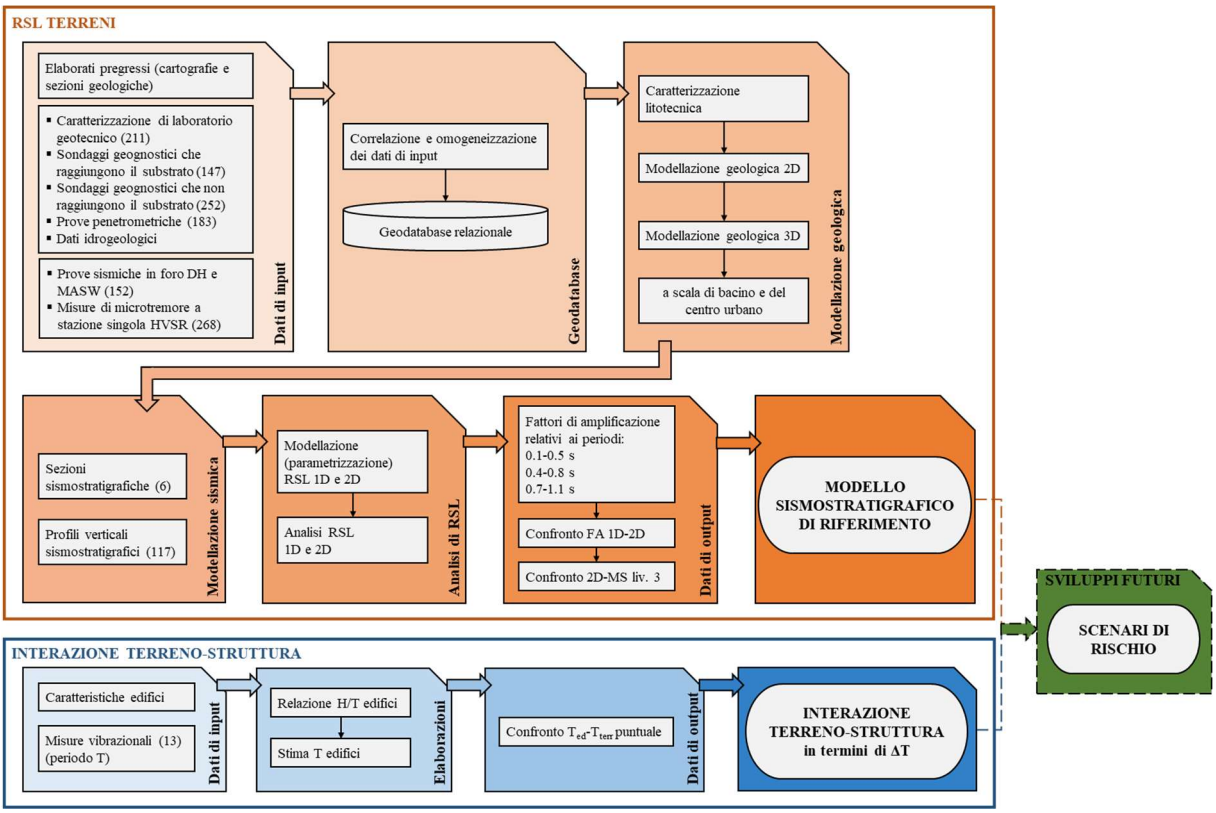


***Fig. 1.2** - Diagramma di flusso delle attività di ricerca*

1.2 Stato dell'arte

La valutazione delle caratteristiche del moto del terreno in superficie a seguito di un evento sismico è di fondamentale importanza per la progettazione di strutture in grado di resistere alle azioni sismiche. Tali caratteristiche possono essere attribuite a tre meccanismi fondamentali: meccanismo di sorgente, propagazione delle onde dalla sorgente al sito e risposta sismica locale. In modo particolare, quest'ultima è responsabile delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico (terremoto di riferimento) relativo ad una formazione rocciosa di base (bedrock sismico) subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo e Silvestri, 1999; Kramer S.L., 1996).

Il fenomeno della risposta sismica locale è stato oggetto di numerosi studi negli ultimi trent'anni, basati sull'analisi delle registrazioni di eventi sismici e su modellazioni di carattere

numerico, fino ad essere introdotto nei moderni codici normativi. Lo stesso testo delle Norme Tecniche per le Costruzioni (c.d. NTC18) al paragrafo 3.2.2 propone, come via ufficiale, un approccio numerico per la valutazione della risposta sismica stratigrafica del terreno alla scala della singola opera.

L'analisi numerica per la valutazione della risposta sismica locale, oltre ad essere più accurata rispetto all'approccio semplificato descritto dalle norme tecniche per le costruzioni (categorie di sottosuolo), consente di identificare l'amplificazione stratigrafica nel caso specifico individuando intervalli di periodo più limitati rispetto a quelli di normativa e di conseguenza ottenere dimensionamento strutturale più razionale.

Gli studi riguardanti la risposta sismica locale possono essere considerati relativamente recenti se paragonati ad altri ambiti dell'ingegneria. Il testo preso come riferimento per lo studio di questa materia è "Geotechnical Earthquake Engineering" di Steven L. Kramer (Kramer, 1996). In questo lavoro l'autore opera una corposa raccolta e sintesi di altri testi e pubblicazioni precedenti e fornisce una trattazione organica e unitaria di un argomento che certamente è di non facile trattazione.

In Italia un primo ottimo testo che affronta l'argomento è "Risposta sismica locale, teoria ed esperienze", degli autori Lanzo e Silvestri (Lanzo e Silvestri, 1999) che ripercorre gli argomenti trattati sul testo di Kramer, focalizzandosi agli aspetti rivolti specificamente alla risposta sismica locale, ed aggiunge commenti esplicativi e note degli autori di notevole interesse. Sono poi affrontati anche dei "*case histories*", tre dei quali riferiti ad eventi italiani (Friuli 1976, Irpinia 1980 e Umbria-marche 1997).

Un altro testo italiano, "Dinamica dei Terreni per le applicazioni sismiche" (Crespellani e Facciorusso, 2010), si concentra sullo studio del comportamento non lineare dei terreni sotto azioni dinamiche e della relativa caratterizzazione meccanica, offrendo un'ottima panoramica dei diversi terreni e delle loro caratteristiche tipiche e riportando anche il risultato di sperimentazioni condotte dagli Autori su terreni italiani.

Altri studi di rilievo riguardanti esperienze di risposta sismica locale possono essere considerati quelli esposti in Pagliaroli et al., 2023. Questo articolo riporta i risultati principali delle analisi di risposta sismica condotte in configurazione 1D e 2D in 4 dei 137 comuni interessati da studi di Microzonazione Sismica di Livello 3 dopo la sequenza sismica del Centro Italia del 2016. In particolare, nei casi illustrati si prende in considerazione il comportamento sismico di alcuni siti di all'interno dei quattro comuni (Arquata del Tronto, Monte San Martino e Montedinove nelle Marche e Saletta nel Lazio), in prossimità o lungo dei versanti e si espongono i risultati in termini di fattori di amplificazione.

L'utilizzo dei fattori di amplificazione come indicatori del livello di pericolosità sismica di una data area viene proposto anche da Yamin et al. 2018 per lo studio di microzonazione sismica della città di Medellin in Colombia. Il lavoro risulta interessante anche per la ricostruzione storica dell'evoluzione delle ricerche in questo campo negli Stati Uniti, in Giappone e in Sud America a partire dagli anni '50.

Dal punto di visto della particolarità dei deposti interessati da studi di risposta sismica locale risulta interessante il lavoro di Salsabili et al. del 2021. Lo studio di microzonazione sismica condotto nella città di Saguenay, situata a nord di Quebec City, in Canada, ha riguardato la caratterizzazione di depositi di origine fluvio-glaciale e glacio-marina che costituiscono il riempimento di diverse valli sepolte e che generano forti contrasti di impedenza al contatto con il basamento cristallino Precambriano. Gli Autori mettono a confronto quattro diversi metodi di classificazione dei terreni, due dei quali usano le velocità delle onde di taglio (V_S), uno i periodi fondamentali dei terreni (T_0) e un quarto la combinazione di questi parametri, per valutarne l'applicabilità, i vantaggi e i limiti nel catturare le peculiarità geologiche dell'area di studio. La conclusione a cui giungono è che i metodi basati sulle velocità medie delle onde di taglio riescono a fornire una classificazione migliore dei terreni superficiali, ma i valori dei periodi di vibrazione sono fondamentali per migliorare le conoscenze sui sedimenti oltre i 30 m di profondità.

Oliveira et al. (2024) hanno condotto uno studio sugli effetti sismici locali nella città di Lisbona, caratterizzata da una morfologia collinare e da strette valli torrentizie. Le analisi sono state condotte in configurazione mono e bidimensionale e ne sono poi stati confrontati i risultati in termini di fattori di amplificazione e di *aggravation factor* (AGF) per valutare l'effetto addizionale della risposta 2D rispetto alla risposta 1D in relazione alla presenza elementi topografici, valli e morfologie sepolte.

Gli studi di risposta sismica locale condotti nel Comune di Forio sull'isola di Ischia da Martino et al. (2020) a seguito dell'evento sismico del 2017 hanno consentito di rilevare effetti locali connessi a condizioni geologico-strutturali complesse, legate al contesto vulcanico, alla presenza di elementi tettonici e sistemi di fratturazione e alla giustapposizione di accumuli di frana. Mancini et al., 2021 riportano i risultati dello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 condotto nella parte nord e ovest della stessa Isola. Gli Autori, dopo aver eseguito analisi 1D e 2D, concludono che le aree a maggior propensione nei confronti dei fenomeni di amplificazione sono quelle ai piedi di Monte Epomeo caratterizzate da depressioni tipo graben.

Negli studi citati, gli Autori concordano nell'affermare che la modellazione monodimensionale non è sufficiente per analizzare il comportamento sismico di aree che presentano forti contrasti di impedenza (sedimenti soffici su substrato rigido), inversioni di velocità (strati superficiali più rigidi rispetto a quelli immediatamente sottostanti), fratturazione, faglie, giunti in ammassi rocciosi, giaciture non piano-parallele, intercalazioni litologiche ed irregolarità geometriche si in superficie che in profondità. In presenza di questi elementi di complessità, le analisi di risposta sismica locale 1D non riescono a catturare gli effetti locali e sono meno efficaci delle analisi 2D.

La ricerca svolta in questo dottorato vuole indagare l'efficacia delle analisi di risposta sismica locale, condotte nelle due configurazioni, nell'area del bacino di Cassino. In questo contesto geologico complesso l'aspetto topografico è secondario, trattandosi di una piana, e quindi si vanno a valutare gli effetti dovuti ad elementi del sottosuolo (variazioni stratigrafiche

e giaciturali, morfologie sepolte, tettonica obliterata dai depositi recenti) attraverso il confronto tra i risultati dei due metodi.

1.2.1 Evoluzione della normativa sismica in Italia

L'evoluzione normativa sismica in Italia segue da sempre il verificarsi di eventi sismici con conseguenze più o meno catastrofiche.

Dopo l'evento del 5 febbraio 1783 che colpì la Calabria e che ebbe un bilancio finale di circa 35.000 vittime viene emanata la Legge del marzo 1784, il cosiddetto "Codice borbonico antisismico", con la quale si conferma l'utilizzo del sistema baraccato.

Nel 1859, a seguito degli eventi che colpirono il napoletano (1857) e l'area di Norcia (1859), il Governo pontificio emanò il Regolamento edilizio con il quale si fissavano limiti dimensionali per lo spessore delle murature e per l'altezza della struttura, definendo anche le modalità realizzative delle stesse.

Nel 1884, dopo il terremoto di Casamicciola (Ischia) viene emanata la Legge n. 1985; anche in questo caso vengono fornite indicazioni sulle modalità costruttive e sulle dimensioni massime in altezza.

In seguito al devastante terremoto di Reggio Calabria e Messina nel 1908 fu emanato il Regio Decreto n. 193 del 1909 contenente norme tecniche obbligatorie per le riparazioni e per la costruzione di nuovi edifici valide per i comuni inseriti in un apposito elenco allegato al decreto; questi comuni venivano dichiarati sismici. Con questo provvedimento nasce quindi la prima classificazione sismica di parti del territorio italiano. L'inclusione in una zona dichiarata sismica comportava l'obbligo di rispettare le norme tecniche antisismiche e dopo ogni forte terremoto i comuni colpiti venivano via via classificati sismici e anche per essi si applicava la normativa relativa. Ovviamente questa classificazione sismica implicava solo l'inclusione (o meno) nell'elenco dei comuni sismici, ma ad essa non era associato alcun dato che indicasse il grado di sismicità dell'area e quindi non vi era alcuna distinzione in categorie.

Nel 1915, con il Regio Decreto Legge n. 573 del 29/04/1915 emanato a seguito del terremoto della Marsica con epicentro nella Piana del Fucino, anche buona parte dei comuni Abruzzesi furono dichiarati sismici e con essi un gran numero di comuni del basso Lazio che avevano subito danni rilevanti; tra i quali anche Cassino.

Nel 1927, con il Regio Decreto n. 430 del 17/03/1927, viene introdotta la seconda categoria sismica, con una differenziazione nelle regole di progetto. Da qui in poi l'inclusione di ulteriori porzioni del territorio italiano in zona dichiarata sismica avveniva sempre dopo il verificarsi di eventi sismici di rilievo.

Nel 1974 viene pubblicata la Legge n. 64 del 2 febbraio 1974 che aveva molti elementi di novità rispetto alla normativa precedente, proprio sulle procedure con cui dovevano essere dichiarate sismiche le parti del territorio italiano. Questa norma prevedeva che si procedesse all'aggiornamento degli elenchi delle zone dichiarate sismiche e si attribuissero a ciascuna zona dei valori differenziati del grado di sismicità per la determinazione delle azioni sismiche. Cambia quindi la logica normativa precedente, dove i comuni erano dichiarati sismici attraverso

una norma che semplicemente li inseriva negli elenchi senza particolari approfondimenti tecnici. Con la legge 64/74 la classificazione deve avvenire sulla base di comprovate motivazioni tecniche e cominciò, pertanto, a basarsi su valutazioni di pericolosità sismica.

Ma è solo a partire dal 1980, in seguito ai terremoti del Friuli nel 1976 e dell'Irpina nel 1980, che gli studi sismologici permisero la formulazione di una proposta di normativa sismica basata su un concetto di tipo probabilistico della sismicità italiana.

Per una applicazione completa fu necessario attendere il 1984 (nel frattempo si erano verificati gli eventi del Friuli nel 1976, dell'Irpinia nel 1980 e dei Monti della Meta del 1984), mentre tra il 1980 ed il 1984 il Ministero dei Lavori Pubblici emanò una serie di decreti, tra i quali il Decreto Ministeriale 1981 che introduce la terza categoria a minore sismicità e coefficienti minori rispetto alle prime due.

In seguito al terremoto del Molise del 2002, con il crollo della scuola "Francesco Jovine" di San Giuliano di Puglia e la conseguente morte dei 27 bambini e di una maestra, è stato compiuto un passo decisivo nel valutare la pericolosità sismica a livello nazionale, emanando l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri nel 2003 (O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003) con la quale si stabilì che tutto il territorio italiano venisse classificato sismico. Venne introdotta una quarta categoria che di fatto ricomprende tutte le aree considerate fino ad allora come "non classificate".

Da allora le regioni, anche in virtù dell'O.P.C.M. n. 3519 del 28 aprile 2006, hanno provveduto a rivedere gli elenchi delle zone sismiche; nel Lazio gli ultimi aggiornamenti sono stati determinati con la Delibera di Giunta Regionale n. 387 del 22 maggio 2009, che classifica tutti i comuni ricompresi nel proprio territorio in 3 zone a pericolosità decrescente (zona 1, 2 e 3), introducendo due sottozone (A e B) per le zone 2 e 3 per adattare meglio le norma alle caratteristiche di sismicità locali.

A partire dal Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 14 gennaio 2008 (c.d. NTC 2008) e a seguire con il D.M. 17 gennaio 2018 (NTC 2018) le azioni sismiche di progetto si ottengono direttamente dagli studi di pericolosità sismica mentre con la precedente normativa l'azione sismica era associata alla categoria sismica, a cui corrispondeva un unico coefficiente S o un unico valore di accelerazione al suolo di riferimento a_g.

Per quanto riguarda le analisi numeriche di risposta sismica (RSL), la normativa italiana, per quanto attiene la progettazione di strutture, fa riferimento al loro utilizzo a partire dalle NTC 2008 e quindi con le NTC 2018 (§ 3.2.2). A livello di pianificazione territoriale questi approfondimenti sono richiesti la realizzazione di studi di Microzonazione Sismica di Livello 3.

Per la regione Lazio la prima norma che rende obbligatori gli studi di RSL per strutture ricadenti in classe d'uso III e IV è la D.G.R. n. 489 del 17 ottobre 2012, mentre il Regolamento Sismico Regionale n. 26 (D.G.R. Lazio n. 724 del 26 ottobre 2020) introduce per la prima volta come obbligatorio l'approccio bidimensionale della RSL per strutture ricadenti in classe d'uso "*III e IV ed in tutti i casi in cui (es. inversioni di velocità, bruschi passaggi di rigidezza, ecc.) il sottosuolo non è classificabile nelle categorie di cui alla Tabella 3.2.II delle NTC2018 … e*

con sottosuoli non costituiti da strati orizzontali continui e superficie topografica non pianeggiante".

Infine, la D.G.R. Lazio n. 709 del 2 settembre 2022 fornisce indicazioni su come utilizzare i risultati degli studi di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3) eseguiti in aree stabili suscettibili di amplificazioni locali e si applica alle costruzioni in classe d'uso II con ''livello di rischio sismico'' dell'opera Medio e Alto ai sensi del R.R. n. 26/2020 (Zone sismiche 1, 2a, 2b). Dal confronto tra lo spettro di risposta medio regolarizzato ottenuto dallo studio di MS3 della microzona di interesse con quello ottenuto con l'approccio semplificato di normativa (categorie di sottosuolo da NTC 2018) per il tempo di ritorno di 475 anni si determina se può essere utilizzato l'approccio semplificato o se deve essere eseguita una analisi RSL ai fini della progettazione della singola opera. Quindi, questa norma introduce la possibilità di dover eseguire un approfondimento di questo tipo anche per le strutture ricadenti in classe d'uso II secondo le NTC.

1.2.2 Pericolosità sismica di base

Come visto nei paragrafi precedenti, la pericolosità sismica di base, ai sensi dell'attuale normativa, è il dato di partenza per la determinazione delle azioni sismiche ed è determinata a partire dalle caratteristiche sismologiche dell'area (tipologia, dimensione e profondità del movimento atteso, cinematica della faglia che genera il movimento, energia e frequenza dei terremoti). Essa valuta per una data area e in un determinato periodo di tempo, i valori di un insieme di parametri (picco di velocità orizzontale PGV, accelerazione orizzontale di picco PGA, spostamento orizzontale di picco PGD, intensità macrosismica I, ordinate spettrali) corrispondenti a prefissate probabilità di superamento, determinati assumendo ipotesi di scuotimento applicato in condizioni geomorfologiche piane su sottosuolo rigido. Dal punto di vista temporale, la pericolosità non è più definita con riferimento ad un singolo valore del periodo di ritorno, T_R = 475 anni, ma in corrispondenza di 9 valori, ovvero T_R = 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni, coerentemente con un approccio prestazionale alla progettazione, basato sull'assunzione che, a fronte di un'azione sismica di intensità variabile e pertanto caratterizzata da un periodo di ritorno variabile, si richiedano alle strutture livelli di prestazione diversi.

Per la valutazione quantitativa è possibile disporre di due metodologie: un approccio deterministico e uno probabilistico. Tra le due metodologie di analisi la più complessa e raffinata è quella che prevede un approccio di tipo statistico, poiché permette di tenere in considerazione le incertezze sui parametri di scuotimento assumendo che i terremoti obbediscano ad un processo di accadimento Poissoniano, ovvero senza memoria. Il metodo probabilistico più utilizzato è quello di Cornell (1968). Esso prevede che si individuino delle zone sorgenti (zone sismogenetiche), nelle quali la probabilità che si verifichi un terremoto all'interno sia la stessa per ogni punto, e si quantifichino il rispettivo grado di attività sismica e gli effetti provocati in relazione alla distanza epicentrale.

Questa analisi permette di valutare la distribuzione probabilistica di una grandezza rappresentativa del sisma atteso tramite le curve di pericolosità uniforme, che definiscono la frequenza media annua di occorrenza di un terremoto caratterizzati da differenti livelli di severità (Fig. 1.3). Tuttavia tale metodo presenta delle limitazioni dettate dalle ipotesi di partenza, ovvero: considerare terremoti come eventi indipendenti non considerando una probabilità di accadimento maggiore col trascorrere del tempo, in riferimento all'ultimo terremoto; considerare una legge di attenuazione omogenea ed isotropa su tutto il territorio (indipendentemente dalla morfologia del terreno e direzione di propagazione delle onde); inoltre si considera la condizione di sito ideale (roccia affiorante con superficie orizzontale) e quindi non prendendo in considerazione le alterazioni del moto sismico causate dagli effetti di sito.

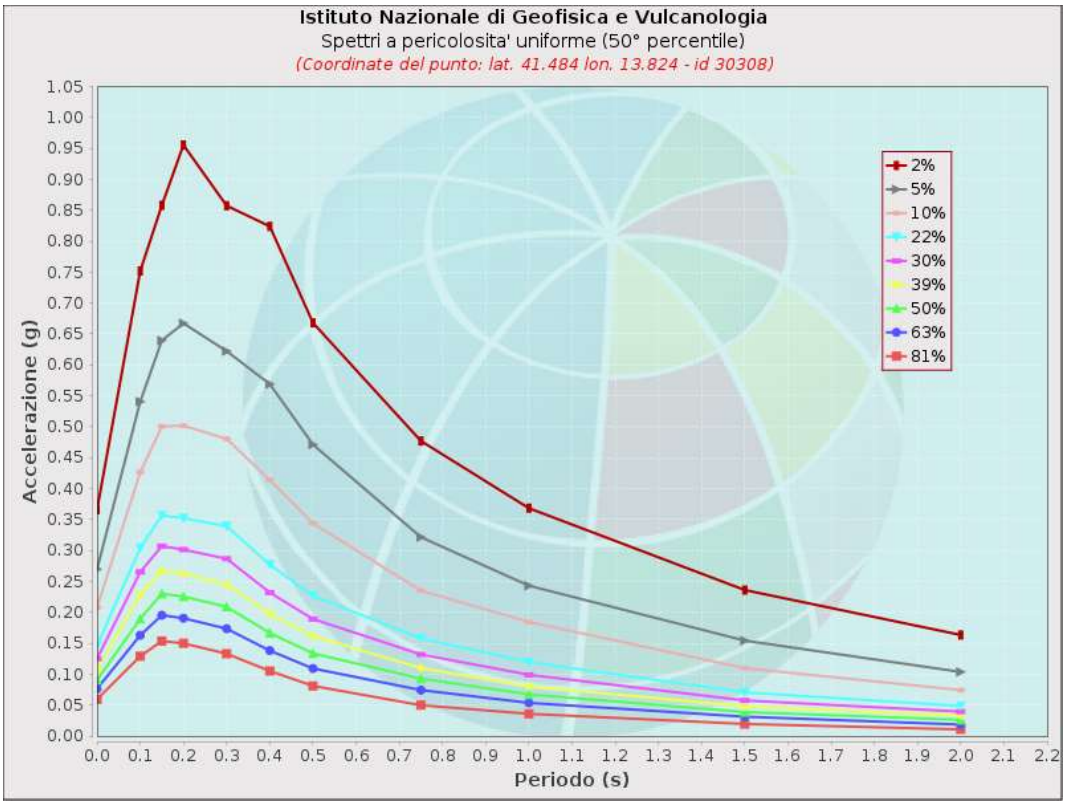


***Fig. 1.3** – Spettri di risposta a pericolosità uniforme riferite a una probabilità di superamento PVR del 10% in un periodo di 50 anni per coordinate ricadenti nel centro dell'abitato di Cassino (http://esse1-gis.mi.ingv.it/)*

Le NTC18 definiscono i parametri di scuotimento desiderati (solitamente il valore di accelerazione massima al suolo, PGA), in un certo intervallo di tempo (convenzionalmente 50 anni per edifici di civile abitazione) in riferimento a una probabilità di eccedenza (convenzionalmente del 10%, riferito allo stato limite di salvaguardia della vita, SLV) nel periodo di riferimento considerato (475 anni). Esse permettono di definire la pericolosità sismica di base secondo una procedura basata sugli studi condotti dall'INGV, a partire dagli spettri di pericolosità uniforme, tramite tre parametri a_g, F_0 e T_C^*, definiti nelle NTC 2018 come:

- a_g: accelerazione orizzontale massima del terreno;
- F_0: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro di accelerazione orizzontale;

- T_C^*: periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha messo a disposizione un applicativo in Excel (Spettri di risposta – ver. 1.03) per la valutazione dell'input sismico attraverso la localizzazione geografica del sito, la definizione di vita nominale e coefficiente d'uso della struttura e l'indicazione della categoria di suolo e della categoria topografica del sito.

1.2.3 Effetti di sito e risposta sismica locale

Una volta definita la pericolosità sismica di base occorre apportarvi delle correzioni per ottenere l'azione sismica di progetto, così da tenere conto delle reali condizioni di sito. La pericolosità sismica è ricavata infatti in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, condizioni che solo raramente sono verificate. Le norme tecniche per le costruzioni forniscono un approccio semplificato per la valutazione della risposta sismica locale associato agli effetti di sito stratigrafici e topografici.

Le metodologie per la determinazione degli *effetti stratigrafici* si basano sulla determinazione di categorie di sottosuolo alle quali vengono associati dei parametri che generano una modifica dello spettro di risposta associato a un sottosuolo rigido in condizioni topografiche orizzontali. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^{N} \frac{h(strato)}{V_S(strato)}}$$

La classificazione prevede le ben note cinque classi di sottosuolo riportate nella seguente Tabella 1.1:

***Tab. 1.1** – Categorie di sottosuolo che permettono l'approccio semplificato (da NTC 2018, Tab. 3.2.II)*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti*, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina molto consistenti*, con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti*, con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
E	*Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D,* con profondità del substrato non superiore a 30m.

Per terreni ricadenti in classi di sottosuolo diverso da quello di tipo A, è prevista una modifica dello spettro elastico in accelerazione, tramite i coefficienti S_S (coefficiente

stratigrafico) e C_C (coefficiente funzione della categoria di suolo). Queste correzioni apportano modifiche agli spettri elastici delle categorie da B ad E, rispetto allo spettro A, come mostrato in Figura 1.4.

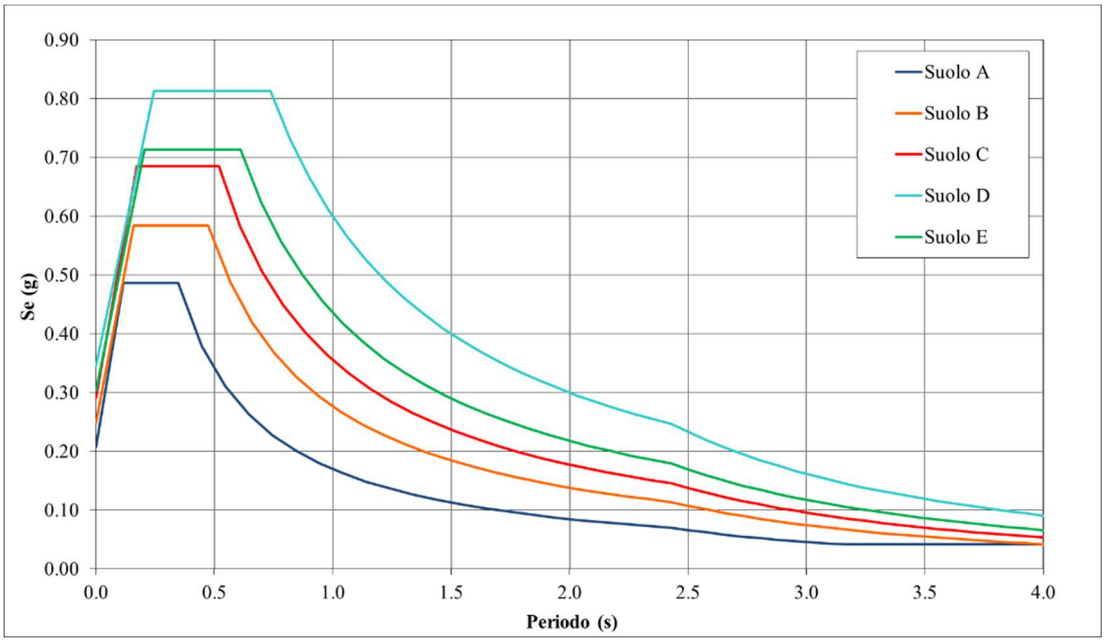


***Fig. 1.4** – Spettri di risposta elastici in accelerazione per la componente orizzontale secondo NTC18; confronto tra le diverse categorie di suolo per uno stesso sito di coordinate ricadenti nel centro dell'abitato di Cassino (dati estratti con l'applicativo Spettri di risposta – ver. 1.03 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici)*

Per la valutazione degli *effetti topografici* che possono riscontrarsi in corrispondenza di creste, rilievi o avvallamenti la normativa permette di utilizzare metodi semplificati basati sulla classificazione di quattro categorie topografiche, per ciascuna delle quali viene associato un valore del coefficiente di amplificazione topografica S_T (Fig. 1.5). Il metodo semplificato prevede incrementi massimi del fattore di amplificazione topografica (S_T) di un valore compreso tra 0.2 (per le categorie T2 e T3) e 0.4 (categoria T4) rispetto alla categoria T1 (superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°), con conseguente incremento dello spettro senza modificarne la forma (Fig. 1.6).

Categoria topografica	Caratteristiche della superficie topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T_1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°	-	1.0
T_2	Pendii con inclinazione media i > 15°	Sulla sommità del pendio	1.2
T_3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media 15° ≤ i ≤ 30°	Sulla cresta del rilievo	1.2
T_4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media i > 30°	Sulla cresta del rilievo	1.4

***Fig. 1.5** – Classificazione di un sito in categorie topografiche e relativi coefficienti di amplificazione, come previsti in NTC 2018 (da Foti et al., 2009)*

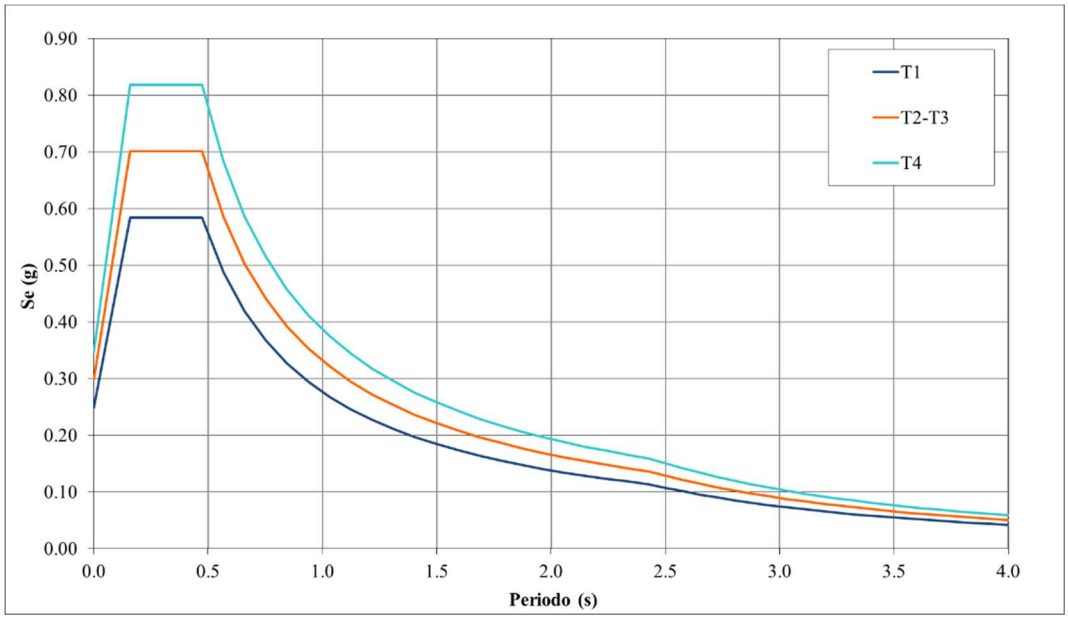


Fig. 1.6 – *Spettri di risposta elastici in accelerazione per la componente orizzontale secondo NTC18; confronto tra le diverse categorie topografiche per un sito caratterizzato da un suolo di categoria B, di coordinate ricadenti nel centro dell'abitato di Cassino (dati estratti con l'applicativo Spettri di risposta – ver. 1.03 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici)*

L'approccio semplificato proposto dalla normativa non può però essere applicato in condizioni stratigrafiche e topografiche complesse dove numerosi altri elementi possono risultare determinanti. In generale, i fattori che possono generare uno scostamento dalle condizioni ideali possono essere (Figg. 1.7 e 1.8; Panzera et al., 2013):

- ✓ di carattere topografico e morfologico
- ✓ dovuti alla natura e geometria dei sedimenti
- ✓ dovuti alla presenza di falde acquifere, frane, discontinuità strutturali, cavità.

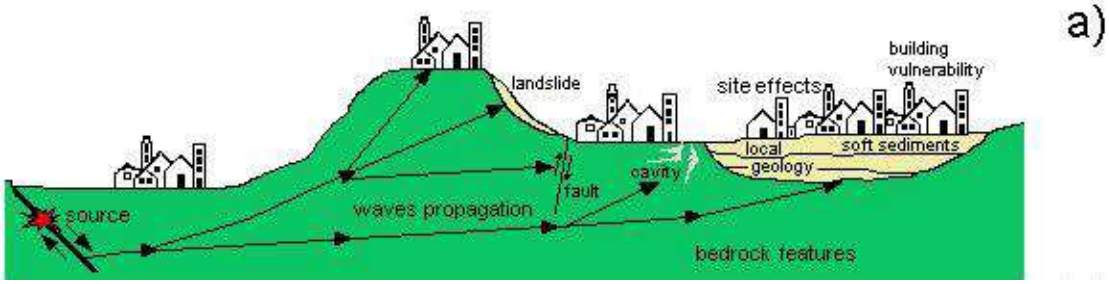


Fig. 1.7 – *Schema esplicativo dei fattori che possono influenzare la propagazione di un segnale sismico dalla sorgente alla superficie libera (da Panzera et al., 2013 – Figura 1.a)*

Il procedimento che permette di considerare i cosiddetti effetti di sito, ovvero le modifiche all'azione sismica di base come fornita dagli studi di pericolosità sismica, è l'*analisi di risposta sismica locale*, che, in funzione delle condizioni di sito, può essere eseguita considerando modelli monodimensionali (1D), bidimensionali (2D) o tridimensionali (3D). La scelta del modello di riferimento per la modellazione di risposta sismica dipende dalla ricostruzione geologico-tecnica del sottosuolo e dagli elementi morfologici.

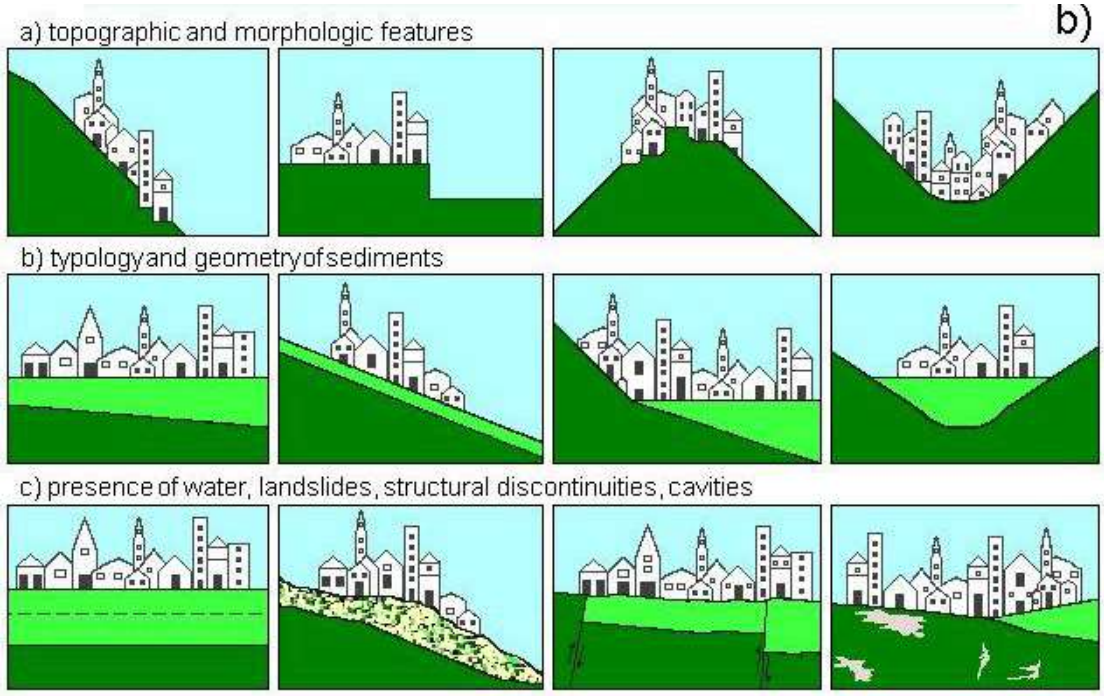


Fig. 1.8 – *Scenari di risposta sismica locale (da Panzera et al., 2013 – Figura 1.b)*

Nel caso di un modello 1D (Fig. 1.9) il riferimento è rappresentato da un sistema di strati piani e paralleli infinitamente estesi lateralmente (*soft soil*), caratterizzati da uno spessore e da proprietà fisico-meccaniche specifiche, sovrapposti ad un substrato rigido (*bedrock*) infinitamente esteso lateralmente e verticalmente (semispazio infinito). Queste condizioni possono interessare:

a) depositi sedimentari recenti in bacini alluvionali;
b) depositi continentali e/o marini antichi che preservano una stratificazione circa orizzontale;
c) multilayer originati da depositi da ricaduta di origine vulcanica;
d) multilayer originati da profili di alterazione delle rocce e/o dei terreni.

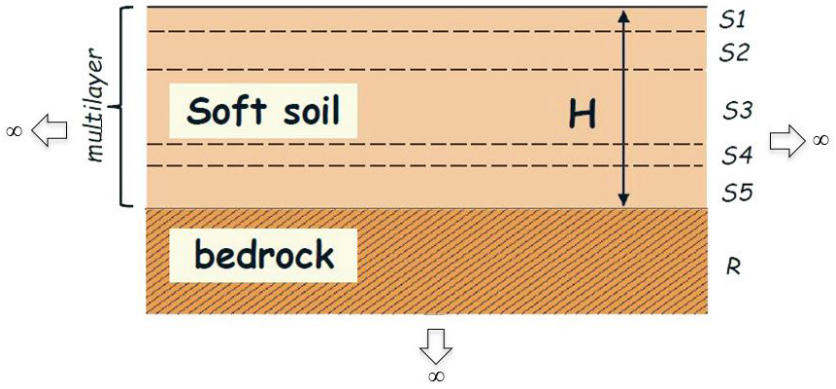


Fig. 1.9 - *Modello di riferimento per amplificazione sismica monodimensionale*

In questa rappresentazione la sola dimensione geometrica che riveste un ruolo significativo è la profondità e di conseguenza vengono trascurate le rimanenti due dimensioni. I fenomeni di amplificazione sono principalmente dovuti al contrasto di impedenza sismica (prodotto tra la densità del mezzo considerato, ρ, e la velocità di propagazione delle onde di

taglio, V) (Figg. 1.10 e 1.11) fra i diversi strati di terreno che compongono la colonna considerata:

$$I = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s}$$

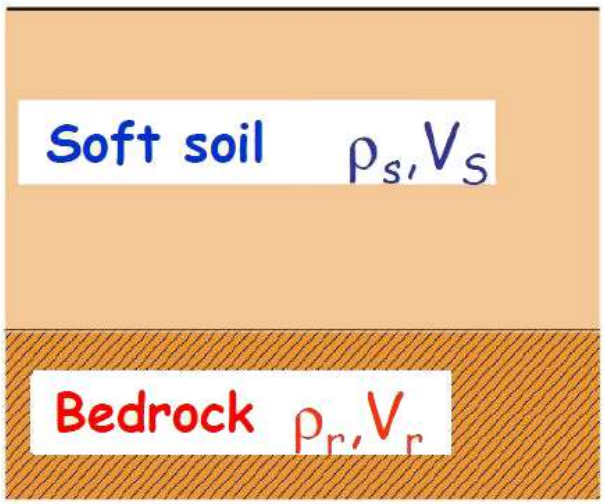


Fig. 1.10 - *Modello esplicativo del contrasto di impedenza tra bedrock e soft-soil*

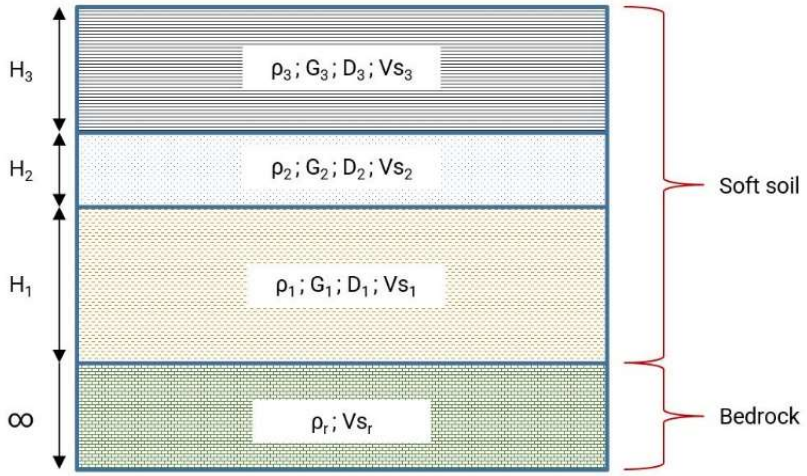


Fig. 1.11 - *Configurazione monodimensionale con i parametri del singolo strato che caratterizzano il modello: spessore dello strato i-esimo (H_i), densità dello strato i-esimo (ρ_i), funzione di variazione del modulo di taglio dello strato i-esimo (G_i), funzione di variazione del coefficiente di smorzamento dello strato i-esimo (D_i), velocità delle onde di taglio dello strato i-esimo (Vs_i)*

Nelle analisi di risposta sismica locale, in considerazione dell'intensità delle azioni sismiche in ingresso, il campo di deformazioni di interesse è generalmente quello delle medie deformazioni (Lanzo e Silvestri, 1999; Crespellani e Facciorusso, 2010). Il comportamento del terreno è pertanto marcatamente non lineare di tipo isteretico stabile (Fig. 1.12), caratterizzato dai parametri G(γ) e D(γ), e può essere modellato attraverso un modello lineare equivalente (analisi lineare equivalente), nel quale il comportamento non lineare del terreno è simulato assumendo un modello equivalente "visco-elastico lineare" alla Kelvin-Voigt, caratterizzato proprio dal modulo di taglio secante G e dal coefficiente di smorzamento D, e nel quale la soluzione è ottenuta attraverso un processo iterativo (successione di analisi lineari) che si

interrompe se è raggiunta una data soglia di tolleranza sull'errore dei parametri (Kramer, 1996; Lanzo & Silvestri, 1999).

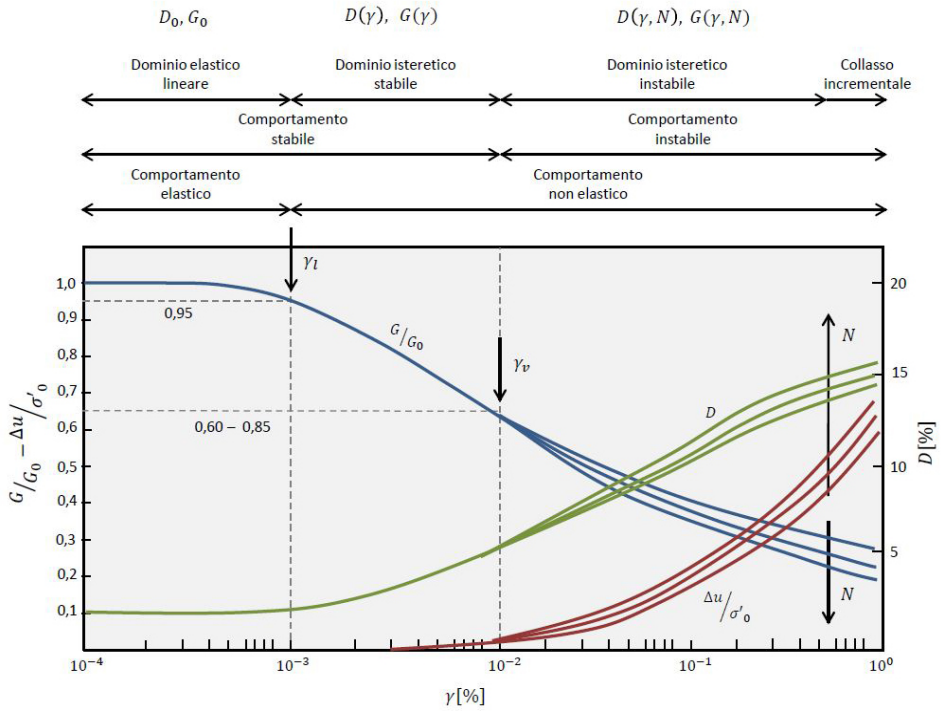


***Fig. 1.12** – Livelli deformativi ed aspetti del comportamento meccanico dei terreni*

Quando le assunzioni alla base del modello monodimensionale non sono verificate è necessario eseguire analisi di risposta sismica locale con modellazioni 2D o 3D. Queste condizioni si presentano, ad esempio, quando il rapporto tra la profondità di un bacino (h) e la semi-ampiezza dello stesso (l) supera il valore di 0.25 (Pergalani et al., 2020 – Fig. 1.13); le stesse considerazioni possono farsi in caso di stratificazioni non piano-parallele o in condizioni morfologiche articolate (pendii, creste, etc.) o per siti in prossimità di elementi strutturali o tettonici di rilievo o, ancora, in presenza di cavità sotterranee.

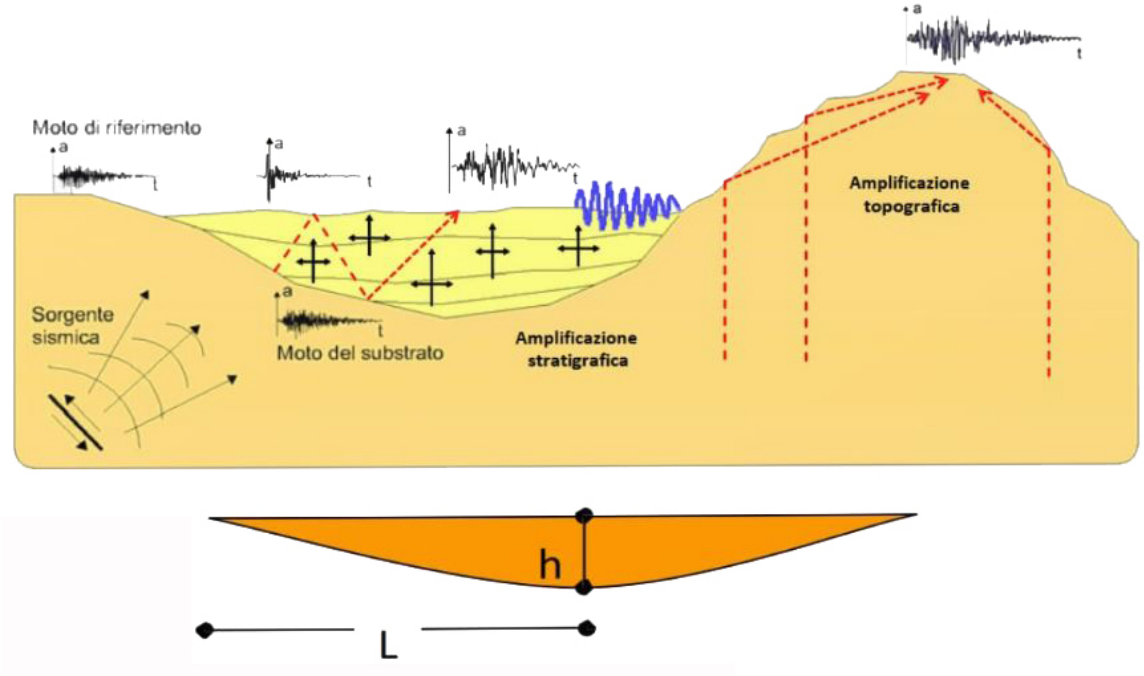


***Fig. 1.13** - Fattori morfologici influenti sull'amplificazione (Pergalani et al., 2020)*

Riassumendo, un'analisi di risposta sismica locale viene eseguita tramite *step* successivi che comprendono:

- la definizione del modello geologico del sottosuolo: prevede la ricostruzione dell'andamento del bedrock geologico (sia in termini di variazioni nella profondità che di differenziazioni litologiche) e la caratterizzazione dei depositi di riempimento del bacino al fine di costruire colonne o sezioni stratigrafiche rappresentative;
- la definizione del modello geotecnico del sottosuolo: attribuzione dei parametri geotecnici (peso di volume, limiti di consistenza, coesione, angolo di resistenza al taglio, granulometria) alle diverse litologie riconosciute; alcuni di questi parametri non entrano in maniera diretta nella successiva analisi numerica ma sono fondamentali per stimare il comportamento fisico-meccanico dei terreni;
- la definizione del modello sismico del sottosuolo: consiste nella parametrizzazione sismica di ciascuna litologia; si ottiene così una colonna o una sezione sismostratigrafica rappresentativa delle condizioni dello specifico sito, caratterizzata in termini di spessore, peso di volume, velocità di propagazione delle onde di taglio, comportamento dinamico (definizione delle curve di variazione del modulo di rigidezza $G(\gamma)$ e del rapporto di smorzamento $D(\gamma)$ in funzione delle deformazioni, propri della singola litologia);
- la stima della pericolosità sismica di base: estrazione dei dati di base dalle NTC 2018, dai cataloghi degli eventi sismici del passato (DBMI, CPTI), dalle mappe di pericolosità pubblicate dall'INGV, dai cataloghi delle faglie attive e capaci (ITHACA), dal database delle sorgenti sismogenetiche (DISS) e da ogni altra fonte in grado di fornire elementi che permettano di delineare un quadro di riferimento del moto atteso nel sito, considerando la sua superficie pianeggiante, rigida e in condizioni di *free-field* (assenza di strutture);
- la definizione dell'input sismico: l'azione sismica in ingresso deve essere descritta attraverso storie temporali del moto, ossia tramite accelerogrammi; la normativa (NTC18, § 3.2.3.6), in tutte le analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici, suggerisce l'utilizzo di accelerogrammi naturali (registrazioni di eventi naturali), mentre esclude del tutto l'impiego di accelerogrammi artificiali (generati con procedure probabilistiche a partire da uno spettro di riferimento) e permette per casi particolari l'uso di accelerogrammi sintetici (ricavati attraverso la simulazione del meccanismo di sorgente e della propagazione); raccomanda, inoltre, di utilizzare almeno 7 accelerogrammi che siano rappresentativi dell'azione sismica di riferimento per lo specifico sito (criterio di spettro-compatibilità);
- l'analisi numerica di risposta sismica locale: tramite software specifici si simula la propagazione delle onde sismiche attraverso il modello di sottosuolo ipotizzato; vengono poi estratti i risultati della simulazione numerica in termini di storie temporali, spettri di risposta, deformazioni, fattori di amplificazione.

Capitolo 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

2.1 Inquadramento geologico regionale

L'area di studio è localizzata nella parte meridionale della regione Lazio nell'Italia centrale. Geologicamente è compresa in un tratto di Appennino fortemente condizionato nella sua formazione dagli eventi di strutturazione di catena, i quali sono il risultato della convergenza della placca africana ed europea. Questo processo è stato particolarmente attivo durante il Miocene e il Pliocene inf., deformando gradualmente le unità geologiche comprese nel sistema geodinamico catena-avanfossa-avanpaese. (Tavani et al., 2021; Miccadei et al., 2014; Carminati et al., 2012; Cuffaro et al., 2011; Cosentino et al., 2010; Di Domenica et al., 2010; Patacca e Scandone, 2007; Cipollari et al., 1995; Calamita, 1991; Boccaletti et al., 1990; Bally et al., 1986).

Gli affioramenti tipici della catena appenninica (Monti Sabini, Simbruini, Lepini, ecc..) sono caratterizzati principalmente da rocce carbonatiche mesozoiche, deposte in contesti di mare poco profondo e che ora costituiscono gran parte della catena. Durante il Miocene, i processi tettonici compressivi, responsabili della formazione della catena appenninica, hanno migrato verso est, interessando i settori più adriatici della catena e lasciando l'intero margine tirrenico laziale, e le strutture appenniniche che si erano formate, soggette a processi estensionali associati all'apertura del bacino tirrenico (Tavani et al., 2021; Scrocca et al., 2012; Cuffaro et al., 2011; Di Domenica et al., 2010; Mattei et al., 2008). Il cambio di regime tettonico produce lungo tutto il margine tirrenico, ambienti di bacino di retro-arco caratterizzati da campi di stress prevalentemente distensivi con sviluppo di strutture vulcaniche (ad es. Vulcano Laziale, distretto vulcanico sabatino, ecc.). Il margine occidentale appenninico è pertanto caratterizzato da rilievi meno elevati e bacini sedimentari intermontani con apparati vulcanici quiescenti e inattivi (Cosentino et al., 2010) (Fig. 2.1).

Nel margine tirrenico laziale, le faglie normali ad alto angolo orientate NO-SE sono prevalenti e sono associate all'attività vulcanica, all'incisione delle valli alluvionali e alle variazioni relative del livello del mare. Le strutture trasversali, orientate NE-SO, influenzano notevolmente l'assetto tettonico e la localizzazione del vulcanismo Pliocenico e Quaternario nell'area (Mattei et al., 2008). L'area laziale, inoltre, ospita alcuni lineamenti tettonici di importanza regionale. La Linea Olevano-Antrodoco è una importante fascia di deformazione compressiva che separa le strutture caratterizzate da sedimentazione carbonatica in facies di scarpata e di bacino (serie umbro marchigiana), dalle strutture con sedimentazione in facies di piattaforma carbonatica e di margine (serie laziale abruzzese). Un ulteriore elemento tettonico distensivo di interesse regionale è noto come linea Val Roveto-Atina-Caserta e riconosciuta

essere anche una faglia attiva e capace nel tratto compreso tra Sant'Elia Fiumerapido e S. Pietro Infine (Maceroni et al., 2022; Saroli et al., 2003; Smeraglia et al., 2018).

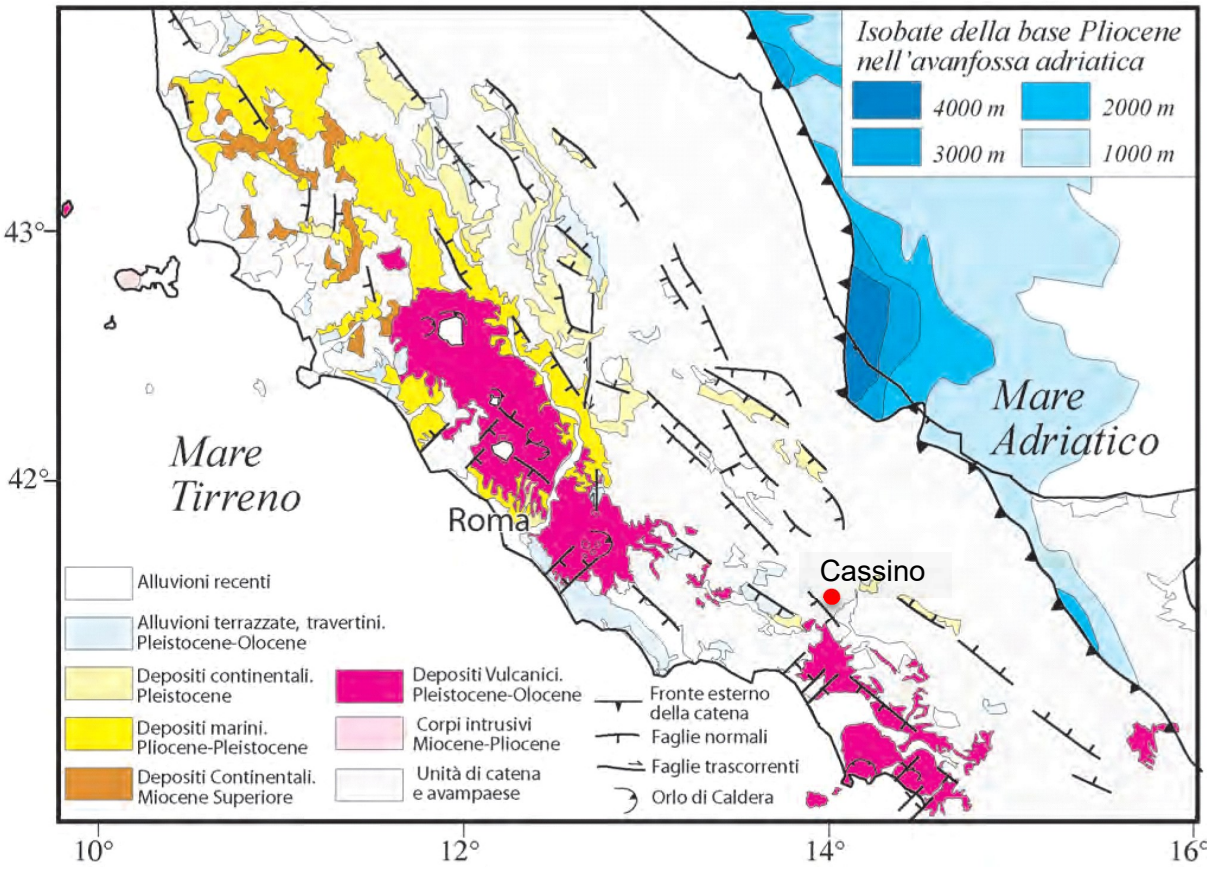


Fig. 2.1 - *Schema geologico-strutturale del margine tirrenico centro-settentrionale della penisola italiana. Con il cerchio rosso è evidenziata la localizzazione delle aree di studio. (Mattei et al., 2008)*

Più nel dettaglio, l'area di studio ricade nel dominio geologico appenninico centro-meridionale, a sua volta appartenente alla serie sedimentaria laziale-abruzzese rappresentata nel Foglio 160 della C.G.I. scala 1:100.000 (Fig. 2.2). L'elemento principale è costituito dalla Valle Latina, una vasta valle fluviale situata tra i Monti Lepini a nord-est e il complesso dei Monti Ernici-Ausoni-Aurunci a sud- ovest, i cui principali corsi d'acqua sono il fiume Sacco che termina il suo corso sfociando nel tratto terminale del fiume Liri.

Il settore terminale sud-orientale della Valle Latina si apre sull'ampia depressione tettonica nota come Piana di Cassino. Quest'ultima è circondata da rilievi con quote medie di circa 1200 m costituiti prevalentemente da formazioni calcaree e subordinatamente dolomitiche di età meso-cenozoica. Questi sono rappresentati dal margine orientale di Monte Cairo, dai margini sud-occidentali e occidentale della struttura dei Monti di Venafro, dal margine settentrionale dei Monti Aurunci orientali e dal margine nordoccidentale dei Monti Ausoni. In particolare, i litotipi più antichi esistenti in affioramento sono costituiti dalle serie prevalentemente calcaree dei Monti di Venafro, di Monte Cassino e Monte Trocchio con una età compresa dal Lias al Miocene inferiore.

Seguono i depositi argilloso-marnoso-arenacei appartenenti al flysch di Frosinone ed alle Unità Sicilidi (Formazione di Falvaterra), affioranti diffusamente al margine della Valle Latina e della Piana di Cassino e appartenenti al Miocene medio-superiore.

Questi risultano parzialmente coperti da depositi del Plio-Pleistocene ed Olocene costituiti da limi, argille, sabbie lacustri, travertini, depositi piroclastici sciolti e litoidi e da depositi alluvionali terrazzati e recenti.

Come già descritto, l'area presenta la sovrapposizione di strutture compressive (Lepini-Ausoni-Aurunci Monte Cairo e Monti di Venafro) con vergenza nord est e strutture distensive successive ribassate da faglie dirette sul margine occidentale. In particolare, la Valle Latina e la Piana di Cassino rappresentano due bacini tettonici colmati dai sedimenti terrigeni marini e plio-pleistocenici. L'unità dei Lepini-Ausoni-Aurunci sovrascorre sui depositi argillosi miocenici della Valle Latina, che a sua volta rappresenta la paleo-avanfossa tortoniana. Il gruppo del Monte Cairo e i Monti di Venafro sovrascorrono invece sui depositi flyschoidi della Valle di Comino e della stretta di Atina, prosecuzione della paleo-avanfossa della Val Roveto di età Tortoniano superiore-Messiniano verso sud ovest.

Molti Autori si sono interessati alla stratigrafia e tettonica della Valle Latina e della Piana di Cassino (Boni et al., 1986; Boni e Bono, 1973; Accordi et al., 1967), talvolta con studi specifici e talvolta marginalmente con lavori a carattere regionale, l'attenzione si è sempre concentrata sui blocchi carbonatici di Monte Cassino, Monte Trocchio, Monte Porchio e i Monti di Rocca D'Evandro.

L'allineamento di tali strutture avrebbe potuto rappresentare un sistema *Horst-Graben* oppure delle strutture separate da piani di *thrust*, di cui Monte Porchio e Monte Torchio rappresenterebbero dei *klippen*. Queste due interpretazioni suggeriscono diverse possibili conclusioni circa l'assetto stratigrafico, strutturale e di conseguenza idrogeologico di tutta la Piana di Cassino (Saroli et al., 2020, 2019a, 2019b, 2017). Malgrado il dibattito sia ancora aperto, l'area oggetto di studio risente solo marginalmente di tali problematiche venendosi a collocare nel settore di passaggio dalla Valle Latina alla Piana di Cassino.

Di seguito verranno descritti i principali litotipi del bacino di Cassino (dove possibile i corpi geologici presenti nella cartografia di Fig. 2.2 verranno accorpati in unità geologiche-tecniche). In Fig. 2.3 si riporta lo schema dei rapporti stratigrafici così definiti dal termine più antico al più recente.

18 Dolomie bianche e grigie (G^{2-1}): dolomie bianche e grigie, presenti alla base della serie mesozoica carbonatica. Sono per lo più massive, talora grossolanamente stratificate, quasi sempre sterili. Nei Monti di Venafro formano l'ossatura di una distinta unità tettonica. Possono raggiungere una potenza di 700-800 metri. Costituiscono un impermeabile relativo rispetto ai calcari sovrastanti e sostengono l'acquifero a falda libera delle idrostrutture carbonatiche. (Lias inf.)

17 Calcari bianchi, nocciola e rosati con intercalazioni dolomitiche (G^{4-2}, C^3-G_o^5, C^3-G^5): calcari stratificati bianchi, nocciola e rosati poveri in macrofossili, con intercalazioni irregolari e sporadiche di calcari oolitici o detritici ed alternanze di dolomie saccaroidi. Lo spessore è variabile ma si aggira sui 200-400 m. Elevata permeabilità secondaria per fratturazione. (Lias sup.-med.)

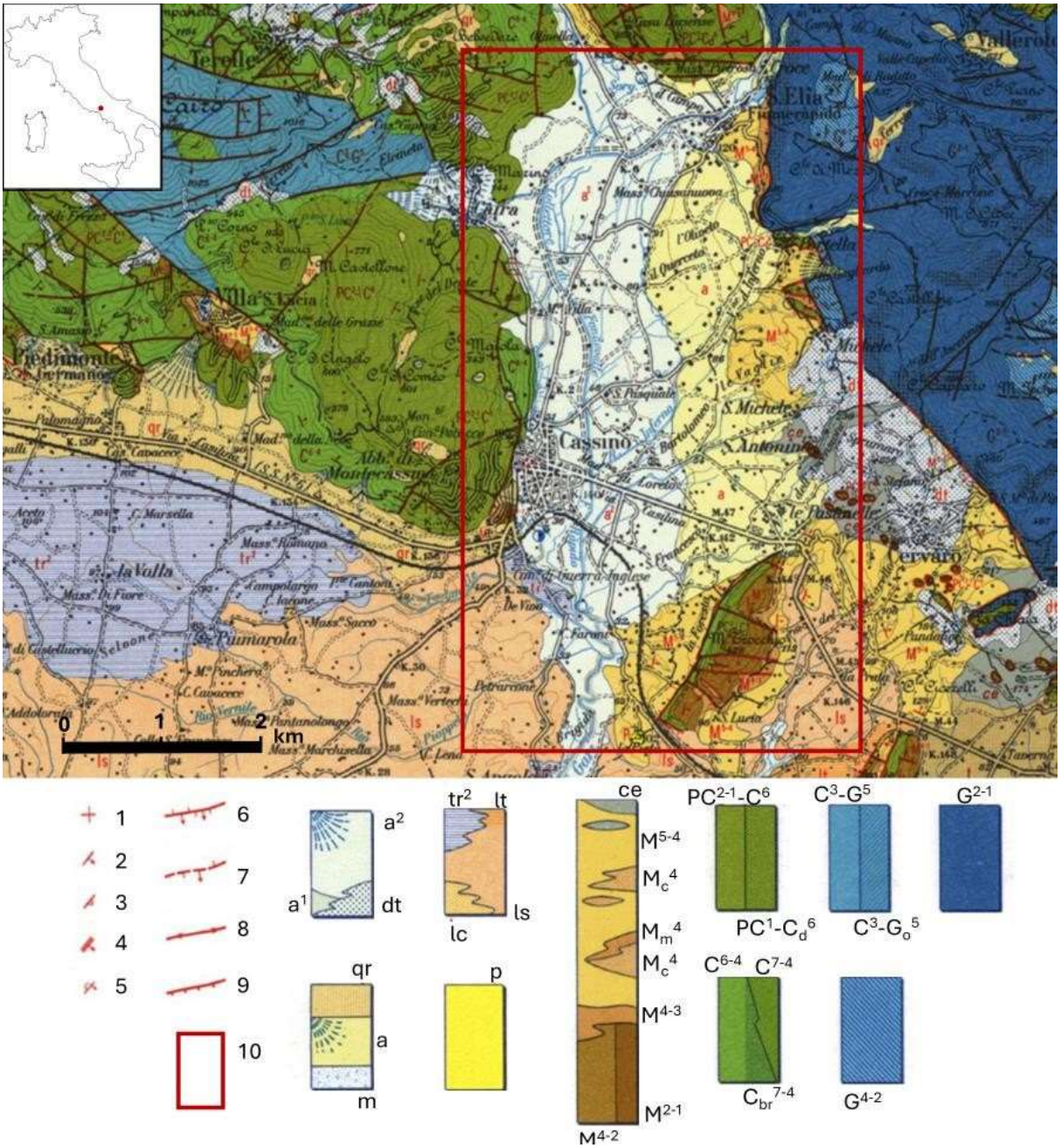


Fig. 2.2 - *Stralcio della Carta geologica d'Italia F. 160, scala 1:100000. Legenda: 1: strato sub-orizzontale; 2: strato poco inclinato; 3: strato molto inclinato; 4: strato sub-verticale; 5: strato rovesciato; 6: faglia diretta/inversa; 7: faglia diretta/inversa presunta; 8: faglia trascorrente; 9: sovrascorrimento; 10: area di studio. formazioni continentali: a^2: alluvioni sciolte attuali, a^1:suoli argillosi e limosi, dt: detriti di falda, qr: terre rosse, a: alluvioni antiche terrazzate, m: conoidi cementate (Olocene); tr^2: travertino, lt: alternanza di limi e tufi, ls: limi e sabbie, lc: limi calcarei p: (Pliocene); Formazioni marine: Conglomerati poligenici (Pliocene); ce: Argille varicolori (Messiniano-Tortoniano); M^{5-4}: Argille e argille marnose con intercalazioni di arenarie con livelli ed intercalazioni di brecciole calcaree (M_c^4)e marne a orbuline (M_m^4) (Messiniano-Tortoniano); M^{4-3}: Calcari marnosi e marne (Tortoniano-Elveziano); M^{4-2}: Calcari a briozoi e litotamni (Tortoniano – Langhiano); M^{2-1}; Calcareniti bianche (Langhiano – Aquitaniano); PC^{2-1}-C^6: Calcari bianchi e avana (Montiano/Daniano-Cenomaniano); PC^1-C_d^6: Calcari detritici e calcareniti (Daniano-Cenomaniano); C^{6-4}:Calcari nocciola (Cenomaniano inf.-Aptiano); C^{7-4}: Diaspri varicolori (Turoniano-Aptiano); C_{br}^{7-4}:Brecce calcaree (Turoniano-Aptiano); C^3- G^5: Calcari nocciola bianchi e grigi (Cretacico inf.-Dogger); C^3- G_o^5: Calcari nocciola bianchi e grigi (Cretacico inf.-Dogger); G^{4-2}: Calcari biancastri (Lias sup.-med.); G^{2-1}: Dolomie bianche e grigie (Lias inf.)*

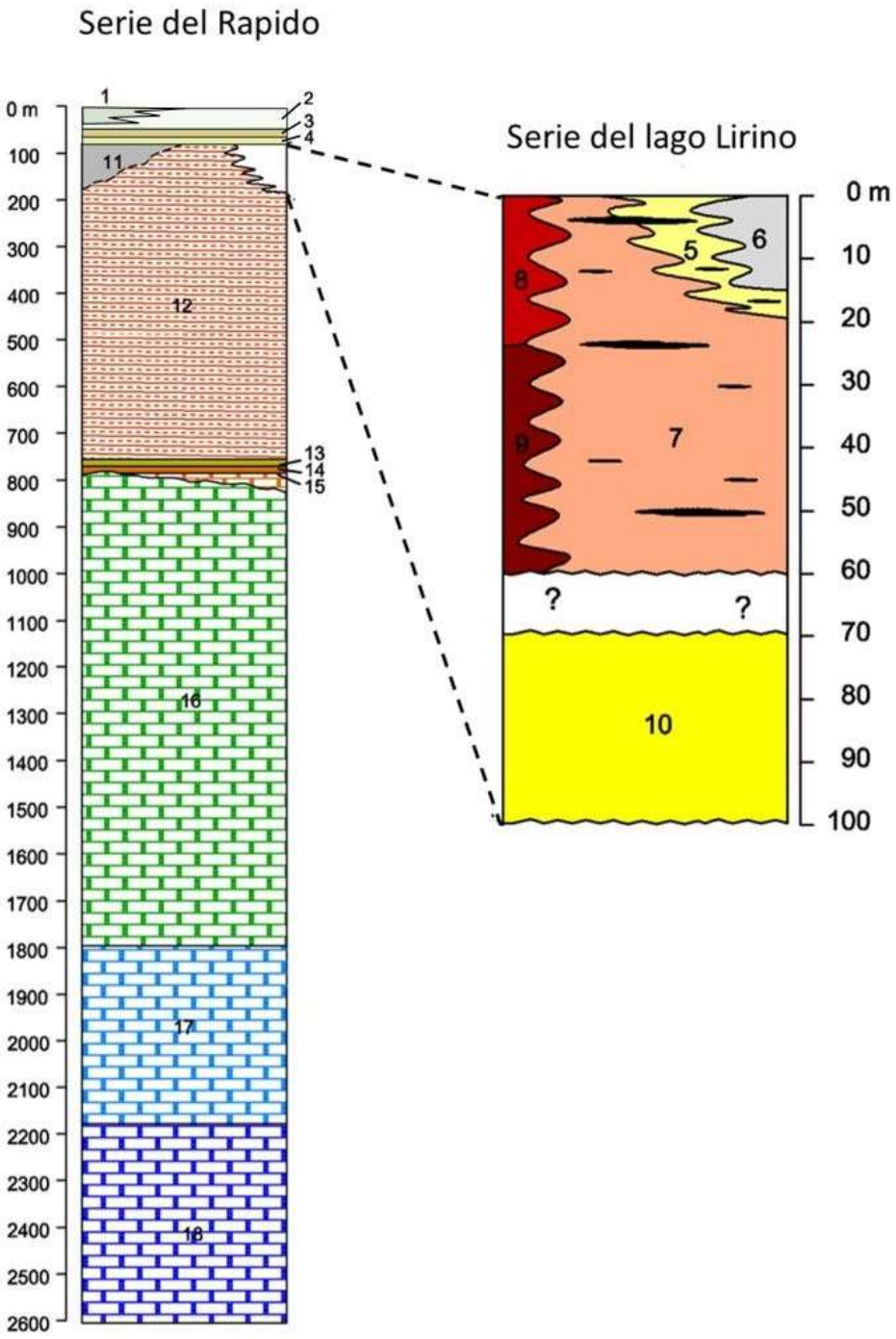


Fig. 2.3 - *Schema dei rapporti stratigrafici: 1) Alluvioni sciolte recenti; 2) Detrito di falda, coni di detrito ed eluvi Detrito di falda; 3) Terre rosse miste a depositi eluvio-colluviali; 4) Conoidi attuali e conoide antiche; 5) Limi argilloso-sabbioso grigio-bruno (Pleistocene med.-sup.); (6) Travertino (Pleistocene med.-sup.); 7) Limi bianco avorio-avana e sabbie (Pleistocene inf.- med.); 8) Piroclastiti (Pleistocene inf.-sup.); 9) Tufi Grigi (Pleistocene med.-sup.); 10) Puddinghe poligeniche (Pliocene inf.-Messiniano Lago Mare); 11) Argille varicolori (Messiniano); 12) Complesso argilloso-arenaceo (Tortoniano-Messiniano); 13) Marne a orbulina (Tortoniano inf.); 14) Calcari marnosi (Tortoniano inf.); 15) Calcari a briozoi e litotamni (Burdigaliano Serravalliano); 16) Complesso calcareo (Paleocene-Dogger); 17) Calcari bianchi e nocciola (Lias medio sup.); 18) Dolomie bianche e grigie (Lias inf.)*

16. Complesso calcareo (C_{br}^{7-4}, C^{7-4}, C^{6-4}, PC^{2-1}-C^{6}): calcari bianchi e avana a pasta fine o microgranulari, a luoghi dolomitici, ben stratificati di facies neritica interna. Lo spessore è valutabile in 500 m. La sequenza continua con calcari nocciola a pasta fine o microgranulari, stratificati, con spessore valutabile in circa 400 m. Questo complesso calcareo, avendo una permeabilità elevata per fratturazione, costituisce l'acquifero principale.

15 Calcari a Briozoi e Litotamni (M^{4-2}): calcareniti micritiche a granulometria medio- fine di colore da avana ad arancio, con struttura a losanghe. Si presentano stratificati e contengono biotiti e bioclastiti con Litotamni e Briozoi. Verso l'alto questi calcari, della potenza media di circa 40 m, divengono leggermente marnosi. (Burdigaliano- Serravalliano).

14 Calcari marnosi (M^{2-1}): calcari marnosi stratificati a fessurazione scagliosa con Orbulina. Lo spessore è valutabile in circa 10-15 m. Tale litotipo nel complesso può considerarsi un *aquiclude* in quanto dotato di una bassissima permeabilità. Giace in concordanza sui Calcari a Briozoi e Litotamni (Tortoniano inferiore).

13 Marne ad Orbulina (M^{4-3}): marne e marne argillose grigio-avana, di spessore variabile da qualche metro a circa 5-10 m. Poggiano in trasgressione sui calcari a Briozoi e Litotamni tramite un livello arenaceo-conglomeratico con glauconite e *fecal pellets*. Tale litotipo nel complesso può considerarsi un *aquiclude*. (Tortoniano inf.).

12 Complesso argilloso-arenaceo (M_c^4, M_m^4, M^{5-4}): i sedimenti argilloso-arenacei (argilloso-arenaceo, Flysch.) riuniti in questo complesso si presentano come una alternanza spesso gradata di livelli argillosi, siltitici ed arenacei, con caratteristiche impronte di fronde tipo *groove casts* e *flute casts* sulla superficie inferiore degli strati arenacei. La formazione dovrebbe avere uno spessore massimo valutabile in 600-800 m. Risulta ovunque privo di circolazione idrica sotterranea anche se si possono trovare falde esigue nelle intercalazioni arenacee fratturate o nelle coltri sabbiose di alterazione superficiale. Tale litotipo nel complesso può considerarsi un *aquiclude* (Tortoniano-Messiniano).

11 Argille varicolori (ce): Argille grigie e varicolori (Argille caotiche, Unità Sicilidi, Auct.), limose non stratificate. Lo spessore è estremamente variabile. Risulta ovunque privo di circolazione idrica sotterranea. Tale litotipo può considerarsi un *aquiclude*. (Messiniano).

10 Puddinghe poligeniche (p): puddinghe poligeniche costituite da elementi estranei alle serie locali, passanti verso l'alto a clasti carbonatici appartenenti alle serie locali immerse in un cemento calcareo-sabbioso giallastro. (Pliocene inferiore-Messiniano lago mare).

9 Tufi grigi Tufi grigi: con abbondante leucite, talora stratificati e spesso gradati, con alternanza irregolari e lentiformi di sabbie grigio scure o verdastre. Costituiscono i prodotti vulcanici più antichi del Roccamonfina. (Pleistocene medio-Pleistocene inferiore).

8 Piroclastiti: tufi grigi con grossi frammenti di litoidi di varia natura per lo più in posizione caotica. (Pleistocene superiore-Pleistocene inferiore).

7 Limi bianco avorio-avana e sabbie (ls, lc): limi di colore bianco avorio ed avana con irregolari alternanze di sabbie gialle, talora a stratificazione incrociata. Gli spessori variano dai 35 ai 50 m. Sono riferibili al ciclo deposizionale intermedio del Lago Lirino, noto come "Facies lacustre normale l2" (Devoto, 1965). (Pleistocene medio-Pleistocene inferiore).

6 Travertino (tr^2): travertino terroso, spugnoso, vacuolare e cavernoso scarsamente coerente, intensamente carsificato e fratturato. Lo spessore del travertino è valutabile in circa 10-15 m. (Pleistocene superiore-Pleistocene medio).

5 Limi argilloso-sabbioso grigio-bruno (lt): limi argillosi-sabbioso di colore grigio- bruno, con livelli di argille grigie e varicolori ed intercalazioni di limi sabbiosi. Presenza di lenti di

ghiaia e livelli torbosi lenticolari e lignitiferi con spessore da pochi centimetri a diverse decine di centimetri. Sono riferibili alla "Facies lacustre tardiva l3" (Devoto, 1965). Nel complesso lo spessore totale è valutabile fra i 15 e i 20 metri. (Pleistocene superiore-Pleistocene medio).

4 Conoidi attuali e conoide antiche (m, a): conoidi attuali e conoide antiche, costituite da depositi eterometrici debolmente arrotondati di natura calcareo-dolomitica, da cementati a scarsamente cementati, a tratti sciolti (Olocene - Pleistocene medio).

3 Terre rosse miste a depositi eluvio-colluviali (qr): terre rosse e rosso-brune miste a depositi eluvio-colluviali, costituite da argille rosse residuali miste a clasti detritici di natura calcareo-dolomitica. (Olocene-Pleistocene superiore).

2 Detrito di falda, coni di detrito ed eluvi Detrito di falda (dt, a^1): coni di detrito ed eluvi recenti costituiti da clasti eterometrici di natura prevalentemente calcareo-dolomitica, in matrice terroso ed in genere scarsamente cementati. Sono caratterizzati da uno spessore variabile da qualche metro a poche decine di metri. (Olocene- Pleistocene superiore).

1 Alluvioni sciolte recenti (a^2): alluvioni sciolte attuali ed alluvioni recenti, costituite da ghiaie eterometriche di natura calcarea in matrice sabbioso-limosa. Contengono corpi lenticolari irregolari di limi torbosi nerastri con intercalazioni di sabbia grigia in lenti con presenza di prodotti vulcanici rimaneggiati. Quando per contatto eteropico interagiscono con acquiferi multifalda alimentati sono caratterizzate da importanti falde libere. (Olocene-Pleistocene superiore).

Inoltre, localmente, si possono rinvenire nelle stratigrafie di sondaggio **Terreni di riporto** solitamente di scarso spessore costituiti da terreno vegetale e di riporto di natura sabbioso-limosa, con clasti eterometrici di natura calcarea detritica e resti antropici (Olocene).

Le unità geologiche sopra descritte possono essere suddivise in quattro grandi complessi litologici:

1. **complesso marino di piattaforma carbonatica (Lias inf. – Tortoniano inf.)**
2. **complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori (Tortoniano – Messiniano)**
3. **complesso lago mare (puddinghe allotigene) (Messiniano lago mare Pliocene inf.)**
4. **complesso continentale e complesso vulcanico (Pleistocene – Olocene).**

Il complesso marino di piattaforma carbonatica racchiude le principali formazioni legate alla piattaforma laziale abruzzese. La base della successione è costituita da dolomie giurassiche, con spessori attorno ai 300-400 m. Alle facies dolomitiche, si sovrappongono i calcari dolomitizzati del giurassico medio-superiore. La serie prosegue monotona dall'inizio del giurassico medio fino al Daniano con facies neritiche affioranti estesamente nell'area compresa tra Caira e Montecassino di circa 800 metri di spessore e prosegue le calcareniti conosciute in letteratura come Calcari a Briozoii e Litotamni. Questa serie di piattaforma, sviluppatasi dall'Aquitaniano al Serravalliano, è estesa lungo tutto il margine della Valle Latina fino ai Monti Trocchio, Porchio e M. Lungo. Un piccolo lembo di Miocene carbonatico, con spessore inferiore ai 40 metri, affiora lungo la strada per Montecassino.

A causa del passaggio da condizioni oligotrofiche a condizioni eutrofiche, con conseguente intorbidimento delle acque, si verifica un progressivo annegamento della piattaforma miocenica. Al di sopra di questi calcari infatti si depositano marne, da calcaree ad argillose che testimoniano l'aumento della componente terrigena rispetto a quella calcarea (Tortoniano inf.). L'annegamento della rampa miocenica è testimoniato dalla presenza di un *hard-ground* lungo la strada per la Rocca Janula (Montecassino)

La serie si chiude con dalla deposizione di alternanze di marne e siltiti arenacee che verso l'alto passano a termini appartenenti al complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori appartenenti al Tortoniano-Messiniano. Questo accorpamento è costituito da materiali argillosi sovraconsolidati caratterizzati dalla presenza di una notevole quantità di inclusi, di natura ed età varia, affiorano estesamente oltre che nella località di S. Michele (Cassino), anche nei comuni limitrofi di Falvaterra, Esperia, Cervaro e San Vittore.

Nell'area studio è presente un affioramento di circa 10 metri di spessore costituito da brecce e puddinghe debolmente cementate a SO di Monte Trocchio e attribuibili ad un ambiente di transizione di mare basso tendente al marino-continentale e appartenenti al complesso lago mare.

I litotipi più recenti sono caratteristici del passaggio alla sedimentazione continentale legata al complesso continentale e al complesso vulcanico (Saroli et al., 2019b) e possono essere descritti come limo sabbioso con intercalazioni lentiformi di sabbie e ghiaie (Devoto, 1965). L'evoluzione dell'area è caratterizzata da una fase tettonica distensiva quaternaria, che fa sentire i suoi contraccolpi già alla fine del Pliocene. Oltre ad aver provocato la risalita di magma inter-crostale, ha causato lo sprofondamento di ampi settori di catena compresi tra gli Ausoni–Aurunci e il massiccio del Monte Cairo e in tutta la piana di Cassino. Alla fine del Pliocene inizio Pleistocene inferiore, con progressivo ritiro del mare, si instaura nel bacino un corpo lacustre che prende il nome di Lago Lirino. La sedimentazione lacustre, nella porzione meridionale del bacino, si interdigita con i depositi piroclastici dell'apparato vulcanico di Roccamonfina. Le litofacies affioranti nell'area hanno un'origine continentale e variano da sabbie limose a materiali più francamente argillosi. Nei depositi lacustri non mancano lenti di travertino terroso talvolta allungati a formare piastroni come quelli presenti nei pressi di Aquino, S. Angelo in Theodice e Cassino. Il Lago Lirino rappresenta infatti un bacino tettonico subsidente con una superficie massima superiore ai 300 km^2. Si estendeva per tutta la Valle Latina da Ceprano a San Vittore. Dai sondaggi disponibili nella piana di Cassino, si nota come l'intero corpo lacustre si interdigita, in tutta la sua estensione, con livelli di ceneri scure, correlabili con gli eventi dell'apparato vulcanico di Roccamonfina. I livelli, da centimetrici a decimetrici si trovano concentrati per lo più nella parte basale in quanto le condizioni paleo-morfologiche ne hanno favorito la conservazione. Le cause di estinzione del Lago Lirino sono ascrivibili al progressivo riempimento del lago dovuto agli apporti detritici dei corsi Sacco, Melfa, Liri e Gari e dall'azione erosiva operata dal suo emissario, il fiume Garigliano. Secondo (Devoto, 1965) è possibile formalizzarne la stratigrafia dell'area legata all'evoluzione del Lago Lirino in tre cicli su base macro-paleontologiche (Fig. 2.4):

1. Ciclo lacustre inferiore (l1)
2. Ciclo lacustre tipico (l2), corrispondente ai Limi bianco avorio-avana e sabbie (ls, lc);
3. Ciclo lacustre tardivo e il travertino tipico (l3), corrispondenti ai limi argilloso-sabbioso grigio-bruno (lt) e coevo ai depositi di travertino (tr^2).

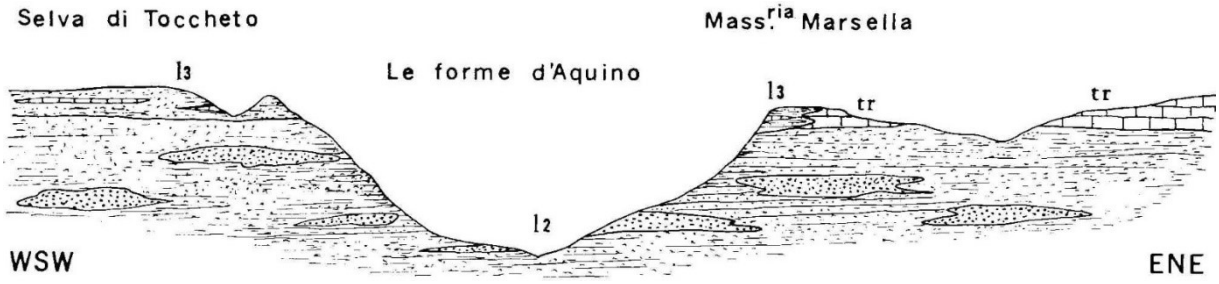


Fig. 2.4 - *Rapporti stratigrafici tra il travertino e la facies lacustre tardiva definiti da (Devoto, 1965). Legenda: l2: ciclo lacustre tipico; l3: ciclo lacustre tardivo; tr: travertino tipico*

I tre cicli registrano un progressivo riempimento del bacino intra-tettonico. Da lago aperto si passa progressivamente in tutta l'area ad un ambiente di transizione tra lago basso e riva (facies inferiore e tipica). Nelle zone a N del bacino, in eteropia con la facies tipica, comincia la deposizione del travertino, e l'isolamento di alcuni bacini torbosi in cui si deposita la facies tardiva. Insieme al travertino, la facies tipica segna il completo riempimento del bacino.

Alla sedimentazione del complesso continentale (Pleistocene – Olocene) si accompagna in eteropia laterale quella del complesso vulcanico appartenente all'apparato vulcanico di Roccamonfina e risulta sovrastata dai depositi di limi argillosi, sabbia e ghiaia dei fiumi Rapido, Liri e Gari che hanno inciso la sequenza continentale in epoca recente e localmente da terreni di riporto antropico. Ai fini della realizzazione di un modello geologico dell'area di studio di Cassino i depositi fluvio-lacustri e del complesso vulcanico hanno limitata estensione e spessore, pertanto, sono stati accorpati al **complesso continentale & complesso vulcanico (Pleistocene – Olocene)**.

2.2 Assetto geologico e strutturale del bacino di Cassino

Il Comune di Cassino (FR) è situato in un bacino intermontano plio-pleistocenico alla base del colle di Montecassino e sul margine sud-orientale della più ampia Valle Latina ed è attraversato da due corsi d'acqua costituiti dal Fiume Rapido e Gari, il quale prende origine dalle omonime sorgenti del Gari. Con un'estensione di circa 82 km^2 è il secondo centro della provincia di Frosinone per importanza. Il bacino che ospita il comune di Cassino è bordato a NW dal massiccio dal Monte Cairo, a NE dai Monti di Venafro, a SE dai Monti di Rocca D'Evandro, a SW dalla Valla Latina (Fig. 2.5).

Nel complesso l'area è caratterizzata da una struttura a graben orientata nord-est/sud-ovest, con la parte più profonda del bacino situata a nord. Faglie normali attraversano l'intera area, dislocando le strutture trascorrenti e compressive (Saroli et al., 2020, 2019; Lancia et al.,

2018).

I principali litotipi che caratterizzano l'area sono rappresentati dalle sequenze del **complesso marino di piattaforma carbonatica (c)** meso-cenozoico che affiorano ampiamente nell'area di indagine alle quote più elevate.

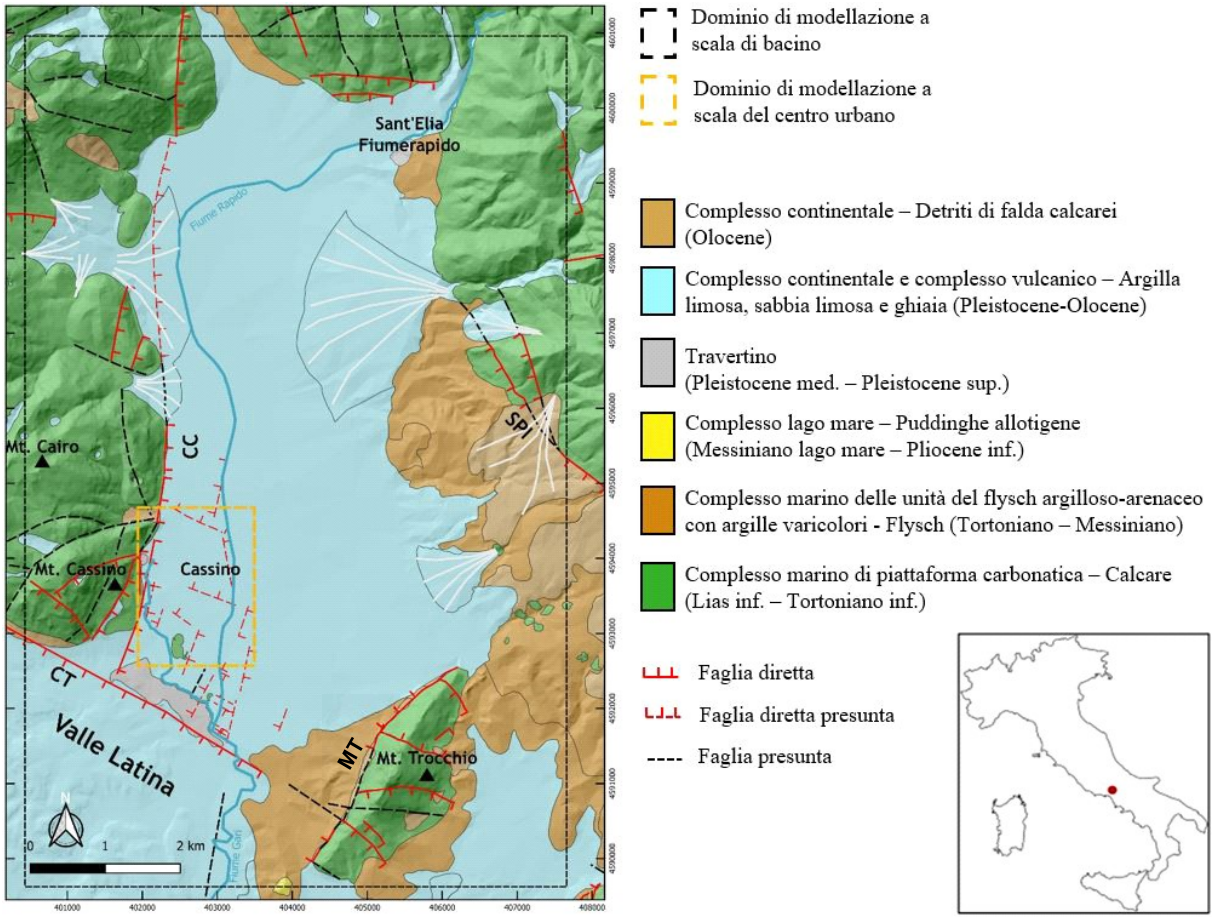


Fig. 2.5 - *Mappa geologica del bacino di Cassino e dell'area di studio interessata dalla modellazione geologica. Le sigle in rosso indicano la nomenclatura delle faglie principali del bacino: CC) Faglia Caira-Cassino; CT) Faglia Cassino-Monte Trocchio; MT) Faglia di Monte Trocchio; SPI) Faglia Atina-S. Pietro Infine*

Al di sopra si rinvengono depositi terrigeni argilloso-arenacei del **complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori (f)** seguiti dal **complesso lago mare (p)**. Terminano la sequenza le litologie del **complesso continentale & complesso vulcanico (l)** costituito da depositi continentali delle facies fluvio-lacustri di Devoto, 1965 in eteropia con i depositi vulcanici e sovrastati dai recenti depositi dei fiumi Rapido, Liri e Gari. Il complesso nel suo insieme risulta composto da un litotipo principale di **limo argilloso e argilla limosa (la)** grigio, raramente rossastro con sottili livelli sabbioso-limosi e torbe alternato a lenti di **sabbia limosa (s)** fine, di colore grigio, con frequenti resti di materia organica e **ghiaia (g)** di dimensione eterometrica in matrice sabbioso-limosa, costituita da clasti prevalentemente calcarei appartenenti alle serie locali a cui si sovrappongono localmente **terreni di riporto (t)** sabbioso-limosi, con clasti eterometrici di natura calcarea e frequenti resti antropici e banchi di **travertino (tr)**. L'effetto combinato della tettonica compressiva e distensiva ha governato e governa tutt'ora l'evoluzione geomorfologia dell'area. In particolare, il bacino di Cassino è interessato principalmente da faglie dirette ad alto angolo con direzione

appenninica ed anti-appenninica legate alla fase distensiva quaternaria (Fig. 2.5). I principali elementi tettonici del bacino sono faglie dirette e bordiere del bacino: la Faglia Caira-Monte Cassino (CC) orientata NNE-SSO, la Faglia Cassino-Monte Trocchio (CT) orientata ONO-ESE, e la Faglia del Monte Trocchio (MT) orientata NE-SO e la Faglia Atina–S. Pietro Infine (SPI) orientata ONO-ESE la cui traccia attraversa la località S. Michele (Fig. 2.5). In particolare, quest'ultima faglia è stata inserita nel catalogo ISPRA delle faglie attive e capaci ITHACA con codice 27000 e censita come Faglia di S. Pietro Infine. Tale faglia rappresenta parte di un allineamento tettonico distensivo la cui estensione complessiva è di 25 km in direzione SE e attraversa i territori comunali di S. Elia Fiumerapido, Cervaro, S. Vittore del Lazio, S. Pietro Infine, Mignano Monte Lungo e Conca della Campania (Galadini et al., 2000; Boncio et al., 2016).

2.3 Idrogeologia del bacino di Cassino

L'idrogeologia della piana di Cassino è un tema di grande rilevanza nella regione dell'Appennino centrale. Le complesse sequenze carbonatiche e sedimentarie che caratterizzano l'area hanno un impatto significativo sul ciclo dell'acqua e sulle risorse idriche sotterranee e costituiscono le principali idrostrutture e quindi serbatoi naturali di acqua sotterranea. All'interno di queste idrostrutture, l'acqua si accumula e alimenta molte delle principali sorgenti dell'area di studio.

Il complesso di piattaforma carbonatica dei Simbruini-Ernici-Monte Cairo, che si trova a NO della zona urbana di Cassino, ha come vertice meridionale di un triangolo ideale Monte Cairo e Montecassino verso il quale converge il flusso idrico sotterraneo dell'idrostruttura che alimenta, in particolare, il gruppo sorgentizio del Gari (Boni et al., 1986) (Fig. 2.6).

Queste condizioni idrogeologiche così favorevoli fanno sì che nell'area ci sia una concentrazione elevata di sorgenti, compresa tra le aree di San Germano, Villa comunale e Terme Varroniane per un totale di circa 15-18 m^3/s. La permeabilità delle rocce carbonatiche è principalmente dovuta a fratturazione e processi di carsismo.

Nell'area di Cassino, i sistemi carsici sono delimitati lateralmente e alla base da depositi impermeabili o semi-impermeabili che isolano le idrostrutture carsiche e influenzano la distribuzione delle sorgenti lungo i margini dell'area. Questo contrasto di permeabilità rappresenta un fattore chiave che influenza l'idrogeologia della regione e ne determina in modo significativo la circolazione dell'acque sotterranee e l'ubicazione delle sorgenti nella zona.

In particolare, a causa di questo assetto idrogeologico, la circolazione idrica sotterranea dell'area presenta due acquiferi principali. Un acquifero carbonatico profondo ospitato dal complesso marino di piattaforma carbonatica e un acquifero superficiale multifalda ospitato nei depositi quaternari del complesso continentale e vulcanico, con direzioni di flusso approssimativamente coincidenti.

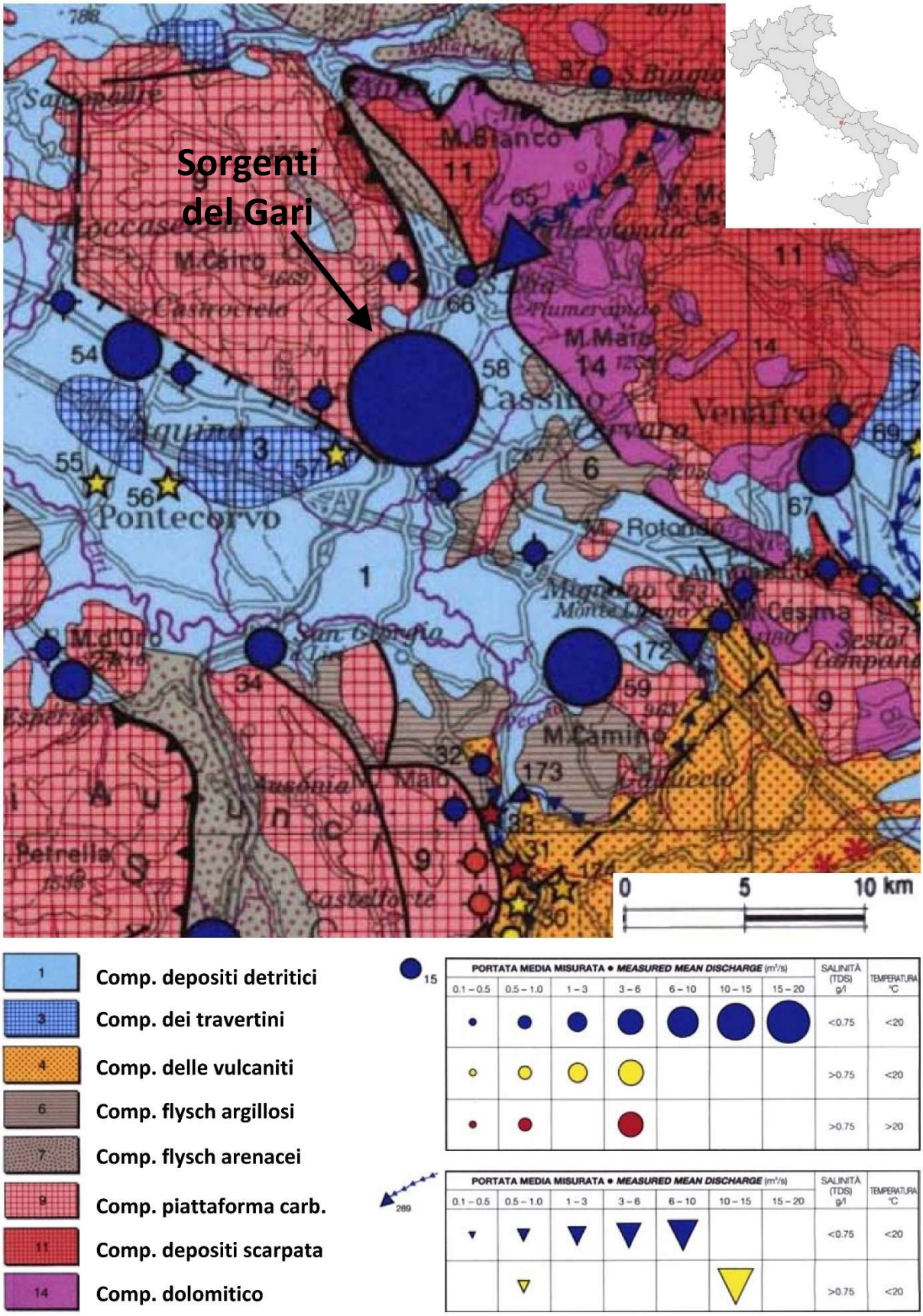


Fig. 2.6 - *Stralcio della carta idrogeologica dell'Italia centrale centrata nell'area di Cassino (Boni et al., 1986)*

L'interazione tra i depositi quaternari della piana di Cassino e l'idrostruttura carbonatica gioca un ruolo chiave nell'idrogeologia della regione; infatti, i depositi quaternari del complesso continentale e vulcanico sono caratterizzati da una permeabilità complessiva che

varia da media a bassa, sebbene la permeabilità verticale ed orizzontale possano variare notevolmente. La presenza di questi depositi di origine fluvio-lacustre agisce come un impermeabile relativo rispetto alla falda in pressione nel substrato carbonatico, permettendo comunque fenomeni di drenaggio verso l'alto in specifiche condizioni geologico-strutturali (Saroli et al., 2019b). In particolare, l'acquifero multistrato dei complessi alluvionali risulta caratterizzato da una falda alimentata prevalentemente da fenomeni di drenaggio laterali e dal basso verso l'alto, con direzione di flusso prevalente da NO a SE e da N verso S e livello piezometrico statico posto a circa 0.50–0.70 m da p.c. (Fig. 2.7). La presenza della superficie piezometrica in prossimità del piano campagna determina, in condizioni di piogge intense, la risalita della falda direttamente a p.c. venendo così a creare un'interazione tra le acque dilavanti e di ruscellamento con la falda stessa.

