PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

RegioneEmiliaRomagna

CONFERENZA DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

III LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

RELAZIONE ILLUSTRATIVA

Regione Emilia-Romagna

Comune di Voghiera



Regione:	Soggetto realizzatore:	Data:
Emilia Romagna	Dott. Geol.Thomas Veronese Collaboratori: Dott. Geol. Lunghi Luca Dott.ssa Geol. Franciosi Sara Indagini Geofisiche: Prof. Nasser Abu Zeid Cartografia GIS: Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli	Settembre 2023 Integrazioni: Luglio 2024

Gruppo di lavoro:

Microzonazione sismica di III livello:
Dott. Geol. Thomas Veronese

Indagini geofisiche e interpretazione dati geofisici
Dott. Geol. Nasser Abu Zeid

Indagini geologiche in situ:
Dott. Geol. Thomas Veronese

Cartografia e progetto GIS:
Dott. Geol. Claudia Tomassoli

Collaboratori
Dott. Geol. Sara Franciosi
Dott. Geol. Luca Lunghi

INDICE:

1. INTRODUZIONE ... 3

1.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO ... 7
1.2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO ... 8

2. PERIMETRAZIONE DELLE AREE IN CUI EFFETTUARE GLI STUDI DI III LIVELLO ... 9

3. ELEMENTI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE PIÙ APPROFONDITA DELLA RSL ... 13

3.1. INDAGINI GEOLOGICHE E MODELLI STRATIGRAFICI ... 15
3.1.1. ELENCO INDAGINI ESISTENTI ... 15
3.1.2. ELENCO NUOVE INDAGINI ... 16
3.1.3. MODELLO GEOLOGICO PROFONDO DI RIFERIMENTO ... 29
3.1.4. MODELLO GEOLOGICO SUPERFICIALE ... 30
3.1.5. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE INDAGINI ... 32
3.1.6. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA GEOLOGICO TECNICA ... 34
3.1.7. CARTA DELLE FREQUENZE NATURALI F_0 DEL TERRENO ... 35
3.1.8. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA MOPS ... 36
3.1.9. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S (Vs) ... 41
Misure dirette mediante sismocono ... 41
Indagini geofisiche ... 42
3.2. SEGNALI DI INPUT PER ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE ... 46

4. ANALISI DELLA RSL PER AMBITI DI STUDIO – MODELLI DI INPUT ... 49

4.1. CURVE DI DECADIMENTO DEL MODULO DI TAGLIO G_0 E DI SMORZAMENTO D. ... 59
4.2. SINTESI DEI RISULTATI – MODELLI DI OUTPUT ... 74
4.2.1. AREA PRODUTTIVA GUALDO-DUCENTOLA ... 74
4.2.2. DUCENTOLA centro abitato interno al paleoalveo ... 76
4.2.3. GUALDO centro abitato esterno al paleoalveo ... 77
4.2.4. VOGHENZA centro abitato interno al paleoalveo ... 79
4.2.5. VOGHENZA centro abitato esterno al paleoalveo ... 80
4.2.6. VOGHIERA centro abitato interno al paleoalveo ... 81
4.2.7. VOGHIERA centro abitato esterno al paleoalveo ... 83
4.2.8. MONTESANTO centro abitato esterno al paleoalveo ... 84
4.3. CALCOLO DEGLI HSM E SINTESI RISULTATI ... 85

5. CARTE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ... 91

5.1. CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE IN TERMINI DI P.G.A. ... 91
5.2. CARTE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE IN TERMINI DI S.A. ... 92
5.3. CARTE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE IN TERMINI DI S.I. ... 95
5.4. CARTE DELLA DISTRIBUZIONE SUL TERRITORIO DEI VALORI DI HSM ... 98

6. ANALISI DELLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE E CALCOLO INDICE DI LIQUEFAZIONE 102

6.1. METODO DI ANALISI ... 102
6.2. CARTA DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE ... 113

7. ANALISI DEL LATERAL SPREADING ... 119

8. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE ... 125

9. CONCLUSIONI ... 132

1. INTRODUZIONE

Su incarico dell'amministrazione comunale di Voghiera si sono condotte le Indagini di microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Voghiera - CUP J42C21002560007 – l'incarico è stato conferito con determina dirigenziale di affidamento n. 270 del 20/12/2022.

Le attività di microzonazione sismica nel territorio regionale sono regolate da specifici indirizzi approvati con Delibera di Assemblea Legislativa n. 112/2007 e aggiornati con Delibera di Giunta Regionale n. 2193/2015, Delibera di Giunta Regionale n. 630/2019 (Allegato 4) e D.G.R. n. 476 del 12 aprile 2021 Aggiornamento dell'Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017), di cui alla deliberazione della Giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630" e sua integrazione D.G.R. n. 564 del 26/04/2021.

La legge n. 145 del 30 dicembre 2018, recante «Bilancio di previsione dello Stato per l'anno finanziario 2019 e bilancio pluriennale per il triennio 2019-2021» e la relazione tecnica collegata - sezione II, recante i rifinanziamenti previsti ai sensi dell'art. 23, comma 3,lettera b) della legge n. 196 del 2009 nella medesima legge n. 145 del 2018 ed in particolare la terza riga, nonché la Tabella 2 del decreto del Ministero dell'economia e delle finanze 31 dicembre 2018, recante «Ripartizione in capitoli delle Unità elementari di voto parlamentare relativo al bilancio di previsione dello Stato per l'anno 2019 e per il triennio 2019-2021», prevedono il rifinanziamento del Fondo per la prevenzione del rischio sismico per € 50.000.000 per ciascuna delle annualità 2019, 2020 e 2021.

Questo studio di Microzonazione sismica di terzo livello viene realizzato con i fondi attribuiti con la Delibera della Giunta Regionale N. 1885 del 15 novembre 2021, "APPROVAZIONE DEI CRITERI PER L'ATTRIBUZIONE, LA CONCESSIONE E LA LIQUIDAZIONE DI CONTRIBUTI E PER LA REALIZZAZIONE E PRESENTAZIONE DEGLI ELABORATI RELATIVI A STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA.".

REGIONE EMILIA-ROMAGNA
Atti amministrativi
GIUNTA REGIONALE
Delibera Num. 1885 del 15/11/2021
Seduta Num. 52

Proposta:	GPG/2021/1963 del 09/11/2021
Struttura proponente:	SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI DIREZIONE GENERALE CURA DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE
Assessorato proponente:	ASSESSORE ALLA MONTAGNA, AREE INTERNE, PROGRAMMAZIONE TERRITORIALE, PARI OPPORTUNITA'
Oggetto:	OCDPC 20 MAGGIO 2021, N. 780 - ATTUAZIONE DELL'ART.2, COMMA 1, LETT. A) E COMMA 2. APPROVAZIONE DEI CRITERI PER L'ATTRIBUZIONE, LA CONCESSIONE E LA LIQUIDAZIONE DI CONTRIBUTI E PER LA REALIZZAZIONE E PRESENTAZIONE DEGLI ELABORATI RELATIVI A STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA.
Iter di approvazione previsto:	Delibera ordinaria

La determinazione del responsabile del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli n. 21384 del 27/11/2020 avente ad oggetto "O.C.D.P.C. 675/2020: approvazione elenco degli Enti Locali destinatari ed elenco degli Enti Locali esclusi dai contributi per studi di MS e analisi della condizione limite di emergenza di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 675/2020, in attuazione della delibera di Giunta della Regione Emilia- Romagna n. 1238/2020".

Prov.	Ente richiedente	Comune	Tipo di studio richiesto	Domanda (protocollo RER)
PC	Comune di Castell'Arquato	Castell'Arquato	MS3	Prot. 09/11/2020.0738867.E
PR	Comune di Busseto	Busseto	MS3	Prot. 09/11/2020.0741375.E
	Comune di Fontanellato	Fontanellato	MS3	Prot. 12/10/2020.0657486.E
RE	Comune di Campagnola Emilia	Campagnola Emilia	MS3	Prot. 02/11/2020.0705540.E
	Comune di Casina	Casina	MS3	Prot. 30/10/2020.0701544.E
	Comune di Rolo	Rolo	MS3	Prot. 05/11/2020.0727116.E
MO	Comune di Bomporto	Bomporto	MS3	Prot. 23/10/2020.0683246.E
	Comune di Ravarino	Ravarino	MS3	Prot. 10/11/2020.0742799.E
FE	Comune di Voghiera	Voghiera	MS3	Prot. 28/10/2020.0694128.E
RN	Unione dei Comuni della Valconca	Gemmano	MS3	Prot. 05/11/2020.0726040.E
		Mondaino	MS3	
		Montefiore Conca	MS3	
		Montegridolfo	MS3	
		Morciano Di Romagna	MS3	
		Saludecio	MS3	
		San Clemente	MS3	
		Montescudo-Monte Colombo	MS3	

Il lavoro è basato sulla Microzonazione **sismica di 2 livello e analisi della Condizione Limite per l'emergenza (CLE)**, di cui alla D.G.R. n. 2193 del 21/12/2015, D.G.R., i fondi per questo studio sono stanziati dalla REGIONE EMILIA-ROMAGNA - Atti amministrativi - GIUNTA REGIONALE - Atto del Dirigente a firma unica DETERMINAZIONE - Num. 8757 del 05/06/2017 BOLOGNA e **validata in data 09 Settembre 2019**.

Gli studi di microzonazione sismica hanno l'obiettivo di provare a prevedere le alterazioni che lo scuotimento sismico può indurre in superficie, restituendo informazioni utili per il governo del territorio, per la progettazione, per la pianificazione per l'emergenza e per la ricostruzione post sisma.

Nella pianificazione territoriale, in funzione delle varie scale e dei vari livelli di intervento, gli studi di microzonazione sismica sono condotti su quelle aree per le quali il quadro normativo consente o prevede l'uso a scopo edificatorio o per infrastrutture, la loro potenziale trasformazione a tali fini, o ne preveda l'uso ai fini di protezione civile.

Gli studi di microzonazione sismica sono di fondamentale importanza nella pianificazione al fine di:

- orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti;
- definire gli interventi ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento;
- stabilire orientamenti e modalità di intervento nelle aree urbanizzate;
- definire priorità di intervento.

Tutto ciò è oggetto degli studi di microzonazione sismica, attraverso i quali è possibile individuare e caratterizzare le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale e le zone soggette a instabilità, quali frane, rotture della superficie per faglie e liquefazioni dinamiche del terreno.

Nella pianificazione d'emergenza, sia di livello comunale che provinciale, gli studi di microzonazione sismica consentono una migliore e consapevole individuazione degli elementi strategici di un piano di emergenza ed in generale delle risorse di protezione civile.

La conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

• scegliere aree e strutture di emergenza ed edifici strategici in zone stabili;

• individuare, in caso di collasso, i tratti "critici" delle infrastrutture viarie e di servizio e le opere rilevanti per le quali potrebbero essere necessarie specifiche valutazioni di sicurezza.

Nella fase della ricostruzione la microzonazione sismica:

• contribuisce a scegliere le aree per le abitazioni temporanee;

• fornisce elementi ai tecnici e amministratori, sull'opportunità di ricostruire gli edifici non agibili;

• contribuisce a scegliere nuove aree edificabili.

Nella progettazione di nuove opere o di interventi su opere esistenti, gli studi di microzonazione sismica evidenziano la presenza di fenomeni di possibile amplificazione dello scuotimento legati alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area e di fenomeni di instabilità e deformazione permanente attivati dal sisma. Gli studi di microzonazione sismica, quindi, possono offrire elementi conoscitivi utili per la progettazione di opere, con differente incisività in funzione del livello di approfondimento e delle caratteristiche delle opere stesse, indirizzando alla scelta delle indagini di dettaglio.

Lo studio di microzonazione sismica è uno strumento conoscitivo dalle diverse potenzialità, che ha costi differenti in funzione del livello di approfondimento che si vuole raggiungere:

PRIMO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO:

- Individua le aree suscettibili di effetti locali in cui effettuare le successive indagini.
- Definisce il tipo di effetti attesi.
- Indica, per ogni area, il livello di approfondimento necessario.
- Descrive le caratteristiche delle unità geologiche del sottosuolo, in termini di litologia, stratigrafia, tettonica e geometria per definire il modello geologico di base per la MS.

SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO:

- Conferma delle condizioni di pericolosità indicate dal precedente livello di approfondimento o eventuale nuova perimetrazione delle aree in cui effettuare la MS.
- Suddivisione dettagliata del territorio in base all'amplificazione attesa.
- Conferma o migliore definizione delle aree, indicate dal livello di approfondimento precedente, in cui si ritengono necessari approfondimenti di terzo livello e indicazione delle indagini e analisi da effettuare.

TERZO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO:

- Conferma delle condizioni di pericolosità indicate dai precedenti livelli di approfondimento ed eventuale nuova perimetrazione delle aree in cui effettuare la MS.
- Valutazione più approfondita della RSL, in termini di amplificazione e/o stima degli indici di rischio, nelle seguenti situazioni:

  a) aree soggette a liquefazione e densificazione;

  b) aree instabili e potenzialmente instabili;

c) aree in cui le coperture hanno spessore fortemente variabile, come ad esempio nelle aree pedemontane e di fondovalle a ridosso dei versanti; in tali condizioni sono raccomandate analisi bidimensionali;

d) aree suscettibili di effetti differenziali (zone di contatto laterale tra litotipi con caratteristiche fisico – meccaniche molto diverse, zone di faglia attiva e capace, zone con cavità sepolte).

Questo livello di analisi è finalizzato a valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale delle aree instabili e potenzialmente instabili, di quelle soggette a liquefazione e densificazione sempre ai fini della redazione della carta di microzonazione.

Le modalità tecniche di esecuzione e di applicazione della microzonazione sismica sul territorio italiano sono definite dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica", approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome.

1.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

1. Il comune di Voghiera è compreso nella seguente cartografia:
2. - Scala 1: 50.000: Foglio 186 Copparo, Foglio 204 Portomaggiore,
3. - Scala 1: 25.000: Foglio 186 SO Copparo, Foglio 204NO Portomaggiore.
4. - Scala 1: 5.000: Foglio 186130, 204010, 204020, 204050, 204060.

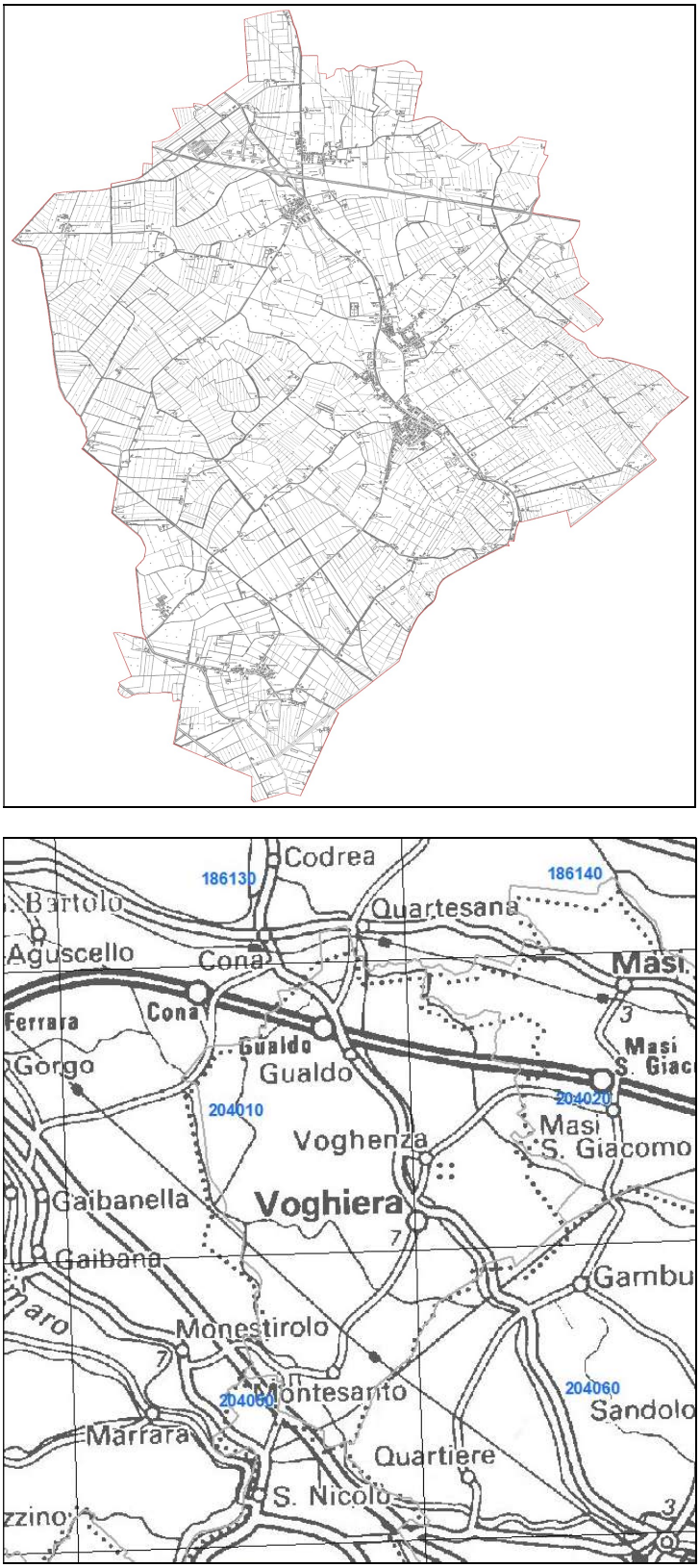


FIGURA 1 *- TERRITORIO COMUNALE DI VOGHIERA - provincia di Ferrara*

1.2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), da qui in avanti "Standard MS 4.2".
- "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008) e successive modifiche e integrazioni (AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".
- Delibera Assemblea Legislativa n°112/2007 della Regione Emilia Romagna "Atto di Indirizzo e coordinamento tecnico" per gli studi di microzonizzazione sismica.
- Deliberazione della Giunta della Regione Emilia Romagna n. 2193/2015 "Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia - Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla deliberazione dell'assemblea legislativa 2 Maggio 2007, N. 112.
- Deliberazione della Giunta della Regione Emilia Romagna n. 630/2019 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017).
- Deliberazione della Giunta Regionale 12 aprile 2021, N. 476 Aggiornamento dell' "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)" di cui alla deliberazione della Giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630
- Deliberazione della Giunta Regionale 26 aprile 2021, N. 566 "Approvazione dei criteri per l'attribuzione, la concessione e la liquidazione di contributi per studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza nei comuni caratterizzati da una pericolosità sismica a_g inferiore a 0,125g".
- Deliberazione della Giunta della Regione Emilia Romagna n. 2245/2018 "Approvazione dei criteri per la realizzazione di studi di microzonazione sismica nei comuni caratterizzati da una pericolostià sismica Ag inferiore a 0,125g in attuazione dell'art. 8 della L.R. N. 19/2008, approvazione allegati A1 e A2."
- L.R. 30/10/2008 n. 19 "Norme per la riduzione del Rischio Sismico"
- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni", pubblicato sulla G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, suppl. ord. n. 30, che entrano in vigore il 6 marzo 2008.
- Decreto del Ministero e dei Trasporti 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni", pubblicato sulla G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018, suppl. ord. n. 8.

2. PERIMETRAZIONE DELLE AREE IN CUI EFFETTUARE GLI STUDI DI III LIVELLO

La microzonazione sismica (MS) viene richiesta nelle aree urbanizzate, negli agglomerati in territorio rurale di dimensioni significative, nelle aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche e lungo le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali di nuova previsione. Le aree in cui realizzare la microzonazione sismica sono state fornite dall'amministrazione comunale.

I perimetri degli ambiti di interesse sui quali verrà realizzata la Microzonazione sismica di III Livello sono dunque gli stessi sui quali è stata sviluppata la microzonazione sismica di II livello. Lo studio di questo livello verrà dunque focalizzato su tutti i principali centri abitati del comune di Voghiera.

Le Località sui quali verrà sviluppata la Microzonazione Sismica di terzo livello sono riportate nelle seguenti immagini di **FIGURA 2.1**, **2.2**, **2.3**, **2.4**, **2.5** e **2.6**.

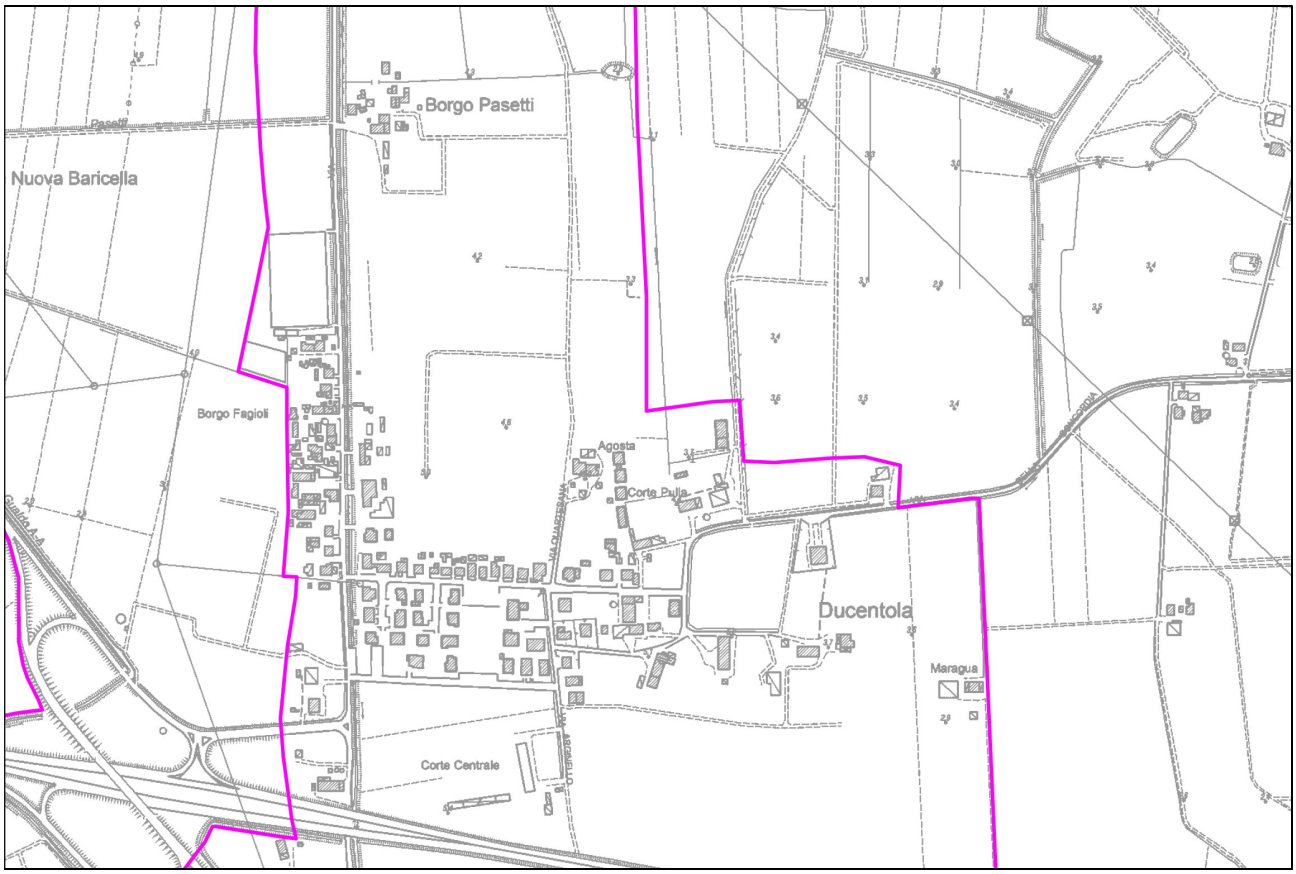


FIGURA 2-1 *DUCENTOLA*

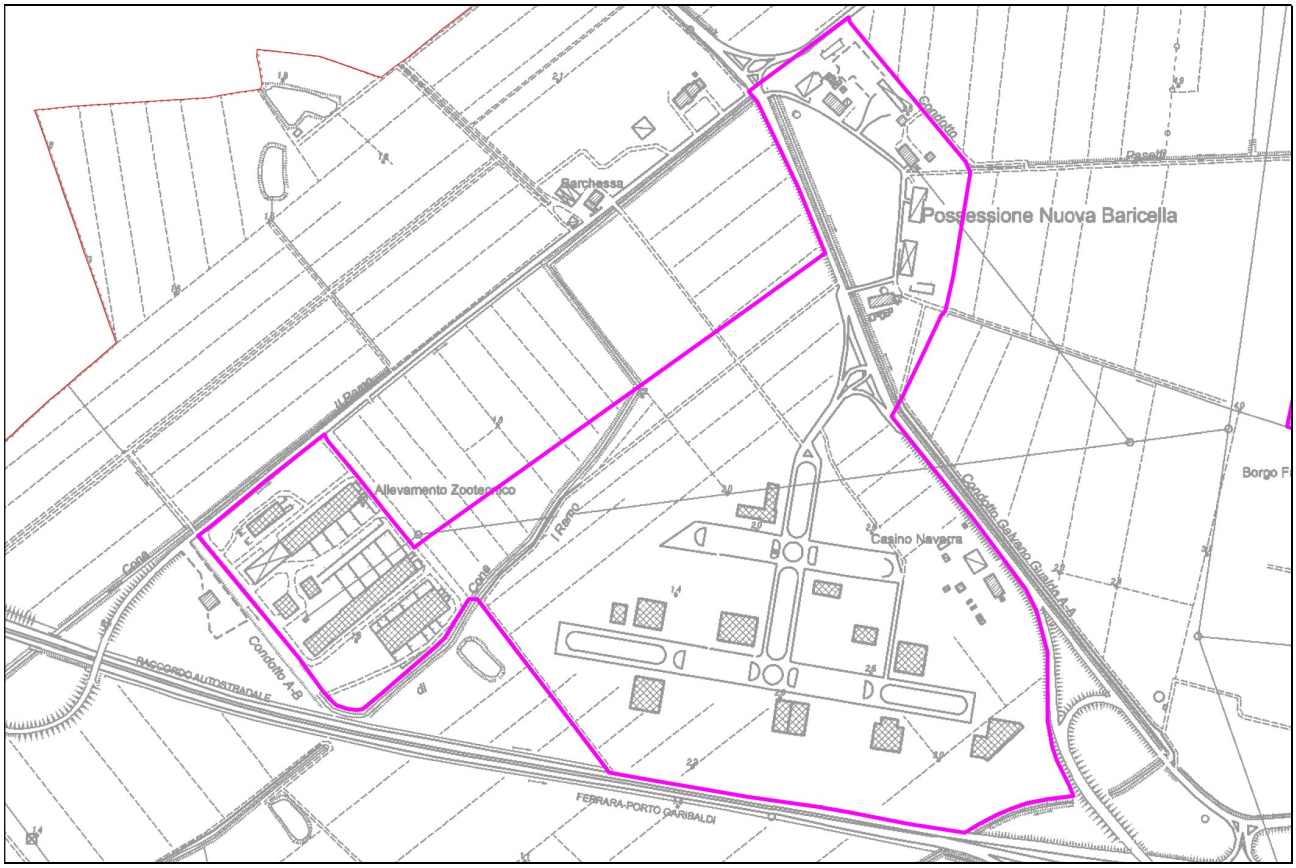


FIGURA 2-2 *ZONA PRODUTTIVA GUALDO*

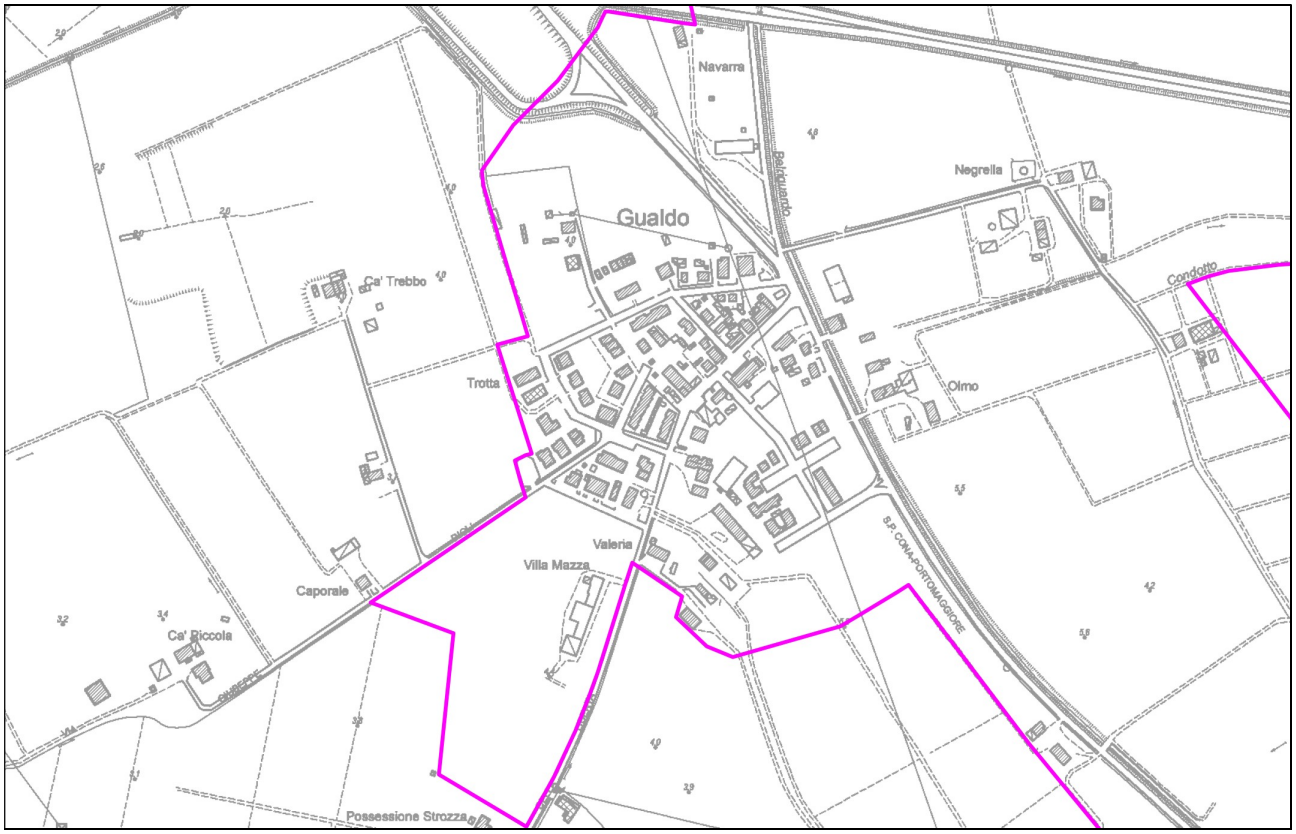


FIGURA 2-3 *GUALDO*

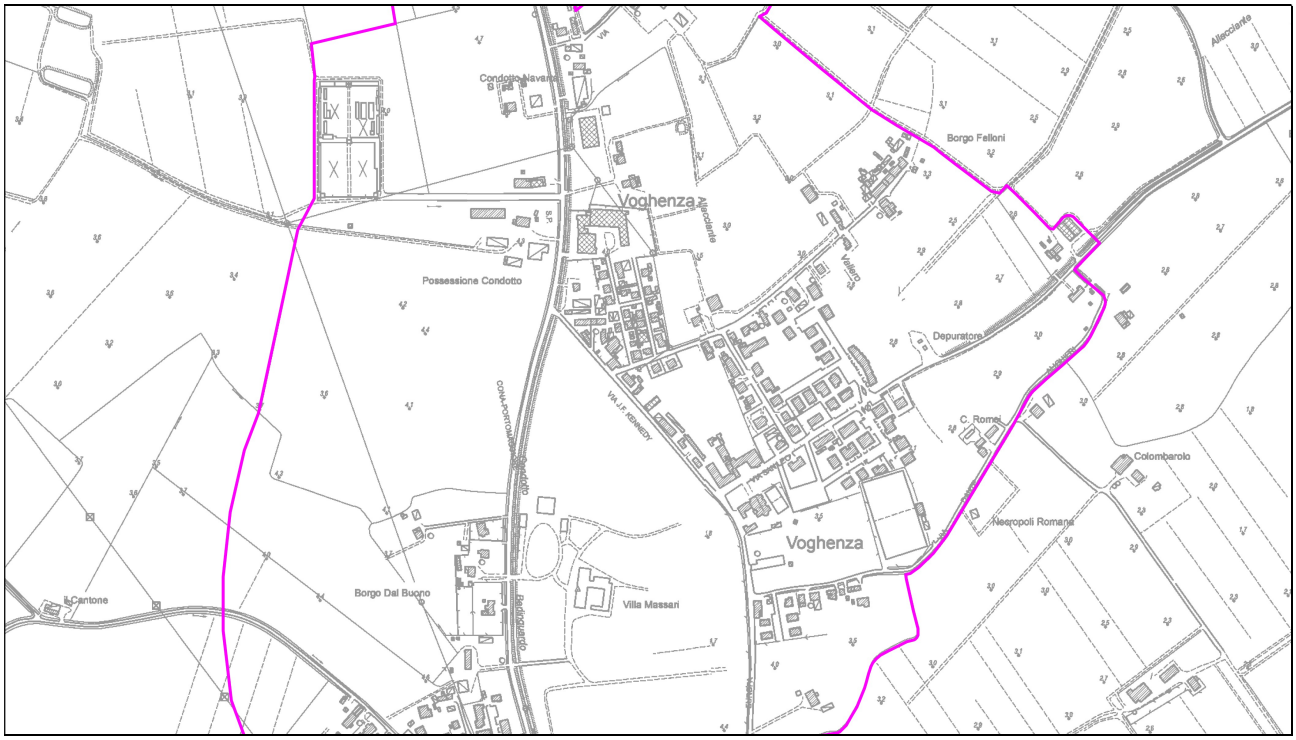


FIGURA 2-4 *VOGHENZA*

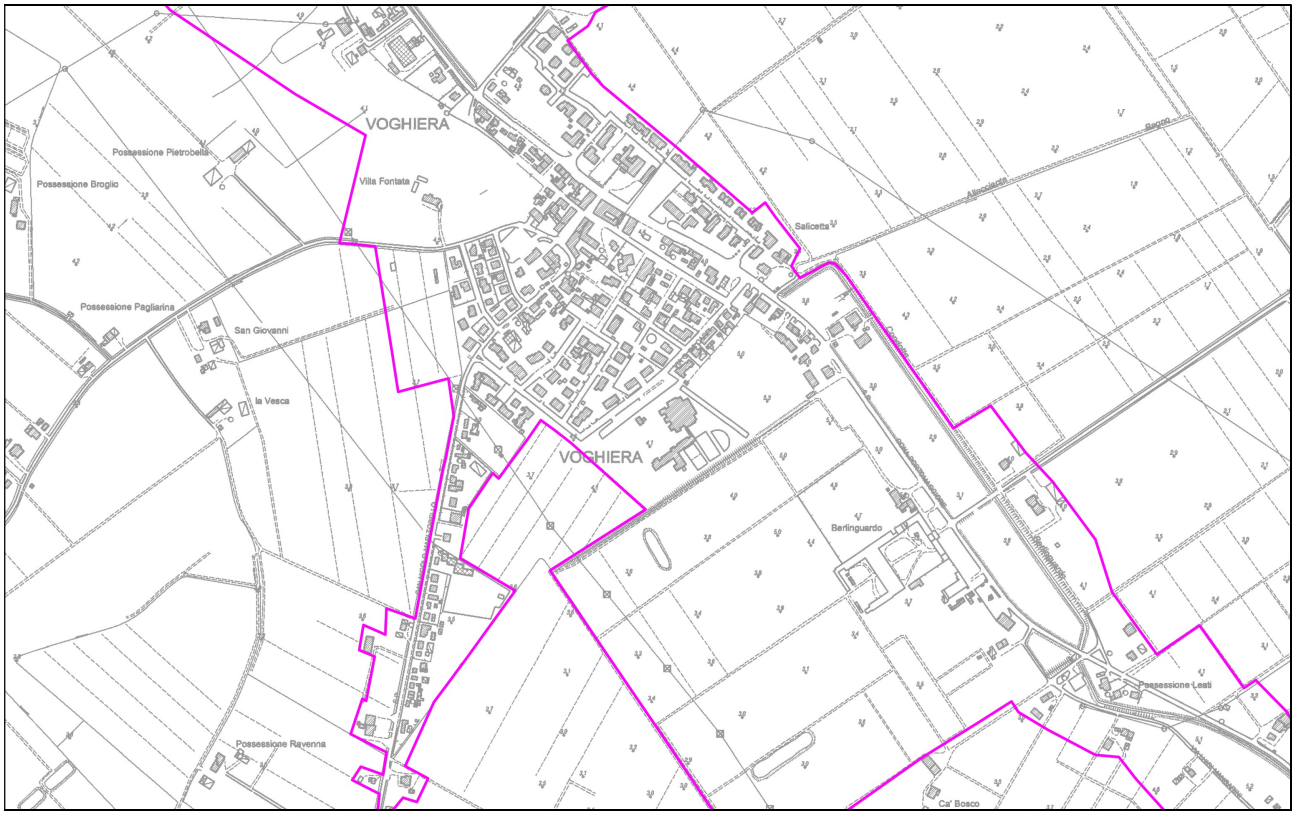


FIGURA 2-5 *VOGHIERA*

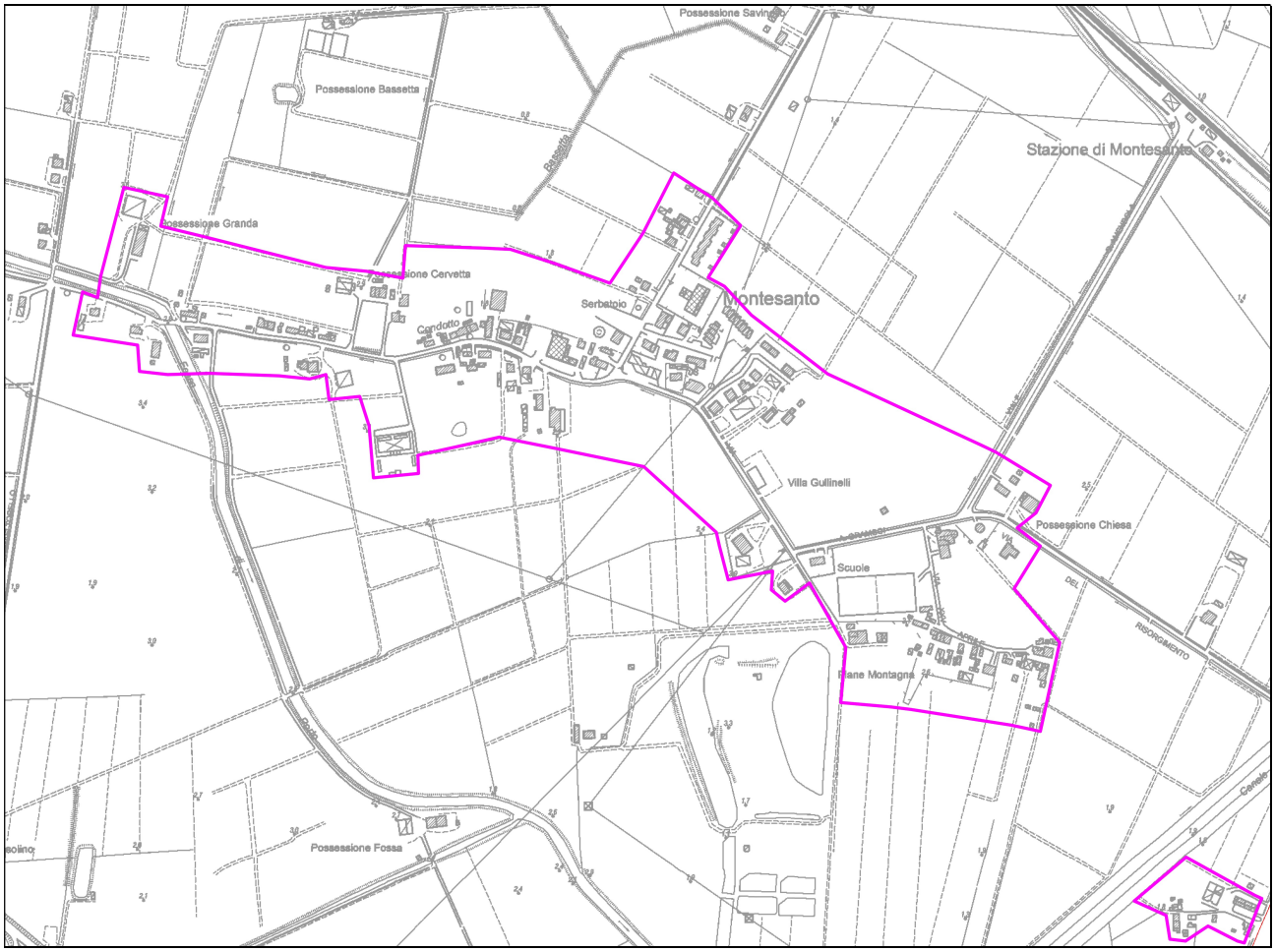


FIGURA 2-6 *MONTESANTO*

3. ELEMENTI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE PIÙ APPROFONDITA DELLA RSL

La finalità del terzo livello di approfondimento deve confermare o meno, le condizioni di pericolosità indicate dai precedenti livelli di approfondimento.

Questa valutazione deve avvenire mediante uno studio di risposta sismica locale, in modo da pervenire ad una più approfondita determinazione dei fattori di amplificazione, con cui poi procedere alla stima degli indici di rischio, che nel comune di Voghiera interessano, sulla base dei precedenti livelli di micro zonazione sismica, le aree soggette a liquefazione e densificazione.

Negli studi precedenti era emerso la presenza diffusa dei caratteri predisponenti alla liquefazione delle sabbie, in quanto presenti in affioramento quasi ovunque sabbie limose di battigia sciolte, di deposizione recente, tardo olocenica, sature di acqua di falda, quasi sempre sub affiorante.

Questo livello di analisi è quindi finalizzato a valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale delle aree potenzialmente soggette a liquefazione, andando ad approfondire gli studi sulle cause scatenanti l'effetto di sito della liquefazione delle sabbie sature

Gli ambiti in cui sono presenti criticità geologiche che richiedono il terzo livello di approfondimento erano già state individuate attraverso il primo livello di analisi, nella Carta delle aree suscettibili di effetti locali o delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).

Per ogni località abitata all'interno degli ambiti si svilupperà un calcolo della funzione di amplificazione attraverso l'analisi della risposta sismica locale RSL.

La funzione di amplificazione di un sito fornisce una chiara ed efficace rappresentazione dell'effetto "filtrante" di un deposito di terreno sulle onde sismiche. Essa mette in evidenza in quale campo di frequenze la presenza del terreno può indurre effetti significativi di amplificazione del moto sismico incidente o, viceversa, se tali effetti possano addirittura tradursi in un'attenuazione delle ampiezze in superficie.

La conoscenza della sola funzione di amplificazione non è comunque sufficiente per determinare le caratteristiche del moto sismico alla superficie di un deposito. In termini applicativi, scopo finale di un'analisi di risposta sismica locale è infatti quello di disporre di uno spettro di risposta dell'accelerazione (associato ad un terremoto presunto ed ad un dato fattore di smorzamento strutturale), che includa realisticamente l'effetto di amplificazione del sottosuolo. Ciò premesso la funzione di amplificazione (o meglio la funzione di trasferimento) rappresenta comunque un indispensabile elemento per determinare il moto in superficie.

Si riporta in **FIGURA 3.1** lo schema del processo che porta alla determinazione del moto sismico alla superficie di un deposito di terreno su basamento roccioso, a cui è applicata l'eccitazione sismica rappresentata, anziché da un'onda armonica stazionaria, da un moto irregolare come nel caso di un sisma reale.

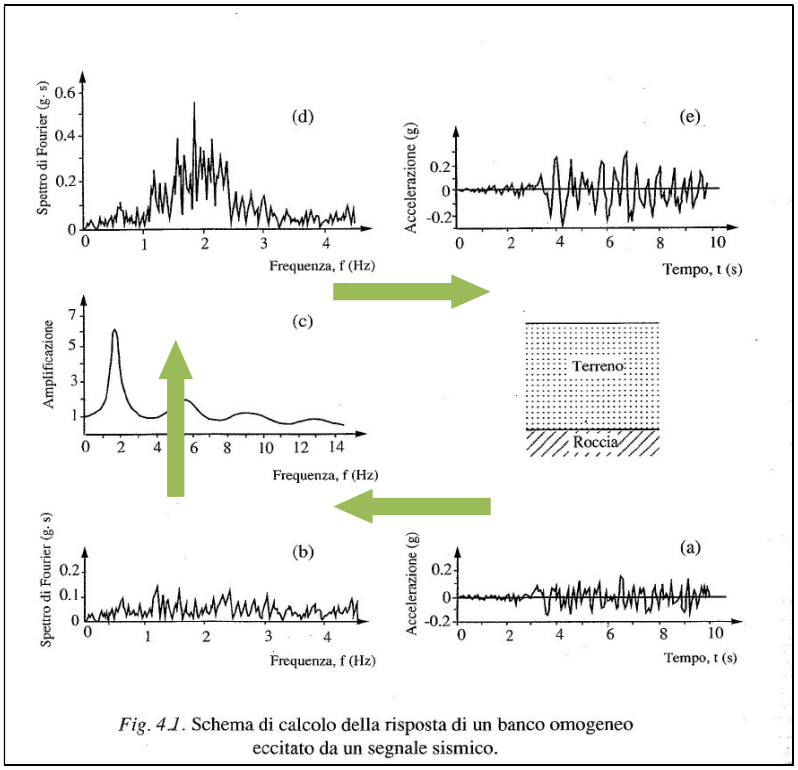


Fig. 4.1. Schema di calcolo della risposta di un banco omogeneo eccitato da un segnale sismico.

FIGURA 3-1

Per procedere a questo tipo di studio serve:

a. modello geologico stratigrafico di dettaglio dei primi 30m/40m di terreno;
b. profilo di Vs di dettaglio dei primi 30m/40m;
c. profilo di Vs profondo fino al bedrock sismico;
d. modello geologico stratigrafico di dettaglio fino al bedrock sismico;
e. curve sitospecifiche di decadimento del modulo Go, espresse attraverso il rapporto G/Go, e curve di smorzamento D ricavati da prove di colonna risonante, o prove triassiali cicliche, per i terreni campionati nei primi 30m/40m;
f. curve bibliografiche idonee di Go e D, da attribuire ai terreni profondi fino al bedrock sismico.
g. gruppo di 7 accelerogrammi spettro compatibili per la definizione del moto sismico al bedrock.

I dati da ricercare sono evidenziati nei paragrafi successivi.

3.1. INDAGINI GEOLOGICHE E MODELLI STRATIGRAFICI

Nel territorio comunale di Voghiera sono presenti numerose tipologie di indagini geognostiche, prese in considerazione ed analizzate, per le finalità del presente lavoro di microzonazione sismica. Esse sono raccolte e archiviate nel database prodotto per la micro zonazione sismica di II livello approvata nel 2019; la loro ubicazione è riportata nella carta delle indagini.

Le diverse indagini presenti sul territorio comunale sono costituite dunque da sondaggi a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo, per l'eventuale perforazione di pozzi sia per acqua che per idrocarburi, da penetrometrie statiche sia a punta meccanica (CPT) sia a punta elettrica con piezocono ed eventualmente con sismocono (CPTU e SCPTU) e da prove geofisiche da superficie con stendimenti sismici (MASW, Re.Mi., ESAC) e prove a stazione singola (HVSR).

Per la redazione del Terzo livello di approfondimento, si è reso necessario eseguire ulteriori indagini ad integrazione di quelle esistenti, per redigere in modo più completo ed efficaci, le analisi della risposta sismica locale.

Per i modelli stratigrafici si è fatto riferimento anche alla banca dati regionale. L'analisi delle indagini presenti nella nuova banca dati consente anche di disegnare nuove sezioni litologiche, che andranno ad arricchire

3.1.1. ELENCO INDAGINI ESISTENTI

Sono state prese in considerazione ed analizzate tutte le indagini geognostiche della Microzonazione sismica di II Livello del comune di Voghiera, consegnata ed approvata nel 2019; tale banca dati è stata poi implementata con le indagini eseguite dallo scrivente dal 2019 fino ad oggi, all'interno del comune e con le apposite indagini eseguite per questo studio di Microzonazione sismica di III livello.

Dall'implementazione di questa banca dati per gli studi di MZ di II livello, ad oggi, lo scrivente ha eseguito altre indagini per committenti privati nel territorio comunale. Queste indagini sono state aggiunte alla banca dati costruita nel II livello. In questi anni c'è stata una relativa stasi nell'edilizia e nelle opere pubbliche, per cui non risultano essere state fatte altre indagini significative all'interno del territorio comunale.

Nella **Tabella 3.1** che segue è indicato il numero delle indagini reperite per la Microzonazione sismica di II Livello del comune di Voghiera e quelle eseguite dallo scrivente dal 2019 fino ad oggi.

	Tipologia di indagine	Numero Totale di indagini	Numero indagini Banca dati Veronese	Numero indagini bibliografiche RER	Numero indagini bibliografiche COMUNE
PENETROMETRIE E SONDAGGI	CPT	161	135	19	7
	CPTU	42	24	14	4
	SCPTU	16	10	-	6
	SPT	0	-	-	-
	Sondaggio continuo	3	-	3	-
	Sondaggio a distruzione	0	-	-	-
	Pozzi acqua	10	-	10	-
	Pozzi idrocarburi	1	-	1	-
	TOTALE	233	169	47	17

INDAGINI GEOFISICHE	E.S.A.C.	1	1	-	-
	HVSR	2	-	-	2
	RE.MI.	5	4	-	1
	M.A.S.W.	0	-	-	-
	S.E.V.	0	-	-	-
	TOTALE	8	5	0	3

INDAGINI II LIVELLO	CPTU	4
	SCPTU	3
	ESAC	1
	HVSR	4
	TOTALE	12

Tabella 3-1 - *Numero di indagini complessive utilizzate nel II livello di approfondimento più quelle raccolte in comune eseguite dal 2019 ad oggi.*

3.1.2. ELENCO NUOVE INDAGINI

Dopo aver raccolto e messo a sistema tutte le indagini geologiche presenti nel territorio comunale, per i nuovi studi di Microzonazione sismica di terzo livello, in particolare per poter procedere allo svolgimento dell'Analisi di risposta Sismica Locale (RSL) per le diverse località, è emersa l'opportunità di procedere alla realizzazione di ulteriori indagini, laddove abbiamo ravvisato esserci una certa lacuna di informazioni.

Gli ambiti della micro zonazione sismica del comune sono stati suddivisi per le diverse località che lo caratterizzano, per risposta sismica attesa:

- DUCENTOLA
- ZONA PRODUTTIVA DI GUALDO
- GUALDO
- VOGHENZA
- VOGHIERA
- MONTESANTO.

In quasi tutte le località del comune di Voghiera erano già disponibili delle prove SCPTU a 30m, eseguite per gli studi di MZ di II livello. Nella località di Ducentola e in corrispondenza del castello del Belriguardo di Voghiera sul principale ramo di paleoalveo che attraversa il comune, non erano mai state fatte queste tipologie di indagini. Inoltre per lo studio specifico di III Livello, della liquefazione delle sabbie vengono analizzate anche le aree del parco di Villa Massari di Voghenza e la fascia esterna al Paleoalveo del castello del Belriguardo.

Per questo nuovo studio sono dunque state realizzate le seguenti nuove indagini: N. 2 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono sismico SCPTU, spinte fino alla profondità di -30,0 m da p.c., eseguite nelle località di Ducentola e Voghiera (Castello del Belriguardo), N. 2 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU, spinte fino alla profondità di -20,0 m da p.c., eseguite nelle

località di Voghenza (Parco Villa Massari) e Voghiera (Castello del Belriguardo) e N. 2 prove geofisiche profonde con tecnica ESAC.

Inoltre, nella località di Ducentola è stato eseguito un sondaggio stratigrafico in corrispondenza della prova SCPTU, esteso fino alla profondità di -6,40m. Con il sondaggio si è prelevato un campione rimaneggiato di terreno C1, dalla profondità di -3,20 m da p.c. fino a -6,40 m da p.c., da sottoporre ad analisi granulometrica presso il laboratorio geotecnico SOCOTEC di Ferrara.

In **Tabella 3.2** si riportano le prove di nuova realizzazione eseguite per la Microzonazione sismica di terzo livello con il codice di riferimento della prova, la data di esecuzione, le rispettive coordinate geografiche e la località in cui sono state eseguite.

INDAGINI III LIVELLO	CPTU	2
	SCPTU	2
	SONDAGGIO A DISTRUZIONE (A COCLEA)	1
	ESAC	2
	TOTALE	7

N° indagine	Riferimento	Data	Lat.	Long.	Località
SCPTU MZ1 *U45-23*	038023P249	27/04/2023	4965060	241819	Campo sportivo, Ducentola (Fe)
Sondaggio MZ-S1	038023P272	27/04/2023	4965060	241819	Campo sportivo, Ducentola (Fe)
SCPTU MZ2 *U45-23*	038023P250	27/04/2023	4960650	243332	S.P.29, Castello del Belriguardo, Voghiera (Fe)
CPTU MZ3 *U45-23*	038023P251	28/04/2023	4960580	243208	S.P.29, Castello del Belriguardo, Voghiera (Fe)
CPTU MZ4 *U45-23*	038023P252	28/04/2023	4961950	242682	Villa Massari, Voghenza (Fe)
ESAC 1	038023P253	15/01/2022	4964950	241815	Campo sportivo, Ducentola (Fe)
ESAC 2	038023P254	15/01/2022	4957890	241074	Via A. Gramsci, Montesanto (Fe)

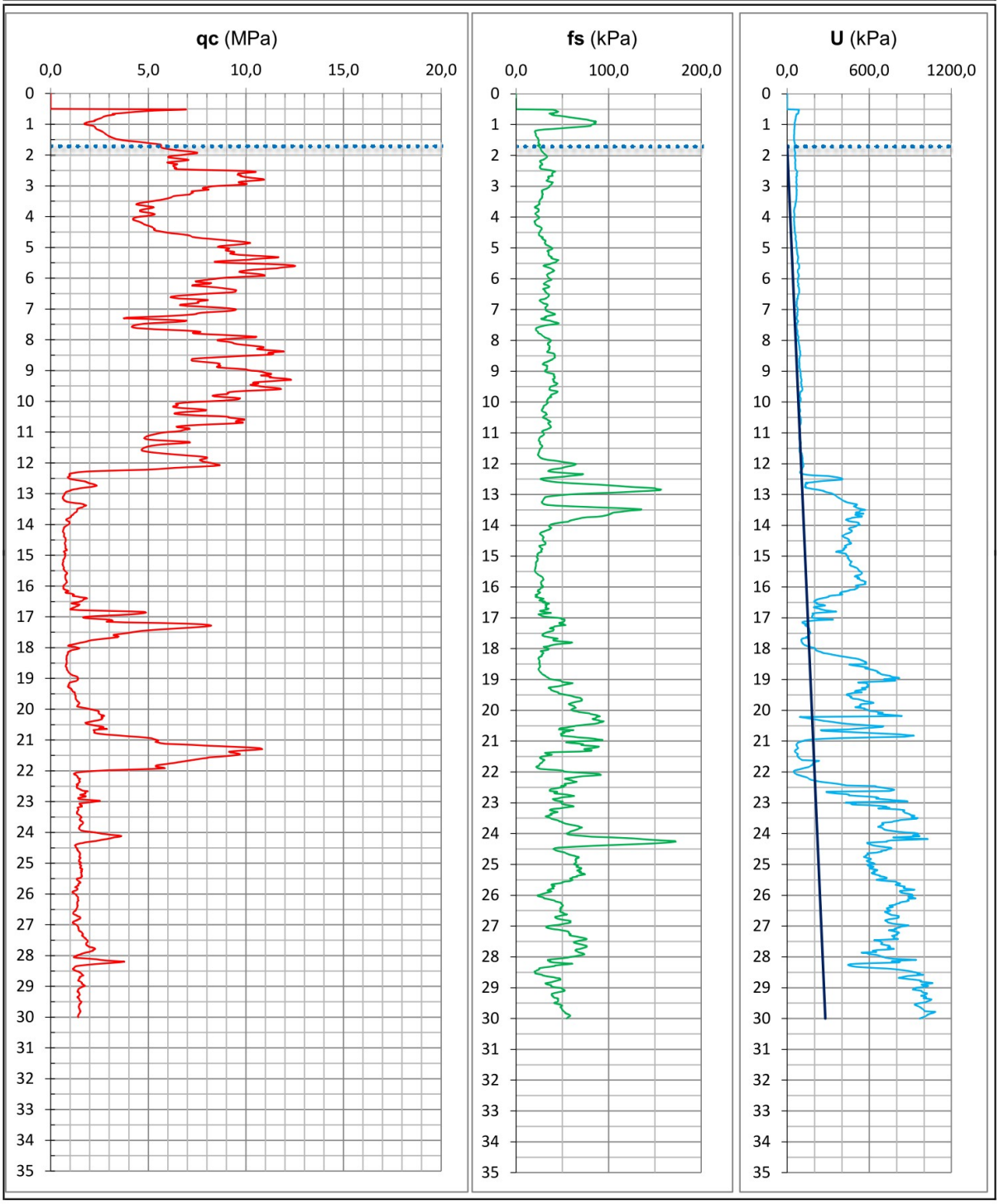
Tabella 3-2 – *Indagini per la MZ di III livello di Approfondimento, WGS84 fuso 33N*

Si riportano di seguito i diagrammi delle resistenze ed i profili di Vs delle 2 nuove prove SCPTU e diagrammi delle resistenze delle 2 nuove prove CPTU eseguite, che si aggiungono a quelle già disponibili (**FIGURA 3.2, 3.3**, **3.4**, **3.5**, **3.6** e **3.7**).

PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA DIAGRAMMI DI RESISTENZA	RIF. PROVA:	CPTU n°:
	SCPTU U45-23	MZ1

COMMITTENTE: Comune di Voghiera
CANTIERE: Campo Sportivo, Ducentola (Fe)
DATA: 27/04/2023

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,70
PREFORO (m da p.c.): 0,50



PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA
PROVA DOWN HOLE SCPTU

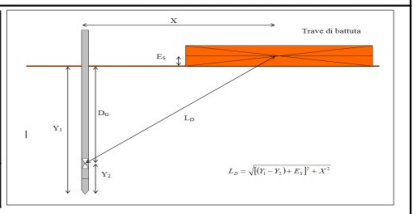
RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U45-23	MZ1

COMMITTENTE: Comune di Voghiera
CANTIERE: Campo Sportivo, Ducentola (Fe)
DATA: 27/04/2023

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,70
PREFORO (m da p.c.): 0,50

Peso mazza battente:	5Kg
Ricevitore Down Hole:	G1-cpl2IN
Equipaggiamento di registrazione:	D1-SISMI USB
Distanza centro sorgente-verticale X:	0,25 m
Distanza punta-accelerometro Y_2:	0,20 m

Vs_{30}= 184 m/sec Categoria suolo di fondazione = C



Distanza corretta L_D punta elettrica	Tempo di arrivo onda S (millisecondi)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
0,000		
0,838		186
1,817	9,787	
		200
2,811	14,744	
		187
3,808	20,082	
		172
4,807	25,895	
		176
5,805	31,557	
		174
6,805	37,295	
		180
7,804	42,862	
		189
8,804	48,161	
		212
9,803	52,869	
		200
10,803	57,867	
		197
11,803	62,934	
		169
12,802	68,852	
		128
13,802	76,688	
		113
14,802	85,565	
		118
15,802	94,072	
		141
16,802	101,139	
		200
17,802	106,147	
		181
18,802	111,675	
		184
19,802	117,123	
		200
20,802	122,131	
		244
21,801	126,229	
		222
22,801	130,738	
		219
23,801	135,306	
		211
24,801	140,054	
		201
25,801	145,041	
		205
26,801	149,918	
		223
27,801	154,402	
		245
28,801	158,487	
		240
29,801	162,656	

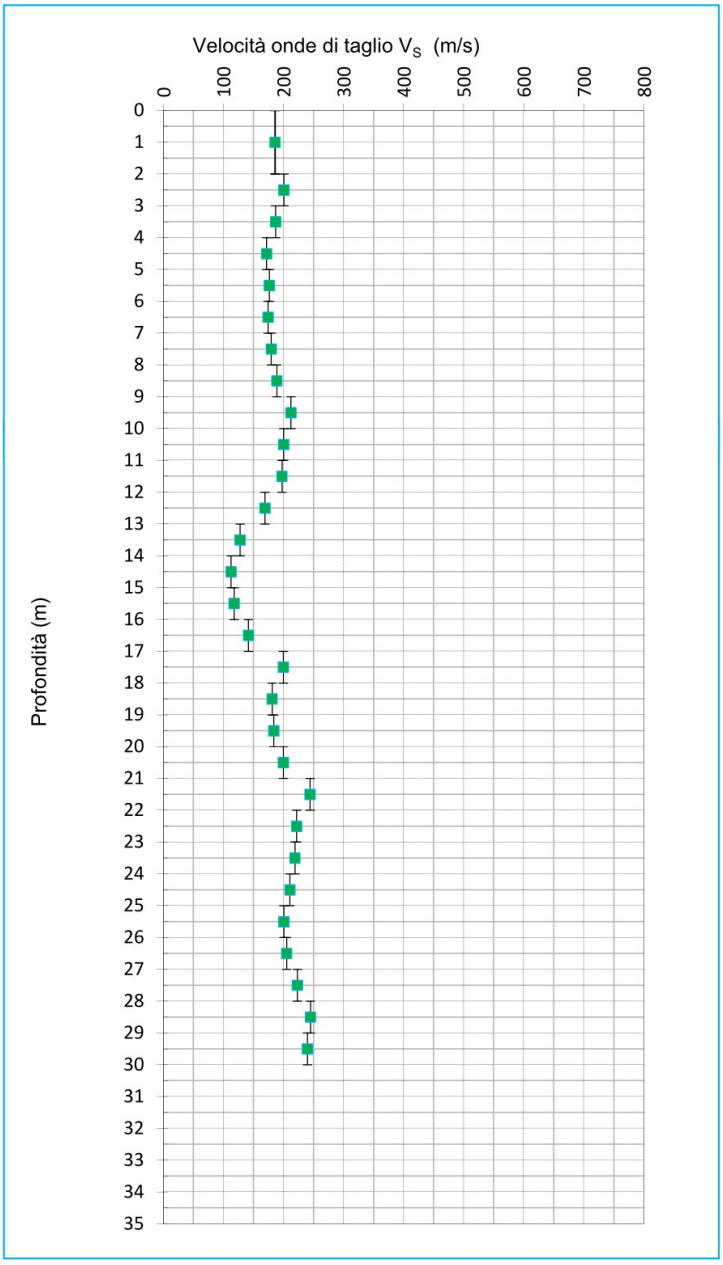


FIGURA 3-2 *PROVA SCPTU DUCENTOLA*

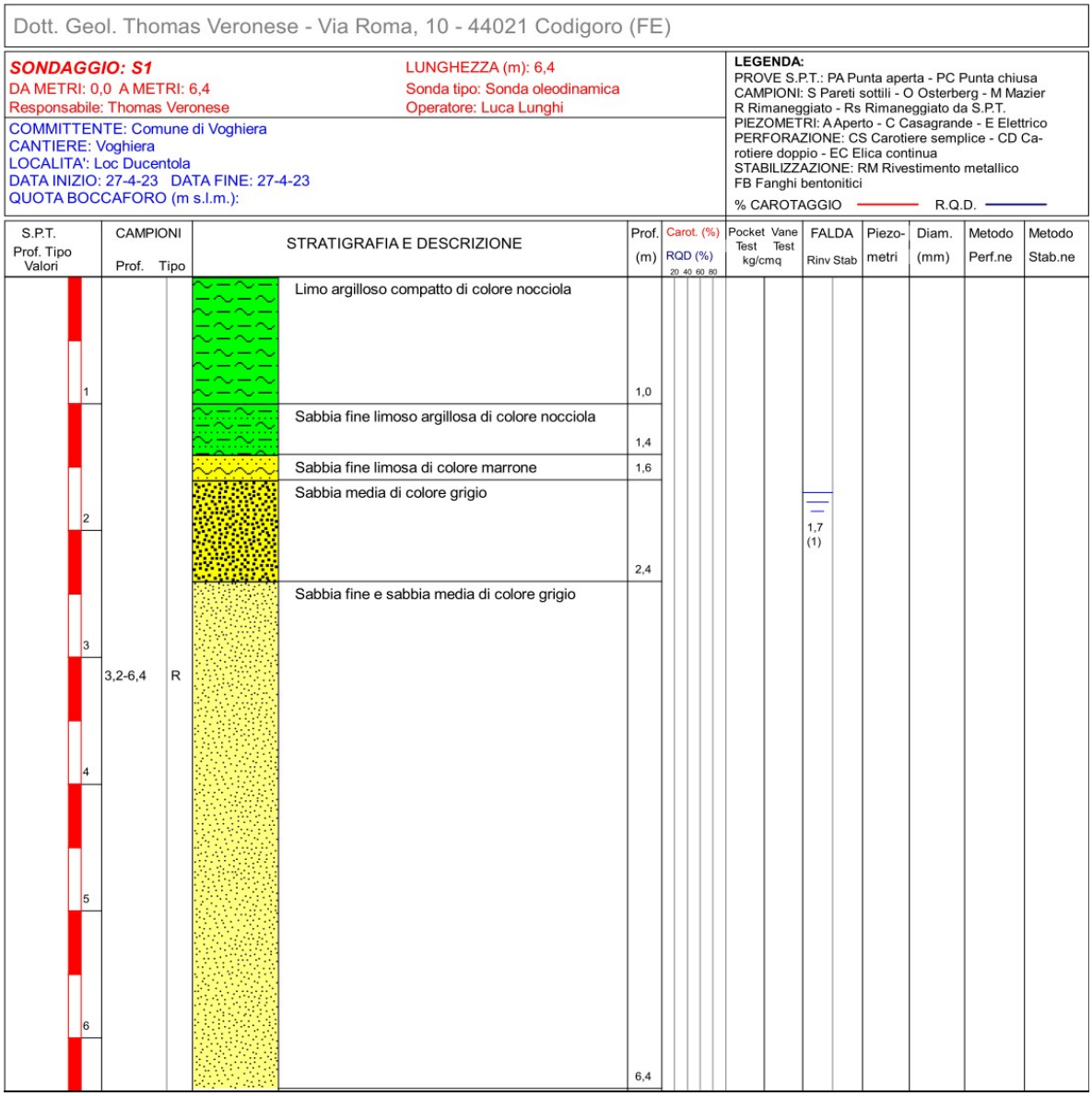


FIGURA 3-3 *scheda sondaggio geognostico MZ-S1 eseguito in corrispondenza di SCPTU1*

Di seguito si riporta la curva granulometrica del campione di sabbie del paleo alveo del Po denominato Eridano, poi Padoa-Eridano, poi Padus Vetere, infine Po di Ferrara (denominato localmente Fiume Sandalo).

