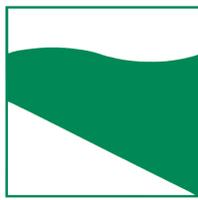




PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Livello 2

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna

Comune di Russi



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA		
Studio realizzato con il contributo di cui all'OCPC 675/2020 recepita con DGR 1238/2020	Dott. geologo Samuel Sangiorgi	Febbraio 2022

## INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Contenuti dello studio.....	3
1.2	Riferimenti normativi.....	5
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	5
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	7
2.1	Riferimenti bibliografici.....	7
2.2	Sismicità storica.....	7
2.3	Sorgenti sismogeniche INGV.....	9
2.4	Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale: gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica.....	10
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	13
3.1	Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico.....	13
3.2	Geomorfologia.....	16
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	20
4.1	Le nuove indagini eseguite.....	21
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	26
5.1	Sottosuolo profondo.....	26
5.2	Litologie sub-affioranti.....	32
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	34
6.1	Commenti introduttivi.....	34
6.2	Definizione del substrato rigido.....	34
6.3	Liquefacibilità.....	35
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS.....	39
7.1	Cenni introduttivi.....	39
7.2	Sintesi illustrativa delle MOPS.....	39
7.3	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS.....	40
7.4	Calcolo dei fattori di amplificazione.....	41
	7.4.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.....	41
	7.4.2 Zone di attenzione per instabilità: calcolo dei fattori di amplificazione.....	41
7.5	Elaborazione dei valori di HSM.....	42
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	43

---

8.1	Carta delle Indagini.....	43
8.2	Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica.....	43
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	44
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS.....	44
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S.....	46
8.6	Carta di microzonazione sismica livello 2.....	46
8.7	Carta della distribuzione dei valori di $H_{SM}$ .....	47
9	BIBLIOGRAFIA.....	48

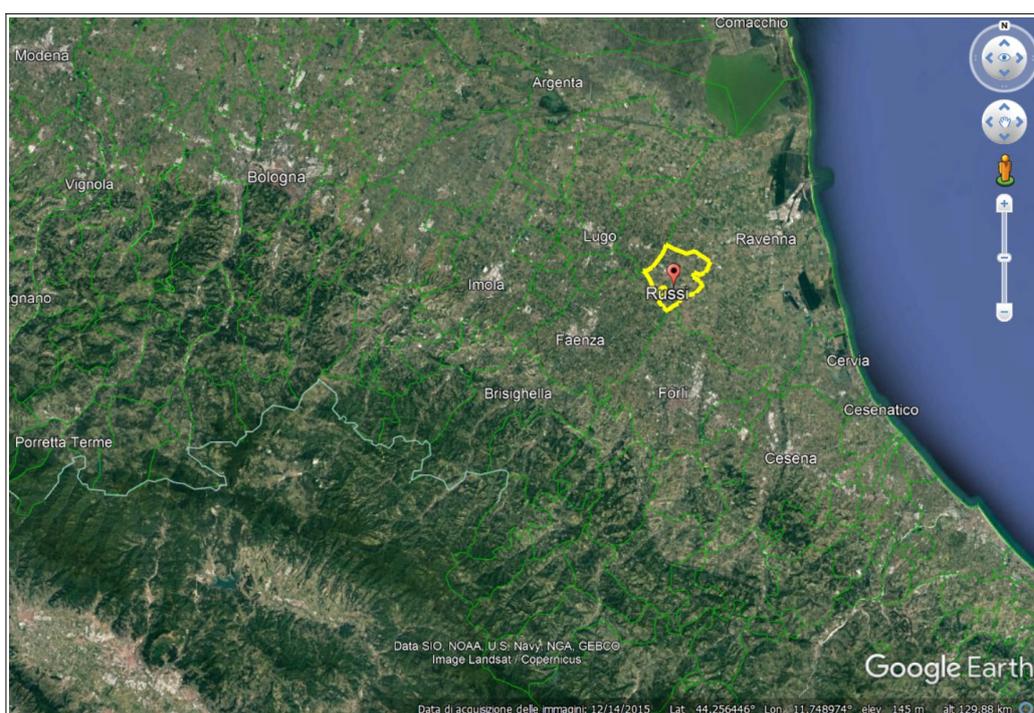
# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Contenuti dello studio

Il Comune di Russi ha beneficiato di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per la realizzazione di studi comunali di microzonazione sismica (“livello 2”) e di analisi della Condizione Limite per l’Emergenza (CLE), come previsto dalla Legge 77/2009 e ai sensi dell’Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 675/2020, recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 1238/2020. Lo studio di MS di “livello 2” e le analisi della CLE sono stati affidati allo Studio scrivente.

Sono state dunque espletate le seguenti attività:

- la raccolta dati geognostici e geofisici disponibili ed esecuzione di indagini integrative (penetrometrie CPTU; stendimenti sismici ESAC-SPAC; stendimenti sismici MASW; registrazioni sismiche HVSJ);
- l’elaborazione delle analisi di “livello 1” su tutto il territorio comunale;
- la microzonazione di “livello 2” estesa al territorio urbanizzato, a parti contermini che non presentano particolari fattori preclusivi o limitanti alle trasformazioni urbane, ad alcuni agglomerati significativi in territorio rurale, a fasce di territorio riguardanti la viabilità di connessione definita nell’Analisi della Condizione Limite per l’Emergenza;
- l’elaborazione delle analisi della Condizione Limite per l’Emergenza (CLE);
- l’archiviazione dei dati e la redazione delle cartografie secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione previsti per la MS e la CLE.



*Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo di Russi foto aerea: “Google Earth”*

La figura 1.1 offre un inquadramento del limite comunale di Russi: si tratta di un territorio amministrativo ricadente nella pianura padana a circa 13 km a ovest di Ravenna, di estensione areale totale pari a poco più di 46 km<sup>2</sup> e con una popolazione di 18.136 abitanti (dato ISTAT 01/01/2021).

La figura 1.2 localizza con maggior dettaglio il territorio comunale e individua gli areali interessati dallo studio di microzonazione sismica di “livello 2”.

La disponibilità di informazioni ha consentito di estendere le analisi di “livello 1” a tutto il territorio amministrativo.

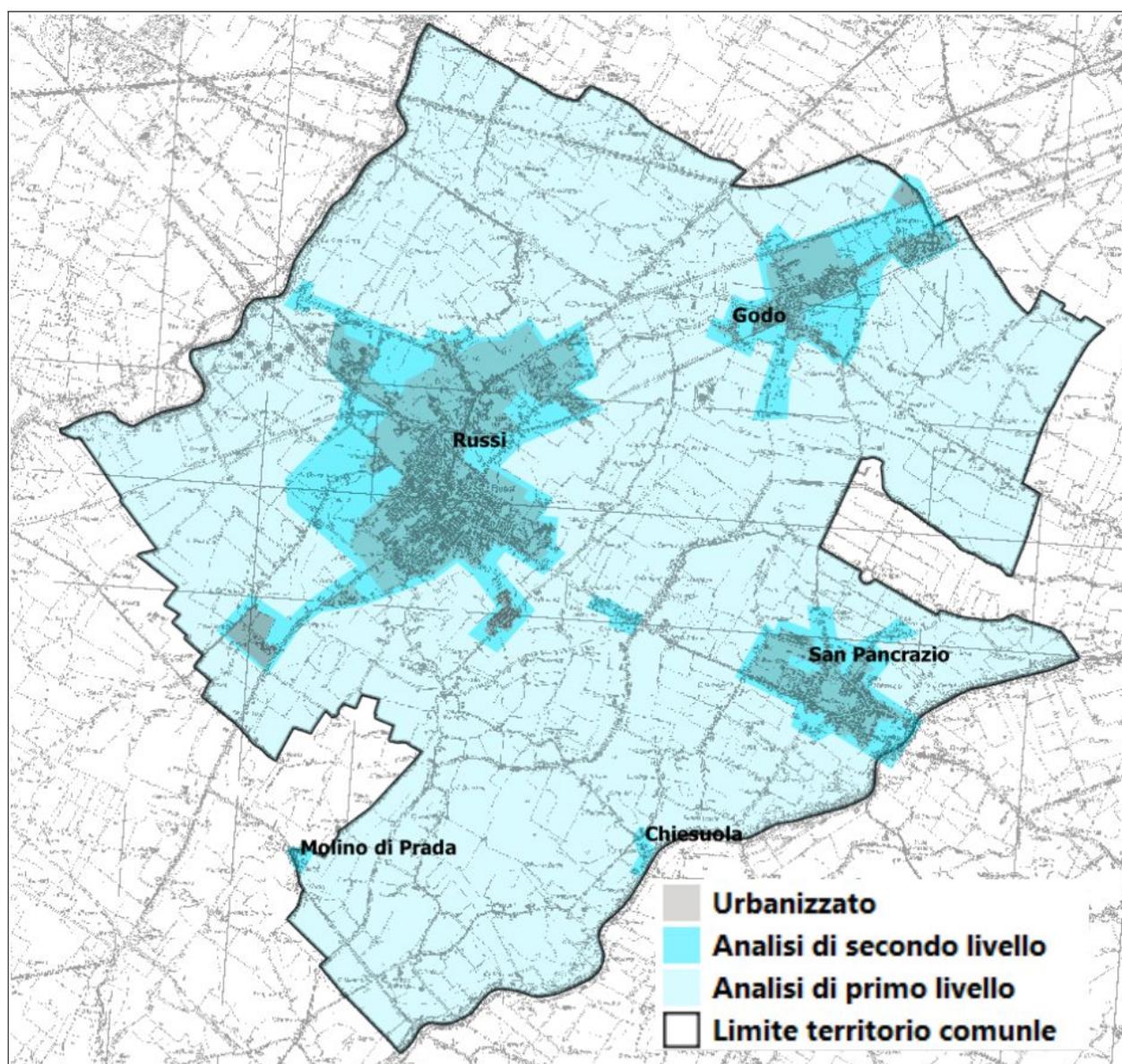


Figura 1.2 - Estensione del territorio comunale interessato dagli approfondimenti sismici di primo e secondo livello (base topografica Regione Emilia-Romagna - CTR 1:25.000)

## 1.2 Riferimenti normativi

Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato A2 della Delibera n. 1238/2020 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna: "Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica e analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 675/2020 .

Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

- ✓ "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, dicembre 2020), 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 e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative:

- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale 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 n. 476/2021 "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) dicui alla Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019, n. 630" e DGR n. 564/2021;
- ✓ LR 30/10/2008 n.19 "Norme per la riduzione del Rischio Sismico";
- ✓ LR 21/12/2017 n.24 "Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio";
- ✓ DM del 17/01/2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni".

## 1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Russi sono i seguenti:

- la presente Relazione Descrittiva (riprodotta in formato \*.pdf) che, oltre a caratterizzare e inquadrare le aree oggetto delle analisi nel contesto geologico, geomorfologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie;
- le tavole cartografiche (riprodotte in formato \*.pdf) elencate in tabella 1.1 e illustrate in dettaglio nel capitolo 8;
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato \*.shp – shapefile);
- le sezioni geologiche di riferimento per il territorio studiato (riprodotte in formato \*.pdf),

contenute nell'Allegato 1.

- i report delle indagini integrative effettuate per questo studio (riprodotte in formato \*.pdf), contenute nell'Allegato 2.

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle indagini	Tavola 1a/b	1:10.000
Carta geologico-tecnica	Tavola 2a/b	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3a/b	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4a/b	1:10.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S	Tavola 5a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica livello 2 - FA <sub>PGA</sub>	Tavola 6a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA <sub>SA1</sub>	Tavola 10a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA <sub>SA2</sub>	Tavola 11a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA <sub>SA3</sub>	Tavola 12a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA <sub>SA4</sub>	Tavola 13a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA <sub>S11</sub>	Tavola 7a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA <sub>S12</sub>	Tavola 8a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 - FA <sub>S13</sub>	Tavola 9a/b	1:10.000
Carta della distribuzione dei valori di H <sub>SM</sub>	Tavola 14a/b	1:10.000

*Tabella 1.1 - Elaborati cartografici predisposti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Russi*

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate nella DGR 1238/2020 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS v.4.1 (CTMS, 2018), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. Per questo lavoro, si è tuttavia considerato il successivo aggiornamento degli standard v.4.2 (dicembre 2020). Gli studi sono inoltre coerenti con la DGR 630/2019 e con le successive DGR 476/2021 e DGR n. 564/2021. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento i raster tipografici georeferenziati della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBTR scala 1.5.000), aggiornati al 2021. Per questo lavoro, la base topografica raster è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate "WGS\_1984\_UTM\_Zone\_33N", per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard MS v.4.2.

## 2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Riferimenti bibliografici

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l’indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il *CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 4.0* (Rovida et al., 2022; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$  d’interesse nella finestra temporale 1000–2014
- il *DBMI15 versione 4.0 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani* utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000–2020 (Locati et al., 2022 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI>);
- il *CFTI5Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea* (Guidoboni et al., 2018), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull’ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismo-indotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la *Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale* (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ad essi sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del sisma atteso, i valori di accelerazione orizzontale massima del suolo (ag) e dei principali “parametri spettrali”, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica;
- la *Zonazione Sismogenetica ZS9* (Meletti e Valensise, 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il *Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.3.0* (DISS Working Group, 2021), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore.

### 2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 versione 4.0 (Locati et al., 2022), riporta per il Capoluogo 29 eventi sismici, con intensità macrosismiche generalmente “moderate” e che arrivano fino al grado VIII della scala MCS (Sieberg, 1930) per il terremoto del novembre 1688 con epicentro Cotignola e al quale

viene attribuita una magnitudo Mw pari a circa 5,84: questo specifico evento ha prodotto effetti maggiori soprattutto nella zona epicentrale, peraltro causando danneggiamenti anche nei Comuni limitrofi della bassa romagna. Un ulteriore evento sismico, con epicentro localizzato nei pressi di Russi ( 2 febbraio 1881) ma di minore magnitudo stimata (Mw =4,69), ha tuttavia provocato danneggiamenti nel Capoluogo anch’essi significativi (intensità macroismica stimata pari a 6-7).

La figure 2.1, 2.2 e 2.3 riportano rispettivamente la localizzazione delle massime intensità macrosismiche registrate nella Provincia di Ravenna, l’elenco cronologico dei terremoti più significativi per il territorio di Russi e il grafico temporale degli eventi sismici con macrointensità stimate (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano v.4.0 agg. 2022).

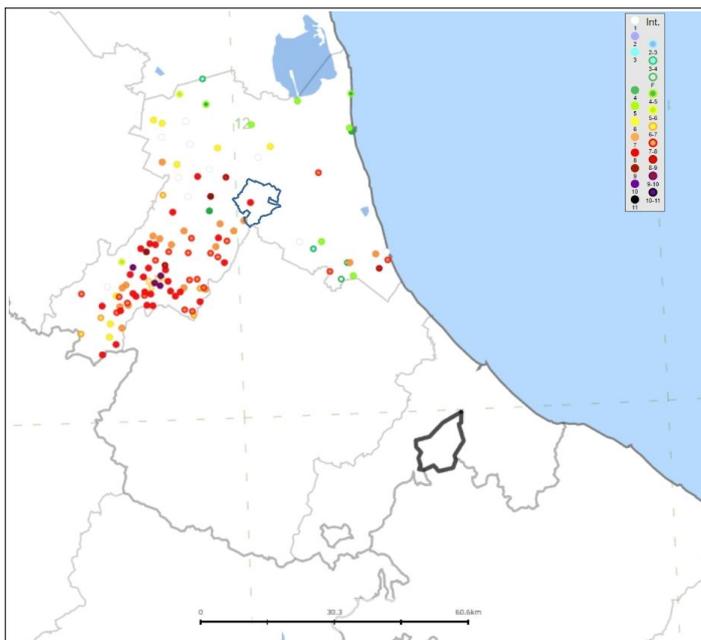
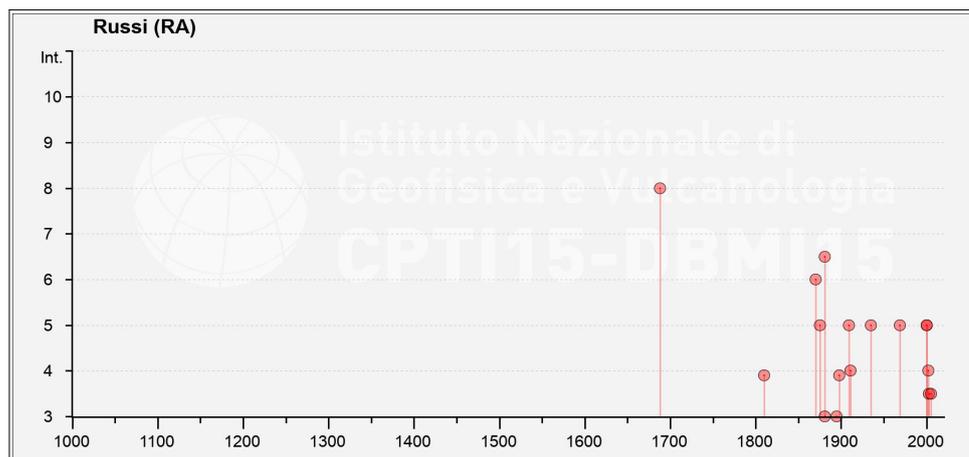


Figura 2.1- Massime intensità macrosismiche registrate nelle località del territorio della Provincia di Ravenna (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano v.4.0 agg. 2022). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Russi (in blu)

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
8	1688	04	11	12	20		Romagna	39	8-9	5.84
F	1810	12	25	00	45		Pianura emiliana	33	6	5.06
6	1870	10	30	18	34		Forlivese	41	8	5.61
5	1875	03	17	23	51		Costa romagnola	144	8	5.74
6-7	1881	02	02				Russi	13	5-6	4.69
3	1881	09	28				Cesena	24	6-7	4.71
3	1895	03	23				Comacchio	33	6	4.65
NF	1897	12	18	07	24	2	Alta Valtiberina	132	7	5.09
F	1898	01	16	13	10		Romagna settentrionale	110	6	4.59
2	1898	03	09	11	43		Romagna settentrionale	68	6	4.59
NF	1904	11	17	05	02		Pistoiese	204	7	5.10
5	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
4	1911	02	19	07	18	3	Forlivese	181	7	5.26
5	1935	06	05	11	48		Faentino	27	6	5.23
5	1969	01	10	16	17	3	Pianura Ravennate	22	5	4.38
NF	1971	10	04	16	43	3	Valnerina	43	5-6	4.51
NF	1972	11	30	11	25	2	Costa pesarese	30		4.52
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1993	11	07	23	21	1	Cesenate	36	4-5	3.95
NF	1993	11	09	13	46	2	Cesenate	28	4-5	3.93
NF	1995	12	27	23	44	2	Forlivese	37	5	3.97
NF	1998	03	26	16	26	1	Appennino umbro-marchigiano	409		5.26
NF	1999	01	25	22	45	5	Appennino forlivese	97	5	4.36
5	2000	05	06	22	07	0	Faentino	85	5	4.08
5	2000	05	08	12	29	5	Faentino	126	5	4.67
2-3	2000	05	10	16	52	1	Faentino	151	5-6	4.82
4	2002	11	02	10	57	4	Ferrarese	79	4	4.21
3-4	2003	12	07	10	20	3	Forlivese	165	5	4.18
3-4	2005	07	15	15	17	1	Forlivese	173	4-5	4.29

Figura 2.2- Terremoti significativi per il Capoluogo, con macrointensità stimata ≥3 (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano v.4.0 agg. 2022)

Figura 2.3- Grafico temporale dei terremoti significativi per il Capolugo e macrointensità stimata (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano v.4.0 agg. 2022)



La figura 2.4 riporta invece la localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi che hanno interessato il territorio studiato (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano v.4.0 agg. 2022).