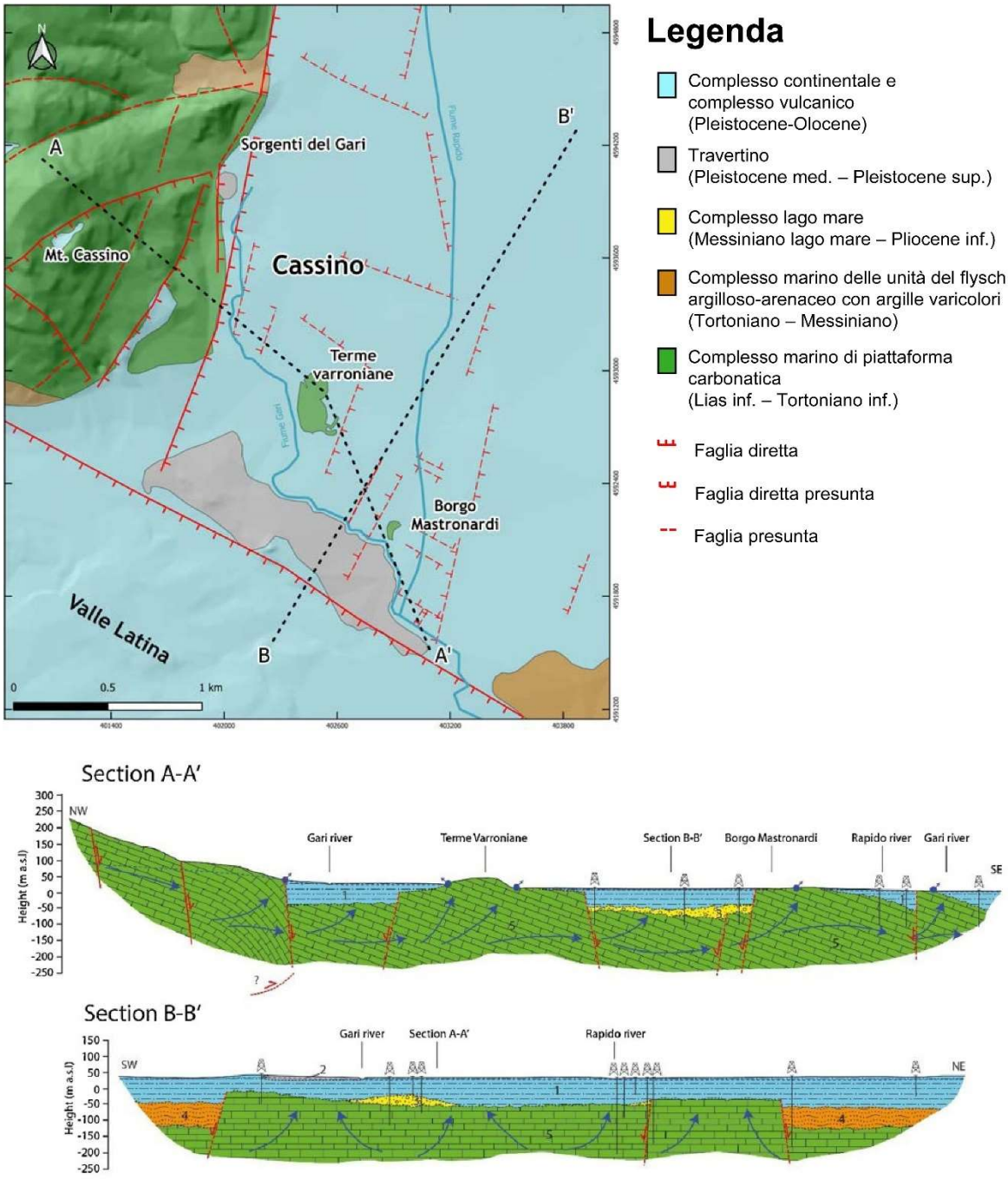


Fig. 2.7 - *Sezioni geologiche e idrogeologiche del bacino di Cassino (modificata da Saroli et al., 2020)*

2.4 Pericolosità sismica di base dell'area

La pericolosità sismica di base è la componente della pericolosità che dipende dalle caratteristiche sismiche dell'area, ovvero dalle sorgenti sismiche, dall'energia sismica liberata, dal tipo e dalla frequenza dei terremoti e costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione dell'azione sismica di sito.

La sismicità dell'area del bacino di Cassino (quadrato rosso in Figura 2.8) può essere visualizzata tramite uno stralcio della "Carta della Sismicità in Italia dal 1999 al 2024" (Pignone et al., 2024). La carta illustra la distribuzione dei sismi avvenuti tra il 1999 e il 2024 in Italia e registrati dalla Rete Sismica Nazionale dell'INGV, classificati e tematizzati in base alla magnitudo (4 classi) e alla profondità ipocentrale (5 classi). La maggior parte della sismicità nell'area di interesse ha avuto magnitudo medie inferiori a 4 e profondità minori di 15 km.

L'assetto tettonico descritto nei precedenti paragrafi e la sua evoluzione nel quadro geodinamico dell'appennino rende l'area di studio suscettibile sia a terremoti locali sia a terremoti provenienti dall'area abruzzese, molisana e campana.

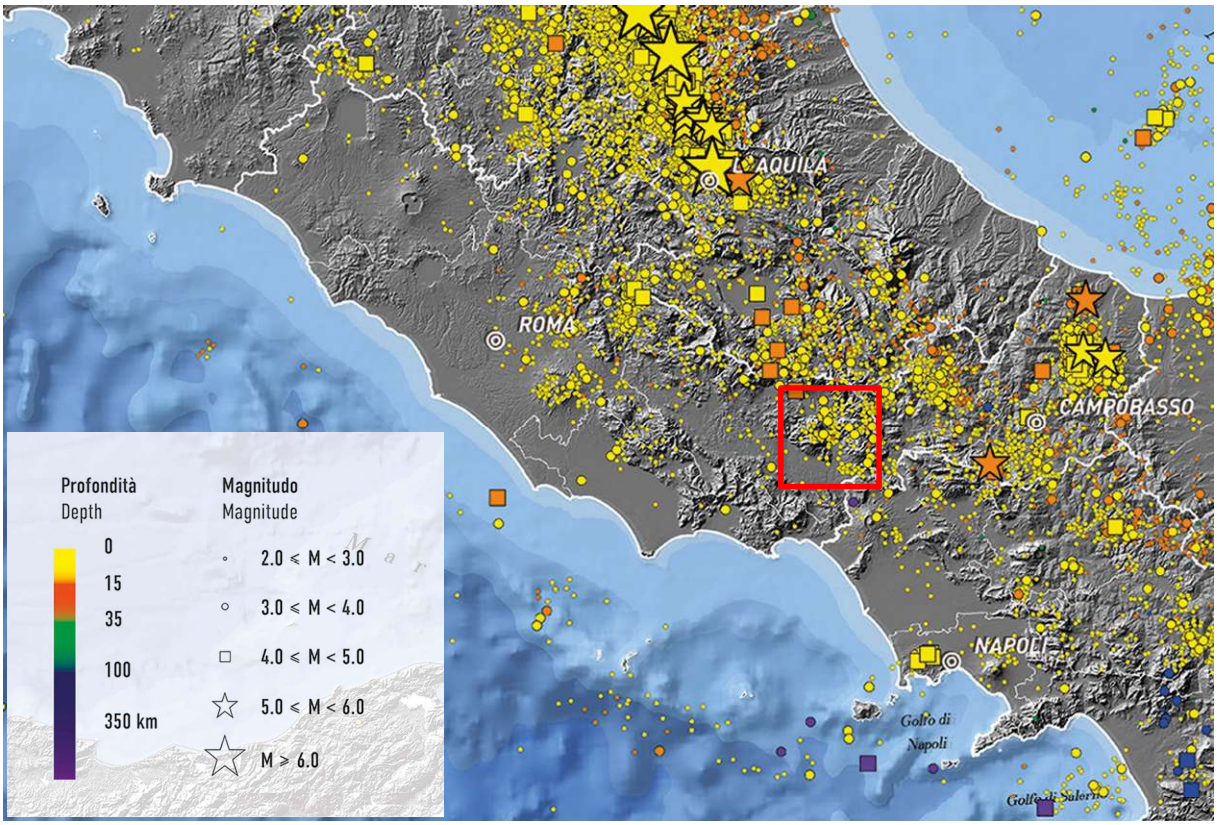


***Fig. 2.8** – Stralcio della Carta della Sismicità in Italia dal 1999 al 2024 (Pignone et al., 2024); nel quadrato rosso l'area del cassinate*

2.4.1 Sorgenti sismogeniche

La sismologia si è posta l'obiettivo di simulare in modo accurato la distribuzione dello scuotimento del terreno che verrà determinato da un forte terremoto nel futuro. Lo scuotimento è in assoluto il principale responsabile del danneggiamento subìto dalle opere in occasione di un forte evento sismico. Le tecniche di simulazione dello scuotimento del terreno sono oggi alla base dei codici per il calcolo della pericolosità sismica e si avvalgono di dati che descrivono

dal punto di vista geologico le faglie in grado di generare forti terremoti. Tali faglie devono necessariamente essere gerarchizzate, completamente parametrizzate e rappresentate nella loro geometria tridimensionale, seppure in forma semplificata. Si realizza così il necessario passaggio dalle faglie, normalmente definite in modo qualitativo e solo nella loro espressione superficiale, alle sorgenti sismogeniche come quelle censite nel *Database of Italy's Seismogenic Sources* (DISS v3.3.1, 2025) ideato dall'INGV.

Il DISS è costituito da sorgenti sismogeniche rappresentate nelle tre dimensioni, ottenute parametrizzando la geometria (come la faglia è posizionata nello spazio) e la cinematica (come la faglia si può muovere) di grandi faglie attive ritenute in grado di generare terremoti di magnitudo (Mw) superiore a 5.5. Il valore di magnitudo di 5.5 è stato scelto in quanto considerato il valore "di soglia" oltre il quale la faglia responsabile del terremoto assume dimensioni tali da poter essere identificata attraverso le metodologie geologiche e perché in Italia, per via delle tipologie costruttive prevalenti, la magnitudo 5.5 viene usualmente vista come il limite inferiore per cui un terremoto crostale può causare scuotimento tale da creare danni significativi all'edificato.

Il DISS si interessa esclusivamente di censire strutture primarie, cioè quelle faglie che, prendendo in carico la maggior parte della deformazione tettonica e muovendosi in profondità, causano i terremoti principali e il relativo scuotimento. È ben noto che a queste strutture primarie possono essere associate in superficie una o più faglie secondarie; queste ultime non sono riportate nel Database.

Le sorgenti presenti nel DISS sono tutte rigorosamente basate su dati geologici e geofisici e le principali appartengono a due tipologie: le Sorgenti Sismogeniche Individuali (*Individual Seismogenic Sources*, ISS), ideate per descrivere nel dettaglio le faglie responsabili di specifici forti terremoti già avvenuti o che si ritiene potranno avvenire, e le Sorgenti Sismogeniche Composite (*Composite Seismogenic Sources*, CSS) ideate per descrivere sistemi di faglia estesi, ancorché con un livello di dettaglio necessariamente minore.

Nel DISS è presente un'ulteriore categoria di sorgente, le Sorgenti Dibattute (DSS), definite come aree attorno a faglie attive proposte in letteratura come potenzialmente sismogeniche ma che, a giudizio degli autori del DISS, non possono essere trasformate in sorgenti sismogeniche perché non sufficientemente documentate, oppure perché sulla loro esistenza o sul loro potenziale sismogenico esistono opinioni fortemente contrastanti.

Andando ad esaminare l'area del bacino di Cassino (Fig. 2.9) è possibile evidenziare (lettere *A* e *B*) due sistemi di sorgenti sismogeniche che possono incidere sulla pericolosità sismica dell'area (ITISn = sigla attribuita alle sorgenti sismiche individuali; ITCSn = sigla attribuita alle sorgenti sismiche composite).

Sorgenti *A*:

- ITCS081 Venafro
- ITIS138 Aquae Iuliae

Sorgenti *B*:

- ITCS025 Salto Lake-Ovindoli-Barrea

- ITIS028 Barrea

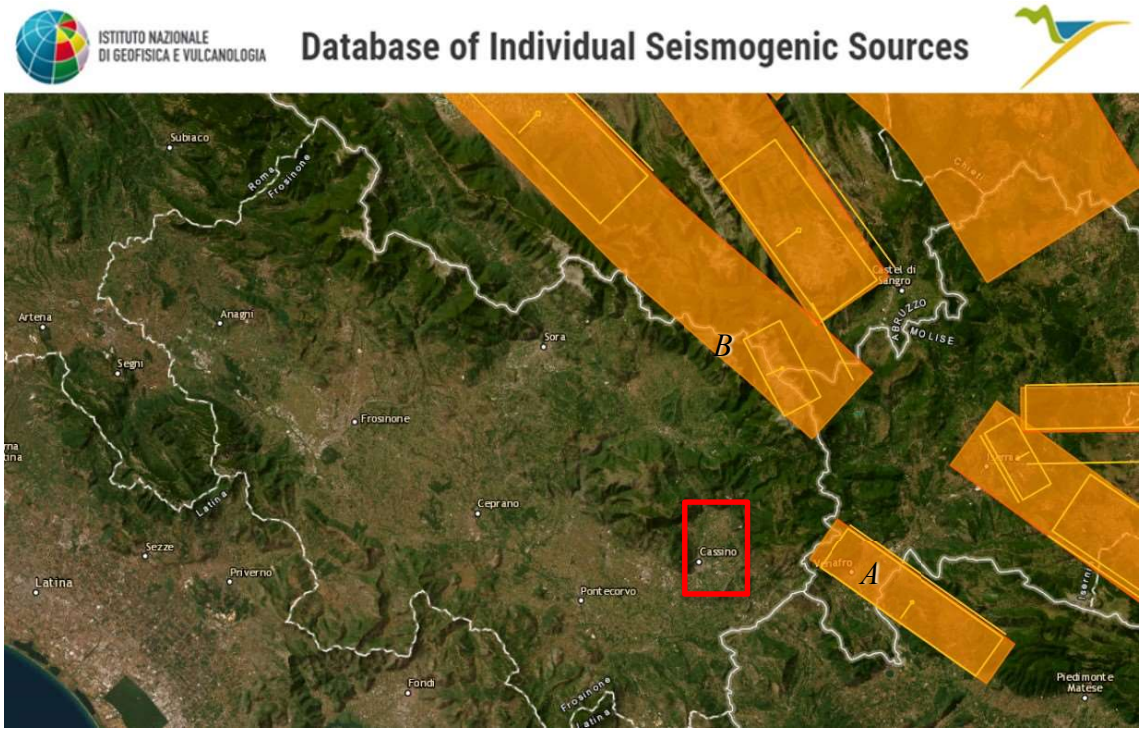


***Fig. 2.9** – Stralcio mappa delle sorgenti sismogeniche redatta da INGV (DISS v3.3.1, 2025); nel rettangolo rosso l'area di interesse. Con le lettere A e B sono indicati i sistemi descritti nel testo. I rettangoli gialli indicano le proiezioni sulla superficie delle sorgenti sismogeniche individuali (IIS); in arancione le proiezioni sulle superficie delle sorgenti sismogeniche composite (CSS); le linee rosse individuano le faglie attive*

Sorgenti *A*

L'Appennino meridionale tra le unità del Molise e la regione a sud delle sorgenti del terremoto dell'Irpinia del 23 novembre 1980 (M 6.9) può essere visto come un sistema che origina grandi scosse. La maggior parte dei terremoti principali che sono stati associati con alcune di queste sorgenti hanno una magnitudo compresa tra 6.0 e 7.0. Tra i numerosi terremoti catastrofici che hanno colpito l'Appennino centrale e meridionale, alcuni sono stati caratterizzati non solo da molteplici eventi distruttivi, ma anche da "epicentri distribuiti", vale a dire scosse avvenute a decine di chilometri di distanza.

Le immagini seguenti mostrano le informazioni generali e parametriche della sorgente composita "Venafro" (Tab. 2.1) e della sorgente individuale "Aquae Iuliae" (Tab. 2.2).

***Tab. 2.1** – Informazioni sulla sorgente sismogenica composita ITCS081 Venafro (DISS v3.3.1, 2025)*

General Information	
DISS-ID	ITCS081
Name	Venafro
Compiler(s)	Fracassi U.(1)
Contributor(s)	Fracassi U.(1)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sezione Roma 1; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy
Created	04/05/2010
Updated	04/05/2010
Display map	
Related sources	ITIS138

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

Parametric Information			
Parameter	Quality	Evidence	
Min depth [km]	1.0	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Max depth [km]	13.0	AR	Derived from dip, width and min depth.
Strike [deg] min... max	116...136	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Dip [deg] min... max	60...70	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Rake [deg] min... max	260...280	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Slip Rate [mm/y] min... max	0.4000... 2.0000	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Max Magnitude [Mw]	6.6	ER	Estimated from Leonard's (2014) scaling relations.

***Tab. 2.2** – Informazioni sulla sorgente sismogenica individuale ITIS138 Aquae Iuliae (DISS v3.3.1, 2025)*

General Information

DISS-ID	ITIS138
Name	Aquae Iuliae
Compiler(s)	Fracassi U.(1)
Contributor(s)	Burrato P.(1), Fracassi U.(1), Valensise G.(1), Vannoli P.(1)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sezione Roma 1; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy
Created	03/05/2010
Updated	31/01/2012
Display map	
Related sources	ITCS081

Information About The Associated Earthquakes

Latest Earthquake	09 Sep 1349 (1/2)	CPTI11.
Penultimate Earthquake	848	Based on paleoseismological data by Galli and Naso (2009).

Parametric Information

Parameter		Quality	Evidence
Location [Lat/Lon]	41.45 / 14.13	LD	Based on data by Galli and Naso (2009).
Length [km]	22.0	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Width [km]	13.0	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Min depth [km]	1.0	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Max depth [km]	12.8	AR	Derived from dip, width and min depth.
Strike [deg]	125	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Dip [deg]	65	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Rake [deg]	270	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Slip Per Event [m]	0.90	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Slip rate [mm/y] min...max	0.4500... 1.9000	LD	Based on geological data by Galli and Naso (2009).
Recurrence [y] min... max	1500... 9000	LD	Based on data by Galli and Naso (2009).
Magnitude [Mw]	6.5	LD	Based on data by Galli and Naso (2009).

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

Sorgenti *B*

Questo sistema composito si estende a cavallo della dorsale dell'Appennino centrale tra i rilievi SE della piana di Rieti (a nord-ovest) e la più alta valle del fiume Sangro (a sud-est), attraverso la piana del Fucino. Questa sorgente sismogenica rientra nel nucleo del sistema di faglie normali dell'Abruzzese centrale, a vergenza SW, che segna il confine estensionale occidentale dell'Appennino centrale.

Cataloghi storici e strumentali mostrano una sismicità medio-alta all'interno dell'area. Inoltre, questo sistema ha dato origine ad alcuni terremoti complessi e distruttivi; i principali sono quelli del 9 settembre 1349 (Mw 6.5, Aquilano) e del 13 gennaio 1915 (Mw 7.0, Avezzano). Quest'ultimo è certamente uno dei terremoti più studiati della storia sismica italiana. Infine, il terremoto del 7 maggio 1984 (Mw 5.9) dell'Appennino abruzzese si è verificato nella parte meridionale di questo sistema, che si rivela piuttosto significativa a causa della sua posizione al passaggio tra i grandi sistemi di faglia normali a vergenza SW (in Abruzzo) e a vergenza NE (in Molise).

Le immagini seguenti mostrano le informazioni generali e parametriche della sorgente composita "Barrea" (Tab. 2.3) e della sorgente individuale "Salto Lake-Ovindoli-Barrea" (Tab. 2.4).

***Tab. 2.3** – Informazioni sulla sorgente sismogenica composita ITCS025 Salto Lake-Ovindoli-Barrea (DISS v3.3.1, 2025)*

General Information

DISS-ID	ITCS025
Name	Salto Lake-Ovindoli-Barrea
Compiler(s)	Barba S.(1), Basili R.(1), Burrato P.(1), Fracassi U.(1), Kastelic V.(1), Tiberti M.M.(1), Valensise G.(1), Vannoli P.(1)
Contributor(s)	Barba S.(1), Basili R.(1), Burrato P.(1), Fracassi U.(1), Kastelic V.(1), Tiberti M.M.(1), Valensise G.(1), Vannoli P.(1)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sezione Roma 1; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy
Created	08/01/2005
Updated	23/12/2011
Display map	
Related sources	ITIS002 ITIS028

Parametric Information

Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	LD	Based on data of instrumental seismicity.
Max depth [km]	14.5	LD	Based on data of instrumental seismicity.
Strike [deg] min... max	121...146	LD	Based on geological data from various authors.
Dip [deg] min... max	40...65	LD	Based on geological data from various authors.
Rake [deg] min... max	260...280	LD	Based on geological data from various authors.
Slip Rate [mm/y] min... max	0.1000... 1.7000	LD	Based on paleoseismology and long-term geological markers.
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

***Tab. 2.4** – Informazioni sulla sorgente sismogenica individuale ITIS028 Barrea (DISS v3.3.1, 2025)*

General Information

DISS-ID	ITIS028
Name	Barrea
Compiler(s)	Vannoli P.(1), Basili R.(1)
Contributor(s)	Vannoli P.(1), Basili R.(1), Valensise G.(1)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sezione Roma 1; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy
Created	31/10/2001
Updated	31/10/2001
Display map	
Related sources	ITCS025

Information About The Associated Earthquakes

Latest Earthquake	07 May 1984	CPTI04; INGV-CNT Seismic Bulletin.
Penultimate Earthquake	Unknown	See Commentary for information.

Parametric Information

Parameter		Quality	Evidence
Location [Lat/Lon]	41.70 / 13.95	LD	Based on geological data from Boncio et al. (1998).
Length [km]	10.0	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Width [km]	7.5	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Min depth [km]	5.0	LD	Based on seismological data from Westaway et al. (1989) and Boncio et al. (1998)
Max depth [km]	10.7	LD	Based on seismological data by Westaway et al. (1989) and Boncio et al. (1998).
Strike [deg]	152	LD	Based on geological data from Westaway et al. (1989) and Boncio et al. (1998).
Dip [deg]	50	LD	Based on seismological data from Westaway et al. (1989) and Boncio et al. (1998)
Rake [deg]	264	LD	Based on seismological data from Westaway et al. (1989) and Boncio et al. (1998)
Slip Per Event [m]	0.27	ER	Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).
Slip rate [mm/y] min...max	0.1000... 1.0000	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Recurrence [y] min... max	270... 2700	EJ	Inferred from slip rate and average displacement.
Magnitude [Mw]	5.8	LD	Based on various macroseismic and seismological estimations.

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

2.4.2 Faglie attive e capaci

Secondo la definizione degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS - Gruppo di lavoro MS, 2008), è considerata *attiva* una faglia che si è attivata almeno una volta negli ultimi 40.000 anni (parte alta del Pleistocene superiore-Olocene) ed è considerata *capace* una faglia attiva che raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione del terreno. Questa definizione si riferisce al piano di rottura principale della faglia (piano su cui avviene la maggiore dislocazione).

Le faglie attive capaci di rompere in superficie in Italia sono strettamente confinate lungo la catena appenninica, coincidendo in gran parte con le aree epicentrali dei terremoti più forti (Galadini e Galli, 2000).

La conoscenza approfondita e la precisa collocazione spaziale delle faglie in grado di produrre una significativa deformazione tettonica permanente in superficie (faglie capaci), assume un ruolo chiave per la mitigazione del rischio.

L'esame del catalogo delle faglie capaci ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults - ITHACA Working Group, 2019) dell'ISPRA evidenzia la presenza della faglia *San Pietro Infine* (cod. 27000) sul bordo orientale del bacino di Cassino (Fig. 2.10), riconosciuta come attiva e capace nel tratto compreso tra Sant'Elia Fiumerapido e San Pietro Infine (Galli & Naso, 2009; Maceroni et al., 2022; Saroli et al., 2003; Smeraglia et al., 2018). Questo elemento, della lunghezza complessiva di circa 25 km, a cinematica normale e orientazione nordovest-sudest, risulterebbe attivo almeno nel Pleistocene superiore, con ultima attività datata all'ultimo glaciale (9.000-15.000). Secondo Saroli et al. (2020) si stima che questa faglia può generare terremoti con magnitudo fino a 6.7-6.8.

Si tratta di una faglia a cinematismo normale ed in superficie le sue evidenze sono ben riscontrabili; la sua attività è testimoniata dalla successione di terrazzi tardo-quaternari che risulta essere dislocata in prossimità di San Vittore del Lazio

Come evidenziato in Tab. 2.5 (estratto delle caratteristiche della faglia da catalogo ITHACA), il rigetto medio è stimato in 135 m, mentre lo slip rate verticale è di circa 0,3÷0,5 mm/anno.

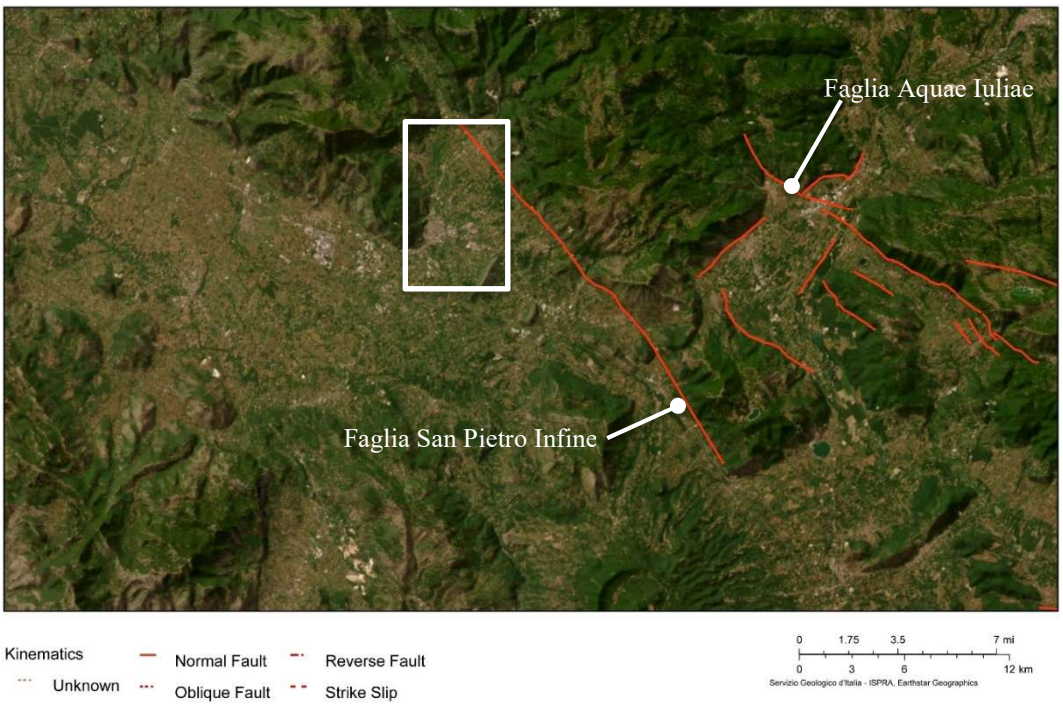


Fig. 2.10 - *Faglie di San Pietro Infine e delle Aquae Iuliae (catalogo ITHACA, 2019); nel riquadro bianco l'area del bacino di Cassino*

Nella stessa figura 2.11 è indicata anche la posizione della faglia delle *Aquae Iuliae* per la quale nel catalogo ITHACA sono riportate quattro schede descrittive relative a quattro diversi segmenti (Tab. 2.5). Questa faglia avrebbe originato il terremoto del 1349 (M = 6.7) e probabilmente altri due eventi precedenti (Galli & Naso, 2009).

Tale faglia, ad andamento nordovest-sudest, affiora per oltre 20 km lungo il versante meridionale del massiccio del Matese e, attraverso la Valle del Volturno, prosegue a nordovest nei monti di Venafro, ribassando il quadrante sudoccidentale. Il nome stesso della faglia deriva dal fatto che i suoi movimenti hanno, a più riprese, dislocato un acquedotto di età augustea del I secolo a. C., che aveva la funzione di portare le acque dalle sorgenti del Volturno fino a Venafro.

Una serie di analisi archeosismologiche e paleosismologiche, condotte dagli Autori menzionati, hanno evidenziato diversi indizi di attività recente lungo questo allineamento. Questa faglia, della quale il lineamento Pozzilli-Capriati rappresenta solo una parte, risulterebbe separata in due segmenti, che si uniscono nella Valle del Volturno. Considerando la corrispondenza tra la distribuzione degli effetti ed il trend del sisma del 1349 e l'assoluta mancanza, da quell'evento, di altri sismi con una magnitudo di 6.5, Galli e Naso sono ragionevolmente sicuri che l'ultima rottura sia proprio quella del 9 settembre 1349.

Ulteriori informazioni sul comportamento nel medio-lungo termine sono emerse dallo studio dell'interazione tra questa faglia e la successione di terrazzi fluviali che la stessa ha variamente dislocato lungo i settori che attraversa anche durante l'Olocene. Il quadro che ne deriva permette di concludere che la struttura ha determinato un sollevamento relativo, con conseguente terrazzamento, del settore settentrionale ed un abbassamento, con conseguente impilamento dei depositi, nel settore meridionale, con uno slip rate di circa 1 mm/a.

***Tab. 2.5** – Informazioni sulla faglia San Pietro Infine e sulla faglia della Aquae Iuliae dal catalogo ISPRA (ITHACA Working Group, 2019)*

GENERAL IDENTIFICATION

Fault Code	27000
Fault Name	San Pietro Infine
Region Name	Campania
Tectonic Environment	ND
System Name	San Pietro Infine
Rank	Primary

GEOMETRY AND KINEMATICS

Segmentation	Single Segment
Average Strike (°)	135
Dip (°)	Steep
Dip Direction	SW
Fault Length (km)	24.9
Mapping Scale	1:250000
Fault Depth (m)	
Kinematics	Normal

ACTIVITY

Surface Evidence	well expressed
Last Activity	Latest glacial (9,000÷15,000)
Applied Tecnique	Geomorphologic data
Evidence for Capability	Displacement of latest Pleistocene-Holocene deposits and/or land forms
Lithology	talus deposits

SLIP PARAMETERS

Slip Rate (mm/yr)	0.3
Max Known Magnitude (Mw)	6.5
Known Seismic Events	1349?

FINAL REMARKS

Capability Consensus	High reliability
Study Quality	FAIR

GENERAL IDENTIFICATION

Fault Code	42007	42008	42009	42010
Fault Name	Aquae Iuliae			
Region Name	Molise			
Tectonic Environment	ND			
System Name	Venafro Plain			
Rank	ND			

GEOMETRY AND KINEMATICS

Segmentation	Single Segment			
Average Strike (°)	140	120	120	110
Dip (°)	Undefined			
Dip Direction	SW			
Fault Length (km)	2.7	1	1.5	2.8
Mapping Scale	1:10000			1:25000
Fault Depth (m)				
Kinematics	Normal			

ACTIVITY

Surface Evidence	ND
Last Activity	Historical (<3,000)
Applied Tecnique	Geomorphologic data
Evidence for Capability	Paleoseismology (Holocene-latest Pleistocene)

SLIP PARAMETERS

Known Seismic Events	1349, M 6,7; 346 AD or 848 AD

FINAL REMARKS

Capability Consensus	High reliability
Study Quality	HIGH

2.4.3 Eventi di riferimento

La sismicità storica del territorio di Cassino, desunta dal DBMI15 v4.0 (Locati et al., 2022), comprende le osservazioni riportate nei file *Cassino*, *Abbazia di Montecassino* e *Caira* (frazione di Cassino) del database stesso; di seguito si riportano gli elenchi delle osservazioni (Tabb. da 2.6 a 2.8) e i relativi grafici di distribuzione temporale degli eventi (Figg. da 2.11 a 2.13):

***Tab. 2.6** – Elenco degli eventi relativi alla località Cassino (DBMI15 v4.0)*

Storia sismica di Cassino - [41.488, 13.831]

Osservazioni disponibili: 67

Is[1]	Anno Me Gi h:m:s	Area epicentrale	Io	Mw
7	1005	Cassino	7	5.1 ± 0.46
8	1231 6 1 11	Cassinese	7	5.1 ± 0.46
10	1349 9 9	Lazio-Molise	10	6.8 ± 0.17
7	1456 12 5	Appennino centro-meridionale	11	7.19 ± 0.1
6	1456 12 30 8:20	Appennino centro-meridionale		
4	1646 5 31	Gargano	10	6.72 ± 0.25
7	1654 7 24 0:25	Sorano	9-10	6.33 ± 0.14

[1] Il valore numerico della colonna **Is** rappresenta l'intensità MCS risentita; il significato delle sigle è definito come segue:

D danno (**damage**) di entità non precisabile (indicativamente I > 6)

F avvertito (**felt**); in genere si esclude che vi siano danni (I < 6)

NF non avvertito (**not felt**); in caso di esplicita segnalazione in tal senso è equiparabile a I = 1

F	1705 11 29	Abruzzo-Lazio		
5-6	1731 4 26	Cassinese	5-6	4.56 ± 0.34
F	1759 10 5 1	Cassinese	4-5	3.93 ± 0.46
6	1837 5 14 5	Cassinese	6	4.69 ± 0.65
7-8	1863 1 19 6	Cassinese	6-7	4.86 ± 0.46
4	1872 12 12 18	Cassinese	4	3.7 ± 0.46
5	1873 7 12 6:06	Val Comino	7-8	5.38 ± 0.16
6	1874 12 6 15:50	Val Comino	7-8	5.48 ± 0.22
5	1882 6 6 5:40	Isernino	7	5.2 ± 0.2
5	1883 4 28	Villa Santa Lucia	5	4.16 ± 0.46
5	1885 3 23 19:22	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
4	1885 4 10 1:44	Appennino laziale-abruzzese	5	4.57 ± 0.28
5	1889 6 29 0:10	Cassinese	5	4.37 ± 0.63
F	1891 5 9 0:16	Val Roveto	5	4.42 ± 0.25
5-6	1891 10 1 17:57	Pignataro	5-6	4.4 ± 0.46
5	1895 3 25 21:15	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
2	1897 3 29 0:05	Venafro	5	4.16 ± 0.46
5	1899 1 5 2:45	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
6	1901 7 31 10:38 30	Sorano	7	5.16 ± 0.13
NF	1904 6 9 1:14	Mignano Monte Lungo	5-6	4.51 ± 0.43
NF	1904 11 2 15:32 05	Marsica	5-6	4.54 ± 0.3
NF	1905 9 8 1:43	Calabria centrale	10-11	6.95 ± 0.09
NF	1907 10 7 14:22	Sorano	5	4.2 ± 0.47
NF	1910 6 7 2:04	Irpinia-Basilicata	8	5.76 ± 0.08
4	1910 12 29 5:47	Cassinese	4	3.7 ± 0.46
2	1913 1 3 13:39 25	Marsica	5-6	4.53 ± 0.21
4	1913 10 4 18:26	Molise	7-8	5.35 ± 0.07
6	1914 6 12 6:42	Cassinese	6-7	4.66 ± 0.46
3	1914 12 1 10:42 28	Cassinese	4-5	3.93 ± 0.46
7	1915 1 13 6:52 43	Marsica	11	7.08 ± 0.08
5	1916 1 26 12:22	Sorano	6	4.72 ± 0.24
3	1916 6 4 0:46	San Pietro Infine	6	4.24 ± 0.35
3	1917 6 16 20:36	Sorano	5-6	4.39 ± 0.42
4-5	1917 12 2 12:13	Cassinese	4-5	3.93 ± 0.46
NF	1919 10 22 6:10	Anzio	6-7	5.22 ± 0.08
4	1920 6 21 7:22	Val Comino	5	4.62 ± 0.16
5-6	1922 12 29 12:22 06	Val Roveto	6-7	5.24 ± 0.08
3	1929 1 14 4:01	Monti della Meta	4-5	4.42 ± 0.16
3	1930 7 23 0:08	Irpinia	10	6.67 ± 0.08
6	1931 5 26 15:24	Cassinese	6-7	4.36 ± 0.32
2	1937 7 17 17:11	Tavoliere delle Puglie	6	4.96 ± 0.11
2	1958 6 24 6:07	Aquilano	7	5.04 ± 0.07
5	1962 8 21 18:19	Irpinia	9	6.15 ± 0.08
5	1967 10 2 20:13 03	Terelle	5-6	4.45 ± 0.21
5	1969 4 17 9:12	Terelle	6-7	4.59 ± 0.19
5	1970 9 27 19:18	Mignano Monte Lungo	7	4.6 ± 0.24
6	1973 11 5 8:41	Cassinese	6	4.29 ± 0.1
3	1979 9 19 21:35 37	Valnerina	8-9	5.83 ± 0.1
F	1980 6 14 20:56 50	Marsica	5-6	4.96 ± 0.1
5	1980 11 23 18:34 52	Irpinia-Basilicata	10	6.81 ± 0.1
NF	1984 4 29 5:02 59	Umbria settentrionale	7	5.62 ± 0.1
6-7	1984 5 7 17:50	Monti della Meta	8	5.86 ± 0.1
6	1984 5 11 10:41 49.27	Monti della Meta	7	5.47 ± 0.1
3	1990 5 5 7:21 29.61	Potentino		5.77 ± 0.1
3	1992 3 15 23:44 31.09	Alta Valle del Volturno	5-6	3.78 ± 0.19
3	1992 3 16 5:45 35.02	Alta Valle del Volturno	5-6	3.78 ± 0.17
4	2002 11 1 15:09 01.92	Molise	7	5.72 ± 0.07
NF	2003 6 1 15:45 18.04	Molise	5	4.44 ± 0.07
4	2016 10 26 19:18 07.42	Valnerina		6.07 ± 0.07
F	2017 1 18 10:14 09.09	Aquilano		5.7 ± 0.07

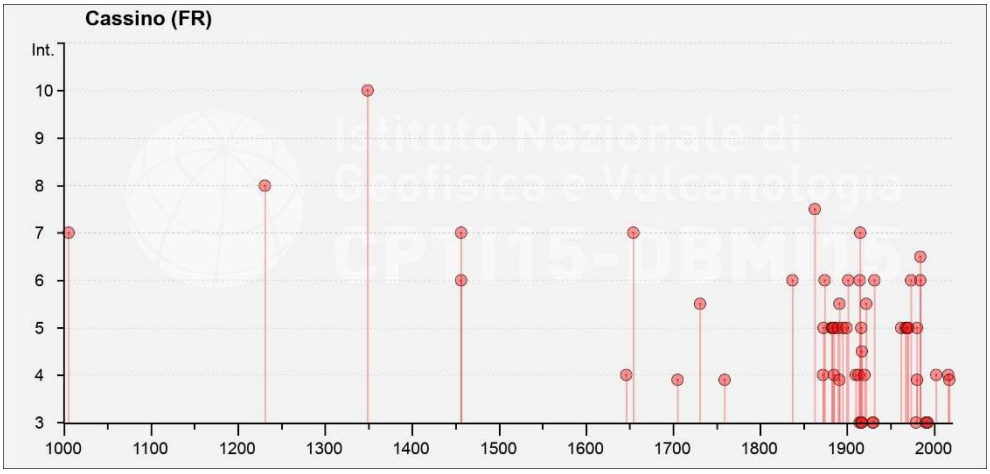


Fig. 2.11 – *Grafico di distribuzione temporale degli eventi relativi alla località Cassino (DBMI15 v4.0)*

Tab. 2.7 – *Elenco degli eventi relativi alla località Montecassino (DBMI15 v4.0)*

Storia sismica di Abbazia di Montecassino - [41.491, 13.814]

Osservazioni disponibili: 71

Is	Anno Me Gi h:m:s	Area epicentrale	Io	Mw
F	1117 1 3 15:15	Veronese	9	6.52 ± 0.1
5	1120 3 25	Valle del Garigliano	8-9	5.8 ± 0.46
9	1349 9 9	Lazio-Molise	10	6.8 ± 0.17
D	1456 12 5	Appennino centro-meridionale	11	7.19 ± 0.1
4	1646 5 31	Gargano	10	6.72 ± 0.25
7	1654 7 24 0:25	Sorano	9-10	6.33 ± 0.14
6	1688 6 5 15:30	Sannio	11	7.06 ± 0.1
F	1694 9 8 11:40	Irpinia-Basilicata	10	6.73 ± 0.1
5	1703 5 25	Sabina		
5	1705 11 29	Abruzzo-Lazio		
5-6	1706 11 3 13	Maiella	10-11	6.84 ± 0.1
5	1711 3 30 3	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
5	1718 7 14	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
F	1720 6 7	Tavoliere delle Puglie	6-7	5.22 ± 0.43
D	1720 8 28	Cassinese	5-6	4.35 ± 0.46
5-6	1723 9 19	Cassinese	5-6	4.4 ± 0.46
F	1731 3 20 3	Tavoliere delle Puglie	9	6.33 ± 0.13
5-6	1731 4 26	Cassinese	5-6	4.56 ± 0.34
F	1731 9 15 14	Abruzzo		
5-6	1759 10 5 1	Cassinese	4-5	3.93 ± 0.46
5-6	1761 4 5 14	Cassinese	5-6	4.4 ± 0.46
F	1765 5 12	Casertano	6-7	4.86 ± 0.46
5-6	1805 7 26 21	Molise	10	6.68 ± 0.1
D	1806 7 21 9	Cassinese	5-6	4.4 ± 0.46
5	1835 12 23	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
6	1837 5 14 5	Cassinese	6	4.69 ± 0.65
D	1863 1 19 6	Cassinese	6-7	4.86 ± 0.46
5	1872 12 12 18	Cassinese	4	3.7 ± 0.46
5	1873 7 12 6:06	Val Comino	7-8	5.38 ± 0.16
6	1874 12 6 15:50	Val Comino	7-8	5.48 ± 0.22
F	1875 12 6	Gargano	8	5.86 ± 0.12
5-6	1877 8 24 2:45	Lazio meridionale	7	5.21 ± 0.17
5	1882 6 6 5:40	Isernino	7	5.2 ± 0.2
5	1885 3 23 19:22	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
4	1885 4 10 1:44	Appennino laziale-abruzzese	5	4.57 ± 0.28
NF	1887 2 23 5:21 50	Liguria occidentale	9	6.27 ± 0.1
5	1889 6 29 0:10	Cassinese	5	4.37 ± 0.63

3	1889 8 26 5:31	Castel di Sangro	4	4.2 ± 0.43
4-5	1891 5 9 0:16	Val Roveto	5	4.42 ± 0.25
D	1891 10 1 17:57	Pignataro	5-6	4.4 ± 0.46
F	1892 1 22	Colli Albani	7	5.14 ± 0.16
5-6	1895 3 25 21:15	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
5-6	1899 1 5 2:45	Cassinese	5	4.16 ± 0.46
6	1901 7 31 10:38 30	Sorano	7	5.16 ± 0.13
5	1910 12 29 5:47	Cassinese	4	3.7 ± 0.46
NF	1912 7 7 4:45	Sorano	5	4.18 ± 0.35
3-4	1913 1 3 13:39 25	Marsica	5-6	4.53 ± 0.21
F	1913 10 4 18:26	Molise	7-8	5.35 ± 0.07
D	1914 6 12 6:42	Cassinese	6-7	4.66 ± 0.46
5-6	1914 12 1 10:42 28	Cassinese	4-5	3.93 ± 0.46
3	1914 12 19 3:50 42	Isernino	5-6	4.33 ± 0.35
7	1915 1 13 6:52 43	Marsica	11	7.08 ± 0.08
4-5	1915 1 14 7:17	Marsica	5-6	4.88 ± 0.17
4	1915 2 27 23:23 05	Marsica	6	4.77 ± 0.47
2	1915 4 5 6:18 58	Valle dell'Aniene	6	4.8 ± 0.13
4	1916 1 26 12:22	Sorano	6	4.72 ± 0.24
3	1917 1 3 1:35	Marsica		
3	1917 6 16 20:36	Sorano	5-6	4.39 ± 0.42
2	1917 7 8 2	Appennino laziale-abruzzese	5-6	4.68 ± 0.19
5	1917 12 2 12:13	Cassinese	4-5	3.93 ± 0.46
4	1919 10 22 6:10	Anzio	6-7	5.22 ± 0.08
5-6	1922 12 29 12:22 06	Val Roveto	6-7	5.24 ± 0.08
5	1925 9 24 13:33 46	Molise occidentale	7	5.26 ± 0.1
F	1927 5 25 2:50	Sannio	6	4.98 ± 0.1
4-5	1927 10 11 14:45 08	Marsica	7	5.2 ± 0.09
2-3	1929 1 14 4:01	Monti della Meta	4-5	4.42 ± 0.16
5	1930 7 23 0:08	Irpinia	10	6.67 ± 0.08
NF	1930 10 30 7:13	Senigallia	8	5.83 ± 0.08
D	1931 5 26 15:24	Cassinese	6-7	4.36 ± 0.32
F	1931 10 21 7:35	Ciociaria	5	4.23 ± 0.22
5	1933 9 26 3:33 29	Maiella	9	5.9 ± 0.07

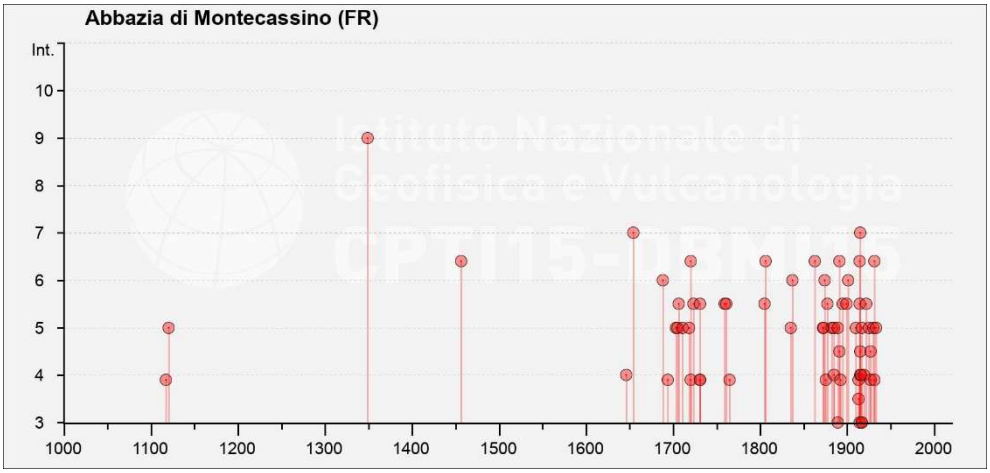


Fig. 2.12 – *Grafico di distribuzione temporale degli eventi relativi alla località Montecassino (DBMI15 v4.0)*

Tab. 2.8 – *Elenco degli eventi relativi alla località Caira (DBMI15 v4.0)*

Storia sismica di Caira - [41.527, 13.816]

Osservazioni disponibili: 6

Is	Anno Me Gi h:m:s	Area epicentrale	Io	Mw
6	1837 5 14 5	Cassinese	6	4.69 ± 0.65
3	1916 1 26 12:22	Sorano	6	4.72 ± 0.24

3	1916 6 4 0:46	San Pietro Infine	6	4.24 ± 0.35
4	1917 1 3 1:35	Marsica		
4	1917 6 16 20:36	Sorano	5-6	4.39 ± 0.42
3-4	1917 12 2 12:13	Cassinese	4-5	3.93 ± 0.46

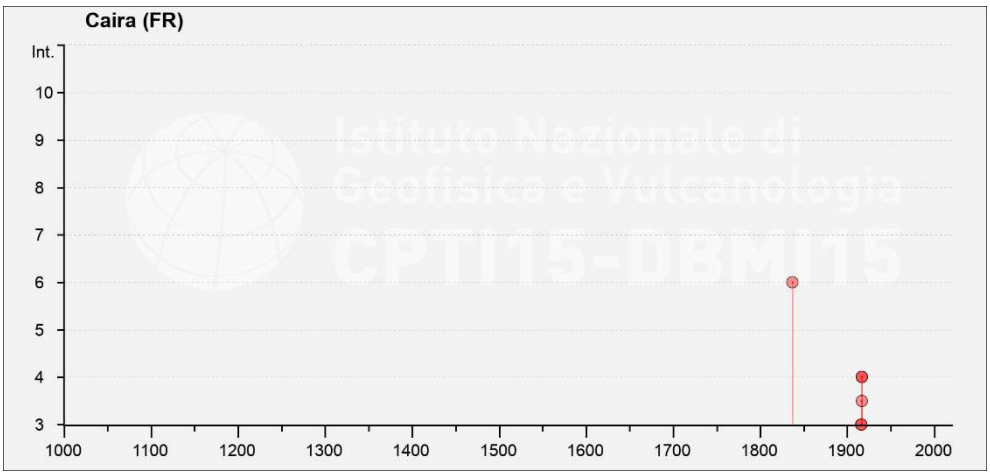


***Fig. 2.13** – Grafico di distribuzione temporale degli eventi relativi alla località Caira (DBMI15 v4.0)*

La sismicità è concentrata principalmente lungo l'asse della catena montuosa appenninica e registra anche la presenza dei grandi eventi sismici con intensità massime del XI grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS) e magnitudo equivalente (Me) di circa 7.0. Tra questi sono di particolare rilevanza per il territorio del bacino di Cassino, sia per l'elevata intensità stimata che per la vicinanza all'area epicentrale, gli eventi verificatesi nel 1231 e 1863 nell'area di Cassino, nel 1349 con località epicentrale nel Lazio-Molise, nel 1456 nell'Appennino centro-meridionale, nel 1654 nell'area del Sorano e nel 1915 con località epicentrale nella Marsica (Fig. 2.14 e Tab. 2.9).

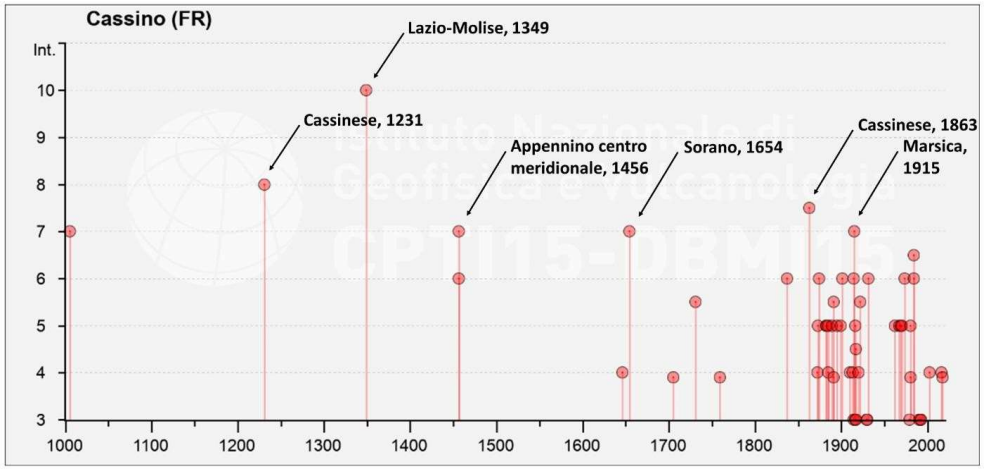


***Fig. 2.14 -** Massime intensità registrate per il comune di Cassino (DBMI15 v4.0), con evidenziati i principali eventi*

***Tab. 2.9** – Riepilogo degli eventi di particolare rilevanza per il territorio del bacino di Cassino (DBMI15 v4.0)*

Is	Anno	Me	Gi	Or	Mi	Se	Area epicentrale	Io	Mw
8	1231	6	1	11			Cassinese	7	5.1 ± 0.46
10	1349	9	9				Lazio-Molise	10	6.8 ± 0.17
7	1456	12	5				Appennino centro-merid.	11	7.19 ± 0.1
7	1654	7	24	0	25		Sorano	9-10	6.33 ± 0.14
7-8	1863	1	19	6			Cassinese	6-7	4.86 ± 0.46
7	1915	1	13	6	52	43	Marsica	11	7.08 ± 0.08

Di seguito (Fig. 2.15) si riportano le mappe del risentimento macrosismico (Rovida et al., 2022) per ciascuno degli eventi citati e una descrizione degli effetti riscontrati nell'area di Cassino per l'evento del 1349.

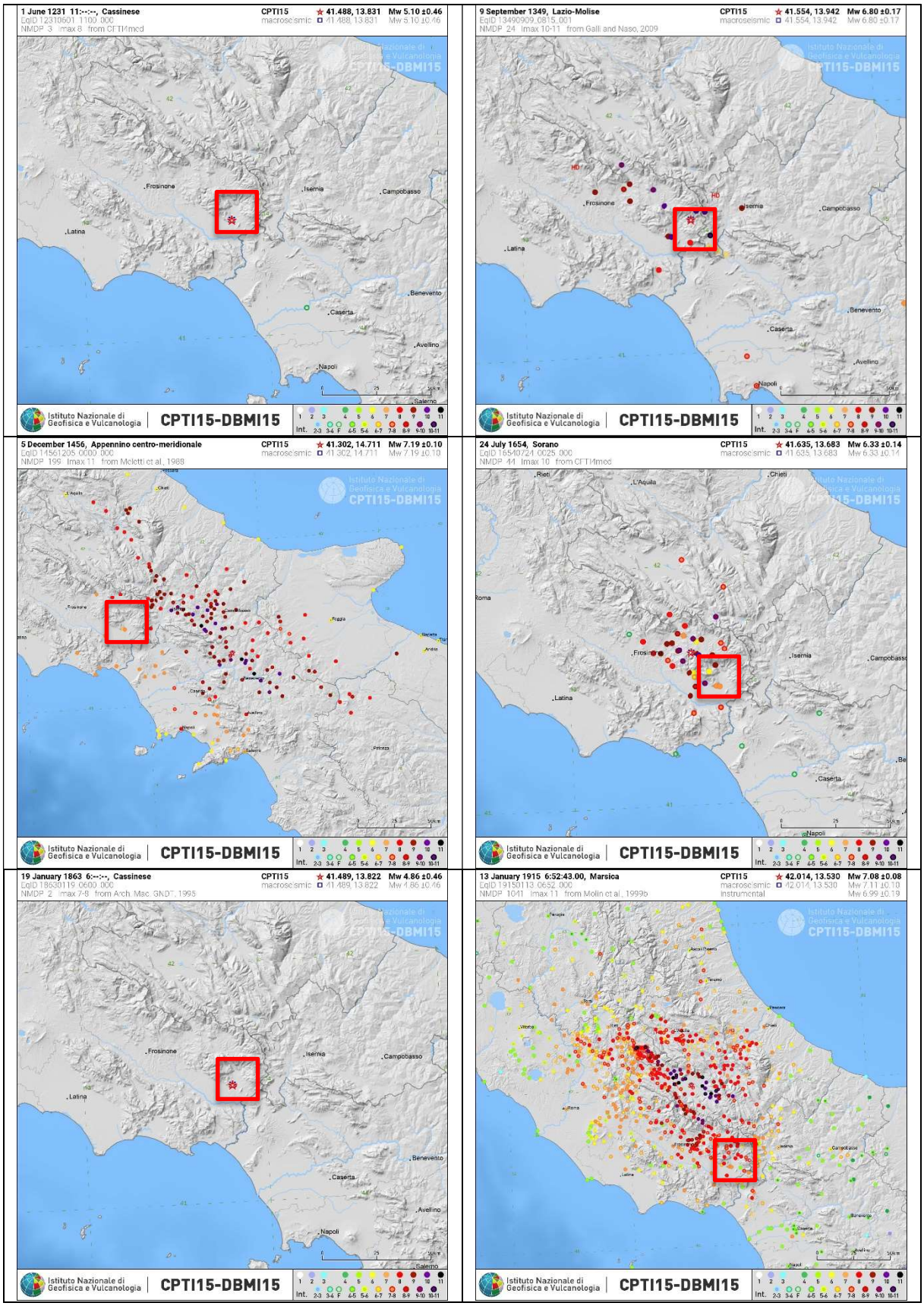


Fig. 2.15 - *Mappe del risentimento macrosismico relative agli eventi elencati in tabella 2.9 (CPTI15 v4.0); nel quadrato rosso l'area del bacino di Cassino*

Il 9 settembre 1349, dopo una serie di scosse minori che si succedevano dal gennaio precedente, si verificò questo evento che provocò ingenti danni nell'area del cassinate. La stessa Abbazia di Montecassino venne completamente distrutta. Nella città di Cassino morirono quasi mille persone e si registrò il crollo di gran parte delle abitazioni soprattutto nella piana, allora in parte paludosa. Si notò un intorbidimento delle acque.

Di seguito alcuni passaggi tratti dalle fonti storiche (dall'Archivio Storico Macrosismico Italiano - ASMI; Rovida et al. 2017; Rovida et al. 2025) su questo evento che risulta essere abbondantemente documentato, soprattutto per quel che riguarda l'Abbazia di Montecassino, la notizia della cui distruzione fu di tale portata da far passare in secondo piano la descrizione dei danni causati all'abitato di Cassino.

"*Nell'anno 1349, nel mese di gennaio, nella notte di S. Vincenzo (22 gennaio), dopo la cena ci fu un terremoto molto grande, e da quella notte ci furono pressoché ininterrottamente quasi ogni mese dei piccoli terremoti fino alla festa della natività della gloriosa Vergine Maria (8 settembre). Proprio nel giorno 9 del mese di settembre del predetto anno…a metà dell'ora terza ci fu un terremoto tanto grande, e di potenza così ingentissima, che da nessuno è ricordato un terremoto simile dal tempo della creazione. … Distrusse inoltre, e abbatté il Monastero Cassinese con tutta la terra di S. Germano, nella quale morirono quasi mille uomini, distrusse altre terre del sopraddetto Monastero. … E ciò che è di maggior meraviglia tutte le acque dell'intera patria, che una volta scaturivano chiarissime, dopo il terremoto diventarono subito torbide come fango dal colore sanguigno.*" (Ciarlanti, 1644).

"*… soprattutto intorno a Monte Cassino. Anche qui il terremoto durò circa tre settimane, con una o due scosse al giorno, non tuttavia così pericolose come il primo giorno.*" (Selbach).

"*Nell'anno del Signore 1349…. Giorno 9 di settembre vi fu un grande terremoto … e specialmente nell'episcopato Cassinese tanto che tutto il monastero dalle fondamenta crollò, non rimanendo in esso nessuna casa eretta … E tutti i castelli del Monastero furono totalmente distrutti, eccetto Castro, S. Vittore e Fratte, e accadde nell'ora della messa in cui molti uomini e donne, sacerdoti e religiosi sugli altari e nei corali nelle chiese morirono, eccetto quelli che morirono nelle case, castelli e città. Anche nella città di San Germano per metà crollo, soprattutto quella parte che era in piano o nelle paludi e una gran moltitudine di uomini e donne e bambini e religiosi morì.*" (Caravita, 1870).

"*Nello stesso anno, il 9 settembre 1349, un terribile terremoto rovinò il Monastero di Montecassino e la città sottostante, dove perirono circa mille persone, e distrusse buona parte del Cominense…*" (Vassalli, 1949).

"*Dopo il flagello della peste, maggiori danni e rovine si cagionarono dal terremoto nel Regno di Napoli, seguito a' 9 di settembre dell'anno appresso 1349. Viene riferito da S. Antonino, che si fece sentire, non solo in Italia, ma anche in Germania ed in Ungheria. Caddero dà fondamenti il Monastero de' Cassinesi colla Terra di S. Germano …*" (Giuliani, 1768).

"*(Montecassino) … rovinò pel terremoto del 1349 la (chiesa del monastero di Montecassino) eretta dall'abate Giovanni…*" (Moroni, 1840).

"*A' 9 settembre 1349 accadde il memorabile scuotimento di terra che ne soffrì tutta la signoria cassinese; appena i monaci ebbero tempo di fuggire dal monastero per piangerlo colla basilica di Desiderio, meraviglia di què tempi. Il vescovo abbattuto dal disastro, per ricovero face costruire capanne sulle rovine del cenobio.*" (Moroni, 1840).

"*1349: Adì 10 settembre terremoti disusati, e meravigliosi si sentirono in Italia, li quali in molte parti durarono più giorni…. A Monte Cassino fecero danni incredibili e gettarono a terra gran parte di quell'antico monastero di S. Benedetto sopra il monte del Poggio medesimo, che pare tutto un sasso.*" (Lancellotti, 1673).

2.4.4 Classificazione sismica del comune di Cassino

La Presidenza del Consiglio dei Ministri, nel 2006, ha emanato i criteri nazionali per la riclassificazione sismica (OPCM n. 3519 del 28 aprile 2006), definendo come ciascuna Regione deve eseguire l'aggiornamento della propria classificazione sismica. In ottemperanza a tale norma la Regione Lazio ha emanato con D.G.R. n. 387 del 22 maggio 2009 e D.G.R. n. 835 del 3 novembre 2009 la nuova classificazione sismica che suddivide il territorio regionale nelle seguenti zone e sottozone sismiche:

Tab. 2.10 – *Zone sismiche del territorio della Regione Lazio*

ZONA SISMICA	SOTTOZONA SISMICA	ACCELERAZIONE CON PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO PARI AL 10% IN 50 ANNI (a_g)
1		$0.25 \leq a_g < 0{,}278g$ *(val. Max per il Lazio)*
2	**A**	$0.20 \leq a_g < 0.25$
	B	$0.15 \leq a_g < 0.20$
3	**A**	$0.10 \leq a_g < 0.15$
	B	*(val. min.)* $0.062 \leq a_g < 0.10$

Secondo tale classificazione il comune di Cassino risulta in zona sismica 2A con $0{,}20 \leq a_g \leq 0{,}25$.

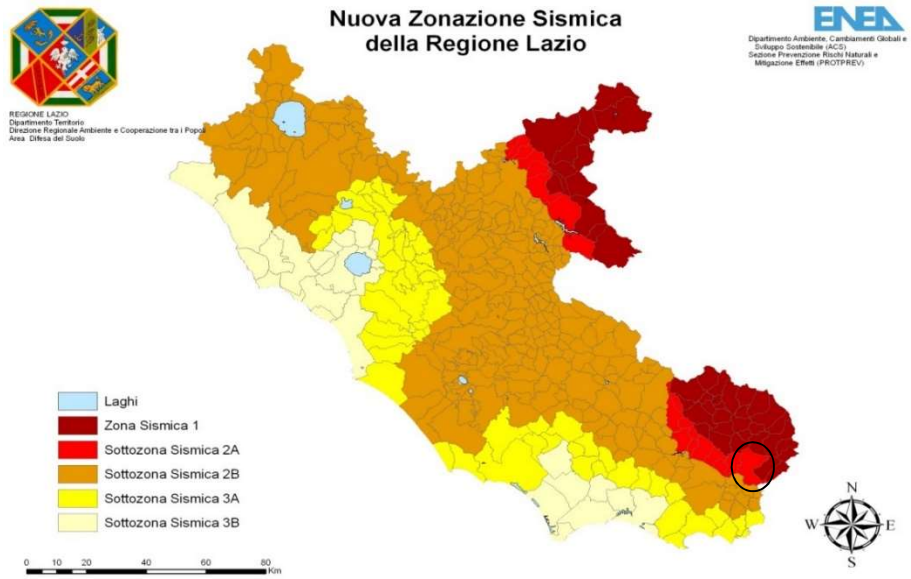


Fig. 2.16 – *Zonazione sismica della Regione Lazio (D.G.R. n. 387/2009); nell'ovale nero il comune di Cassino*

Nell figura 2.17 è riportato uno stralcio della mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale MPS04-S1 (2004) che evidenzia i valori di scuotimento in termini di PGA (Peak Ground Acceleration espressa in g) attesa con una probabilità di eccedenza paria al 10% in 50 anni su suolo rigido e pianeggiante. Si conferma che l'area di interesse di questo studio, nella parte nord del territorio comunale di Cassino, ha valori di accelerazione compresi tra 0.200g e 0.250g.

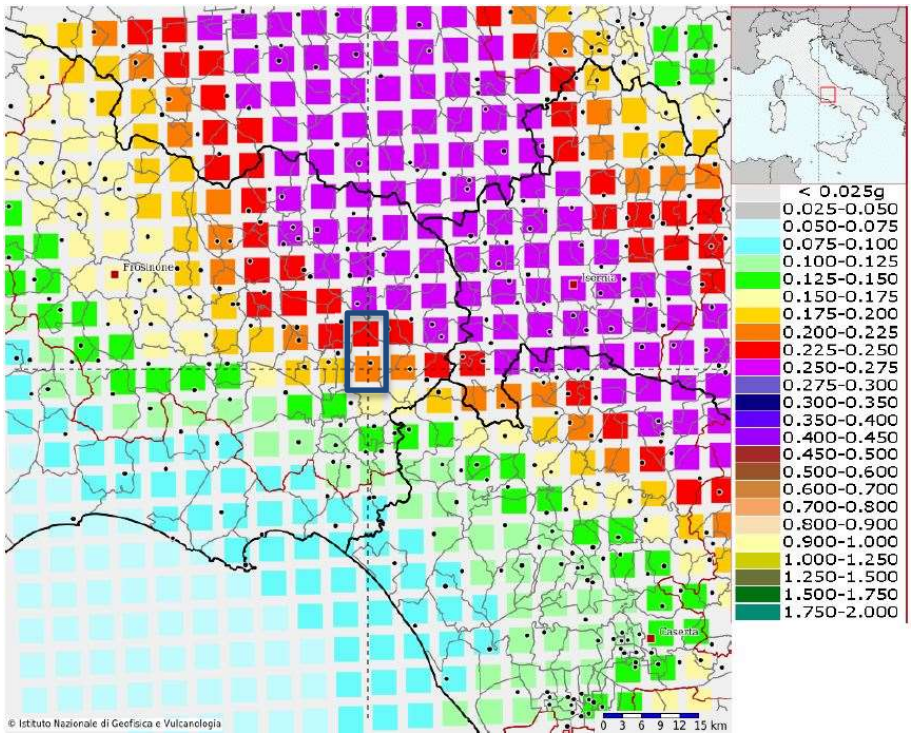


***Fig. 2.17** – Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale MPS04-S1 (2004); nel rettangolo blu l'area di interesse*

2.4.5 Parametri sismici da NTC 2018

Come già visto, il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha messo a disposizione un applicativo in Excel (Spettri di risposta – ver. 1.03) per la stima dei parametri di base per la definizione dell'azione sismica attraverso la localizzazione geografica del sito, la definizione di vita nominale e coefficiente d'uso della struttura e l'indicazione della categoria di suolo e della categoria topografica del sito; l'applicativo è realizzato tenendo conto delle coordinate dei 10751 nodi (e dei parametri collegati) riportati nell'allegato B delle NTC 2008 (rimasti invariati anche nelle NTC 2018). Per tutti i punti del *reticolo di riferimento* e per 9 valori del periodo di ritorno T_R (30 anni, 50 anni, 72 anni, 101 anni, 140 anni, 201 anni, 475 anni, 975 anni, 2475 anni) vengono forniti i valori dei parametri a_g, F_0, T_C* da utilizzare per definire l'azione sismica.

Nella prima schermata (*Fase 1*) è possibile ricavare la tabella dei Valori dei parametri a_g, F_0, T_C per i periodi di ritorno T_R di riferimento (Fig. 2.18).

T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
30	0.059	2.427	0.277
50	0.076	2.396	0.292
72	0.090	2.371	0.310
101	0.108	2.334	0.315
140	0.125	2.345	0.321
201	0.146	2.348	0.329
475	0.207	2.349	0.348
975	0.269	2.357	0.367
2475	0.365	2.417	0.383

Fig. 2.18 - *Applicativo "Spettri di risposta-ver1.0.3"; Fase 1: individuazione della pericolosità del sito: tramite l'inserimento delle coordinate del sito è possibile ricavare la tabella di valori dei parametri a_g, F_0, T_C* per i 9 periodi di ritorno T_R di riferimento*

Nella seconda schermata (*Fase 2*), inserendo il valore per la vita nominale (V_N) e per il coefficiente d'uso dell'opera (c_u), si ottiene il periodo di riferimento (V_R) come prodotto dei due. Nel caso di questo studio, come nel caso degli studi di microzonazione sismica, si utilizzano i valori V_N = 50 anni e c_u = 1 (corrispondente alla classe d'uso II delle NTC 2018); sarà allora $V_R = V_N * c_u$ = 50 anni. Vengono così definiti i periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (T_R) per ciascuno stato limite. Nel caso di questo studio, come nel caso degli studi di microzonazione sismica, si considera T_R = 475 anni, cui corrispondono i seguenti valori dei parametri sismici di base (Fig. 2.19):

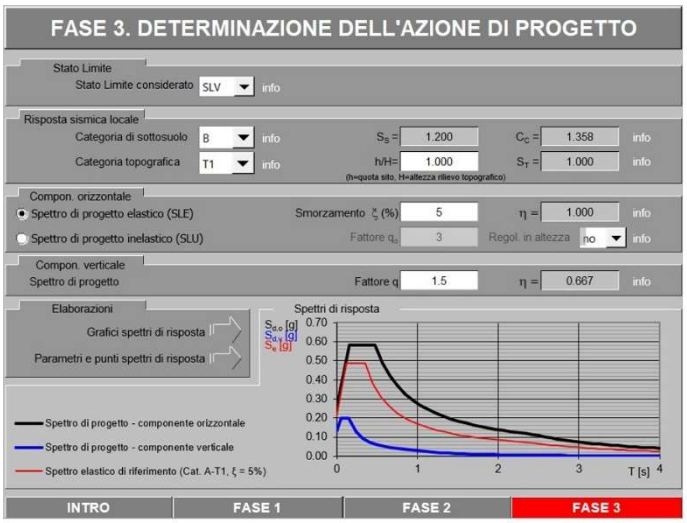
Tab. 2.11 – *Parametri sismici di base determinati per l'area di studio*

Parametro	**Valore**
a_g	0.207 g
F_0	2.349
T_C*	0.348

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	30	0.059	2.426	0.277
SLD	50	0.076	2.396	0.292
SLV	475	0.207	2.349	0.348
SLC	975	0.269	2.357	0.367

Fig. 2.19 - *Applicativo "Spettri di risposta-ver1.0.3"; Fase 2: scelta della strategia di progettazione: inserendo V_N e c_u si ottengono i periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (V_R) e da questi i relativi parametri a_g, F_0, T_C* per ciascuno stato limite*

Nella terza schermata (*Fase 3*), inserendo lo stato limite di riferimento (nel caso di questo studio è lo SLV), la categoria di sottosuolo (determinata secondo le indicazioni delle NTC 2018 a seguito di indagini in sito) e la categoria topografica si ottengono i valori dei parametri sismici, indipendenti e dipendenti, e le coordinate dello spettro di risposta da normativa che descrive il comportamento sismico di uno specifico sito, comprensivo delle amplificazioni dovute allo scostamento dalle condizioni di suolo rigido e pianeggiante, in accordo con l'approccio semplificato proposto dalle NTC 2018 (Fig. 2.20).



Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_g	0.207 g
F_o	2.349
T_C^*	0.348 s
S_S	1.200
C_C	1.358
S_T	1.000
q	1.000

Parametri dipendenti

S	1.200
η	1.000
T_B	0.158 s
T_C	0.473 s
T_D	2.429 s

Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.249
T_B ←	0.158	0.584
T_C ←	0.473	0.584
	0.566	0.488
	0.659	0.419
	0.753	0.367
	0.846	0.327
	0.939	0.294
	1.032	0.268
	1.125	0.246
	1.218	0.227
	1.311	0.211
	1.405	0.197
	1.498	0.185
	1.591	0.174

Fig. 2.20 - *Applicativo "Spettri di risposta-ver1.0.3"; Fase 3: determinazione dello spettro di progetto: inserendo lo stato limite di riferimento, la categoria di sottosuolo e la categoria topografica si ottengono i calori dei parametri sismici e le coordinate dello spettro di risposta*

Capitolo 3. DATI E METODI

3.1 Raccolta delle indagini dell'area di studio

Nel caso studio di Cassino, date le dimensioni e la complessità geologica dell'area, è stato preferito un approccio multidisciplinare e multi-scala per la raccolta dei dati. In primo luogo è stata considerata la bibliografia disponibile (Saroli et al., 2020, 2019, 2019b, 2017; Scarascia Mugnozza et al., 2012; Devoto, 1965) accompagnata da un rilevamento di campagna. Successivamente, sono stati reperiti numerosi dati diretti e indiretti provenienti dai database della Microzonazione Sismica di Livello 1 (Scarascia Mugnozza et al., 2012), e della Microzonazione Sismica di Livello 3, realizzate per il comune di Cassino rispettivamente nel 2012 e nel 2024, da dati di un precedente dottorato (Rompato, 2023) e da numerosi lavori professionali condotti nell'area ed è stata eseguita una campagna di misure di microtremore sismico a stazione singola al fine di infittire la copertura delle indagini lungo tutta la superfice del bacino, andando ad integrare la già numerosa disponibilità di misure di questo tipo (Fig. 3.1).

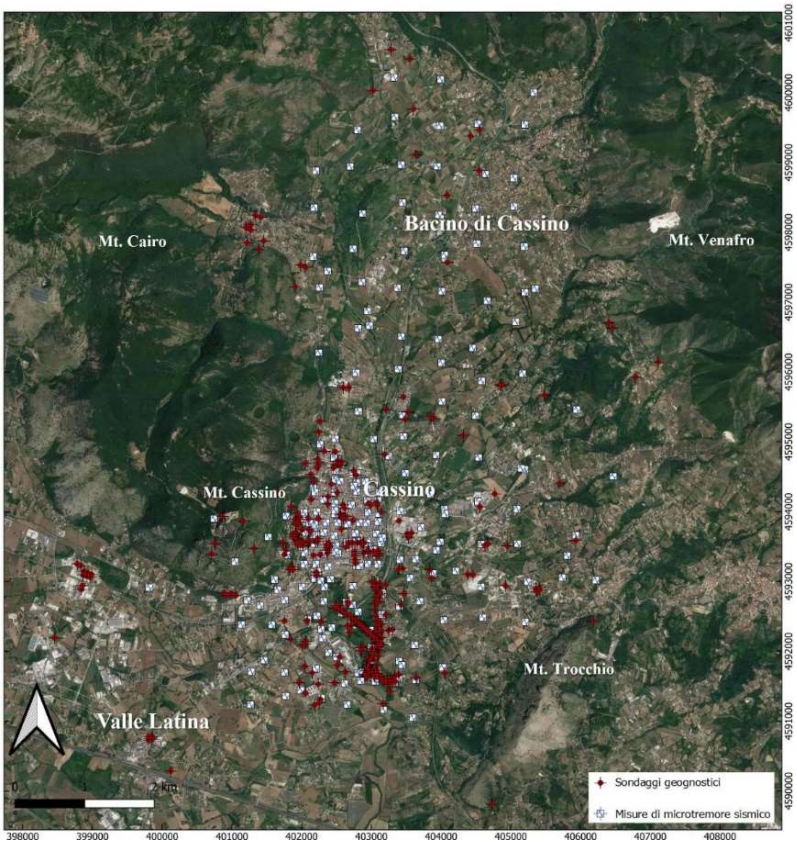


Fig. 3.1 *- Localizzazione dei sondaggi e delle misure di microtremore sismico nell'area studio di Cassino*

È stato possibile raccogliere i risultati delle analisi di laboratorio sui campioni prelevati in sondaggio, permettendo di ottenere anche dati sulle proprietà fisiche e geotecniche dei litotipi presenti nel sottosuolo.

Sono state reperite anche indagini penetrometriche di tipo statico e di tipo dinamico attraverso le quali si sono eseguite le opportune correlazioni stratigrafiche e geotecniche nei primi metri dei terreni di copertura.

Infine, i risultati delle indagini sismiche di superficie e in foro hanno permesso una caratterizzazione dei litotipi anche dal punto di vista del comportamento dinamico.

3.1.1 Sondaggi geognostici

Il dataset di sondaggi ottenuto conta 399 verticali effettuate nel corso degli anni. Tali indagini consistono per lo più in sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni indisturbati che raggiungono profondità variabili comprese tra 10 metri a oltre 400 m dal piano campagna (Fig. 3.2).

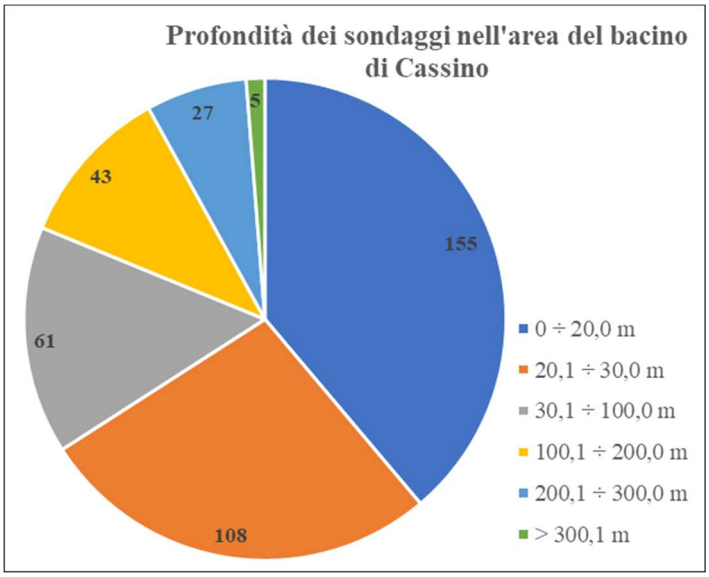


Fig. 3.2 - *Numero di sondaggi disponibili nel dataset del bacino di Cassino divisi per classi di profondità da p.c.*

In particolare, dei 399 sondaggi 147 di essi raggiungono il substrato roccioso costituito dai litotipi del complesso marino di piattaforma carbonatica e del complesso marino delle unità flyschoidi argilloso-arenacee con argille varicolori. Grazie alla possibilità di elaborare un così vasto numero di dati è stato possibile realizzare un modello esteso per circa 60 km² di superfice e profondo circa 380 metri dal piano campagna.

Malgrado siano provenienti da diverse fonti e diversi periodi, i sondaggi considerati presentano una forte coerenza geologica, la quale ha permesso di omogeneizzare le stratigrafie in classi litologiche univoche. In particolare, dall'analisi delle schede di sondaggio nei tratti relativi al Complesso continentale e vulcanico si può notare una tipica alternanza di strati a granulometria variabile con frequenti livelli di ghiaia e di sabbia immersi in una matrice limo-argillosa e argillo-limosa (Fig. 3.3).

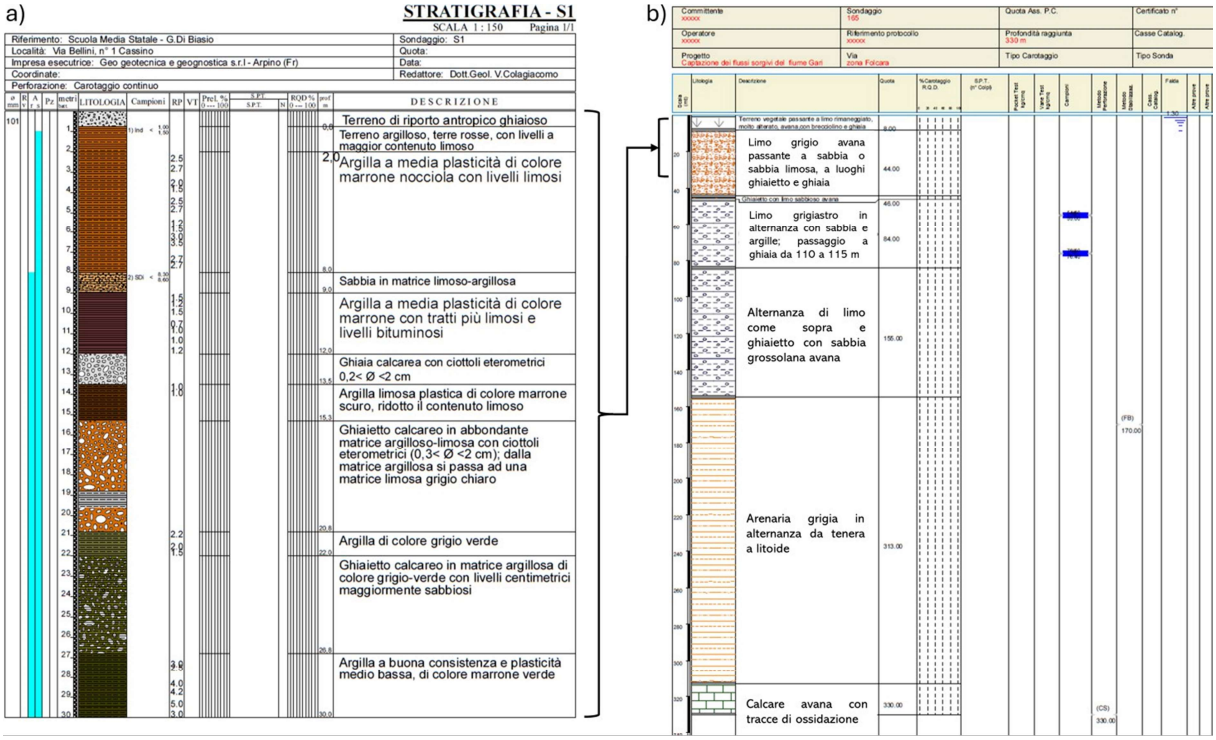


Fig. 3.3 - *Esempi di due stratigrafie di sondaggio. a) Sondaggio superficiale che attraversa i sedimenti del complesso continentale e complesso vulcanico nel centro urbano di Cassino. b) Sondaggio profondo che raggiunge sia il complesso marino di piattaforma carbonatica sia il complesso marino delle unità flyschoidi argilloso-arenacee con argille varicolori nel centro urbano di Cassino*

3.1.2 Prove penetrometriche

Il dataset delle indagini penetrometriche conta in totale 183 prove così suddivise (Figg. 3.4 e 3.5):

- ✓ prove penetrometriche dinamiche
  - n. 59 DPL (Dynamic Probing Light)
  - n. 3 DPM (Dynamic Probing Medium)
  - n. 71 DPSH (Dynamic Probing Super Heavy)
- ✓ prove penetrometriche statiche
  - n. 23 CPT (Cone Penetration Test)
  - n. 27 CPTu (Cone Penetration Test con piezocono)

Alcune delle indagini esistenti sono state rielaborate. Ad esempio, quelle più datate sono state rielaborate con software attuali (CPT/CPTu con CeT-IT, DPSH, DPM, DPL con Dynamic probing Geostru). Ogni indagine è stata suddivisa negli intervalli di penetrazione caratteristici della singola prova, ottenendo così un insieme di ben 145.000 record ad ognuno dei quali corrispondono valori dei diversi parametri geotecnici ottenuti dalle elaborazioni originali e da quelle riviste. Data la limitata profondità generalmente raggiunta (raramente maggiore di 20 m), questo tipo di indagini ha permesso di operare le opportune correlazioni stratigrafiche e geotecniche solo per i primi metri dei terreni di copertura.

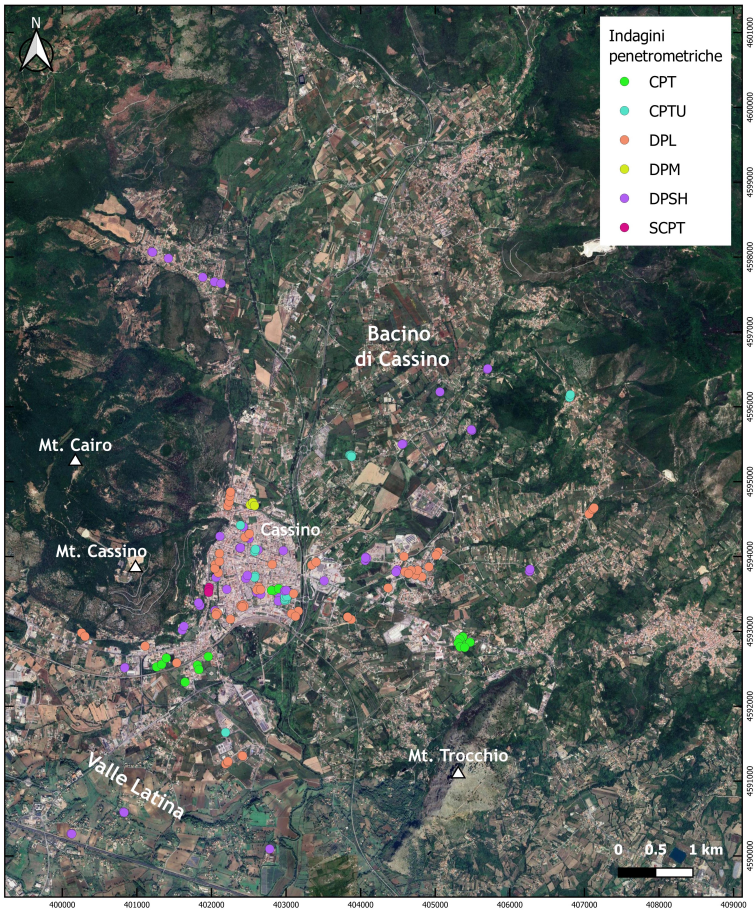


Fig. 3.4 - *Localizzazione delle prove penetrometriche nell'area di studio di Cassino distinte per tipologia*

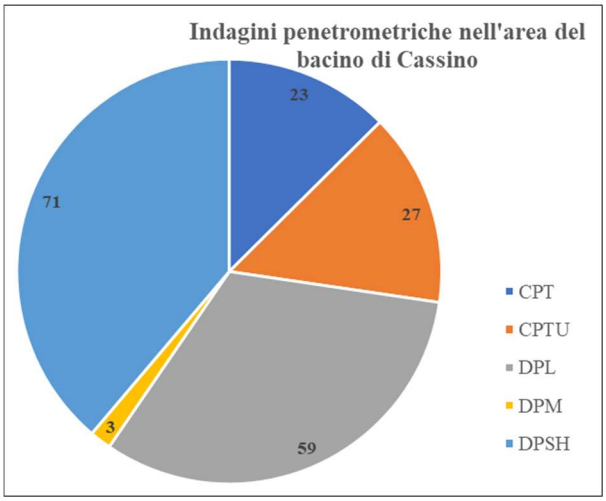


Fig. 3.5 - *Numero di prove penetrometriche disponibili nel dataset del bacino di Cassino divise per tipologia*

3.1.3 Dati di laboratorio

Nei sondaggi geognostici presenti nei dataset analizzati risultano prelevati 308 campioni, ma il totale dei campioni che sono stati analizzati in laboratorio o dei quali erano presenti gli elaborati di prova ammonta a 211. Dopo una accurata classificazione, sono stati selezionati i 42 campioni elencati in Tab. 3.1, ritenuti più rappresentativi, e prelevati dai sondaggi evidenziati in Fig. 3.6, per ottenere una caratterizzazione fisica e meccanica dei litotipi costituenti il *Complesso continentale e vulcanico*, rinvenuti nel centro urbano di Cassino. Tra i dati ottenuti dalle analisi di laboratorio eseguite su questi campioni sono stati considerati i valori delle

caratteristiche fisiche, granulometriche e i valori degli indici di liquidità e di plasticità come mostrato in Tab. 3.1.

***Fig. 3.6** – Localizzazione dei sondaggi dai quali sono stati prelevati i campioni per analisi di laboratorio. I numeri indicano l'identificativo univoco del sondaggio riportato nella prima colonna di Tab. 3.1 come "BH_ID"*

***Tab. 3.1** - Tabella riassuntiva delle proprietà fisiche e meccaniche delle litologie rinvenute nel bacino di Cassino*

BH_ID	Sample_ID	From	To	γn (kN/mc)	γsat (kN/mc)	e	n (%)	S (%)	W_{LL} (%)	W_{PL} (%)	PI (%)	CI	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Activity
B001	Sa001	1.00	1.50	19.10	19.10	0.70	41.00	100.00	45.10	29.50	15.60	1.18		4.50	52.70	42.80	0.36
B001	Sa002	8.30	8.60										1.10	31.20	52.30	15.40	
B003	Sa003	2.00	2.40	19.00	19.00	0.71	41.60	100.00	61.00	38.30	22.70	1.48	0.20	1.00	41.90	56.90	0.40
B003	Sa004	5.50	6.00	17.00	17.00	1.08	52.00	99.50	49.50	44.00	5.50	5.10	0.50	2.70	18.30	78.50	0.07
B004	Sa005	2.50	2.90	18.80	18.90	0.68	40.30	97.10	53.40	36.10	17.30	1.60	0.10	3.50	44.40	52.00	0.33
B004	Sa006	7.00	7.50	16.80	16.80	1.10	52.30	100.00	89.10	56.10	33.00	1.37		0.30	21.30	78.40	0.42
B004	Sa007	13.50	14.00	17.30	17.90	1.11	52.50	89.20	57.40	39.70	17.70	1.20	3.20	9.00	22.90	64.90	0.27
B004	Sa008	18.20	18.70	19.40	19.50	0.57	36.40	96.70	81.10	36.00	45.10	1.32	0.60	4.40	47.50	47.50	0.95
B005	Sa009	1.00	1.50	19.10	19.10	0.71	41.50	100.00	51.20	32.30	18.90	1.27		4.30	48.90	46.80	0.40
B005	Sa010	5.50	5.90											42.40	38.10	19.50	
B006	Sa011	3.20	3.70	18.70	18.70	0.72	41.80	100.00	53.00	32.00	21.00	1.19		4.70	45.70	49.60	0.42
B006	Sa012	7.40	7.80										5.90	63.80	17.40	12.90	
B006	Sa013	12.50	13.00											51.30	35.90	12.80	
B007	Sa014	1.80	2.30	18.30	18.30	0.80	44.50	100.00	55.20	34.70	20.50	1.17	0.80	8.00	42.50	48.70	0.42
B007	Sa015	9.00	9.40										28.80	54.90	9.80	6.50	
B008	Sa016	21.00	21.60	18.80	19.00	0.65	39.50	95.50	47.30	34.40	12.90	1.77	0.50	3.10	30.60	65.80	0.20
B009	Sa017	8.00	8.50	17.20	17.30	1.06	51.40	99.00	84.10	47.10	37.00	1.17	0.50	1.80	24.30	73.40	0.50
B010	Sa018	1.50	2.10	19.40	19.60	0.68	40.60	93.60	40.20	27.70	12.50	1.31		5.50	52.30	42.20	0.30
B010	Sa019	3.00	3.70	18.20	18.20	0.90	47.30	100.00	53.70	36.90	16.80	1.15	0.30	2.80	35.10	61.80	0.27
B010	Sa020	7.00	7.70	17.50	17.60	1.00	49.90	97.80	67.00	48.20	18.80	1.56	0.30	4.90	23.10	71.70	0.26
B010	Sa021	14.10	14.70	17.20	17.30	1.17	53.80	97.70	50.90	35.40	15.50	0.52		5.30	36.40	58.30	0.27
B045	Sa022	4.50	5.00	18.50	19.20	0.78	43.80	83.90	56.60	36.00	20.60	1.58	1.70	6.10	54.70	37.50	0.55
B045	Sa023	7.50	8.10	18.60					63.10	38.70	24.40	1.39					
B094	Sa075	3.00	3.50	16.80	16.80	1.25	55.60	100.00	56.00	47.90	8.10	0.97		8.20	49.20	42.60	0.19
B104	Sa079	4.40	4.50											17.90	40.80	41.30	
B104	Sa080	5.40	5.90	17.20	17.70	1.01	50.30	90.20	55.50	34.60	20.90	0.99		6.30	41.00	52.70	0.40
B104	Sa081	5.90	6.35										1.10	11.90	43.70	43.30	
B104	Sa082	9.20	9.70	17.50	17.70	1.01	50.30	96.30	59.30	38.00	21.30	1.04		7.30	30.80	61.90	0.34
B104	Sa083	13.20	13.40											47.90	30.00	22.10	
B104	Sa084	18.50	18.70											26.80	51.10	22.10	
B104	Sa085	20.00	20.70	17.40	17.50	1.04	50.90	96.90	66.50	40.50	26.00	1.07	0.40	7.20	34.10	58.30	0.45
B104	Sa086	29.50	29.70											12.90	49.30	37.80	
B105	Sa087	2.80	3.30	18.10	18.40	0.82	45.20	92.60	58.70	33.10	25.60	1.15	2.60	8.40	42.20	46.80	0.55
B105	Sa088	4.50	4.70										0.20	14.20	34.70	50.90	
B105	Sa089	11.20	11.40										0.30	14.20	37.10	48.40	
B105	Sa090	15.00	15.50	17.10	17.70	1.01	50.30	87.90	63.10	37.20	25.90	1.12		0.50	36.00	63.50	0.41
B113	Sa091	3.00	3.60	19.10	19.20	0.66	39.70	98.20	35.10	26.50	8.60	1.18	4.90	28.60	30.40	36.10	0.24
B113	Sa092	14.05	14.20										0.10	55.50	32.40	12.00	
B127	Sa093	3.00	3.50	16.80	16.90	1.25	55.60	100.00	56.00	47.90	8.10	0.97		8.20	49.20	42.60	0.19
B127	Sa094	14.50	15.00											53.10	37.00	9.90	
B417	Sa178	12.30	12.70	20.90	21.20	0.46	31.70	90.40	28.60	26.10	2.50	5.24	55.20	15.50	18.40	10.90	0.23
B417	Sa179	21.00	21.40	21.30	21.70	0.41	29.00	85.20	31.80	20.90	10.90	1.74	34.40	20.90	19.00	25.70	0.42

Nel pur abbondante set di prove di laboratorio reperite non è presente alcuna prova di tipo dinamico o ciclico, come prove alla colonna risonante o taglio torsionale ciclico che hanno lo scopo di misurare in laboratorio il modulo di taglio dinamico e il fattore di smorzamento per differenti valori di deformazione, così da ottenere le curve di decadimento G(γ) e D(γ) utili ai fini delle analisi numeriche di risposta sismica locale.

3.1.4 Dati geofisici da misure di microtremore sismico a stazione singola

Al fine di avere sufficienti dati per estendere le dimensioni del volume di modellazione anche oltre i confini del centro urbano sono state reperite ed eseguite misure passive di microtremore a stazione singola oltre quelle già disponibili dai dataset citati. Ciò ha permesso di coprire le aree con scarsità o assenza di misure dirette di sondaggio. In particolare, è stato possibile elaborare tali indagini e ottenere valori puntuali di spessore dello strato risonante più superficiale (complesso continentale e vulcanico), utilizzandoli successivamente come verticali di "sondaggi virtuali". La metodologia utilizzata offre il vantaggio di poter eseguire le misure senza sorgenti sismiche esterne o attese di eventi naturali, oltre ad un basso costo esecutivo e il minimo impatto ambientale.

I microtremori identificano le vibrazioni ambientali del suolo generalmente comprese tra 0.2 e 20 Hz e possono essere originati da sorgenti naturali o antropiche (il moto ondoso, il vento ed il suo effetto su alberi o edifici, il funzionamento di macchinari industriali, il transito di veicoli, ecc.).

Sono state raccolte e in parte rielaborate 212 misure di microtremore a stazione singola da due precedenti campagne indagini svolte nei periodi 2009-2011 (Saroli et al., 2020) e 2022-2023 (Rompato, 2024); a quest'ultima campagna ha collaborato anche il sottoscritto. Questo dataset è stato integrato con ulteriori 56 misure, in parte provenienti da lavori professionali ed in parte eseguite ad hoc, che fanno salire il totale dei siti indagati a 268. La distribuzione dei punti di indagine (Fig. 3.7) segue i vertici di una maglia di circa 600 m di lato per le misure a scala di bacino e di circa 150 m di lato per le registrazioni all'interno del centro urbano.

Le misurazioni eseguite ad hoc sono state effettuate utilizzando sismometri a tre componenti di tipo LE3D realizzato da Lennartz Electronics (https://reftek.com/lennartz-sensors), accoppiato con un data-logger REFTEK 130 prodotto da Trimble Geospatial (https://geospatial.trimble.com/en/industries/surveying-and-mapping/monitoring), collegato ad un alimentatore da 12V e impostato su una frequenza di campionamento di 200 Hz. La durata della registrazione è stata di 50 minuti (Bard, 2004; Molnar et al., 2018).

Le misure così ottenute sono state successivamente processate secondo il metodo *Horizontal to Vertical Noise Ratio* (HVNR) (Nakamura, 1989). Esso si basa sulla stima del rapporto tra le componenti orizzontali (H) e verticali (V) dello spettro delle ampiezze di Fourier, calcolate per il segnale di microtremore registrato e suddiviso in finestre di durata omogenea di circa 40-60 secondi.

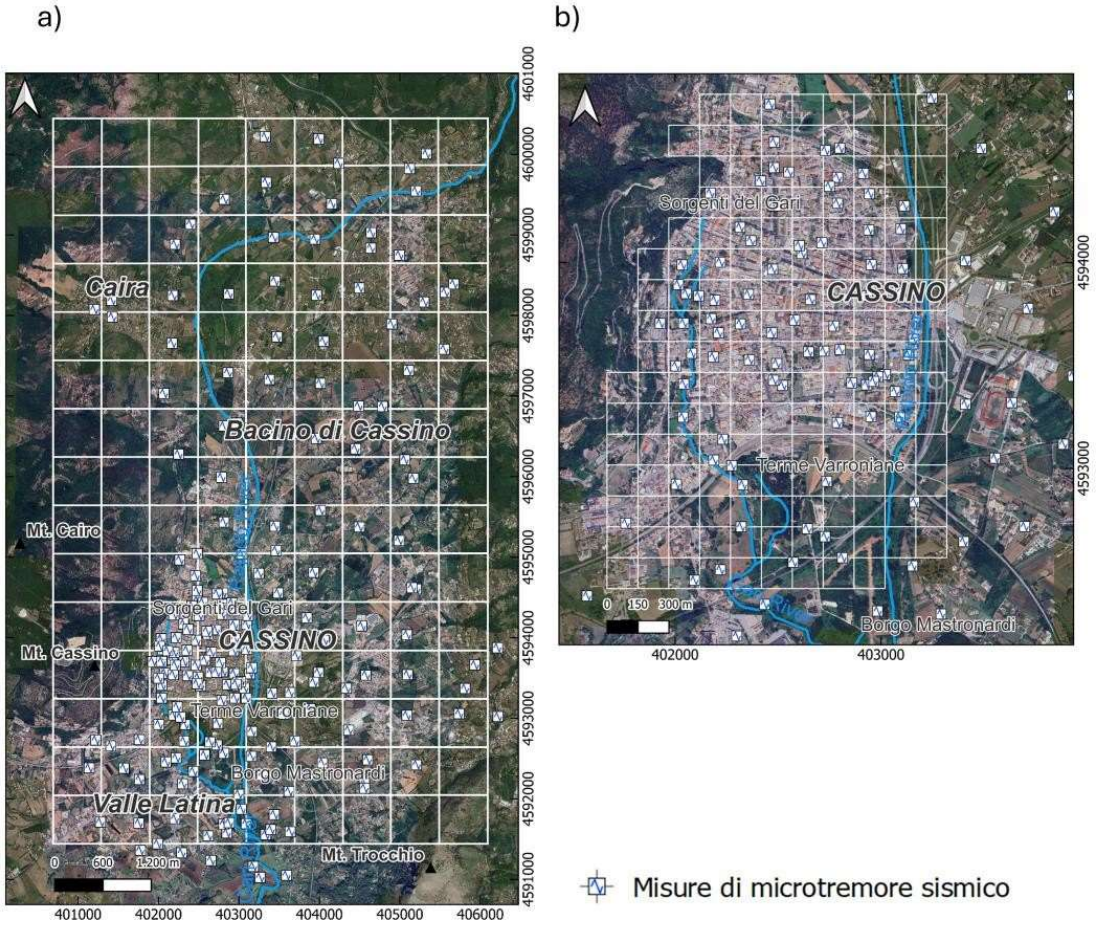


Fig. 3.7 - *Localizzazione delle misure di microtremore nell'area studio di Cassino; a) distribuzione delle misure alla scala di bacino con passo di campionamento di 600 m; b) distribuzione delle misure alla scala del centro urbano con passo di campionamento di 150 m*

Questo approccio fornisce preziose informazioni ai fini dell'analisi di risposta sismica del sito, in particolare permette di identificare una frequenza di risonanza del terreno, indicata come "f_0" (o il suo inverso, il periodo fondamentale di risonanza T), la quale si manifesta come un picco evidente nella curva HVNR (Saroli et al., 2020; Molnar et al., 2018; Chatelain et al., 2008; Fäh et al., 2008; Roten and Fäh, 2007).