Passante effettivo setaccio 0.063 (g) in areometro		50.01
t° C	Tempo (s)	Lettura
20	30	32.0
20	60	28.0
20	120	25.0
20	300	21.0
20	600	17.5
20	1200	15.0
20	2400	12.5
20	4800	10.0
20	14400	8.0
20	86400	6.0
21	172800	5.0
Rapporti granulometrici		
	USCS	UNI
GHIAIA	> 4,75 mm	> 2,00 mm
	0.0%	0.1%
SABBIA	> 0,075 mm	> 0,063 mm
	85.9%	88.0%
LIMO	> 2 µ	> 2 µ
	12.8%	10.7%
ARGILLA	< 2 µ	< 2 µ
	1.3%	1.3%

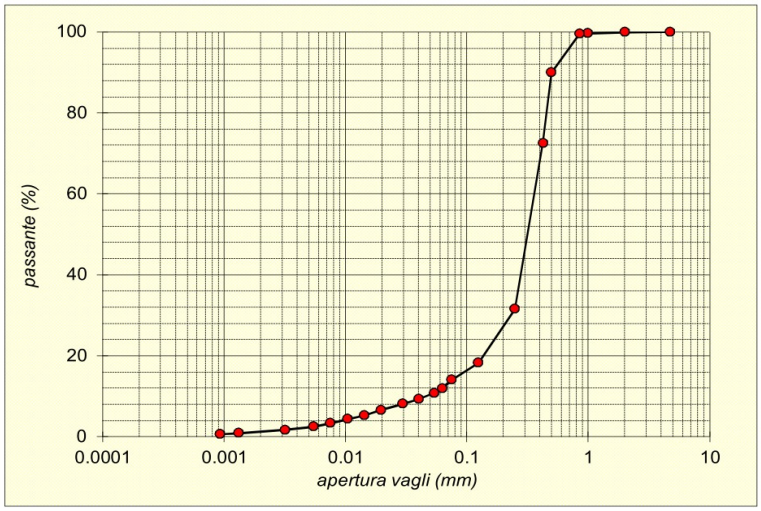
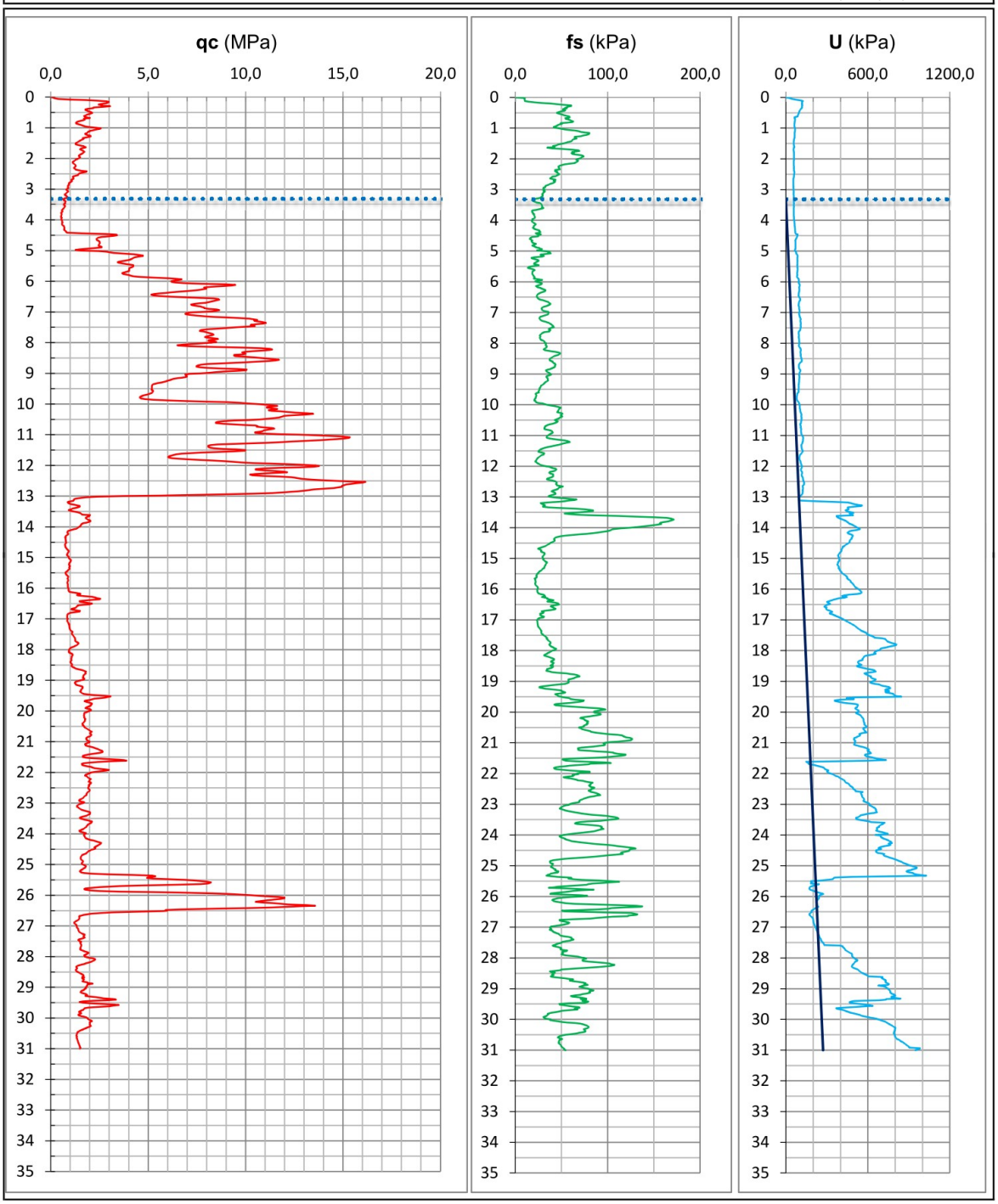


FIGURA 3-4 *scheda sondaggio geognostico MZ-S1 eseguito in corrispondenza di SCPTU1*

PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA DIAGRAMMI DI RESISTENZA	RIF. PROVA:	CPTU n°:
	SCPTU U45-23	MZ2

COMMITTENTE: Comune di Voghiera
CANTIERE: S.P.29, Belriguardo, Voghiera (Fe)
DATA: 27/04/2023

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 31,00
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 3,30
PREFORO (m da p.c.): 0,00



PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA
PROVA DOWN HOLE SCPTU

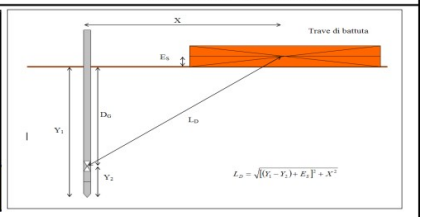
RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U45-23	MZ2

COMMITTENTE: Comune di Voghiera
CANTIERE: S.P.29, Belriguardo, Voghiera (Fe)
DATA: 27/04/2023

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 31,00
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 3,30
PREFORO (m da p.c.): 0,00

Peso mazza battente:	5Kg
Ricevitore Down Hole:	G1-cpl2IN
Equipaggiamento di registrazione:	D1-SISMI USB
Distanza centro sorgente-verticale X:	0,25 m
Distanza punta-accelerometro Y_2:	0,20 m

Vs_{30}= 191 m/sec Categoria suolo di fondazione = C



Distanza corretta L_D punta elettrica	Tempo di arrivo onda S (millisecondi)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
0,000		
0,838		208
1,817	8,736	
		182
2,811	14,189	
		144
3,808	21,092	
		148
4,807	27,859	
		179
5,805	33,426	
		182
6,805	38,925	
		187
7,804	44,262	
		203
8,804	49,184	
		188
9,803	54,508	
		204
10,803	59,406	
		211
11,803	64,134	
		208
12,802	68,952	
		150
13,802	75,618	
		128
14,802	83,426	
		148
15,802	90,164	
		172
16,802	95,985	
		193
17,802	101,161	
		199
18,802	106,187	
		197
19,802	111,275	
		225
20,802	115,713	
		233
21,801	120,012	
		230
22,801	124,362	
		222
23,801	128,867	
		215
24,801	133,526	
		214
25,801	138,205	
		207
26,801	143,033	
		198
27,801	148,077	
		219
28,801	152,639	
		213
29,801	157,326	
		219
30,801	161,885	

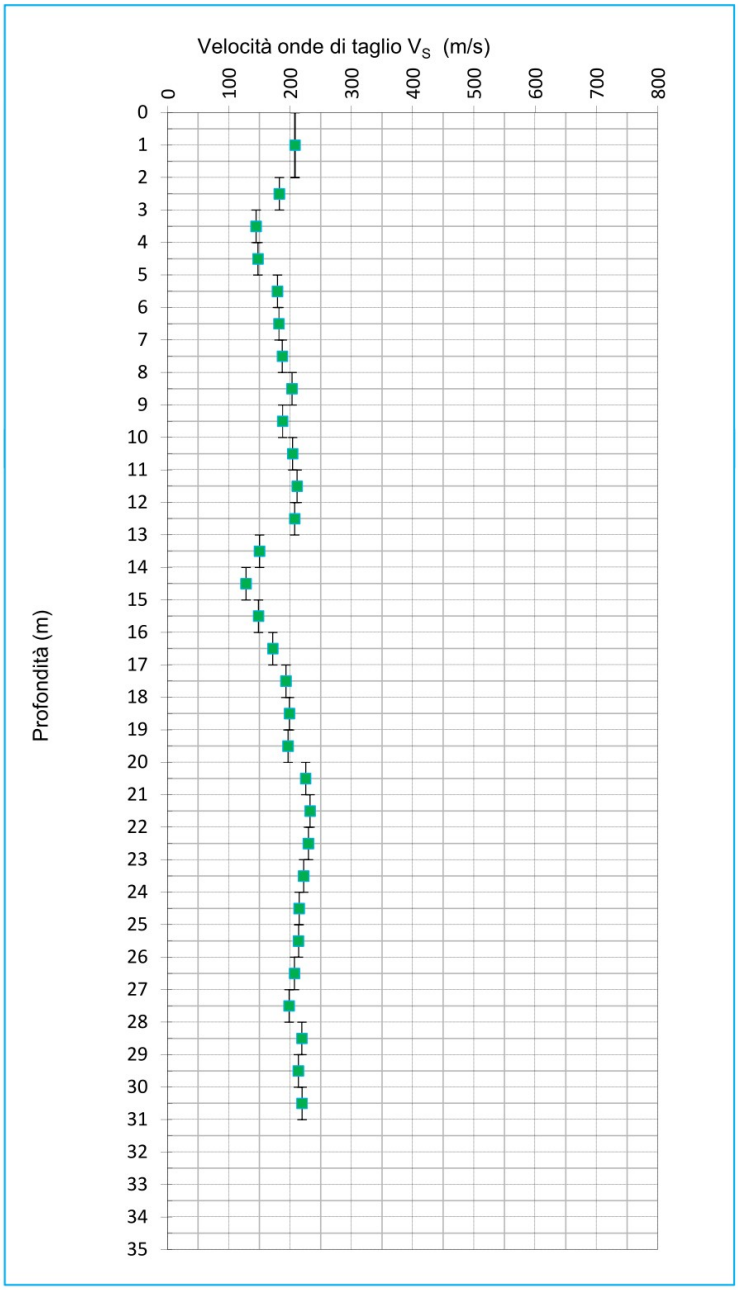


FIGURA 3-5 *PROVA SCPTU VOGHIERA*

PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA DIAGRAMMI DI RESISTENZA	RIF. PROVA:	CPTU n°:
	CPTU U45-23	MZ3

COMMITTENTE: Comune di Voghiera
CANTIERE: S.P.29, Belriguardo, Voghiera (Fe)
DATA: 28/04/2023

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 20,00
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 3,10
PREFORO (m da p.c.): 0,00

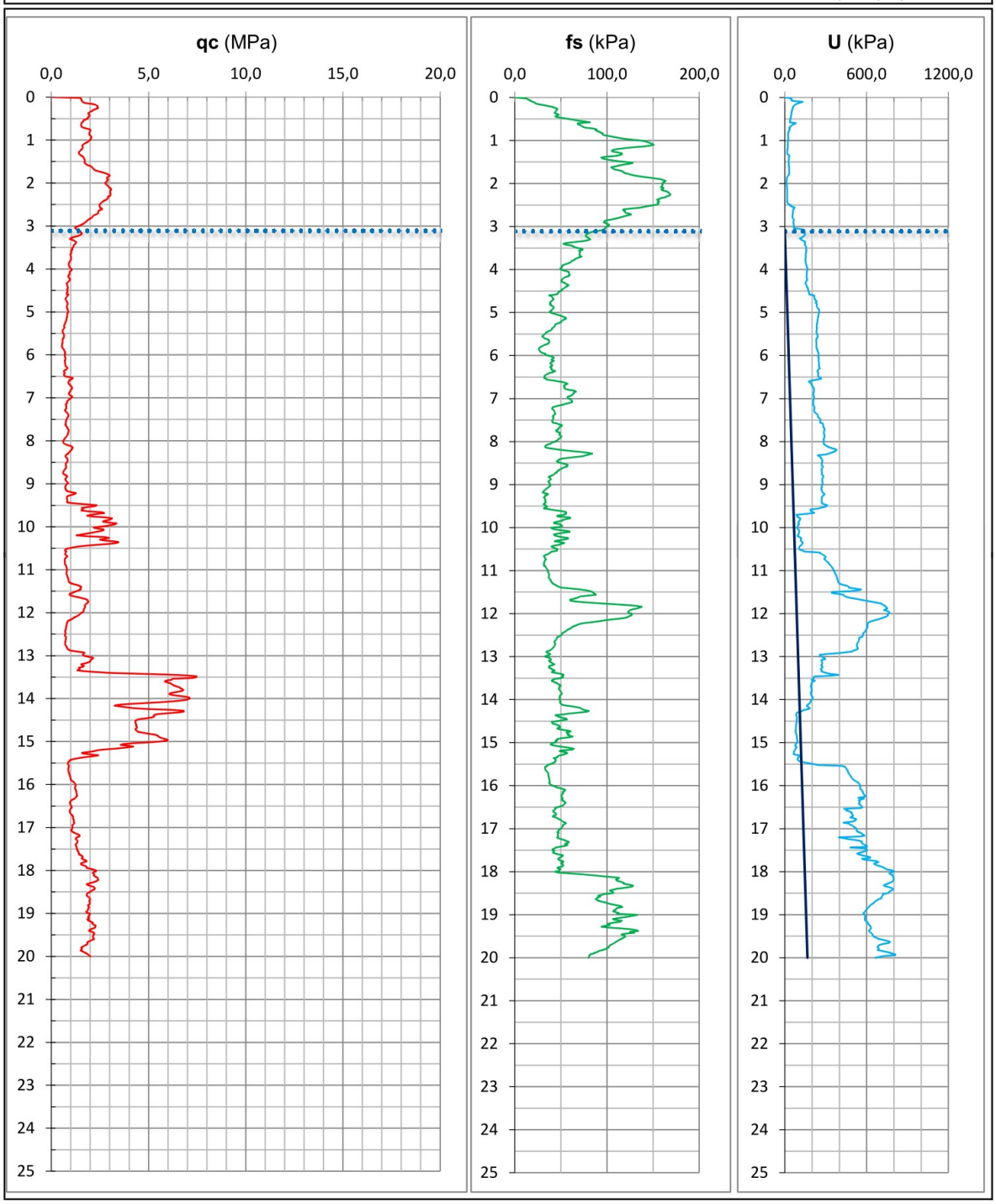


FIGURA 3-6 *PROVA CPTU VOGHIERA*

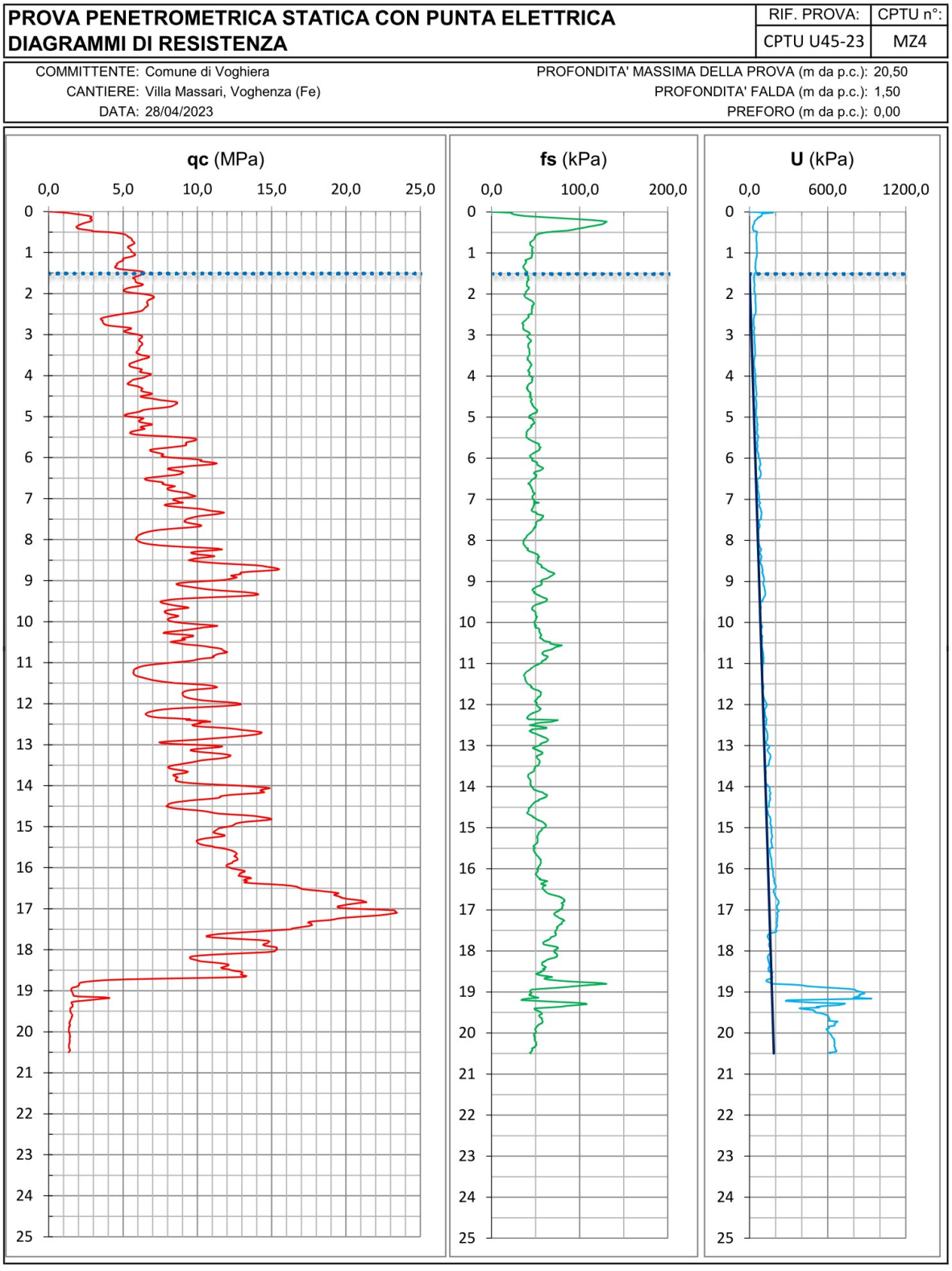


FIGURA 3-7 *PROVA CPTU VOGHIERA*

In **FIGURA 3.8** si riporta l'ubicazione delle 21 prove SCPTU complessive, tra preesistenti e di nuova realizzazione, utilizzate per le RSL.

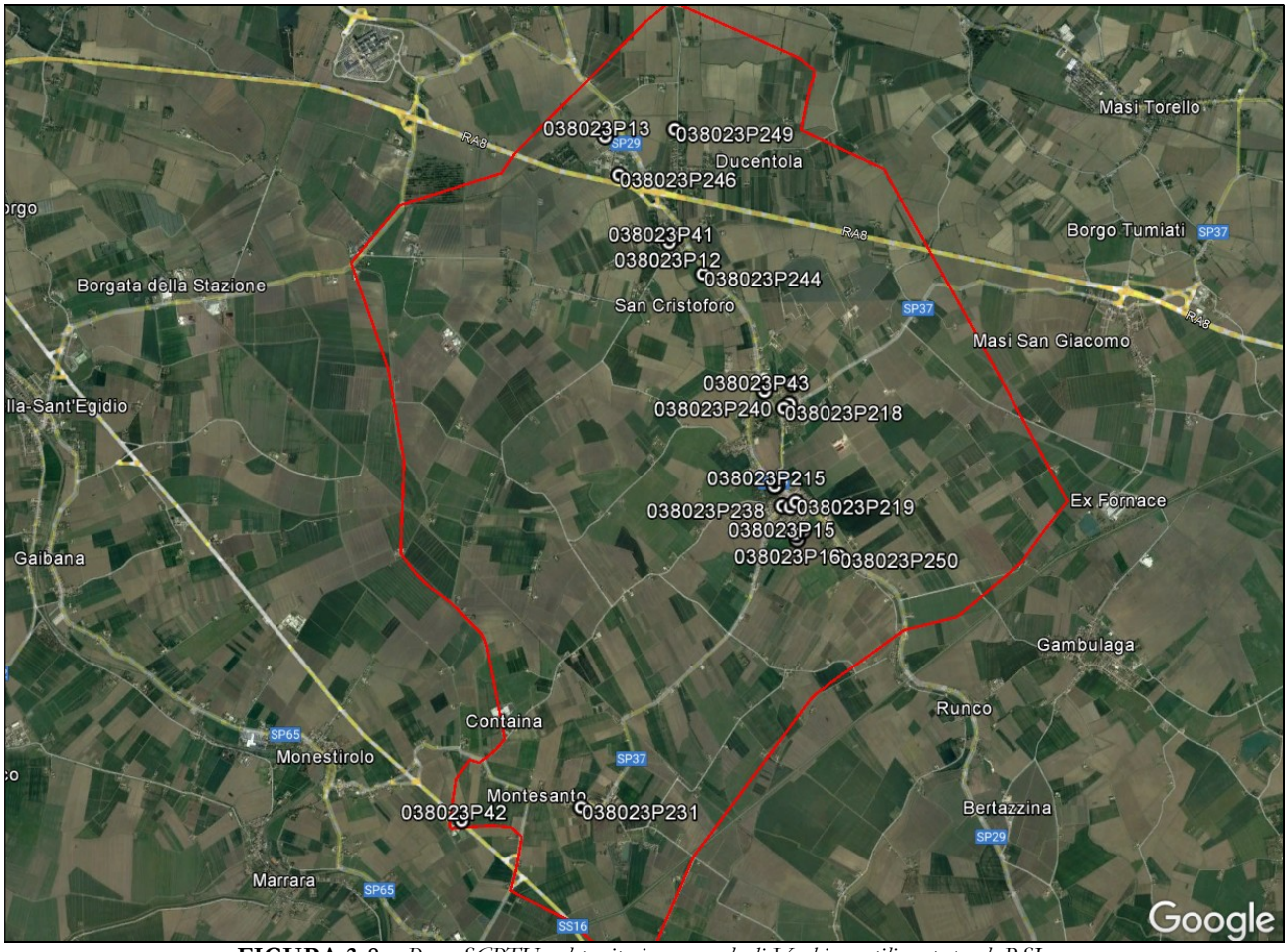
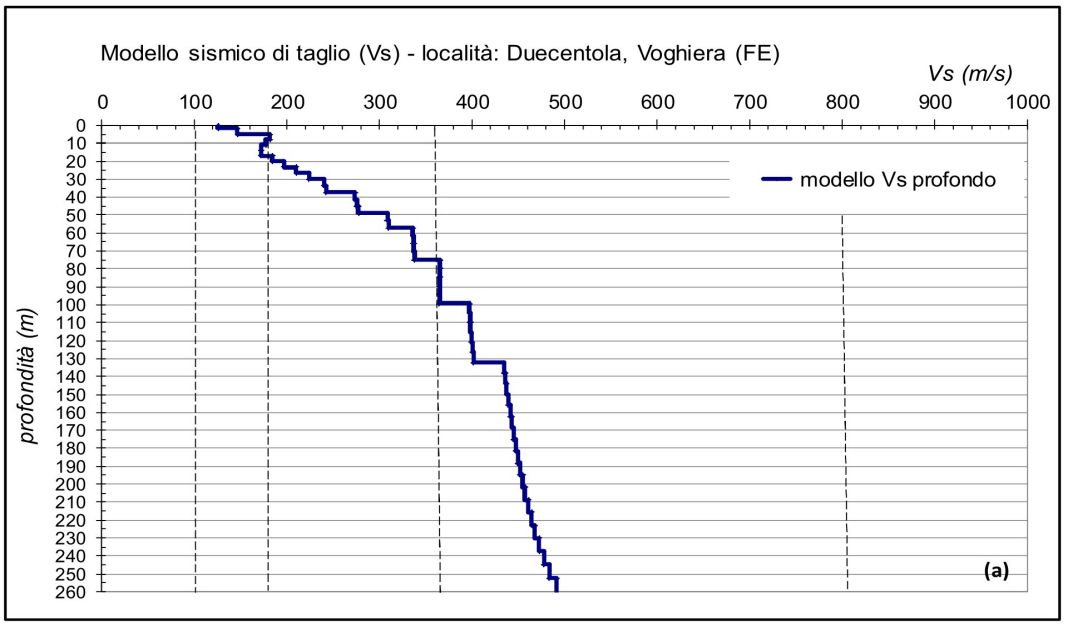
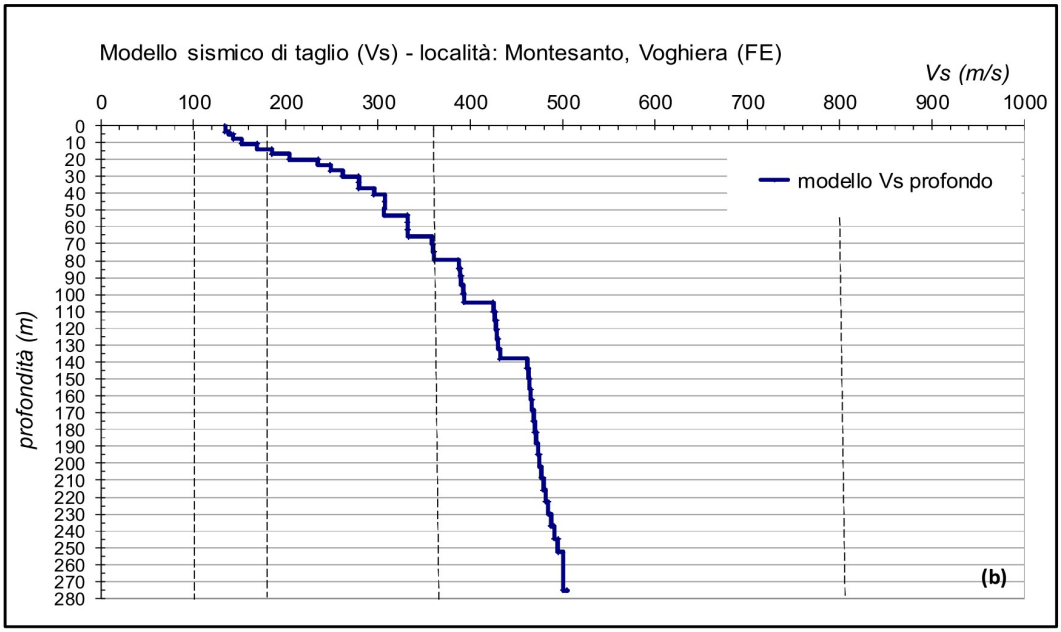


FIGURA 3-8 – *Prove SCPTU nel territorio comunale di Voghiera utilizzate per le RSL*

In **FIGURA 3.9** si riporta il profilo di Vs delle 2 nuove prove ESAC fatte eseguire a Teamgeofisica.ceg del dott. Nasser Abu Zeid a Ducentola e Montesanto, più la prova ESAC fatta eseguire a Voghiera per il II livello di approfondimento nel 2017 dalla medesima ditta.





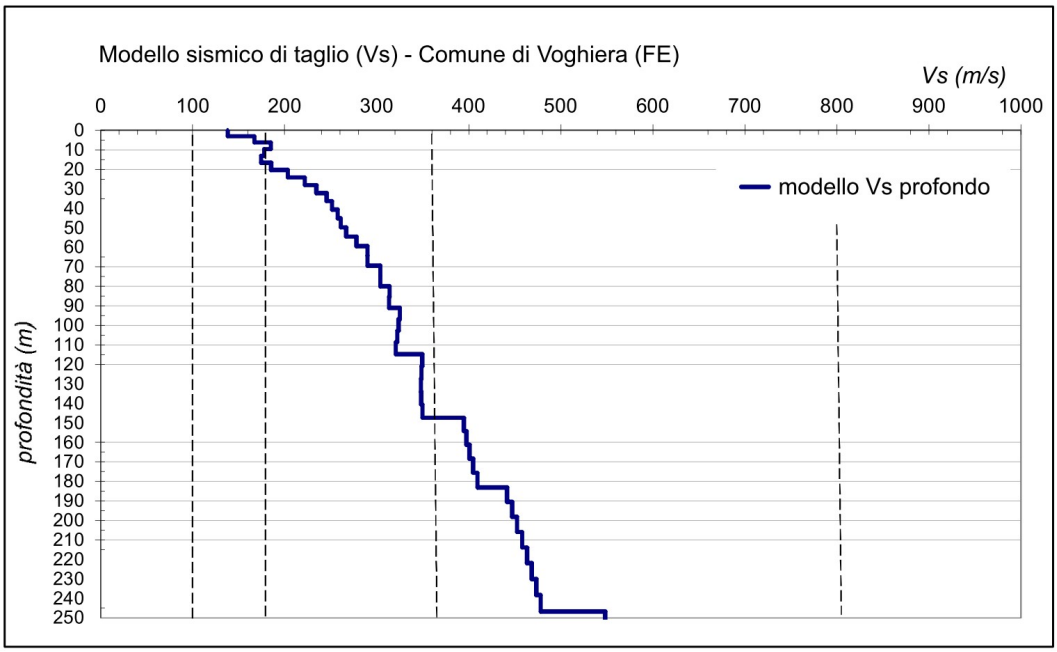


FIGURA 3-9 – *Prove E.S.A.C. eseguita dalla ditta Teamgeofisica.ceg del dott. Nasse Abu Zeid*

In **FIGURA 3.10** si riporta l'ubicazione delle prove geofisiche ESAC per il profilo di Vs profondo, sia preesistenti che di nuova realizzazione, utilizzate per le RSL.



FIGURA 3-10 – *Ubicazione delle prove ESAC utilizzate per i modelli profondi di velocità delle onde di taglio Vs nel territorio comunale di Voghiera utilizzate per le RSL.*

Con tutti i dati in nostro possesso e con le nuove indagini proposte è possibile fare uno studio specifico di analisi di risposta sismica locale per ogni località del territorio comunale.

In **Tabella 3.4** si riportano tutte le indagini che ora compongono la banca dati allegata agli studi di Microzonazione Sismica di III livello del comune di Voghiera.

	Tipologia di indagine	Numero Totale di indagini	Numero indagini Banca dati Veronese	Numero indagini bibliografiche RER	Numero indagini bibliografiche COMUNE
PENETROMETRIE E SONDAGGI	CPT	161	135	19	7
	CPTU	42	24	14	4
	SCPTU	16	10	-	6
	SPT	0	-	-	-
	Sondaggio continuo	3	-	3	-
	Sondaggio a distruzione	0	-	-	-
	Pozzi acqua	10	-	10	-
	Pozzi idrocarburi	1	-	1	-
	TOTALE	233	169	47	17

INDAGINI GEOFISICHE	E.S.A.C.	1	1	-	-
	HVSR	2	-	-	2
	RE.MI.	5	4	-	1
	M.A.S.W.	0	-	-	-
	S.E.V.	0	-	-	-
	TOTALE	8	5	0	3

INDAGINI II LIVELLO	CPTU	4
	SCPTU	3
	ESAC	1
	HVSR	4
	TOTALE	12

STRATIGRAFIA SMS	29

INDAGINI III LIVELLO	CPTU	2
	SCPTU	2
	SONDAGGIO A DISTRUZIONE (A COCLEA)	1
	ESAC	2
	TOTALE	7

	TOTALE INDAGINI	289

Tabella 3-3- *Indagini complessive reperite in banca dati e analizzate in questo studio*

3.1.3. MODELLO GEOLOGICO PROFONDO DI RIFERIMENTO

Lo schema deposizionale dell'area allo studio è riportato nella **FIGURA 3.11**.

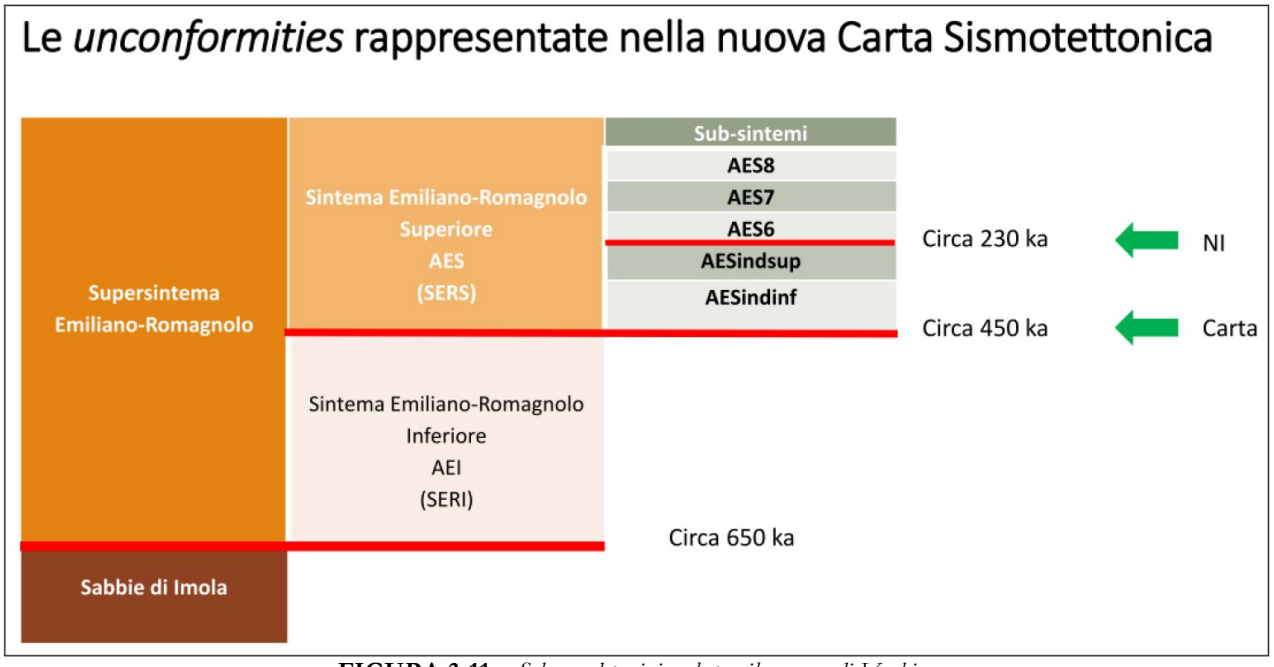
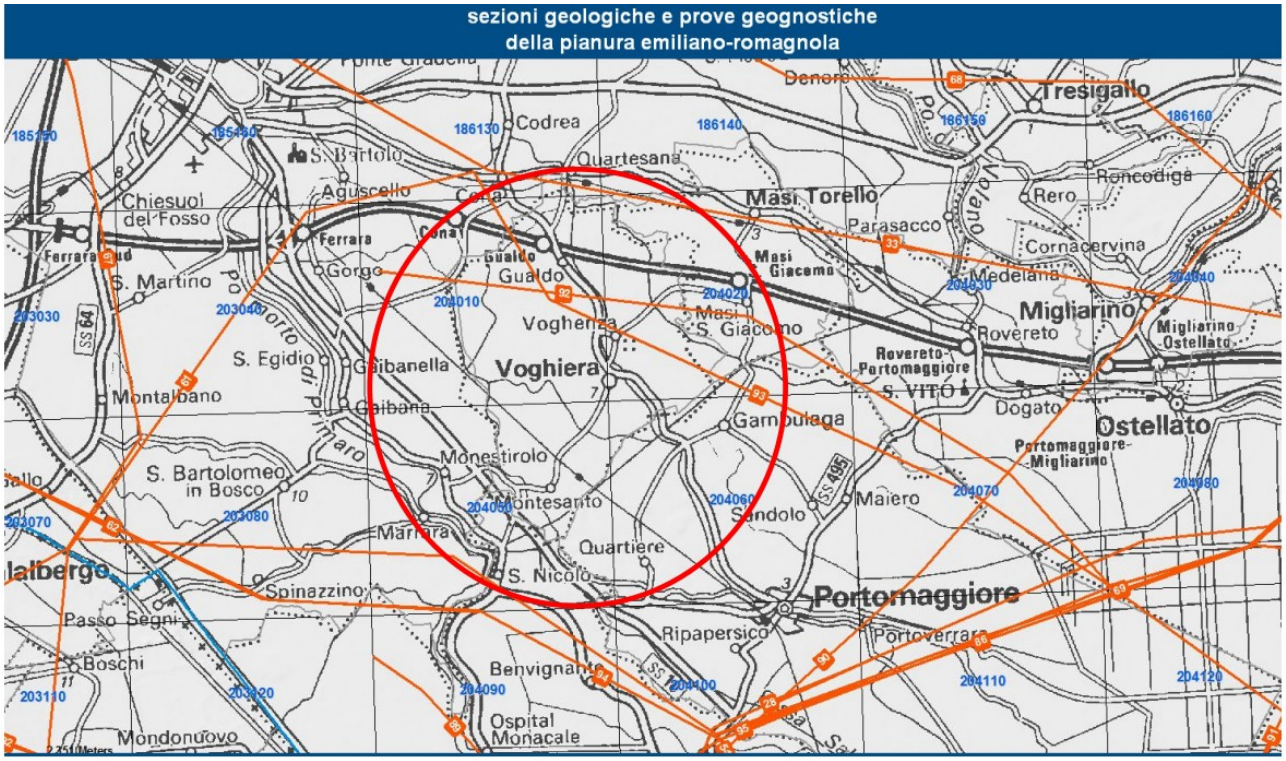


FIGURA 3-11 – *Schema deposizionale per il comune di Voghiera*

Il modello geologico profondo è stato ricostruito principalmente attraverso la sezione 093 reperita in banca dati regionale. Essa è molto dettagliata e di indubbia utilità. (**FIGURA 3.12**).



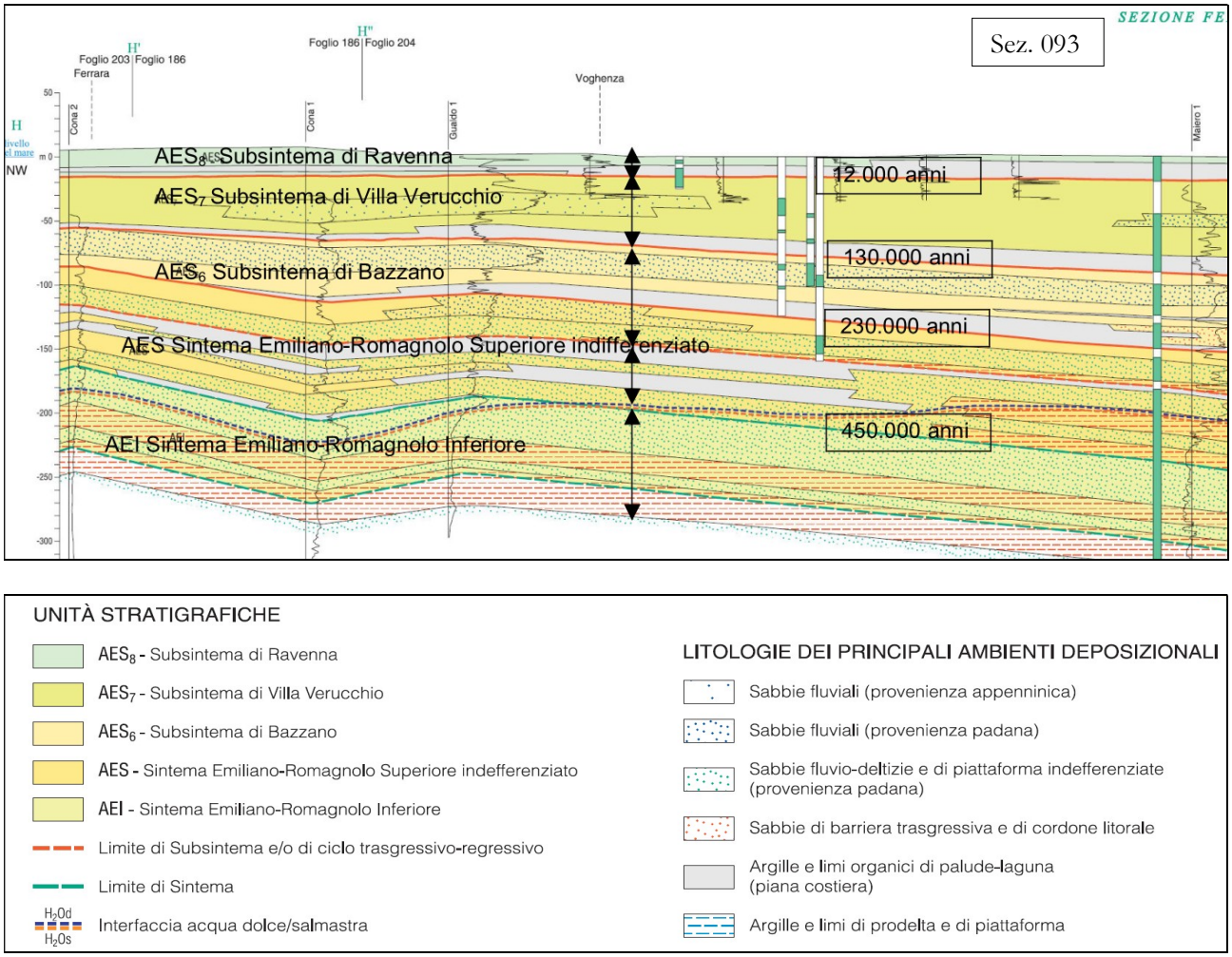


FIGURA 3-12 – *Sezione 93*

https://geo.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss/user/viewer.jsp?service=sezioni_geo

Per i dettagli su queste sezioni geologiche si faccia riferimento a quanto contenuto negli studi di MS di II livello.

Sono state consultate e analizzate tutte le colonne stratigrafiche dei sondaggi per ricerca idrocarburi che sono presenti in banca dati.

3.1.4. MODELLO GEOLOGICO SUPERFICIALE

Questo territorio deltizio situato tra Ferrara e le Valli di Comacchio era caratterizzato da grandi corsi d'acqua, il maggiore dei quali era il ramo principale del Po che in età classica sfociava a mare poco dopo l'etrusca città di Spina. Voghiera e Voghenza erano poste l'una a destra, l'altra a sinistra dell'antico corso dell'Eridano, in corrispondenza della grande isola fluviale identificabile oggi nel Parco Massari-Mazzoni.

Il tracciato dell'antico fiume estinto per autosedimenetazione in alveo, passa per Ducentola, Gualdo, Voghenza e Voghiera, dirige a Runco poi piega per Gambulaga, Dogato, Ostellato, San Giovanni di Ostellato e sfociava in epoca etrusca all'altezza degli impianti idrovori di Valle Lepri, ove ha sede l'antica città etrusca di Spina. Sono proprio le sabbie di questo paleo alveo il principale oggetto di studio della microzonazione sismica di Voghiera, per via della potenziale instabilità per liquefazione che possono manifestare durante forti terremoti.

In **FIGURA 3.13** si riporta uno stralcio della carta geomorfologica redatta dallo scrivente in occasione del Quadro Conoscitivo del PSC di Voghiera, mai giunto ad approvazione.

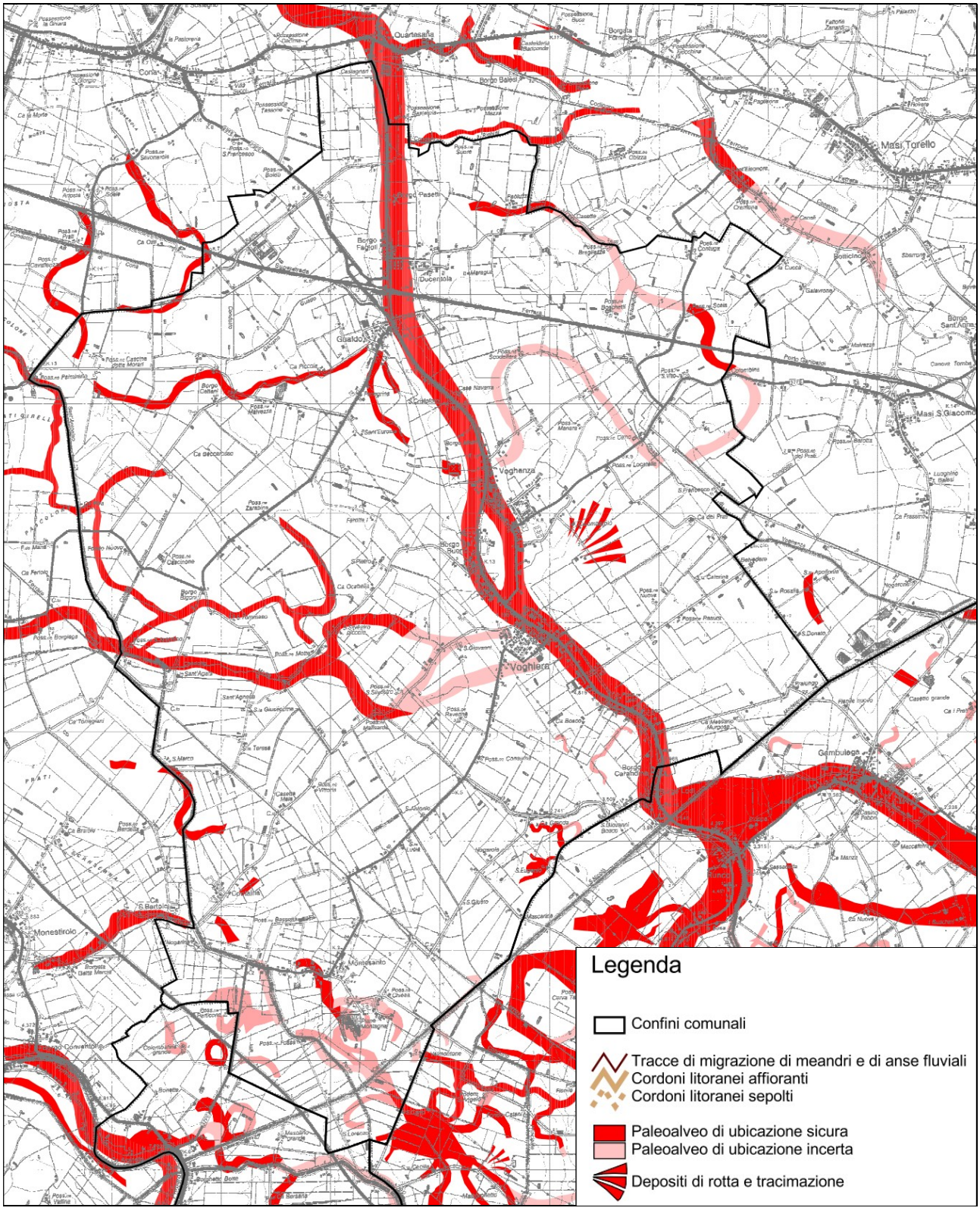


FIGURA 3-13 – *Ubicazione delle prove ESAC utilizzate per i modelli profondi di velocità delle onde di taglio Vs nel territorio comunale di Voghiera utilizzate per le RSL.*

3.1.5. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE INDAGINI

La Carta delle indagini è stata aggiornata e viene riprodotta in scala 1:10.000 ed interessa tutto il territorio comunale; in essa sono ubicate e classificate tutte le indagini contenute nel database creato per questo lavoro con il software MS del Dipartimento di Protezione Civile Nazionale.

In questa carta sono rappresentate tutte le indagini presenti nel territorio comunale di Voghiera, sia quelle della Microzonazione sismica di secondo livello approvata nel 2019, sia quelle della banca dati dello scrivente eseguite da quel momento fino ad oggi.

Per ogni indagine realizzata corrisponde una diversa simbologia di rappresentazione, riportata nella legenda della tavola, come richiesto negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Microzonazione sismica - Versione 4.2.:

Le 276 indagini sono state analizzate ed archiviate in una banca dati informatizzata e georeferenziata con sistema WGS84 fuso 33N (come prescritto negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica del Dipartimento nazionale della Protezione Civile) in ambiente GIS ESRI, la cui struttura risponde alle specifiche per gli studi di microzonazione sismica.

Questo consente l'elaborazione degli studi di microzonazione sismica del comune, finalizzata ad una semplificazione e ad una sintesi dei contenuti principali delle caratteristiche geologiche, morfologiche, litostratigrafiche, sismiche e geotecniche e nel contempo ottenere una omogenea rappresentazione dei tematismi da parte dei soggetti realizzatori, facilitandone la lettura ed il confronto dei risultati degli studi di contesti territoriali differenti.

Per l'archiviazione dei dati si è fatto ricorso al software Soft_MS versione 4.2, messo a disposizione dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (D.P.C.), attraverso il quale è possibile inserire i dati di tutte le indagini presenti nel territorio ed archiviarle in tabelle costituite da un insieme di record, gerarchicamente organizzate in modo da memorizzare in maniera indipendente le informazioni legate al sito di indagine, alle prove in esso realizzate ed ai parametri tecnici di ognuna di queste.

Tutte le indagini reperite e successivamente analizzate ed archiviate presentano una buona affidabilità e sono ubicate in modo abbastanza uniforme all'interno del comune di Voghiera offrendo dunque una buona distribuzione e copertura areale del territorio. Per la maggior parte delle indagini, la loro ubicazione è concentrata in modo particolare nei centri abitati con una buona densità di indagini profonde a 30m da p.c. per la caratterizzazione sismica del territorio e la determinazione del valore di Vs_{30}.

In **FIGURA 3.14** è riportata la legenda della carta delle Indagini, aggiornata al III livello di approfondimento degli studi di microzonazione sismica.

Legenda


Prova penetrometrica statica con punta meccanica



Prova penetrometrica statica con piezocono



Prova penetrometrica statica con cono sismico
e piezocono


Stazione microtremore a stazione singola


Sondaggio a carotaggio continuo


Pozzo per acqua


Sondaggio a distruzione di nucleo


Pozzo per idrocarburi


Array sismico, ESAC/SPAC



Stratigrafia zona MS (teorica)



Prova REfractionMIcrotremors

FIGURA 3-14

3.1.6. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA GEOLOGICO TECNICA

La Carta geologico-tecnica viene riprodotta in scala 1:10.000 ed è focalizzata sulle aree oggetto di studio di microzonazione sismica e sul corpo principale del paleoalveo che attraversa il comune da nord a sud, concordate con la regione e con l'amministrazione comunale.

In questa carta vengono suddivise le unità geologico-litotecniche distinte per spessori di minimo 3 m di terreni di copertura. Questa suddivisione è stata fatta sulla base delle unità geomorfologiche presenti nel territorio sovrapposte alle diverse prove geologiche sito-specifiche riportate nella carta delle indagini.

La suddivisione dei diversi litotipi in classi predefinite permette di identificare situazioni geologiche e litostratigrafiche potenzialmente suscettibili di amplificazione locale. Per descrivere la litologia dei terreni è stato utilizzato l'Unified Soil Classification System (leggermente modificato, ASTM, 1985), un sistema di classificazione dei suoli utilizzato sia in ingegneria sia in geologia, che può essere applicato alla maggioranza dei materiali non consolidati ed è composto da una sigla formata da 2 lettere. Indicazioni importanti, soprattutto sulla geometria 2D dei corpi litologici, sono fornite dalle identificazioni degli ambienti genetico-deposizionali.

Questa carta è stata modificata rispetto a quella del II livello di approfondimento, dato che sul territorio comunale sono state realizzate, raccolte ed analizzate più indagini e quindi si ha un maggior dettaglio nel riconoscimento delle diverse unità lito-stratigrafiche che caratterizzano il sottosuolo.

Nello specifico per questa carta sono state utilizzate le seguenti litologie dei terreni di copertura e i diversi ambienti genetico-deposizionali in cui si sono depositati, come richiesto negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Microzonazione sismica - Versione 4.2.:

LITOLOGIE

- SM: sabbie limose, miscela di sabbia e limo e limo;
- ML: Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità;
- CL: argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre.

AMBIENTI GENETICO-DEPOSIZIONALI

- es: ambiente fluvio-lacustre, argine/barre/canali;
- pi: ambiente fluvio-lacustre, piana inondabile;

In **FIGURA 3.15** è riportata la legenda della carta delle Indagini, aggiornata al III livello di approfondimento degli studi di microzonazione sismica.

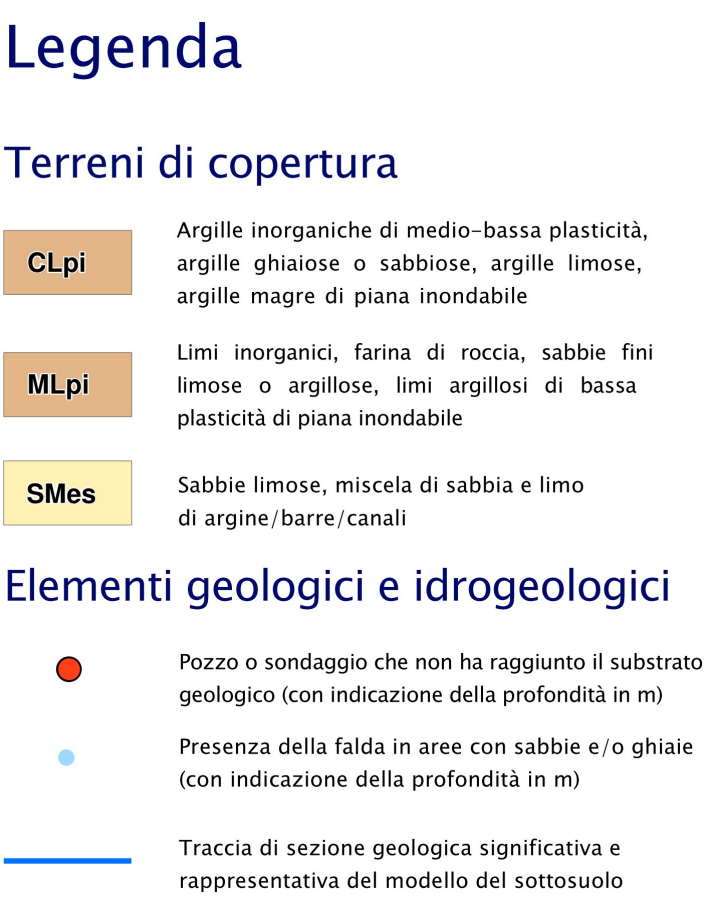


FIGURA 3-15

Nella Carta Geologico Tecnica vengono inoltre rappresentati gli elementi geologici ed idrogeologici e nello specifico sono riportati tutti i sondaggi e i pozzi sia per acqua che per idrocarburi presenti nel territorio con la rispettiva profondità di perforazione e se ha raggiunto o meno il substrato geologico.

La carta geologico-tecnica mostra inoltre le tracce di sezioni geologiche significative e rappresentative del modello del sottosuolo reperite dall'archivio della Regione Emilia Romagna e 3 sezioni di nuova realizzazione, eseguite per questo studio.

3.1.7. CARTA DELLE FREQUENZE NATURALI F_0 DEL TERRENO

La Carta delle frequenze naturali F_0 del terreno viene riprodotta in scala 1:10.000.

Questa carta non ha subito variazioni rispetto a quella del II livello in quanto in sito non sono state realizzate altre prove geofisiche a stazione singola HVSR per la misura delle frequenze del terreno.

3.1.8. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA MOPS

La Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica viene riprodotta in scala 1:10.000 ed è focalizzata sui centri abitati del comune e sul corpo principale del paleoalveo che attraversa il comune da nord a sud, concordate con la regione e con l'amministrazione comunale.

La Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Carta delle MOPS) è costruita sulla base degli elementi predisponenti alle amplificazioni e alle instabilità sismiche già riportati nella carta geologico tecnica e sulla base delle indagini presenti sul territorio.

In questa carta sono state suddivise le diverse aree in funzione della diversa stratigrafia rilevata con le rispettive prove sito-specifiche e sulla base delle conoscenze geologico-litotecniche acquisite con la carta geologico tecnica.

Sono dunque emerse 5 diverse zone stabili suscettibili di amplificazioni locali rappresentate con un codice differente che va dal 2001 al 2005. La suddivisione fatta è stata basata sulla presenza o assenza di corpi sabbiosi alle diverse profondità di spessori più o meno importanti con terreni di copertura argilloso limosi di origine alluvionale caratterizzati da spessori variabili.

Questa carta è stata modificata rispetto a quella del II livello di approfondimento; da quando è stata redatta la carta nel II livello di approfondimento ad oggi, sono state eseguite nuove indagini sul territorio comunale, e questo ha consentito di migliorare la perimetrazione delle zone omogenee in prospettiva sismica, in quanto è stato possibile migliorare la conoscenza della distribuzione nel sottosuolo delle forme lito-stratigrafiche.

La legenda della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica è stata così suddivisa:

- **30502001** porzioni di territorio caratterizzate dalla presenza di paleoalvei importanti sub-affioranti con tetto delle sabbie compreso tra piano campagna e -4,0 metri da piano campagna con spessore maggiore di 5 metri caratterizzato da un addensamento in graduale aumento con la profondità seguito da terreni argilloso limosi e limoso argillosi con lenti di sabbia e sabbia limosa dello spessore variabile più in profondità;

- **30502002** porzioni di territorio immediatamente esterne al paleoalveo principale e interessate dalle divagazioni secondarie del medesimo, caratterizzate da un primo strato di terreni di copertura di 1-4 metri di argille e limi di consistenza media di origine alluvionale, seguito da depositi di paleoalveo secondario, sabbioso e sabbioso limoso, di spessore inferiore a 6 metri, a cui seguono terreni argillosi e argilloso limosi consistenti a cui si possono intervallare banchi sabbiosi e sabbioso limosi di spessore variabile;

- **30502003** porzioni di territorio in transizione tra la zona dei paleoalvei e le piane alluvionali, caratterizzate da un primo intervallo di depositi argilloso limosi e limoso argillosi di consistenza variabile di spessore maggiore di 4 metri, seguito da corpi di paleoalveo minore con spessore del corpo sabbioso minore di 5 metri a cui seguono depositi argilloso limosi e limoso argillosi di consistenza in generale aumento con la profondità alternati a banchi sabbiosi e sabbiosi limosi mediamente addensati;

- **2004** porzioni di territorio caratterizzate da un primo intervallo di almeno 15 metri di terreni argilloso limosi e limoso argillosi talvolta di origine organica e torbe caratterizzati da un diverso grado di consistenza da bassa a medio alta all'aumentare della profondità con possibile presenza di corpi lenticolari sabbioso limosi dello spessore decimetrico, seguiti da depositi di paleoalveo minori con tetto delle sabbie e spessore metrico variabile, generalmente moderatamente addensati;

- **2005** porzioni di territorio caratterizzate da terreni in prevalenza argilloso limosi e limoso argillosi a consistenza variabile da bassa a moderata e con presenza variabile di terreni torbosi o argille organiche nei primi 20 metri da piano campagna; talvolta è possibile la presenza di corpi lenticolari dello spessore inferiore al metro di limi sabbiosi e sabbie fini limose.

N.B. Va sottolineato come in corrispondenza delle zone MOPS 30502001, 30502002 e 30502003 in diversi tratti del territorio comunale si è in presenza di strutture geomorfologiche dossive (topograficamente rilevate) che possono essere potenzialmente interessate da fenomeni di lateral spreading. A parere dello scrivente sarebbe indicato negli standard di rappresentazione cartografica delle microzonazioni sismiche evidenziare queste aree rispetto a quelle ove le sabbie liquefacibili interessano porzioni di territorio orizzontali.

In **FIGURA 3.16** è riportata la legenda della carta delle Indagini, aggiornata al III livello di approfondimento degli studi di micro zonazione sismica.

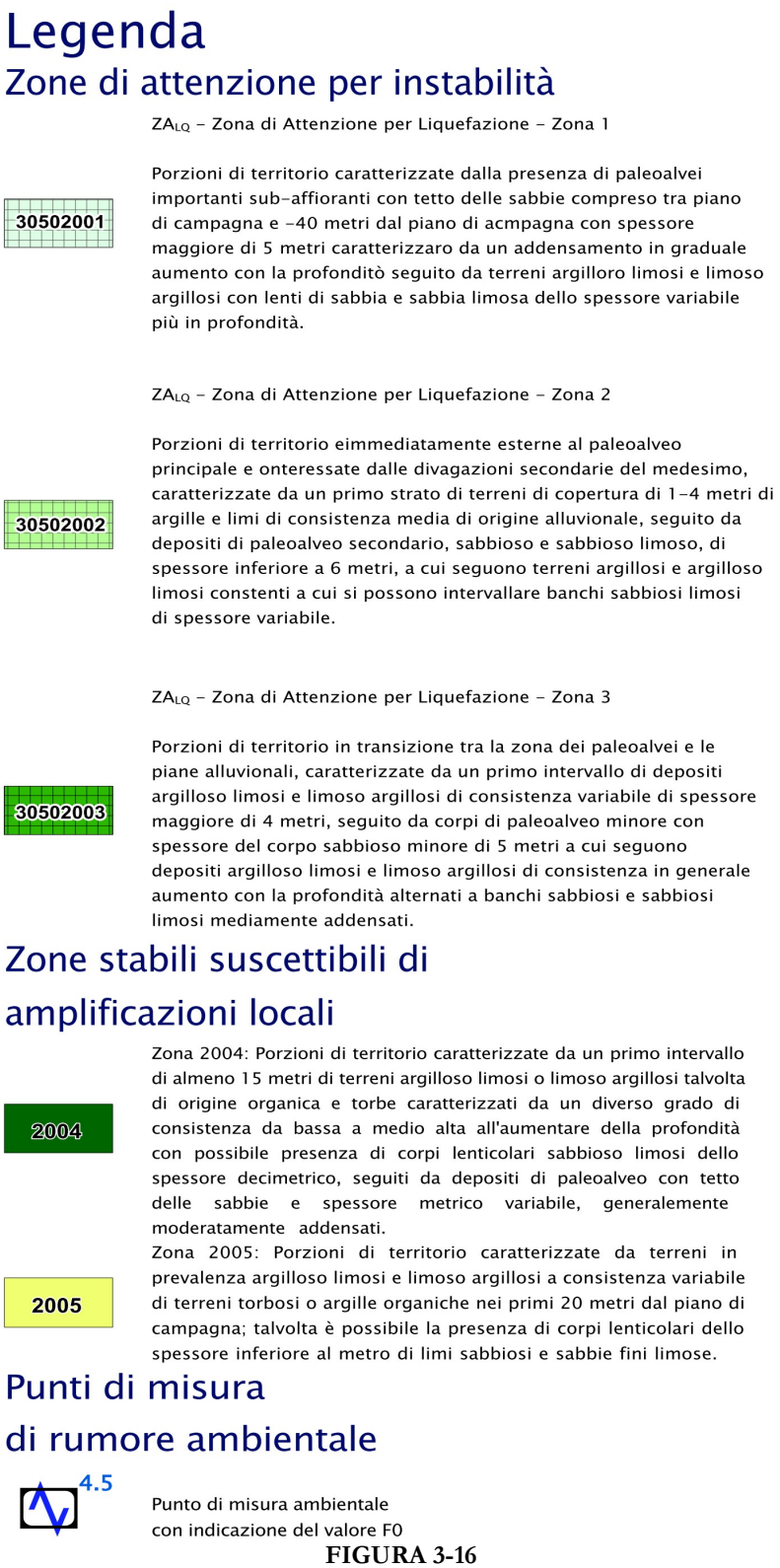
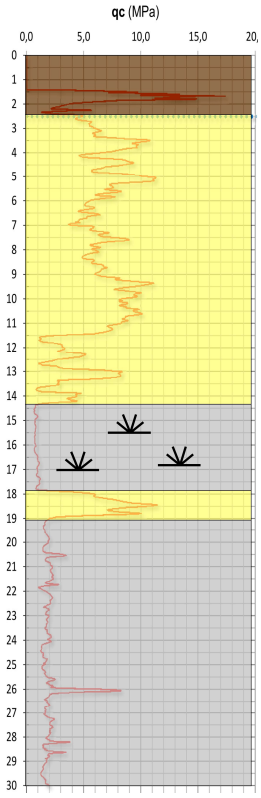


FIGURA 3-16

Si riportano le colonne lito-stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale di Voghiera.

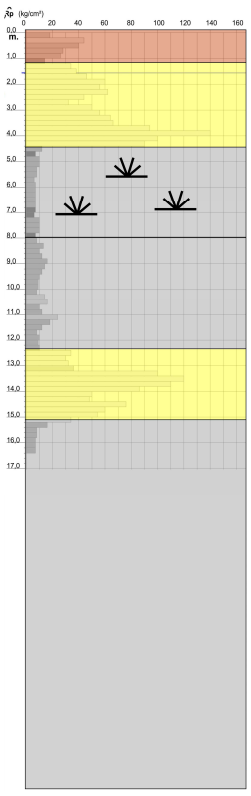
30502001



ZA_{LQ} – Zona di Attenzione per Liquefazione – Zona 1

Porzioni di territorio caratterizzate dalla presenza di paleoalvei importanti sub-affioranti con tetto delle sabbie compreso tra piano di campagna e -40 metri dal piano di acmpagna con spessore maggiore di 5 metri caratterizzaro da un addensamento in graduale aumento con la profonditò seguito da terreni argilloro limosi e limoso argillosi con lenti di sabbia e sabbia limosa dello spessore variabile più in profondità.

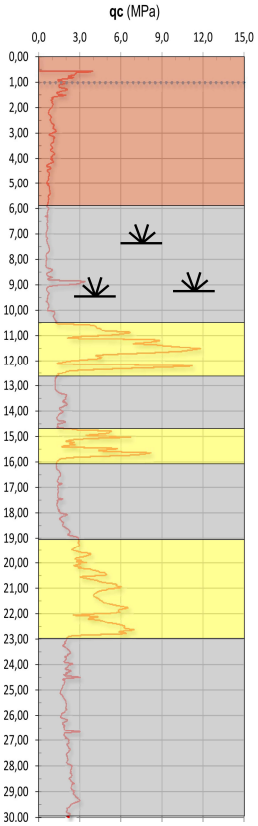
30502002



ZA_{LQ} – Zona di Attenzione per Liquefazione – Zona 2

Porzioni di territorio eimmediatamente esterne al paleoalveo principale e onteressate dalle divagazioni secondarie del medesimo, caratterizzate da un primo strato di terreni di copertura di 1-4 metri di argille e limi di consistenza media di origine alluvionale, seguito da depositi di paleoalveo secondario, sabbioso e sabbioso limoso, di spessore inferiore a 6 metri, a cui seguono terreni argillosi e argilloso limosi constenti a cui si possono intervallare banchi sabbiosi limosi di spessore variabile.

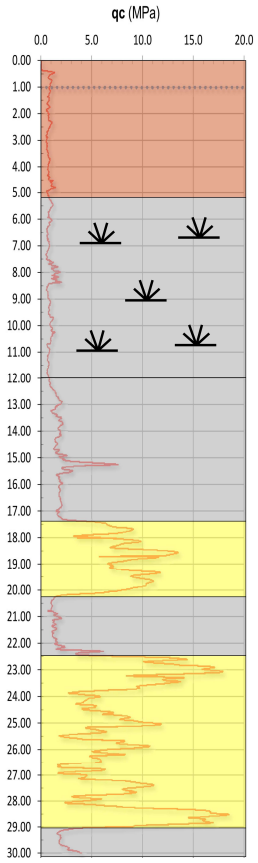
30502003



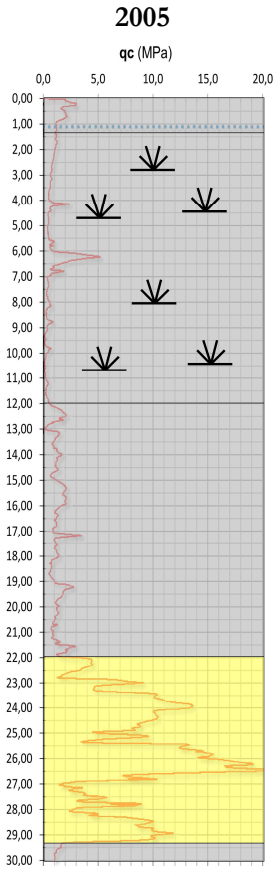
ZA_{LQ} – Zona di Attenzione per Liquefazione – Zona 3

Porzioni di territorio in transizione tra la zona dei paleoalvei e le piane alluvionali, caratterizzate da un primo intervallo di depositi argilloso limosi e limoso argillosi di consistenza variabile di spessore maggiore di 4 metri, seguito da corpi di paleoalveo minore con spessore del corpo sabbioso minore di 5 metri a cui seguono depositi argilloso limosi e limoso argillosi di consistenza in generale aumento con la profondità alternati a banchi sabbiosi e sabbiosi limosi mediamente addensati.

2004



Zona 2004: Porzioni di territorio caratterizzate da un primo intervallo di almeno 15 metri di terreni argilloso limosi o limoso argillosi talvolta di origine organica e torbe caratterizzati da un diverso grado di consistenza da bassa a medio alta all'aumentare della profondità con possibile presenza di corpi lenticolari sabbioso limosi dello spessore decimetrico, seguiti da depositi di paleoalveo con tetto delle sabbie e spessore metrico variabile, generalmente moderatamente addensati.



Zona 2005: Porzioni di territorio caratterizzate da terreni in prevalenza argilloso limosi e limoso argillosi a consistenza variabile di terreni torbosi o argille organiche nei primi 20 metri dal piano di campagna; talvolta è possibile la presenza di corpi lenticolari dello spessore inferiore al metro di limi sabbiosi e sabbie fini limose.

LEGENDA LOG STRATIGRAFICI

Sabbie e sabbie limose di paleoalveo

Limi e limi argillosi di piana alluvionale prossimale

Argille e argille limose di piana alluvionale distale

Coltre di limi argillosi, stadio di vita finale del fiume

Terreni organici e torbe

3.1.9. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S (Vs)

La Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) è stata aggiornata e viene riprodotta in scala 1:10.000.

Nella carta di microzonazione sismica allegata a questo studio, vengono riportati i valori di Vs_{30} ricavati attraverso misure dirette tramite prove SCPTU e tramite prove Re.MI. o M.A.S.W., come richiesto dalle linee guida per la loro compilazione dettate dal DPCN.