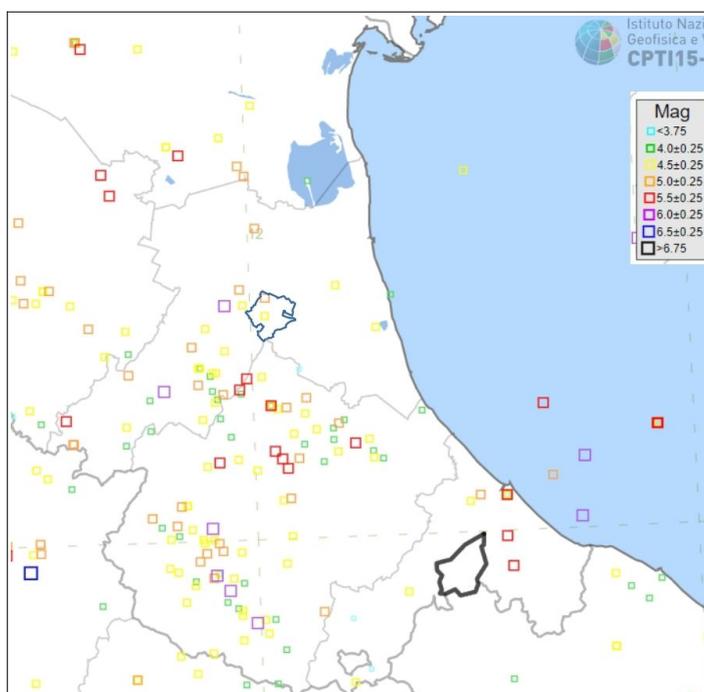


Figura 2.4 - Localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi registrati nella Provincia di Ravenna (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano v.4.0 agg. 2022). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Russi (in blu)

## 2.3 Sorgenti sismogeniche INGV

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano – ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), il territorio comunale ricade nella “Zona 912”, caratterizzata da un valore di  $Mw_{max}$  pari a 6,14. La sismicità deriva dal sistema di faglie del margine avanzato e sepolto dell'arco appenninico.

La figura 2.5 riporta la localizzazione delle sorgenti sismogeniche individuate nel database DISS v. 3.3.0 (DISS Working Group, 2022). Questo fondamentale database evidenzia come il territorio centro meridionale di Russi ricada nella sorgente sismogenica complessa denominata “ITCS011

Ascensione-Armaia”, caratterizzata da una profondità compresa tra 2 e 10 km e “slip rate” tra 0,15 e 0,33 mm/anno. La magnitudo massima deriva dagli eventi sismici noti (Cotignola, 1688 e altri terremoti avvenuti nella pianura romagnola).

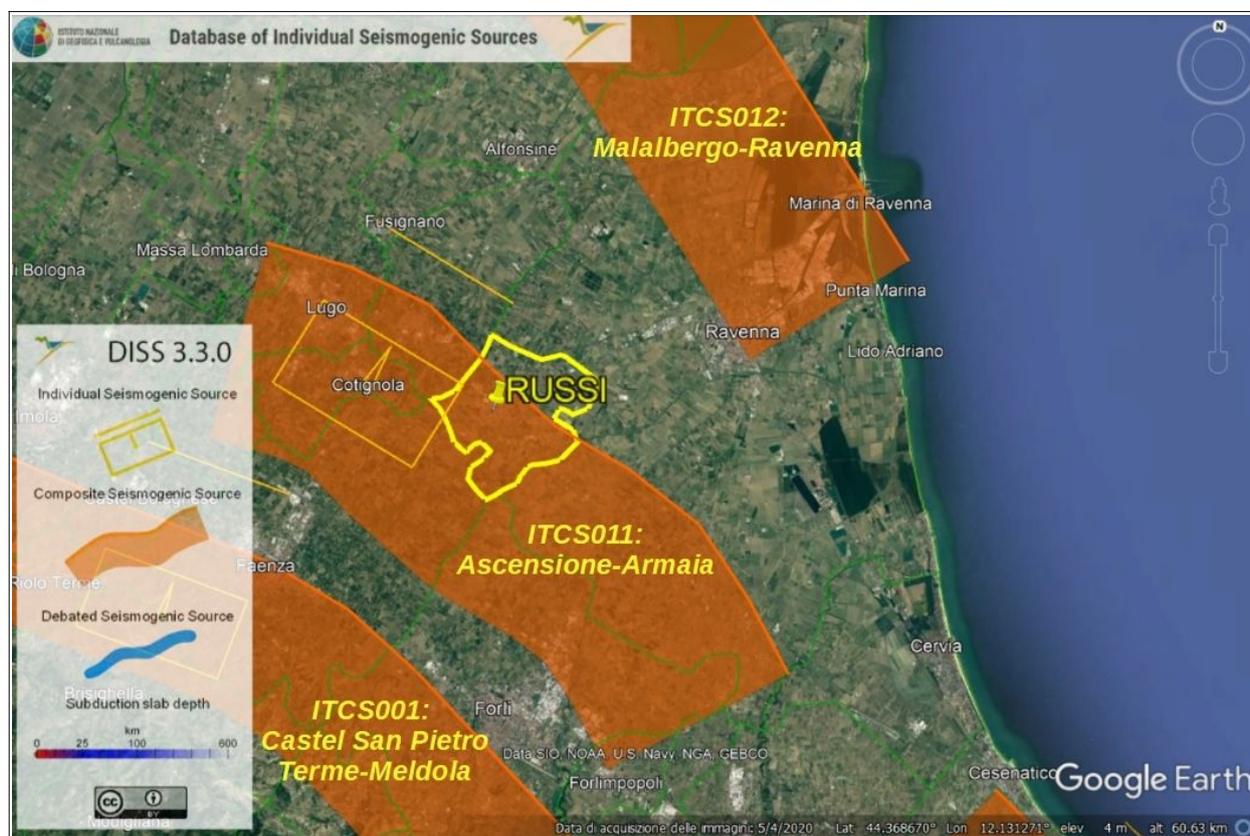


Figura 2.5 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.3.0). Foto aerea: Google Earth

Il territorio di Russi può tuttavia risentire, seppure con minori conseguenze, di terremoti ascrivibili ad ulteriori areali sismogenetici limitrofi, sia riferibili al contesto di margine appenninico emerso (vedi sorgente complessa denominata “ITCS001 Castel San Pietro Terme-Meldola”), sia riferibili al margine appenninico più esterno e sepolto (vedi “ITCS012 Malalbergo-Ravenna”).

## 2.4 Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale: gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato e approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di Microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la LR n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>. Questi indirizzi regionali per la microzonazione sismica, sono stati redatti sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale negli ultimi 40 anni circa, assumendo come riferimento la “pericolosità di base” elaborata da INGV e recepita a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006.

Con le successive DGR 2193/2015 e DGR 630/2019, vengono introdotti sostanziali aggiornamenti agli indirizzi tecnici di riferimento per le analisi sismiche da espletare a supporto della pianificazione territoriale e urbanistica. Queste revisioni hanno considerato come ulteriore riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), le ulteriori esperienze scientifiche seguite ai recenti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009; pianura emiliana del 2012) e, infine, le esperienze di applicazione della DAL 112/2007. In sintesi, le principali novità contenute nella la DGR 2193/2015 e nella DGR 630/2019 consistono:

- ✓ nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate (“livello 2”);
- ✓ nell'introduzione di un ulteriore fattore di amplificazione riferito all'intensità spettrale di Housner  $S_{I3}$  (per l'intervallo di periodo  $T$  compreso tra 0,5 s e 1,5 s);
- ✓ nell'introduzione dei fattori di amplificazione riferiti all'accelerazione spettrale  $SA_1$ ,  $SA_2$ ,  $SA_3$ ,  $SA_4$  (per intervalli di periodo  $T$  rispettivamente di 0,1–0,5s, 0,4–0,8s, 0,7–0,11s, 0,5–1,5s);
- ✓ nella definizione dell'input sismico ( $a_{g,ref}$  al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a  $0,05^\circ$  (mappa MPS04) in analogia con quanto previsto per le NTC 2008);
- ✓ nella richiesta di produrre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del “primo livello” di approfondimento;
- ✓ nella richiesta di produrre una carta della distribuzione sul territorio dei valori di “Hazard”  $H_{SM}$  (Naso et al., 2019).

Gli ultimi aggiornamenti agli indirizzi regionali, apportati con la DGR 476/2021 (e DGR integrativa 564/2021), hanno sostanzialmente riguardato la selezione di nuovi segnali (accelerogrammi) di riferimento per le analisi di risposta sismica locale negli studi di “terzo livello”.

Gli indirizzi RER forniscono gli elementi essenziali per espletare gli studi di pericolosità sismica secondo i tre “livelli” di approfondimento e forniscono inoltre tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (microzonazione sismica di “secondo livello”).

Per quanto riguarda la  $a_g$  al sito di riferimento ( $a_{g,ref}$ ), la figura 2.6 riporta per il territorio comunale di Russi i punti della griglia INGV e i relativi valori di  $a_{refg}$  (mappa MPS04). Ai punti vengono attribuiti i parametri della pericolosità sismica di base e in particolare si attribuiscono il valore dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. La griglia di punti è costruita per tutto il territorio nazionale (densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km) e la mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale a seguito dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

Si evince che per il territorio comunale i valori di  $a_{refg}$  (per terremoti con  $TR = 475$  anni) sono

compresi tra circa 0,190g e 0,176g, con una variabilità relativamente moderata della pericolosità “di base”, in diminuzione verso nord-est.

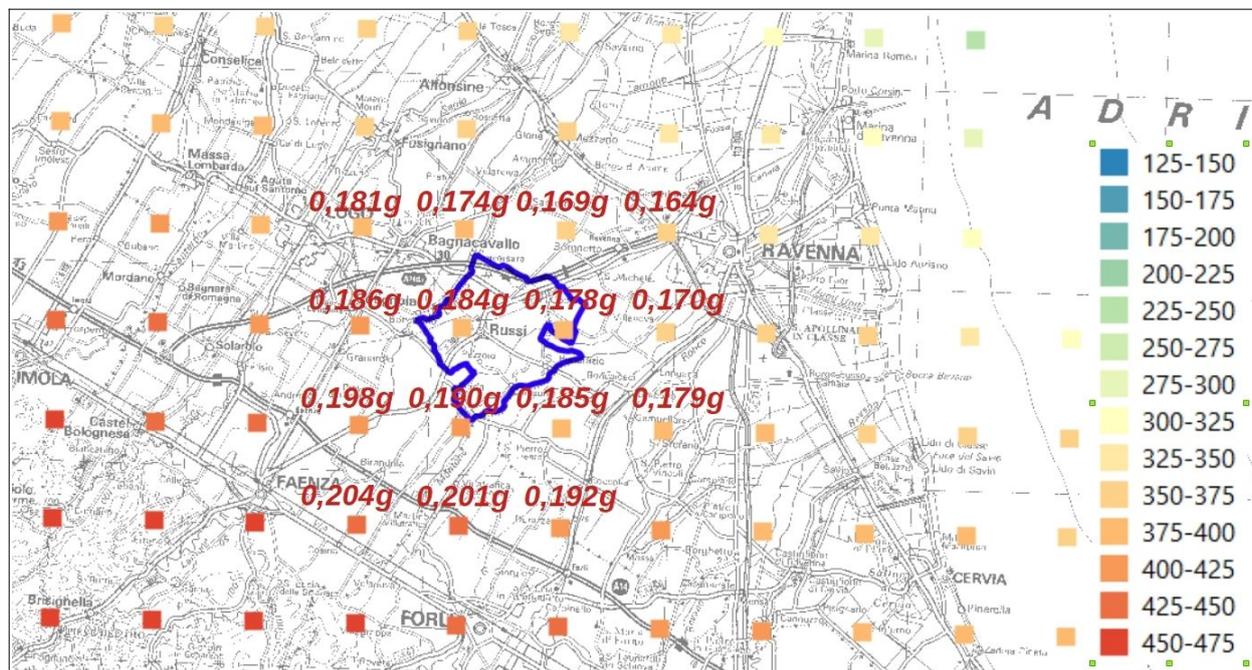


Figura 2.6 - Reticolo INGV di pericolosità sismica ( $a_{ref}$  per terremoti con  $TR = 475$  anni). La figura riporta i punti della griglia interni o limitrofi al territorio comunale di Russi

### 3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

#### 3.1 Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico

Dal punto di vista tettonico, il territorio di Russi si colloca in zona di “fronte” appenninico sepolto nella Pianura Padana (AGIP 1977, 1981, 1982; Boccaletti et al., 1985, 1987; Bally et al., 1986; Castellarin & Vai, 1986; Castellarin et al., 1992; Pieri, 1992; ecc.), che costituisce la propaggine più settentrionale della catena appenninica che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano veneta (Boccaletti et al., 2004). Tale fronte è individuabile nelle “Pieghie Romagnole” (M. Pieri & G. Groppi, 1981).

La figura 3.1 rappresenta uno schema tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle Note Illustrative della *Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (edizione 2016)*. La figura 3.1 evidenzia come le strutture appenniniche proseguano ben oltre il limite dell'appennino aforante, proseguendo nella pianura, sepolte dai sedimenti quaternari padani.



Figura 3.1 - Schema strutturale tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna a aree limitrofe” (ed. 2016)

Nella pianura, gli studi geognostici e sismici (RER-ENI, Agip) permettono di ricostruire l'assetto tettonico ed i meccanismi deformativi del fronte sepolto. In sintesi, il fronte di sovrascorrimento sepolto è costituito da un sistema di elementi tendenzialmente arcuati, articolati fra loro da un sistema di faglie trasversali ad andamento antiappenninico che rappresentano veri e propri svincoli cinematici a carattere trascorrente e lungo cui si sono avuti anche importanti movimenti verticali. Le deformazioni del fronte hanno dato luogo alla formazione di bacini (sinclinali) e accavallamenti (“thrust” nord vergenti, associati ad anticlinali) e il risultato finale è quello di un consistente impilamento dei depositi sedimentari plio-pleistocenici, suturati dai depositi continentali di età più recente (Quaternario).

Mentre la strutturazione dell'Appennino emerso è avvenuta principalmente in età neogenica (Miocene superiore-Pliocene inferiore), la principale attività tettonica del suo margine, ovvero del suo fronte deformato e sepolto, è prevalentemente attribuita al Pliocene medio-superiore e Quaternario.

Nell'area di studio, le strutture tettoniche del fronte appenninico sono sature da depositi di età più recente (coltre alluvionale del Quaternario), sovrapposti ai depositi marini plio-pleistocenici (figura 3.2).

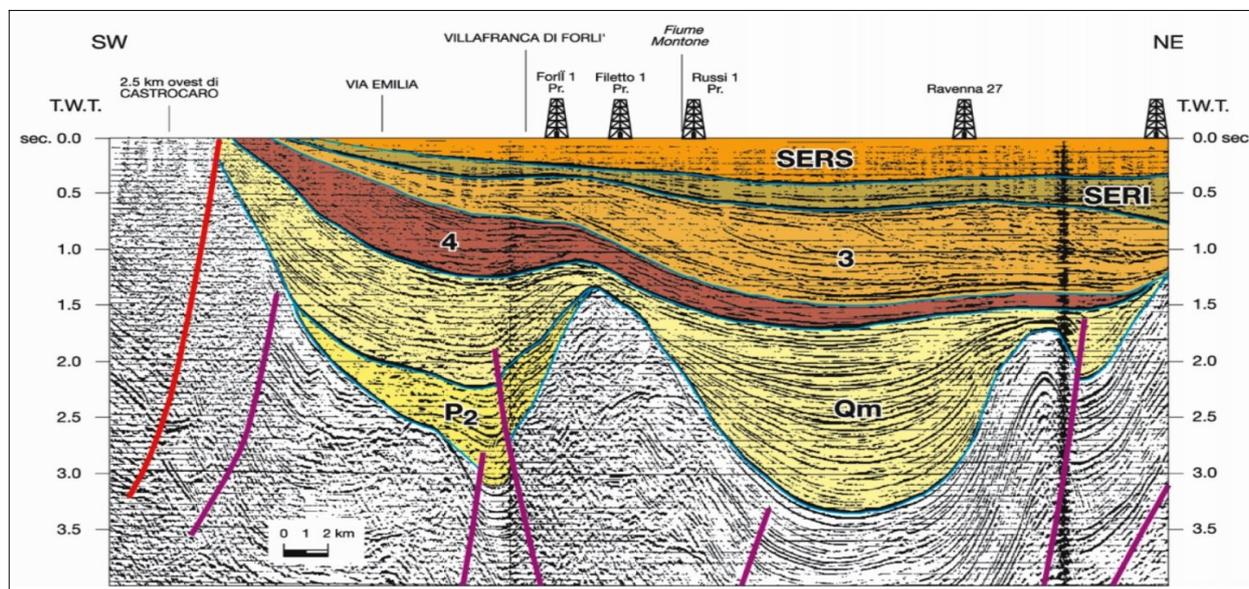


Figura 3.2 - Profilo sismico rappresentativo del margine appenninico sepolto nella pianura, da Castrocaro a oltre Ravenna (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe - ed. 2016)

La coltre alluvionale è prevalentemente caratterizzata da alternanze di ghiaie, sabbie, limi e argille (in funzione delle evoluzioni delle facies deposizionali dominanti), di età Pleistocene medio-Olocene e principalmente attribuibili ai corsi d'acqua Lamone e Montone.

La classificazione stratigrafica dei sedimenti alluvionali di riferimento per questo lavoro è quella proposta e utilizzata in Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP (1998), nonché indicata nella Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 e come ulteriormente schematizzato in figura 3.3.