Le analisi HVNR sono state elaborate con il software Geopsy secondo il processo di elaborazione schematizzato come segue:

1. divisione dei record in finestre temporali, la cui lunghezza dipende dalla rappresentatività statistica della curva HV da determinare (circa 45-60 secondi, con *overlap* del 25.00%);
2. calcolo della FFT (*Fast Foureir Transform*) per ciascuna finestra temporale, con l'applicazione di un filtro logaritmico Konno-Ohmachi con costante a 40.00 e *cosin taper* al 5.000% per smussare eventuali picchi dovuti a componenti antropiche (Konno e Ohmachi, 1998);
3. fusione dei due spettri di Fourier orizzontali utilizzando una media quadratica per ciascuna finestra temporale;
4. calcolo del rapporto spettrale H/V per ogni finestra temporale;

5. media geometrica dei rapporti spettrali H/V ottenuti dalle varie finestre, con il calcolo della deviazione standard.

Questa analisi delle curve H/V, in combinazione con gli spettri di Fourier dei dati e le relative analisi di direzionalità, aiuta a individuare picchi di frequenza di risonanza propria del sito (f_0) e individuare anomalie, come picchi spuri di origine antropica e contribuendo a migliorare la qualità dei dati di microtremore acquisiti (Fig. 3.8).

Successivamente è stato possibile correlare le f_0, calcolate dalle registrazioni eseguite nei pressi di sondaggi profondi disponibili, allo spessore degli strati appartenenti al complesso continentale e vulcanico e determinare la profondità da p.c. del contrasto di impedenza sismica (Saroli et al., 2020; Bard et al., 1980). Questi valori sono stati utilizzati per realizzare dei "sondaggi virtuali" digitalizzati all'interno del geodatabase. Questi dati aggiuntivi hanno permesso, in fase di modellazione, di avere valori noti da interpolare in quelle aree in cui la copertura di sondaggi profondi reali risultava scarsa o assente.

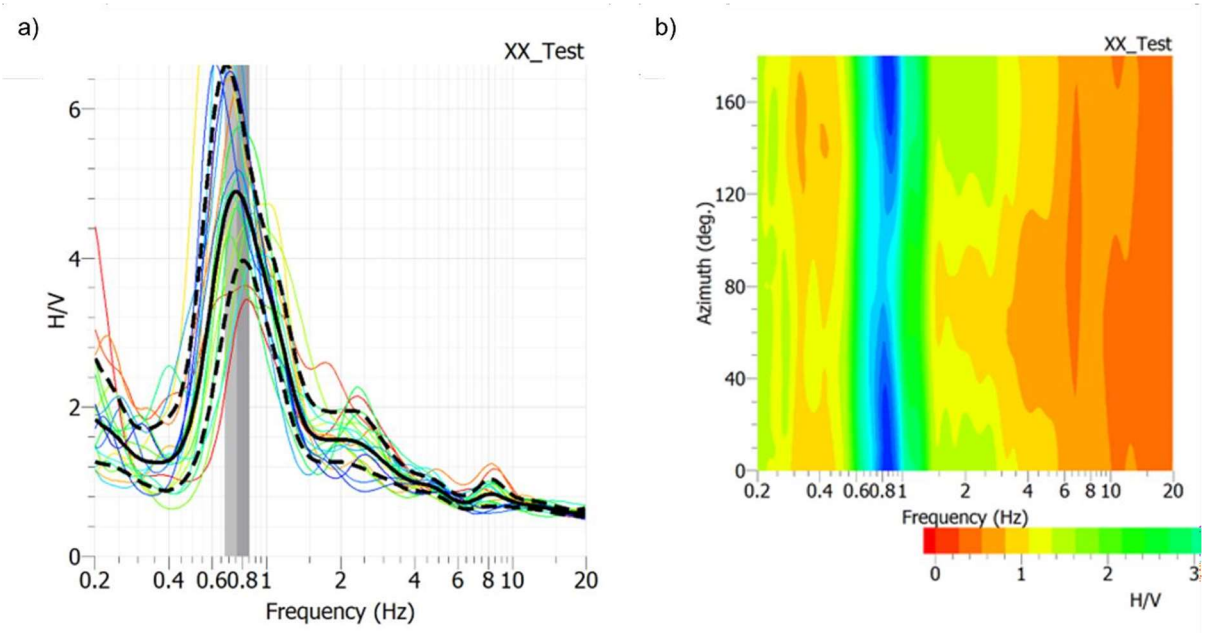


Fig. 3.8 - *Esempio di analisi HVNR della misura di microtremore ID 117.1323. a) curva dei rapporti spettrali H/V e frequenza di picco f_0; b) analisi di direzionalità dell'onda della stessa misura*

3.1.5 Dati geofisici da sismica di superficie e in foro

Al fine di caratterizzare i depositi del bacino di Cassino dal punto di vista sismico sono state raccolte ed analizzate le indagini sismiche presenti nel database della Microzonazione sismica di Livello 3 e da numerosi lavori professionali eseguiti nell'area di interesse. In particolare, nel database della microzonazione sono state reperite 50 indagini MASW alle quali se ne aggiungono altre 78 raccolte diversamente, per un totale di 128 prove (Fig. 3.9). L'indagine MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) viene utilizzata per la determinazione dei profili verticali della velocità delle onde di taglio (V_S) tramite inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh. Queste si trasmettono con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In

un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase.

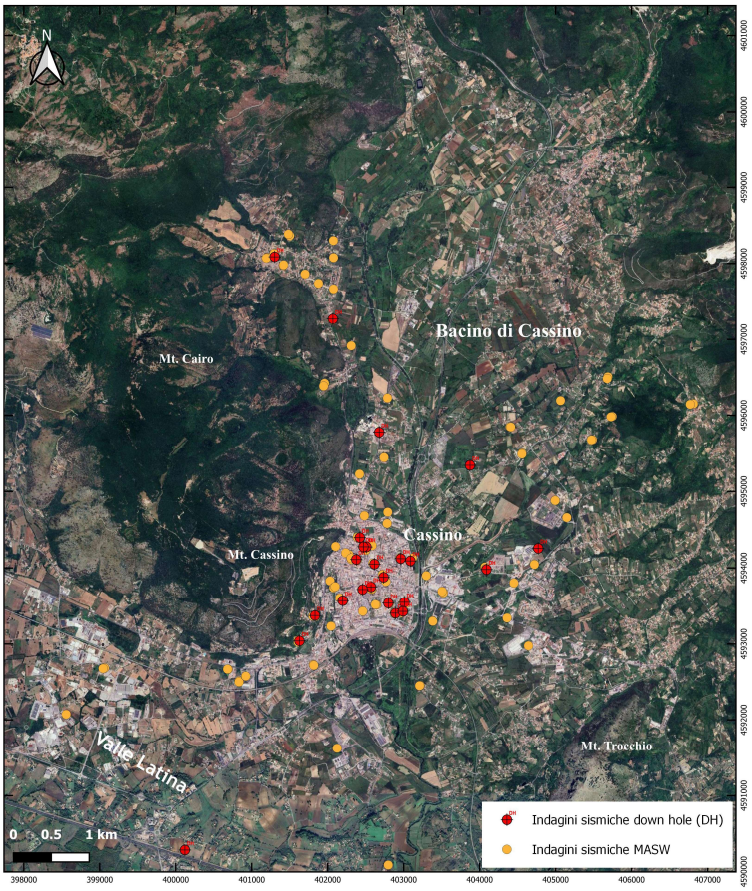


Fig. 3.9 - *Localizzazione dei fori di sondaggio nei quali sono state eseguite prove sismiche tipo down hole (DH) e dei siti nei quali sono state eseguite prove sismiche di superficie tipo MASW (indicate nell'immagine tramite il centroide dello stendimento)*

La prova viene eseguita posizionando nel sito di interesse uno "stendimento" di geofoni che registrano i tempi di arrivo delle onde generate da una fonte "energizzante" (una massa battente o, più raramente, piccole cariche esplose con il c.d. *fucile sismico*). I segnali registrati vengono poi analizzati con opportuni software che elaborano modelli sismo-stratigrafici che approssimano i dati rilevati, fornendo curve di variazione della velocità delle onde di taglio (V_S) con la profondità (Fig. 3.10).

L'esame delle indagini reperite ha posto dei problemi di omogeneizzazione dovuti principalmente a:

- numero di geofoni utilizzati per l'acquisizione: nella maggior parte dei casi 12 o 24, con la tendenza nel tempo ad una "standardizzazione" nell'uso di 24 geofoni;
- distanza intergeofonica: variabile in genere tra 1 e 2 m, in funzione soprattutto degli spazi a disposizione;
- dimensione dello stendimento: variabile in relazione al numero di geofoni utilizzati e alla distanza intergeofonica; sono state reperite quindi indagini con stendimenti di lunghezza minore di 20 m e, di contro, configurazioni lunghe fino a oltre 50 m.

Questi elementi "oggettivi" influiscono sulla qualità complessiva del segnale acquisito e sulla profondità massima investigata; quest'ultima è generalmente inferiore ai 30 m dal piano

campagna. L'elaborazione dei dati acquisiti e la successiva interpretazione da parte del singolo operatore costituiscono ulteriore elementi "soggettivi" il cui peso non è valutabile dalla semplice consultazione della documentazione di prova.

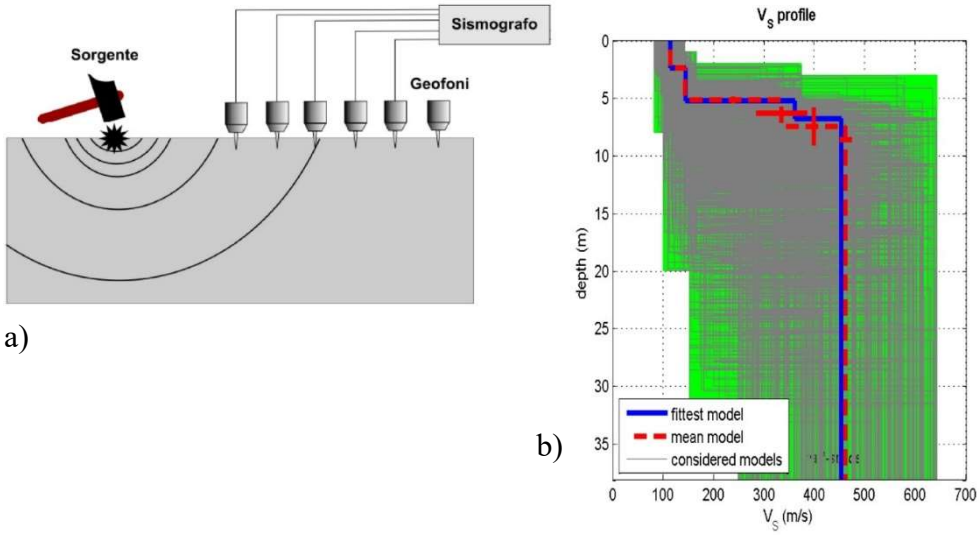


Fig. 3.10 - *Indagine MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves); a) schema di esecuzione ed acquisizione della prova; b) profili di Vs determinati dopo l'elaborazione dei dati acquisiti: insieme dei modelli "possibili" (linee verdi), modello medio (linea rossa tratteggiata), modello con migliore approssimazione (linea blu)*

Infine, sono stati analizzati i dati provenienti da 24 prove sismiche in foro tipo down-hole (DH) realizzate in fori di sondaggio per alcune opere in classe d'uso III e IV (NTC 2018) come prescritto dalla normativa regionale (dal Regolamento Regionale Lazio n. 2/2012 al vigente R.R. Lazio n. 26/2020) o per la Microzonazione Sismica di Livello 3. La distribuzione di queste indagini è chiaramente poco omogenea e legata alla localizzazione delle opere che ne necessitavano l'esecuzione (soprattutto edifici scolastici; Fig. 3.9).

Come l'indagine MASW anche le prove DH richiedono una sorgente esterna che possa generare un treno d'onda del quale rilevare i tempi di arrivo delle onde P ed S ad una sonda geofonica posta nel foro e costituita da geofoni orizzontali e verticali. La prova viene eseguita in un foro opportunamente attrezzato, in genere, con una tubazione in PVC resa solidale con il terreno circostante tramite cementazione dell'intercapedine. La sonda geofonica viene posta in registrazione all'interno del tubo ad intervalli di profondità variabili in genere tra 0.5 e 2 m. Anche in questo caso i segnali registrati vengono poi analizzati con opportuni software per ottenere le curve di variazione della velocità delle onde P ed S con la profondità (Fig. 3.11).

La profondità massima raggiunta con queste prove nell'area di interesse di questo studio è di 30 m dal piano campagna, ma, diversamente dalle indagini MASW, il limite non è dovuto alla "capacità di lettura" del metodo utilizzato ma semplicemente alla profondità di realizzazione dei fori di sondaggio, dettata dalla richiesta della normativa vigente del parametro Vs_{30} (o Vs_{eq} in caso di rinvenimento del bedrock sismico a profondità minori di 30 m).

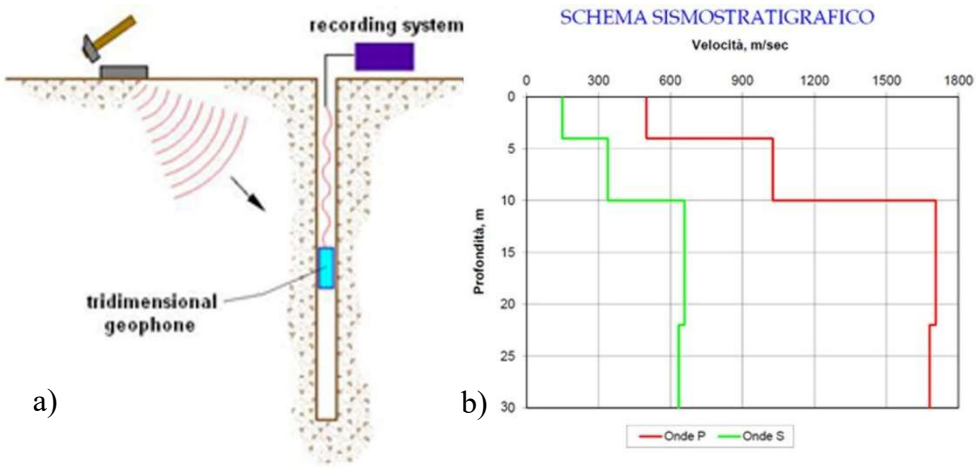


Fig. 3.11 - *Indagine DH (down-hole). a) schema di esecuzione ed acquisizione della prova; b) profili di Vp e Vs determinati dopo l'elaborazione dei dati acquisiti: profilo di velocità delle onde P in rosso, profilo di velocità delle onde S in verde*

3.1.6 Dati idrogeologici

L'area di studio è sede di un importante acquifero regionale ospitato dall'idrostruttura del complesso di piattaforma carbonatica, la quale nell'area di Cassino, risulta confinata e in pressione. Questa idrostruttura carbonatica profonda alimenta numerosi gruppi sorgentizi come, le sorgenti del Gari, la zona di Terme Varroniane e Borgo Mastronardi, oltre ad un secondo acquifero multifalda superficiale situato all'interno dei depositi quaternari del complesso continentale e vulcanico per fenomeni di filtrazione laterale e verticale dal basso verso l'alto. Di seguito vengono riportate le profondità piezometriche dei due acquiferi rilevate nelle verticali di sondaggio disponibili (Tab. 3.2 e Tab. 3.3).

Tab. 3.2 - *Profondità da p.c. della falda relativa all'acquifero carbonatico profondo individuata in sondaggio (i valori di profondità negativi indicano un livello piezometrico che risale al di sopra del p.c.)*

Borehole ID	Longitudine	Latitudine	Quota s.l.m. [m]	Prof. Tot [m]	Profondità Acquifero Carbonatico [m]
11	403449	4593190	35	215	1.3
12	403044	4592992	35	200	0.9
13	403250	4592299	40	150	7.9
14	403643	4591623	35	180	3.7
15	403268	4591429	30	116.4	0.7
16	403170	4591250	46	375	-2.2
17	402707	4592367	32.2	195	-0.5
18	402686	4592266	30.7	147.2	0.7
19	402280	4592425	31.9	150	1.8
20	401842	4592172	39.5	338	4.5
21	402665	4592676	34	110	0
22	402128	4593722	39.6	100	-1.4
24	403144	4593997	39.4	269	0.7
25	402729	4593556	36	185	-0.5
26	403428	4592672	40	220	5.2
27	404732	4589812	78.1	201	33.5
43	403114	4593404	35	180	0.1
46	402548	4591922	40.7	91	11
47	403192	4594823	44.8	256	0.9
336	401755	4593389	121	100	62.3
337	402777	4594524	40	330	1.3
399	401771	4593448	111.1	105.6	74

Tab. 3.3 - *Profondità da p.c. della falda relativa all'acquifero multifalda superficiale individuata in sondaggio*

Borehole ID	Longitudine	Latitudine	Quota s.l.m. [m]	Prof. Tot [m]	Prof. Acquifero Quaternario [m]
1	402891	4593405	35	30	1
2	402947	4593439	35	30	0.9
3	402954	4593429	35	30	0.8
4	402975	4593422	35	30	0.9
5	402635	4593495	35.9	15	0.8
6	402376	4594110	39.4	30	1
7	402570	4593750	37.3	30	0.9
10	402883	4593561	35.5	40	1.7
28	403099	4593400	35	66	0.7
29	403531	4593637	38.3	9	3.5
30	403393	4593179	35	61	1.7
31	403012	4592994	35	48	1.6
32	403301	4592315	40	65	7.3
33	402660	4592363	32.3	55	1.9
34	402674	4593557	36.2	89	0.1
35	402269	4593384	37.6	5	2
36	402372	4593452	37	9	0.8
37	402370	4593410	36.8	10.5	0.8
38	402367	4593488	37.3	15	0.8
39	402403	4593505	37.1	18	0.8
40	402389	4593549	37.4	15	0.8
41	402359	4593526	37.5	16	0.8
44	402198	4593570	38.6	30	1.5
54	402105	4593744	39.8	15	2
55	402006	4593741	40	15	2.7
56	402556	4593964	38.2	21	1.5
57	402593	4593951	38.1	30	1.5
58	402567	4593918	38	22	1.5
59	402601	4593898	37.8	30	1.5
60	402630	4593929	37.9	25	1.5
61	402961	4594121	40	30	2
62	403074	4594130	40	15	2
78	402736	4593877	37.3	30	5
79	402226	4593574	38.5	15	2
80	403088	4594091	40	30	2
81	402990	4594093	40	15	2
82	404948	4593510	53.5	20	4
83	402456	4594628	44.6	15	1.5
85	404770	4594255	52.7	30	3
86	402167	4593375	38.5	25	0.5
87	402098	4593591	39.4	10	0.2
88	402096	4593570	39.3	10	0.3
89	402103	4593551	39.2	10	0.2
90	402104	4593568	39.3	28	0.2
91	402107	4593578	39.3	22.5	0.4

Borehole ID	Longitudine	Latitudine	Quota s.l.m. [m]	Prof. Tot [m]	Prof. Acquifero Quaternario [m]
92	402678	4595778	47.5	30	2.6
93	402596	4595776	48.2	20	2.9
94	402137	4594178	40	15	1.9
113	402510	4594274	40	30	3
127	402422	4594396	41.1	31	3
164	403866	4593049	38.7	20	3.8
165	403837	4593174	37.9	20	6
166	402225	4594634	49.5	22	2.6
167	402244	4594665	47.5	22	3
168	402241	4594699	45	22	3
169	402231	4594754	48.4	10.5	3.5
174	402508	4594675	44.5	9.4	2.5
175	402519	4594725	44.2	8.3	2.5
176	402576	4594716	43.8	7.8	2
180	402477	4591551	35.2	31	4.5
181	402240	4591530	40	36	4.5
182	402057	4591405	41.9	30	4.5
184	402514	4591800	35	30	4.5
200	404556	4594072	48.8	5.2	1.2
201	398841	4592887	69.1	21	9
207	402378	4594216	39.9	167	1
293	403079	4593369	35	147.2	0.7
344	402042	4592110	40	50	1
345	402063	4592144	41.8	51	1
346	402013	4592087	35	50	1
353	403574	4593694	38.8	2.3	3.5
354	403396	4593871	40	10	3
363	404781	4589055	53.1	30	4
364	399805	4590727	75.7	25	15
365	398858	4592942	69.5	21	9
379	403466	4592826	38.3	5	5
394	405701	4594406	99.4	11	11
395	402748	4594583	40.7	30	0.8
396	404382	4593102	44.7	17.5	2
397	402213	4593133	37.1	20	2
398	402555	4594664	43.9	9.4	3
409	399833	4590756	75	25	16
410	399857	4590774	70	25	16
411	399806	4590777	75	25	17
412	399854	4590740	75	25	18
415	403207	4592527	39.1	30	2.6
416	403856	4595367	53.2	30	2
417	403894	4595335	54.6	30	3.2
517	403552	4600484	81.9	2.3	2.1
518	404554	4599466	85.4	9	4.5

3.2 Geodatabase

Dopo aver raccolto i dati di input per l'area di studio, questi sono stati organizzati e digitalizzati in tabelle Excel per creare un geodatabase relazionale. Un geodatabase relazionale è un tipo di database appositamente progettato per memorizzare e gestire dati georeferenziati, organizzati in tabelle e interconnessi tramite una chiave primaria. Le tabelle sono progettate in modo che ogni riga rappresenti un record singolo e ogni colonna rappresenti un attributo specifico di quel record. I punti di indagine, in termini di coordinate e quota sul livello del mare, sono stati geo-riferiti manualmente in ambiente QGIS. In particolare, i valori di quota per ogni punto indagine sono stati campionati dai modelli digitali di terreno (DEM) e da carta tecnica regionale (CTR).

La tabella principale è rappresentata dal file "*TAB_Site"* che contiene indicazioni sul sito in cui sono state realizzate le indagini e su tipo e numero delle indagini presenti (Tab. 3.4). La chiave primaria che permette di collegare questa tabella con quelle delle diverse indagini è rappresentata dal campo "*Site_ID*".

La tabella "*TAB_Borehole*" contiene informazioni circa i singoli sondaggi (Tab. 3.5): quota del boccapozzo sul livello del mare, profondità della perforazione, profondità della falda, presenza ed eventuale tipologie e profondità del bedrock, le prove eseguite in foro e i campioni prelevati. A questa tabella sono collegate, tramite il campo "*BH_ID*", la tabella relativa alle eventuali prove *down hole* eseguite (*TAB_DH*) e che riporta per ogni verticale gli intervalli di profondità con velocità omogenea delle onde P ed S, la tabella delle prove di laboratorio cui sono stati sottoposti i campioni prelevati (*TAB_Lab*), con i valori dei parametri geotecnici determinati, e la tabella "*TAB_Lithology*" che registra la profondità da piano campagna di tetto e letto delle litologie attraversate durante il sondaggio.

Tab. 3.4 - *Architettura del foglio TAB_Site. La colonna Site_ID rappresenta l'identificativo del sito di indagine (chiave primaria); gli altri campi contengono informazioni descrittive del sito e informazioni sul tipo e numero delle indagini realizzate*

Site_ID	Site_descr	Address	Proj_type	Project	Year	Borehole	BH_num	Sample	SPT	DH	Penet_test	MASW	SR	HVSR	Other
S003	Via Sant'Antonino 50	Via Sant'Antonino 50	Costruzione	Edificio privato	2006	0		0	0	0	2	0	0	0	
S004a	Mensa Folcara	Loc. Folcara	Costruzione	Edificio pubblico	2011	0		0	0	0	1	1	0	0	
S004b	Polo Folcara	Loc. Folcara	Costruzione	Edificio pubblico	1999	7	180-186	8	23	0	10	0	2	0	
S004c	Lettere	Loc. Folcara	Costruzione	Edificio pubblico	1998	3	344-346	7	11	0	0	0	0	0	
S004d	Lettere_int	Loc. Folcara	Costruzione	Edificio pubblico	1999		344-346								
S005	Ex ONMI	Via XX Settembre	Verifica sismica	Scuola	2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S
S006	CFP	Via Montecifalco	Verifica sismica	Scuola	2011	0	0	0	0	0	1	0	0	0	N
S007	Scuola D'Annunzio	Via Pascoli 46	Verifica sismica	Scuola	2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S
S008	Centro anziani	Via Fontanarosa	Costruzione	Edificio pubblico	2010	1	363	1	4	0	0	1	0	0	N
S009	Scuola Colosseo	Piazza Piave 1	Verifica sismica	Scuola	2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S
S010	Scuola Sant'Angelo in Th	Corso Trieste 53	Verifica sismica	Scuola	2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N
S011	Scuola Caira	Corso San Basilio	Verifica sismica	Scuola	2011	1	373	0	1	0	0	1	0	0	N
S012	Scuola Conte	Via XX Settembre 42	Verifica sismica	Scuola	2011	1	113	2	0	1	2	2	0	1	N
S013	Cabinovia		Costruzione	Infrastruttura	2002	2	54, 55	3	3	0	0	0	0	0	N
S014	Campo Boario	Campo Boario	Costruzione	Infrastruttura	2008	0		0	0	0	3	0	0	0	N
S015	Edra Hotel	SS Cassino-Formia	Costruzione	Albergo	2001	5	364, 409-412	15	0	0	0	0	0	0	N
S016	Rio Ascensione	Ponte Via Sprumaro		Frana	2008	0		0	0	0	3	0	0	0	N
S017	Chiesa Madre	Piazza San Benedetto	Riqualificazione		2011	0		0	0	0	1	1	0	0	N
S018	Elle Service	Via San Pasquale	Costruzione	Edificio privato	2009	1	395	2	4	0	0	0	0	0	S
S019	Villa della Meridiana	Via San Pasquale 125	Costruzione	Edificio privato	2009	3	128-130	1	0	0	0	0	0	0	N
S020	Stazione RAN	Via Montecassino													
S021	COGEI	Via Arno	Costruzione	Edificio privato	2009	3	8-10	6	6	0	3	0	0	0	N
S022	CC CEDIS	Via Casilina	Costruzione	Edificio commerciale	1994	4	454-457	4	8	0	9	0	0	0	
S023	D'Ambrosio	Via Sant'Angelo	Lottizzazione		1993	3		3	0	0	3	0	0	0	N
S024	Panorama	Via Casilina	Costruzione	Edificio commerciale	2000	1	396	0	0	0	0	0	0	0	S
S025	SAL	Via Casilina	Lottizzazione		2003	4	149-152	7	0	0	3	0	0	0	N
S026	ALFA DOMUS	Via Puncicardi	Piano Partic.		1994	2	164-165	3	0	0	2	0	0	0	N
S027a	Mattatoio comunale	Via San Marco 23	Recupero edilizio	Edificio pubblico	1998	1	397	0	0	0	0	0	0	0	N
S027b	Historiale	Via San Marco 23	Costruzione	Edificio pubblico	2010	1	267	1	1	0	0	1	0	0	N
S028	PPA San Silvestro	Loc. San Silvestro	PPA		1997	4	166-169	5	3	0	4	0	0	0	N
S029	Teatro Manzoni	Piazza Diamare	Costruzione	Edificio pubblico	1999	1	103	2	6	0	0	0	0	0	S
S030	Variante San Pasquale	Loc. San Pasquale	Variante PRG		2007	4	174-176, 398	0	0	0	3	0	0	0	N
S031a	Reno de' Medici	Via Casilina	Verifica	Discarica	2009	6	387-392	0	0	0	0	0	0	0	N
S031b	Reno de' Medici	Via Casilina	Verifica	Silos	2009	2	385-386	0	0	0	0	0	0	0	S
S031c	Reno de' Medici	Via Casilina	Costruzione	Discarica	2010	3	580-582	0	0	0	0	0	0	0	N
S031d	Reno de' Medici	Via Casilina	Costruzione	Discarica	2006	5	202-206	5	0	0	0	0	0	0	N
S031e	Reno de' Medici	Via Casilina	Verifica idraulica			2	583-584	0	0	0	0	0	0	0	N

Tab. 3.5 - *Architettura del foglio TAB_Borehole. La colonna BH_ID rappresenta l'identificativo del singolo sondaggio (chiave primaria per il collegamento con le tabelle delle singole prove relative al sondaggio); gli altri campi contengono informazioni su quota s.l.m. e profondità del sondaggio, sulla falda e sulle prove eseguite e i campioni prelevati*

Site_ID	BH_ID	x	y	Elev_asl	Depth	BH_type	Water_tabR	Water_tabS	Carb_Wt	Quat_Wt	Bedrock	n_BR	BR_type	Carb_BRdpt	Oth_BRdpt	Sample	Sample_Lab	SPT	DH	Pkt_P	Vane_test
S001a	B445	404619.1	4593519.8	45.00	21.00	BH	3.20	3.20		3.20	N	0				0	0	2	0	S	N
S001a	B452	404648.2	4593535.4	45.00	21.00	BH	3.00	3.00		3.00	N	0				2	0	2	0	S	N
S002	B002	402977.9	4593461.9	36.10	30.00	BH	7.80	1.00		1.00	N	0				0	0	0	0	S	N
S002	B003	402972.8	4593433.8	35.90	30.00	BH	5.00	1.00		1.00	N	0				2	0	1	0	S	N
S002	B004	403006.7	4593423.8	36.00	30.00	BH	3.00	1.00		1.00	N	0				4	0	0	0	S	N
S004b	B180	402480.7	4591547.3	35.10	31.00	BH	4.50	4.50		4.50	N	0				2	0	5	0	N	N
S004b	B181	402243.7	4591527.2	40.00	36.00	BH	4.50	4.50		4.50	N	0				2	0	6	0	N	N
S004b	B182	402174.1	4591441.5	42.20	30.00	BH	4.50	4.50		4.50	N	0				2	0	6	0	N	N
S004b	B184	402535.1	4591800.7	34.90	30.00	BH	4.50	4.50		4.50	N	0				2	0	6	0	N	N
S004b	B183	402116.0	4591630.9	40.00	31.00	BH					N	0				0	0	0	0	N	N
S004b	B185	402215.4	4591696.9	40.00	30.00	BH					N	0				0	0	0	0	N	N
S004b	B186	402175.5	4591771.7	40.00	30.00	BH					N	0				0	0	0	0	N	N
S004c	B344	402251.8	4591736.6	40.00	50.00	BH	1.00	1.00		1.00	N	0				3	0	3	0	S	S
S004c	B345	402262.7	4591750.0	39.90	51.00	BH	1.00	1.00		1.00	N	0				3	0	4	0	S	S
S004c	B346	402241.1	4591724.1	38.40	50.00	BH	1.00	1.00		1.00	N	0				1	0	4	0	S	S
S008	B363	404785.5	4589052.1	53.70	30.00	BH	4.00	4.00		4.00	N	0				1	0	4	0	S	N
S011	B373	401305.2	4598096.9	137.00	20.00	BH					N	0				0	0	1	0	N	N
S012	B113	402509.6	4594274.2	39.50	30.00	BH	3.00	3.00		3.00	N	0				2	0	0	1	S	N
S013	B54	402115.4	4593742.0	36.50	15.00	BH	2.00	2.00		2.00	N	0				2	2	1	0	N	N
S013	B55	401993.3	4593734.2	39.00	15.00	BH	2.70	2.70		2.70	N	0				1	1	2	0	N	N
S015	B364	399805.4	4590727.0	76.00	25.00	BH	15.00	15.00		15.00	N	0				3	2	0	0	N	N
S015	B412	399854.5	4590740.2	75.00	25.00	BH	18.00	18.00		18.00	N	0				3	0	0	0	N	N
S015	B410	399857.3	4590774.0	70.00	25.00	BH	16.00	16.00		16.00	N	0				3	0	0	0	N	N
S015	B411	399806.0	4590777.5	76.80	25.00	BH	17.00	17.00		17.00	N	0				3	0	0	0	N	N
S015	B409	399833.4	4590755.7	76.00	25.00	BH	16.00	16.00		16.00	N	0				3	0	0	0	N	N
S018	B395	402752.3	4594580.0	41.60	30.00	BH	0.80	0.80		0.80	N	0				2	1	4	0	N	N
S019	B128	404845.0	4595810.4	88.40	21.00	BH					N	0				1	1	0	0	S	N
S019	B129	404881.2	4595806.7	89.20	18.00	BH					N	0				0	0	0	0	S	N
S019	B130	404853.8	4595795.0	88.40	28.50	BH					N	0				0	0	0	0	S	N
S021	B8	402797.6	4593538.6	35.80	40.00	BH					N	0				1	1	0	0	S	N
S021	B9	402844.5	4593550.1	35.90	30.00	BH					N	0				1	1	2	0	S	N
S021	B10	402896.5	4593557.7	36.30	40.00	BH	1.70	1.70		1.70	N	0				4	4	4	0	S	N
S022	B454	405408.4	4592909.4	67.00	21.50	BH	1.50	1.50		1.50	N	0				1	1	2	0	S	N
S022	B455	405358.1	4592899.3	66.00	21.00	BH	1.50	1.50		1.50	N	0				1	1	2	0	S	N

La compilazione della tabella "*TAB_Lithology*" ha richiesto l'utilizzo di una classificazione geologica/litologica comune per le stratigrafie reperite. Questo aspetto ha

richiesto particolare attenzione in quanto è stato necessario omogenizzare tra loro le numerose stratigrafie provenienti da campagne di indagine diverse per finalità ed estensione e altrettanto discontinue nel tempo. Al fine di ottenere un set di dati di input coerenti tra loro sono stati analizzati i report di sondaggio con l'obbiettivo di individuare e omogenizzare tra loro i principali litotipi attraversati nei sondaggi. Sono stati utilizzati sondaggi poco profondi ad alta risoluzione verticale per individuare le principali litologie sabbiose e ghiaiose alternate nel riempimento limoso-argilloso del complesso continentale e vulcanico (l), mentre sondaggi profondi che intercettano il complesso lago-mare, il complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori e il complesso marino di piattaforma carbonatica sono stati determinanti per definire la geometria delle superfici di tetto dei litotipi del bedrock (Figg. da 3.12 a 3.14).

Con questa metodologia è stato possibile identificate le seguenti litologie principali relative al bacino di Cassino e ricorrenti nella maggior parte delle verticali analizzate (dal più recente al più antico):

1. complesso continentale e complesso vulcanico (***l***) (Pleistocene – Olocene) costituito da:
    - terreno di riporto (***t***)
    - travertino (***tr***)
    - limo argilloso e argilla limosa (***la***)
    - sabbia limosa (***s***)
    - ghiaia (***g***);
2. complesso lago mare (puddinghe allotigene) (***p***) (Messiniano lago mare Pliocene inf.);
3. complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori (***f***) (Tortoniano – Messiniano);
4. complesso marino di piattaforma carbonatica (***c***) (Lias inf. – Tortoniano inf.).

Inoltre, per assicurare l'omogeneità delle litologie all'interno dell'articolato dataset di Cassino, sono state eseguite inizialmente dodici sezioni di correlazione all'interno del centro abitato. La Fig. 3.15 mostra l'ubicazione delle sezioni, mentre in Appendice A si riportano tutte le sezioni elaborate. Questo approccio ha permesso un'analisi dettagliata delle variazioni litologiche laterali e verticali presenti nel sottosuolo urbano, consentendo l'individuazione degli orizzonti omologhi tra i diversi sondaggi. La realizzazione di tali sezioni è risultata cruciale per garantire coerenza e coesione all'interno del dataset geologico. Attraverso queste sezioni, è stato possibile stabilire una correlazione preliminare tra gli strati sabbioso-ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi, alternati alla matrice limoso-argillosa, che caratterizzano il riempimento alluvionale del bacino di Cassino.

Questo approccio ha fornito una base solida per la validazione dell'omogeneizzazione delle stratigrafie presenti nella zona di studio, contribuendo significativamente all'analisi e all'interpretazione dei dati geologici dell'area (Fig. 3.16).

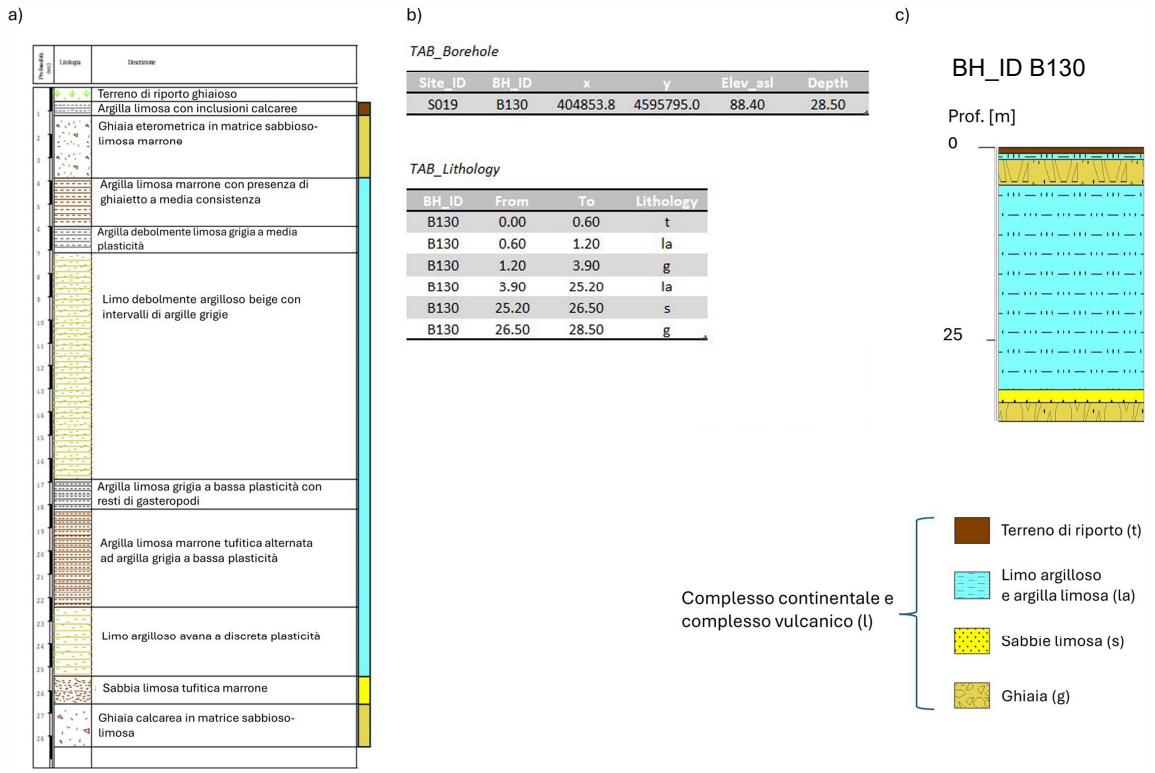


Fig. 3.12 *– Esempio di omogeneizzazione e digitalizzazione di una stratigrafia di sondaggio poco profondo. a) stratigrafia proveniente dal database del progetto di Microzonazione Sismica di Livello 1 (Scarascia Mugnozza et al., 2012) con descrizione dei litotipi attraversati in fase di scavo; b) assegnazione della chiave primaria (BH_ID B130) e digitalizzazione della stratigrafia nelle schede "TAB_Borehole" e "TAB_Lithology" secondo una litostratigrafia comune; c) sondaggio digitalizzato secondo le litologie definite per il bacino di Cassino*

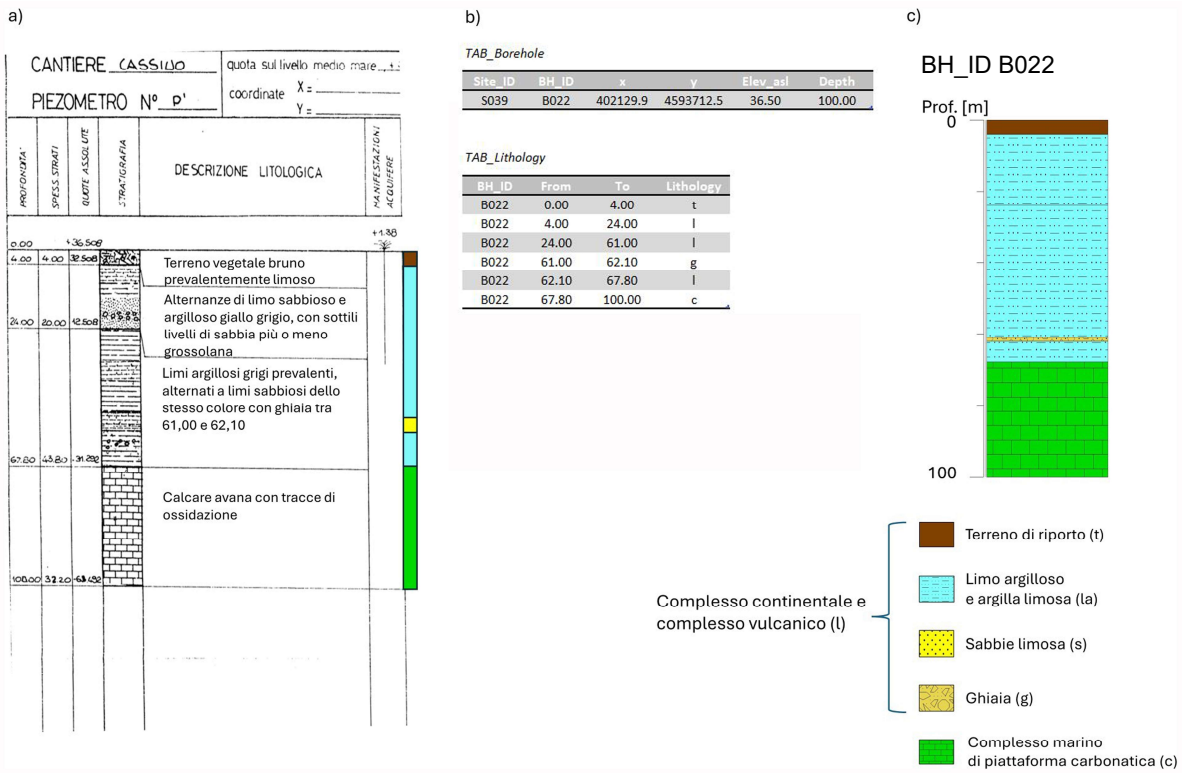


Fig. 3.13 *- Esempio di omogeneizzazione e digitalizzazione di una stratigrafia di sondaggio profondo. a) stratigrafia proveniente dal database del progetto di Microzonazione Sismica di Livello 1 (Scarascia Mugnozza et al., 2012) con descrizione dei litotipi attraversati in fase di scavo; b) assegnazione della chiave primaria (BH_ID B022) e digitalizzazione della stratigrafia nelle schede "TAB_Borehole" e "TAB_Lithology" secondo una litostratigrafia comune; c) sondaggio digitalizzato secondo le litologie definite per il bacino di Cassino*

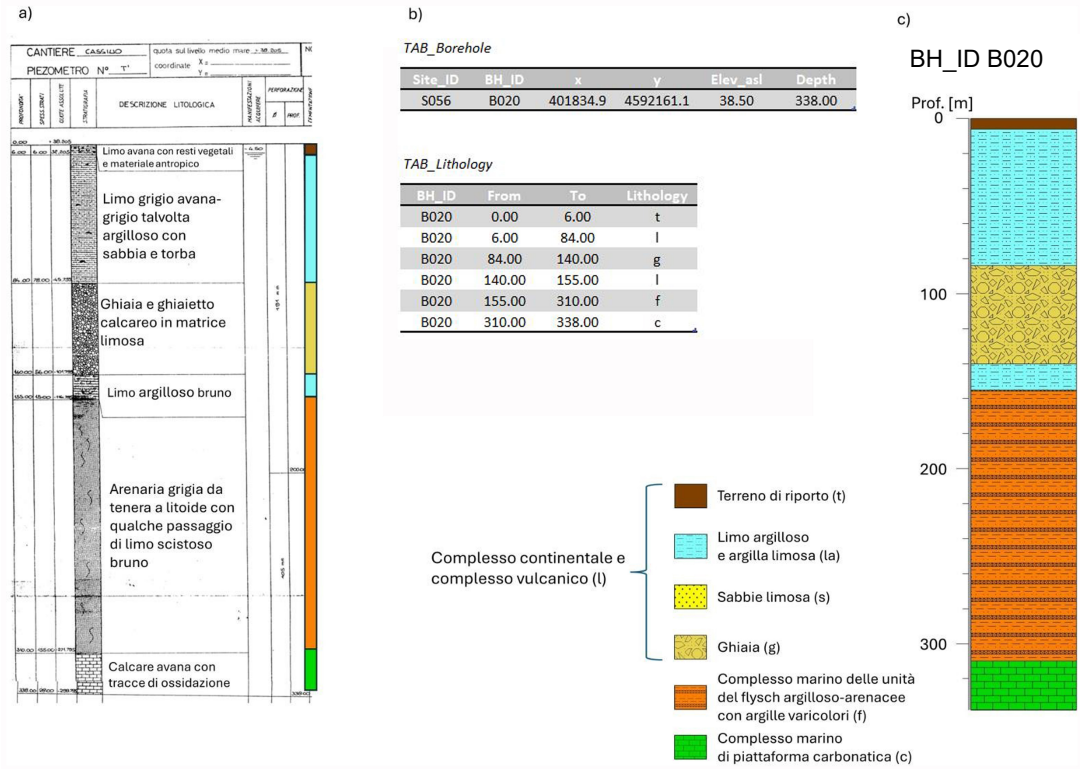


Fig. 3.14 - *Esempio di omogeneizzazione e digitalizzazione di una stratigrafia di sondaggio profondo. a) stratigrafia proveniente dal database del progetto di Microzonazione Sismica di Livello 1 (Scarascia Mugnozza et al., 2012) con descrizione dei litotipi attraversati in fase di scavo; b) assegnazione della chiave primaria (BH_ID B020) e digitalizzazione della stratigrafia nelle schede "TAB_Borehole" e "TAB_Lithology" secondo una litostratigrafia comune; c) sondaggio digitalizzato secondo le litologie definite per il bacino di Cassino*

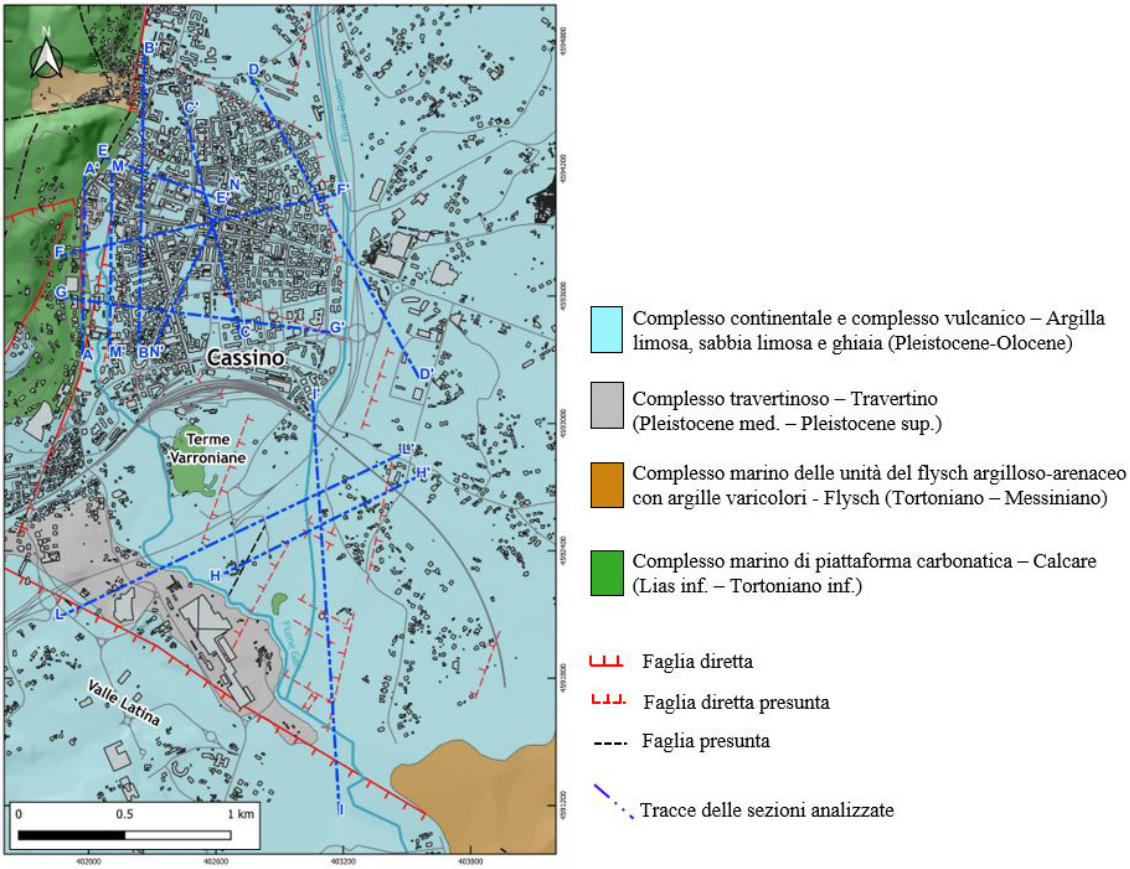


Fig. 3.15 - *Localizzazione delle tracce delle sezioni preliminari svolte nell'area studio del centro urbano di Cassino. L'elaborazione delle sezioni è riportata in Appendice A*

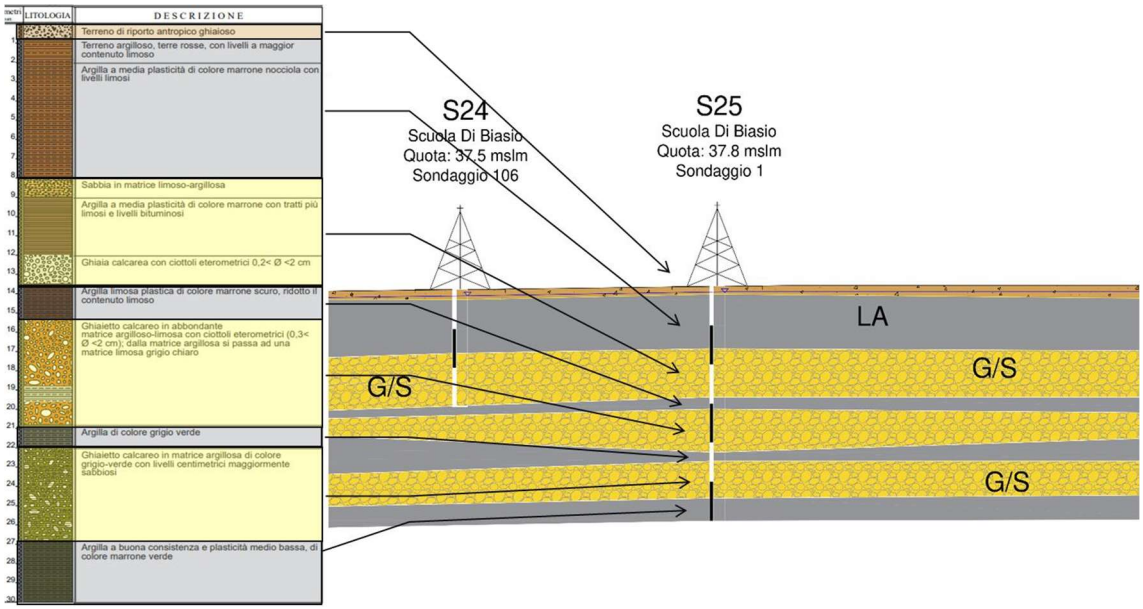


Fig. 3.16 - *Esempio di sezione geologica di correlazione preliminare dei sondaggi per il caso studio di Cassino*

Anche per le prove penetrometriche il collegamento tra la tabella principale *TAB_Site* e la *TAB_Penetrometer* è garantito dalla chiave primaria *Site_ID*, Nella *TAB_Penetrometer* per ogni prova penetrometrica è riportata l'ubicazione e la quota del sito sul livello del mare, la profondità della prova e il tipo di prova (Tab. 3.6). La chiave *PN_ID* collega questa tabella con la scheda *PN_Data* che contiene tutti i dati base delle prove: numero di colpi in funzione della penetrazione nelle prove dinamiche e resistenza laterale e alla punta per le prove statiche oltre alla sovrappressione dell'acqua per le sole prove CPTu. Queste prove sono state utilizzate, anche rielaborandole, per integrare i dati geotecnici disponibili dalle prove di laboratorio dove questi ultimi erano mancanti del tutto o in parte.

Tab. 3.6 - *Architettura del foglio TAB_Penetrometer. La colonna PN_ID rappresenta l'identificativo della singola prova (chiave primaria per il collegamento con la tabella PN_Data)*

Site_ID	PN_ID	x	y	Elev_asl	Depth	PN_type
S002	P001	402982.90	4593442.91	36.00	18.86	CPTu
S002	P002	402998.34	4593455.67	36.20	17.42	CPTu
S002	P003	403012.45	4593442.91	36.00	8.11	CPTu
S002	P004	403001.37	4593418.39	35.90	25.06	CPTu
S002	P005	402981.55	4593413.69	35.90	15.25	CPTu
S002	P006	402982.22	4593430.48	36.00	17.06	CPTu
S002	P007	402984.57	4593461.71	35.90	20.10	CPTu
S002	P008	403013.79	4593466.75	36.10	20.18	CPTu
S003	P009	406263.06	4593801.50	127.50	9.20	DPSH
S003	P010	406270.94	4593830.51	127.50	8.80	DPSH
S012	P011	402502.77	4594239.05	39.50	15.00	DPSH
S012	P012	402504.77	4594305.50	37.30	12.95	CPTu
S014	P013	402634.00	4593592.00	35.20	2.80	DPL
S014	P014	402610.00	4593554.00	35.90	3.50	DPL
S014	P015	402660.00	4593558.00	36.80	3.20	DPL
S016	P016	407062.00	4594568.00	201.30	1.80	DPL
S016	P017	407111.00	4594630.00	212.50	1.50	DPL
S016	P018	407129.00	4594650.00	220.60	2.40	DPL
S021	P019	402835.34	4593542.98	35.80	15.22	CPTe
S021	P020	402805.57	4593547.34	35.90	14.41	CPTe
S021	P021	402899.63	4593569.96	36.30	15.98	CPTe

Le indagini MASW, anch'esse collegate al sito di esecuzione delle prove tramite la chiave primaria *Site_ID*, sono raccolte nella scheda *TAB_Linear*, nella quale inserire in futuro anche altre tipologie di prove lineari, come prove RE.MI., ESAC, stendimenti di sismica a rifrazione, tomografie elettriche, già presenti in alcuni fascicoli di indagine ma non considerate ai fini del presente studio; questa tabella contiene informazioni sulla localizzazione della prova e dati geometrici e di configurazione (lunghezza dello stendimento, numero di geofoni, distanza intergeofonica), oltre al valore V_{S30} e alla categoria di suolo che viene individuata ai sensi delle NTC 2018. Questa tabella è collegata tramite la chiave *LN_ID* alla tabella *LN_Data* nella quale si riportano, per ogni prova, gli intervalli di profondità con velocità omogenea delle onde S.

Infine, la scheda *TAB_HVSR* contiene tutte le informazioni di localizzazione di ciascuna prova di microtremore a stazione singola e i dati di frequenza naturale f_0 del sito e del periodo corrispondente. Anche questa scheda è collegata a quella principale, *TAB_Site*, tramite la chiave primaria *Site_ID*.

3.3 Modello geologico dell'area di studio

L'area studio di Cassino è stata interessata dalla realizzazione di due modelli geologici a scale diverse. Il primo modello proposto copre l'intera estensione del bacino intermontano di Cassino, mentre un secondo modello più dettagliato si concentra sull'area specifica del centro urbano (Fig. 3.17). L'obiettivo è stato quello di sfruttare entrambi gli approcci di modellazione al fine di evidenziare al meglio le caratteristiche geologiche peculiari dell'area e delle diverse scale di rappresentazione. Con questa metodologia si è voluto dare seguito alle risultanze dello studio condotto in un precedente dottorato (Rompato, 2024).

3.3.1 Modello geologico alla scala di bacino

Il modello geologico alla scala di bacino intermontano si estende su una superficie di circa 14*x*7.5 km e raggiunge una profondità di circa 450 metri dal piano della campagna; è stato sviluppato facendo riferimento alla successione stratigrafica già presentata nel paragrafo 3.2 (dal più recente al più antico):

1. complesso continentale e complesso vulcanico (***l***) (Pleistocene – Olocene) costituito da:
    - terreno di riporto (***t***)
    - travertino (***tr***)
    - limo argilloso e argilla limosa (***la***)
    - sabbia limosa (***s***)
    - ghiaia (***g***);
2. complesso lago mare (puddinghe allotigene) (***p***) (Messiniano lago mare Pliocene inf.);
3. complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori (***f***) (Tortoniano – Messiniano);
4. complesso marino di piattaforma carbonatica (***c***) (Lias inf. – Tortoniano inf.).

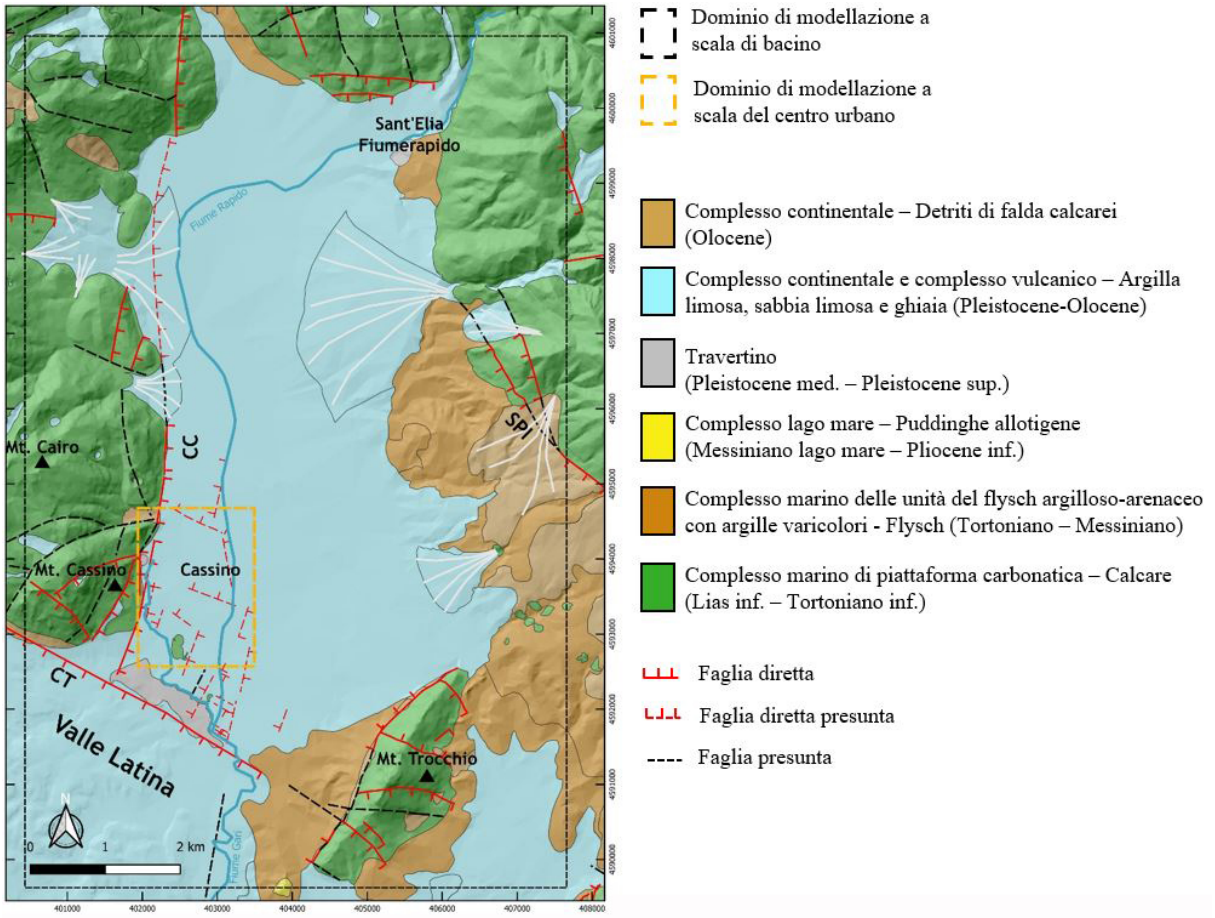


Fig. 3.17 - *Localizzazione dei domini di modellazione per l'area studio del bacino di cassino. In mappa sono evidenziate le sigle delle faglie: CC) Faglia Caira-Cassino; CT) Faglia Cassino-Monte Trocchio; SPI) Faglia Atina-S. Pietro infine*

Data l'estensione dell'area da modellare e dell'alto numero di dati disponibili nel geodatabase realizzato, è stata eseguita un'analisi preliminare dei sondaggi al fine di omogeneizzare le molteplici stratigrafie provenienti da varie campagne di indagine e ottenere un set di dati di input coerente. I sondaggi poco profondi disponibili (profondità fino a 100 m) offrono un'elevata risoluzione lungo la verticale di perforazione. Questi sondaggi, in particolare, si sono rivelati estremamente utili nell'individuare e correlare gli strati di litologia sabbiosa e ghiaiosa presenti nel riempimento limoso-argilloso del complesso continentale e vulcanico (***l***). I sondaggi più profondi raggiungono tipicamente il complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori (***f***) e il complesso marino di piattaforma carbonatica (***c***). I dati sono stati sfruttati per ricostruire i rapporti tra queste due litologie e l'assetto generale del substrato geologico. Dall'analisi preliminare dei sondaggi si evidenzia un'area in cui il Complesso marino di piattaforma carbonatica (***c***) si rinviene a quote molto più elevate rispetto al resto della piana e risulta in contatto stratigrafico direttamente con il complesso continentale e vulcanico (***l***). Questa zona risulta distribuita nel settore sud-occidentale del bacino compresa fra il centro urbano, le Terme Varroniane e Borgo Mastronardi (Figg. 3.18 e 3.19).

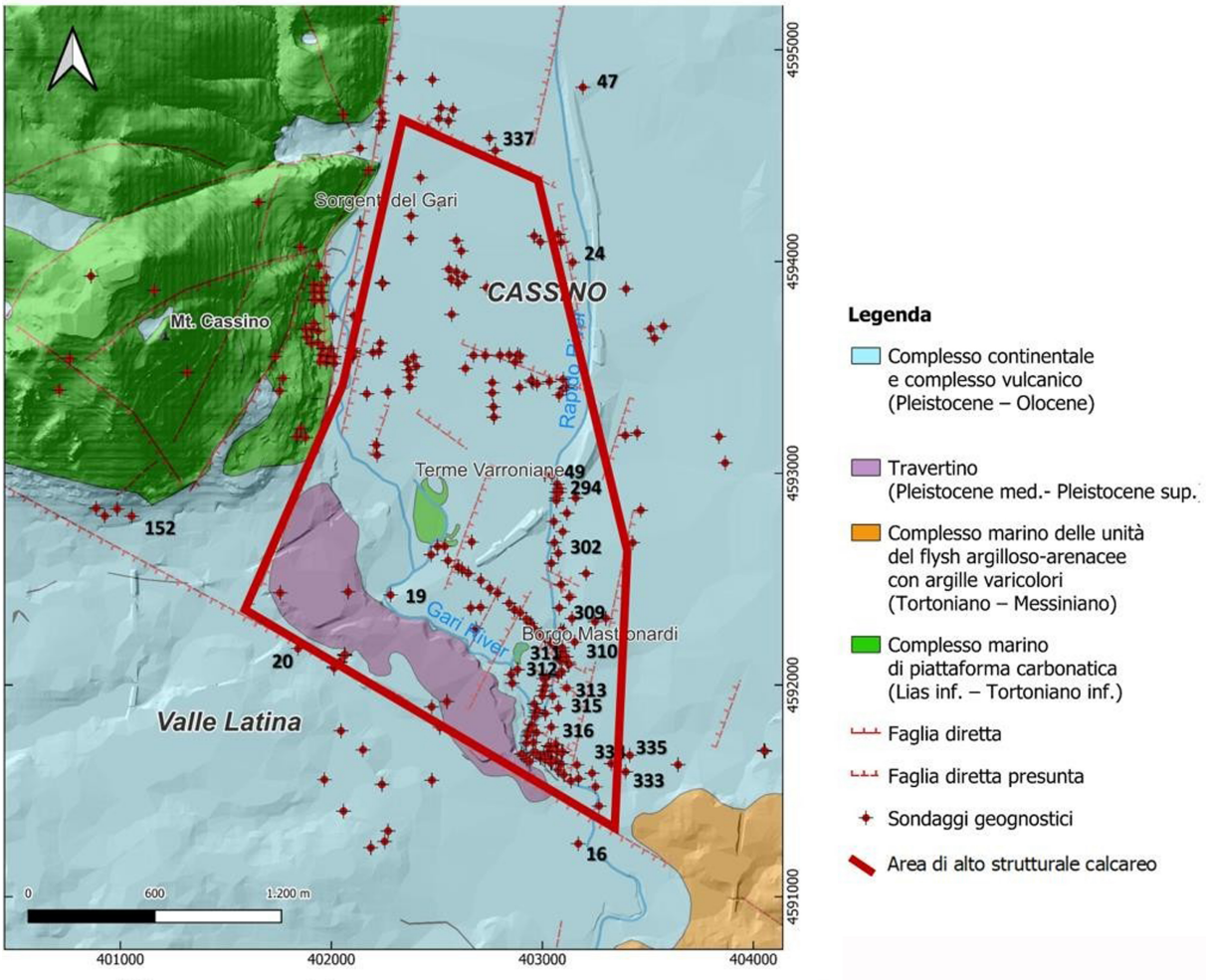


Fig. 3.18 - *Localizzazione dei sondaggi geognostici utilizzai per identificare la porzione di complesso marino di piattaforma carbonatica (**c**) che risulta rialzata rispetto al resto del bacino; il poligono in rosso delimita i confini preliminari della struttura (la numerazione indentifica la chiave BH_ID con cui sono stati catalogati i sondaggi nel geodatabase)*

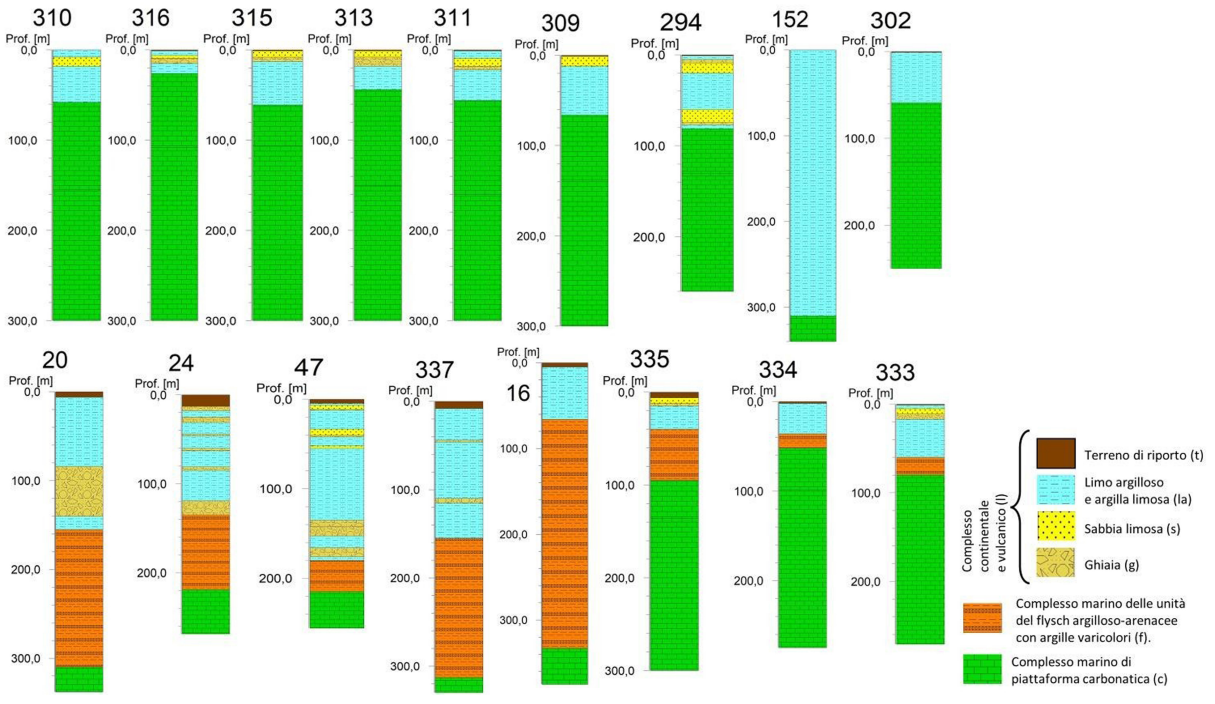


Fig. 3.19 – *Stratigrafie dei sondaggi indicati in figura 3.14 (la numerazione indentifica la chiave BH_ID con cui sono stati catalogati i sondaggi nel geodatabase)*

Nella modellazione dell'area alla scala di bacino, l'attenzione è stata posta particolarmente nella definizione della geometria della superficie del tetto del complesso marino di piattaforma carbonatica (***c***) e del complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori (***f***). A questa scala le indagini dirette disponibili sono risultate in numero decisamente inferiore o totalmente mancanti in alcune zone; questo ha reso difficoltosa la correlazione tra indagini poste a distanze reciproche di diverse centinaia di metri.

Per ovviare a questa problematica si è fatto ricorso ad un'estesa campagna di misure di microtremore eseguite lungo tutto il bacino al fine di individuare la distribuzione delle frequenze fondamentali (f_0) dell'area (Fig. 3.20), in quanto questo parametro identifica un contrasto di impedenza correlabile con il contatto tra i complessi costituenti il bedrock e il complesso continentale e vulcanico.

Il principio sfruttato per eseguire queste correlazioni, già anticipato nel paragrafo 1.2.3, è conseguenza del fatto che i microtremori sono dati da onde di volume provenienti dal substrato rigido, all'interno del quale il rapporto spettrale tra la media delle componenti orizzontali (*H*) e quella verticale (*V*) è prossimo ad 1 (spettro piatto). La componente orizzontale delle onde di volume viene modificata all'interfaccia bedrock/suolo (quest'ultimo rappresentato nel caso del bacino di Cassino dal complesso continentale e vulcanico) e alle interfacce presenti nella verticale stratigrafica del suolo stesso, mentre la componente verticale non subisce sostanziali variazioni (Fig. 3.20). Il valore del rapporto spettrale H/V e la frequenza corrispondente al picco di tale rapporto forniscono informazioni sull'amplificazione della componente di moto orizzontale e sullo spessore dei sedimenti deformabili. Tanto maggiore è il contrasto di impedenza tra bedrock e depositi di copertura, tanto maggiore sarà il valore del rapporto; tanto maggiore è la frequenza a cui si evidenzia il picco del rapporto, tanto più prossimo alla superficie risulterà il limite bedrock/coperture.

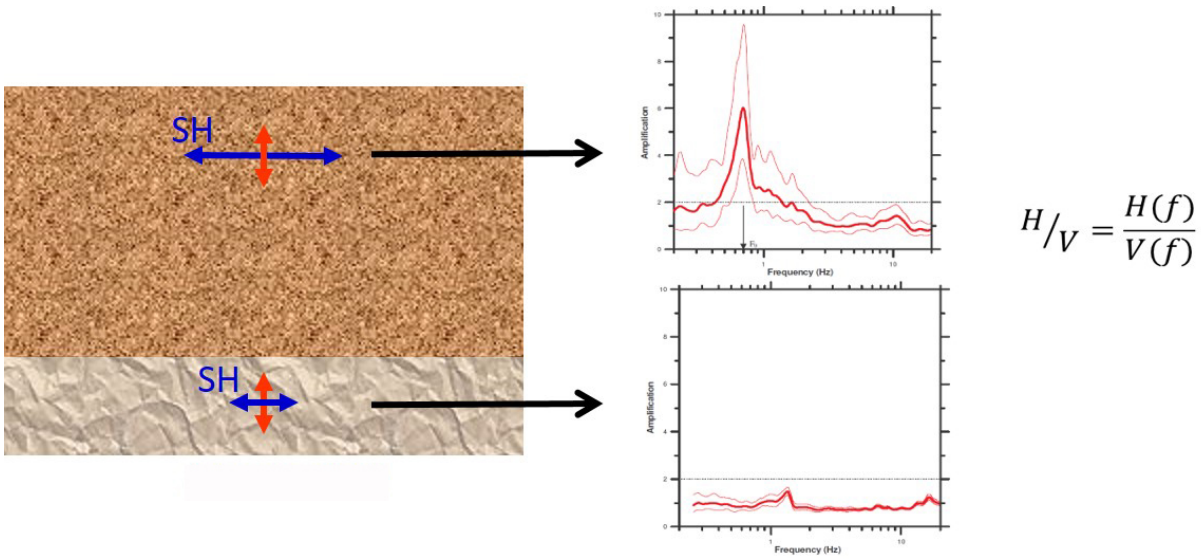


Fig. 3.20 - *Schematizzazione della variazione di ampiezza delle componenti orizzontali e verticale dell'onda SH al passaggio dal bedrock ai terreni di copertura; questa variazione si riflette sul rapporto spettrale H/V che risulta tanto più marcato quanto maggiore è il contrasto di impedenza all'interfaccia tra le due litologie (Nakamura, 1989, 2000, 2008)*

L'analisi delle misure eseguite ha evidenziato che le frequenze misurate nell'intervallo 2÷3,4 Hz risultano vicine agli affioramenti carbonatici Terme Varroniane e Borgo Mastronardi e ai rilievi di Monte Cassino e Venafro e indicano la presenza di un contrasto di impedenza superficiale. Allontanandosi dagli affioramenti rocciosi verso nord-ovest e sud-est diminuiscono gradualmente i valori di frequenza che risultano compresi tra 0.6 Hz e 0.8 Hz nel centro della piana di Cassino (Fig. 3.21).

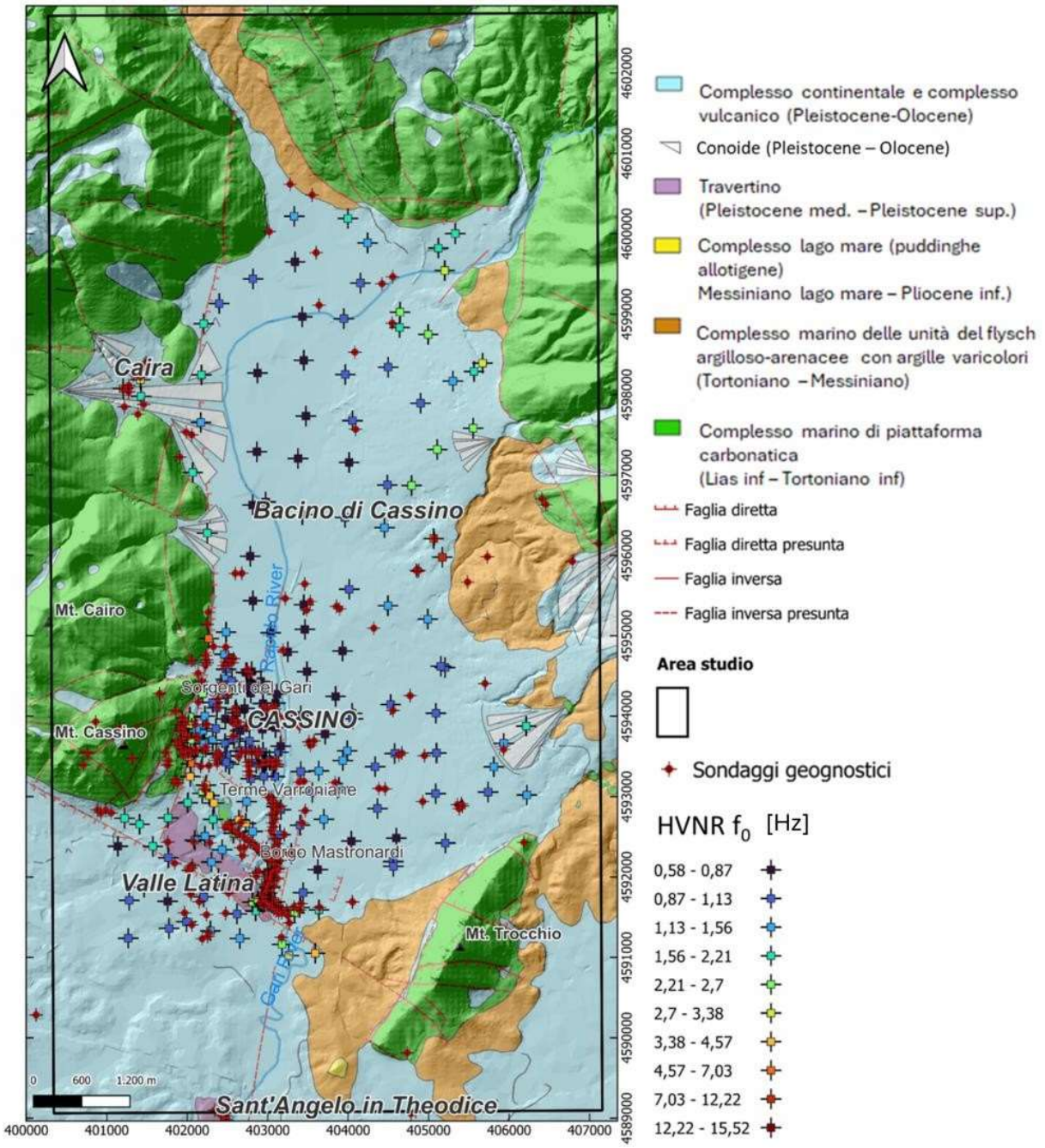


Fig. 3.21 - *Localizzazione delle stazioni di misure di microtremore realizzate nell'area studio del bacino di Cassino e analizzate con la tecnica HVNR per identificare la frequenza fondamentale del complesso continentale e complesso vulcanico* ***(l)***

Le misure di microtremore sismico sono state correlate con lo spessore dei depositi di riempimento del bacino (Fig. 3.22), appartenenti al Complesso continentale e vulcanico, tramite confronto con i sondaggi profondi localizzati nei pressi dei punti di misura (Saroli et al., 2020; Bard et al., 1980), secondo la relazione (Ibs-von Seht e Wohlenberg, 1999):

$$H = a \cdot {f_0}^b$$

dove:

H = spessore dei depositi di copertura

f_0 = frequenza fondamentale dei depositi

a e b = coefficienti di correlazione dipendenti dalle caratteristiche dei depositi.

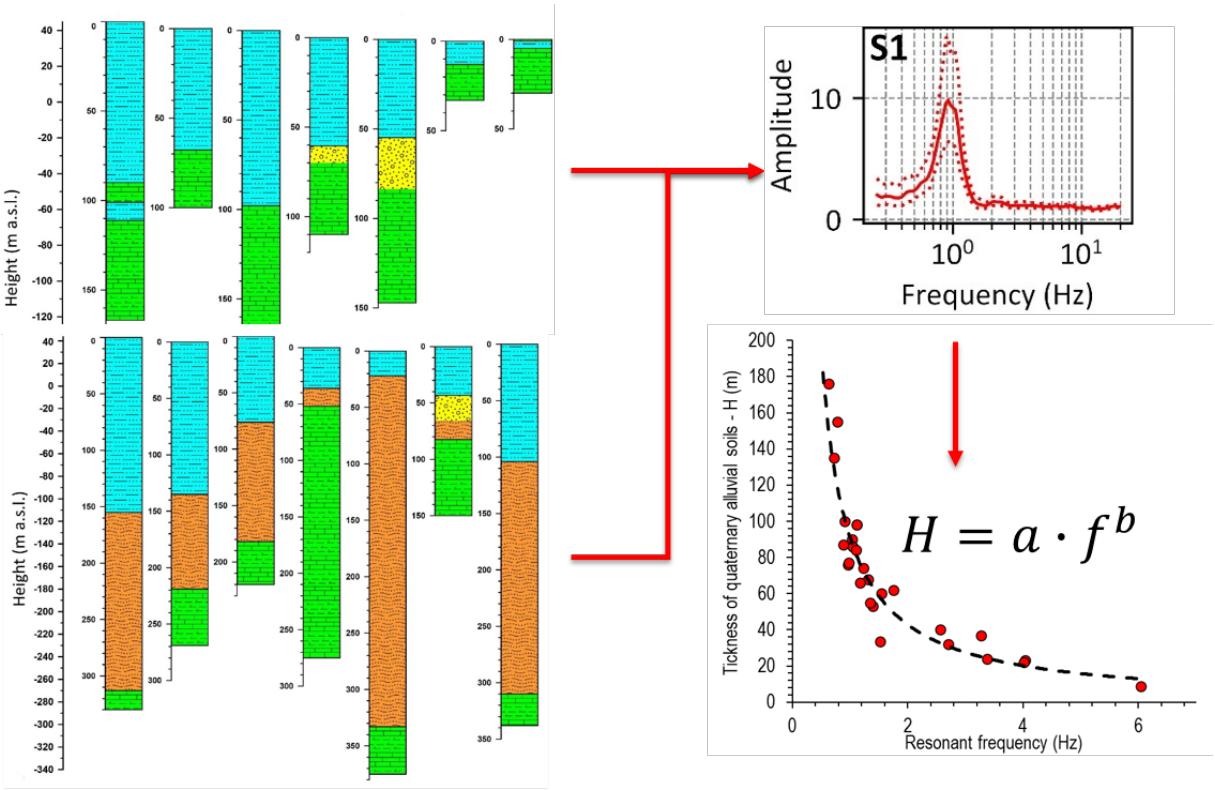


***Fig. 3.22** – Processo di correlazione tra profondità del bedrock individuato nei sondaggi (H) e frequenza fondamentale dei terreni da misure di microtremore (f_0) ai fini della determinazione dei coefficienti della relazione di Ibs-von Seht e Wohlenberg (1999)*

La soluzione del problema risiede quindi nella determinazione del valore dei coefficienti di correlazione a e b della precedente relazione. Plottando le coppie di valori H ed f_0 si ottiene la distribuzione della Figura 3.23, dalla quale è ricavabile l'equazione che lega, nelle condizioni geologico-stratigrafiche caratteristiche dell'area del bacino di Cassino, la frequenza dei depositi con la loro profondità.

Questa procedura si è dimostrata particolarmente utile in quanto ha permesso di stimare dei valori di profondità del letto del Complesso continentale e vulcanico (***I***) per ogni stazione di misura di microtremori. In particolare, è stato possibile tradurre i valori di profondità calcolati in "sondaggi virtuali" che sono stati utilizzati come input di interpolazione per quelle aree in cui la copertura di sondaggi reali profondi risultava scarsa o assente.

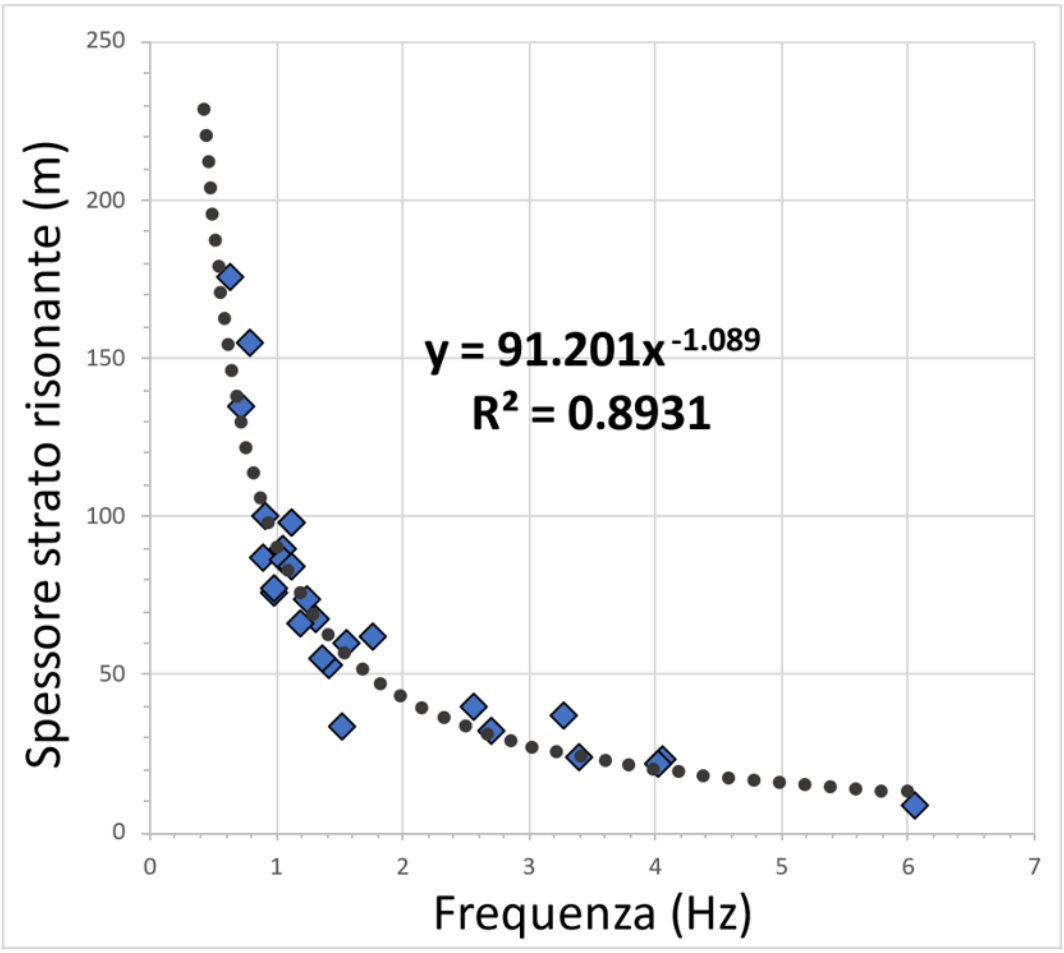


Fig. 3.23 - *Curva di correlazione della distribuzione delle coppie di valori H ed f_0 relativa ai depositi del bacino di Cassino*

Utilizzando questi dati nel software di *gridding* e *contouring* open source "*surfit 3.0*", si è ricostruito l'andamento del tetto del bedrock nell'area del bacino di Cassino. Per meglio definire la geometria del substrato geologico, è stato necessario selezionare le principali linee di faglia da rappresentare nel modello. Come si può notare dalla Fig. 3.24, sono state oggetto di modellazione le principali faglie bordiere del bacino: la faglia Caira-Cassino (CC), la faglia Cassino-Monte Trocchio (CT), la faglia Atina-S. Pietro Infine (SPI). Oltre a queste, sono state inserite ulteriori faglie minori (FM1, FM2, FM3, FM4 ed FM5), desunte dalla cartografia geologica di riferimento ed evidenziate dall'analisi preliminare dei dati di sondaggio, per giustificare il fatto che in alcune zone il substrato calcareo risulta variamente dislocato rispetto al resto del bacino; ad esempio, nell'area delle Terme Varroniane e di Borgo Mastronardi risulta sollevato.

Nel modello risultante la profondità del tetto del bedrock sismico è espressa in metri sul livello del mare per normalizzare le misure su tutta l'area. Il risultato di questa elaborazione evidenzia la notevole profondità (oltre i -100 m s.l.m.) del bedrock nella parte centro-occidentale del bacino ed a ridosso della faglia Caira-Cassino e una sua risalita graduale (fino a oltre i 100 m s.l.m.) nella parte est a contatto con la struttura carbonatica dei monti di Venafro. Nell'area delle Terme Varroniane, come noto anche da evidenze di terreno, il substrato si rinviene a profondità limitate rispetto al piano topografico e in alcuni punti è affiorante.

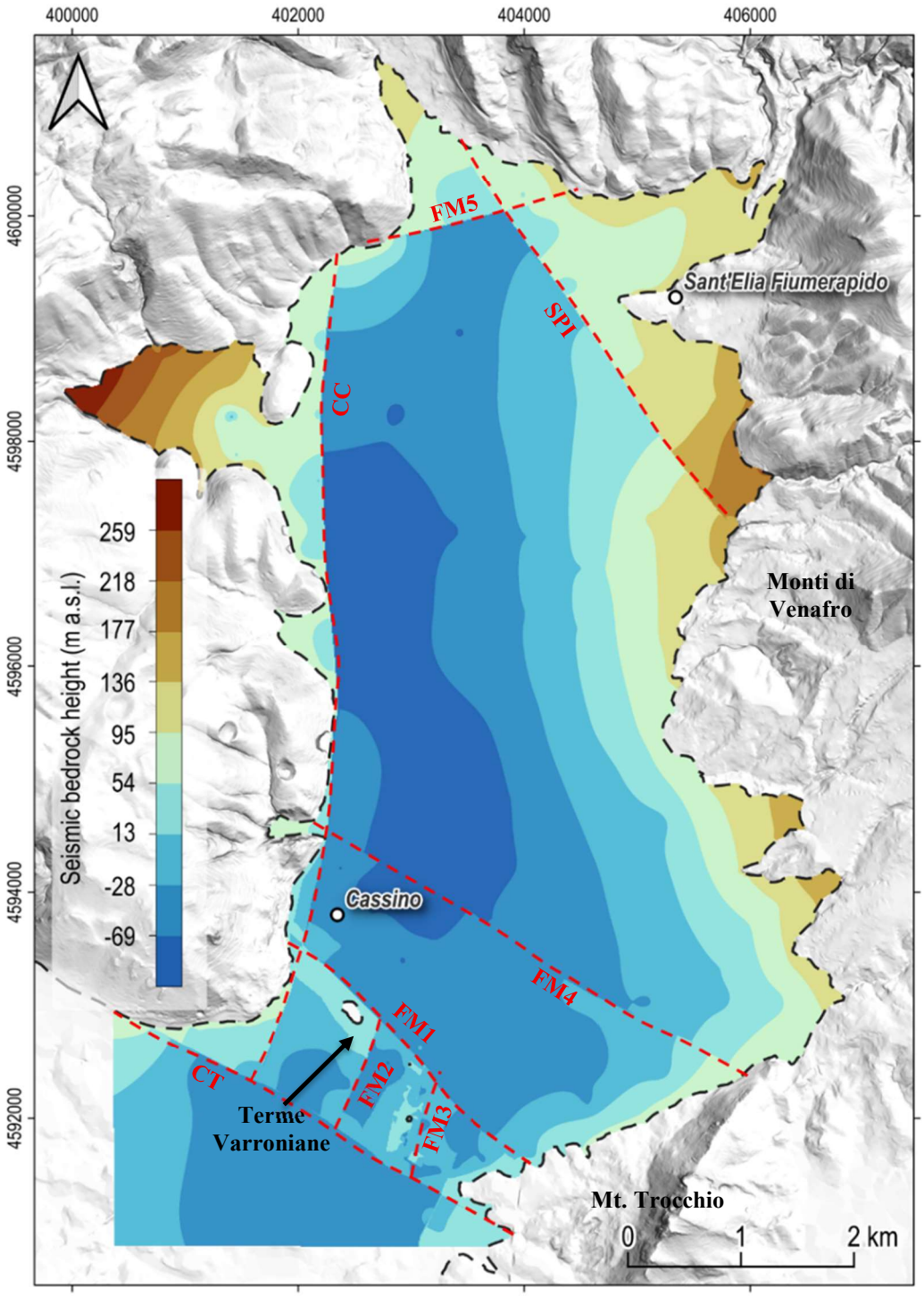


Fig. 3.24 - *Andamento del tetto del bedrock sismico nel bacino di Cassino; l'elaborazione è stata eseguita con "surfit 3.0" utilizzando come dati di input i dati dei sondaggi e le profondità stimate dalle misure di microtremore sismico. Le quote sono indicate in metri sul livello del mare. Le linee rosse tratteggiate indicano le faglie inserite nella modellazione: faglia Caira-Cassino (CC), faglia Cassino-M. Trocchio (CT), faglia Atina-San Pietro Infine (SPI); FM1, FM2, FM3, FM4 ed FM5 sono faglie inserite per rispettare le evidenze geologico-stratigrafiche*

È stata quindi realizzata una mappa di distribuzione dei periodi di vibrazione (Fig. 3.25) desunti dalle misure di microtremore a disposizione ($T=1/f_0$), utilizzando la tecnica di interpolazione Kriging con *external drift* (KD) (Trevisani et al. 2017; Oliver e Webster, 2014).

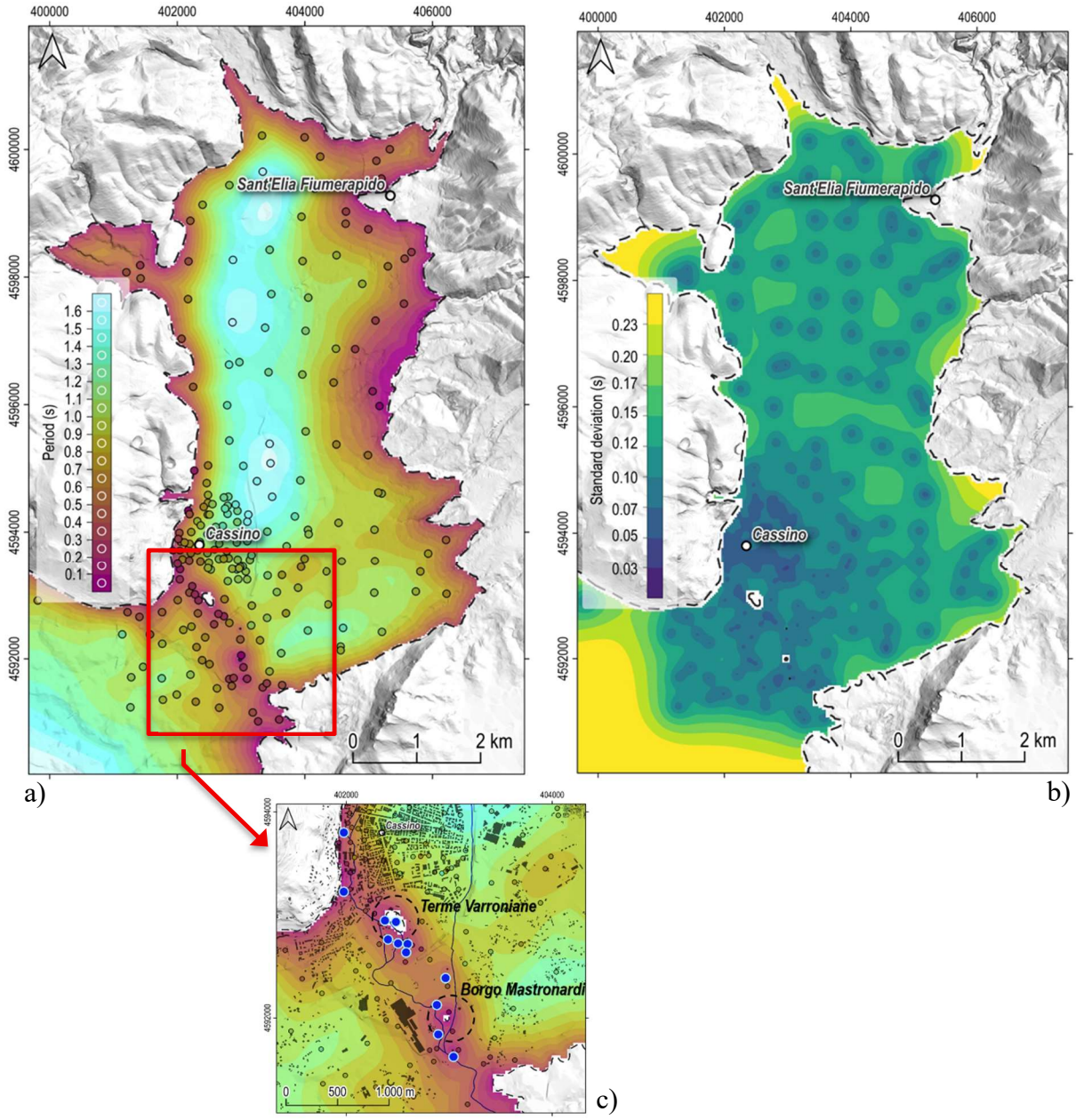


Fig. 3.25 - *a) mappa di distribuzione dei valori di periodo di vibrazione T ottenuti da misure di microtremore ($T=1/f_0$); b) mappa dei valori di deviazione standard associati all'interpolazione; c) particolare della mappa dei valori di T che evidenzia la particolare condizione dell'area Terme Varroniane/Borgo Mastronardi: i valori di T relativamente bassi indicano un substrato a quote prossime alla superficie. I pallini blu localizzano alcune emergenze sorgentizie del gruppo del F. Gari*

La distribuzione spaziale di P (Fig. 3.25.a) mostra valori compresi tra 0.8 e 1.6 s nel centro del bacino di Cassino che si raccordano con valori tendenti a 0.1 s lungo il bordo e nell'area compresa tra il centro abitato di Cassino e Borgo Mastronardi. Questo andamento è in perfetto accordo con l'analisi preliminare eseguita sui sondaggi del geodatabase e con il modello raffigurato in Fig. 3.24. Appare, inoltre, evidente la fascia di alto strutturale che collega il rilievo di Monte Cassino al rilievo di Monte Trocchio a sud del centro abitato, come mostrato in Fig. 3.25.c; nella stessa figura sono localizzate (pallini blu) le principali emergenze sorgentizie della falda contenuta nella struttura carbonatica di M. Cairo/Montecassino che seguono proprio l'andamento dell'alto strutturale.

La Figura 3.25.b mostra la mappa dei valori di deviazione standard associati alla elaborazione dei valori di P (Fig. 3.25.a); elevati valori di deviazione standard si stimano esclusivamente in corrispondenza dei bordi dell'area indagata a causa principalmente della minore disponibilità di dati.

La modellazione a scala di bacino, eseguita tramite l'elaborazione delle indagini a disposizione e le evidenze geologiche, mostra la presenza di un substrato profondo e irregolare, dislocato dalle faglie principali che agiscono anche sul complesso carbonatico che costituisce i rilievi circostanti al bacino stesso. Dall'esame delle stratigrafie di sondaggio emerge che al di sopra del substrato carbonatico sono presenti depositi riconducibili al Complesso del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori (Fig. 3.19), che possono avere spessori compresi tra 150 e 300 m. Data la relativa rigidezza di questo complesso, le misure di microtremore sismico non permettono di distinguere (nelle aree prive di sondaggi profondi) in modo netto se il contrasto di impedenza che definisce il picco del rapporto *H/V* è dovuto al contatto dei depositi del Complesso continentale e vulcanico con i flysch o con il substrato carbonatico. Questa relativa incertezza incide sulla successiva modellazione sismica del bacino, nella quale il bedrock sismico può essere individuato nell'uno o nell'altro complesso. Al di sopra di questi litotipi si rinviene uno strato di copertura costituito dal complesso continentale e il complesso vulcanico (senza ulteriore distinzione dei litotipi che lo compongono) che presenta spessori fino a 150 m nel centro del bacino. A chiusura del bacino intermontano di Cassino, poco a sud di Borgo Mastronardi, emerge dal Complesso continentale un blocco di travertino delle dimensioni approssimative di 650*x*180 m, allungato in direzione appenninica, la cui genesi è da ricondursi a risalita di fluidi idro-termali lungo le fratture del substrato, come ad esempio la faglia Cassino-M. Trocchio. Infine, è stato possibile identificare altri elementi litologici appartenenti al complesso lago-mare (puddinghe allotigene), affioranti a sud di Monte Trocchio e presente al di sotto delle coperture recenti a sud dell'abitato di Cassino. Nelle modellazioni eseguite questo complesso non è rappresentato in modo diffuso all'interno del bacino perché la sua continuità risulta limitata a causa dei processi deposizionali e delle successive fasi erosive.

Nella figura 3.26 è riportata una serie di diagrammi a blocco riassuntivi della modellazione geologica del bacino di Cassino; lo schema è stato realizzato con il software di modellazione 3D "*Leapfrog*" (da Rompato, 2024 modificato).