Per lo studio di microzonazione sismica di III Livello sono state realizzate 2 prove penetro metriche statiche con piezocono e sismocono SCPTU negli abitati di Ducentola e di Voghiera ad integrazione di quelli già esistenti; poi sono state fatte realizzare due prove geofisiche di superficie ESAC a Ducentola e a Montesanto anch'esse ad integrazione di quelle esistenti.

Il parametro Vs30 rappresenta la media ponderata dei valori delle velocità dell'onda di taglio "S" nei primi 30 m di sottosuolo indagato, matematicamente espressa da (**Eq. 3.1**):

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum hi/vi} \qquad \textbf{Eq. 3-1}$$

dove,

Vs30 : velocità media ponderata delle onde di taglio "S",

hi : spessore dello strato iesimo,

Vi : velocità delle onde di taglio "S" nello strato iesimo.

I valori di Vs30 sono stati calcolati in diversi modi:

- Misure dirette mediante sismocono SCPTU;
- Prove geofisiche

Misure dirette mediante sismocono

La prova consiste nell'inserire sulla punta elettrica della prova penetrometrica statica con punta elettrica dei ricevitori (geofoni) che con opportuna strumentazione e una sorgente di onde in superficie (**FIGURA 3.17**) possono essere misurati, a profondità diverse (SCPTU), fino alla profondità di -30,00 m da p.c., i tempi di arrivo delle onde sismiche fra la superficie (sorgente) ed i ricevitori (in profondità), analogamente a quanto avviene con il metodo geofisico cosiddetto "downhole".

In base ai tempi di arrivo conoscendo la distanza tra la sorgente ed il ricevitore si può calcolare la velocità delle onde sismiche ed in particolare delle onde di taglio (Vs).

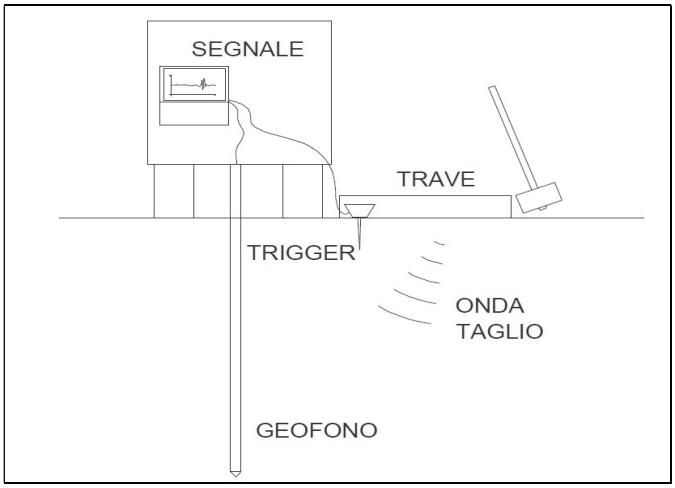


FIGURA 3-17 *Rappresentazione grafica della prova penetrometrica con piezocono sismico*

Indagini geofisiche

Le tecniche geofisiche comunemente utilizzate per la determinazione di tale parametro sono essenzialmente di tre tipi:

- prove in foro singolo (Down-Hole) o doppio (Cross-Hole),
- sismica di superficie (rifrazione e riflessione) con energizzazione di onde polarizzate (SH),
- tecniche mediante onde superficiali "R" e "L" (SASW, MASW e Microtremori Re.Mi., SPAC, MSPAC ed ESAC).

Le prime richiedono l'esecuzione di un sondaggio per permettere la determinazione del parametro. Le seconde, più costose, forniscono risultati di elevata qualità ma sono facilmente influenzate da rumori antropici che ne degradano le caratteristiche. Le ultime sono realizzate, ad eccezione della tecnica SASW, con procedure operative simili a quelle impiegate nella sismica a rifrazione.

Le prove geofisiche adottate in questo studio appartengono alla terza categoria e vengono caratterizzate con applicazione della tecnica dei microtremori (Autocorrelazione Spaziale Migliorato "ESAC") che permette di ottenere con minor costo di processo il profilo verticale della velocità media delle onde di taglio "S" e contemporaneamente di raggiungere profondità superiori a 30 m favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock sismico - così come definito dalla normativa (Vs>800 m/s) - coadiuvando contemporaneamente l'interpretazione delle eventuali variazioni di rigidità sismica (VS2 x ρ) dei terreni investigati.

Attraverso l'analisi delle onde superficiali "tipo Rayleigh R", che costituiscono un particolare tipo di onde superficiali trasmesse sulla superficie libera di un mezzo omogeneo ed isotropo, si ricava indirettamente la velocità delle onde di taglio "S" secondo l'equazione **Eq 3.2**:

$$V_R = \left(\frac{0.862 + 1.14\upsilon}{1 + \upsilon} \right) \times V_S \qquad \textbf{Eq. 3-2}$$

Dove:

VR ≅ 0.92 VS

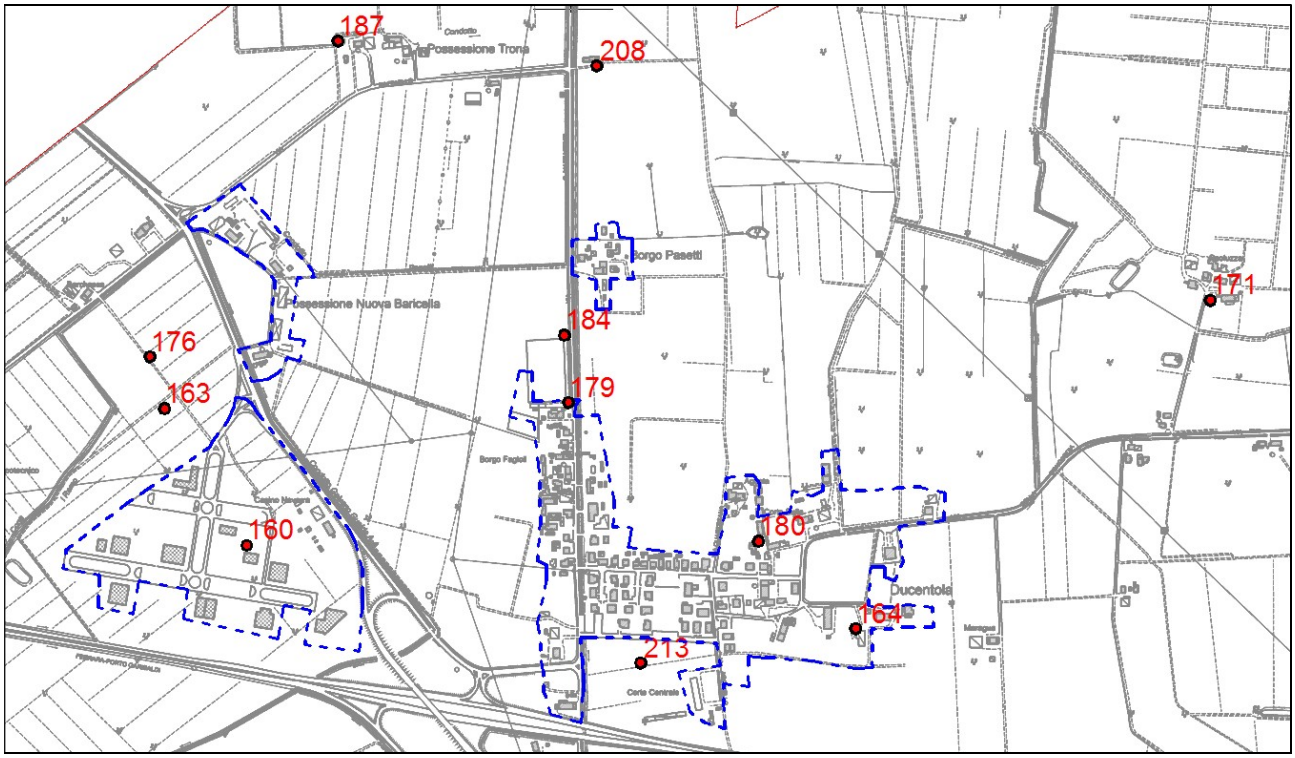
VR: velocità di fase dell'onde Rayleigh

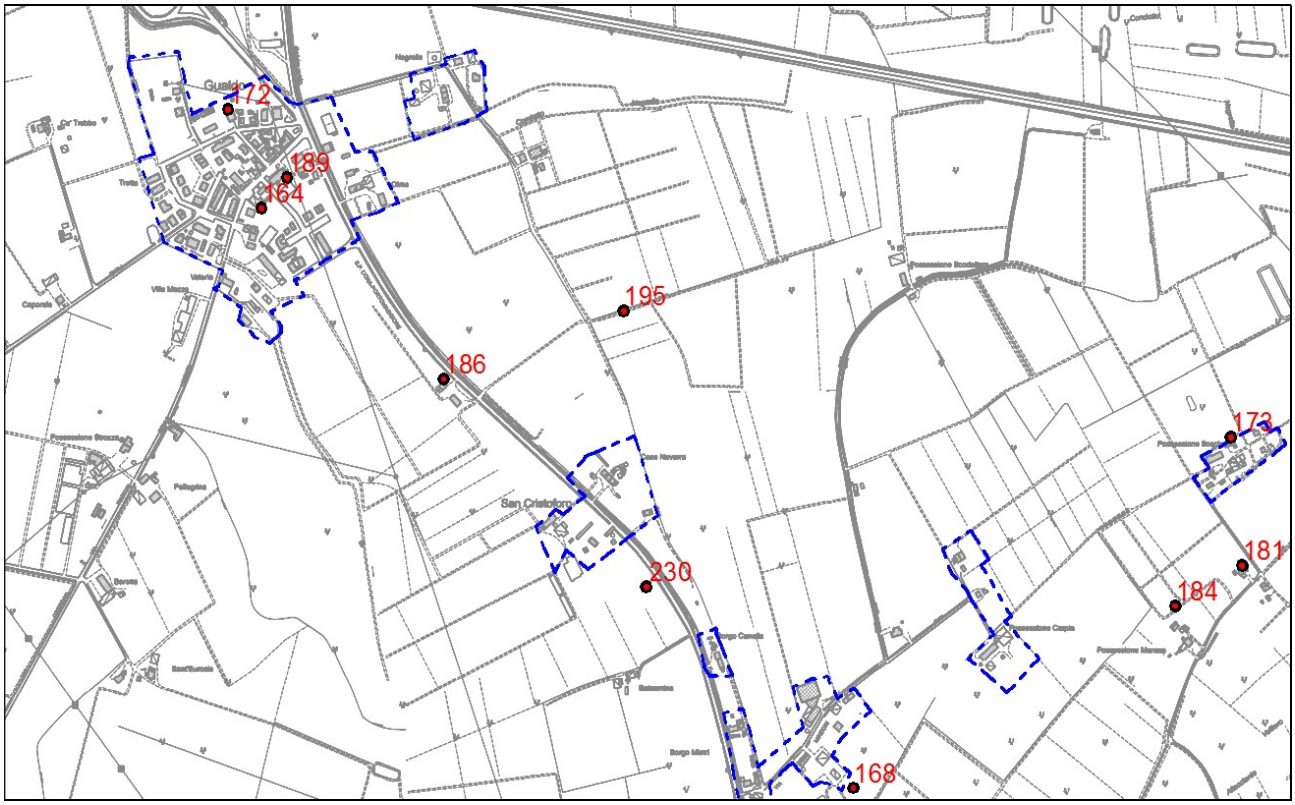
VS:velocità di propagazione dell'onda di taglio

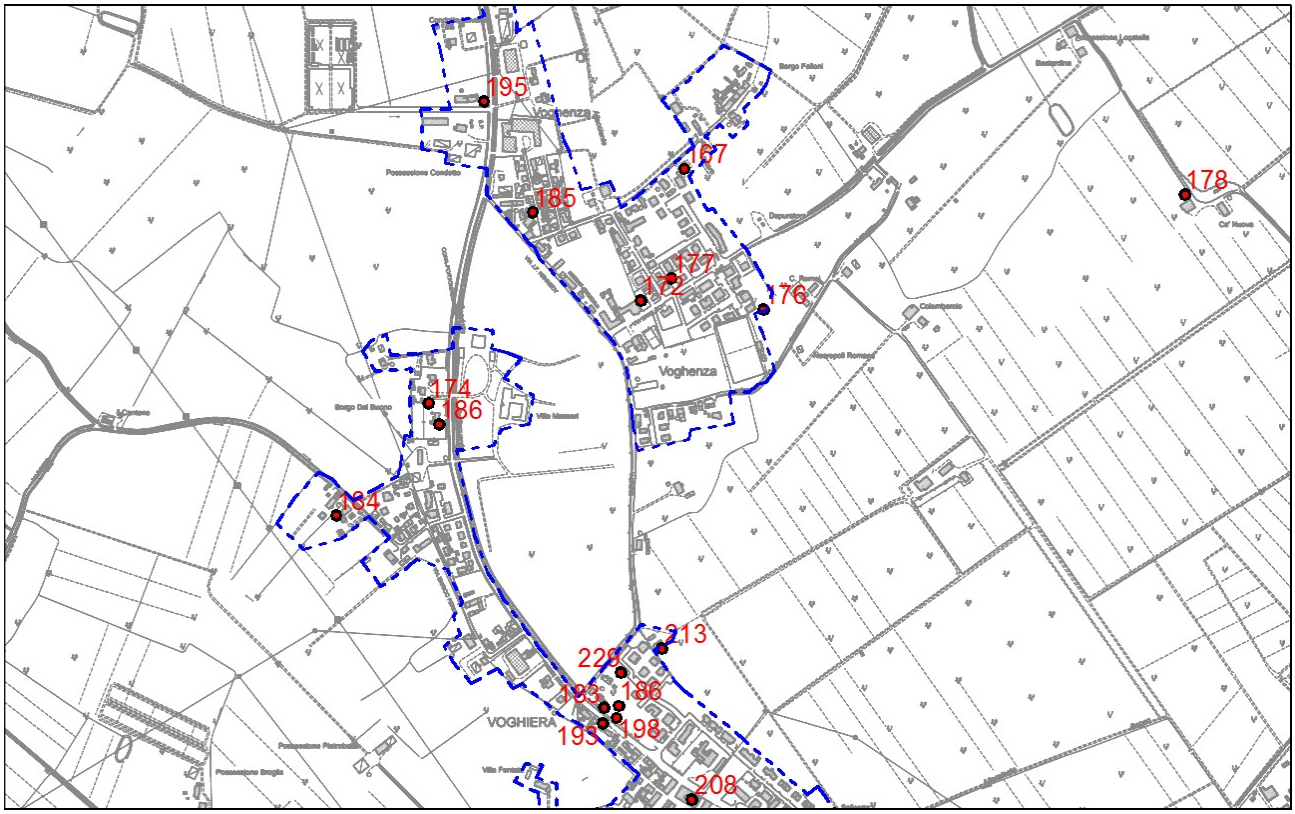
ρ: rapporto di Poisson

L'analisi delle tracce sismiche registrate è consistita nell'applicazione di una trasformata bi-dimensionale di tipo *p-f* (ρ=slowness "1/velocità"-*f*=frequenza "Hz"/McMechan e Yedlin, 1981) che analizza la variazione nel tempo dell'energia di propagazione del segnale sismico lungo tutte le direzioni rispetto alla linea sismica. Il risultato di tale analisi rappresenta il cosiddetto spettro di potenza da cui si ottiene in prima battuta la curva di dispersione sperimentale delle onde "R" e successivamente, attraverso una procedura di modellazione numerica, la determinazione delle velocità delle onde di taglio "S".

Le indagini geofisiche utilizzate per la determinazione dei valori di Vs30 sono caratterizzate da una tecnica chiamata dei microtremori mediante la quale vengono registrate onde passive di sottofondo attraverso uno stendimento di geofoni lineare equidistanziati. Le prove geofisiche realizzate permettono di ottenere con minor costo di processo il profilo verticale della velocità media delle onde di taglio "S" e contemporaneamente di raggiungere profondità superiori a 30 m favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock - così come definito dalla normativa (Vs>800 m/s) – e l'interpretazione delle eventuali variazioni di rigidità sismica (VSxρ) dei terreni investigati.




172
189
164
195
186
173
181
184
230
168


195
Voghenza
167
185
178
177
172
176
Voghenza
174
186
184
213
228
193
186
VOGHIERA
193
198
208

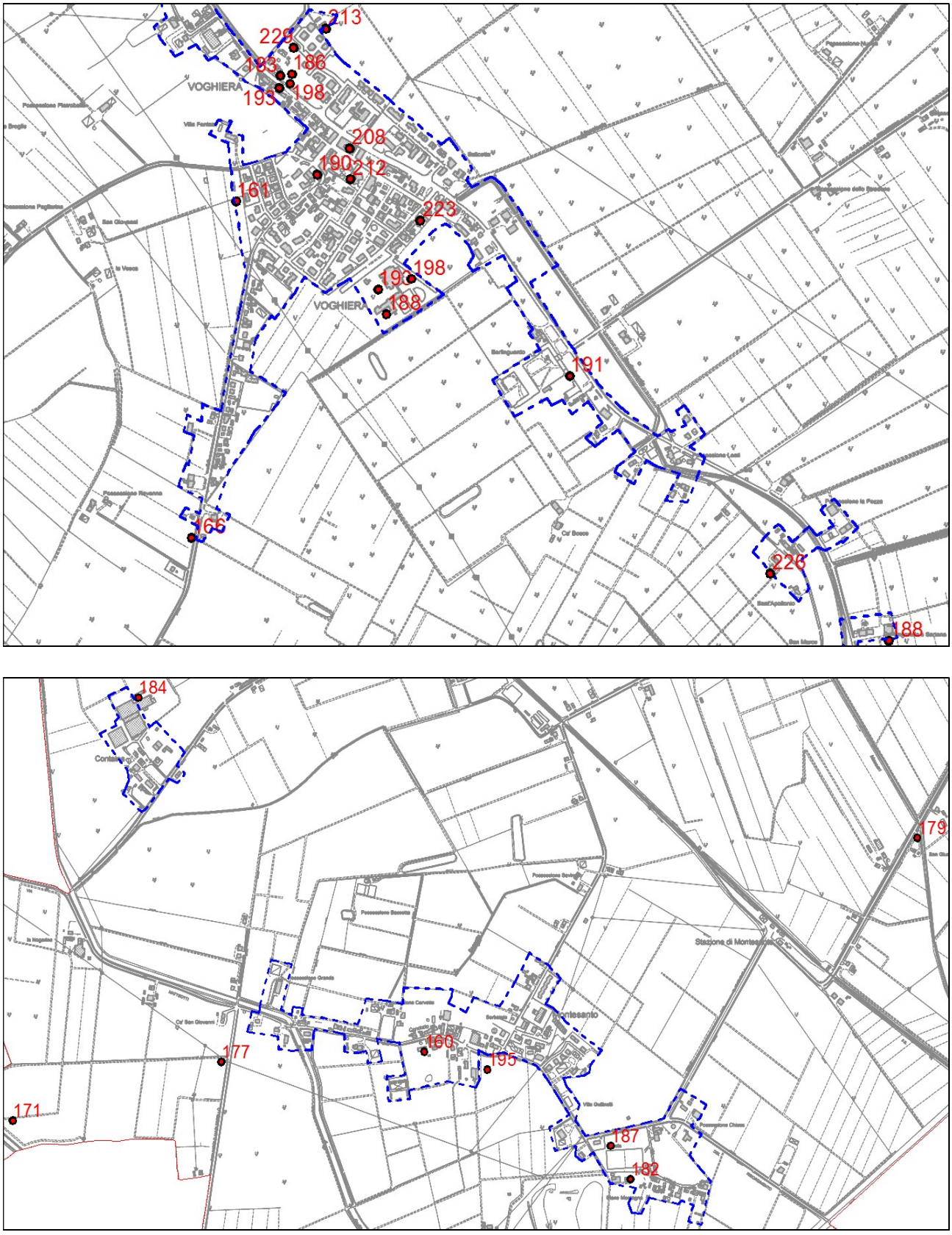


FIGURA 3-18 – *Distribuzione dei valori di Vs30 calcolati su tutto il territorio di Voghiera*

3.2. SEGNALI DI INPUT PER ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

I segnali di input di riferimento per le analisi di risposta sismica locale sono indicati nell'Allegato A4 degli indirizzi regionali (DGR 476/2021); essi sono scaricabili sul WebGIS: http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html realizzata da EUCENTRE (**FIGURA 3.19**).

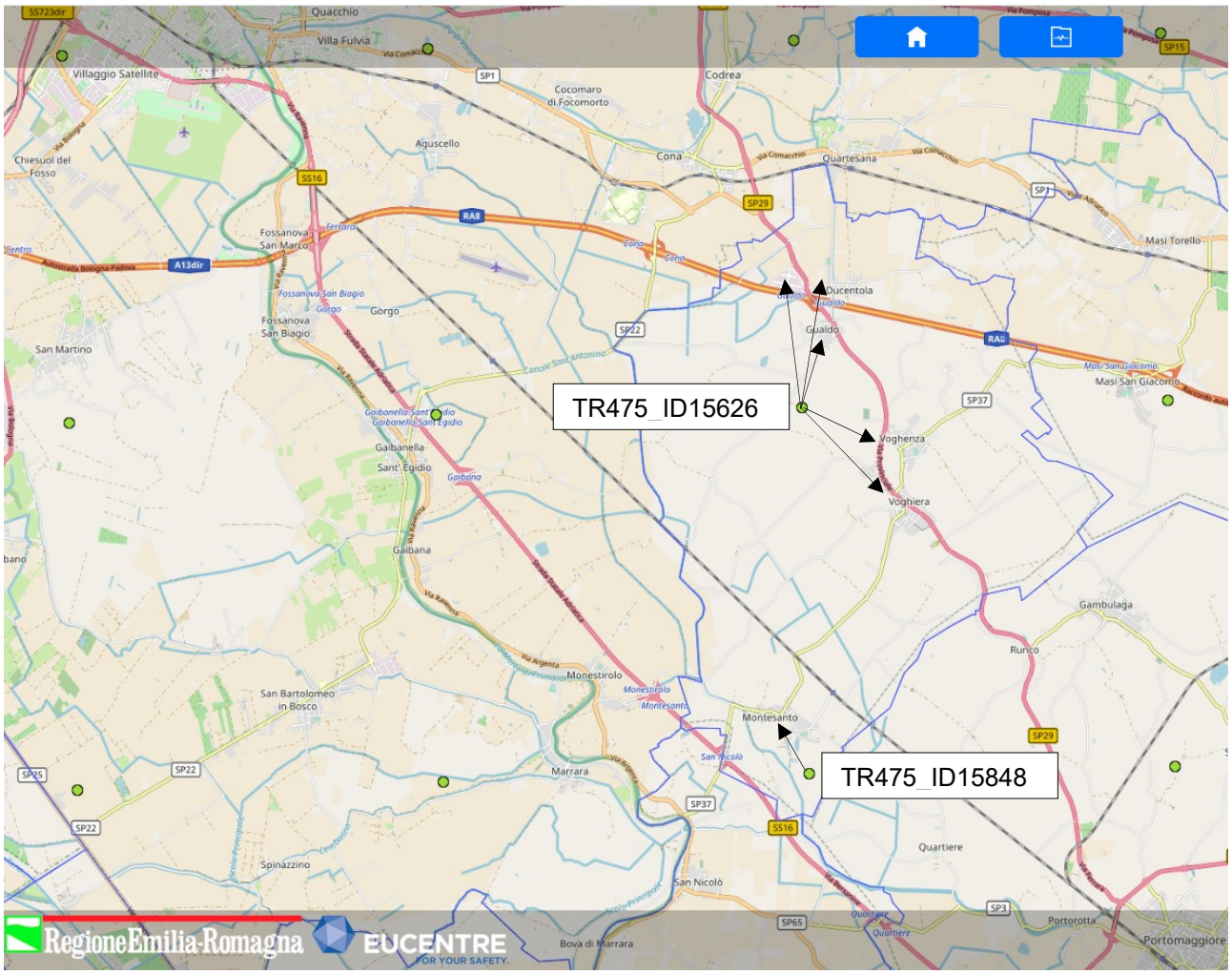
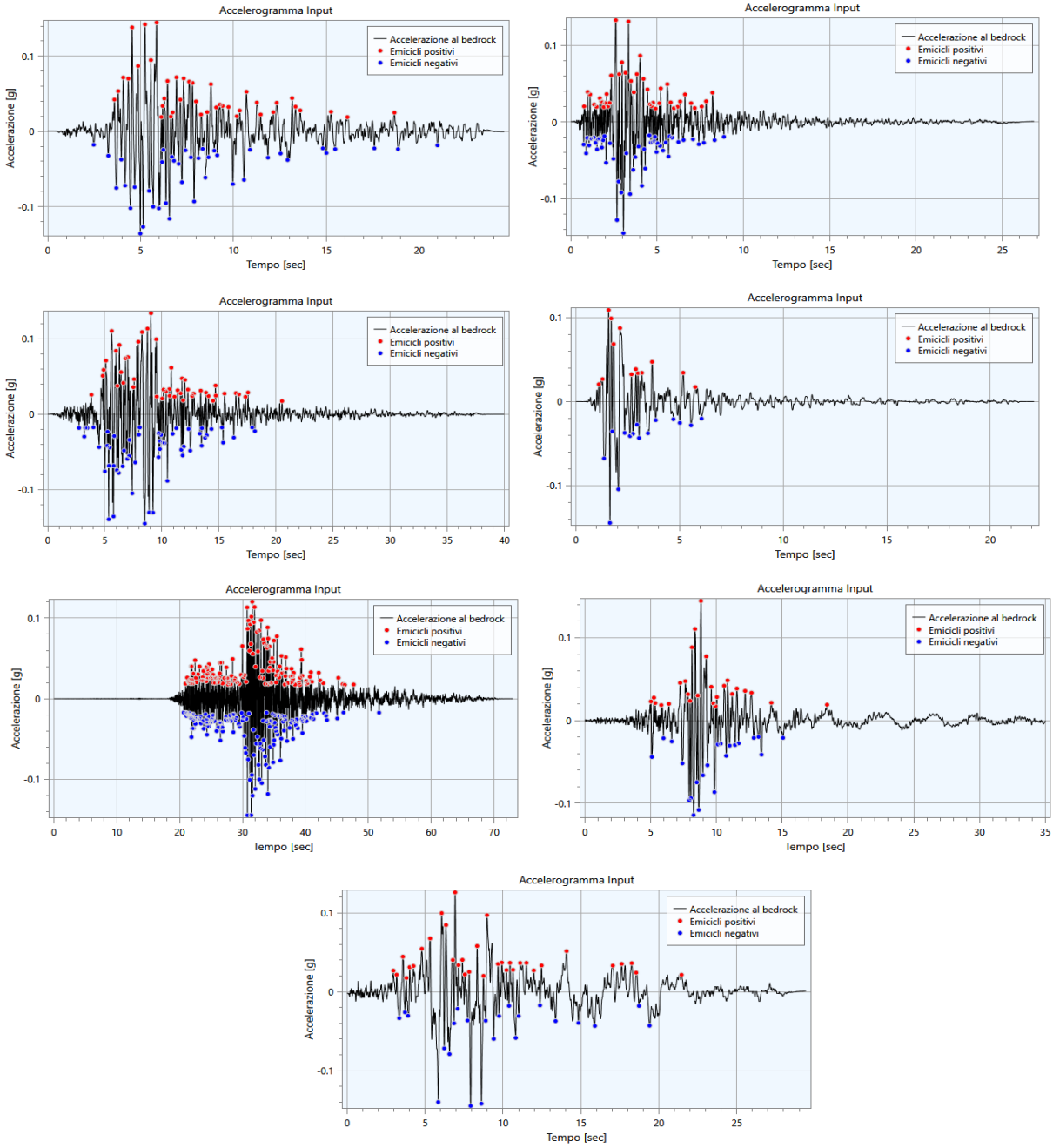


FIGURA 3-19 – *Estrazione dei gruppi di 7 accelerogrammi, come da prescrizione della DGR 476/2021.*
https://rer.eucentre.it/mainpage.jsp

Sostanzialmente per le località di Ducentola, Gualdo, Voghenze e Voghiera si farà riferimento alla settupla TR475_ID15626 (**FIGURA 3.20**), mentre per la località Montesanto si farà riferimento alla settupla TR475_ID15848 (**FIGURA 3.21**).

Si fa presente che alcuni dei 7 acceleregrammi presentano tempi di registrazione molto lunghi, per cui per alleggerire il calcolo, sono stati tagliati, mantenendo le fasi di registrazione ove è più significativo la fase di strong-motions., ove cioè è concentrata la maggior parte dell'energia liberata dal sisma.

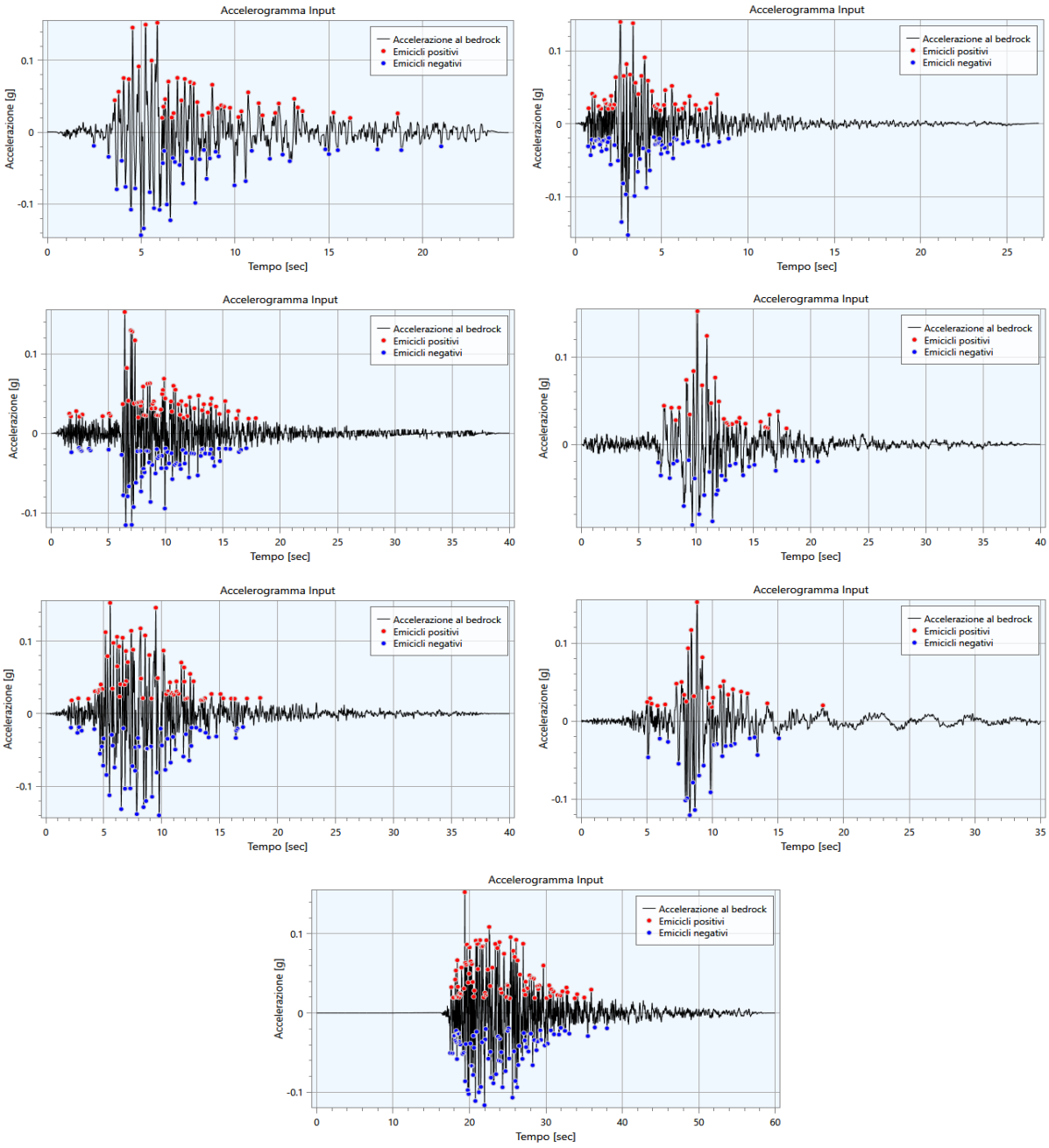
TR475_ID15626



% Ma	gnitude	(Mw)	Ep	ic.Distance(km) Scaling_Factor Source File_Name
6.2	29.9	1.89	%	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.24	%	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.69	38.07	0.95	%	NGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
5.6	18	0.91	%	ESM IT.LRS..HNE.D.19980909.112800.C.ACC.ASC
6.2	78.79	2.53	%	NGA RSN2989_CHICHI.05_CHY102N.AT2
6.6	31	0.59	%	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.5	57.74	3.11	%	NGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP247.AT2

FIGURA 3-20 - *Settupla di accelerogrammi* TR475_ID15626

TR475_ID15848



% Ma	gnitude	(Mw)	Ep	ic.Distance(km) Scaling_Factor Source File_Name
6.2	29.9	1.99	%	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.31	%	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
5.99	54.21	2.47	%	NGA RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
6.93	83.53	1.45	%	NGA RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
6.69	38.07	1.1	%	NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
6.6	31	0.62	%	KiKnet SMNH100010061330.EW2
5.9	14.4	2.6	%	ESM IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

FIGURA 3-21 - *Settupla di accelerogrammi* TR475_ID15848

4. ANALISI DELLA RSL PER AMBITI DI STUDIO – MODELLI DI INPUT

In questo capitolo si riporta il modello stratigrafico ed il profilo di Vs adottato per ogni ambito di studio. In particolare si riporta la suddivisione in strati pseudomogenei dei primi 30m investigati con il cono sismico, e la suddivisione in strati pseudomogenei della stratigrafia profonda adottata per il rispettivo ambito. Con le indagini ESAC, fatte eseguire alla ditta TeamGeofisica.ceg, del dott. Nasser Abu Zeid, il bedrock sismico non è mai stato raggiunto. Esso è atteso a profondità molto maggiori di 350m.

Il software utilizzato per condurre l'analisi di risposta sismica locale, la cui licenza è di proprietà dello scrivente, è LSR-2D versione 5.0.1. (**FIGURA 4.1**).



FIGURA 4-1 *Software in licenza dello scrivente per gli studi di Risposta Sismica Locale*

L'analisi condotta è di tipo Equivalente Lineare.

Il territorio è stato suddiviso in otto aree pseudomogenee, e per ognuna è stato scelto un punto per lo studio di risposta sismica locale (**FIGURA 4.2**).



FIGURA 4-2 – *Punti di studio delle RSL*

1. Area produttiva Gualdo Ducentola, esterna al paleoalveo del fiume Eridano (punto di studio area produttiva).
2. Centro abitato di Ducentola, interno al paleoalveo del fiume Eridano (punto di studio presso il campo sportivo di Ducentola).
3. Centro abitato di Gualdo esterno al paleoalveo del fiume Eridano (punto di studio presso l'asilo nido di Gualdo).
4. Voghenza centro abitato e Villa Massari-Mazzoni interno la paleoalveo del fiume Eridano (punto di studio Parco Massari).
5. Voghenza centro abitato esterno al paleoalveo del fiume Eridano (punto di studio Teatro di Voghenza).
6. Voghiera centro abitato interno al paleoalveo del fiume Eridano (punto di studio fronte Est del Castello del Belriguardo).
7. Voghiera centro abitato esterno al paleoalveo del fiume Eridano (punto di studio Scuole Elementari di Voghiera).
8. Montesanto centro abitato, esterno al paleoalveo del fiume Eridano (punto di studio Campo da Calcio di Montesanto).

I risultati dell'analisi del punto di studio nell'area produttiva di Gualdo Ducentola, esterni sul alto ovest al paleoalveo del fiume Eridano, sono assunti anche per la porzione di paese di Ducentola esterna al paleoalveo del fiume sul lato est.

Per ognuna delle otto aree di studio si riportano ora i modelli stratigrafici ed i profili di Vs sia dei primi 30m (profili di dettaglio), sia quelli profondi.

ZONA PRODUTTIVA GUALDO-DUCENTOLA esterno paleoalveo Eridanus

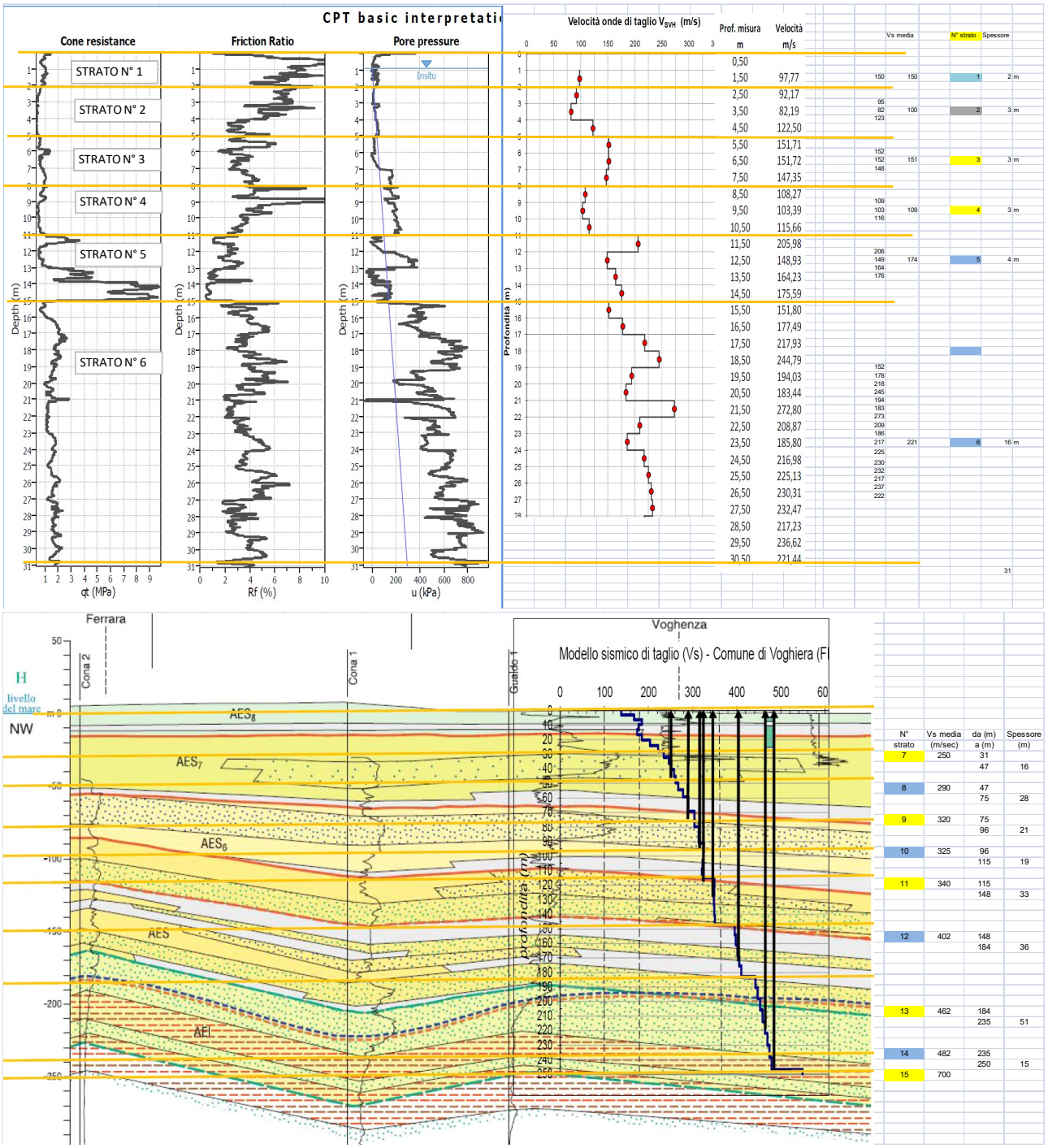


FIGURA 4-3

DUCENTOLA –sopra paleoalvo fiume Eridanus

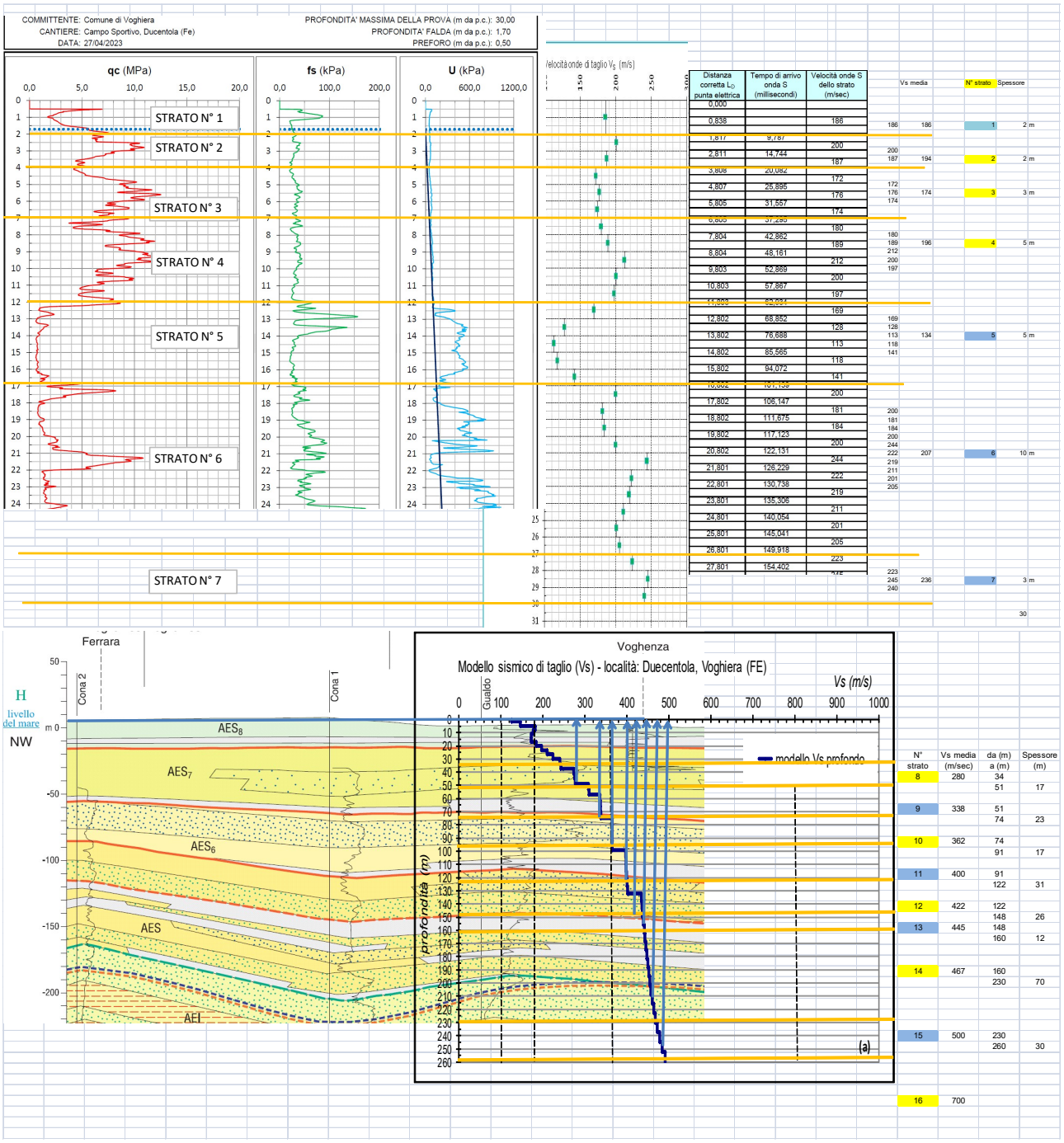


FIGURA 4-4

GUALDO esterno al paleoalveo del fiume Eridanus (Asilo Nido)

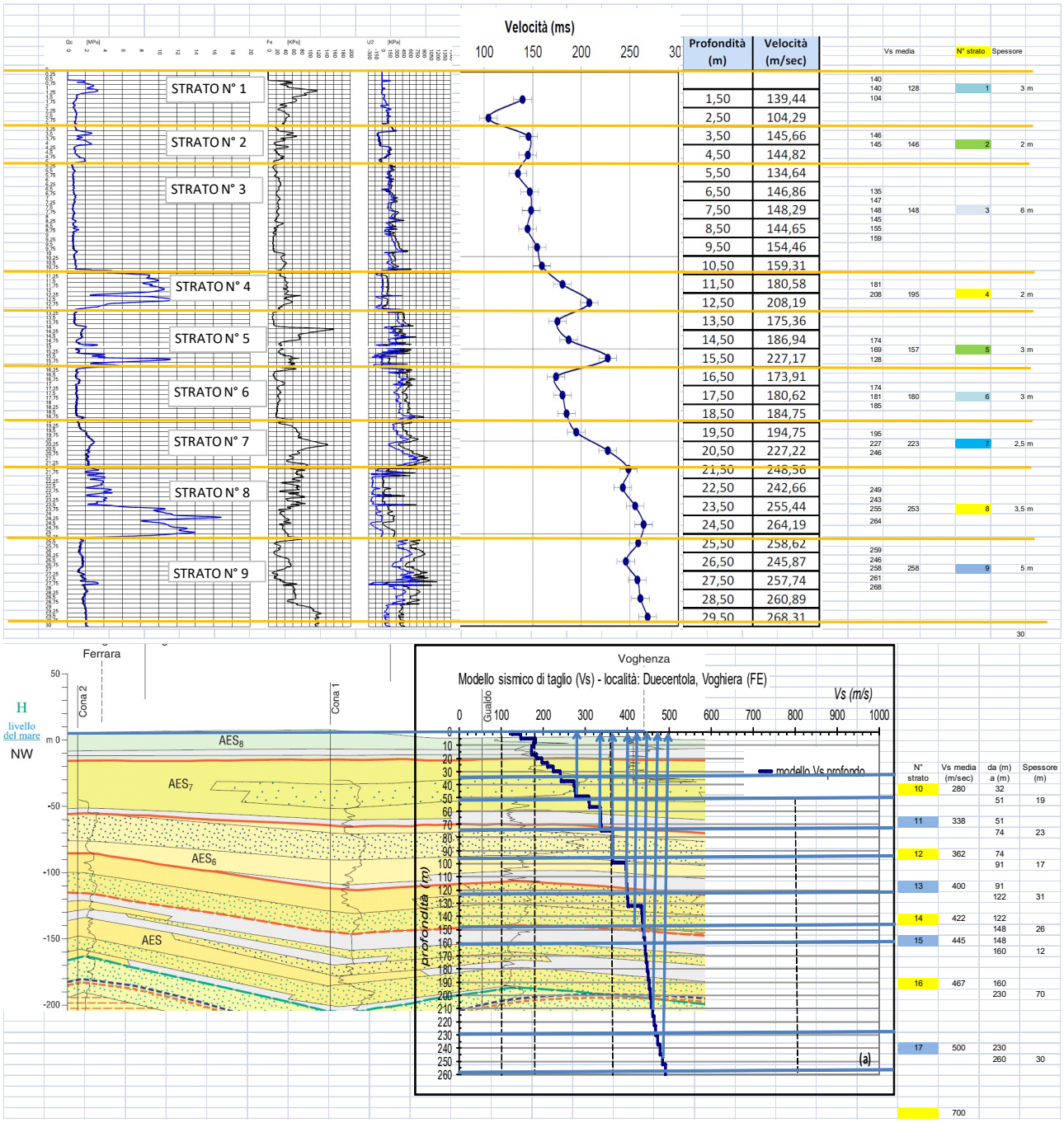


FIGURA 4-5

VOGHENZA sopra il paleo alveo del fiume Eridano (Villa Massari)

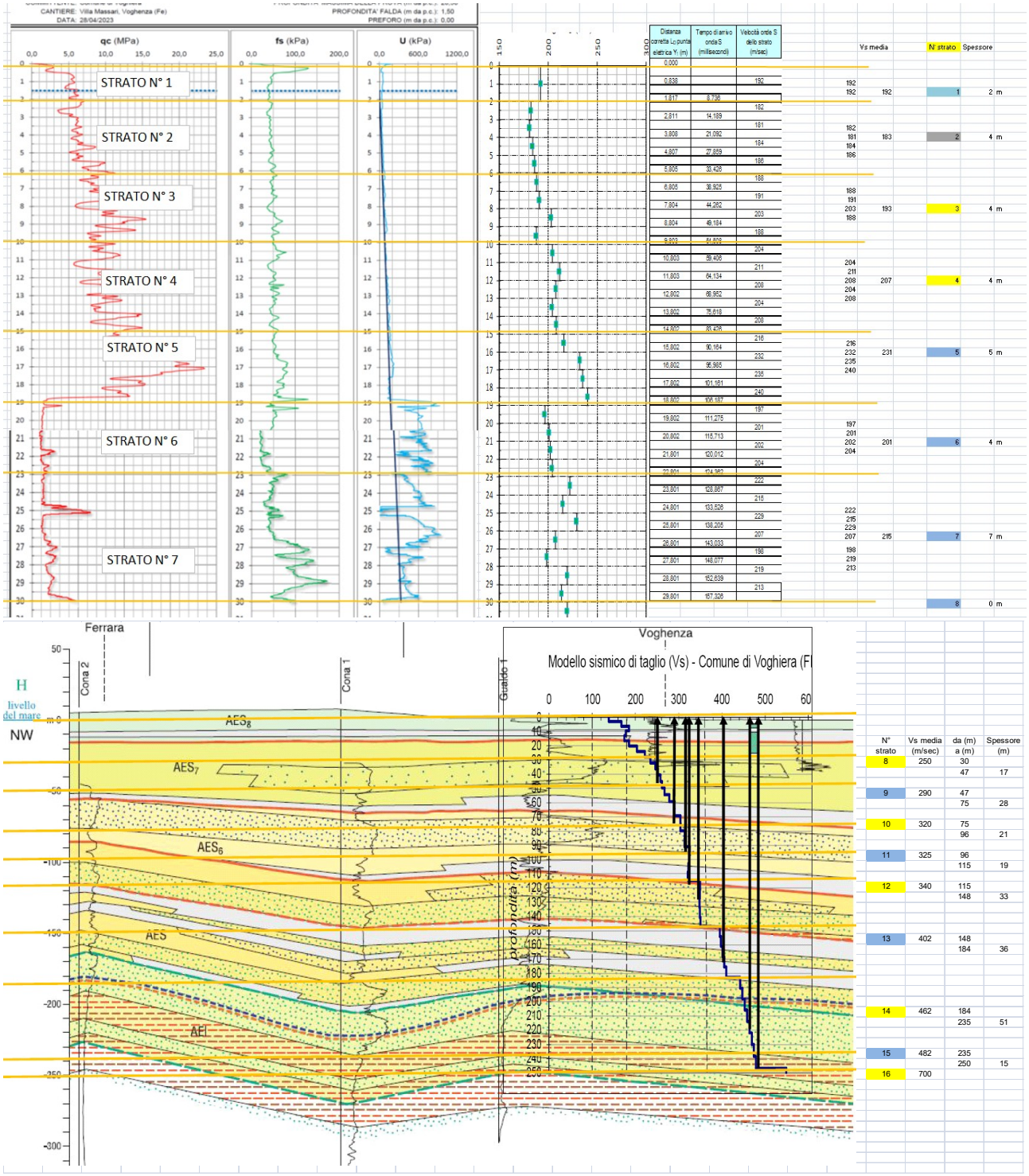


FIGURA 4-6

VOGHENZA esterno al paleoalveo del fiume Eridano (Teatro di Voghenza)

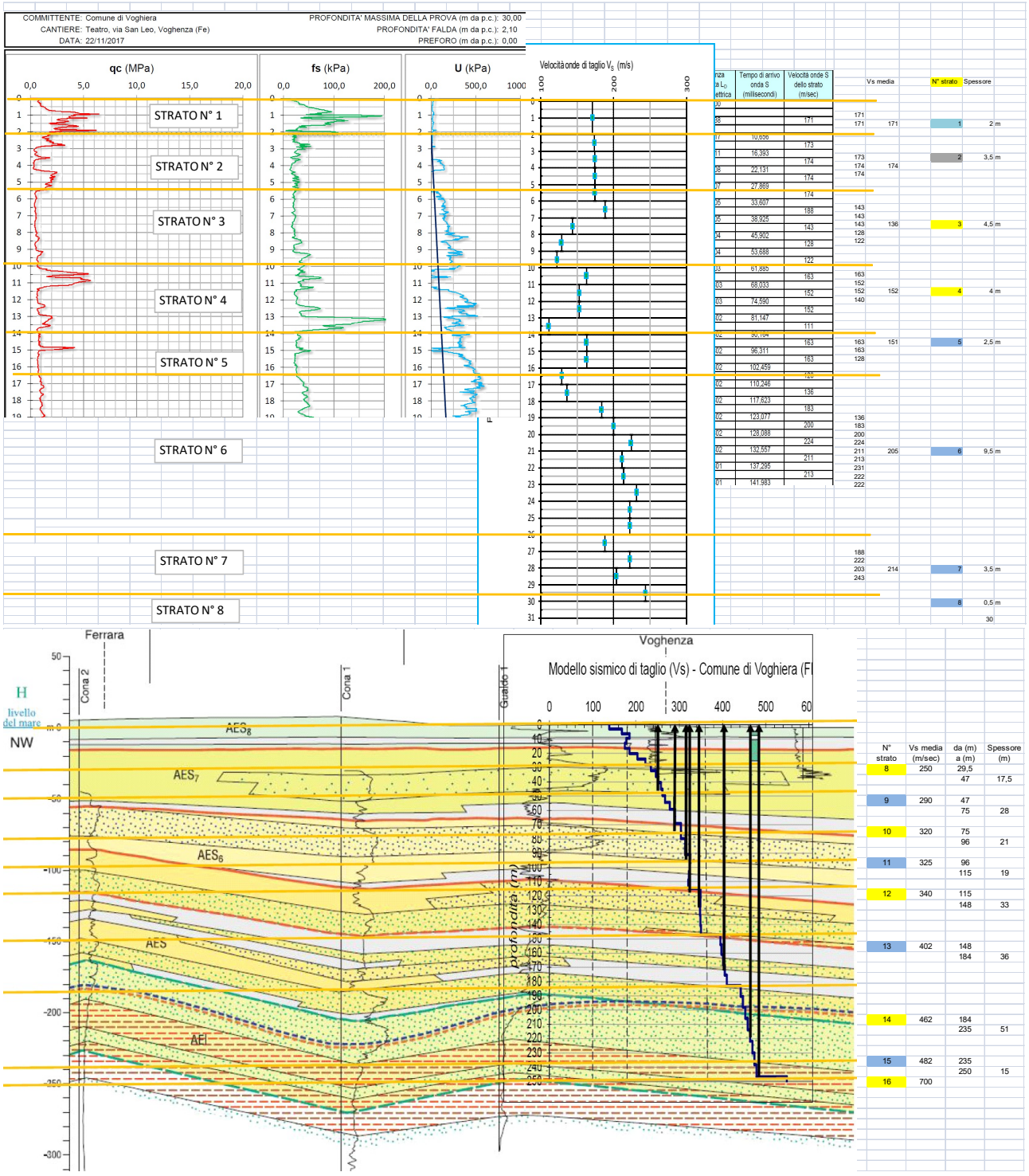


FIGURA 4-7

VOGHIERA centro abitato sul paleoalveo del fiume Eridanus (Fronte del Castello del Belriguardo)

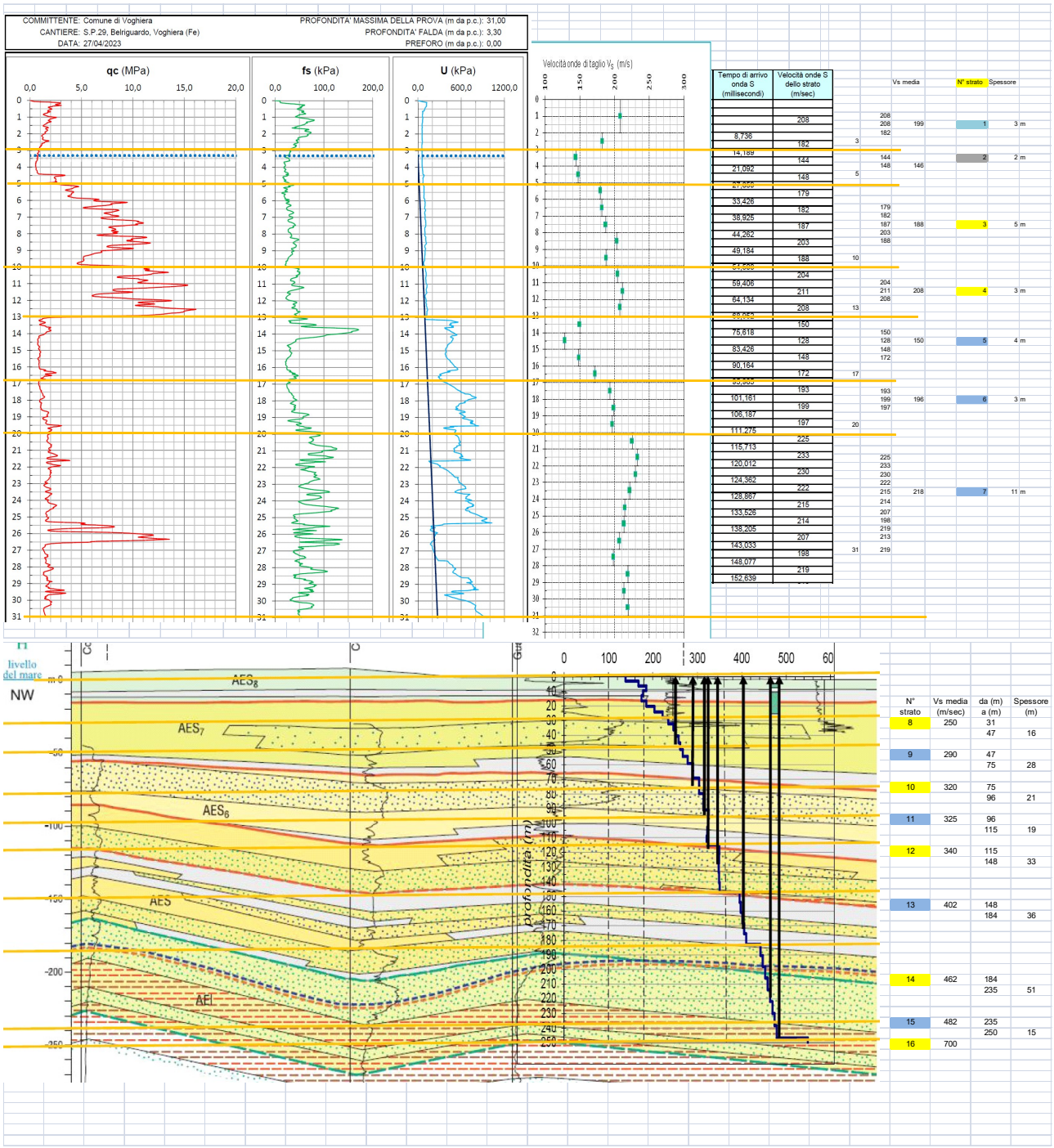
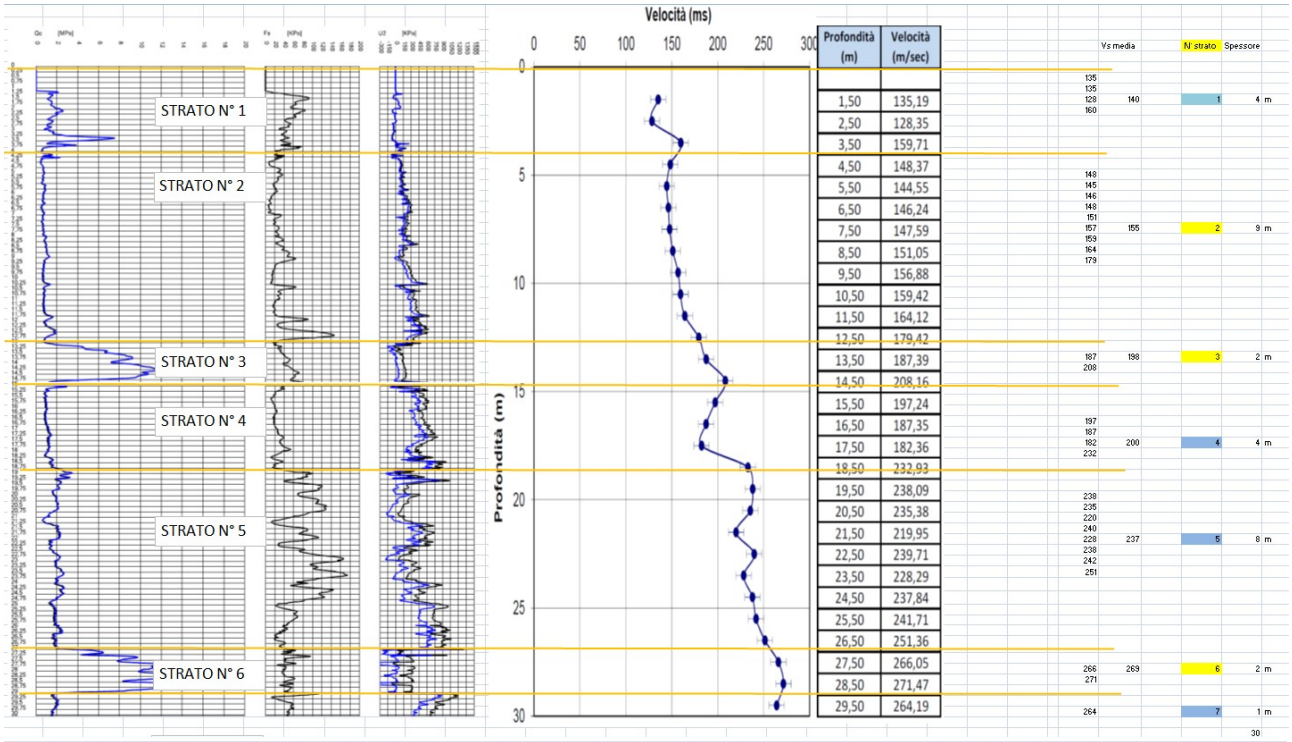


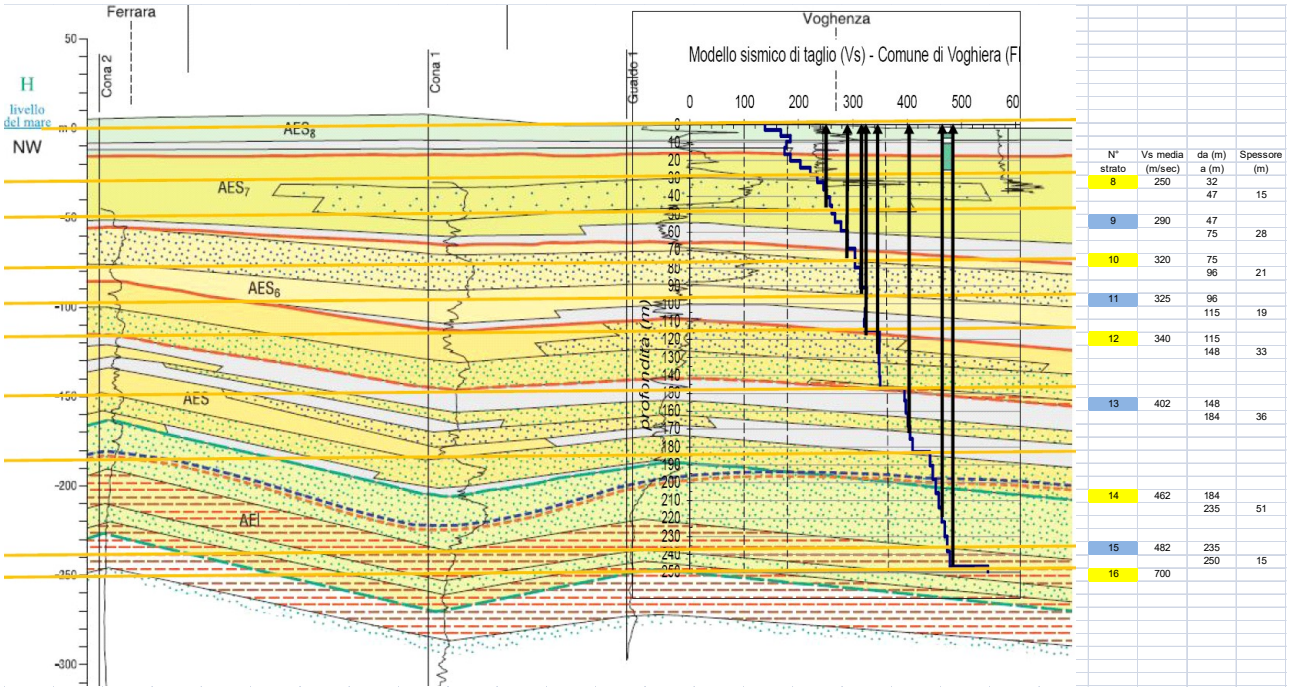
FIGURA 4-8

VOGHIERA centro abitato esterno al paleoalveo del fiume Eridano



Profondità (m)	Velocità (m/sec)
1,50	135,19
2,50	128,35
3,50	159,71
4,50	148,37
5,50	144,55
6,50	146,24
7,50	147,59
8,50	151,05
9,50	156,88
10,50	159,42
11,50	164,12
12,50	179,42
13,50	187,39
14,50	208,16
15,50	197,24
16,50	187,35
17,50	182,36
18,50	232,93
19,50	238,09
20,50	235,38
21,50	219,95
22,50	239,71
23,50	228,29
24,50	237,84
25,50	241,71
26,50	251,36
27,50	266,05
28,50	271,47
29,50	264,19

Vs media	N strato	Spessore
140	1	4 m
155	2	9 m
198	3	2 m
200	4	4 m
237	5	8 m
269	6	2 m
	7	1 m



N° strato	Vs media (m/sec)	da (m) a (m)	Spessore (m)
8	250	32	
		47	15
9	290	47	
		75	28
10	320	75	
		96	21
11	325	96	
		115	19
12	340	115	
		148	33
13	402	148	
		184	36
14	462	184	
		235	51
15	482	235	
		250	15
16	700		

FIGURA 4-9

MONTESANTO esterno al paleoalveo del fiume Eridano

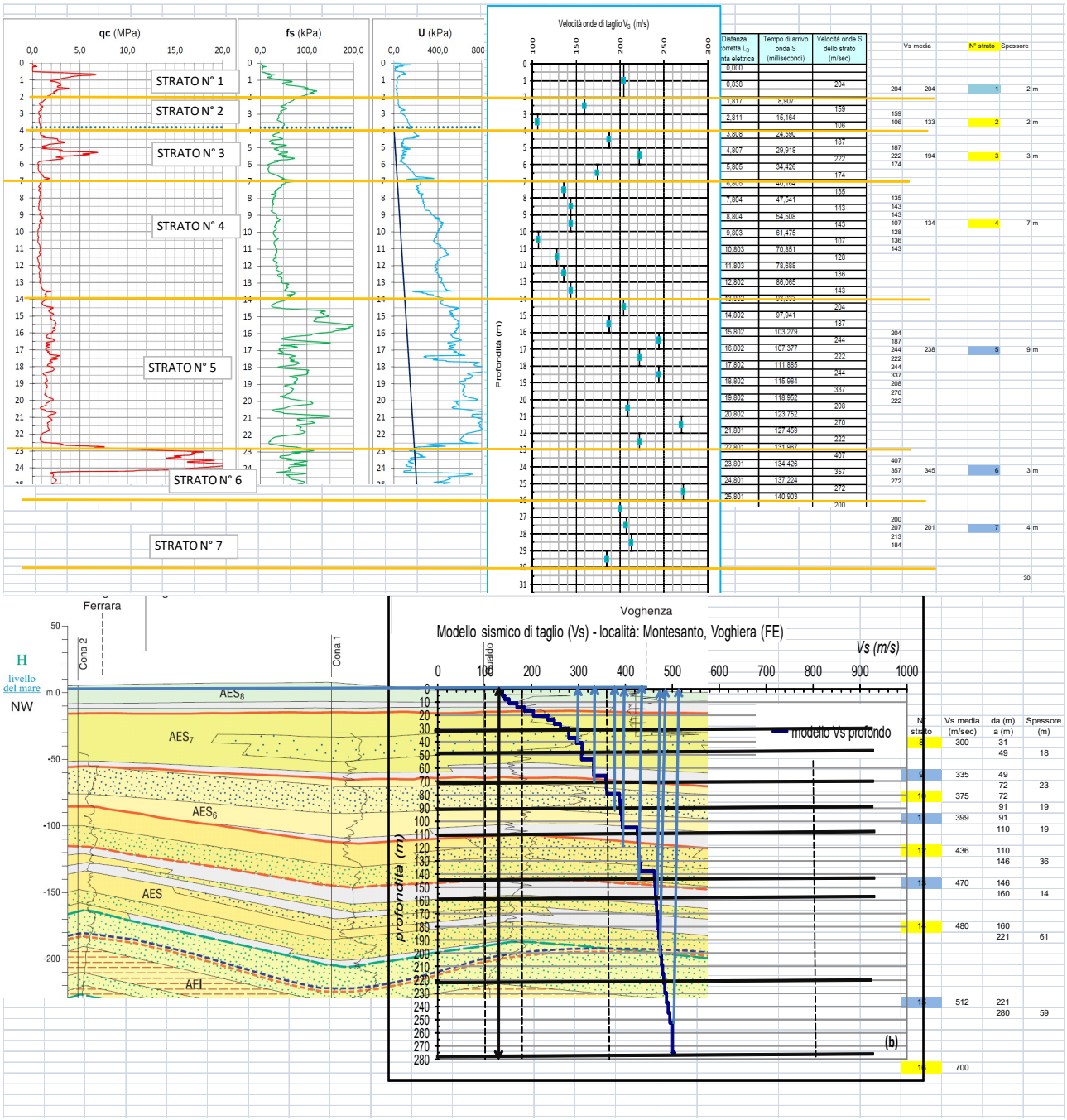


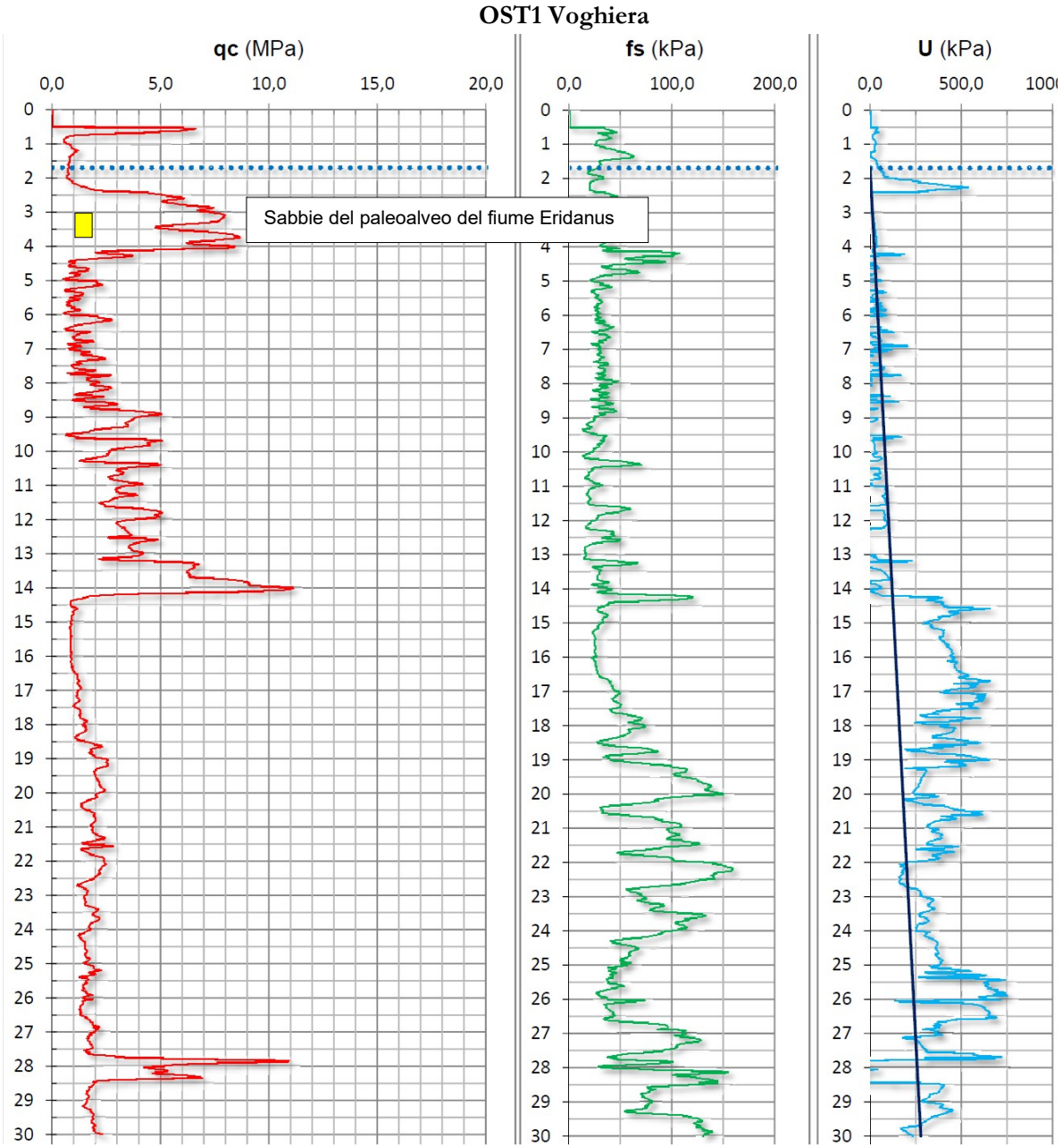
FIGURA 4-10

4.1. CURVE DI DECADIMENTO DEL MODULO DI TAGLIO G_0 E DI SMORZAMENTO D.

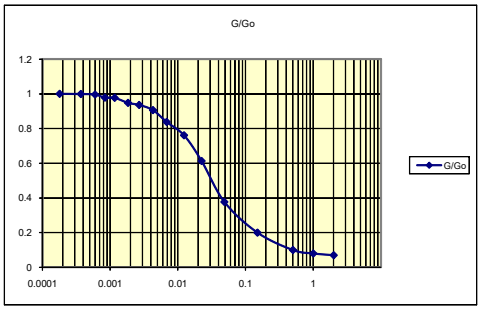
E' ovvio che uno studio di risposta sismica locale rigoroso si necessiterebbe di indagini di laboratorio sui terreni prelevati nelle verticali indagate, in quanto si tratta di valutare il comportamento geotecnico in campo dinamico di sedimenti in sito, sito specifici. Il costo di queste analisi sarebbe troppo oneroso per l'amministrazione pubblica. In ogni caso la banca dati personale dello scrivente, costruita in anni di studi specifici per opere pubbliche, realizzate nel ferrarese, consente di adottare curve di decadimento del modulo Go abbastanza vicine alla realtà, riducendo i margini di errore, che si avrebbero utilizzando le curve bibliografiche riportate nei codici di calcolo, provenienti da esperienze condotte su sedimenti studiati in giro per il mondo.