UNITÀ STRATIGRAFICHE	SEQUENZE DEPOSIZIONALI	ETA' (milioni di anni)	SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni)	UNITÀ IDROSTRATIGRAFICHE		
				GRUPPO ACQUIFERO	COMPLESSO ACQUIFERO	SISTEMA ACQUIFERO
SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLIO SISTEMA ROMAGNOLIO SUPERIORE	Qc <sub>2</sub>	~0.12	PLEISTOCENE SUPERIORE-OLOCENE	A	A1	
					A2	
					A3	
					A4	
SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLIO SISTEMA ROMAGNOLIO INFERIORE	Qc <sub>1</sub>	~0.35-0.45	PLEISTOCENE MEDIO	B	B1	
					B2	
					B3	
					B4	
SABBIE DI IMOLA	Qm	~0.65	PLEISTOCENE INFERIORE	C	C1	
					C2	
					C3	
					C4	
GRUPPO DEL SANTERNO	P2	~1.0	PLIOCENE MEDIO-SUPERIORE		C5	
		~2.2				
		~3.3-3.6				
		~3.9	PLIOCENE INFERIORE MICCENE			
					ACQUIFERO BASALE	

Figura 3.3 - Schema stratigrafico dei depositi plio - quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (RER & ENI-AGIP, 1998)

Convenzionalmente, le coperture alluvionali sono riferibili a due principali e successivi cicli deposizionali così denominati convenzionalmente:

- il “Sintema Emiliano–Romagnolo Inferiore” (SERI o AEI), che costituisce lo spessore di alluvioni più profonde e sovrapposte ai depositi marini plio–pleistocenici;
- il Sintema Emiliano–Romagnolo Superiore (SERS o AES).

All’interno del Sintema Emiliano–Romagnolo Superiore (AES) sono classificate unità di range inferiore (subsintemi) e costituiti da alternanze cicliche di depositi fini (argille e limi) riferibili a facies deposizionale di piana alluvionale e depositi prevalentemente sabbiosi riferibili a barre/canali/argini fluviali.

Nella pianura padana, lo spessore complessivo dei depositi alluvionali è fortemente variabile, in funzione della morfologia delle strutture tettonizzate sepolte: studi RER & ENI–Agip (1998) hanno evidenziato come, nelle aree di sinclinale, la coltre alluvionale superi anche i 500 metri, mentre nelle aree di anticlinale si hanno potenze decisamente inferiori ai 100 metri.

In sintesi, le unità stratigrafiche alluvionali di interesse per l’area di studio sono le seguenti (dal basso verso la superficie):

**SINTEMA EMILIANO–ROMAGNOLO INFERIORE (AEI)** → nelle stratigrafie di sottosuolo di questo settore della pianura, il limite inferiore dei depositi AEI viene posizionato in corrispondenza del contatto netto fra i depositi fluvio–deltizi basali del supersintema ed i depositi sabbioso–ghiaiosi litorali e di delta–conoide riferiti al tetto delle Sabbie di Imola (IMO). L’età di questi depositi è attribuita al pleistocene medio (0,70–0,75 Ma → 0,40–0,45 Ma).

**SINTEMA EMILIANO–ROMAGNOLO SUPERIORE (AES) BASALE INDIFFERENZIATO** → Nel sottosuolo della pianura AES è costituito dall’alternanza ciclica di argille organiche, limi, sabbie e ghiaie di ambiente alluvionale e subordinatamente deltizio e costiero. Il contatto basale risulta più marcato verso nord, con maggiori contrasti di facies tra depositi sabbiosi fluvio–deltizi e di piattaforma di AEI con i depositi più fini di piana alluvionale e deltizia di AES.

**SUBSINTEMA DI BAZZANO (AES6)** → Questi depositi sono stati correlati nel sottosuolo (su base geometrica) con i depositi grossolani sommitali di un ciclo trasgressivo – regressivo. I depositi di questo ciclo hanno varie decine di metri di spessore e poggiano in contatto netto sulle ghiaie e sabbie di canale fluviale del ciclo sottostante. La base del ciclo è costituita da depositi fini alluvionali, talora sostanza organica, di origine palustre, passanti a depositi costituiti da alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi e argille di argine, rotta e piana inondabile. Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile. La parte superiore è data da sedimenti prevalentemente sabbiosi di canale fluviale in corpi lateralmente estesi di spessore fino a 20 metri circa e caratterizzati da contatti netti ed erosivi sui depositi sottostanti.

L’unità è chiusa al tetto da depositi argillosi di piana alluvionale e palude del ciclo sovrastante. Età deposizionale: Pleistocene medio (circa 230 .000–130.000 anni).

**SUBSINTEMA DI VILLA VERRUCCHIO (AES7)** → La porzione basale trasgressiva del ciclo è costituita da depositi fini di tracimazione fluviale e piana inondabile contenenti livelli metrici di argille e limi localmente ricchi di sostanza organica di origine palustre. Questi depositi passano verso NE ad argille organiche lagunari e sabbie marine di cordone litorale. Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile dove sono frequenti livelli pedogenizzati (paleosuoli). La

porzione sommitale del ciclo è caratterizzata da più frequenti depositi sabbiosi di canale fluviale a geometria nastriforme (nell'area di studio riferibili principalmente ai corsi d'acqua Savena e Idice). Lateralmente, questi depositi grossolani di canale fluviale passano a depositi fini di tracimazione fluviale pedogenizzati. Il limite di tetto di AES7 è ricoperto dai depositi trasgressivi, prevalentemente organici di piana alluvionale e di palude, del subsistema sovrastante (AES8). Età deposizionale: Pleistocene superiore (circa 125.000 → 18.000 anni).

SUBSISTEMA DI RAVENNA (AES8) → Si tratta di un'unità relativamente superficiale e con spessore massimo di circa 20 metri, ed è perciò particolarmente investigata (anche per l'intero spessore) da molte indagini geognostiche. L'età deposizionale è compresa tra circa 14.000 anni e l'attuale, corrispondente alla fase di rapida risalita eustatica e di miglioramento climatico che si sviluppa a partire dal tardo Pleistocene fino a tutto l'Olocene.

In questo subsistema è stata distinta un'unità di rango gerarchico inferiore: l'UNITÀ DI MODENA (AES8a) la quale contiene i depositi più superficiali e più recenti, compresi quelli attualmente in evoluzione. AES8a è un'unità di pochi metri di spessore, che raggiunge i 10 m solo localmente, in corrispondenza dei dossi fluviali.

### 3.2 Geomorfologia

L'evoluzione della pianura olocenica è riconducibile ad un modello semplice, almeno nelle linee generali. I corsi d'acqua appenninici a valle delle conoidi pedemontane, poco attive durante l'Olocene (ultimi 15.000 anni), oggi prevalentemente in erosione, tendono a proseguire verso il collettore principale su alvei pensili, formati da sedimenti che il corso d'acqua non è più in grado di portare in carico.

Nel caso di rotte e tracimazioni, in natura frequente, le acque invadono la pianura circostante depositando dapprima i sedimenti più grossolani nelle vicinanze dell'alveo, più lontano i sedimenti più fini (limi sabbiosi e limi) e nelle conche morfologiche, ove le acque possono rimanere a lungo e decantare, si depositano limi argillosi ed anche argille.

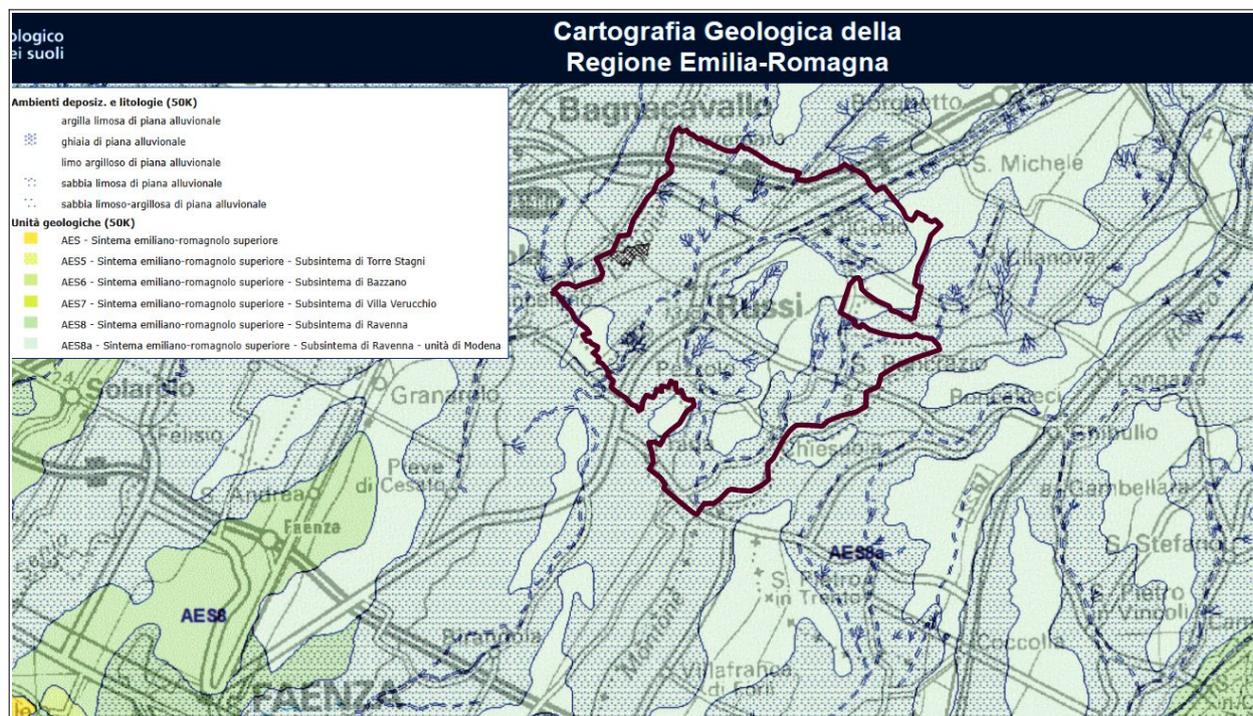
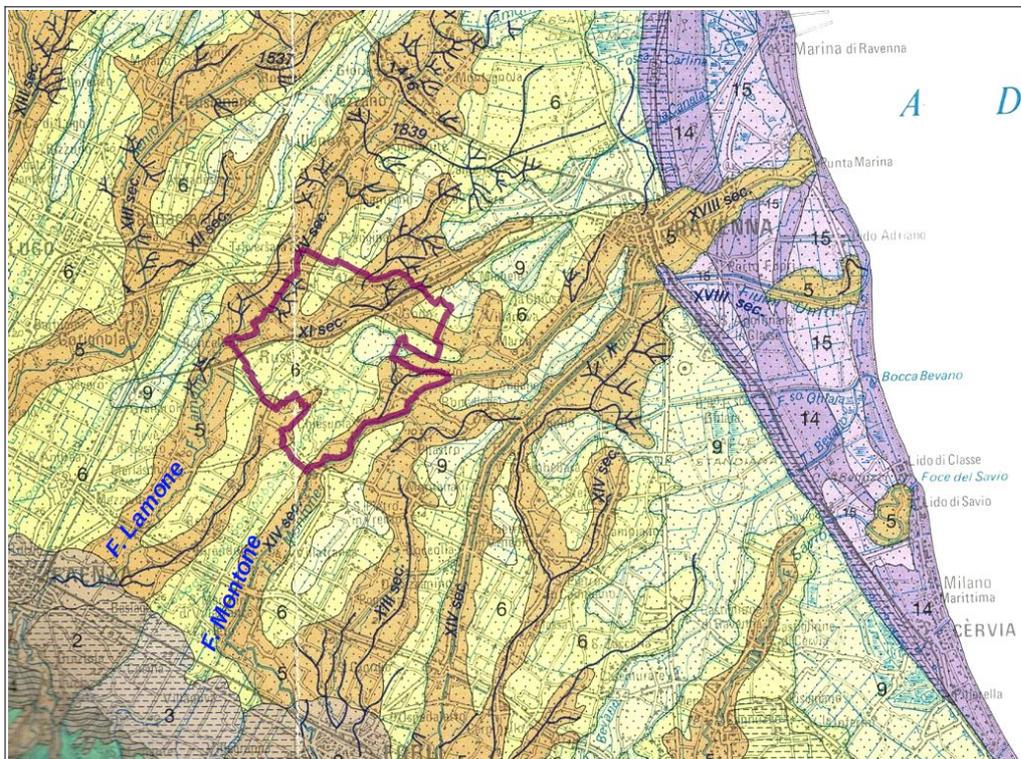
A seconda delle condizioni di drenaggio locale le acque possono permanere per tempi più o meno lunghi nelle aree esondate, fino a formare paludi e laghi permanenti, presupposto alla formazione di potenti depositi di argille di decantazione e torbe. Per corsi d'acqua di pianura non arginati artificialmente, rotte e tracimazioni sono un fenomeno ricorrente che crea le condizioni per modifiche e divagazioni dell'alveo, ciò avviene con frequenza assai alta nei bacini subsidenti che caratterizzano la pianura padana. La velocità di subsidenza naturale condiziona la velocità di accrezione verticale, ma la sua variazione geografica condiziona anche la distribuzione spaziale dei corsi d'acqua.

La distribuzione delle litologie di superficie e del primo sottosuolo, così come l'assetto morfologico della pianura, sono quindi strettamente legati ai processi strutturali e di sedimentazione e alla loro disposizione nel tempo.

Alla fine degli anni settanta, gli studi pedologici dell'allora "Servizio Cartografico" regionale hanno consentito di avviare un'accurata ricostruzione degli ambienti deposizionali recenti anche attraverso la interpretazione di foto aeree. Ciò ha permesso di giungere a una completa ricostruzione della morfologia del sottosuolo dell'intera pianura regionale, tuttora in continuo aggiornamento e tuttavia ancora basata sui contenuti del primo impianto (D. Preti, 1987). Le successive edizioni della carta morfologica, sempre aggiornate e corrette, hanno anche

compreso datazioni storiche di probabile formazione dei corpi geologici più recenti (figura 3.4). la seguente figura 3.5 ripropone uno stralcio della più recente cartografia geologica RER dove è possibile distinguere i depositi più recenti (Unità di Modena – AES8a).

*Figura 3.4 – Stralcio della Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna scala 1:250.000 (a cura di D. Preti, RER, 1999). I depositi di piana alluvionale sono numerati progressivamente da n.5 ("canale e argine prossimale" sabbiosi) a n. 9 (depositi "interfluviali e depositi di palude" argillosi). Sono riportate le principali tracce dei paleoalvei con datazione storica*



*Figura 3.5 – Stralcio della Carta Geologica di Pianura RER a cura del SGSS regionale ([https://geo.regione.emilia-romagna.it/cartografia\\_sgss](https://geo.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss))*

Per il territorio di studio, la deposizione alluvionale è prevalentemente riconducibile ai corsi d'acqua Lamone e Montone, con un assetto morfologico più superficiale caratterizzato dalla "pensilità" di questi corsi d'acqua e con paleoalvei sub affioranti di età deposizionale compresa tra il XI secolo e il XIV secolo d.c.).

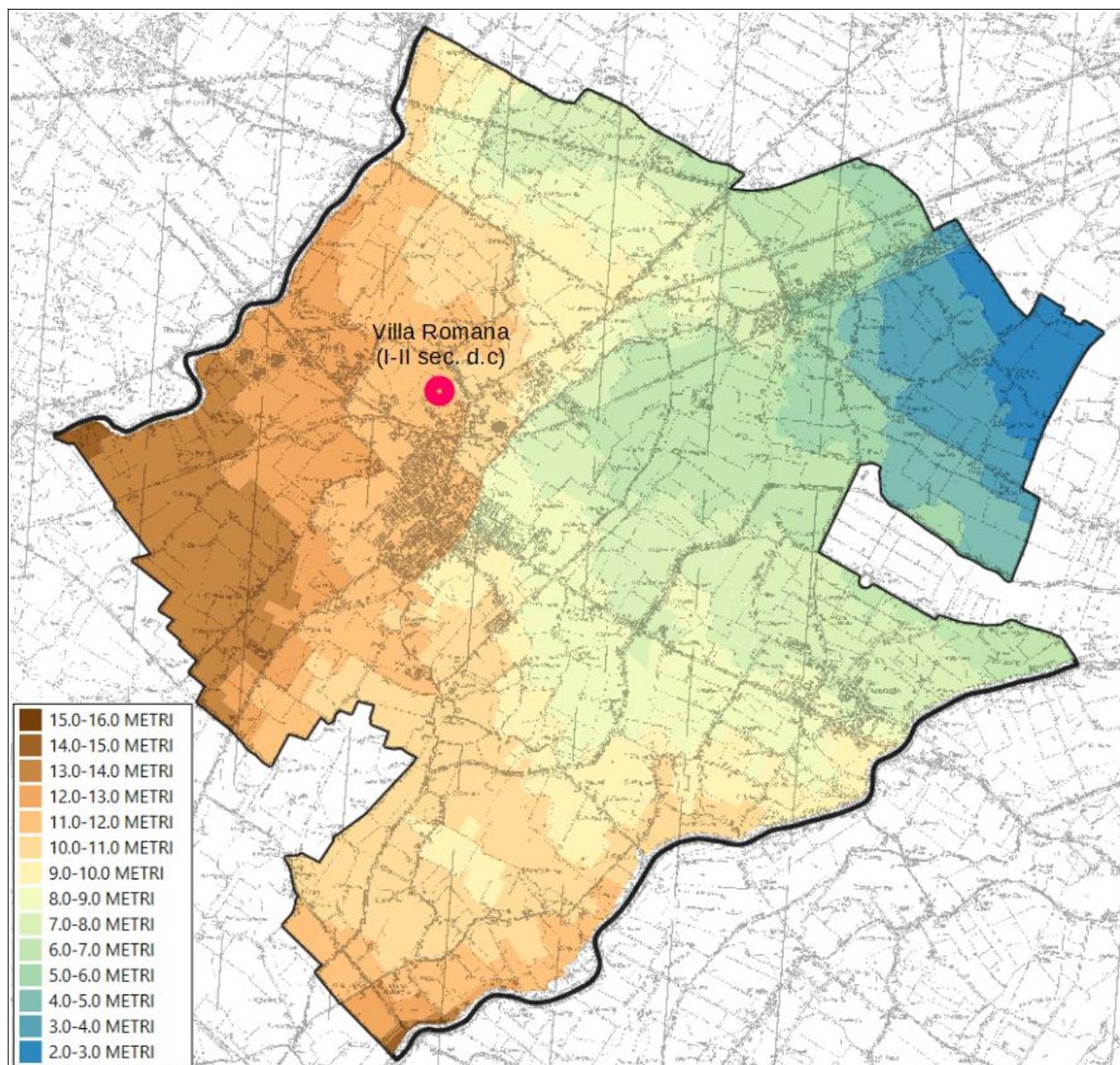


Figura 3.6 - Ricostruzione altimetrica del territorio di Russi. Viene localizzato il sito archeologico della villa romana

Per questo Studio è stata inoltre effettuata una ricostruzione morfologica del territorio comunale basata sulle quote indicate nelle carte topografiche regionali (CTR scala 1:5.000) e sul controllo degli elementi morfologici naturali e antropici (rilevati artificiali; sistemazioni agricole; ecc.), riproposta nella figura 3.6. Dalla ricostruzione si evince un significativo dislivello (circa 14÷13 metri) tra il settore comunale occidentale (più elevato, a ridosso del fiume Lamone) e quello orientale ("conca morfologica").

