



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



Unione Rubicone e Mare



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3

Regione Emilia-Romagna

Unione Rubicone e Mare

(Gatteo, San Mauro Pascoli e Savignano sul Rubicone)



Relazione illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Studio di geologia Gabriele Tarabusi	27/10/2014

*Coordinamento dello studio di
Microzonazione Sismica:* dott. geol. Gabriele Tarabusi

Redazione della relazione: dott. geol. Gabriele Tarabusi
dott. geol. Ruggero Mazzoni
dott.ssa Sofia Gamberi

*Creazione geodatabase dei dati geologici
e geotecnici:* dott. geol. Gabriele Tarabusi
dott.ssa Sofia Gamberi

Elaborazione tavole cartografiche: dott.ssa Sofia Gamberi

Elaborazione dei dati stratigrafici: dott. geol. Ruggero Mazzoni
dott. geol. Gabriele Tarabusi

*Esecuzione ed interpretazione misure di
microtremore a stazione singola:* Studio di geologia Tarabusi
PROGEO srl

*Esecuzione ed elaborazione indagini
geognostiche in situ:* SOGEO srl

*Esecuzione ed interpretazione indagini
MASW, ESAC e DOWN-HOLE:* PROGEO srl

Esecuzione prove di laboratorio: ISMGEO - Istituto Sperimentale Modelli Geotecnici srl

INDICE

1. Introduzione	2
2. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento	5
3. Assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico	16
4. Dati geotecnici e geofisici	32
5. Modello del sottosuolo	52
6. Interpretazioni e incertezze	54
7. Metodologie di elaborazione e risultati	62
8. Elaborati cartografici	82
9. Commenti finali e criticità	92
10. Bibliografia	96
Allegato 1 - Sezioni geologiche	
Allegato 2 - Rapporti delle indagini	
Allegato 3 - Rapporti delle prove geotecniche di laboratorio	
Allegato 4 - Rapporti di calcolo per la stima degli indici di liquefazione	
Allegato 5 - Rapporti delle prove geotecniche di laboratorio pregresse (Gatteo Mare 1999)	

1. INTRODUZIONE

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Il presente studio di Microzonazione Sismica di secondo livello e locali approfondimenti di terzo livello dei comuni dell'Unione Rubicone e Mare (Gatteo, San Mauro Pascoli e Savignano sul Rubicone) in provincia di Forlì-Cesena, è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera n. 1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013) della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile 52/13 a favore degli Enti locali". L'Unione dei comuni del Rubicone, oggi Unione Rubicone e Mare (Gatteo, San Mauro Pascoli e Savignano sul Rubicone), è infatti risultata assegnataria di tali contributi.

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 3.0", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), da qui in avanti "Standard MS 3.0";

- "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:

- Delibera Assemblea Legislativa (DAL) n. 112/2007 Art. 16 c.1 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica";
- Norme del PTCP della Provincia di Forlì-Cesena in materia di rischio sismico, (Provincia di Forlì-Cesena 2006-2013);
- L.R. 30/10/2008 n.19 "Norme per la riduzione del Rischio Sismico";
- D.M. del 14/01/2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".

1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Scopo della microzonazione sismica è la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento dei terreni durante un evento sismico e ai possibili effetti indotti dallo scuotimento. Essa rappresenta uno strumento di prevenzione e riduzione del rischio sismico particolarmente efficace se realizzato e applicato già in fase di pianificazione urbanistica.

Costituisce quindi un supporto fondamentale agli strumenti di pianificazione comunale per indirizzare le scelte urbanistiche verso le aree a minore pericolosità sismica.

Per ottimizzare costi e tempi la microzonazione sismica è attualmente richiesta nelle aree urbanizzate, in quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e lungo le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (Regione Emilia-Romagna, 2013).

Per il presente lavoro, l'area oggetto dello studio di microzonazione di dettaglio (definita come "ambiti di studio" nelle cartografie) è stata perimetrata dai tecnici dell'Ufficio Unico di Piano (Comuni di Gatteo, San Mauro Pascoli e Savignano sul Rubicone). Il perimetro di tale area, divisa in due porzioni distinte, una più estesa, nell'entroterra, in corrispondenza dei capoluoghi e una larga circa 2,5 km lungo la costa, è identificata in tutte le tavole cartografiche con un tratto di colore azzurro.

1.3 Elaborati prodotti

I documenti di riferimento e sintesi del presente studio sono costituiti dalle tavole cartografiche (corredate da 9 sezioni geologiche) e dai dati informatizzati ad esse associate. La presente relazione, oltre a caratterizzare e inquadrare l'area dell'Unione nel contesto geologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie.

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica sono i seguenti:

- le 24 tavole cartografiche in formato PDF (illustrate al capitolo 8), 8 per ciascuno dei 3 comuni dell'Unione (tabella 1);
- i 3 archivi informatizzati dei dati (cartografici e alfanumerici delle indagini) in formato "mdb" geodatabase, uno per ciascuno dei 3 comuni dell'Unione;
- la presente relazione in formato PDF, unica per i 3 comuni dell'Unione;
- le 9 sezioni geologiche (allegato 1) in formato PDF;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione (allegato 2);
- i rapporti delle prove geotecniche di laboratorio di nuova esecuzione (allegato 3);
- i rapporti di calcolo per la stima degli indici di liquefazione sulle verticali delle prove penetrometriche statiche (allegato 4);
- i rapporti delle prove geotecniche di laboratorio pregresse (allegato 5).

Elaborato cartografico	Comune di Gatteo	Comune di Savignano	Comune di San Mauro Pascoli
Carta delle indagini	Tavola 1a	Tavola 1b	Tavola 1c
Carta geologico-tecnica	Tavola 2a	Tavola 2b	Tavola 2c
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3a	Tavola 3b	Tavola 3c
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4a	Tavola 4b	Tavola 4c
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5a	Tavola 5b	Tavola 5c
Carta di microzonazione sismica di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 - FAPGA	Tavola 6a	Tavola 6b	Tavola 6c
Carta di microzonazione sismica di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 - FA _{0.1-0.5}	Tavola 7a	Tavola 7b	Tavola 7c
Carta di microzonazione sismica di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 - FA _{0.5-1}	Tavola 8a	Tavola 8b	Tavola 8c

Tabella 1. Elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica per ciascuno dei 3 comuni.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate, per il primo, il secondo e il terzo livello di approfondimento, negli allegati C e D della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013). Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi, integrandoli con la richiesta di alcuni specifici elaborati aggiuntivi, come specificato al capitolo 8. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente studio 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.

Si sottolinea che, come previsto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013) e come dettagliato all'inizio del paragrafo, per i tre comuni sono state realizzate tre distinte serie di elaborati cartografici (tabella 1) e tre banche dati separate. Si è però deciso di elaborare un'unica relazione con i relativi allegati, in quanto lo studio è stato condotto in maniera integrata sui tre comuni, che presentano, per gran parte del loro territorio, caratteristiche analoghe per fasce parallele alla costa. Le attività svolte, dalla programmazione delle indagini alla suddivisione areale delle carte di microzonazione, sono state infatti condotte senza quasi tenere conto dei confini amministrativi, ma ragionando sempre sull'intera area in esame, nell'ottica di caratterizzare al meglio tutti gli ambiti di interesse a partire da una visione più generale dell'intero territorio dell'Unione, che integrasse tutti i dati disponibili. Anche in ragione dello sviluppo "allungato" dei tre comuni, in direzione perpendicolare alla costa, è apparso limitante il dover realizzare elaborati cartografici distinti, in quanto l'andamento di alcune suddivisioni areali del territorio è certamente meglio comprensibile se visto nell'insieme piuttosto che per singolo comune. A questo proposito basti pensare che la stretta fascia costiera su cui è presente il maggior rischio di liquefazione e su cui si sono concentrate le analisi previste per il terzo livello di approfondimento, con l'individuazione di aree a diverso indice di liquefazione (tavole 6, 7 e 8), si estende per circa 1,5 km in tutto, ma è divisa in senso trasversale dai confini dei tre comuni, che hanno uno sbocco al mare di appena poche centinaia di metri ciascuno. Appare evidente come la rappresentazione di quest'area in particolare, interessata da un'unica criticità geologica, risulti condizionata dalla suddivisione amministrativa, che comporta l'inevitabile scomposizione dei risultati cartografici dello studio in tre distinte tavole.

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

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.

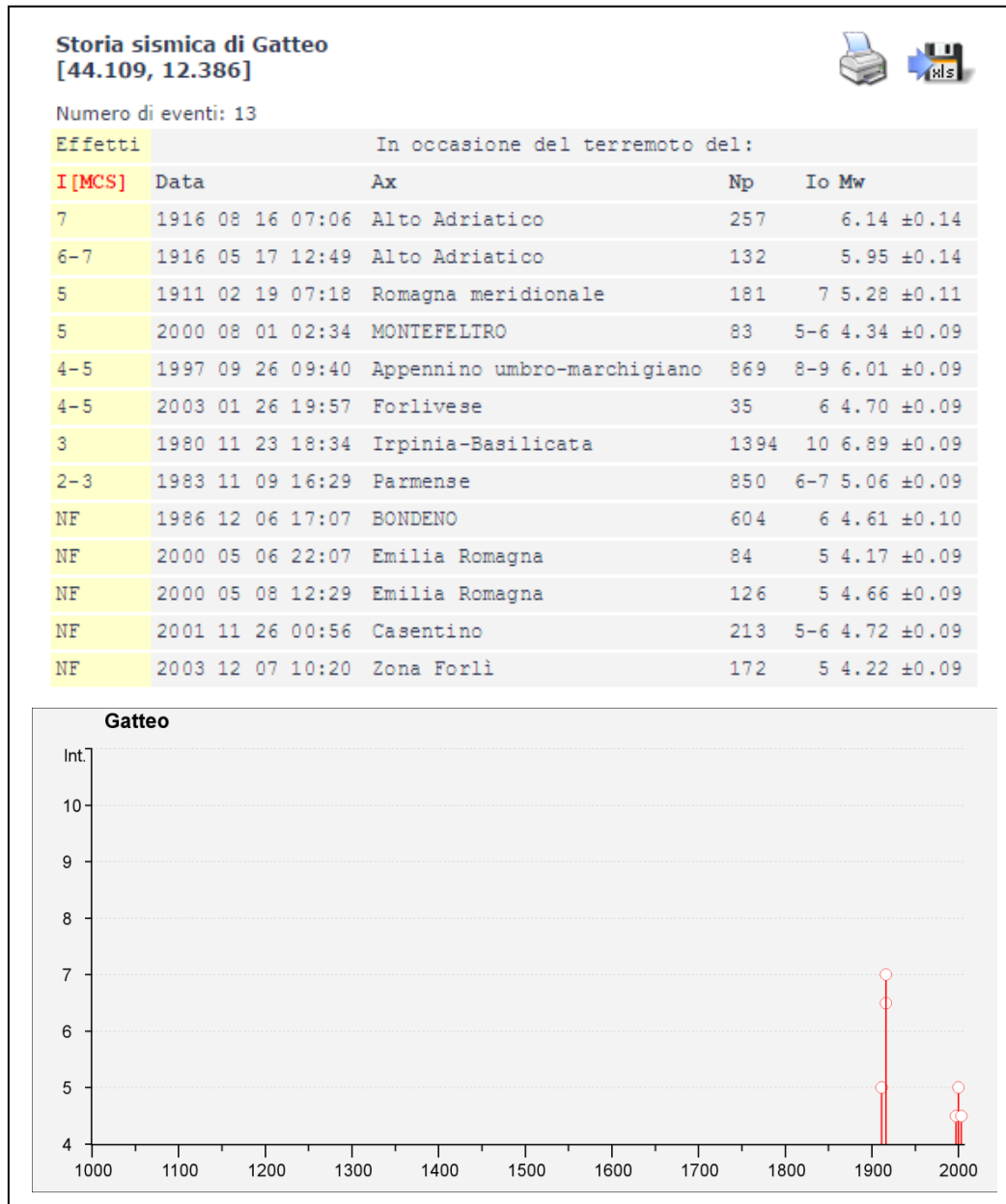
A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI11 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2011 (Rovida et al., 2011; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia fino al 2011;
- il DBMI11 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI11 (Locati et al., 2011 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni et al., 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), 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. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, 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 3.1.1 (DISS Working Group, 2010 e Basili et al., 2008; <http://diss.rm.ingv.it>), 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;
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;

- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 ad oggi.

2.1 Sismicità storica

Il DBMI11 (Locati et al., 2011), indica, per l'area dell'Unione, effetti a partire dall'anno 1672 con intensità macrosismiche che arrivano fino al grado VII della scala MCS (Sieberg, 1930). Di seguito si riportano le schede che sintetizzano in formato grafico e tabellare la storia sismica dei tre capoluoghi comunali.



MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

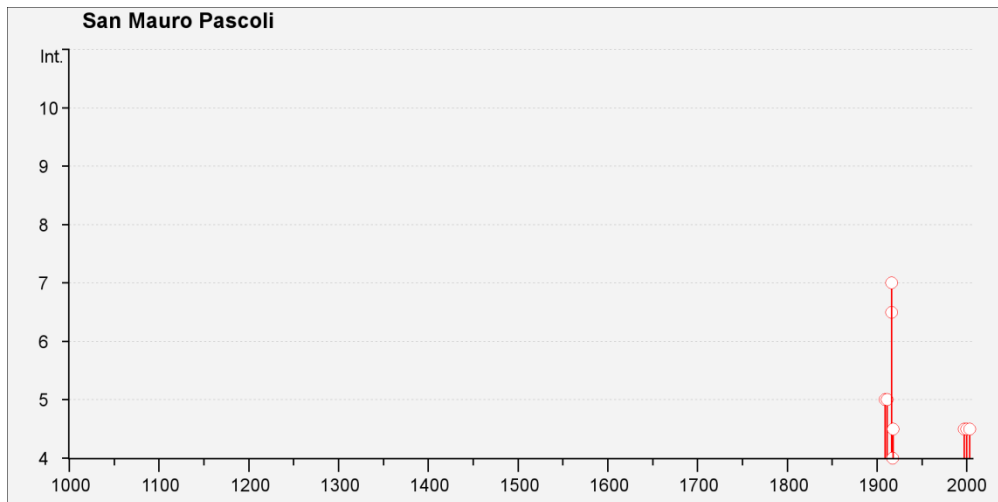
Storia sismica di San Mauro Pascoli [San Mauro di Romagna]
[44.106, 12.416]



Numero di eventi: 18

Effetti	In occasione del terremoto del:				
I [MCS]	Data	Ax	Np	Io Mw	
5	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	799	6-7 5.53 ±0.09	
5	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	181	7 5.28 ±0.11	
6-7	1916 05 17 12:49	Alto Adriatico	132	5.95 ±0.14	
7	1916 08 16 07:06	Alto Adriatico	257	6.14 ±0.14	
3	1917 04 26 09:35	Valtiberina	134	9-10 5.89 ±0.11	
4	1917 12 02 17:39	GALEATA	32	6-7 5.09 ±0.20	
4-5	1918 11 10 15:12	Appennino romagnolo	187	9 5.88 ±0.11	
NF	1986 12 06 17:07	BONDENO	604	6 4.61 ±0.10	
3	1997 09 26 00:33	Appennino umbro-marchigiano	760	5.70 ±0.09	
4-5	1997 09 26 09:40	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9 6.01 ±0.09	
3-4	1998 03 26 16:26	Appennino umbro-marchigiano	408	6 5.29 ±0.09	
3	2000 05 06 22:07	Emilia Romagna	84	5 4.17 ±0.09	
3	2000 05 08 12:29	Emilia Romagna	126	5 4.66 ±0.09	
3	2000 05 10 16:52	Emilia Romagna	151	5-6 4.86 ±0.09	
4-5	2000 08 01 02:34	MONTEFELTRO	83	5-6 4.34 ±0.09	
NF	2001 11 26 00:56	Casentino	213	5-6 4.72 ±0.09	
4-5	2003 01 26 19:57	Forlivese	35	6 4.70 ±0.09	
4-5	2003 12 07 10:20	Zona Forli	172	5 4.22 ±0.09	

San Mauro Pascoli



MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

Storia sismica di Savignano sul Rubicone
[44.092, 12.399]



Numero di eventi: 27

Effetti	In occasione del terremoto del:				
I [MCS]	Data	Ax	Np	Io	Mw
6-7	1672 04 14 15:45	Riminese	92	8	5.61 ±0.21
6-7	1786 12 25 01:00	Riminese	91	8	5.62 ±0.17
6-7	1875 03 17 23:51	Romagna sud-orientale	144		5.93 ±0.16
6	1916 05 17 12:49	Alto Adriatico	132		5.95 ±0.14
6	1916 08 16 07:06	Alto Adriatico	257		6.14 ±0.14
5	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	799	6-7	5.53 ±0.09
5	1916 06 16 01:27	Alto Adriatico	17		
4-5	1997 09 26 09:40	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	6.01 ±0.09
4-5	2003 01 26 19:57	Forlivese	35	6	4.70 ±0.09
4	1873 03 12 20:04	Marche meridionali	196	8	5.95 ±0.10
4	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	181	7	5.28 ±0.11
4	1952 07 04 20:35	Appennino romagnolo	64	7	4.99 ±0.18
4	1985 11 24 06:54	APP. FORLIVESE	29	5-6	4.32 ±0.16
4	1998 03 26 16:26	Appennino umbro-marchigiano	408	6	5.29 ±0.09
4	2000 08 01 02:34	MONTEFELTRO	83	5-6	4.34 ±0.09
3-4	2000 05 06 22:07	Emilia Romagna	84	5	4.17 ±0.09
3-4	2000 05 08 12:29	Emilia Romagna	126	5	4.66 ±0.09
3-4	2003 12 07 10:20	Zona Forlì	172	5	4.22 ±0.09
3	1997 09 26 00:33	Appennino umbro-marchigiano	760		5.70 ±0.09
3	2003 09 14 21:42	Appennino bolognese	133	6	5.29 ±0.09
2-3	2000 05 10 16:52	Emilia Romagna	151	5-6	4.86 ±0.09
2	1956 05 26 18:39	Appennino romagnolo	79	7	4.99 ±0.15
2	1956 06 03 01:45	Appennino romagnolo	62		
2	1983 11 09 16:29	Parmense	850	6-7	5.06 ±0.09
NF	1898 01 16 12:10	Romagna settentrionale	73	6-7	4.79 ±0.33
NF	1986 12 06 17:07	BONDENO	604	6	4.61 ±0.10
NF	2001 11 26 00:56	Casentino	213	5-6	4.72 ±0.09

Savignano sul Rubicone



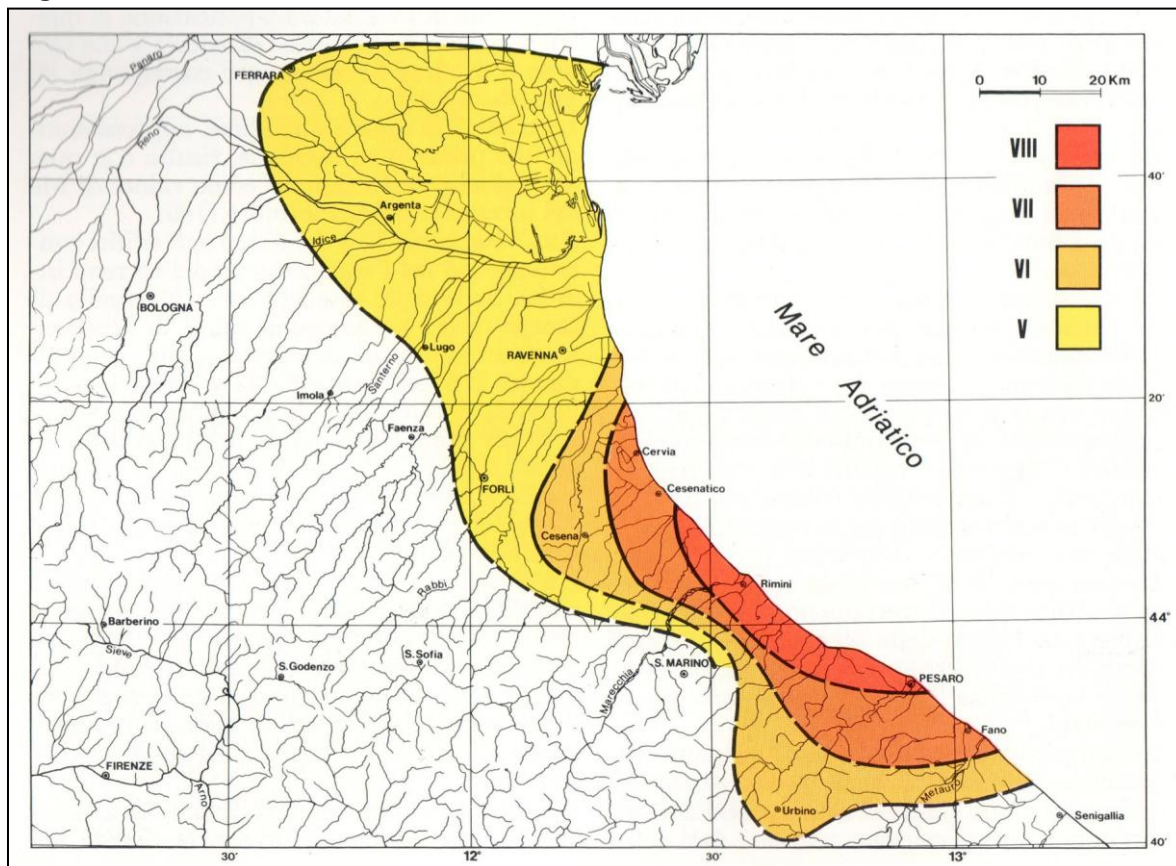
MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

Secondo quanto riportato nel DBMI, gli eventi sismici che hanno prodotto danni nell'area di studio sono quattro, tutti con intensità epicentrale pari al grado VIII della scala MCS: quelli del 1672, 1786 e 1875 per cui sono riportati effetti solo a Savignano sul Rubicone (grado VI-VII MCS), e la sequenza del 1916 (grado VI-VII MCS a Savignano sul Rubicone e grado VII MCS a Gatteo e San Mauro Pascoli). Prima del 1672 non ci sono dati, ma si può ragionevolmente ritenere che in tempi storici vi siano stati altri terremoti analoghi per frequenza e intensità.

Di seguito vengono riportate sotto forma di schede le sintesi descrittive degli effetti nelle località di interesse per ciascuno dei quattro eventi sopra citati. I dati descrittivi sono tratti dal catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007), mentre quelli parametrici dal CPTI11 (Rovida et al., 2011). Per ogni scheda viene riportata la carta delle isosisme tratta dal libro "Il terremoto di Rimini e della costa romagnola: 25 dicembre 1786" (Guidoboni e Ferrari, 1986), che rappresenta un riferimento fondamentale per inquadrare la sismicità dell'area e la distribuzione e la tipologia del danneggiamento sull'edificato storico.

1672, 14 aprile

Area epicentrale: *Riminense*
Intensità epicentrale: *grado VIII MCS*
Magnitudo: *5.6 +/- 0.21 Mw*



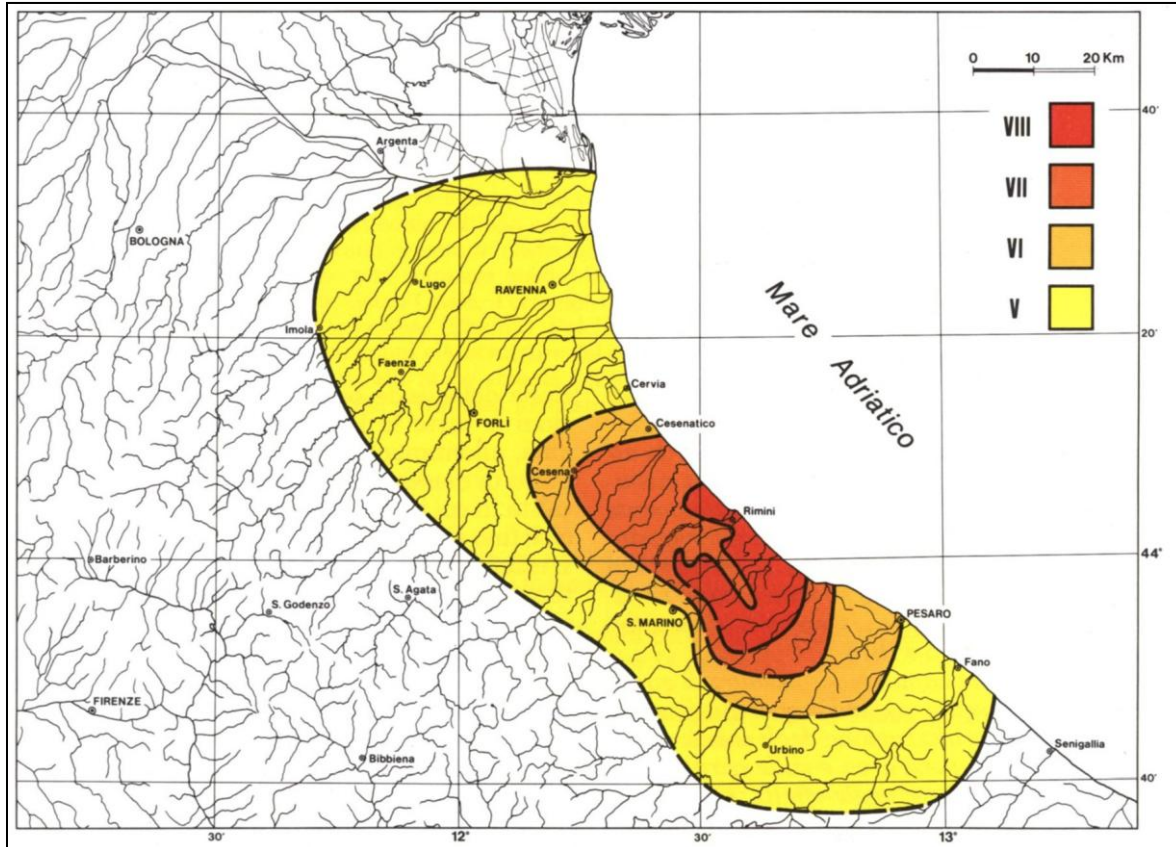
Effetti a Savignano sul Rubicone (grado VI-VII MCS):
Una relazione in versi, coeva all'evento e stampata a Forlì, riporta una generica segnalazione di danni.

1786, 25 dicembre

Area epicentrale: *Riminense*

Intensità epicentrale: *grado VIII MCS*

Magnitudo: *5.62 +/- 0.17 Mw*



Effetti a Savignano sul Rubicone (grado VI MCS):

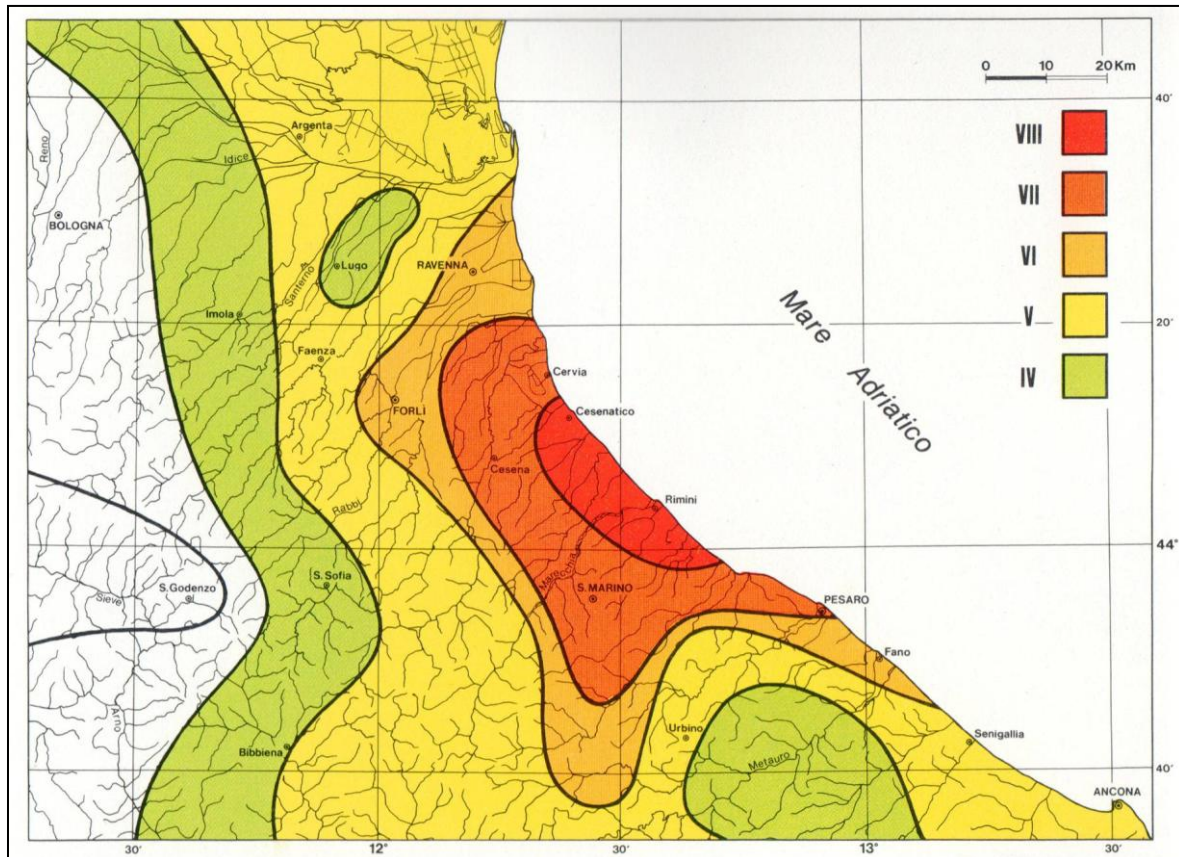
Giornali dell'epoca riportarono la notizia di gravi danni e vittime; fonti attendibili hanno consentito invece di ridimensionare gli effetti: vi furono danni limitati.