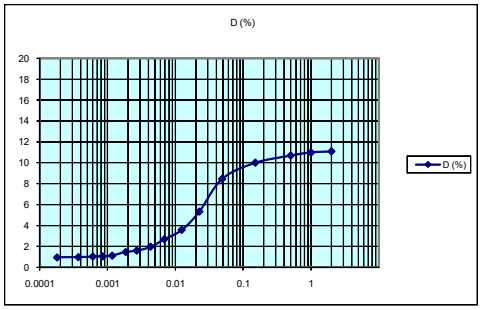
In particolare, per Voghiera si farà riferimento a curve di colonna risonante eseguite su campioni prelevai presso al locale Caserma dei Carabinieri in occasione di uno studio di vulnerabilità sismica di questo edificio.

Le curve di decadimento del modulo Go e di Dumping utilizzate sono le seguenti:



OST1 CC Vog		3,0m-3,6m	Sabbia
γ (%)	G/Go	γ (%)	D (%)
0.00018	1	0.00018	0.95
0.00037	0.999	0.00037	0.97
0.0006	0.996	0.0006	1.02
0.00084	0.978	0.00084	1.06
0.00117	0.977	0.00117	1.116
0.00184	0.948	0.00184	1.47
0.00269	0.936	0.00269	1.59
0.0043	0.906	0.0043	1.96
0.00684	0.838	0.00684	2.68
0.01235	0.761	0.01235	3.57
0.02244	0.613	0.02244	5.33
0.04871	0.377	0.04871	8.45
0.15	0.2	0.15	10
0.5	0.1	0.5	10.7
1	0.08	1	11
2	0.07	2	11.1





rev.	data emiss.	sperimentatore	direttore
0	13/12/2021	Angeloni	Saccenti

Normativa di riferimento: ASTM D422
Classificazione di riferimento: AGI 1977
N° certificato di prova:
N° verbale di accettazione: 097/2021

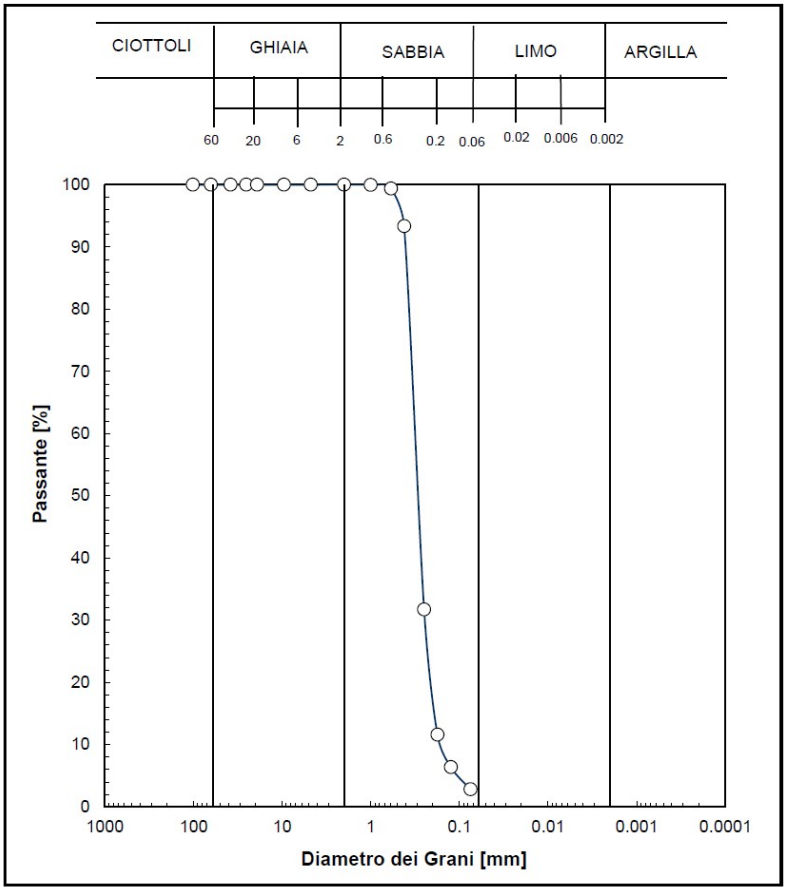
Committente:	**Comune di Voghiera (FE)**
Cantiere:	**C.C. Via Provinciale Voghiera (FE)**
Sondaggio:	**-**
Campione:	**OST1**
Profondità prelievo [m]:	**3.06 - 3.25**
Prova:	**Gr 1**
Data prova:	**09/12/2021**

Vagliatura

Diametro vaglio	Massa tratt.	Massa tratt.
[mm]	[g]	[%]
101.6	0	0
63.5	0	0
38.1	0	0
25.4	0	0
19.1	0	0
9.53	0	0
4.75	0	0
2	0	0
1	0.3	0.0
0.59	5.5	0.6
0.42	56.8	6.0
0.25	579.9	61.6
0.177	189.0	20.1
0.125	49.3	5.2
0.075	33.5	3.6

Aerometria

Tempo	Temp.	Lettura
[min]	[°C]	[-]

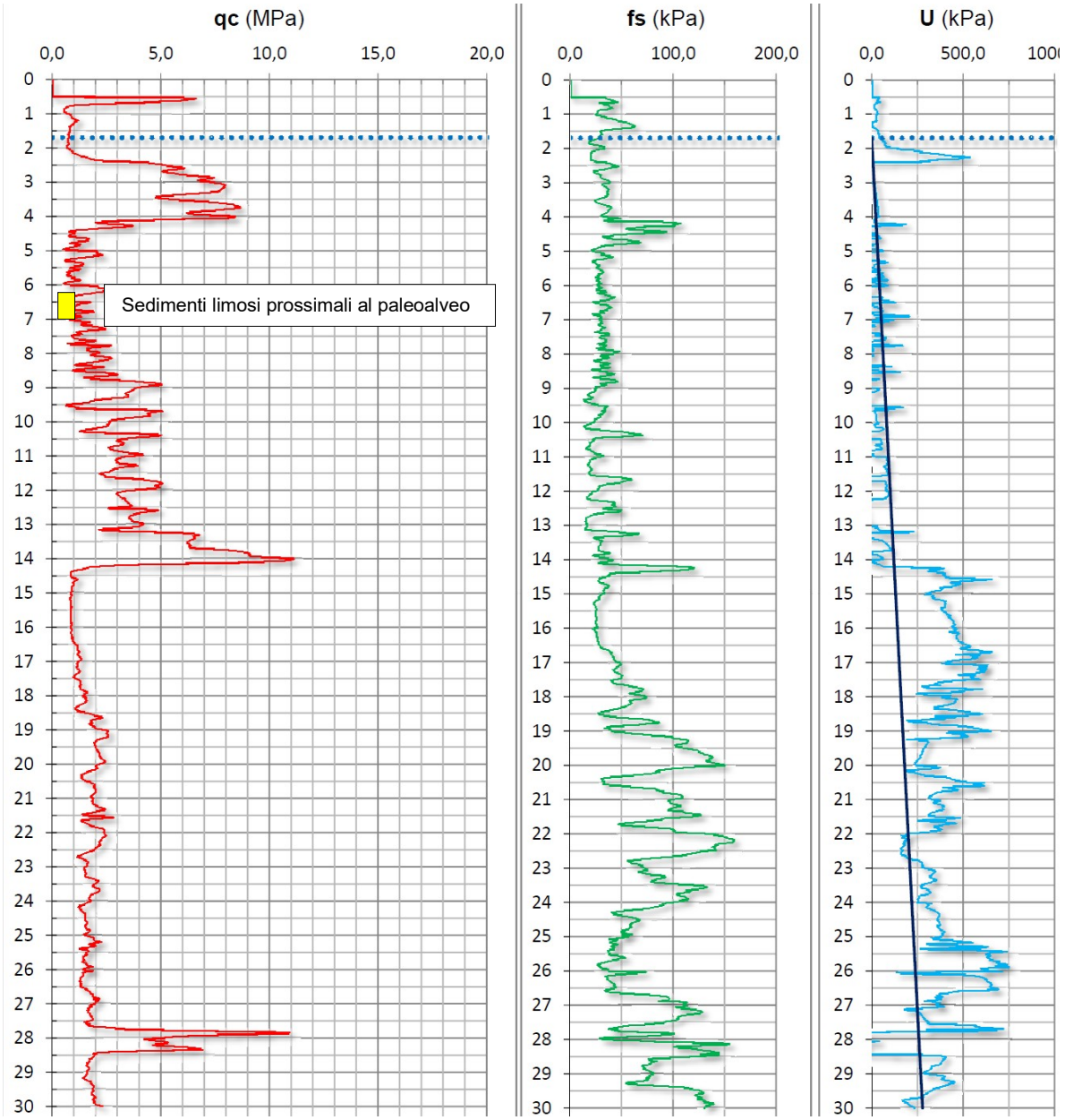


Curva granulom.

Diametro	Passante
[mm]	[%]
1.02.E+02	100.0
6.35.E+01	100.0
3.81.E+01	100.0
2.54.E+01	100.0
1.91.E+01	100.0
9.53.E+00	100.0
4.75.E+00	100.0
2.00.E+00	100.0
1.00.E+00	100.0
5.90.E-01	99.4
4.20.E-01	93.3
2.50.E-01	31.7
1.77.E-01	11.6
1.25.E-01	6.4
7.50.E-02	2.8

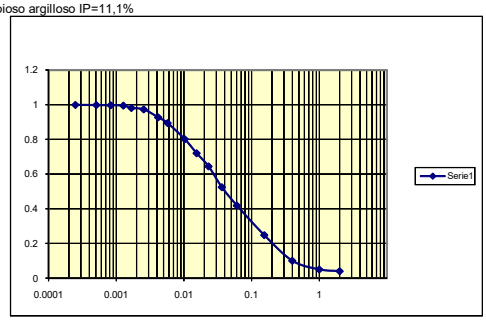
Prova	Simbolo	Profondità		Massa secca materiale	Metodo preparazione materiale	% < 0.075mm	% CIOTTOLI	% GHIAIA	% SABBIA	% LIMO	% ARGILLA	Massa materiale aerometria	L max	D_{60}	D_{50}
		da m	a m	[g]								[g]	[mm]	[mm]	[mm]
Gr 1	x	3.06	3.25	941.1	VIA UMIDA	**3**	**-**	**-**	**99**	**1***	**0***	0	-	3.2.E-01	2.9.E-01

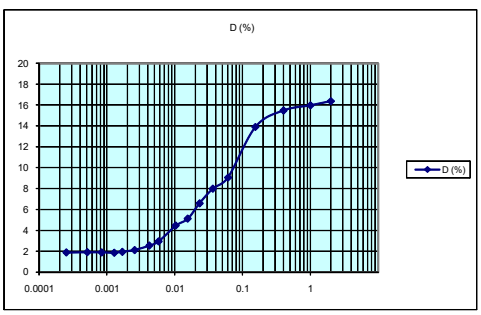
Ost2 Voghiera



OST 2 CC Vog 6,0m-6,6m limo sabbioso argilloso IP=11,1%

γ (%)	G/Go	γ (%)	D (%)
0.00025	1	0.00025	1.88
0.00051	0.999	0.00051	1.91
0.00083	0.998	0.00083	1.89
0.00128	0.996	0.00128	1.86
0.00168	0.982	0.00168	1.95
0.00255	0.974	0.00255	2.12
0.00418	0.928	0.00418	2.54
0.00576	0.895	0.00576	2.96
0.01032	0.802	0.01032	4.47
0.01544	0.721	0.01544	5.13
0.02317	0.645	0.02317	6.6
0.03638	0.525	0.03638	8.01
0.0608	0.419	0.0608	9.08
0.15414	0.248	0.15414	13.93
0.4	0.1	0.4	15.5
1	0.05	1	16
2	0.04	2	16.4





dott. Geologo Thomas Veronese
via Roma 10 - 44021 Codigoro Fe

rev.	data emiss.	sperimentatore	direttore
0	16/12/2021	Angeloni	Saccenti

Normativa di riferimento: ASTM D422
Classificazione di riferimento: AGI 1977
N° certificato di prova:
N° verbale di accettazione: 097/2021

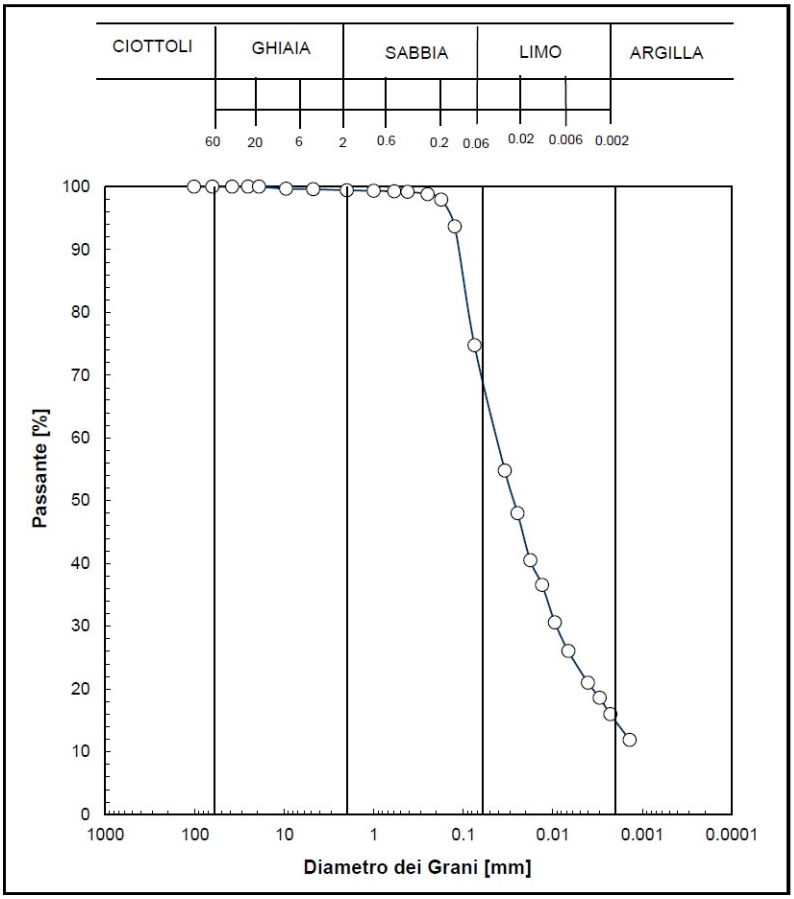
Committente:	**Comune di Voghiera (FE)**
Cantiere:	**C.C. Via Provinciale Voghiera (FE)**
Sondaggio:	**-**
Campione:	**OST2**
Profondità prelievo [m]:	**6.43 - 6.6**
Prova:	**Gr 1**
Data prova:	**09/12/2021**

Vagliatura

Diametro vaglio	Massa tratt.	Massa tratt.
[mm]	[g]	[%]
101.6	0	0
63.5	0	0
38.1	0	0
25.4	0	0
19.1	0	0
9.53	1.7	0.3
4.75	0.3	0.1
2	0.9	0.2
1	0.5	0.1
0.59	0.4	0.1
0.42	0.4	0.1
0.25	2.0	0.4
0.177	4.4	0.8
0.125	22.0	4.3
0.075	97.7	18.9

Aerometria

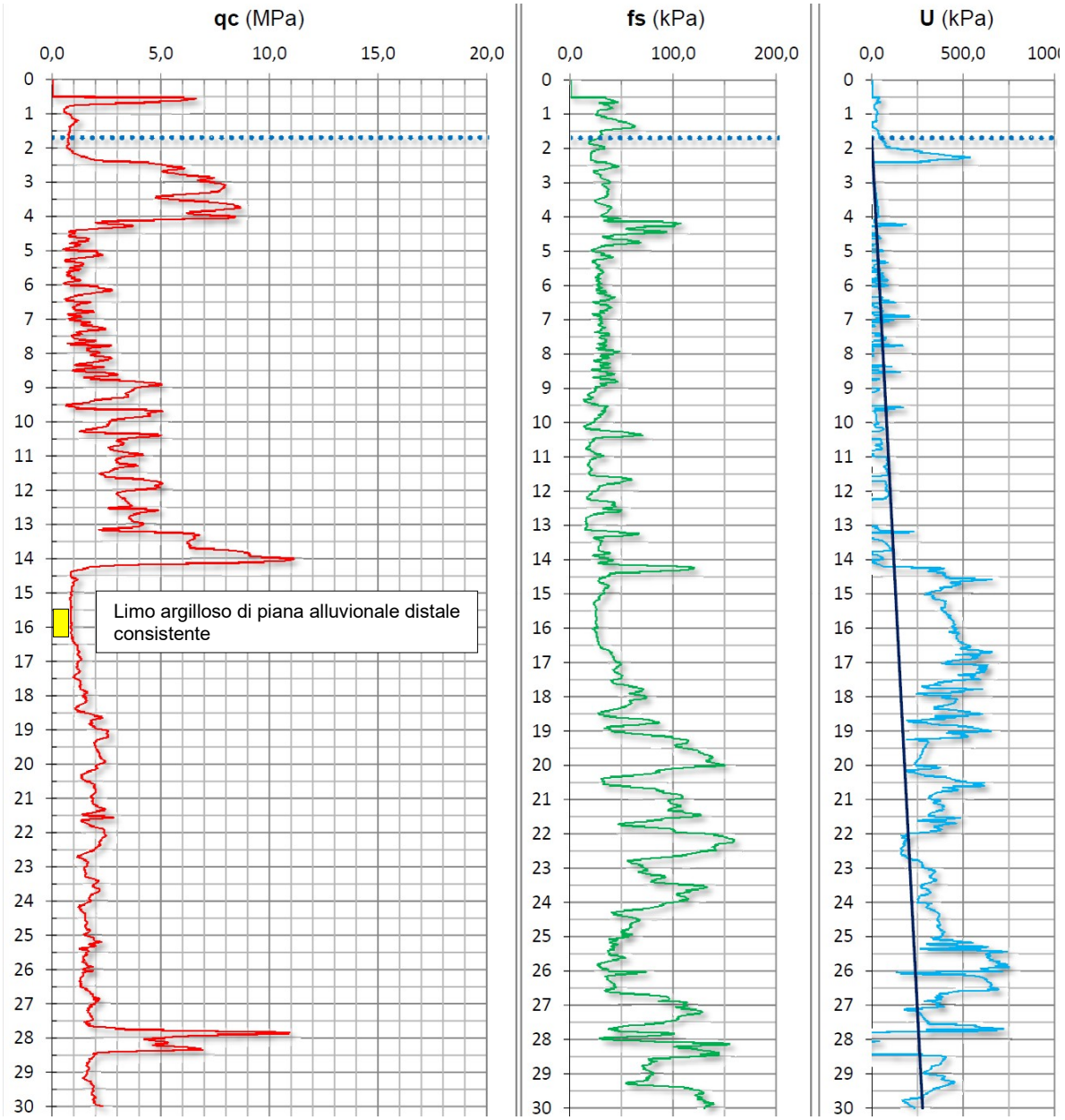
Tempo	Temp.	Lettura
[min]	[°C]	[-]
2	17.5	1.0201
4	17.5	1.0182
8	17.5	1.0161
15	17.5	1.0150
30	17.6	1.0133
61	17.7	1.0120
162	20.1	1.0101
288	21.7	1.0091
496	22.5	1.0082
1371	22.3	1.0071



Curva granulom.

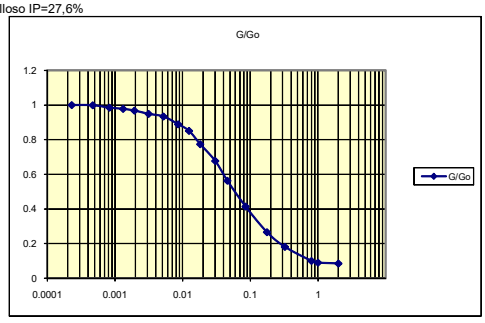
Diametro	Passante
[mm]	[%]
1.02.E+02	100.0
6.35.E+01	100.0
3.81.E+01	100.0
2.54.E+01	100.0
1.91.E+01	100.0
9.53.E+00	99.7
4.75.E+00	99.6
2.00.E+00	99.4
1.00.E+00	99.4
5.90.E-01	99.3
4.20.E-01	99.2
2.50.E-01	98.8
1.77.E-01	98.0
1.25.E-01	93.7
7.50.E-02	74.8
3.43.E-02	54.8
2.48.E-02	48.0
1.79.E-02	40.5
1.32.E-02	36.6
9.48.E-03	30.6
6.72.E-03	26.1
4.05.E-03	21.0
3.00.E-03	18.6
2.28.E-03	16.0
1.39.E-03	11.9
-	-
-	-

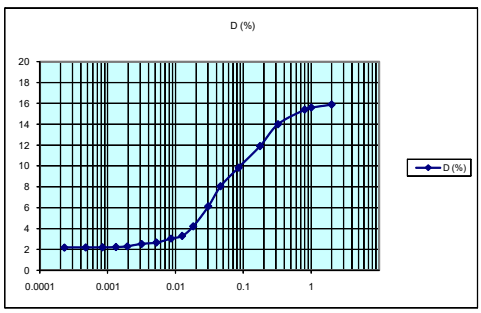
Prova	Simbolo	Profondità		Massa secca materiale	Metodo preparazione materiale	% < 0.075mm	% CIOTTOLI	% GHIAIA	% SABBIA	% LIMO	% ARGILLA	Massa materiale aerometria	L max	D_{60}	D_{50}
		da m	a m	[g]								[g]	[mm]	[mm]	[mm]
Gr 1	x	6.43	6.60	515.6	VIA UMIDA	**75**	**-**	**1**	**30**	**54**	**15**	33	-	4.2.E-02	2.7.E-02



OST13 CC Vog 15,50m-16,10m Limo argilloso IP=27,6%

γ (%)	G/Go	γ (%)	D (%)
0.00023	1	0.00023	2.18
0.00047	0.999	0.00047	2.185
0.00083	0.985	0.00083	2.19
0.00132	0.978	0.00132	2.22
0.00194	0.968	0.00194	2.3
0.00315	0.949	0.00315	2.53
0.00521	0.934	0.00521	2.65
0.00858	0.889	0.00858	3.05
0.01242	0.851	0.01242	3.29
0.01819	0.774	0.01819	4.22
0.03034	0.677	0.03034	6.13
0.04584	0.563	0.04584	8.06
0.08503	0.414	0.08503	9.85
0.17621	0.266	0.17621	11.91
0.32429	0.181	0.32429	14.01
0.8	0.1	0.8	15.4
1	0.09	1	15.6
2	0.085	2	15.9





rev.	data emiss.	sperimentatore	direttore
0	16/12/2021	Angeloni	Saccenti

Normativa di riferimento: ASTM D422
Classificazione di riferimento: AGI 1977
N° certificato di prova:
N° verbale di accettazione: 097/2021

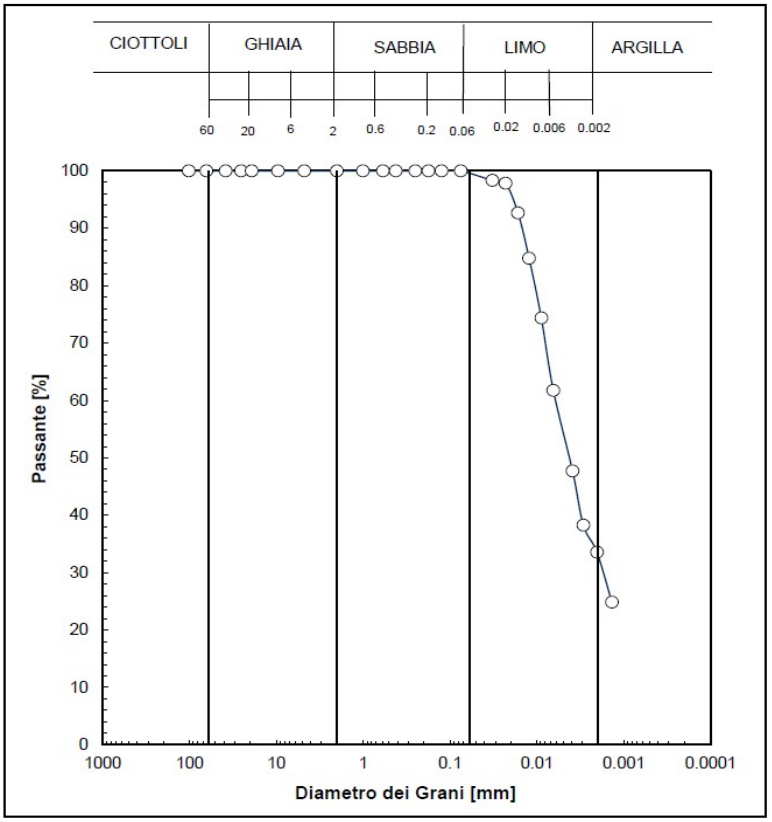
Committente:	**Comune di Voghiera (FE)**
Cantiere:	**C.C. Via Provinciale Voghiera (FE)**
Sondaggio:	**-**
Campione:	**OST3**
Profondità prelievo [m]:	**15.95 - 16.1**
Prova:	**Gr 1**
Data prova:	**09/12/2021**

Vagliatura

Diametro vaglio [mm]	Massa tratt. [g]	Massa tratt. [%]
101.6	0	0
63.5	0	0
38.1	0	0
25.4	0	0
19.1	0	0
9.53	0	0
4.75	0	0
2	0	0
1	0	0
0.59	0	0
0.42	0	0
0.25	0	0
0.177	0	0
0.125	0	0
0.075	0	0

Aerometria

Tempo [min]	Temp. [°C]	Lettura [-]
2	17.4	1.0261
4	17.4	1.0260
8	17.4	1.0249
15	17.5	1.0232
30	17.5	1.0210
60	17.6	1.0183
166	20.0	1.0148
293	21.8	1.0124
600	22.7	1.0112
1376	22.5	1.0094



Curva granulom.

Diametro [mm]	Passante [%]
1.02.E+02	100.0
6.35.E+01	100.0
3.81.E+01	100.0
2.54.E+01	100.0
1.91.E+01	100.0
9.53.E+00	100.0
4.75.E+00	100.0
2.00.E+00	100.0
1.00.E+00	100.0
5.90.E-01	100.0
4.20.E-01	100.0
2.50.E-01	100.0
1.77.E-01	100.0
1.25.E-01	100.0
7.50.E-02	100.0
3.24.E-02	98.4
2.29.E-02	97.9
1.64.E-02	92.7
1.22.E-02	84.8
8.85.E-03	74.4
6.43.E-03	61.7
3.86.E-03	47.7
2.90.E-03	38.3
2.02.E-03	33.6
1.36.E-03	24.9
-	-
-	-

Prova	Simbolo	Profondità da m	Profondità a m	Massa secca materiale [g]	Metodo preparazione materiale	% < 0.075mm	% CIOTTOLI	% GHIAIA	% SABBIA	% LIMO	% ARGILLA	Massa materiale aerometria [g]	L max [mm]	D_{60} [mm]	D_{50} [mm]
Gr 1	x	15.95	16.10	294.5	VIA UMIDA	**100**	**-**	**-**	**0**	**66**	**33**	34	-	6.0.E-03	4.2.E-03

Sperimentatore: Diaby
Direttore: Saccenti
Data emissione: 17/12/2021
Rev.

Normativa di riferimento: ASTM D4318
N° certificato di prova:
N° verbale di accettazione: 097/2021

Committente:	**Comune di Voghiera (FE)**
Cantiere:	**C.C. Via Provinciale Voghiera (FE)**
Sondaggio:	**-**
Campione:	**OST3**
Profondità prova [m]:	**15.95 - 16.10**
Prova:	**LLP1**
Data prova:	**07/12/2021**

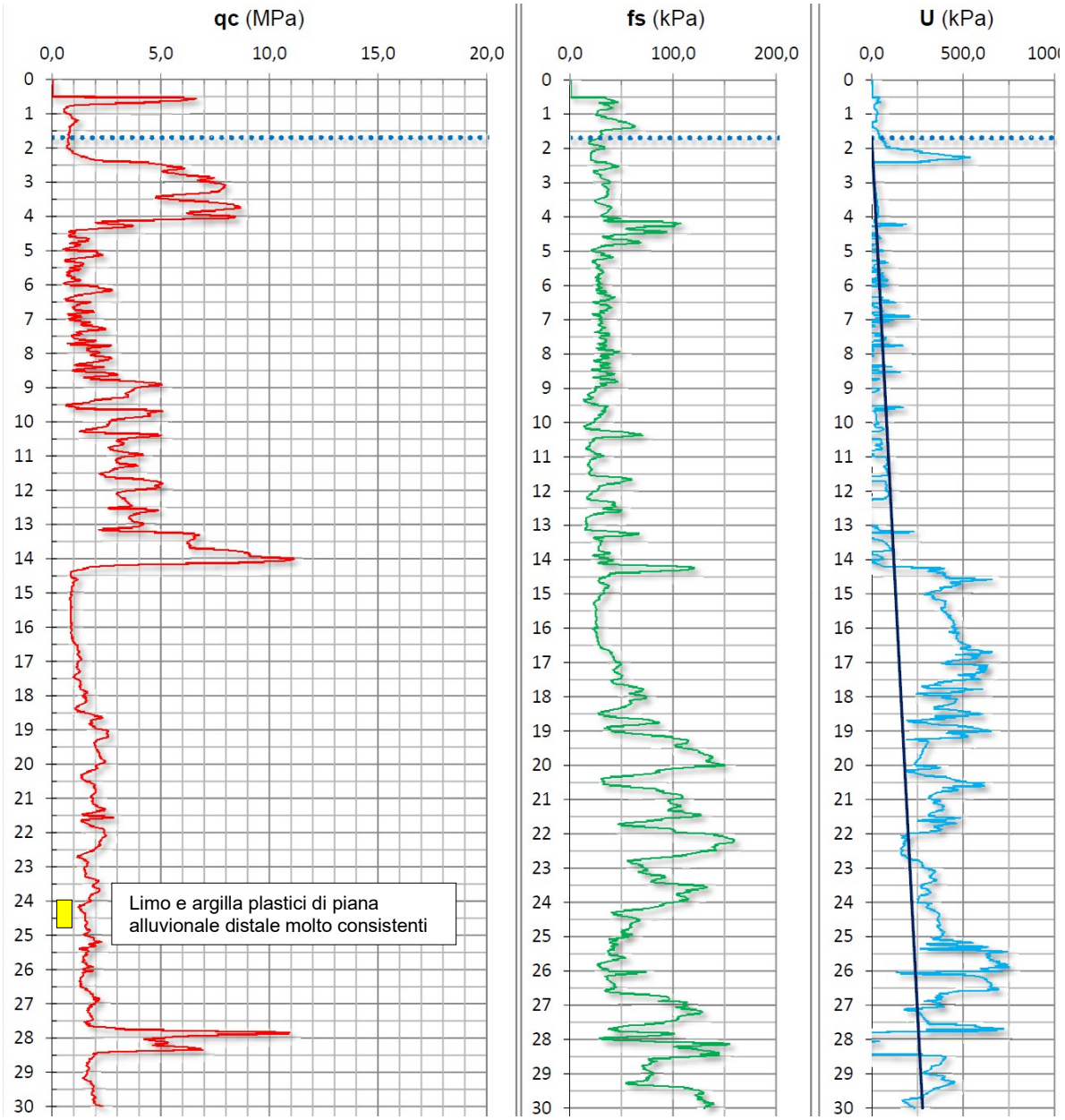
Limite Liquido

	prova 1	prova 2	prova 3
numero colpi	34	25	19
massa tara (g)	21.72	22.46	22.26
massa umido + tara (g)	46.75	49.95	49.29
massa secco + tara (g)	37.87	40.02	39.29
umidità (%)	54.98	56.55	58.72

Limite Plastico

massa tara (g)	22.48	22.66
massa umido + tara (g)	33.13	33.68
massa secco + tara (g)	30.72	31.19
umidità (%)	29.25	29.19

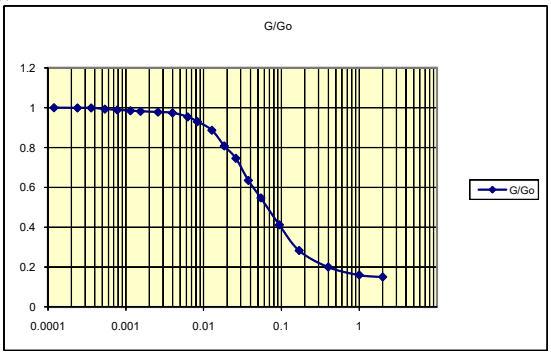
LL (%)	**56.8**
LP (%)	**29.2**
IP (%)	**27.6**

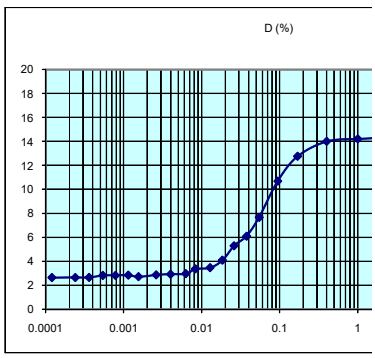


OST4 CC Vog 24,0m-24,6m Limo argilloso IP=30.2%

γ (%)	G/Go
0.00012	1
0.00024	0.999
0.00036	0.999
0.00054	0.993
0.00078	0.989
0.00115	0.985
0.00155	0.982
0.0026	0.978
0.00399	0.974
0.00626	0.954
0.00834	0.93
0.01279	0.887
0.01848	0.808
0.02601	0.746
0.03764	0.635
0.05455	0.547
0.09414	0.412
0.16909	0.283
0.4	0.2
1	0.16
2	0.15

γ (%)	D (%)
0.00012	2.64
0.00024	2.65
0.00036	2.66
0.00054	2.82
0.00078	2.83
0.00115	2.84
0.00155	2.72
0.0026	2.87
0.00399	2.93
0.00626	2.96
0.00834	3.37
0.01279	3.46
0.01848	4.09
0.02601	5.3
0.03764	6.1
0.05455	7.67
0.09414	10.68
0.16909	12.75
0.4	14
1	14.2
2	14.3





dott. Geologo Thomas Veronese
via Roma 10 - 44021 Codigoro Fe

rev.	data emiss.	sperimentatore	direttore
0	16/12/2021	Angeloni	Saccenti

Normativa di riferimento: ASTM D422
Classificazione di riferimento: AGI 1977
N° certificato di prova:
N° verbale di accettazione: 097/2021

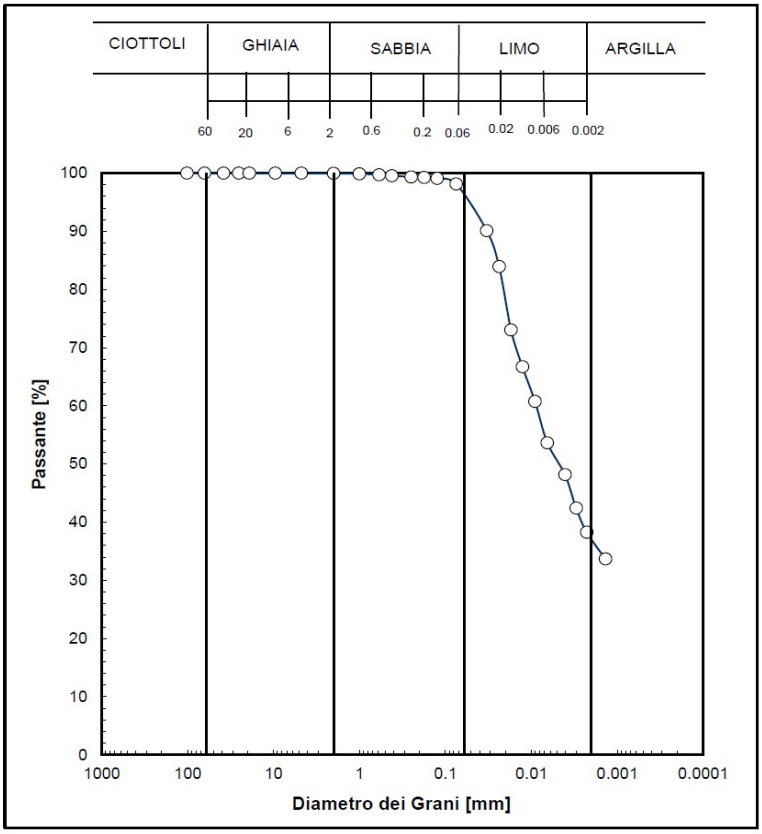
Committente:	**Comune di Voghiera (FE)**
Cantiere:	**C.C. Via Provinciale Voghiera (FE)**
Sondaggio:	**-**
Campione:	**OST4**
Profondità prelievo [m]:	**24.02 - 24.18**
Prova:	**Gr 1**
Data prova:	**09/12/2021**

Vagliatura

Diametro vaglio [mm]	Massa tratt. [g]	Massa tratt. [%]
101.6	0	0
63.5	0	0
38.1	0	0
25.4	0	0
19.1	0	0
9.53	0	0
4.75	0	0
2	0.1	0.0
1	0.2	0.1
0.59	0.6	0.2
0.42	0.6	0.2
0.25	0.8	0.2
0.177	0.4	0.1
0.125	0.5	0.1
0.075	3.5	1.0

Aerometria

Tempo [min]	Temp. [°C]	Lettura [-]
2	17.5	1.0239
4	17.5	1.0226
8	17.5	1.0203
15	17.8	1.0189
30	18.0	1.0176
60	18.0	1.0161
152	19.5	1.0146
279	20.3	1.0132
486	21.3	1.0121
1362	21.0	1.0112



Curva granulom.

Diametro [mm]	Passante [%]
1.02.E+02	100.0
6.35.E+01	100.0
3.81.E+01	100.0
2.54.E+01	100.0
1.91.E+01	100.0
9.53.E+00	100.0
4.75.E+00	100.0
2.00.E+00	100.0
1.00.E+00	99.9
5.90.E-01	99.7
4.20.E-01	99.6
2.50.E-01	99.4
1.77.E-01	99.3
1.25.E-01	99.1
7.50.E-02	98.2
3.30.E-02	90.1
2.37.E-02	84.0
1.72.E-02	73.0
1.27.E-02	66.7
9.07.E-03	60.8
6.51.E-03	53.7
4.06.E-03	48.2
3.00.E-03	42.4
2.27.E-03	38.3
1.37.E-03	33.7
-	-
-	-

Prova	Simbolo	Profondità da m	Profondità a m	Massa secca materiale [g]	Metodo preparazione materiale	% < 0.075mm	% CIOTTOLI	% GHIAIA	% SABBIA	% LIMO	% ARGILLA	Massa materiale aerometria [g]	L max [mm]	D_{60} [mm]	D_{50} [mm]
Gr 1	x	24.02	24.18	364.5	VIA UMIDA	**98**	**-**	**0**	**4**	**59**	**37**	33	-	8.7.E-03	4.7.E-03

Sperimentatore: Diaby
Direttore: Saccenti
Data emissione: 17/12/2021
Rev.

Normativa di riferimento: ASTM D4318
N° certificato di prova:
N° verbale di accettazione: 097/2021

Committente:	**Comune di Voghiera (FE)**
Cantiere:	**C.C. Via Provinciale Voghiera (FE)**
Sondaggio:	**-**
Campione:	**OST4**
Profondità prova [m]:	**24.02 - 24.18**
Prova:	**LLP1**
Data prova:	**07/12/2021**

Limite Liquido

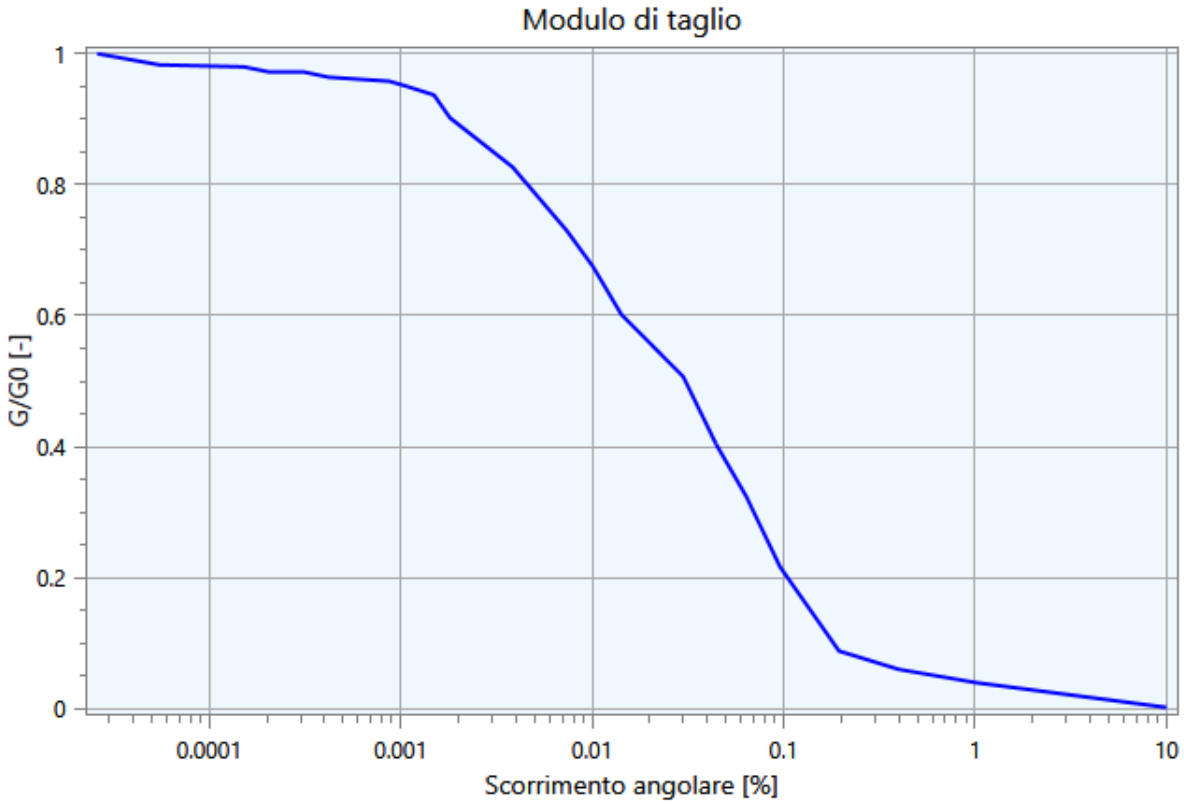
	prova 1	prova 2	prova 3
numero colpi	35	29	23
massa tara (g)	22.26	21.75	22.15
massa umido + tara (g)	45.90	49.65	43.35
massa secco + tara (g)	38.23	40.28	35.98
umidità (%)	48.03	50.57	53.29

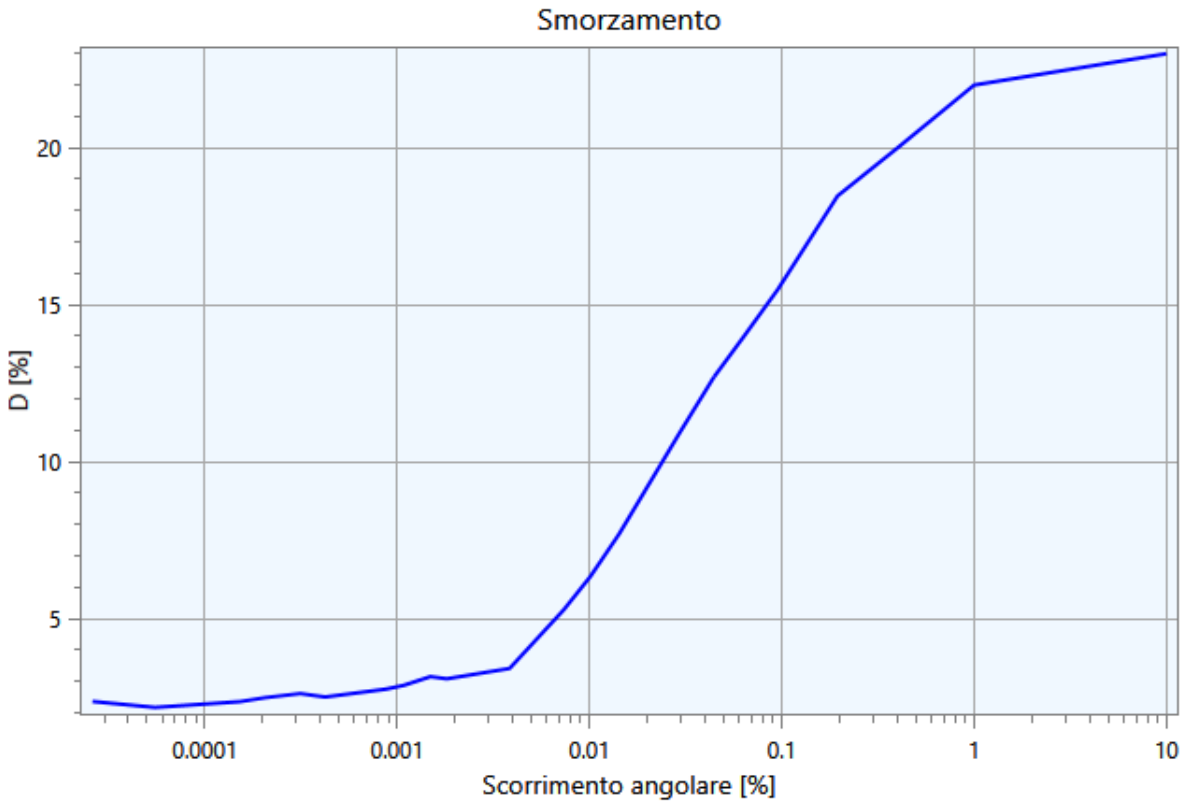
Limite Plastico

massa tara (g)	22.17	22.20
massa umido + tara (g)	34.83	33.68
massa secco + tara (g)	32.54	31.60
umidità (%)	22.08	22.13

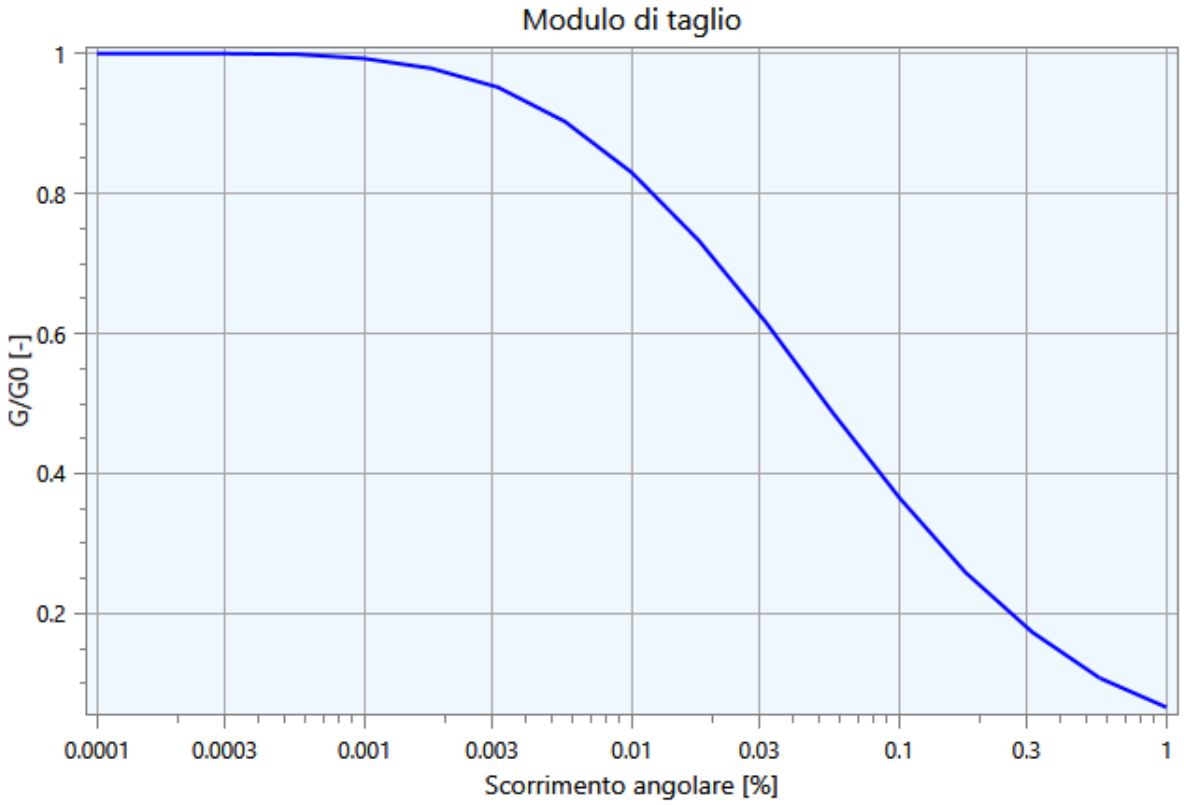
LL (%)	**52.3**
LP (%)	**22.1**
IP (%)	**30.2**

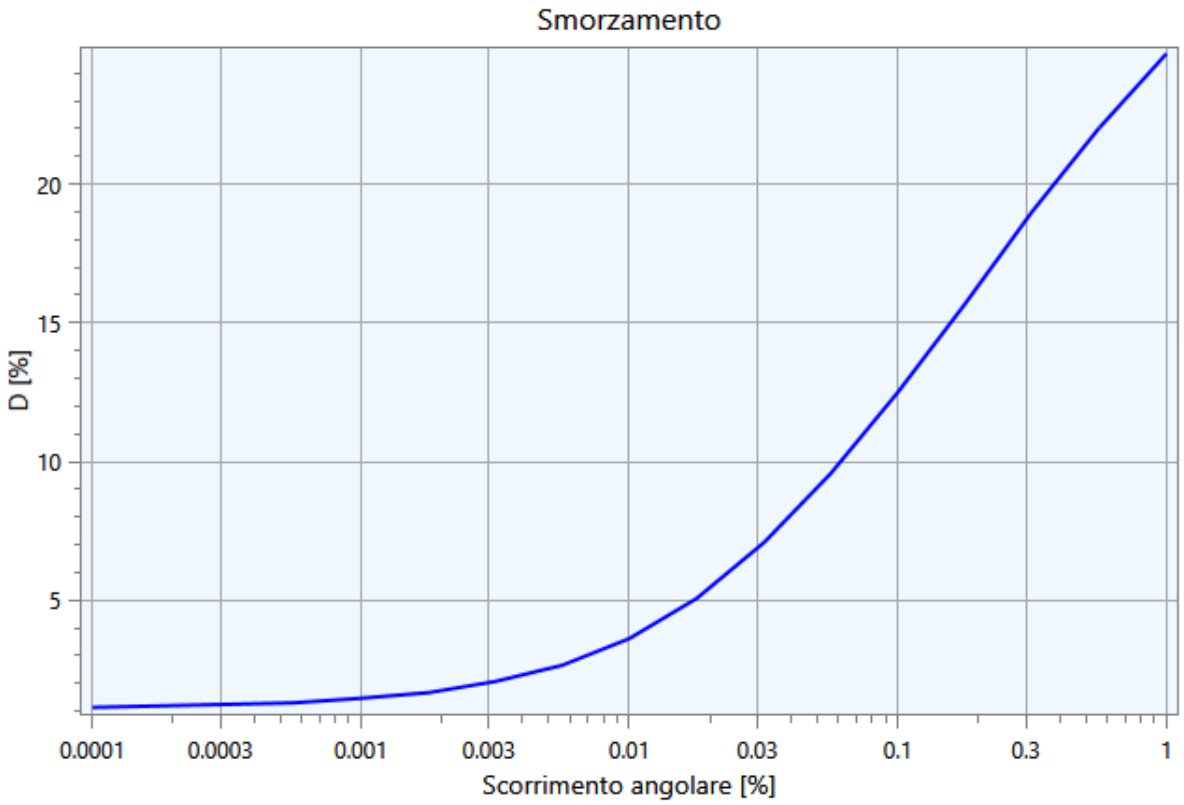
Bond Cr1


Modulo di taglio
G/G0 [-]
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0.0001
0.001
0.01
0.1
1
10
Scorrimento angolare [%]

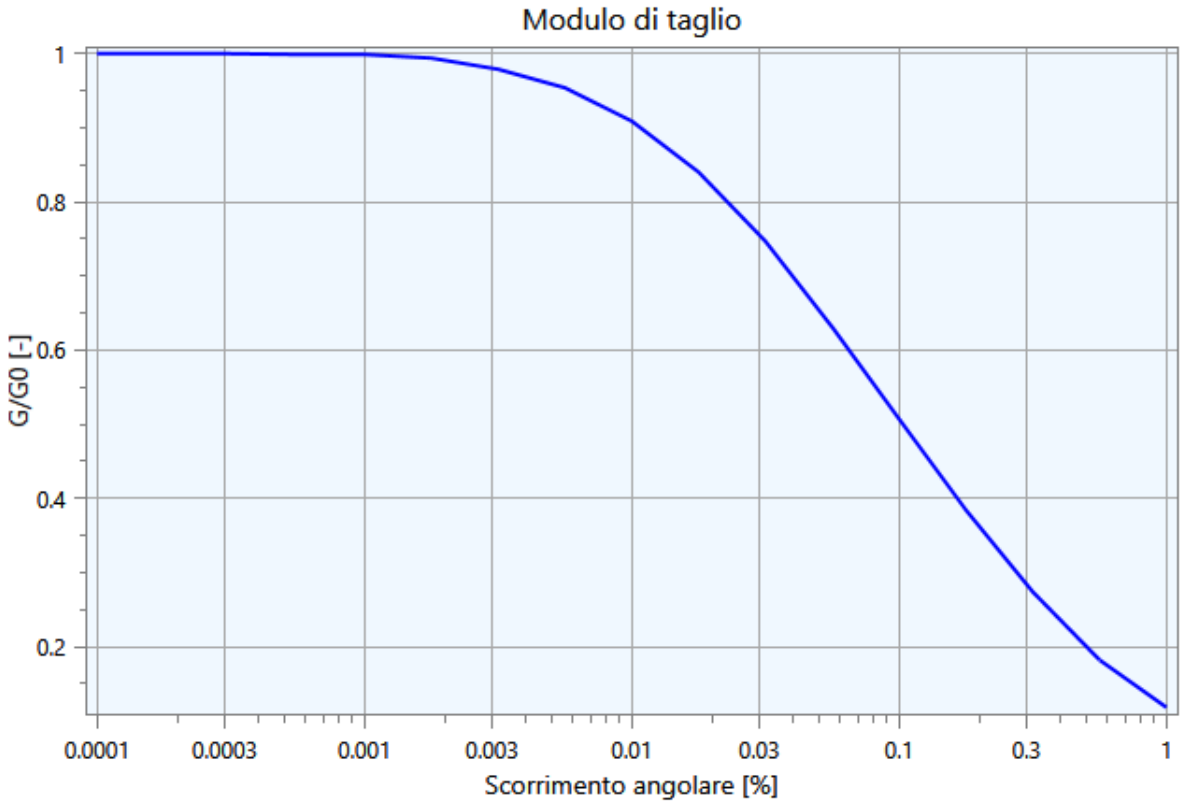

Smorzamento
D [%]
20
15
10
5
0.0001
0.001
0.01
0.1
1
10
Scorrimento angolare [%]