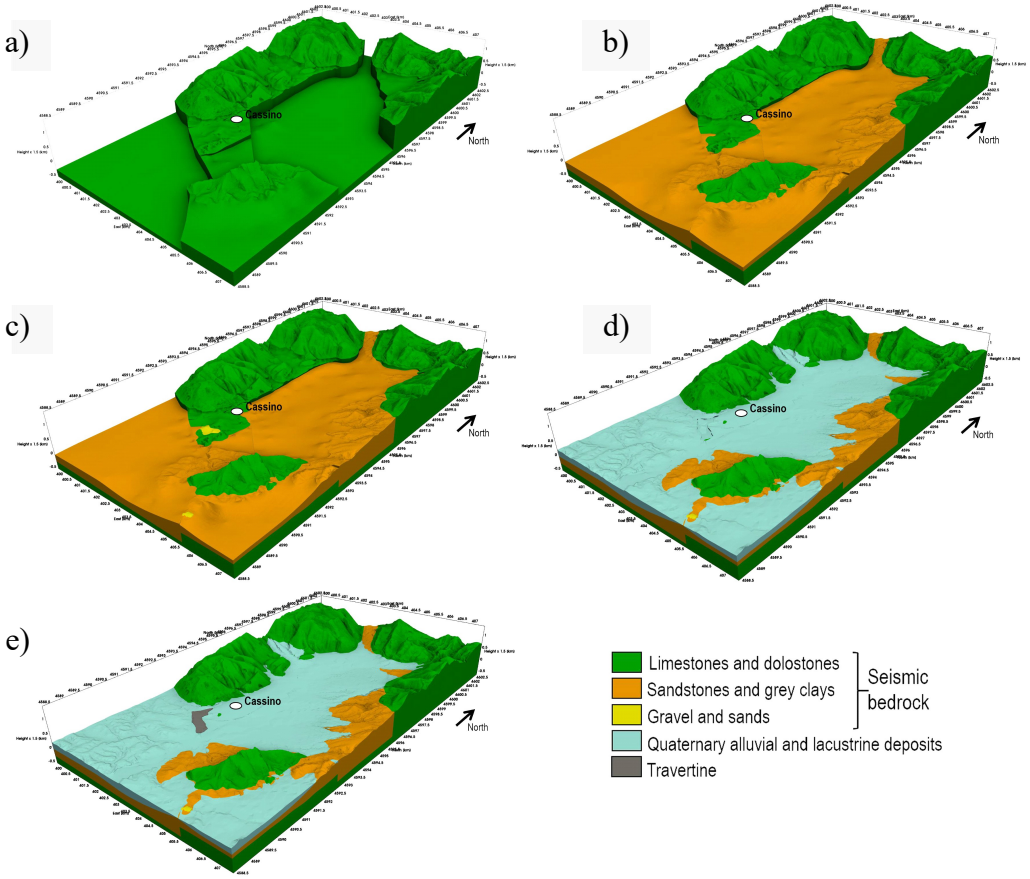


Fig. 3.26 - *Schema riassuntivo della modellazione geologica del bacino di Cassino: a) in verde il complesso marino di piattaforma carbonatica costituito da calcari e dolomie; b) in arancione il complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori; c) in giallo il complesso lago-mare costituito da puddinghe allotigene cementate; d) in azzurro il complesso continentale e complesso vulcanico costituito da depositi alluvionali e lacustri di natura limoso-argillosa e argilloso-limosi con intercalazioni e lenti sabbiose e ghiaiose e affioramenti travertinosi di origine idro-termale (nella figura e). Da Rompato (2024) modificato*

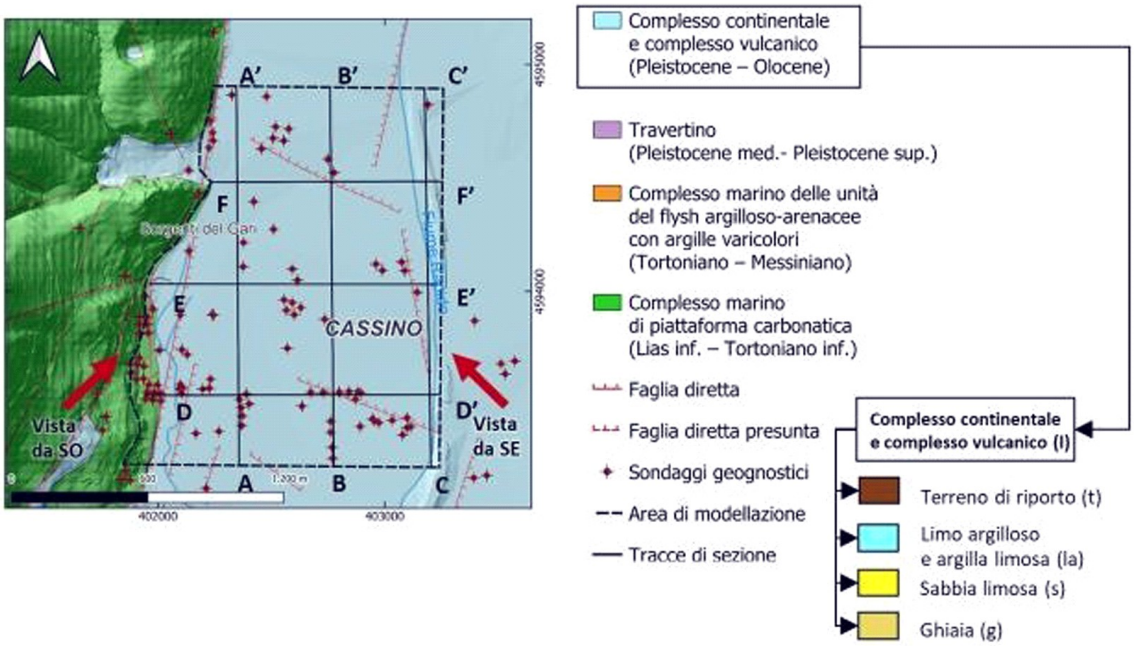


Fig. 3.27 - *Localizzazione dell'area di modellazione e ubicazione delle tracce delle sezioni delle figure seguenti (non tutte le unità della legenda affiorano nella mappa)*

3.3.2 Modello geologico alla scala del centro urbano

Data l'elevata concentrazione di sondaggi poco profondi nell'area del centro urbano di Cassino si è condotta un'ulteriore modellazione di dettaglio il cui scopo è stato quello di ricostruire l'assetto dei diversi litotipi che compongono il Complesso continentale e il complesso vulcanico (***l***).

A questo scopo sono stati analizzati 114 sondaggi del database limitando la modellazione ad un'area di 1.4*x*1.7 km situata all'interno del nucleo abitato di Cassino per una profondità massima di 150 metri dal piano di campagna (Fig. 3.27).

Il volume geologico "***l***" si caratterizza per la presenza di diversi orizzonti alternati di limo argilloso e argilla limosa (***la***) che si rinvengono in contatto, sia verticalmente che orizzontalmente con livelli o banchi di ghiaia (***g***) e sabbia limosa (***s***). Inoltre, localmente si rinvengono terreni di riporto (***t***) superficiali. Queste litologie sono spesso saturate dall'acqua che filtra verso l'alto dal substrato calcareo sepolto o dall'alimentazione laterale dove le litologie sabbiose e ghiaiose sono in contatto con il rilievo di Monte Cassino.

In Fig. 3.27 sono riportate le tracce delle sezioni utilizzate per la modellazione geologica dell'area del centro urbano, realizzate a partire dai 114 sondaggi citati. Dalle sezioni (Figg. 3.28 e 3.29) si nota che i sedimenti del complesso continentale e vulcanico (***l***), al di sotto del centro urbano di Cassino, si rinvengono su 3 fasce principali disposte a quote differenti.

Una prima fascia superficiale si estende da piano campagna alla quota massima di 0 m s.l.m. per uno spessore di circa 50 m. Questa risulta formata da orizzonti alternati di ghiaia (***g***) e sabbia limosa (***s***), limo argilloso e argilla limosa (***la***), a volte ricoperti da uno strato di terreo di riporto che raggiunge spessori massimi di 10 m. Inoltre dalle sezioni AA', BB', CC' e FF' (Figg. 3.28 e 3.29.c) si può notare che questo intervallo presenta alla base uno strato continuo di sabbia limosa (***s***) spesso circa 4m che si attesta a quota 0 m s.l.m. e risulta continuo in tutta la porzione nord della città.

Una seconda fascia si rinviene da quota 0 m a quota -85 m s.l.m. ed è caratterizzata dalla presenza di strati di ghiaia (***g***) alternati a limo argilloso e argilla limosa (***la***). A queste profondità gli strati di ghiaia riconosciuti risultano essere poco estesi lateralmente e spessi al massimo 5 m. Tuttavia, le sezioni BB', CC' e DD' (Figg. 3.28.b, 3.28.c, 3.29.a) mostrano un accumulo di litotipo ghiaioso (***g***) con rara sabbia limosa (***s***) compreso tra 0 m e -50 m s.l.m. situato nella zona sudorientale della città.

Nelle porzioni più profonde del bacino si rinviene una terza fascia caratterizzata e da strati di ghiaia (***g***), alternati a limi argillosi e argilla limosa (***la***), e dall'assenza di orizzonti di sabbia limosa (***s***). In particolare, nella parte orientale della città si rinviene uno strato di ghiaia (***g***) basale spesso circa 12 m a partire da circa -85 m s.l.m. fino al fondo del bacino e in contatto con il complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argilla vari colori (***f***) (sez. CC', DD' e EE' nelle Figg. 3.28.c, 3.29.a, 3.29.b).

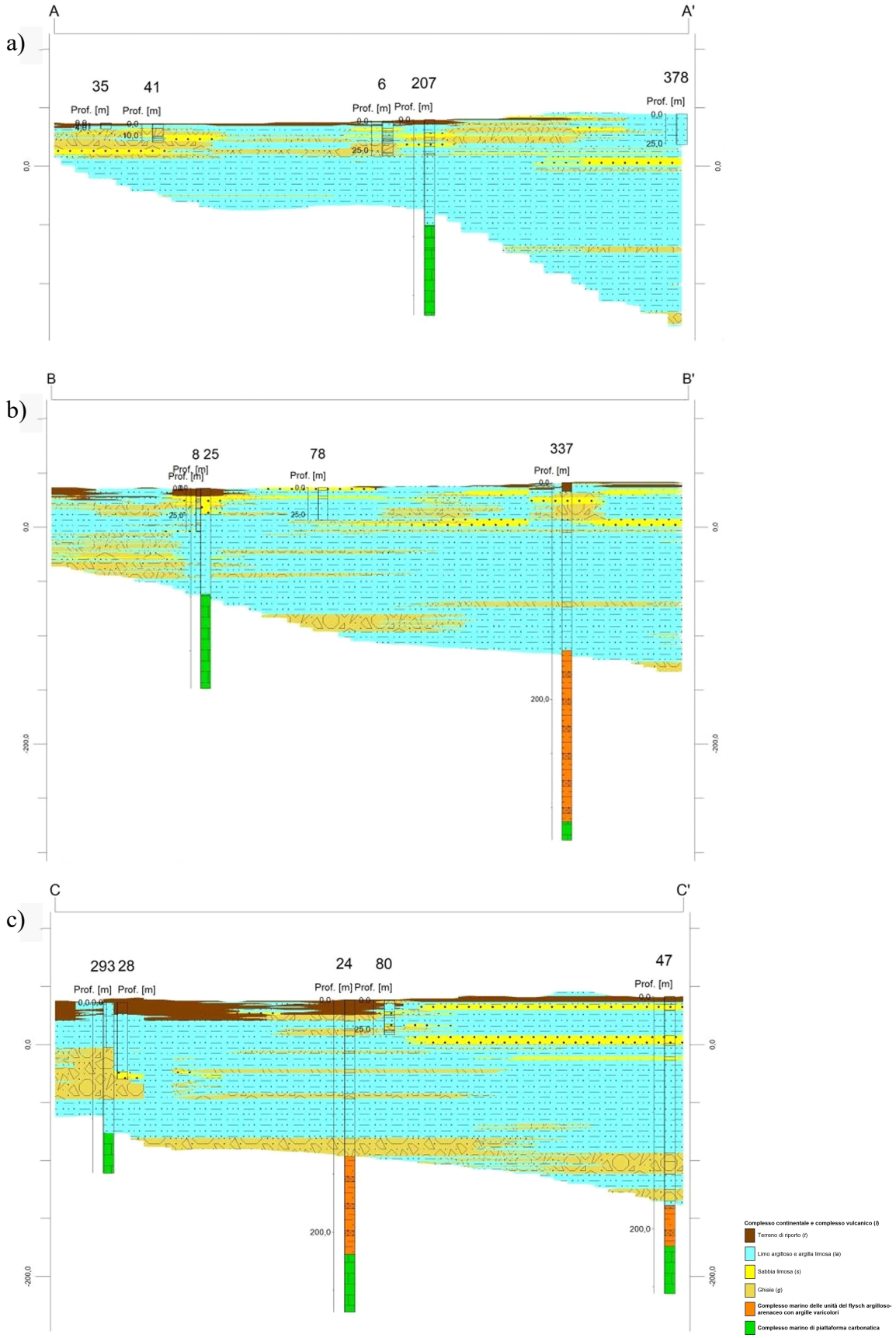


Fig. 3.28 - *Sezioni per la modellazione geologica a scala del centro urbano di Cassino (tracce delle sezioni in Fig. 3.27): a) sezione AA'; b) sezione BB'; c) sezione CC'. Le sezioni evidenziano le alternanze di litotipi nel complesso continentale e complesso vulcanico (esagerazione verticale 3x)*

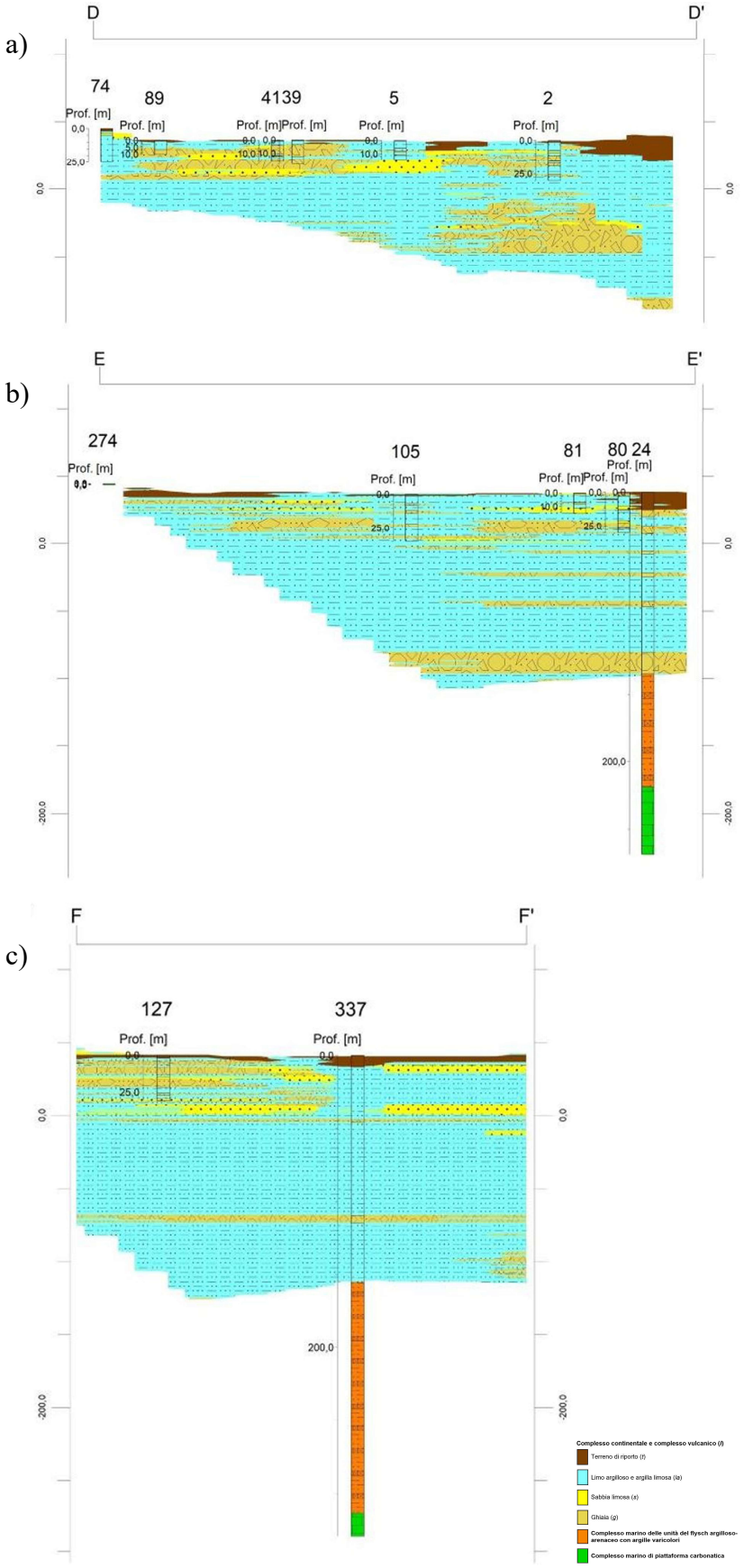


Fig. 3.29 - *Sezioni per la modellazione geologica a scala del centro urbano di Cassino (tracce delle sezioni in Fig. 3.27): a) sezione DD'; b) sezione EE'; c) sezione FF'. Le sezioni evidenziano le alternanze di litotipi nel complesso continentale e complesso vulcanico (esagerazione verticale 3x)*

3.4 Modellazione sismica 1D e 2D dell'area di studio

Il lavoro fin qui illustrato ha permesso di definire il modello geologico del bacino di Cassino con livelli di dettaglio diversi in funzione delle indagini disponibili. Questo processo risulta di primaria importanza ai fini dello studio del comportamento sismico di quest'area. Si illustreranno pertanto di seguito i passaggi che hanno portato ad ottenere una modellazione sismica della stessa area a partire proprio da quella imprescindibile modellazione geologica.

La modellazione sismica di un'area non consiste nella mera assegnazione a specifici intervalli litologici di parametri che ne definiscono il comportamento in condizioni dinamiche, ma richiede accurate considerazioni rispetto al modello geologico di partenza al fine di determinare innanzitutto la configurazione, monodimensionale, bidimensionale o tridimensionale, che più approssima il reale comportamento dal punto di vista sismico di quei depositi nello specifico assetto geologico-stratigrafico, geomorfologico e tettonico definito. Nel paragrafo *1.2.3* sono stati delineati i criteri di applicabilità delle tre configurazioni. In questo lavoro sono state eseguite le analisi numeriche di risposta sismica locale con modellazione sia 1D che 2D, per verificare quali avrebbero potuto essere i limiti di applicabilità dei due metodi all'area studiata e in quale delle due condizioni i risultati sarebbero stati più cautelativi.

Il passo successivo consiste nella scelta dell'ubicazione delle verticali o delle sezioni da indagare in modo tale che siano rappresentative del problema. Per quanto riguarda l'area di studio sono state realizzate diverse sezioni geologiche, sia, come visto, in fase preliminare di definizione del modello geologico, sia negli step successivi. Sulla base delle evidenze emerse, ma anche per tener conto della orientazione del bacino di Cassino, con estensione longitudinale in direzione N-S, sono state scelte e tracciate sei sezioni sulle quali condurre le analisi numeriche di risposta sismica locale (Fig. 3.30). Di queste, tre si sviluppano trasversalmente all'orientazione del bacino (E-W) e tre longitudinalmente (N-S). Le sezioni così tracciate hanno lo scopo di interessare sia il modello a scala del centro urbano che quello a scala di bacino. Le tre sezioni orientate E-W indagano da un lato il contatto tra la struttura carbonatica di M. Cairo/Montecassino e dall'altra (lato E) i rapporti stratigrafici e tettonici tra le alluvioni recenti, quelle antiche terrazzate (che nel modello geologico sono state inglobate nel complesso continentale e vulcanico) e il complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori. Le sezioni N-S giungono alla placca travertinosa presente poco a sud della località Borgo Mastronardi e verso nord sono state interrotte dove il tetto del bedrock raggiunge le massime profondità perché, proseguendo, l'assetto geologico generale non varia e quindi l'incidenza sul comportamento sismico dei depositi e, di conseguenza, sulle analisi di risposta sismica locale in configurazione 2D è praticamente nulla.

Dopo aver definito la configurazione dimensionale da utilizzare e le aree da indagare, si deve valutare la possibilità di semplificare il modello geologico di partenza in termini geometrici ma anche relativamente alla elevata eteropia dei depositi, per venire incontro alle limitazioni dei software di analisi e dei codici di calcolo che implementano.

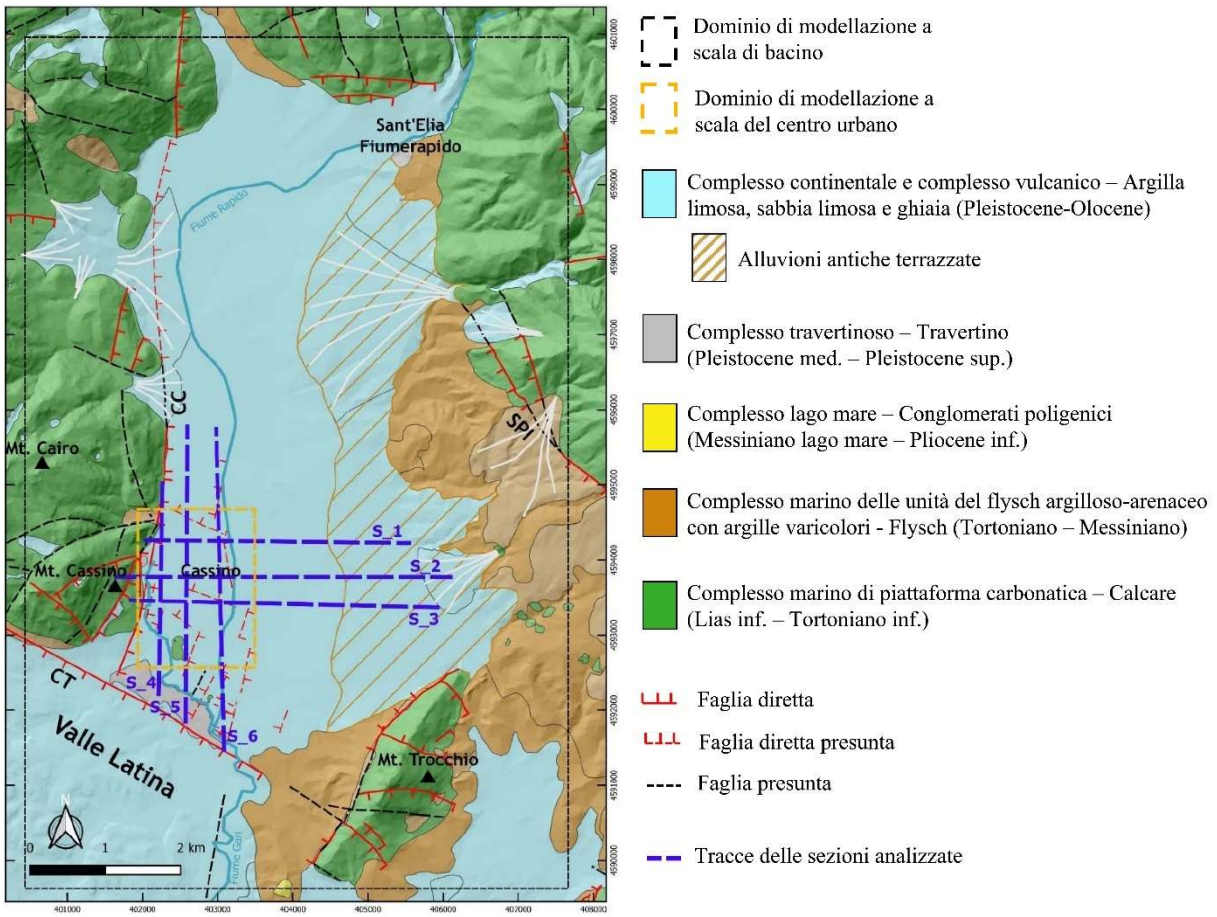


Fig. 3.30 - *Ubicazione delle sezioni di modellazione sismica*

In Fig. 3.31 è rappresentata la sezione geologica S_2, realizzata tenendo conto del modello geologico definito. L'analisi di questa sezione evidenzia un'alta variabilità nelle porzioni superficiali dei depositi appartenenti al complesso continentale e complesso vulcanico, con presenza di lenti e intercalazioni ghiaiose e sabbiose dei sedimenti fluvio-lacustri di natura limoso-argillosa e argilloso-limosa. La stessa variabilità non si riscontra nella parte più profonda di questo complesso, come succede anche muovendosi verso E. La differenza è riconducibile, come già evidenziato nei paragrafi precedenti, al numero maggiore di sondaggi presenti nel centro urbano e alla loro maggior definizione per quanto riguarda i primi 30÷40 m di profondità. I sondaggi più profondi, realizzati soprattutto per la ricerca di acque nei depositi carbonatici, presentano chiaramente un minore dettaglio nel distinguere i diversi passaggi litologici all'interno dei depositi di copertura.

Inoltre, nel modello rappresentato nella sezione non vi è alcuna distinzione, all'interno del complesso continentale e vulcanico, tra depositi superficiali e profondi.

Le considerazioni appena esposte per la sezione S_2, qui individuata come esempio, sono valide anche per le altre cinque sezioni.

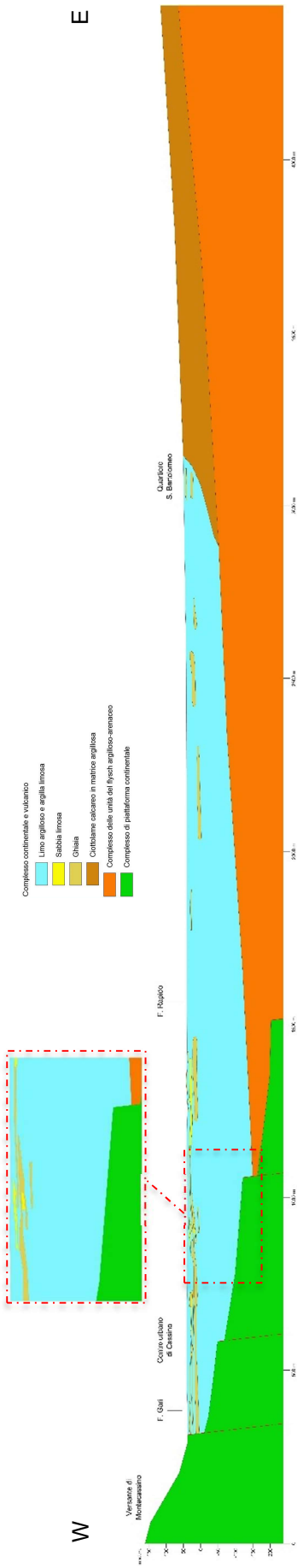


Fig. 3.31 *– Sezione geologica S_2. Nel particolare si evidenzia l'elevata variabilità dei depositi superficiali rispetto a quelli a maggiori profondità dovuta alla minore definizione delle indagini profonde*

Se queste circostanze risultano "accettabili" per quanto concerne la ricostruzione del modello geologico così come precedentemente definito, lo stesso non può dirsi per la modellazione che dovrà essere sottoposta ad analisi di risposta sismica. Da un lato le differenze marcate tra le diverse zone delle sezioni, dovute non a condizioni reali ma alla disponibilità di dati, generano risposte che possono discostarsi dal reale comportamento sismico dei depositi; dall'altro, un'alta variabilità litologica, con cadenza al più decametrica, su sezioni di lunghezza dell'ordine di qualche chilometro crea difficoltà per quanto riguarda la discretizzazione del dominio, ad esempio con il metodo agli elementi finiti implementato nel software LSR2D (cfr. § 3.5.1). Quest'ultimo problema è stato riscontrato proprio in questo lavoro. Inizialmente si è provato ad eseguire le analisi numeriche sulle sezioni sismostratigrafiche nelle condizioni viste per la sezione S_2 (Fig. 3.31), la discretizzazione eseguita dal software ha fornito risultati non accettabili (Fig. 3.32) e durante l'elaborazione dell'analisi numerica si sono avuti più volte problemi di stabilità del sistema (non imputabili all'efficienza delle macchine utilizzate), con casi di blocco del programma di calcolo fino a situazioni di terminazione improvvisa dell'intero sistema operativo, e casi di non raggiungimento della condizione di errore minimo stabilito (2%) anche dopo decine di iterazioni (cfr. § 3.5.1).

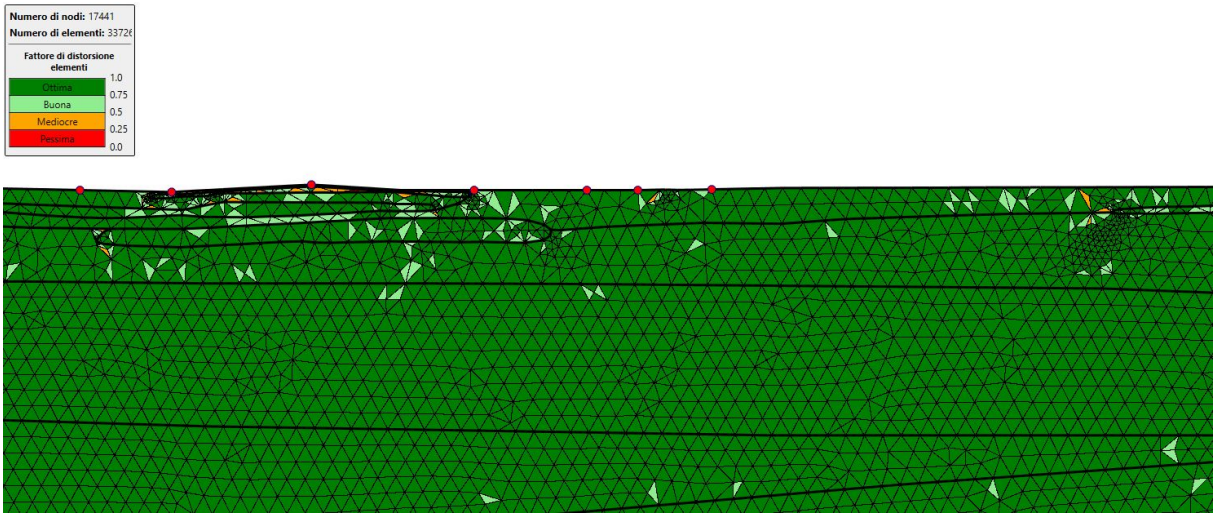


***Fig. 3.32** – Particolare della parte superficiale della sezione S_2: viene evidenziata la qualità della discretizzazione del dominio eseguita dal software LSR2D col metodo agli elementi finiti, con diversi settori in arancione (qualità mediocre)*

Si è deciso quindi di operare delle omogeneizzazioni e/o semplificazioni dei modelli che portassero ad un giusto compromesso rispetto alla rappresentatività degli stessi. Queste modifiche hanno riguardato dapprima questioni puramente geometriche, con la smussatura di angoli accentuati nelle superfici di separazione dei sismostrati o, per quanto possibile, in corrispondenza dei gradini di faglia.

Le azioni di maggior rilievo sono state però eseguite rispetto alle variazioni stratigrafiche descritte. Quindi si è deciso di ridurre questa variabilità considerando il Complesso continentale (***l***) come un unico sismostrato (contenente i depositi fluvio-lacustri, le ghiaie e le sabbie). Questo modello "base" è stato poi gradualmente complicato andando a suddividere nuovamente il Complesso continentale, ma questa volta in modo più regolare. Prima sono stati separati i depositi alluvionali da quelli lacustri più profondi, poi le coperture alluvionali sono state a loro

volta suddivise in due sismostrati in base alle caratteristiche medie degli stessi e infine un quarto modello è stato elaborato suddividendo anche i depositi lacustri e ottenendo così un totale di quattro sismostrati nei depositi di riempimento del bacino (Fig. 3.33).

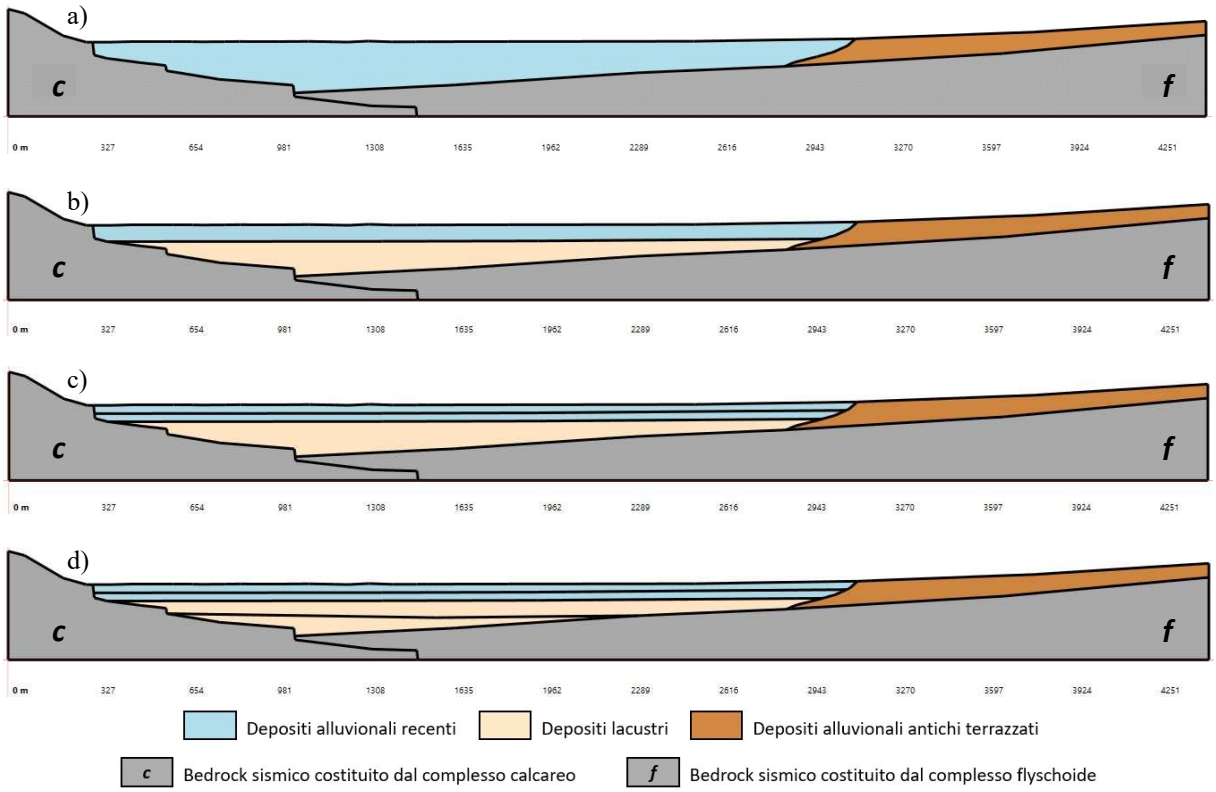


Fig. 3.33 - *Evoluzione nella modellazione della sezione S_2: a) modello con un unico sismostrato comprendente tutte le litologie del Complesso continentale e complesso vulcanico; b) modello a 2 sismostrati con distinzione tra depositi alluvionali e depositi lacustri; c) modello a 3 sismostrati con ulteriore suddivisione dei depositi alluvionali; d) modello a 4 sismostrati con distinzione tra due livelli all'interno dei depositi lacustri*

Le quattro diverse modellazioni della stessa sezione S_2 sono poi state sottoposte ad analisi numeriche per verificare l'eventuale dispersione dei risultati. Come evidenziato in Fig. 3.34, la sola modellazione ad un unico sismostrato (Fig. 3.34.a) presenta un andamento dei valori dei fattori di amplificazione (FA) dissimile rispetto alle altre tre modellazioni; queste, al netto di contenute variazioni dei singoli FA, nel complesso mostrano un andamento simile degli stessi lungo le tre sezioni. In questo studio sono state eseguite, pertanto, le analisi sul modello a 4 sismostrati (sia per la configurazione monodimensionale che per quella bidimensionale) perché è quello che approssima meglio le condizioni reali del bacino di Cassino e al contempo garantisce l'operabilità delle simulazioni numeriche.

Per quanto riguarda la definizione del bedrock sismico, fondamentale per determinare la profondità di inserimento dell'input sismico nel modello sismostratigrafico, come da normativa è stato individuato in quei litotipi che hanno velocità delle onde di taglio V_S maggiori di 800 m/s (700 m/s per i litotipi flyschoidi). Il Complesso di piattaforma carbonatica (***c***) e il Complesso delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori (***f***) presentano valori maggiori, come verificato tramite indagini MASW e DH in siti dove sono in affioramento o a profondità investigabili con queste tecniche (cfr. § 3.53).

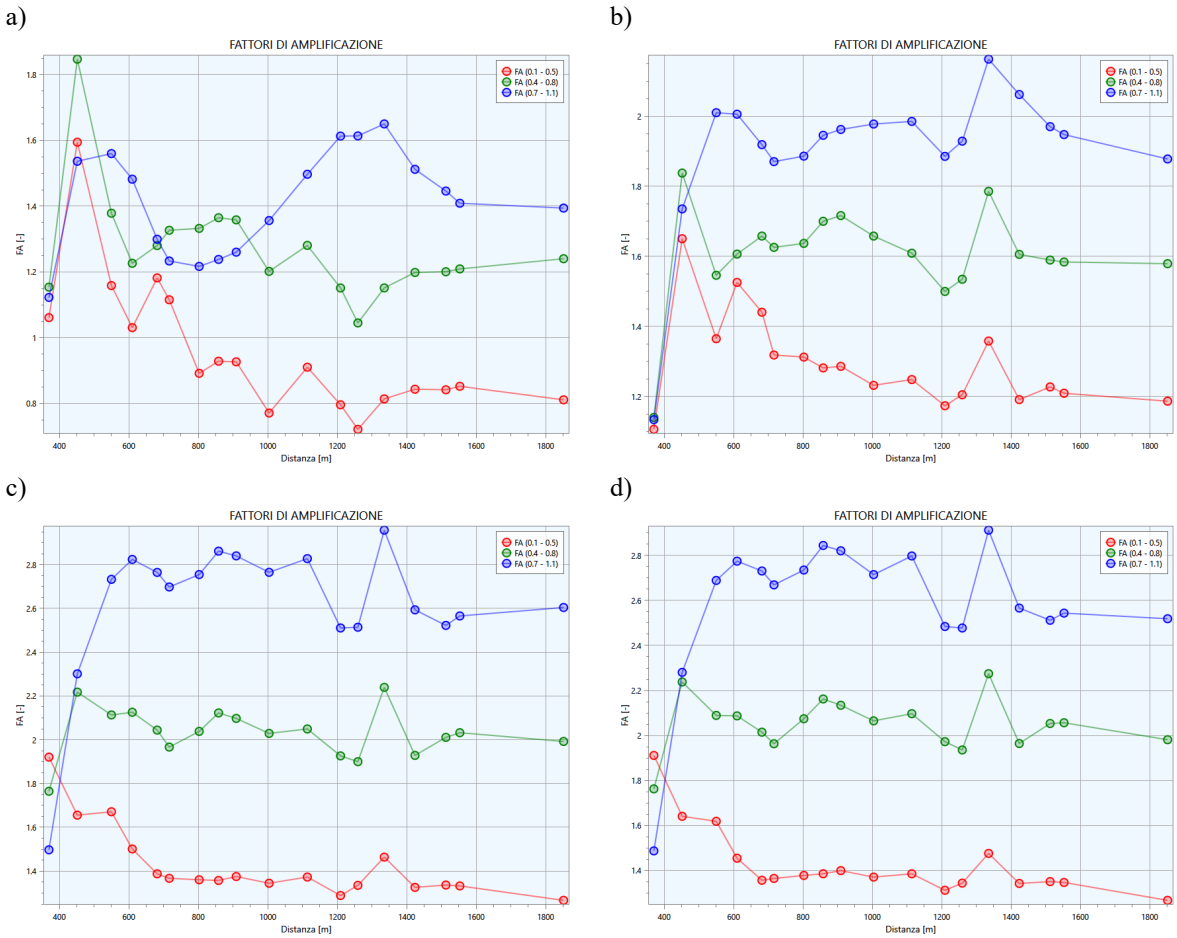


Fig. 3.34 - *Fattori di amplificazione restituiti nei punti di controllo della sezione S_2 dall'analisi numerica delle 4 modellazioni di Fig. 3.34: a) 1 sismostrato, b) 2 sismostrati, c) 3 sismostrati, d) 4 sismostrati. Solo la configurazione ad un sismostrato mostra un risultato generale che si discosta dagli altri*

Il software utilizzato per le analisi numeriche in modellazione bidimensionale (LSR2D, § 3.5.1) richiede l'indicazione di punti sulla sezione nei quali estrapolare i risultati, detti *punti controllo*. Questi punti sono stati scelti per lo più all'interno del centro urbano di Cassino e in funzione della distribuzione di sondaggi e misure di microtremore per avere un riscontro oggettivo della bontà della modellazione. Al fine, poi, di confrontare i risultati delle simulazioni numeriche in modellazione 1D e 2D, le verticali sismostratigrafiche da analizzare sono state modellate proprio in corrispondenza dell'ubicazione dei punti di controllo inseriti nelle sezioni. Sono state modellate in totale 117 verticali (Fig. 3.35) oltre alle 6 sezioni già citate.

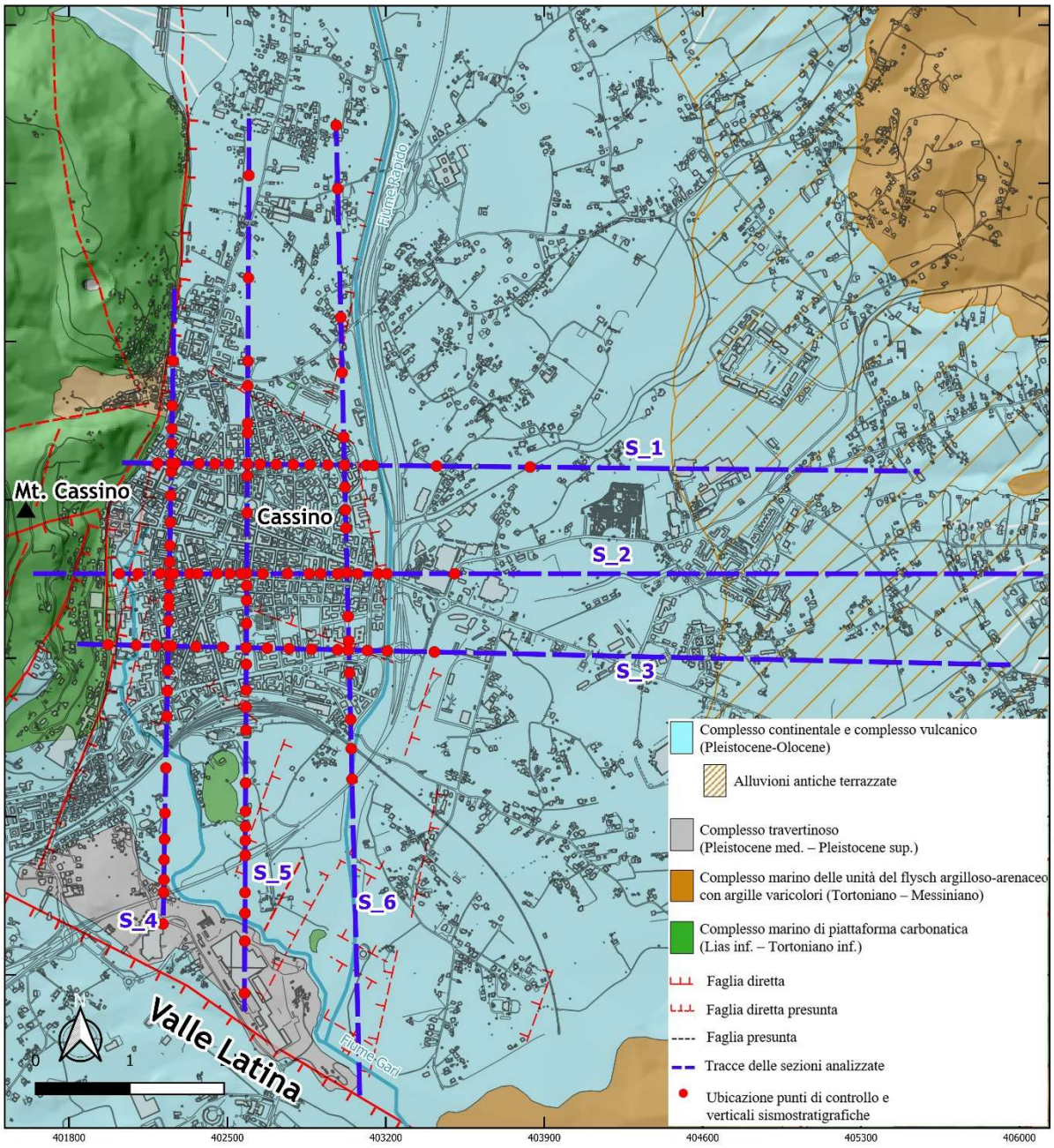


Fig. 3.35 - *Ubicazione dei punti di controllo (pallini rossi) della modellazione 2D, cui corrispondono le verticali della modellazione 1D*

3.5 Analisi numeriche di risposta sismica locale mono e bi-dimensionali

Nel paragrafo *1.2.3* sono stati descritti gli elementi caratterizzanti e il processo logico e procedurale alla base delle analisi di risposta sismica locale monodimensionali (RSL_1D) e bidimensionali (RSL_2D). Nei prossimi paragrafi si applicheranno quei concetti all'area del bacino di Cassino per valutarne il comportamento in caso di evento sismico. Verranno prima illustrati i software utilizzati e poi si procederà con la scelta dell'input sismico da porre a base delle simulazioni numeriche e la parametrizzazione del modello sismostratigrafico.

3.5.1 Software utilizzati

La valutazione quantitativa della risposta sismica locale, richiede l'utilizzo di software avanzati, i quali attraverso una modellazione numerica simulano il processo dinamico di trasmissione e propagazione delle onde, dal bedrock fino alla superficie terrestre.

I software attualmente presenti sul mercato offrono diverse possibilità in termini di:

- resa grafica dei risultati,
- introduzione dei parametri,
- simulazione del processo dinamico,
- modelli costitutivi utilizzati,
- dominio discretizzato.

La valutazione quantitativa della risposta sismica locale stima le modifiche in termini di durata, in termini di ampiezza e di contenuto in frequenze che subisce un dato evento sismico, relativo ad un substrato roccioso (R), attraverso la propagazione nei terreni sovrastanti fino alla superficie (S). In realtà, nella pratica si valuta la risposta sismica locale rispetto ad un ipotetico (o reale) affioramento del substrato roccioso (A) (Fig. 3.36).

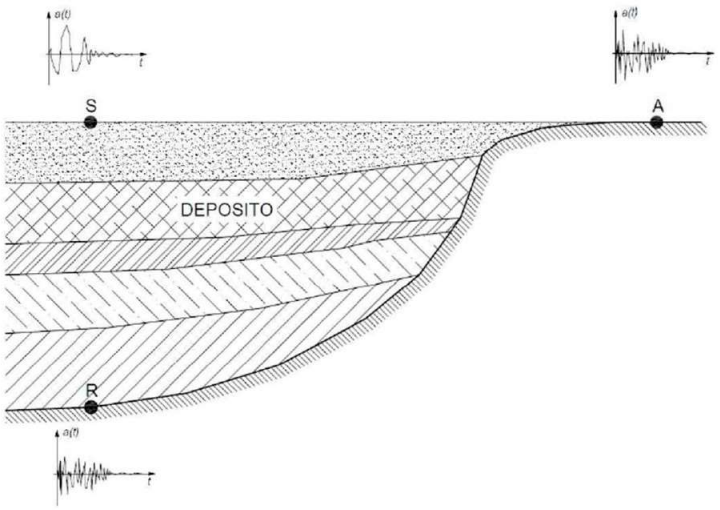


Fig. 3.36 - *Scenari in cui valutare la risposta sismica locale (Lanzo & Silvestri, 1999)*

La valutazione quantitativa si effettua sulla base del confronto tra le grandezze che rappresentano il moto sulla superficie investigata, ed alla base affiorante (o substrato roccioso), considerando:

- il dominio del tempo,
- il dominio delle frequenze.

Nel dominio del tempo, la grandezza più rappresentativa è l'accelerazione massima; pertanto la valutazione viene eseguita mediante il rapporto tra l'accelerazione massima valutata alla superficie del terreno ($a_{max,s}$), e quella in corrispondenza della formazione rocciosa di riferimento ($a_{max,r}$) (Foti et al., 2009):

$$A_a = \frac{a_{max,s}}{a_{max,r}}$$

Il rapporto tra le accelerazioni massime definisce il *fattore di amplificazione*, il quale non considera in maniera efficace ed esaustiva la totalità delle caratteristiche del moto sismico in ingresso e uscita dal deposito analizzato.

In funzione del valore del rapporto appena descritto, si possono identificare due differenti comportamenti:

- amplificazione locale, in presenza di un rapporto maggiore di 1;
- deamplificazione locale, in presenza di un rapporto minore di 1.

Attraverso la valutazione quantitativa nel dominio delle frequenze, si determina il reale "effetto di filtro" che opera il terreno, incrementando l'ampiezza del moto per alcune specifiche frequenze, e riducendola per altre, nel passaggio dal substrato di riferimento alla superficie.

La valutazione avviene attraverso la *funzione di trasferimento*, ovvero il rapporto tra lo spettro di Fourier del moto alla superficie, rispetto allo spettro di Fourier valutato in corrispondenza dell'affioramento del substrato roccioso (Foti et al., 2009):

$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_r(f)}$$

Nella pratica si utilizza, però, come valutazione numerica della risposta sismica locale, il suo modulo, ovvero la *funzione di amplificazione*:

$$A(f) = |H(f)|$$

La funzione di amplificazione contiene maggiori informazioni legate alla risposta sismica locale, in quanto consente di determinare con immediatezza quali componenti in frequenza abbiano subito un certo grado di amplificazione.

I codici di calcolo monodimensionali, come già specificato nel paragrafo *1.2.3*, permettono la simulazione nel caso di una successione di strati piano-paralleli su bedrock anch'esso orizzontale, con estensione laterale infinita, e superficie topografica orizzontale, considerando una colonna verticale di terreno. In questa configurazione i fenomeni di amplificazione sono dovuti principalmente al contrasto di impedenza fra i diversi strati di terreno che compongono la colonna. Il comportamento non-lineare all'interno di questi codici di calcolo può venire valutato secondo due differenti approcci:

- analisi lineare equivalente, si eseguono una sequenza di analisi lineari, aggiornando il modulo di taglio ed il rapporto di smorzamento, fino al soddisfacimento di un prefissato criterio di convergenza;
- analisi non lineare incrementale, si esegue una integrazione delle equazioni dinamiche del moto passo-passo, modificando anche in questo caso il modulo di taglio ed il rapporto di smorzamento.

L'analisi lineare equivalente fornisce risultati accettabili nel campo delle piccole deformazioni; al contrario, per livelli deformativi superiori, si richiede l'utilizzo delle analisi incrementali.

I codici di calcolo bidimensionali considerano, oltre alla profondità, una delle due rimanenti dimensionali spaziali per la determinazione della risposta sismica locale. Con questa configurazione si possono valutare gli effetti di focalizzazione delle onde sismiche in aree

marginali delle valli o gli effetti di riflessioni multiple legati all'interferenza tra il bedrock e strati di terreno non orizzontali.

La rappresentazione nei modelli bidimensionali avviene attraverso una discretizzazione del dominio. Due delle tipologie più diffuse sono:

- metodo alle differenze finite (FDM), discretizza il continuo in una serie di punti distinti;
- metodo agli elementi finiti (FEM), discretizza il continuo con un insieme di elementi più piccoli, la cui eterogeneità si adatta a rappresentare al meglio il sistema da analizzare.

Nelle analisi numeriche bidimensionali, bisogna tenere in conto il problema che deriva dalla discretizzazione del dominio, ovvero il passo degli elementi (siano quadrangolari o triangolari), riveste un ruolo decisivo nel fenomeno di propagazione delle onde sismiche, ed è funzione della lunghezza d'onda associata alla massima frequenza trasmessa.

Esistono ad oggi diversi software che permettono di eseguire analisi numeriche di risposta sismica locale nelle condizioni descritte e la cui scelta è essenzialmente legata alla schematizzazione del problema (Tab. 3.7).

Tab. 3.7 - *Elenco dei principali codici di calcolo per analisi numeriche di risposta sismica locale, suddivisi per caratteristiche (MDOF = modello a masse concentrate; F.E.M. = modello agli elementi finiti; F.D.M. = modello alle differenze finite (da AGI 2005, modificata)*

Geometria	Codice di calcolo	Fonte		Discretizzazione	Dominio di analisi	Metodo di analisi	Tensioni
1D	SHAKE	Schnabel et al. (1972)	Berkeley University	Continuo	Dominio frequenze	Lineare equivalente	Tensioni totali
	EERA	Bardet et al. (2000)	University of Southern California Los Angeles				
	STRATA	Kottke e Rathje (2008)	NEES Org.				
	DEEPSOIL DF	Hashash (2012)	Illinois University				
	NERA	Bardet e Tobita (2001)	University of Southern California Los Angeles	MDOF	Dominio tempo	Non lineare	
2D	QUAD4M	Hudson et al. (1994)	Berkeley University	F.E.M.	Dominio tempo	Lineare equivalente	
	QUAKE/W	www.geo-slope.com	Geostudio				
	LSR-2D	www.stacec.com	Stacec				
2D/3D	FLAC	www.itascacg.com	Itasca Consulting Group Inc.	F.D.M.	Dominio tempo	Non lineare	Tensioni efficaci
	GEFDYN	Aubry e Modaressi (1996)	EcoleCentrale Paris	F.E.M.	Dominio tempo	Non lineare	
	PLAXIS	www.plaxis.nl	Bentley Group				

In questo lavoro la scelta è ricaduta sul software open-source STRATA (Kottke & Rathje, 2008) per le analisi numeriche monodimensionali e su LSR2D, software commerciale dell'azienda Stacec s.r.l., per le simulazioni bidimensionali. Di seguito si descriveranno le caratteristiche dei due software e si tralascerà, ove possibile, la trattazione dei concetti fisico-meccanici alla base del loro funzionamento perché esula dagli scopi di questo lavoro.

Caratteristiche di STRATA

Per eseguire le analisi numeriche di risposta sismica locale in modellazione monodimensionale è stato scelto il software STRATA non solo per la comprovata affidabilità del codice di calcolo, ma anche per la possibilità di eseguire analisi "speditive" in campo lineare

elastico per verificare la corrispondenza tra la modellazione di ogni singola verticale sismostratigrafica e le misure di microtremore, al fine di valutare la correttezza della modellazione ed eventualmente apportarvi modifiche; dovendo eseguire 117 analisi monodimensionali, questo aspetto ha assunto notevole rilevanza.

STRATA (utilizzato in questo lavoro nella versione 0.8.1) calcola la risposta sismica locale di una colonna di terreno monodimensionale utilizzando la propagazione delle onde lineari con proprietà dinamiche del terreno dipendenti dalla deformazione. Il programma permette di eseguire analisi lineare elastiche (EL) dove le proprietà elastiche e lo smorzamento sono mantenuti costanti o analisi lineari equivalenti (EQL) dove le proprietà elastiche e lo smorzamento vengono fatti variare in funzione delle deformazioni.

Il codice di calcolo adottato (come anche per SHAKE o EERA) è descritto da Kramer (1999) e rispetta le condizioni di monodimensionalità del comportamento di una successione di strati piano-paralleli su bedrock anch'esso orizzontale, con estensione laterale infinita, e superficie topografica orizzontale. Ogni stato è definito dai propri valori di densità, modulo di taglio, fattore di smorzamento e spessore (Fig. 1.10); questi valori sono indipendenti dalla frequenza.

L'algoritmo di risoluzione fa uso del modello a strati continui, adottando il modello di solido alla Kelvin-Voigt con coppia molla puramente elastica-smorzatore puramente viscoso (Fig. 3.37).

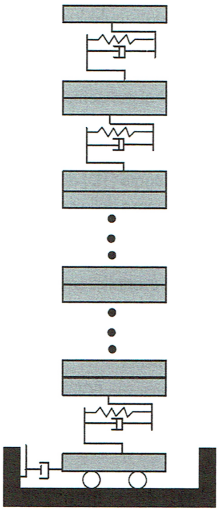


Fig. 3.37 - *Coppia molla-smorzatore del modello Kelvin-Voigt (Nori e Di Marcantonio, 2014)*

Nel caso di analisi lineari elastiche (EL), l'algoritmo permette di adottare un modello dove la rigidità della molla elastica e la viscosità dello smorzatore sono costanti, dove la rigidità G e lo smorzamento D non variano durante l'analisi.

Nelle analisi lineari equivalenti (EQL), viene adottato un modello che fa uso delle curve di decadimento di G e D (che rappresentano la variazione della rigidità della molla e della viscosità dello smorzatore) in funzione delle deformazioni. In pratica STRATA, per tenere conto della variabilità delle caratteristiche del terreno esegue delle analisi lineari, effettuando a valle di ogni analisi una verifica sui valori di G e D con correzione in base al livello deformativo raggiunto, ripetendo le analisi fino a convergenza, ossia fino al raggiungimento per tutti gli

strati di un errore minore della soglia prevista (generalmente pari al 2%). Questa procedura iterativa è svolta da STRATA automaticamente. STRATA inoltre effettua una discretizzazione automatica degli strati, che risulta fondamentale per lo svolgimento dell'analisi lineare equivalente. Sebbene infatti uno strato inizialmente è rappresentato da un'unica coppia di valori di G e D per tutto lo spessore, dopo la prima iterazione non è più così, dato che i valori di deformazione non saranno identici lungo tutto lo spessore dello strato e quindi nemmeno i valori di G e D che sono corretti in base al livello deformativo di output.

L'interfaccia del software STRATA è realizzata a schede dove inserire progressivamente tutti i dati necessari a condurre l'analisi numerica. La prima scheda *General Settings* permette la scelta del metodo di analisi, dei parametri di calcolo (errore massimo, numero di iterazioni, rapporto deformativo effettivo) e dei parametri di discretizzazione. Nella seconda scheda *Soil Types* si inseriscono i sismostrati con le relative proprietà, oltre alle proprietà del bedrock e alla profondità della falda. In questa scheda va attribuita a ciascun sismostrato una coppia di curve G/G_max e D%, scegliendo tra quelle di letteratura disponibili nel software o altre aggiunte dall'utente. La terza scheda *Soil Profile* permette di inserire la sismostratigrafia con gli spessori e la velocità delle onde di taglio Vs di ciascuno strato. Nella successiva scheda *Motion(s)* vanno inserite le storie temporali di input per l'analisi di risposta sismica locale, specificando la profondità alla quale i segnali verranno immessi nel modello (al bedrock o ad una profondità da specificare). Nella scheda *Output Specification* si scelgono le elaborazioni da far condurre al software in funzione dei dati finali che si vogliono ottenere: andamento con la profondità di una serie di parametri della sottoscheda "*Profiles*", serie temporali alle profondità desiderate, spettri di risposta e di Fourier alle profondità desiderate, funzioni di trasferimento, rapporti spettrali, intervalli di periodo entro i quali eseguire le elaborazioni, passo di restituzione dei risultati, ecc.

Caratteristiche di LSR2D

Per eseguire le analisi di risposta sismica locale in modellazione bidimensionale, per tenere conto del comportamento non lineare del terreno e di adottare una modellazione bidimensionale per considerare anche gli effetti topografici, di valle e di bacino, si è fatto ricorso al software LSR2D (*Local Seismic Response* 2D) che consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema della risposta sismica locale mediante un approccio agli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando un modello di sottosuolo alla Kelvin-Voigt (Fig. 3.37). Questo software, rispetto ad altri che adottano lo stesso metodo (ad es. QUAD4M), presenta dei significativi vantaggi in relazione all'avanzata interfaccia d'uso, ricca di strumenti che agevolano l'introduzione dei dati, e ai numerosi strumenti di post-processing che permettono di ridurre i tempi per l'elaborazione dei dati a valle. Inoltre, implementa nativamente la normativa tecnica italiana di riferimento per l'esecuzione delle analisi (NTC 2018), agevolando la produzione di risultati che possono essere direttamente utilizzati a scopi professionali, ma utili anche ai fini del presente studio.

LSR2D (utilizzato in questo lavoro nelle versioni a partire dalla 5.0.10 fino all'attuale versione 6.0.2) è un software commerciale e per il suo utilizzo il sottoscritto detiene la licenza LIC5338. In particolare, il passaggio dalla versione 5.1 alla versione 5.2 ha riportato una modifica suggerita dal sottoscritto a seguito di problemi riscontrati nelle analisi numeriche eseguite per questo dottorato di ricerca: una impostazione del codice riguardante il processo di salvataggio dei dati alla fine della elaborazione poneva dei limiti nelle dimensioni dei file in uscita; questa limitazione non era mai stata rilevata dai programmatori Stacec, ma le dimensioni delle modellazioni qui eseguite ha rivelato questo problema che è stato prontamente risolto.

Nel codice di calcolo LSR2D le equazioni del moto vengono assemblate mediante il metodo degli elementi finiti (FEM) nell'ipotesi di materiale viscoelastico in tensioni totali. Il deposito viene discretizzato in una mesh di elementi di forma triangolare o quadrangolare, consentendo una efficace modellazione della variazione geometrica del contatto deposito-substrato, così come delle irregolarità della superficie topografica e dei contatti stratigrafici. La scelta della griglia di calcolo rappresenta un punto fondamentale dell'analisi in quanto da essa dipende l'accuratezza della soluzione. In generale è possibile affermare che tanto più è fitta la mesh tanto più sarà accurata la soluzione, tuttavia una mesh troppo fitta fa aumentare notevolmente gli oneri computazionali; per contro una mesh troppo grossolana si traduce in un filtraggio delle componenti di alta frequenza poiché le piccole lunghezze d'onda non possono essere adeguatamente modellate da nodi troppo distanti tra loro. La soluzione classicamente adottata è quella di scegliere le dimensioni degli elementi in modo che sia rispettata la condizione:

$$h \leq \frac{V_S}{\left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{5}\right) \cdot f_{max}} = \frac{\lambda_{min}}{6 \div 8}$$

dove V_S è la velocità di propagazione delle onde di taglio e f_{max} è la massima frequenza considerata nell'analisi (generalmente 20 Hz). Una schematizzazione del modello di calcolo adottato in LSR2D è riportata in figura 3.38 e l'equilibrio dinamico del sistema è descritto dalla seguente relazione:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 2Ma_g$$

dove:

M = matrice di massa globale del sistema
C = matrice di smorzamento globale del sistema
K = matrice di rigidezza globale del sistema
$\ddot{u}$ = vettore delle accelerazioni globali del sistema
$\dot{u}$ = vettore delle velocità globali del sistema
u = vettore degli spostamenti globali del sistema

Gli spostamenti in corrispondenza delle frontiere laterali del modello dovrebbero essere uguali a quelli di una colonna di terreno isolata in condizioni di campo libero. Se lo smorzamento del terreno è relativamente alto, tale condizione può essere raggiunta semplicemente allontanando di una certa distanza dalla regione di interesse le frontiere laterali ed assegnando delle restrizioni cinematiche nei confronti della componente verticale (Fig.

3.39.b). Tuttavia, se lo smorzamento del terreno è basso la distanza necessaria per il raggiungimento della condizione desiderata risulta molto elevata, producendo un notevole incremento dei costi computazionali. Un metodo alternativo, è quello di applicare il moto di campo libero (*free field*) in modo tale che le frontiere agiscano come un sistema in grado di assorbire le onde riflesse che altrimenti verrebbero artificialmente reintrodotte nel modello (Fig. 3.39.a). Nel codice LSR2D questo è implementato mediante l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne *free-field*) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero (Fig. 3.39.c).

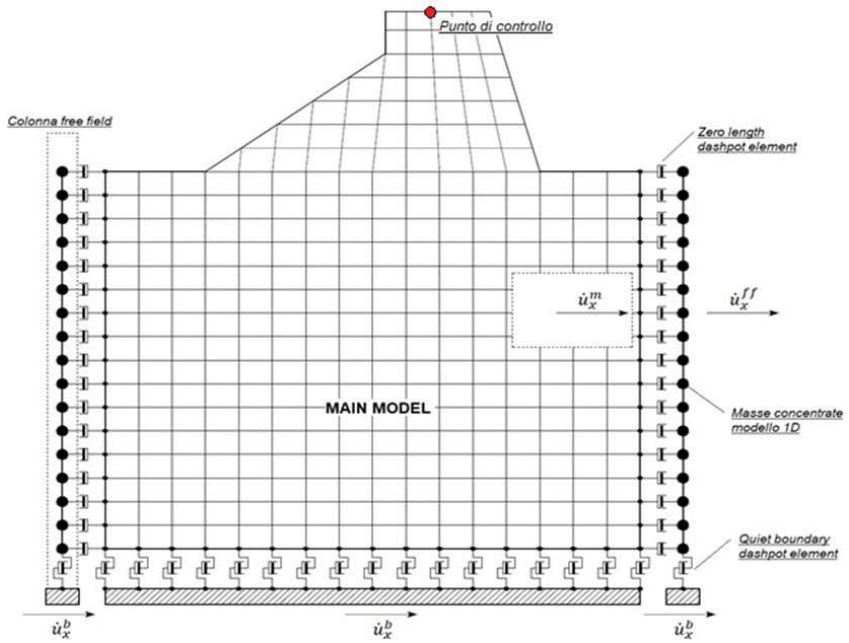


Fig. 3.38 - *Schematizzazione del modello agli elementi finiti implementato nel codice di calcolo LSR2D*

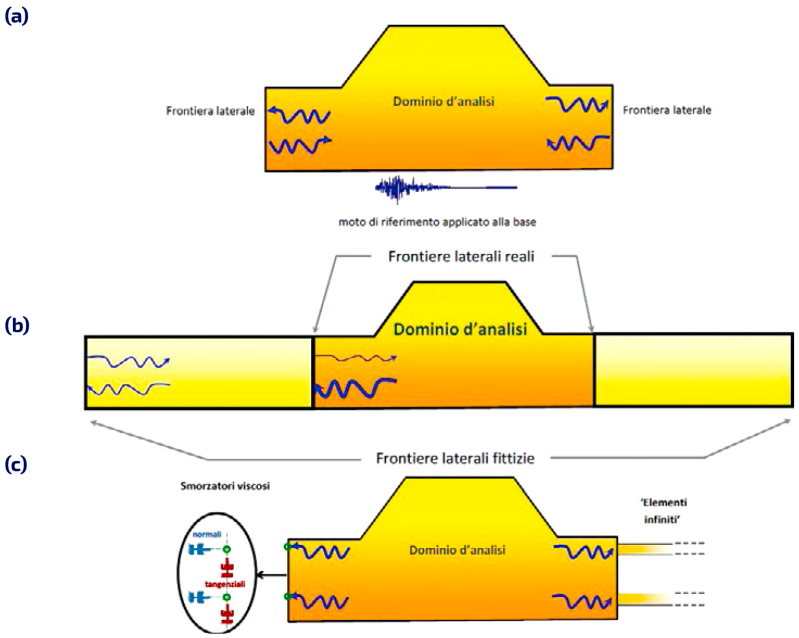


Fig. 3.39 - *Modello 2D con frontiere laterali riflettenti a) prossime o b) lontane e frontiere laterali c) assorbenti (Pergalani et al., 2020)*

Come STRATA, anche LSR2D esegue una procedura iterativa che consiste in una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidezza e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza.

L'interfaccia grafica del software LSR2D è realizzata sostanzialmente in tre schede principali che permettono di gestire le diverse fasi di lavoro. Nella scheda *Home* si può, tra le altre cose, gestire l'inserimento degli accelerogrammi di input, l'eventuale inserimento di curve di decadimento definite dall'utente (oltre quelle già presenti), la definizione dell'analisi da condurre e l'importazione del modello sismostratigrafico (ad esempio da file *dxf*). Nella scheda *Modellazione*, una volta caricato il modello, è possibile procedere alla caratterizzazione di ciascun sismostrato in termini di peso di volume, di V_S e di curve di decadimento, si possono inserire i punti di controllo e si possono applicare le restrizioni cinematiche (vincoli) ai limiti inferiore e laterali della sezione. Nella scheda *Elaborazione e Output* si impostano i parametri della mesh (forma e passo) per poi generarla e, ove la discretizzazione risulti accettabile, avviare il calcolo.

Al termine dell'elaborazione possono essere estratti i risultati dell'analisi di risposta sismica locale in termini di:

- storie temporali e spettri di risposta delle componenti cinematiche (spostamenti, velocità ed accelerazioni) del moto in direzione orizzontale e/o verticale nei punti di controllo definiti in fase di input;
- fattori di amplificazione nei punti di controllo definiti e per ognuno dei tre intervalli di periodo di riferimento (0.1-0.5 s; 0.4-0.8 s; 0.7-1.1 s);
- valori massimi di spostamenti, velocità ed accelerazione su tutti i nodi del dominio discretizzato;
- valori massimi delle componenti dello stato tensionale e deformativo sui nodi del dominio;
- valori del rapporto G/G_0 e del rapporto di smorzamento viscoso D raggiunti per ogni elemento finito durante la ricerca della convergenza della procedura lineare equivalente.

In particolare, i fattori di amplificazione, che sono stati utilizzati in questo studio per definire la pericolosità sismica dell'area studiata, derivano da rapporti tra grandezze integrali derivate da spettri di risposta elastici in accelerazione alla superficie e quelli corrispondenti al moto atteso su un suolo di riferimento pianeggiante ed ipoteticamente affiorante nello stesso sito (cfr. § 4.1).

3.5.2 Scelta dell'input sismico

Definito il modello sismostratigrafico, per eseguire l'analisi numerica di risposta sismica locale bisogna "caricare" il modello stesso con una azione sismica in ingresso descritta attraverso storie temporali del moto, ossia tramite accelerogrammi. Come già specificato (§ 1.2.3) la normativa (NTC18, § 3.2.3.6) suggerisce l'utilizzo di accelerogrammi naturali (registrazioni di eventi naturali) e raccomanda l'utilizzo di almeno 7 accelerogrammi che siano

rappresentativi dell'azione sismica di riferimento per lo specifico sito (criterio di spettro-compatibilità).

L'azione sismica di riferimento è valutata in condizioni ideali di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (suolo di categoria A e topografia T1), al netto quindi degli effetti di sito e corrisponde quindi con la pericolosità sismica di base per il sito in esame. D'altronde non potrebbe essere altrimenti, dato che lo scopo delle analisi di risposta sismica locale è proprio valutare gli effetti di sito sulla azione sismica riferita alle condizioni ideali rappresentate negli studi di pericolosità sismica di base.

Per valutare il contributo alla pericolosità di base da parte delle diverse sorgenti sismogenetiche si esegue una procedura di disaggregazione. In pratica, assunto che l'accelerazione superi un determinato valore di interesse, con la disaggregazione si calcola per ciascuna possibile coppia magnitudo (M) e distanza (R) del sito dalla sorgente del terremoto la probabilità che tale superamento sia causato dalla coppia stessa.

Questa procedura può essere eseguita sul sito del Modello di pericolosità sismica MPS04-S1 dell'INGV (http://esse1-gis.mi.ingv.it/, Fig. 3.40), Nel caso di questo studio i parametri di ricerca sono stati i seguenti:

Tab. 3.8 - *Parametri di ricerca per la procedura di disaggregazione*

Coordinate	Lat. 41.493°; Long. 13.830°
Parametro dello scuotimento	PGA
Probabilità in 50 anni	10% (SLV)
Percentile	50°

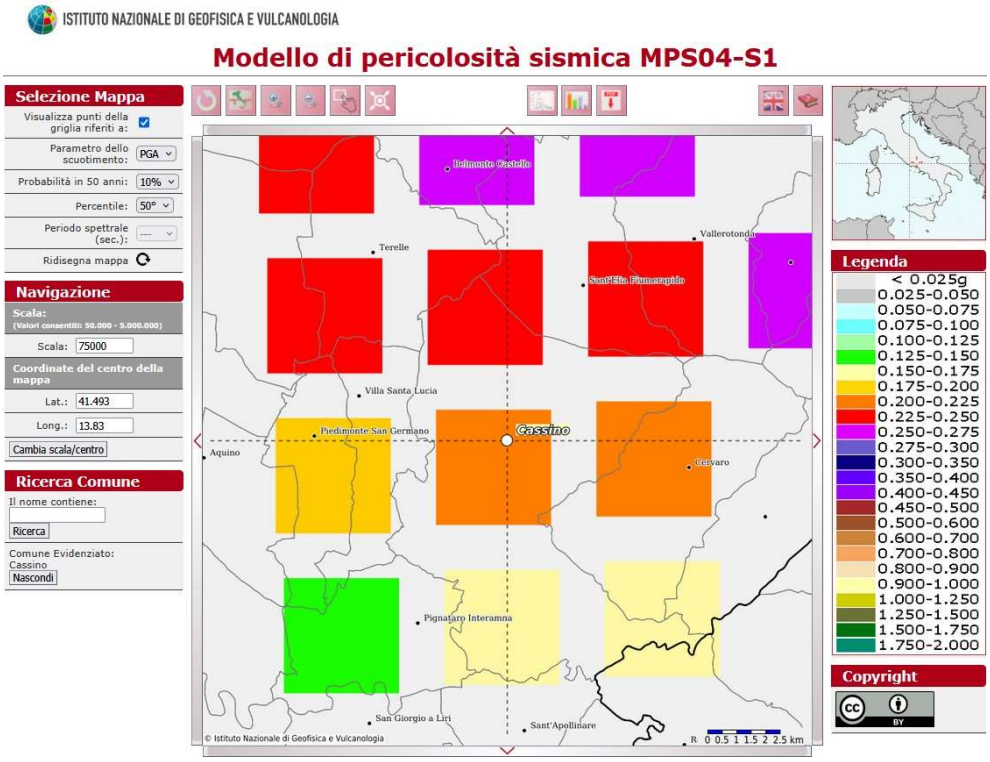


Fig. 3.40 - *Pagina http://esse1-gis.mi.ingv.it/ con impostazione dei parametri di ricerca come da tabella 3.8*

Cliccando sul riquadro corrispondente alle coordinate inserite si ottiene il grafico di disaggregazione nel quale si può leggere il contributo alla pericolosità di base da parte delle

diverse sorgenti sismogenetiche (Fig. 3.41 e Tab. 3.9). Il contributo maggiore viene dato da sorgenti poste entro i 40 km di distanza dall'area di studio con eventi sismici di magnitudo compresa tra 4.0 e 7.5.

Tab. 3.9 - *Contributo in termini di magnitudo e distanza delle sorgenti sismogenetiche alla pericolosità di base dell'area di studio*

	da	*a*
Magnitudo (Mw)	4.0	7.5
Distanza (km)	0	40

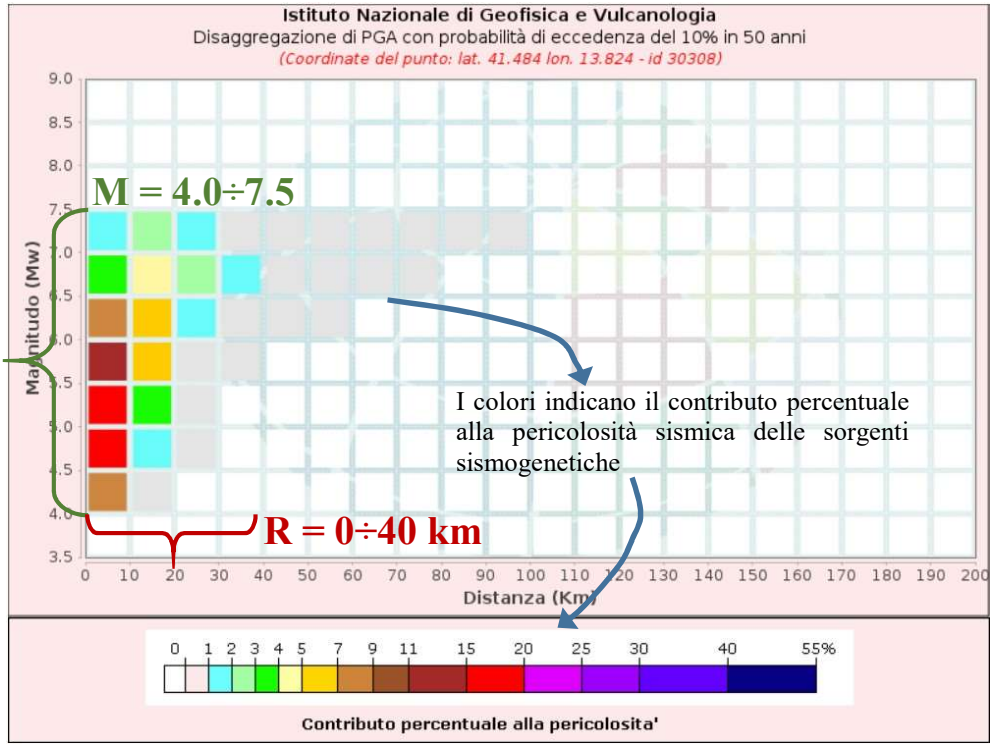


Fig. 3.41 - *Grafico di disaggregazione per la lettura del contributo delle diverse sorgenti sismogenetiche alla pericolosità di base*

Questi valori sono stati usati nell'applicativo REXELweb (Sgobba et al. 2021), disponibile al sito web di ITACA (*ITalian ACcelerometric Archive* v4.0 - https://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_40/#/rexel), per la ricerca delle combinazioni di registrazioni accelerometriche di input al bedrock per la simulazione dell'evento sismico. La ricerca viene eseguita da questo strumento secondo criteri di spettro-compatibilità tramite confronto con uno spettro obiettivo o target che viene definito tramite l'inserimento delle coordinate del sito di interesse, dello stato limite da considerare (Fig. 3.42), dei parametri di disaggregazione, del periodo di ritorno (Fig. 3.43), della tolleranza inferiore (10%) e superiore (30%) per l'accelerazione, dell'intervallo di periodo (0.1÷2.0 s) e della numerosità dei set accelerometrici richiesti (7, come specificato dalla normativa) (Fig. 3.44).

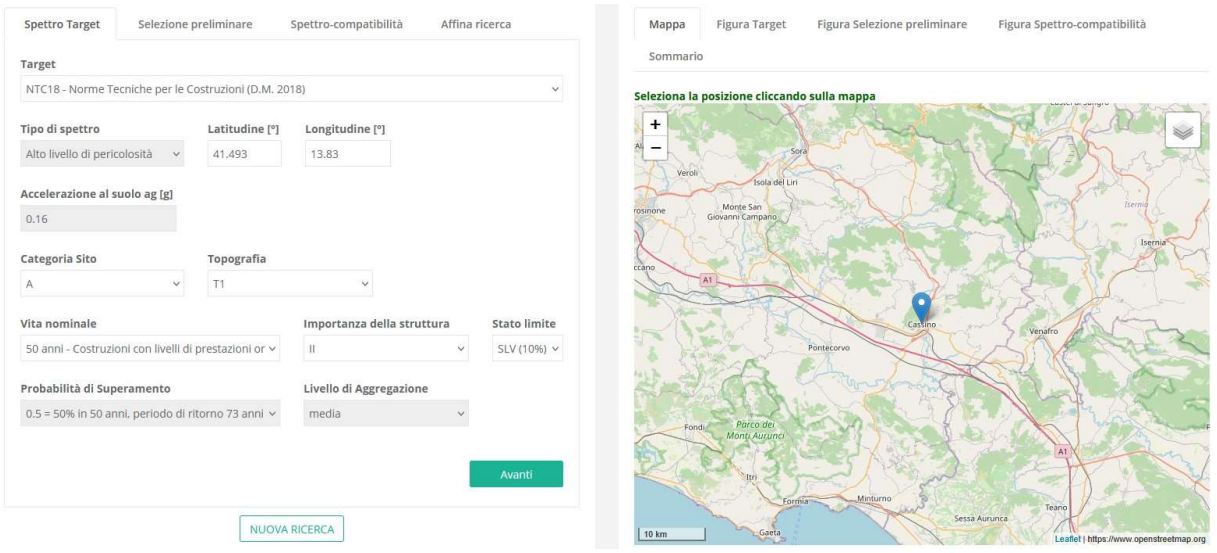


Fig. 3.42 - *REXELweb: scheda per l'individuazione del sito di interesse considerato pianeggiante (topografia T1) e su suolo rigido (categoria di sito A)*

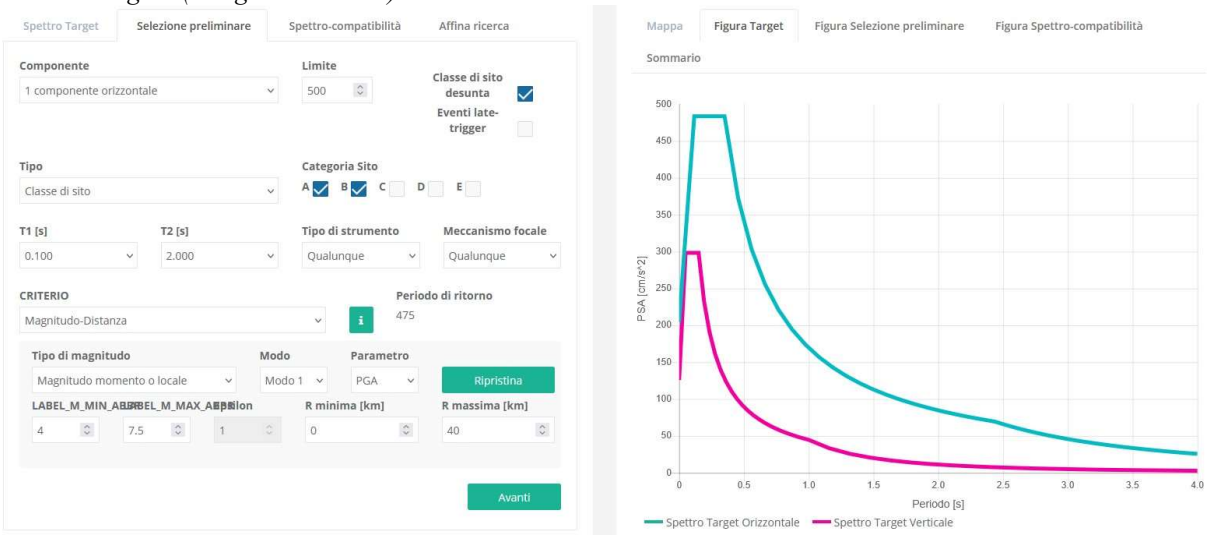


Fig. 3.43 - *REXELweb: scheda per l'inserimento dei parametri di disaggregazione e del periodo di ritorno (475 anni); a destra gli spettri target (verticale e orizzontale) definiti con i criteri di ricerca*

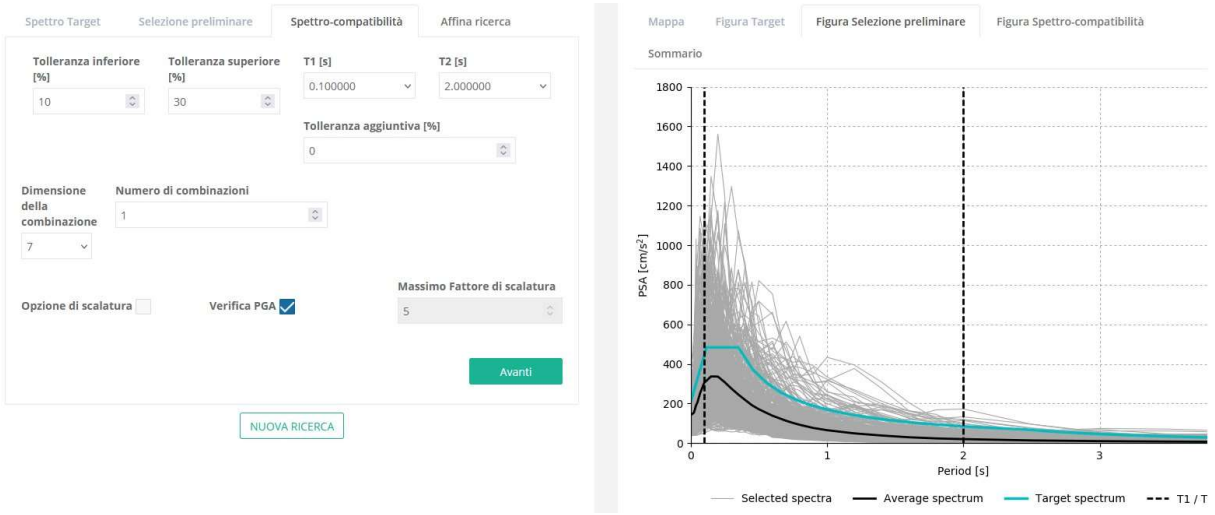


Fig. 3.44 - *REXELweb: scheda per l'inserimento delle tolleranze di ricerca e della numerosità del set di accelerogrammi; nel grafico a destra sono riportati gli spettri selezionati (in grigio) in funzione dei criteri di ricerca e dello spettro target (in azzurro) e lo spettro medio (in nero) degli spettri selezionati*

L'inserimento dei dati nelle diverse schede genera aggiornamenti successivi nel grafico a destra nella stessa schermata, passando dalla visualizzazione del solo spettro target definito (Fig. 3.43), all'insieme degli spettri che soddisfano i criteri di ricerca (Fig. 3.44), fino alla visualizzazione del set di accelerogrammi selezionati (Fig. 3.45) che sono elencati nella tabella 3.10.

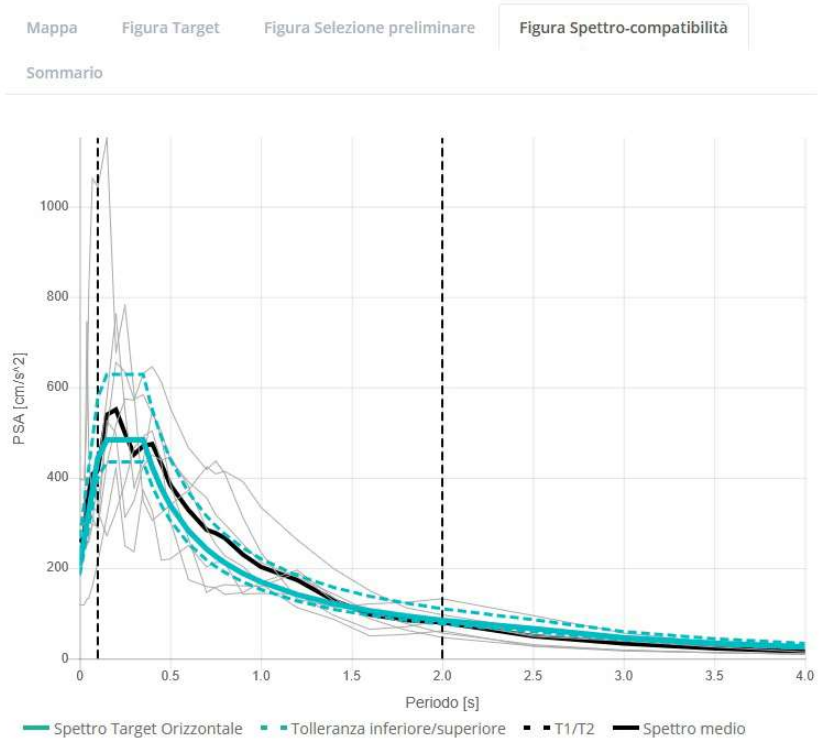


Fig. 3.45 - *REXELweb: figura di spettro-compatibilità, con indicazione (linee tratteggiate verticali) dell'intervallo di periodo della ricerca (T1/T2), delle tolleranze inferiore e superiore dell'accelerazione (curve azzurre tratteggiate), del set di accelerogrammi selezionati (in grigio) e del loro spettro medio (curva continua nera)*

Tab. 3.10 – *Set degli accelerogrammi di input estratti da REXELweb*

Nome file	*Data evento*	*Stazione di registrazione*
3A.MZ63..HNE.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP	30/10/2016	Collecreta
E.SRC0.00.HNE.D.IT-1976-0030.ACC.MP	15/09/1976	S. Rocco
IT.AMT.00.HGN.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP	30/10/2016	Amatrice
IT.MSCT.00.HGE.D.EMSC-20170118_0000037.ACC.MP	18/01/2017	Mascioni
IT.NRC.00.HGE.D.EMSC-20161026_0000095.ACC.MP	26/10/2016	Norcia
IT.TLM1.00.HNN.D.IT-1976-0002.ACC.MP	06/05/1976	Tolmezzo C.
IV.EVRN..HNE.D.EMSC-20181226_0000014.ACC.MP	26/12/2018	Santa Venerina

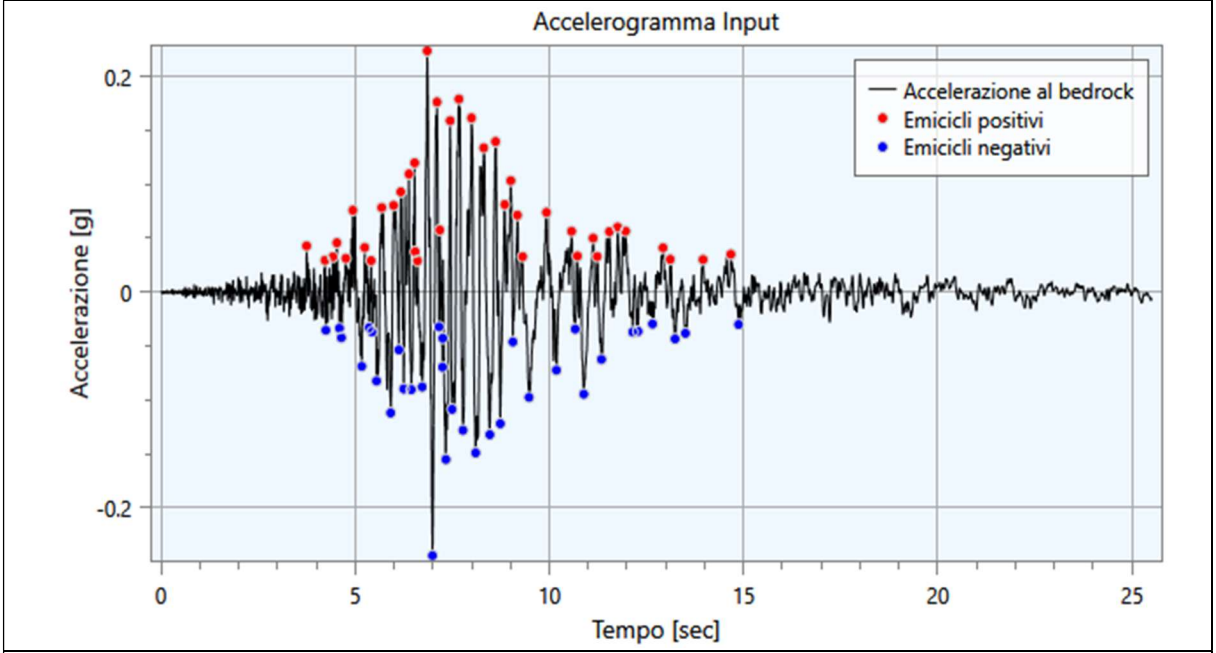
Di seguito si illustrano le caratteristiche dei 7 accelerogrammi selezionati, così come "letti" nel software LSR2D che estrapola i seguenti dati:

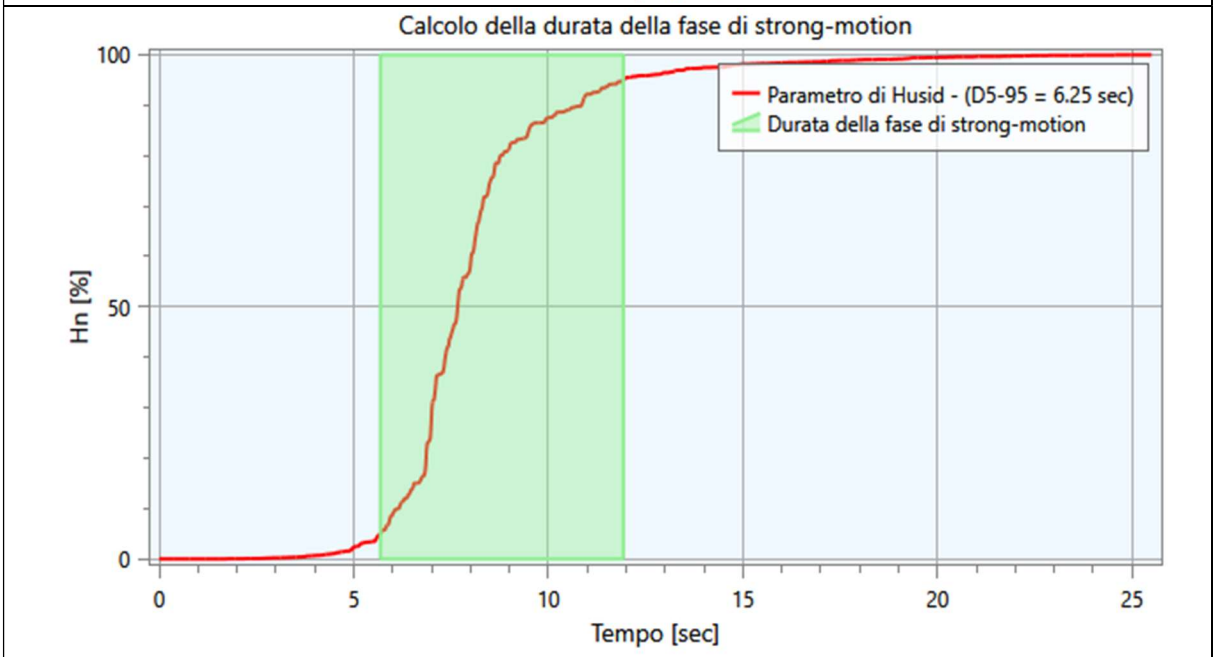
a_{max}: accelerazione massima
I_S: intensità di Arias
t_5: istante iniziale della fase di *strong motion*
t_{95}: istante finale della fase di *strong motion*
$D_{5\text{-}95}$: durata della fase di *strong motion*
v_0: frequenza di passaggi per lo zero nella fase di *strong motion*

N_{eq}: numero di cicli equivalenti.