1875, 17 marzo

Area epicentrale: *Riminense*

Intensità epicentrale: *grado VIII MCS*

Magnitudo: *5.93 +/- 0.16 Mw*



Effetti a Savignano sul Rubicone (grado VI-VII MCS):

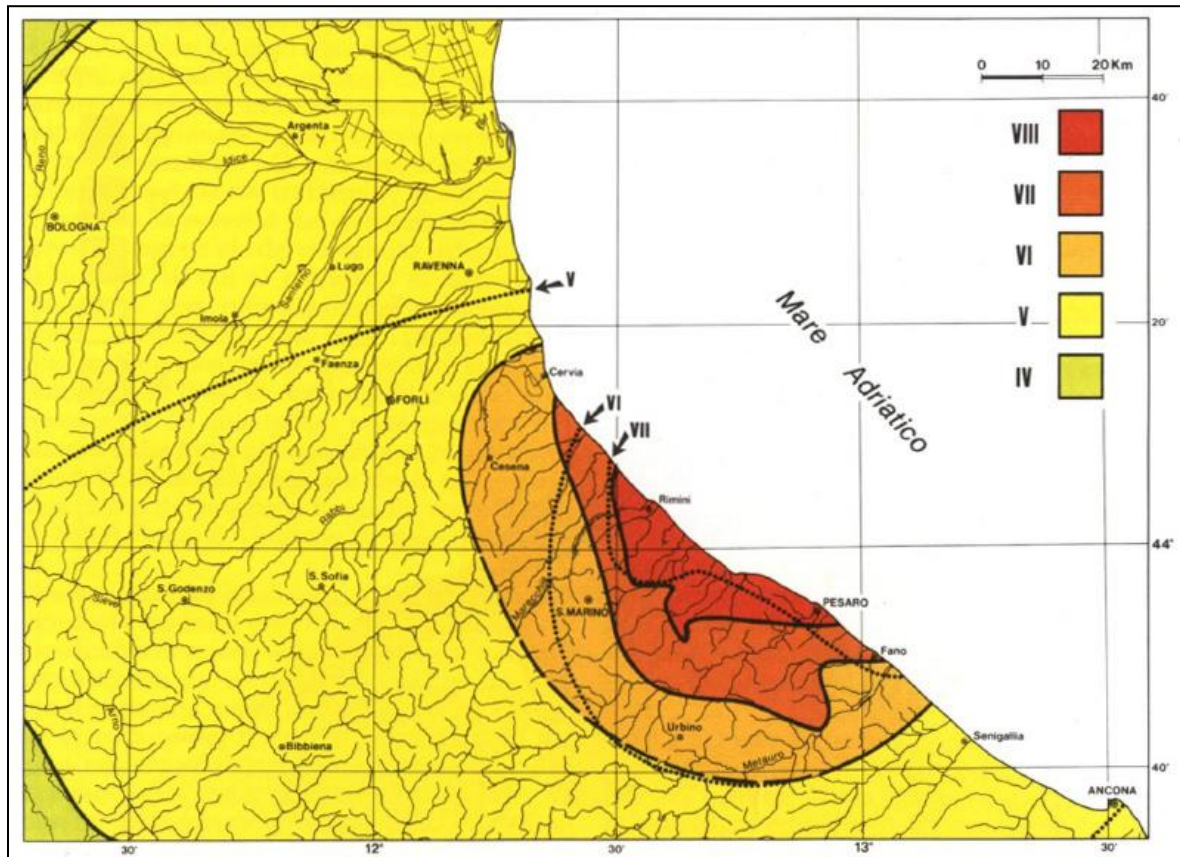
La scossa causò danni non precisati.

1916, 17 maggio e 16 agosto

Area epicentrale: *Alto Adriatico*

Intensità epicentrale: *grado VIII MCS (17 maggio e 16 agosto)*

Magnitudo: *5.95 +/- 0.14 (17 maggio) e Mw 6.14 +/- 0.14 Mw (16 agosto)*



Isosisme del 17 maggio (linea tratteggiata) e del 16 agosto (linea continua)

Effetti a Savignano sul Rubicone (grado VI MCS 17 maggio e 16 agosto):

La scossa del 17 maggio, della durata di circa 15 secondi, fu fortemente avvertita dalla totalità degli abitanti, i quali, presi dal panico, si riversarono nelle strade. Quasi tutti gli edifici furono danneggiati: le case di costruzione più recente furono lievemente lesionate, mentre in quasi tutte le case di vecchia o cattiva costruzione furono rilevati danni più gravi e caduta dei comignoli. La scossa del 16 agosto, della durata di circa 20 secondi, fu avvertita da tutti. Causò fenditure leggere in 100 case mal costruite il 16 giugno (scossa minore non riportata nel DBMI) e il 16 agosto a Savignano fu rilevata agitazione nelle acque dei pozzi.

Effetti a Gatteo (VI-VI MCS scossa del 17 maggio - VII MCS scossa del 16 agosto):

La scossa del 17 maggio causò danni alle abitazioni e alla chiesa parrocchiale. La scossa del 16 agosto causò ulteriori danni; secondo i rilievi del Genio civile 3 abitazioni private necessitavano di urgenti lavori di riparazione: la prima aveva i muri gravemente lesionati e pericolanti e doveva essere sgomberata; nella seconda si dovevano riparare i soffitti e il tetto, la terza era in pratica da ricostruire interamente. Inoltre, fu richiesta al prefetto la chiusura della chiesa parrocchiale di San Lorenzo e la demolizione parziale dell'edificio e del campanile annesso e fu segnalato alla Soprintendenza ai Monumenti di Ravenna che la cella campanaria del Castello era pericolante.

Effetti a San Mauro (VI-VI MCS scossa del 17 maggio - VII MCS scossa del 16 agosto):

La scossa del 17 maggio causò danni alla chiesa parrocchiale e alla Caserma dei Carabinieri. La scossa del 16 agosto, danneggiò lievemente quasi tutte le case e ne rese inabitabili 5.

Sulla base di quanto sopra indicato ed in particolare osservando le isosisme dei quattro terremoti principali noti, risulta evidente la caratteristica di propagazione efficace degli effetti in direzione parallela alla costa e come almeno una parte degli epicentri debbano essere localizzati in mare, ma comunque tutti in prossimità della costa dell'area in esame. In questo senso è importante notare come i centri capoluogo oggetto del presente studio siano collocati tutti nell'entroterra ad alcuni chilometri dalla linea di riva (circa 6 per Gatteo e San Mauro Pascoli, circa 8 per Savignano sul Rubicone), pertanto più distanti dalla zona che si può considerare essere stata soggetta al massimo scuotimento. Considerare quindi la sismicità storica dei capoluoghi come rappresentativa delle intere aree comunali porterebbe certamente ad una sottostima per gli ambiti costieri. Non essendo disponibili informazioni dalle fonti storiche per le frazioni e quindi nemmeno per le zone costiere dell'Unione Rubicone e Mare (oggi intensamente antropizzate, ma un tempo scarsamente popolate), per avere un quadro indicativo anche per tali ambiti dei possibili effetti di terremoti di analoga intensità, è possibile fare riferimento alla storia sismica del vicino abitato di Cesenatico, porto della città di Cesena sin dal 1300, che viene riportata in formato grafico e tabellare nella pagina seguente.

In particolare il terremoto del 1875, per cui si evidenzia il massimo danneggiamento a Rimini e Cesenatico (VIII MCS), deve avere prodotto il massimo scuotimento lungo la costa, per cui, per analogia, agli ambiti di studio più prossimi al mare può ragionevolmente essere attribuita una intensità ipotetica circa pari al grado VIII della scala MCS (sulla base degli immaginabili effetti che si sarebbero potuti riscontrare se ci fosse stato un edificio analogo a quello dei due centri costieri per cui si hanno informazioni).

È importante sottolineare che per il terremoto del 17 marzo del 1875 il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007), sintetizza un quadro piuttosto dettagliato di diffusi effetti sull'ambiente fisico, concentrati proprio lungo la costa, ascrivibili a fenomeni di maremoto, fratturazione e probabili liquefazioni dei terreni:

I pescatori che si trovavano sulle barche per il lavoro notturno osservarono una forte agitazione anomala del mare in diverse località: a Rimini, Pesaro e Ancona e nelle acque dei canali di Cervia e Cesenatico. Nel tratto di mare tra Cervia e Cesenatico fu osservata la formazione di alcune onde di maremoto, che però, sulla costa, non fecero danni.

Lungo la strada fra Cervia e Cesenatico si aprì una fenditura lunga 1 km e larga fino a 15 cm. Nella piazza di Cesenatico si aprì una spaccatura parallela al canale lunga parecchi metri. A Cervia e a Cesenatico si formarono inoltre numerose cavità a forma di imbuto, da cui fuoriuscirono getti d'acqua.

A Fermo, anche a causa delle abbondanti piogge, si attivarono delle frane. A Porretta Terme fu notato un abbassamento delle acque di un pozzo di 25 mm.

Fenomeni luminosi furono osservati a Cervia, Cesenatico, Cagli e San Marino.

Per lo stesso evento il "Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia" (Galli e Meloni, 1993) indica, sulla base delle stesse fonti storiche, l'occorrenza di fenomeni legati alla liquefazione dei terreni a Cesenatico (FC) e Cervia (RA).

Anche per gli effetti sull'ambiente può valere, anche se in misura minore perché si tratta di fenomeni in parte legati alle condizioni locali, l'analogia precedentemente proposta, per cui per la fascia costiera dei comuni dell'Unione Rubicone e Mare si può ipotizzare si siano verificati effetti analoghi a quelli osservati nel vicino abitato di Cesenatico.

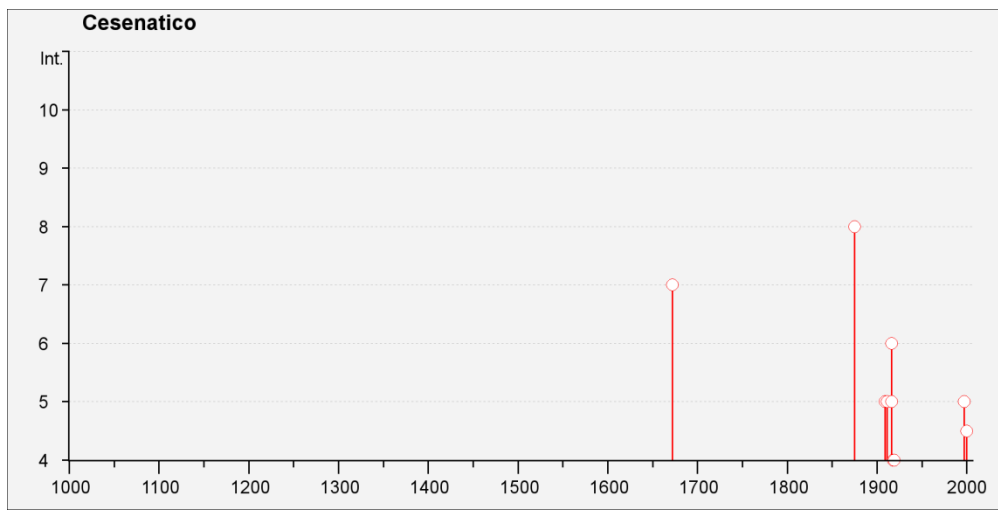
MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

Storia sismica di Cesenatico
[44.197, 12.405]



Numero di eventi: 27

Effetti	In occasione del terremoto del:			
I [MCS]	Data	Ax	Np	Io Mw
8	1875 03 17 23:51	Romagna sud-orientale	144	5.93 ±0.16
7	1672 04 14 15:45	Riminese	92	8 5.61 ±0.21
6	1916 05 17 12:49	Alto Adriatico	132	5.95 ±0.14
5	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	799	6-7 5.53 ±0.09
5	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	181	7 5.28 ±0.11
5	1916 06 16 01:27	Alto Adriatico	17	
5	1916 08 16 07:06	Alto Adriatico	257	6.14 ±0.14
5	1997 09 26 09:40	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9 6.01 ±0.09
4-5	2000 05 08 12:29	Emilia Romagna	126	5 4.66 ±0.09
4	1918 11 10 15:12	Appennino romagnolo	187	9 5.88 ±0.11
4	1919 06 29 15:06	Mugello	566	10 6.29 ±0.09
3-4	1915 01 13 06:52	Avezzano	1041	11 7.00 ±0.09
3	1914 10 27 09:22	Garfagnana	618	7 5.76 ±0.09
3	1929 04 10 05:43	Bolognese	87	7 5.03 ±0.13
3	1930 10 30 07:13	SENIGALLIA	263	8 5.81 ±0.09
3	1952 07 04 20:35	Appennino romagnolo	64	7 4.99 ±0.18
3	2003 09 14 21:42	Appennino bolognese	133	6 5.29 ±0.09
2-3	1913 07 21 22:35	VALLE DEL LAMONE	43	5-6 4.78 ±0.19
2-3	2000 05 06 22:07	Emilia Romagna	84	5 4.17 ±0.09
2-3	2001 11 26 00:56	Casentino	213	5-6 4.72 ±0.09
2	1956 05 26 18:39	Appennino romagnolo	79	7 4.99 ±0.15
2	1956 06 03 01:45	Appennino romagnolo	62	
2	1984 04 29 05:02	GUBBIO/VALFABBRICA	709	7 5.65 ±0.09
2	1986 12 06 17:07	BONDENO	604	6 4.61 ±0.10
2	2000 05 10 16:52	Emilia Romagna	151	5-6 4.86 ±0.09
NF	1895 03 23	COMACCHIO	37	6 4.74 ±0.31
NF	1987 07 05 13:12	VALMARECCHIA	90	6 4.47 ±0.09



2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il database DISS (DISS Working Group, 2010) indica la presenza di due sorgenti sismogenetiche che attraversano l'area di studio, una individuale "ITIS036 - Val Marecchia" e una composita "ITCS039 - Riminese onshore" (figura 1). Si tratta di una porzione del fronte compressivo appenninico esterno, un sistema di faglie con vergenza nord-est, a cui è associata una magnitudo massima pari a 5.7 Mw, relativa al terremoto del 17 marzo 1875, così come era riportato nella versione '99 del catalogo CPTI. La profondità è indicata tra 3 e 6 km, mentre lo slip-rate è compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno.