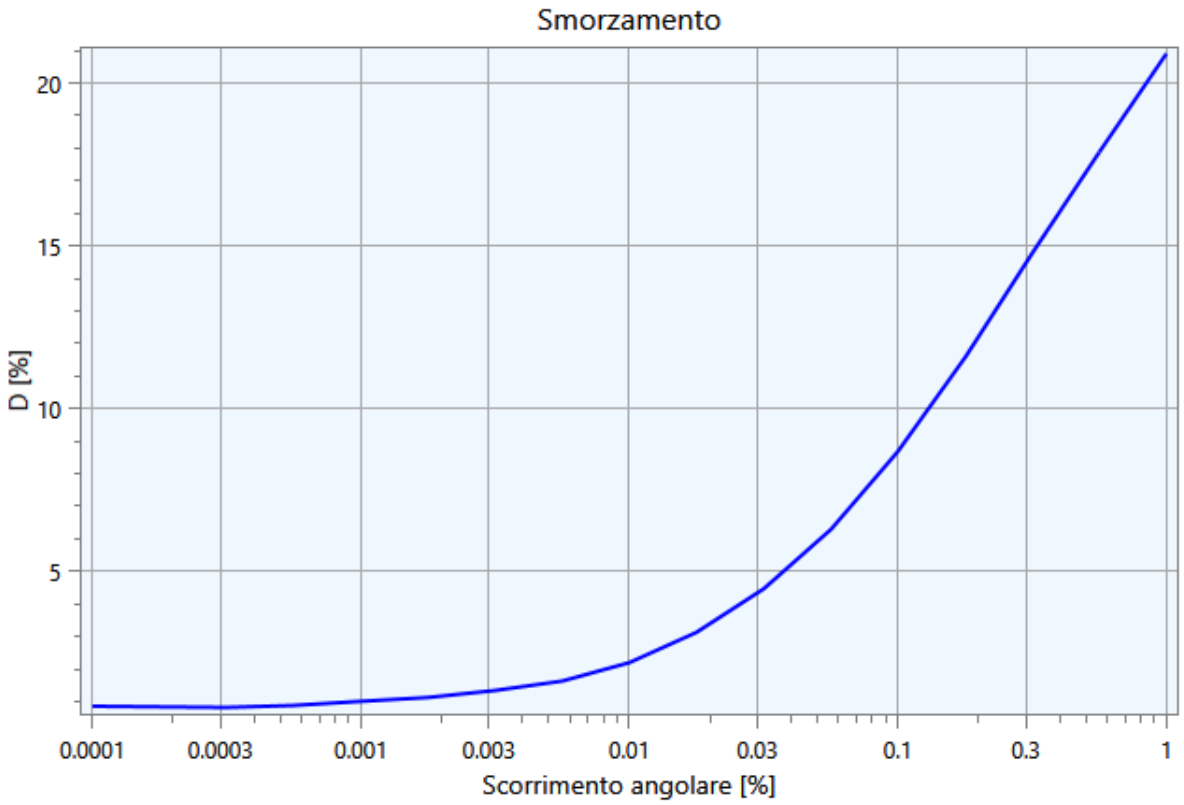
EPRI (93), 20-50 ft



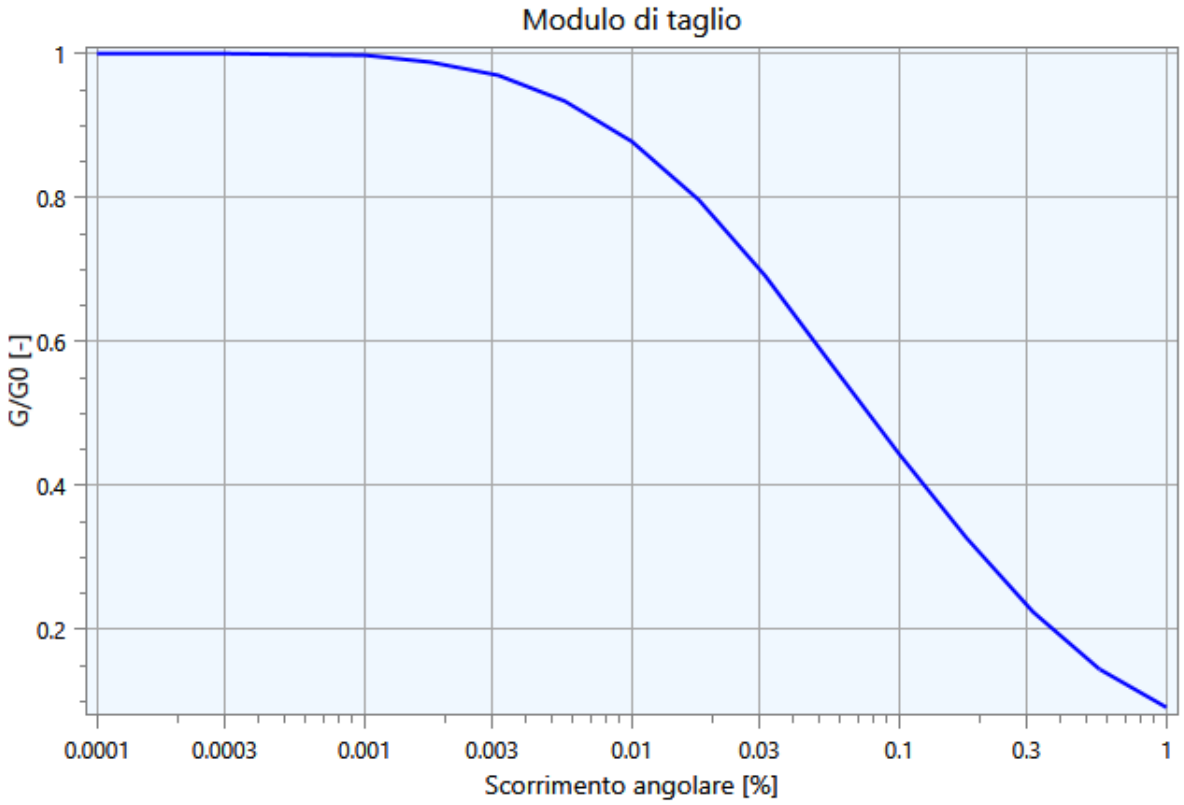


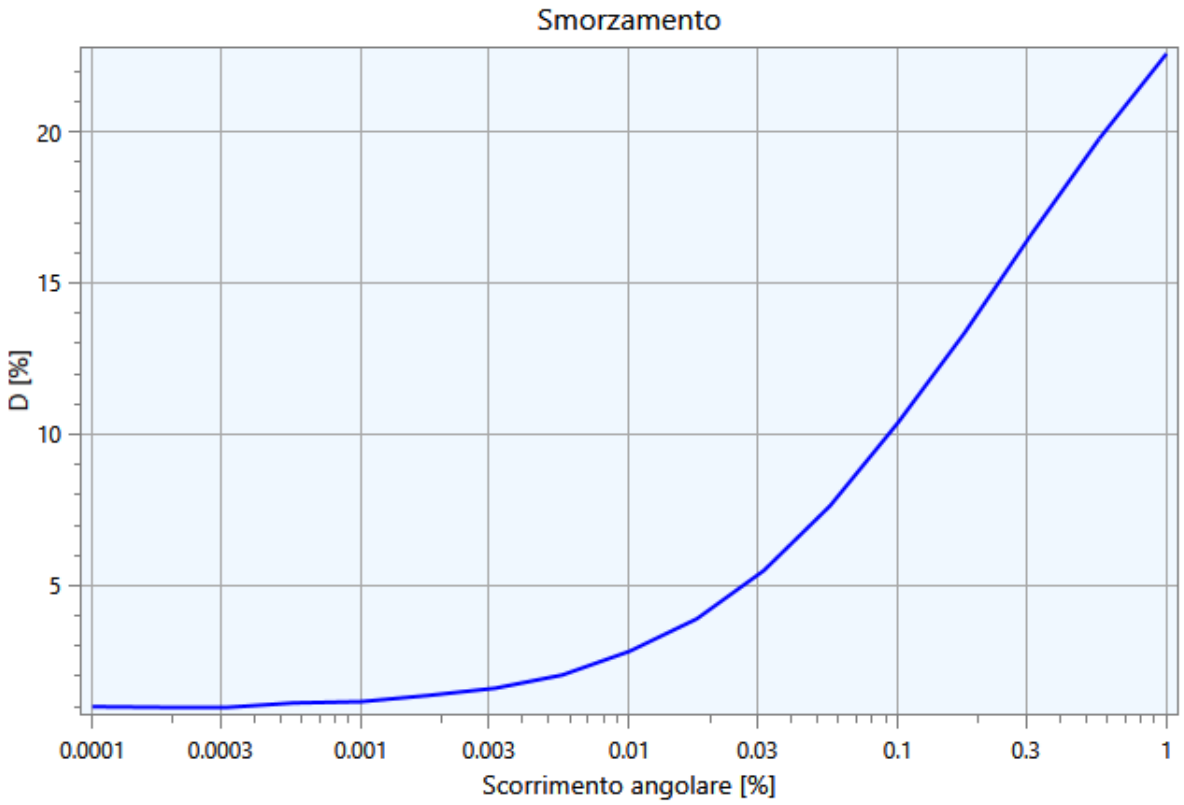
EPRI (93), 120-250 ft



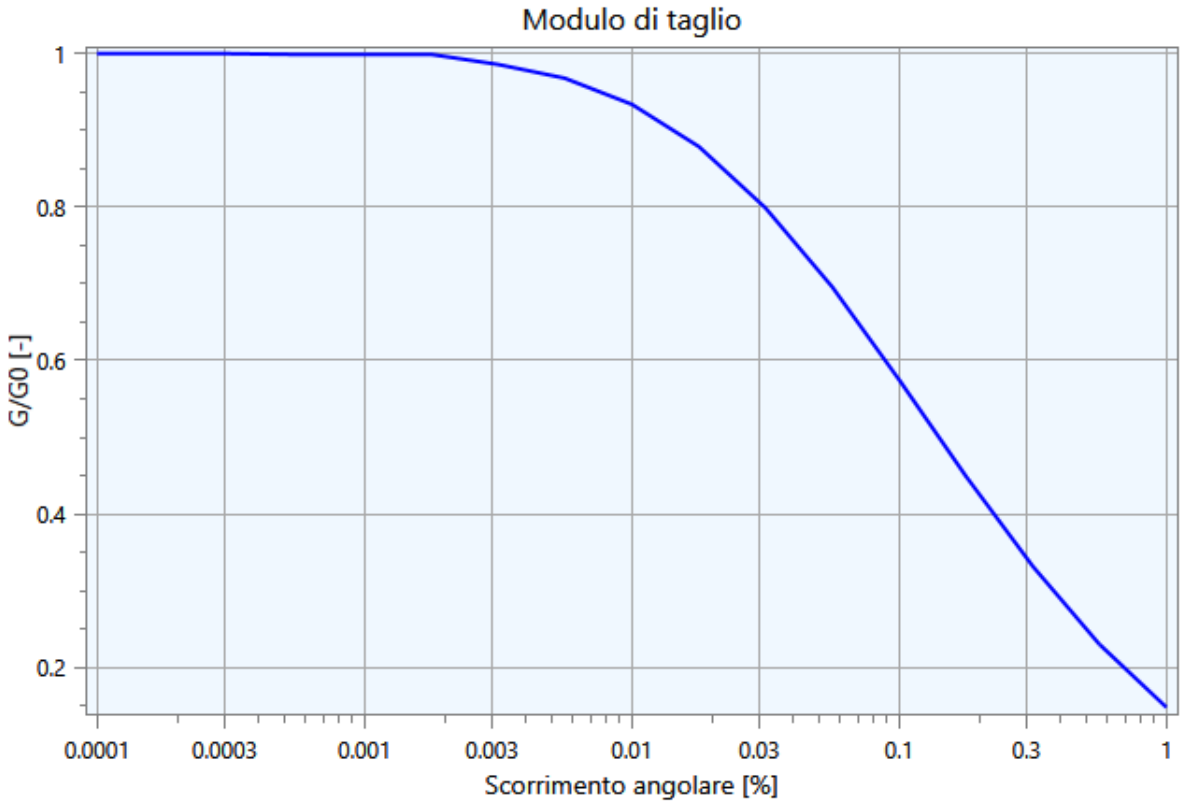


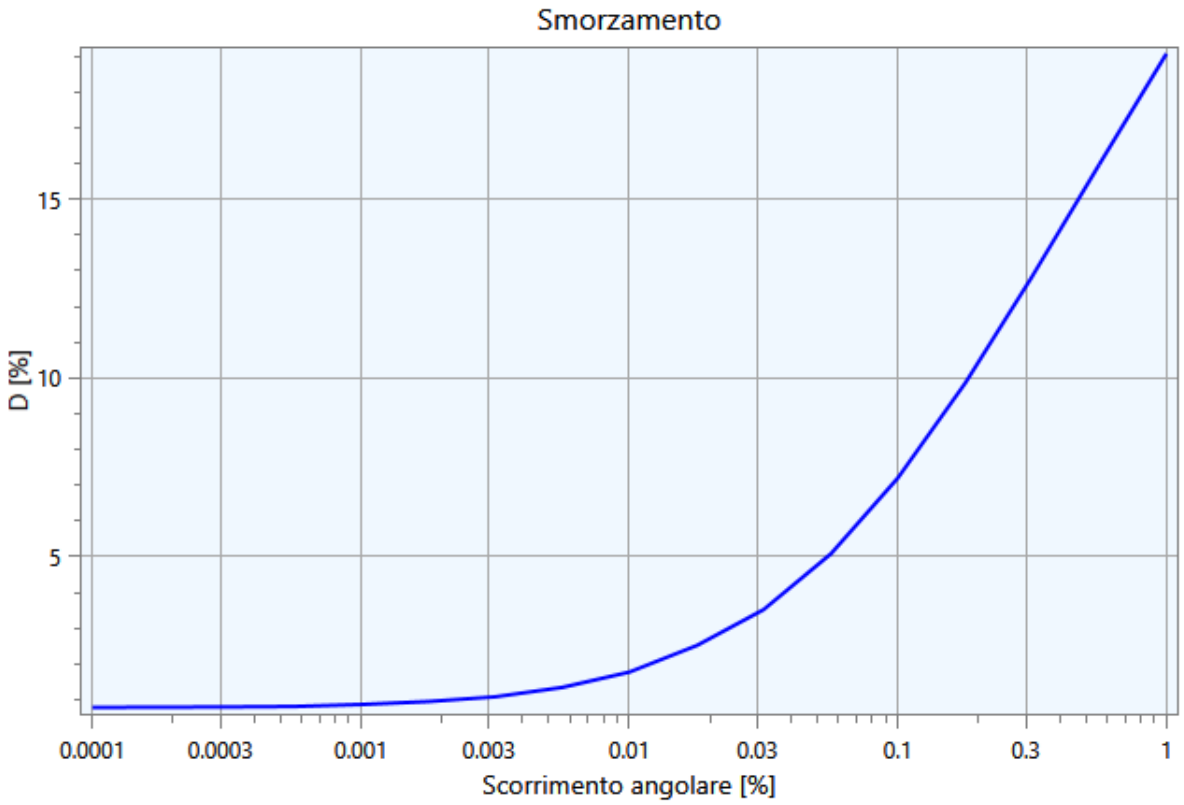
EPRI (93), 50-120 ft



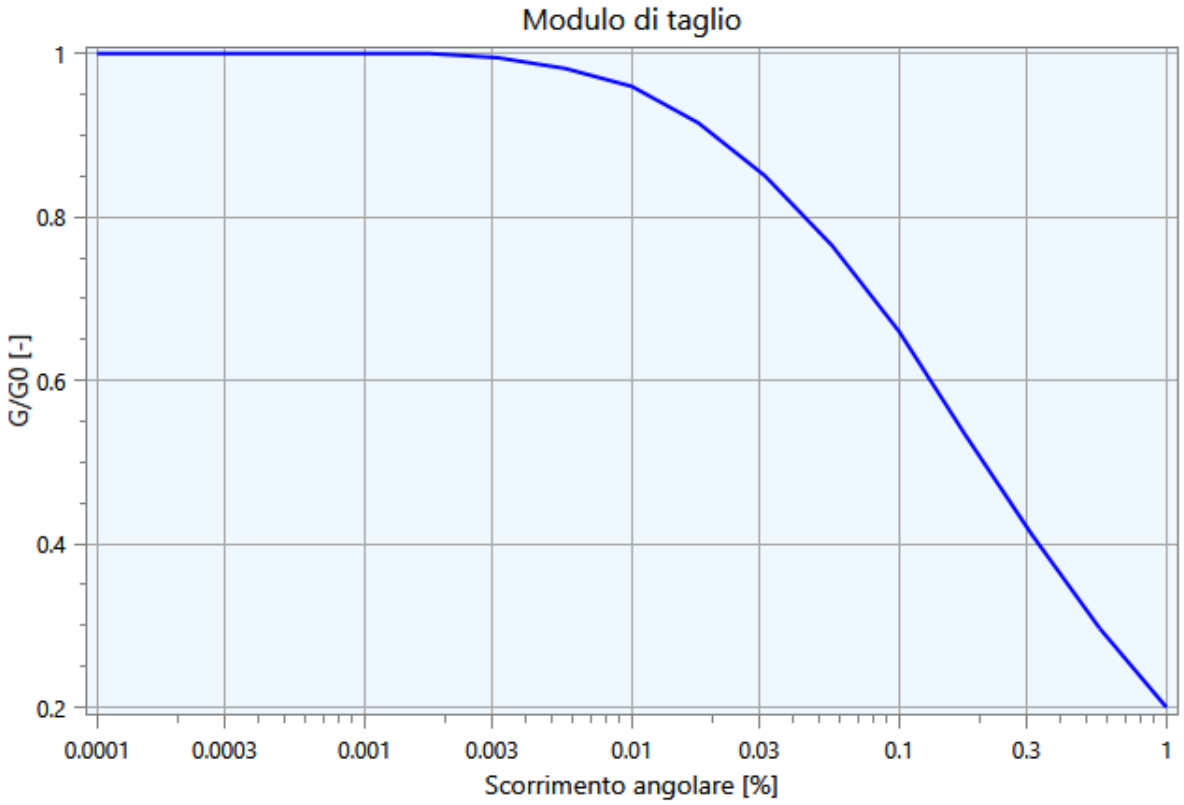


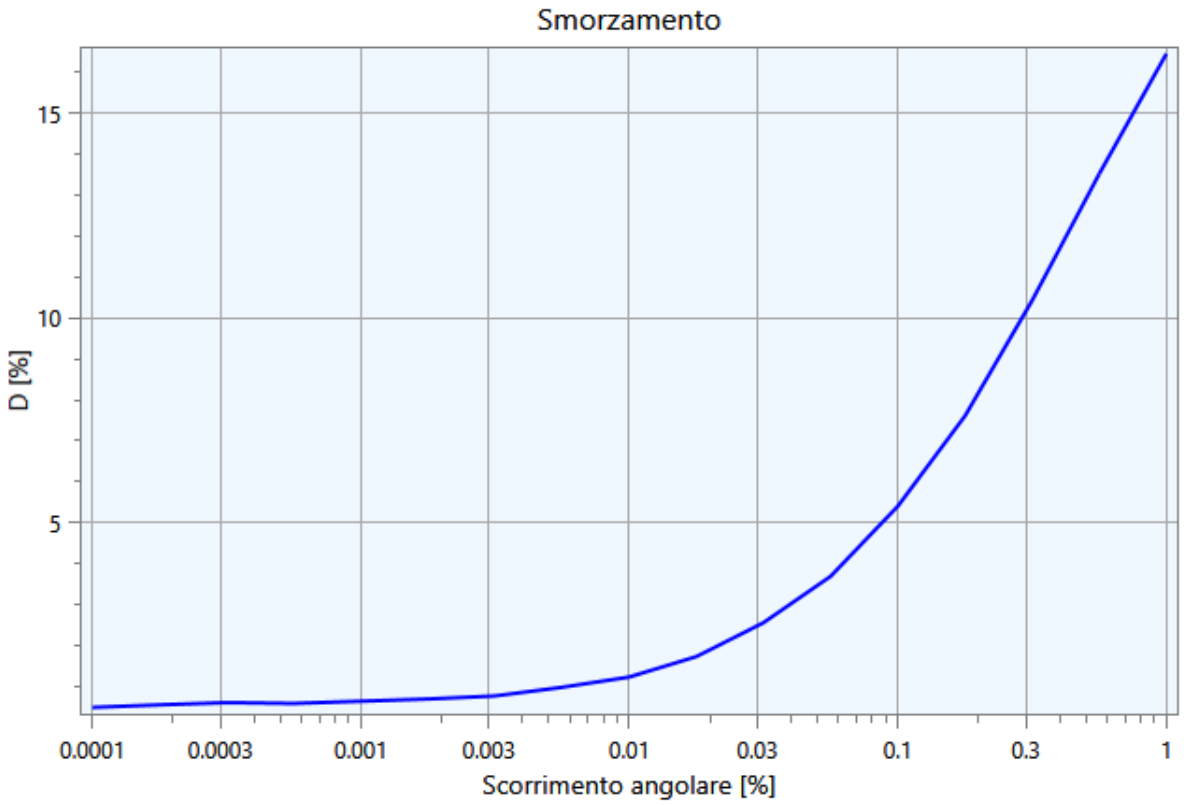
EPRI (93), 250-500 ft



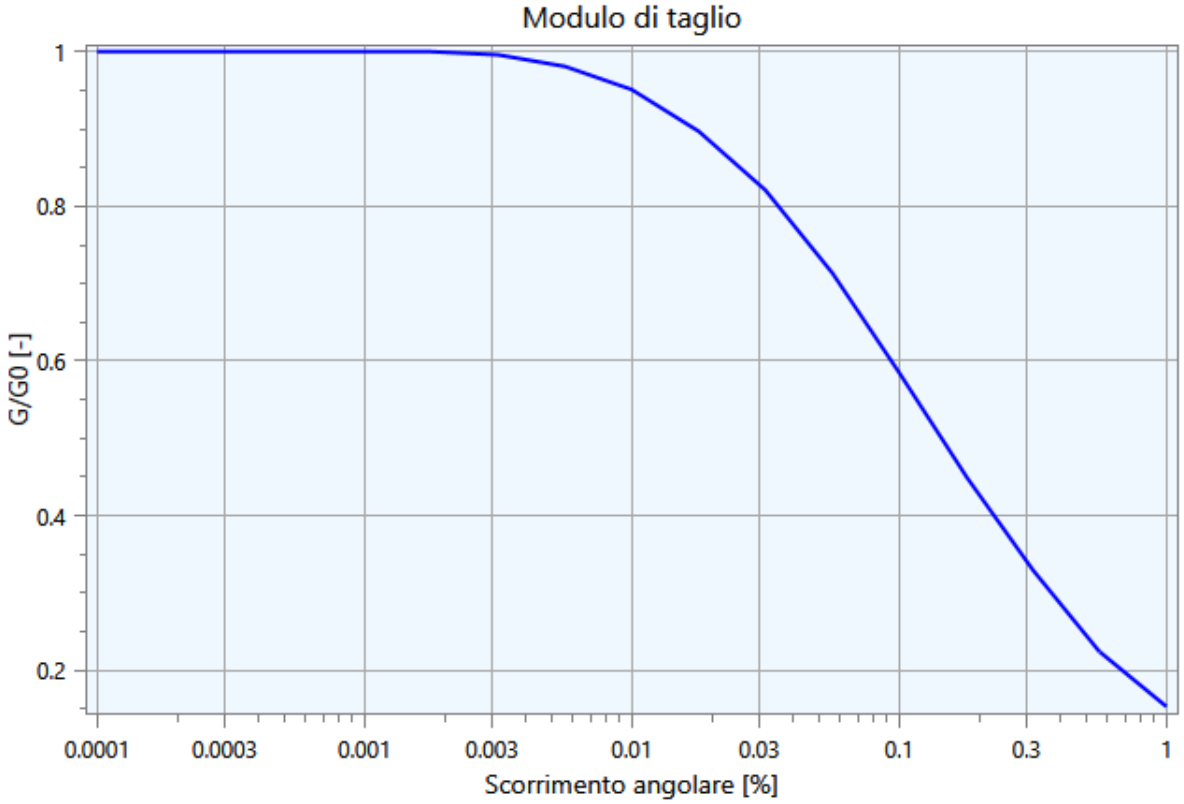


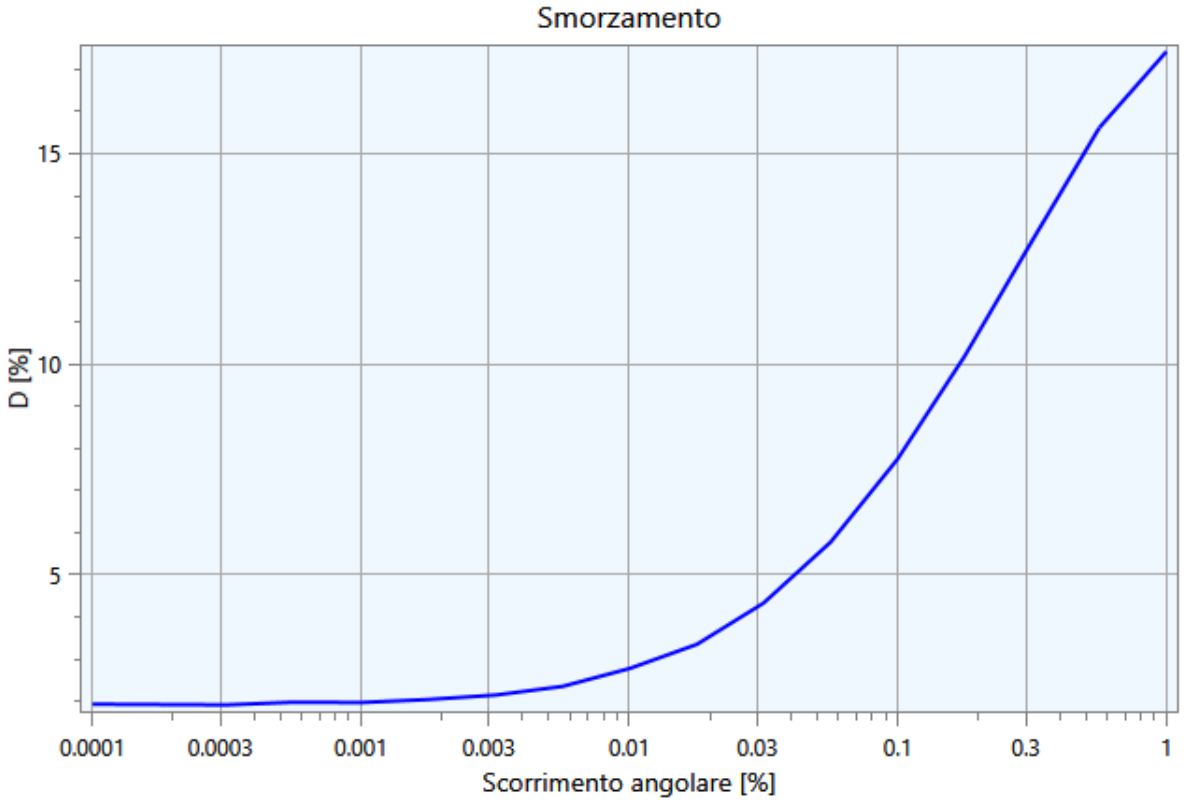
EPRI (93), 500-1000 ft





EPRI (93), PI=50





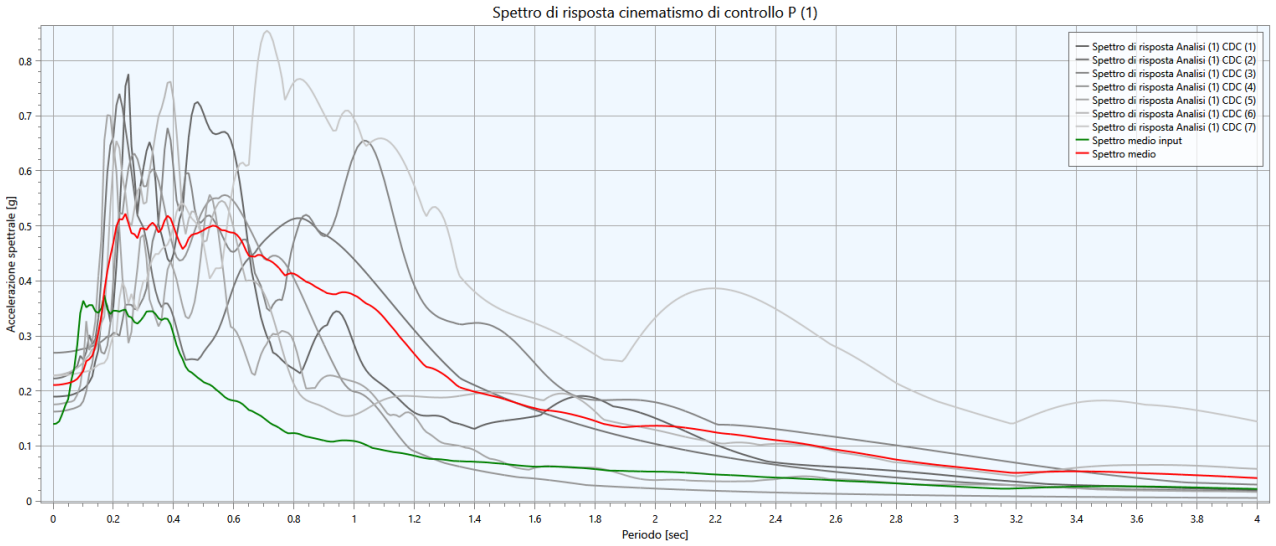
Per gli strati profondi granulari si è fatto riferimento alle curve EPRI in funzione dello stato tensionale ovvero della profondità.

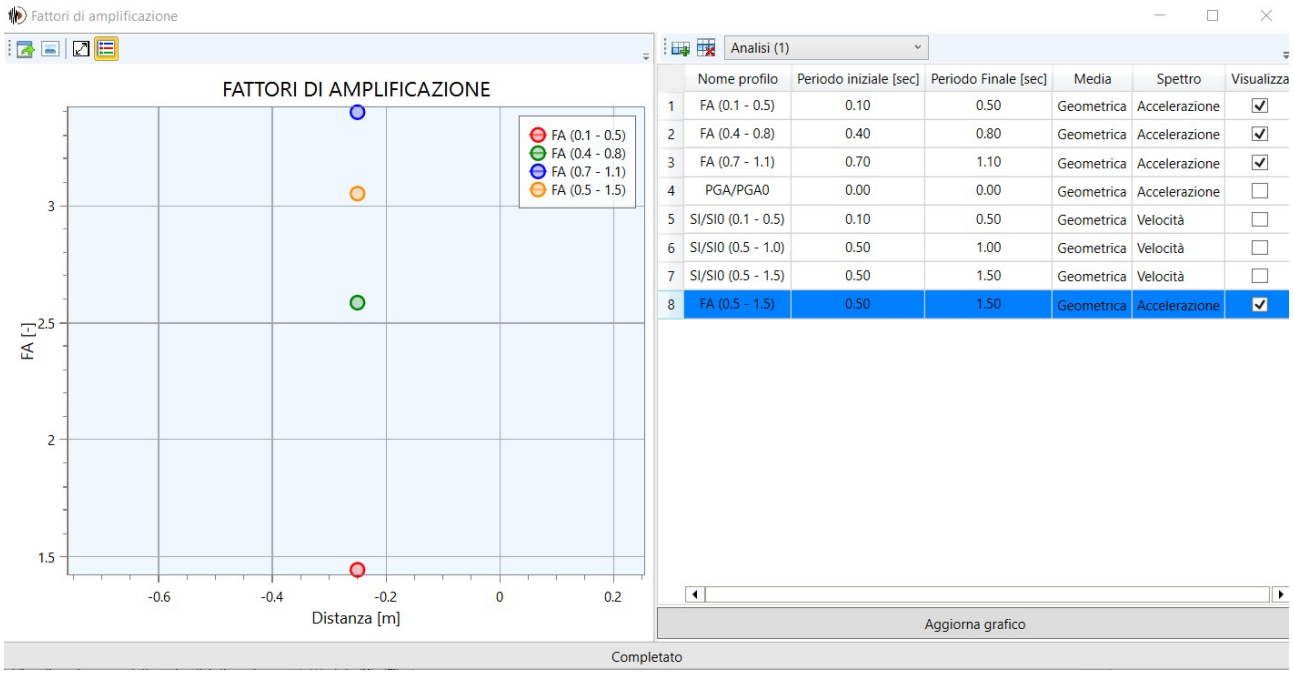
Per gli strati coesivi profondi, si dovrebbe quantomeno conoscere il valore dell'indice di plasticità, che è quello che condiziona il decadimento di Go con gli sforzi di taglio g. Non avendo questi dati, si assumono delle curve cautelative con plasticità del 50%. In verità ci si aspetterebbero valori di plasticità più bassi.

4.2. SINTESI DEI RISULTATI – MODELLI DI OUTPUT

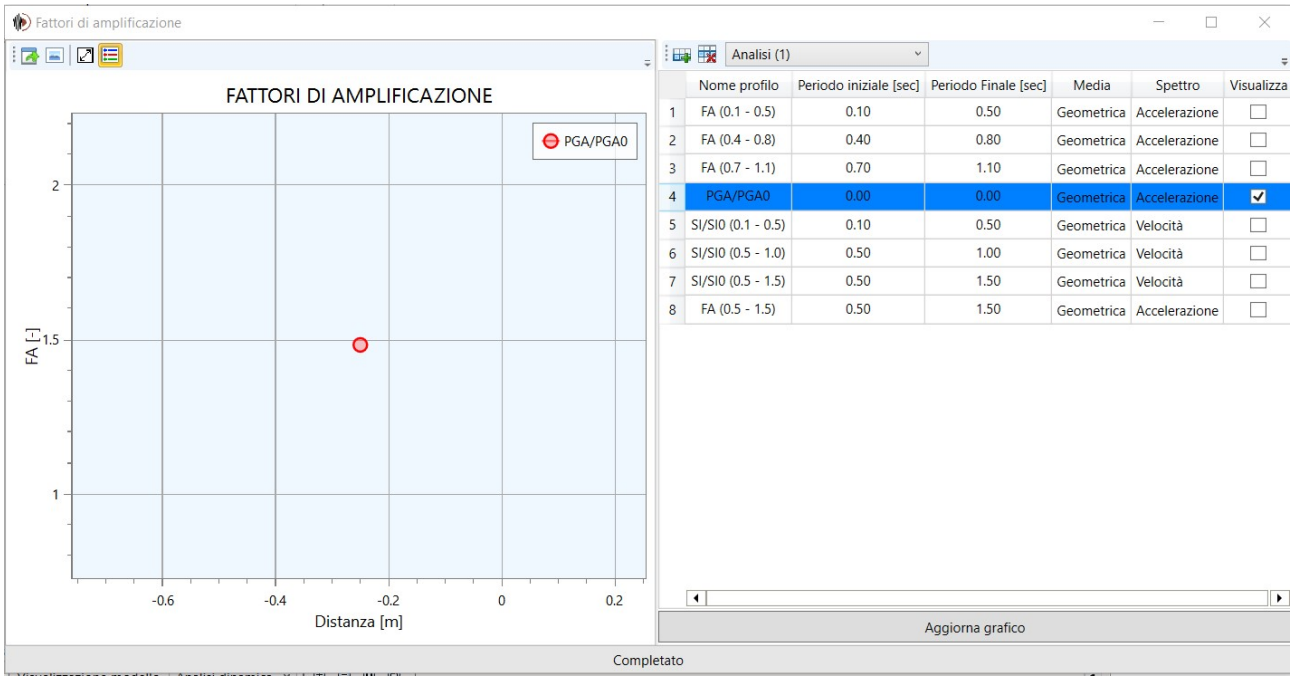
Di seguito si riportano le figure con rappresentati lo spettro medio di Input e lo spettro medio di Output per ogni località. Seguono i risultati dei calcoli del fattori di amplificazione nei diversi periodi previsti dalla normativa per le accelerazioni spettrali FA, per la PGA/PGAo, e per l'Intensità di Housner SI/SIo.

4.2.1. AREA PRODUTTIVA GUALDO-DUCENTOLA





	Nome profilo	Periodo iniziale [sec]	Periodo Finale [sec]	Media	Spettro	Visualizza
1	FA (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Accelerazione	☑
2	FA (0.4 - 0.8)	0.40	0.80	Geometrica	Accelerazione	☑
3	FA (0.7 - 1.1)	0.70	1.10	Geometrica	Accelerazione	☑
4	PGA/PGA0	0.00	0.00	Geometrica	Accelerazione	☐
5	SI/SI0 (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Velocità	☐
6	SI/SI0 (0.5 - 1.0)	0.50	1.00	Geometrica	Velocità	☐
7	SI/SI0 (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Velocità	☐
8	FA (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Accelerazione	☑



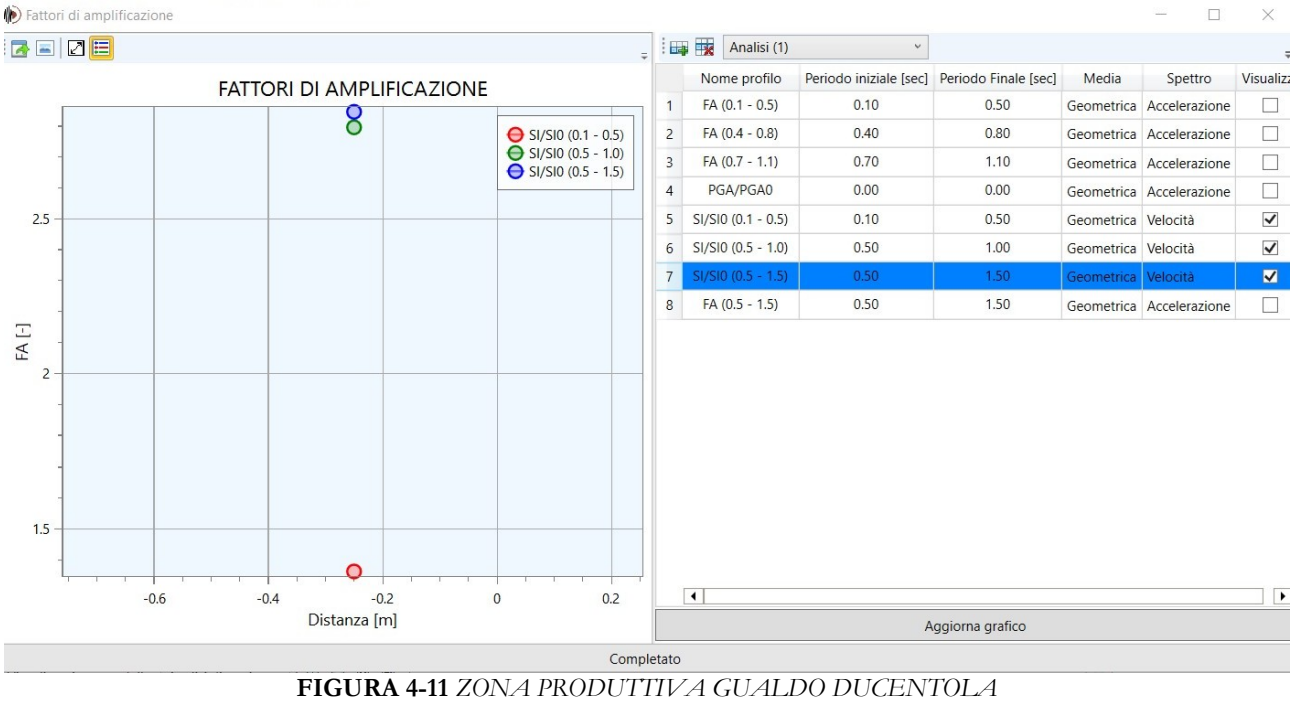
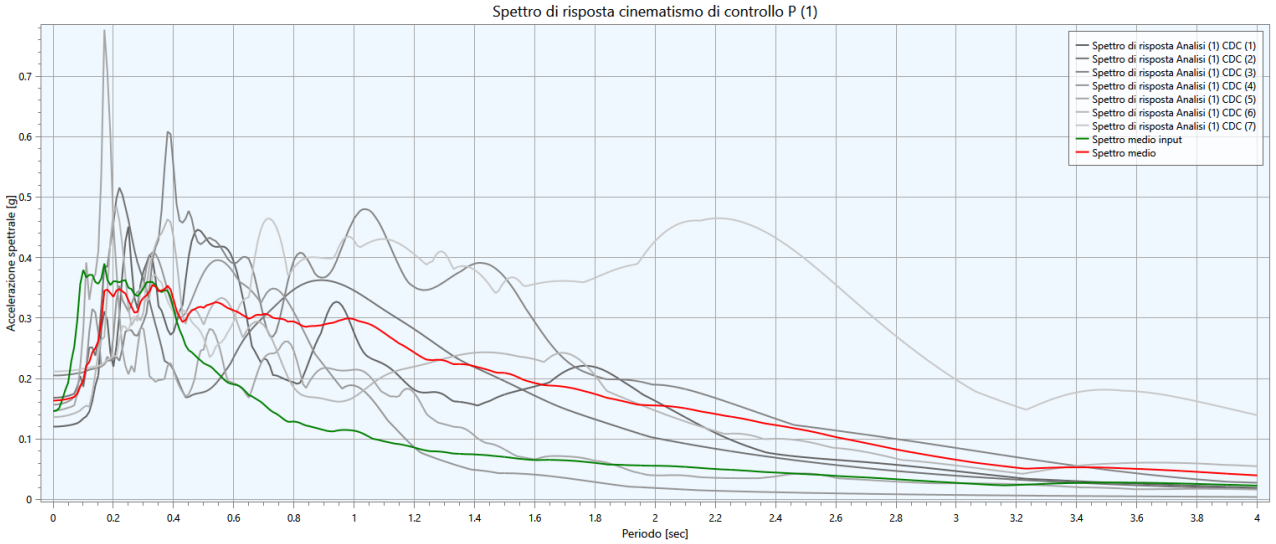
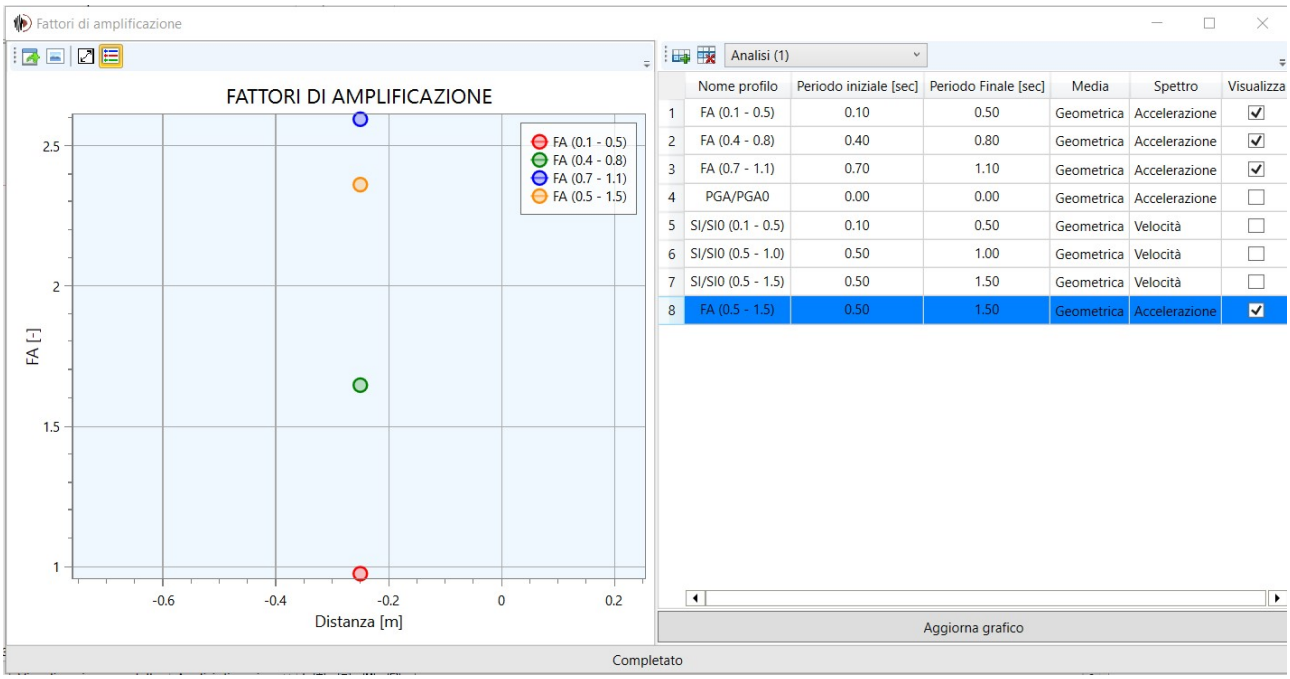


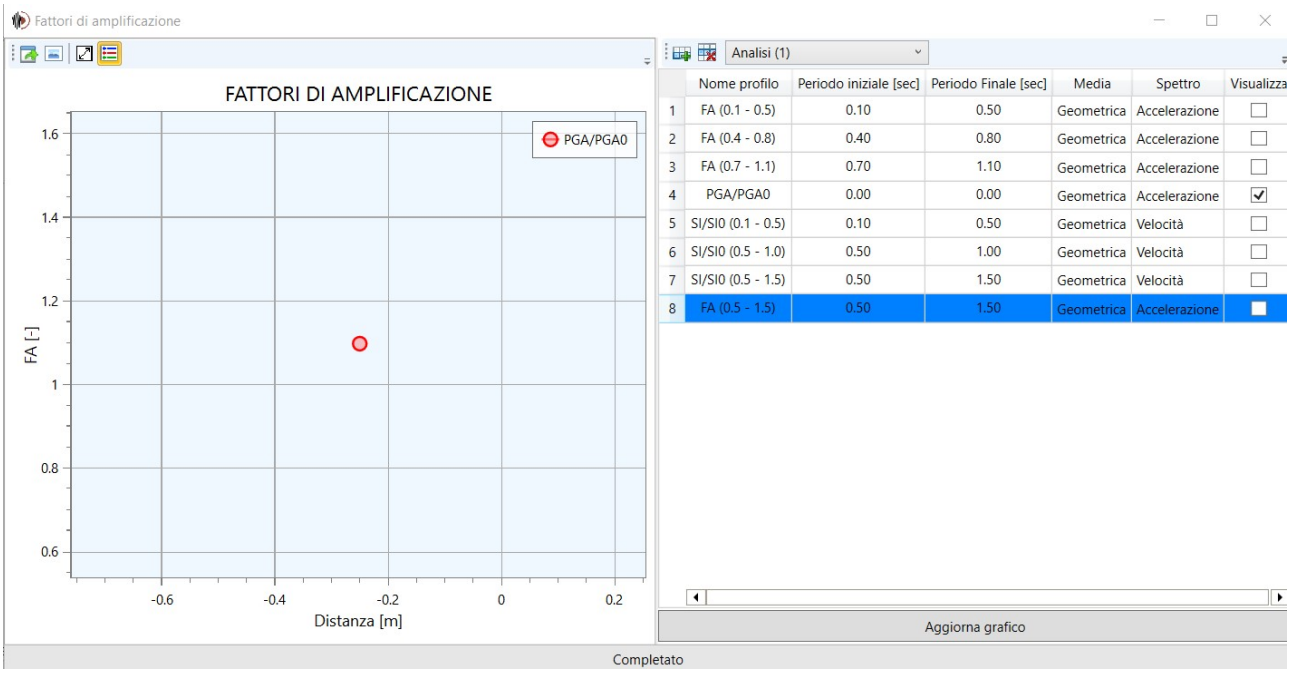
FIGURA 4-11 *ZONA PRODUTTIVA GUALDO DUCENTOLA*

4.2.2. DUCENTOLA centro abitato interno al paleoalveo





	Nome profilo	Periodo iniziale [sec]	Periodo Finale [sec]	Media	Spettro	Visualizza
1	FA (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Accelerazione	☑
2	FA (0.4 - 0.8)	0.40	0.80	Geometrica	Accelerazione	☑
3	FA (0.7 - 1.1)	0.70	1.10	Geometrica	Accelerazione	☑
4	PGA/PGA0	0.00	0.00	Geometrica	Accelerazione	☐
5	SI/SI0 (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Velocità	☐
6	SI/SI0 (0.5 - 1.0)	0.50	1.00	Geometrica	Velocità	☐
7	SI/SI0 (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Velocità	☐
8	FA (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Accelerazione	☑



	Nome profilo	Periodo iniziale [sec]	Periodo Finale [sec]	Media	Spettro	Visualizza
1	FA (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Accelerazione	☐
2	FA (0.4 - 0.8)	0.40	0.80	Geometrica	Accelerazione	☐
3	FA (0.7 - 1.1)	0.70	1.10	Geometrica	Accelerazione	☐
4	PGA/PGA0	0.00	0.00	Geometrica	Accelerazione	☑
5	SI/SI0 (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Velocità	☐
6	SI/SI0 (0.5 - 1.0)	0.50	1.00	Geometrica	Velocità	☐
7	SI/SI0 (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Velocità	☐
8	FA (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Accelerazione	☐

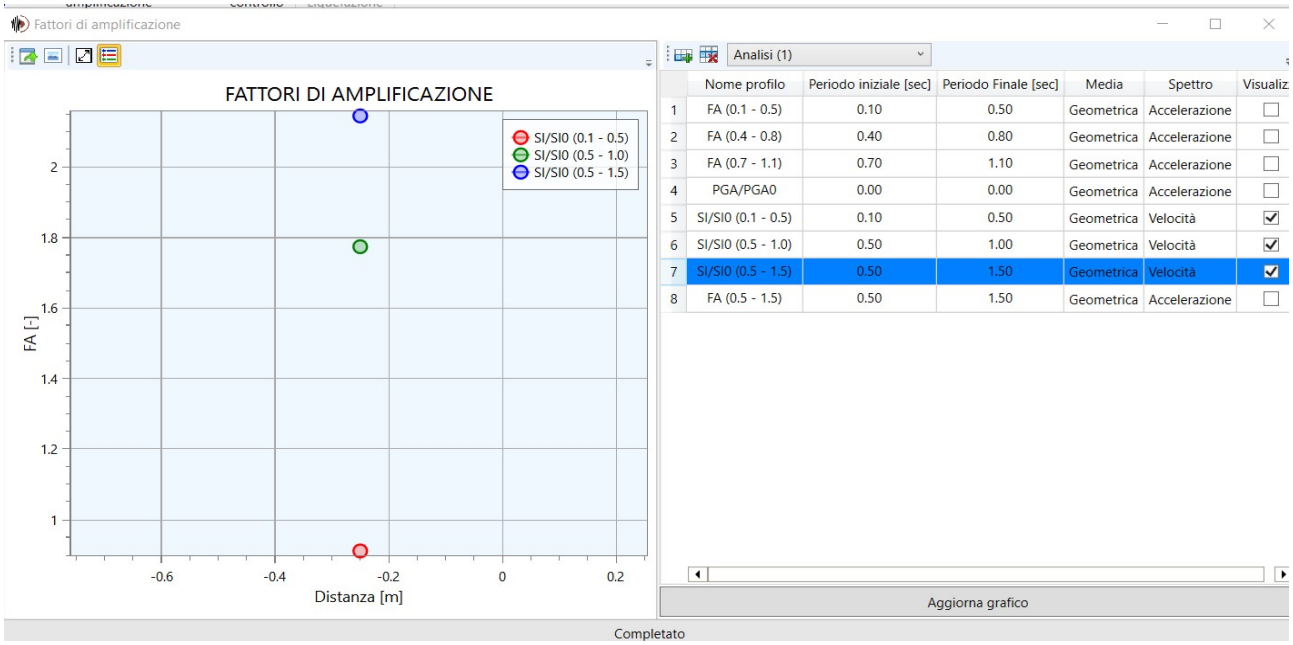
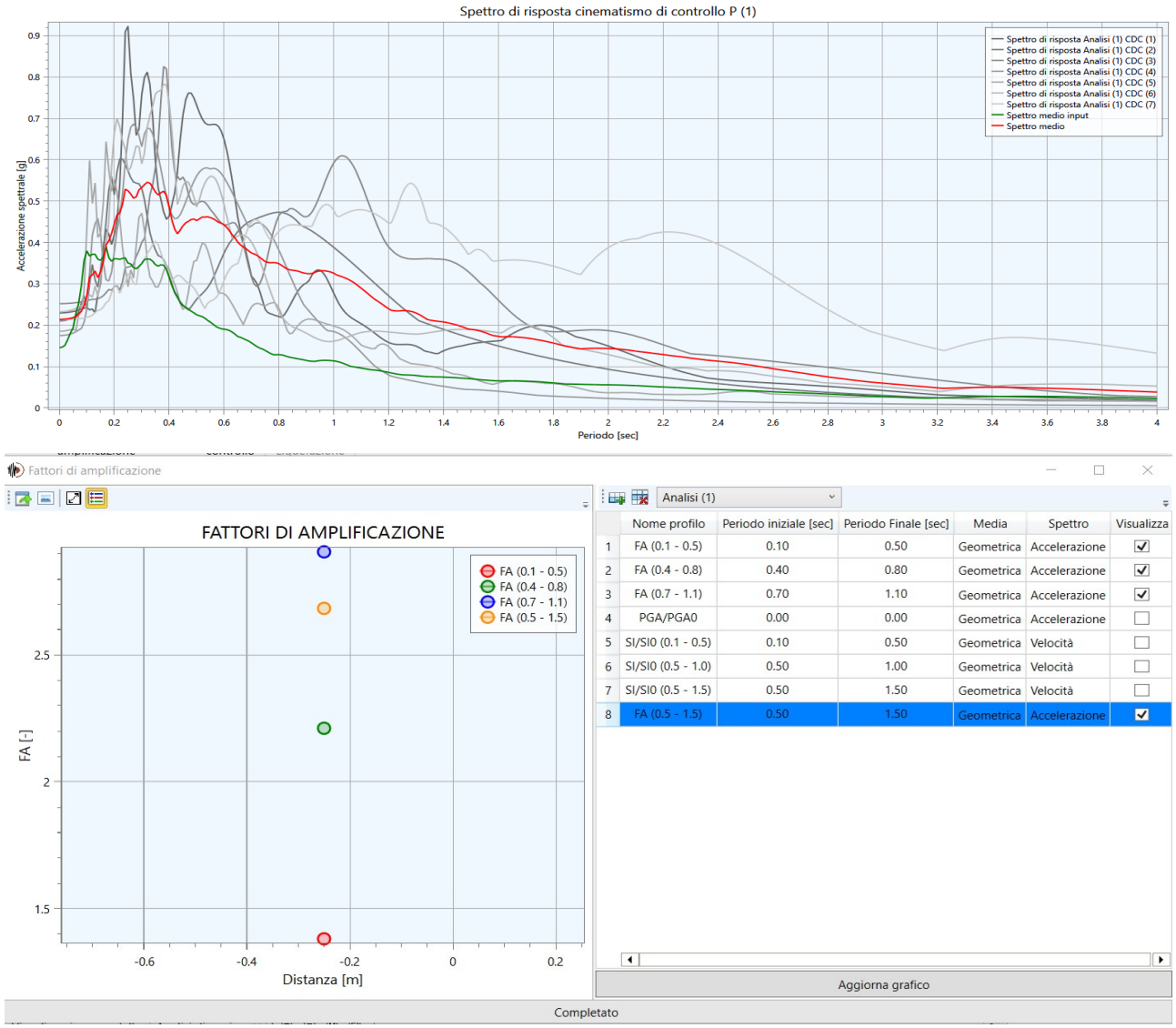


FIGURA 4-12 *Ducentola centro abitato interno al paleo alveo*

4.2.3. GUALDO centro abitato esterno al paleoalveo



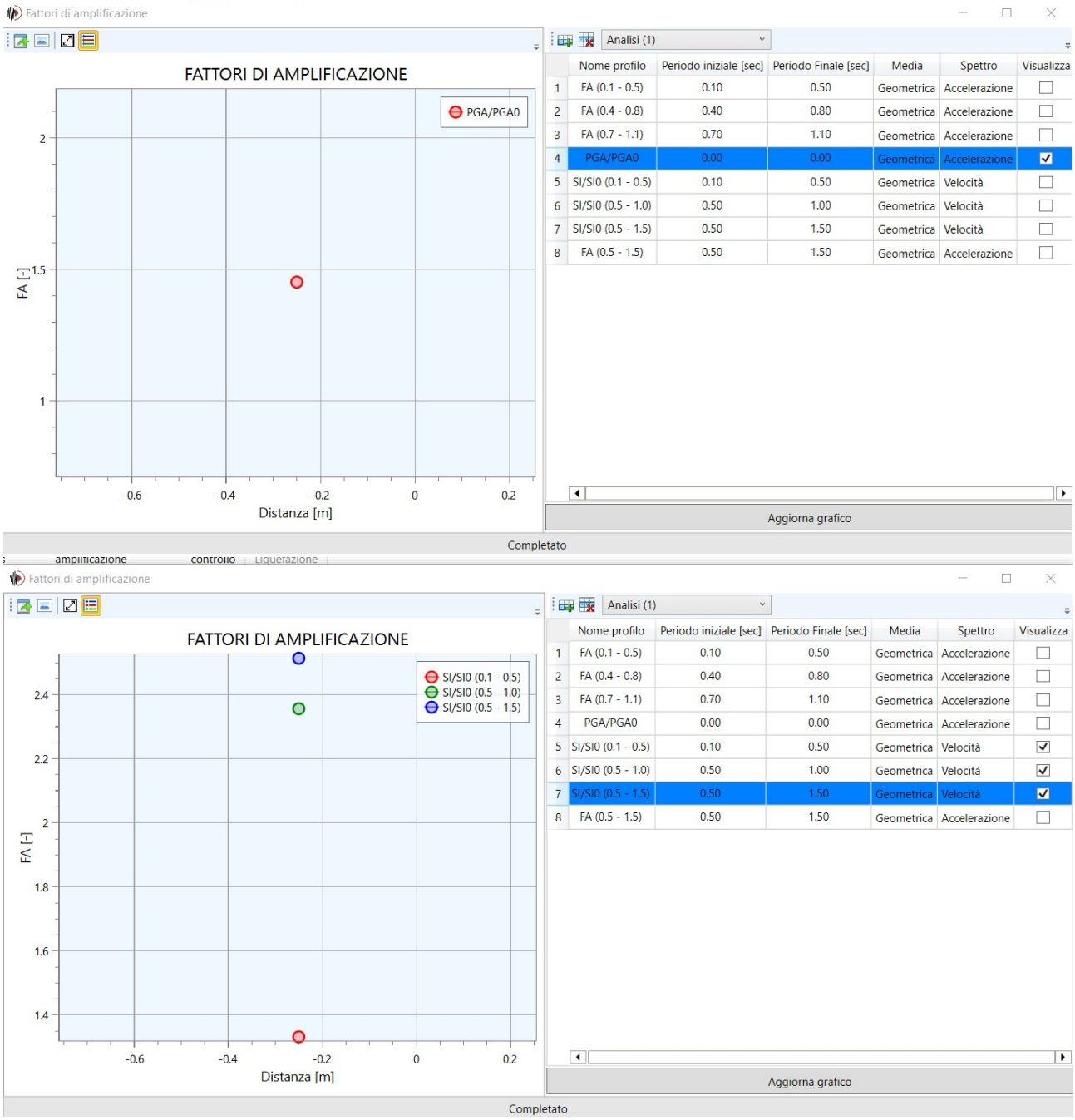
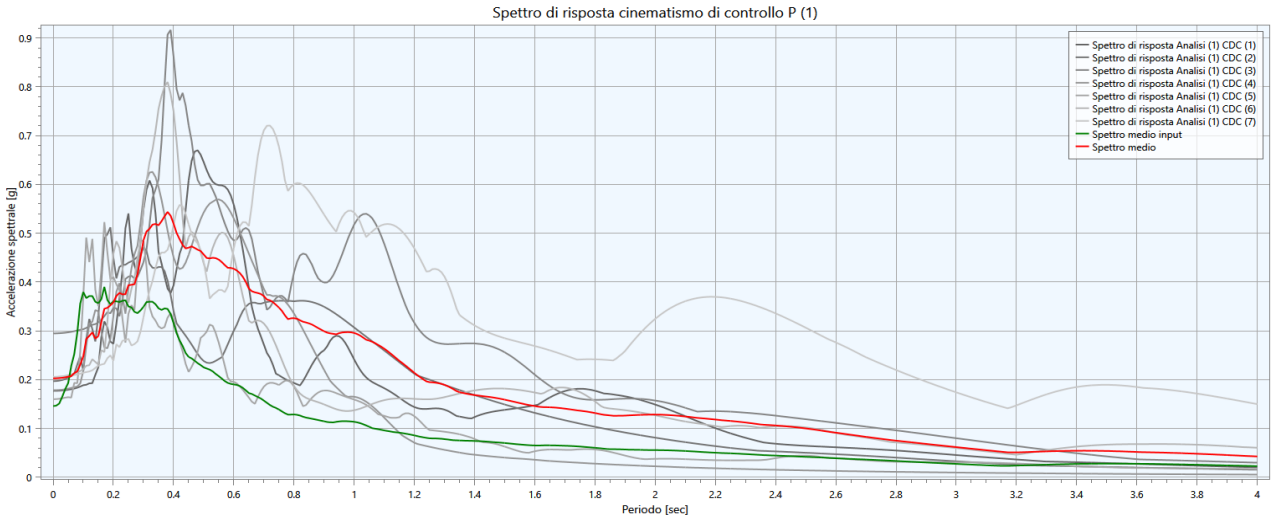
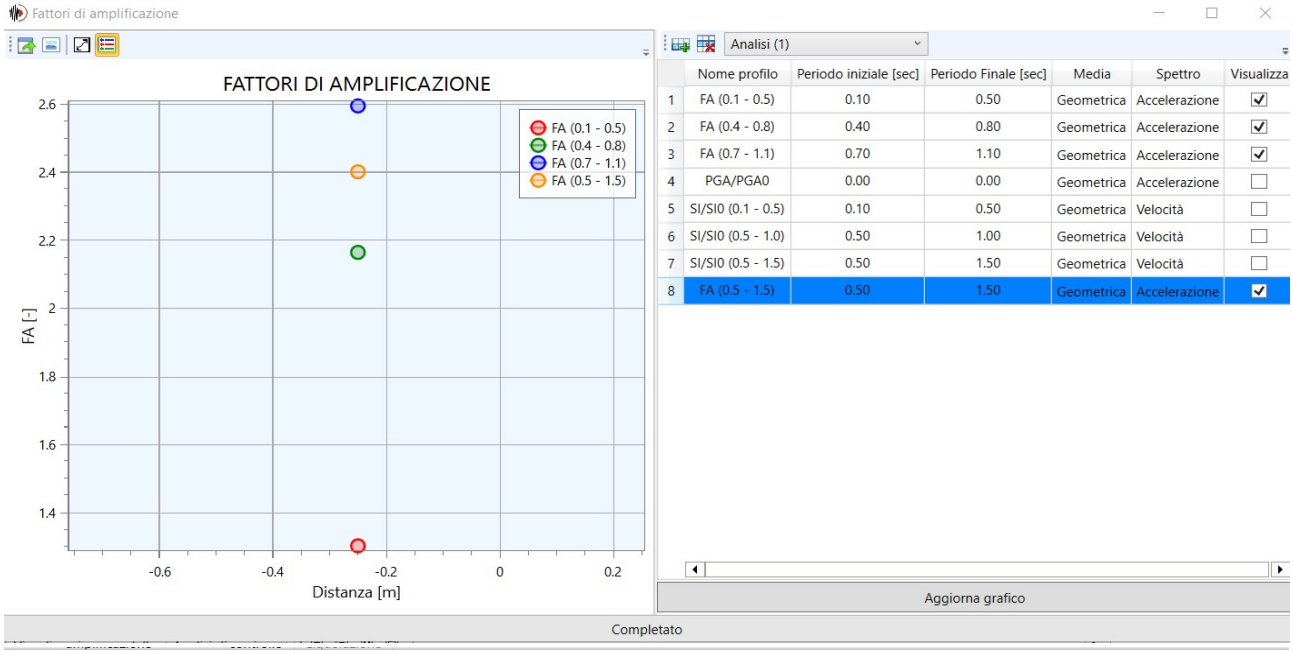


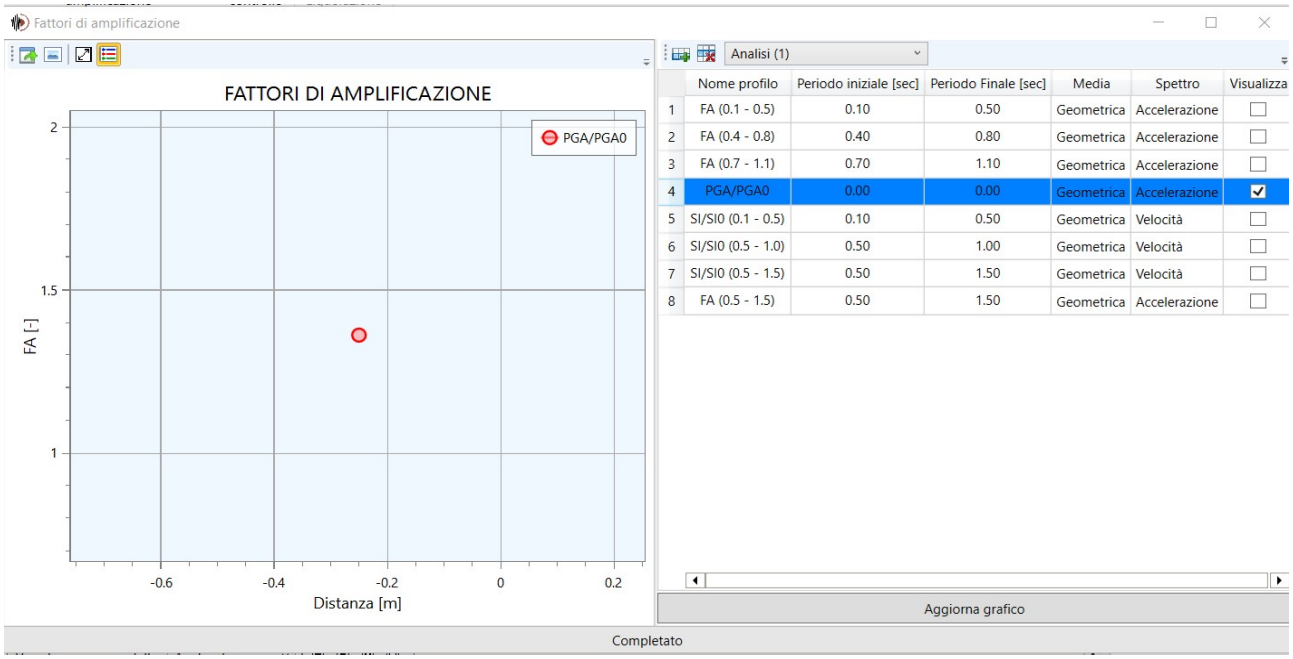
FIGURA 4-13 *Gualdo paese esterno al paleoalveo*

4.2.4. VOGHENZA centro abitato interno al paleoalveo





	Nome profilo	Periodo iniziale [sec]	Periodo Finale [sec]	Media	Spettro	Visualizza
1	FA (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Accelerazione	☑
2	FA (0.4 - 0.8)	0.40	0.80	Geometrica	Accelerazione	☑
3	FA (0.7 - 1.1)	0.70	1.10	Geometrica	Accelerazione	☑
4	PGA/PGA0	0.00	0.00	Geometrica	Accelerazione	☐
5	SI/SI0 (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Velocità	☐
6	SI/SI0 (0.5 - 1.0)	0.50	1.00	Geometrica	Velocità	☐
7	SI/SI0 (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Velocità	☐
8	FA (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Accelerazione	☑



	Nome profilo	Periodo iniziale [sec]	Periodo Finale [sec]	Media	Spettro	Visualizza
1	FA (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Accelerazione	☐
2	FA (0.4 - 0.8)	0.40	0.80	Geometrica	Accelerazione	☐
3	FA (0.7 - 1.1)	0.70	1.10	Geometrica	Accelerazione	☐
4	PGA/PGA0	0.00	0.00	Geometrica	Accelerazione	☑
5	SI/SI0 (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Velocità	☐
6	SI/SI0 (0.5 - 1.0)	0.50	1.00	Geometrica	Velocità	☐
7	SI/SI0 (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Velocità	☐
8	FA (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Accelerazione	☐

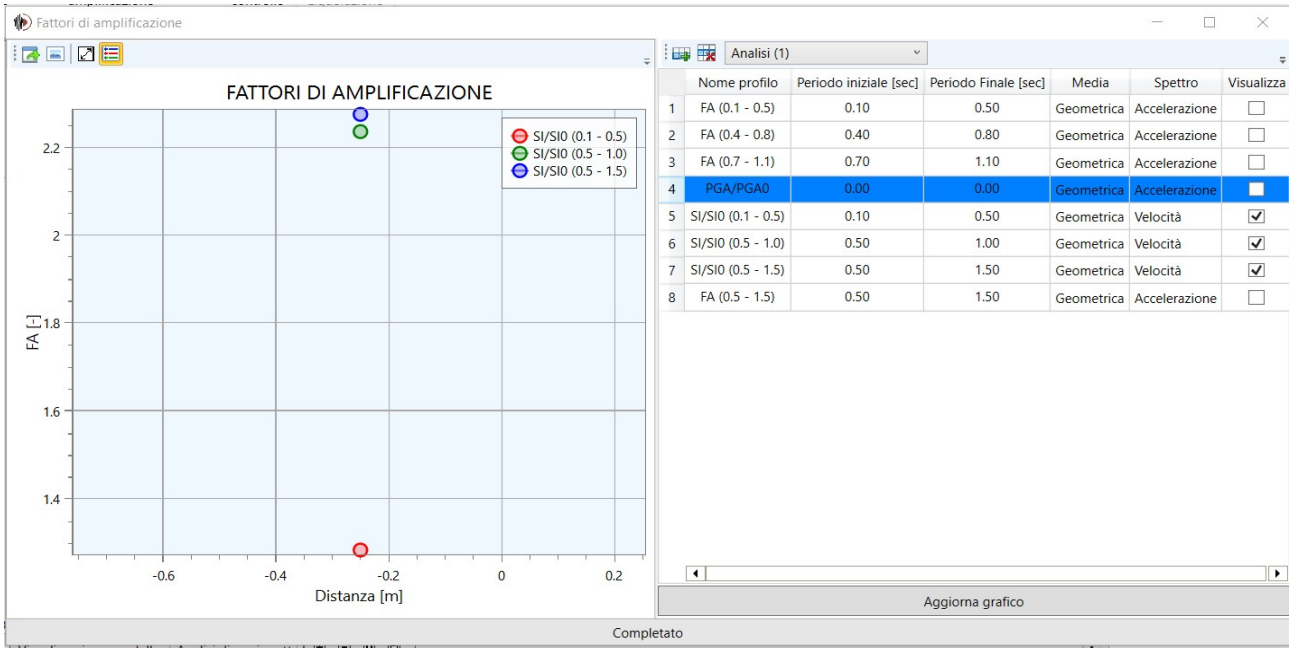
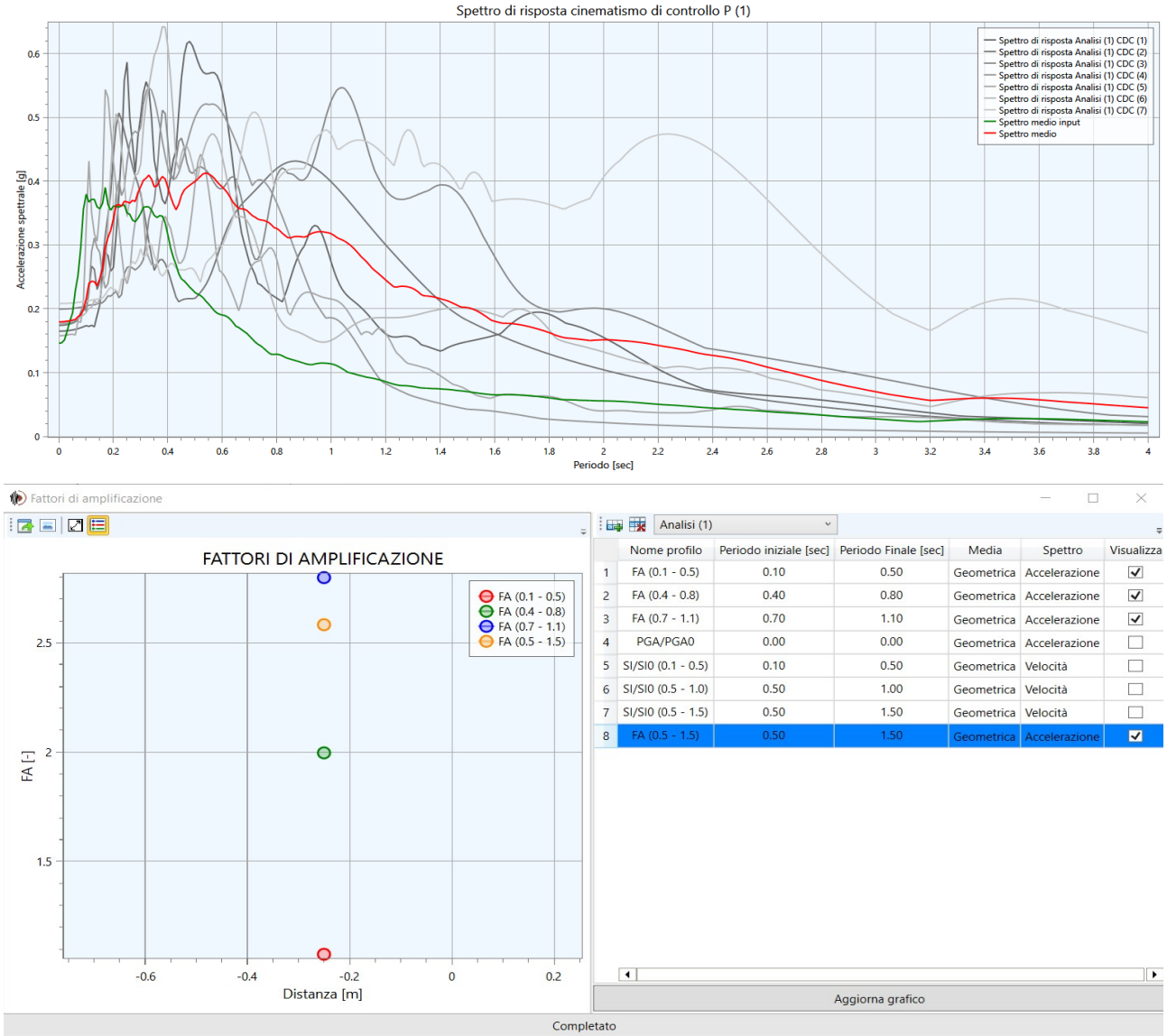