***Tab. 3.11** – Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (1)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso)*

Nome: Acc (1)	**Nome file:** 3A.MZ63..HNE.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP

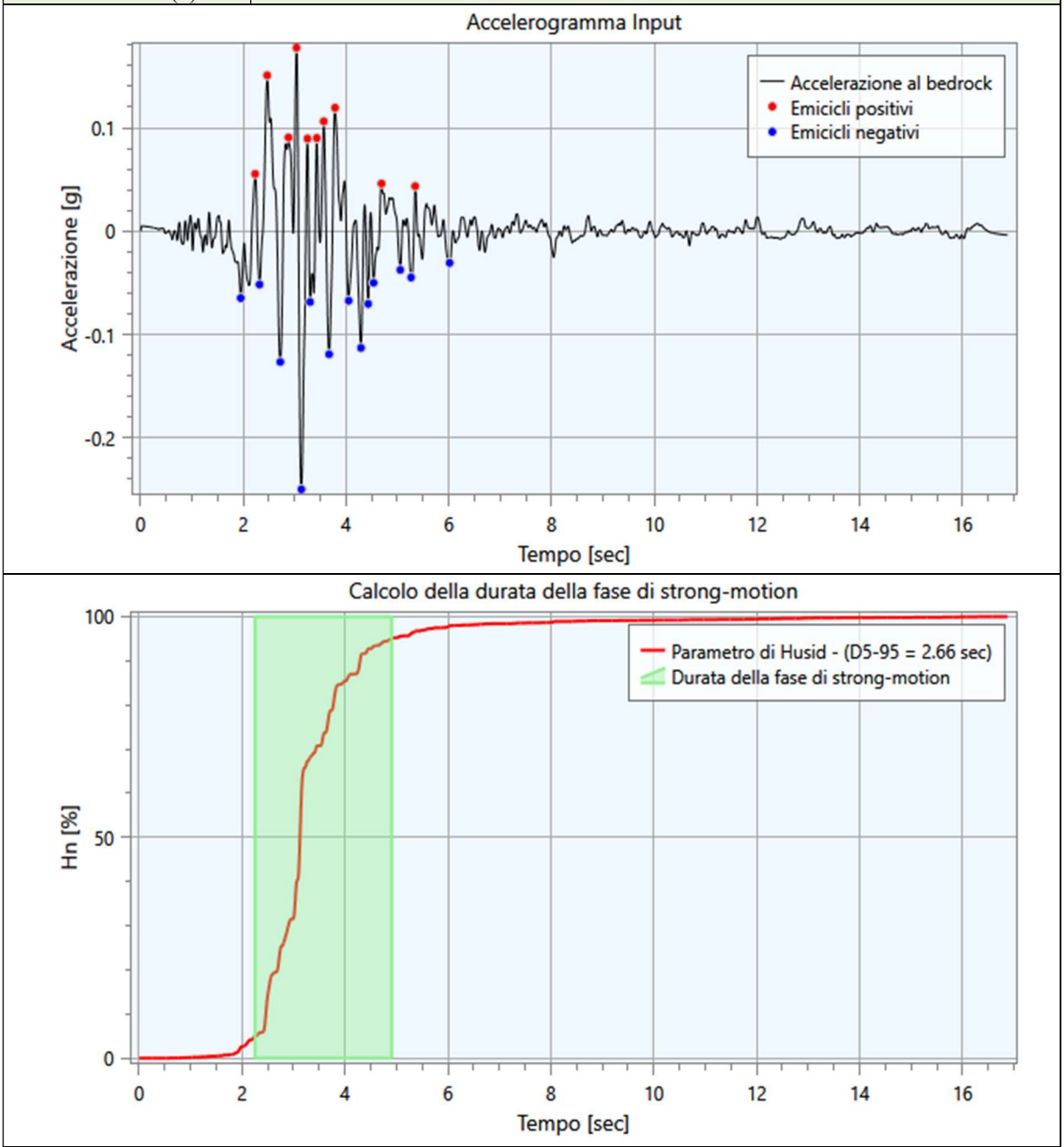




Info		**Dati**	
a_{max} [g]	0.24	**Nome evento**	None
I_s [cm/s]	49.1	**Id evento**	EMSC-20161030_0000029
t_5 [s]	5.68	**Data**	30/10/2016
t_{95} [95]	11.93	M_w	6.6
$D_{5\text{-}95}$ [s]	6.25	M_L	
ν_0 [Hz]	10.8	**Sito EC8**	B
N_{eq} [-]	10.5	**Nome stazione**	COLLECRETA IDPA CNR IMAA CNR
		R_{ep} [km]	28.3

Tab. 3.12 – *Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (2)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso)*

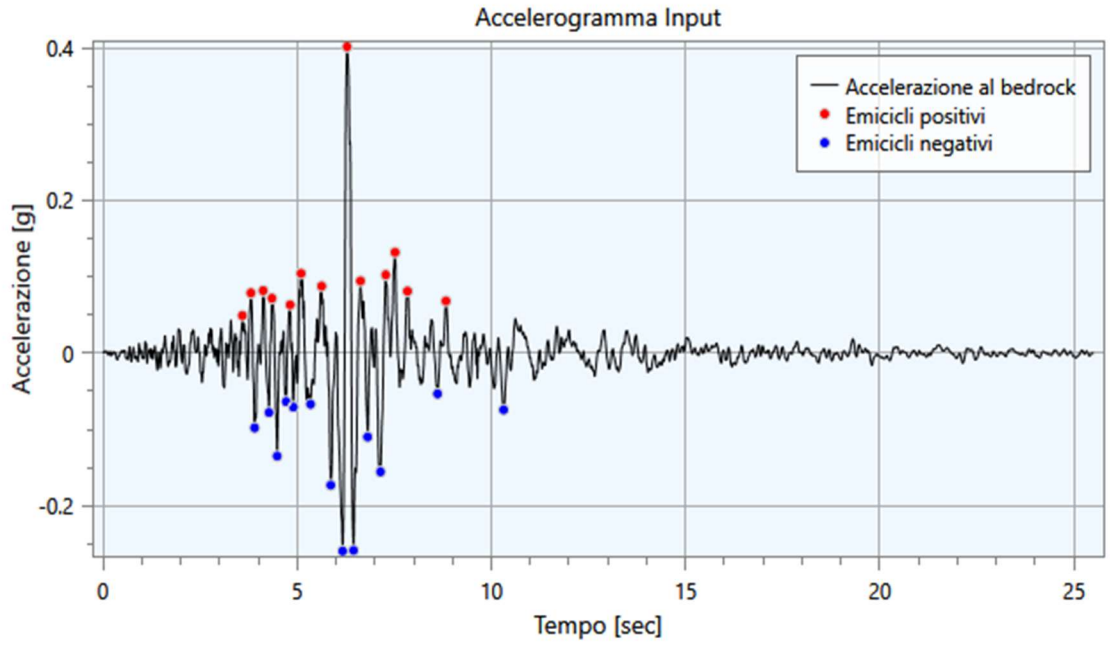
Nome: Acc (2)	**Nome file:** E.SRC0.00.HNE.D.IT-1976-0030.ACC.MP

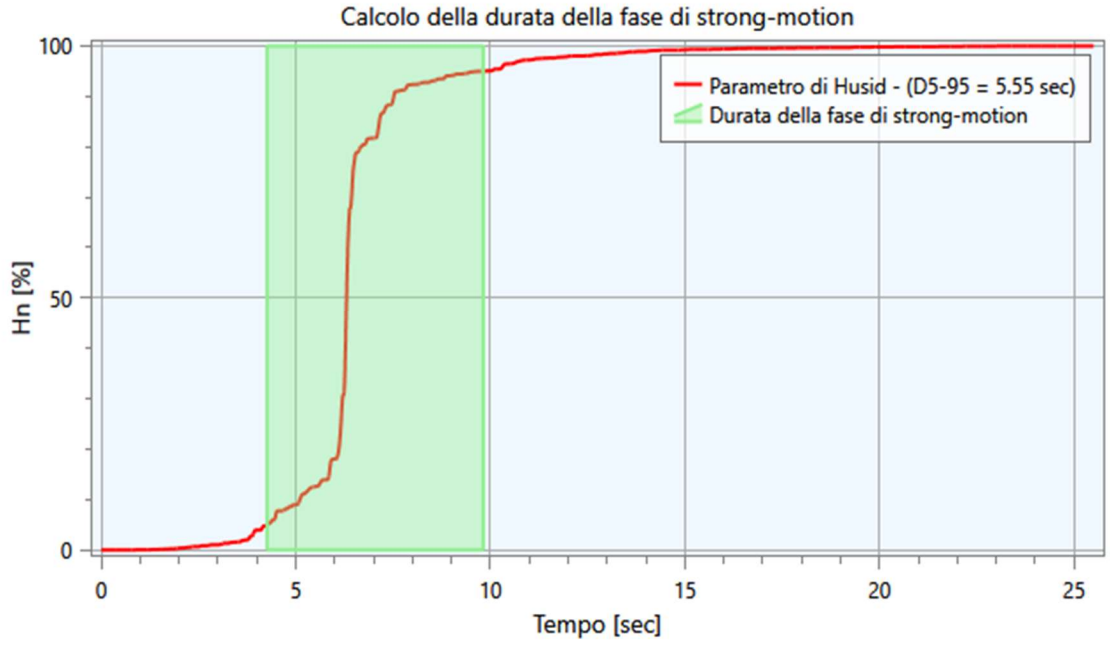


Info		**Dati**	
a_{max} $[g]$	0.25	**Nome evento**	None
I_s $[cm/s]$	25.4	**Id evento**	IT-1976-0030
t_5 $[s]$	2.25	**Data**	15/09/1976
t_{95} $[95]$	4.91	M_w	6.0
$D_{5\text{-}95}$ $[s]$	2.66	M_L	
ν_0 $[Hz]$	8.0	**Sito EC8**	A (inferred from geology)
N_{eq} [-]	4.3	**Nome stazione**	S. ROCCO
		R_{ep} $[km]$	15.8

Tab. 3.13 – *Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (3)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso)*

Nome: Acc (3)	**Nome file:** IT.AMT.00.HGN.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP

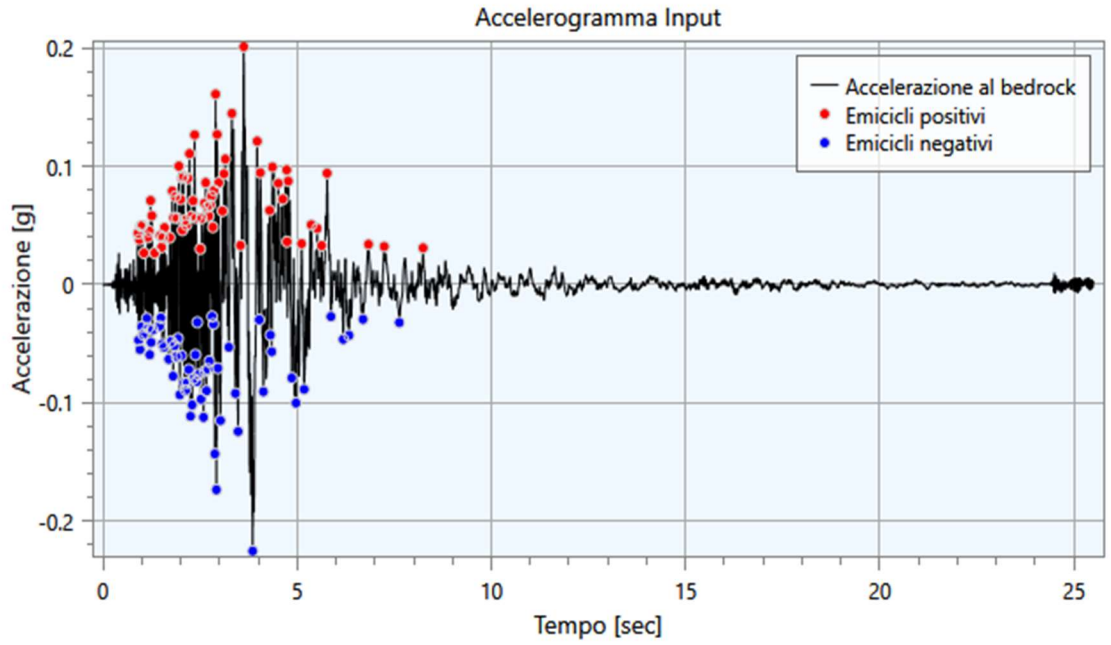


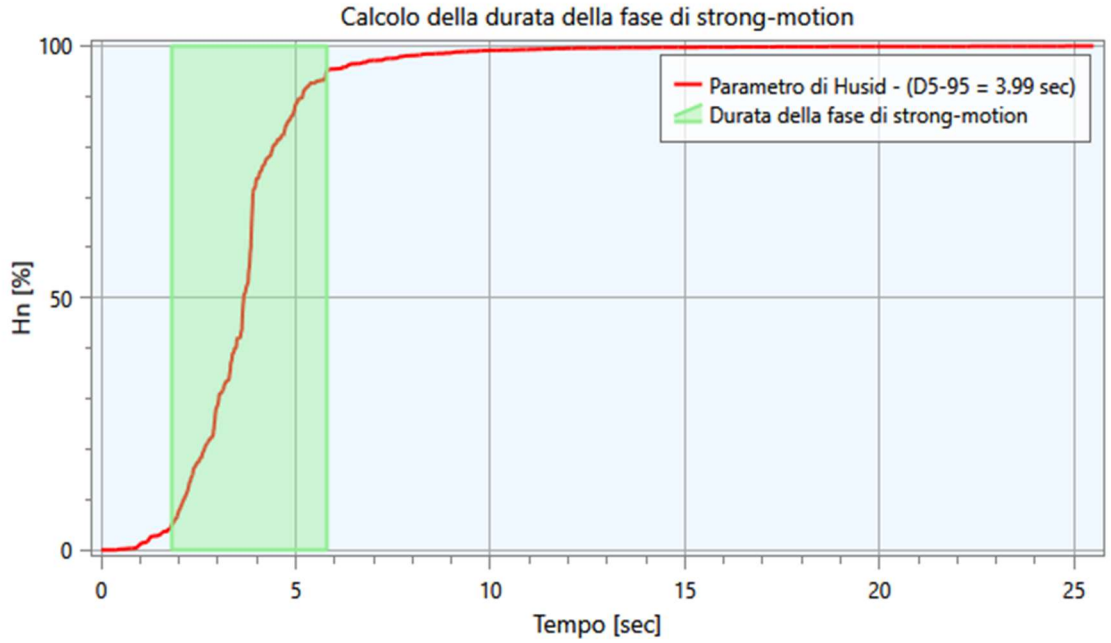


Info		**Dati**	
a_{max} [g]	0.40	**Nome evento**	None
I_s [cm/s]	68.5	**Id evento**	EMSC-20161030_0000029
t_5 [s]	4.26	**Data**	30/10/2016
t_{95} [95]	9.82	M_w	6.6
$D_{5\text{-}95}$ [s]	5.55	M_L	
ν_0 [Hz]	7.7	**Sito EC8**	B
N_{eq} [-]	3.4	**Nome stazione**	AMATRICE
		R_{ep} [km]	26.5

Tab. 3.14 – *Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (4)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso)*

Nome: Acc (4)	**Nome file:** IT.MSCT.00.HGE.D.EMSC-20170118_0000037.ACC.MP

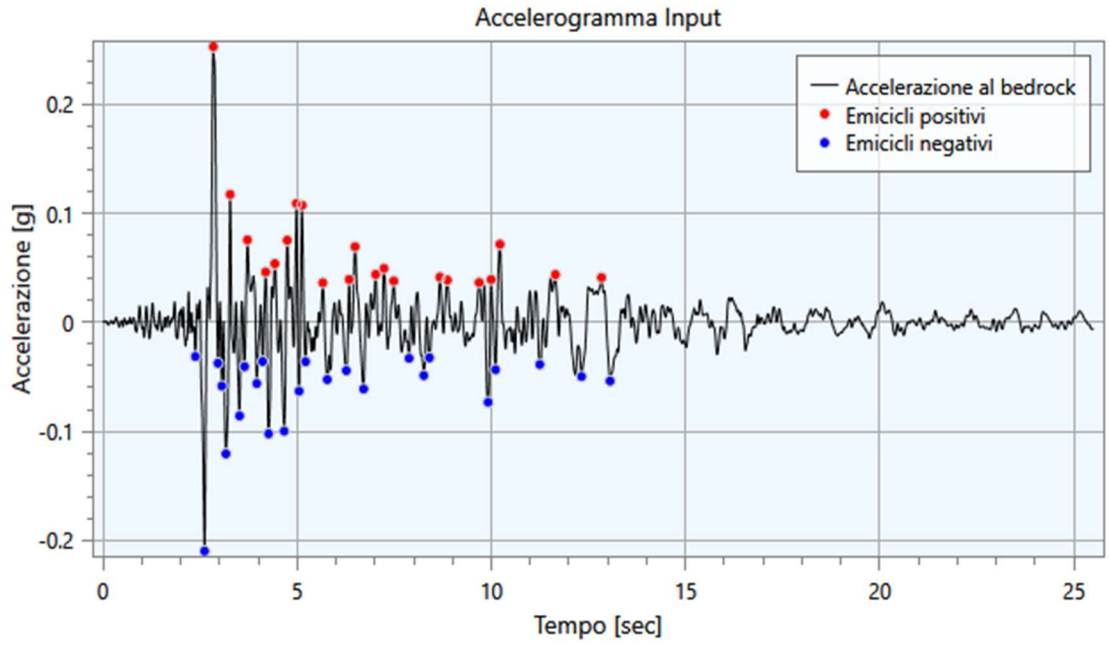


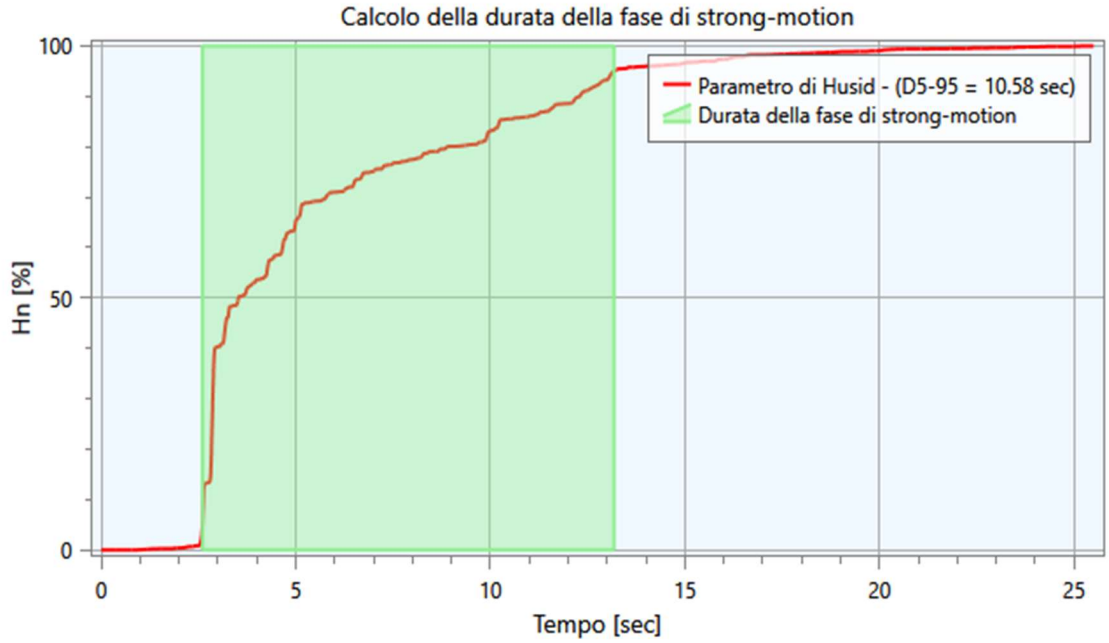


Info		**Dati**	
a_{max} [g]	0.23	**Nome evento**	None
I_s [cm/s]	27.5	**Id evento**	EMSC-20170118_0000037
t_5 [s]	1.81	**Data**	18/01/2017
t_{95} [95]	5.80	M_w	5.4
$D_{5\text{-}95}$ [s]	3.99	M_L	
ν_0 [Hz]	27.5	**Sito EC8**	B
N_{eq} [-]	14.2	**Nome stazione**	MASCIONI (CAMPOTOSTO) 2
		R_{ep} [km]	4.8

Tab. 3.15 – *Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (5)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso)*

Nome: Acc (5)	**Nome file:** IT.NRC.00.HGE.D.EMSC-20161026_0000095.ACC.MP

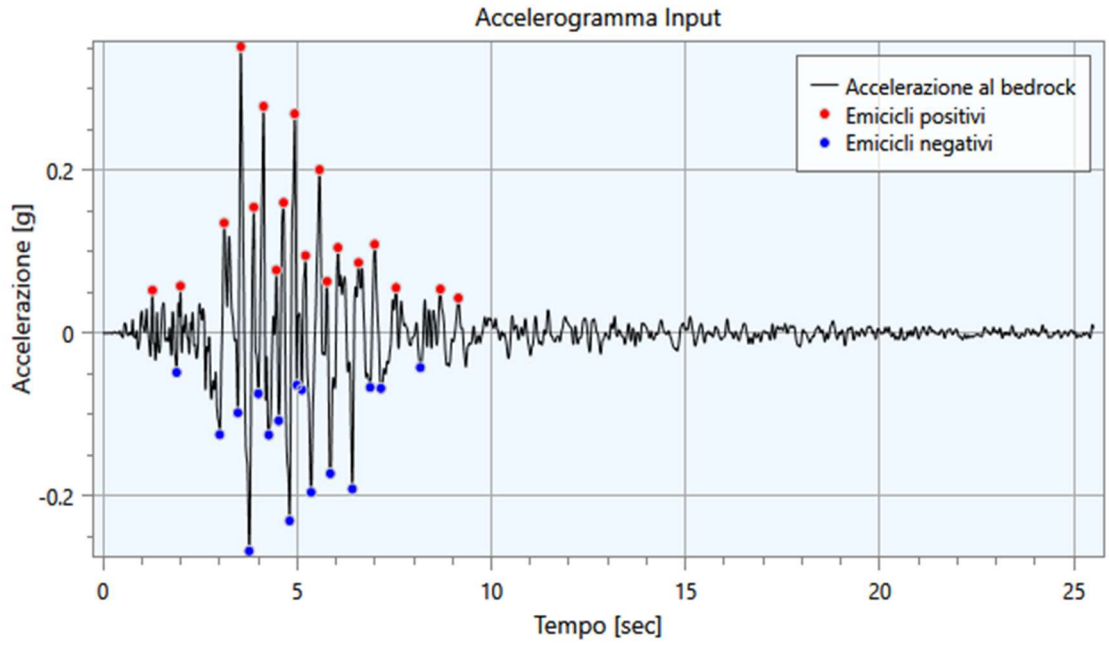


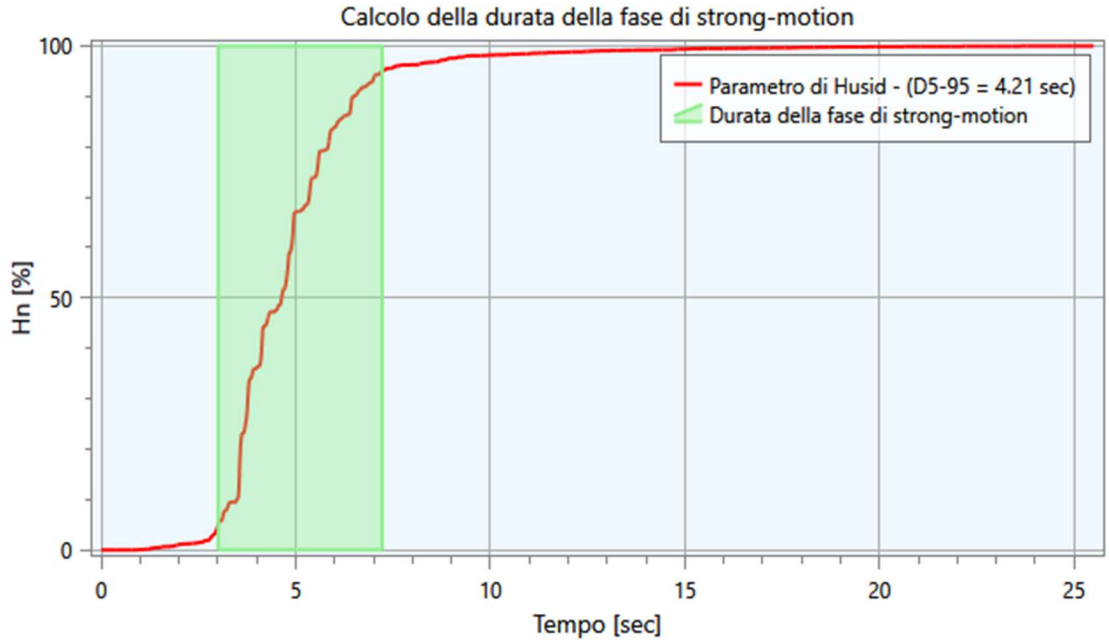


Info		**Dati**	
a_{max} [g]	0.25	**Nome evento**	None
I_s [cm/s]	30.1	**Id evento**	EMSC-20161026_0000095
t_5 [s]	2.60	**Data**	26/10/2016
t_{95} [95]	13.18	M_w	5.9
$D_{5\text{-}95}$ [s]	10.58	M_L	
ν_0 [Hz]	8.1	**Sito EC8**	B
N_{eq} [-]	4.4	**Nome stazione**	NORCIA
		R_{ep} [km]	13.6

Tab. 3.16 – *Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (6)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso)*

Nome: Acc (6)	**Nome file:** IT.TLM1.00.HNN.D.IT-1976-0002.ACC.MP

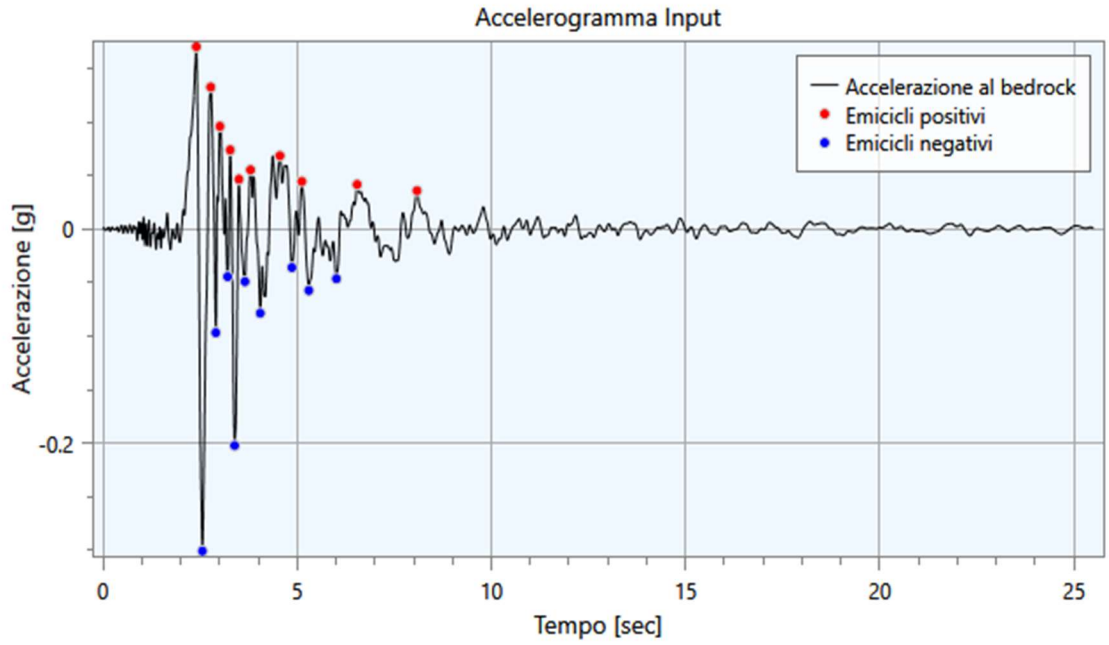


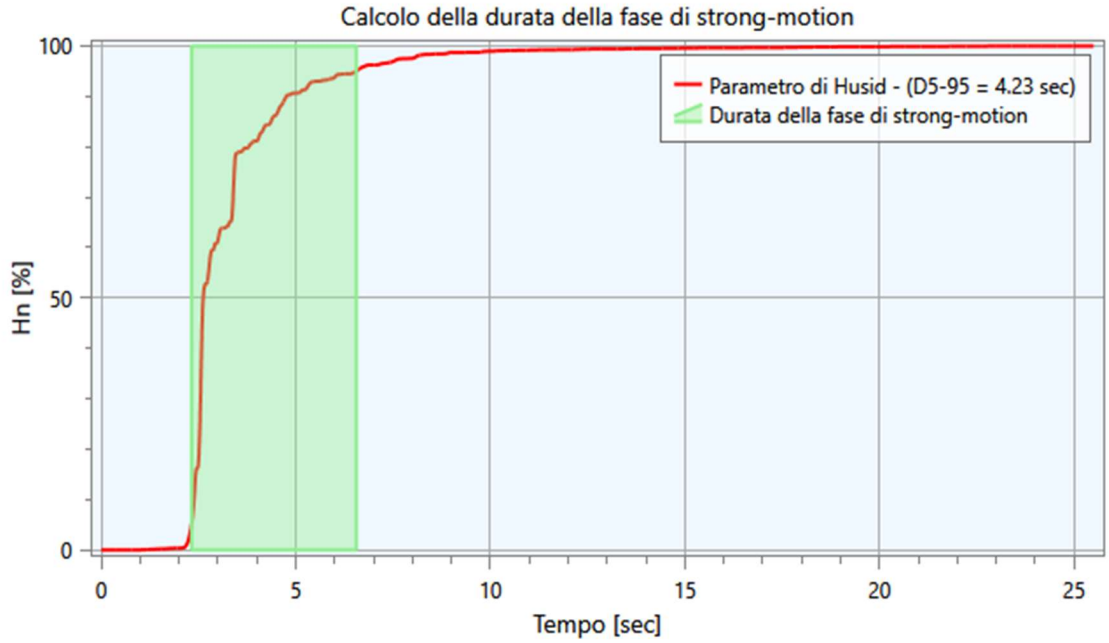


Info		**Dati**	
a_{max} [g]	0.35	**Nome evento**	None
I_s [cm/s]	79.0	**Id evento**	IT-1976-0002
t_5 [s]	3.00	**Data**	06/05/1976
t_{95} [95]	7.22	M_w	6.4
$D_{5\text{-}95}$ [s]	4.21	M_L	
ν_0 [Hz]	6.9	**Sito EC8**	B
N_{eq} [-]	6.9	**Nome stazione**	TOLMEZZO CENTRALE - DIGA AMBIESTA 1
		R_{ep} [km]	27.7

Tab. 3.17 *– Caratteristiche dell'accelerogramma di input "ACC (7)": storia temporale (in alto), diagramma di intensità di Husid (al centro) e caratteristiche dell'evento e della stazione di registrazione dell'accelerogramma (in basso)*

Nome: Acc (7)	**Nome file:** IV.EVRN..HNE.D.EMSC-20181226_0000014.ACC.MP





Info		**Dati**	
a_{max} $[g]$	0.30	**Nome evento**	None
I_s $[cm/s]$	35.4	**Id evento**	EMSC-20181226_0000014
t_5 $[s]$	2.32	**Data**	26/12/2018
t_{95} $[95]$	6.55	M_w	5.0
$D_{5\text{-}95}$ $[s]$	4.23	M_L	
ν_0 $[Hz]$	4.9	**Sito EC8**	A (inferred from geology)
N_{eq} [-]	3.0	**Nome stazione**	SANTA VENERINA
		R_{ep} $[km]$	5.3

3.5.3 Parametrizzazione dei sismostrati

Le unità geologiche sono state caratterizzate dal punto di vista geofisico e geotecnico (V_S, densità, indice di plasticità, granulometria) a partire dalle numerose indagini e prove eseguite nell'area (Fig. 3.46), come illustrato nel paragrafo 3.1.

In particolare, per caratterizzare il sismostrato "AL" (Tab. 3.23) in termini di peso di volume (γ_n) e indice di plasticità (PI) sono stati estratti i dati di 29 campioni prelevati all'interno dei depositi alluvionali attuali e recenti compresi nel Complesso continentale e vulcanico (***I***). L'ubicazione dei sondaggi da cui sono stati prelevati questi campioni è riportata nella carta di Fig. 3.46. La Fig. 3.47 mostra la variabilità di questi dati e la media di ciascun parametro (γ_n=18.04 kN/m^3, IP=22.08), utilizzata poi nella modellazione del sismostrato. Il valore dell'indice di plasticità non entra direttamente nelle analisi di risposta sismica ma permette di attribuire le curve di decadimento del modulo di taglio e di smorzamento al sismostrato.

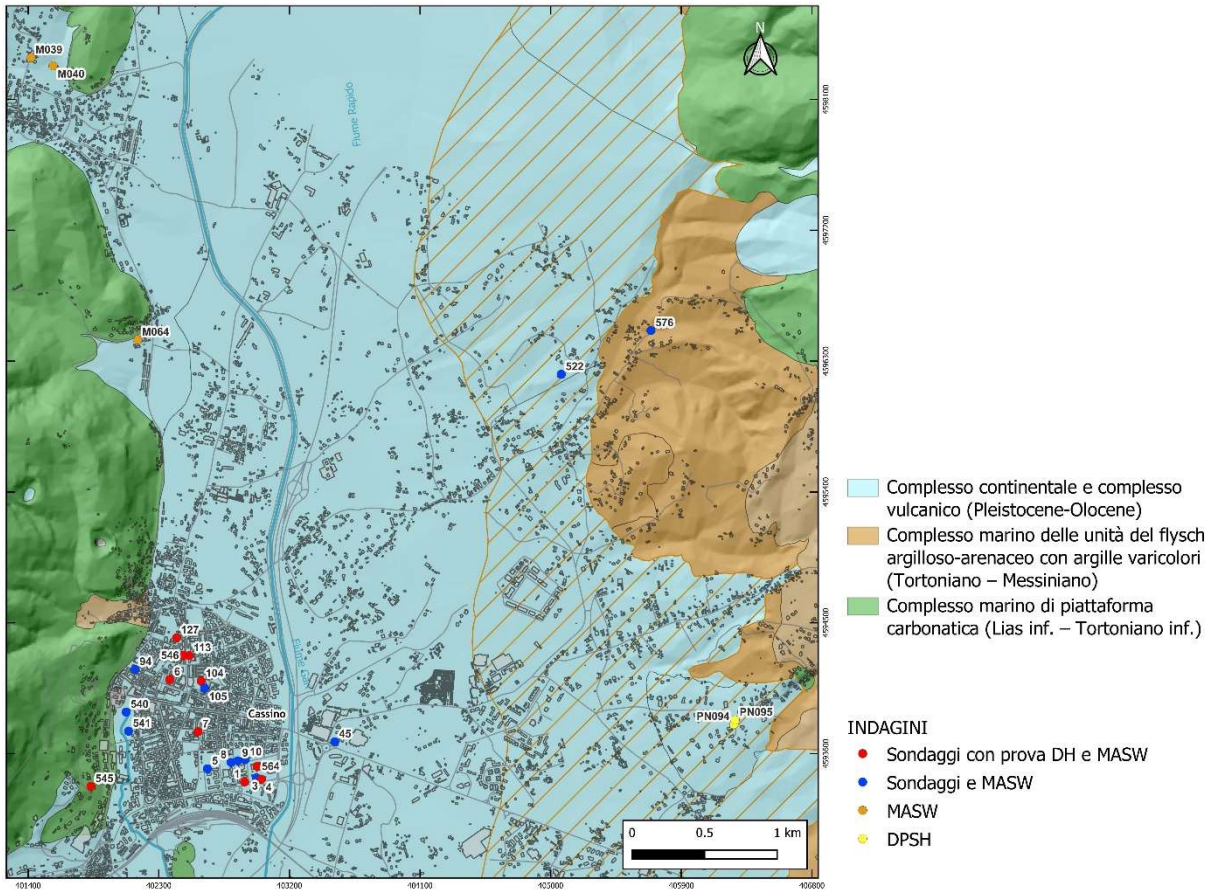


Fig. 3.46 – *Ubicazioni delle indagini utilizzate per la caratterizzazione dei sismostrati*

Per l'attribuzione dei valori di velocità delle onde di taglio (V_S) sono state esaminati i risultati di 28 MASW realizzate in prossimità dei sondaggi elencati in tabella 3.18 e 9 prove down hole realizzate in alcuni di quei fori di sondaggio (Fig. 3.46). In queste indagini si è notato un trend comune:

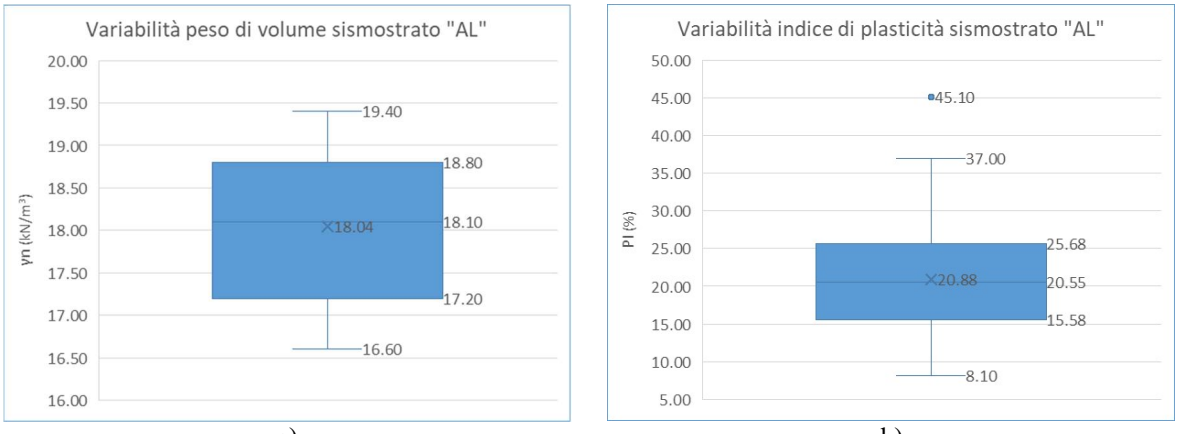
a) i terreni entro 1÷3 m dal piano campagna, costituiti generalmente da riporti recenti, hanno velocità delle V_S relativamente basse, dell'ordine dei 150 m/s; questi terreni non sono stati inclusi nella modellazione sismica perché di spessore limitato e dalle caratteristiche granulometriche molto diversificate;

b) fino ad una profondità compresa tra i 15 e i 25 m le velocità si attestano mediamente tra i 180 e i 300 m/s; questi depositi sono attribuiti al sismostrato "AL_1" che comprende la parte superiore dei depositi alluvionali attuali e recenti;

c) a profondità tra i 20 e i 30 m le velocità delle onde di taglio aumentano, anche repentinamente, verso range di valori mediamente compresi tra i 400 e i 580 m/s e caratterizzano il sismostrato "AL_2", la parte inferiore dei depositi alluvionali attuali e recenti.

***Tab. 3.18** – Tabella riassuntiva dei valori del peso di volume (γ_n) e dell'indice di plasticità (PI) dei campioni utilizzati per caratterizzare il sismostrato "AL"*

BH_ID	Sample_ID	From	To	γn (kN/mc)	PI (%)
B001	Sa001	1.00	1.50	19.10	15.60
B003	Sa003	2.00	2.40	19.00	22.70
B004	Sa005	2.50	2.90	18.80	17.30
B004	Sa006	7.00	7.50	16.80	33.00
B004	Sa007	13.50	14.00	17.30	17.70
B004	Sa008	18.20	18.70	19.40	45.10
B005	Sa009	1.00	1.50	19.10	18.90
B006	Sa011	3.20	3.70	18.70	21.00
B007	Sa014	1.80	2.30	18.30	20.50
B008	Sa016	21.00	21.60	18.80	12.90
B009	Sa017	8.00	8.50	17.20	37.00
B010	Sa018	1.50	2.10	19.40	12.50
B010	Sa019	3.00	3.70	18.20	16.80
B010	Sa020	7.00	7.70	17.50	18.80
B010	Sa021	14.10	14.70	17.20	15.50
B045	Sa022	4.50	5.00	18.50	20.60
B045	Sa023	7.50	8.10	18.60	24.40
B094	Sa075	3.00	3.50	16.80	8.10
B104	Sa080	5.40	5.90	17.20	20.90
B104	Sa082	9.20	9.70	17.50	21.30
B104	Sa085	20.00	20.70	17.40	26.00
B105	Sa087	2.80	3.30	18.10	25.60
B105	Sa090	15.00	15.50	17.10	25.90
B113	Sa091	3.00	3.60	19.10	8.60
B127	Sa093	3.00	3.50	16.80	8.10
B540	Sa199	11.00	11.50	18.04	
B541	Sa200	15.60	16.10	17.95	
B546	Sa206	11.00	11.50	16.60	
B564	Sa266	2.50	3.00	18.80	28.00



a) b)

***Fig. 3.47** – Variabilità dei valori a) del peso di volume e b) dell'indice di plasticità tra i campioni elencati in tabella 3.18*

La tabella 3.19 riporta i valori di V_S delle singole prove MASW (figura a) e DH (figura b) per gli intervalli rientranti nel sismostrato "AL_1", mentre la figura 3.48.a mostra la variabilità dei valori citati nel punto b) e la loro media che è stata utilizzata nella modellazione del relativo sismostrato.

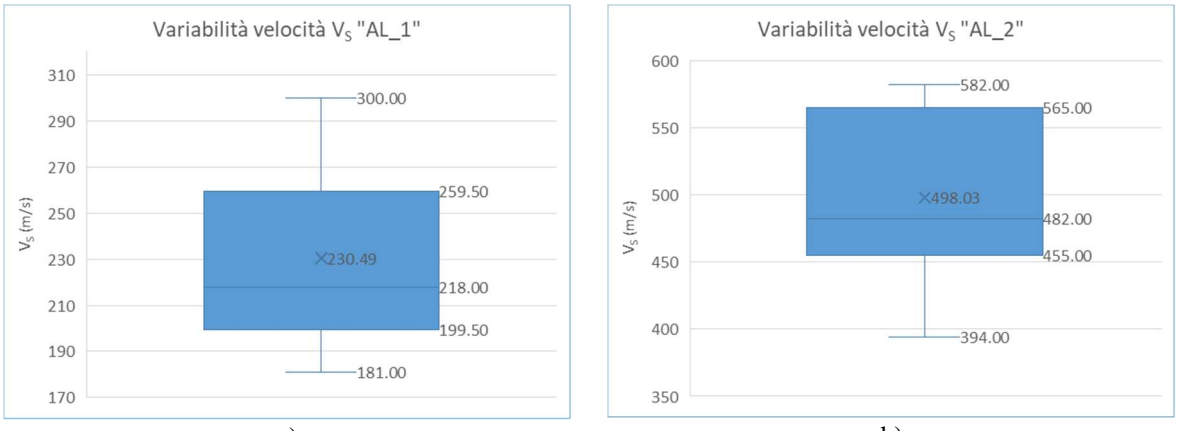
***Tab. 3.19** – Tabelle riassuntiva dei valori delle velocità delle onde di taglio V_S da a) indagini MASW e b) prove down hole utilizzati per caratterizzare il sismostrato "AL_1"*

a)

LN_ID	From	To	V_S (m/s)
M001	2.60	15.50	203
M002	1.70	14.40	199
M003	3.00	12.50	270
M004	2.50	12.50	245
M005	2.40	18.20	184
M006	3.10	19.60	209
M007	1.70	19.70	265
M008	2.10	18.50	265
M009	2.80	19.40	211
M010	2.70	19.50	205
M011	2.50	16.00	299
M012	1.60	11.30	254
M014	2.20	14.10	253
M015	2.50	18.30	258
M016	2.60	17.50	263
M017	2.30	16.90	259
M018	1.70	14.60	181
M019	2.60	13.20	192
M020	2.30	12.30	237
M021	2.10	10.70	212
M022	2.10	13.00	289
M023	1.70	12.10	298
M043	1.20	22.80	196
M044	1.70	24.70	198
M049	2.40	11.80	188
M050	1.90	13.90	194
M072	3.70	15.30	207
M073	2.00	18.50	185

b)

BH_ID	DH_ID	From	To	V_S (m/s)
B001	DH001	2.00	16.00	214
B004	DH002	2.00	12.00	220
B006	DH003	2.00	20.00	260
B007	DH004	2.00	22.00	211
B104	DH005	4.00	22.00	238
B113	DH006	0.00	12.00	218
B127	DH007	2.00	12.00	300
B546	DH010	2.00	16.00	200
B564	DH014	4.00	20.00	248



a) b)

***Fig. 3.48** – Variabilità dei valori di velocità delle onde di taglio V_S utilizzate per caratterizzare a) il sismostrato "AL_1" e b) il sismostrato "AL_2"*

La tabella 3.20 riporta i valori di velocità delle onde di taglio delle singole prove MASW (figura a) e DH (figura b) per gli intervalli rientranti nel sismostrato "AL_2", mentre la figura 3.48.b ne mostra la variabilità e il valore medio che è stato utilizzato nella modellazione del relativo sismostrato.

***Tab. 3.20** – Tabelle riassuntiva dei valori delle velocità delle onde di taglio V_S da a) indagini MASW e b) prove down hole utilizzati per caratterizzare il sismostrato "AL_2"*

a)

LN_ID	From	To	V_S (m/s)
M001	15.50		579
M002	14.40		557
M003	12.50		480
M004	12.50		529
M005	18.20		575
M006	19.60		582
M007	19.70		578
M008	18.50		580
M009	19.40		479
M010	19.50		482
M011	16.00		496
M012	11.30		461
M014	14.10		450
M015	18.30		405
M016	17.50		580
M017	16.90		579
M018	14.60		457
M019	13.20		472
M020	12.30		480
M021	10.70		496
M022	13.00		499
M023	12.10		468
M043	22.80		542
M044	24.70		472
M049	11.80		525
M050	13.90		409
M072	15.30		430
M073	18.50		467

b)

BH_ID	DH_ID	From	To	V_S (m/s)
B001	DH001	16.00		573
B004	DH002	18.00		553
B006	DH003	20.00		574
B007	DH004	22.00		432
B104	DH005	22.00		433
B113	DH006	12.00		484
B127	DH007	12.00		422
B546	DH010	16.00		394
B564	DH014	20.00		453

Al sismostrato "At", costituito dai depositi alluvionali antichi terrazzati del Complesso continentale e vulcanico, è stato attribuito il valore di peso di volume da utilizzare nelle simulazioni numeriche di RSL grazie ai dati di un campione prelevato nel sondaggio B522 e di due prove penetrometriche dinamiche superpesanti, DPSH (Fig. 3.46), realizzate in località Sant'Antonino nella parte est del Comune di Cassino (Tab. 3.21). Il valore medio tra quelli disponibili è pari a 18.5 kN/m^3.

Nello stesso sito del sondaggio B522 sono state realizzate due prove MASW che hanno fornito per i depositi che costituiscono questo sismostrato un valore medio di 398 m/s. Si è utilizzato nella modellazione il valore di 400 m/s.

Tab. 3.21 - *Tabelle riassuntiva dei valori del peso di volume (γ_n) disponibili per la caratterizzazione del sismostrato "At"*

BH_ID	Sample_ID	From	To	γn (kN/mc)
B522	Sa187	2.50	3.00	18.20

PN_ID	From	To	γn (kN/mc)
PN094	0.40	9.00	18.70
PN095	0.40	8.80	18.65

Per quanto riguarda la caratterizzazione del sismostrato "Tr", che comprende i depositi travertinosi presenti nell'area a sud delle Terme Varroniane, non essendo disponibili campioni prelevati in quest'area, sono stati utilizzati due campioni estratti da fori di sondaggio (B023, B447) realizzati nella frazione Sant'Angelo in Theodice del Comune di Cassino, situata pochi chilometri più a sud. Il peso di volume medio per i due campioni considerati è di poco inferiore a 16 kN/m^3, mentre la velocità media delle onde di taglio per i due siti, da prove MASW (M013, M014), è pari a 404 m/s. Nella modellazione del sismostrato è stato utilizzato il valore di 400 m/s.

Per l'attribuzione di valori di peso di volume al sismostrato "Lc", costituito da sedimenti limoso-argillosi e limoso-sabbiosi di origine fluvio-lacustre appartenenti al Complesso continentale e vulcanico (***I***), si è fatto ricorso al campione prelevato nel sondaggio B447 che fornisce un valore di 17,95 kN/m^3. La velocità delle onde di taglio è stata stimata utilizzando una relazione empirica che segue una legge di potenza, ampiamente utilizzata nella letteratura geotecnica e sismologica per descrivere l'aumento progressivo di Vs con la profondità (z) in depositi sedimentari, a partire da dati di prove eseguite nelle porzioni superficiali dei terreni (Hamilton, 1976; Ohta e Goto, 1978; Imai e Tonouchi, 1982; Crespellani e Vannucchi, 1991; Boore e Joyner, 1997). Tale relazione è espressa nella forma:

$$V_S = a \cdot z^b$$

dove a e b sono due coefficienti empirici associati rispettivamente alla velocità delle onde di taglio in prossimità del p.c. e al tasso di incremento di V_S con la profondità, determinabili attraverso l'operazione di regressione lineare sui dati esistenti (le indagini MASW e DH elencate nelle Tabb. 3.19 e 3.20). Nel grafico di Fig. 3.49 sono state plottate le coppie di valori z/V_S e si è ottenuta la seguente relazione che lega le due variabili:

$$V_S = 60.214 \cdot z^{0.5319}$$

Tramite questa relazione si è stimata la velocità delle onde di taglio alle profondità di 65 e 90 m, corrispondenti alle profondità medie dei sismostrati "Lc_1" ed "Lc_2" (Fig. 3.55). Le VS stimate sono pari rispettivamente a 554.61 m/s e 659.42 m/s. Nelle simulazioni numeriche sono stati utilizzati i valori di 550 e 650 m/s.

Per la caratterizzazione del substrato argilloso-arenaceo "ALS", costituito dai depositi argilloso-arenacei del Complesso delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori, sono state utilizzate indagini realizzate in località Capo d'Acqua nella zona collinare

ad est del Comune di Cassino. In quest'area tali litologie affiorano diffusamente e sono caratterizzate da pochi metri di alterazioni superficiali al di sopra del substrato inalterato.

Un campione prelevato nel corso del sondaggio B576 ha dato come peso di volume il valore di 22.9 kN/m^3. Le due prove MASW realizzate (M074, M075) hanno fornito rispettivamente valori di 1056 m/s a 5.9 m di profondità e 991 m/s a 8.10 m dal p.c. Il valore medio è di 1024 m/s.

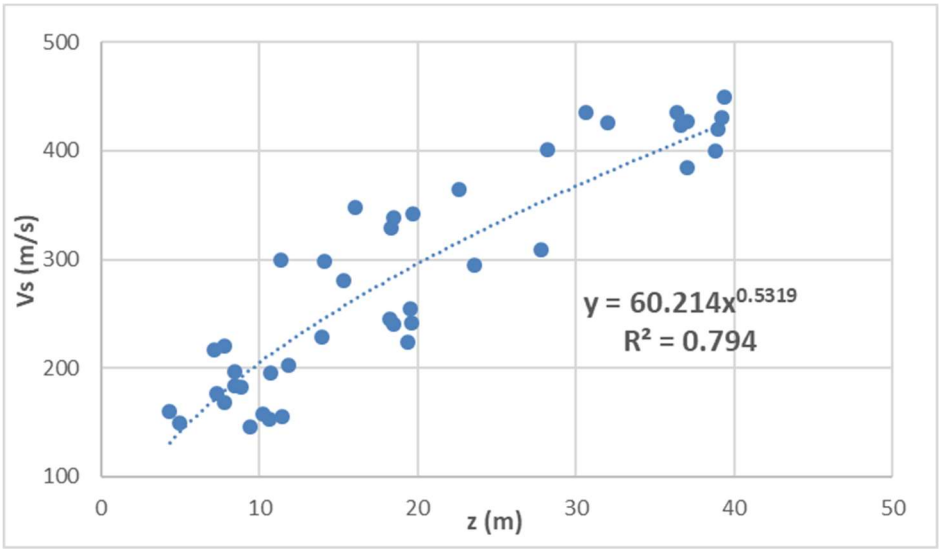


Fig. 3.49 - *Curva di correlazione della distribuzione delle coppie di valori VS e z relativa alle indagini MASW e DH nei depositi del bacino di Cassino ed elencate nelle tabelle 3.19 e 3.20*

Infine, i risultati di indagini realizzate in siti ove il complesso calcareo si trova a profondità investigabili con le tecniche MASW e DH (Fig. 3.46) hanno permesso di caratterizzate il bedrock "LP" per quel che riguarda la velocità delle onde di taglio. In tabella 3.22 si riassumono i risultati di queste indagini. Il valore medio è pari a 1306 m/s. Non essendo disponibili prove per la determinazione del peso di volume su campioni di questa litologia, si è ritenuto di assegnare un valore almeno pari a quello del sismostrato "ALS", in accordo con dati di letteratura.

Tab. 3.22 - *Tabelle riassuntiva dei valori delle velocità delle onde di taglio V_S da a) prove down hole e b) indagini MASW utilizzati per caratterizzare il sismostrato "LP"*

BH_ID	DH_ID	From	To	V_S (m/s)
B545	DH009	10.00		1241

a)

LN_ID	From	To	V_S (m/s)
M039	21.20		1436
M040	19.20		1436
M047	9.10		1117
M048	15.40		1241
M064	11.90		1366

b)

Per quel che riguarda l'attribuzione delle curve di decadimento del modulo di taglio G/G_0-γ e delle curve di smorzamento D-γ a ciascuna unità, in assenza di prove dinamiche o cicliche

sui campioni (prove alla colonna risonante o taglio torsionale ciclico), si è fatto ricorso a curve di letteratura che si è ritenuto, in funzione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni, approssimassero in maniera efficace il comportamento meccanico dei depositi di interesse sotto sollecitazioni sismiche. Nella tabella Tab. 3.23 si riassumono i dati utilizzati per la parametrizzazione dei sismostrati.

Tab. 3.23 - *Parametrizzazione dei sismostrati*

Litologia	**Sismostrato**	**Sigla**	**γ (kN/mc)**	**V_S (m/s)**	**Curve G/G_0-γ e D-γ**
Depositi alluvionali attuali e recenti, costituiti da argille limose e limi argillosi con corpi lenticolari o intercalazioni più o meno estese di ghiaie calcaree in matrice sabbioso-limosa, di sabbie grigie contenenti prodotti vulcanici e di limi torbosi	Alluvionale _sup.	AL_1	18.0	230	Vucetic & Dobry, PI = 30
	Alluvionale _inf.	AL_2	18.0	500	Vucetic & Dobry, PI = 30
Depositi alluvionali antichi terrazzati, costituiti da ciottolame calcareo, con lenti sabbiose e abbondante matrice argillosa	Alluvioni antiche	At	18.5	400	Vinale, 1988
Travertino terroso, spugnoso, vacuolare e cavernoso scarsamente coerente, intensamente carsificato e fratturato	Travertini	Tr	16.0	400	Pergalani et al., 1999
Depositi lacustri costituiti da limi con alternanze di sabbie e limi argilloso-sabbiosi con livelli di argille grigie e varicolori; presenza di lenti di ghiaia e livelli torbosi lenticolari e lignitiferi	Lacustre _sup.	Lc_1	18.0	550	Vucetic & Dobry, PI = 15
	Lacustre _inf.	Lc_2	18.0	650	Vucetic & Dobry, PI = 15
Complesso argilloso-arenaceo costituito da alternanze di livelli argillosi, siltitici ed arenacei	Substrato argilloso-arenaceo	ALS	23.0	1000	Lineare elastico (smorzamento: 0.5%)
Complesso calcareo in stratificazione per lo più massiva; comprende livelli di brecce calcaree cementate al tetto dell'unità	Substrato calcareo	LP	23.0	1300	Lineare elastico (smorzamento: 0.5%)

Le figure dalla 3.50 alla 3.54 mostrano le curve di decadimento G/G0-γ e smorzamento D-γ utilizzate per le unità di Tabella 3.18 nelle simulazioni numeriche.

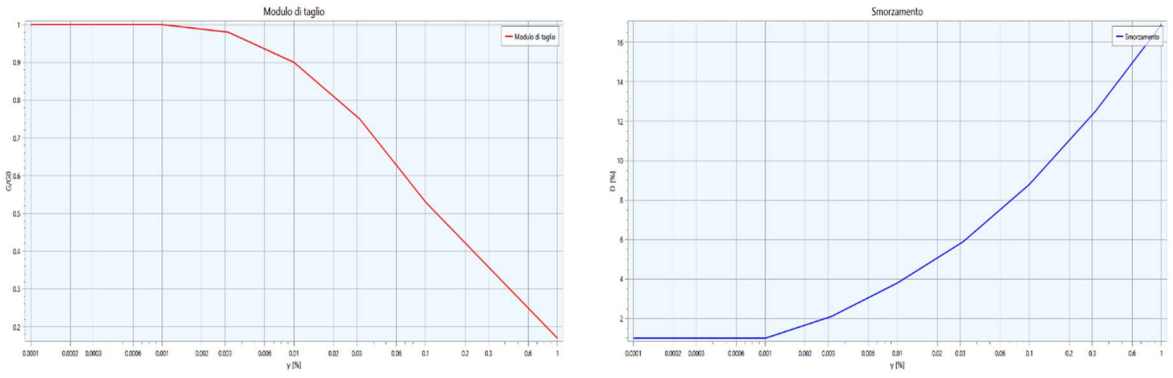


Fig. 3.50 - *Curve di decadimento G/G0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): Vucetic & Dobry, PI = 30*

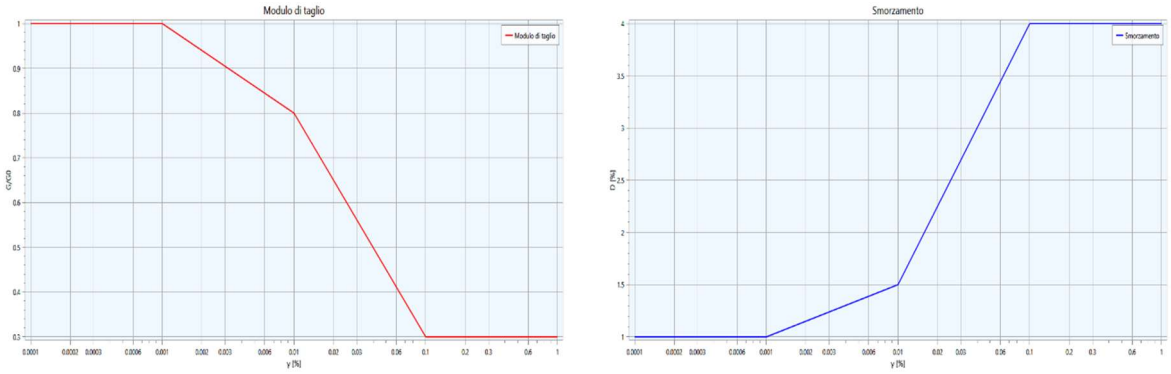


Fig. 3.51 - *Curve di decadimento G/G0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): Vinale, 1988*

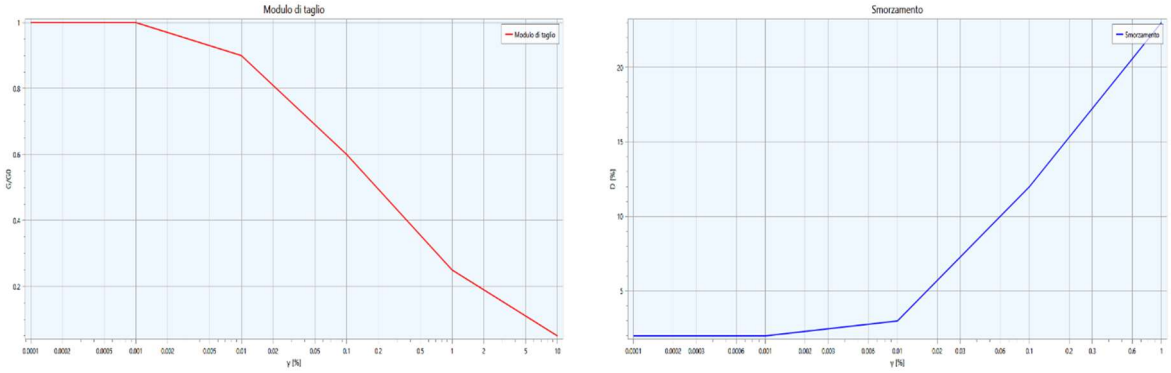


Fig. 3.52 - *Curve di decadimento G/G0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): Pergalani et al., 1999*

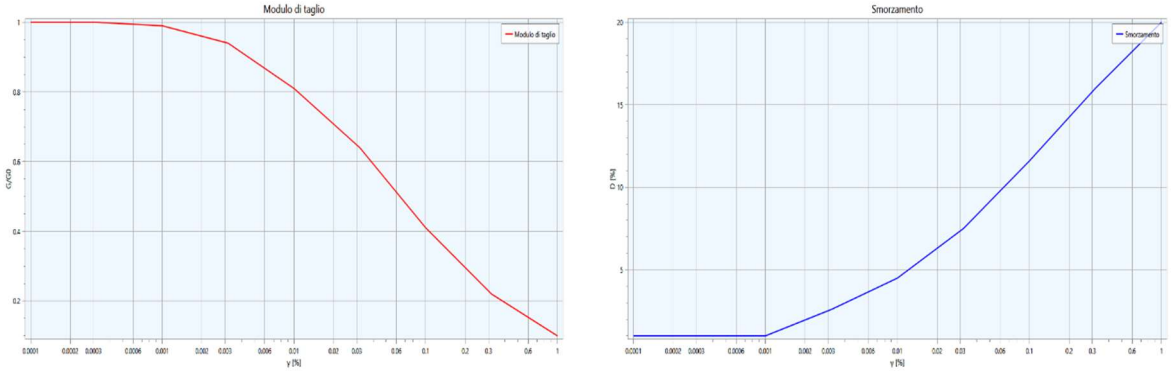


Fig. 3.53 - *Curve di decadimento G/G0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): Vucetic & Dobry, PI = 15*

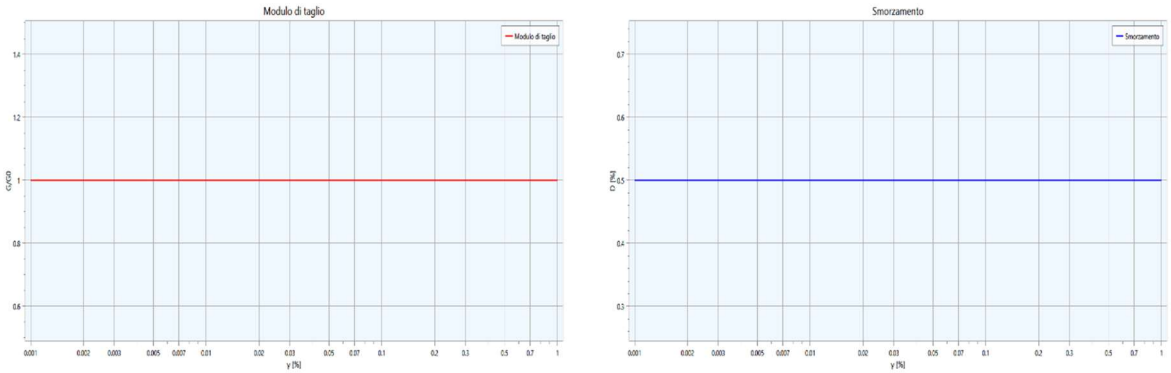


Fig. 3.54 - *Curve di decadimento G/G0-γ (sinistra) e smorzamento D-γ (destra): lineare elastico (smorz. 0.5%)*

3.5.4 Simulazioni numeriche

Nei paragrafi precedenti sono stati definiti tutti i punti della procedura per giungere di fatto all'esecuzione delle simulazioni numeriche di risposta sismica locale in corrispondenza delle sezioni e delle verticali elaborate:

- ✓ è stata ricavata la pericolosità sismica di base (§ 2.4);
- ✓ è stato definito il modello geologico, sia a scala di bacino che alla scala del centro urbano (§ 3.3);
- ✓ è stata definita la modellazione sismica mono e bi-dimensionale (§ 3.4);
- ✓ sono stati scelti i codici di calcolo da utilizzare per le analisi numeriche (§ 3.5.1);
- ✓ è stata definita l'azione sismica tramite l'estrazione del set di accelerogrammi di input (§ 3.5.2);
- ✓ sono stati attribuiti al modello sismostratigrafico i valori dei parametri sismici necessari ad eseguire le analisi numeriche (§ 3.5.3).

Nella tabella seguente si riassume quanto determinato per la pericolosità sismica di base.

Tab. 3.24 - *Riepilogo dei dati della pericolosità sismica di base*

<table>
<tr><th colspan="3">PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE</th></tr>
<tr><td>Sorgenti sismogeniche</td><td>Faglie attive e capaci</td><td>Principali eventi di riferimento</td></tr>
<tr><td rowspan="2">- ITCS081 Venafro
- ITIS138 Aquae Iuliae
- ITCS025 Salto Lake-Ovindoli-Barrea
- ITIS028 Barrea</td><td>- San Pietro Infine
- Aquae Iuliae</td><td rowspan="3">- 1231 Cassinese
- 1349 Lazio-Molise
- 1456 Appennino centro-merid.
- 1654 Sorano
- 1863 Cassinese
- 1915 Marsica</td></tr>
<tr><td>Parametri NTC 2018</td></tr>
<tr><td>Classificazione sismica
- Zona sismica 2A
- $0.20 \leq a_g < 0.25$</td><td>- $a_g = 0.207$ g
- $F_0 = 2.349$
- $T_C^* = 0.348$</td></tr>
</table>

La modellazione geologica e la successiva modellazione sismica hanno permesso di estrapolare 6 sezioni sismostratigrafiche e 117 verticali sismostratigrafiche nell'area di studio. Nella Fig. 3.55 si riportano le 6 sezioni come modellate nel software LSR2D. In questa figura è visibile come nessuna delle sezioni inizi e termini all'interno del bedrock sismico, garantendo le condizioni di campo libero necessarie affinché non si generino effetti artificiali di riflessione di onde all'interno del modello. Come già specificato nel paragrafo 3.5 (cfr. Fig. 3.39), si ovvia a questa limitazione o allontanando di una certa distanza dalla regione di interesse (vedi punti di controllo più avanti) le frontiere laterali ed assegnando delle restrizioni cinematiche nei confronti della componente verticale oppure applicando il moto di campo libero (*free field*) in modo tale che le frontiere agiscano come un sistema in grado di assorbire le onde riflesse. Nel nostro caso, a tutte sezioni sono stati applicati degli smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne *free-field*) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Questo ha permesso di contenere le lunghezze delle sezioni entro limiti tali (dai 2822 m della sezione S_4 ai 4445 m della sezione S_2) da ridurre il carico computazionale senza alterare in alcun modo i risultati finali.

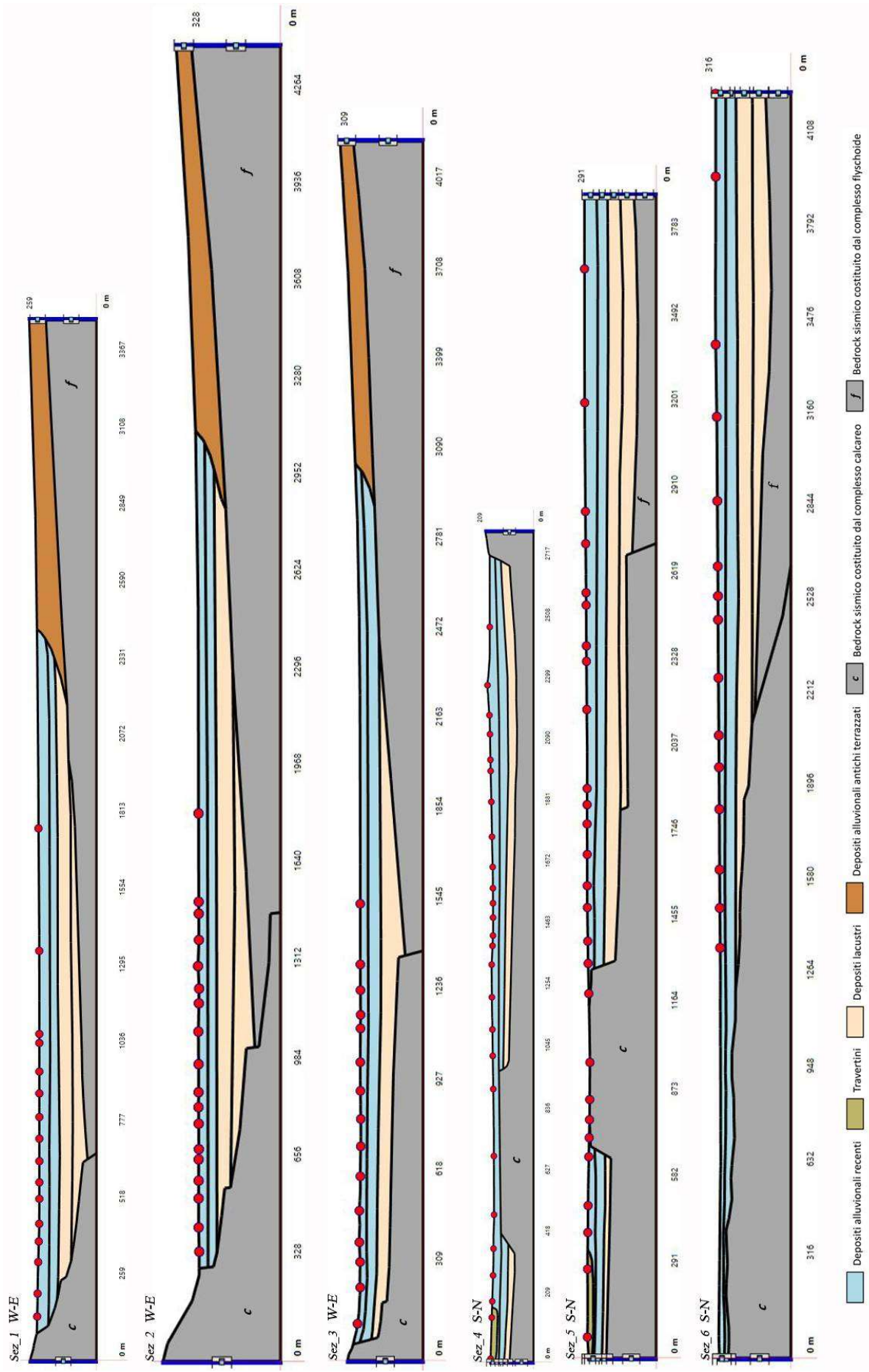


Fig. 3.55 - *Sezioni sismostratigrafiche modellate con LSR2D. I pallini rossi indicano la posizione dei punti di controllo; ai confini sinistro e destro di ciascuna sezione sono visibili le colonne free-field imposte*

Una volta elaborate sezioni e verticali sismostratigrafiche, sono state definite le condizioni al contorno. In LSR2D sono stati configurati i bordi del dominio, in modo tale che le frontiere agissero come un sistema in grado di assorbire le onde riflesse che altrimenti sarebbero state artificialmente reintrodotte nel modello: come specificato nel § 3.5.1, ai lati del modello vengono impostati dei *free field boundaries*, ossia dei confini ad oscillazioni libera nelle direzioni *x* ed *y* in grado di simulare l'estensione infinita del sistema. Nel margine inferiore, sono state imposte delle condizioni di moto in regime fisso: questa caratteristica è stata simulata con un *quiet boundary*, che è un margine fisso che può essere attraversato dalle onde ma non ne viene perturbato. Nel software STRATA non è stato necessario imporre condizioni al contorno di questo tipo.

Nelle sezioni modellate in LSR2D (Fig. 3.55) sono stati individuati 117 punti di controllo nei quali il software ha restituito i risultati delle analisi numeriche. Negli stessi punti sono state eseguite le analisi 1D con STRATA.

Nella Tab. 3.25 sono elencati i punti per ogni sezione con la distanza di ciascuno dall'origine della sezione stessa.

***Tab. 3.25** – Elenco dei punti di controllo (PC) di ogni sezione e distanza di ciascuno dall'origine della sezione stessa*

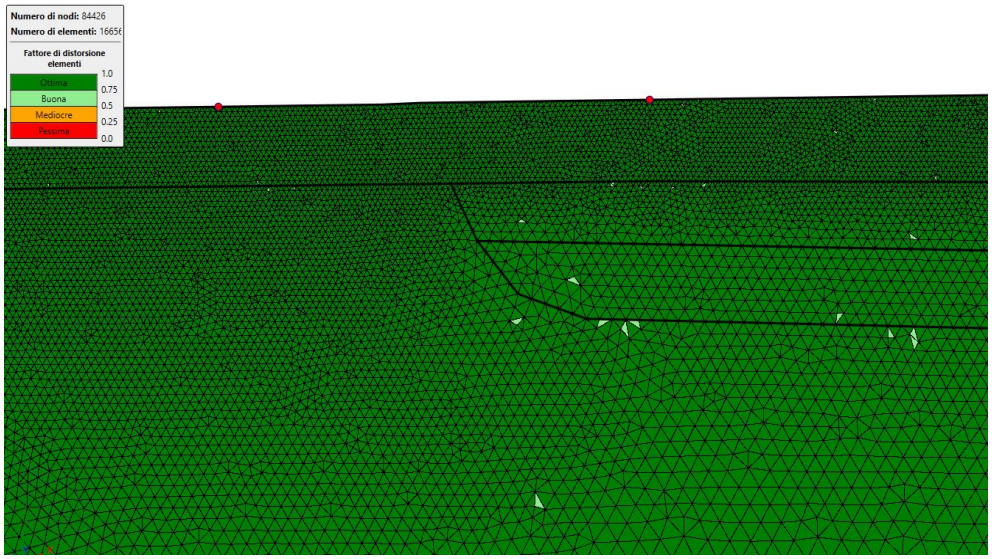
Sez_1		**Sez_2**		**Sez_3**		**Sez_4**		**Sez_5**		**Sez_6**	
n. PC	*Dist. (m)*	*n. PC*	*Dist. (m)*	*n. PC*	*Dist. (m)*	*n. PC*	*Dist. (m)*	*n. PC*	*Dist. (m)*	*n. PC*	*Dist. (m)*
1	147.4	17	370.1	35	125.8	50	10.0	76	70.1	103	1388.7
2	224.9	18	451.8	36	250.5	51	150.1	77	300.1	104	1523.6
3	331.0	19	550.0	37	337.9	52	205.3	78	424.0	105	1653.4
4	400.6	20	610.1	38	405.5	53	293.6	79	515.1	106	1858.3
5	460.1	21	681.7	39	513.9	54	384.6	80	680.3	107	2000.0
6	544.3	22	716.5	40	632.1	55	500.1	81	744.8	108	2108.0
7	599.9	23	802.7	41	735.3	56	699.7	82	806.0	109	2302.9
8	671.3	24	858.5	42	829.2	57	927.8	83	874.0	110	2499.6
9	747.0	25	909.3	43	925.7	58	1040.4	84	999.9	111	2580.1
10	820.0	26	1003.9	44	1024.3	59	1130.5	85	1232.9	112	2680.6
11	899.7	27	1114.0	45	1140.2	60	1240.1	86	1335.0	113	2902.0
12	973.3	28	1209.6	46	1186.9	61	1351.0	87	1410.2	114	3187.0
13	1069.8	29	1259.6	47	1271.5	62	1415.1	88	1524.1	115	3431.8
14	1100.1	30	1335.5	48	1359.9	63	1450.0	89	1597.9	116	4000.6
15	1380.3	31	1424.0	49	1568.3	64	1511.1	90	1704.0	117	4281.2
16	1793.4	32	1512.9			65	1560.1	91	1807.1		
		33	1553.1			66	1611.2	92	1872.3		
		34	1851.8			67	1683.2	93	1927.1		
						68	1786.0	94	2194.6		
						69	1904.8	95	2357.7		
						70	2010.1	96	2409.9		
						71	2048.0	97	2548.0		
						72	2135.0	98	2589.8		
						73	2199.8	99	2756.0		
						74	2301.7	100	2865.1		
						75	2499.8	101	3233.1		
								102	3686.2		

Sia in STRATA che in LSR2D gli accelerogrammi sono stati scalati in funzione della a_g di sito (0.207 g) determinata come elemento della pericolosità sismica di base (Tab. 3.24)

In entrambi i software l'errore relativo massimo sulle curve di decadimento G/G_0-γ e D-γ è stato posto al 2% e il valore dell'*effective strain ratio* pari a 0.65.

La frequenza massima per la discretizzazione del dominio è stata fissata a 20 Hz. STRATA esegue questa discretizzazione sullo spessore degli strati in modo automatico, mentre l'elaborazione di LSR2D è di tipo semi-automatico perché necessita di un controllo, da parte dell'utente, in termini di qualità della geometria degli elementi creati, relativamente alla forma degli elementi (triangoli o quadrati) e alla loro dimensione. Nel caso in esame è stata scelta la forma triangolare; sebbene la scelta di elementi quadrangolari è da preferire, vista la maggiore accuratezza delle funzioni di forma utilizzate nella formulazione di tali elementi, nel caso di geometrie molto irregolari, come nel caso oggetto di questo lavoro, questi presentano distorsioni di forma troppo elevate ed allora la tipologia triangolare rappresenta la scelta ottimale (Fig 3.56).

a)



b)

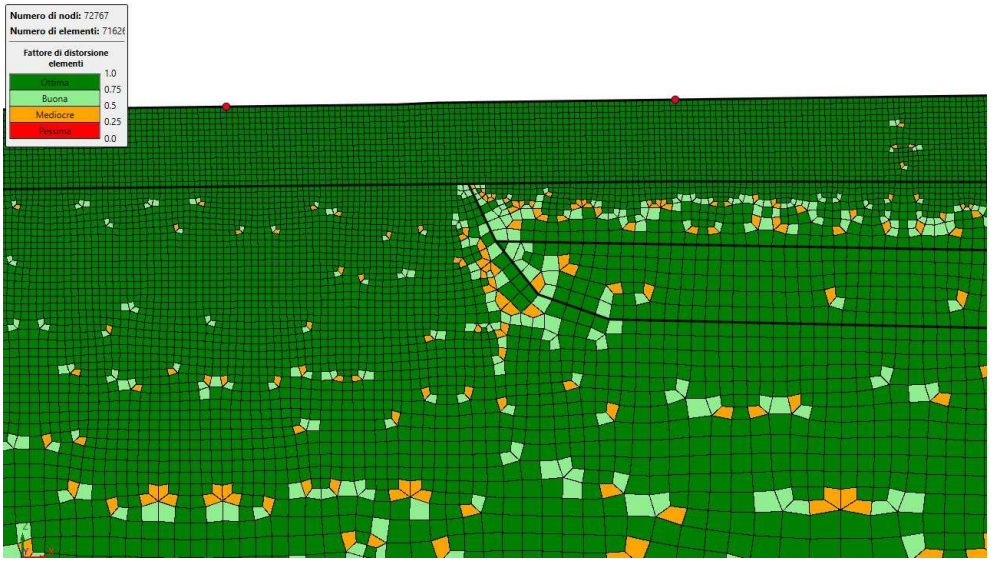


Fig. 3.56 - *Confronto tra la discretizzazione eseguita in LSR2D con mesh ad elementi a) triangolari o b) quadrangolari (in uno stesso tratto della sezione S_1 e nelle medesime condizioni di modellazione): la qualità di ciascun risultato è indicata dal colore degli elementi come specificato nella legenda in alto a sinistra delle immagini*

Infine, in STRATA è stato importante impostare la modalità di restituzione dei risultati (Fig. 3.57) perché questo software non calcola automaticamente i fattori di amplificazione ma bisogna esportare i risultati in un apposito foglio di calcolo che permette di calcolarli nei tre intervalli di periodo dettati dalle norme (0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s).

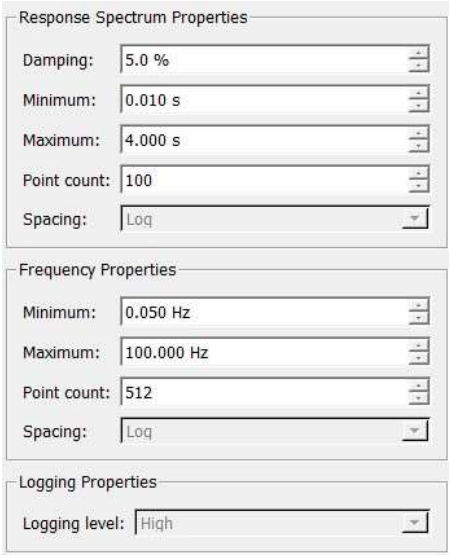


Fig. 3.57 - *Impostazioni per la restituzione dei risultati in STRATA*

Con tutte modellazioni eseguite e le impostazioni fissate, si è potuto procedere all'avvio delle simulazioni numeriche di risposta sismica locale in configurazione monodimensionale e bidimensionale, dei cui risultati si tratterà nel Capitolo 4.

3.6 Misure di microtremore su edifici

L'amplificazione sismica di un sito e l'interazione suolo-fondazione-struttura sono tra gli elementi più importanti tra quelli che possono causare un aumento dei danni a seguito di un terremoto: se la frequenza di vibrazione principale di un edificio è molto vicina a quella del terreno sottostante il fenomeno di risonanza tra suolo e costruzione può produrre un significativo aumento dei danni agli edifici durante i terremoti (Mucciarelli et al., 2011; Castellaro et al., 2012; Gallipoli et al., 2010; Gangone et al., 2023).

Durante la campagna di misure di microtremore sismico a stazione singola nell'area di studio, sono state eseguite per la prima volta delle misurazioni su alcuni edifici del centro urbano di Cassino per valutare possibili effetti di interazione tra i terreni di fondazione e gli edifici stessi.

3.6.1 Scelta della tipologia di edifici

Gli edifici su cui realizzare delle misure sono stati scelti in base a criteri geometrici, ma tenendo conto (per futuri sviluppi e valutazioni) anche del periodo di costruzione e della tipologia costruttiva; i criteri di scelta sono stati l'altezza dell'edificio (cercando di coprire tutto lo spettro di altezze presenti nel centro abitato) e la loro regolarità in pianta (in genere un

quadrilatero). Non secondaria è risultata la disponibilità dei proprietari a far eseguire queste indagini sulle proprie strutture e ciò ha influenzato ed in parte limitato la possibilità di scelta.

Sono state eseguite 13 misure, delle quali 4 su edifici pubblici e 9 su edifici privati: in Fig. 3.58 è riportata l'ubicazione di ciascun edificio con il relativo codice utilizzato per identificarlo univocamente.

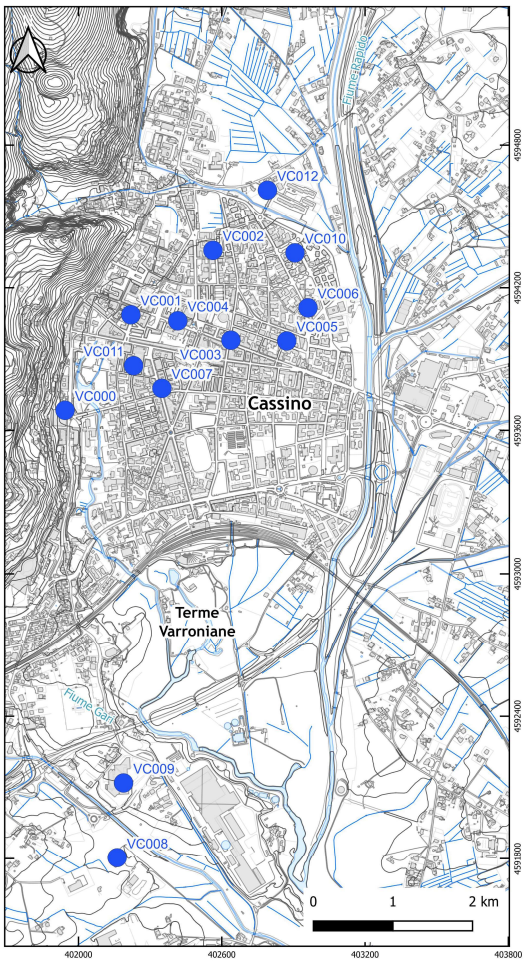


Fig. 3.58 - *Ubicazione degli edifici sui quali sono state eseguite misure di rumore sismico*

3.6.2 Specifiche delle misure eseguite

Le misure sono state eseguite con un sismometro LE-3D/5 a 3 componenti, accoppiato con un acquisitore REFTEK 130-01 impostato su una frequenza di campionamento di 200 Hz (Fig. 3.59); la durata di ciascuna misura è stata di circa 50 minuti.

A differenza di quanto fatto per le medesime misure eseguite su terreno (§ 3.1.4), il sismometro non è stato orientato secondo i punti cardinali, ma con il nord dello strumento stesso parallelo alla dimensione maggiore dell'edificio al fine di accoppiare le componenti N-S ed E-W delle registrazioni rispettivamente con la dimensione maggiore e minore dell'edificio.

L'intento di queste misure è stato quello di verificare la possibilità di identificare una correlazione tra l'altezza ed il periodo fondamentale di vibrazione degli edifici; una volta stabilita eventualmente questa correlazione, stimare per tutte le strutture dell'area il proprio periodo fondamentale di vibrazione e confrontare questo con le frequenze naturali dei terreni determinate nelle campagne di indagini eseguite. Pur sapendo che ai fini della vulnerabilità di

un edificio la risonanza non è il solo elemento che gioca un ruolo importante, si ritiene che questa procedura, della quale esistono peraltro già esempi in letteratura (Tabatabaie et al., 1998; Gallipoli et al., 2009; Gallipoli et al., 2010; Gangone et al., 2023; Gallipoli et al., 2023), possa costituire un elemento di analisi speditivo per la elaborazione degli scenari di rischio nella pianificazione di emergenza.

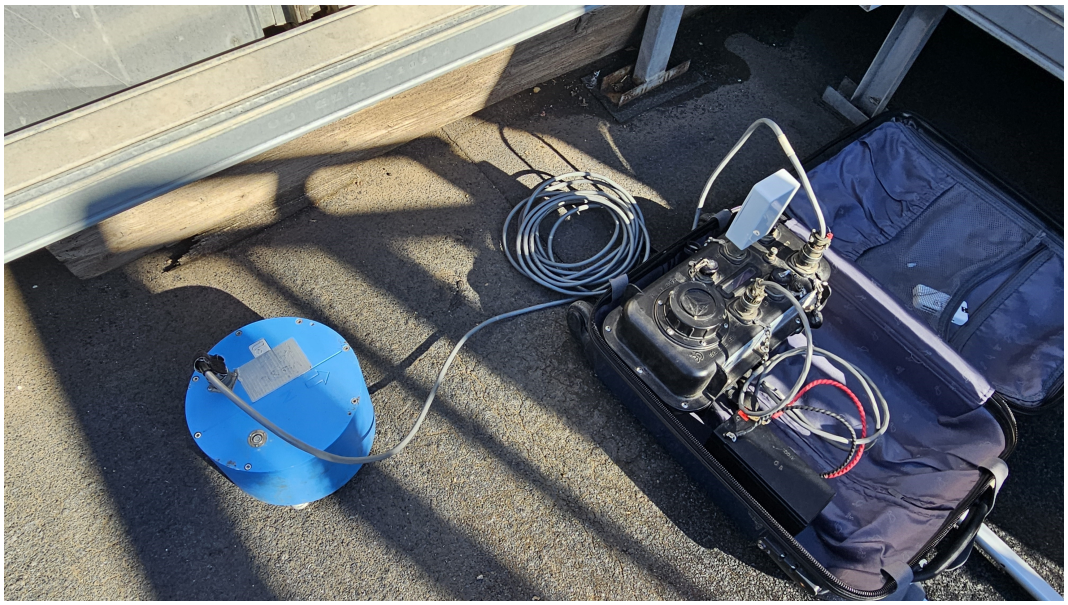


Fig. 3.59 - *Strumentazione utilizzata per le misure di rumore sismico sugli edifici*

La validità del metodo è stata testata raffrontando i risultati ottenuti con i casi esposti nella letteratura citata e basati su un numero consistente di misure (Figg. 3.60 e 3.61).

Nel paragrafo 4.3 si esporranno i risultati ottenuti.

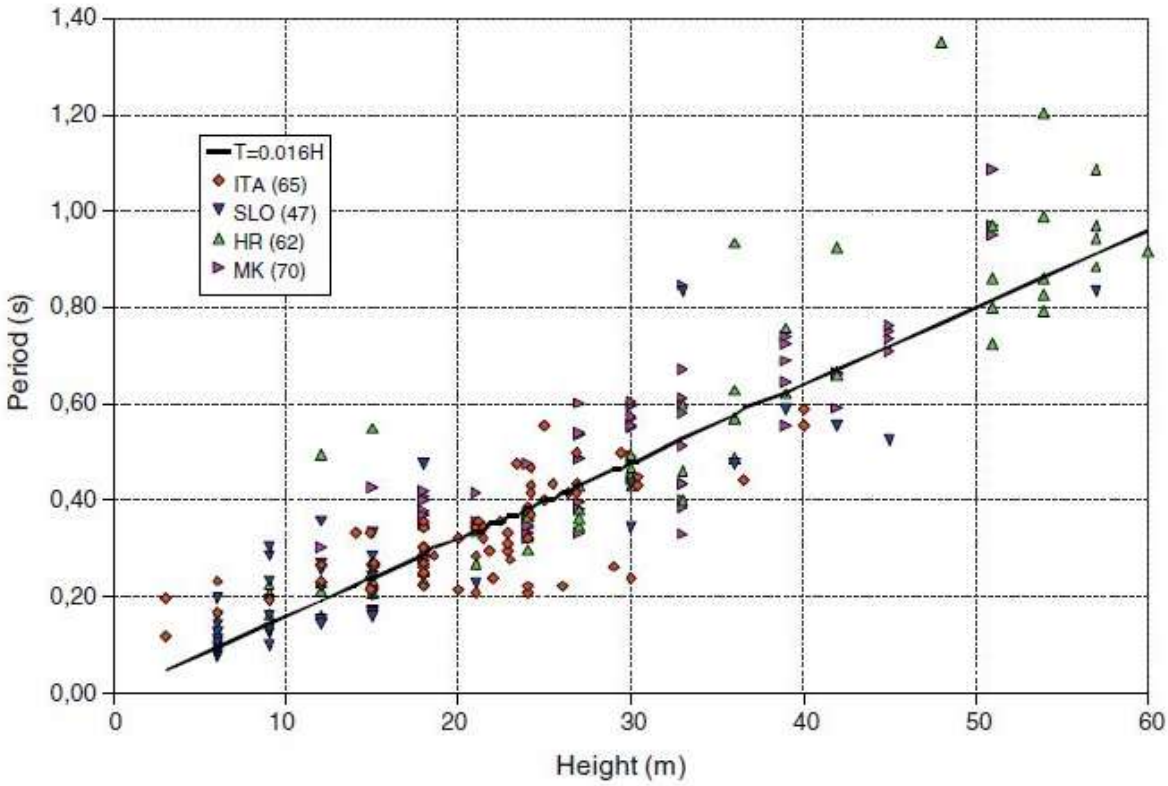


Fig. 3.60 - *Grafico a dispersione delle coppie di valori altezza (H)/periodo fondamentale (T) dell'edificio ottenute in diversi lavori (in Gallipoli et al., 2010)*

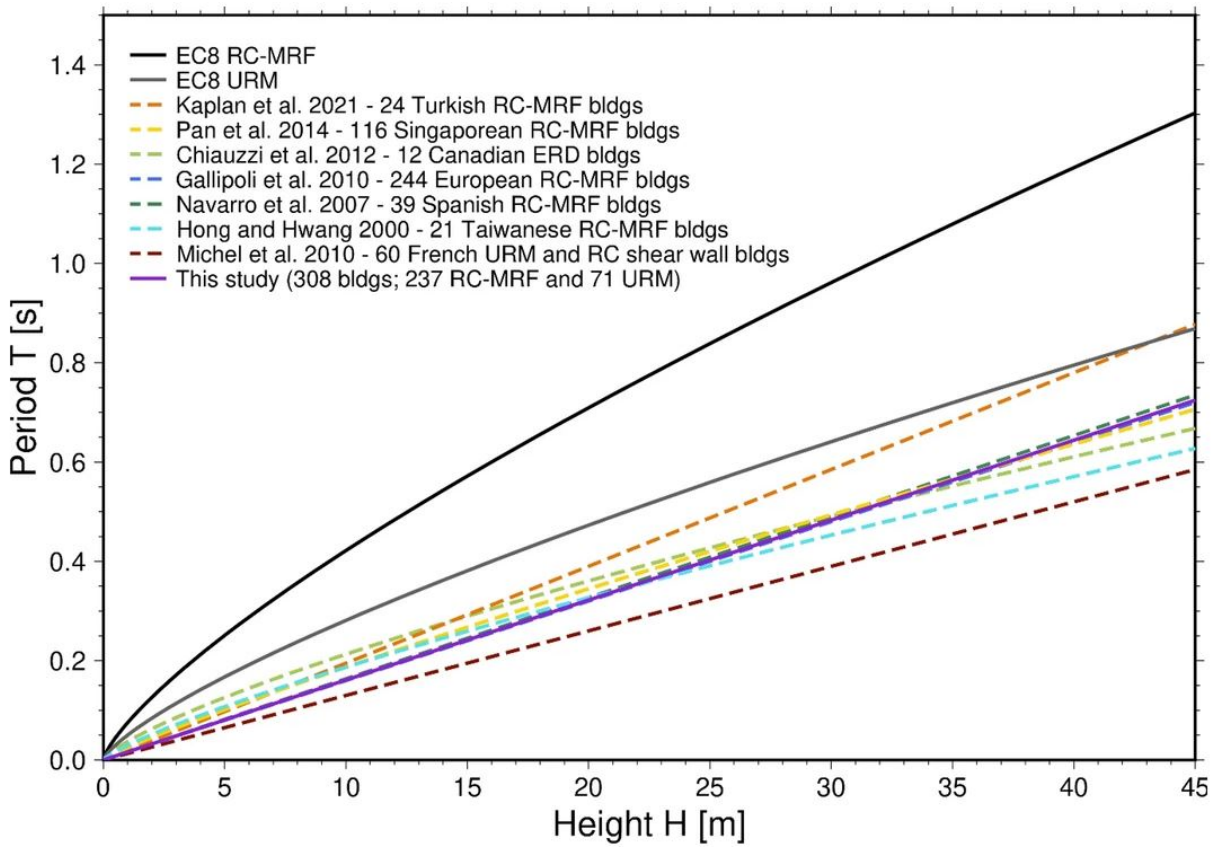


Fig. 3.61 - *Confronto tra diverse correlazioni tra altezza (H) e periodo fondamentale (T) dell'edificio (in Gallipoli et al., 2023)*

Capitolo 4. RISULTATI

In questo capitolo si esporranno i risultati delle analisi numeriche di risposta sismica locale condotte nell'area del bacino di Cassino lungo le sezioni e le verticali definite con le modalità viste nei capitoli precedenti. Come già evidenziato nei paragrafi precedenti, i diversi software che eseguono simulazioni numeriche di RSL possono restituire una serie di risultati in funzione del codice di calcolo implementato, della configurazione dimensionale, del modello di discretizzazione del dominio e così via. Per quanto riguarda i software utilizzati in questo lavoro, STRATA può fornire

- profili di variazione di diversi parametri lungo la verticale indagata
- serie temporali alle profondità desiderate
- spettri di risposta e di Fourier alle profondità desiderate
- funzioni di trasferimento
- rapporti spettrali.

LSR2D invece restituisce informazioni circa

- storie temporali e spettri di risposta delle componenti cinematiche (spostamenti, velocità ed accelerazioni) del moto in direzione orizzontale e/o verticale nei punti di controllo definiti in fase di input
- fattori di amplificazione nei punti di controllo definiti e per ognuno dei tre intervalli di periodo di riferimento (0.1-0.5 s; 0.4-0.8 s; 0.7-1.1 s)
- valori massimi di spostamenti, velocità ed accelerazione su tutti i nodi del dominio discretizzato
- valori massimi delle componenti dello stato tensionale e deformativo sui nodi del dominio
- valori del rapporto G/G_0 e del rapporto di smorzamento viscoso D raggiunti per ogni elemento finito durante la ricerca della convergenza della procedura lineare equivalente.

4.1 Stima dei fattori di amplificazione

In questo lavoro, pur essendo stati estratti numerosi dati dalle elaborazioni eseguite, ci si è concentrati sulla determinazione dei fattori di amplificazione (FA) nei punti di controllo fissati lungo le sezioni sismostratigrafiche. Questo parametro permette di valutare lo scostamento dalle condizioni di pericolosità di base, andando a quantificare l'effetto della complessità stratigrafica, intesa come influenza della semplice successione di *layers* a caratteristiche differenti nella configurazione monodimensionale o come ulteriore incidenza dovuta alla loro

continuità laterale nella configurazione bidimensionale (o anche tridimensionale), della topografia, che nel caso di questo studio ha scarso peso in quanto l'area esaminata è pressoché pianeggiante, e degli elementi tettonici.

I valori di FA, essendo uno strumento quantitativo sintetico, permettono la realizzazione di carte di distribuzione che forniscono una visione d'insieme del comportamento di una data area. Presentano il vantaggio di essere espressi come numeri puri facilmente elaborabili e confrontabili. Nel nostro caso il confronto verrà eseguito con i risultati dello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 del comune di Cassino.

I FA sono ottenuti, come da procedura indicata in Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS, Gruppo di Lavoro MS, 2008), per ogni set di input sismico (7 accelerogrammi), come rapporto tra l'integrale dello spettro elastico medio in accelerazione di output e l'integrale dello spettro elastico medio in accelerazione di input, nei tre intervalli di periodo 0.1-0.5, 0.4-0.8, 0.7-1.1 s:

$$FA = \frac{Sa_{m,o}}{Sa_{m,i}}$$

con

$$Sa_m = \int_{T_i}^{T_f} SA(T)dT$$

dove

Sa_m è il valore medio dello spettro in output (o) o in input (i)

$SA(T)$ è lo spettro di risposta in accelerazione in output o in input

T_i e T_f sono i limiti dell'intervallo di periodi considerato

Il software STRATA non calcola in automatico i fattori di amplificazione, ma è necessario esportare i punti degli spettri dei 7 accelerogrammi di input e dei 7 accelerogrammi di output in un foglio excel per ottenere i tre valori dei FA, tramite il rapporto degli integrali delle due curve risultanti, nei tre intervalli di periodo (Fig. 4.1).

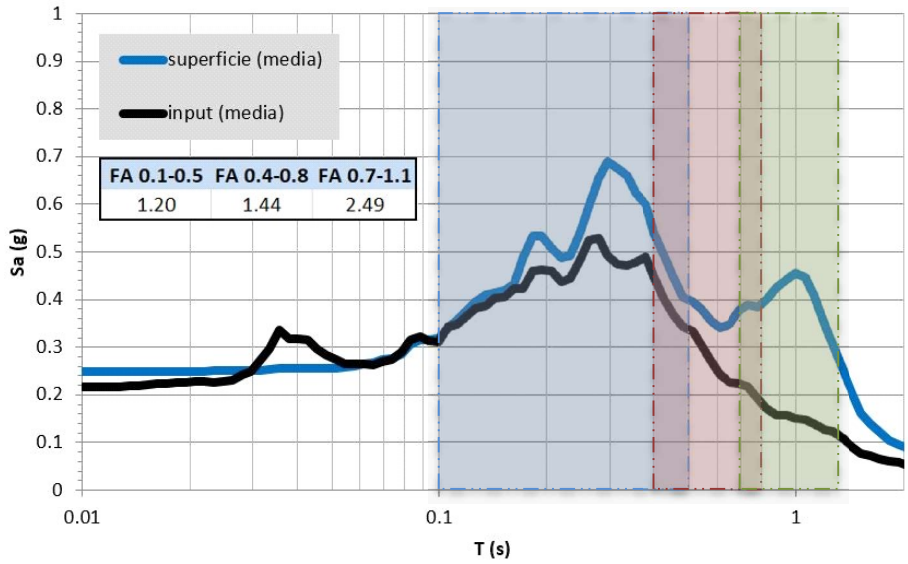


Fig. 4.1 - *Grafico per la determinazione dei fattori di amplificazione nei tre periodi di riferimento (Punto 1 sulla sezione S_1). La curva nera rappresenta lo spettro medio in accelerazione di input, la curva blu lo spettro medio in accelerazione di output. Per il calcolo dei fattori di amplificazione viene eseguito il rapporto tra gli integrali delle due curve negli intervalli di periodo 0.1-0.5 s (riquadro azzurro), 0.4-0.8 s (riq. rosso) e 0.7-1.1 s (riq. verde)*

Il software LSR2D calcola invece in automatico i valori di FA per ogni punto di controllo della singola sezione, permettendone l'esportazione come file .txt e come grafico.

4.1.1 Fattori di amplificazione da modellazione 1D

Nei 117 punti indicati in Tab. 3.25 e in Fig. 4.2 sono state modellate le verticali sismostratigrafiche 1D e sono stati calcolati i fattori di amplificazione con la procedura esposta nel precedente paragrafo. Si espongono di seguito i risultati suddivisi per sezione e si discuteranno gli stessi nel capitolo 5 in funzione del modello geologico ricostruito.

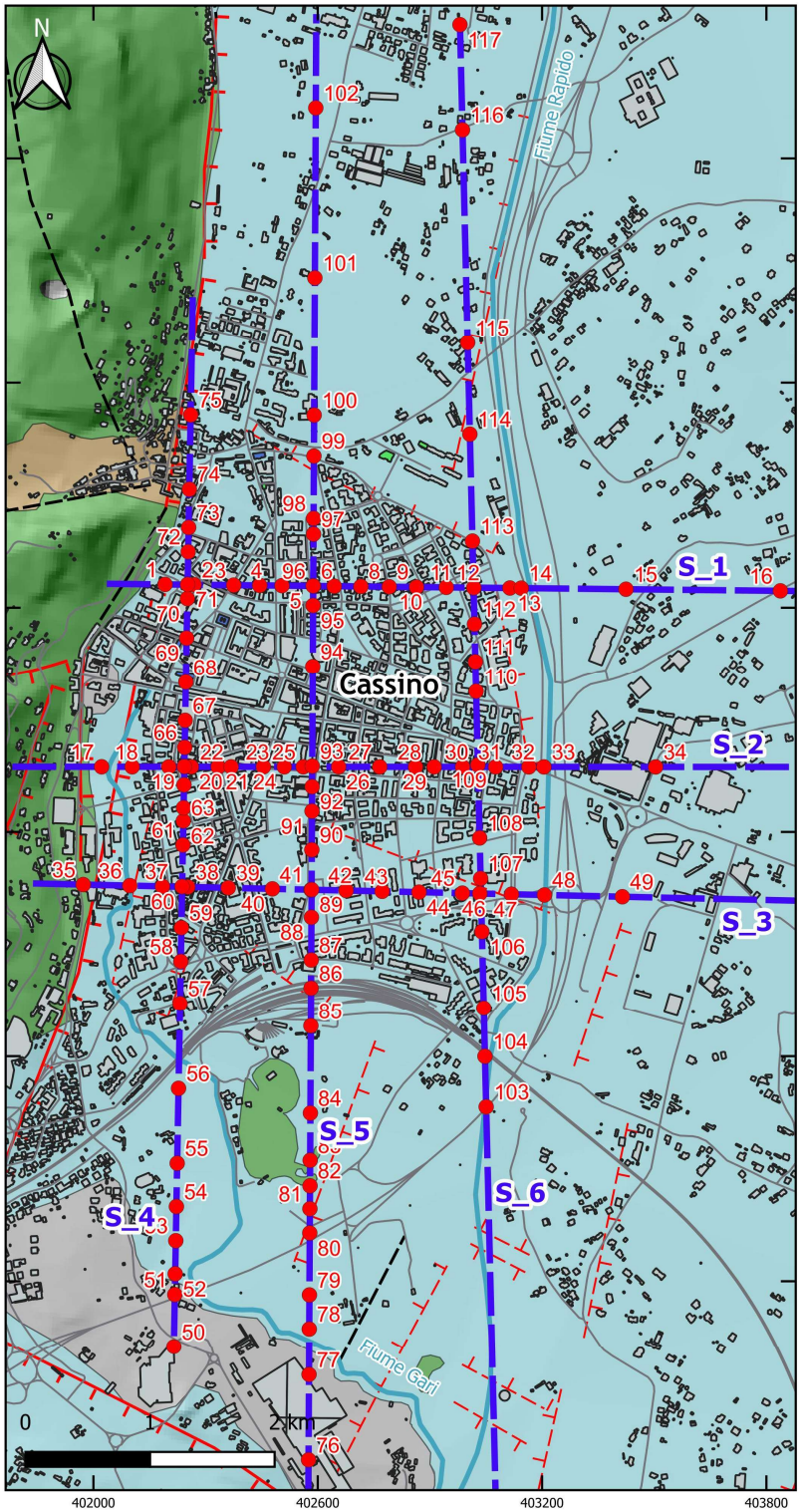


Fig. 4.2 - *Numerazione dei punti di controllo (pallini rossi)*

Nelle tabelle che seguono, i FA sono elencati per ciascuno dei tre intervalli di riferimento in funzione della distanza di ogni punto di controllo dall'origine della sezione.

Per quanto riguarda la sezione S_1, i fattori di amplificazione calcolati variano tra 1.13 e 1.42 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 1.81 e 1.44 per il secondo intervallo e salgono a 2.25-2.66 per l'intervallo di periodi maggiori. Per tutti gli intervalli dopo i 700 m si nota una stabilizzazione del valore di FA (Tab. 4.1 e Fig. 4.3).

***Tab. 4.1** – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 1D*

Sez_1				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
1	147.4	1.20	1.44	2.49
2	224.9	1.42	1.62	2.48
3	331.0	1.19	1.75	2.25
4	400.6	1.19	1.77	2.60
5	460.1	1.21	1.81	2.66
6	544.3	1.22	1.80	2.64
7	599.9	1.22	1.79	2.62
8	671.3	1.20	1.78	2.59
9	747.0	1.13	1.67	2.38
10	820.0	1.14	1.66	2.39
11	899.7	1.14	1.65	2.39
12	973.3	1.14	1.62	2.37
13	1069.8	1.14	1.61	2.36
14	1100.1	1.14	1.62	2.38
15	1380.3	1.15	1.64	2.39
16	1793.4	1.13	1.62	2.36

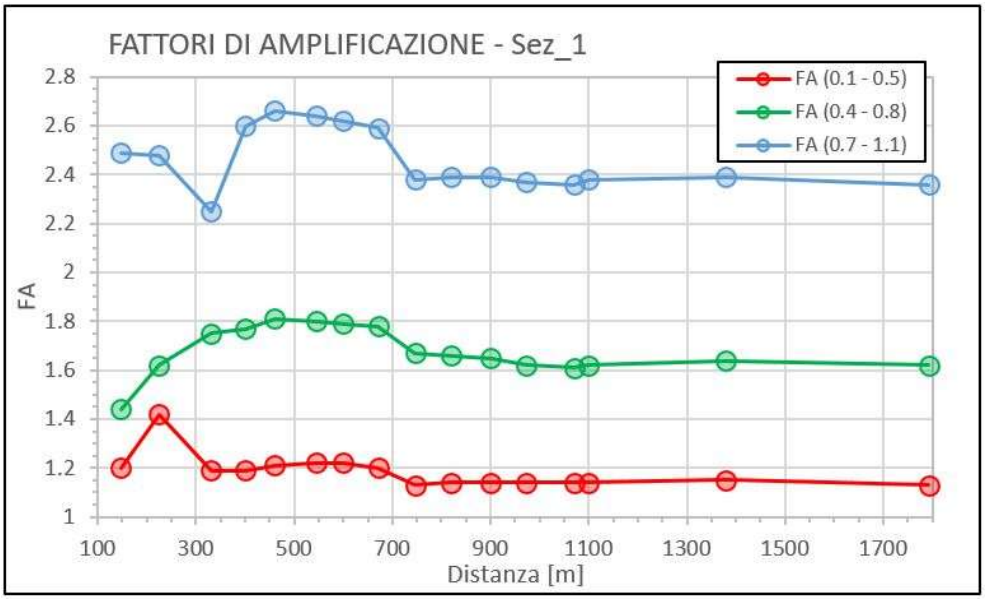


***Fig. 4.3 -** Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 1D*

Per quanto riguarda la sezione S_2, i fattori di amplificazione calcolati variano tra 1.10 e 1.48 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 1.67 e 1.95 per il secondo intervallo e salgono a 2.26-2.79 per

l'intervallo di periodi maggiori. Anche in questo caso ad una certa distanza dall'origine della sezione (≈ 1100 m), corrispondente allo stesso settore visto per la S_1, i valori di FA tendono a rimanere costanti (Tab. 4.2 e Fig. 4.4).