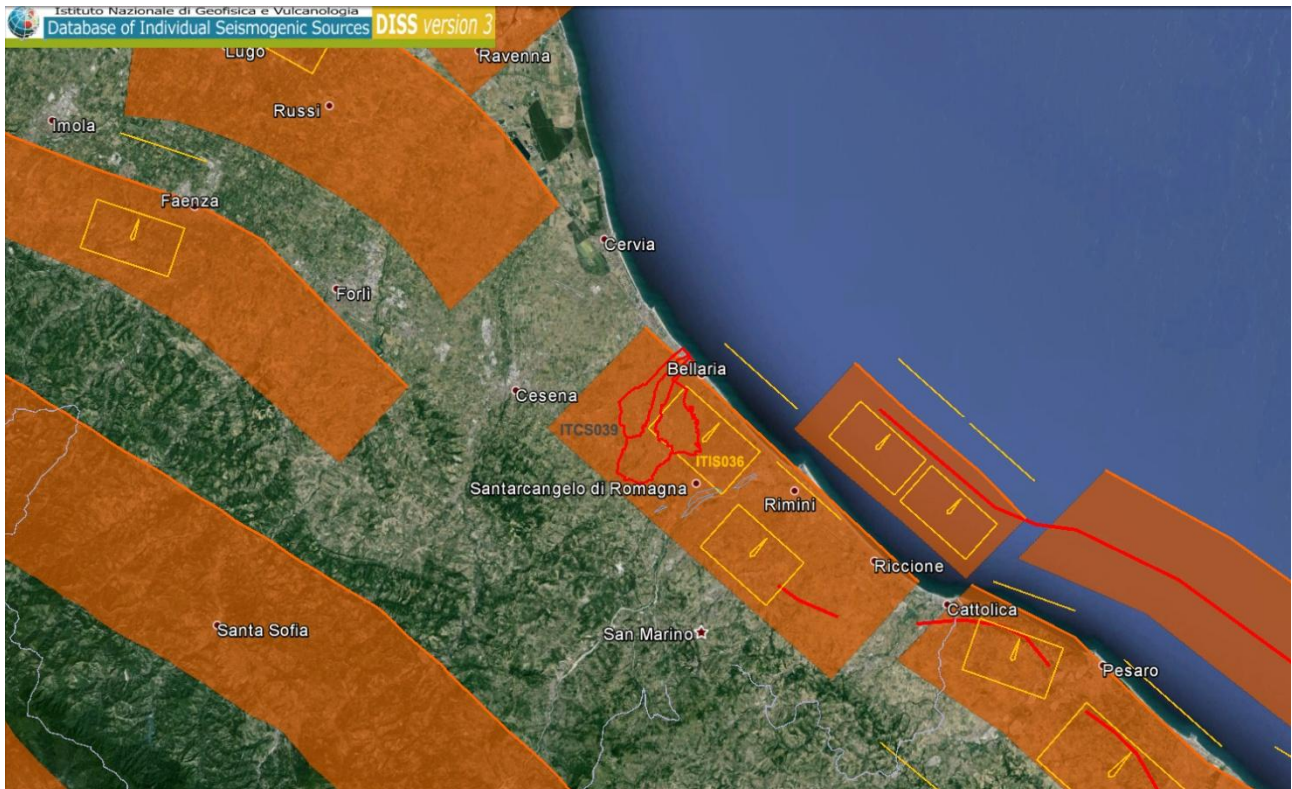


Figura 1. Le sorgenti sismogenetiche del database DISS 3.1.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è riportata l'area dei comuni dell'Unione Rubicone e Mare.

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade entro la Zona 917 "Rimini - Ancona", caratterizzata da un valore di Mw_{max} pari a 6.14.

3. ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

3.1 Inquadramento geologico-strutturale

Il territorio dell'Unione Rubicone e Mare si colloca nella estrema porzione orientale della Pianura Padana che tende a chiudersi, stretta fra le ultime dorsali appenniniche e il mare e che costituisce, dal punto di vista geologico, un grande bacino plio-quadernario di tipo sedimentario interessato da subsidenza differenziata sia nel tempo che nello spazio, con movimenti verticali controllati dai lineamenti strutturali presenti in profondità.

Il contesto geologico di riferimento è pertanto quello del Bacino Padano che strutturalmente rappresenta un'area di avanfossa, denominata "avanfossa appenninico-adriatica" (Ori et al., 1986) che si è originata per la subduzione della microplacca padano-adriatica al di sotto dell'orogene appenninico (Dondi e D'Andrea, 1986; Pieri e Groppi, 1981).

Gli eventi orogenetici che hanno portato alla successione stratigrafica attuale sono riconducibili alle spinte tettoniche di origine appenninica, avvenute secondo direzione SO-NE, le quali hanno determinato l'innalzamento dei depositi pliocenici. La linea di costa era collocata abbastanza vicino al limite di spartiacque che corrispondeva alla linea di cerniera tra aree in sollevamento e aree subsidenti. Tale linea era interrotta da faglie trasversali ad andamento antiappenninico su cui si sono impostati gli assi di erosione fluviale di cui si segnalano, per il territorio dell'Unione quelli del Rubicone e dell'Uso e poco più ad est quello del fiume Marecchia.

Pertanto si può dire che il bordo appenninico esterno e l'attuale fascia costiera sono il prodotto del sistema ad embrici e accavallamenti che ha regolato e regola il sollevamento e lo sviluppo della catena appenninica.

Dal punto di vista strutturale l'assetto del margine appenninico padano è modellato secondo blande sinclinali ed anticlinali nord-vergenti, con asse parallelo alla catena (ONO-ESE); la porzione esterna della catena appenninica si spinge a nord oltre Ferrara (pieghe ferraresi) e ad est in mare Adriatico (pieghe romagnole e adriatiche) e rappresenta una sequenza di grandi pieghe e sovrascorrimenti (Pieri e Groppi, 1981; Frassinetti e Viel, 1997) che, seppur sepolte ed occultate dalla copertura continentale alluvionale, costituiscono un elemento tettonico di rilievo, con ripercussioni dirette anche per il territorio in esame (Boccaletti et al., 2004). Queste strutture sono poi dislocate da faglie con componente trascorrente ed andamento antiappenninico NE-SO, trasversale quindi all'asse della catena (Fabbri, 2000).

L'attività tettonica nell'area è iniziata presumibilmente prima del Pliocene (5 milioni di anni fa) ed è proseguita per quasi tutto il Pliocene superiore, accavallando unità geologiche più antiche (mioceniche ed anche mesozoiche) su termini più giovani (Pliocene inferiore e medio) (Frassinetti e Viel, 1997); proprio in corrispondenza della fascia costiera è presente una prima dislocazione importante del sistema di archi adriatici (figura 2).

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

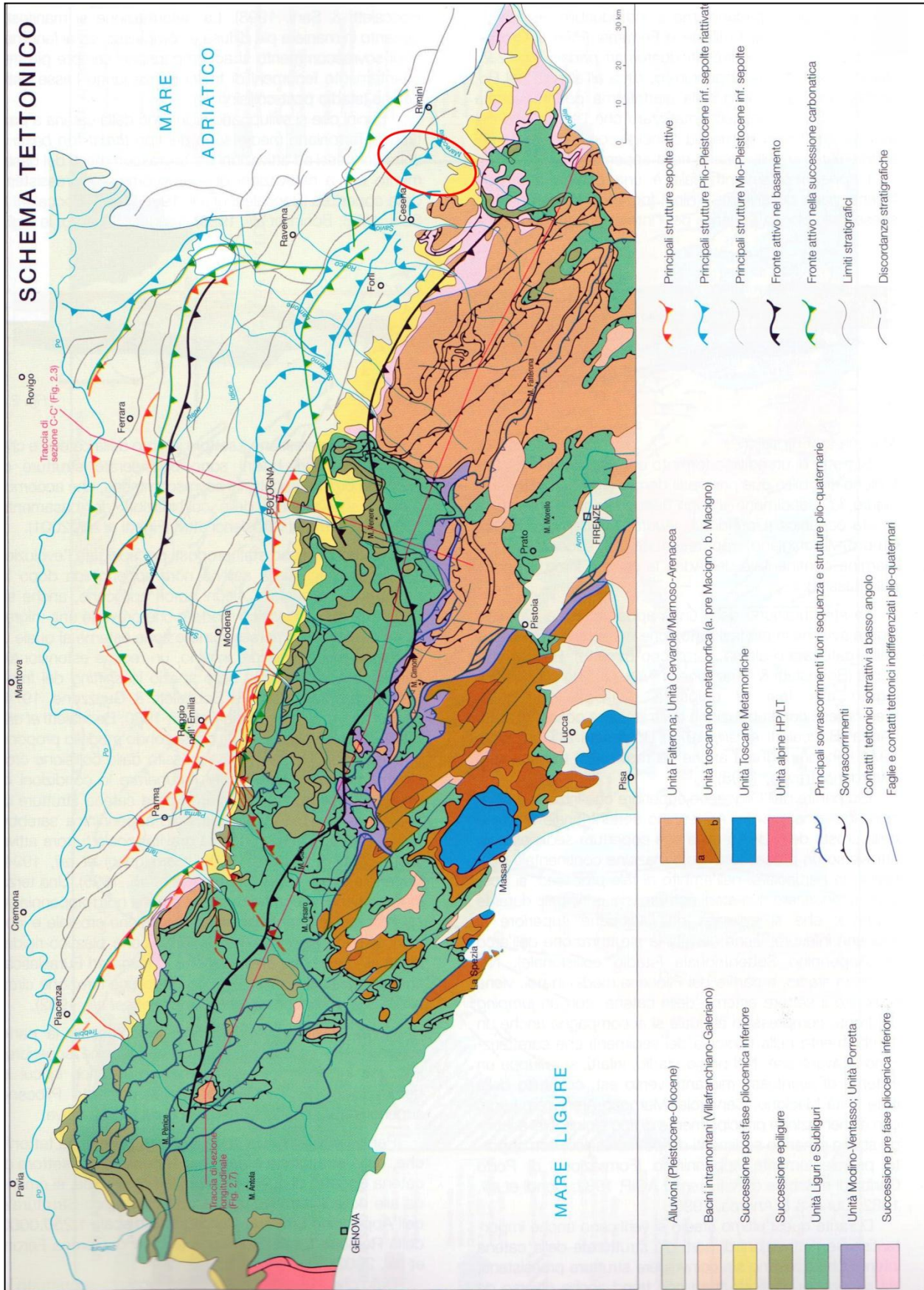


Figura 2. Schema tettonico dell'Emilia-Romagna, in cui è evidenziata col tratto rosso l'area di studio (Boccaletti et al., 2004).

La presenza di questa struttura tettonica in corrispondenza della linea di costa costituisce uno degli elementi di maggiore importanza geologica dell'area in studio. La

puntuale definizione e ricostruzione del volume di sedimenti quaternari che raccordano il margine della catena emersa con la costa, rappresenta una base conoscitiva necessaria per definire la possibile amplificazione litologica.

Il bacino padano è riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin-tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica che sigillano le strutture deformative plicative sottostanti; nell'area di studio la differenza di spessore dell'insieme di sedimenti pliocenici e quaternari è contenuta tra i duemila (a sud della linea di costa) ed i tremila metri (a nord, nel mare Adriatico), e pare poco significativa se confrontata con quella di altre zone della Pianura Padana (Frassinetti e Viel, 1997).

La fase pliocenica viene denominata di *flysch*, in contrasto con i sedimenti di *molassa* che hanno caratterizzato la fase successiva, nella quale divenne dominante l'*input* di materiale erosivo proveniente dallo smantellamento della catena Appenninica (Zoetemeijer, 1993). Con il Pleistocene si instaura un nuovo ciclo sedimentario (Qm, Ricci Lucchi et al., 1982), che porta al colmamento del Bacino Padano in un regime di subsidenza generalizzata. Gran parte delle aree precedentemente emerse vengono ricoperte dal mare ed inizia una sedimentazione nettamente sabbiosa. Successivamente la sedimentazione diviene esclusivamente continentale e prosegue con i depositi fluvio-lacustri delle alluvioni Padane (Qc, Ricci Lucchi et al., 1982). I sedimenti sabbiosi, limosi ed argillosi, che riempiono la parte più superficiale del bacino, sono stati depositi dal fiume Po e dagli altri fiumi, tributari e non, che provengono dalla catena Appenninica compresi il Rubicone e l'Uso (Dondi et al., 1982; Pieri, 1984; Dondi e D'Andrea, 1986; Ori, 1993; Vittori e Ventura, 1995; Amorosi et al., 1999).

Nel Pleistocene medio la prosecuzione del sollevamento del margine appenninico comporta il definitivo instaurarsi della deposizione continentale e l'inizio della sequenza deposizionale denominata Supersintema Emiliano-Romagnolo; le tre sequenze deposizionali proposte dalla Regione Emilia-Romagna per caratterizzare i depositi sedimentari a partire dal Pliocene medio-superiore corrispondono a cicli trasgressivo-regressivi.

I depositi del Quaternario, soprattutto del Pleistocene medio-superiore, rappresentano degli accumuli disposti in amplissime ondulazioni, con geometrie lenticolari che indicano il colmamento delle depressioni residue dei bacini pliocenici precedenti.

Il corpo del ciclo Qc è costituito da successioni alternanti depositi grossolani alla base (ghiaie e sabbie) e fini al tetto (peliti); ad esse sono intercalati anche sedimenti marini, sabbiosi e limo-sabbiosi, la cui deposizione è avvenuta in seguito ad ingressione del dominio marino durante i periodi interglaciali. La litologia nettamente prevalente all'interno del ciclo è rappresentata dai termini più fini (limi e argille), mentre fra i componenti grossolani predominano le sabbie.

3.2 Inquadramento geologico e stratigrafico

I dati geologici di seguito riportati sono derivati dalle relazioni geologiche redatte tra la fine degli anni '90 del secolo scorso e i primi anni 2000 a supporto dei Piani Regolatori Generali (e le relative varianti) dei comuni dell'Unione (Frassinetti e Viel, 1997; Fabbri, 2000; Viel e Frassinetti, 2000; Viel e Frassinetti, 2001; Venturini, 2003) e dall'analisi della Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna 1: 50.000 realizzata per il progetto CARG (figura 3) e consultabile attraverso il sito web del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli a cui si rimanda per eventuali approfondimenti. Le descrizioni delle unità geologiche e dei rapporti stratigrafici sono per lo più tratte dalle "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia", Foglio 256 (ISPRA, Regione Emilia-Romagna, Università di Bologna, 2009).