FIGURA 4-14 *Voghenza centro abitato interno al paleoalveo*

4.2.5. VOGHENZA centro abitato esterno al paleoalveo



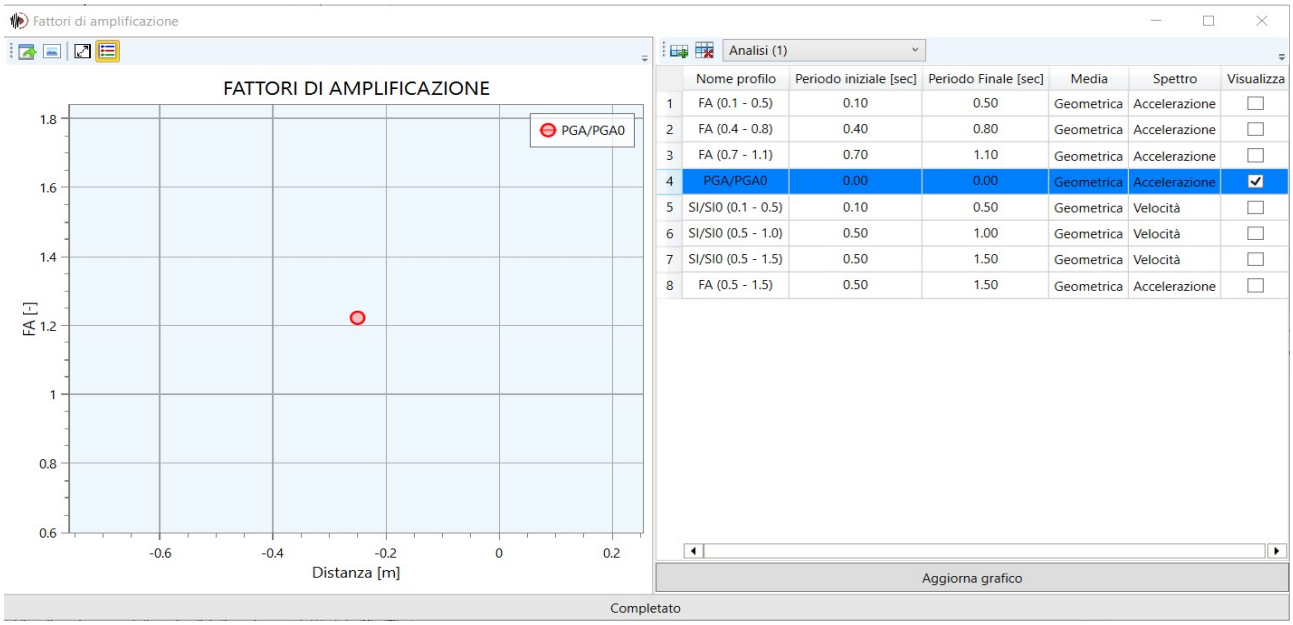
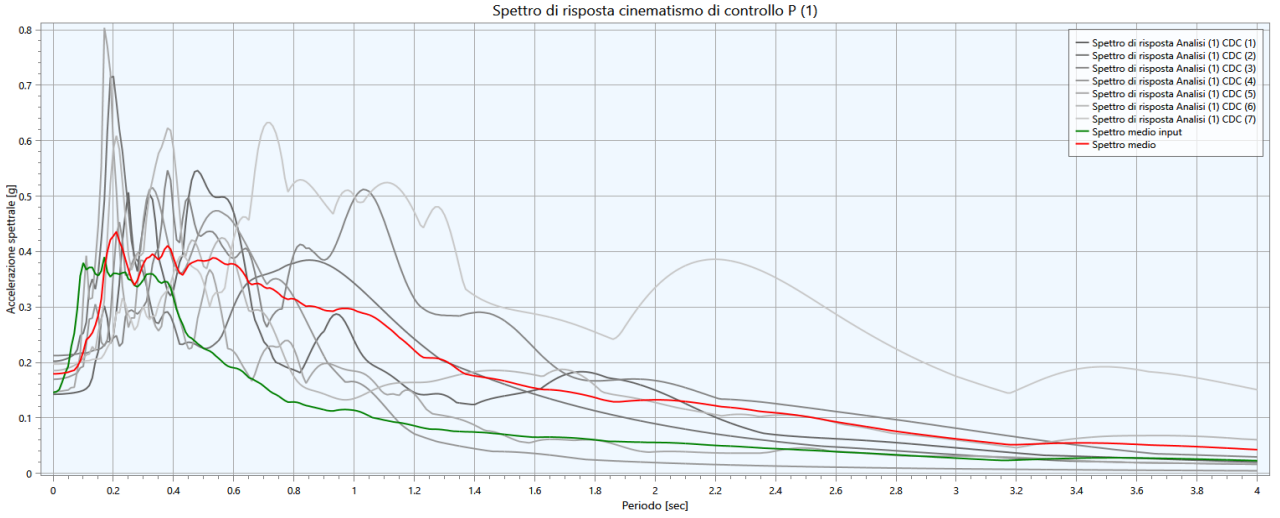
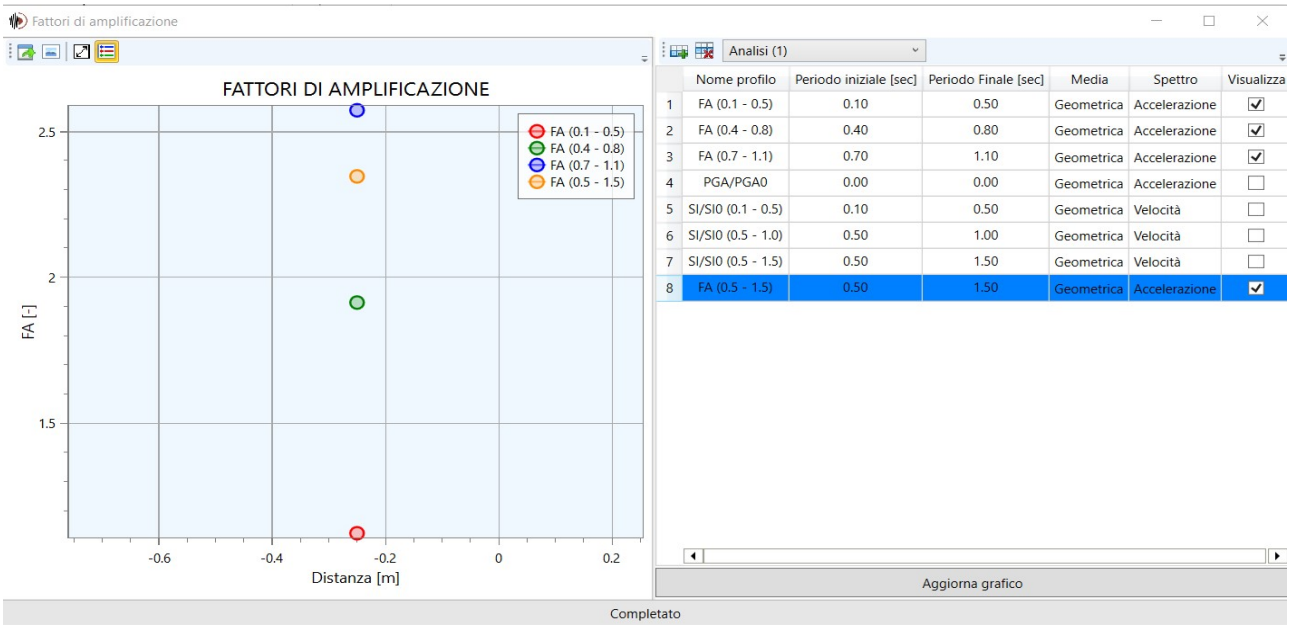
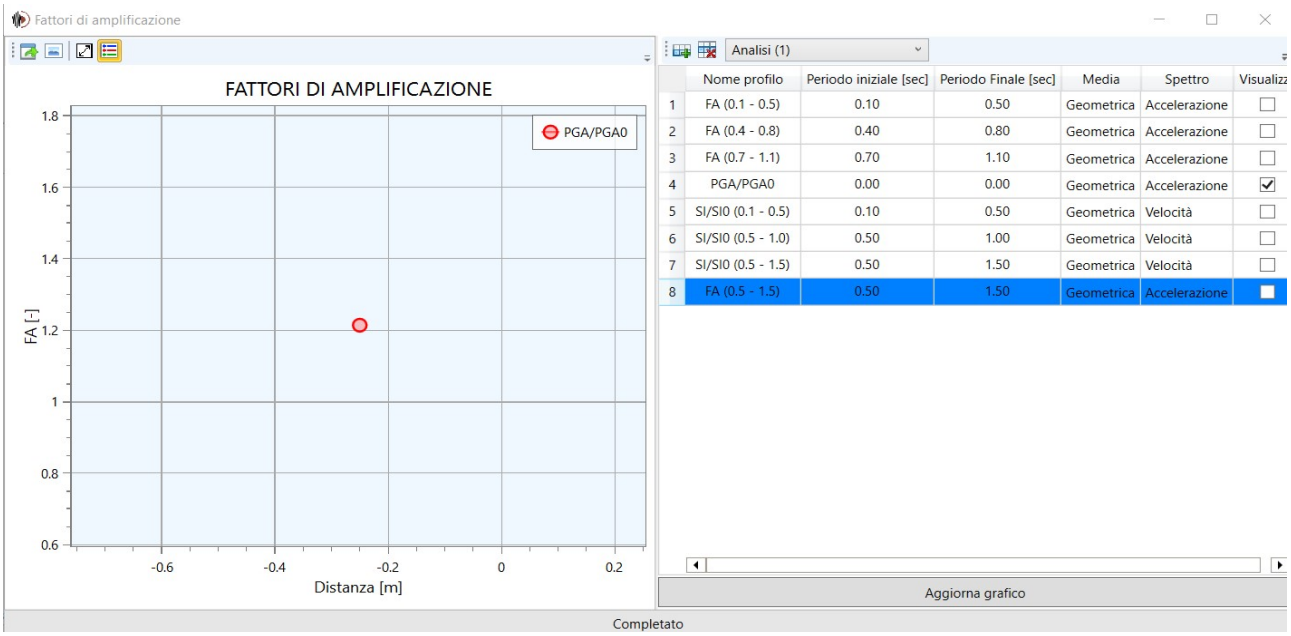


FIGURA 4-15 *Voghenza centro abitato esterno al paleo alveo*

4.2.6. VOGHIERA centro abitato interno al paleoalveo







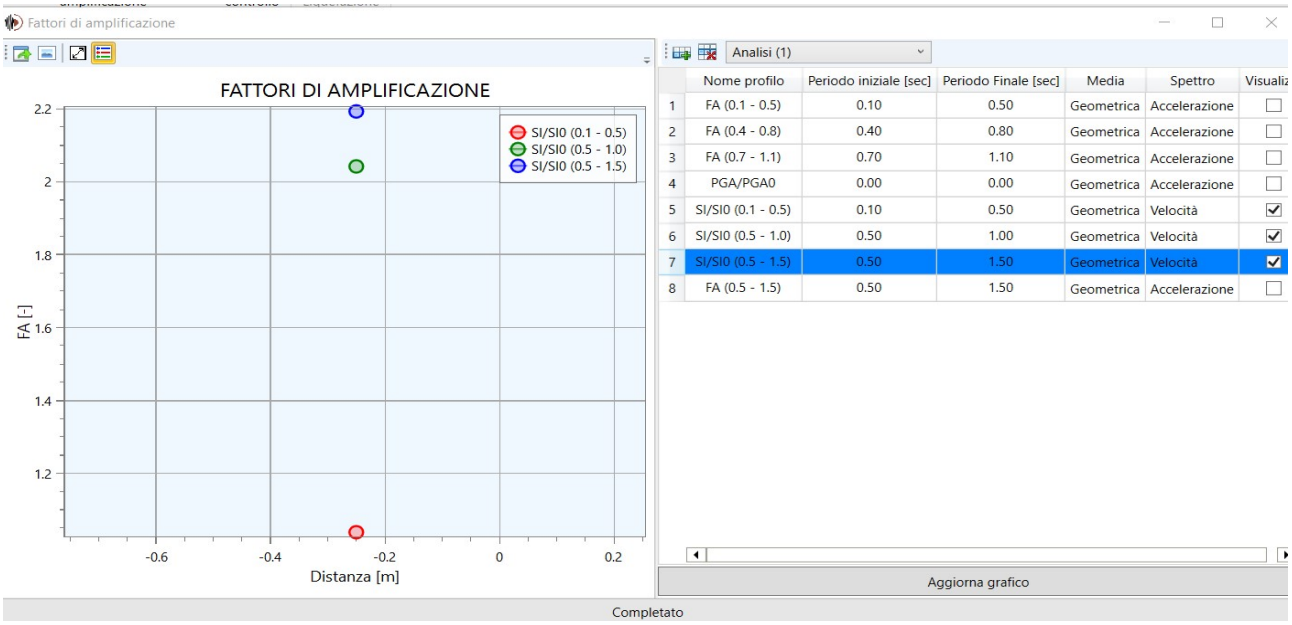
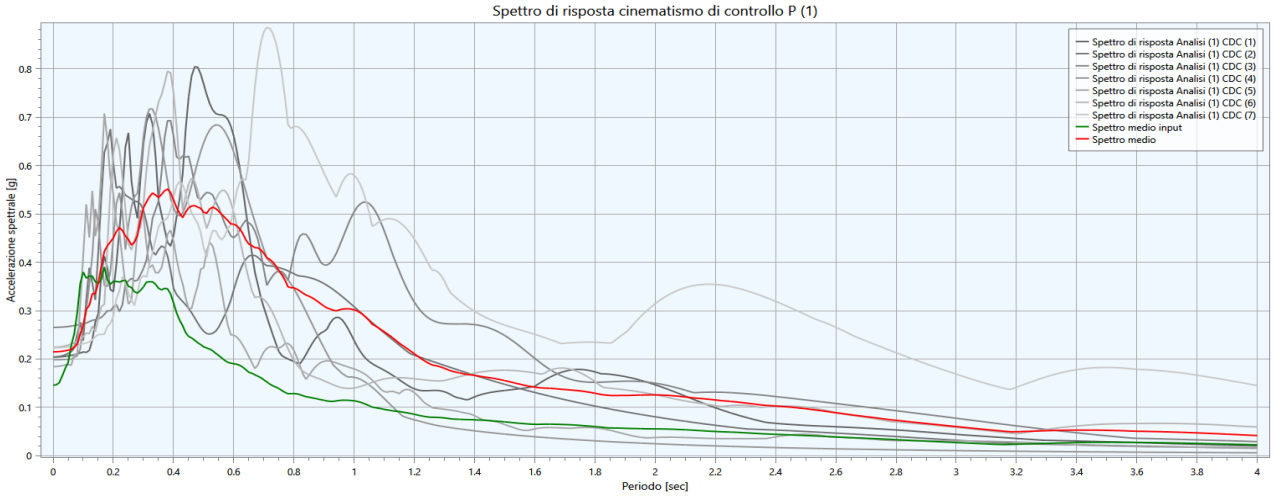
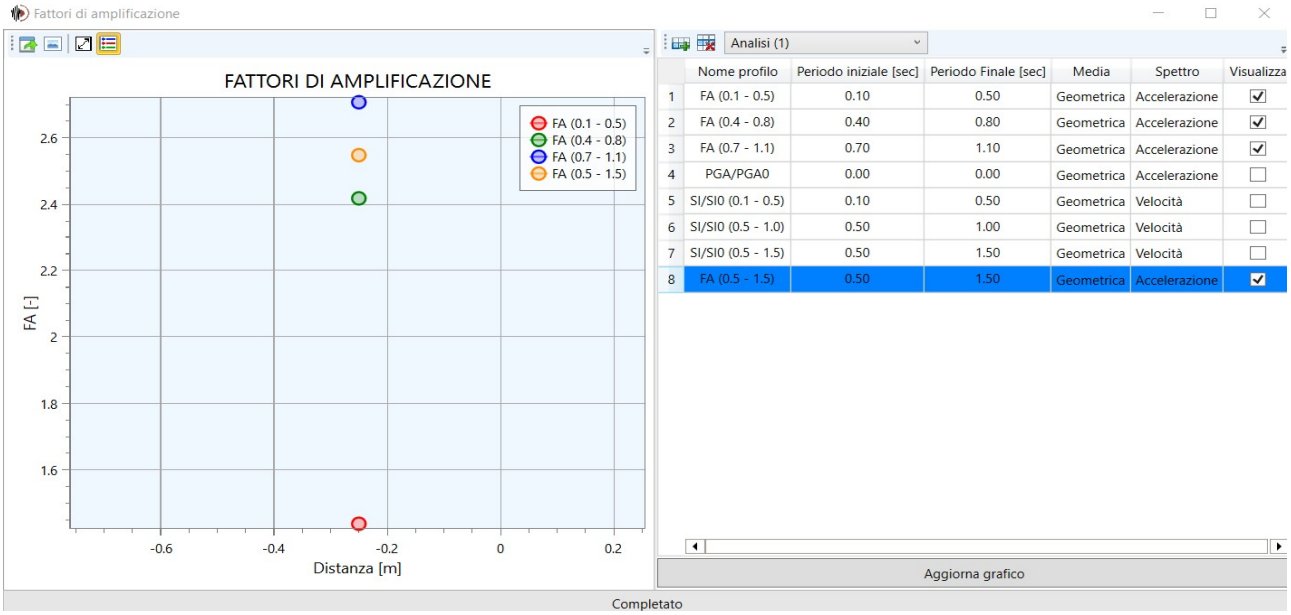


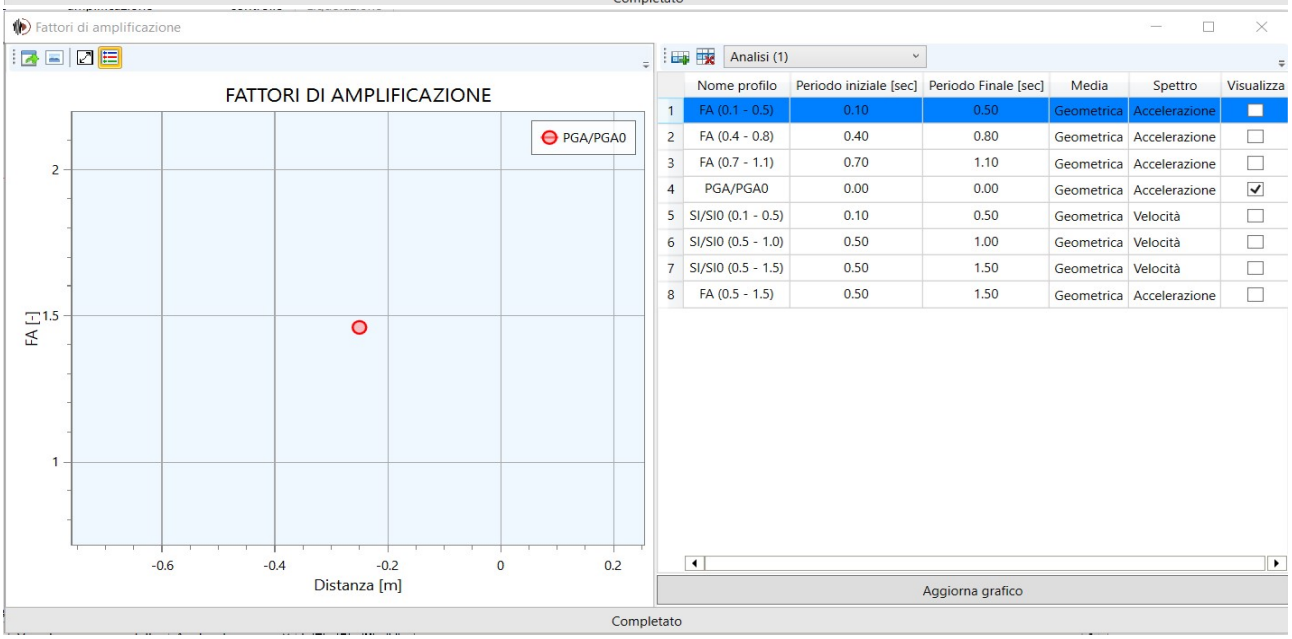
FIGURA 4-16 *Voghiera centro abitato interno al paleoalveo*

4.2.7. VOGHIERA centro abitato esterno al paleoalveo





	Nome profilo	Periodo iniziale [sec]	Periodo Finale [sec]	Media	Spettro	Visualizza
1	FA (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Accelerazione	☑
2	FA (0.4 - 0.8)	0.40	0.80	Geometrica	Accelerazione	☑
3	FA (0.7 - 1.1)	0.70	1.10	Geometrica	Accelerazione	☑
4	PGA/PGA0	0.00	0.00	Geometrica	Accelerazione	☐
5	SI/SI0 (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Velocità	☐
6	SI/SI0 (0.5 - 1.0)	0.50	1.00	Geometrica	Velocità	☐
7	SI/SI0 (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Velocità	☐
8	FA (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Accelerazione	☑



	Nome profilo	Periodo iniziale [sec]	Periodo Finale [sec]	Media	Spettro	Visualizza
1	FA (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Accelerazione	☐
2	FA (0.4 - 0.8)	0.40	0.80	Geometrica	Accelerazione	☐
3	FA (0.7 - 1.1)	0.70	1.10	Geometrica	Accelerazione	☐
4	PGA/PGA0	0.00	0.00	Geometrica	Accelerazione	☑
5	SI/SI0 (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Velocità	☐
6	SI/SI0 (0.5 - 1.0)	0.50	1.00	Geometrica	Velocità	☐
7	SI/SI0 (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Velocità	☐
8	FA (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Accelerazione	☐

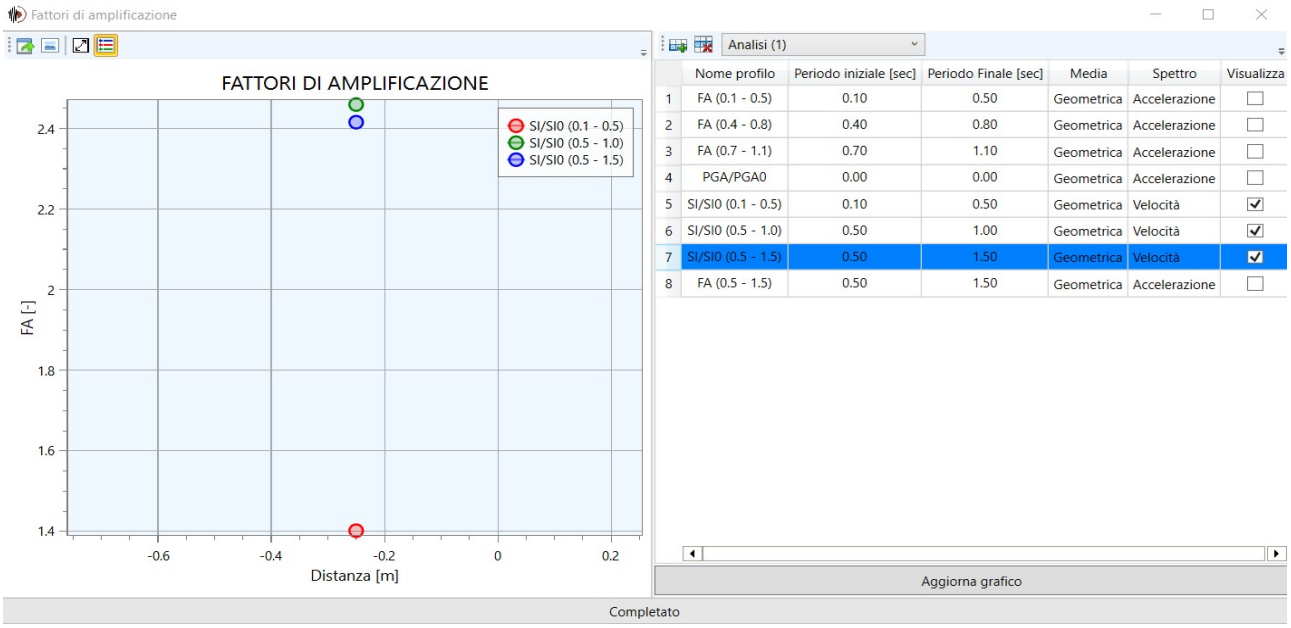
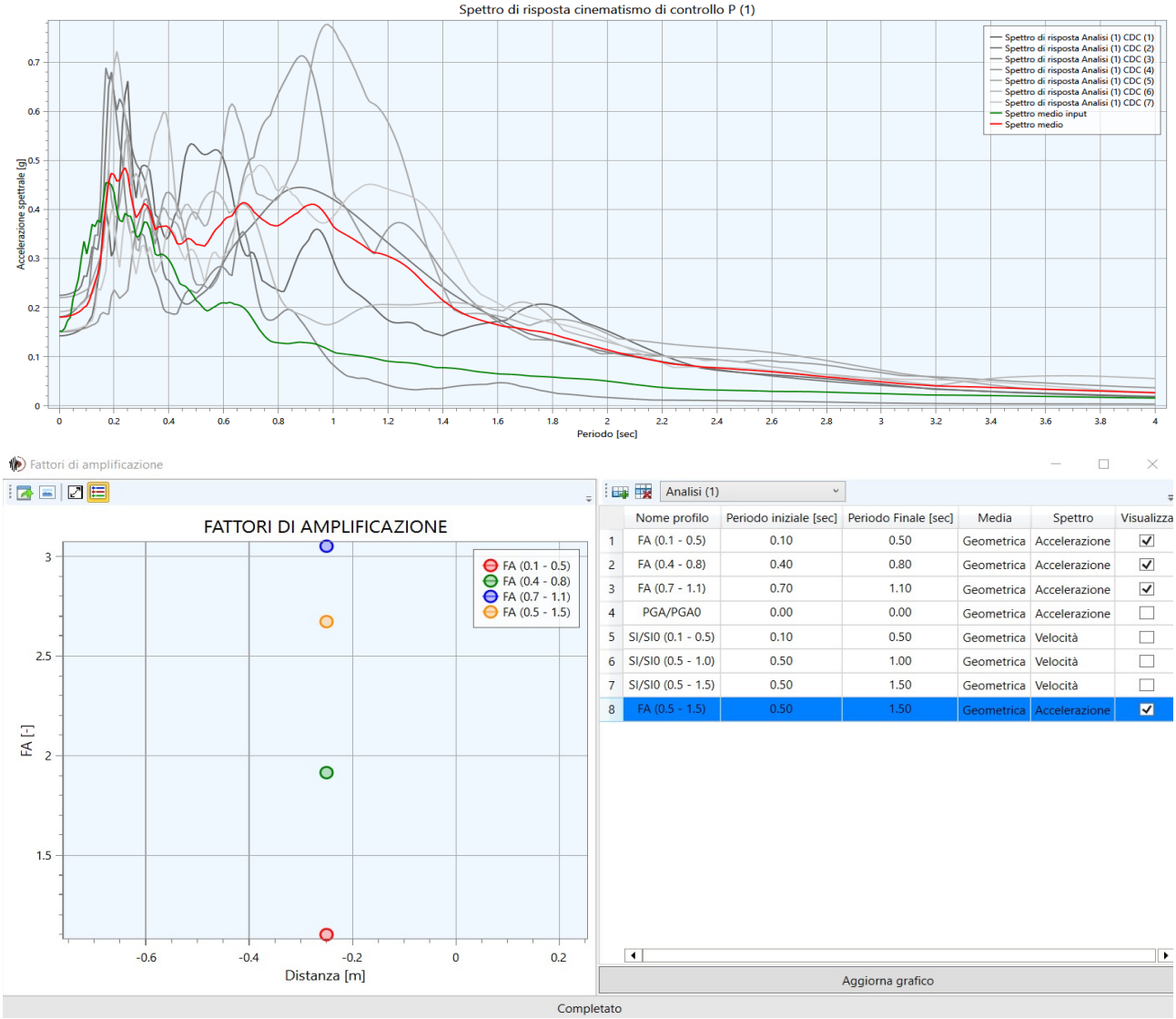


FIGURA 4-17 *Voghiera centro abitato esterno al paleoalveo*

4.2.8. MONTESANTO centro abitato esterno al paleoalveo



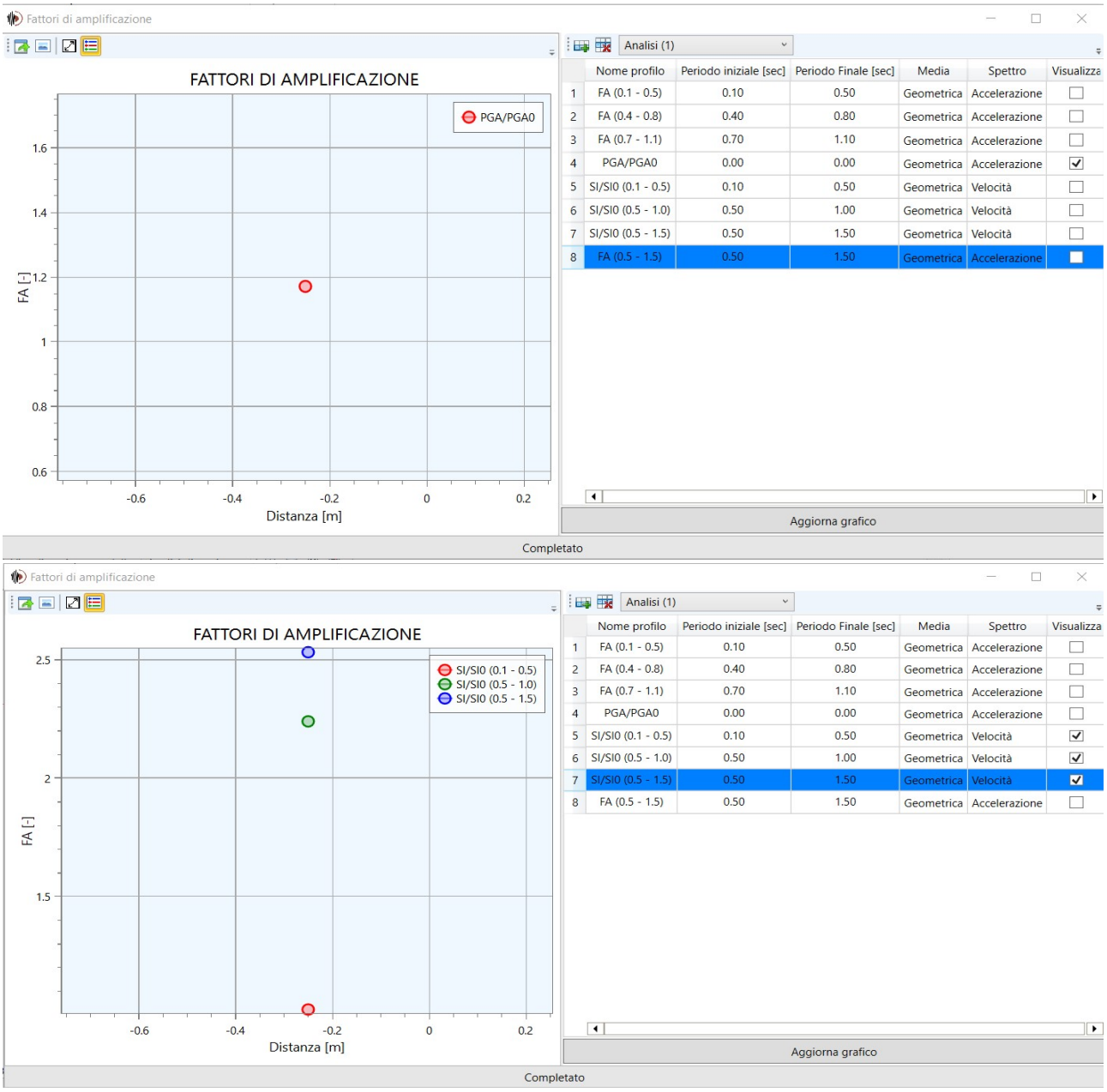


FIGURA 4-18 *Montesanto centro abitato esterno al paleoalveo*

4.3. CALCOLO DEGLI HSM E SINTESI RISULTATI

Una volta calcolati gli spettri in accelerazione di output della RSL, si procede al calcolo degli HSM, eseguendo l'integrale delle curve spettrali nei rispettivi periodi richiesti dalla normativa. Per l'esecuzione del calcolo è stato prodotto dallo scrivente un apposito foglio di calcolo Excel.

Di seguito si riportano le fasi di calcolo, per ogni località.

AREA PRODUTTIVA GUALDO DUCENTOLA esterna al paleoalveo

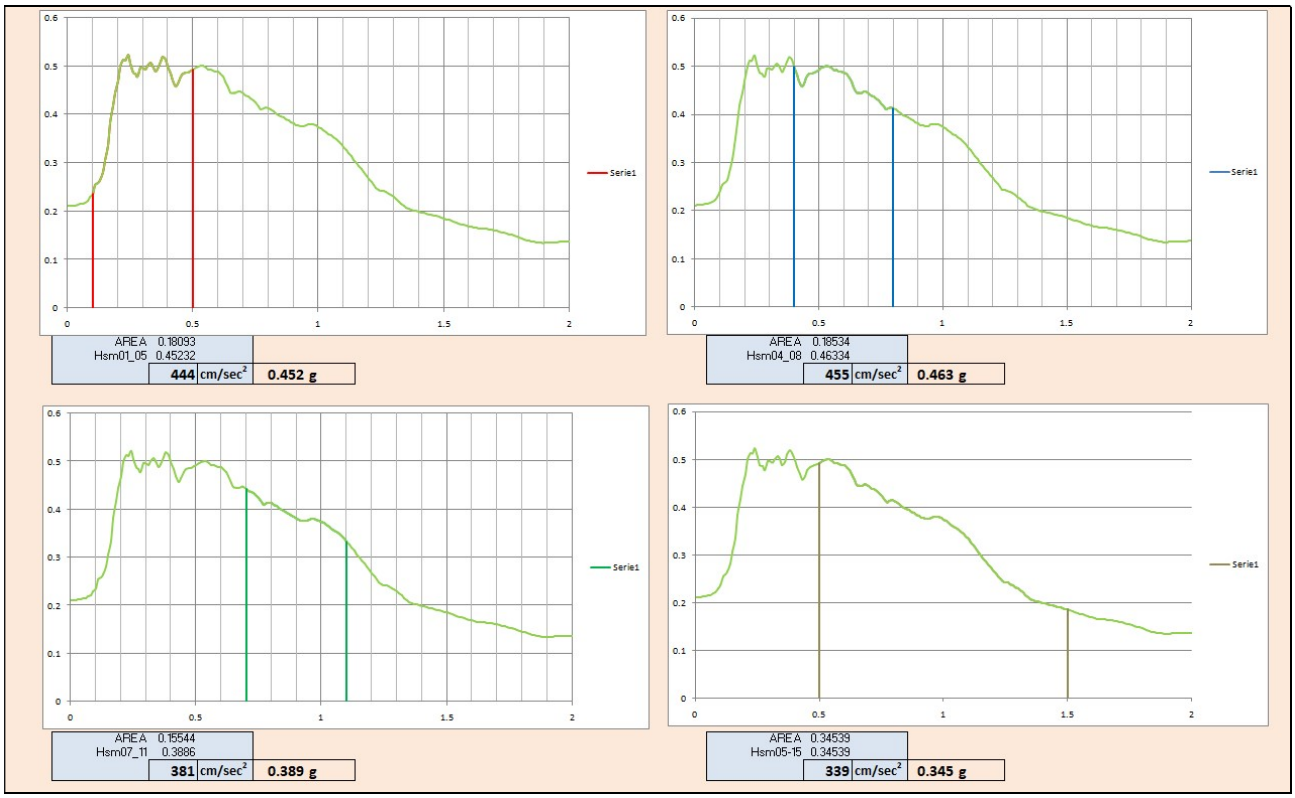


FIGURA 4-19 *Area produttiva Gualdo Ducentola – esterna al paleoalveo*

DUCENTOLA centro abitato interno al paleoalveo (campo sportivo)

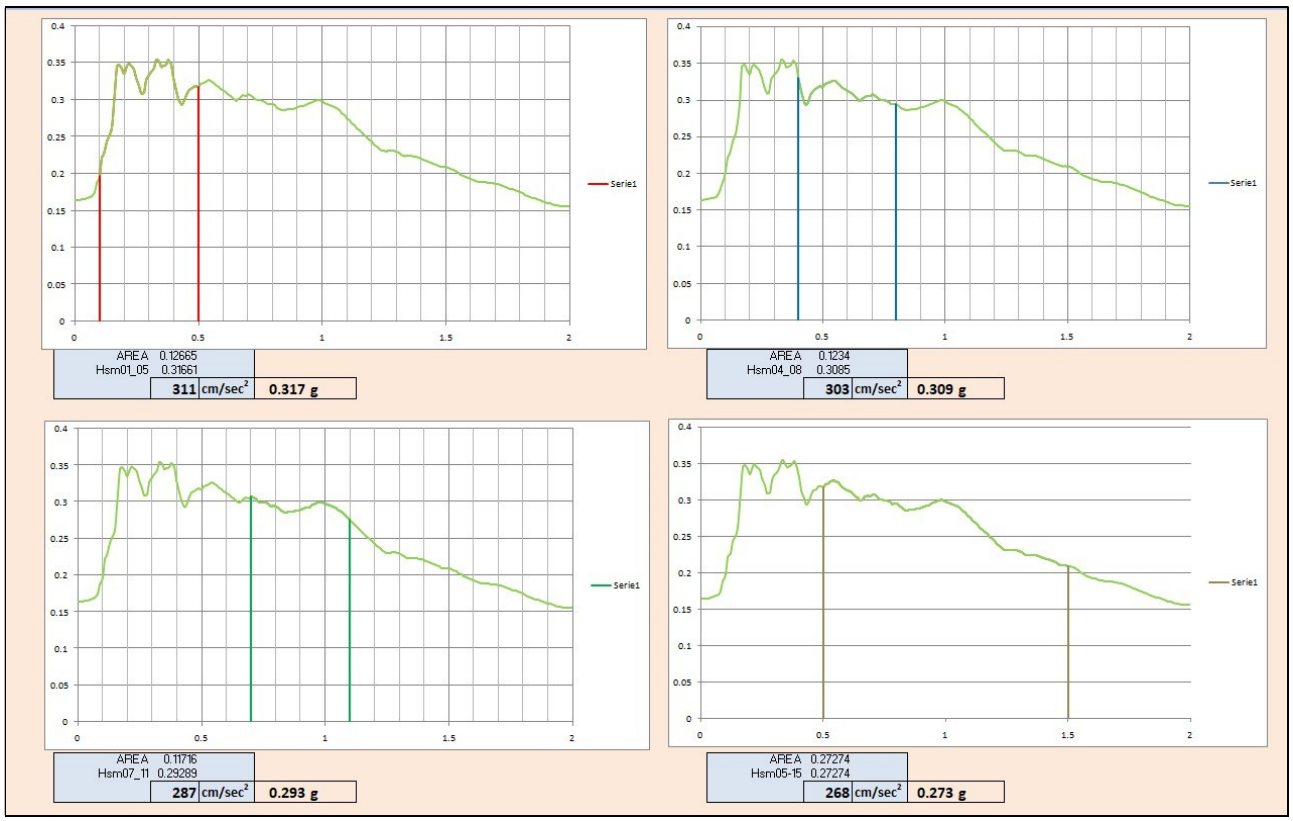


FIGURA 4-20 *Ducentola, centro abitato interno al paleoalveo*

GUALDO centro abitato esterno al paleoalveo (Asilo nido)

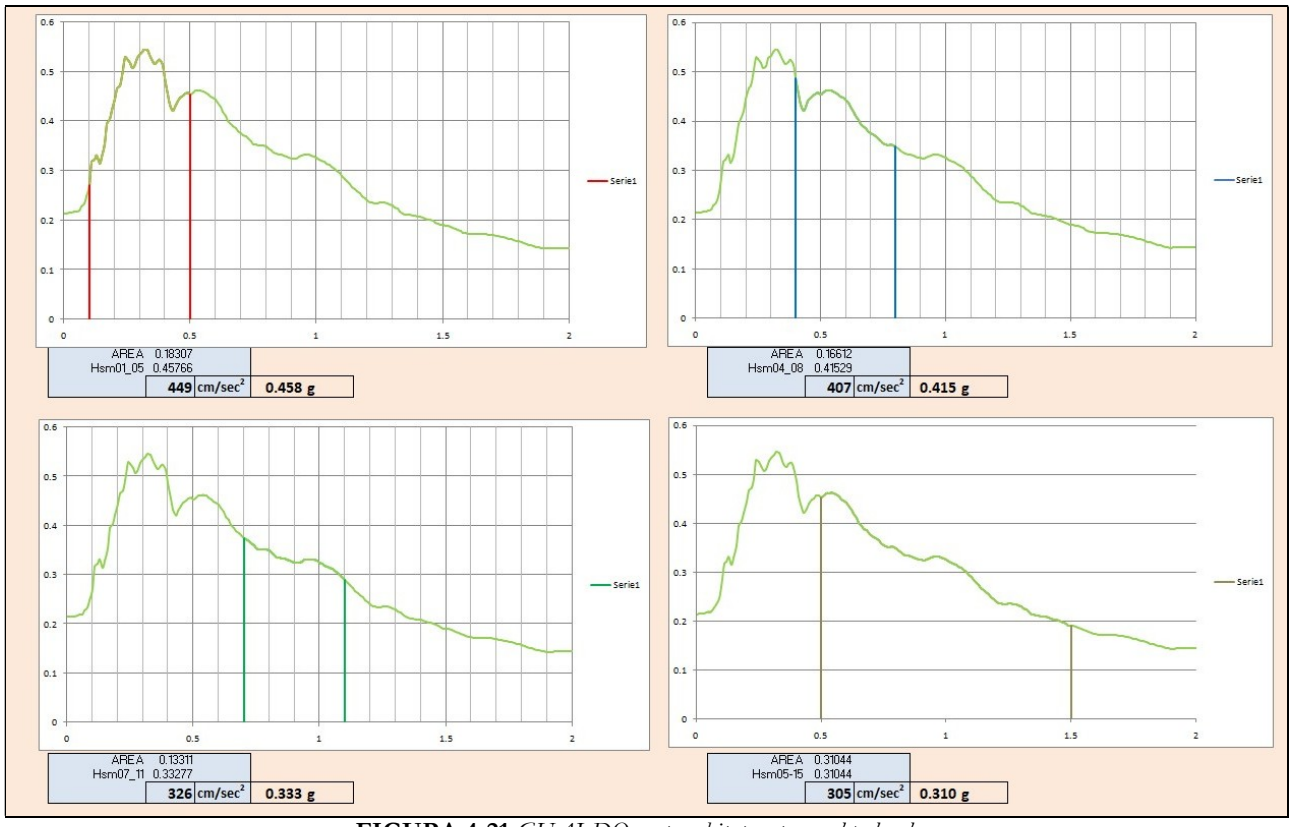


FIGURA 4-21 *GUALDO centro abitato esterno al paleoalveo*

VOGHENZA centro abitato interno al paleo alveo (Parco Massari)

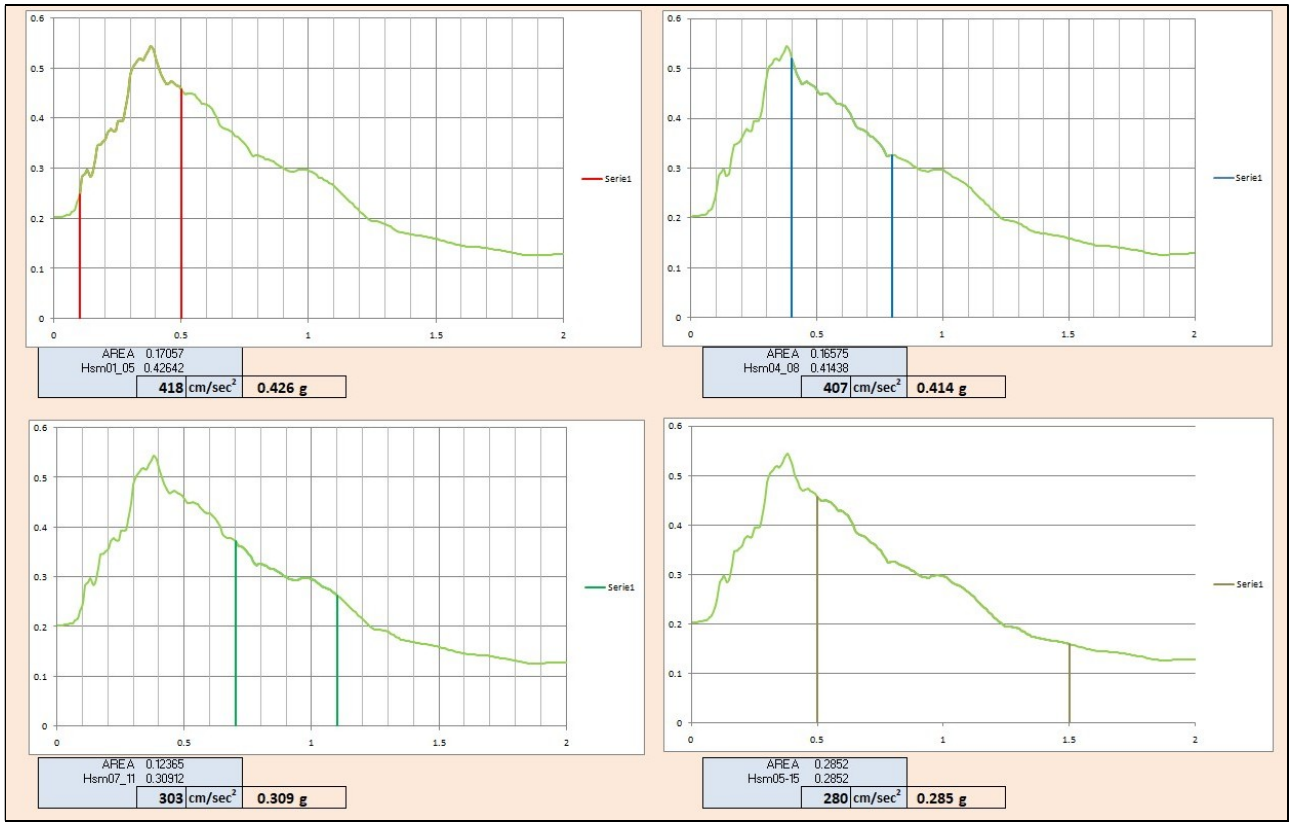


FIGURA 4-22 *VOGHENZA centro abitato interno al paleo alveo (Parco Massari)*

VOGHENZA centro abitato esterno al paleoalveo (Teatro)

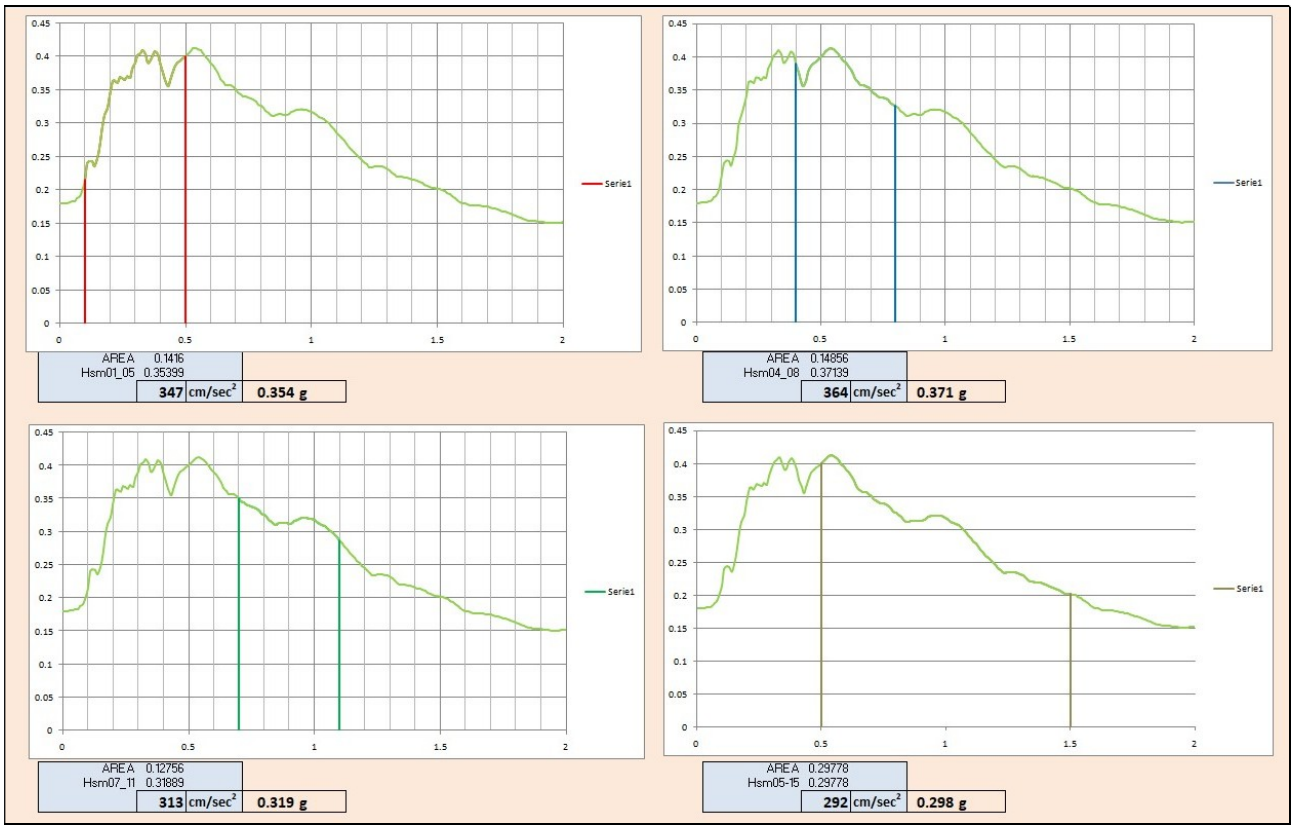


FIGURA 4-23 *VOGHENZA centro abitato esterno al paleoalveo (teatro di Voghenza)*

VOGHIERA centro abitato interno al paleoalveo (fronte del Castello del Belriguardo)

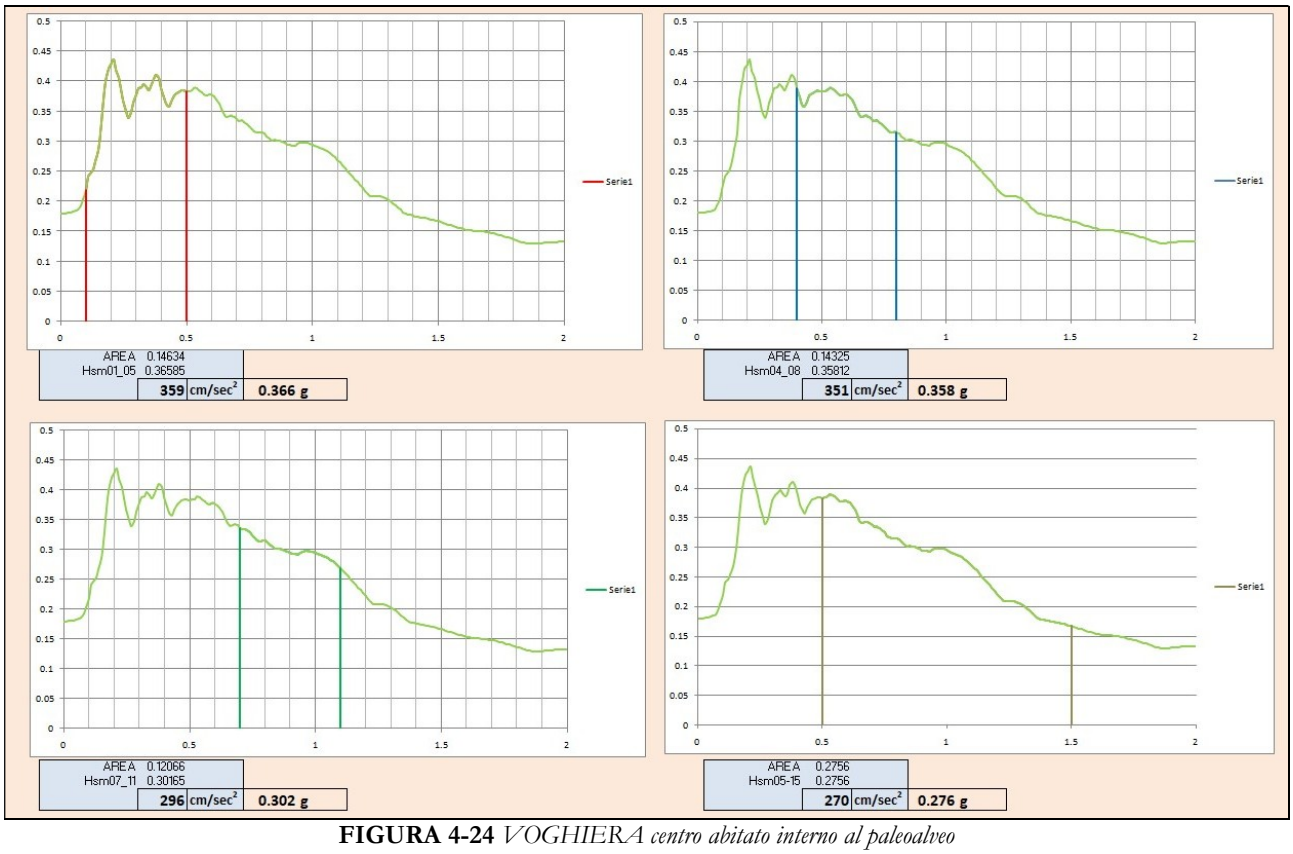


FIGURA 4-24 *VOGHIERA centro abitato interno al paleoalveo*

VOGHIERA centro abitato esterno al paleoalveo (scuole elementari)

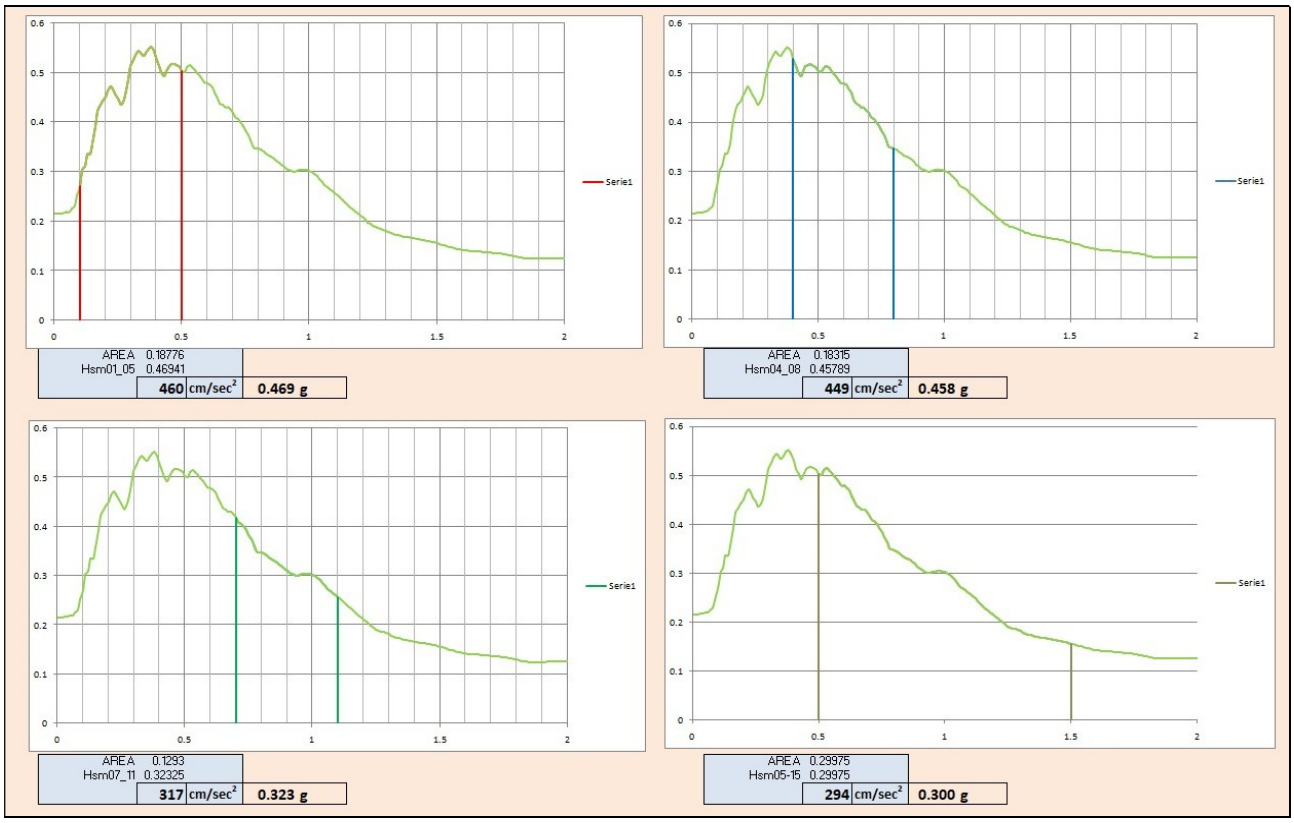


FIGURA 4-25 *VOGHIERA centro abitato esterno al paleoalveo (scuole elementari)*

MONTESANTO centro abitato esterno al paleoalveo (campo sportivo)

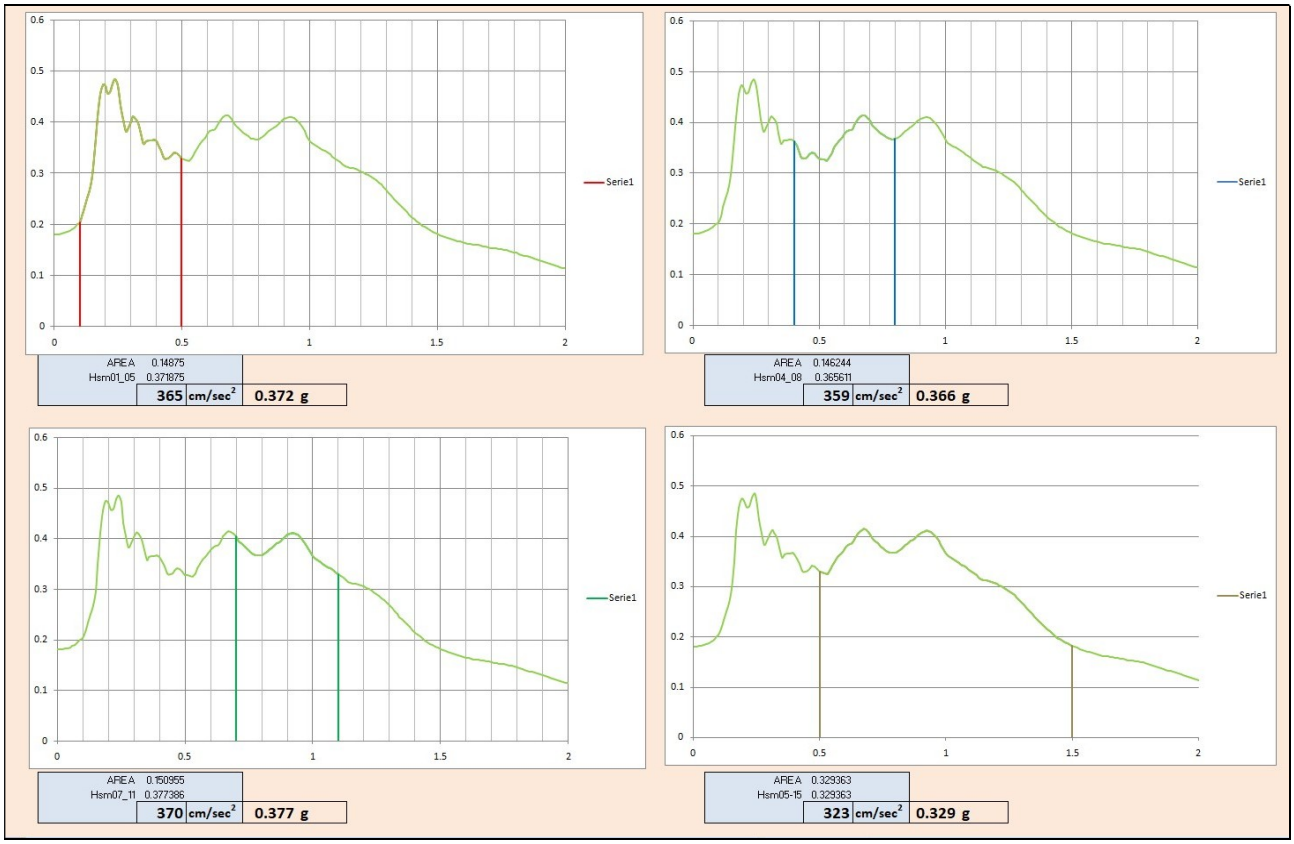


FIGURA 4-26 *Montesanto centro abitato esterno al paleoalveo (campo sportivo)*

I risultati sono riassunti nella seguente tabella di sintesi:

	ΔT (sec)	Ducentola	Zona produttiva Gualdo Ducentola	Gualdo	Voghenza esterno paleoalveo Teatro	Voghenza paleoalveo Villa Massari	Voghiera esterno paleoalveo Scuole Medie	Voghiera paleoalveo Belriguardo fronte	Montesanto
FA SA1	0.1-0.5	0,97	1,45	1,38	1,08	1,30	1,44	1,12	1,10
FA SA2	0.4-0.8	1,65	2,59	2,21	2,00	2,16	2,42	1,91	1,91
FA SA3	0.7-1.1	2,59	3,40	2,91	2,80	2,59	2,71	2,57	3,05
FA SA4	0.5-1.5	2,36	3,05	2,68	2,58	2,40	2,55	2,35	2,67
PGA/PGAo		1,10	1,48	1,45	1,22	1,36	1,46	1,21	1,17
SI1	0.1-0.5	0,91	1,36	1,33	0,98	1,28	1,40	1,04	1,02
SI2	0.5-1.0	1,77	2,80	2,36	2,10	2,24	2,46	2,04	2,24
SI3	0.5-1.5	2,14	2,85	2,51	2,36	2,28	2,42	2,19	2,53
Hsm	0.1-0.5	311 cm/sec^2	444 cm/sec2	449 cm/sec2	347 cm/sec2	418 cm/sec2	460 cm/sec2	359 cm/sec2	365 cm/sec2
Hsm	0.4-0.8	303 cm/sec2	455 cm/sec2	407 cm/sec2	364 cm/sec2	407 cm/sec2	449 cm/sec2	351 cm/sec2	359 cm/sec2
Hsm	0.7-1.1	287 cm/sec2	381 cm/sec2	326 cm/sec2	313 cm/sec2	303 cm/sec2	317 cm/sec2	296 cm/sec2	370 cm/sec2
Hsm	0.5-1.5	268 cm/sec2	339 cm/sec2	305 cm/sec2	292 cm/sec2	280 cm/sec2	294 cm/sec2	270 cm/sec2	323 cm/sec2

	ΔT (sec)	Ducentola	Zona produttiva Gualdo Ducentola	Gualdo	Voghenza esterno paleoalveo Teatro	Voghenza paleoalveo Villa Massari	Voghiera esterno paleoalveo Scuole Medie	Voghiera paleoalveo Belriguardo fronte	Montesanto
Hsm	0.1-0.5	0.317g	0.452g	0.458g	0.354g	0.426g	0.469g	0.366g	0.372g
Hsm	0.4-0.8	0.309g	0.463g	0.415g	0.371g	0.414g	0.458g	0.358g	0.366g
Hsm	0.7-1.1	0.293g	0.389g	0.33g	0.319g	0.309g	0.323g	0.302g	0.377g
Hsm	0.5-1.5	0.273g	0.345g	0.310g	0.298g	0.285g	0.300g	0.276g	0.329g

Tabella 4-1 – *Tabella riassuntiva dei risultati del calcolo dei diversi fattori di amplificazione e della distribuzione dei valori di HSM per i diversi intervalli di periodo previsti dalla normativa*

5. CARTE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

Attraverso le analisi di risposta sismica locale RSL eseguite per le varie località, vengono forniti gli spettri di risposta sismica riferiti a tali aree, per un periodo di ritorno di 475 anni con smorzamento pari al 5% ed è stato possibile realizzare le carte di amplificazione in termini di F_{PGA}, $FH_{0,1-0,5s}$, $FH_{0,5-1,0s}$, $FH_{0,5-1,5s}$, $FA_{0,1-0,5s}$, $FA_{0,4-0,8s}$, $FA_{0,7-1,1s}$ e $FA_{0,5-1,5s}$, e le mappe di scuotimento atteso in termini di $Hsm_{0,1-0,5s}$, $Hsm_{0,4-0,8s}$, $Hsm_{0.7-1,1s}$ e $Hsm_{0,5-1,5s}$.

In queste carte vengono quantificati i fattori di amplificazione sismica che quel territorio provoca al moto sismico, per via della sua condizioni stratigrafica.

Dove sussistono le condizioni per cui si possano avere effetti di sito (presenza dei fattori predisponenti), non necessariamente si possono verificare effetti connessi al rischio sismico, se non ci sono eventi sismici di intensità sufficiente (presenza dei fattori scatenanti). Per questo è importante in questi territori a bassa sismicità comprendere comunque gli effetti di amplificazione sismica, per stabilire se possono o meno indurre fenomeni di instabilità. Queste carte sono fondamentali negli studi di Microzonazione sismica.

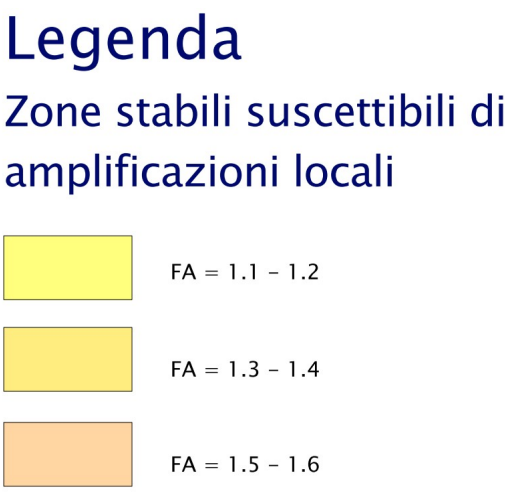
5.1. CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE IN TERMINI DI P.G.A.

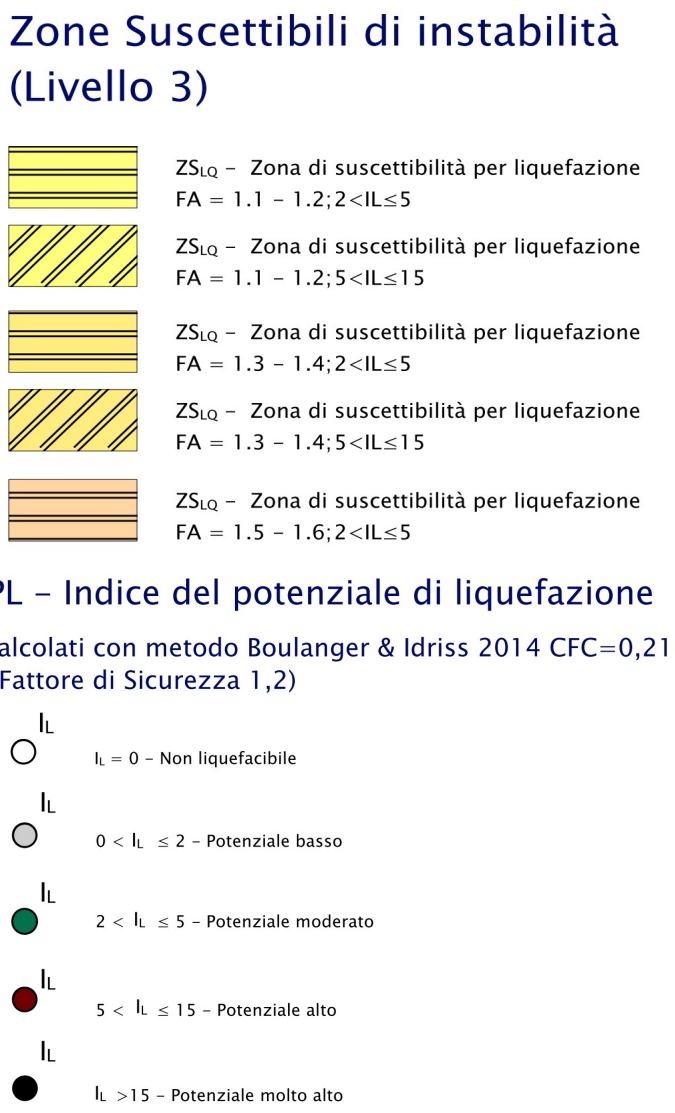
Si riporta in **Tabella 5.1** la sintesi dei risultati ottenuti attraverso lo studio di risposta sismica locale RSL per ogni località del comune, per i fattori di amplificazione P.G.A..

FA	ΔT (sec)	Ducentola	Zona produttiva Gualdo	Gualdo	Voghenza esterno paleoalveo Teatro	Voghenza paleoalveo Villa Massari	Voghiera esterno paleoalveo Scuole	Voghiera paleoalveo Belriguardo fronte	Montesanto
PGA		1,10	1,48	1,45	1,22	1,36	1,46	1,21	1,17
SA1	0.1-0.5	0,97	1,45	1,38	1,08	1,30	1,44	1,12	1,10
SA2	0.4-0.8	1,65	2,59	2,21	2,00	2,16	2,42	1,91	1,91
SA3	0.7-1.1	2,59	3,40	2,91	2,80	2,59	2,71	2,57	3,05
SA4	0.5-1.5	2,36	3,05	2,68	2,58	2,40	2,55	2,35	2,67
SI1	0.1-0.5	0,91	1,36	1,33	0,98	1,28	1,40	1,04	1,02
SI2	0.5-1.0	1,77	2,80	2,36	2,10	2,24	2,46	2,04	2,24
SI3	0.5-1.5	2,14	2,85	2,51	2,36	2,28	2,42	2,19	2,53

Tabella 5-1

Si riporta la legenda delle carte dei fattori di amplificazione in termini di P.G.A..





5.2. CARTE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE IN TERMINI DI S.A.

Si riporta in **Tabella 5.2** la sintesi dei risultati ottenuti attraverso lo studio di risposta sismica locale RSL per ogni località del comune, per i fattori di amplificazione S.A..