***Tab. 4.2** – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 1D*

Sez_2				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
17	370.1	1.48	1.95	2.77
18	451.8	1.44	1.88	2.78
19	550.0	1.38	1.92	2.79
20	610.1	1.24	1.91	2.77
21	681.7	1.23	1.88	2.73
22	716.5	1.24	1.91	2.74
23	802.7	1.23	1.88	2.68
24	858.5	1.23	1.87	2.66
25	909.3	1.21	1.83	2.63
26	1003.9	1.21	1.84	2.59
27	1114.0	1.10	1.69	2.27
28	1209.6	1.13	1.74	2.27
29	1259.6	1.14	1.77	2.26
30	1335.5	1.11	1.67	2.30
31	1424.0	1.14	1.75	2.28
32	1512.9	1.15	1.75	2.30
33	1553.1	1.14	1.74	2.30
34	1851.8	1.16	1.77	2.38

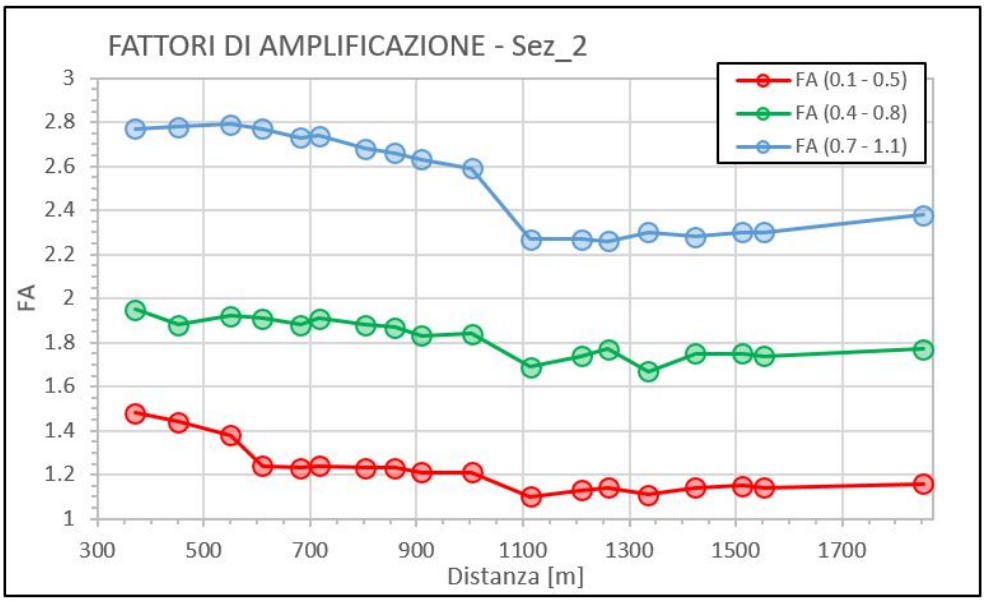


***Fig. 4.4 -** Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 1D*

Per quanto riguarda la sezione S_3, i fattori di amplificazione calcolati risultano mediamente più alti rispetto alle precedenti due sezioni; variano tra 1.19 e 1.61 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 1.85 e 2.48 per il secondo intervallo e salgono a 2.25-2.90 per l'intervallo di periodi maggiori. Non si nota in questo caso una stabilizzazione dei valori di FA come nelle sezioni S_1 e S_2 (Tab. 4.3 e Fig. 4.5).

***Tab. 4.3** – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 1D*

Sez_3				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
35	125.8	1.61	2.48	2.90
36	250.5	1.51	2.38	2.90
37	337.9	1.45	2.29	2.89
38	405.5	1.40	2.21	2.89
39	513.9	1.37	2.18	2.86
40	632.1	1.47	2.25	2.81
41	735.3	1.48	2.25	2.79
42	829.2	1.46	2.22	2.77
43	925.7	1.38	2.16	2.78
44	1024.3	1.31	2.08	2.77
45	1140.2	1.27	2.02	2.72
46	1186.9	1.28	2.03	2.70
47	1271.5	1.26	2.01	2.65
48	1359.9	1.25	1.98	2.59
49	1568.3	1.19	1.85	2.25

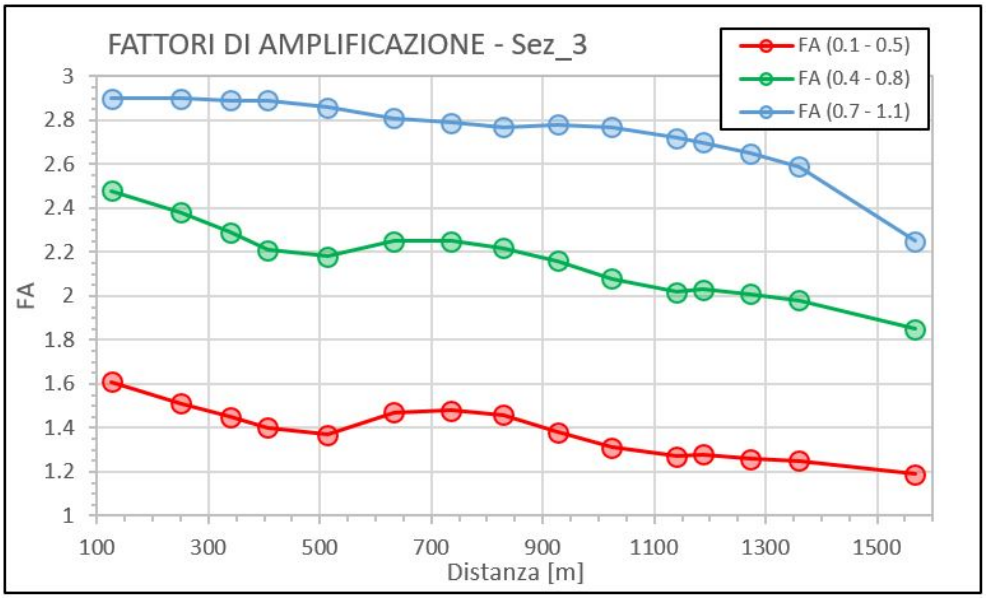


***Fig. 4.5** - Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 1D*

Per quanto riguarda l'andamento dei FA lungo la sezione S_4, risulta meno regolare per la banda di periodo più alta; i valori variano tra 1.27 e 1.9 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 1.76 e 2.73 per il secondo intervallo e tra 1.6-2.93 per l'intervallo di periodi maggiori (Tab. 4.4 e Fig. 4.6).

Tab. 4.4 – *Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 1D*

Sez_4				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
50	10.0	1.90	2.11	1.60
51	150.1	1.84	2.16	1.68
52	205.3	1.88	2.73	2.49
53	293.6	1.71	2.55	2.67
54	384.6	1.62	2.34	2.61
55	500.1	1.49	2.35	1.91
56	699.7	1.65	2.40	1.77
57	927.8	1.70	2.39	1.73
58	1040.4	1.81	2.60	2.36
59	1130.5	1.73	2.52	2.52
60	1240.1	1.63	2.41	2.73
61	1351.0	1.60	2.38	2.8
62	1415.1	1.73	2.60	2.66
63	1450.0	1.79	2.65	2.59
64	1511.1	1.76	2.63	2.64
65	1560.1	1.71	2.57	2.72
66	1611.2	1.66	2.51	2.79
67	1683.2	1.60	2.44	2.86
68	1786.0	1.51	2.28	2.90
69	1904.8	1.44	2.14	2.90
70	2010.1	1.37	2.02	2.87
71	2048.0	1.36	2.00	2.86
72	2135.0	1.34	1.96	2.82
73	2199.8	1.33	1.92	2.78
74	2301.7	1.27	1.76	2.52
75	2499.8	1.53	2.38	2.93

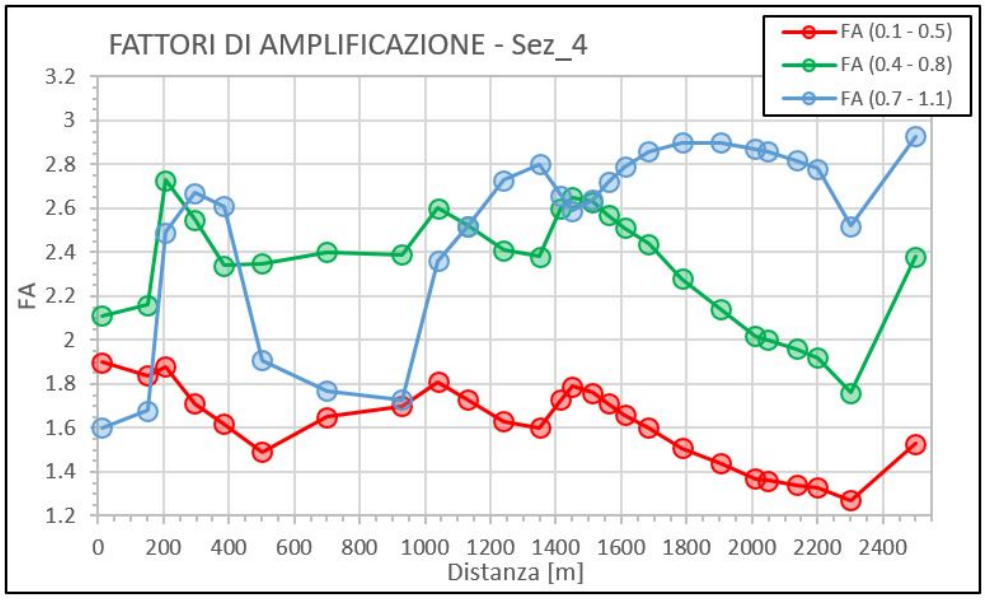


Fig. 4.6 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 1D*

Per quanto riguarda la sezione S_5, per tutti gli intervalli di periodo di riferimento, i fattori di amplificazione presentano un minimo pari a 1.00 (assenza di amplificazione) e altri valori prossimi all'unità ad una distanza compresa tra i 750 e i 1000 m circa dall'origine della sezione; per il resto l'andamento dei valori risulta abbastanza regolare con un massimo di 1.79 per l'intervallo 0.1-0.5 s, 2.65 per il secondo intervallo e 2.95 per l'intervallo di periodi maggiori (Tab. 4.5 e Fig. 4.7).

***Tab. 4.5** – Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 1D*

Sez_5				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
76	70.1	1.34	2.17	2.15
77	300.1	1.21	2.02	2.48
78	424.0	1.61	2.40	2.78
79	515.1	1.40	2.26	2.95
80	680.3	1.79	2.65	2.53
81	744.8	1.10	1.02	1.01
82	806.0	1.00	1.00	1.00
83	874.0	1.00	1.00	1.00
84	999.9	1.13	1.03	1.01
85	1232.9	1.22	1.04	1.02
86	1335.0	1.74	2.62	2.71
87	1410.2	1.51	2.36	2.90
88	1524.1	1.44	2.26	2.87
89	1597.9	1.48	2.25	2.79
90	1704.0	1.38	2.18	2.84
91	1807.1	1.29	2.05	2.84
92	1872.3	1.23	1.90	2.69
93	1927.1	1.22	1.85	2.69
94	2194.6	1.22	1.82	2.66
95	2357.7	1.22	1.79	2.63
96	2409.9	1.22	1.79	2.63
97	2548.0	1.21	1.74	2.58
98	2589.8	1.20	1.73	2.56
99	2756.0	1.11	1.56	2.29
100	2865.1	1.09	1.52	2.21
101	3233.1	1.04	1.43	2.05
102	3686.2	1.03	1.41	2.00

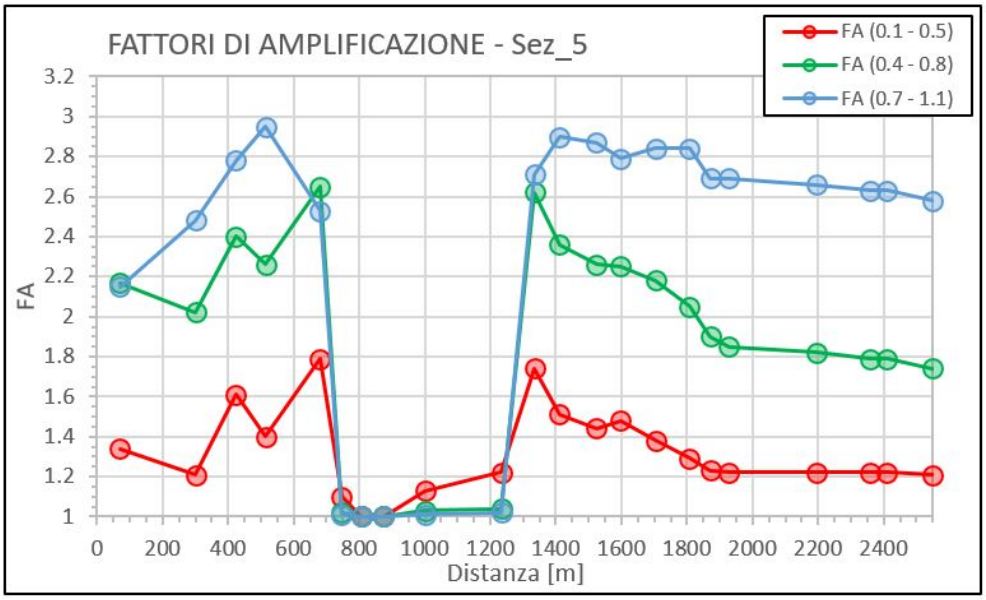


Fig. 4.7 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 1D*

Per quanto riguarda la sezione S_6, la variazione dei valori di FA lungo la sezione risulta abbastanza regolare, con una sostanziale progressiva riduzione spostandosi verso nord. I fattori di amplificazione calcolati variano tra 1.09 e 1.93 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 1.62 e 2.74 per il secondo intervallo e salgono a 2.25-2.81 per l'intervallo di periodi maggiori (Tab. 4.6 e Fig. 4.8).

Tab. 4.6 – *Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 1D*

Sez_6				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
103	1388.7	1.93	2.74	2.45
104	1523.6	1.91	2.73	2.52
105	1653.4	1.83	2.67	2.68
106	1858.3	1.72	2.58	2.81
107	2000.0	1.53	2.29	2.79
108	2108.0	1.47	2.22	2.75
109	2302.9	1.33	2.00	2.39
110	2499.6	1.29	1.96	2.37
111	2580.1	1.27	1.94	2.36
112	2680.6	1.24	1.91	2.35
113	2902.0	1.19	1.83	2.35
114	3187.0	1.13	1.73	2.31
115	3431.8	1.09	1.62	2.25
116	4000.6	1.10	1.64	2.28
117	4281.2	1.11	1.64	2.31

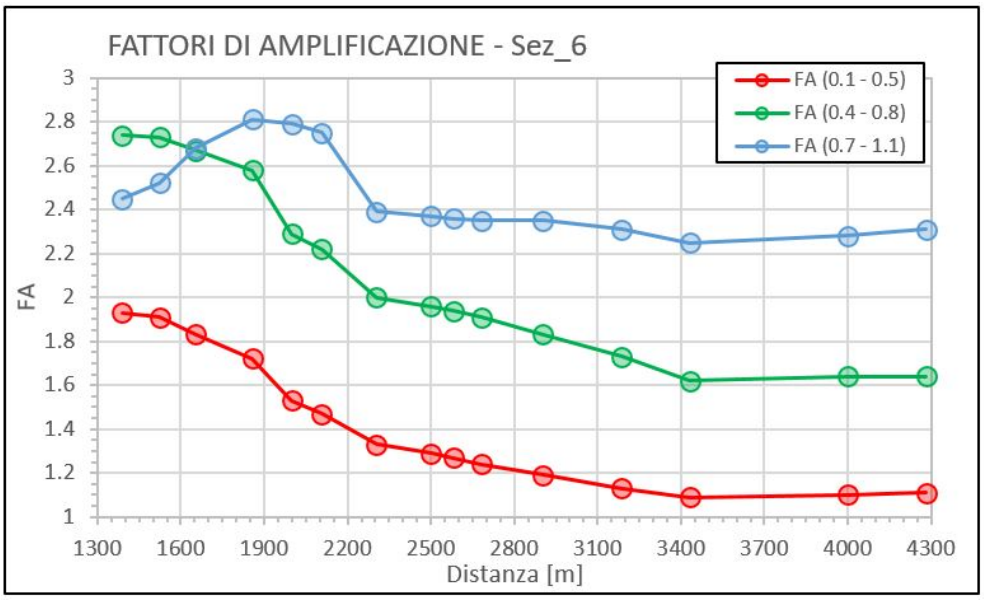


Fig. 4.8 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 1D*

4.1.2 Fattori di amplificazione da modellazione 2D

Si espongono di seguito i risultati ottenuti dal software LSR2D per la modellazione bidimensionale, suddivisi per sezione; i risultati saranno discussi nel capitolo 5 in funzione del modello geologico ricostruito.

Per quanto riguarda la sezione S_1, i fattori di amplificazione calcolati variano tra 1.25 e 1.45 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 1.56 e 2.01 per il secondo intervallo e salgono a 1.81-2.81 per l'intervallo di periodi maggiori. Sa solo per la banda più bassa dopo i 700 m si nota una stabilizzazione del valore di FA (Tab. 4.7 e Fig. 4.9).

Tab. 4.7 *– Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 2D*

Sezione 1				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
1	147.4	1.45	1.67	1.81
2	224.9	1.40	1.87	2.61
3	331.0	1.43	1.56	2.81
4	400.6	1.33	1.66	2.55
5	460.1	1.37	1.83	2.51
6	544.3	1.37	1.98	2.67
7	599.9	1.38	2.01	2.69
8	671.3	1.31	1.91	2.60
9	747.0	1.33	1.87	2.49
10	820.0	1.30	1.86	2.50
11	899.7	1.31	1.83	2.51
12	973.3	1.29	1.75	2.47
13	1069.8	1.28	1.70	2.42
14	1100.1	1.28	1.71	2.41
15	1380.3	1.28	1.73	2.44
16	1793.4	1.25	1.71	2.44

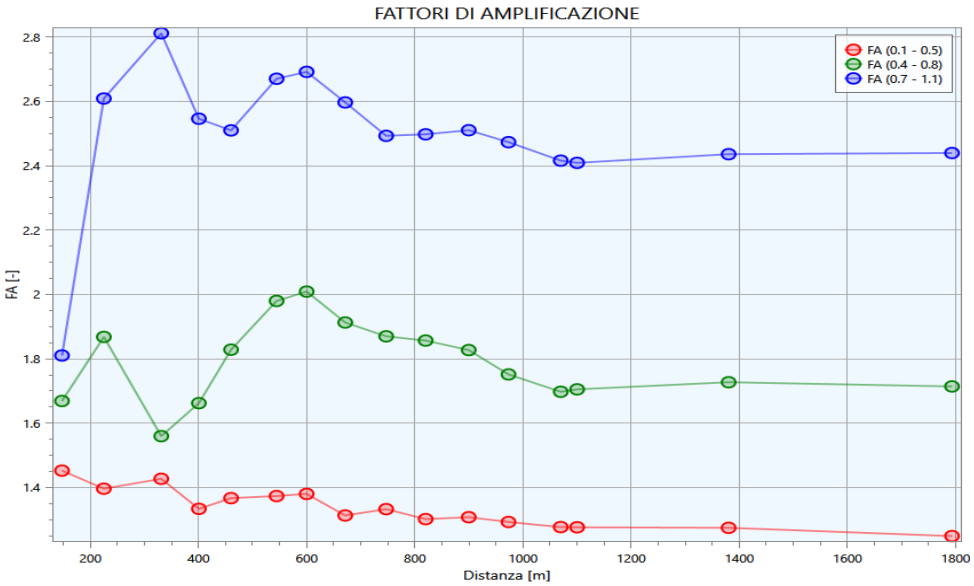


Fig. 4.9 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 2D*

Per quanto riguarda la sezione S_2, i fattori di amplificazione calcolati variano tra 1.30 e 1.94 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 1.78 e 2.32 per il secondo intervallo e salgono a 1.49-2.90 per l'intervallo di periodi maggiori. Risultano così mediamente maggiori rispetto a quelli della simulazione 1D (Tab. 4.8 e Fig. 4.10).

Tab. 4.8 – *Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 2D*

Sezione 2				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
17	370.1	1.94	1.78	1.49
18	451.8	1.68	2.30	2.30
19	550.0	1.64	2.13	2.73
20	610.1	1.48	2.13	2.81
21	681.7	1.39	2.07	2.76
22	716.5	1.40	2.00	2.69
23	802.7	1.40	2.10	2.74
24	858.5	1.41	2.19	2.84
25	909.3	1.43	2.17	2.82
26	1003.9	1.40	2.12	2.74
27	1114.0	1.42	2.14	2.80
28	1209.6	1.35	2.01	2.48
29	1259.6	1.38	1.97	2.48
30	1335.5	1.51	2.32	2.90
31	1424.0	1.37	2.00	2.56
32	1512.9	1.38	2.10	2.50
33	1553.1	1.37	2.10	2.53
34	1851.8	1.30	2.02	2.52

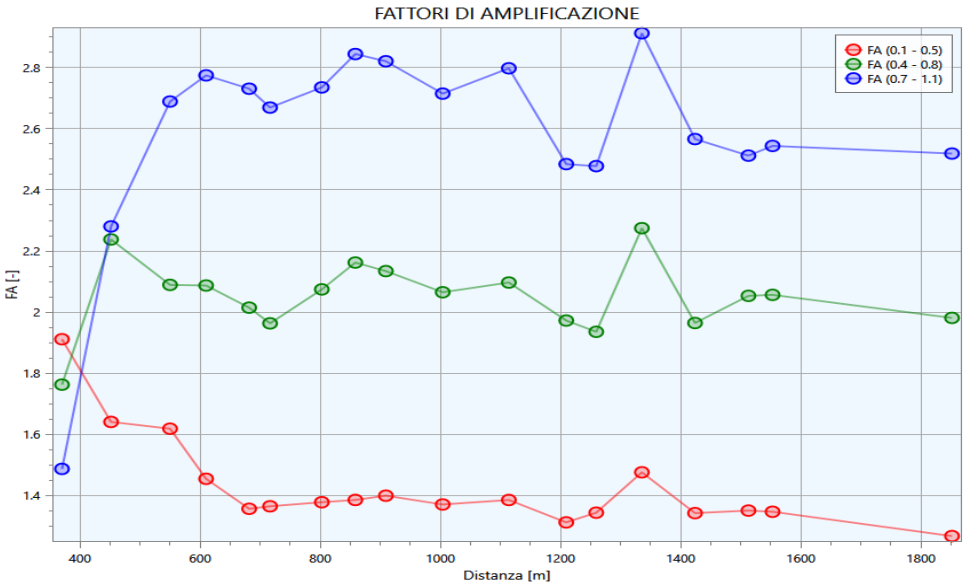


Fig. 4.10 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 2D*

Per quanto riguarda la sezione S_3, i fattori di amplificazione calcolati presentano dei picchi con valori maggiori di 3 per l'intervallo di periodo 0.7-1.1 s e valori sempre maggiori di 2 per la banda centrale. I valori variano tra 1.29 e 2.17 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 2.13 e 2.88 per il secondo intervallo e salgono a 2.21-3.29 per l'intervallo di periodi maggiori (Tab. 4.9 e Fig. 4.11).

Tab. 4.9 – *Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 2D*

Sezione 3				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
35	125.8	2.17	2.88	2.21
36	250.5	1.42	2.22	2.63
37	337.9	1.49	2.14	2.91
38	405.5	1.67	2.51	3.29
39	513.9	1.67	2.54	3.21
40	632.1	1.61	2.52	2.80
41	735.3	1.60	2.55	2.80
42	829.2	1.61	2.57	2.86
43	925.7	1.52	2.44	2.96
44	1024.3	1.44	2.25	2.90
45	1140.2	1.40	2.16	2.64
46	1186.9	1.37	2.14	2.55
47	1271.5	1.39	2.24	2.57
48	1359.9	1.29	2.17	2.58
49	1568.3	1.32	2.13	2.49

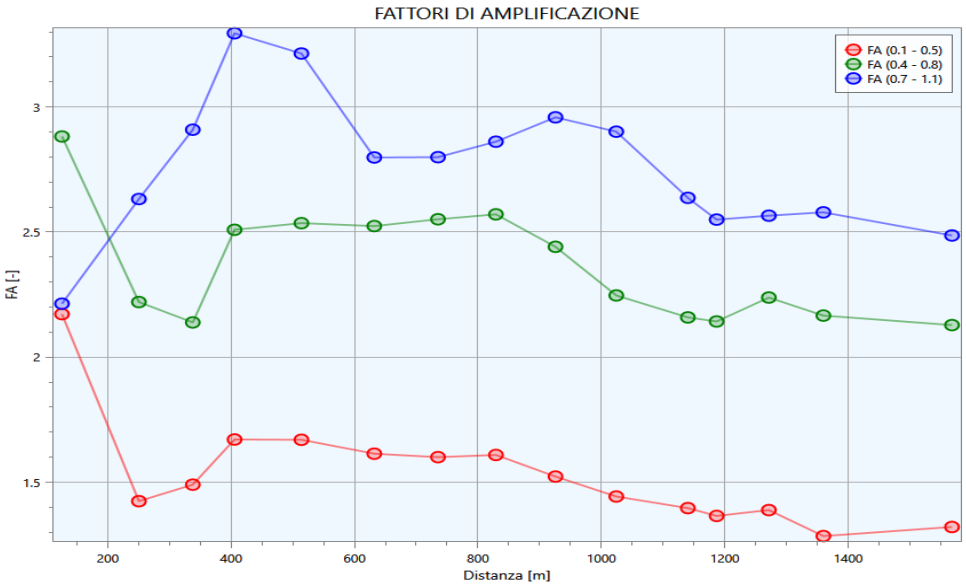


Fig. 4.11 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 2D*

Per quanto riguarda l'andamento dei FA lungo la sezione S_4, risulta meno regolare per la banda di periodo più alta; i valori variano tra 1.20 e 1.89 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 2.01 e 2.86 per il secondo intervallo e tra 1.86-3.46 per l'intervallo di periodi maggiori (Tab. 4.10 e Fig. 4.12).

Tab. 4.10 – *Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 2D*

Sezione 4				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
50	10.0	1.23	2.08	2.63
51	150.1	1.20	2.02	2.61
52	205.3	1.80	2.55	3.18
53	293.6	1.63	2.45	3.46
54	384.6	1.53	2.34	2.55
55	500.1	1.48	2.33	1.90
56	699.7	1.70	2.86	1.94
57	927.8	1.74	2.71	1.86
58	1040.4	1.78	2.78	2.22
59	1130.5	1.79	2.64	2.57
60	1240.1	1.73	2.58	3.19
61	1351.0	1.69	2.70	3.23
62	1415.1	1.81	2.54	2.69
63	1450.0	1.85	2.50	2.50
64	1511.1	1.89	2.64	2.52
65	1560.1	1.81	2.68	2.64
66	1611.2	1.76	2.62	2.76
67	1683.2	1.69	2.49	2.88
68	1786.0	1.60	2.40	3.06
69	1904.8	1.58	2.25	3.03
70	2010.1	1.49	2.10	2.81

71	2048.0	1.45	2.07	2.73
72	2135.0	1.46	2.20	2.72
73	2199.8	1.49	2.01	2.83
74	2301.7	1.53	2.07	3.36
75	2499.8	1.65	2.66	3.16

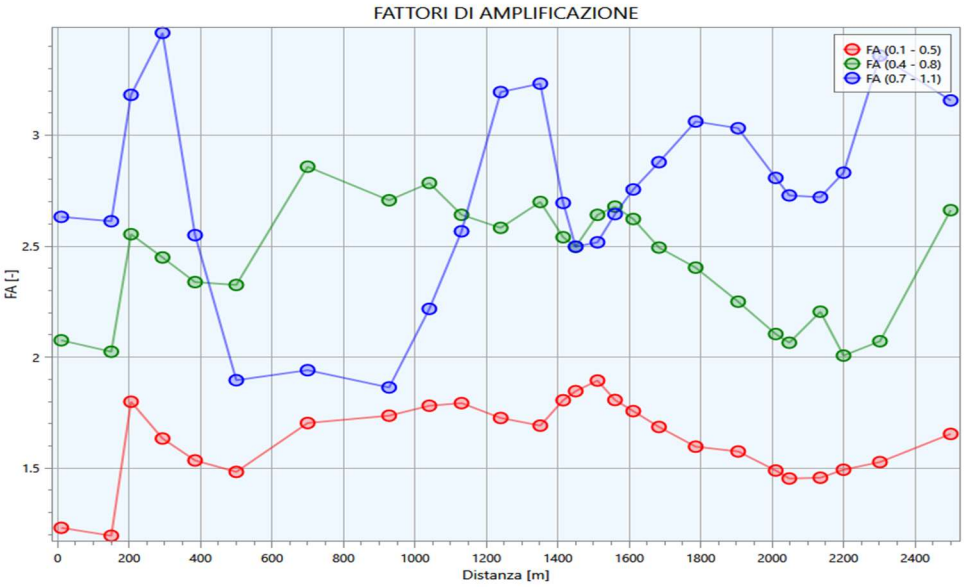


Fig. 4.12 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 2D*

Per quanto riguarda la sezione S_5, per tutti gli intervalli di periodo di riferimento, i fattori di amplificazione presentano un minimo con valori prossimi all'unità, come nelle analisi 1D. A circa 300 m dall'origine è presente un picco che super il valore 3 per la seconda banda e 4 per l'intervallo 0.7-1.1. un altro picco importante è presente a circa 1400 m. (Tab. 4.11 e Fig. 4.13).

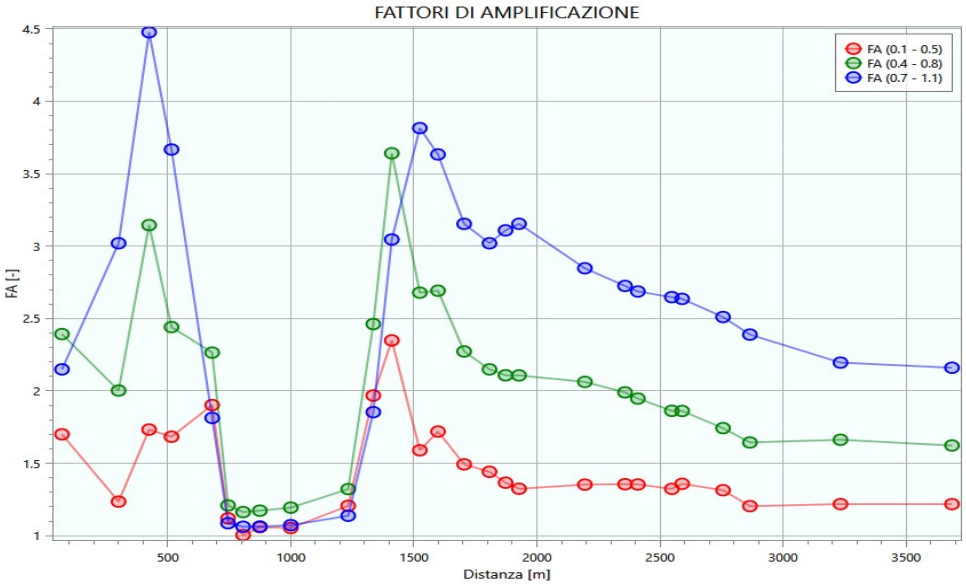


Fig. 4.13 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 2D*

Tab. 4.11 – *Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 2D*

Sezione 5				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
76	70.1	1.70	2.39	2.15
77	300.1	1.24	2.00	3.02
78	424.0	1.73	3.15	4.48
79	515.1	1.68	2.44	3.67
80	680.3	1.90	2.26	1.81
81	744.8	1.12	1.21	1.09
82	806.0	1.00	1.16	1.06
83	874.0	1.06	1.17	1.06
84	999.9	1.05	1.19	1.07
85	1232.9	1.21	1.32	1.14
86	1335.0	1.97	2.46	1.85
87	1410.2	2.35	3.64	3.05
88	1524.1	1.59	2.68	3.82
89	1597.9	1.72	2.69	3.63
90	1704.0	1.49	2.27	3.15
91	1807.1	1.44	2.15	3.02
92	1872.3	1.37	2.11	3.11
93	1927.1	1.32	2.11	3.15
94	2194.6	1.35	2.06	2.85
95	2357.7	1.36	1.99	2.73
96	2409.9	1.35	1.95	2.69
97	2548.0	1.32	1.86	2.65
98	2589.8	1.36	1.86	2.64
99	2756.0	1.31	1.74	2.51
100	2865.1	1.20	1.64	2.39
101	3233.1	1.22	1.66	2.20
102	3686.2	1.22	1.62	2.16

Per quanto riguarda la sezione S_6, la variazione dei valori di FA lungo la sezione risulta abbastanza regolare, con una sostanziale progressiva riduzione spostandosi verso nord. I fattori di amplificazione calcolati variano tra 1.01 e 2.11 per l'intervallo 0.1-0.5 s, tra 1.48 e 3.04 per il secondo intervallo e tra 2.03 e 2.97 per l'intervallo di periodi maggiori (Tab. 4.12 e Fig. 4.14).

Tab. 4.12 – *Fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 2D*

Sezione 6				
n. punto di controllo	**Distanza (m)**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
103	1388.7	2.11	3.03	2.58
104	1523.6	2.11	3.04	2.76
105	1653.4	2.10	3.02	2.91
106	1858.3	1.97	2.81	2.97
107	2000.0	1.65	2.48	2.89

108	2108.0	1.67	2.50	2.92
109	2302.9	1.56	2.44	2.88
110	2499.6	1.58	2.53	2.87
111	2580.1	1.56	2.49	2.81
112	2680.6	1.49	2.38	2.70
113	2902.0	1.32	2.11	2.52
114	3187.0	1.27	1.94	2.46
115	3431.8	1.25	1.86	2.45
116	4000.6	1.24	1.85	2.53
117	4281.2	1.01	1.48	2.03

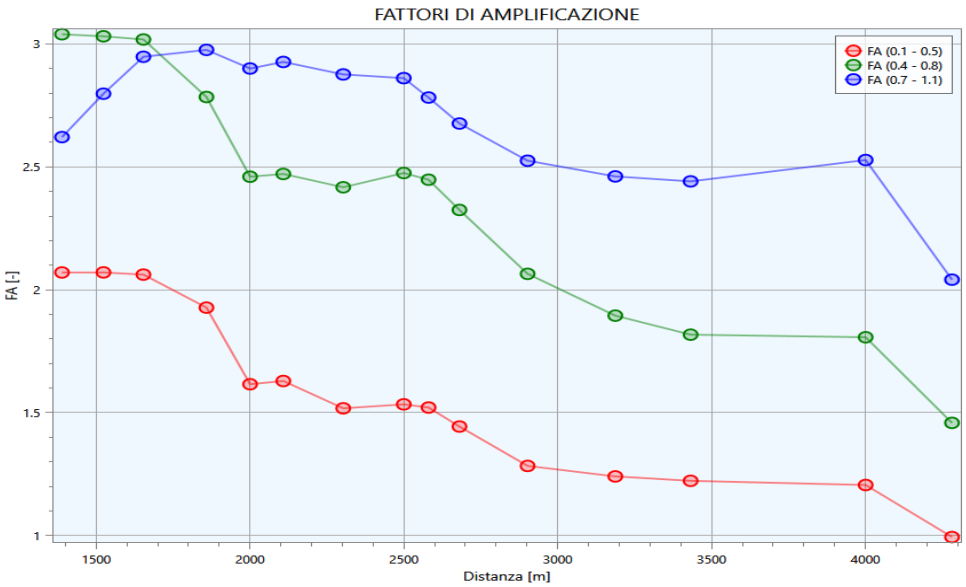


Fig. 4.14 - *Grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 2D*

I valori dei FA ottenuti risultano in linea con le evidenze scaturite da studi di microzonazione sismica di livello 3 eseguiti in comuni limitrofi, come Cervaro e San Vittore de Lazio, o nelle piane fluvio-lacustri di Isola del Liri e Castelliri. Per la banda di periodo più bassa (0.1-0.5 s) i fattori di amplificazione sono per lo più contenuti, mentre per i periodi maggiori crescono fino a mostrare picchi abbastanza elevati. È comunque da sottolineare il fatto che, presumibilmente, in caso di sollecitazioni sismiche tali da generare valori di amplificazione così alti, possano sopraggiungere prima dei fenomeni di deformazione cosismici (ad esempio liquefazione) che limitano di fatto l'effetto amplificativo.

4.2 Costruzione carta dei fattori di amplificazione del centro urbano di Cassino

Per evidenziare la variazione spaziale dei fattori di amplificazione nell'area studiata, è stata realizzata una carta di distribuzione di questi valori seguendo le procedure indicate negli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica* della Microzonazione Sismica ver. 4.2 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020). In particolare gli *Standard* prevedono la realizzazione di una Carta di microzonazione sismica composta da 3 elaborati

contenenti i FA per i 3 intervalli di periodo di riferimento; ogni microzona delimita le aree che differiscono di 0.2 unità di FA per valori fino 2.4 e di 0.5 unità per valori fino 3.5, distinguendo poi le zone con FA ≤ 1.0 e quelle con FA > 3.5 (Fig. 4.15). Altre microzone sono individuate in funzione della eventuale presenza di fenomeni di instabilità (frane, liquefazione, faglie attive e capaci, cedimenti differenziali, cavità sotterranee, sinkhole); nel caso del nostro studio non si è tenuto conto delle eventuali instabilità.

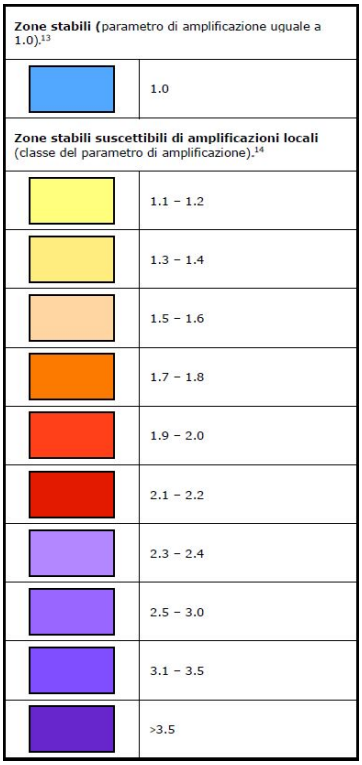


Fig. 4.15 - *Legenda della Carta di Microzonazione Sismica per le zone stabili e stabili suscettibili di amplificazioni locali (da Standard di rappresentazione e archiviazione informatica ver. 4.2, 2020)*

Nella realizzazione di questo tipo di carte, per definire le microzone si opera generalmente tenendo conto dei valori dei fattori di amplificazione ottenuti nelle sezioni o nelle verticali sismostratigrafiche analizzate e delle evidenze morfologiche e delle conoscenze sulla tettonica. Nell'area oggetto di queste analisi di risposta sismica, come già evidenziato, la topografia non gioca un ruolo rilevante sui fenomeni amplificativi, quindi il *contouring* delle mappe è stato eseguito in modo automatico in QGIS (con il plugin *Contour*) per evitare ogni "influenza" da parte dell'operatore e quindi riuscire ad apprezzare, al netto di limitazioni insite nel metodo e nell'algoritmo di elaborazione, le variazioni dei FA dovute all'articolazione dell'assetto stratigrafico e alla presenza di elementi tettonici. La spazializzazione delle microzone, che può presentarsi con trend a variazioni repentine dei FA (Figg. 4.16-4.21), deriva dalla numerosità dei punti di controllo, imposta per aumentare il più possibile il dettaglio dell'analisi e valutare le "interpretazioni" dei codici di calcolo mono e bidimensionali in funzione delle peculiarità che riescono ad analizzare nei modelli sismostratigrafici proposti.

Le figure dalla 4.16 alla 4.21 mostrano le carte dei fattori di amplificazione generate per le modellazioni monodimensionali e bidimensionali nei tre intervalli di periodo 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s.

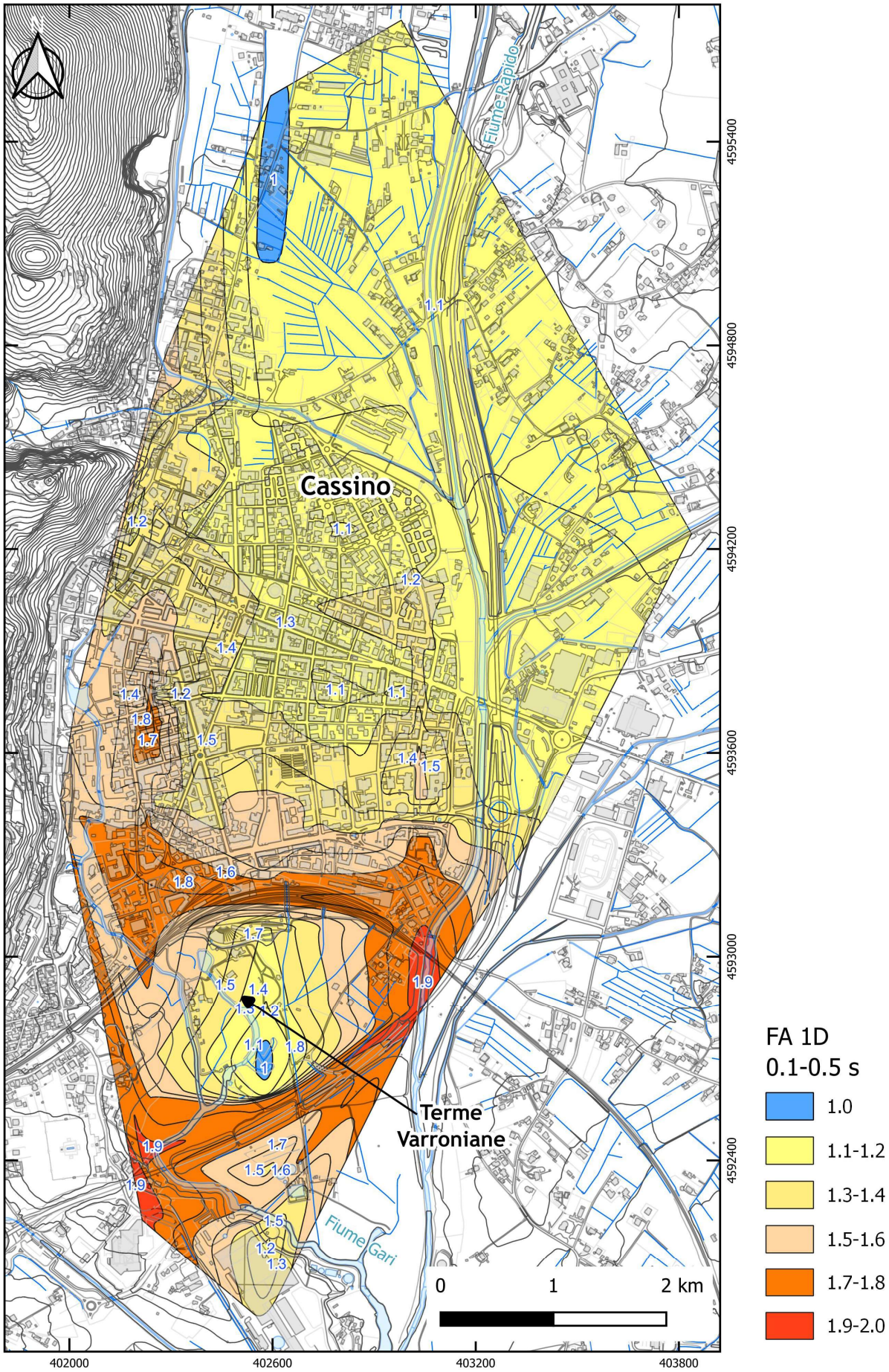


Fig. 4.16 - *Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.1-0.5 s, calcolati con modellazione 1D*

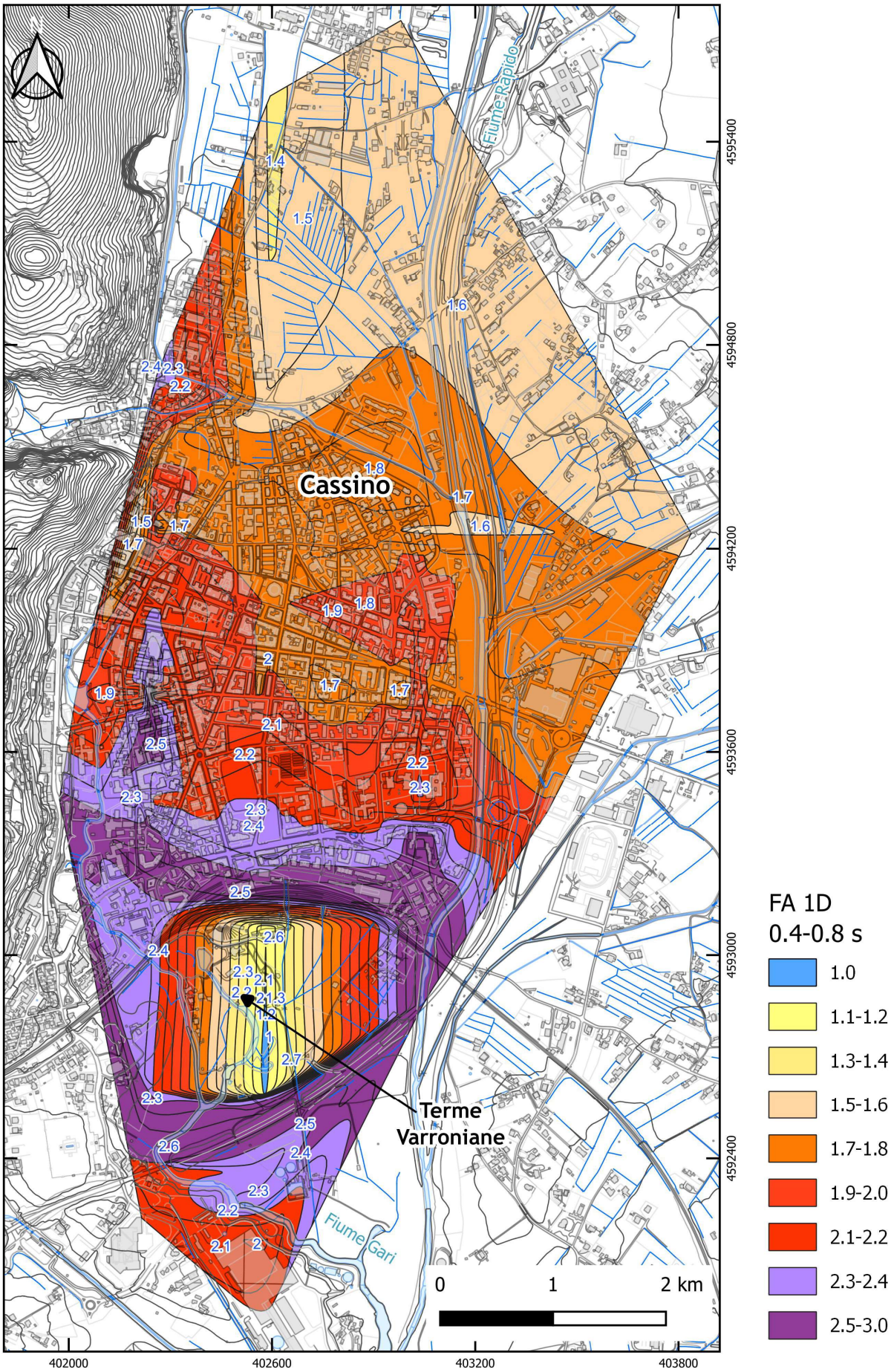


Fig. 4.17 - *Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.4-0.8 s, calcolati con modellazione 1D*

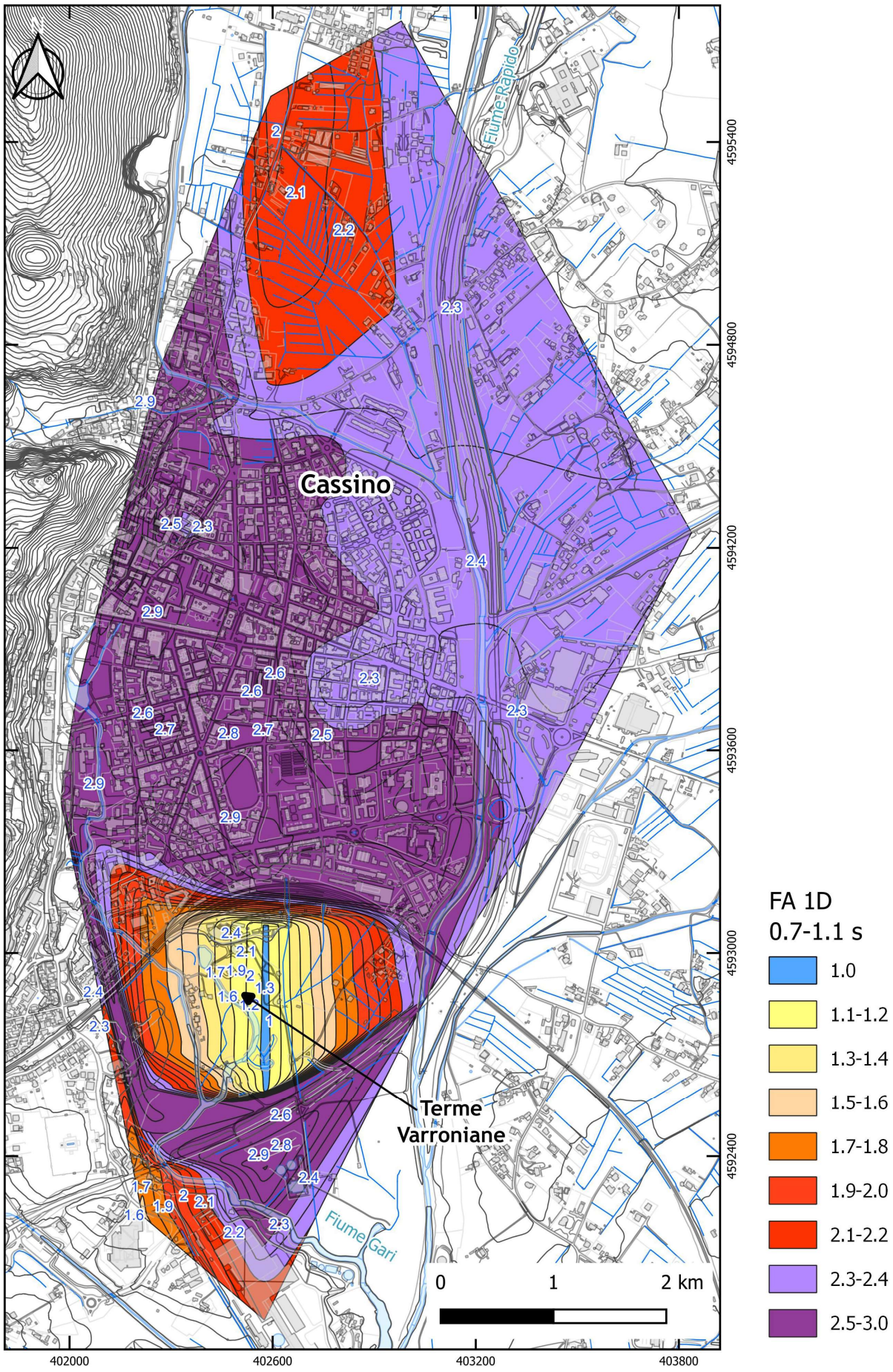


Fig. 4.18 - *Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.7-1.1 s, calcolati con modellazione 1D*

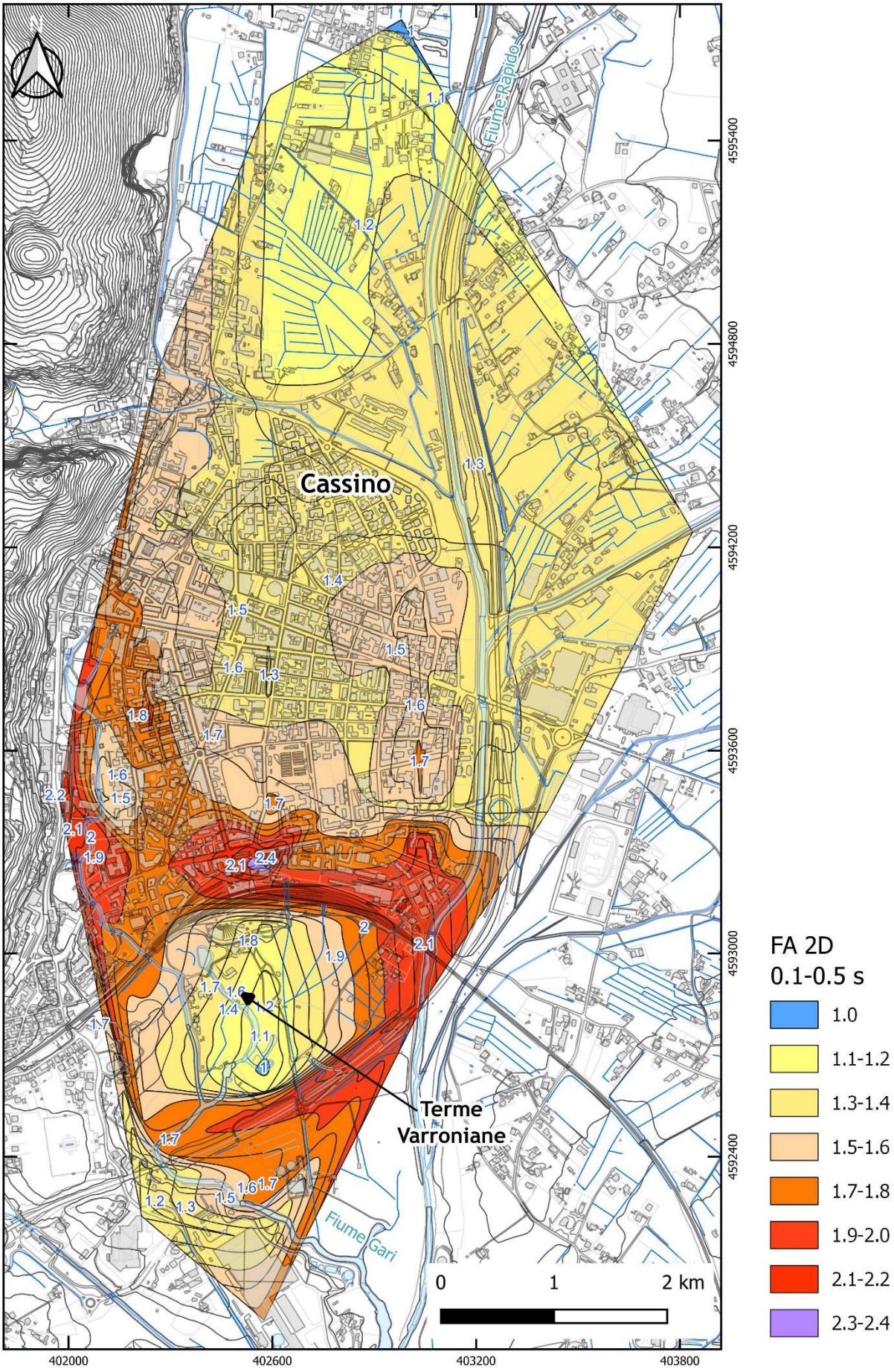


Fig. 4.19 - *Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.1-0.5 s, calcolati con modellazione 2D*

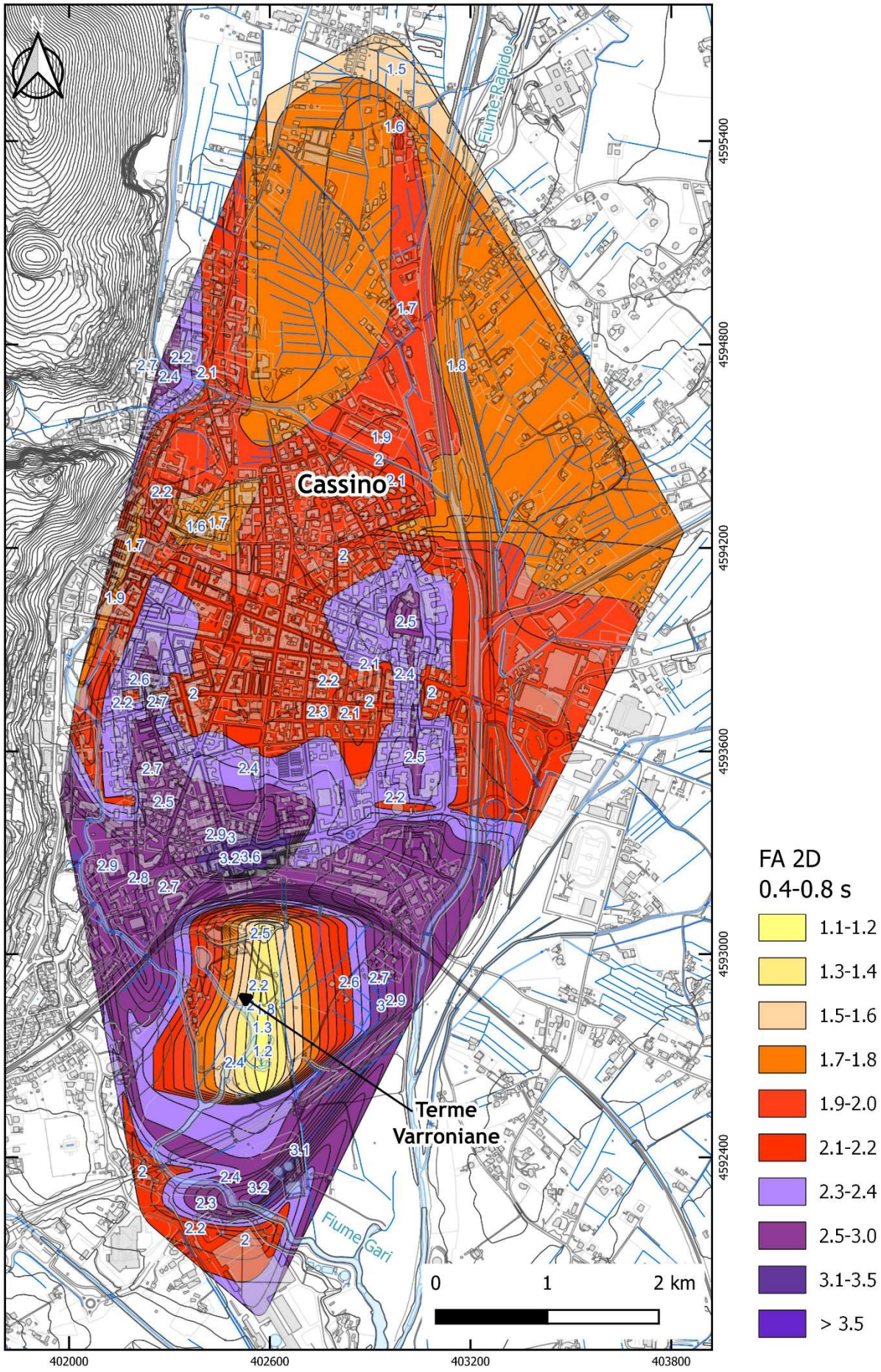


Fig. 4.20 - *Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.4-0.8 s, calcolati con modellazione 2D*

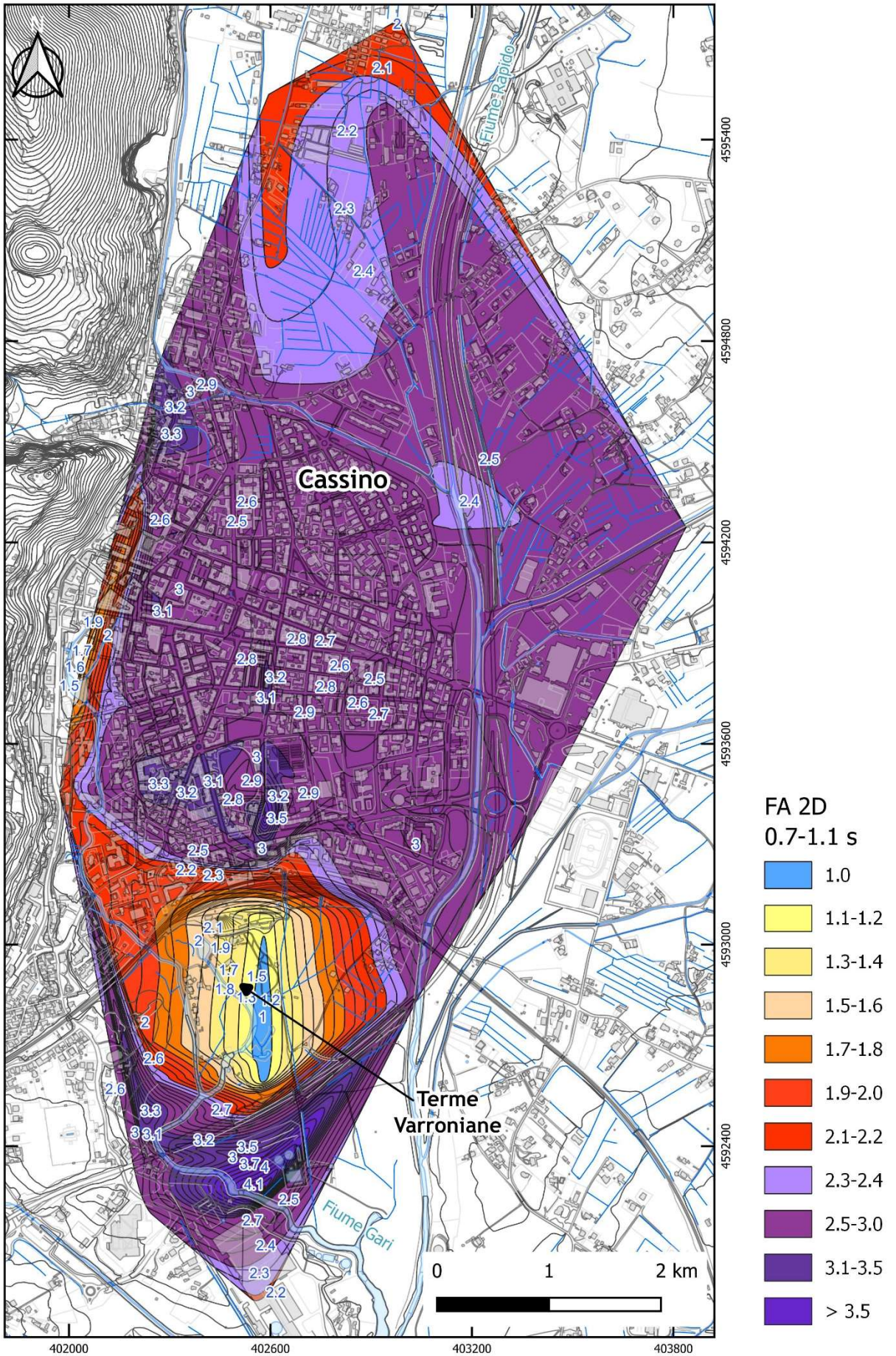


Fig. 4.21 - *Carta dei fattori di amplificazione relativi all'intervallo 0.7-1.1 s, calcolati con modellazione 2D*

4.3 Risultati delle misure sugli edifici

Si espongono di seguito i risultati delle misurazioni di microtremore sismico eseguite alla sommità di alcuni edifici per individuare una eventuale correlazione tra altezza (H) e periodo fondamentale di vibrazione (T) dei fabbricati. Come descritto nel paragrafo 3.6, sono stati scelti edifici di altezza diversa (Fig. 4.22) in modo da coprire tutto lo spettro delle altezze presenti nel centro abitato per poter estendere all'intero patrimonio edilizio i risultati estrapolati per gli edifici testati.

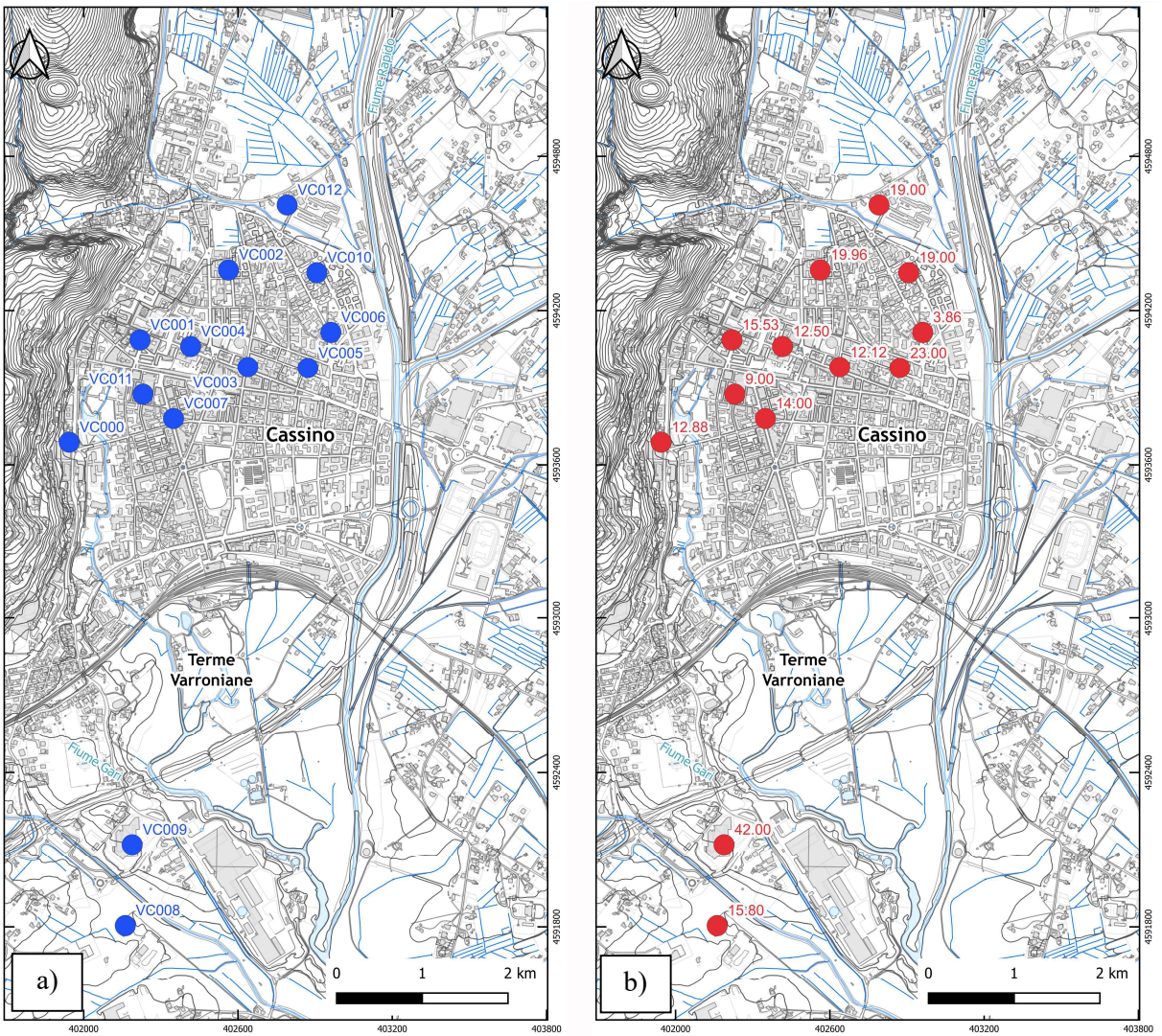


Fig. 4.22 - *Edifici sui quali sono state eseguite misure di microtremore sismico: a) ubicazione edificio con codice identificativo della misura e b) altezze in metri degli edifici*

La figura seguente mostra gli spettri delle tre componenti per ogni misura eseguita. Da ciascuna figura è possibile determinare la frequenza corrispondente al picco spettrale. La componente verticale (*Up-Down*) ha sempre i valori minori al di sopra dei 6-8 Hz; fa eccezione la misura VC006 nella quale questa componente ha valori più alti delle due orizzontali.

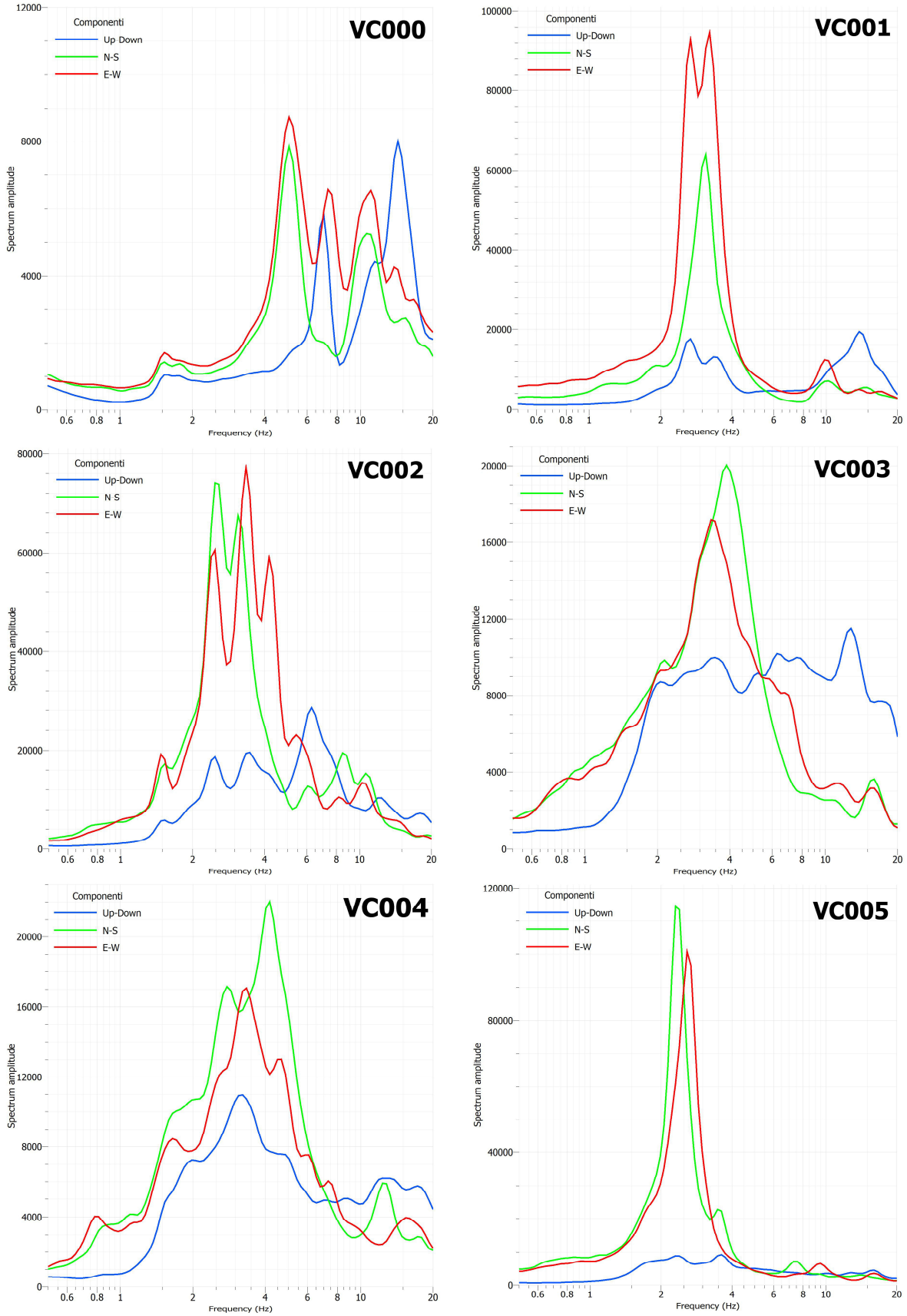


***Fig. 4.23.a** – Spettri delle tre componenti delle misure eseguite sugli edifici; misure da VC000 a VC005*

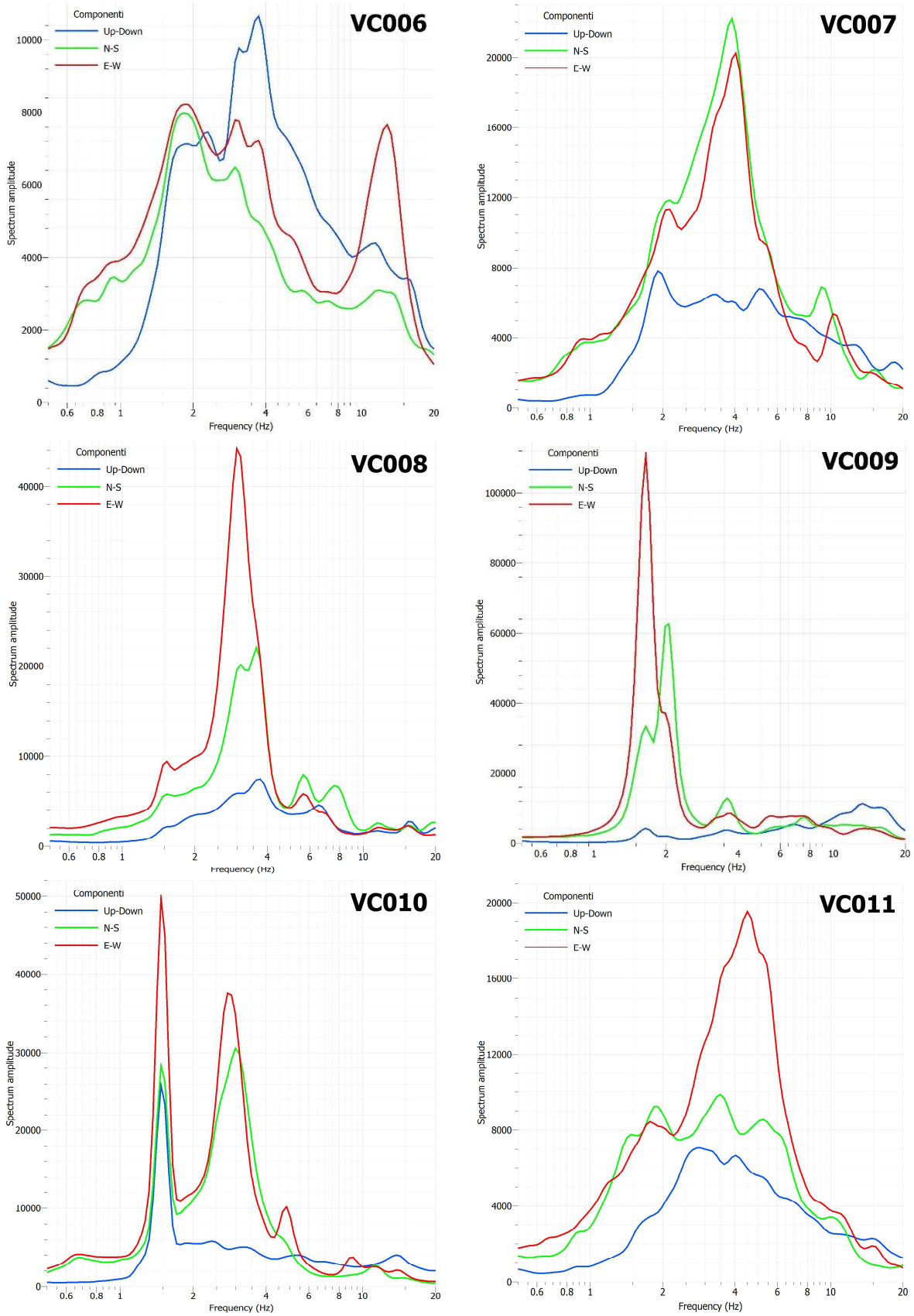


***Fig. 4.23.b** – Spettri delle tre componenti delle misure eseguite sugli edifici; misure da VC006 a VC011*

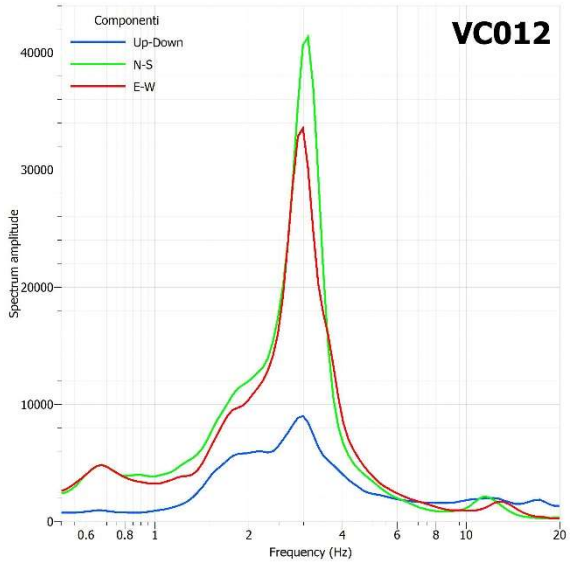


***Fig. 4.23.c** – Spettri delle tre componenti delle misure eseguite sugli edifici; misura VC012*

Per ogni misura eseguita, ai fini delle elaborazioni è stato preso in considerazione il periodo maggiore tra le due componenti orizzontali; nella seguente tabella (Tab.4.13) vengono esposti i risultati di questa indagine. Per ogni misura (codice identificativo VC*xxx*) si riportano l'altezza del corrispondente edificio, i valori delle frequenze nelle due direzioni corrispondenti alle due dimensioni dell'edificio (Freq_N e Freq_E), l'individuazione della frequenza maggiore (Freq_max), il corrispondente periodo (T_max) e il periodo del terreno di fondazione in corrispondenza dell'edifico (T_terr).

***Tab. 4.13** – Risultati delle misure di microtremore sismico eseguite sugli edifici. Freq_N è la frequenza di vibrazione lungo la direzione della dimensione maggiore dell'edificio; Freq_E è la frequenza di vibrazione lungo la direzione della dimensione minore dell'edificio; Freq_min è il valore minore tra Freq_N e Freq_E, cui corrisponde T_max, il periodo di vibrazione maggiore; T_terr è il periodo del terreno di fondazione in corrispondenza dell'edificio*

Codice misura	H edificio (m)	Freq_N (Hz)	Freq_E (Hz)	Freq_min (Hz)	T_max (s)	T_terr (s)
VC000	12.88	5.10	4.98	4.98	0.20	0.27
VC001	15.53	2.94	3.02	2.94	0.34	0.75
VC002	19.96	3.24	2.75	2.75	0.36	1.05
VC003	12.12	3.41	3.75	3.41	0.29	1.27
VC004	12.50	3.34	4.00	3.34	0.30	1.04
VC005	23.11	2.54	2.33	2.33	0.43	1.29
VC006	3.86	12.33	12.04	12.04	0.08	1.31
VC007	13.95	3.79	3.75	3.75	0.27	0.96
VC008	15.80	3.03	3.39	3.03	0.33	1.01
VC009	42.00	1.65	1.98	1.65	0.61	0.91
VC010	19.00	2.81	2.93	2.81	0.36	1.34
VC011	9.05	4.39	3.45	3.45	0.29	0.86
VC012	18.20	3.00	2.93	2.93	0.34	1.31

Questi dati sono stati inseriti nei grafici illustrati nelle Figg. 3.69 (Gallipoli et al., 2010) e 3.70 (Gallipoli et al., 2023) per confrontare i risultati ottenuti con i dati di letteratura (Figg. 4.24 e 4.25).

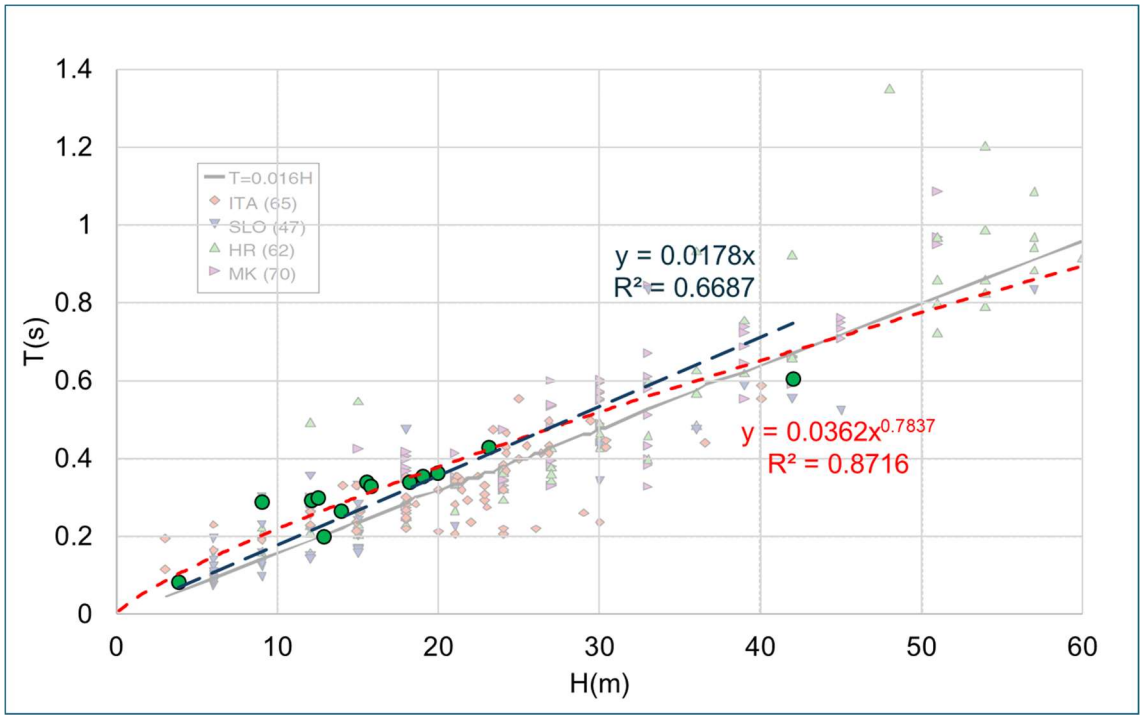


Fig. 4.24 - *Risultati dell'indagine (pallini verdi) posti a confronto con i dati esposti in Gallipoli et al., 2010*

Dal confronto esposto nei due grafici si nota la chiara corrispondenza dei dati desunti dall'indagine (pallini verdi) e le relazioni da letteratura.

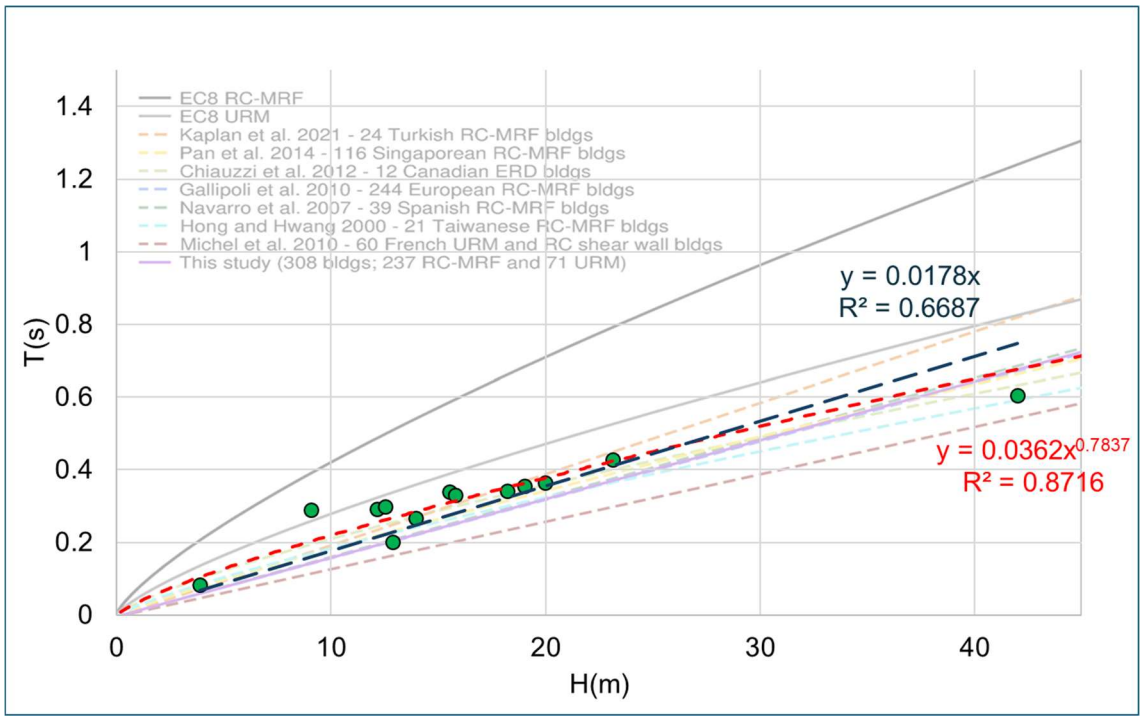


Fig. 4.25 - *Risultati dell'indagine (pallini verdi) posti a confronto con i dati esposti in Gallipoli et al., 2023*

Nei lavori citati, gli autori propongono diverse formulazioni per la relazione empirica tra le due variabili altezza dell'edificio (H) e periodo fondamentale di vibrazione (T), nelle forme:

I	$T = aH^b$
II	$T = a + bH$
III	$T = aH$

È stata eseguita una analisi di regressione adottando le forme delle relazioni I e III e i risultati (come visibile nelle precedenti figure) sono i seguenti:

I	$T = 0.0362\ H^{0.7837}$
III	$T = 0.0178\ H$

Il coefficiente di determinazione R^2, che valuta l'accuratezza del modello, risulta sufficientemente alto per la relazione *I*, in assoluto ma anche se confrontato con i modelli esposti in Gallipoli et al., 2010 in cui $R^2 = 0.81$.

Utilizzando questa relazione empirica sono stati stimati i periodi di vibrazione degli edifici del centro urbano di Cassino partendo dalla loro altezza, ottenuta dai dati della cartografia del Database GeoTopografico (DBGT) - Scala 1:5.000 della Regione Lazio realizzato sulla base dei voli AGEA 2020.

Per ciascun edificio è stato ricavato il valore del periodo fondamentale del sottostante terreno tramite estrapolazione in ambiente QGIS (comando *Intersezione*) dalla mappa di distribuzione dei valori di periodo di vibrazione T ottenuti dalle misure di microtremore ($T=1/f_0$) e riportata in figura 3.26.a. Si è calcolata quindi la differenza, in valore assoluto, tra i valori di periodo fondamentale di ciascun edificio e del terreno di fondazione, ottenendo risultati che variano tra 0 (valori coincidenti) e 1.32 s.

Considerando che i fenomeni di risonanza terreno-struttura sono tanto più probabili quanto più i valori dei periodi fondamentali del sito e dell'edificio sono prossimi l'uno all'altro, si può valutare la propensione di ciascun edificio verso questo fenomeno dal valore della differenza calcolata tra i due periodi (ΔT). Nella seguente tabella si riportano le percentuali cumulative di edifici per differenze fino a 0.5 s.

Tab. 4.14 – *Percentuale cumulata di edifici con differenze entro 0.5 s tra i periodi fondamentali del terreno e delle strutture*

ΔT (s)	**% cumulata di edifici**
≤ 0.1	11.0
≤ 0.2	23.1
≤ 0.3	35.1
≤ 0.4	47.8
≤ 0.5	59.7

È opportuno specificare che la frequenza fondamentale di vibrazione di una struttura non dipende unicamente dalla sua altezza ma è funzione anche della distribuzione dei carichi, della forma, della tipologia costruttiva e dei materiali impiegati. Quindi l'elaborazione eseguita, pur conforme ad altre esperienze simili da letteratura, può presentare un certo grado di incertezza. Lo scopo in questo caso però non è la determinazione assoluta di questo valore, ma la stima di

un dato su vasta scala che sia in grado di descrivere il comportamento di un insieme di strutture e permetta di elaborare scenari di rischio in funzione della pianificazione di emergenza.

La fig. 4.26 riporta una elaborazione dei risultati ottenuti in funzione del valore ΔT, distinguendo le aree nelle quali la presenza di edifici con $\Delta T > 0.4$ è preponderante e quindi il rischio di risonanza terreno/struttura è minore dalle zone nelle quali sono in numero maggiore gli edifici che hanno un $\Delta T \leq 0.4$ e quindi vi è maggiore propensione agli effetti di risonanza tra terreno e struttura sovrimposta (Pinzón et al., 2019; Tallini et al., 2020).

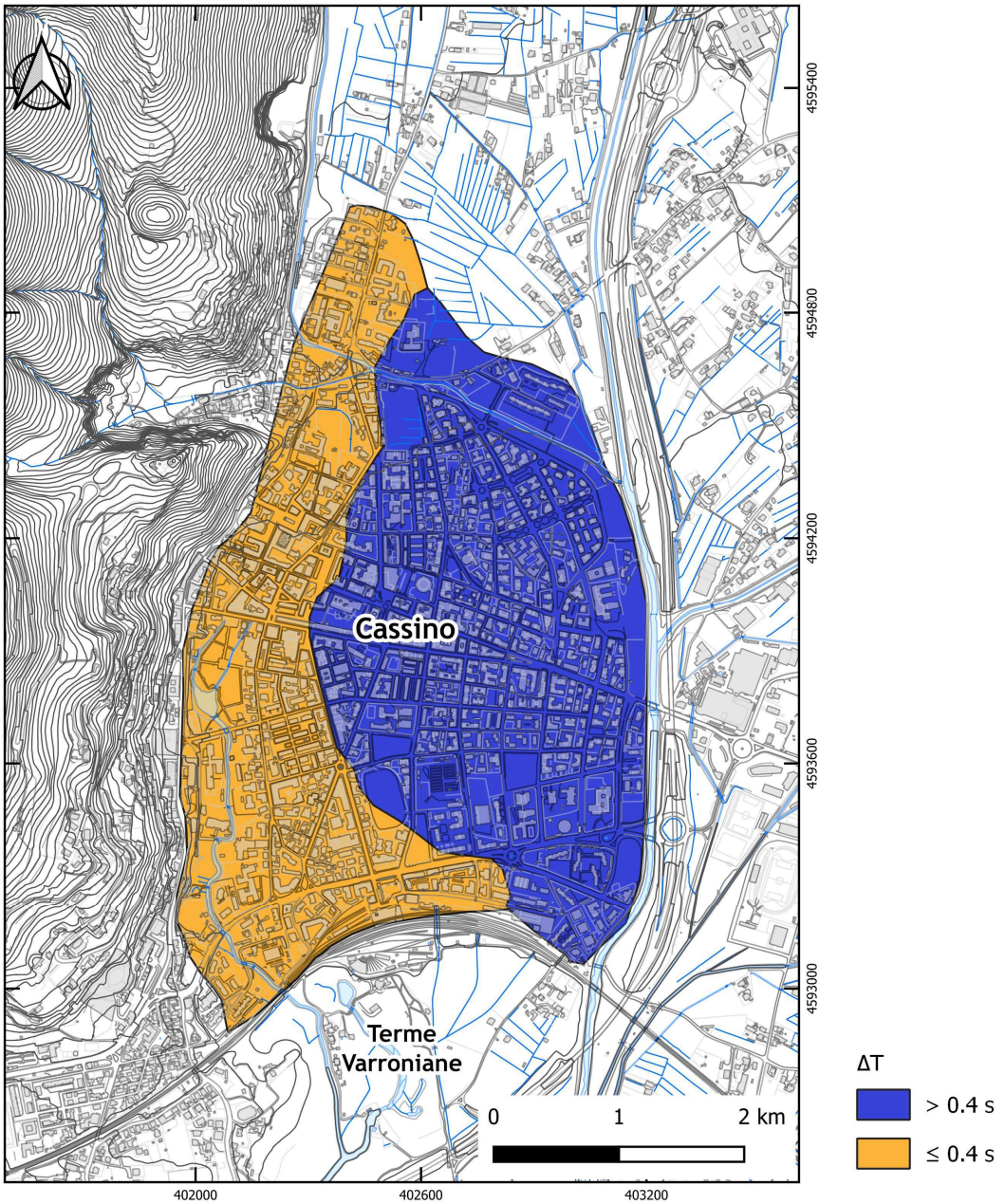


Fig. 4.26 - *Carta delle aree nelle quali la differenza ΔT tra il periodo fondamentale di vibrazione della struttura e il periodo fondamentale del terreno risulta maggiore di 0.4 o minore o uguale a 0.4*

Capitolo 5. DISCUSSIONE

In questo capitolo vengono discussi i risultati delle analisi numeriche di risposta sismica locale esposti nel capitolo precedente, sia correlandoli con le evidenze geologiche e tettoniche dell'area che confrontando i valori dei fattori di amplificazione ottenuti con la modellazione monodimensionale con quelli derivanti dalla modellazione bidimensionale; un ulteriore confronto è stato poi condotto tra i risultati di questo lavoro e quelli dello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 eseguito dal comune di Cassino nell'area del centro urbano.

5.1 Correlazioni con il modello geologico

Andando ad esaminare congiuntamente le carte di distribuzione dei FA mostrate nel precedente capitolo e relative alle modellazioni 1D e 2D (Fig. 5.1, 5.2 e 5.3), alle quali sono stati aggiunti gli elementi tettonici principali, è chiaramente osservabile un particolare trend dei FA nell'area delle Terme Varroniane, immediatamente a sud del centro urbano di Cassino, con valori di FA compresi tra 1 e 1.2 e crescenti via via che ci si allontana da esse. Dal modello geologico esaminato nel paragrafo 3.3 risulta che in questa zona il substrato calcareo è molto superficiale, fino ad arrivare ad affiorare in alcuni punti e tende ad approfondirsi fuori da quest'area a causa di diverse faglie che lo hanno dislocato generando questa struttura ad *horst*.

Come già specificato, la discretizzazione in classi di FA usata è quella proposta per gli studi di microzonazione sismica; la spazializzazione, che crea un trend con variazioni repentine dei FA, deriva dalla numerosità dei punti di controllo, imposta per aumentare il più possibile il dettaglio dell'analisi. Inoltre, negli studi di microzonazione sismica si interviene sulle forme delle microzone cercando di adattarne l'andamento alle evidenze geologiche, stratigrafiche, geomorfologiche e tettoniche, ove questi elementi siano sufficientemente noti; nel caso del presente studio si è preferito non operare alcun intervento proprio per poter confrontare le "interpretazioni" dei codici di calcolo mono (STRATA) e bidimensionali (LSR2D) in funzione degli elementi che riescono ad analizzare nei modelli sismostratigrafici proposti.

Un'altra area con una repentina variazione dei FA si trova poco a nord delle Terme Varroniane, nella zona della stazione ferroviaria, dove è stata ipotizzata la presenza di una faglia diretta ad andamento circa NW-SE, con immersione a NE (indicata con il numero *1* nelle figure 5.1÷5.3). I FA a cavallo di questo elemento tettonico tendono a diminuire spostandosi verso N per i periodi 0.1-0.5 e 0.4-0.8 s, mentre il trend si inverte per l'intervallo a periodo maggiore.

Nella parte W dell'area analizzata, alla base del rilievo di Montecassino, si nota una variazione dei FA che genera aree di iso-amplificazione allungate in maniera circa parallela

rispetto al versante. Questo andamento è in genere correlabile ad un approfondimento progressivo del bedrock al sotto dei depositi di copertura; in questo caso giocano un ruolo determinante anche le faglie dirette a vergenza orientale (indicate con il numero *2* nelle figure precedenti) che dislocano la struttura carbonatica al di sotto della piana.

Un altro elemento tettonico (faglia diretta con immersione a est) che corre lungo il fiume Rapido, sul bordo orientale del centro urbano, è all'origine dell'approfondimento del bedrock e segna con buona probabilità limite del complesso dei flysch che da qui costituirebbe il bedrock sismico; in corrispondenza di questo lineamento (indicato con il numero *3* nelle figure precedenti) si verifica una variazione dei valori di FA.

Questa prima analisi della distribuzione dei fattori di amplificazione evidenzia una buona corrispondenza tra il complesso modello geologico, ricostruito grazie alla elevata disponibilità di indagini e alla loro interpretazione, e il modello sismostratigrafico da esso derivato. Questo, benché soggetto ad inevitabili omogeneizzazioni e semplificazioni (§ 3.4), approssima in maniera ottimale il comportamento sotto sollecitazioni sismiche dell'area analizzata.

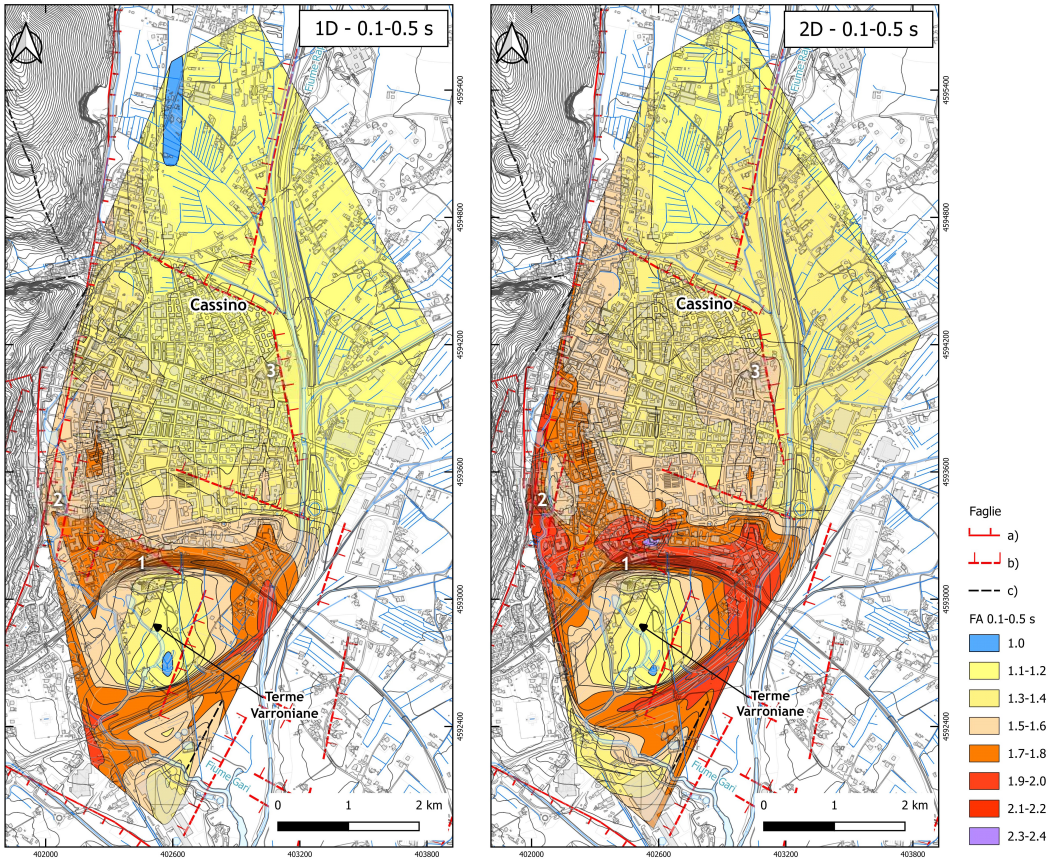


***Fig. 5.1** - Confronto tra le carte dei fattori di amplificazione calcolati con modellazione 1D (a sinistra) e 2D (a destra) relativi all'intervallo di periodo 0.1-0.5 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto. I numeri bianchi nelle figure indicano le faglie commentate nel testo*

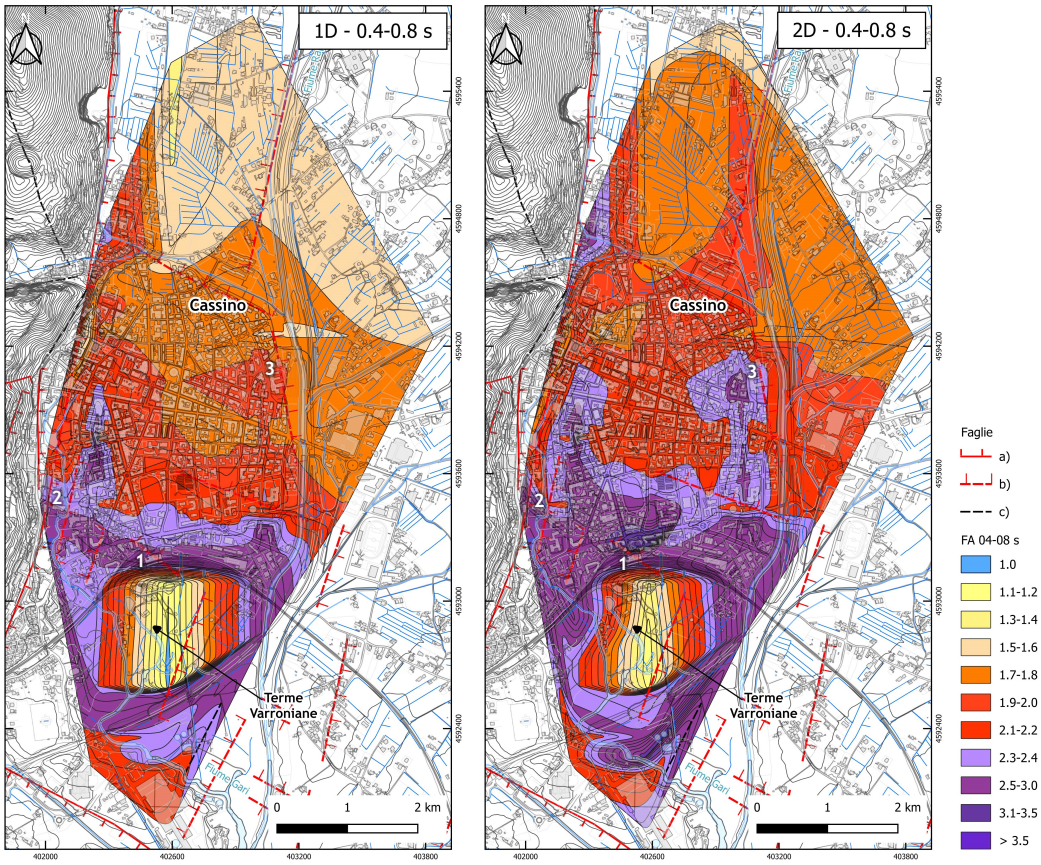


Fig. 5.2 - *Confronto tra le carte dei fattori di amplificazione calcolati con modellazione 1D (a sinistra) e 2D (a destra) relativi all'intervallo di periodo 0.4-0.8 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto. I numeri bianchi nelle figure indicano le faglie commentate nel testo*

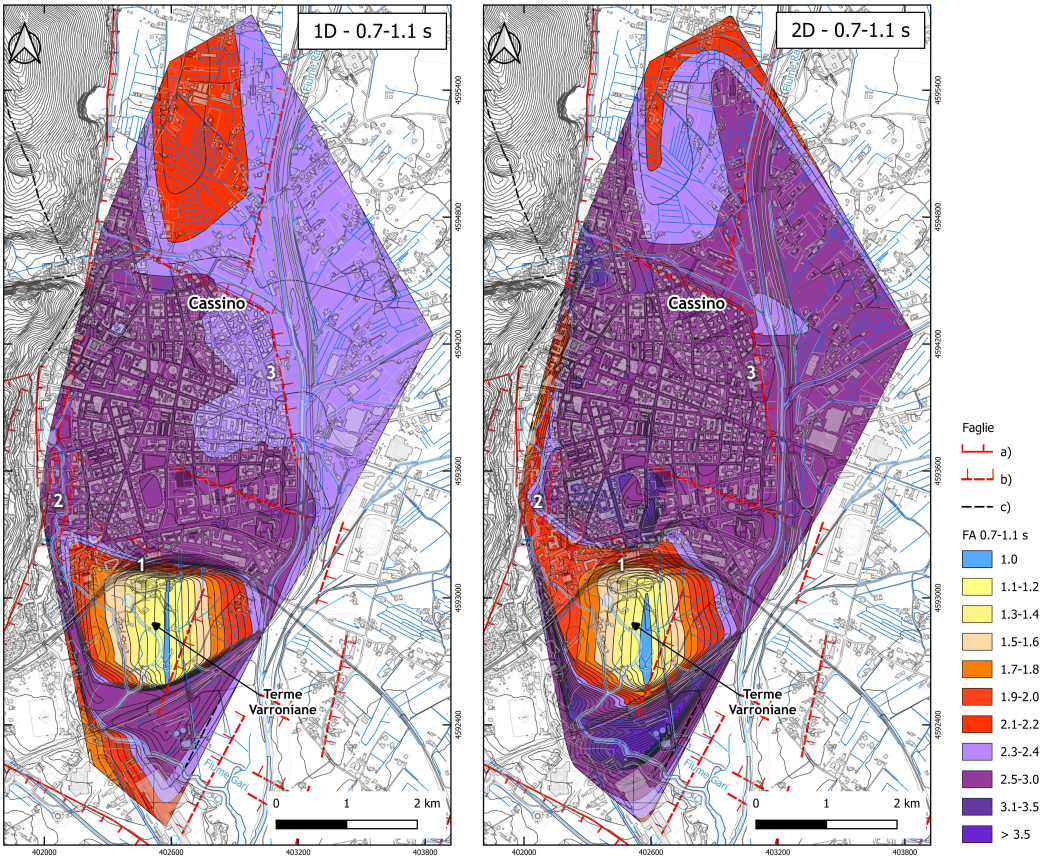


Fig. 5.3 - *Confronto tra le carte dei fattori di amplificazione calcolati con modellazione 1D (a sinistra) e 2D (a destra) relativi all'intervallo di periodo 0.7-1.1 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto. I numeri bianchi nelle figure indicano le faglie commentate nel testo*

Ulteriori considerazioni possono essere fatte andando ad esaminare ciascuna sezione in funzione dei fattori di amplificazione determinati lungo la stessa.