Dal punto di vista geologico la Pianura Padana è un bacino sedimentario compreso tra l'Appennino settentrionale e le Alpi meridionali in cui i sedimenti più recenti, in prevalenza olocenici, ricoprono successioni stratigrafiche complesse sia dal punto di vista stratigrafico stesso che strutturale; nello specifico l'area di studio ricade nel dominio strutturale denominato "Pieghe Adriatiche".

In particolare, il territorio dell'Unione Rubicone e Mare risulta essere caratterizzato dalla presenza di depositi alluvionali attribuibili alle unità oloceniche più superficiali della potente successione quaternaria di riempimento del bacino padano legato all'orogenesi dell'Appennino Settentrionale, depositi geneticamente correlati all'evoluzione geomorfologica dominata dai processi di divagazione dei corsi d'acqua e dalle oscillazioni climatico-eustatiche sovrainposte agli eventi tettonici di sollevamento regionale.

L'unica differenza geologica e stratigrafica riguarda una piccola porzione meridionale del territorio comunale di Savignano sul Rubicone e una parte del capoluogo stesso che è insediato sull'ultima propaggine del rilievo appenninico, costituita dalle formazioni geologiche più giovani (SVG - Arenarie e Argille di Savignano e FAA - Formazione delle Argille Azzurre), sollevate dagli eventi tettonici pliocenici; sono inoltre rappresentati anche i terrazzi pleistocenici non connessi tra le località di Castello di Ribano e Il Poggetto che costituiscono con probabilità il residuo dell'antica pianura sollevata nelle ultime fasi tettoniche della catena appenninica (Frassinetti e Viel, 1997).

La successione plio-quaternaria presenta un carattere regressivo, con alla base sabbie e peliti torbiditiche seguite da un prisma sedimentario fluvio-deltizio, progradante, ricoperto al tetto da depositi continentali.

I depositi alluvionali possono essere raggruppati all'interno del Sistema Emiliano-Romagnolo (Pleistocene e Olocene medio) che è stato suddiviso a sua volta in 5 subsistemi sulla base delle caratteristiche morfo-pedostratigrafiche. Le due unità presenti nell'area in esame (AES8 e AES8a), sono essenzialmente composte da argille, limi e sabbie di piana alluvionale. Tali depositi quaternari continentali, geneticamente correlati agli apporti alluvionali, appaiono distribuiti in architetture nastriformi e lentiformi/tabulari.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

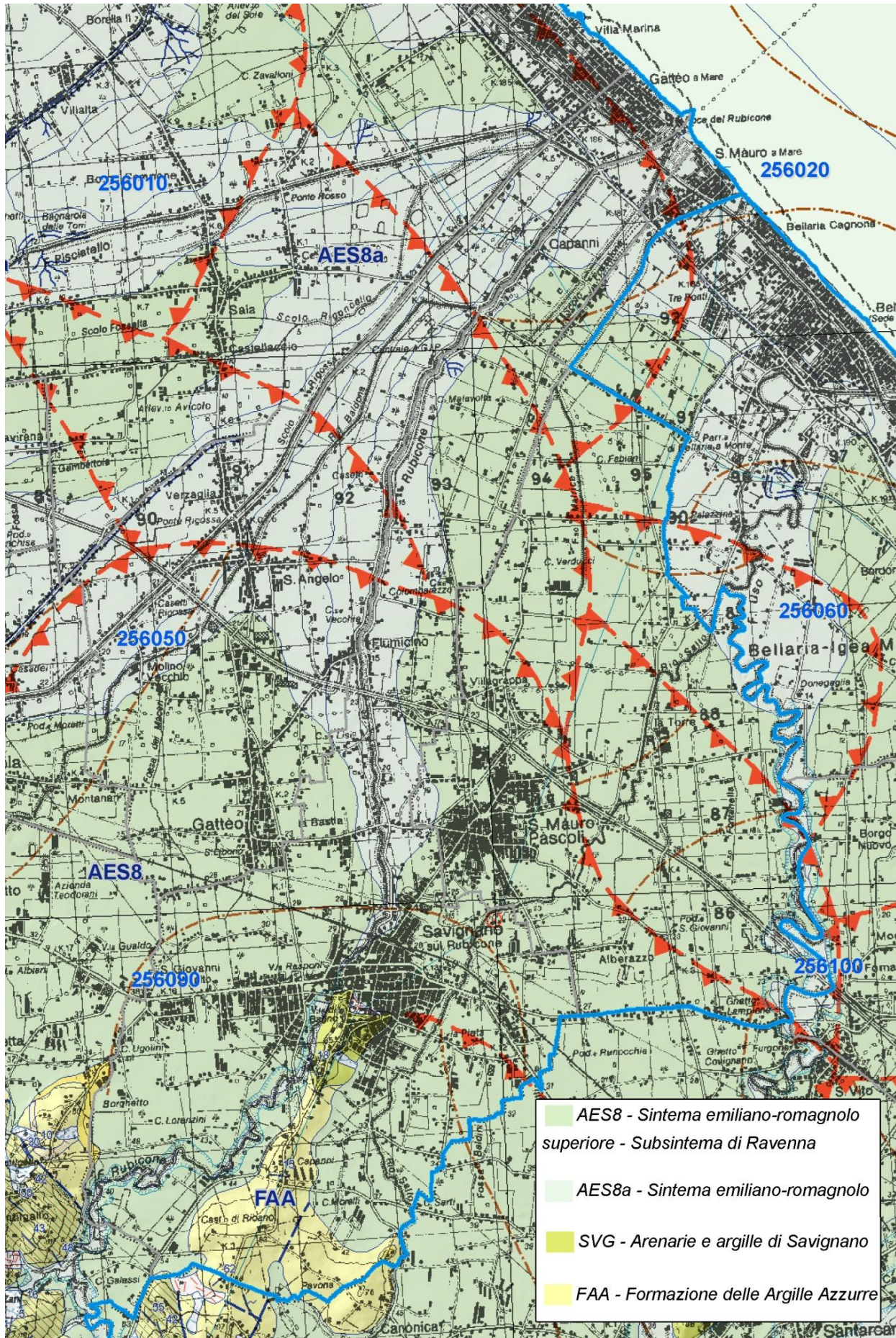


Figura 3. Estratto della carta geologica regionale (non in scala).

Nella figura 4, estratto dalla Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Boccaletti et al., 2004), si distinguono gli spessori del Sintema Emiliano-Romagnolo che risultano essere variabili tra 50 e 100 metri nelle porzioni meridionali rispettivamente dei comuni di Savignano e di San Mauro Pascoli, fino a raggiungere i 200 metri della zona costiera.

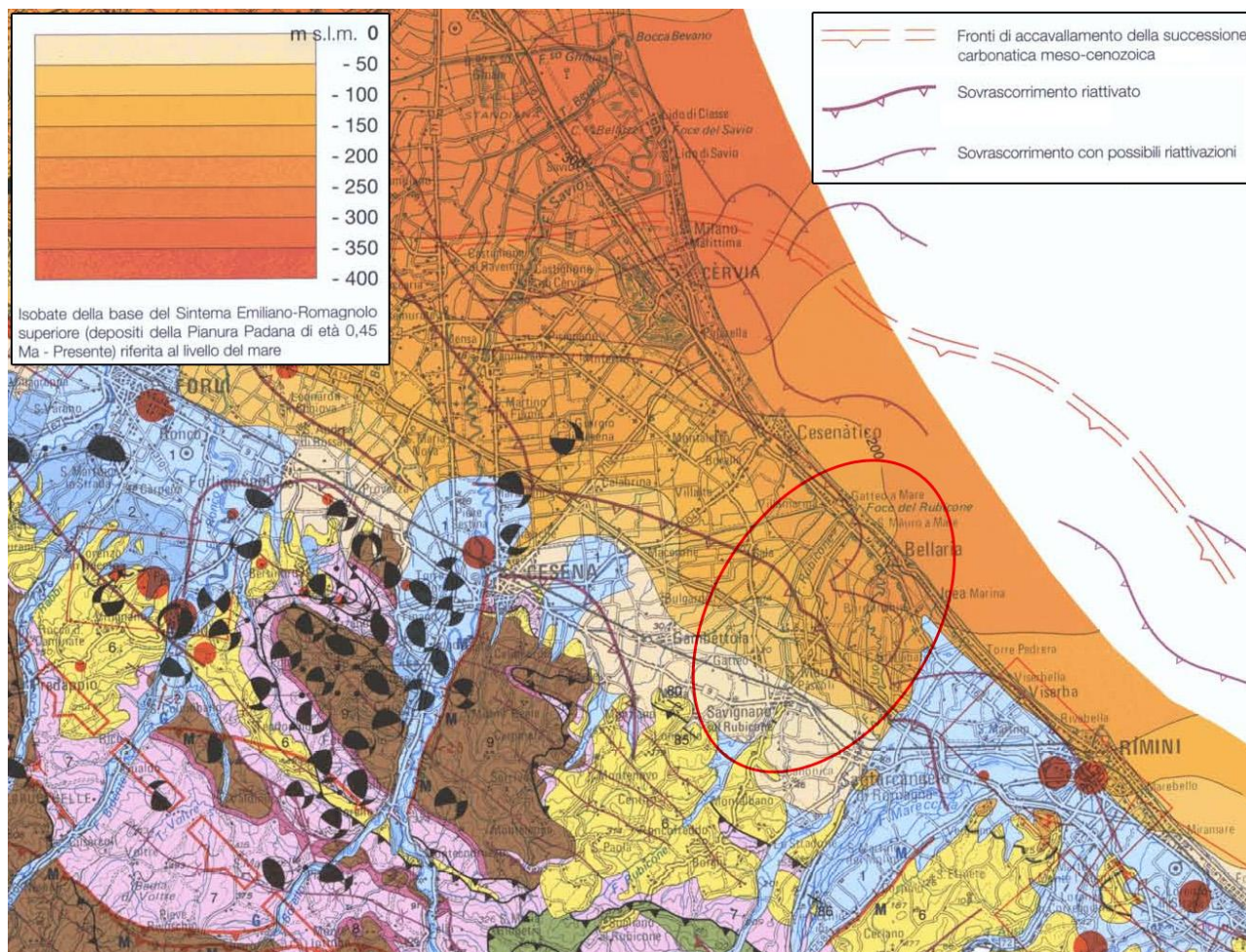


Figura 4. Estratto della Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, in cui è evidenziata col tratto rosso l'area di studio (Boccaletti et al., 2004) (non in scala).

Sulla base della Carta Geologica Regionale le unità geologiche affioranti nelle aree in esame sono essenzialmente caratterizzate da sedimenti di origine fluviale e marina distribuiti secondo alternanze di litotipi a diversa granulometria, organizzati in strati a geometria variabile, spesso lenticolare, e quindi arealmente discontinui, in cui i rapporti tra le diverse litologie sono da ricondurre all'evolversi di un ambiente caratterizzato da energie di trasporto e da modalità deposizionali variabili nel tempo.

In particolare, come riportato nelle note illustrative del progetto CARG - Foglio 256, nell'area in esame affiorano le seguenti unità:

AES8 - Subsistema di Ravenna (Pleistocene superiore–Olocene; post circa 20.000 anni fa)

Tale unità affiora nella maggior parte del Foglio 256, si sviluppa in condizioni di piana inondabile e rappresenta l'intero spessore dei sedimenti, prevalentemente fini, depositi nell'ultimo postglaciale, in parte al di sopra dell'esteso corpo ghiaioso attribuito all'unità di Vignola.

I depositi affioranti estesamente sono fini e vanno dalla sabbia media all'argilla e ai limi, deposti in ambiente di piana alluvionale sviluppata a valle dei conoidi; solo nelle aree a sud dell'autostrada A1 sono presenti depositi ghiaiosi di conoide. A valle dei conoidi il territorio presenta una inclinazione verso NNE, interrotta solo da blande ondulazioni positive allungate in senso N-S e NNE-SSO. Gli affioramenti sono praticamente inesistenti e le osservazioni sono basate essenzialmente dai sondaggi (si veda la banca dati disponibile sul sito web della Regione).

I depositi sono il prodotto della sedimentazione prevalentemente verticale dovuta a processi di tracimazione di corsi d'acqua sinuosi che si sviluppano a valle dei corsi braided caratteristici delle conoidi pedemontane. I processi di posizionali hanno portato alla formazione di argini naturali prevalentemente sabbiosi e piane inondabili limose argillose, mentre la migrazione dei meandri ha condotto alla deposizione di corpi sabbiosi nastriformi allungati nel senso di scorrimento delle acque. Lo spessore massimo dell'unità è di circa 20 metri; l'età è pleistocenica superiore-olocenica, le datazioni con il metodo C14 della base dell'unità oscillano tra 15000 e 9000 anni fa. Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico, mentre il contatto di base è discontinuo, spesso erosivo e discordante, sugli altri subsistemi e sulle unità più antiche.

Su base morfologica, archeologica e pedostratigrafica viene distinta, all'interno del Subsistema di Ravenna, l'Unità di Modena (AES8a).

AES8a - Unità di Modena (Olocene; post IV-VII sec. d.C.)

Unità di rango inferiore che costituisce la parte sommitale del Subsistema di Ravenna, definita sulla base della presenza di un suolo a bassissimo grado di alterazione con profilo potente meno di 100 cm, calcareo, di colore grigio-giallastro.

Ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua: depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, e di conoide. Lo spessore massimo dell'unità è di circa 8 metri; il profilo di alterazione è di esiguo spessore (poche decine di cm) e di tipo A/C, localmente A/Bw/C.

SVG – Arenarie e argille di Savignano (Pleistocene inferiore)

Questa formazione è costituita da una alternanza di argille sottili, grigie chiare, beige all'alterazione, e arenarie sottili e molto sottili, fini e finissime, poco cementate, piano parallele, lenticolari a scala dell'affioramento. Il rapporto arenaria/pelite A/P, generalmente $\ll 1$, è crescente verso l'alto e lateralmente verso SO. La potenza della formazione è di almeno 200 metri.

FAA – Argille azzurre (Pliocene inf. e medio)

Le argille azzurre sono principalmente costituite da argille, argille marnose, localmente siltose, marne argillose e siltose, grigio e grigio-azzurre, talora grigio plumbeo, a stratificazione mal distinguibile per bioturbazione marcata. Sono presenti locali intercalazioni di arenarie fini in strati sottili e medi. Si distinguono essenzialmente due litofacies in funzione del rapporto arenaria/pelite (A/P): pelitico-arenacea e arenacea.