FA	ΔT (sec)	Ducentola	Zona produttiva Gualdo	Gualdo	Voghenza esterno paleoalveo Teatro	Voghenza paleoalveo Villa Massari	Voghiera esterno paleoalveo Scuole	Voghiera paleoalveo Belriguardo fronte	Montesanto
PGA		1,10	1,48	1,45	1,22	1,36	1,46	1,21	1,17
SA1	0.1-0.5	0,97	1,45	1,38	1,08	1,30	1,44	1,12	1,10
SA2	0.4-0.8	1,65	2,59	2,21	2,00	2,16	2,42	1,91	1,91
SA3	0.7-1.1	2,59	3,40	2,91	2,80	2,59	2,71	2,57	3,05
SA4	0.5-1.5	2,36	3,05	2,68	2,58	2,40	2,55	2,35	2,67
SI1	0.1-0.5	0,91	1,36	1,33	0,98	1,28	1,40	1,04	1,02
SI2	0.5-1.0	1,77	2,80	2,36	2,10	2,24	2,46	2,04	2,24
SI3	0.5-1.5	2,14	2,85	2,51	2,36	2,28	2,42	2,19	2,53

Tabella 5-2

Si riporta la legenda delle carte dei fattori di amplificazione in termini di S.A..

Legenda

Zone stabili

FA ≤1

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

FA = 1.1 – 1.2

FA = 1.3 – 1.4

FA = 1.5 – 1.6

Zone Suscettibili di instabilità (Livello 3)

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.1 – 1.2;2<IL≤5

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.1 – 1.2;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.3 – 1.4;2<IL≤5

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.3 – 1.4;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.5 – 1.6;2<IL≤5

FA SA1

Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

FA = 1.7 –1.8

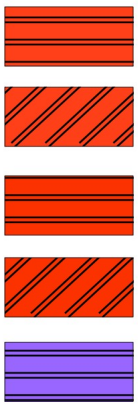
FA = 1.9 – 2.0

FA = 2.1 – 2.2

FA = 2.3 – 2.4

FA = 2.5 – 3.0

Zone Suscettibili di instabilità (Livello 3)



ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.9 – 2.0;2<IL≤5

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.9 – 2.0;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.1 – 2.2;2<IL≤5

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.1 – 2.2;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.5 – 3.0;2<IL≤5

FA SA2

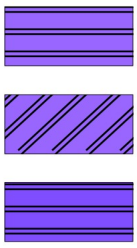
Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

FA = 2.5 – 3.0

FA = 3.1 – 3.5

Zone Suscettibili di instabilità (Livello 3)



ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.5 – 3.0;2<IL≤5

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.5 – 3.0;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 3.1 – 3.5;2<IL≤5

FA SA3

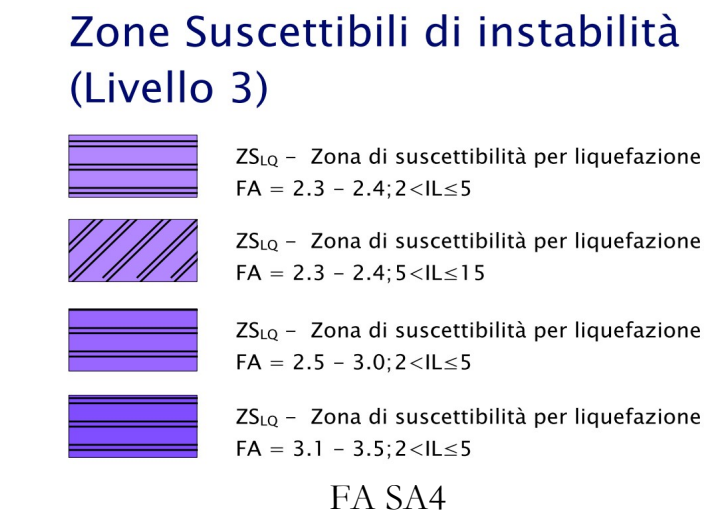
Legenda

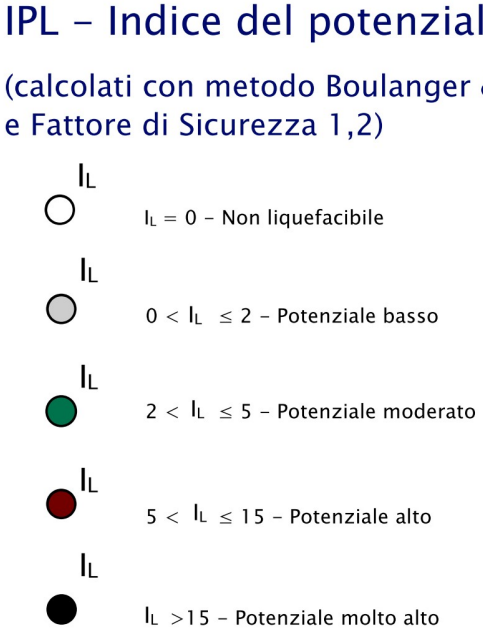
Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

FA = 2.3 – 2.4

FA = 2.5 – 3.0

FA = 3.1 – 3.5





5.3. CARTE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE IN TERMINI DI S.I.

Si riporta in **Tabella 5.3** la sintesi dei risultati ottenuti attraverso lo studio di risposta sismica locale RSL per ogni località del comune, per i fattori di amplificazione S.I..

FA	ΔT (sec)	Ducentola	Zona produttiva Gualdo	Gualdo	Voghenza esterno paleoalveo Teatro	Voghenza paleoalveo Villa Massari	Voghiera esterno paleoalveo Scuole	Voghiera paleoalveo Belriguardo fronte	Montesanto
PGA		1,10	1,48	1,45	1,22	1,36	1,46	1,21	1,17
SA1	0.1-0.5	0,97	1,45	1,38	1,08	1,30	1,44	1,12	1,10
SA2	0.4-0.8	1,65	2,59	2,21	2,00	2,16	2,42	1,91	1,91
SA3	0.7-1.1	2,59	3,40	2,91	2,80	2,59	2,71	2,57	3,05
SA4	0.5-1.5	2,36	3,05	2,68	2,58	2,40	2,55	2,35	2,67
SI1	0.1-0.5	0,91	1,36	1,33	0,98	1,28	1,40	1,04	1,02
SI2	0.5-1.0	1,77	2,80	2,36	2,10	2,24	2,46	2,04	2,24
SI3	0.5-1.5	2,14	2,85	2,51	2,36	2,28	2,42	2,19	2,53

Tabella 5-3

Si riporta la legenda delle carte dei fattori di amplificazione in termini di S.I..

Legenda

Zone stabili



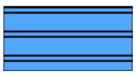
FA ≤1

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

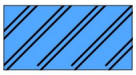


FA = 1.3 –1.4

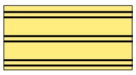
Zone Suscettibili di instabilità (Livello 3)



ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA ≤ 1; 2<IL≤5



ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA ≤ 1; 5<IL≤15



ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.3 – 1.4;2<IL≤5



ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.3 – 1.4;5<IL≤15

FA SI1

Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali



FA = 1.7 –1.8



FA = 1.9 – 2.0



FA = 2.1 – 2.2

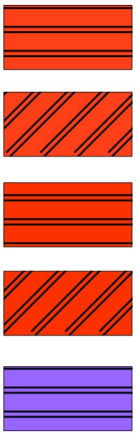


FA = 2.3 – 2.4



FA = 2.5 – 3.0

Zone Suscettibili di instabilità (Livello 3)



ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.9– 2.0; 2<IL≤5

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 1.9 – 2.0;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.1 – 2.2;2<IL≤5

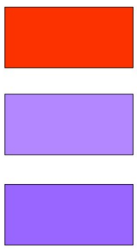
ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.1 – 2.2;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.5 – 3.0;2<IL≤5

FA SI2

Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

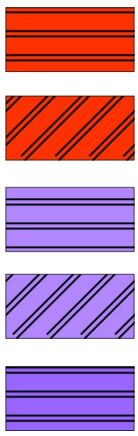


FA = 2.1 – 2.2

FA = 2.3 – 2.4

FA = 2.5 – 3.0

Zone Suscettibili di instabilità (Livello 3)



ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.1 – 2.2;2<IL≤5

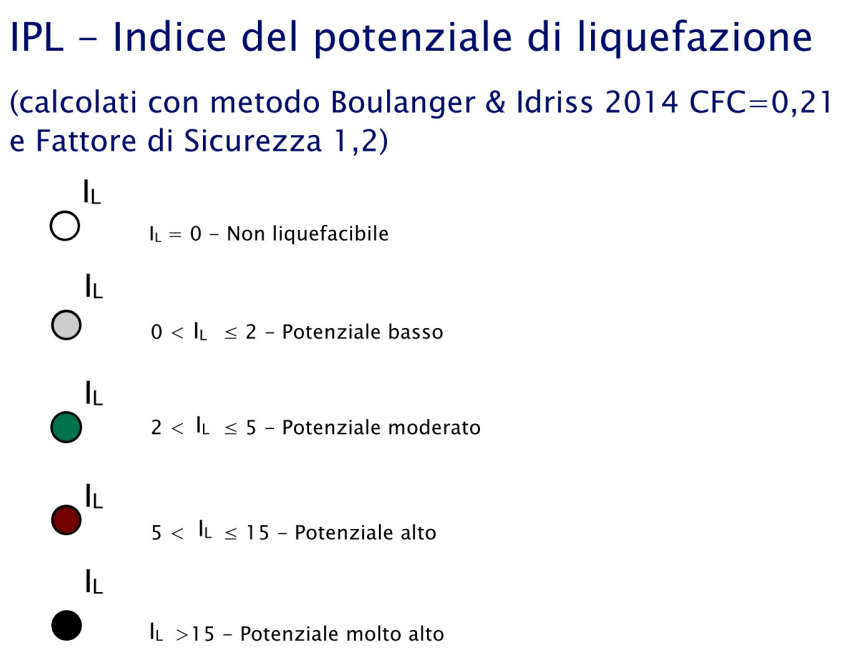
ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.1 – 2.2;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.3 – 2.4;2<IL≤5

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.3 – 2.4;5<IL≤15

ZS_{LQ} – Zona di suscettibilità per liquefazione
FA = 2.5 – 3.0;2<IL≤5

FA SI3



5.4. CARTE DELLA DISTRIBUZIONE SUL TERRITORIO DEI VALORI DI HSM

Le mappe di microzonazione sismica rappresentano il rischio sismico locale attraverso fattori di amplificazione, vale a dire valori relativi, e le mappe di rischio sismico di riferimento non considerano gli effetti locali che possono derivare da condizioni geologiche e morfologiche locali. Per l'implementazione di politiche per ridurre il rischio sismico, le autorità responsabili della gestione del territorio hanno bisogno di mappe realistiche di pericolosità sismica comparabili su scala nazionale. Grazie ai dati disponibili sulla geologia e al rischio sismico e alle procedure indicate dalle linee guida regionali e nazionali, è possibile produrre, in modo rapido ed economico, mappe del rischio sismico del sito su qualsiasi scala. L'uso del parametro H_{SM} per questa mappatura consente di considerare sia il rischio sismico di riferimento sia gli effetti locali e rende i risultati finali comparabili su scala nazionale; pertanto, consente una classificazione realistica del pericolo sismico applicabile a tutte le scale.

In **FIGURA 5.1** si riporta lo schema per la mappatura del rischio sismico del sito secondo le linee guida italiane per la microzonazione sismica (SM Working Gruppo, 2015; CTMS, 2017c), adottato nella Deliberazione della Giunta Regionale 12 aprile 2021, N. 476.

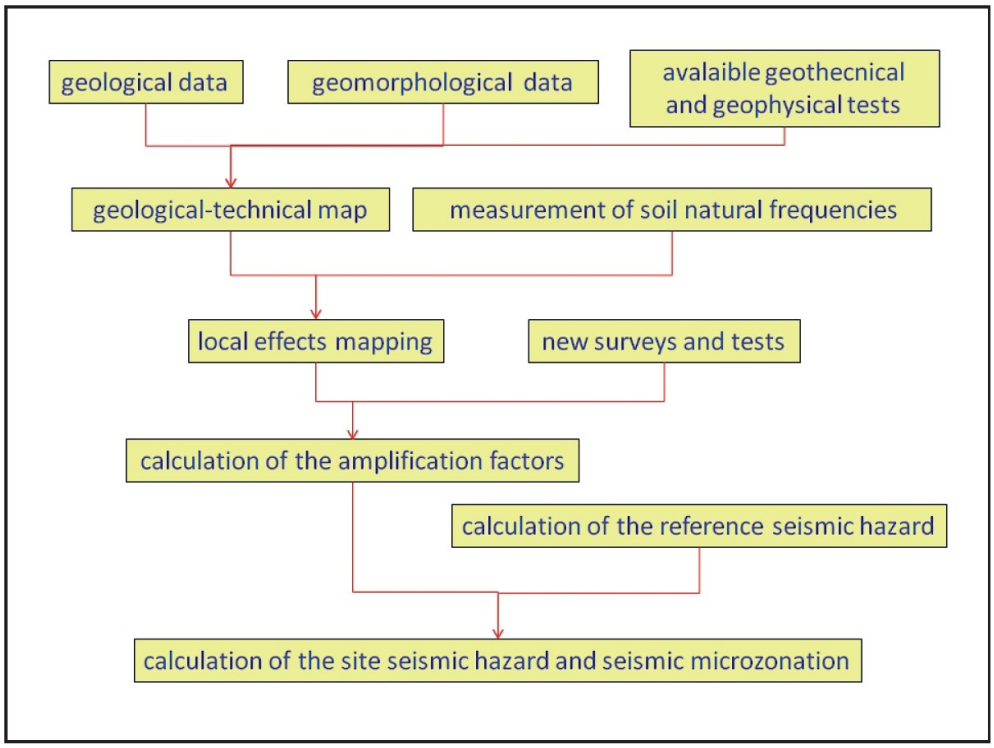


FIGURA 5-1 - *Schema per la mappatura del rischio sismico del sito secondo le linee guida italiane per la microzonazione sismica (SM Working Gruppo, 2015; CTMS, 2017c)*

Con l'introduzione del parametro H_{SM} si è scelto di sviluppare mappe che tenessero in conto del rischio sismico derivato dalla interazione tra il moto sismico e la presenza di edifici con determinati modo di vibrare. L'intervallo compreso tra 0,1sec e 0,5sec risulta essere il più significativo possibile per la realtà edilizia della Regione Emilia Romagna (**FIGURA 5.2**), ma la norma prevede che nel III livello di approfondimento il parametro di H_{SM} venga calcolato anche per l'intervallo di periodo 0,4sec-0,8 sec, 0,7sec-1,1sec e 0,5sec-1,5sec.

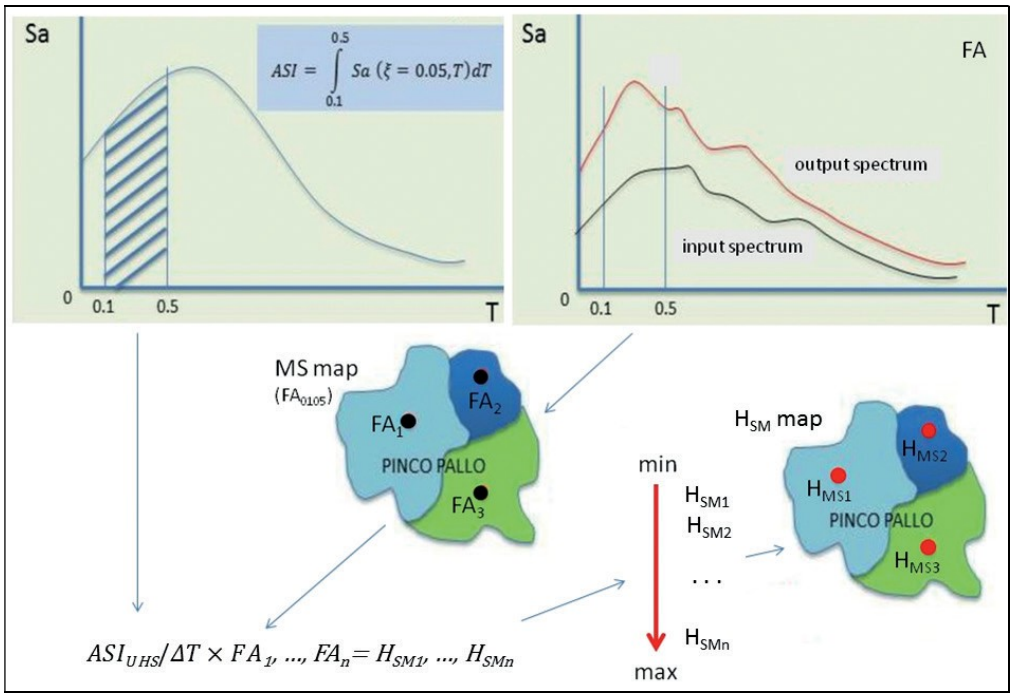


FIGURA 5-2 - *Schema per il calcolo del parametro HSM e mappatura HSM*

Non ci sono, sulla normativa regionale, delle classi di rischio in cui suddividere il territorio. Una ipotesi è stata proposta da Naso et Alii (giugno 2019):

Il parametro H_{SM} può essere discretizzato in classi in modo semiquantitativo, relativo al livello di scuotimento, il potenziale danno agli edifici e l'intensità strumentale. Le possibili soglie delle classi per i valori H_{SM} proposti da Naso et Alii (2019) possono variare da "basso-molto basso", "moderato-basso", Pericolo sismico da "moderato", "alto" a "molto alto". In **Tabella 5.4** si riporta la recente proposta di classificazione.

Table 1 - Possible thresholds for H_{SM} and others physical parameters.

seismic hazard	low-very low	moderate-low	moderate	high	very high
H_{SM} (cm/s^2)	≤ 180	180 < H_{SM} ≤ 340	340 < H_{SM} ≤ 650	650 < H_{SM} ≤ 1240	> 1240
potential damage	none - very light	very light - moderate	moderate - heavy	heavy	very heavy
instrumental intensity	≤ VI	VII	VIII	IX	≥ X

FA	ΔT (sec)	Ducentola	Zona produttiva Gualdo	Gualdo	Voghenza esterno paleoalveo Teatro	Voghenza paleoalveo Villa Massari	Voghiera esterno paleoalveo Scuole	Voghiera paleoalveo Belriguardo fronte	Montesanto
HSM (cm/sec^2)	0.1-0.5	311	444	449	347	418	460	359	365
HSM (cm/sec^2)	0.4-0.8	303	455	407	364	407	449	351	359
HSM (cm/sec^2)	0.7-1.1	287	381	326	313	303	317	296	370
HSM (cm/sec^2)	0.5-1.5	268	339	305	292	280	294	270	323

Tabella 5-4 – *Possibili soglie delle classi per i valori H_{SM} espressi in cm/sec^2.*

Nel territorio comunale di Voghiera le fasce individuate appartengono alla classe "moderato-basso" e "moderato".

Intervalli di periodo	Classificazione HSM [g]			
	Basso ($ZS4_{SM}$)	Medio ($ZS3_{SM}$)	Alto ($ZS2_{SM}$)	Molto alto ($ZS1_{SM}$)
T1 (0,1-0,5)	**≤ 0,21**	**0,22-0,54**	**0,55-0,85**	**≥0,86**
T2(0,4-0,8)	**≤ 0,14**	**0,15-0,34**	**0,35-0,55**	**≥0,56**
T3(0,7-1,1)	**≤ 0,09**	**0,10-0,22**	**0,23-0,35**	**≥0,36**
T4(0,5-1,5)	**≤ 0,09**	**0,10-0,22**	**0,23-0,35**	**≥0,36**

FA	ΔT (sec)	Ducentola	Zona produttiva Gualdo	Gualdo	Voghenza esterno paleoalveo Teatro	Voghenza paleoalveo Villa Massari	Voghiera esterno paleoalveo Scuole	Voghiera paleoalveo Belriguardo fronte	Montesanto
HSM (g)	0.1-0.5	0,32	0,45	0,46	0,35	0,43	0,47	0,37	0,37
HSM (g)	0.4-0.8	0,31	0,46	0,41	0,37	0,41	0,46	0,36	0,37
HSM (g)	0.7-1.1	0,29	0,39	0,33	0,32	0,31	0,32	0,30	0,38
HSM (g)	0.5-1.5	0,27	0,35	0,31	0,30	0,29	0,30	0,28	0,33

Tabella 5-5 – *Classificazione di H_{SM} (g) per i 4 intervalli di periodo*

Secondo quest'altra classificazione, il comune di Voghiera presenta rischio "Medio" per i bassi periodi (tra 0,1 e 0,5 sec, che sono di gran lunga quelli più diffusi, viste le caratteristiche delle costruzioni tipiche con altezza di uno o due piani); con la crescita dell'intervallo di periodo analizzato, aumenta il rischio, che è generalmente "Alto", tranne rari casi in cui per periodi compresi tra 0,7-1,1 secondi si ricade nella fascia di rischio "Molto Alto".

In **FIGURA 5.3** si riporta la legenda della carta H_{SM} per tutti gli intervalli di periodo, dove è possibile notare una gradazione di colori differenti per ogni intervallo espresso in g, forniti dalla Regione Emilia Romagna. Nella stessa carta vengono indicati i valori puntuali di HSM calcolati attraverso analisi di risposta sismica locale R.S.L. per ogni ambito.

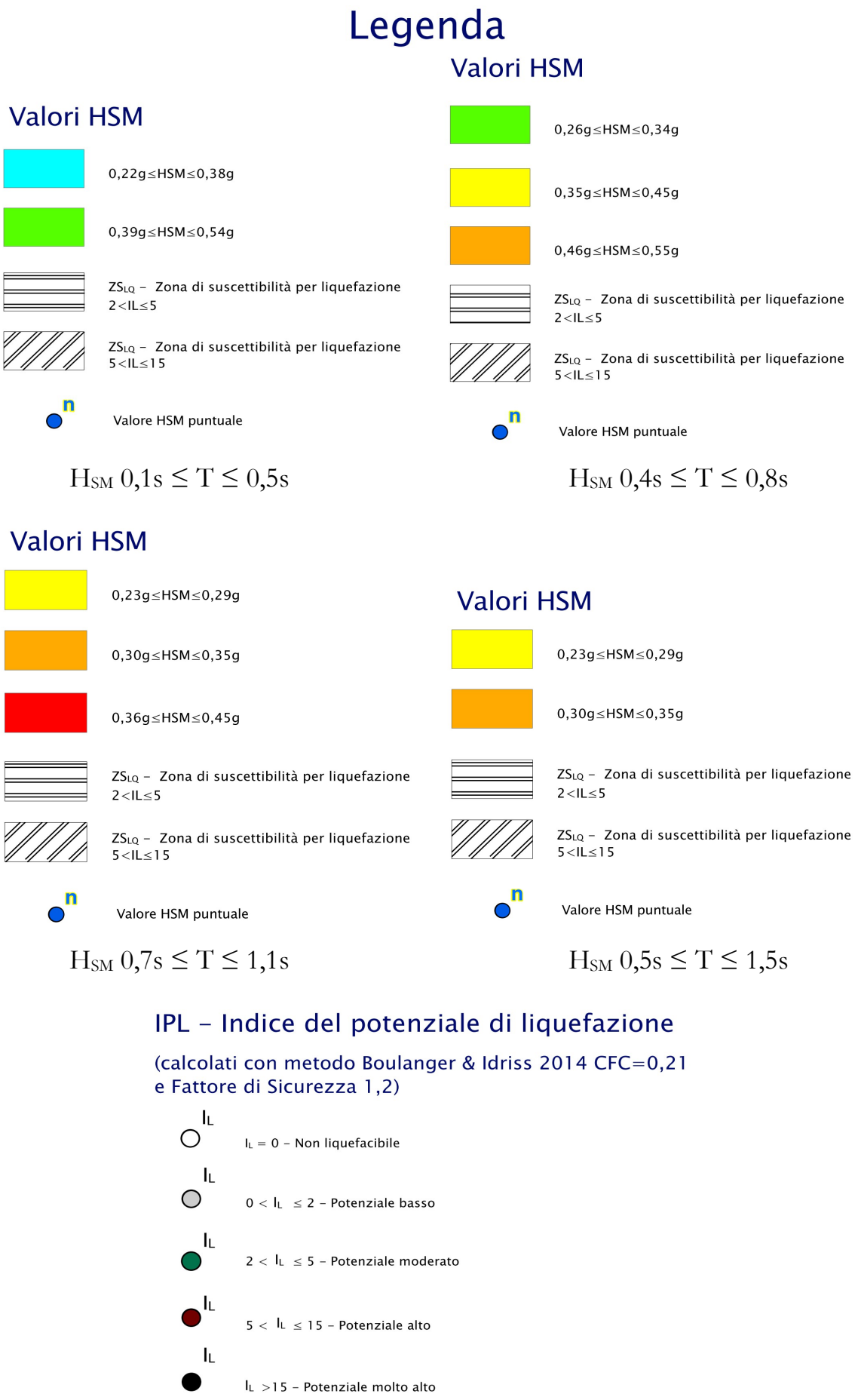


FIGURA 5-3 – *Legenda della mappa di distribuzione dei valori di Hsm per i 4 intervalli di periodo*

6. ANALISI DELLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE E CALCOLO INDICE DI LIQUEFAZIONE

Durante gli studi precedenti era stata evidenziata nel primo livello di approfondimento la presenza dei caratteri predisponenti la liquefazione delle sabbie, in quanto era stato mappato su tutto il territorio il perimetro ove erano presenti le sabbie sciolte oloceniche sature di acqua di falda, presenti nei primi 20m di spessore. Erano sostanzialmente le sabbie limose di battigia che hanno segnato l'avanzamento dei depositi deltizi dei rami di foce del fiume Po, a costruire le nuove linee di costa durante le fase trasgressive postflandriane. Quindi era stata dimostrata la diffusa presenza di depositi potenzialmente liquefacibili di sabbie limose.

Nel secondo livello di approfondimento era emerso che tutta l'area comunale era soggetta ad amplificazione sismica stratigrafica, e si era fatto ricorso agli abachi regionali per determinare i vari fattori di amplificazione attesi. Anche in questo caso si confermava la necessità di proporre delle MOPS in cui vi erano i retini dell'instabilità per la potenziale liquefazione dei depositi sabbioso limosi.

Si rimandava dunque al terzo livello di approfondimento il compito di valutare numericamente e analiticamente quanto potesse essere effettivamente pericolosa la potenziale liquefazione dei depositi sabbiosi, facendo ricorso ad una più attenta definizione dei fattori di amplificazione da determinare mediante analisi di risposta sismica locale. Una volta definite le azioni sismiche, ovvero le cause scatenanti, si è proceduto a valutare le resistenze dei depositi sabbiosi presenti nel territorio comunale di Voghiera, alle sollecitazioni di taglio cicliche indotte dal terremoto di progetto, convenzionalmente scelto per un tempo di ritorno di 475 anni.

Quello che ne è emerso è che le cause scatenanti la liquefazione delle sabbie, e dunque la potenziale instabilità del sito, può talvolta verificarsi, in quanto le energie sismiche attese in superficie per tempo di ritorno di 475 anni, possono essere sufficienti ad innescare liquefazione.

Di seguito verrà descritto il metodo analitico utilizzato per verificare la liquefazione delle sabbie ed i riferimenti normativi a cui si è attenuti.

6.1. METODO DI ANALISI

Per verificare la possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione vanno impiegate le procedure che nell'Ingegneria Geotecnica Sismica vengono denominati 'metodi semplificati'. Tali metodi sono basati su prove geotecniche quali le CPTU (penetrometrie a punta elettrica con piezocono) e attraverso i dati ottenuti di CSR e CRR si procede poi a valutare, ad ogni quota z del deposito, compresa nei primi 20 m, il coefficiente di sicurezza rispetto alla possibilità di liquefazione:

$$F_L(z) = \frac{CRR_{M=7.5;\sigma'_v=1atm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma \qquad \text{Eq. 6-1}$$

dove:

$CRR_{M=7.5;\sigma'_v=1atm} = \frac{\tau_{ult}}{\sigma'_{v0}}$ è il rapporto di resistenza ciclica, ovvero la resistenza normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale σ'_{v0}, per terremoto di magnitudo M = 7.5 e pressione efficace di riferimento σ'_v = 1atm;

MSF è il fattore di scala della magnitudo che è funzione, oltre che dal valore della magnitudo dell'azione sismica di riferimento, anche del metodo di stima di CRR;

K_σ è il fattore di correzione che tiene conto della pressione efficace alla profondità a cui la resistenza viene valutata;

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max\,s}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d \qquad \textbf{Eq. 6-2}$$

è il rapporto di tensione ciclica, ovvero la tensione di taglio ciclica media indotta dall'azione sismica di riferimento, normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale σ'_{v0}, ove $a_{max\ s}$ è il picco di accelerazione al piano campagna, g è l'accelerazione di gravità, σ_{v0} e σ'_{v0} sono le tensioni verticali rispettivamente totale e efficace alla profondità considerata, ed r_d è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica per effetto della deformabilità del terreno che può essere stimato con relazioni empiriche associate ai diversi metodi di stima di CRR (e di MSF). Il valore della tensione tangenziale media $\tau_{media} = 0.65\ \tau_{max}$ al variare della profondità può essere più precisamente determinato con analisi di risposta sismica locale.

Tra i metodi semplificati basati sui risultati di prove CPTe/CPTu è particolarmente raccomandato dalle delibere regionali il recente metodo di *Boulanger e Idriss, 2014*.

Lo scrivente tende a non utilizzarlo nella pratica professionale, poiché, oltre ad utilizzare le prove penetrometriche statiche a punta elettrica e piezocono, esso necessiterebbe di analisi dettagliate sulla granulometrie dei depositi sabbiosi incontrati. Il metodo infatti necessita della determinazione di un fattore di correzione per il contenuto in fine C_{FC}, senza il quale si fanno valutazioni che possono apparire fin troppo cautelative.

Si riporta di seguito lo stralcio della Deliberazione della Giunta Regionale 12 aprile 2021, N. 476, con la sequenza logica del calcolo (**FIGURA 6.1**, **6.2**, **6.3**).

A2.2 Metodo basato sui risultati di prove CPTe/CPTu (Boulanger e Idriss, 2014)

Tutti i metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione che utilizzano i risultati di prove penetrometriche statiche sono calibrati sull'apparecchiatura a punta elettrica (CPTe/CPTu).
L'uso di tali metodi con i risultati di prove CPT a punta meccanica può condurre ad una sovrastima della resistenza CRR e quindi del fattore di sicurezza.

1. $q_{c1N} = C_N \cdot \frac{q_c}{p_a}$

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}}\right)^m \leq 1.7$$

$$m = 1.338 - 0.249 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264} \quad \text{con } 21 \leq q_{c1Ncs} \leq 254$$

(q_{c1Ncs} è definito al punto 2 e m è determinato per via iterativa; p_a è la pressione atmosferica)

2. $q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \cdot \exp\left[1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right]$$

FC è il contenuto di fine espresso in %. In assenza di dati specifici per il sito, FC può essere stimato con l'espressione empirica[2]:

$FC = 80\ I_c - 137$

in cui I_c è l'indice di classificazione del terreno da prova CPT proposto da Robertson (1990):

$$I_c = \sqrt{(\log F + 1.22)^2 + (\log Q_n - 3.47)^2}$$

con

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \cdot 100$$

$$Q_n = \left(\frac{q_c - \sigma_{v0}}{p_a}\right) \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}}\right)^m$$

3. $CRR = exp\left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.80\right]$

4. $MSF = 1 + (MSF\left[8.64 exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325\right]_{max}$

$MSF\left(\frac{q_{c1Ncs}}{180}\right)^3{}_{max}$

[2] L'espressione deriva dalla seguente correlazione tra I_c e FC proposta da Boulanger e Idriss (2014):
$Ic = [(FC+137)/80]-C_{FC}$ dove $(-C_{FC})$ è l'errore che, per il set di dati utilizzato dagli Autori, presenta media nulla e deviazione standard 0.29.
Qualora si disponga di dati specifici per il sito, il parametro C_{FC} può essere appositamente calibrato mantenendo la stessa forma funzionale (lineare) della suddetta correlazione, o forme funzionali differenti.
In mancanza di dati specifici per il sito, è lecito invece determinare FC dalla curva di regressione media ottenuta da Boulanger e Idriss (2014), ovvero assumere nella suddetta correlazione C_{FC}=0.

FIGURA 6-1

$$5.\ K_\sigma = 1 - C_\sigma \cdot ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.0$$

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3$$

$$6.\ CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

$$r_d = exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot sen\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot sen\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

$$7.\ F_L = \frac{CRR_{M=7.5;\sigma'v=1atm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

Nelle equazioni precedenti M è la magnitudo momento del terremoto di riferimento.

La curva CRR – q_{c1Ncs} è mostrata in Figura 2b.

FIGURA 6-2

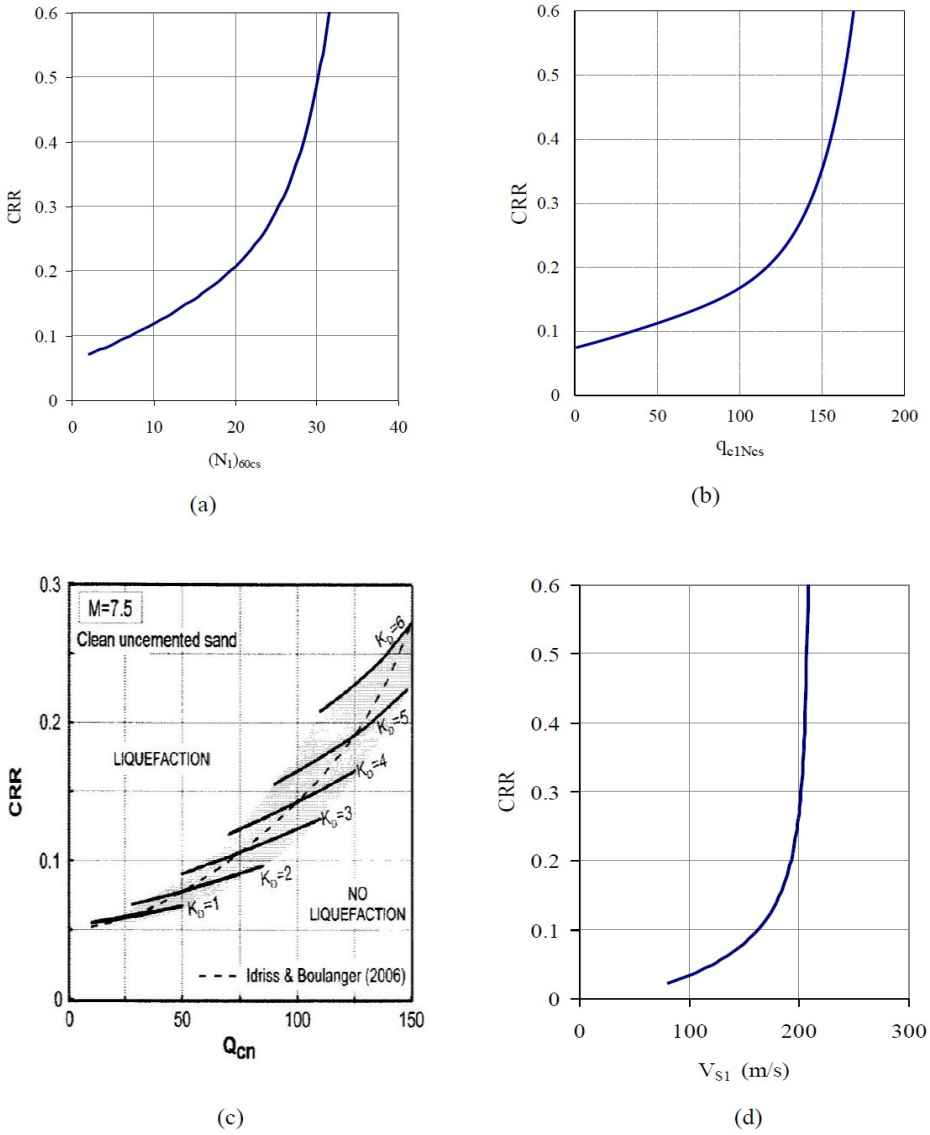


Figura 2 – Carte per la stima della resistenza normalizzata alla liquefazione CRR di un terreno sabbioso saturo sulla base dai risultati di prove SPT (a), CPTe (b), DMT (c) (Marchetti, 2015) e da profili di V_S (d)

FIGURA 6-3

L'indice del potenziale di liquefazione, I_L, è definito dalla seguente relazione (**FIGURA 6.4**):

Liquefaction Potential Index (LPI) calculation procedure

Calculation of the Liquefaction Potential Index (LPI) is used to interpret the liquefaction assessment calculations in terms of severity over depth. The calculation procedure is based on the methology developed by Iwasaki (1982) and is adopted by AFPS.

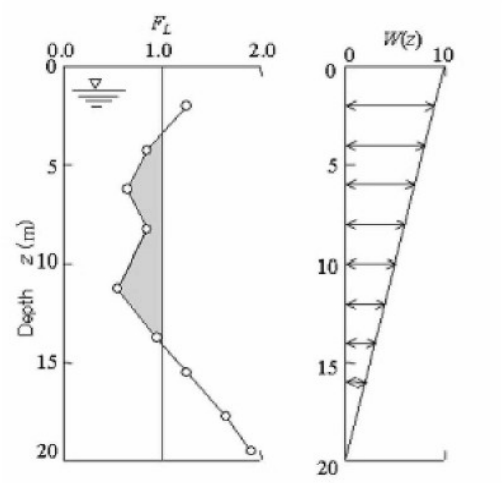
To estimate the severity of liquefaction extent at a given site, LPI is calculated based on the following equation:

$$\mathbf{LPI} = \int_0^{20} (10 - 0{,}5z) \times F_L \times dz$$

where:
F_L = 1 - F.S. when F.S. less than 1
F_L = 0 when F.S. greater than 1
z depth of measument in meters

Values of LPI range between zero (0) when no test point is characterized as liquefiable and 100 when all points are characterized as susceptible to liquefaction. Iwasaki proposed four (4) discrete categories based on the numeric value of LPI:

- LPI = 0 : Liquefaction risk is very low
- 0 < LPI <= 5 : Liquefaction risk is low
- 5 < LPI <= 15 : Liquefaction risk is high
- LPI > 15 : Liquefaction risk is very high



Graphical presentation of the LPI calculation procedure

CLiq v.3.0.3.4 - CPT Liquefaction Assessment Software

FIGURA 6-4

Mentre per Iwasaki (1982) il calcolo tiene conto degli strati ove FL<=1, con Sonmnez (2003) si tiene conto degli strati ove FL<=1,2.

Altra particolarità del metodo di Somnez è che per valori di FL compresi tra 1,20 e 0,95 la funzione variabile F(z) si discosta da quella di Iwasaki, e per Sonmez è:

$F(z) = 0$ per $F_L \geq 1.2$
$F(z) = 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot F_L)$ per $1.2 > F_L \geq 0.95$
$F(z) = 1 - F_L$ per $F_L \leq 0.95$

Il metodo di Boulanger & Idriss 2014, a rigore, andrebbe utilizzato nel modo di seguito esposto. La pubblicazione originale degli autori indica che il contenuto in fine và stimato con questa formula (**FIGURA 6.5**):

For the present study, the relationship for estimating FC was developed by first regressing I_c against FC using the combined data sets in Figure 2.10 to obtain the least-squares fit,

$$I_C = \frac{(FC + 137)}{80} + \varepsilon \qquad (2.29)$$

where ε = an error term, which was found to have a mean of 0 and a standard deviation of 0.29 and be unbiased against FC. This equation can then be inverted to provide the following form for estimating FC,

$$FC = 80(I_C + C_{FC}) - 137$$
$$0\% \leq FC \leq 100\% \qquad (2.30)$$

where C_{FC} is a fitting parameter that can be adjusted based on site-specific data when available. The sign convention for C_{FC} is set opposite to that for the error term ε in Equation 2.29 so that a positive C_{FC} corresponds to a larger estimate of FC. The regression of I_c against FC was preferred over regressing FC directly against I_c because this is a calibration or inverse regression problem (e.g., Draper and Smith 1998). This expression with C_{FC} = 0.0, -0.29, and 0.29 (i.e., +/- an amount equal to the standard deviation in the general correlation) is shown in Figure 2.11. The curves envelope approximately 2/3 of the data points, as expected. The term C_{FC} can be calibrated to site specific data by regressing I_c against FC using the equation,

$$I_C = \frac{(FC + 137)}{80} - C_{FC} \qquad (2.31)$$

FIGURA 6-5

La Deliberazione della Giunta Regionale 12 aprile 2021, N. 476 riporta la formula per la stima del contenuto in fine, in modo parziale (**FIGURA 6.6**):

FC è il contenuto di fine espresso in %. In assenza di determinazione sperimentale di laboratorio FC può essere stimato con l'espressione empirica:

$FC = 80\ I_c - 137$

in cui Ic è l'indice di classificazione del terreno da prova CPT proposto da Robertson (1990):

$$I_c = \sqrt{(\log F + 1.22)^2 + (\log Q_n - 3.47)^2}$$

FIGURA 6-6

Nelle note a fondo pagina è indicato (**FIGURA 6.7**):

[2] L'espressione deriva dalla seguente correlazione tra I_c e FC proposta da Boulanger e Idriss (2014):
Ic = [(FC+137)/80]-C_{FC} dove (-C_{FC}) è l'errore che, per il set di dati utilizzato dagli Autori, presenta media nulla e deviazione standard 0.29.
Qualora si disponga di dati specifici per il sito, il parametro C_{FC} può essere appositamente calibrato mantenendo la stessa forma funzionale (lineare) della suddetta correlazione, o forme funzionali differenti.
In mancanza di dati specifici per il sito, è lecito invece determinare FC dalla curva di regressione media ottenuta da Boulanger e Idriss (2014), ovvero assumere nella suddetta correlazione C_{FC}=0.

FIGURA 6-7

L'importanza di stimare il fattore di correzione del contenuto in fine C_{FC} sembra fondamentale per gli autori, al fine di utilizzare il loro metodo, Boulanger & Idriss 2014.

La stima del C_{FC} andrebbe fatta per ogni verticale di indagine, laddove si siano incontrate delle sabbie. Questo implementerebbe i costi degli studi, per via dei sondaggi necessarie e delle analisi granulometriche di laboratorio geotecnico.

Per questi studi di Microzonazione sismica di III livello, si è attuato il seguente comportamento, che a parere dello scrivente, è più coerente con quanto richiesto dagli autori del metodo:

A) La struttura geomorfologica del paleoalveo del fiume Padoa Eridanus è il deposito principale di sabbie, che attraversa il comune di Voghiera. Quindi si è focalizzata l'attenzione su queste sabbie.
B) Affianco alla prova SCPTU eseguita a Ducentola (**FIGURA 6.8**), nel mezzo del paleoalveo, è stato eseguito un carotaggio a coclea (quindi a secco, senza uso di acqua) per prelevare una buona porzione di sabbie (da -3,2m a -6,4m), come visibile in **FIGURA 6.9**.
C) Questo campione di sabbie è stato analizzato in laboratorio per misurare la percentuale della frazione fine, ovvero il passante al setaccio 0,075mm, che risultata essere pari a 14,1% (**FIGURA 6.10**).
D) E' stato calcolato l'indice di comportamento medio Ic dalla penetrometria CPTU, nell'intervallo -3,2m/-6,4m), che è risultato essere pari a Ic=1,67.
E) Avendo il valore di Ic, avendo il valore del contenuto di frazione fine FC da laboratorio, è possibile calcolare il fattore di correzione per il contenuto in fine, richiesto dagli autori, che nel caso in esame è risultato essere C_{FC}=0,21 (tale valore deve essere ricompreso nell'intervallo ±0,29). La formula è:

$$\mathbf{C_{FC}=[(FC_{lab}+137)/80]-I_C=[(14,1+137)/80]-1,67=0,21}$$

F) Un volta calcolato il C_{FC} per il caso delle sabbie del paleoalveo del Padoa Eridano a Ducentola, si è applicato questo valore in tutte le prove CPTU analizzate, consapevoli che non è rigoroso, ma si pensa che le stime così fatte siano meno viziate da errore (cautelativo e conservativo) rispetto al caso in cui si fosse trascurato completamente il valore del C_{FC}, assumendolo pari a 0.
G) Il software C-Liq utilizzato consente di utilizzare il metodo di Boulanger & Idriss 2014 e di inserire il valore di C_{FC} calcolato.

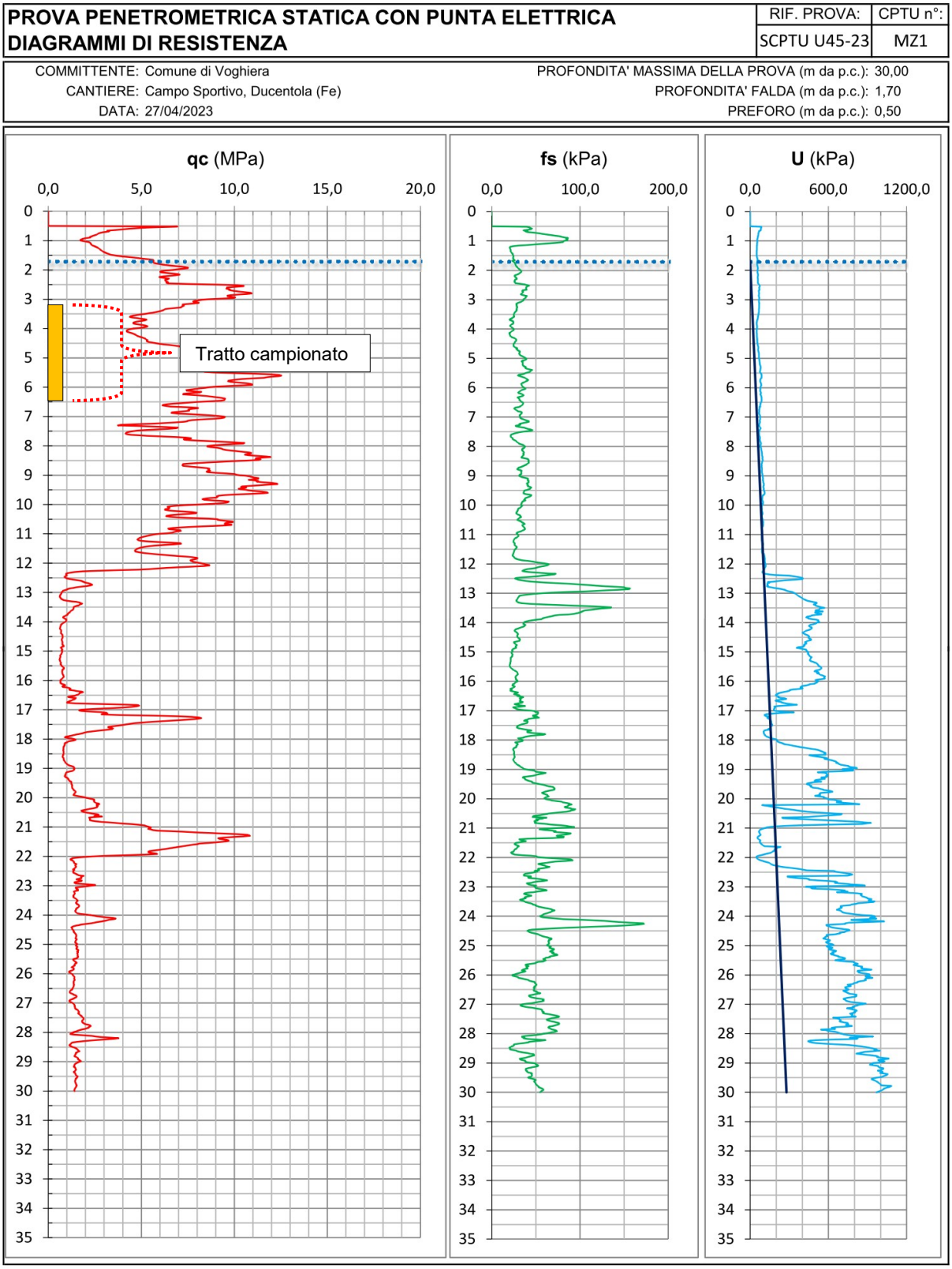


FIGURA 6-8 - *PROVA SCPTU DUCENTOLA*

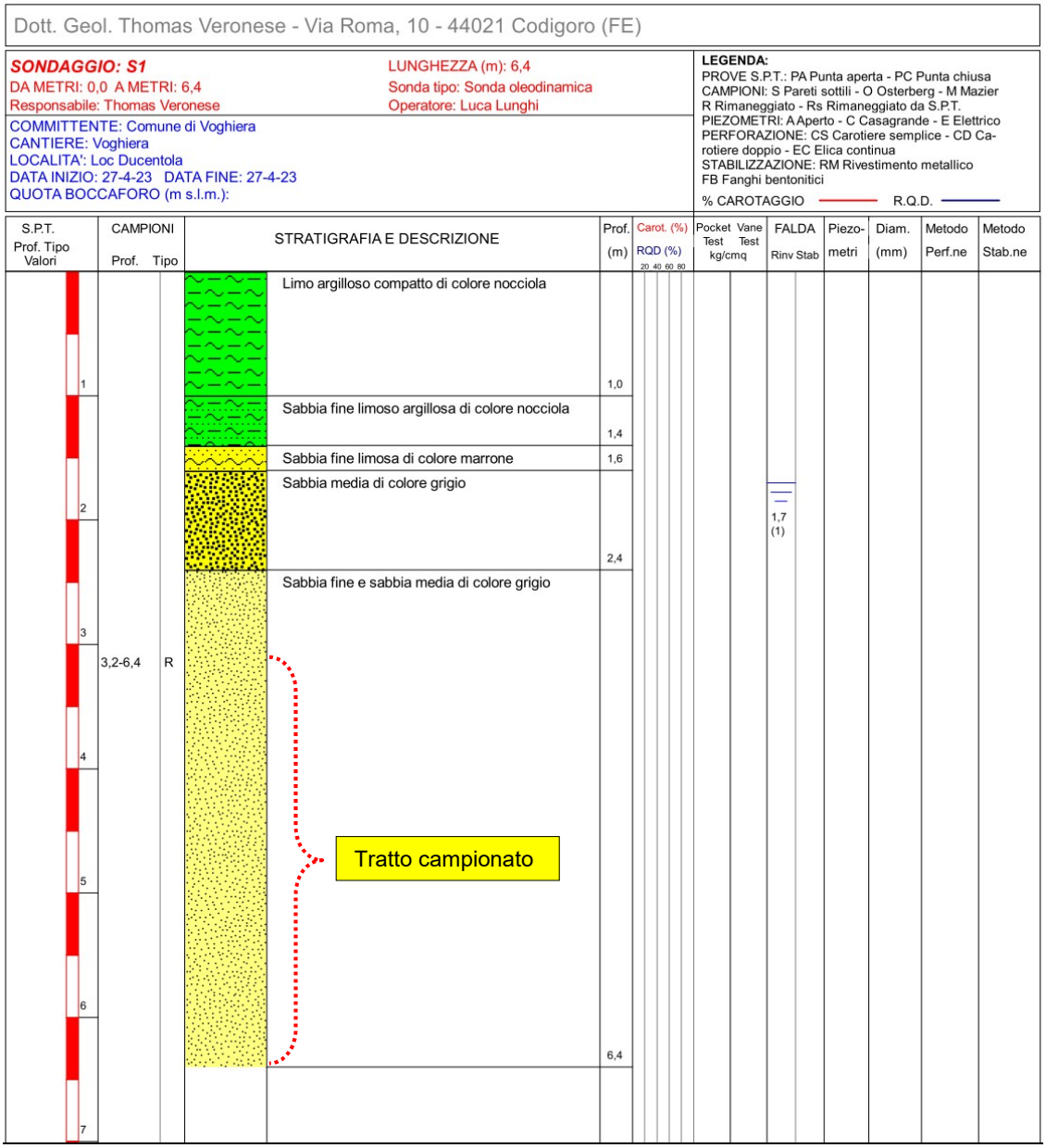


FIGURA 6-9 - *Scheda sondaggio geognostico MZ-S1 eseguito in corrispondenza di SCPTU1*

Passante effettivo setaccio 0.063 (g) in areometro		50.01
t° C	Tempo (s)	Lettura
20	30	32.0
20	60	28.0
20	120	25.0
20	300	21.0
20	600	17.5
20	1200	15.0
20	2400	12.5
20	4800	10.0
20	14400	8.0
20	86400	6.0
21	172800	5.0

Rapporti granulometrici	USCS	UNI
GHIAIA	> 4,75 mm 0.0%	> 2,00 mm 0.1%
SABBIA	> 0,075 mm 85.9%	> 0,063 mm 88.0%
LIMO	> 2 µ 12.8%	> 2 µ 10.7%
ARGILLA	< 2 µ 1.3%	< 2 µ 1.3%

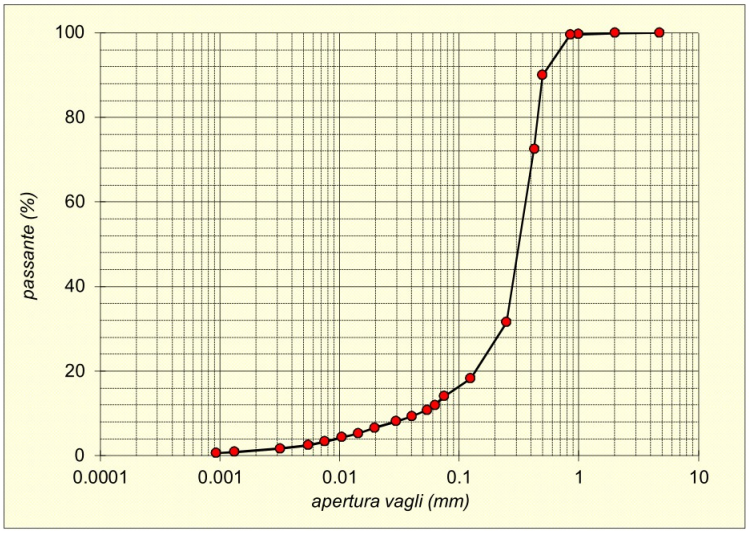


FIGURA 6-10 - *Scheda sondaggio geognostico MZ-S1 eseguito in corrispondenza di SCPTU1*

Per il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione è stato utilizzato il software di calcolo dal nome C-Liq, versione 3.5.2.22. (**FIGURA 6.11**).



FIGURA 6-11

Questo software è in grado di elaborare le prove penetrometriche statiche a punta elettrica e con i relativi dati di imput è in grado di calcolare il fattore di sicurezza alla liquefazione e tutto ciò che concerne questo rischio.

Come parametro di scuotimento si adotta l'accelerazione di picco. Con le analisi di risposta sismica locale si sono calcolati, per diversi settori del territorio comunale antropizzato, i valori del fattore di amplificazione stratigrafico F.A. per PGA/PGA_0. Generalmente si è osservato che in corrispondenza dei depositi sabbiosi, si ha un decremento del fattore di amplificazione, in quanto il modulo di taglio alle basse deformazioni G0 decade sotto effetto delle deformazioni indotte dalle sollecitazioni di taglio cicliche, e questo decadimento che porterebbe progressivamente alla liquefazione, in verità consente anche uno smorzamento significativo alla propagazione delle onde di taglio S.

La sintesi dei risultati è riportata nella **Tabella 6.1**, ove per ogni prova analizzata, sono indicati il codice di archivio nella banca dati dello scrivente, il codice di archivio attribuito nella banca dati della MZ, l'accelerazione di picco attesa in superficie, la quota della falda freatica, ed infine il valore di IPL calcolato.

				Fs=1,2
				C_{FC}=0,21
Gualdo zona art		pga	falda	IPL I&B 2014
U05-18 CPTU1	038023P222	0,21	3,00	0,08
U05-18 CPTU2	038023P223	0,21	3,00	1,54
U65-19 CPTU1	038023P246	0,21	3,50	0,42
Ducentola		pga	falda	IPL I&B 2014
U80-17 MZ2	038023P216	0,16	1,90	0,30
U55-15 CPTU1	038023P24	0,21	2,00	4,87
U53-20 CPTU1	038023P247	0,21	3,00	3,40
U45-23 MZ1 SCPTU1	038023P249	0,16	1,70	0,55
204010U503	038023P27	0,21	1,00	1,20
204020U511	038023P28	0,21	1,00	4,00
Gualdo		pga	falda	IPL I&B 2014
U76-16	038023P17	0,21	1,80	0,04
nido SCPTU	038023P12	0,21	2,10	1,29
U12-13	038023P41	0,21	1,00	1,29
U18-22 CPTU1	038023P244	0,16	2,50	2,16
U18-22 CPTU2	038023P245	0,16	2,70	0,72
204010U506	038023P29	0,16	1,00	0,14
U33-14 CPTU1 (10,60)	038023P22	0,21	2,50	1,21
U33-14 CPTU2 (10,48m)	038023P23	0,21	2,50	0,63
204010U505	038023P30	0,21	1,00	2,50
Voghenza		pga	falda	IPL I&B 2014
204010U513	038023P31	0,20	2,00	7,42
U53-14 (16m)	038023P20	0,18	1,60	3,25
U60-17	038023P43	0,18	2,90	0,44
U54-16 (13m)	038023P19	0,20	1,30	6,04
U79-13	038023P45	0,18	2,80	0,20
U80-17 MZ4	038023P218	0,18	2,10	1,86
U33-16	038023P26	0,18	1,30	0,21
U27-22	038023P240	0,18	2,00	1,44
U47-18	038023P243	0,18	2,20	0,81
U45-23 MZ4 CPTU	038023P252	0,20	1,50	0,77
U67-14	038023P18	0,18	1,10	4,23
204020U504	038023P34	0,18	2,00	0,51
U46-15	038023P21	0,18	1,10	0,42
Voghiera		pga	falda	IPL I&B 2014
204020U503	038023P32	0,18	1,00	0,47
U80-17 MZ6	038023P220	0,18	2,70	1,31
SCPTU CC songeo	038023P14	0,18	1,90	2,54
U80-17 MZ1	038023P215	0,18	1,70	5,05
U80-17 MZ5	038023P219	0,18	2,50	1,36
U80-17 MZ3	038023P217	0,18	2,50	1,01
SCPTU municipio	038023P15	0,18	2,20	0,19
SCPTU scuola elementari	038023P16	0,18	2,30	0,31
SCPTU scuola media	038023P248	0,21	2,30	1,17
U78-15	038023P44	0,21	2,80	0,65
204010U514	038023P35	0,21	1,00	2,64
U41-19	038023P237	0,18	3,00	1,52
U20-20 CPTU1	038023P235	0,18	2,70	0,51
U20-20 CPTU2	038023P236	0,21	2,70	0,53
U25-21	038023P233	0,21	1,90	0,48
U78-21	038023P238	0,21	3,20	0,47
U88-22	038023P234	0,21	3,00	0,03
U45-23 MZ2 SCPTU	038023P250	0,18	3,30	0,89
U45-23 MZ3 CPTU	038023P251	0,21	3,10	1,07
U28-23	038023P239	0,21	2,30	0,72
204010U509	038023P33	0,21	1,00	0,32
204060U501	038023P36	0,21	1,00	2,51
U126-22	038023P241	0,21	3,50	1,27
U101-21	038023P242	0,21	1,90	6,05
Montesanto		pga	falda	IPL I&B 2014
U80-17 MZ7	038023P221	0,18	2,70	0,48
204050U510	038023P39	0,18	1,00	0,97
204050U506	038023P40	0,18	1,00	0,44
204050U503	038023P37	0,18	1,00	0,32
204050U509	038023P38	0,18	1,00	0,09
U48-12	038023P25	0,18	1,00	0,00
U27-17	038023P42	0,18	1,00	0,00
U44-21	038023P232	0,18	2,60	0,53
U03-22	038023P231	0,18	3,80	0,02

Tabella 6-1 *Risultati calcolo IPL con PGA da RSL (Calcolato con la metodologia Boulanger & Idriss 2014)*

Potenziale Liquefazione I_{PL}	Classificazione
$I_{PL} = 0$	Non liquefacibile
$0 < I_{PL} \leq 2$	Basso
$2 < I_{PL} \leq 5$	Moderato
$5 < I_{PL} \leq 15$	Alto
$I_{PL} \geq 15$	Molto Alto

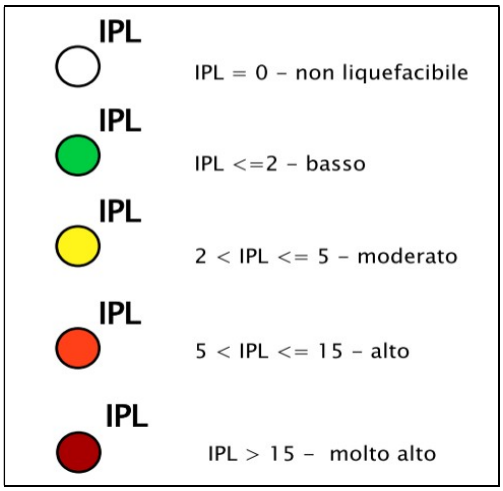


Tabella 6-2

6.2. CARTA DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Le Carte di microzonazione sismica di III Livello – Indice del potenziale di Liquefazione IPL sono calcolate utilizzando il metodo Boulanger & Idriss 2014 e vengono riprodotte in scala 1:10.000.

Le carte dell'indice del potenziale di liquefazione sono state realizzate attraverso tutte le prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU), raccolte per costituire l'archivio di questo studio (indagini bibliografiche estrapolate dall'archivio della regione Emilia Romagna, indagini realizzate dallo scrivente sia nella pratica professionale, che appositamente per gli studi di MZ, e le indagini fornite dal Comune di Voghiera allegate alle relazioni geologiche per interventi vari).

Ad ogni punto d'indagine realizzato sul territorio corrisponde un diverso colore in funzione del valore del potenziale di liquefazione stimato con il calcolo; inoltre per ogni indagine presente sul territorio comunale viene riportato il valore puntuale di I_{PL} (**FIGURA 6.12**)

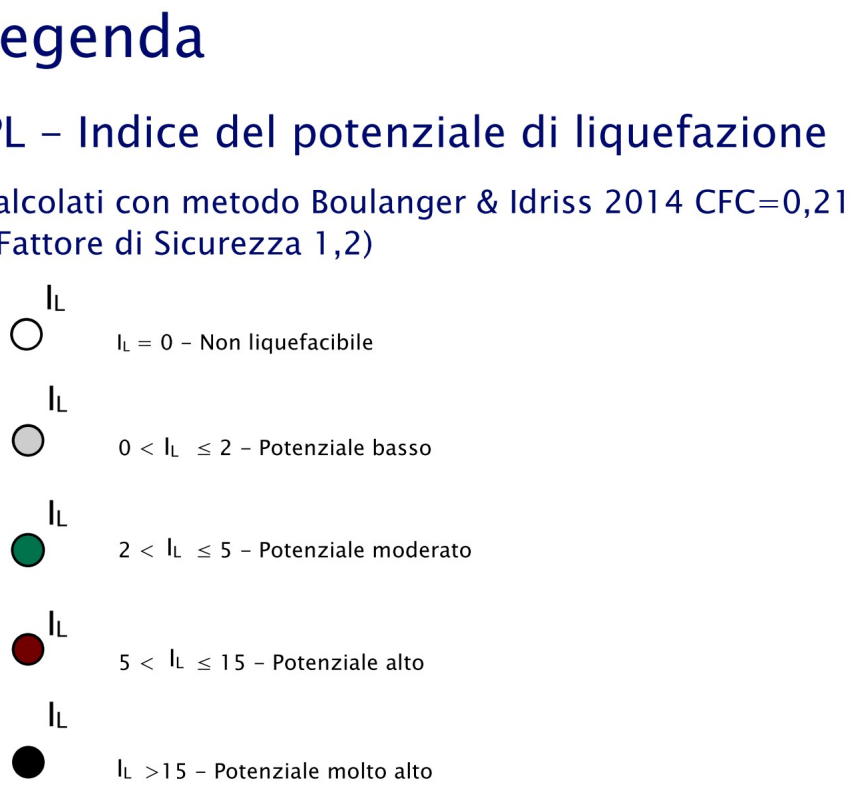


FIGURA 6-12

L'indice del potenziale di liquefazione è un valore adimensionale che parte da 0 ed esprime il grado di pericolosità dovuto a liquefazione delle sabbie in caso di sisma. Sulla base dei valori di questo indice si esprime una diversa classificazione del potenziale di liquefazione (**Tabella 6.3**) indicata con diversi colori in carta, come riportato da Deliberazione della Giunta Regionale 12 aprile 2021, N. 476.

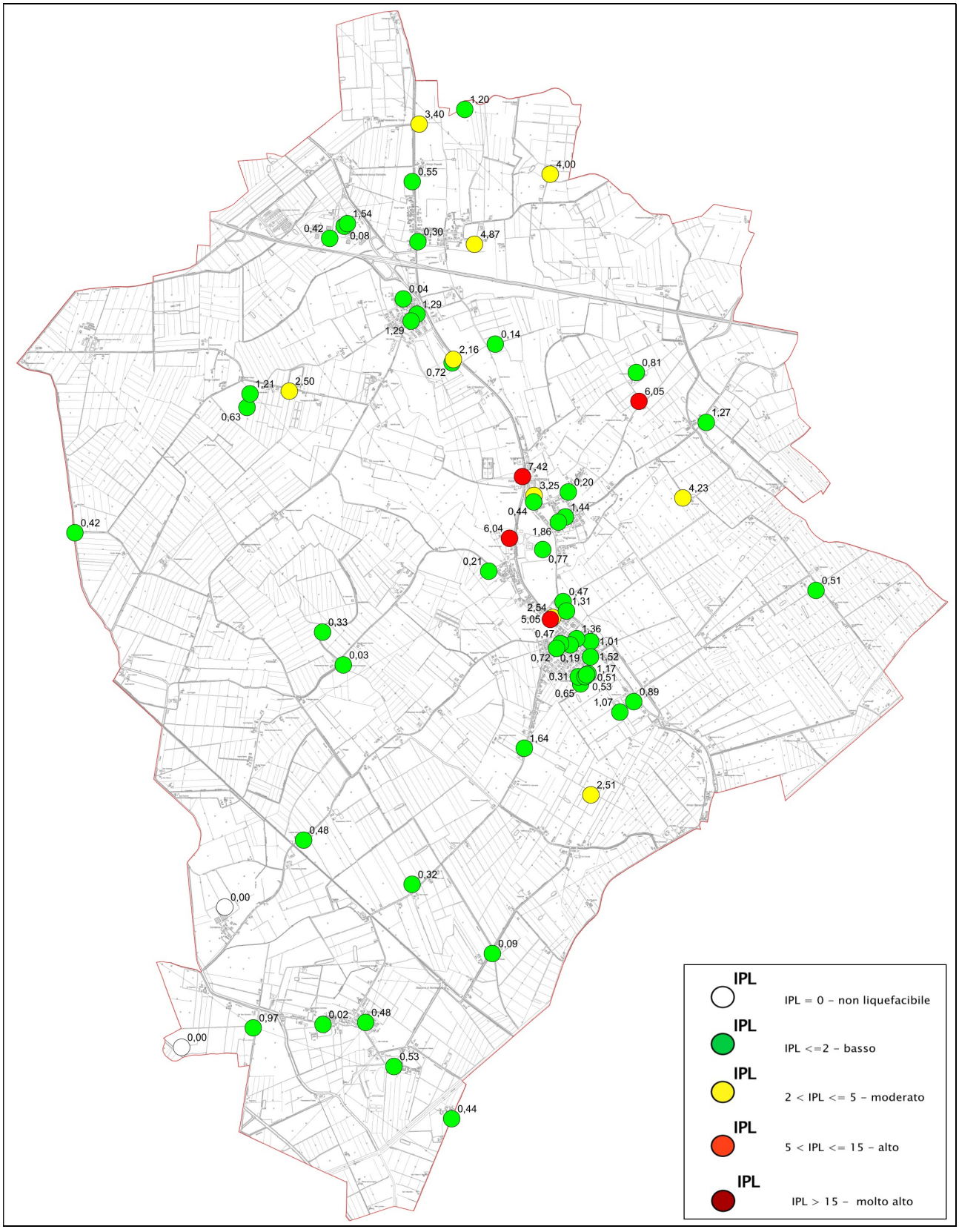
Indice del Potenziale di Liquefazione I_L	**Classificazione D.G.R. 476 del 2021**	**Colori nella carta**
0,00	*Rischio di liquefazione nullo*	*Bianco*
0,00 ≤ 2,00	*Rischio di liquefazione basso*	*Verde chiaro*
2,00 ≤ 5,00		*Giallo*
5,00 ≤ 15,00	*Rischio di liquefazione elevato*	*Rosso*
≥15,00	*Rischio di liquefazione estremamente elevato*	*Rosso scuro*

Tabella 6-3 - *Classificazione dell'indice del potenziale di liquefazione*

Il calcolo del potenziale di liquefazione viene fatto per eventi con tempo di ritorno convenzionale di 475 anni.

E' ovvio che se avvengono terremoti con energie e quindi tempi di ritorno più alti rispetto a quelli convenzionali per gli studi di microzonazione sismica, oppure se avvengono nel giro di pochi minuti, più sismi importanti, che provocano una somma delle relative sovrapressioni neutre interstiziali indotte, qui ci sono tutti i caratteri predisponenti per l'effetto di sito della liquefazione.