La figura 3.6, inoltre, riporta la localizzazione di un sito archeologico molto importante anche dal punto di vista geologico: si tratta, infatti, del rinvenimento di una villa romana che ha avuto

il suo massimo splendore nel I-II sec. d.c. e che, successivamente, è stata progressivamente abbandonata e sepolta dalle tracimazioni del fiume Lamone. Il piano romano è stato infatti riscoperto negli anni '50 del secolo scorso a circa 9÷10 metri di profondità, a dimostrazione dell'intensa attività deposizionale fluviale nel periodo post-romano fino alle più recenti bonifiche (XI-XIV secolo). Anche l'assenza, rispetto a zone poco lontane, dell'antica "centuriazione" romana (ereditata anche nelle successive evoluzioni dell'assetto territoriale), appare come un'ulteriore testimonianza dei frequenti alluvionamenti subiti nel territorio in oggetto.

## 4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

La fase iniziale di lavoro ha previsto la raccolta, la selezione e il riordino delle indagini geognostiche/geofisiche e di laboratorio disponibili per il territorio di studiato. In questo senso, si è potuto disporre di un buon numero di prove che sono state raccolte e archiviate dalla Regione Emilia-Romagna, e dal Comune e in particolare:

- ✓ dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che ha fornito le prove della propria banca dati geognostica;
- ✓ dal Comune di Russi che ha fornito dati di indagini geognostiche archiviate presso l'Ufficio Tecnico comunale (relazioni geologiche redatte per progetti di costruzione e/o Piani Attuativi).

Le prove pregresse per il Comune di Russi, implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro, sono state così distinte per tipologia:

- ✓ n. 15 sondaggi a carotaggio continuo (S);
- ✓ n. 35 pozzi per acqua (PA);
- ✓ n. 3 trincee;
- ✓ n. 116 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- ✓ n. 14 prove penetrometriche con punta elettrica (CPTe);
- ✓ n. 34 prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU);
- ✓ n. 40 prove penetrometriche dinamiche leggere (DL);
- ✓ n. 1 prova penetrometrica dinamica superpesante (DPSH);
- ✓ n. 1 prova sismica in foro "Down-Hole" (DH);
- ✓ n. 8 stendimenti sismici attivi MASW;
- ✓ n. 1 stendimento sismico passivo Re.Mi.;
- ✓ n. 6 tomografie elettriche;
- ✓ n. 33 registrazioni dei microtremori a stazione singola (HVSr).

Tra le prove di repertorio, è risultato molto utile disporre, come vedremo, anche dei dati numerici di undici penetrometrie CPTe/CPTU eseguite dalla RER (nell'ambito del Progetto Carta Geologica d'Italia).

Si evince, pertanto un buon numero e densità di prove disponibili per il territorio urbanizzato di Russi, tuttavia nel corso dello studio di MS è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità dell'archivio, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Dal confronto di indagini analoghe eseguite da soggetti diversi, in tempi diversi sulla stessa area, si sono evidenziati risultati a volte non coerenti. Per quanto possibile, lo studio di MS ha dunque espletato una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio. Le figure 4.1 e 4.2 riportano la distribuzione delle prove di repertorio nell'intero territorio comunale e delle ulteriori indagini integrative eseguite, come vedremo, per questo studio.

I report e i diagrammi degli esiti delle indagini puntuali e lineari sono riportati anche in formato \*.pdf nella cartella Indagini\documenti.

#### 4.1 Le nuove indagini eseguite

Per l'elaborazione della MS di "livello 2" si è reso indispensabile effettuare ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico. Il "piano delle indagini" (tipologia; quantità; localizzazione) è stato definito allo scopo di perseguire i seguenti obiettivi:

- fornire la caratterizzazione sismostratigrafica più raffinata del sottosuolo negli insediamenti urbani, più "vulnerabili" (es. centro storico del Capoluogo e frazioni);
- proporre una "base dati" (geognostica e geofisica) di riferimento per gli ulteriori approfondimenti sismici nelle zone che possono essere caratterizzate da potenziale instabilità.

In questo senso, nel territorio di Russi sono state complessivamente eseguite le seguenti indagini:

- ✓ *n. 15 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU)* → realizzate con strumento penetrometrico di contrasto massimo pari a 200 kN e montato su semovente cingolato "Pagani", quest'ultimo dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.1). Le prove sono state spinte fino alla massima profondità di 20 metri e hanno permesso di definire le caratteristiche tessiturali e geotecniche nell'intervallo più utile anche ai fini delle verifiche della possibilità di liquefazione e cedimenti post-sisma. Si rammenta come le prove penetrometriche elettriche consentano una migliore definizione tessiturale dei sedimenti attraversati rispetto alle altre tipologie di prove penetrometriche (CPT; DPSH; ecc.), potendo registrare dati delle resistenze dei sedimenti pressoché continui (una lettura ogni cm di avanzamento).



Foto 4.1 - Prove CPTU eseguite nel Capoluogo (a sx) e presso la frazione Godo (a dx)

- ✓ *n. 3 stendimenti sismici in array bidimensionale ESAC* (foto 4.2)→ Per questo studio, sono stati elaborati tre modelli sismostratigrafici profondi mediante tecniche di investigazione sismiche basate sulla raccolta ed analisi del rumore sismico ambientale, utilizzando il metodo ESAC (Autocorrelazione Spaziale Migliorato). L'utilizzo delle tecniche passive sull'analisi spettrale delle onde Rayleigh (R) è giustificata dal fatto che il rumore sismico ambientale è ricco di onde superficiali tipo R e che in un mezzo omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione  $V_s$  può essere ricavata indirettamente dall'analisi spettrale delle onde R secondo equazioni sperimentali. Tale tecnica permette di ottenere i profili verticali (1D) della velocità media delle onde di taglio "S" anche molto profonde, favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock sismico. Nel caso specifico di Russi le tre prove hanno consentito l'elaborazione di modelli sismostratigrafici fino a circa -150 metri circa. Un secondo vantaggio della tecnica ESAC riguarda lo svincolo dal problema della direzionalità della/e sorgente/i di rumore sismico ambientale in quanto è già implicito nella stessa geometria utilizzata di tipo 2D, impiegando geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz). Le geometrie degli stendimenti effettuati sono "a elle" con spaziatura tra i geofoni di 5 metri (lunghezza complessiva degli stendimenti 115 metri).

Le prove ESAC sono state eseguite nel Capoluogo e presso le frazioni Godo e San Pancrazio.

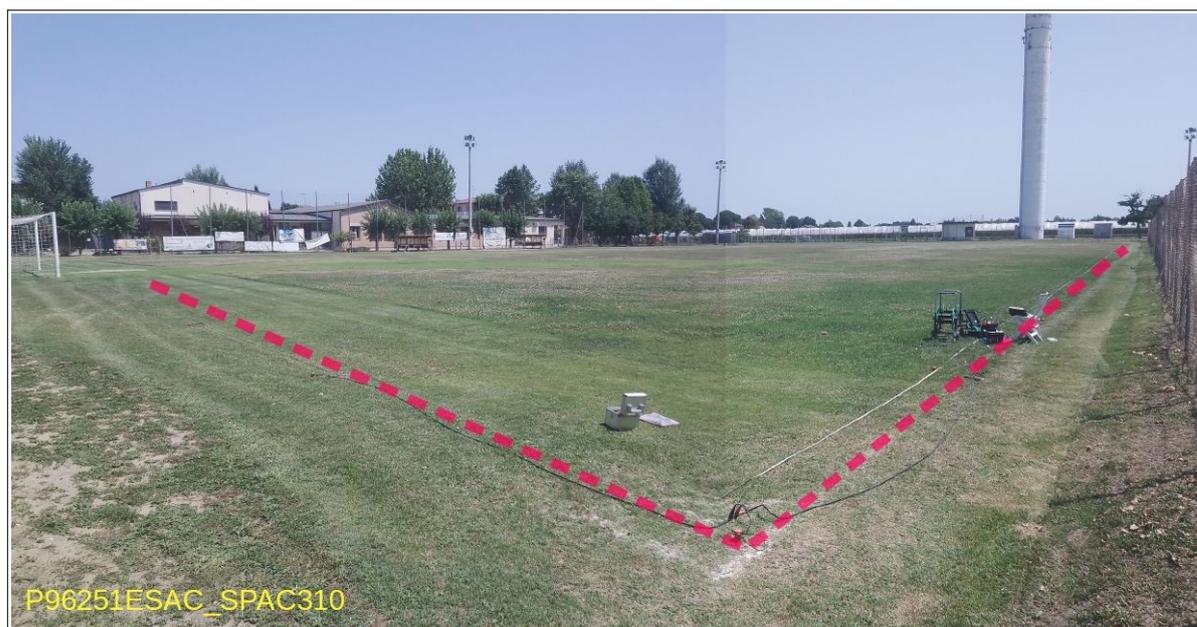


Foto 4.2 - Prova ESAC\_SPAC eseguita nel Capoluogo (Campo sportivo via Pascoli)

- ✓ *n. 6 stendimenti in array lineare MASW/RE.MI* (foto 4.3)→ eseguiti nel Capoluogo, nelle frazioni Godo e San Pancrazio e presso il Palazzo San Giacomo. Le prove MASW/ReMi hanno consentito la stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ) nel sottosuolo fino a circa -35÷40 metri di profondità. La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW/ReMi ha previsto acquisizioni dei segnali sismici con sismografo multicanale ABEM RAS24 a 24 canali, passivi e attivi (generati da sorgenti energizzanti artificiali lungo lo stendimento dei geofoni).

Foto 4.3 – Stendimento MASW/Re.Mi. Eseguito presso Palazzo San Giacomo



- ✓ n. 24 registrazioni del *microtremore sismico a stazione singola* con tecnica HVSR (foto 4.4)
  - Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale “Tromino” e sono finalizzate all’elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo (Albarello e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l’amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Foto 4.4 – Registrazione HVSR effettuata nella frazione San Pancrazio



Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all’attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole (10–15 m/s<sup>2</sup>), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e

misurabili con tecniche di acquisizione dette passive. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti e/o 60 minuti.

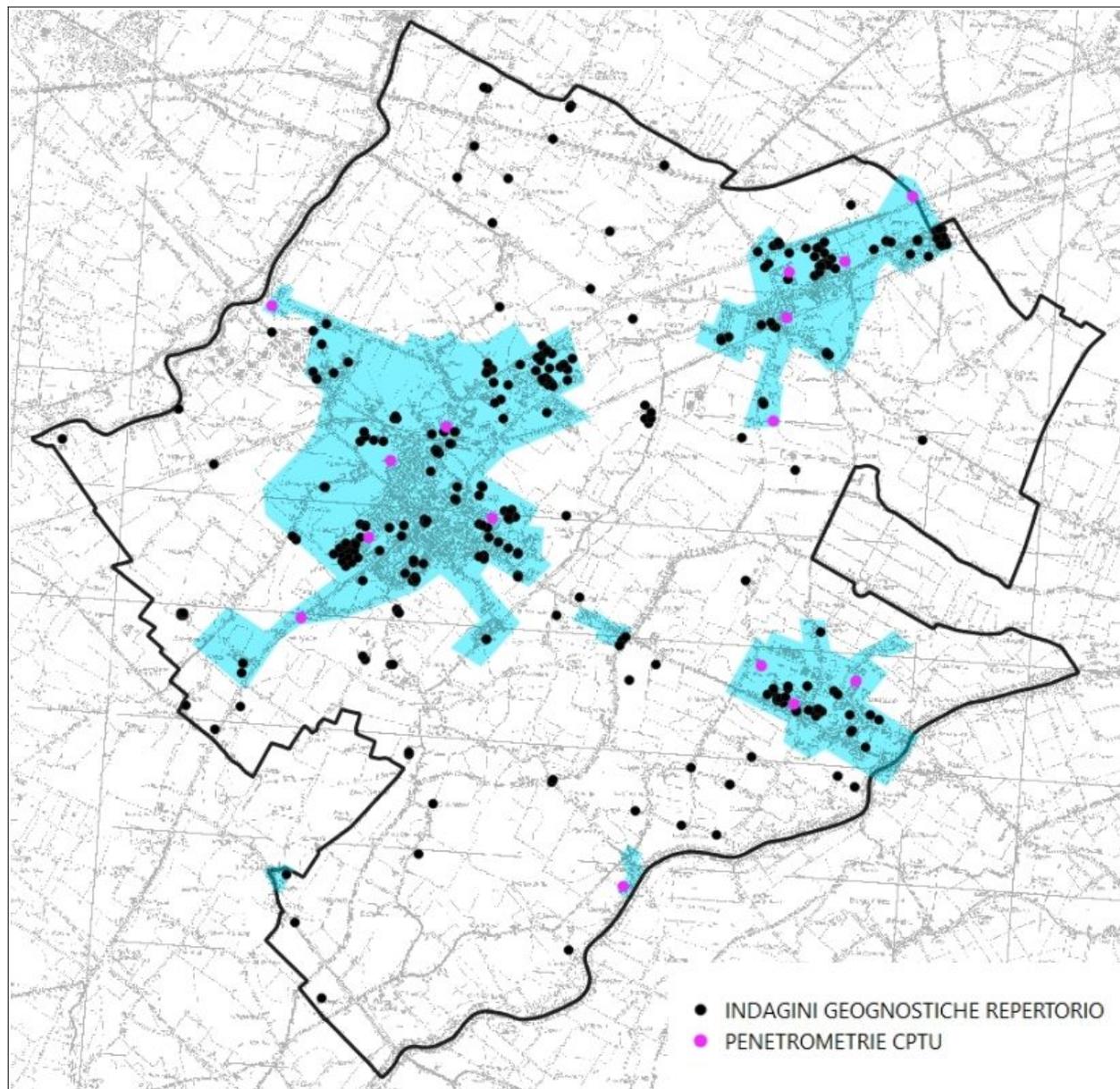


Figura 4.1– Localizzazione delle indagini geognostiche disponibili per lo studio di microzonazione sismica. Con simbologia in colore nero: prove di repertorio. Con simbologia in colore fucsia: prove CPTU eseguite per questo studio. In azzurro sono rappresentati gli areali interessati dagli approfondimenti sismici di "livello 2"

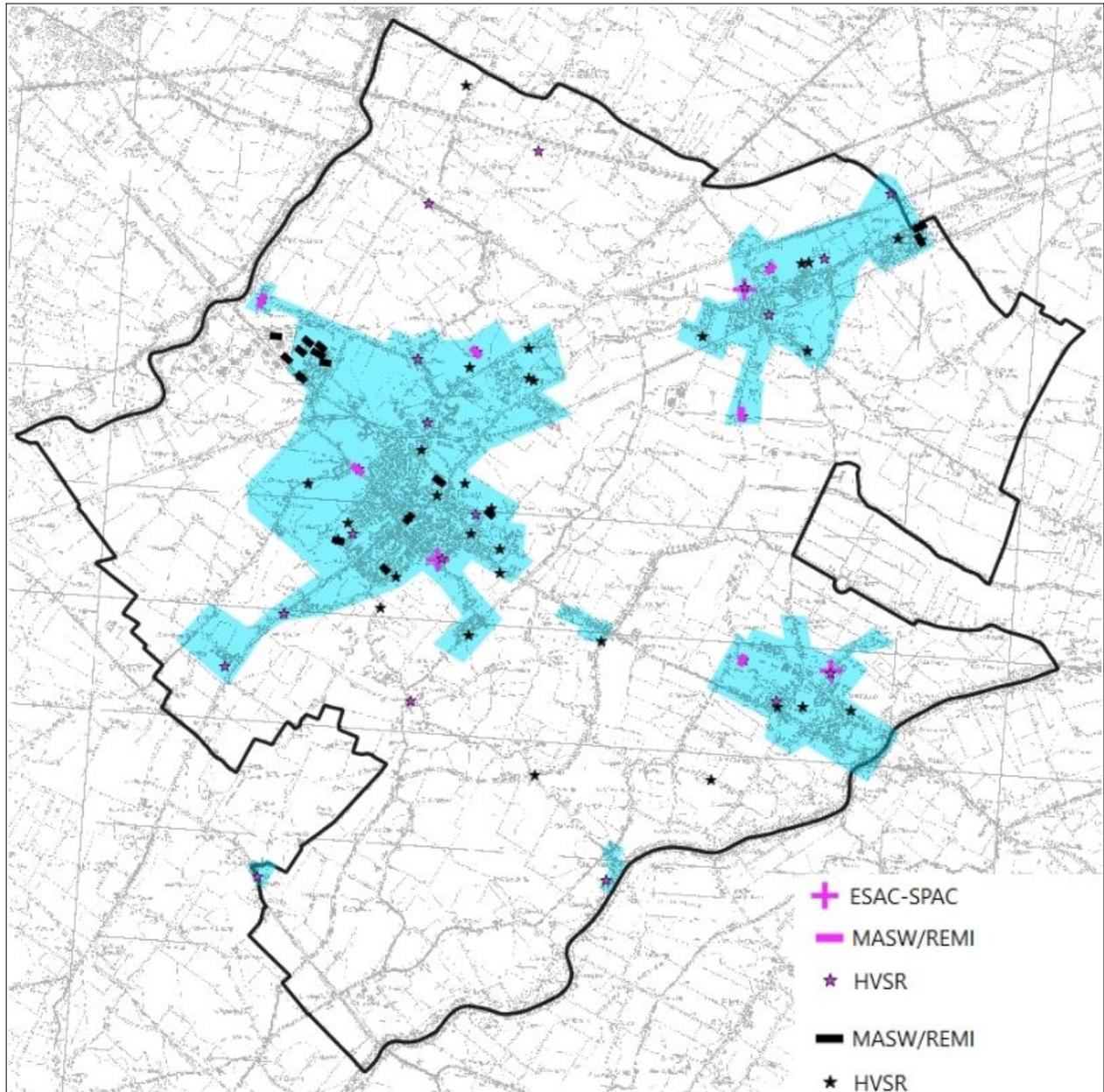


Figura 4.2- Localizzazione delle indagini geofisiche disponibili per lo studio di microzonazione sismica. Con simbologia in colore nero: prove di repertorio. Con simbologia in colore fucsia: prove ESAC-SPAC, MASW e HVSR eseguite per questo studio. In azzurro sono rappresentati gli areali interessati dagli approfondimenti sismici di "livello 2"

## 5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3 e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione hanno permesso la classificazione e la modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica.

Per lo studio di microzonazione sismica di Russi si è potuto disporre di molti punti di controllo, seppure con evidenti concentrazioni in alcune aree, tutto sommato ben distribuiti sull'intero territorio comunale. Questo consente di ottenere un'attendibile ricostruzione delle caratteristiche litologiche e sismiche dei primi 20÷40 metri di sottosuolo nelle aree interessate dallo studio.

Le conoscenze litostratigrafiche degli areali studiati vengono sintetizzate nella Carta Geologico Tecnica, che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5÷6 metri) e nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), che presenta la suddivisione del territorio comunale sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica profonda (fino al bedrock sismico) nel territorio studiato.