3.3 Paleogeografia e inquadramento geomorfologico e litologico

Il territorio dell'Unione Rubicone e Mare è parte di una più vasta zona di interconoide, compresa fra i fiumi Savio e Marecchia, dove esistono solamente piccoli corsi d'acqua, la cui limitata capacità di trasporto ha impedito la formazione di grandi conoidi sabbioso-ghiaiose; sono quindi presenti soprattutto sedimenti fini, anche in coerenza con le litologie dei rispettivi bacini imbriferi.

Dal punto di vista morfologico il territorio esaminato comprende una porzione del Bacino Idrografico del fiume Rubicone che interessa in particolare i comuni di Gatteo e Savignano sul Rubicone e per una piccola porzione il Bacino del torrente Uso (zona orientale del

comune di San Mauro Pascoli). Lo stesso territorio è inoltre interessato, solamente nella porzione più orientale, dal corso dell'antico Pisciatello-Rigossa, che costituisce un sistema a sé stante.

A partire dai sistemi morfologici individuati, nell'area in esame si descrivono tre ambienti genetico-deposizionali principali (come da tabella 1.1.2-1 degli Standard 3.0 MS): costiero, ormai completamente alterato e artificializzato per le intense trasformazioni subite con i processi insediativi (Frassinetti e Viel, 1997), fluvio-lacustre in prevalenza di pianura alluvionale (comprendente anche la zona palustre di retroduna), e, per una piccola porzione, di versante in corrispondenza del margine appenninico (figura 5).

L'area oggetto dello studio di microzonazione sismica comprende pertanto:

- per un tratto largo poco meno di un chilometro a partire dalla linea di riva, il cordone sabbioso costiero, che si è depositato alla fine dell'ultimo periodo glaciale;
- per gran parte del territorio dell'Unione i depositi continentali di pianura alluvionale che colmano questa porzione terminale del bacino padano e sono del Pleistocene medio-Olocene;
- per una piccola porzione del territorio comunale di Savignano sul Rubicone, il margine appenninico emerso, in cui si rinvencono limitati spessori di depositi di versante e terrazzati, che poggiano su formazioni costituite da sedimenti marini depositatisi tra il pliocene-pleistocene inferiore (SVG e FAA).

Relativamente all'ambiente costiero, le sabbie superficiali testimoniano fenomeni verificatisi in un periodo geologico recente durante il quale l'ingressione marina su terre emerse ha depositato sabbie che costituiscono ora il litorale; tale periodo, che ha seguito l'ultima glaciazione denominata Wurmiana, terminata circa 10.000 anni fa, è noto come "Flandriano". Tale periodo culmina 5-6.000 anni fa e rappresenta un periodo di "optimum climatico" postglaciale, durante il quale, per lo scioglimento dei ghiacci, il livello dei mari salì gradualmente, fino a superare di qualche metro l'attuale livello (Fabbri, 2000).

Il conseguente avanzamento marino (trasgressione) portò inizialmente le acque ad incidere i sedimenti continentali già emersi, in seguito, ad accumulare depositi sabbiosi e ghiaiosi al di sopra dei sedimenti fini, trasportati e depositati precedentemente dai fiumi (Fabbri, 2000).

La morfologia originale dell'arenile vedeva dune sabbiose accumulate dall'azione eolica, spesso organizzate in cordoni subparalleli alla costa, fra i quali, in un articolato sistema, dovevano estendersi stretti acquitrini e canneti, canali di scolo e piattaforme sabbiose fino alla battigia soggetta all'escursione fra l'alta e la bassa marea; questa tipica morfologia è oggi ormai irriconoscibile a causa di interventi antropici. Seppur appiattite, le dune sabbiose hanno però mantenuto quota sul livello marino leggermente più elevata dell'immediato entroterra. I cordoni di dune (tomboli) un tempo marcavano in maniera evidente una fascia sabbiosa, oggi intensamente urbanizzata ma ancora in parte riconoscibile, di varia larghezza e spessore, seguibile con continuità da Ravenna a Cattolica.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

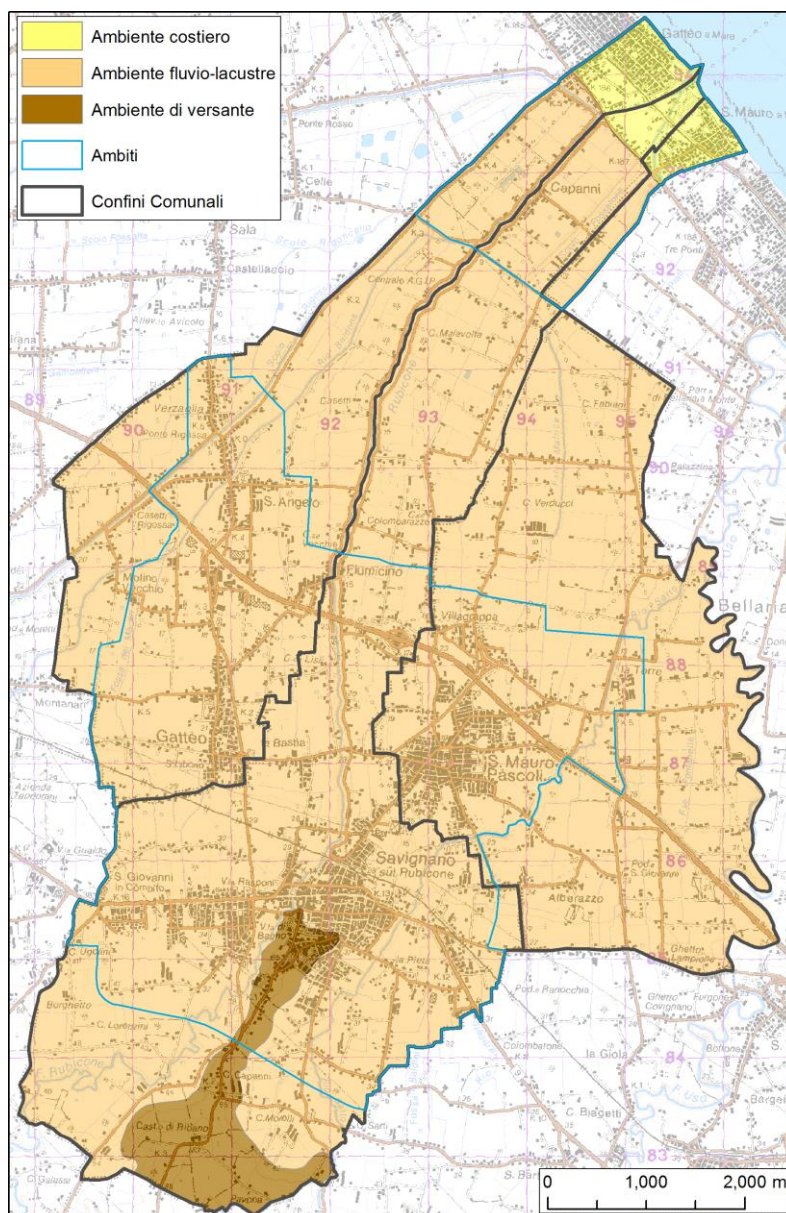


Figura 5. Ambienti genetico-deposizionali principali distinti nell'area di studio.

In corrispondenza della fascia costiera del territorio dei tre comuni, il deposito sabbioso ha larghezza di circa 900 metri e spessore, in corrispondenza della battigia, variabile da 7,5 a 9,0 m mentre verso l'interno tende ad assottigliarsi fino a scomparire, lasciando posto ad un ambiente di "retro-duna" con sedimenti di origine continentale di età Wurmiana. Il limite massimo di avanzamento corrisponde con buona approssimazione all'attuale tracciato della SS16, che è impostata su sabbie e ghiaie di deposizione marina (Fabbri, 2000).

La serie costiera prevalentemente sabbiosa mostra, nell'insieme, evidenti variazioni granulometriche, essendo presenti subordinate e discontinue intercalazioni lentiformi, arricchite in limo ed anche in argilla, che spesso risultano più frequenti nella parte bassa dell'accumulo, in prossimità del passaggio ai depositi continentali; passaggio che avviene quasi sempre in modo piuttosto netto.

La foce del Rubicone divide il litorale in due parti: a nord le spiagge di Gatteo a mare; a sud le spiagge di Savignano e di San Mauro Pascoli. Questa porzione di litorale è stata sottoposta, negli anni '90, al costante arretramento del litorale (Frassinetti e Viel, 1997), compensato nei primi anni duemila dai ripascimenti effettuati.

Recenti studi regionali per la gestione dei litorali finanziati tramite il Progetto Coastance indicano per le celle litoranee relative ai tre comuni dell'Unione Rubicone e Mare una situazione di equilibrio precario tra apporti ed erosione, anche in considerazione del fatto che tale equilibrio viene mantenuto attraverso la periodica realizzazione di interventi di ripascimento e/o ricarica delle scogliere esistenti (Arpa Emilia-Romagna, 2011; Regione Emilia-Romagna, 2011).

L'ambiente fluvio-lacustre si estende dall'immediato entroterra della fascia costiera sabbiosa fino al margine collinare, ed è in prevalenza costituito dal volume di sedimenti di pianura alluvionale che colmano la depressione padana e raccordano, in superficie, il bordo della catena appenninica emersa, con la costa; in questo spazio di forma allungata in direzione appenninica (SO-NE), ampio fino a più di 9 Km nel territorio di Savignano sul Rubicone, è possibile distinguere unità geolitologiche ascrivibili ad ambienti diversi (Fabbri, 2000).

Le aree limitrofe alle sabbie costiere, descrivono un ambiente di "retro-duna" o "vallivo", originariamente costituito da acquitrini e paludi stagionali nei quali era frequente la deposizione di argille varvate e torba; sono zone interfluviali con gradienti topografici molto bassi e più depresse della pianura alluvionale, dove il deflusso delle acque verso il mare risulta ostacolato dalla morfologia più elevata della fascia costiera.

I sedimenti depositatisi in queste aree sono pertanto caratterizzati da tessiture fini, argillose e spesso torbose, con andamento lentiforme e consistenza da plastica a molle difficilmente distinguibili da quelli alluvionali sottostanti, ugualmente argilloso-limosi. Nel restante territorio di pianura dell'Unione Rubicone e Mare, affiorano depositi alluvionali argillosi e limosi con intercalazioni sabbiose, di età olocenica pleistocenica. In dettaglio la bassa pianura, che dalla zona vicina al mare si estende fin circa agli abitati di Gatteo e San Mauro Pascoli, è interessata da sedimenti omogenei dal punto di vista litologico: argillosi e limosi in matrice argillosa, solo sporadicamente intercalati da sottili lenti limo-sabbiose; solamente ai margini dell'asta fluviale del Rubicone si estende, in superficie, una fascia con più marcata componente sabbiosa (Fabbri, 2000).

Nel territorio di media e alta pianura in direzione della Via Emilia e della linea del margine collinare si nota qualche lieve variazione nella litologia con le frazioni limo-sabbiose e sabbiose che tendono gradualmente ad aumentare soprattutto ad est dell'abitato di San Mauro Pascoli, sebbene la matrice argilloso-limosa rimanga nettamente predominante. Questi sedimenti sono in larga parte afferenti alla conoide del torrente Uso che sporadicamente ha depositato nel tempo significativi strati sabbioso-ghiaiosi.

Il sottile ed allungato crinale che culmina in Castelvechio (nella zona sud dell'abitato di Savignano), separa i depositi dell'Uso da quelli del Rubicone, la cui conoide si sviluppa pressoché totalmente nel ristretto lembo di territorio delimitato dallo stesso crinale di Castelvechio e da quello di Montilgallo, collocato subito ad ovest dell'area dell'Unione.

L'andamento del Rubicone è mutato nel corso del tempo, e se attualmente descrive alcuni ampi meandri, fino ad incontrare la dorsale di Castelvecchio, un tempo aveva un andamento rettilineo fino a San Giovanni in Compito come testimoniato da evidenze morfologiche e litologiche che indicano la presenza di un dosso fluviale, corrispondente ad un paleoalveo formato prevalentemente da sabbie e sabbie limose con intercalazioni di argille e limi; gli strati sabbiosi sono a volte sottili, a volte di ordine metrico. Le sabbie ricompaiono poi, ma più rarefatte, in vicinanza dell'alveo odierno del Rubicone, compreso nel tratto di attraversamento di Savignano, mentre verso nord sfumano rapidamente nella matrice argillosa. Il Rubicone ha senz'altro spaziato in quest'area, depositando, tra dorsali di Castelvecchio e Montigallo, nel territorio del comune di Savignano, livelli di sabbie e limi su larghi fronti, di spessore variabile, anche plurimetrico, ma sempre interrotti da intercalazioni di argille.

Dati di letteratura indicano come il fiume Rubicone abbia prodotto tre paleoalvei ghiaiosi con una modesta dispersione areale (C.A.I.R.E., 1995), dei quali però non si è trovato riscontro nei numerosi dati stratigrafici raccolti per il presente studio. Il torrente Uso invece, che ha un apporto clastico assai maggiore, ha sicuramente prodotto paleoalvei ghiaiosi a profondità diverse, anche se negli ambiti di studio risultano di spessore modesto e comunque attestati a profondità relativamente elevate.

Una ridotta porzione nella zona centro-meridionale del comune di Savignano sul Rubicone ricade in zona collinare (ambiente di versante, margine appenninico); infatti il crinale di Castelvecchio, spartiacque fra le valli del Rubicone e dell'Uso, stretto nella parte terminale ed allungato fin quasi al centro di Savignano, rappresenta l'estrema propaggine dei rilievi appenninici ed è costituito dalle formazioni geologiche più recenti, sollevate dagli eventi tettonici pliocenici.

Dal punto di vista stratigrafico, le rocce che originano questi colli sono ascrivibili ad un insieme di unità sedimentarie terrigene, di ambiente marino di età pliocenico-pleistocenica, conosciute nella letteratura geologica con diverse denominazioni: come "Gruppo del Santerno" secondo Dondi et al., 1982, oppure come "Ciclo marino P1-P2" (Ricci Lucchi et al., 1982).

Nel territorio in esame delle varie unità che compongono il gruppo si ritrovano principalmente i due termini più recenti (figura 3): le "Arenarie ed argille di Savignano" del Pleistocene inferiore e le "Argille Azzurre" del Pliocene inferiore-medio (Farabegoli, 1997).

Le "Arenarie ed argille di Savignano" (SVG in figura 3) formano l'altura di Castelvecchio e i luoghi immediatamente retrostanti, mentre le "Argille Azzurre" (FAA in figura 3) la gran parte della restante zona di collina più meridionale del territorio di Savignano sul Rubicone (in larga parte fuori dagli ambiti di studio).