Si mette a confronto, solo a titolo esemplificativo, la carta così definita, con quella che si otterrebbe se si usasse indistintamente il fattore di amplificazione da abaco regionale, FA=1,3.

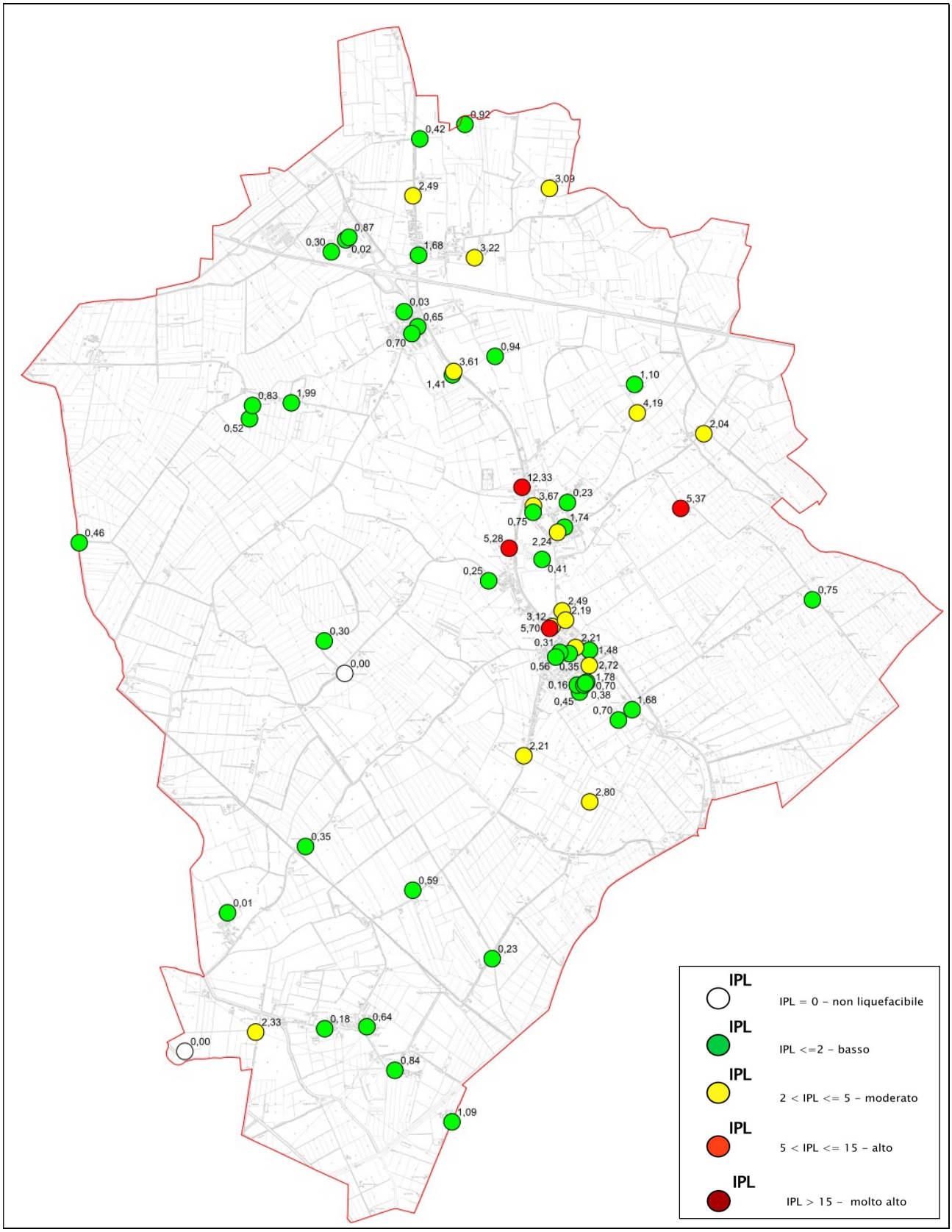


A scopo solo didattico, si propongono le carte dei valori di IPL calcolati su tutto il territorio comunale.

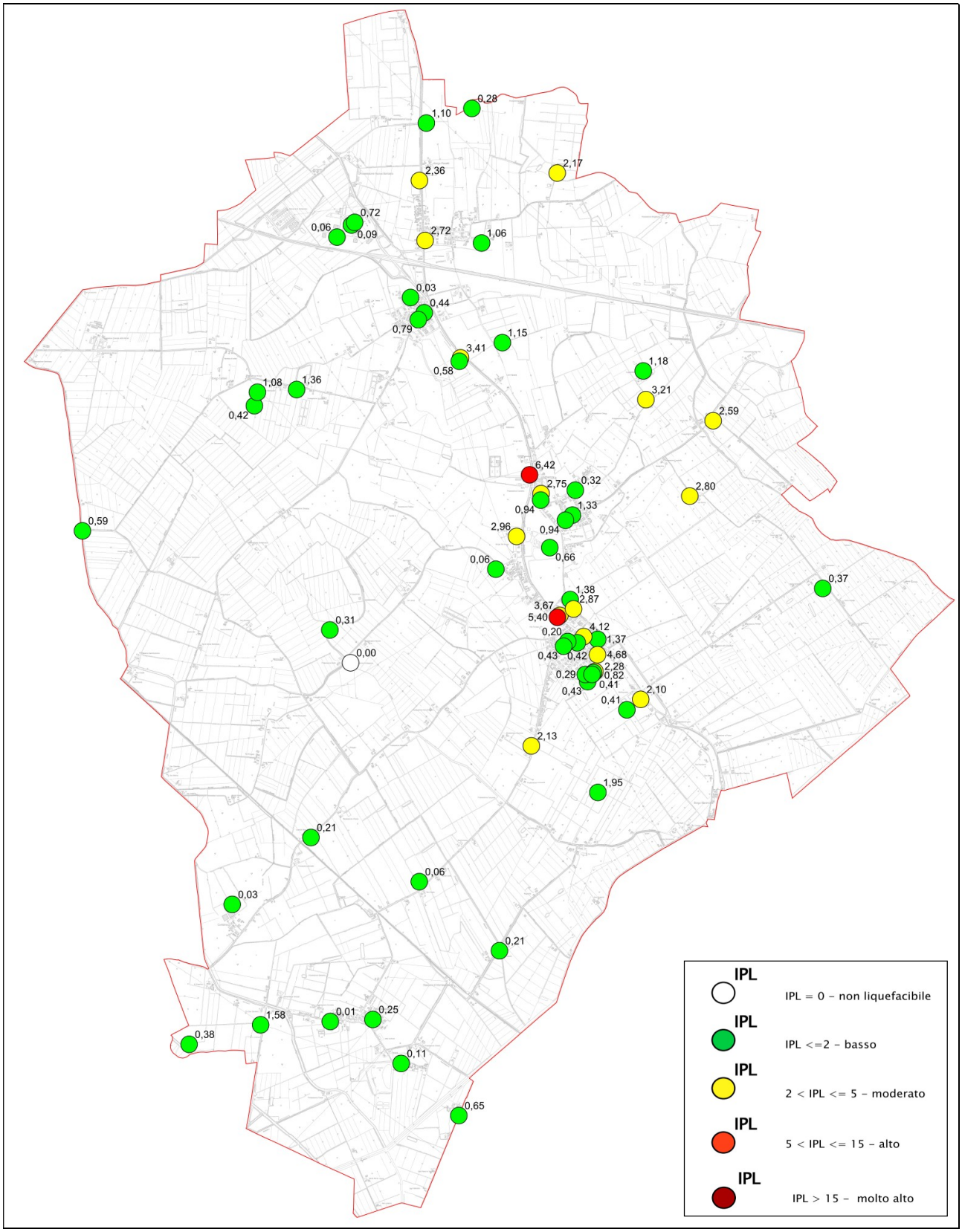
Per redigere queste carte e poterle confrontare è stato utilizzato lo stesso fattore di sicurezza paria F=1,2 e lo stesso fattore di amplificazione stratigrafico da abaco regionale del II livello, ovvero F.A.PGA/PGAo=1,3.

Come si può osservare, mettendo a confronto i risultati ottenuti utilizzando il metodo di Boulanger & Idriss 2014, applicano il C_{FC} calcolato pari a 0,20, con i risultati ottenuti utilizzando il metodo di Robertson 2010, si perviene a risultati molto simili.

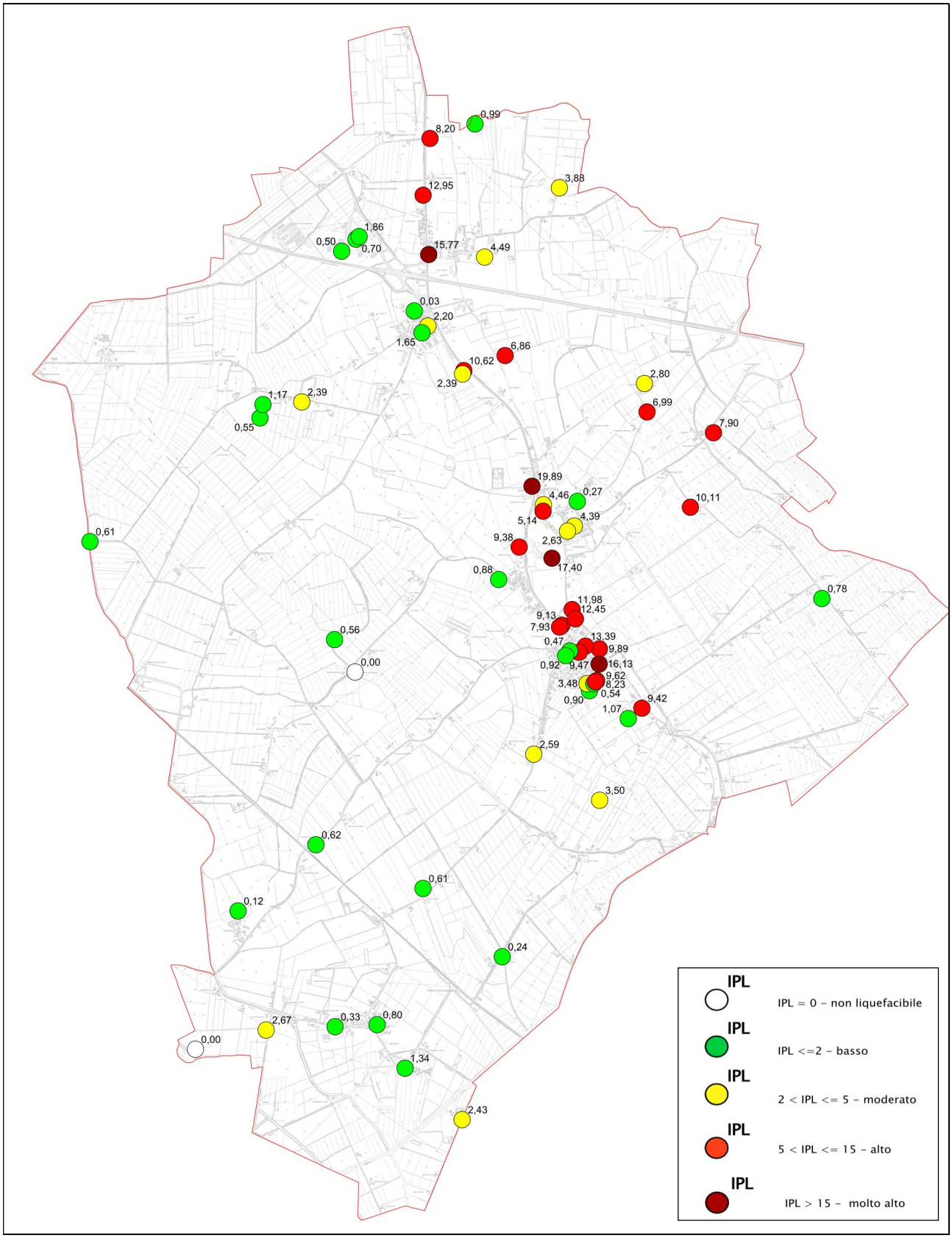
Se poi si confrontano le due carte precedenti con la terza, ovvero quella che utilizza il metodo di Boulanger & Idriss 2014, utilizzato senza calcolare il C_{FC}, ponendolo cioè conservativamente uguale a C_{FC}=0, si coglie subito la significativa differenza di risultati.



B&I 2014 con CFC=0,20



ROBERTSON 2010



B&I 2014 con CFC=0,0

7. ANALISI DEL LATERAL SPREADING

Il territorio comunale di Voghiera, come già visto, è attraversato da un importante paleoalveo fluviale.

In alcuni settori rimane evidente dal punto di vista topografico la presenza degli antichi dossi arginali degli ultimi secoli di vita di questo fiume estinto (Padoa Eridano, poi Pado Vetere).

Si è scelto di studiare quei settori di territorio, ove i dossi topografici insistono sulle sabbie del paleoalveo.

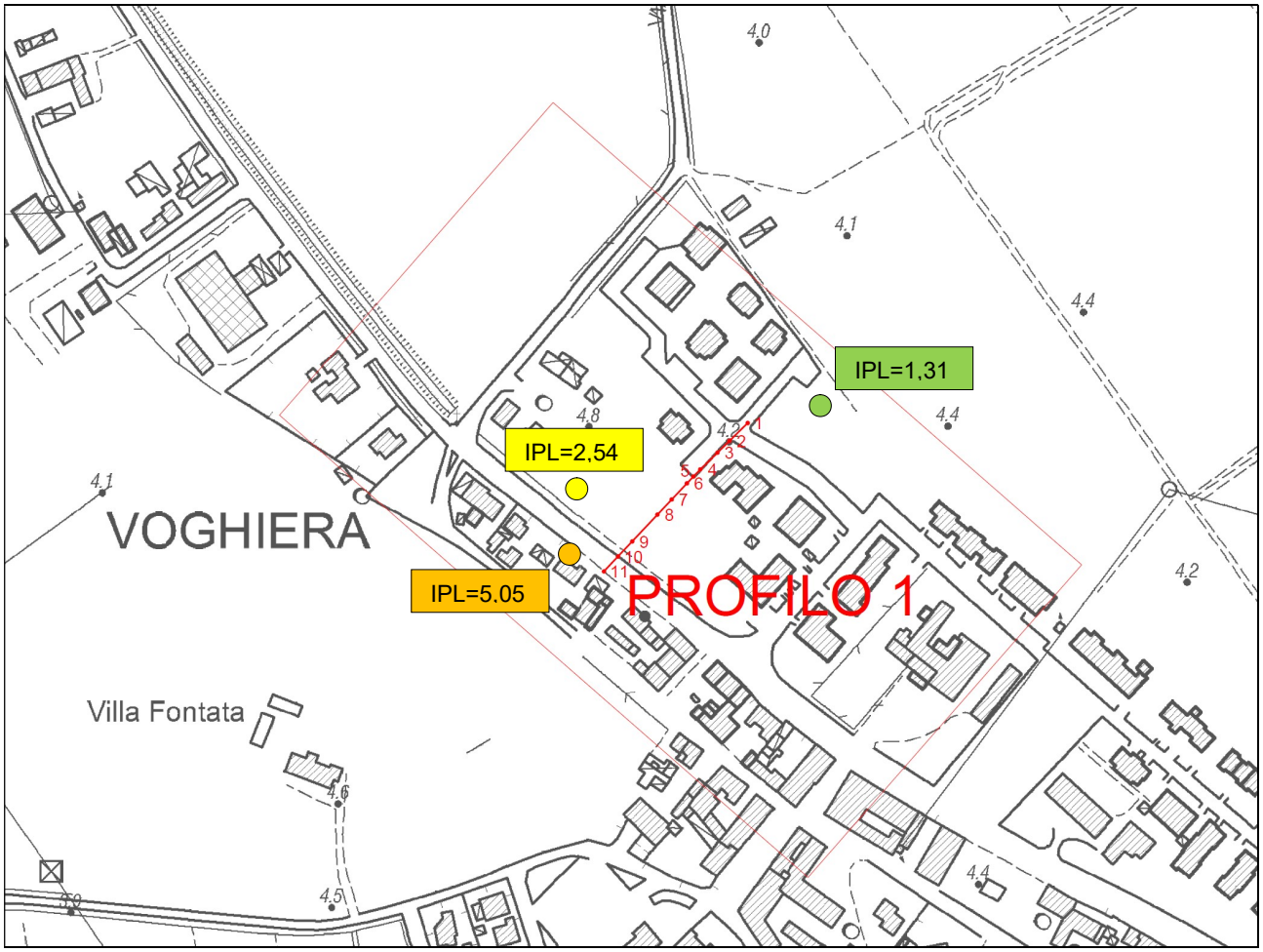
Questo perché, quando le sabbie vanno in liquefazione, i versanti topografici tendono a scivolare lateralmente dando origine al fenomeno del lateral spreading, che è stato così evidente a Mirabello e San Carlo, a seguito degli eventi sismici del 2012.

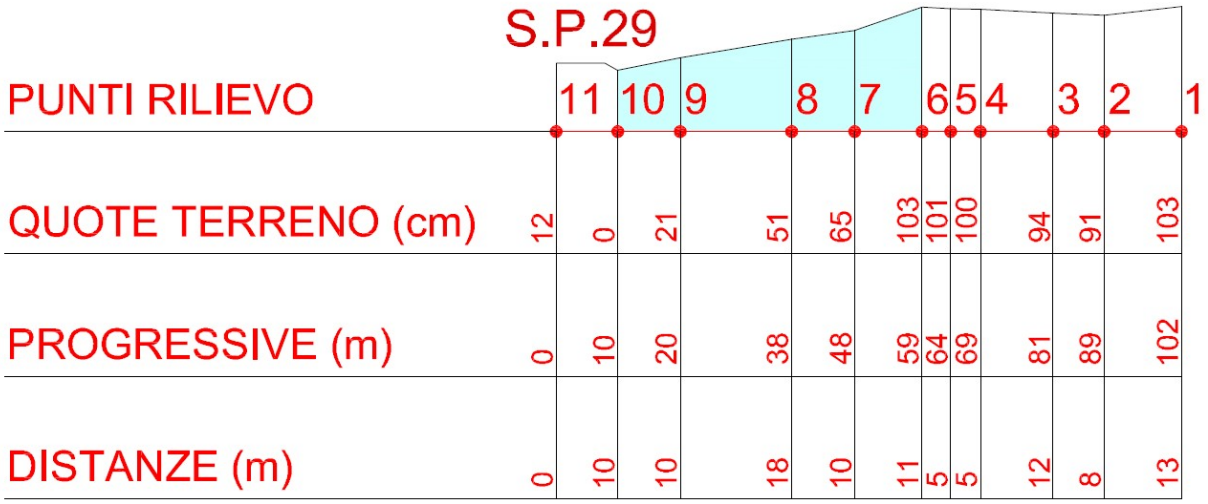
E' bene sottolineare che non vi è una distribuzione continua di queste strutture dossive parallele al paleoalveo. Andrebbe fatta una ricerca storica per comprendere il perché. Da sempre l'uomo ha questa tendenza a spianale e livellare il terreno in cui si insedia, cancellando le strutture geomorfologiche testimoni della storia evolutiva del territorio.



FIGURA 7-1 – *Porzioni di territorio con dossi morfologici ancora evidenti su cui valutare il fenomeno del Lateral Spreading*

AREA DI STUDIO N.1





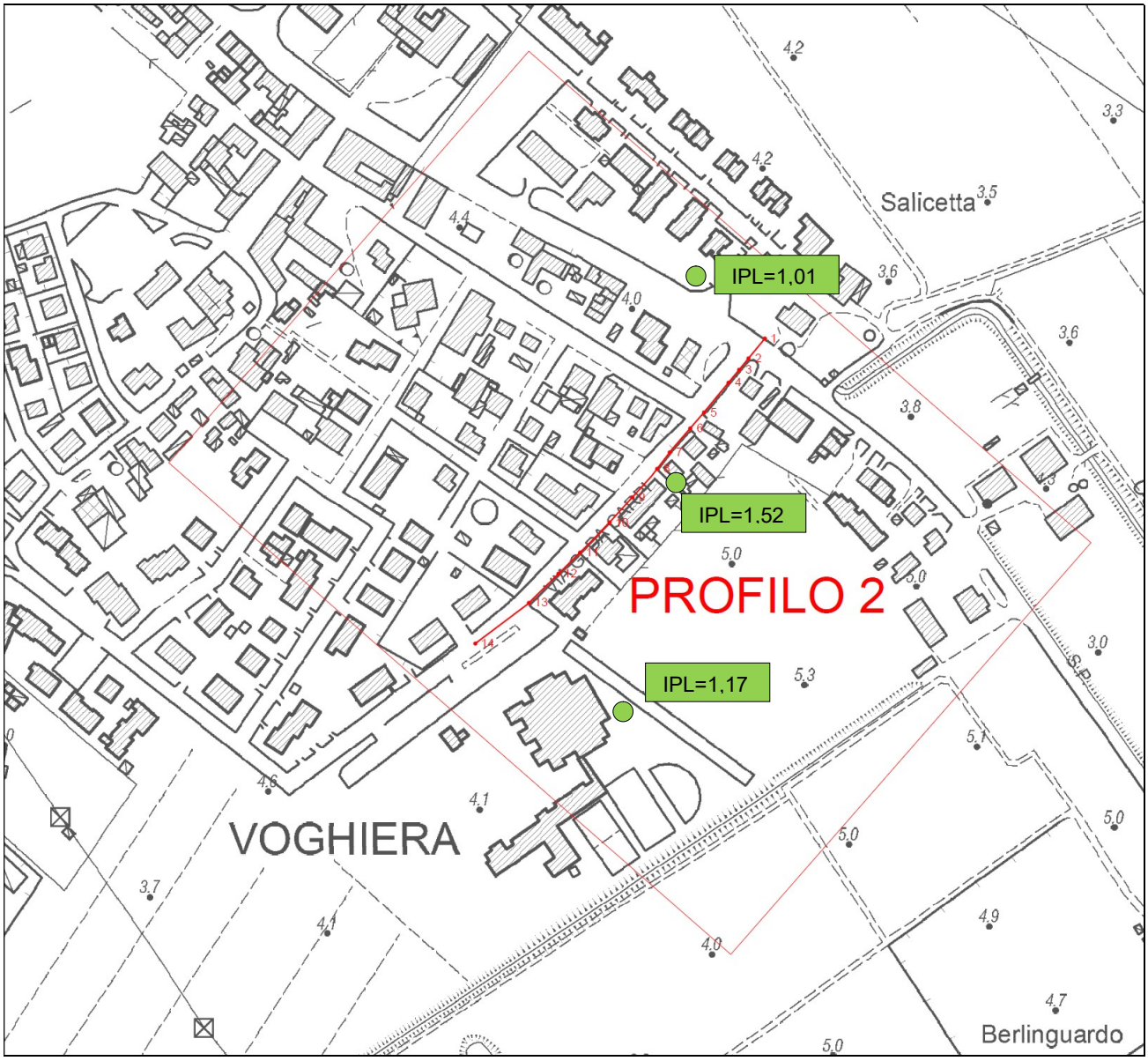
PROFILO TOPOGRAFICO N. 1

1,2° = 2,1%

PENDENZA (%)

FIGURA 7-2

AREA DI STUDIO N.2



PUNTI RILIEVO	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
QUOTE TERRENO (cm)	74	73	92	120	126	122	109	63	33	6	0	1	1
PROGRESSIVE (m)	0	23	40	64	83	104	116	134	146	167	177	185	200
DISTANZE (m)	0	23	17	24	19	21	12	18	12	21	10	8	15

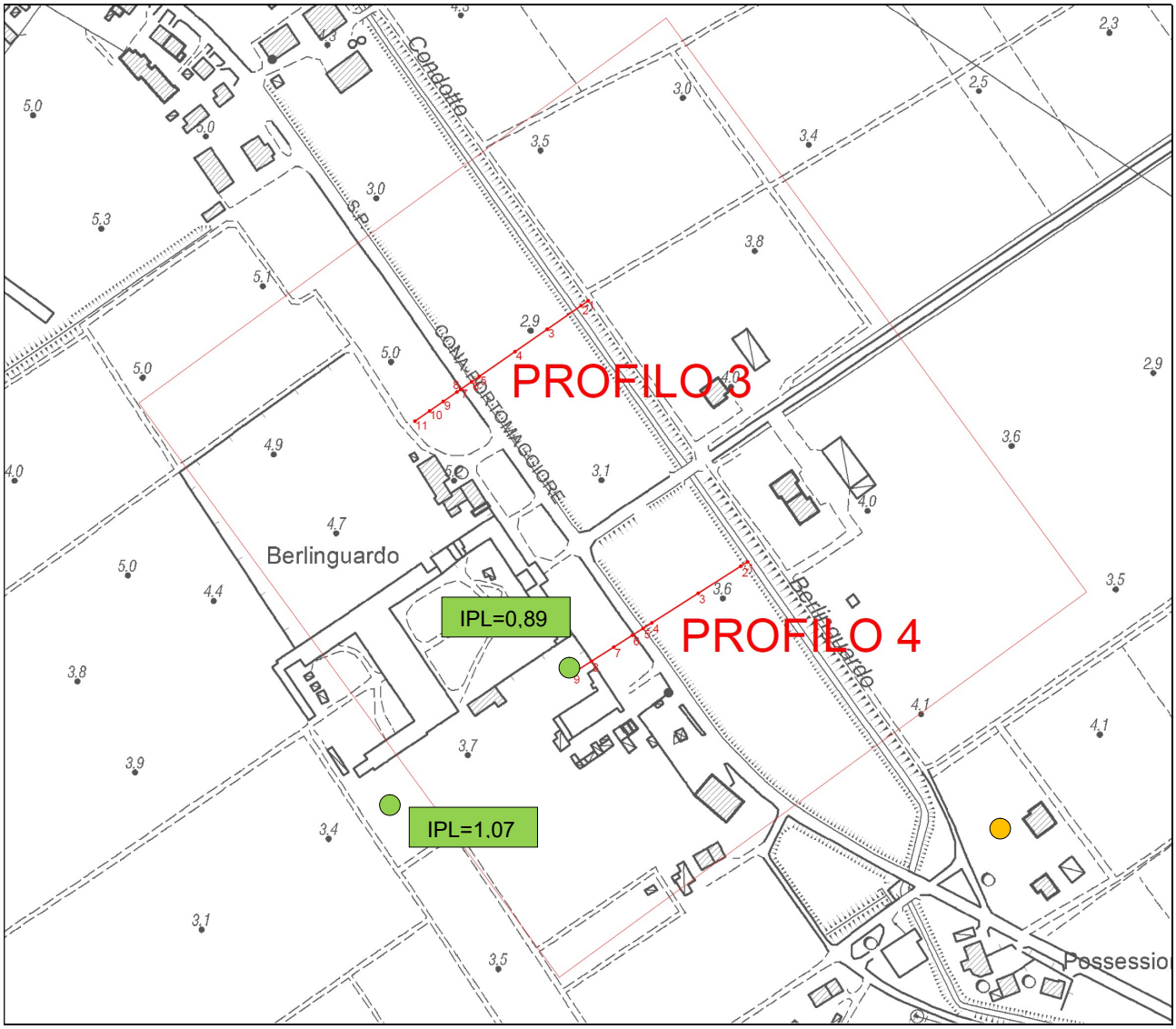
PROFILO TOPOGRAFICO N. 2

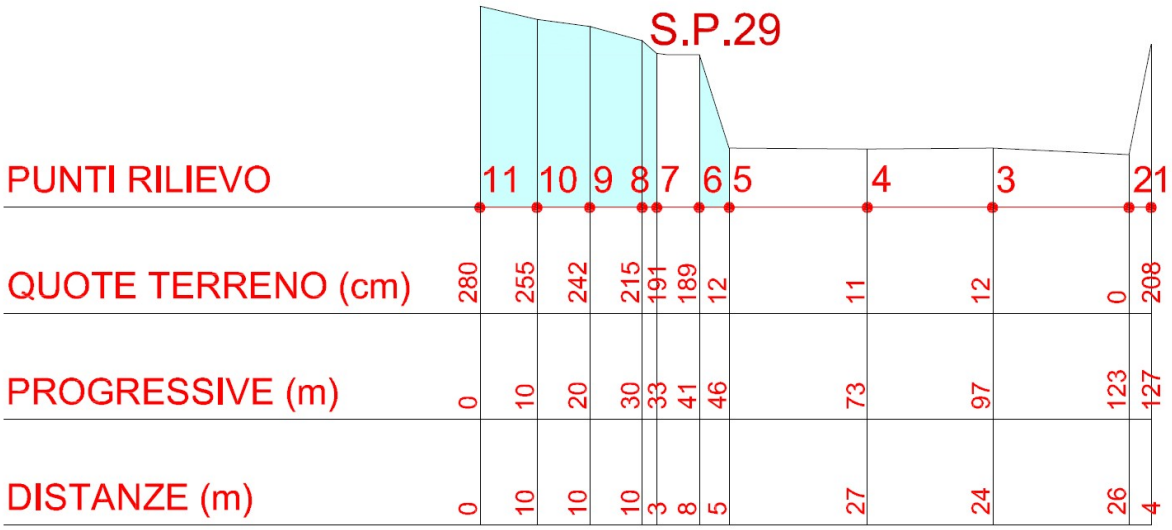
1,1° = 2%

PENDENZA (%)

FIGURA 7-3

AREA DI STUDIO N. 3

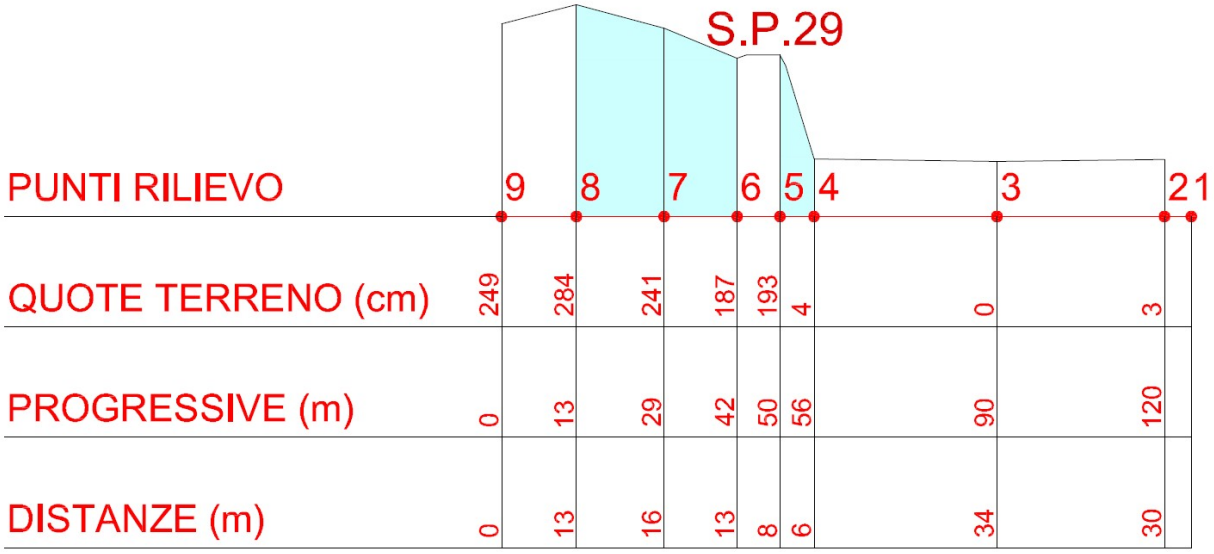




PROFILO TOPOGRAFICO N. 3

19,5° = 35,4%

PENDENZA (%)



PROFILO TOPOGRAFICO N. 4

17,5° = 31,5%

PENDENZA (%)

FIGURA 7-4

Note le pendenze locali ed i valori del potenziale IL, calcolati secondo le modalità descritte nei capitoli precedenti, si è definita una griglia di suddivisione del territorio comunale in tre zone, rispettivamente corrispondenti a probabilità di accadimento del lateral spreading bassa (Z0), media (zona di suscettibilità, ZS) o alta (zona di rispetto, ZR).

In bianco è indicata la combinazione classe IL/pendenza che individua le aree in cui gli effetti di instabilità per lateral spreading sono nulli o trascurabili (Z0), in giallo le combinazioni classe IL/pendenza che individuano le aree in cui gli effetti di instabilità per lateral spreading sono non trascurabili (ZS), in rosso le combinazioni classe IL/pendenza che individuano le aree con gravi effetti di instabilità per lateral spreading (ZR), come riportato in **Tabella 7.1**.

In termini generali, si evidenzia una proporzionalità diretta tra le evidenze di lateral spreading ed il duplice effetto dato dal valore di IL e dalle condizioni geomorfologiche dell'area, espresse mediante la pendenza in percentuale, che rappresentano un fattore aggravante del fenomeno.

		PENDENZA (%)		
		2-5%	5-15%	>15%
CLASSE IL Sonmez, 2003	0<IL≤2	Z0	ZS	ZR
	2<IL≤5	ZS	ZR	ZR
	5<IL≤15	ZS	ZR	ZR
	IL>15	ZR	ZR	ZR

Tabella 2 – Matrice utilizzata per la classificazione delle aree di suscettibilità e di rispetto per lateral spreading.

Tabella 7-1

Per la microzonazione sismica di livello 3, sono state individuate e perimetrate zone di suscettibilità (ZS_{LS}) e di rispetto (ZR_{LS}) per lateral spreading secondo la combinazione delle classi delle pendenze e delle classi dell'indice di liquefazione (IL) riportata in **Tabella 7.1**.

Il risultato dell'analisi è che l'area di studio N. 1 presenta pendenze massime del 2,1%, con prove che danno IPL comprese tra 2 e 5, perciò viene classificata come ZS (zona di suscettibilità) con probabilità media di accadimento del lateral spreading.

L'area di studio N. 2 presenta pendenze massime del 2,0%, con prove che danno IPL compreso tra 0 e 2, per cui la classificazione è Z0 (probabilità di accadimento del lateral spreading bassa).

L'area di studio N. 3 presenta pendenze massime del 31-35% in corrispondenza delle ex peschiere estensi, per cui questa scarpata topografica induce a fare ricadere parte dell'area nella classificazione ZR. Non è determinabile la porzione di terreno a monte che può essere interessato dal lateral spreadin, ma vista il limitato dislivello della scarpata, si è cautelativamente adottato una fascia di 40m. Più ad ovest si esce dal paleoalveo quindi tutta l'area di studio diventa a rischio nullo.

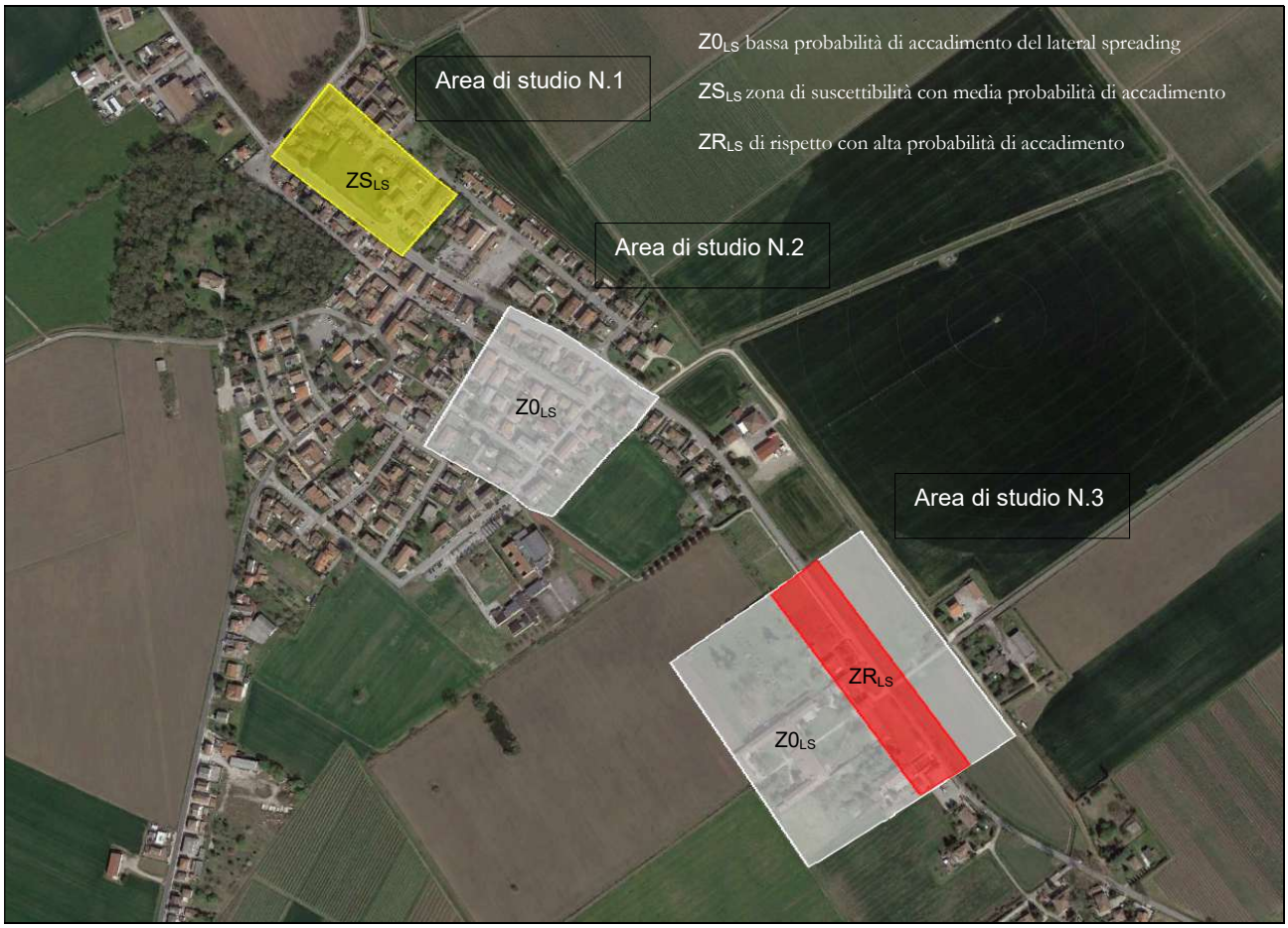


FIGURA 7-5 – *Fasce suscettibili di lateral spreading conseguente a liquefazione delle sabbie.*

8. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Negli studi di microzonazione sismica di II livello, ed in particolare nella carta delle M.O.P.S. (Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica), erano state individuate nel 2019 quelle aree a diversa suscettibilità per gli effetti locali attesi. In particolare nel comune di Voghiera erano stati individuati i seguenti effetti locali:

a) zone suscettibili di amplificazioni stratigrafica locale;

b) zone suscettibili di instabilità per deformazioni permanenti del territorio dovuti principalmente alla liquefazione in presenza di importanti spessori di terreni granulari saturi nei primi 20 m da piano campagna.

Va però affermato che mentre è certa la presenza dei caratteri predisponenti alla liquefazione delle sabbie (depositi di sabbie limose di deposizione recentissima, sature, che stanno nei fusi liquefacibili), minore certezza può essere affidata alla stima delle cause scatenanti la liquefazione delle sabbie, ovvero la stima delle energie sismiche attese. In ogni caso il comune di Voghiera ricade nelle fasce di maggior risentimento degli effetti delle faglie attive dell'Emilia Romagna (**FIGURA 8.1**).

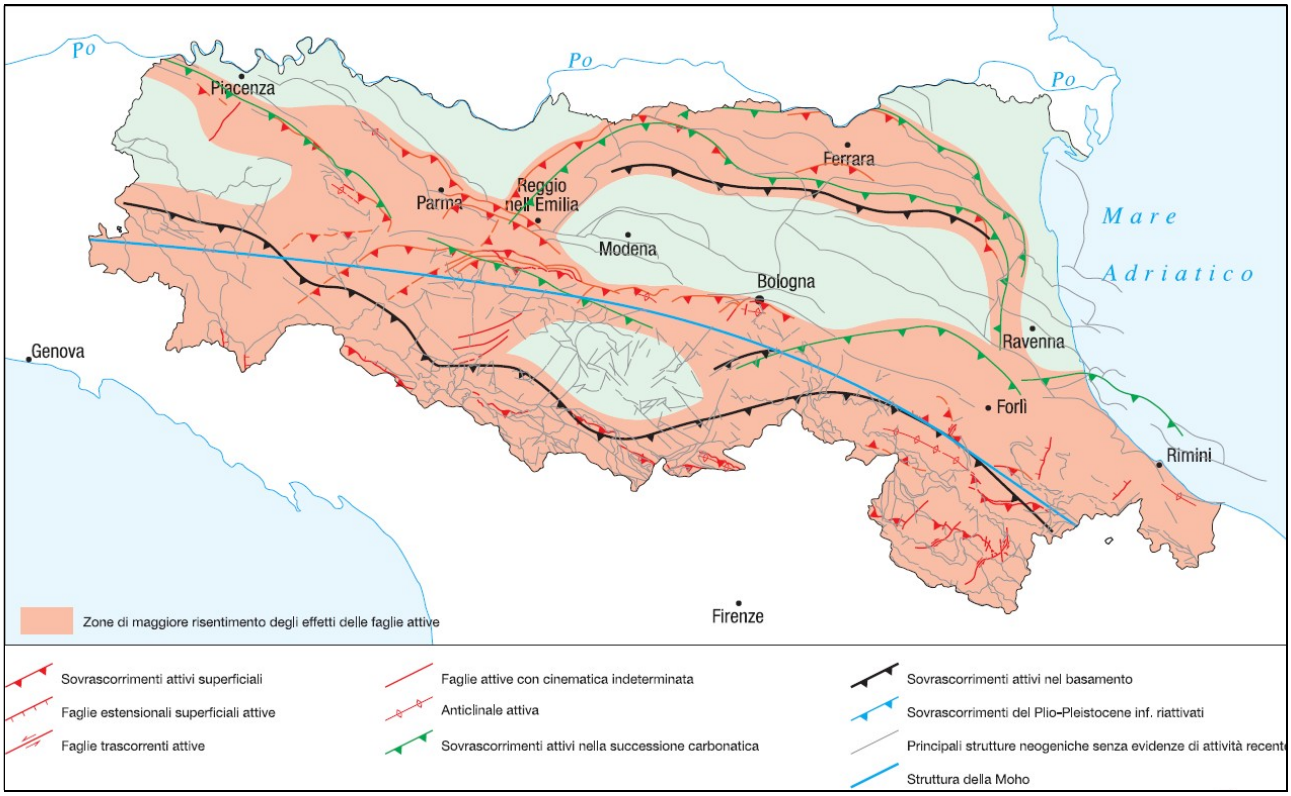


FIGURA 8-1 – *Ubicazione del comune di Voghiera, all'interno delle fasce di maggiore risentimento degli effetti delle faglie attive.*

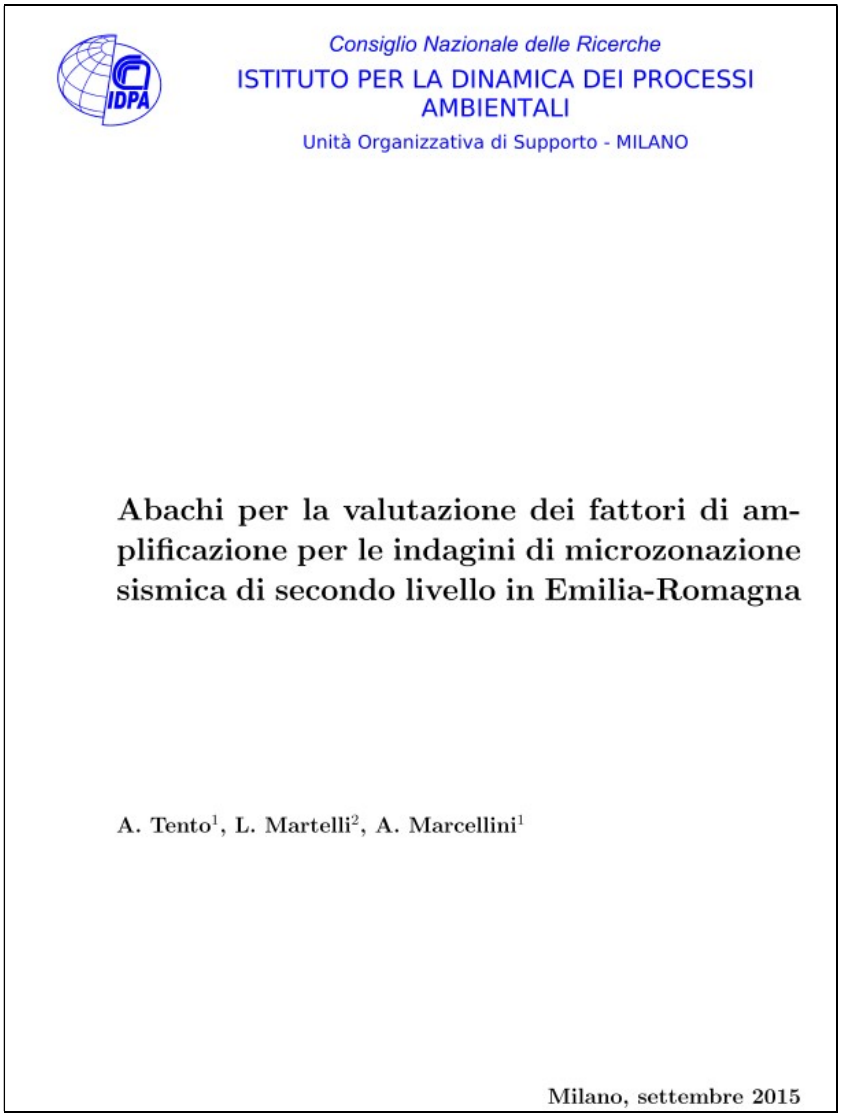
Le accelerazioni sismiche al bedrock sismico presentano già valori compresi tra 0,14g e 0,15g, per cui aumentandole del fattore di amplificazione stratigrafico si ottengono in superficie accelerazioni di picco che possono indurre liquefazione, se le resistenze del deposito sabbioso sono più basse delle azioni cicliche indotte dal sismcia. In **FIGURA 8.2** si riporta la carta dei valori di PGAo al Bedrock sismico per il comune di Voghiera.



FIGURA 8-2 – *Valori di accelerazione di picco su suolo rigido secondo la DGR 2193/2015).*

Quindi fondamentale è la stima del fattore di amplificazione stratigrafico locale.

Recenti studi (Tento, Martelli, Marcellini 2015), evidenziano che in terreni ove il bedrock sismico (Vs>800m/sec, **FIGURA 8.3**) è profondo oltre i 300m dal p.c. e i valori di Vs_{30} sono molto bassi, i valori dei fattori di amplificazione sismica sono prossimi all'unità (**FIGURA 8.4**).



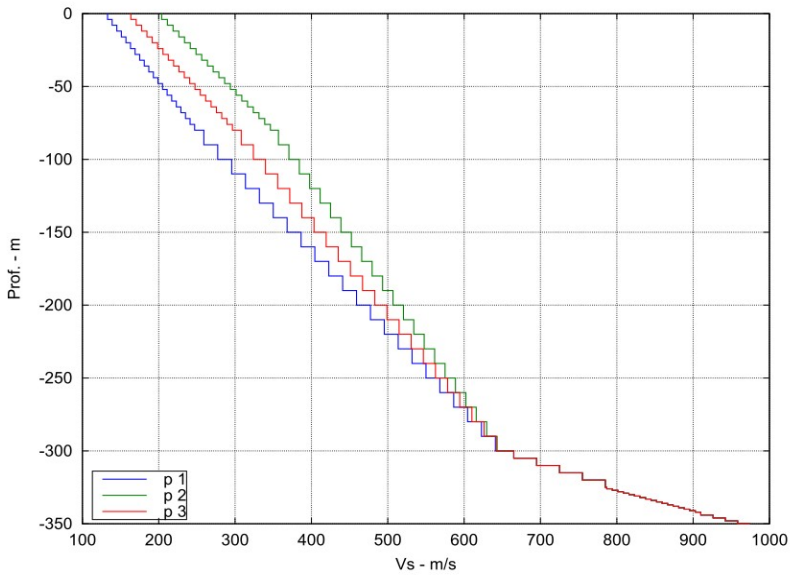


Figura 40: Pianura 3, profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori di amplificazione.

FIGURA 8-3 – *Profilo di Vs con bedrock sismico oltre i 300m di profondità*

Prof.	Vs_{30} m/s	FA PGA	FA SI1	FA SI2	FA SI3
p1	152	1.1	1.2	2.3	2.6
p2	227	1.3	1.5	2.2	2.4
p3	185	1.3	1.4	2.3	2.6

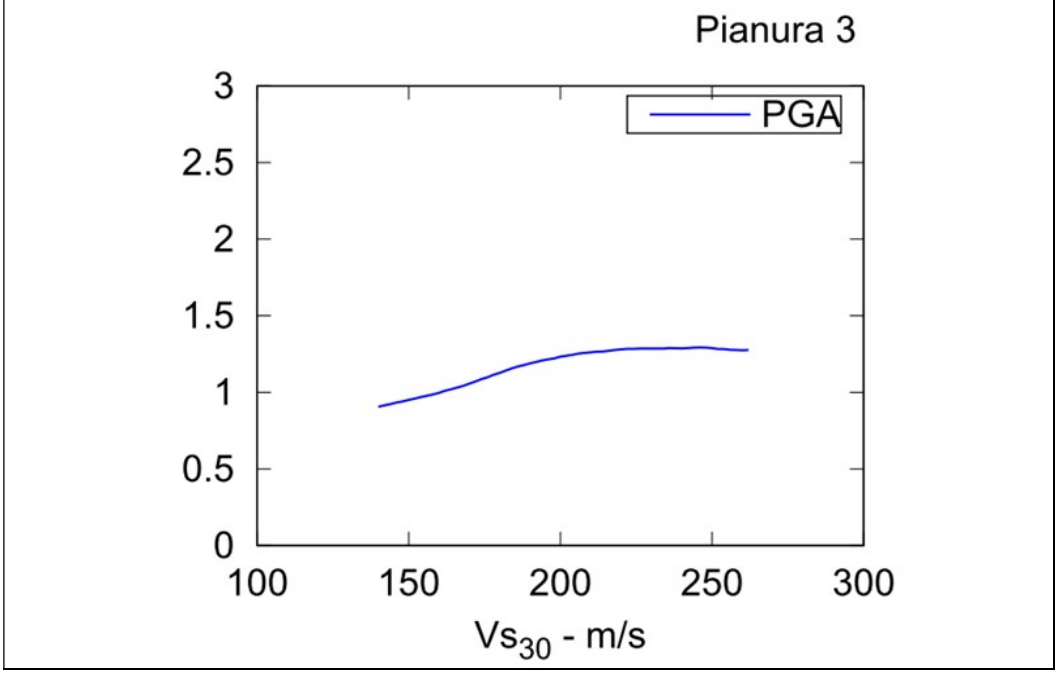


FIGURA 8-4 – *Per valori di Vs30 compresi tra 152 m/sec e 185 m/sec il fattore di amplificazione sismica F.A. per la P.G.A. varia tra 1,1 e 1,3, mantenendosi intorno a 1,3 per valori di Vs30 superiori a 185m/sec.*

In questo studio sono state condotte della analisi di risposta sismica locale in modo abbastanza rigoroso, i cui risultati sono coerenti con quanto emerso dallo studio citato.

Quindi all'interno di un esteso paleoalveo sabbioso che attraversa il territorio comunale da Ducentola a Voghiera, vi sono zone con caratteristiche diverse per quanto riguarda gli spessori delle sabbie presenti, la variazione del contenuto in fine e lo stato di addensamento delle stesse.

Conoscendo le dinamiche deposizionali dei sedimenti terrigeni in un alveo fluviale, che per la maggior parte della sua vita è stato contenuto solo da modesti argini naturali, vi sono da attendersi importanti variazioni delle tre caratteristiche citate, ovvero spessori delle sabbie, variazioni del contenuto in fine, e variazioni dello stato di addensamento. Tutto dipende dall'energia idrodinamica (i filetti di corrente) presente in quel momento in quel tratto dell'alveo.

Si veda nelle due figure seguenti (**FIGURA 8.5** e **FIGURA 8.6**), gli schemi deposizionali in piana alluvionale attraversata da alvei fluviali.

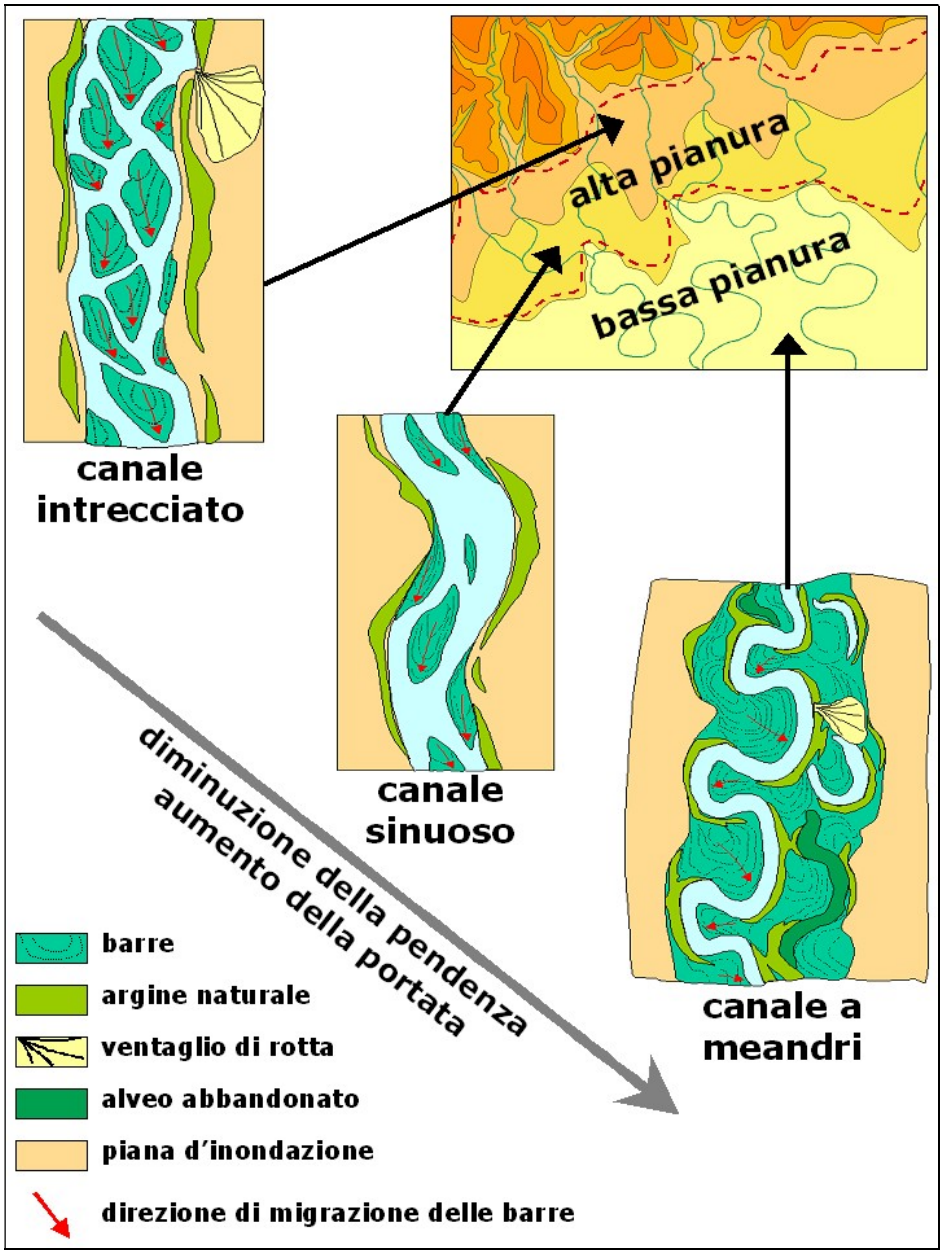


FIGURA 8-5 – *Schema generale di una pianura alluvionale, con le principali forme di erosione e di deposito in funzione della portata della corrente e della pendenza (gradiente topografico) dell'alveo. Di Antonov - Opera propria, Pubblico dominio, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8546814*

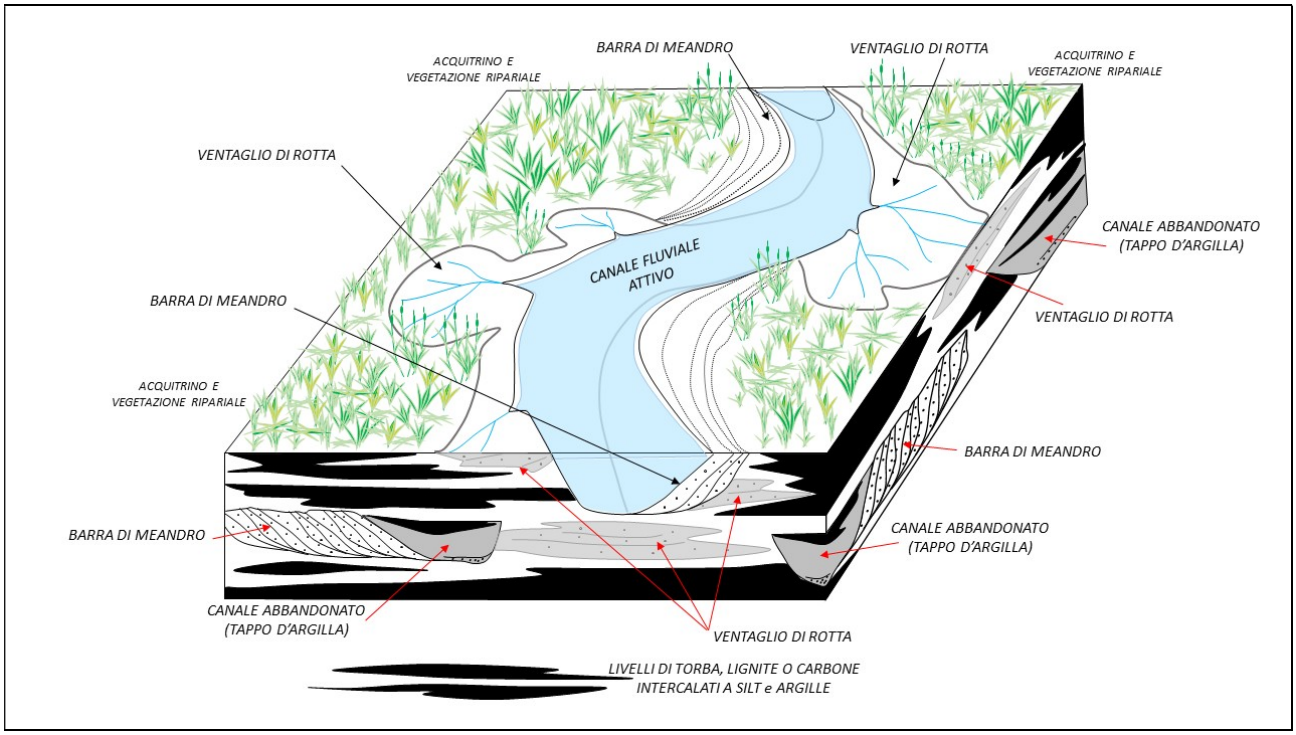


FIGURA 8-6 – *Diagramma generale che illustra la presenza e la posizione di livelli di carbone (o lignite, o torba a seconda dell'età del deposito) in un ambiente fluviale a meandri. Di Antonov - Opera propria, CC0,* https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=98579311

Le indagini raccolte in banca dati sono abbastanza dense e numerose, ma alcuni margini di incertezza vanno comunque contemplati per la variabilità intrinseca nelle strutture deposizionali all'interno dell'alveo fluviale, in questo caso del paleoalveo fluviale.

Le altre incertezze nascono dal metodo applicato dell'analisi della risposta sismica locale, che tende a fornire informazioni sulle accelerazioni di picco, ovvero all'interno dell'accelerogramma di registrazione del terremoto, si prende il picco di accelerazione sismica espressa come frazione dell'accelerazione di gravità, e si fanno le valutazioni con quel valore di picco massimo.

In teoria la geotecnica sismica tende ora a riconoscere più importanza al fattore dell'incremento delle sovrapressioni neutre Δu, nelle acque di saturazione dei depositi, indotte dal sisma.

Per esempio, nel terremoto dell'Emilia del 20/05/2012, pare avere avuto molta importanza il fatto che si siano verificati 3 terremoti nel giro di 4 minuti (**FIGURA 8.7**), e dunque uno solo di questi terremoti con una determinata PGA, non avrebbe innescato tutta la liquefazione che c'è stata, indotta dall'incremento delle sovrapressioni neutre derivate dalla somma dai tre gruppi di sollecitazioni cicliche subite in tempo così ristretto.

Purtroppo questa modalità di sciame sismico ravvicinato non è contemplata nei modelli "semplificati" che si adottano per fare gli studi di micro zonazione sismica, talmente indeterminabile sia questo modo di accadimento. Mentre gli studi statistico probabilistici sulle PGAo e sui fattori di amplificazione stratigrafici e topografici, sono gli strumenti più facilmente utilizzabili per fare le micro zonazioni sismiche.

Modelli troppo complessi diventano inutilizzabili dalla maggior parte dei professionisti.

Altra osservazione importante è che gli studi di microzonazione sismica vanno condotti convenzionalmente per eventi con un periodo di ritorno TR = 475 anni (corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni). Dunque eventi sismici, con tempi di ritorno maggiori, possono cambiare gli scenari calcolabili di stabilità o instabilità, poiché aumenta l'energia delle cause scatenanti.

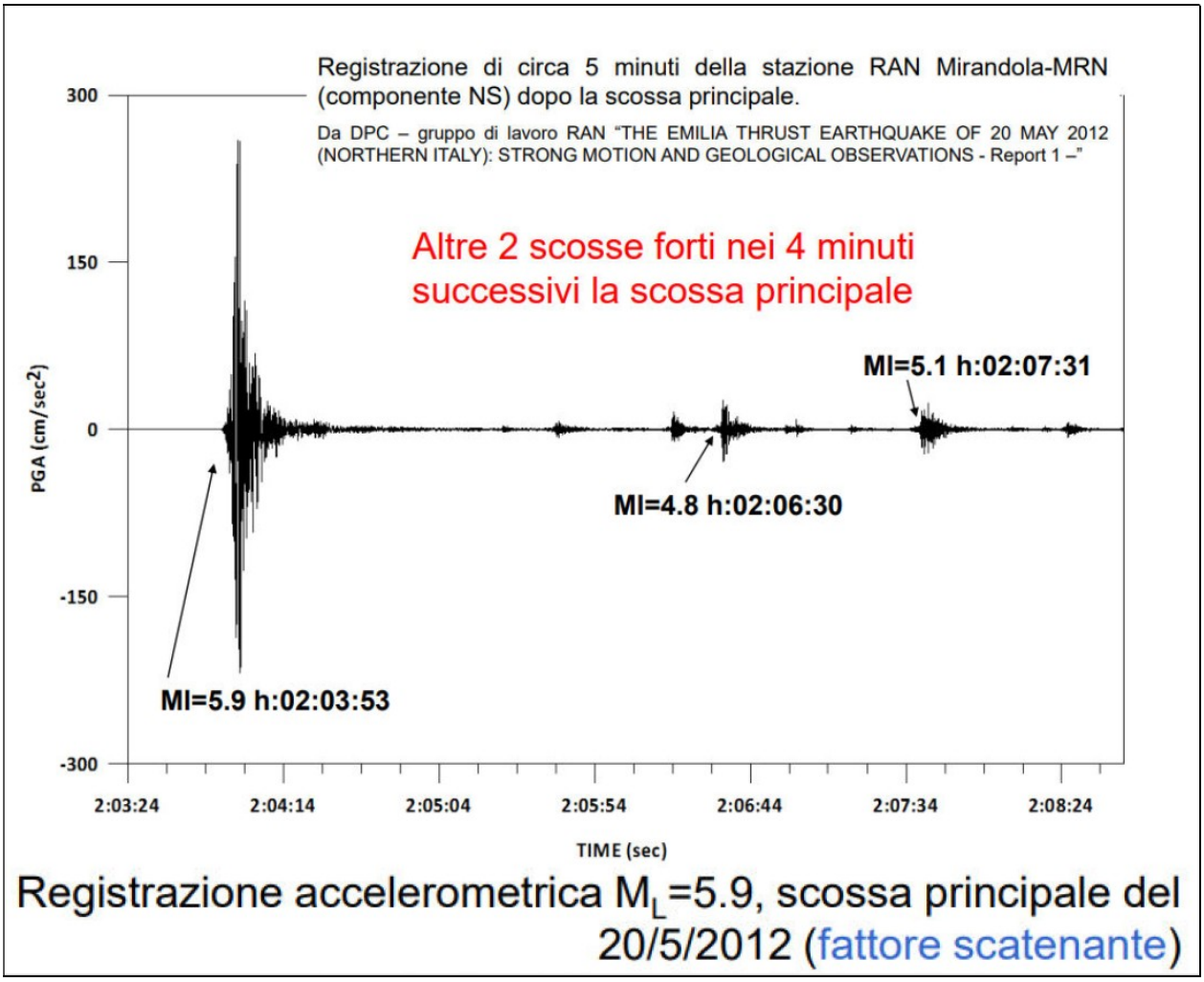


FIGURA 8-7

Riassumendo, i limiti più importanti di questi studi nascono dal fatto che con le verticali di indagine a disposizione si perimetrano aree che si suppongono omogenee stratigraficamente e negli effetti di sito attesi. Ma il disegno di questi perimetri può non essere corretto, perché l'interpolazione dei dati distanti, anche se ragionata, può benissimo essere sconfessata dalla natura geologica dei terreni. Questi studi necessiterebbero di aggiornamenti periodici, con l'aumentare delle indagini eseguite nel frattempo sul territorio (come dimostrato già in questa occasione dove si sono modificati i perimetri del 2019 sulla base di nuove indagini a disposizione).

L'altro grande tema di incertezza è quello della determinazione delle energie per le cause scatenanti gli effetti di sito attesi, di cui si è ampiamente parlato in questo paragrafo.

Questi concetti saranno ripresi nelle conclusioni.

9. CONCLUSIONI

Gli studi di microzonazione sismica indirizzano la pianificazione territoriale sulle diverse risposte del terreno ad eventi sismici importanti, in grado di generare tali effetti di sito. La pianificazione territoriale è in grado così di fare delle valutazioni nei rapporti alle scelte urbanistiche all'interno degli strumenti di pianificazione e gestione del territorio.

I limiti di questi studi derivano dal fatto che le verticali di indagine sono sempre poche per tirare dei perimetri di microzona, e quindi possono essere soggetti ad errori di perimetrazione importanti.

Con l'esecuzione di nuove indagini geologiche sarebbe buono lasciare sempre una porta aperta alla modifica dei perimetri interpolati nello studio di microzonazione sismica, antecedenti alle nuove conoscenze che per forza si acquisiranno in futuro.

L'altro tema delicato di questi studi è che essi vanno condotti con terremoti di progetto che hanno probabilità di accadimento convenzionale in 475 anni. Sarebbe bello progettare tutto per eventi con tempo di ritorno molto più alto, ma la norma dice che gli edifici, in funzione della classe d'uso, devono resistere ad energie sismiche via via maggiori.

Quindi un'area che può risultare stabile per un terremoto con tempo di ritorno di 475 anni, può non esserlo per eventi con tempo di ritorno di 712 anni (classe d'uso III) e ancor meno per venti con tempo di ritorno di 949 anni (classe d'uso IV).

Ma è ovvio che se si progettasse indistintamente tutto come se si fosse sempre in presenza di edifici di classe d'uso IV, i costi diventerebbero insostenibili per i privati e per gli enti pubblici.

Con questi studi sono stati condotti per eventi con tempi di ritorno di 475 anni; sono state condotte delle analisi di risposta sismica locale, che spesso hanno abbassato i valori di PGA amplificati, attesi in superficie, rispetto a quelli che si calcolano con gli spettri semplificati, per via del decadimento del modulo di taglio alle basse deformazioni G_0, in quanto le deformazioni indotte dalle sollecitazioni di taglio cicliche dell'azione sismica, rammollisce le sabbie sature del paleoalveo del Padoa Eridano, che durante questi effetti diventano smorzanti, ben prima di arrivare alla liquefazione.

Quello che emerge è che ci sono importanti indizi di presenza di caratteri predisponenti alla liquefazione delle sabbie, anche negli effetti smorzanti (dumping) delle sabbie, presenti nelle fasce del paleoalveo; tali effetti in talune fasce con andamenti topografici particolari, possono anche tradursi in fenomeni di lateral spreading. Tutto dipenderà dalle energie degli eventi sismici che potenzialmente si possono liberare in questa zona sismo genetica in cui si estende il territorio comunale di Voghiera.

Gli studi di progettazione definitiva faranno riferimento alle N.T.C. 2018 e caso per caso andranno sempre fatti gli approfondimenti di studio sulle amplificazioni stratigrafiche e sulla stabilità nei confronti dell'effetto di sito della liquefazione delle sabbie.

Codigoro, lì 02/08/2024

Dott. Geol. Thomas Veronese