Nella sezione S_1 (Fig. 5.4) è evidente l'influenza della faglia (verticale *1a* in figura) sull'andamento dei valori di FA; poi vi è una generale stabilizzazione dei FA, tranne che a cavallo della verticale *1b*, in corrispondenza della faglia del passaggio dal bedrock calcareo a quello delle unità dei flysch.

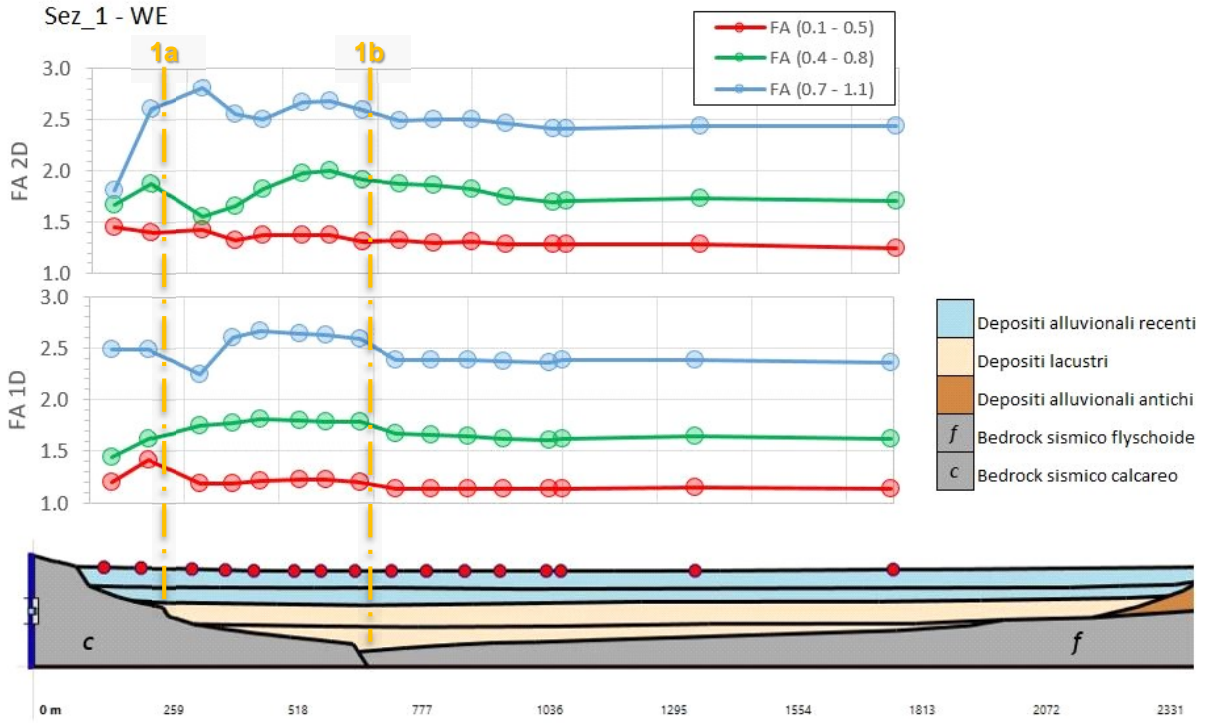


Fig. 5.4 - *Sezione S_1: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA*

Nella sezione S_2 (Fig. 5.5) è molto evidente nella modellazione 2D l'effetto del bordo della valle al contatto con il bedrock calcareo (*2a*) mentre la stessa influenza non è rilevata nella modellazione 1D. A cavallo della verticale 2b il passaggio calcare/flysch è evidenziato nella modellazione monodimensionale, ma non in quella bidimensionale. Procedendo sulla sezione si nota una stabilizzazione dei FA nel modello 1D, mentre nel 2D ci sono punti che mostrano aumenti di FA probabilmente legati alla variazione di spessore nei depositi che non può essere colta dalla modellazione monodimensionale.

Nella sezione S_3 (Fig. 5.6) la modellazione 1D presenta un andamento dei FA abbastanza regolare, non risentendo particolarmente di alcun elemento stratigrafico o tettonico, fatta salva una blanda diminuzione in corrispondenza del passaggio calcari/flysch (*3b*). Nella modellazione 2D è invece evidente l'effetto del bordo della valle al contatto con il bedrock calcareo e quello della faglia (*3a*) mentre è meno accentuato rispetto alla modellazione monodimensionale l'effetto del passaggio dal bedrock calcareo a quello flyschoide (*3b*).

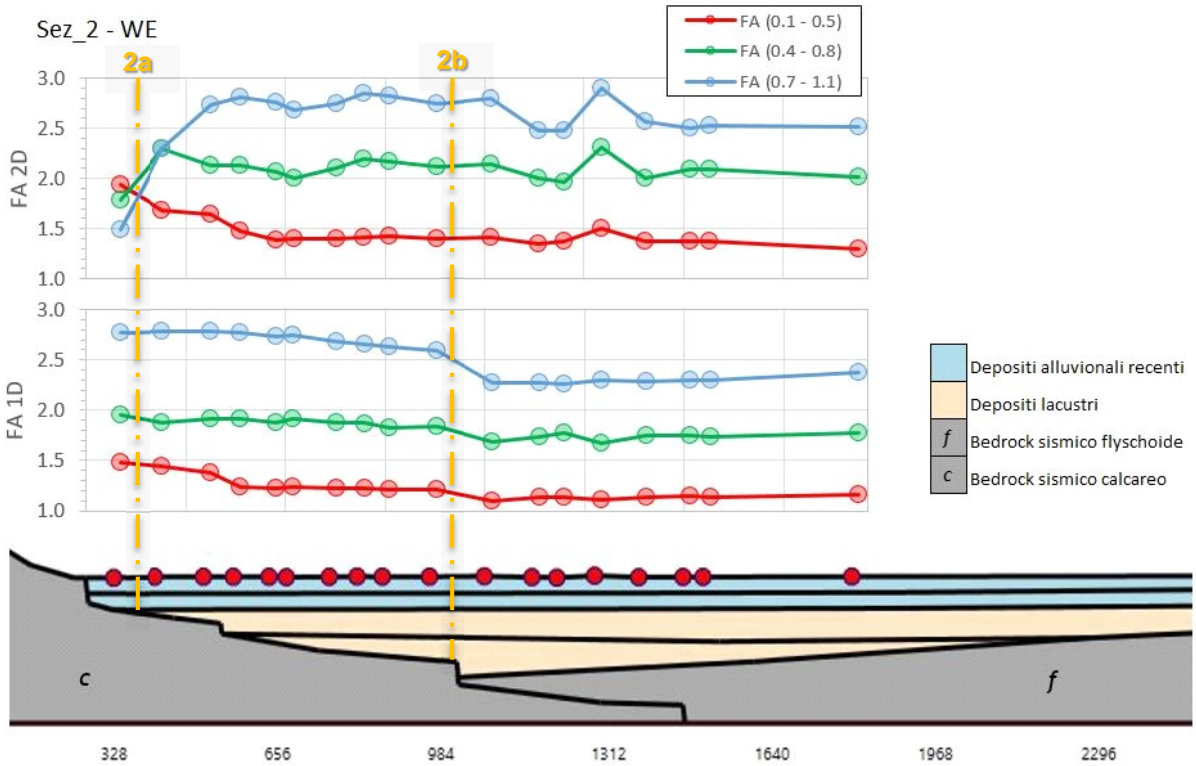


Fig. 5.5 - *Sezione S_2: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA*

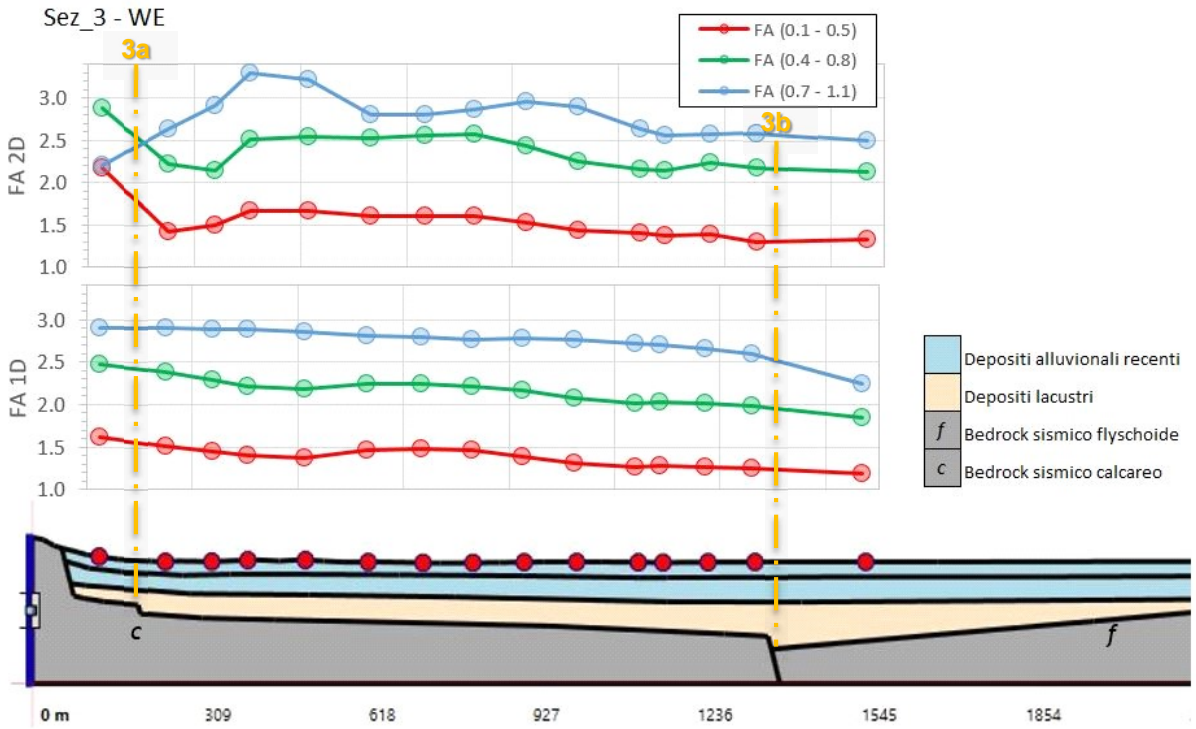


Fig. 5.6 - *Sezione S_3: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA*

Nella sezione S_4 (Fig. 5.7) un primo elemento di rilievo è il passaggio dal blocco di travertino ai depositi fluvio-lacustri (tratto *4a*) che si riflette in entrambe le modellazioni in un sensibile aumento dei fattori di amplificazione (tranne che nell'intervallo a periodi minori dell'1D), più evidente alle basse frequenze (periodi maggiori). Per questi periodi (0.7-1.1 s) è accentuata anche la variazione di FA in corrispondenza della risalita a quote più superficiali del

bedrock calcareo (*4b*). Proseguendo nella sezione, vi è un generale decremento dei fattori di amplificazione, con una tendenza all'aumento solo in prossimità del bordo della struttura valliva.

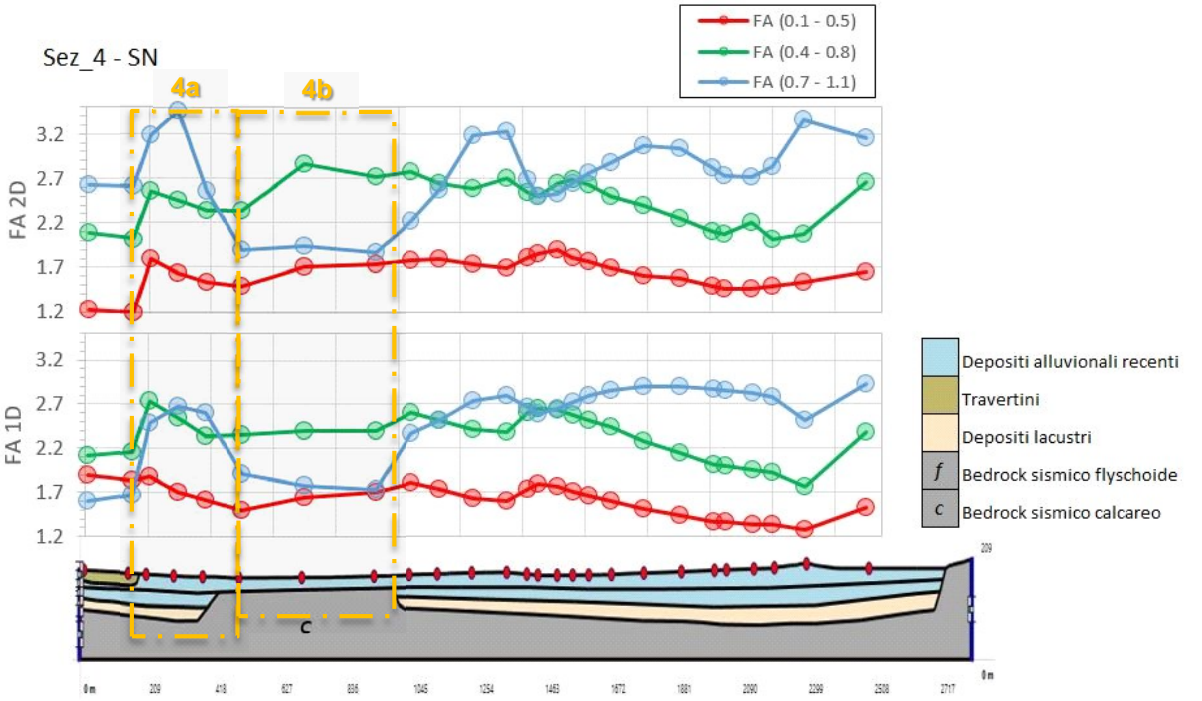


Fig. 5.7 - *Sezione S_4: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA*

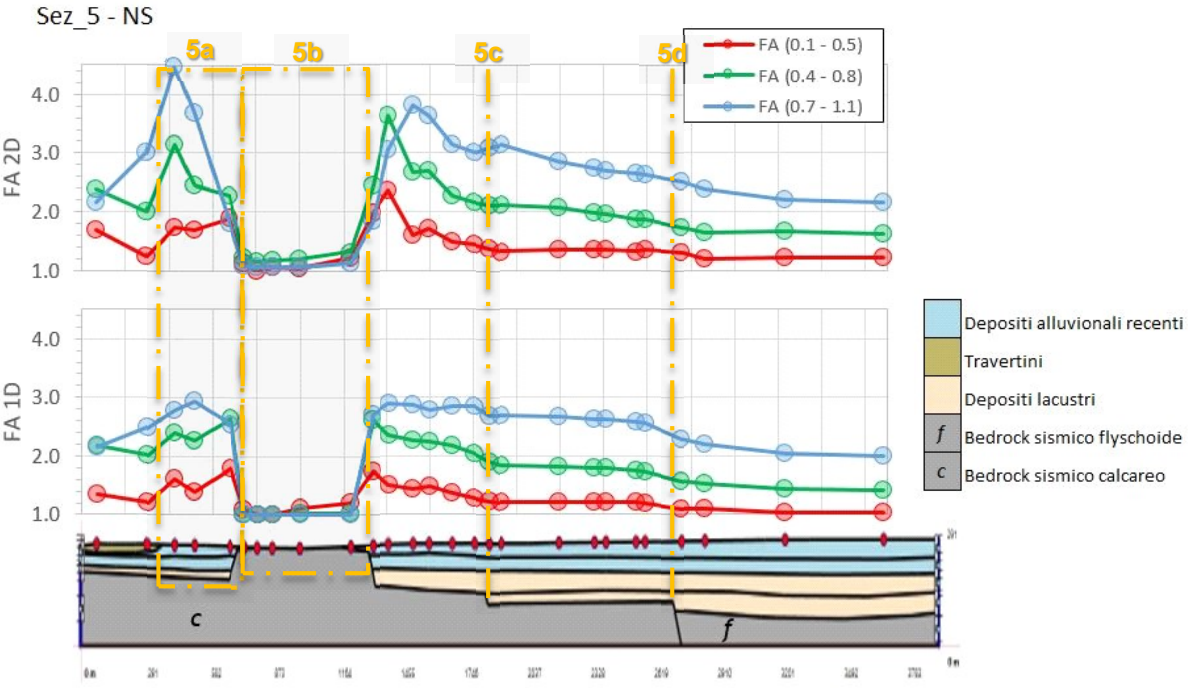


Fig. 5.8 - *Sezione S_5: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA*

Nella sezione S_5 (Fig. 5.8), con un maggior accordo tra i 3 intervalli di periodo, è evidente un andamento dei FA analogo a quello della sezione S_4: un picco nei valori al passaggio dai travertini ai depositi fluvio-lacustri (*5a*) e un netto decremento di FA in corrispondenza dell'affioramento del substrato calcareo (*5b*). La presenza dei successivi elementi tettonici (*5c*

e *5d*) si nota una lieve diminuzione (tranne che negli alti periodi per la modellazione 2D) dei fattori di amplificazione.

Nella sezione S_6 (Fig. 5.9) l'andamento dei FA risulta abbastanza regolare, risentendo in modo blando solo delle variazioni di spessore dei depositi di copertura.

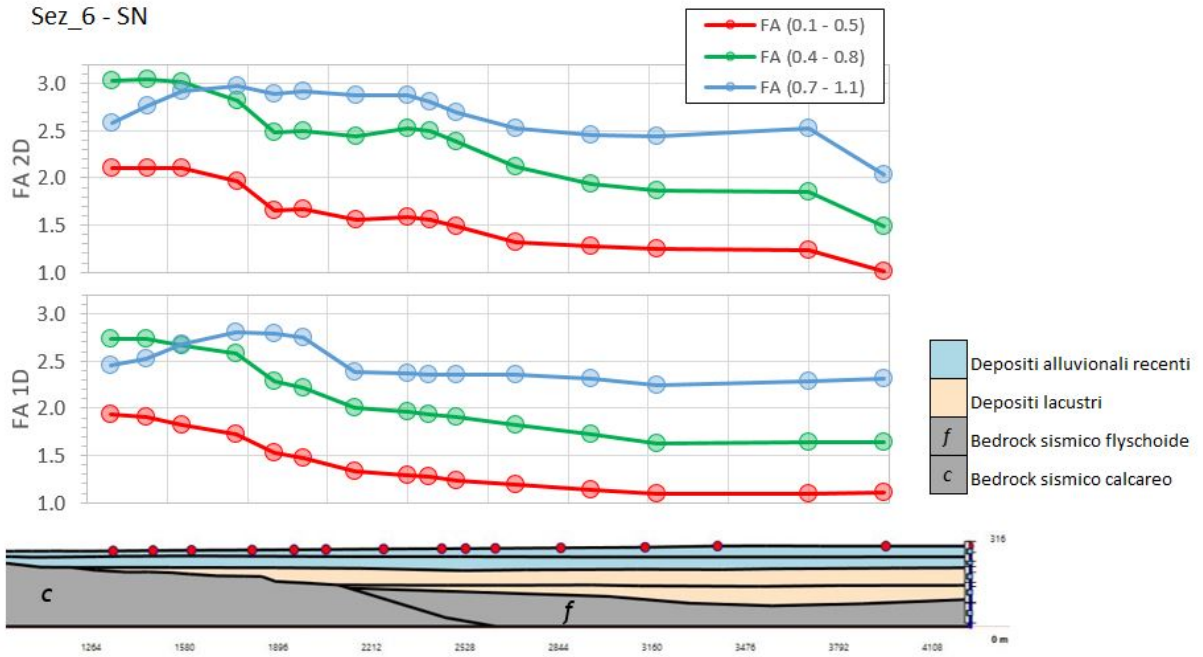


Fig. 5.9 - *Sezione S_6: analisi dei fattori di amplificazione 1D e 2D in funzione della modellazione; i pallini rossi sulla sezione indicano i punti di controllo nei quali sono stati calcolati i FA*

In generale, quindi, come già evidenziato dalle carte di distribuzione dei fattori di amplificazione, anche l'analisi delle sezioni conferma che esiste una buona corrispondenza tra il modello geologico, di per sé complicato dall'irregolare andamento del substrato carbonatico generato dall'intensa azione tettonica e dall'alternanza di depositi di copertura di diversa natura e spessore, e il modello sismostratigrafico che, come dimostrano i risultati delle analisi numeriche di risposta sismica locale, approssima in maniera ottimale il comportamento sotto sollecitazioni sismiche dell'area studiata. I risultati delle analisi numeriche mostrano, infatti, che le modellazioni eseguite (non solo in termini geometrici, ma anche per quanto riguarda le omogeneizzazioni e la parametrizzazione) riescono ad "intercettare" le variazioni di spessore dei *soft soil*, i passaggi litologici significativi (travertino/alluvioni o calcari/flysch, ad esempio), la presenza di elementi tettonici.

L'andamento "asintotico" dei valori dei FA nei tratti finali delle sezioni (ad esclusione della sezione S_4 che termina nel bedrock sismico) dà ragione del fatto che il prolungamento delle stesse oltre i limiti raggiunti non avrebbe apportato significative variazioni nei risultati ottenuti. L'accorgimento di applicare a tutte le sezioni degli smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne *free-field*) ha permesso di descrivere in mode efficace il moto in condizioni di campo libero, consentendo di contenere le lunghezze delle sezioni entro limiti tali (dai 2822 m della sezione S_4 ai 4445 m della sezione S_2) da ridurre il carico computazionale senza alterare in alcun modo i risultati finali.

Tutto ciò, da un lato conferma la bontà del processo che ha portato alla ricostruzione del complesso assetto geologico, stratigrafico e tettonico del bacino di Cassino e dall'altro dimostra che le modellazioni sismostratigrafiche risultano valide ai fini applicativi.

Le incertezze riscontrate riguardano le differenze nei valori dei fattori di amplificazione risultanti dalle analisi numeriche in configurazione mono e bidimensionale, che vengono discusse nel paragrafo seguente.

5.2 Confronto tra i risultati delle analisi numeriche 1D e 2D

Come specificato nel capitolo di introduzione di questo elaborato, uno degli obiettivi dello studio condotto è quello di operare un raffronto tra i risultati ottenuti nelle analisi numeriche di risposta sismica locale condotte in configurazione monodimensionale e bidimensionale, per definirne non solo l'entità dello scostamento in termini di fattori di amplificazione, ma per valutarne l'applicabilità in contesti diversi. Con questo confronto è infatti possibile mettere in evidenza le condizioni di amplificazione dovute a particolari condizioni geomorfologiche o strutturali, piuttosto che alla semplice condizione stratigrafica, ed approfondire i relativi aspetti

Per valutare queste differenze si è proceduto a confrontare i valori dei fattori di amplificazione sezione per sezione (Tabb. 5.1÷5.6), attribuendo per convenzione valore negativo ai FA della modellazione 1D e valore positivo ai FA ottenuti dal 2D. Quindi, nelle tabelle relative a ciascuna sezione le colonne "Confronto 2D-1D" riporteranno per ogni punto di controllo e per ogni periodo di riferimento i risultati di questa differenza in termini di valori positivi se il FA dal 2D è maggiore e negativi se è maggiore quello derivante dall'analisi 1D.

Tab. 5.1 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_1 con analisi numerica 2D e 1D*

Sezione 1									
n. punto di controllo	**FA 1D**			**FA 2D**			**CONFRONTO 2D-1D**		
	0.1-0.5	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
1	1.2	1.44	2.49	1.45	1.67	1.81	0.25	0.23	-0.68
2	1.42	1.62	2.48	1.40	1.87	2.61	-0.02	0.25	0.13
3	1.19	1.75	2.25	1.43	1.56	2.81	0.24	-0.19	0.56
4	1.19	1.77	2.6	1.33	1.66	2.55	0.14	-0.11	-0.05
5	1.21	1.81	2.66	1.37	1.83	2.51	0.16	0.02	-0.15
6	1.22	1.8	2.64	1.37	1.98	2.67	0.15	0.18	0.03
7	1.22	1.79	2.62	1.38	2.01	2.69	0.16	0.22	0.07
8	1.20	1.78	2.59	1.31	1.91	2.60	0.11	0.13	0.01
9	1.13	1.67	2.38	1.33	1.87	2.49	0.20	0.20	0.11
10	1.14	1.66	2.39	1.30	1.86	2.50	0.16	0.20	0.11
11	1.14	1.65	2.39	1.31	1.83	2.51	0.17	0.18	0.12
12	1.14	1.62	2.37	1.29	1.75	2.47	0.15	0.13	0.10
13	1.14	1.61	2.36	1.28	1.70	2.42	0.14	0.09	0.06
14	1.14	1.62	2.38	1.28	1.71	2.41	0.14	0.09	0.03
15	1.15	1.64	2.39	1.28	1.73	2.44	0.13	0.09	0.05
16	1.13	1.62	2.36	1.25	1.71	2.44	0.12	0.09	0.08

Per quanto riguarda la sezione S_1 (Tab. 5.1) il confronto evidenzia che in soli 5 punti di controllo (6 valori) e solo per alcuni periodi di riferimento (in genere i più alti) risultano maggiori i FA dell'analisi monodimensionale. In particolare, un solo valore risulta molto a favore della modellazione 1D con una differenza di 0.68 (punto di controllo n. 1, P = 0.7-1.1 s). I valori dei fattori di amplificazione da analisi 2D risultano maggiori per tutti gli altri punti, con un massimo della differenza pari a 0.56, ma con una media di 0.14.

Per la sezione S_2 (Tab. 5.2) si osserva una situazione analoga alla S_1: in soli 4 punti di controllo (5 valori) i FA dell'analisi 1D sono maggiori di quelli delle simulazioni 2D, con un picco della differenza pari a 1.28 per il punto di controllo n. 17 nell'intervallo 0.7-1.1 s. La maggiore differenza in favore dei fattori di amplificazione per la modellazione bidimensionale, che risultano prevalenti, è pari a 0.65 (punto n. 30, P = 0.4-0.8 s).

Tab. 5.2 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_2 con analisi numerica 2D e 1D*

Sezione 2									
n. punto di controllo	**FA 1D**			**FA 2D**			**CONFRONTO 2D-1D**		
	0.1-0.5	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
17	1.48	1.95	2.77	1.94	1.78	1.49	0.46	-0.17	-1.28
18	1.44	1.88	2.78	1.68	2.30	2.30	0.24	0.42	-0.48
19	1.38	1.92	2.79	1.64	2.13	2.73	0.26	0.21	-0.06
20	1.24	1.91	2.77	1.48	2.13	2.81	0.24	0.22	0.04
21	1.23	1.88	2.73	1.39	2.07	2.76	0.16	0.19	0.03
22	1.24	1.91	2.74	1.40	2.00	2.69	0.16	0.09	-0.05
23	1.23	1.88	2.68	1.40	2.10	2.74	0.17	0.22	0.06
24	1.23	1.87	2.66	1.41	2.19	2.84	0.18	0.32	0.18
25	1.21	1.83	2.63	1.43	2.17	2.82	0.22	0.34	0.19
26	1.21	1.84	2.59	1.40	2.12	2.74	0.19	0.28	0.15
27	1.10	1.69	2.27	1.42	2.14	2.80	0.32	0.45	0.53
28	1.13	1.74	2.27	1.35	2.01	2.48	0.22	0.27	0.21
29	1.14	1.77	2.26	1.38	1.97	2.48	0.24	0.20	0.22
30	1.11	1.67	2.30	1.51	2.32	2.90	0.40	0.65	0.60
31	1.14	1.75	2.28	1.37	2.00	2.56	0.23	0.25	0.28
32	1.15	1.75	2.30	1.38	2.10	2.50	0.23	0.35	0.20
33	1.14	1.74	2.30	1.37	2.10	2.53	0.23	0.36	0.23
34	1.16	1.77	2.38	1.30	2.02	2.52	0.14	0.25	0.14

Nella sezione S_3 (Tab. 5.3) i punti in cui risultano maggiori i FA 1D sono 8 (per 10 valori), con un picco della differenza pari a 0.69 (punto n. 35, P = 0.7-1.1 s) ma una media di 0.17. Ancora una volta i punti in cui i valori 2D sono maggiori risultano la maggioranza, con un massimo di scostamento pari a 0.56 (sempre nel punto n. 35, ma per P = 0.1-0.5 s) e una media pari a 0.20.

Tab. 5.3 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_3 con analisi numerica 2D e 1D*

Sezione 3									
n. punto di controllo	FA 1D			FA 2D			CONFRONTO 2D-1D		
	0.1-0.5	0.4-0.8	0.7-1.1	0.1-0.5	0.4-0.8	0.7-1.1	0.1-0.5	0.4-0.8	0.7-1.1
35	1.61	2.48	2.9	2.17	2.88	2.21	0.56	0.40	-0.69
36	1.51	2.38	2.9	1.42	2.22	2.63	-0.09	-0.16	-0.27
37	1.45	2.29	2.89	1.49	2.14	2.91	0.04	-0.15	0.02
38	1.40	2.21	2.89	1.67	2.51	3.29	0.27	0.30	0.40
39	1.37	2.18	2.86	1.67	2.54	3.21	0.30	0.36	0.35
40	1.47	2.25	2.81	1.61	2.52	2.80	0.14	0.27	-0.01
41	1.48	2.25	2.79	1.60	2.55	2.80	0.12	0.30	0.01
42	1.46	2.22	2.77	1.61	2.57	2.86	0.15	0.35	0.09
43	1.38	2.16	2.78	1.52	2.44	2.96	0.14	0.28	0.18
44	1.31	2.08	2.77	1.44	2.25	2.90	0.13	0.17	0.13
45	1.27	2.02	2.72	1.40	2.16	2.64	0.13	0.14	-0.08
46	1.28	2.03	2.70	1.37	2.14	2.55	0.09	0.11	-0.15
47	1.26	2.01	2.65	1.39	2.24	2.57	0.13	0.23	-0.08
48	1.25	1.98	2.59	1.29	2.17	2.58	0.04	0.19	-0.01
49	1.19	1.85	2.25	1.32	2.13	2.49	0.13	0.28	0.24

Nella sezione S_4 (Tab. 5.4) i punti in cui ci sono FA 1D maggiori dei FA 2D sono 15 (per 24 valori, contro 53 valori 2D maggiori); nell'analisi monodimensionale il picco della differenza è di 0.67 (punto n. 50, P = 0.1-0.5 s) con una media di 0.13. Lo stesso punto n. 50 (P = 0.7-1.1 s) presenta la differenza massima in favore dei FA da 2D (1.03). Un punto di controllo (n. 54, P = 0.4-0.8 s) i valori dei FA delle due analisi si eguagliano.

Tab. 5.4 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_4 con analisi numerica 2D e 1D*

Sezione 4									
n. punto di controllo	FA 1D			FA 2D			CONFRONTO 2D-1D		
	0.1-0.5	0.4-0.8	0.7-1.1	0.1-0.5	0.4-0.8	0.7-1.1	0.1-0.5	0.4-0.8	0.7-1.1
50	1.90	2.11	1.60	1.23	2.08	2.63	-0.67	-0.03	1.03
51	1.84	2.16	1.68	1.20	2.02	2.61	-0.64	-0.14	0.93
52	1.88	2.73	2.49	1.80	2.55	3.18	-0.08	-0.18	0.69
53	1.71	2.55	2.67	1.63	2.45	3.46	-0.08	-0.10	0.79
54	1.62	2.34	2.61	1.53	2.34	2.55	-0.09	0.00	-0.06
55	1.49	2.35	1.91	1.48	2.33	1.90	-0.01	-0.02	-0.01
56	1.65	2.40	1.77	1.70	2.86	1.94	0.05	0.46	0.17
57	1.70	2.39	1.73	1.74	2.71	1.86	0.04	0.32	0.13
58	1.81	2.60	2.36	1.78	2.78	2.22	-0.03	0.18	-0.14
59	1.73	2.52	2.52	1.79	2.64	2.57	0.06	0.12	0.05
60	1.63	2.41	2.73	1.73	2.58	3.19	0.10	0.17	0.46
61	1.60	2.38	2.80	1.69	2.70	3.23	0.09	0.32	0.43
62	1.73	2.60	2.66	1.81	2.54	2.69	0.08	-0.06	0.03
63	1.79	2.65	2.59	1.85	2.50	2.50	0.06	-0.15	-0.09
64	1.76	2.63	2.64	1.89	2.64	2.52	0.13	0.01	-0.12
65	1.71	2.57	2.72	1.81	2.68	2.64	0.10	0.11	-0.08
66	1.66	2.51	2.79	1.76	2.62	2.76	0.10	0.11	-0.03
67	1.60	2.44	2.86	1.69	2.49	2.88	0.09	0.05	0.02

68	1.51	2.28	2.90	1.60	2.40	3.06	0.09	0.12	0.16
69	1.44	2.14	2.90	1.58	2.25	3.03	0.14	0.11	0.13
70	1.37	2.02	2.87	1.49	2.10	2.81	0.12	0.08	-0.06
71	1.36	2.00	2.86	1.45	2.07	2.73	0.09	0.07	-0.13
72	1.34	1.96	2.82	1.46	2.20	2.72	0.12	0.24	-0.10
73	1.33	1.92	2.78	1.49	2.01	2.83	0.16	0.09	0.05
74	1.27	1.76	2.52	1.53	2.07	3.36	0.26	0.31	0.84
75	1.53	2.38	2.93	1.65	2.66	3.16	0.12	0.28	0.23

Nella sezione S_5 (Tab. 5.5) i punti in cui risultano maggiori i FA 1D sono 5 (per 7 valori), con un picco della differenza pari a 0.86 (punto n. 86, P = 0.7-1.1 s) ma una media di 0.32. Ancora una volta i punti in cui i valori 2D sono maggiori risultano la maggioranza, con un picco della differenza pari a 1.70 (punto n. 78, ma per P = 0.7-1.1 s) e una media pari a 0.26. Due punti di controllo (n. 76, P = 0.7-1.1 s e n. 82, P = 0.1-0.5 s) i valori dei fattori di amplificazione delle due analisi si eguagliano.

Tab. 5.5 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_5 con analisi numerica 2D e 1D*

Sezione 5									
n. punto di controllo	**FA 1D**			**FA 2D**			**CONFRONTO 2D-1D**		
	0.1-0.5	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
76	1.34	2.17	2.15	1.70	2.39	2.15	0.36	0.22	0.00
77	1.21	2.02	2.48	1.24	2.00	3.02	0.03	-0.02	0.54
78	1.61	2.40	2.78	1.73	3.15	4.48	0.12	0.75	1.70
79	1.40	2.26	2.95	1.68	2.44	3.67	0.28	0.18	0.72
80	1.79	2.65	2.53	1.90	2.26	1.81	0.11	-0.39	-0.72
81	1.10	1.02	1.01	1.12	1.21	1.09	0.02	0.19	0.08
82	1.00	1.00	1.00	1.00	1.16	1.06	0.00	0.16	0.06
83	1.00	1.00	1.00	1.06	1.17	1.06	0.06	0.17	0.06
84	1.13	1.03	1.01	1.05	1.19	1.07	-0.08	0.16	0.06
85	1.22	1.04	1.02	1.21	1.32	1.14	-0.01	0.28	0.12
86	1.74	2.62	2.71	1.97	2.46	1.85	0.23	-0.16	-0.86
87	1.51	2.36	2.90	2.35	3.64	3.05	0.84	1.28	0.15
88	1.44	2.26	2.87	1.59	2.68	3.82	0.15	0.42	0.95
89	1.48	2.25	2.79	1.72	2.69	3.63	0.24	0.44	0.84
90	1.38	2.18	2.84	1.49	2.27	3.15	0.11	0.09	0.31
91	1.29	2.05	2.84	1.44	2.15	3.02	0.15	0.10	0.18
92	1.23	1.90	2.69	1.37	2.11	3.11	0.14	0.21	0.42
93	1.22	1.85	2.69	1.32	2.11	3.15	0.10	0.26	0.46
94	1.22	1.82	2.66	1.35	2.06	2.85	0.13	0.24	0.19
95	1.22	1.79	2.63	1.36	1.99	2.73	0.14	0.20	0.10
96	1.22	1.79	2.63	1.35	1.95	2.69	0.13	0.16	0.06
97	1.21	1.74	2.58	1.32	1.86	2.65	0.11	0.12	0.07
98	1.20	1.73	2.56	1.36	1.86	2.64	0.16	0.13	0.08
99	1.11	1.56	2.29	1.31	1.74	2.51	0.20	0.18	0.22
100	1.09	1.52	2.21	1.20	1.64	2.39	0.11	0.12	0.18
101	1.04	1.43	2.05	1.22	1.66	2.20	0.18	0.23	0.15
102	1.03	1.41	2.00	1.22	1.62	2.16	0.19	0.21	0.16

Infine, nella sezione S_6 (Tab. 5.6) l'unico punto di controllo in cui risultano maggiori i fattori di amplificazione 1D è il n. 117 per tutto lo spettro di periodi considerato. Il picco della differenza in favore dei fattori di amplificazione dall'analisi bidimensionale è pari a 0.57 (punto n. 110, P = 0.4-0.8 s) e la media pari a 0.26.

Tab. 5.6 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per la sezione S_6 con analisi numerica 2D e 1D*

Sezione 6									
n. punto di controllo	**FA 1D**			**FA 2D**			**CONFRONTO 2D-1D**		
	0.1-0.5	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**	**0.1-0.5**	**0.4-0.8**	**0.7-1.1**
103	1.93	2.74	2.45	2.11	3.03	2.58	0.18	0.29	0.13
104	1.91	2.73	2.52	2.11	3.04	2.76	0.20	0.31	0.24
105	1.83	2.67	2.68	2.10	3.02	2.91	0.27	0.35	0.23
106	1.72	2.58	2.81	1.97	2.81	2.97	0.25	0.23	0.16
107	1.53	2.29	2.79	1.65	2.48	2.89	0.12	0.19	0.10
108	1.47	2.22	2.75	1.67	2.50	2.92	0.20	0.28	0.17
109	1.33	2	2.39	1.56	2.44	2.88	0.23	0.44	0.49
110	1.29	1.96	2.37	1.58	2.53	2.87	0.29	0.57	0.50
111	1.27	1.94	2.36	1.56	2.49	2.81	0.29	0.55	0.45
112	1.24	1.91	2.35	1.49	2.38	2.70	0.25	0.47	0.35
113	1.19	1.83	2.35	1.32	2.11	2.52	0.13	0.28	0.17
114	1.13	1.73	2.31	1.27	1.94	2.46	0.14	0.21	0.15
115	1.09	1.62	2.25	1.25	1.86	2.45	0.16	0.24	0.20
116	1.1	1.64	2.28	1.24	1.85	2.53	0.14	0.21	0.25
117	1.11	1.64	2.31	1.01	1.48	2.03	-0.10	-0.16	-0.28

Per visualizzare questi dati e contestualizzare le differenze tra i due approcci sono state elaborate le mappe di distribuzione dei valori risultanti dai confronti esposti nelle precedenti tabelle (Figg. 5.10÷5.12). Le mappe evidenziano che le differenze tra i fattori di amplificazione calcolati con le analisi in campo monodimensionale e bidimensionale aumentano all'aumentare del periodo di riferimento in cui sono calcolati, con la massima differenza in favore dei FA 1D pari a 1.28 e pari a 1.70 in favore del 2D, per l'intervallo di periodo maggiore (Fig. 5.12), contro, rispettivamente 0.67 (1D) e 0.84 (2D) per l'intervallo 0.1-0.5 s (Fig. 5.10) e 0.39 e 1.28 per l'intervallo intermedio (Fig. 5.11).

Le maggiori differenze in favore del modello 2D si rilevano nella parte più a sud, in corrispondenza della placca travertinosa e del passaggio ai depositi fluvio-lacustri: come evidenziato nell'analisi delle singole sezioni (§ 5.1, Figg. 5.6 e 5.7) il modello monodimensionale, proprio per il fatto di eseguire una analisi su una verticale, non è in grado di valutare l'influenza delle discontinuità laterali dei depositi.

L'area a ridosso della stazione ferroviaria (poco a nord delle Terme Varroniane) presenta valori di FA maggiori per il modello 2D alle frequenze intermedie (Fig. 5.11), mentre i FA del modello 1D sono prevalenti alle frequenze più basse (intervallo 0.7-1.1 s) (Fig. 5.12). In questo caso lo spessore dei depositi di copertura a cavallo della faglia risponde in maniera differente a seconda delle frequenze di sollecitazione: nell'intervallo di periodi maggiore la variazione di

spessore è rilevante rispetto alla discontinuità stratigrafica laterale. Le stesse considerazioni possono ritenersi valide per l'area a ridosso del versante di Montecassino.

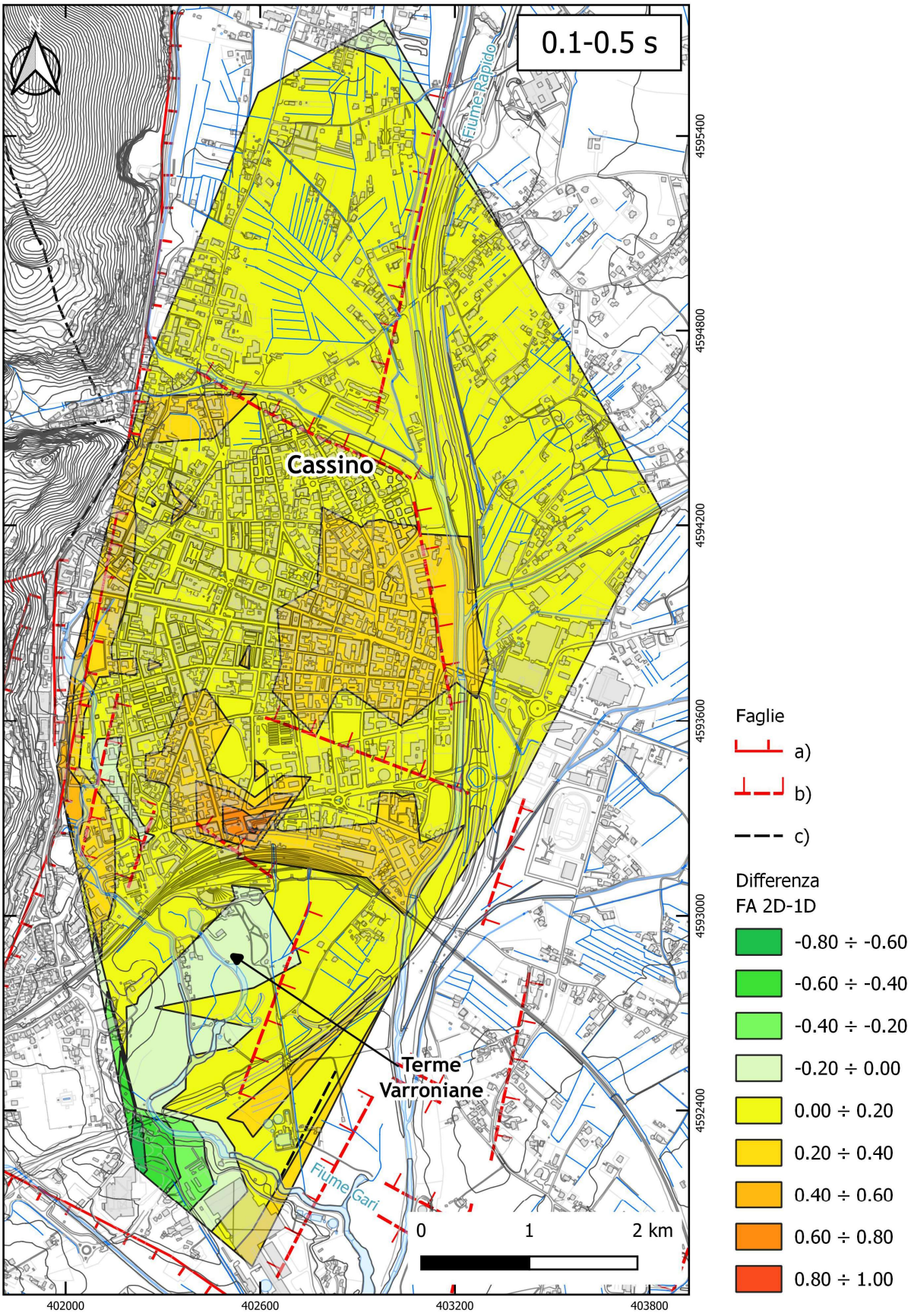


Fig. 5.10 - *Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione 2D e 1D relativi all'intervallo di periodo 0.1-0.5 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto*

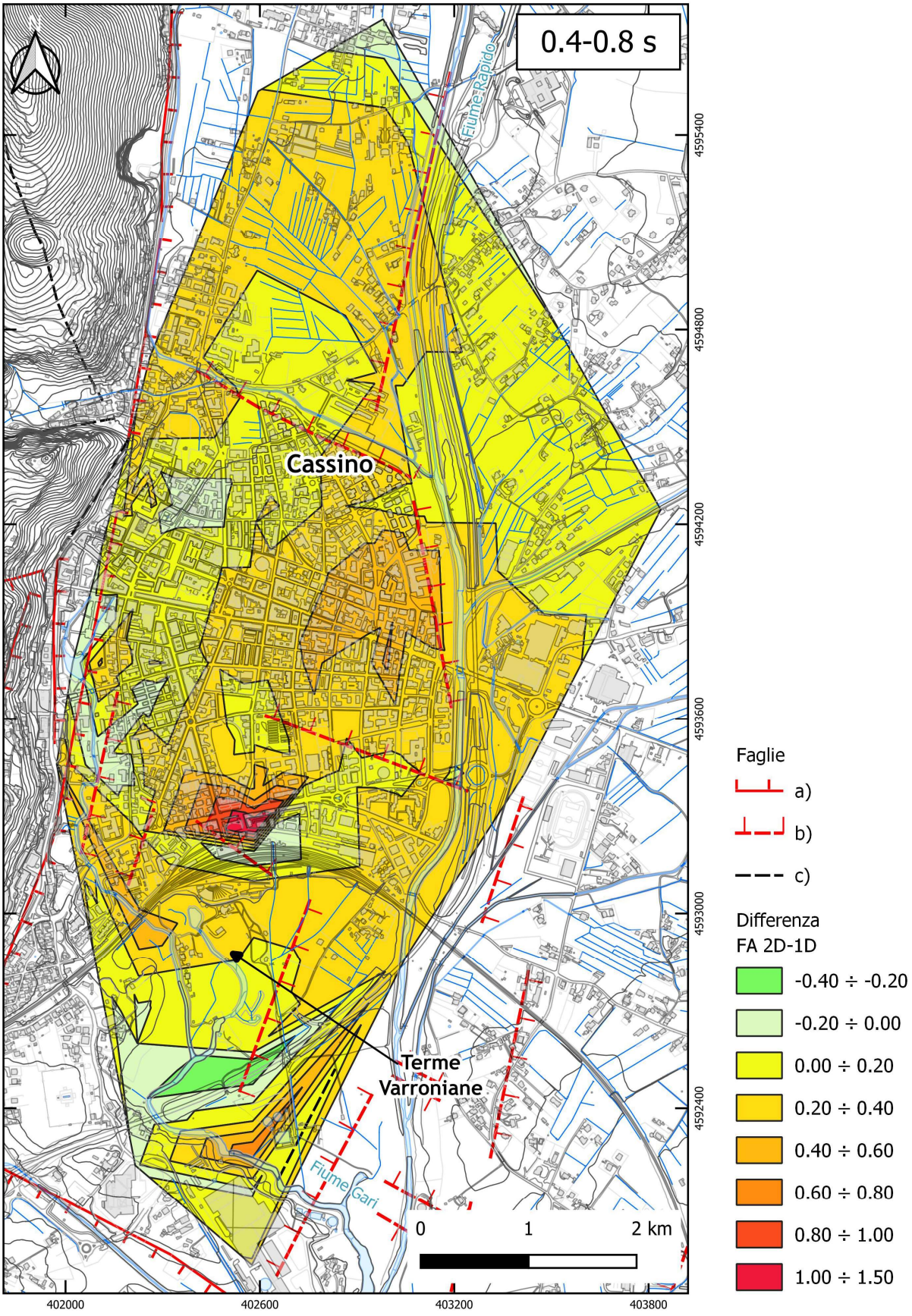


Fig. 5.11 - *Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione 2D e 1D relativi all'intervallo di periodo 0.4-0.8 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto*

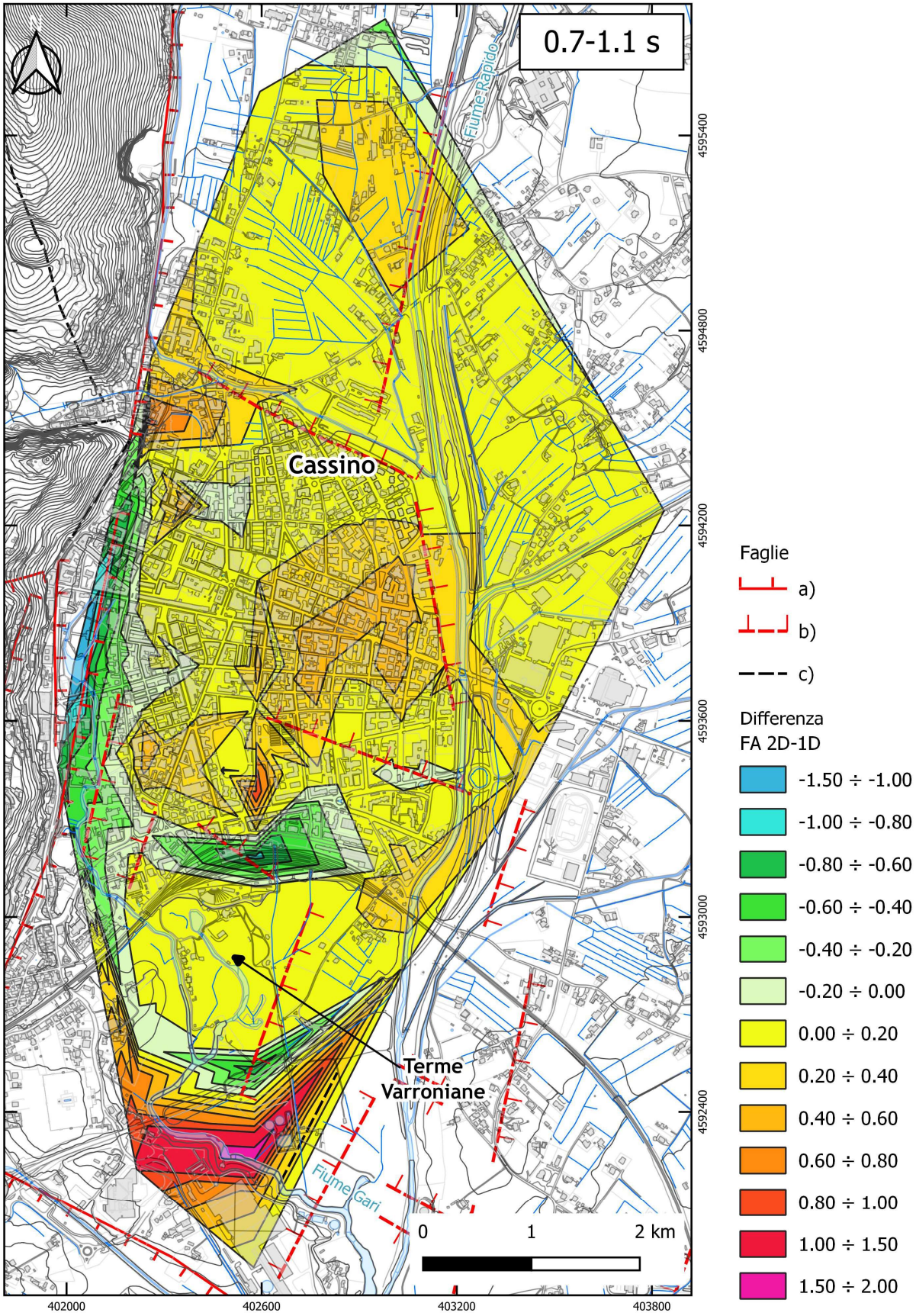


Fig. 5.12 - *Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione 2D e 1D relativi all'intervallo di periodo 0.7-1.1 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto*

Nelle restanti parti dell'area indagata si nota una generale prevalenza dei fattori di amplificazione derivanti dall'analisi 2D.

L'analisi delle mappe di distribuzione mostra chiaramente che anche a prescindere dalla prevalenza dei FA di una o dell'altra analisi, la modellazione 2D riesce a rilevare gli effetti della morfologia sepolta in misura maggiore e più precisa rispetto alla 1D.

Nelle figure da 5.13 a 5.15 viene evidenziata la prevalenza dei due modelli nell'area del centro urbano in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi 2D e 1D (ΔFA), considerando prevalente il modello monodimensionale per ΔFA minori di -0.10 e il modello bidimensionale per ΔFA maggiori di 0.10; per valori compresi tra questi due estremi si è considerato che nessuno dei due modelli fosse significativamente prevalente.

Risulta evidente che il modello bidimensionale è prevalente per tutti gli intervalli di riferimento, con una incidenza percentuale delle aree interessate che va dal 67 all'82% (in funzione dell'intervallo di periodo). Se si considera il totale delle aree in cui prevale il 2D e quelle in cui è indifferente condurre analisi con uno dei due modelli si raggiunge una incidenza rilevante (dal 90 al 98%) rispetto alle aree nelle quali è prevalente il modello monodimensionale.

Quando si conducono analisi numeriche di risposta sismica locale, qualunque sia lo scopo, è buona prassi eseguire analisi su entrambe le modellazioni per verificare quali sono i fattori che maggiormente incidono sul comportamento sismico di un'area, dato che gli elementi che entrano in gioco sono molteplici, come chiarito nei capitoli precedenti. Nel caso del bacino di Cassino, il modello bidimensionale è quello più rappresentativo del comportamento sismico dei depositi ivi presenti, come era da attendersi in relazione alla complessità geologica, stratigrafica e strutturale descritta.

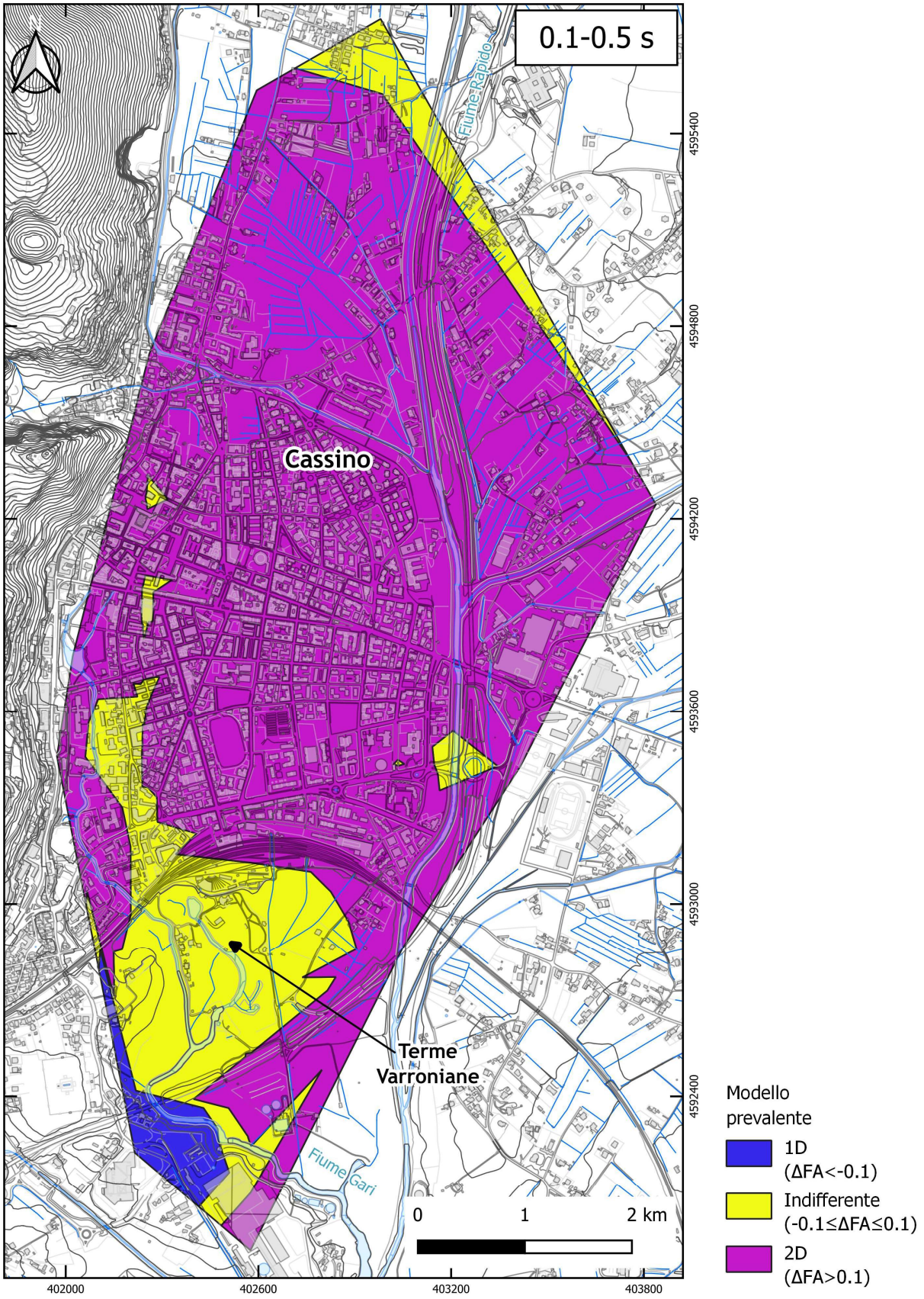


Fig. 5.13 - *Modello dimensionale prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi 2D e 1D (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.1-0.5 s*

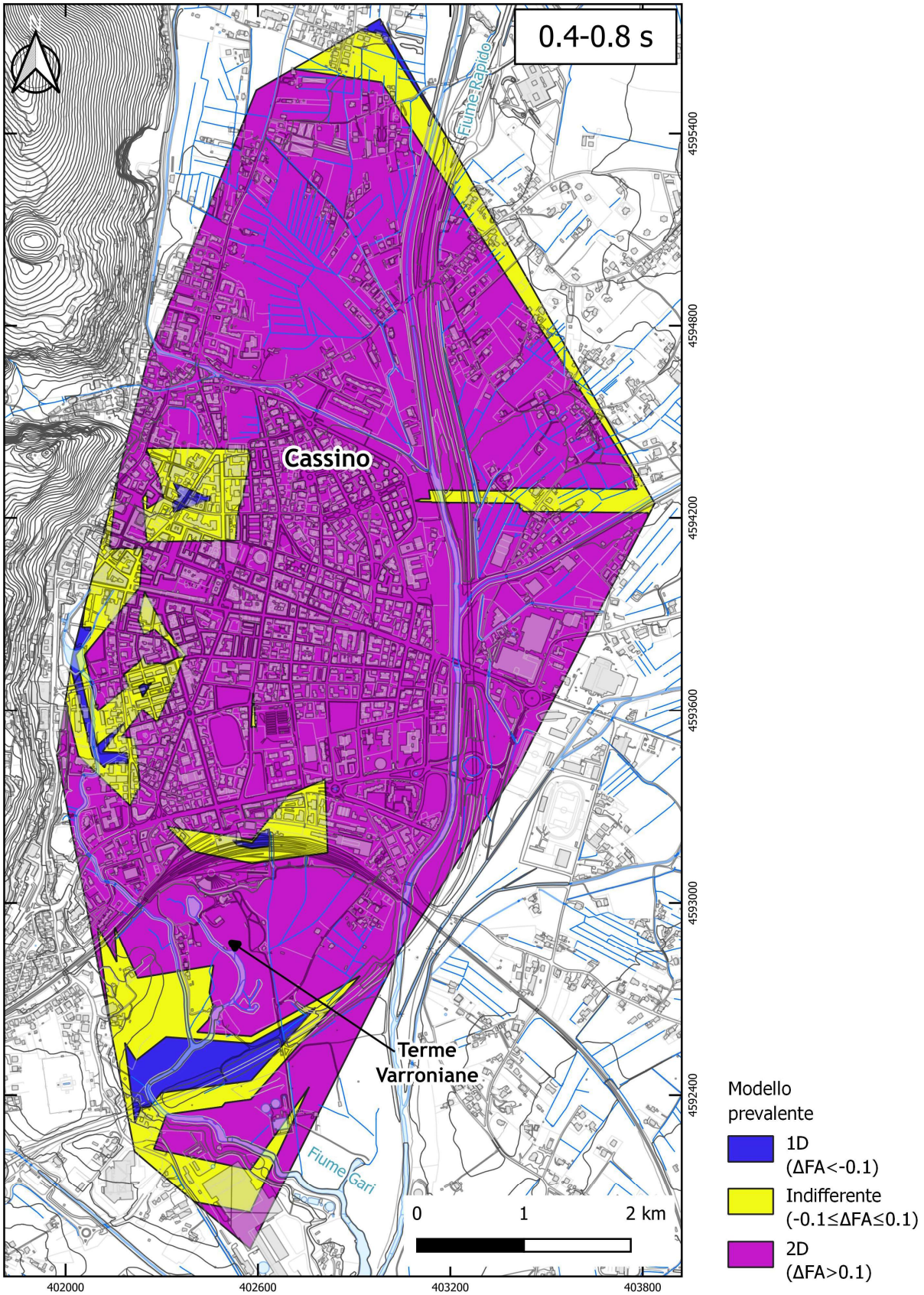


Fig. 5.14 - *Modello dimensionale prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi 2D e 1D (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.4-0.8 s*

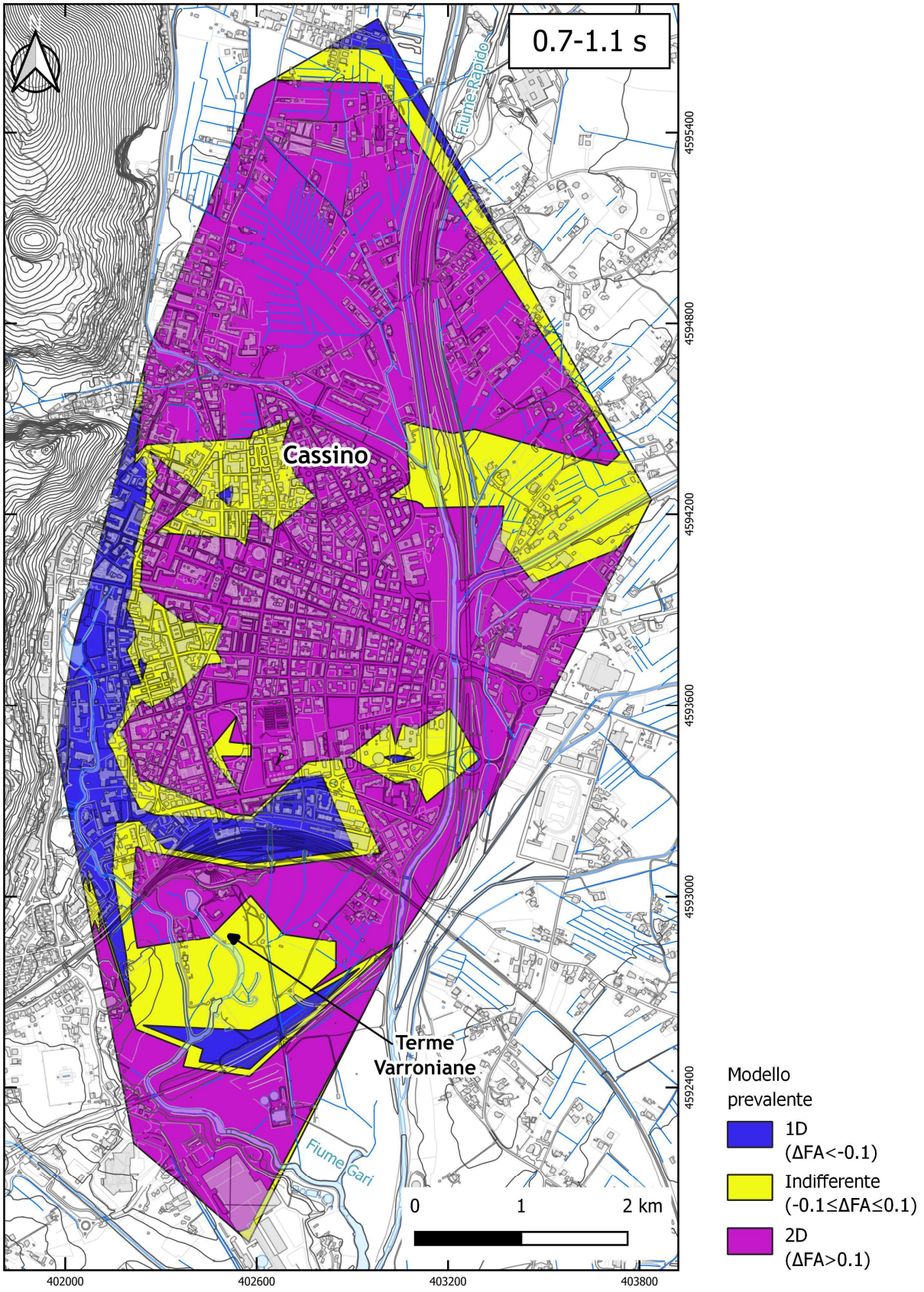


Fig. 5.15 - *Modello dimensionale prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi 2D e 1D (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.7-1.1 s*

5.3 Confronto con i risultati della microzonazione sismica del comune di Cassino

La microzonazione sismica è l'insieme di studi che permettono di valutare il comportamento dei depositi presenti in una determinata area e di suddividerla in zone omogenee dal punto di vista della risposta alle sollecitazioni sismiche. È caratterizzata da accuratezza e complessità crescente con il grado di dettaglio raggiunto nei tre distinti livelli:

- ✓ livello 1 (qualitativo): è un livello di base che consiste nella rilettura e successiva rielaborazione dei dati geologici, geofisici e geotecnici preesistenti e/o eseguiti appositamente, al fine di suddividere qualitativamente il territorio in Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), distinguendo primariamente tra Zone Stabili (ZS), Zone Stabili suscettibili di amplificazione locale (ZAS) e Zone suscettibili di Instabilità (ZI);
- ✓ livello 2 (semi-quantitativo): introduce, rispetto al Livello 1, un elemento quantitativo numerico, attraverso l'utilizzo di metodi semplificati di analisi numerica, per le ZAS e ZI definite dal precedente Livello 1 di MS o direttamente attraverso studi di MS in assenza del precedente Livello 1;
- ✓ livello 3 (quantitativo): introduce ulteriori dettagli quantitativi sulle aree ad amplificazione sismica o instabili, su aree particolari o per tematiche precise, basandosi su analisi numeriche ottenute da dati di indagini geologico-tecniche e geofisiche eseguite in situ e di prove di laboratorio, e deve differenziare il dettaglio da utilizzare in fase progettuale.

In particolare, si definiscono:

- Zone Stabili (ZS) quelle nelle quali non si ipotizzano effetti locali di rilievo di alcuna natura ed in cui il moto sismico non è modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante;
- Zone Stabili suscettibili di amplificazione sismica (ZAS) quelle in cui il moto sismico è modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di suolo, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche del terreno e/o geomorfologiche del territorio;
- Zone suscettibili di Instabilità (ZI) quelle in cui i terreni sono suscettibili di attivazione di fenomeni di deformazione permanente del territorio a seguito di un evento sismico (instabilità di versante, cedimenti, liquefazioni, faglie attive e/o capaci).

Per il comune di Cassino lo studio di Microzonazione Sismica di Livello 1 (MS1) è stato validato con D.G.R. Lazio A13116 del 21 dicembre 2012 (Scarascia Mugnozza et al., 2012), mentre lo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3) è stato approvato con Determinazione della Direzione LL.PP. della Regione Lazio G08012 del 18/06/2024 ed è stato realizzato dalla società Geologica Toscana s.n.c.

Nella Regione Lazio lo studio, ai sensi della D.G.R. n. 312 del 29 maggio 2020, deve essere condotto nelle microzone stabili suscettibili di amplificazione con la più alta densità abitativa, interessando almeno il 40 % della superficie complessiva di centri e nuclei abitati e

di prossima urbanizzazione o per una copertura di almeno il 40% della popolazione comunale. Il territorio del comune di Cassino che è stato sottoposto ad approfondimento di livello 3 comprende l'area del centro urbano, la porzione occidentale del bacino di Cassino fino all'abitato della frazione di Caira e una parte ad est del centro urbano (Fig. 5.16).

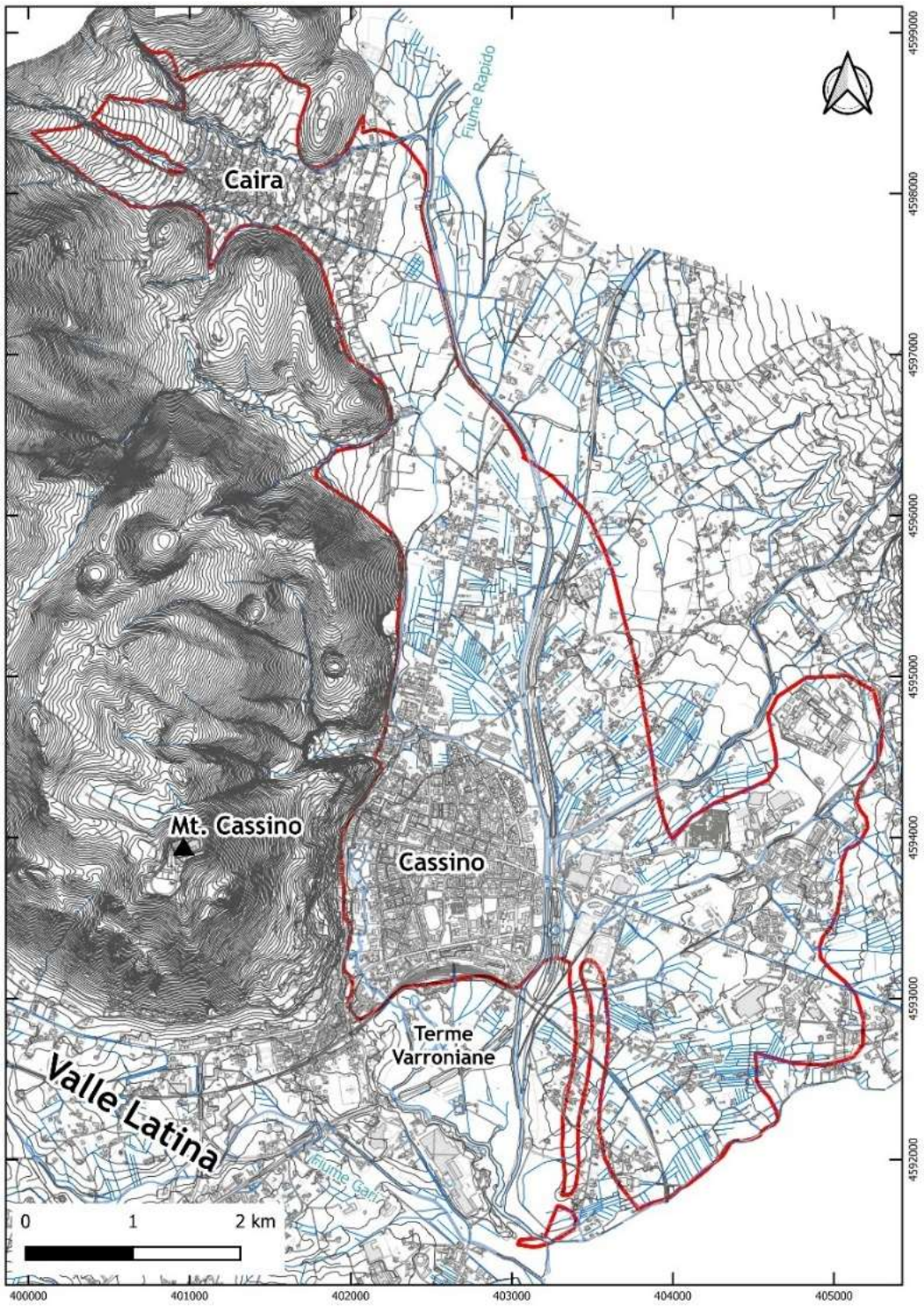


Fig. 5.16 - *Area del comune di Cassino interessata dallo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3*

Gli studi di MS3 prevedono come elaborato finale la "Carta di microzonazione sismica" con l'individuazione, tramite analisi numeriche di risposta sismica locale, di zone iso-amplificative nei tre intervalli di periodo 0.1-0.5, 0.4-0.8 e 0.7-1.1 s. In fig. 5.17 sono riportati gli stralci della Carta di microzonazione sismica relativi all'area del centro urbano di Cassino.

L'analisi della Fig. 5.17 mostra che per l'intervallo 0.1-0.5 s (relativamente all'area evidenziata) i fattori di amplificazione variano tra 1.3 e 1.5; per l'intervallo 0.4-0.8 s i FA sono compresi tra 1.8 e 2.0; per l'intervallo di periodi maggiori i FA variano tra 2.0 e 2.2. La distribuzione dei valori è piuttosto uniforme per ogni intervallo di periodi. Non sono riportate le campiture delle zone suscettibili a liquefazione.

Dalla Relazione tecnica illustrativa dello studio di MS3 risulta che le analisi di risposta sismica sono state condotte in configurazione bidimensionale su 6 sezioni e in modalità monodimensionale su 4 verticali. Le 6 sezioni sono state ubicate nella zona dell'abitato della frazione Caira e nella località Monte Rotondo, sempre nella frazione Caira; quindi per la determinazione dei fattori di amplificazione dell'area del centro urbano di Cassino sono state condotte solo analisi monodimensionali.

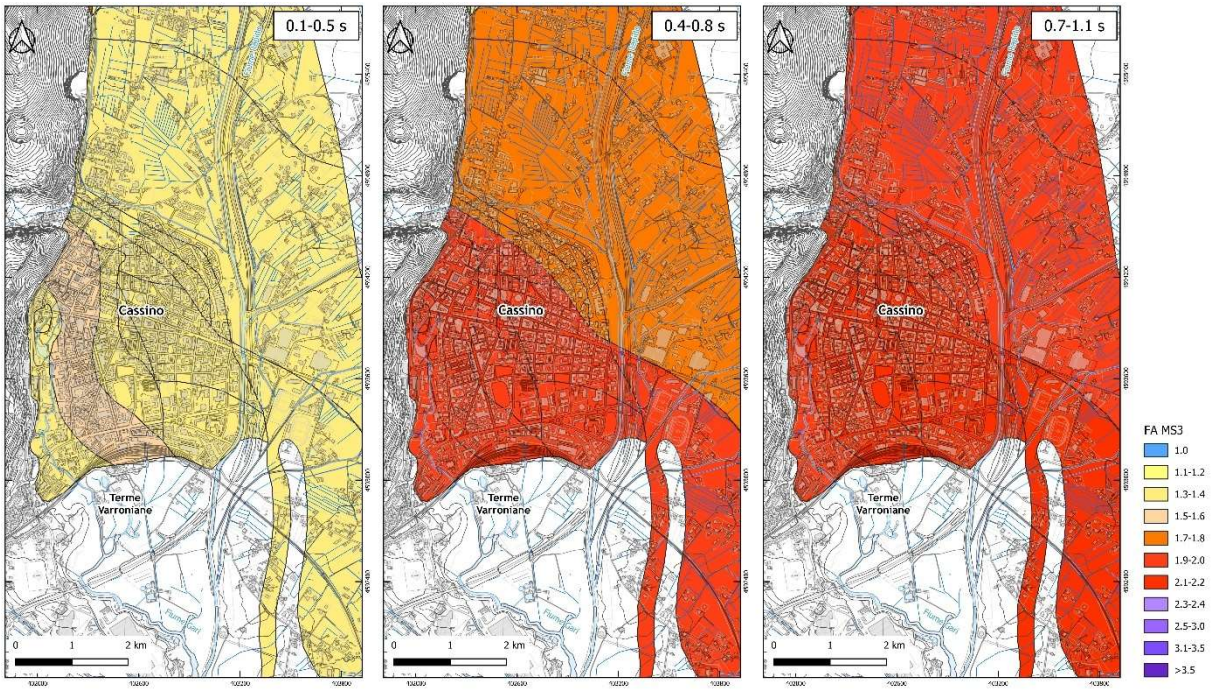


Fig. 5.17 - *Carta di microzonazione sismica del comune di Cassino: stralci relativi ai tre intervalli di periodo per l'area del centro urbano*

Per confrontare i risultati delle analisi numeriche condotte nel corso del presente progetto di ricerca (RSL) e i risultati derivanti dallo studio MS3 si è proceduto a definire un'area di sovrapposizione dei due studi (Fig. 5.18). La sovrapposizione interessa 97 dei 117 punti di controllo della RSL.

Sono state calcolate per ognuno dei 97 punti di sovrapposizione e per ciascuno dei tre periodi di riferimento le differenze tra i fattori di amplificazione da RSL e da MS3; per convenzione è stato attribuito valore positivo ai FA da RSL e negativo ai FA da Microzonazione Sismica. In Fig. 5.14 sono state cartografate queste differenze.

Le carte nelle figure da 5.19 a 5.21 mostrano che nella quasi totalità dell'area di sovrapposizione i fattori di amplificazione determinati tramite le analisi numeriche di questa ricerca risultano maggiori di quelli relativi allo studio di MS3. In particolare, queste differenze sono molto contenute quando i FA da MS3 sono maggiori (-0.14, -0.32, -0.14 rispettivamente

nei tre periodi), mentre sono più marcate quando ad essere maggiori sono i FA da RSL (0.88, 1.65, 1.70 per i tre periodi).

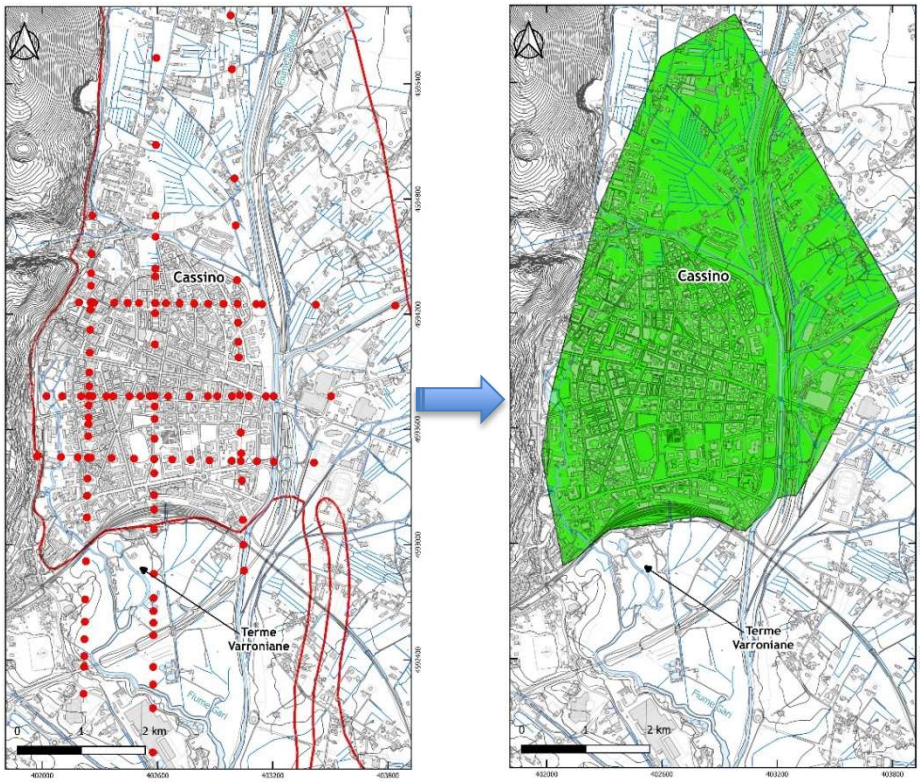


***Fig. 5.18** – Individuazione di un'area di sovrapposizione tra RSL ed MS3: a sinistra la posizione dei punti di controllo da RSL rispetto all'area di approfondimento di MS3, a destra l'area corrispondente ai soli punti di controllo RSL ricadenti nell'area MS3*

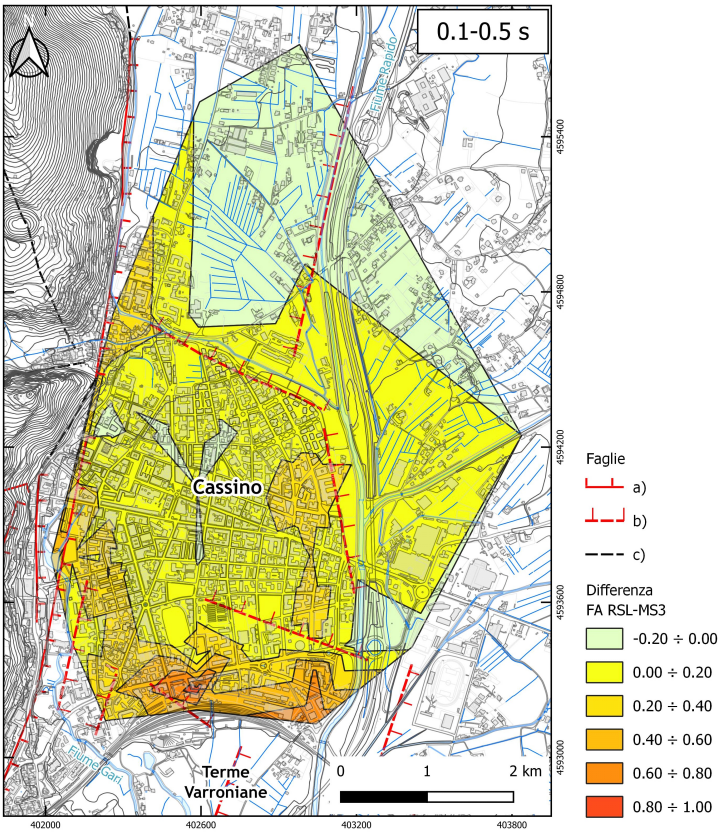


***Fig. 5.19 -** Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione da RSL e da MS3 relativi all'intervallo di periodo 0.1-0.5 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto*

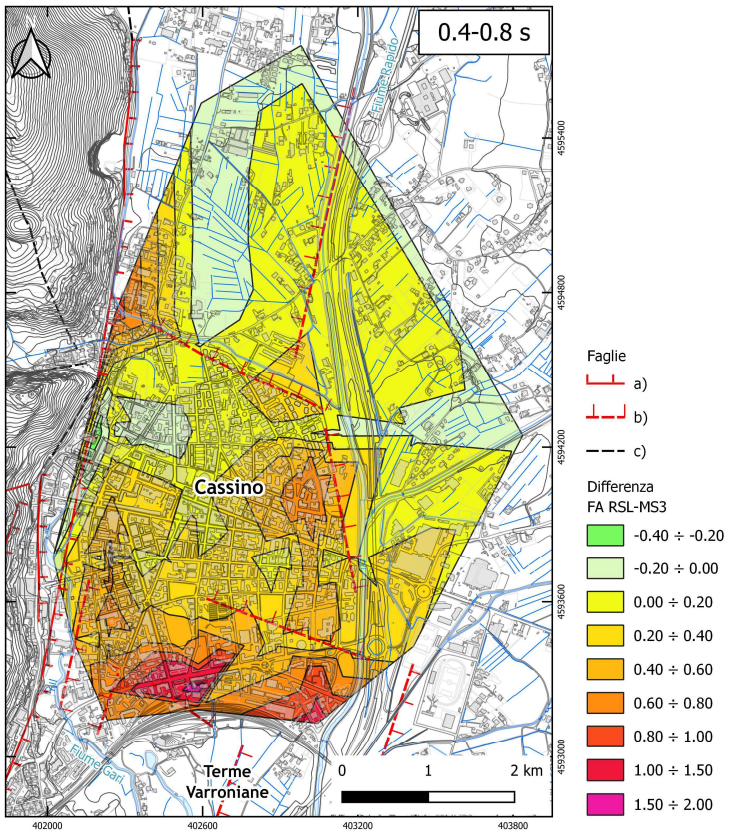


Fig. 5.20 - *Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione da RSL e da MS3 relativi all'intervallo di periodo 0.4-0.8 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto*

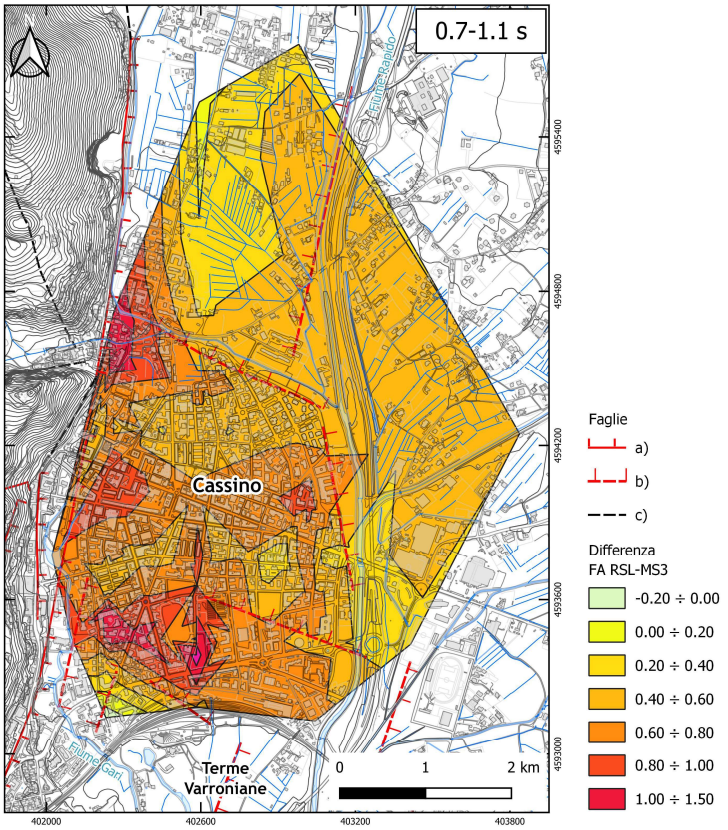


Fig. 5.21 - *Carte delle differenze tra i fattori di amplificazione da RSL e da MS3 relativi all'intervallo di periodo 0.7-1.1 s. Sono evidenziate le principali faglie a) dirette, b) dirette presunte e c) presunte a cinematismo incerto*

Nelle seguenti tabelle sono elencati tutti i valori dei FA relativi ai 97 punti considerati, per i tre intervalli di periodo, con la differenza tra i valori in ciascun punto (ΔFA).

Tab. 5.7 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati nei 97 punti considerati e relativi ai valori determinati nella presente ricerca (RSL) e nello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3); T=0.1-0.5 s*

0.1-0.5 s							
n. punto	**FA_RSL**	**FA_MS3**	**ΔFA**	**n. punto**	**FA_RSL**	**FA_MS3**	**ΔFA**
1	1.45	1.47	-0.02	58	1.78	1.47	0.31
2	1.40	1.47	-0.07	59	1.79	1.47	0.32
3	1.43	1.35	0.08	60	1.73	1.47	0.26
4	1.33	1.35	-0.02	61	1.69	1.47	0.22
5	1.37	1.35	0.02	62	1.81	1.47	0.34
6	1.37	1.35	0.02	63	1.85	1.47	0.38
7	1.38	1.35	0.03	64	1.89	1.47	0.42
8	1.31	1.35	-0.04	65	1.81	1.47	0.34
9	1.33	1.35	-0.02	66	1.76	1.47	0.29
10	1.30	1.25	0.05	67	1.69	1.47	0.22
11	1.31	1.25	0.06	68	1.60	1.47	0.13
12	1.29	1.25	0.04	69	1.58	1.47	0.11
13	1.28	1.25	0.03	70	1.49	1.47	0.02
14	1.28	1.25	0.03	71	1.45	1.47	-0.02
15	1.28	1.25	0.03	72	1.46	1.47	-0.01
16	1.25	1.25	0.00	73	1.49	1.47	0.02
17	1.94	1.25	0.69	74	1.53	1.35	0.18
18	1.68	1.43	0.25	75	1.65	1.25	0.40
19	1.64	1.47	0.17	86	1.97	1.47	0.50
20	1.48	1.47	0.01	87	2.35	1.47	0.88
21	1.39	1.47	-0.08	88	1.59	1.47	0.12
22	1.40	1.35	0.05	89	1.72	1.35	0.37
23	1.40	1.35	0.05	90	1.49	1.35	0.14
24	1.41	1.35	0.06	91	1.44	1.35	0.09
25	1.43	1.35	0.08	92	1.37	1.25	0.12
26	1.40	1.35	0.05	93	1.32	1.35	-0.03
27	1.42	1.35	0.07	94	1.35	1.35	0.00
28	1.35	1.35	0.00	95	1.36	1.35	0.01
29	1.38	1.35	0.03	96	1.35	1.35	0.00
30	1.51	1.35	0.16	97	1.32	1.35	-0.03
31	1.37	1.35	0.02	98	1.36	1.25	0.11
32	1.38	1.35	0.03	99	1.31	1.25	0.06
33	1.37	1.35	0.02	100	1.20	1.25	-0.05
34	1.30	1.35	-0.05	101	1.22	1.25	-0.03
36	1.42	1.25	0.17	102	1.22	1.25	-0.03
37	1.49	1.43	0.06	105	2.10	1.35	0.75
38	1.67	1.47	0.20	106	1.97	1.35	0.62
39	1.67	1.47	0.20	107	1.65	1.35	0.30
40	1.61	1.47	0.14	108	1.67	1.35	0.32
41	1.60	1.47	0.13	109	1.56	1.35	0.21
42	1.61	1.35	0.26	110	1.58	1.25	0.33
43	1.52	1.35	0.17	111	1.56	1.25	0.31
44	1.44	1.35	0.09	112	1.49	1.25	0.24
45	1.40	1.35	0.05	113	1.32	1.25	0.07
46	1.37	1.35	0.02	114	1.27	1.25	0.02
47	1.39	1.35	0.04	115	1.25	1.25	0.00
48	1.29	1.35	-0.06	116	1.24	1.25	-0.01
49	1.32	1.35	-0.03	117	1.01	1.25	-0.24
57	1.74	1.43	0.31				

Tab. 5.8 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati nei 97 punti considerati e relativi ai valori determinati nella presente ricerca (RSL) e nello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3); T=0.4-0.8 s*

0.4-0.5 s							
n. punto	**FA_RSL**	**FA_MS3**	**ΔFA**	**n. punto**	**FA_RSL**	**FA_MS3**	**ΔFA**
1	1.67	1.99	-0.32	58	2.78	1.99	0.79
2	1.87	1.99	-0.12	59	2.64	1.99	0.65
3	1.56	1.91	-0.35	60	2.58	1.99	0.59
4	1.66	1.91	-0.25	61	2.70	1.99	0.71
5	1.83	1.91	-0.08	62	2.54	1.99	0.55
6	1.98	1.91	0.07	63	2.50	1.99	0.51
7	2.01	1.91	0.10	64	2.64	1.99	0.65
8	1.91	1.91	0.00	65	2.68	1.99	0.69
9	1.87	1.91	-0.04	66	2.62	1.99	0.63
10	1.86	1.75	0.11	67	2.49	1.99	0.50
11	1.83	1.75	0.08	68	2.40	1.99	0.41
12	1.75	1.75	0.00	69	2.25	1.99	0.26
13	1.70	1.75	-0.05	70	2.10	1.99	0.11
14	1.71	1.75	-0.04	71	2.07	1.99	0.08
15	1.73	1.75	-0.02	72	2.20	1.99	0.21
16	1.71	1.75	-0.04	73	2.01	1.99	0.02
17	1.78	1.75	0.03	74	2.07	1.91	0.16
18	2.30	1.97	0.33	75	2.66	1.75	0.91
19	2.13	1.99	0.14	86	2.46	1.99	0.47
20	2.13	1.99	0.14	87	3.64	1.99	1.65
21	2.07	1.99	0.08	88	2.68	1.99	0.69
22	2.00	1.91	0.09	89	2.69	1.91	0.78
23	2.10	1.91	0.19	90	2.27	1.91	0.36
24	2.19	1.91	0.28	91	2.15	1.91	0.24
25	2.17	1.91	0.26	92	2.11	1.75	0.36
26	2.12	1.91	0.21	93	2.11	1.91	0.20
27	2.14	1.91	0.23	94	2.06	1.91	0.15
28	2.01	1.91	0.10	95	1.99	1.91	0.08
29	1.97	1.91	0.06	96	1.95	1.91	0.04
30	2.32	1.91	0.41	97	1.86	1.91	-0.05
31	2.00	1.91	0.09	98	1.86	1.75	0.11
32	2.10	1.91	0.19	99	1.74	1.75	-0.01
33	2.10	1.91	0.19	100	1.64	1.75	-0.11
34	2.02	1.91	0.11	101	1.66	1.75	-0.09
36	2.22	1.75	0.47	102	1.62	1.75	-0.13
37	2.14	1.97	0.17	105	3.02	1.91	1.11
38	2.51	1.99	0.52	106	2.81	1.91	0.90
39	2.54	1.99	0.55	107	2.48	1.91	0.57
40	2.52	1.99	0.53	108	2.50	1.91	0.59
41	2.55	1.99	0.56	109	2.44	1.91	0.53
42	2.57	1.91	0.66	110	2.53	1.75	0.78
43	2.44	1.91	0.53	111	2.49	1.75	0.74
44	2.25	1.91	0.34	112	2.38	1.75	0.63
45	2.16	1.91	0.25	113	2.11	1.75	0.36
46	2.14	1.91	0.23	114	1.94	1.75	0.19
47	2.24	1.91	0.33	115	1.86	1.75	0.11
48	2.17	1.91	0.26	116	1.85	1.75	0.10
49	2.13	1.91	0.22	117	1.48	1.75	-0.27
57	2.71	1.97	0.74				

Tab. 5.9 - *Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati nei 97 punti considerati e relativi ai valori determinati nella presente ricerca (RSL) e nello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 (MS3); T=0.7-1.1 s*

0.7-1.1 s							
n. punto	**FA_RSL**	**FA_MS3**	**ΔFA**	**n. punto**	**FA_RSL**	**FA_MS3**	**ΔFA**
1	1.81	2.12	-0.31	58	2.22	2.12	0.10
2	2.61	2.12	0.49	59	2.57	2.12	0.45
3	2.81	2.22	0.59	60	3.19	2.12	1.07
4	2.55	2.22	0.33	61	3.23	2.12	1.11
5	2.51	2.22	0.29	62	2.69	2.12	0.57
6	2.67	2.22	0.45	63	2.50	2.12	0.38
7	2.69	2.22	0.47	64	2.52	2.12	0.40
8	2.60	2.22	0.38	65	2.64	2.12	0.52
9	2.49	2.22	0.27	66	2.76	2.12	0.64
10	2.50	2.00	0.50	67	2.88	2.12	0.76
11	2.51	2.00	0.51	68	3.06	2.12	0.94
12	2.47	2.00	0.47	69	3.03	2.12	0.91
13	2.42	2.00	0.42	70	2.81	2.12	0.69
14	2.41	2.00	0.41	71	2.73	2.12	0.61
15	2.44	2.00	0.44	72	2.72	2.12	0.60
16	2.44	2.00	0.44	73	2.83	2.12	0.71
17	1.49	2.00	-0.51	74	3.36	2.22	1.14
18	2.30	2.00	0.30	75	3.16	2.00	1.16
19	2.73	2.12	0.61	86	1.85	2.12	-0.27
20	2.81	2.12	0.69	87	3.05	2.12	0.93
21	2.76	2.12	0.64	88	3.82	2.12	1.70
22	2.69	2.22	0.47	89	3.63	2.22	1.41
23	2.74	2.22	0.52	90	3.15	2.22	0.93
24	2.84	2.22	0.62	91	3.02	2.22	0.80
25	2.82	2.22	0.60	92	3.11	2.00	1.11
26	2.74	2.22	0.52	93	3.15	2.22	0.93
27	2.80	2.22	0.58	94	2.85	2.22	0.63
28	2.48	2.22	0.26	95	2.73	2.22	0.51
29	2.48	2.22	0.26	96	2.69	2.22	0.47
30	2.90	2.22	0.68	97	2.65	2.22	0.43
31	2.56	2.22	0.34	98	2.64	2.00	0.64
32	2.50	2.22	0.28	99	2.51	2.00	0.51
33	2.53	2.22	0.31	100	2.39	2.00	0.39
34	2.52	2.22	0.30	101	2.20	2.00	0.20
36	2.63	2.00	0.63	102	2.16	2.00	0.16
37	2.91	2.00	0.91	105	2.91	2.22	0.69
38	3.29	2.12	1.17	106	2.97	2.22	0.75
39	3.21	2.12	1.09	107	2.89	2.22	0.67
40	2.80	2.12	0.68	108	2.92	2.22	0.70
41	2.80	2.12	0.68	109	2.88	2.22	0.66
42	2.86	2.22	0.64	110	2.87	2.00	0.87
43	2.96	2.22	0.74	111	2.81	2.00	0.81
44	2.90	2.22	0.68	112	2.70	2.00	0.70
45	2.64	2.22	0.42	113	2.52	2.00	0.52
46	2.55	2.22	0.33	114	2.46	2.00	0.46
47	2.57	2.22	0.35	115	2.45	2.00	0.45
48	2.58	2.22	0.36	116	2.53	2.00	0.53
49	2.49	2.22	0.27	117	2.03	2.00	0.03
57	1.86	2.00	-0.14				

Sempre in riferimento alle carte delle Figg. da 5.19 a 5.21, si può notare che le aree in cui i fattori di amplificazione da MS3 sono maggiori sono per lo più esterne al centro urbano; in quelle aree le modellazioni ricostruite nel presente lavoro mostrano che gli spessori e la natura dei depositi di riempimento del bacino e l'andamento e la tipologia del bedrock tendono a non variare, generando le condizioni minime per un approccio monodimensionale al problema della risposta sismica locale. Al contrario, nel centro urbano sono stati individuati tutti quegli elementi che nel capitolo introduttivo di questo lavoro e poi nel prosieguo della trattazione sono stati indicati come fattori discriminanti per il riconoscimento di quest'area come geologicamente complessa: andamento irregolare del bedrock in termini geometrici a causa delle dislocazioni tettoniche ma anche in termini litologici (contatto tettonico laterale tra substrato calcareo e substrato flyschoide), spessori dei depositi di riempimento variabili in funzione delle citate dislocazioni del bedrock, natura litologica di questi terreni anch'essa estremamente complicata dalle diverse fasi deposizionali che hanno caratterizzato il bacino. Gli effetti di questo assetto geologico complesso sul comportamento sismico dell'area sono riscontrabili da quanto esposto nei paragrafi precedenti con il confronto tra i risultati delle modellazioni mono e bidimensionali; ma sono evidenti anche nelle rappresentazioni delle Figg. 5.19÷5.21 dalle quali emerge che le differenze maggiori tra l'approccio di questo lavoro (modellazione sismostratigrafica bidimensionale) e quello dello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 si concentrano proprio in corrispondenza degli elementi tettonici sepolti che sono stati già evidenziati nelle precedenti discussioni riguardanti il raffronto tra le modellazioni 1D e 2D: la faglia nella zona della stazione ferroviaria, le faglie che bordano a nord e a est il centro urbano e le faglie a ridosso della struttura di Montecassino.