Delle rocce descritte, costituenti le diverse unità, esistono modestissimi affioramenti nei confini territoriali del comune di Savignano sul Rubicone; infatti l'urbanizzazione e lo spessore della copertura eluvio-colluviale, impediscono pressoché ovunque il diretto esame delle litologie del substrato, che pertanto è osservabile quasi esclusivamente in occasione di sbancamenti e scavi profondi.

Questi sedimenti sono spesso sovrastati da depositi alluvionali terrazzati (ambiente fluvio-lacustre), formati da ghiaie, sabbie e limi, riferibili al ciclo continentale inferiore del Pleistocene medio-superiore.

Dei depositi terrazzati antichi vi sono evidenti testimonianze nella zona a sud e a sud-est del Castello di Ripano, dove affiorano, fra i terreni costantemente rimaneggiati dai lavori agricoli, sabbie e ghiaie fluviali di pezzatura da medio grossolana a grossolana e rappresentano lembi relitti di paleosuperfici pertinenti ad una antica pianura sollevata assieme alla catena appenninica durante le ultime fasi tettoniche, ed ora completamente isolate e non connesse idraulicamente con i corpi alluvionali dell'attuale pianura (Fabbri, 2000).

3.4 Subsidenza

Per quanto concerne il fenomeno della subsidenza, le informazioni che seguono sono state desunte dalle relazioni geologiche redatte per i diversi piani regolatori comunali e delle relative varianti urbanistiche e dai rapporti dell'attività di monitoraggio realizzati da Arpa in collaborazione con il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, presenti sui rispettivi siti web.

La fascia in cui ricade il territorio dell'Unione Rubicone e Mare è stata soggetta, nell'ultima decina di anni del secolo scorso (1992-2000), a tassi di subsidenza compresi tra 10 mm/anno nella zona costiera e 20 mm/anno in alcune aree dell'entroterra. Nel periodo 2002-2006 si evidenzia una tendenza ad una leggera diminuzione del tasso di subsidenza nell'entroterra, con valori tra 15 e 20 mm/anno (figura 6).

Nel corso degli anni 2011 e 2012 Arpa Emilia-Romagna, attraverso il progetto "Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola", ha aggiornato le conoscenze sui movimenti verticali del suolo rispetto al precedente rilievo effettuato nel 2006, utilizzando il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari supportato dall'elaborazione di 17 stazioni permanenti GPS.

Dall'esame degli elaborati prodotti si evince che la gran parte del territorio di pianura della regione non presenta nel periodo 2006-2011 variazioni di tendenza rispetto al periodo 2002-2006; circa un terzo della superficie evidenzia una riduzione della subsidenza e appena il 3% un incremento (figura 6).

Per quanto concerne le aree di interesse il sito web di Arpa riporta le seguenti considerazioni sintetiche:

- la provincia di Forlì-Cesena presenta abbassamenti medi di circa 5 mm/anno con massimi di circa 20 mm/anno in prossimità di San Mauro Pascoli e di oltre 10 mm/anno a nord di Cesena;
- in provincia di Rimini si registrano abbassamenti medi di circa 4 mm/anno con massimi di circa 10 mm/anno nella città di Rimini e di circa 15 mm/anno in prossimità di Savignano sul Rubicone;
- il litorale, nel suo complesso, mostra una prevalente tendenza alla diminuzione della subsidenza: si notano abbassamenti di pochi mm/anno su tutto il litorale

ferrarese; il litorale ravennate presenta abbassamenti generalmente fino a circa 5 mm/anno. Più a sud, tra Cesenatico e Bellaria, gli abbassamenti ritornano intorno a 5 mm/anno e si riducono ulteriormente fino a 2-3 mm/anno fino a Rimini;

- il litorale nella sua interezza presenta un abbassamento medio, relativamente ad una fascia di 5 km verso l'entroterra, di circa 4 mm/anno, sostanzialmente dimezzato rispetto al periodo precedente.

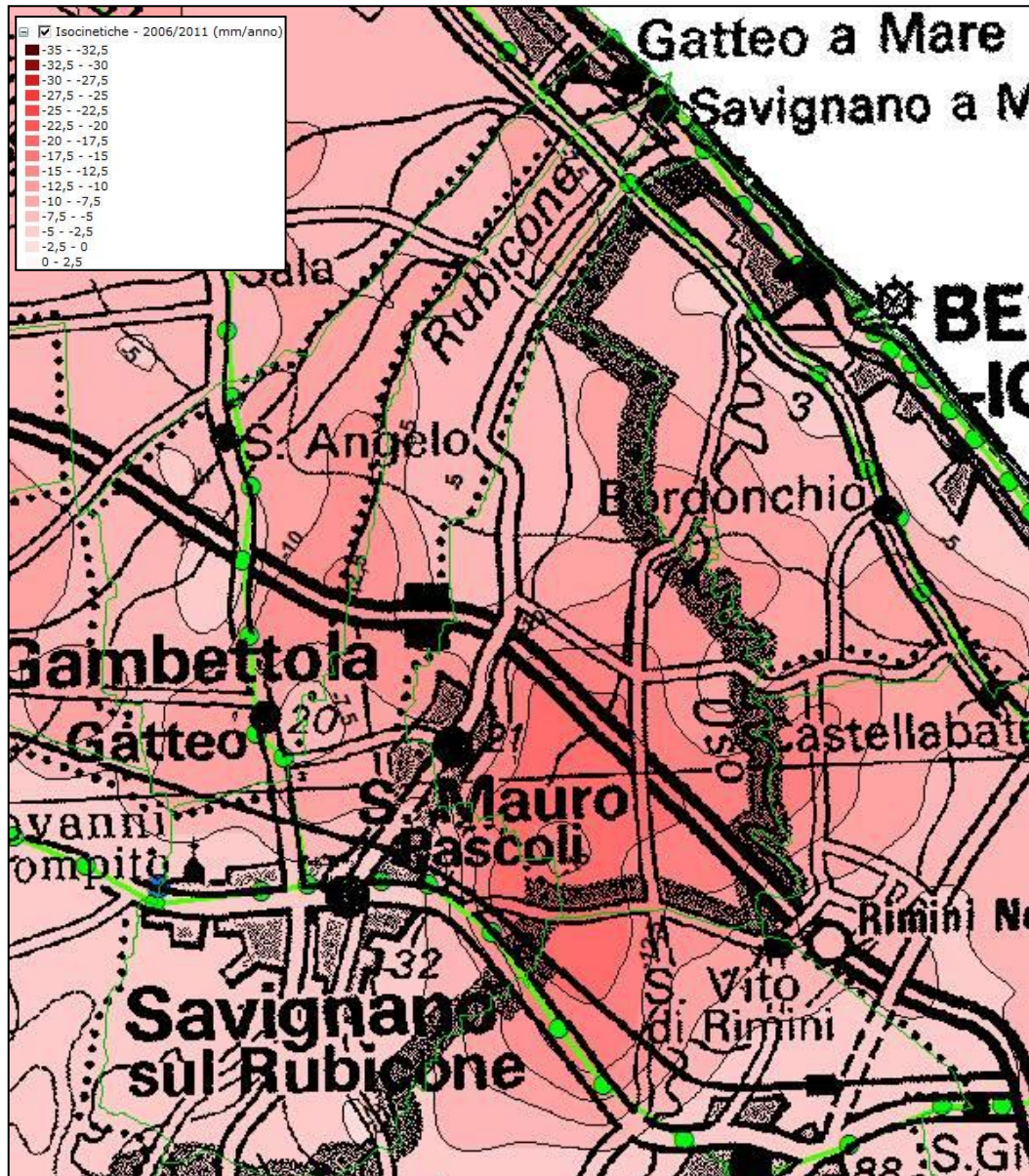


Figura 6. Estratto della Carta delle velocità di abbassamento verticale del suolo nel periodo 2006-2011 (sito web Arpa).

Confrontando i rilievi eseguiti a partire dal periodo 1992-2000 si evidenzia una generale tendenza alla diminuzione della subsidenza e in particolare nella porzione di pianura ad ovest di Gatteo; mentre permane una zona con tassi di subsidenza ancora rilevanti (> 20 mm annui) nella porzione di territorio tra gli abitati di Savignano e San Mauro Pascoli e lungo il torrente Uso.

3.5 Idrogeologia

Per la corretta interpretazione e descrizione delle caratteristiche idrogeologiche dell'area, si può fare riferimento alla figura 7 che fornisce uno schema di comparazione tra la nomenclatura utilizzata in letteratura nell'ambito della definizione delle unità geologiche riconosciute classicamente, le sequenze deposizionali e la denominazione delle unità idrostratigrafiche proposta più recentemente.

UNITA' STRATIGRAFICHE		SEQUENZE DEPOSIZIONALI	ETA' (milioni di anni)	SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni)	UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE		
					GRUPPO ACQUIFERO	COMPLESSO ACQUIFERO	SISTEMA ACQUIFERO
SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO	SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE	Qc	~0.12	PLEISTOCENE SUPERIORE-OLOCENE	A	A1	
						A2	
						A3	
						A4	
SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	Qc	Qc ₁	~0.35-0.45	PLEISTOCENE MEDIO	B	B1	
						B2	
						B3	
						B4	
SABBIE DI IMOLA	Qm	Qm _{3''}	~0.65	PLEISTOCENE INFERIORE	C	C1	
		Qm _{3'}				C2	
GRUPPO DEL SANTERNO	P2	Qm ₂	~0.8	PLIOCENE MEDIO-SUPERIORE	C	C3	
		Qm ₁	~1.0			C4	
			~2.2			C5	
			~3.3-3.6	PLIOCENE INFERIORE	C		
			~3.9				
					ACQUITARDO BASALE		

Superficie di discontinuità principale
 Superficie di discontinuità minore

Figura 7. Schema della suddivisione dei depositi della pianura in tre unità stratigrafiche, denominate Gruppi Acquiferi A, B e C (Regione Emilia-Romagna et al., 1998)

La ricostruzione stratigrafico-tessiturale ottenuta dall'estrapolazione e correlazione tra i dati geologici di sottosuolo noti, ha consentito anche di definire l'assetto dei principali acquiferi della pianura.

Il sistema degli acquiferi di pianura ed in particolare dell'area delle conoidi del Rubicone e dell'Uso può essere considerato "multistrato", costituito da un acquifero principale a cui si interconnettono le singole falde, che solo localmente si presentano isolate, soprattutto quelle superficiali.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

La pianura alluvionale assieme alla pedecollina retrostante, forma un sistema idrogeologico completo, dotato di zone di grande permeabilità; il margine collinare rappresenta un fronte di alimentazione delle falde, infatti spesso affiorano sedimenti con facies arenacea, dotati di buona permeabilità, e anche il raccordo con la pianura è costituito da prevalenti sabbie. Si forma pertanto una fascia di alimentazione, sia attraverso il substrato verso gli acquiferi profondi, sia attraverso i depositi alterati e le sabbie del piede versante, verso gli acquiferi superficiali (Fabbri, 2000).

La geometria del tetto della prima falda e la ricostruzione della geologia di sottosuolo, indicano una certa comunicazione tra gli acquiferi superficiali e quelli sottostanti, almeno per l'area della conoide del Rubicone (interamente compresa nell'area del comune di Savignano); nella porzione a nord della linea dei conoidi si ha la presenza di più acquiferi sovrapposti in comunicazione con la falda superficiale, generalmente freatica. Nella figura 8 è riportata la sezione geologica n.139 (allegato 1) realizzata dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che evidenzia i differenti corpi acquiferi e le litologie prevalenti lungo la direttrice SO-NE fino alla foce del Rubicone.

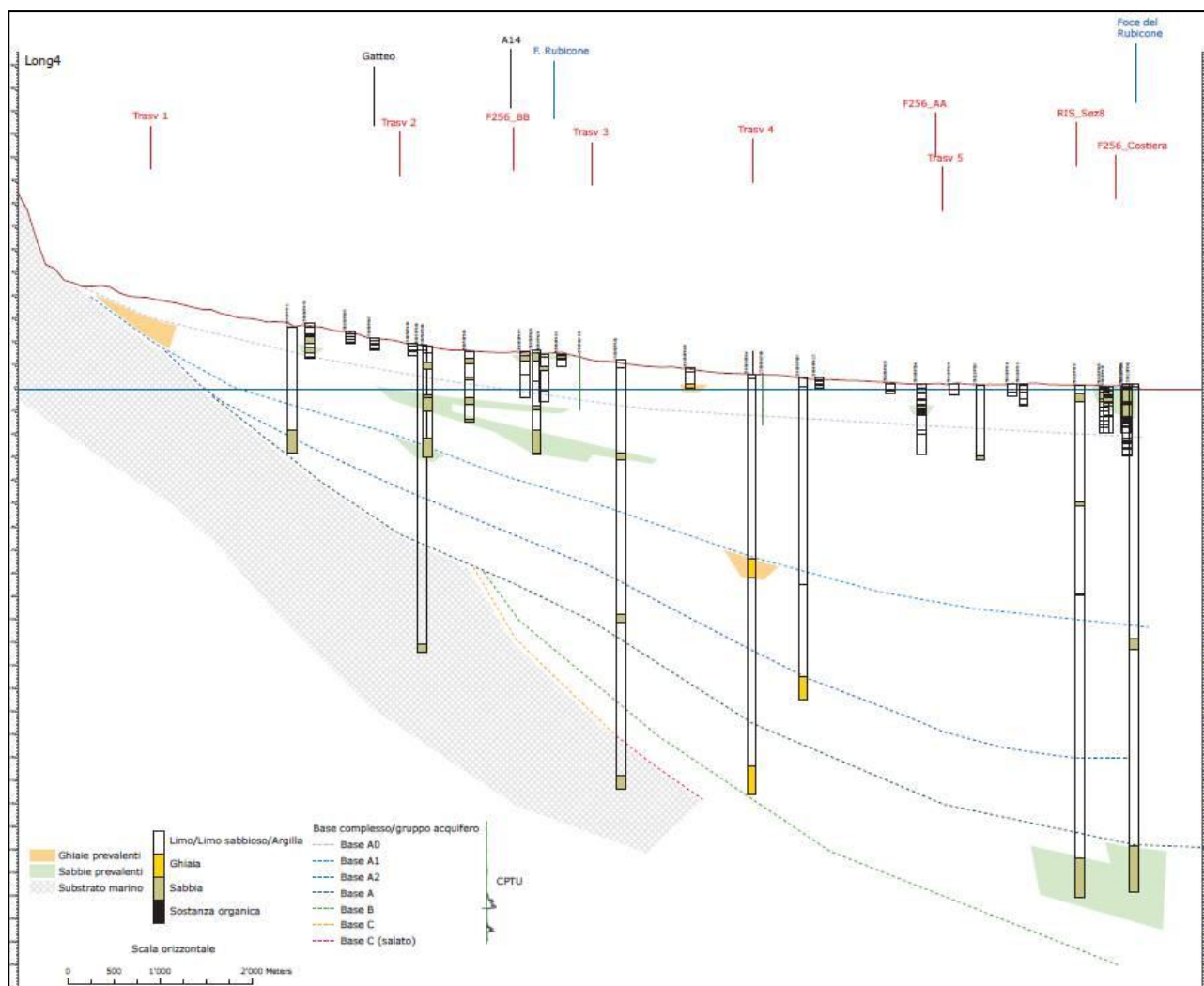


Figura 8. Sezione geologica n.139 realizzata e pubblicata sul geoportale dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della RER.