Vengono di seguito illustrati gli elementi di sintesi riguardanti la modellazione di sottosuolo. Ulteriori informazioni sono riportate anche nei successivi capitoli.

### 5.1 Sottosuolo profondo

La ricostruzione del modello geologico profondo del territorio studiato è possibile attraverso l'analisi e delle sezioni geologiche già disponibili e l'elaborazione di nuove sezioni geologiche, le cui tracce vengono riportate nelle cartografie di microzonazione sismica (figure 5.1). Si tratta in particolare:

- 1) della sezione geologica profonda (sezione n.58) elaborate dal Servizio Geologico della Regione Emilia Romagna nell'ambito degli studi del progetto CARG<sup>1</sup>. La sezione è stata rinominata "sezione n.1";
- 2) della sezione geologica "F" riportata nella Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (a cura di ISPRA) e rinominata "sezione n.2";
- 3) della nuova sezione geologica elaborata dallo Studio Scrivente, che attraversa da NNO a SSE il Capoluogo ed è stata denominata "sezione n.3";
- 4) della nuova sezione geologica elaborata dallo Studio Scrivente, che attraversa da NNO a SSE la frazione San Pancrazio ed è stata denominata "sezione n.4".

Le nuove sezioni realizzate per il Capoluogo e per San Pancrazio includono i dati litotecnici di alcune delle prove prove CPTU realizzate per questo studio (CPTU306; CPTU304; CPTU300; CPTU301) e altre penetrometrie CPT e CPTe disponibili, con profondità investigate fino a circa 30 metri.

---

<sup>1</sup> <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/sezioni-geologiche-prove-geognostiche-pianura>

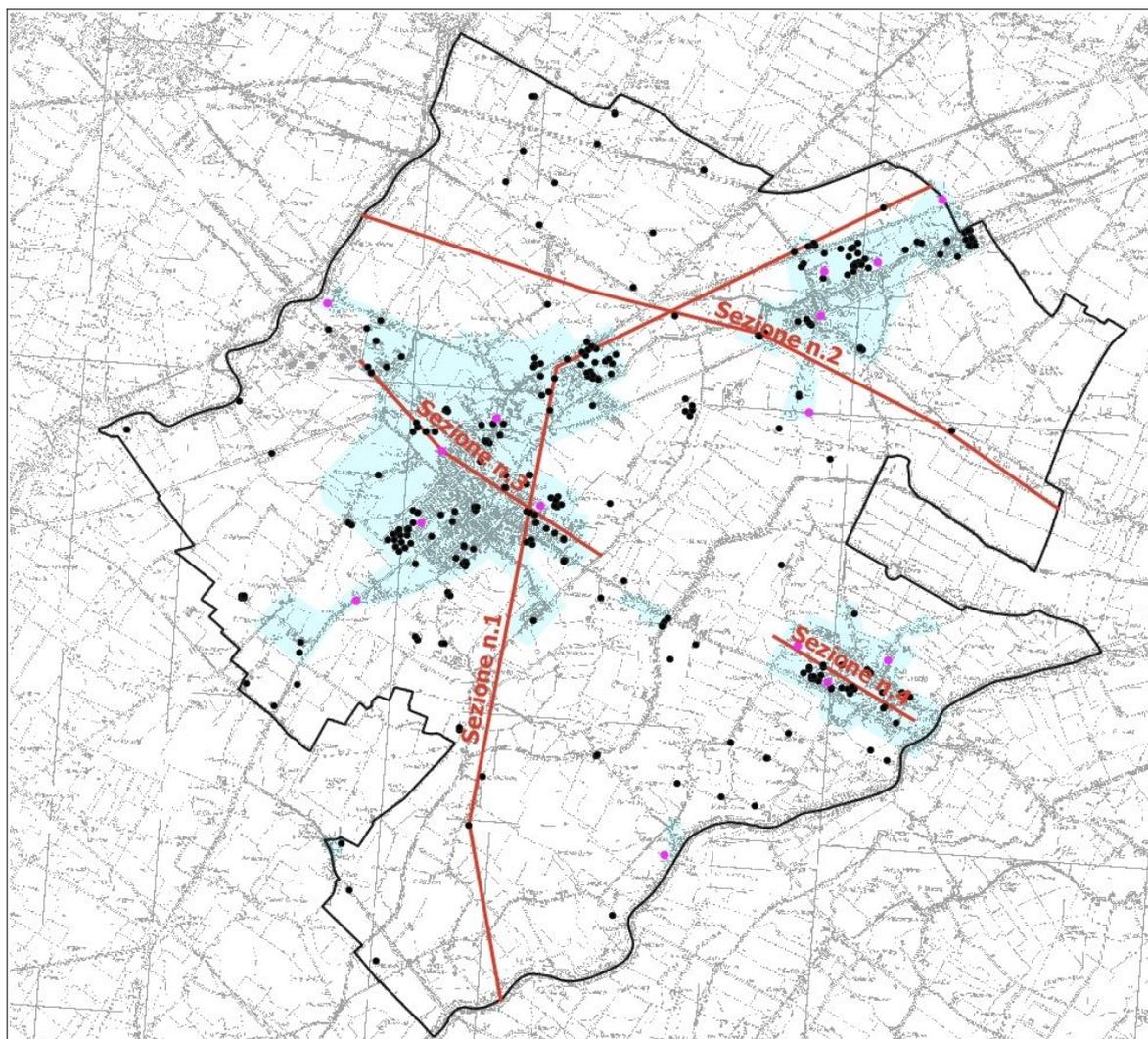


Figura 5.1 – Sezioni geologiche di riferimento per lo studio di MS di Russi. In azzurro, il territorio comunale compreso nella microzonazione (approfondimenti di l'ivello 2")

Un ulteriore e importante contributo per la modellazione geologico-sismica profonda è fornito dagli studi del SGSS, sintetizzati nella Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (scala 1:250.000). Uno stralcio di tale cartografia, riprodotto in figura 5.2, evidenzia la profondità della base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore AES (cfr. capitolo 3): nel territorio comunale, lo spessore complessivo dei depositi alluvionali che costituiscono il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è variabile da circa 170 m a circa 270 metri, con un approfondimento della sua base verso nord (figura 5.2).

La figura 5.3 riporta invece uno stralcio della sezione RER n. 58. In questa sezione geologica profonda, che per il territorio di Russi ricostruisce gli spessori dei depositi alluvionali fino a comprendere anche la base del Sintema AEI, vengono evidenziati due limiti più superficiali e che possono risultare di particolare interesse per l'analisi della risposta sismica locale: il tetto delle sabbie fluviali del subsistema AES6 (in tratteggiato rosso) e il tetto delle sabbie marine di cordone litorale (in tratteggiato arancio) che costituiscono, verso NE, lo spessore basale del subsistema AES7. Nel territorio di Russi, il tetto di questi depositi prevalentemente granulari si colloca ad una profondità relativamente omogenea (circa 85÷100 metri).

Occorre rammentare come le unità alluvionali più recenti risultino meno coinvolte nelle deformazioni di origine tettonica.

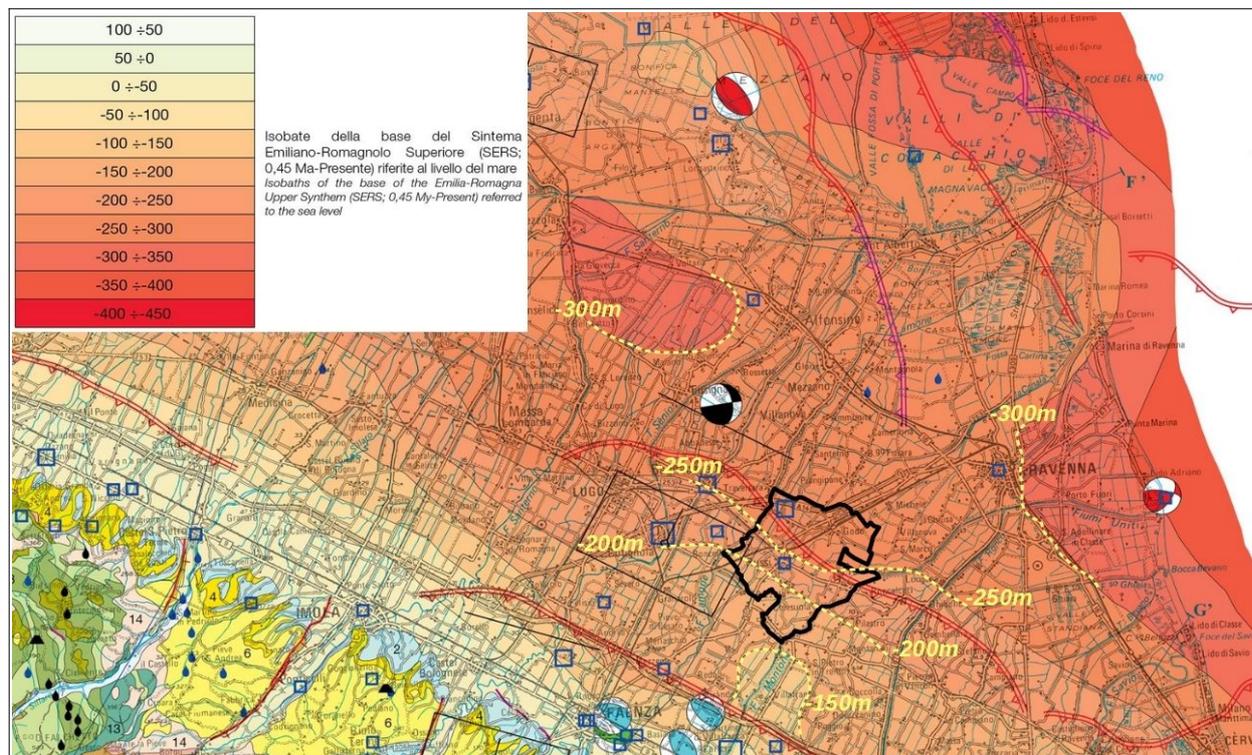


Figura 5.2 – Stralcio della “Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe” (RER, 2016). Sono sovrapposti i confini comunali di Russi e rimarcate le isobate della base del Sintema SERS/AES (metri slm)

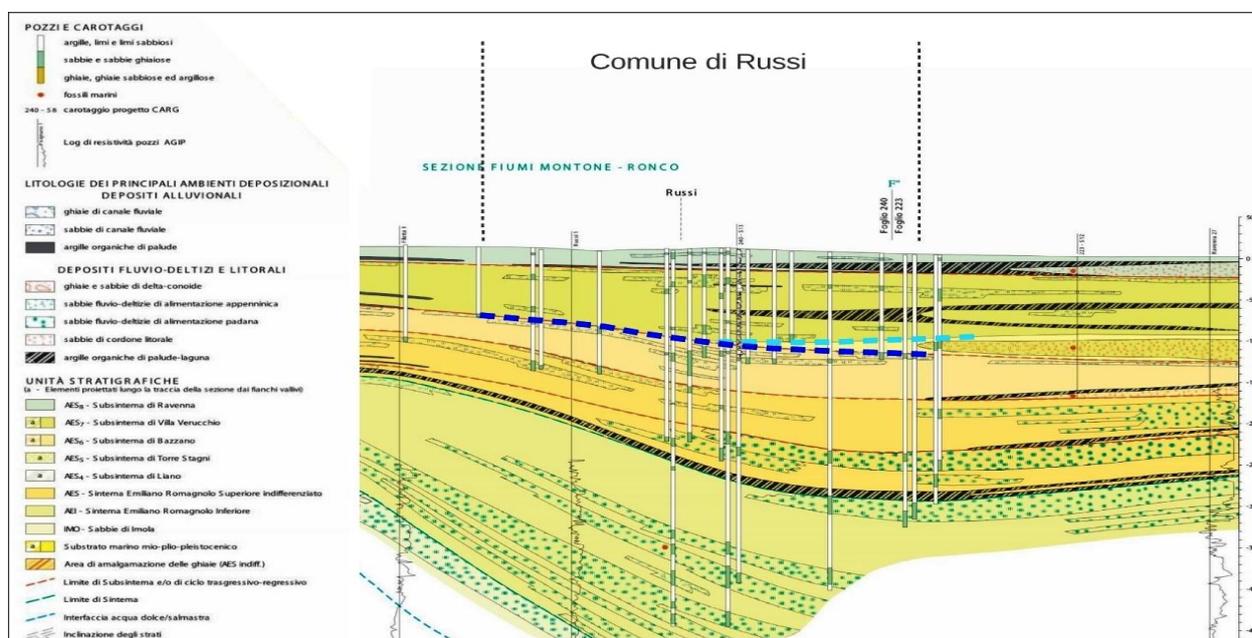


Figura 5.3 – Stralcio della sezione RER N.58 (pubblicata nello studio di MS con numero progressivo 1)

Il tetto di questi depositi granulari risulterebbe correlabile alle frequenze di risonanza di massima intensità (frequenze fondamentali  $f_0$ ) riscontrate in tutto il territorio comunale ( $F_0$  prevalentemente comprese tra 0,9 Hz e 1,1 Hz) e in questo senso può costituire un importante

contrasto di impedenza per le valutazioni della risposta sismica locale. Come si evince dalla figura 5.4, le registrazioni HVSR disponibili hanno evidenziato forme spettrali H/V sostanzialmente omogenee con moderate amplificazioni a basse frequenze. Non è tuttavia possibile distinguere ulteriori picchi spettrali H/V associabili a riflettori sismici più profondi, sia per la debole intensità del segnale acquisito, sia i limiti strumentali intrinseci dell'apparecchio di misura tomografica utilizzato.

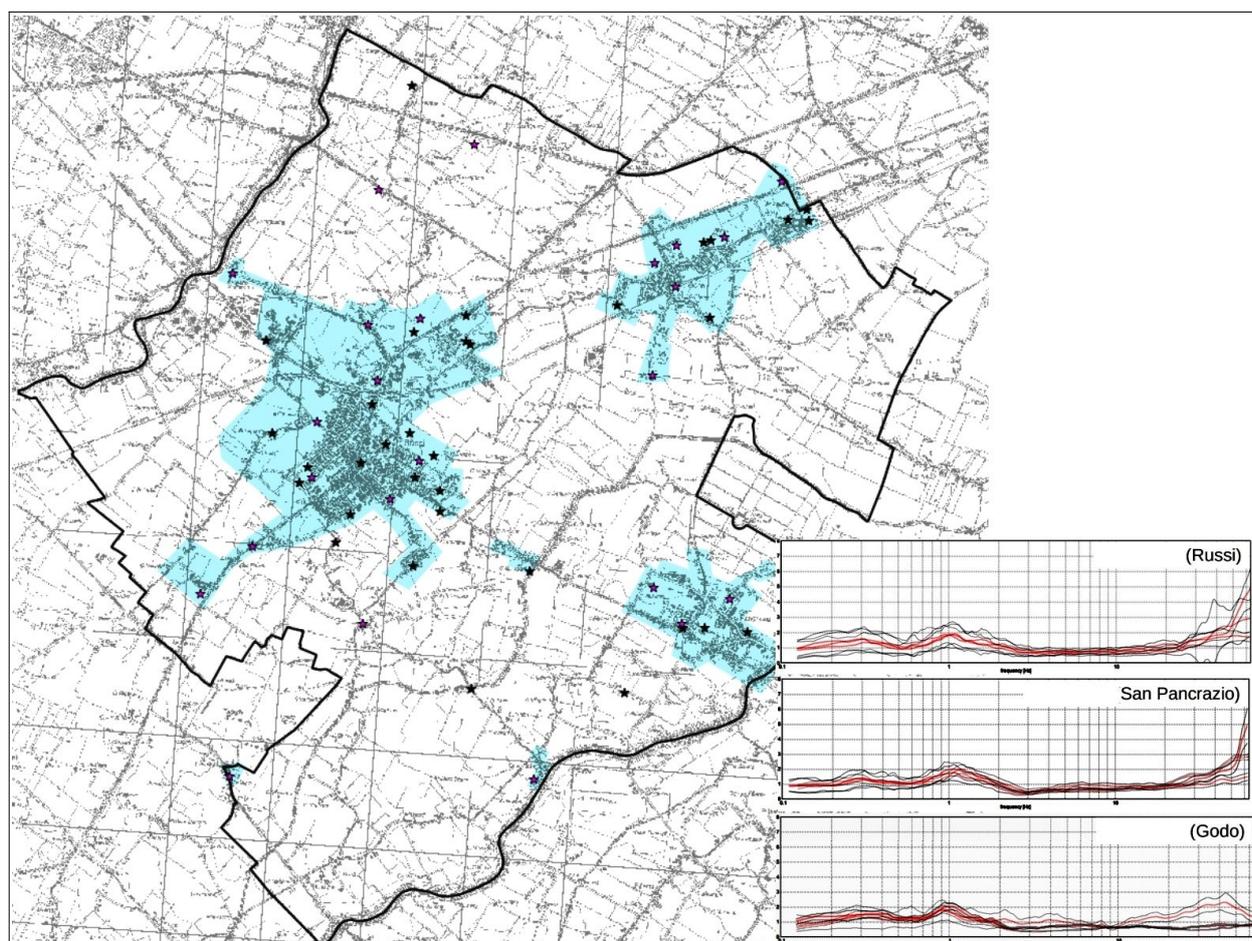


Figura 5.4 - Localizzazione delle prove HVSR disponibili nel territorio comunale e confronto tra spettri H/V ricavati da registrazioni effettuate nel Capoluogo, a San Pancrazio e a Godo

Le ulteriori sezioni n. 3 (figura 5.5) e n. 4 (figura 5.6) offrono ricostruzioni litostratigrafiche rappresentative e di maggior dettaglio del sottosuolo (fino a circa  $-15\div-30$  metri), rispettivamente del Capoluogo e della frazione San Pancrazio: le indagini disponibili evidenziano in entrambe le situazioni depositi sub-affioranti prevalentemente limoso argillosi con livelli sabbiosi, di tracimazione fluviale recente attribuibile ai fiumi Lamone e Montone. Intervalli granulari di maggior spessore vengono invece riscontrati a profondità superiori ai 10 metri rispetto all'attuale piano campagna, dimostrando la frequente presenza di depositi granulari di paleocanali e/o argine di spessore anche plurimetrico.