Tutto ciò è ancora più evidente nelle Figg. da 5.22 a 5.24, nelle quali viene mostrato l'approccio (tra RSL e MS3) prevalente in funzione della differenza (ΔFA) tra i fattori di amplificazione determinati con le due diverse analisi numeriche, considerando prevalente l'approccio da MS3 dove ΔFA è minore di -0.10 e l'approccio adottato nel presente studio dove ΔFA è maggiore di 0.10; per valori compresi tra questi due estremi si è considerato indifferente l'utilizzo di uno dei due approcci.

Queste carte evidenziano che l'approccio adottato in questo studio risulta tanto più adatto al contesto geologico complesso dell'area quanto più aumenta l'intervallo di periodo di riferimento e comunque, le aree in cui può risultare indifferente l'utilizzo di una modellazione mono o bidimensionale sono quelle che presentano minori elementi di complessità; dove la modellazione geologica ha individuato lineamenti tettonici sepolti o variazioni significative degli spessori relativi dei depositi di copertura le analisi numeriche di risposta sismica locale da preferire sono quelle in configurazione bidimensionale.

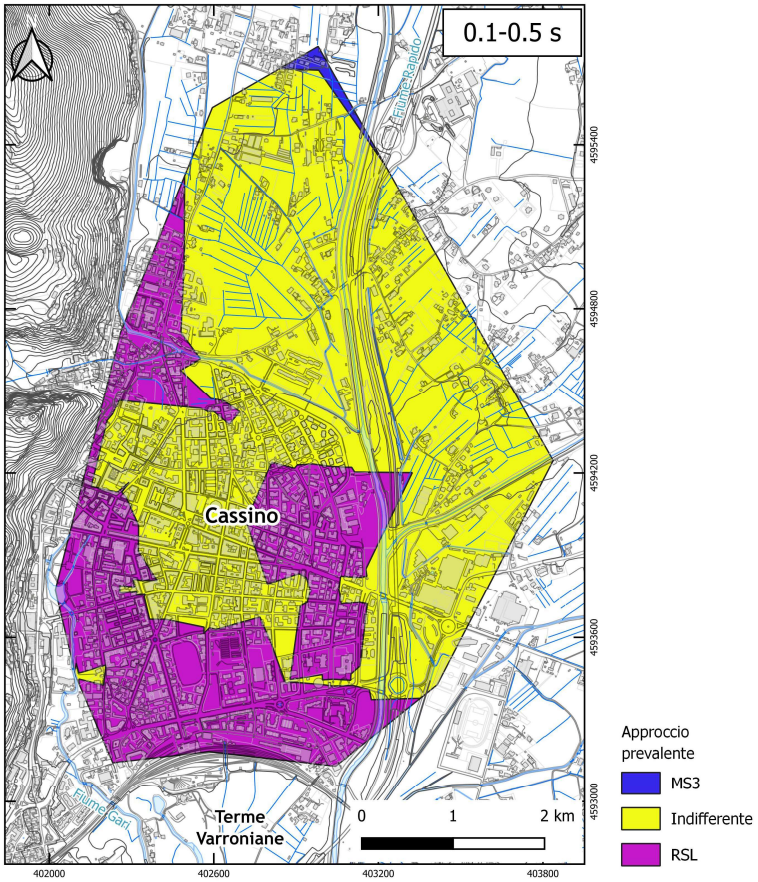


Fig. 5.22 - *Approccio prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi RSL e MS3 (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.1-0.5 s*

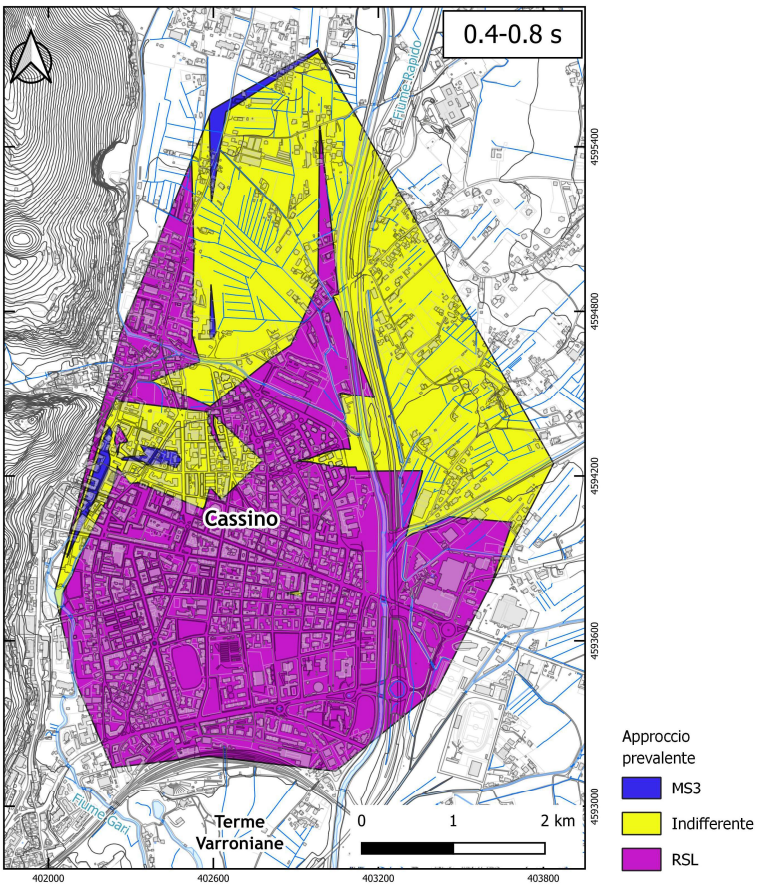


Fig. 5.23 - *Approccio prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi RSL e MS3 (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.4-0.8 s*

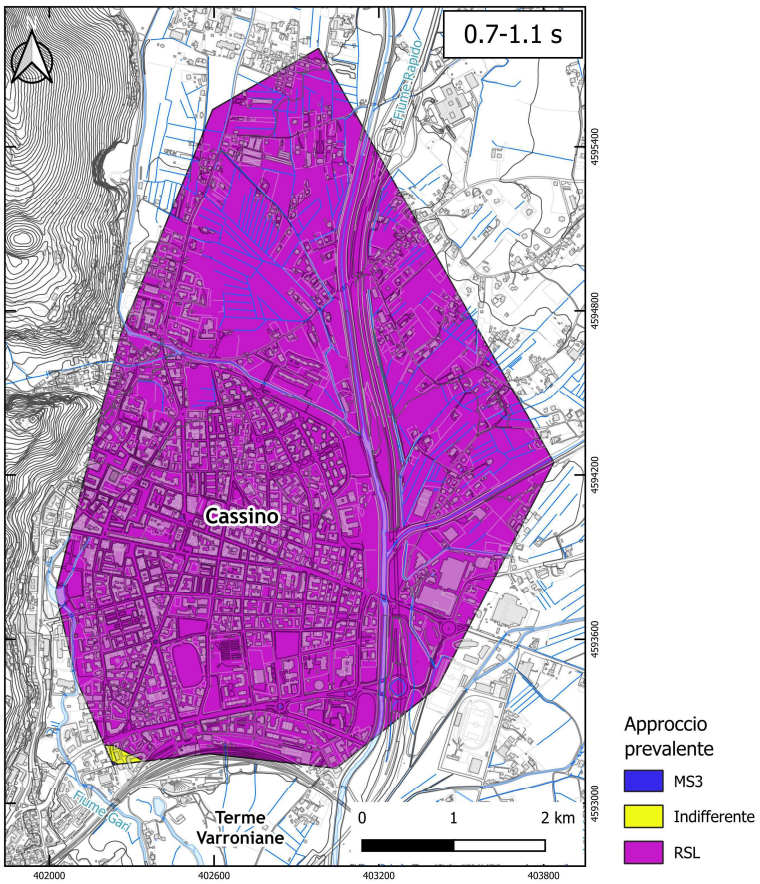


Fig. 5.24 - *Approccio prevalente in funzione della differenza tra i fattori di amplificazione da analisi RSL e MS3 (ΔFA) nell'intervallo di periodo 0.7-1.1 s*

5.4 Confronto con risultati ottenuti in altri studi

Come evidenziato nel paragrafo 1.2, in letteratura sono presenti diverse pubblicazioni relative a studi di risposta sismica locale condotti in contesti geologici complessi e nei quali la ricostruzione del modello geologico di base ha richiesto un approccio multi-sorgente. Si vuole quindi effettuare un confronto tra le metodologie adottate e i risultati ottenuti nel presente studio e quelli relativi ad altri casi analoghi.

Ferma restando la peculiarità del contesto geologico, stratigrafico, idrogeologico e tettonico del Bacino di Cassino, più volte ribadita nel corso di questo studio, l'attenzione si è focalizzata su alcuni dei casi esposti in Pagliaroli et al. (2020) e in Tallini et al. (2024), per la similarità nell'approccio metodologico e per il confronto eseguito tra i risultati delle analisi di RSL condotte in configurazione 1D e 2D. È però doveroso specificare che in nessuno dei casi esaminati, come in nessuno di quelli reperiti in letteratura, è stato eseguito un puntuale ed esteso confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche condotte nelle due configurazioni, come fatto nella presente ricerca.

La prima pubblicazione, dal titolo *Site response analyses for complex geological and morphological conditions: relevant case-histories from 3rd level seismic microzonation in Central Italy*, illustra i risultati ottenuti nell'ambito degli studi di microzonazione sismica di livello 3 eseguiti in cinque comuni dell'Italia Centrale, ciascuno caratterizzato da condizioni

geologiche e morfologiche particolari: Monte San Martino, ubicato lungo un pendio collinare, Montedinove e Arquata del Tronto, situati su creste, e Capitignano e Norcia, costruiti in valli sedimentarie (Fig. 5.25).

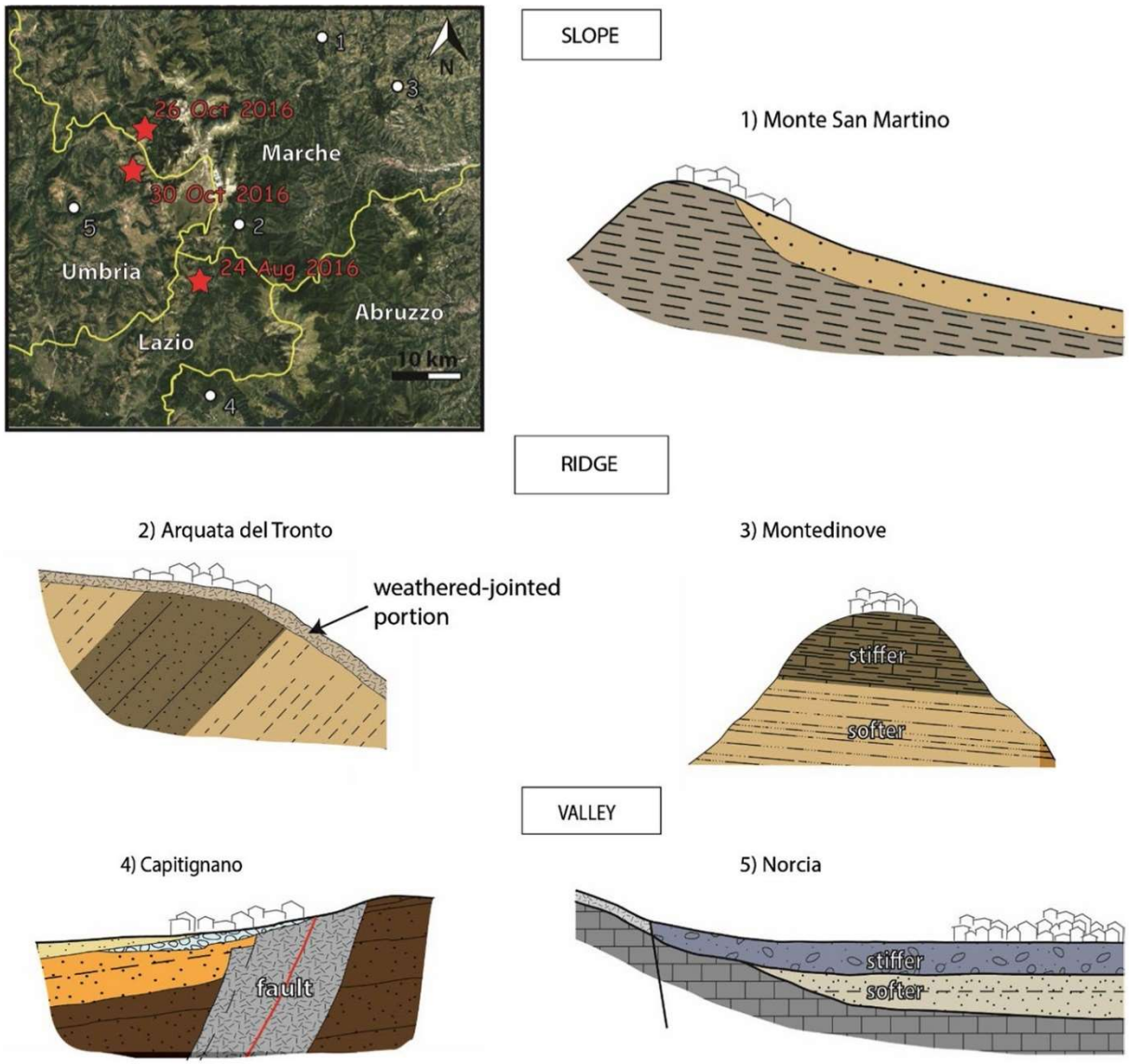


Fig. 5.25 - *Ubicazione dei comuni presentati nella pubblicazione e illustrazione delle relative configurazioni geologiche/morfologiche; da Pagliaroli et al. (2020), fig. 1*

Il caso che presenta condizioni più simili a quelle del Bacino di Cassino e che permette, quindi, di eseguire un confronto più efficace è quello di Capitignano.

Il comune di Capitignano (AQ) è situato a 20 km a nord dell'Aquila, nel settore NE del Bacino di Montereale, un bacino intermontano Plio-Quaternario delimitato a NE dalla Faglia di Capitignano ad andamento NW-SE e cinematica normale. La sezione in Fig. 5.26.b, ben vincolata da numerosi sondaggi e indagini geofisiche, è rappresentativa dell'assetto geologico dell'area di Capitignano. Mostra il limite tettonico tra la fascia pedemontana del Bacino di Montereale e il sistema della Faglia di Capitignano che presenta una serie di elementi tettonici immergenti a SW con angolo di 70°, cui è associata un'area di deformazione di circa 400 m. Il letto della faglia è caratterizzato dall'affioramento della Formazione della Laga che presenta uno strato di alterazione superficiale di circa 10 m, mentre il tetto è composto da circa 140 m di depositi fluvio-lacustri e detriti quaternari. Lo spessore di questi depositi quaternari

diminuisce fino a 15-20 m approssimandosi alla faglia. Il bedrock sismico è stato stimato dall'uso combinato di indagini geofisiche, misure di rumore sismico, registrazioni di terremoti e di un sondaggio profondo 100 m.

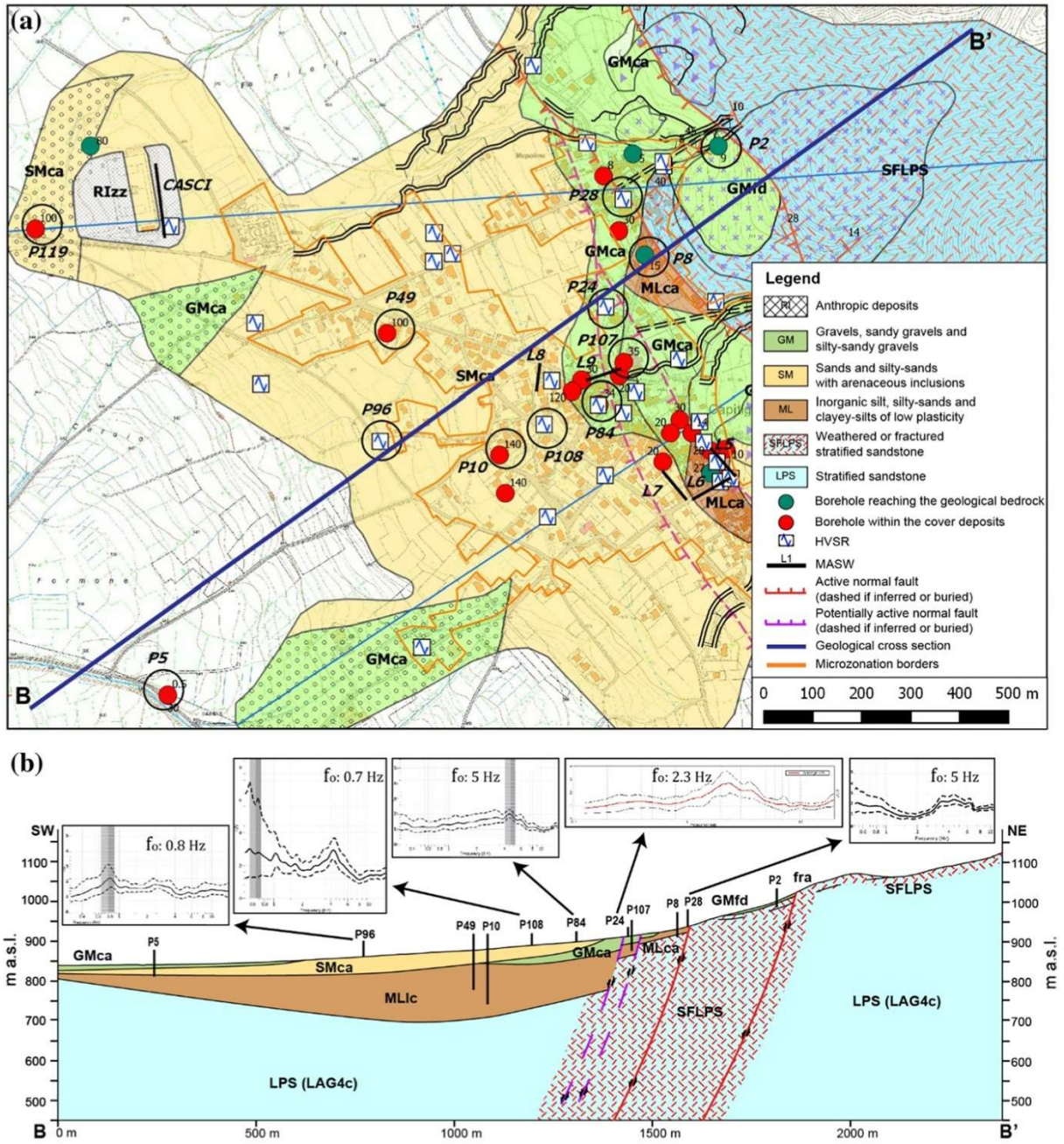


Fig. 5.26 - *a) Carta litotecnica dell'area di Capitignano e b) sezione BB' usata per la modellazione numerica; da Pagliaroli et al. (2020), fig. 12*

In Fig. 5.27.b è riportato il modello sismostratigrafico utilizzato per le simulazioni numeriche di RSL. I depositi MLlc (limi, sabbie limose e limi argillosi) sono stati suddivisi, in questa modellazione, in tre diversi sismostrati in funzione della velocità di propagazione delle onde di taglio (Vs). Lo stesso approccio metodologico è stato seguito nella modellazione sismica dei depositi fluvio-lacustri del Bacino di Cassino.

I punti di controllo per l'analisi bidimensionale, rappresentati dai punti rossi, sono stati posizionati lungo la sezione ogni 30 m; nei punti indicati con A, B e C sono state eseguite le analisi in configurazione monodimensionale (Fig. 5.27.b).

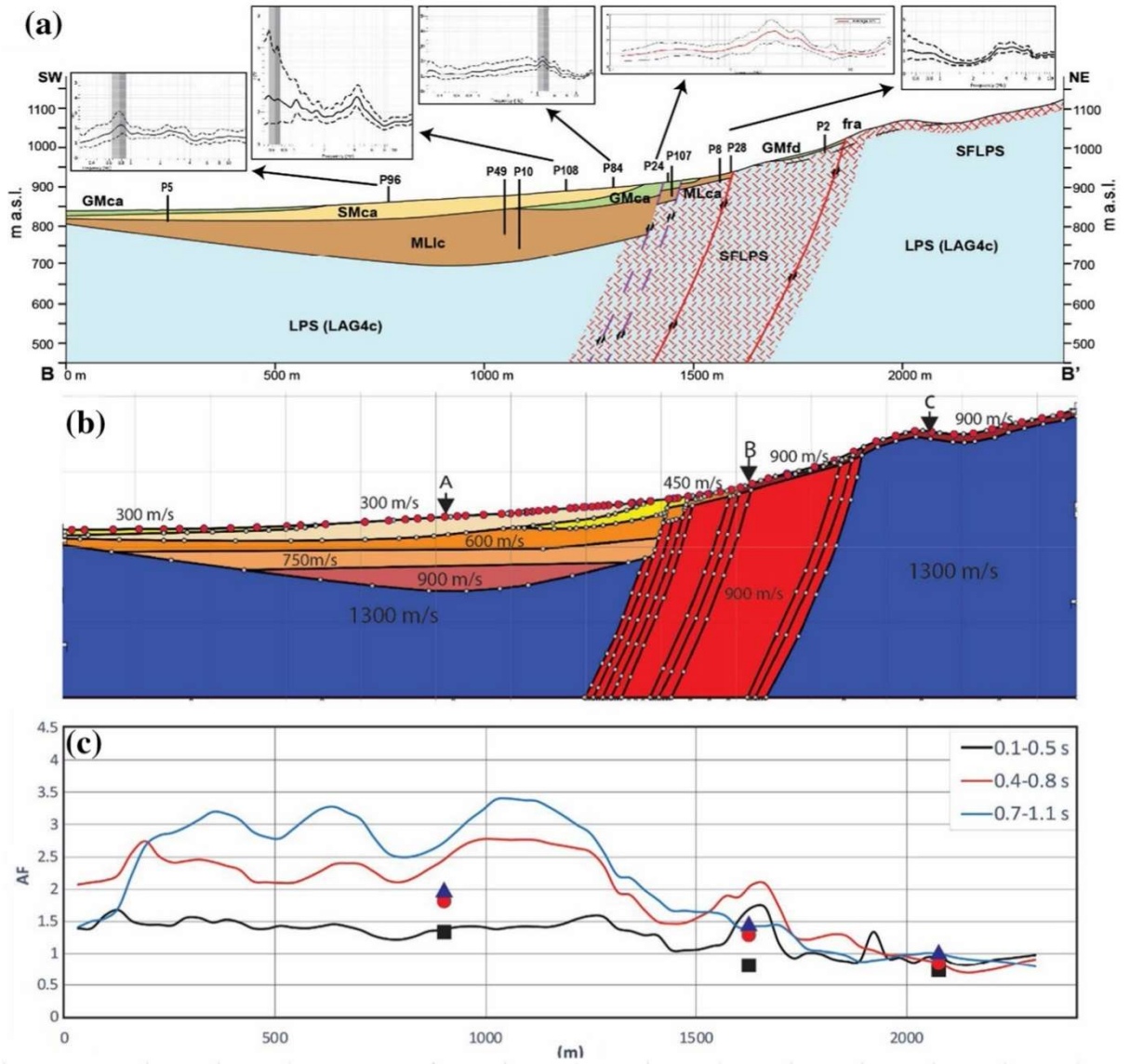


Fig. 5.27 - *a) Sezione litotecnica BB'; b) modellazione numerica del sottosuolo; c) fattori di amplificazione 2D per siti selezionati sulla sezione ogni 30 m (linee nera, arancio e blu) e fattori di amplificazione 1D per i siti A, B e C sulla sezione (quadrati neri per l'intervallo 0.1-0.5 s, cerchio arancio per l'intervallo 0.4-0.8 s, triangoli blu per l'intervallo 0.7-1.1 s); da Pagliaroli et al. (2020), fig. 14 modificata*

Nella Fig. 5.27.c viene mostrato l'andamento dei fattori di amplificazione calcolati lungo la sezione BB'. Per quanto riguarda i valori derivanti dall'analisi 2D (linee continue per i tre intervalli di periodo), si possono osservare valori massimi dei FA per i tre periodi di riferimento pari rispettivamente a 1.4, 2.6 e 3.4, in corrispondenza dei depositi di riempimento del bacino. I diversi picchi sono attribuiti dagli Autori a probabili interferenze tra onde di superficie generatesi al bordo (nella zona di fagliazione) e onde dirette. Nella zona di *footwall* della faglia i fattori di amplificazione decrescono raggiungendo l'unità, mentre valori di FA tra 1 e 2 si stimano nella zona ad elevata fratturazione del bedrock arenaceo. L'analisi monodimensionale eseguita in tre punti caratteristici delle diverse condizioni geologico-tettoniche (area del bacino, zona di fagliazione, presenza di bedrock affiorante) restituisce valori in accordo con quelli dell'analisi 2D nel punto C (bedrock affiorante), ma inferiori negli altri due punti, dove l'assetto geologico risulta più articolato, non solo dal punto di vista stratigrafico ma anche per ciò che

attiene alle variazioni giaciturali dei depositi, alla presenza di elementi tettonici e alle variazioni di profondità del bedrock.

La pubblicazione di Tallini et al. (2024), dal titolo *Seismic microzonation mapping for urban and land sustainable planning in high seismicity areas (L'Aquila Municipality, Central Italy): the contribution of 2D modelling for the evaluation of the amplification factors*, illustra i risultati ottenuti negli studi di microzonazione sismica di livello 3 condotti in aree pilota del territorio del comune dell'Aquila, in particolare le aree di Preturo-Sassa e Bazzano-Monticchio.

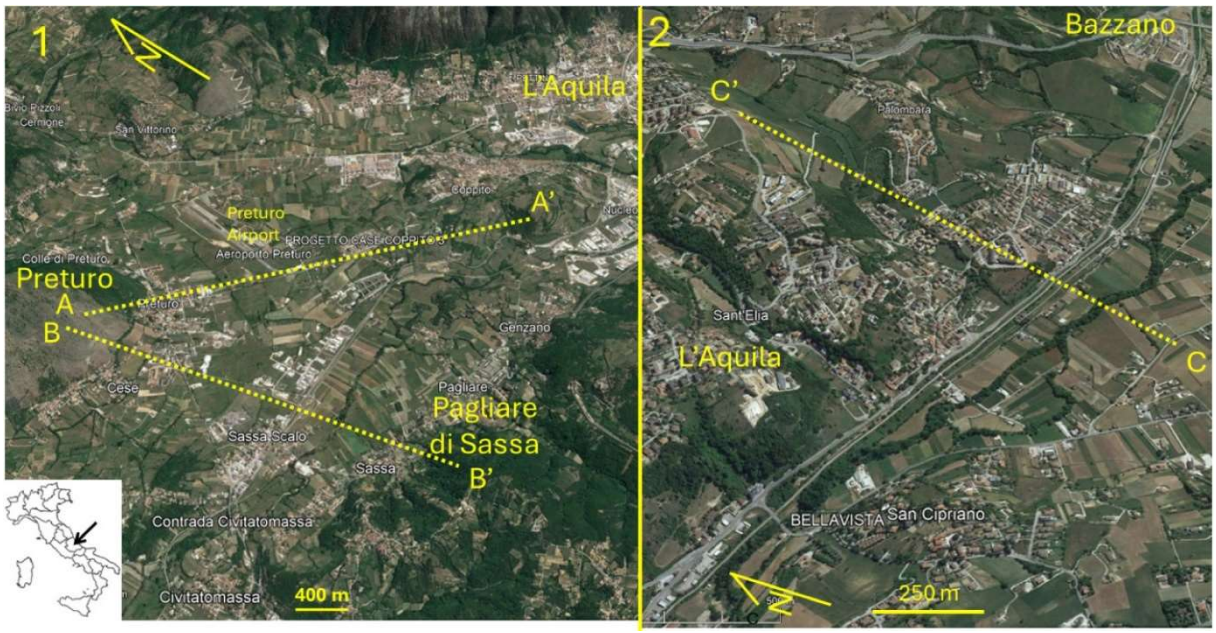


Fig. 5.28 - *Le aree di studio di 1) Preturo-Sassa e 2) Bazzano-Monticchio; le linee tratteggiate corrispondono alle sezioni illustrate nell'articolo; da Tallini et al. (2024), fig. 1*

Entrambe le aree appartengono geologicamente al bacino intermontano del medio Fiume Aterno, caratterizzato da riempimenti detritici grossolani e a grana fine Plio-Quaternari riconducibili principalmente ad ambienti fluvio-lacustri. Il substrato è rappresentato da rocce carbonatiche di scogliera e di rampa e da depositi terrigeni silicoclasici costituiti da torbiditi e peliti emipelagiche.

In entrambi i settori sono stati condotti studi tramite array sismici 2D.

Per quanto riguarda l'area di Preturo-Sassa, l'andamento del substrato è stato ricostruito attraverso una relazione empirica tra lo spessore dei depositi Plio-Quaternari e la frequenza di risonanza; gli Autori hanno evidenziato in questo modo un andamento irregolare del substrato Plio-Quaternario, indicante la presenza di paleomorfologie sepolte molto complesse, con alternanze di alti strutturali e paleovalli (Fig. 5.29).

Anche l'area di Bazzano-Monticchio è caratterizzata da un substrato molto articolato con elementi tettonici che dislocano il bedrock calcareo, favorendo così una successiva distribuzione poco omogenea dei depositi silicoclastici (Fig. 5.30).

Nelle stesse Figg. 5.29 e 5.30 si riporta l'andamento dei fattori di amplificazione calcolati con le simulazioni numeriche 2D (linee con pallini) e 1D (rombi) per i tre intervalli di periodo di riferimento. La sezione BB' è relativa all'area Preturo-Sassa, mentre la sezione CC' schematizza i risultati relativi alla zona di Bazzano-Monticchio.

Si può notare in entrambi i casi che le simulazioni numeriche 2D hanno permesso di rilevare effetti di risposta bidimensionale, evidenziati da valori dei FA 1D minori di quelli derivanti dall'analisi 2D, in centro bacino o in corrispondenza delle rotture di pendio tra i rilievi e la piana dell'Aterno.

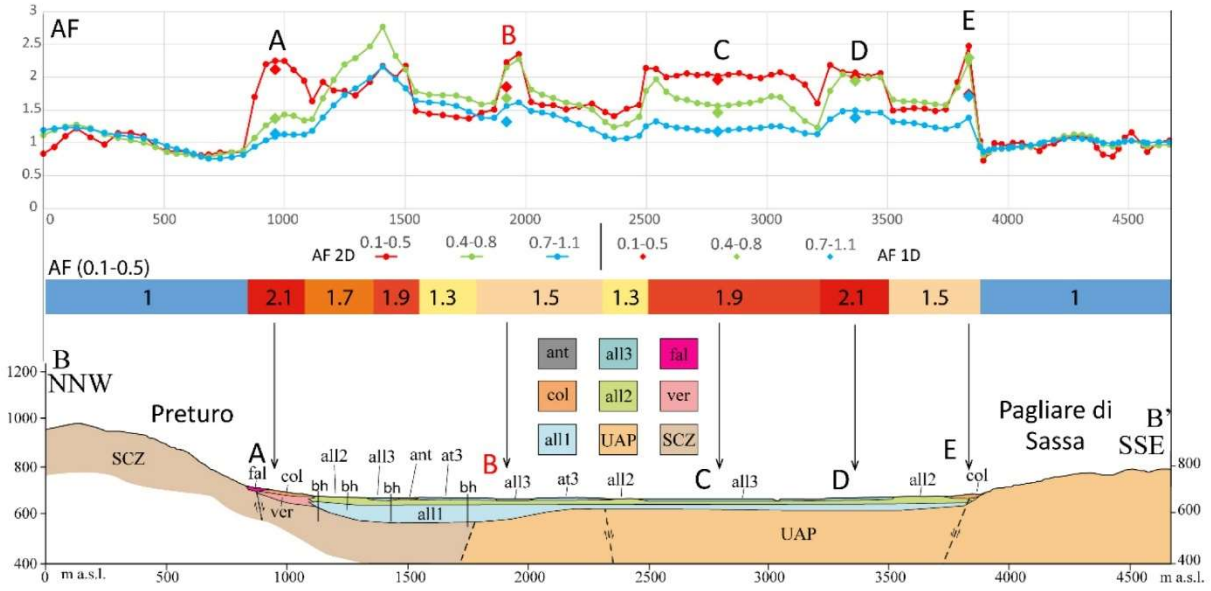


Fig. 5.29 - *Valori dei fattori di amplificazione calcolati attraverso la modellazione 2D per l'area Preturo-Sassa lungo la sezione BB'; i simboli a rombo rappresentano i valori dei FA calcolati con le simulazioni 1D nei punti indicati con le lettere da A ad E; da Tallini et al. (2024), fig. 10*

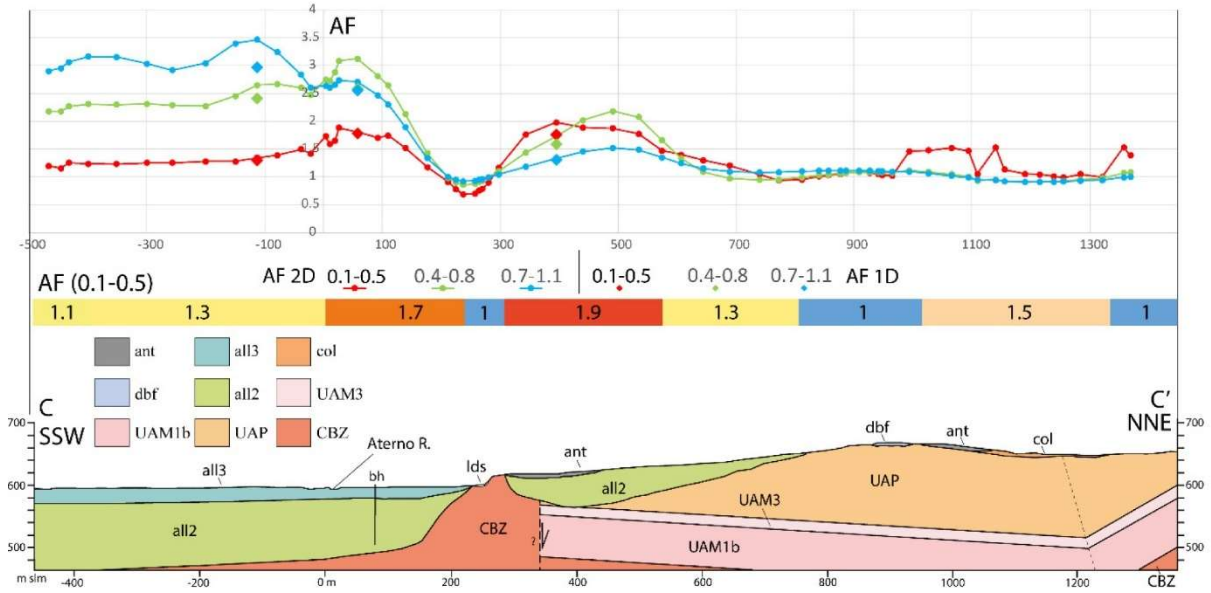


Fig. 5.30 - *Valori dei fattori di amplificazione calcolati attraverso la modellazione 2D per l'area Bazzano-Monticchio lungo la sezione CC'; i simboli a rombo rappresentano i valori dei FA calcolati con le simulazioni 1D; da Tallini et al. (2024), fig. 11*

I casi esposti confermano da un lato la bontà delle metodologie e delle procedure utilizzate nell'ambito di questa ricerca e dall'altro costituiscono una conferma dei risultati ottenuti. Attraverso l'approccio bidimensionale, soprattutto in condizioni geologiche complesse, è possibile mettere in evidenza il comportamento sismico di un'area in modo più accurato.

5.5 Considerazioni in rapporto al pericolo di risonanza terreno-struttura

Nel paragrafo 4.3 è stata valutata la propensione degli edifici dell'area oggetto di questo studio a sviluppare fenomeni di risonanza terreno-struttura a causa della minima differenza tra il periodo di vibrazione fondamentale di un edificio e il periodo fondamentale del terreno sottostante. In particolare si è stimato che il poco più del 23% delle costruzioni presenta differenze fino a 0.2 s e oltre il 35% entro 0.3 s.

Questa informazione, benché non sufficiente da sola a predire il livello di danneggiamento cui potrebbe essere soggetto un edificio in caso di terremoto, risulta particolarmente importante per identificare le aree o gli aggregati di costruzioni maggiormente suscettibili di subire conseguenze in caso di evento sismico. In questo senso tale conoscenza risulta fondamentale sia in termini di pianificazione edilizia che in termini di pianificazione emergenziale; nei piani comunali di Protezione Civile è infatti obbligatorio individuare gli scenari di rischio per tutti gli eventi considerati.

Bisogna però considerare che il dato esposto rappresenta una sorta di fotografia dell'interazione terreno-struttura: a causa di scuotimenti di lunga durata in caso di eventi sismici si può avere una variazione nelle frequenze fondamentali di vibrazione degli edifici a causa di un iniziale danneggiamento con conseguente riduzione del gap periodo terreno/periodo struttura.

La conoscenza congiunta delle aree a maggior amplificazione sismica e di quelle più soggette a fenomeni di risonanza fornisce un quadro di dettaglio migliore in funzione del livello di rischio atteso in un dato territorio. In questo lavoro, poi, non è stata considerata la suscettibilità a liquefazione alla quale risulta soggetta buona parte del bacino di Cassino a causa della natura dei depositi e del livello di falda molto superficiale.

Dal punto di vista sismico e dei fenomeni sismoindotti, quindi, il bacino di Cassino presenta un livello di pericolosità mediamente elevato con conseguenti rilevanti rischi per il ricco patrimonio storico-archeologico, per le infrastrutture, per le risorse naturali (sorgenti del Gari) e, non ultimo, per il tessuto residenziale.

CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo progetto di ricerca è stato quello di studiare il comportamento sismico dei depositi di copertura nel complesso contesto geologico dell'area del bacino di Cassino, attraverso analisi numeriche di risposta sismica locale 1D e 2D. Si può definire complessa una situazione geologica che presenta eterogeneità litologica (litotipi molto diversi tra loro anche su piccola scala), stratigrafia irregolare (alternanze rapide di strati, spessori variabili, depositi discontinui o localizzati), tessitura strutturale complessa (faglie, pieghe, sistemi di fratture, contatti tettonici o erosivi), assetto geomorfologico articolato (pendii, terrazzi, incisioni fluviali, rilievi collinari o montuosi), condizioni idrogeologiche variabili (presenza di falde superficiali, variazioni di saturazione, zone carsiche).

Il bacino di Cassino rappresenta una conca intermontana con caratteristiche peculiari di un contesto geologico complesso appartenente alla serie laziale-abruzzese per la presenza di un bedrock geologico e sismico eterogeneo dal punto di vista della continuità spaziale. La causa di tale complessità è determinata principalmente dall'azione tettonica ereditata dall'evoluzione del sistema di catena appenninico e dalla tettonica quaternaria che ha profondamente deformato il substrato carbonatico e quello costituito dalle unità dei flysch (argille e arenarie). Questa evoluzione tettonica ha creato una struttura complessa con alti e bassi strutturali all'interno dei quali hanno sedimentato in ambiente lacustre e continentale i depositi quaternari di riempimento della conca intermontana con spessori variabili. L'area di studio è ulteriormente complicata dalla presenza della faglia attiva e capace nota in letteratura come faglia di San Pietro Infine, ritenuta responsabile da alcuni Autori del disastroso terremoto del 1349. La presenza di depositi quaternari di copertura costituiti da sistemi deposizionali complessi caratterizzati da argille limose e limi sabbiosi con intercalazioni di ghiaie con spessori molto variabili ed eteropie laterali, saturi di acqua fino al piano campagna, creano le condizioni ottimali per la suscettibilità a fenomeni di liquefazione. Le aree montuose e collinari circostanti, a loro volta, sono caratterizzate da instabilità gravitative diffuse con livello di attività e tipologia cinematica diversificati. Tutto ciò incide su un patrimonio naturale ed antropico importante, a partire dal complesso sorgentizio noto come sorgenti del Gari, tra i maggiori in Europa, passando per le aree archeologiche ricche di resti di epoca Romana, fino ad arrivare ai complessi industriali di rilevanza strategica e non ultimo alla fitta rete del costruito che presenta picchi di densità abitativa e di concentrazione di servizi a copertura anche delle comunità limitrofe (numerose sedi dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale e di istituti scolastici, l'ospedale Santa Scolastica, sedi decentrate delle amministrazioni Provinciale e Regionale) non

solo nel centro urbano di Cassino ma anche nelle frazioni e in aree di recente espansione come il polo didattico della Folcara.

Le attività di ricerca svolte hanno voluto fornire un contributo significativo alla comprensione della struttura geologica complessa del bacino di Cassino e al conseguente comportamento in caso di eventi sismici, proponendo dei criteri metodologici di base per future modellazioni sismostratigrafiche in contesti geologici simili, nei quali generalmente le condizioni di complessità non sono riconoscibili attraverso le sole indagini di tipo puntuale.

Al fine di comprendere al meglio le complessità geologiche, stratigrafiche, geomorfologiche e tettoniche del contesto studiato, avendo a disposizione una mole cospicua di indagini in sito (sondaggi, prove penetrometriche, prove sismiche) e di laboratorio, è stato realizzato un geodatabase informatizzato che ha consentito l'assimilazione e l'integrazione della grande quantità di dati georeferenziati di varia natura e ha permesso il confronto e la valutazione della coerenza tra i dati stessi, fornendo una visione d'insieme che ha tenuto conto della loro distribuzione spaziale e migliorato la comprensione delle relazioni tra le diverse informazioni, agevolando nuove interpretazioni. Nella ricostruzione del modello geologico, infatti, si è riusciti a fare ipotesi e correlazioni anche nelle aree prive di dati attraverso l'interpolazione di stime quantitative sulla distribuzione dei litotipi indagati. Questo ha permesso di confrontare i risultati di modellazioni del sottosuolo ottenute a partire da indagini e dati differenti, di origine puramente geologica da un lato e di tipo sismico dall'altro.

Questo studio offre, quindi, una metodologia di analisi e modellazione che parte da informazioni diversificate e prevalentemente puntuali sulla geologia di una certa area campione al fine di realizzare dei modelli geologici del sottosuolo utilizzabili anche in funzione delle analisi numeriche del comportamento sismico dell'area stessa.

Le analisi numeriche di risposta sismica locale, pur avendo origine nei decenni passati, hanno ricevuto notevole impulso dalla recente normativa sismica sia a livello di progettazione puntuale che di pianificazione territoriale. Troppo spesso, però, si propende per elaborazioni monodimensionali anche quando le condizioni al contorno renderebbero non sufficienti o non adatte queste analisi. Nel contesto specifico della microzonazione sismica, quando si definisce come complessa un'area si intende evidenziare che il sottosuolo non può essere rappresentato con modelli semplificati monodimensionali ma richiede approcci 2D o 3D, in cui la risposta sismica locale è condizionata da forti contrasti di impedenza laterali e verticali. Questi amplificano o modificano le onde sismiche in modo non lineare e non uniforme, quanto più l'incertezza nei dati geologici e geotecnici è alta.

È il caso del complesso contesto geologico del bacino di Cassino, con scarsa rilevanza delle condizioni morfologiche, perché ricadente in zona di pianura, ma caratterizzato da un assetto stratigrafico e tettonico articolato.

A partire dalle indagini dirette sono state costruite numerose sezioni geologiche attraverso punti noti (sondaggi, rilievi di affioramenti) che hanno permesso da un lato di definire l'andamento del bedrock geologico con le indagini più profonde e dall'altro di dettagliare le variazioni stratigrafiche nei depositi di copertura con le indagini più superficiali.

L'interpolazione di queste informazioni ha permesso anche di ipotizzare la presenza di elementi tettonici obliterati dalla sedimentazione continentale o di confermare la presenza di lineamenti classificati nella cartografia geologica come presunti. Utilizzando le misure di microtremore sismico a stazione singola eseguite in prossimità di sondaggi che intercettano il substrato è stata ricavata una relazione empirica che lega la frequenza naturale dei depositi con il loro spessore; questa relazione è stata quindi utilizzata in aree nelle quali le indagini dirette che intercettano il substrato sono più rade per ricavare la profondità del bedrock a partire dal valore di frequenza in un dato punto, generando così una serie di sondaggi "virtuali" in grado di integrare le informazioni esistenti. Si è giunti quindi ad una modellazione geologica di riferimento a scala di bacino che ha evidenziato la presenza di un substrato profondo e irregolare, dislocato dalle faglie principali che agiscono anche sul complesso carbonatico che costituisce i rilievi circostanti al bacino stesso, sul quale può essere presente in alcune aree un substrato riconducibile al complesso dei flysch argilloso-arenacei con argille varicolori. Si è realizzata, poi, una mappa del substrato indifferenziato a partire dai valori dei periodi fondamentali dei depositi di copertura ottenuti dalla campagna di misurazioni di microtremore sismico; il risultato è perfettamente confrontabile con il modello geologico ricostruito. È stato realizzato poi un modello geologico alla scala del centro urbano che ha permesso di evidenziare l'assetto stratigrafico dei depositi di copertura, costituiti da alternanze di sedimenti limoso-argillosi e argilloso-limosi con orizzonti di ghiaie e sabbie limose il cui spessore e la cui continuità laterale diminuiscono con la profondità. Queste litologie sono spesso saturate dall'acqua che filtra verso l'alto dal substrato calcareo sepolto o dall'alimentazione laterale dove le litologie sabbiose e ghiaiose sono in contatto con il rilievo di Monte Cassino.

Ai fini della modellazione sismica sono state ricostruite n. 6 sezioni geologiche rappresentative della complessità del bacino e che attraversano con orientazione N-S e E-W l'area del centro urbano. Da queste sezioni, per progressive e necessarie omogeneizzazioni, sono state ottenute 6 sezioni sismostratigrafiche che garantiscono da un lato la rappresentatività delle condizioni reali e dall'altro la possibilità di gestione da parte dei codici di calcolo.

Sono state, quindi, eseguite su queste sezioni sismostratigrafiche analisi numeriche in modellazione 1D e 2D al fine di evidenziare le condizioni di amplificazione dovute a particolari condizioni di assetto stratigrafico ed è stato operato un confronto dei risultati ottenuti con quelli derivanti dallo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 del comune di Cassino e con l'approccio semplificato di normativa.

I codici di calcolo utilizzati per le elaborazioni numeriche sono stati STRATA per le analisi monodimensionali e LSR2D per le simulazioni bidimensionali.

Lungo le sei sezioni sismostratigrafiche sono stati individuati 117 punti di controllo nei quali estrarre i risultati delle simulazioni numeriche in termini di fattori di amplificazione nei tre intervalli di periodo di riferimento (0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s); negli stessi punti sono state estrapolate le verticali sismostratigrafiche per eseguire le simulazioni 1D ed estrarre i relativi fattori di amplificazione.

La parametrizzazione dei sismostrati è stata eseguita utilizzando i dati derivanti dalle indagini a disposizione ed archiviate nel geodatabase realizzato e la caratterizzazione in termini di curve di decadimento G/G_0-γ e smorzamento D-γ effettuata tramite curve di letteratura, non essendo presenti tra le molteplici indagini a disposizione alcuna prova dinamica sui campioni prelevati.

Nell'ambito dell'attività di ricerca nell'area di studio sono state realizzate per la prima volta misure di microtremore a stazione singola su un campione di edifici scelti in base alla loro altezza in modo da coprire tutto lo spettro delle altezze delle strutture presenti nell'area del bacino di Cassino. Lo scopo di questa attività è stato quello di determinare il periodo di vibrazione fondamentale (T) di ciascun edificio per ricavare una relazione empirica tra questo dato e l'altezza dell'edificio stesso (H). Ricavata questa relazione è stato possibile attribuire in maniera speditiva un valore di T a ciascuna struttura nell'area indagata e confrontare questo valore con il periodo fondamentale del sottostante terreno di fondazione. Il confronto tra queste coppie di valori (T edificio e T terreno) ha permesso di valutare la suscettibilità delle strutture considerate nei confronti del fenomeno della risonanza.

Le attività svolte ai fini della ricerca possono, quindi, essere riassunte nelle seguenti fasi operative principali:

- raccolta di dati di input per la modellazione
- costruzione di un geodatabase relazionale
- realizzazione di un modello geologico a scala di bacino e alla scala del centro urbano a partire dalle numerose sezioni geologiche realizzate tra punti noti (sondaggi, affioramenti) in tutta l'area
- realizzazione di n. 6 sezioni geologiche rappresentative della complessità del bacino sulle quali sono state eseguite le modellazioni sismostratigrafiche 1D e 2D finalizzate all'esecuzione di analisi numeriche di risposta sismica locale

Nel processo di definizione del modello geologico e della successiva modellazione sismica ai fini della realizzazione delle analisi numeriche di risposta sismica, un punto critico è risultato l'omogeneizzazione dei dati provenienti dalle numerose indagini: da un lato è stato necessario correlare indagini di tipologia diversa e dall'altro indagini dello stesso tipo provenienti da operatori diversi che riportavano descrizioni che è stato necessario interpretare e ricondurre ad una descrizione standard comune. Altro elemento critico, proprio del concetto di modellazione, è risultato la definizione di elementi, strutture o variazioni troppo piccole o locali rispetto alle grandezze complessive del modello stesso. In questa casistica rientra anche la necessità di attribuire ai sismostrati valori medi ai fini della esecuzione di analisi numeriche di risposta sismica locale. Infine, si evidenzia che la parametrizzazione del modello sismostratigrafico potrebbe essere migliorata utilizzando curve di decadimento G/G_0-γ e smorzamento D-γ ottenute da campioni prelevati dalle litologie interessate, al momento non disponibili.

Sulla base dei risultati di questo studio possono essere tratte le seguenti considerazioni conclusive:

- ✓ la modellazione geologica eseguita sia alla scala di bacino che alla scala del centro urbano di Cassino, ottenuta da un copioso dataset di indagini e dalle numerose sezioni geologiche eseguite tra punti noti (sondaggi, affioramenti), è risultata essere rappresentativa del complesso contesto geologico caratterizzante l'area; proprio l'approccio multi-origine ha reso possibile il confronto e la validazione dei risultati a partire da insiemi di indagini di tipologia differente;
- ✓ le sezioni geologiche realizzate e l'interpolazione dei dati (sondaggi, prove penetrometriche, misure di microtremore a stazione singola) hanno permesso di riconoscere la variabilità di litotipi all'interno dei depositi di copertura, l'articolata geometria del substrato roccioso e la presenza di elementi tettonici sepolti;
- ✓ la modellazione sismostratigrafica derivata da quella geologica, pur richiedendo delle semplificazioni ed omogeneizzazioni, rappresenta in maniera ottimale il comportamento sismico dell'area di studio; i risultati delle simulazioni numeriche condotte evidenziano infatti in modo chiaro sia le variazioni stratigrafiche e giaciturali sia la presenza di elementi tettonici;
- ✓ le analisi numeriche di risposta sismica locale condotte in configurazione bidimensionale forniscono risultati che meglio rappresentano il contesto geologico e sismostratigrafico esistente rispetto alle simulazioni numeriche condotte in modellazione monodimensionale;
- ✓ nello studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 del comune di Cassino sono state modellate, per quanto riguarda il centro urbano, 4 verticali sismostratigrafiche; il confronto dei risultati di quello studio con i dati ottenuti nelle simulazioni numeriche della presente ricerca mostra che questi ultimi riescono a descrivere in maniera più completa il comportamento sismico dell'area indagata; nello studio di microzonazione sismica le carte dei fattori di amplificazione sismica non riflettono le variazioni stratigrafiche e giaciturali e non mettono in evidenza la presenza degli elementi tettonici; anche in questo caso viene confermata la migliore rappresentatività del modello bidimensionale nella descrizione del comportamento sismico del bacino di Cassino;
- ✓ l'approccio semplificato di normativa fornisce per quasi tutta l'area del bacino di Cassino due serie di valori di pericolosità, in funzione delle due categorie di sottosuolo predominanti nell'area (B e C) come risulta dall'esame delle indagini a disposizione; quindi la distinzione tiene conto soltanto delle differenze stratigrafiche nei primi 30 m di sottosuolo e non considera in alcun modo l'influenza di eventuali variazioni laterali nei depositi o dell'andamento del bedrock sismico o ancora della presenza di eventuali strutture tettoniche sepolte, elementi che hanno avuto un peso nelle analisi numeriche bidimensionali che sono state affrontate in questo studio;

- ✓ le misure dei periodi di vibrazione fondamentali eseguite su alcuni edifici dell'area urbana di Cassino ha permesso di investigare la possibilità che si verifichino fenomeni di risonanza del sistema terreno/struttura in caso di eventi sismici; i risultati sono stati restituiti in termini di aree con maggiore o minore presenza di edifici suscettibili di questo rischio; questo aspetto risulta di primaria importanza in funzione della pianificazione di emergenza per l'individuazione degli scenari di rischio sismico.

Nel complesso, si ritiene che i risultati ottenuti da questa ricerca possano avere ricadute applicative nell'indirizzare future scelte progettuali per quanto riguarda determinate tipologie costruttive nel territorio del Comune di Cassino, ma anche in aree limitrofe con le medesime condizioni geologiche. Non meno importante può risultare l'applicazione ai fini di protezione civile: le attuali linee guida per la realizzazione dei Piani di Protezione Civile prevedono di ipotizzare degli scenari di rischio: anche in via speditiva, conoscendo le aree nelle quali sono attesi fenomeni amplificativi maggiori e le aree nelle quali si osserva una concentrazione maggiore di edifici suscettibili al fenomeno della risonanza terreno/struttura, possono essere previsti scenari più realistici nella pianificazione di emergenza.

BIBLIOGRAFIA

Accordi B. Angelucci A., Sirna G., 1967. Note illustrative della carta geologica d'Italia FF. Frosinone 159 e Cassino 160. Nuova Tecnica Grafica, Roma

A.G.I. Associazione Geotecnica Italiana, 2005. Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica: linee guida. Patron Editore, Bologna

Alcaraz S., Lane R., Spragg K., Milicich S., Sepulveda F., Bignall G., 2011. 3D geological modelling using new leapfrog geothermal software. Thirty-Sixth Workshop Geotherm. Reserv. Eng. Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering

Antonielli B., Iannucci R., Ciampi P., Martino S., Marchetti D., Giudici F., Scarascia Mugnozza G., Bozzano F., 2023. Engineering-geological modeling for supporting local seismic response studies: insights from the 3D model of the subsoil of Rieti (Italy). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 235. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03259-4

Bally A.W., Burbi L., Cooper C., Ghelardoni R., 1986. La tettonica di scollamento dell'Appennino Centrale. Presented at the Geologia dell'Italia centrale. Congresso nazionale. 73, pp. 75–78

Bard P.-Y., 2004. SESAME: Site EffectS assessment using AMbient Excitations. Guidel. Implement. HV Spectr. RATIO Tech. AMBIENT Vib. Meas. Process. Interpret

Bard P.Y., Bouchon M., 1980. The seismic response of sediment-filled valleys. Part

1. The case of incident *SH* waves. Bulletin of the Seismological Society of America 70, 1263–1286. https://doi.org/10.1785/BSSA0700041263

Bard P.Y., Bouchon M., 1985. The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. Bulletin of the Seismological Society of America 75, 519-541. https://doi.org/10.1785/BSSA0750020519

Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M., Boschi E., 2008. The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, Tectonophysics; https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.04.014

Boccaletti M., Ciaranfi N., Cosentino D., Deiana G., Gelati R., Lentini F., Massari F., Moratti G., Pescatore T., Ricci Lucchi F., Tortorici L., 1990. Palinspastic restoration and paleogeographic reconstruction of the peri-Tyrrhenian area during the Neogene. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 77, 41-IN13. https://doi.org/10.1016/0031-0182(90)90097-Q

Boncio P., Dichiarante A.M., Auciello E., Saroli M., Stoppa F., 2016. Normal faulting along the western side of the Matese Mountains: Implications for active tectonics in the Central Apennines (Italy). J. Struct. Geol. 82, 16–36. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.10.005

Boni C., Bono P., 1973. Segnalazione di un gruppo di grandi sorgenti nel bacino del Fiume Peccia, affluente del Garigliano. Geol. Rom., 227–242

Boni C., Bono P., Capelli G., 1986. Schema idrogeologico dell'Italia centrale. Mem. Soc. Geol. It. 35, 991–1012

Boore D.M., Joyner W.B., 1997. Site amplification for generic rock sites. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 87(2), 327–341

Bouckovalas G.D., Papadimitriou A.G., 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume

25, Issues 7-10, 547-558. ISSN 0267-7261

Bozzano, F., Lenti L., Marra F., Martino S., Paciello A., Scarascia Mugnozza G., Varone C., 2016. Seismic response of the geologically complex alluvial valley at the "Europarco Business Park" (Rome – Italy) through instrumental records and numerical modelling. Italian Journal of Engineering Geology and Environment. (1), 37-55. https://doi.org/10.4408/IJEGE.2016-01.O-04

Building Seismic Safety Council (BSSC), 2003. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. FEMA 450, Washington D.C.

Calamita F., 1991. Assetto strutturale e cronologia della deformazione della zona d'incontro tra le aree umbro-marchigiana a laziale-abruzzese (Marche meridionali e Lazio-Abruzzo settentrionali). Studi Geol. Camerti Vol. Spec.

Calcagno P., Chilès J.P., Courrioux G., Guillen A., 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge. Phys. Earth Planet. Inter. 171, 147–157. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.013

Caravita A., 1870. I codici e le arti a Montecassino. Note sul terremoto del 9 settembre 1349 scritta su un codice cassinense contenente la Regula S. Benedicti. Vol. 2, 121 e 123-124

Carminati E., Lustrino M., Doglioni C., 2012. Geodynamic evolution of the central and western Mediterranean: Tectonics vs. igneous petrology constraints. Tectonophysics 579, 173–192. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.026

Caserta A., Martino S., Bozzano F., et al., 2012. Dynanamic properties of low velocity alluvial deposits influencing seismically-induced shear strain: the Grottaperfetta valley test-site (Roma, Italy). Bull. Earthquake Eng., 10, 1133-1162. https://doi.org/10.1007/s10518-012-9349-8

Castellaro S., Negri N., Rovere M., Vigliotti L., 2012. Interazione Suolo-Struttura e Struttura-Struttura: una lezione dal terremoto di Mirandola del 20.05.2012. Il. Geologo 45:47–52

Chatelain J.-L., Guillier B., Cara F., Duval A.-M., Atakan K., Bard P.-Y., The WP02 SESAME team, 2008. Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. Bull. Earthq. Eng. 6, 33–74. https://doi.org/10.1007/s10518-007-9040-7

Ciarlanti G.V., 1644. Memoria sul terremoto del 9 settembre 1349. Memorie historiche del Sannio chiamato oggi Principato UItra, Contado di Molisi, e parte di Terra di Lavoro provincie del Regno di Napoli

Cipollari P., Cosentino D., Parotto M., 1995. Modello cinematico-strutturale dell'Italia Centrale Studi Geologici Camerti, 135–143

Combey A., Mercerat E.D., Diaz J.E., Benavente C.L., Perez F.P., Garcia B. Palomino A.R., Guevara C.J., 2024. Characterizing the seismic response and basin structure of Cusco (Peru): implications for the seismic hazard assessment of a World Heritage Site. Natural Hazards, 121, 2371-2396. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06912-7

Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Microzonazione sismica. Versione 4.2

Cornell C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. Bull. Seism. Soc. Am., 58(5), pp. 1583-1606

Cosentino D., Cipollari P., Marsili P., Scrocca D., 2010. Geology of the central Apennines: a regional review. J. Virtual Explor. 36. https://doi.org/10.3809/jvirtex.2010.00223

Crespellani T., Facciorusso J., 2010. Dinamica dei terreni per le applicazioni sismiche. Dario Flaccovio Editore

Crespellani T., Vannucchi G., 1991. Dynamic properties of soils. In: "Seismic hazard and site effects in the Florence area". Proc. X ECSMFE, Florence. Vol. IV, 1491-1508

Cuffaro M., Riguzzi F., Scrocca D., Doglioni C., 2011. Coexisting tectonic settings: the example of the southern Tyrrhenian Sea. Int. J. Earth Sci. 100, 1915–1924. https://doi.org/10.1007/s00531-010-0625-z

de la Varga M., Schaaf A., Wellmann F., 2019. GemPy 1.0: open-source stochastic geological

modeling and inversion. Geosci. Model Dev. 12, 1–32. https://doi.org/10.5194/gmd-12-1-2019

D'Amico V., Picozzi M., Baliva F., Albarello D., 2008: Ambient Noise Measurements for Preliminary Site-Effects Characterization in the Urban Area of Florence, Italy. Bull. Seismol. Soc. Am., 98(3), 1373–1388. https://doi.org/10.1785/0120070231

Devoto G., 1965. Lacustrine pleistocene in the lower liri valley Geol. Rom., 291–368

Di Domenica A., Scisciani V., Pizzi A., Fernando C., 2010. Relazioni tra faglie normali e sovrascorrimenti lungo le strutture trasversali dell'Appennino centrale

DISS Working Group, 2025. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/diss3.3.1

Fäh D., Stamm G., Havenith H.-B., 2008. Analysis of three-component ambient vibration array measurements. Geophys. J. Int. 172, 199–213. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03625.x

Foti S., Lai C. G., Rota M., 2009. Input sismico e stabilità geotecnica dei siti di costruzione. Collana di manuali di Progettazione Antisismica, Vol. 6

Galadini F., Galli P., 2000. Active Tectonics in the Central Apennines (Italy) – Input Data for Seismic Hazard Assessment. Nat. Hazards 22, 225–268. https://doi.org/10.1023/A:1008149531980

Galli P.A.C., Naso J.A., 2009. Unmasking the 1349 earthquake source (southern Italy): paleoseismological and archaeoseismological indications from the Aquae iuliae fault. Journal of Structural Geology, 31, 128-149. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.09.007

Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Vona M., 2009. Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings. Earthquake Engng Struct. Dyn. 2009; 38:973–988. DOI: 10.1002/eqe.878

Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Šket-Motnikar B., Zupancic P., Gosar A., Prevolnik S., Herak M., Stipcevic J., Herak D., Milutinovic Z., Olumceva T., 2010. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings. Bull Earthquake Eng (2010) 8:593–607. DOI 10.1007/s10518-009-9133-6

Gallipoli M.R., Petrovic B., Calamita G., Tragni N., Scaini C., Barnaba C., Vona M., Parolai S., 2023. Towards specific T–H relationships: FRIBAS database for better characterization of RC and URM buildings. Bulletin of Earthquake Engineering (2023) 21:2281–2307. https://doi.org/10.1007/s10518-022-01594-7

Gangone G., Gallipoli M.R., tragni N., Vignola L., Caputo R., 2023. Soil-building resonance effect in the urban area of Villa d'Agri (Southern Italy). Bulletin of Earthquake Engineering (2023) 21:3273–3296. https://doi.org/10.1007/s10518-023-01644-8

Giallini S., Sirianni P., Pagliaroli A., Pizzi A., Mancini M., Kaiser A., Bourguignon S., Bruce Z., Hill M., Wotherspoon L., Moscatelli M., 2024. Reconstruction of a subsoil model for local seismic response evaluation through experimental and numerical methods: The case of the Wellington CBD, New Zealand. Eng. Geol. 330, 107413. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107413

Giuliani V., 1768. Memorie storiche politiche, ecclesiastiche della città di Vieste

Gruppo di lavoro – Lazio Meridionale – Sintesi delle ricerche geologiche multidisciplinari. ENEA

Gruppo di lavoro MS, 2008. Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Dvd

Guidoboni E., Comastri A., 2005. Catalogue of earthquakes and tsunamis in the Mediterranean area from the 11th to the 15th century. Roma-Bologna

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). 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. https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9

Hamilton E.L., 1976. Shear-wave velocity versus depth in marine sediments: A review. Geophysics. Vol. 41 (5), 985–996

Ibs-von Seht M., Wohlenberg J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bulletin of the Seismological Society of America (1999) 89 (1): 250–259. https://doi.org/10.1785/BSSA0890010250

Imai T., & Tonouchi K., 1982. Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus. Proc. 2nd European Symposium on Penetration Testing (ESOPT II), Amsterdam. Vol. 1, 67-72

ITHACA Working Group, 2019. ITHACA (ITaly HAzard from CApable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx

Konno K., Ohmachi T., 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bull. Seismol. Soc. Am. 88, 228–241. https://doi.org/10.1785/BSSA0880010228

Kottke A.R., Rathje E.M., 2008. Technical manual for Strata. PEER report 2008/xx. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Berkeley

Kottke A.R., Xiaoyue W., Rathje E.M., 2013. Technical manual for Strata. Geotechinical Engineering Center, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, University of Texas

Kramer S. L., 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall

Lancellotti S., 1673. Lo oggidì ovvero il mondo non peggiore né più calamitoso del passato, 454-455, Venezia

Lancia M., Saroli M., Petitta M., 2018. A Double Scale Methodology to Investigate Flow in Karst Fractured Media via Numerical Analysis: The Cassino Plain Case Study (Central Apennine, Italy). Geofluids 2018, 1–12. https://doi.org/10.1155/2018/2937105

Lanzo G., Silvestri F., 1999. Risposta sismica locale: teoria ed esperienze. Hevelius, pp. 159

Livani M., Scrocca D., Gaudiosi I., Mancini M., Cavinato G.P., De Franco R., Caielli G., Vignaroli G., Romi A., Moscatelli M., 2022. A geology-based 3D velocity model of the Amatrice Basin (Central Italy). Eng. Geol. 306, 106741. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106741

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A., 2022. Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4

Maceroni D., Dixit Dominus G., Gori S., Falcucci E., Galadini F., Moro M., Saroli M., 2022. First evidence of the Late Pleistocene—Holocene activity of the Roveto Valley Fault (Central Apennines, Italy). Front. Earth Sci. 10

Mancini M., Caciolli M.C., gaudiosi I., Alleanza G.A., Cavuoto G., Coltella M., Cosentino G., Di Fiore V., d'Onofrio A., Gargiulo F., Milana G., Pietrosante A., Pompa P.P., Silvestri F., Vassallo M., 2021. Seismic microzonation in a complex volcano-tectonic setting: the case of northern and western Ischia Island (southern Italy). Italian Journal of Geosciences, 140 (3), pp 382-408. https://doi.org/10.3301/IJG.2021.10

Martino S., Caprari P., Della Seta M., Esposito C., Fiorucci M., Hailemikael S., Iannucci R., Marmoni G.M., Martini G., Paciello A., Peloso A., 2020. Influence of geological complexities on local seismic response in the municipality of Forio (Ischia Island, Italy).

Italian Journal of Engineering Geology and Environment, (2), 43–62. https://doi.org/10.4408/IJEGE.2020-02.O-04

Mattei M., Funiciello R., Parotto M., 2008. Roma e contesto geodinamico recente dell'Italia Centrale. Geol. Roma dal cent. stor. alla periferia

Meletti C., Montaldo V.; 2007: Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Deliverable D2

Meletti C., Montaldo V., Stucchi M., Martinelli F., 2006. Database della pericolosità sismica MPS04. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/SH/MPS04/DB

Meletti C., Patacca E., Scandone., Figliuolo B., 1988. Il terremoto del 1456 e la sua interpretazione nel quadro sismotettonico dell'Appennino meridionale. Cap. 3, In: Figliuolo B. (ed), Il terremoto del 1456, Napoli, I, 1, 71-108

Miccadei E., Piacentini T., Buccolini M., 2014. Evoluzione geomorfologica a lungo termine dell'area abruzzese: lo stato delle ricerche

Molnar S., Cassidy J.F., Castellaro S., Cornou C., Crow H., Hunter J.A., Matsushima S., Sánchez-Sesma F.J., Yong A., 2018. Application of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Analysis for Site Characterization: State of the Art. Surv. Geophys. 39, 613–631. https://doi.org/10.1007/s10712-018-9464-4

Moroni G., 1840. Dizionario di erudizione storico-ecclesiastica da San Pietro sino ai nostri giorni specialmente intorno ai principali santi, beati, martiri, padri, ai sommi pontefici, cardinali e più celebri scrittori ecclesiastici, 103 voll. + 6 di indici

Mucciarelli M., Bianca M., Ditommaso R., Gallipoli M.R., Masi A., Milkereit C., Parolai S., Picozzi M., Vona M., 2011. Far field damage on RC buildings: the case study of Navelli during the L'Aquila (Italy) seismic sequence, 2009. Bull Earthq Eng 9:263–283

Nakamura, Y., 2008. On the H/V spectrum. 14th WCEE, Beijing, China 2008

Nakamura, Y., 2000. Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications. 12th WCEE, Auckland, New Zealand 2000

Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Q. Rep. Railw. Tech. Res. 30, 25–33

Nori L., Di Marcantonio P., 2014. Manuale pratico di risposta sismica locale. EPC Editore

Oliveira L., Gomes R.C., Amoroso S., Pagliaroli A., Teves-Costa P., 2024. Seismic site effects in Lisbon: the role of complex geological and morphological conditions. Bull Earthquake Eng 22, 4915–4958. https://doi.org/10.1007/s10518-024-01926-9

Oliver M.A., Webster R., 2014. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. Catena, Volume 113, 56–69. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006

Ohta Y., & Goto N., 1978. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics of soil indexes. Earth. Eng. and Struct. Dyn. Vol. 6, 167-187

Pagliaroli A., Pergalani F., Ciancimino A., Chiaradonna A., Compagnoni M., de Silva F., Foti S., Giallini S., Lanzo G., Lombardi F., Luzi L., Macerola L., Nocentini M., Pizzi E., Tallini M. Teramo C., 2019. Site response analyses for complex geological and morphological conditions: relevant case-histories from 3rd level seismic microzonation in Central Italy. Bulletin of Earthquake Engineering. 18:(2019), pp. 5741-5777. [10.1007/s10518-019-00610-7]

Panzera F., Lombardo G., D'Amico S., Galea P., 2013. Speedy Techniques to Evaluate Seismic Site Effects in Particular Geomorphologic Conditions: Faults, Cavities, Landslides and Topographic Irregularities. Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. Chapter 5, 101-146. http://dx.doi.org/10.5772/55439

Panzera F., Lombardo G., Rigano R., 2011. Evidence of topographic effects through the

analysis of ambient noise measurements. Seismological Reaserch Letters, Volume 83, number 3

Patacca E., Scandone P., 2007. Geology of the Southern Apennines. Boll. Soc. Geol. It. Ital. J. Geosci. Spec. Issue No. 7 (2007), 75–119

Pergalani F., Albarello D., Amanti M., Chiessi V., Compagnoni M., De Franco R., D'Onofrio A., Foti S., Gaudiosi I., Lanzo G., Luzi L., Madiai C., Milana G., Martini G., Martino S., Pagliaroli A., Silvestri F., Tallini M., Varone C., 2020. Cap. 7 - Modellazione della risposta sismica locale in configurazione 2D. In: Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni. Protocolli di acquisizione ed elaborazione dati relativi alle attività di Microzonazione Sismica di livello 3 in Italia Centrale, pp. 72-84, Roma: Cnr Edizioni, 2020, ISBN:978 88 8080 408 6

Pergalani F., Pagliaroli A., Bourdeau C., Compagnoni M., Lenti L., Lualdi M., Madiai C., Martino S., Razzano R., Varone C., Verrubbi V., 2020. Seismic microzoning map: approaches, results and applications after the 2016-2017 Central Italy seismic sequence. Bulletin of Earthquake Engineering, 18, 5595-5629. https://doi.org/10.1007/s10518-019-00640-1

Pignone M., Moschillo R., Nardi A., Castello B., Nostro B., Margheriti L., 2024. Carta della sismicità in Italia 1999-2024. Osservatorio Nazionale Terremoti, INGV

Pinzón L.A., Pujades L.G., Macau A., Figueras S., 2019. Increased seismic hazard in Barcelona (Spain) due to soil-building resonance effects. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 117, 245-250. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.022

Rompato M., 2024. Modellazione geologica 3D in contesti urbani: i casi studio di Roma e Cassino. Tesi di dottorato. Corso di dottorato in Metodi, Modelli e Tecnologie per l'Ingegneria – XXXVI Ciclo. Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (DICeM)

Roten D., Fäh D., 2007. A combined inversion of Rayleigh wave dispersion and 2-D resonance frequencies. Geophys. J. Int. 168, 1261–1275. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03260.x

Rovida A., Locati M., Antonucci A., Camassi R., 2017. Archivio Storico Macrosismico Italiano (ASMI). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/asmi

Rovida A., Locati, M., Antonucci A., Camassi R., 2025. The Italian Archive of Historical Earthquake Data, ASMI. Earth System Science Data, 17(6), 3109–3124. https://doi.org/10.5194/essd-17-3109-2025

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A., 2022. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0. https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4

Sabetta F., Paciello A., 1995. Valutazione della pericolosità sismica. In La geologia di Roma. Il centro storico. Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, Vol. 50/1995, pp. 443-449

Sabetta F., Pugliese A., 1987. Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from italian strong-motion records. Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 77, 1491-1513. https://doi.org/10.1785/BSSA0770051491

Salsabili M., Saeidi A., Rouleau A., Nastev M., 2021. Seismic microzonation of a region with complex surficial geology based on different site classification approaches. Geoenviron Disasters 8, 27 (2021). https://doi.org/10.1186/s40677-021-00198-8

Saroli M., Albano M., Giovinco G., Casale A., Dell'Isola M., Lancia M., Petitta M., 2019a. A Macroscale Hydrogeological Numerical Model of the Suio Hydrothermal System (Central Italy). Geofluids 2019, 1–16. https://doi.org/10.1155/2019/5485068

Saroli M, Albano M., Milana G., Moro M., Modoni G., Spacagna R.L., Croce P., Stramondo S., Tolomei C., 2019. A multidisciplinary approach for the seismic characterization of the Cassino plain (central Italy)

Saroli M., Albano M., Modoni G., Moro M., Milana G., Spacagna R.L., Falcucci E., Gori S., Scarascia Mugnozza G., 2020. Insights into bedrock paleomorphology and linear dynamic soil properties of the Cassino intermontane basin (Central Italy). Eng. Geol. 264, 105333. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105333

Saroli M., Di Luzio E., Biasini A., Cavinato G.P., 2003. Geological Setting of the Southern Sector of the Roveto Valley (Central Appennines, Italy). Boll.- Soc. Geol. Ital. 122, 467–481

Saroli M., Lancia M., Albano M., Casale A., Giovinco G., Petitta M., Zarlenga F., dell'Isola M., 2017. A hydrogeological conceptual model of the Suio hydrothermal area (central Italy). Hydrogeol. J. 25, 1811–1832. https://doi.org/10.1007/s10040-017-1549-5

Saroli M., Lancia M., Petitta M., 2019b. The geology and hydrogeology of the Cassino plain (central Apennines, Italy): redefining the regional groundwater balance. Hydrogeol. J. 27, 1563–1579. https://doi.org/10.1007/s10040-019-01953- w

Saroli M., Moro M.; 2012: San Pietro Infine Basin. Field–trip guidebook. In: 16th Joint Geomorphological Meeting. Rome, Italy, July 1-5

Scarascia Mugnozza G., Martino S., Salvatori L., Morrone R., Skrame K., Hailemikael S., Bruni L., Lancia M., Porchia A., Martini G., Paciello A., Paolini S., Peloso A., Verrubbi V., Saroli M., Albano M., Modoni G., 2012. Relazione illustrativa microzonazione sismica di 1° livello

Scrocca D., Carminati E., Doglioni C., Procaccianti D., 2012. Tyrrhenian Sea, in: Regional Geology and Tectonics: Phanerozoic Passive Margins, Cratonic Basins and Global Tectonic Maps. Elsevier, pp. 472–485. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56357-6.00012-3

Selbach H.S. Chronica. MGH, SS. RR.GG. Tomo I

Sgattoni G., Castellaro S., 2020. Detecting 1-D and 2-D ground resonances with a single-station approach. Geophys. J. Int. (2020) 223, 471–487. doi: 10.1093/gji/ggaa325

Sgobba S., Felicetta C., Russo E., D'Amico M., Lanzano G., Pacor F., Luzi L., Baraschino R., Baltzopoulos G., Iervolino I., 2021. The online graphical user interface of REXELweb for the selection of accelerograms from the engineering strong motion database (ESM). Atti del 39° convegno online GNGTS 22-24 giugno 2021

Smeraglia L., Bernasconi S.M., Berra F., Billi A., Boschi C., Caracausi A., Carminati E., Castorina F., Doglioni C., Italiano F., Rizzo A.L., Uysal I.T., Zhao J., 2018. Crustal-scale fluid circulation and co-seismic shallow comb- veining along the longest normal fault of the central Apennines, Italy. Earth Planet. Sci. Lett. 498, 152–168. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.06.013

Stacec s.r.l., 2024. Local Seismic Response 2D (LSR2D). Manuale utente versione 5.0

Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Crowley H., Calvi G.M., Boschi E., 2011. Seismic Hazard Assessment (2003-2009) for the Italian Building Code. Bull. Seismol. Soc. Am. 101(4), 1885-1911. DOI: 10.1785/0120100130

Tabatabaie M., Mansour S.C., 1998. Analysis of Soil-Structure Interaction Due to Ambient Vibration. UCRL-JC-130342

Tallini M., Morana E., Guerriero V., Di Giulio G., Vassallo M., 2024. Seismic Microzonation mapping for urban and land sustainable planning in high seismicity areas (L'Aquila Municipality, Central Italy): the contribution of 2D modeling for the evaluation of the amplification factors. Sustainability, 16, 8401. https://doi.org/10.3390/su16198401

Tallini M., Lo Sardo L., Spadi M., 2020. Seismic site characterisation of Red Soil and soil-building resonance effects in L'Aquila downtown (Central Italy). Bull Eng Geol Environ 79, 4021–4034. https://doi.org/10.1007/s10064-020-01795-x

Tavani S., Cardello G.L., Vignaroli G., Balsamo F., Parente M., Sabbatino M., Raffi I., Billi A., Carminati E., 2021. Segmentation of the Apenninic Margin of the Tyrrhenian Back-Arc Basin Forced by the Subduction of an Inherited Transform System. Tectonics 40, e2021TC006770. https://doi.org/10.1029/2021TC006770

Trevisani S., Boaga J., Agostini L., Galgaro A., 2017. Insights into bedrock surface morphology using low-cost passive seismic surveys and integrated geostatistical analysis. Science of The Total Environment, Volume 578, Pages 186-202, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.041

Van Noten K., Lecocq T., Goffin C., Meyvis B., Molron J., Debacker T.N., Devleeschouwer X., 2022. Brussels' bedrock paleorelief from borehole-controlled power laws linking polarised H/V resonance frequencies and sediment thickness. J Seismol 26, 35–55 (2022). https://doi.org/10.1007/s10950-021-10039-8

Vassalli P., 1949. Storia di Atina

Wathelet M.; Chatelain J.-L.; Cornou C.; Di Giulio G.; Guillier B.; Ohrnberger M., Savvaidis A., 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. Seismol. Res. Lett., 91(3), 1878-1889

Wu Q., Xu H., Zou X., 2005. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration. Computers & Geosciences vol. 31, issue 1, pp 35–43. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.09.005

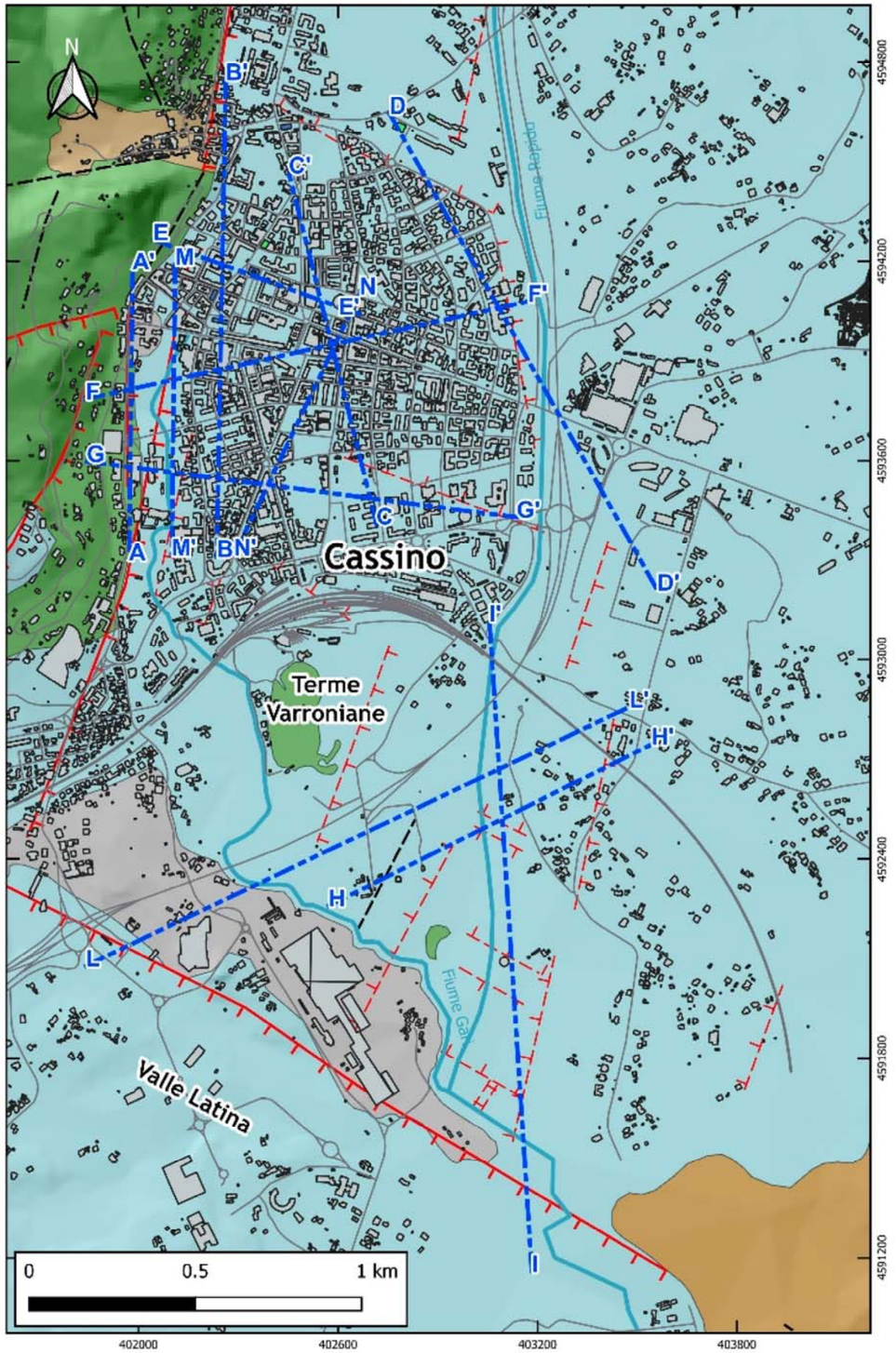
Xu R., Wang l., 2021. The horizontal-to-vertical spectral ratio and its applications. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2021:75. https://doi.org/10.1186/s13634-021-00765-z

Yamin L.E., Reyes J.C., Rueda R., Prada E., Rincon R., Herrera C., Daza J., Riaño A.C., 2018. Practical seismic microzonation in complex geological environments. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 114, pp 480–494. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.030

APPENDICE A

TAVOLE DELLE SEZIONI PER LA MODELLAZIONE GEOLOGICA

UBICAZIONE DELLE TRACCE DELLE SEZIONI UTILIZZATE PER LA MODELLAZIONE GEOLOGICA



Complesso continentale e complesso vulcanico – Argilla limosa, sabbia limosa e ghiaia (Pleistocene-Olocene)

Complesso travertinoso – Travertino (Pleistocene med. – Pleistocene sup.)

Complesso marino delle unità del flysch argilloso-arenaceo con argille varicolori - Flysch (Tortoniano – Messiniano)

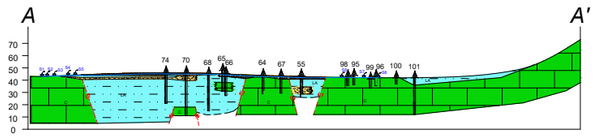
Complesso marino di piattaforma carbonatica – Calcare (Lias inf. – Tortoniano inf.)

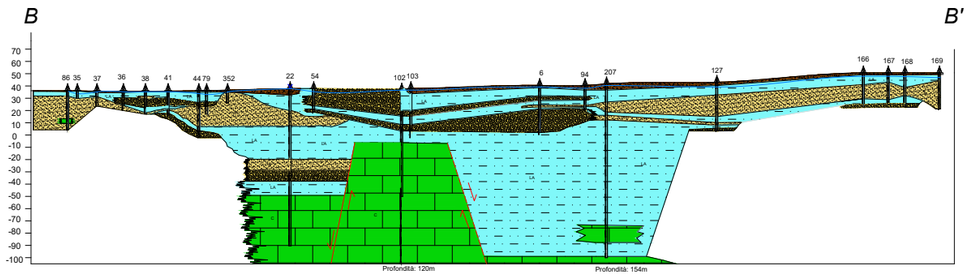
Faglia diretta

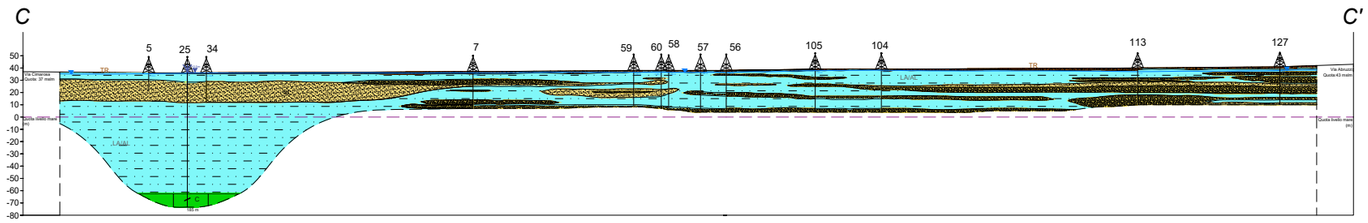
Faglia diretta presunta

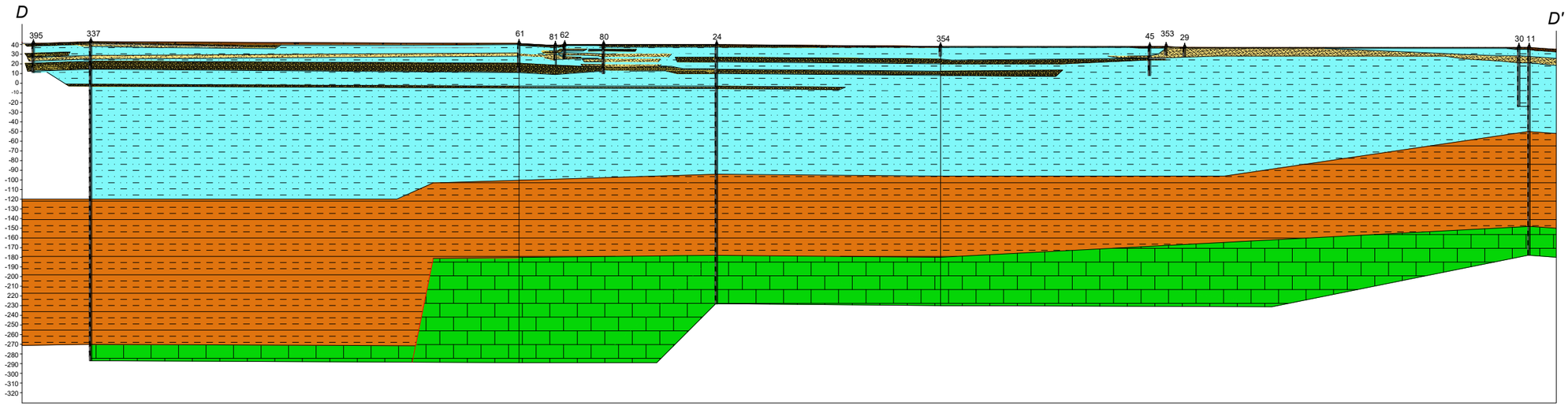
Faglia presunta

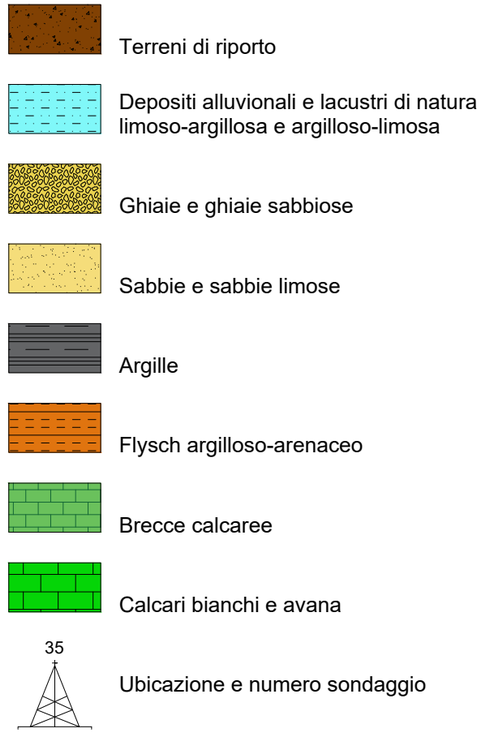
Tracce delle sezioni analizzate


A
A'

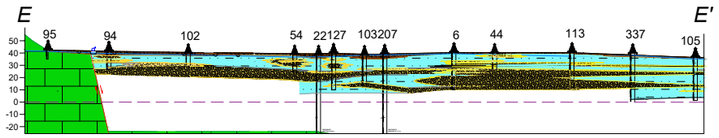

B
B'
Profondità: 120m
Profondità: 154m

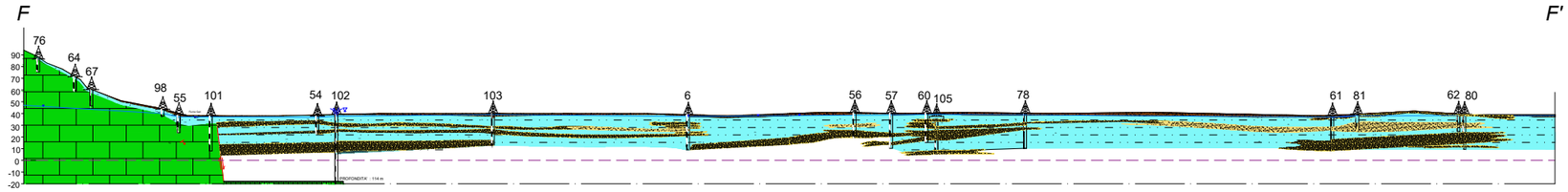

C
C'

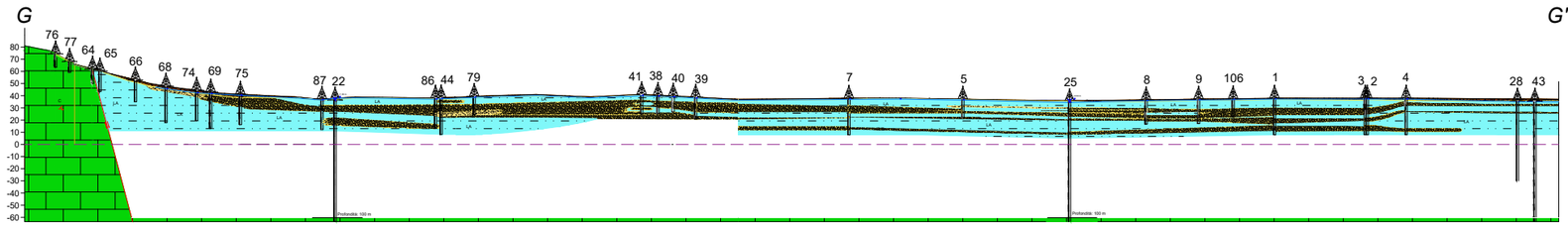

D
D'

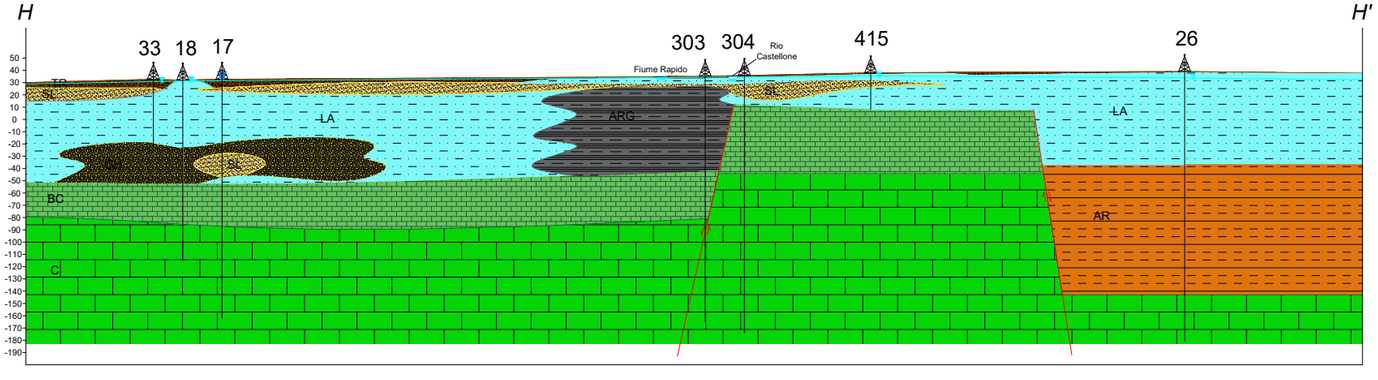

Terreni di riporto
Depositi alluvionali e lacustri di natura limoso-argillosa e argilloso-limosa
Ghiaie e ghiaie sabbiose
Sabbie e sabbie limose
Argille
Flysch argilloso-arenaceo
Brecce calcaree
Calcari bianchi e avana
35
Ubicazione e numero sondaggio

Scala 1:5.000









Terreni di riporto

Depositi alluvionali e lacustri di natura limoso-argillosa e argilloso-limosa

Ghiaie e ghiaie sabbiose

Sabbie e sabbie limose

Argille

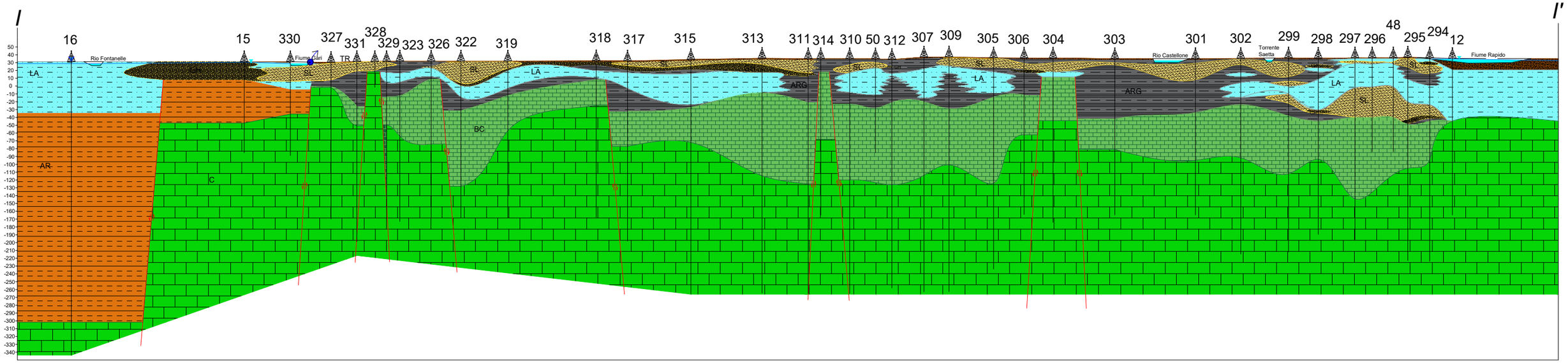
Flysch argilloso-arenaceo

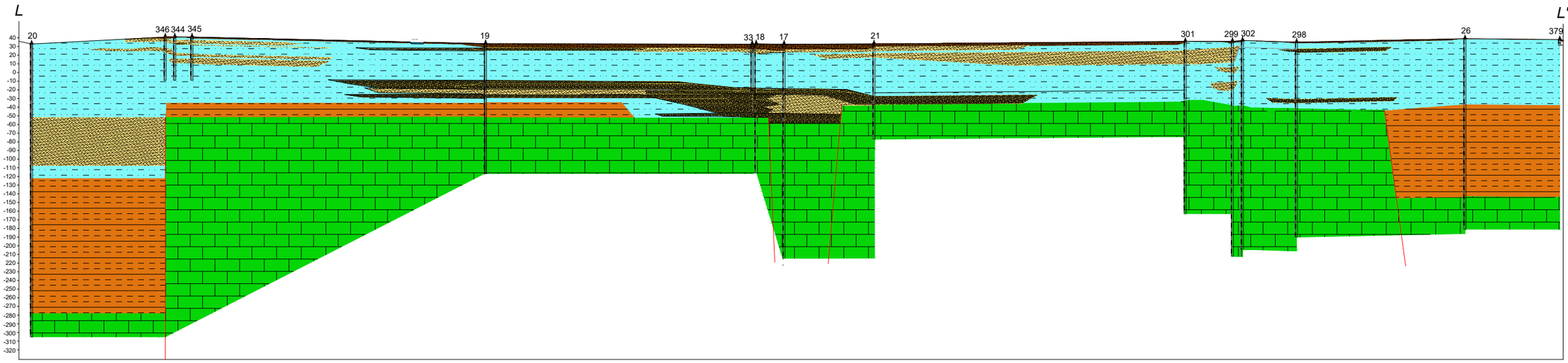
Brecce calcaree

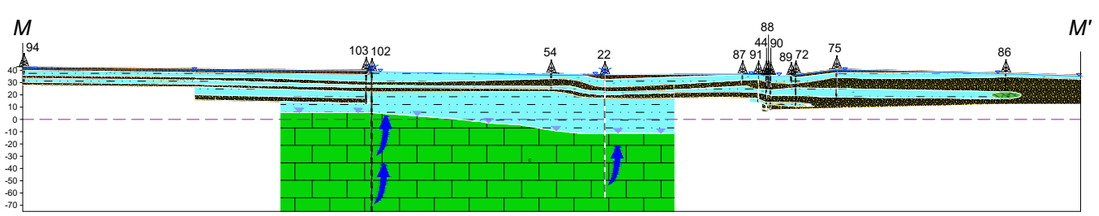
Calcari bianchi e avana

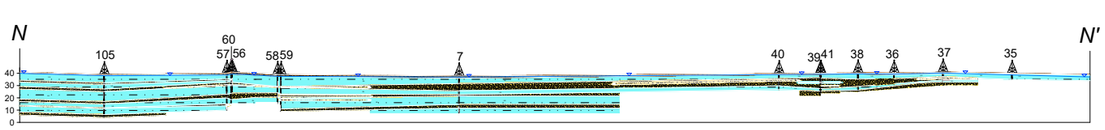
Ubicazione e numero sondaggio

Scala 1:5.000









Terreni di riporto

Depositi alluvionali e lacustri di natura limoso-argillosa e argilloso-limosa

Ghiaie e ghiaie sabbiose

Sabbie e sabbie limose

Argille

Flysch argilloso-arenaceo

Brecce calcaree

Calcari bianchi e avana

35 Ubicazione e numero sondaggio

Scala 1:5.000