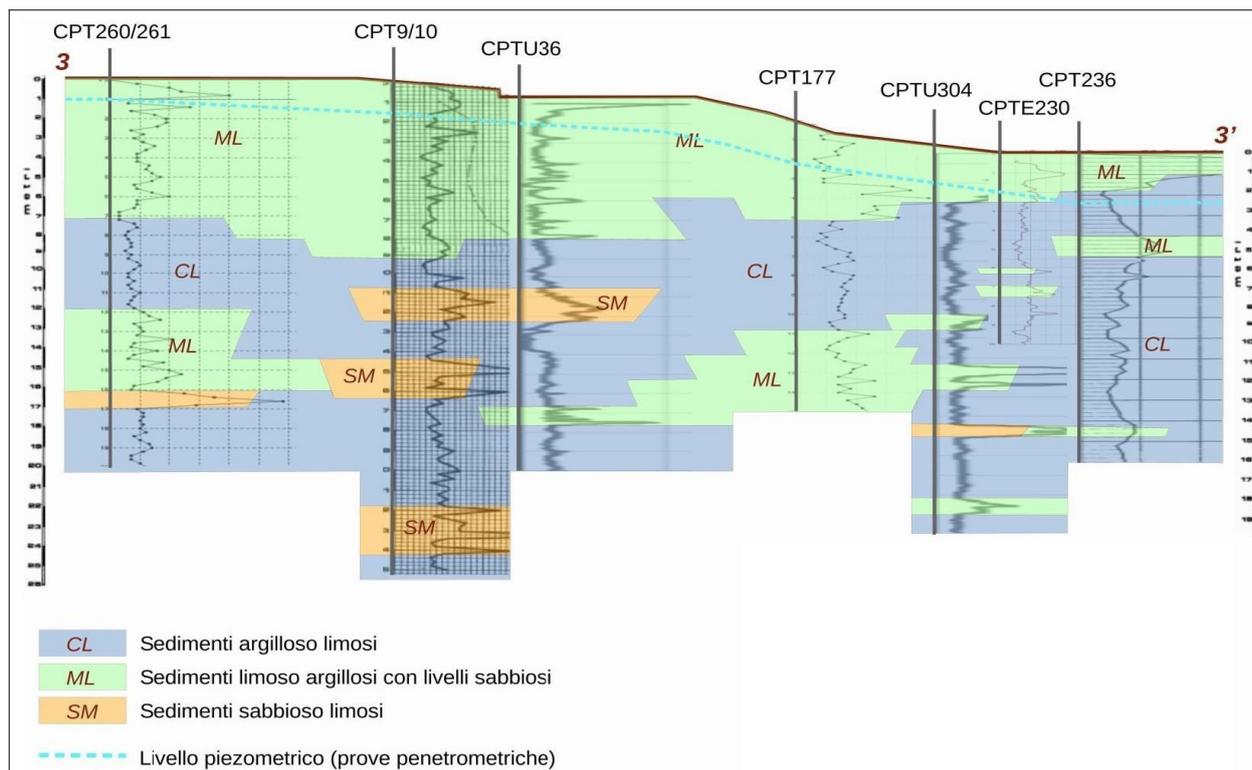


Figura 5.5 – Sezione geologica n.3 elaborata per lo studio di MS e rappresentativa del Capoluogo

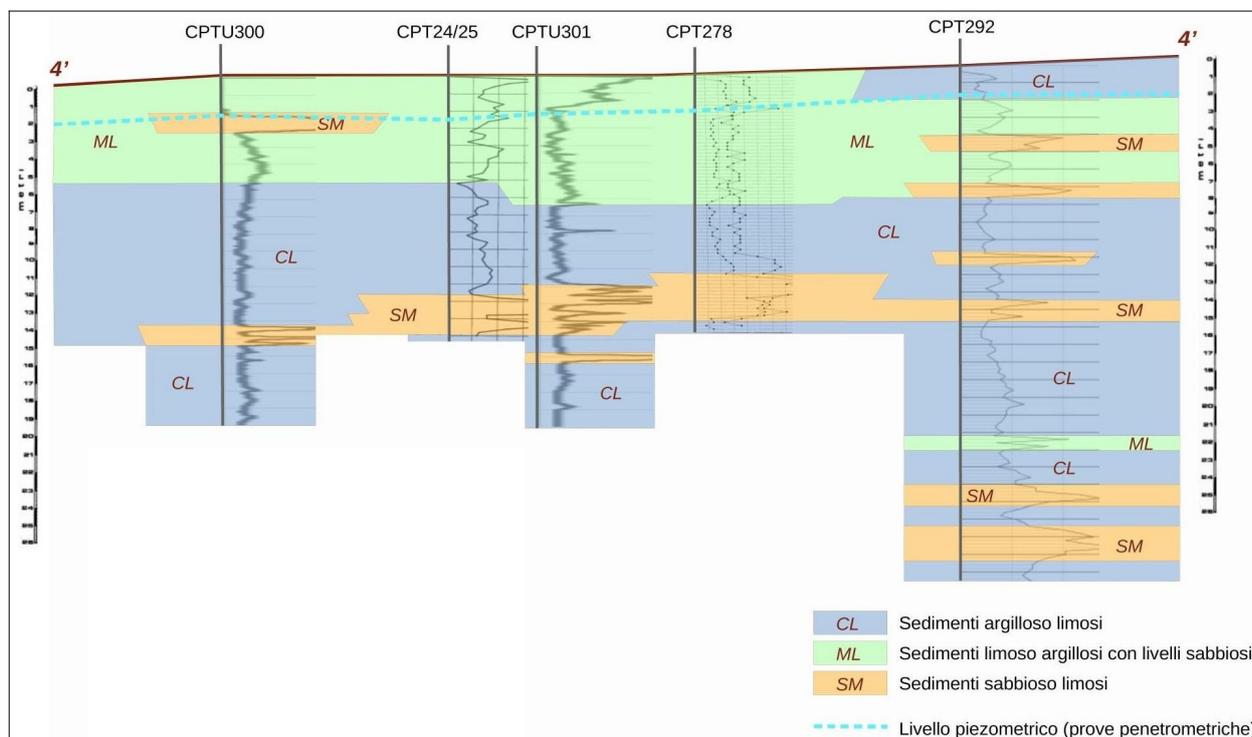


Figura 5.6 – Sezione geologica n.4 elaborata per lo studio di MS e rappresentativa della frazione San Pancrazio

Dal punto di vista sismostratigrafico, le ulteriori prove geofisiche disponibili (MASW; Re.Mi.) consentono di ricavare un quadro sismostratigrafico del sottosuolo fino a circa  $-35\pm 40$  metri utili ai fini delle analisi sismiche di “livello 2”, con esiti di Vs equivalente (Vs30) compresa tra

185 m/s e 218 m/s .

Presso il “Polo Energie Rinnovabili di Russi” (Centrale Santa Brigida) sono inoltre disponibili gli esiti di una prova sismica in foro “Down-Hole”, tuttavia i dati risulterebbero attendibili soltanto fino a una profondità di circa –21 metri.

Per questo studio, si sono eseguiti sei stendimenti sismici MASW (che hanno confermato gli esiti sismostratigrafici relativamente omogenei) e tre stendimenti in array bidimensionale tipo ESAC-SPAC. Queste ultime prove hanno ricavato modelli sismostratigrafici più profondi (fino a circa 125÷150 metri) e con Vs30 comprese 197 m/s (frazione Godo) e 205 m/s (Capoluogo). La figura 5.7 riporta un confronto dei modelli sismostratigrafici delle tre prove ESACSPAC.

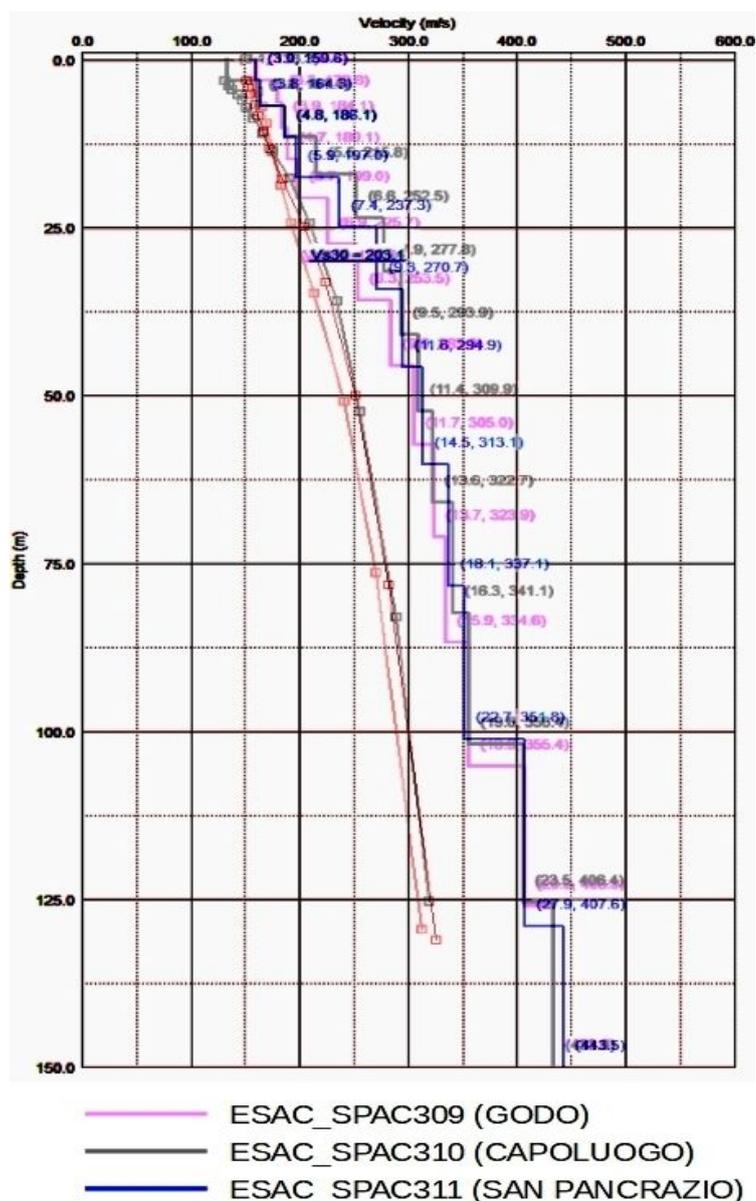


Figura 5.7 - Confronto tra sismostratigrafie ESAC-SPAC realizzate per questo studio

In conclusione, i dati sismostratigrafici disponibili indicano per il territorio di studio una discreta omogeneità della risposta sismica locale, avvalorata dagli esiti simili delle Vs equivalenti (Vs30) e delle registrazioni dei microtremiti sismici HVSr .

## 5.2 Litologie sub-affioranti

Per la caratterizzazione geologico tecnica dei sedimenti superficiali, lo studio si è basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (15 punti di controllo). Si sono inoltre considerati anche gli esiti tessiturali delle prove penetrometriche disponibili. In particolare, le prove CPTU di repertorio (delle quale si dispongono dei dati numerici) e le prove CPTU eseguite per questo lavoro.

I dati numerici complessivamente disponibili per 26 penetrometrie CPTU permettono infatti di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009). Si sono inoltre considerati i dati tessiturali derivati dalle altre prove penetrometriche meccaniche CPT di repertorio, prevalentemente derivati dalle note correlazioni di Begemann 1965, AGI 1977 e Schmertmann 1978.

Tutte queste informazioni, hanno permesso la classificazione dei punti di controllo basata sulle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.2) e sulla prevalenza tessitoriale riscontrata nella “colonna” di sedimenti profonda fino a circa  $-5\div-6$  metri dal piano campagna (cfr. tavola 2 Carta geologico-tecnica). La profondità considerata, è da ritenersi confrontabile con il “volume significativo” caratteristico della maggior parte degli edifici di normale impegno costruttivo (e dotati di fondazioni “dirette”) presenti nel territorio di studio.

Nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è fatta particolare attenzione agli spessori di sedimenti insaturi più superficiali, in quanto le condizioni di essiccamento portano molto spesso a correlazioni tessiturali e meccaniche falsate. In questo senso, le sezioni n.3 e n.4 elaborate per lo studio di MS (cfr. figure 5.5 e 5.6).

I dati complessivamente disponibili nel territorio comunale di Russi Comune evidenziano come i sedimenti superficiali siano sostanzialmente attribuibili a due principali classi geotecniche USCS/AGI in relazione al diverso contesto deposizionale più recente degli areali di studio (figura 5.1).

Più in particolare, il sottosuolo meno profondo viene prevalentemente classificato “ML” in quanto nei primi  $5\div 6$  metri è caratterizzato da alternanze di livelli sabbiosi più o meno limoso/argillosi e livelli di sedimenti più fini (limi e argille sabbiose), tipiche di facies deposizionale di tracicimazione recente dei corsi d’acqua Lamone e Montone.

Una più limitata porzione di territorio centro-orientale è invece caratterizzata da sedimenti più superficiali prevalentemente argilloso limosi e dunque classificabili “CL”: per questa parte di territorio comunale, relativamente più distale rispetto ai citati corsi d’acqua e morfologicamente più depressa la facies deposizioale prevalente è indatti quella di piana inondabile.

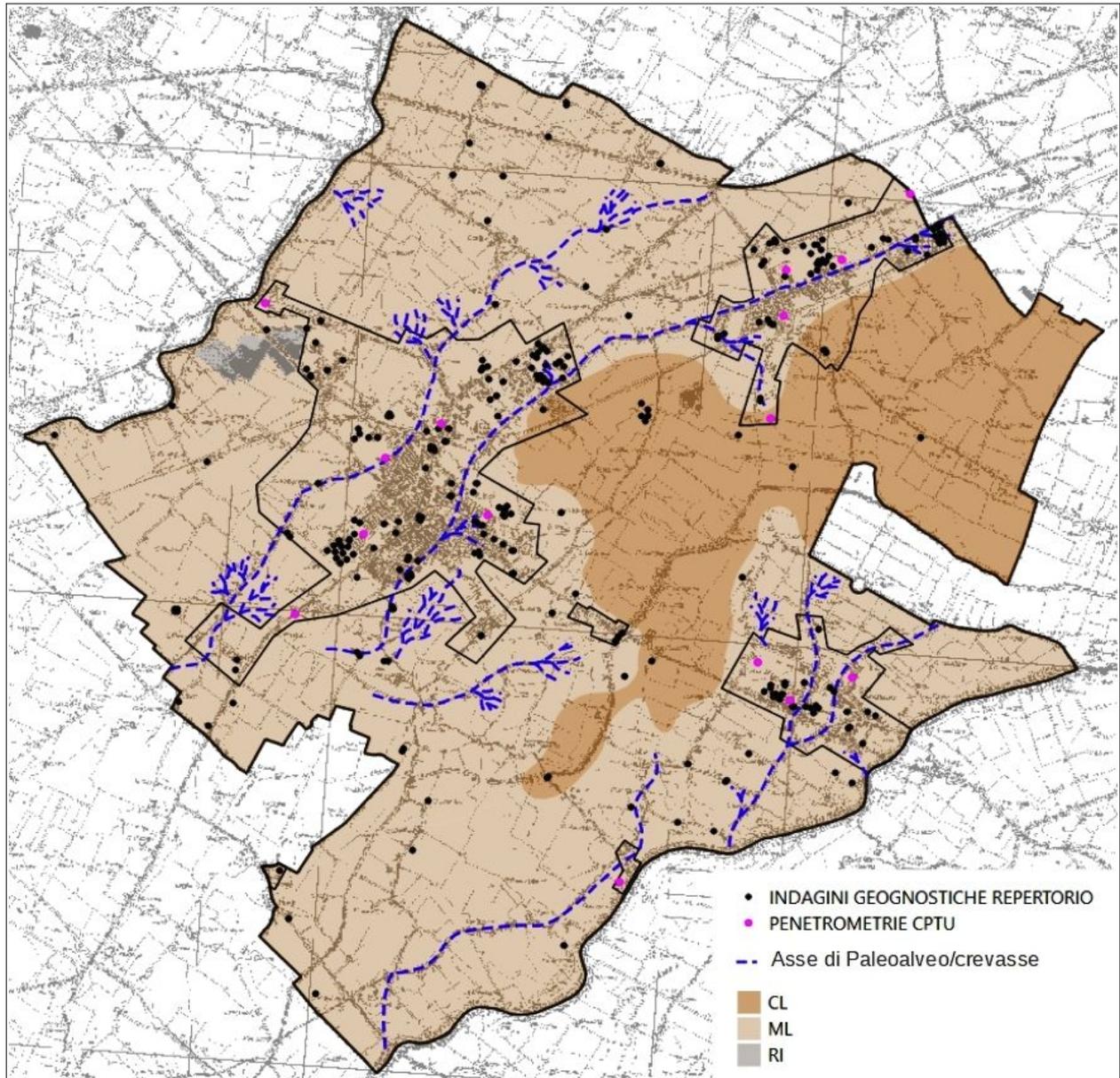


Figura 5.1 - Schema litotecnico del sottosuolo meno profondo del territorio comunale di Russi. La figura riporta i principali assi di paleoalveo e "crevasse" individuati nella cartografia geologica RER. Si riportano anche i punti di controllo geognostici e i limiti degli areali interessati dagli approfondimenti sismici di "livello 2"

## 6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

### 6.1 Commenti introduttivi

I dati geognostici considerati offrono una sufficiente “copertura” conoscitiva delle aree studiate e le indagini geofisiche espletate ex novo per questo studio di microzonazione (registrazioni HVSR) consentono una modellazione del sottosuolo esaustiva per l'elaborazione della risposta sismica locale semplificata (“secondo livello”).

Le incertezze sono comunque accettabili in funzione del grado di approfondimento che si è inteso espletare. Lo studio, ha inoltre definito le aree che dovranno ineludibilmente approfondire gli aspetti di pericolosità sismica.

Nei successivi paragrafi si introducono le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando di valutare anche le inevitabili incertezze e limitazioni non ancora risolvibili in questo livello di approfondimento.

### 6.2 Definizione del substrato rigido

Tra gli obiettivi degli approfondimenti espletati, vi è stato, innanzitutto, quello di definire con maggior dettaglio il bedrock sismico di riferimento per la quantificazione della Risposta sismica Locale.

Occorre premettere che le indagini eseguite sia per gli studi di microzonazione sismica nei Comuni maggiormente danneggiati dal sisma emiliano del 2012 (ai sensi dell'Ordinanza RER n.70/2012), sia per gli altri Comuni, hanno offerto un importante contributo conoscitivo per quanto riguarda la risposta sismica nella pianura padana.

Gli studi regionali, confermati anche da ulteriori indagini effettuate nei Comuni della Pianura, hanno riscontrato come il primo forte contrasto di impedenza sia collocabile nei depositi alluvionali, in genere tra la base del subsistema AES6 e la più profonda base del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore AES. Una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia da depositi alluvionali e bedrock marino. Tuttavia, le numerose registrazioni HVSR eseguite nella Pianura Padana indicano che gli effetti di amplificazione legati a quest'ultimo riflettore sismico possono risultare molto variabili in funzione sia della sua profondità, sia delle caratteristiche litologiche/sismostratigrafiche dello spessore alluvionale e del substrato marino. In tal senso, un'ampia bibliografia scientifica (es. Seed et al., 1975) evidenzia che, per elevati spessori (in genere maggiori di 100 metri) di depositi “soffici” alluvionali, si possono riscontrare importanti effetti di smorzamento.

Per quanto riguarda il territorio comunale di Russi, le informazioni di sottosuolo profonde disponibili (sezioni geologiche; sondaggi; dati ricavati da MASW, ESAC-SPAC; ecc) sono stati confrontati con gli esiti delle registrazioni HVSR, per interpretare modelli sismostratigrafici il più possibile rappresentativi del contesto locale.

Come già scritto (cfr. paragrafo 5.2), le registrazioni HVSR evidenziano amplificazioni spettrali H/V relativamente omogenee e tutto il territorio comunale, ascrivibili alla classe di frequenza fondamentale “ $0,6 \text{ Hz} < f_0 \leq 1 \text{ Hz}$ ” e dunque associabili a riflettori sismici a profondità comprese

tra 200 metri 80 m dal p.c. Le massime amplificazioni spettrali H/V sono presumibilmente correlabili a spessori di sedimenti più grossolani che costituiscono il tetto delle sabbie fluviali del subsistema AES6 (in tratteggiato rosso) e/o al tetto delle sabbie marine di cordone litorale (in tratteggiato arancio) che costituiscono, verso NE, lo spessore basale del subsistema AES7. Come già evidenziato nel precedente paragrafo 5.1 (vedi anche figura 5.3), nel territorio di Russi, il tetto di questi depositi prevalentemente granulari si colloca ad una profondità relativamente omogenea (circa 85÷100 metri).

Si tratterebbe di un primo riflettore sismico in grado di contribuire significativamente alla risposta sismica locale al suolo, tuttavia i sedimenti sottostanti sono da considerarsi come un “pseudobedrock” sismico, in quanto ancora caratterizzati da  $V_s$  inferiori a 800 m/s, come emerge dalle indagini effettuate (prove ESAC-SPAC) e, più in generale, anche dagli studi geofisici di microzonazione sismica effettuati nei Comuni limitrofi.

### 6.3 Liquefacibilità

L'analisi della liquefacibilità dei sedimenti, se sottoposti a sollecitazioni cicliche indotte da terremoti, è di fondamentale importanza per gli aspetti di progettazione geotecnica antisismica. In particolare, occorre valutare, nel modo più adeguato possibile, le effettive condizioni di suscettibilità, le condizioni di innesco e il rischio sito specifico di tale fenomeno.

Con il termine “liquefazione” si indicano vari fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione) osservati durante terremoti significativi (generalmente,  $M > 5.5$ ) nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi; in questi sedimenti, le condizioni “non drenate” durante il sisma possono indurre un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali, che a loro volta possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. Il meccanismo di liquefazione dei sedimenti è governato da molti fattori che si possono ricondurre principalmente:

- alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e della sua energia (magnitudo; accelerazioni; ecc.);
- alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico; densità relativa; coesione; limiti di Atterberg; ecc.);
- alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15–20 metri).

La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi che possono coinvolgere sia i depositi granulari, sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio, sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma, provocate da perdite di resistenza, anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”). Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004 e 2008).

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati durante gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni);

anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni<sup>2</sup>. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Lo studio di microzonazione sismica di rUSSI ha consentito un'accurata analisi qualitativa delle condizioni di propensione alla liquefazione dei sedimenti, basata innanzitutto sugli accertamenti tessiturali predisponenti, desunti dalle prove geognostiche (sondaggi e prove penetrometriche). In questo senso, si è potuto disporre di dati tessiturali diretti, ricavati da sondaggi di repertorio, in numero tuttavia non esaustivo per effettuare una valutazione a una scala territoriale. Si sono pertanto considerati gli esiti delle prove penetrometriche CPT e CPTe/CPTU disponibili. Le prove penetrometriche elettriche consentono una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili rispetto alle altre tipologie di penetrometrie statiche o dinamiche, in quanto restituiscono diagrammi litotecnici molto più definiti (letture delle resistenze alla penetrazione fino a 1 cm/avanzamento). In conclusione, si è potuto disporre di 15 sondaggi, 63 prove CPTe/CPTU e 115 prove CPT che raggiungono almeno 10 metri di profondità.

Per analizzare la potenziale suscettibilità alla liquefazione si è deciso di discriminare due differenti intervalli (layer) di verifica, rispettivamente fino a 0÷10 metri e 10÷20 metri. Ciò ha permesso di “pesare” maggiormente le prove che riscontrano livelli potenzialmente liquefacibili nei primi 10 metri, in quanto tale intervallo è generalmente ritenuto più suscettibile alla liquefazione, con conseguenze più gravi in termini di possibilità manifestazioni superficiali (condizioni free-field) e in termini di possibile interazione con le fondazioni dirette di manufatti (che risultano le più diffuse).

Nell'analisi della potenziale liquefacibilità dei sedimenti si è inoltre considerato il contesto idrogeologico locale, desunto dal controllo delle quote d'acqua rilevate dalle prove geognostiche considerate. Occorre anche rammentare come i dati idrogeologici locali evidenziano soggiacenze che appaiono generalmente modeste (inferiori a 3,0÷3,5 metri, prevalentemente comprese tra 1,0 m e 2,5 m). Livelli piezometrici locali vengono rappresentati anche nelle due sezioni n.3 e n.4 elaborate per questo studio (cfr. figure 5.5 e 5.6).

La tabella 6.1 riporta lo schema di classificazione delle indagini geognostiche sottoposte al controllo della potenziale liquefazione, mentre la figura 6.1 riporta alcune classificazioni esemplificative di prove penetrometriche controllate.

<b>PROFONDITA'</b>	<b>CLASSI SUSCETTIBILITA'</b>
LAYER 0÷10 metri	L1 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >40 cm sotto falda e nei primi 5 metri
	L2 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >100 cm tra 5 e 10 metri
LAYER 10÷20 metri	L3 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 10 e 15 metri
	L4 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 15 e 20 metri

Tabella 6.1

<sup>2</sup> Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

Figura 6.1 – Esempi di classificazione dei diagrammi di prove CPTE/CPTU (realizzate nel Capoluogo) per l'identificazione di condizioni predisponenti la liquefazione. I diagrammi riportano anche la quota piezometrica (tratteggiato azzurro)

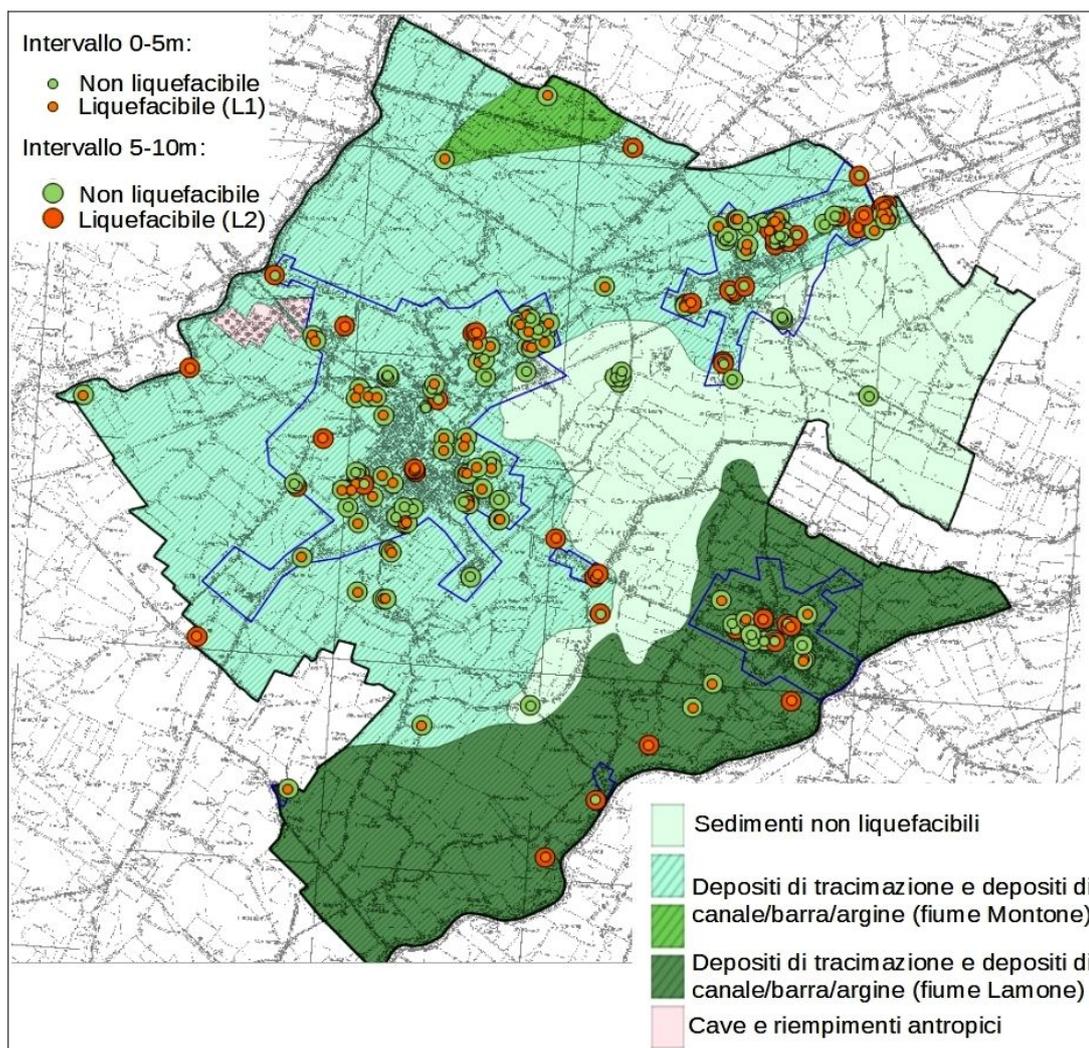
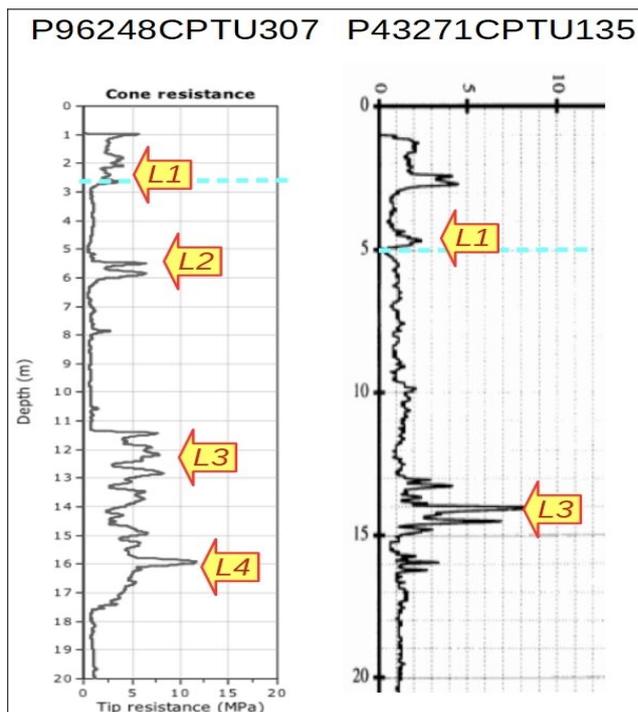


Figura 6.2 – Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefabilità in base alla presenza di strati granulari in falda (fino a -10 metri)

L'analisi delle indagini disponibili ha consentito di delimitare con maggiore accuratezza le zone caratterizzate da depositi di tracimazione e depositi di canale/barra/argine attribuiti ai fiumi Lamone e Montone. In particolare la distribuzione dei depositi granulari di tracimazione più recente appare anche molto coerente con il contesto morfologico ricostruito per questo studio e rappresentato nella figura 3.6 (cfr. paragrafo 3.1).

In questo senso, la figura 6.3 rappresenta la classificazione dei punti di controllo fino a -10 metri (classi "L1" e "L2"): si evince come ampi settori del territorio comunale vengano incluse in un contesto "di attenzione" dal punto di vista della possibilità di liquefazione.

Occorre tuttavia evidenziare come l'attribuzione alle zone potenzialmente liquefacibili sia da ritenersi necessariamente cautelativa per la difficile ricostruzione di corpi nastriformi sabbiosi di canale/argine, in un contesto più recente che appare prevalentemente attribuibile ad episodi di rotta più delimitati e a un contesto di più superficiale tracimazione (con alternanze di limi e argille e livelli limoso sabbiosi nei primi 5÷5 metri).

Il confronto tra esiti tessiturali e contesto idrogeologico locale ha quindi consentito di delimitare le "zone di attenzione per liquefazioni", in coerenza con gli standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v. 4.2).

Occorre precisare che per le zone di potenziale propensione al fenomeno della liquefazione dovranno essere eseguiti ulteriori approfondimenti per accertare le effettive condizioni di pericolosità. Gli approfondimenti dovranno quantificare con gli opportuni metodi (cfr. Allegato A3 DGR 476/2021) il potenziale di liquefazione locale, necessario per le valutazioni sul rischio per i manufatti esistenti e di previsione.

## 7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS

### 7.1 Cenni introduttivi

Il fine ultimo dello studio di microzonazione sismica di “livello 2” è quello di consentire una suddivisione del territorio indagato in:

- zone “stabili”
- zone “stabili suscettibili di amplificazione” → a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione da quantificare con analisi semplificate (abachi)
- zone “di attenzione” → a loro volta suddivise per tipologia di instabilità, con stima della pericolosità da ricavare in termini quantitativi (ulteriori analisi di “livello 3”)

Come riportato nelle note introduttive degli standard di MS (v.4.2), i risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica).

Occorre rammentare che la carta delle MOPS è riferita unicamente al “livello 1” di approfondimento e perciò le zone individuate hanno approfondimenti esclusivamente di tipo qualitativo. La cartografia di MS può avere sia zone con approfondimenti di “livello 2”, sia zone con approfondimenti di “livello 3”.

Per il Comune di Russi, lo studio sismico di “livello 2” ha consentito di valutare i fattori di amplificazione sismica mediante approccio semplificato per gli areali di studio comprendenti il territorio urbanizzato e un’ampia fascia esterna. La definizione delle MOPS ha invece interessato tutto il territorio comunale.

La stima dell’amplificazione si è basata sul modello di sottosuolo locale valutato per le aree studiate (cfr capitolo 5), in particolare considerando gli abachi predisposti dalla Regione Emilia-Romagna e riportati nella DGR 476/2021 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

I paragrafi del presente capitolo illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio e per identificare le zone di attenzione per instabilità.

### 7.2 Sintesi illustrativa delle MOPS

La raccolta ed elaborazione dei dati disponibili ha consentito la suddivisione del territorio studiato in aree qualitativamente omogenee in prospettiva sismica (MOPS). La delimitazione delle MOPS ha tuttavia considerato, in relazione alle caratteristiche sismostratigrafiche locali, anche il contesto deposizionale caratteristico, in quanto può risultare strettamente connesso alla variabilità della risposta sismica e alla possibilità di innesco di altri fenomeni cosismici (es. liquefazioni), come già descritto nei capitoli capitoli.

Nel territorio studiato non si riscontrano “zone stabili” e si è distinta una sola “zona stabile suscettibile di amplificazioni e così descritta nella cartografia delle MOPS:

2001

Zona 1 – Depositi prevalentemente argilloso limosi di piana alluvionale fino a -20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille, limi e sabbie). Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >150 metri.

Nel seguente schema sono invece riportate le descrizioni relative alle “zone di attenzione per instabilità”, riconducibili a possibilità di fenomeni di liquefazione per la presenza di intervalli granulari saturi nei primi 20 metri. Le zone di attenzione sono state differenziate in relazione ai differenti contesti litostratigrafici e di facies deposizionale:

30502002

ZA\_LQ 2 – Depositi alluvionali limoso argillosi con livelli sabbiosi saturi nei primi 5–6 metri (tracimazioni recenti del fiume Lamone), poi frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 metro fino a 10 metri e >2 metri da 10 a 20 metri (depositi di canale/barra/argine attribuiti al fiume Lamone) sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di limi, argille e sabbie). Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >150 metri.

30502003

ZA\_LQ 3 – Depositi alluvionali limoso argillosi con livelli sabbiosi saturi nei primi 5–6 metri (tracimazioni recenti del fiume Lamone), poi intervalli sabbiosi saturi poco frequenti e di spessore <1 metro fino a 15 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille, limi e sabbie). Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >150 metri.

30502004

ZA\_LQ 4 – Depositi alluvionali limoso argillosi con livelli sabbiosi saturi nei primi 5–6 metri (tracimazioni recenti del fiume Montone), poi frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 metro fino a 10 metri e >2 metri da 10 a 20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di limi, argille e sabbie). Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >150 metri.

### 7.3 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS

Per suddividere il territorio in base all’amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, sono stati calcolati i fattori di amplificazione di ogni zona studiata. I fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 476/2021 sono calcolati per un tempo di ritorno dell’evento sismico pari a  $T_r = 475$  (con smorzamento  $\zeta = 5\%$ ) e si riferiscono a:

- FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell’accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull’affioramento “rigido” ( $PGA/PGA_0$ ). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l’impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- FA SA → rapporto dell’intensità spettrale in accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull’affioramento “rigido”. I fattori di amplificazione calcolati si riferiscono ai quattro seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:
  - SA1 → 0,1s–0,5s [FA0105]
  - SA2 → 0,4s–0,8s [FA0408]
  - SA3 → 0,7s–1,1s [FA0411]
  - SA4 → 0,5s–1,5s [FA0515] solo per le aree di pianura/costa
- FA SI – Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come

l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si devono determinare i fattori di amplificazione per i tre seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:

SI1 → 0,1s–0,5s [FH0105]

SI2 → 0,5s–1,0s [FH0510]

SI3 → 0,5s–1,5s [FH0515] solo per le aree di pianura/costa

## 7.4 Calcolo dei fattori di amplificazione

### 7.4.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, nello studio di microzonazione sismica di "livello 2", i fattori di amplificazione vengono calcolati con approccio semplificati mediante l'utilizzo di abachi. In tal senso, si sono utilizzati gli abachi di riferimento per gli studi di MS in Emilia-Romagna (DGR 476/2021), sulla base delle differenti caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista della risposta sismica locale (cfr. capitolo 5).

La seguente tabella 7.1 riporta la sintesi riepilogativa dei fattori di amplificazione (FA) riferibili alla microzona omogenea in prospettiva sismica (MOPS) da ritenersi stabile ma suscettibile di amplificazioni. Nella tabella si riportano il macrocontesto attribuibile alla zona MOPS e il parametro Vs30 necessari per il calcolo dei FA.

Tabella 7.1 - Calcolo dei fattori di amplificazione per le zone "stabili suscettibili di amplificazioni"

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2001	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	Depositi di piana alluvionale argilloso limosi nei primi 20 metri. Substrato sismico a profondità >150 m.

### 7.4.2 Zone di attenzione per instabilità: calcolo dei fattori di amplificazione

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato anche le aree perimetrare come "zone di attenzione per instabilità" per liquefazioni, come indicato negli Standard di MS v. 4.2 (CTMS, 2020). Sono tuttavia aree ove vengono richiesti ulteriori approfondimenti ("livello 3").

La seguente tabella 7.2 riporta il calcolo dei fattori di amplificazione attribuiti alle zone di attenzione per liquefazioni.

Tabella 7.2 – Calcolo dei fattori di amplificazione per le zone “di attenzione per instabilità (liquefazioni)”

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2002	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	Depositi argilloso limoso con livelli sabbiosi nei primi 5+6 m (tracimazioni recenti del f. Lamone) poi frequenti intervalli sabbiosi >1 m fino a 10 metri e >2 m da 10 metri a 20 metri. Substrato sismico a profondità >150 m.
2003	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	Depositi argilloso limoso con livelli sabbiosi nei primi 5+6 m (tracimazioni recenti del f. Lamone) poi intervalli sabbiosi poco frequenti di spessore >1 m fino a 15 metri. Substrato sismico a profondità >150 m.
2004	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	Depositi argilloso limoso con livelli sabbiosi nei primi 5+6 m (tracimazioni recenti del f. Montone) poi frequenti intervalli sabbiosi >1 m fino a 10 metri e >2 m da 10 metri a 20 metri. Substrato sismico a profondità >150 m.

## 7.5 Elaborazione dei valori di $H_{SM}$

Lo studio ha consentito di calcolare i valori di  $H_{SM}$  (Naso et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in  $cm/s^2$ ), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* ( $ASI_{UHS}$ ), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , diviso per  $\Delta T$  (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = (ASI_{UHS} / \Delta T) * FA$$

I valori di  $ASI_{UHS} / \Delta T$  sono stati calcolati per ogni punto della griglia INGV (già disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del SGSS).

Le elaborazioni evidenziano valori relativamente poco difforni ( $H_{SM}$  variabile da 738 a 687) con un blando decremento verso il territorio NE.

## 8 ELABORATI CARTOGRAFICI

### 8.1 Carta delle Indagini

Gli studi di microzonazione sismica hanno consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative. Si tratta, complessivamente, di 355 prove archiviate.

In questo senso, la “Carta delle Indagini”, realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di Russi, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio.

La cartografia identifica il tipo di prova con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> CTMS (v.4.2), distinguendo la tipologia delle prove e indicando il sito oggetto delle indagini.

### 8.2 Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica

La <<Carta geologico–tecnica>>, elaborata alla scala 1:10.000, ha lo scopo di fornire ulteriori elementi per la definizione del modello di sottosuolo meno profondo, necessario per lo studio di microzonazione sismica. Tuttavia, nella pianura, si distingue nei contenuti dalla classica carta geologica e/o litologica.

In particolare, la cartografia geologico–tecnica ha suddiviso il territorio studiato sulla base del controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo e dalle prove penetrometriche, disponendo anche di dati numerici.

L'elaborazione di questa cartografia è basata sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.2). La carta geologico tecnica riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5–6 metri). Il territorio di studio è stato quindi suddiviso nelle classi USCS/AGI riportate in figura 8.1.

In sintesi, si può evidenziare come nel settore di pianura i terreni più superficiali siano prevalentemente attribuibili alla classe tessitoriale “ML” in quanto caratterizzati da alternanze di livelli sabbiosi più o meno limoso/argillosi e livelli di sedimenti più fini (limi e argille sabbiose), tipiche di facies deposizionale di tracimazione recente dei corsi d’acqua Lamone e Montone.

Una più limitata porzione di territorio centro–orientale, è invece caratterizzata da sedimenti più superficiali prevalentemente argilloso limosi e dunque classificabili “CL”: per questa parte di territorio comunale, relativamente più distale rispetto ai citati corsi d’acqua e morfologicamente più depressa la facies deposizionale prevalente è infatti quella di piana inondabile.

La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ forme di superficie e sepolte (assi di paleoalvei)
- ✓ elementi geologici (sondaggi/pozzi)
- ✓ le tracce delle sezioni geologiche di riferimento per questo lavoro.

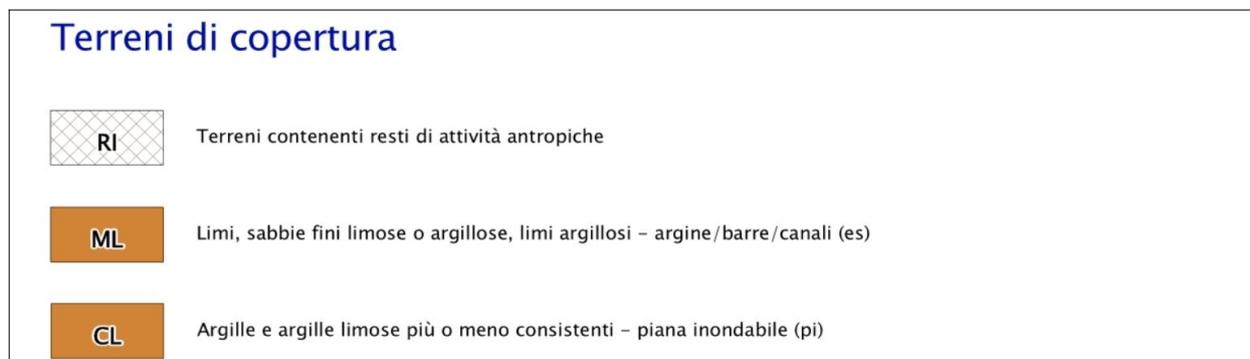


Figura 8.1 – Stralcio della legenda della Tavola 2a – Carta geologico-tecnica: si riportano le classi geotecniche USCS/AGI che caratterizzano il sottosuolo meno profondo del territorio comunale di Russi

### 8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, individua con specifica simbologia, le misure tromografiche per classi di frequenza, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n. 2047/2018 della Regione Emilia-Romagna e nella DGR 630/2019, ovvero:  $0,6 \text{ Hz} < f_0 \leq 1 \text{ Hz}$ ;  $1 \text{ Hz} < f_0 \leq 2$ ;  $2 \text{ Hz} < f_0 \leq 8 \text{ Hz}$ ;  $f_0 > 8 \text{ Hz}$ .

Le registrazioni HVSR vengono anche classificate in base all'entità del rapporto spettrale H/V riferito a contrasti di impedenza alla base delle coperture, in particolare discriminando le prove che hanno ricavato rapporti:  $H/V < 2$  (ampiezze basse);  $2 \leq H/V < 3$  (ampiezze moderate);  $H/V \leq 3$  (ampiezze elevate).

Sono infine riportati per ogni singola misura i valori delle frequenze di risonanza fondamentale  $f_0$  e le eventuali ulteriori frequenze di possibile amplificazione ( $f_1$  e  $f_2$ ).

Si rimanda al capitolo 5 per un'illustrazione più dettagliata dei risultati ottenuti dalle registrazioni sismiche HVSR, tuttavia si evidenzia come tutte le misure (salvo alcune registrazioni, inficiate da errori di acquisizione) abbiano ricavato frequenze fondamentali prevalentemente comprese tra 0,9 Hz e 1.1 Hz.

### 8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS

La cartografia MOPS, elaborata a diversa scala 1:10.000, rappresenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali" e in "Zone di attenzione per instabilità" per liquefazioni. Questa cartografia costituisce l'elaborato fondamentale dello studio sismico di "livello 1".

La carta riporta, inoltre, le "forme di superficie e sepolte" (paleoalvei, già presenti nella carta geologico-tecnica), i punti di misura di rumore ambientale (con l'indicazione della

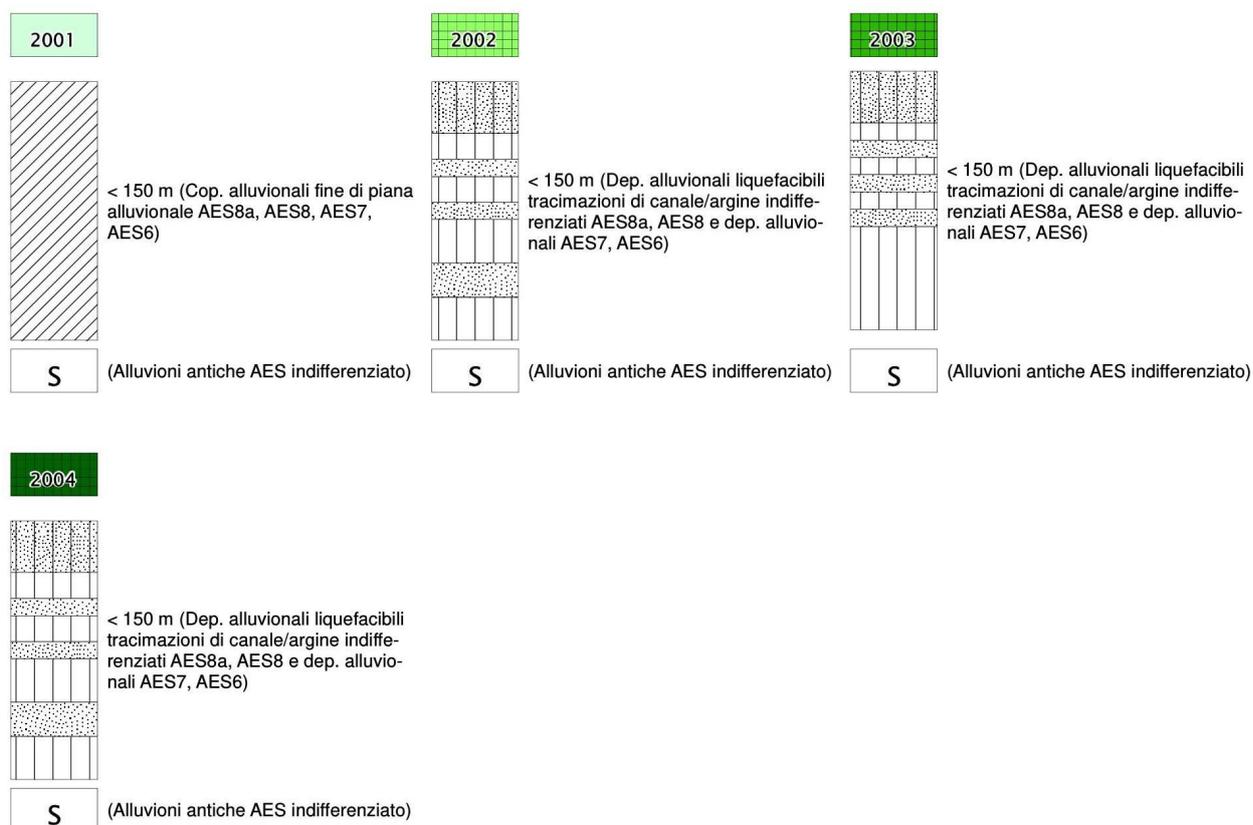
frequenza fondamentale) e limiti delle aree interessate dalla microzonazione sismica di “livello 2”.

Rispetto alle diverse litologie (superficiali) distinte nella carta geologico-tecnica, le MOPS hanno considerato profondità maggiori, tuttavia cercando di arrivare a delle semplificazioni, nel senso di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle criticità locali. Si è tuttavia inteso di conservare una distinzione anche in termini di attribuzione deposizionale dei sedimenti meno profondi (tracimazioni e/o depositi di barra/canale/argine attribuibili al fiume Lamone oppure al fiume Montone).

Sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, nel territorio studiato non si riscontrano “zone stabili”, e si è delimitata una sola “zona stabile suscettibile di amplificazioni”. Si sono infine distinte tre MOPS classificabili come “zone di attenzione per instabilità” riconducibile a possibilità di fenomeni di liquefazioni in caso di scuorimento sismico.

Per ciascuna zona, in legenda si riportano le principali caratteristiche litostratigrafiche e il contesto deposizionale (vedi paragrafo 7.2).

Il seguente schema riporta per le MOPS delimitate nella cartografia i rispettivi rapporti stratigrafici rappresentativi:



## 8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S

La <<Carta delle velocità delle onde di taglio S>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura di  $V_s$ , con indicazione, per ogni punto di controllo, del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ( $V_{s_{30}}$ ). Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale, sia valutata con approccio semplificato (DGR 476/2021; criteri nazionali ICMS 2008), sia da valutare con modellazioni numeriche.

Informazioni relative alle tipologie d'indagine e agli esiti delle  $V_s$  misurate nelle aree di approfondimento, sono riportate nei precedenti capitoli (in particolare nel capitolo 5) a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

## 8.6 Carta di microzonazione sismica livello 2

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 2>> sono anch'esse elaborate alla scala di dettaglio 1:10.000 e riportano i fattori di amplificazioni calcolati per le “zone stabili suscettibili di amplificazioni” e per le “zone di attenzione per instabilità” da liquefazioni riscontrate nel territorio studiato di Russi e che derivano dalla cartografia MOPS.

Occorre precisare che la microzonazione di “livello 2” ha interessato soltanto la parte di territorio comunale urbanizzato, un suo ulteriore intorno, nonché gli areali che includono la viabilità di connessione relativa all'analisi delle CLE.

Le cartografie di microzonazione sismica rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente approfondimento di “livello 2” in quanto riportano per ogni zona i fattori di amplificazione calcolati. In questo senso è necessario specificare che sia alle “zone stabili suscettibili di amplificazioni”, sia alle “zone di attenzione per instabilità” da liquefazioni vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SA; FA SI) attraverso le suddivisione del territorio studiato in classi di amplificazione, come previsto dagli Indirizzi della CTMS e come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.2). Si rammenta che per gli areali studiati i fattori di amplificazione vengono attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. DGR 476/2021, allegato A2).

La grafica standard (colore pieno) consente di attribuire alle zone di attenzione i rispettivi parametri di amplificazione.

In sintesi, sono state elaborate le seguenti otto cartografie di microzonazione sismica:

- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 –  $FA_{PGA}$  → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0));
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SA1}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SA2}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,4 e 0,8 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SA3}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra

0,7 e 1,1 secondi);

- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SA4}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SI1}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SI2}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,0 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SI3}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi).

## 8.7 Carta della distribuzione dei valori di $H_{SM}$

Le mappe di pericolosità sismica denominate <<Carta della distribuzione dei valori di  $H_{SM}$ >> sono anch'esse elaborate alla scala di dettaglio 1:10.000 e riportano i valori di  $H_{SM}$  (Naso et al., 2019) per gli areali interessati dalla microzonazione sismica di livello 2.

Si rammenta che il valore di  $H_{SM}$  rappresenta un parametro di pericolosità che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in  $cm/s^2$ ) come indicato nel paragrafo 7.3.

## 9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) – Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Albarello D. e Castellaro S. (2011) – Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P., Vannucci G. (2004): Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000. Con note illustrative. Regione Emilia-Romagna-SGSS, CNR-IGG. SELCA, Firenze.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) – *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32–56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6): 641–52.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) – Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) – Seismic soil classification from a different perspective. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13–15.
- Castellaro S. (2012) – H/V: un contributo oltre Vs30. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M.
- Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) – Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2018) – Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1. <https://www.centromicrozonationesismica.it/it/download/category/23-standard-ms-e-cle>.
- Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna.
- DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0:

*A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas.* Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>

Elmi, Zecchi (1982) – *Note sulla sismicità dell'Appennino emiliano-romagnolo*. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. *Società Geologica Italiana – Guide Geologiche regionali*, Bologna.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., Martelli, L. (2012). *Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa adriatica romagnola*. In: “La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L’esperienza della regione Emilia-Romagna”. Regione Emilia-Romagna Eds.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., (2013). *Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT e CPTU*. Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Ingegneria – Sezione geotecnica.

Galli P., Castenetto S., Peronace E. (2012) – *Terremoti dell'Emilia – maggio 2012 – Rilievo Macrosismico MCS speditivo – Rapporto finale*. Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico.

Galli, Meloni, Rossi (1999) – *Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters*. European Geophysical Society XXVIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands.

Gruppo di lavoro MS (2008) – *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area “Rischio Sismico” all’indirizzo: [http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir\\_pk=395&cms\\_pk=15833](http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833).

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018) – *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.–1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.–1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>.

ISIDe Working Group (2010) – *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. [Online], Available: <http://iside.rm.ingv.it>.

ISPRA (2009) – *Carta Geologica d'Italia, Fogli 221 e 203*. Coord. Scientifico: Regione Emilia-Romagna. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia – Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. SystemCart, Roma. <https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/emilia.html>.

Lanzo G. & Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius.

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D’Amico S., Conte S., Rocchetti E., Antonucci A. (2019). *Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 2.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.2>.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi C., Madiati C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V. Con Il Contributo Di Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C. e Ricci L. (2013) – *Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura Emiliana del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti del 32° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Fisica della Terra Solida, Trieste, ISBN: 978-88-902101-7-4.

Martelli (2015) – *I terremoti dell'Appennino Bolognese*. La geologia. Nueter, XLI, n. 82, 387-395.

Meletti M., Valensise G (a cura di) (2004) – *Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>.

Ministero delle Infrastrutture (2018) – D.M. 17/01/2018 (G.U. n.42 del 20/02/2018 – Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Mucciarelli M. (a cura di) (2012) – *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici. Studi teorici ed applicazioni professionali*. Edizioni Aracne.

Naso G., Martelli L., Baglione M., Brammerini F., Castenetto S., D'Intinosante V., Ercolessi G. (2019): *Maps for land management: from geology to seismic hazard*, Boll. Geof. Teor. Appl., Vol. 60, DOI 10.4430/bgta0263.

Pieri M. e Groppi G. (1981) – Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy). Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.

RER – ENI, Agip (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ENI Agip Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.

Martelli L. (coord.), Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F. C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F. (2017): *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe. Con note illustrative*. Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. Con note illustrative e CD. DREAM Italia.

*Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Carta Geologica in scala 1:10.000 della regione Emilia-Romagna – cartografia interattiva consultabile on line:* [https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia\\_sgss](https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss).

Regione Emilia Romagna – Legge Regionale n.19/2008 – “Norme per la riduzione del rischio sismico, con le modifiche apportate dalla L.R. 6 luglio 2009, n.6 “Governo e riqualificazione solidale del territorio”. BURER n. 184 del 30/10/2008.

Regione Emilia Romagna – Legge Regionale n.24/2017 – “Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio”. BURERT n. 304 del 21/12/2017.

Regione Emilia Romagna – *Delibera Regionale n.112/2007 – “Approvazione dell'atto di*

*indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>*. BURER n. 64 del 17 maggio 2007.

Regione Emilia Romagna - *Delibera della Giunta Regionale n. 2193/2015 - "Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>, di cui alla deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112"*. BURER n. 4 del 8 gennaio 2016 parte seconda.

Regione Emilia Romagna - *Delibera della Giunta Regionale n. 630/2019 - "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n.24/2017"*. BURER. n. 143 del 6 maggio 2019 parte seconda.

Regione Emilia Romagna - *Delibera della Giunta Regionale n. 476/2021 (e DGR integrativa n.564/2021)- Aggiornamento dell'"Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n.24/2017"*. Di cui alla *Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019 n.630*. BURERT n. 137 del 12/5/2021 (parte seconda) e BURERT n. 111 del 20/04/2021.

Robertson P.K. - *Performance based earthquake design using the CPT* - Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, 2009.

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (2019). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 2.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.2>.