Il corso del Rubicone ha, nella porzione meridionale del comune di Savignano, una chiara funzione drenante (raccoglie l'acqua dalla falda), che tende a diminuire verso valle, fino a scomparire a sud della ferrovia, mentre in pianura, dopo un primo tratto in cui si presenta in equilibrio con la falda, pare svolgere un importante ruolo di ricarica della falda, dimostrato dall'accentuato innalzamento del livello statico (Frassinetti e Viel, 1997).

Il Rubicone è costituito da due unità idrogeologiche, una superficiale fino a circa 12 metri prevalentemente limo-sabbiosa e una più profonda (oltre i 30 metri), separata dalla prima da sedimenti in prevalenza fini, solo nella porzione più meridionale del territorio possono verificarsi comunicazioni tra le due unità.

Il torrente Uso che interessa la porzione orientale del comune di San Mauro Pascoli ha ruolo di prevalente drenaggio della falda superficiale, inoltre vede una separazione in due unità idrogeologiche solo a nord dell'autostrada, dove gli acquiferi tendono ad essere separati attorno ai 16 metri dal piano campagna; a sud dell'autostrada invece si ha un acquifero unico con una alta trasmissività verticale (Frassinetti e Viel, 1997).

Nell'ambito di pianura le misure di soggiacenza rilevate evidenziano modeste variazioni di livello; sono però da sottolineare sia l'azione drenante svolta dal Rubicone, che deprime il livello freatico nella fascia adiacente al suo corso, soprattutto nelle zone a monte della Via Emilia (comune di Savignano), sia la tendenza complessiva della falda a risalire verso la superficie mano a mano che ci si sposta dall'alta alla bassa pianura; tale tendenza raggiunge il culmine fra Capanni, La Cagnona e la vecchia Adriatica (SS16), dove il livello freatico può arrivare a pochi decimetri dalla superficie, ed anche generare ampie zone di ristagno nei periodi piovosi (Fabbri, 2000). In sintesi, relativamente alla piezometria della falda acquifera superficiale, i dati desunti dalle Relazioni geologiche redatta dai geologi Viel e Frassinetti, Venturini e Fabbri per i PRG dei tre comuni facenti parte dell'Unione Rubicone e Mare indicano una soggiacenza abbastanza regolare, con valori mediamente compresi tra 1 e 2 m di profondità dal piano di campagna ed una alimentazione che avviene tramite l'infiltrazione delle acque meteoriche dalla superficie.

Il corpo sabbioso costiero è sede di un acquifero freatico limitato alla base dalle argille limose, verso l'interno tende a chiudersi al contatto con i sedimenti argillosi e limosi continentali, mentre ai lati prosegue lungo la linea di costa con varie interruzioni in corrispondenza dei corpi idrici superficiali (torrenti e canali di bonifica). La relazione geologica redatta per il PRG di Savignano (Fabbri, 2000) indica che nella zona costiera la falda è molto disturbata dall'intenso insediamento che ha interferito con gran parte della superficie di ricarica naturale, ed inoltre, nel tratto estremo, è in diretta comunicazione idrodinamica col mare. La falda in corrispondenza delle sabbie litorali, a seconda dei luoghi e dei periodi dell'anno, è compresa di norma fra 0,8 e 1,6 m. da p.c., con eccezioni come ad esempio nelle aree prossime alla vecchia statale Adriatica, dove sono state misurate soggiacenze pari a 0,5-0,6 metri.

La campagna di monitoraggio dell'acquifero freatico costiero eseguita per la predisposizione del PRG di San Mauro Pascoli nel mese di dicembre 2002 su 12 pozzi freatici distribuiti nel comune di San Mauro e nelle aree costiere del comune di Savignano e Bellaria ha identificato una superficie freatica molto prossima al piano campagna, con una soggiacenza media pari a circa 0,7 metri (Venturini, 2003).

4. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Il presente studio di microzonazione è basato sui risultati di numerose indagini geognostiche e geofisiche in situ, nonché di prove geotecniche di laboratorio, sia pregresse che di nuova realizzazione. Le indagini geognostiche e geofisiche raccolte e realizzate a supporto del presente studio di microzonazione sismica sono localizzate nelle tavole 1 (Carta delle indagini), descritte al paragrafo 8.1 ed archiviate in una banca dati geografica informatizzata.

In tabella 2 sono riportati i numeri, distinti per tipologia, relativi a tutte le indagini geognostiche e geofisiche (pregresse e di nuova realizzazione) archiviate nelle tre banche dati consegnate (una per ciascun comune).

	Gatteo	San Mauro Pascoli	Savignano sul Rubicone	Totale
CPT	241	216	487	944
CPTe	3	1	6	10
CPTU	6	5	11	22
CPT-S	1	1	0	2
CPTU-S	1	1	3	5
PENETROMETRIE DINAMICHE	12	19	22	53
POZZI PER IDROCARBURI	1	2	1	4
POZZI PER ACQUA	32	54	10	96
SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO	19	17	29	65
SONDAGGI A DISTRUZIONE	3	2	12	17
DOWN HOLE	0	1	1	2
ESAC	2	2	3	7
MASW	10	12	12	34
HVSR	15	15	33	63
Totale	346	348	630	1324

Tabella 2: Totale delle indagini archiviate nella banca dati, pregresse e di repertorio, distinte per tipologia, raccolte e utilizzate per il presente studio.

Nelle tre banche dati sono presenti esclusivamente indagini che ricadono all'interno del territorio di ciascun comune e non sono stati inseriti dati di aree limitrofe comunque tenuti in considerazione dal presente studio, fatta eccezione per due pozzi per idrocarburi presenti nel territorio del comune di Bellaria Igea Marina, ubicati lungo il confine con l'Unione Rubicone e Mare, che, vista la loro importanza per la modellazione geologica profonda (paragrafo 6.2 e allegato 1), sono stati inseriti nella banca dati delle indagini di San Mauro Pascoli.

4.1 La banca dati delle indagini

La banca dati delle indagini è stata realizzata, per ciascun comune, in formato geodatabase, secondo le specifiche previste dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013). La figura 9 ne schematizza la struttura.

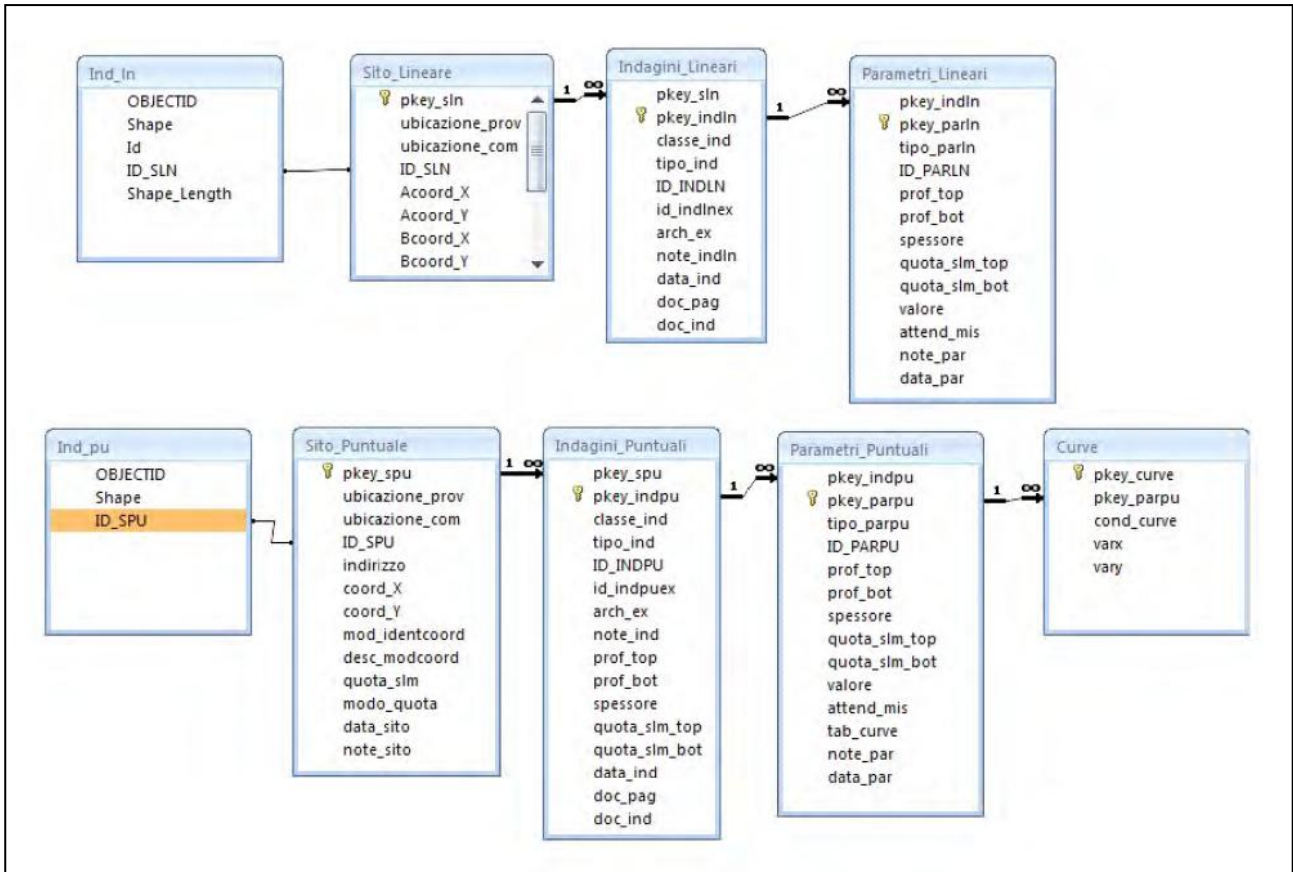


Figura 9. Struttura della banca dati delle indagini che evidenzia le relazioni tra gli archivi geografici puntuali (Ind_pu) e lineari (Ind_In) e le tabelle che archiviano i dati alfanumerici legati a siti, indagini e parametri delle indagini.

4.2 Indagini di repertorio

Per le finalità dello studio di microzonazione sismica è stato raccolto e sistematizzato, nelle suddette banche dati, un vasto repertorio di indagini geognostiche e geofisiche pregresse. I dati sono stati messi a disposizione da diversi soggetti:

- Ufficio di Piano dell'Unione Rubicone e Mare e Uffici Tecnici dei tre comuni dell'Unione, che hanno fornito diverse relazioni geologiche prodotte a supporto degli strumenti urbanistici ed hanno consentito l'accesso ai propri archivi di pratiche edilizie;
- Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che ha fornito la propria banca dati geognostica;
- alcuni geologi professionisti che, a seguito di specifica richiesta, hanno fornito dei rapporti di indagine tratti dai propri archivi.

In particolare è stato effettuato un approfondito lavoro di ricerca presso gli archivi cartacei delle pratiche edilizie presenti presso la sede dei tre comuni, da cui sono state estratte tutte le relazioni geologiche e le relative indagini geognostiche dal 2009 ad oggi e, in maniera mirata, alcune relazioni geologiche antecedenti, relative ad aree rivelatesi, nel corso dello studio, di particolare interesse per la caratterizzazione geologica del sottosuolo.

Il numero totale delle indagini pregresse raccolte ed archiviate è 1222, di cui 381 provenienti dalla banca dati geognostica regionale e 1041 raccolte e informatizzate per il presente studio. Si segnala che le indagini inizialmente raccolte negli archivi comunali erano quasi 1200, di cui circa 150 sono state scartate perché giudicate non sufficientemente attendibili come tipologia o qualità del dato o per problemi nel definirne l'esatta ubicazione. Per l'elaborazione dello studio di microzonazione sono stati inoltre consultati i risultati di indagini realizzate nei comuni limitrofi a breve distanza dal confine amministrativo dell'Unione. Alcune di queste, sebbene non siano riportate nella carta delle indagini, sono risultate assai utili per integrare e correlare i dati presenti nell'area di studio.

Disporre di un archivio informatizzato presenta innumerevoli vantaggi rispetto alla semplice catalogazione cartacea, tra questi la rapida accessibilità, il confronto immediato dei dati inseriti e la possibilità di un continuo aggiornamento. Inoltre la struttura della banca dati consente di associare al dato geografico (punto di indagine) e a quello iconografico (rapporto di prova in pdf), degli attributi alfanumerici (alcuni inseriti anche con giudizio esperto) che permettono di accedere interattivamente ai dati sintetici più importanti (profondità raggiunta, livello della falda misurato, quota del tetto delle ghiaie e del primo orizzonte sabbioso, presenza o meno di uno spessore significativo di terreni compressibili ecc.). La presenza di tali campi informativi ha permesso di realizzare delle carte tematiche specifiche ed efficaci rappresentazioni di sintesi che hanno consentito di ottenere un quadro immediato delle caratteristiche dei terreni studiati, alle diverse scale.

Dall'analisi della distribuzione delle verticali delle numerose indagini geognostiche pregresse e dei dati ad esse associati, si è potuto quindi osservare che buona parte del territorio dell'Unione, in particolare nelle porzioni urbanizzate, presenta caratteristiche geomeccaniche dei terreni ben note, da cui emerge un quadro tutto sommato chiaro e di buona correlabilità generale, come dettagliato al capitolo 5.

Molto meno numerose sono invece risultate le indagini geofisiche pregresse, volte a misurare direttamente la velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri (V_{s30}).

Relativamente alla qualità dei dati, è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità degli archivi, 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 è stata quindi fatta una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio. Alcune di queste valutazioni sono richiamate nei successivi capitoli.

4.3 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

Al fine di caratterizzare le aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche e le zone dell'urbanizzato che risultavano meno conosciute dal punto di vista geomeccanico e geofisico, o su cui si è comunque ritenuto opportuno eseguire approfondimenti ulteriori, sono stati integrati i dati pregressi con specifiche campagne di indagini, geognostiche e geofisiche. Le nuove indagini nel loro complesso, localizzate in figura 10, sono state distribuite per garantire una copertura uniforme dell'intera area di indagine.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

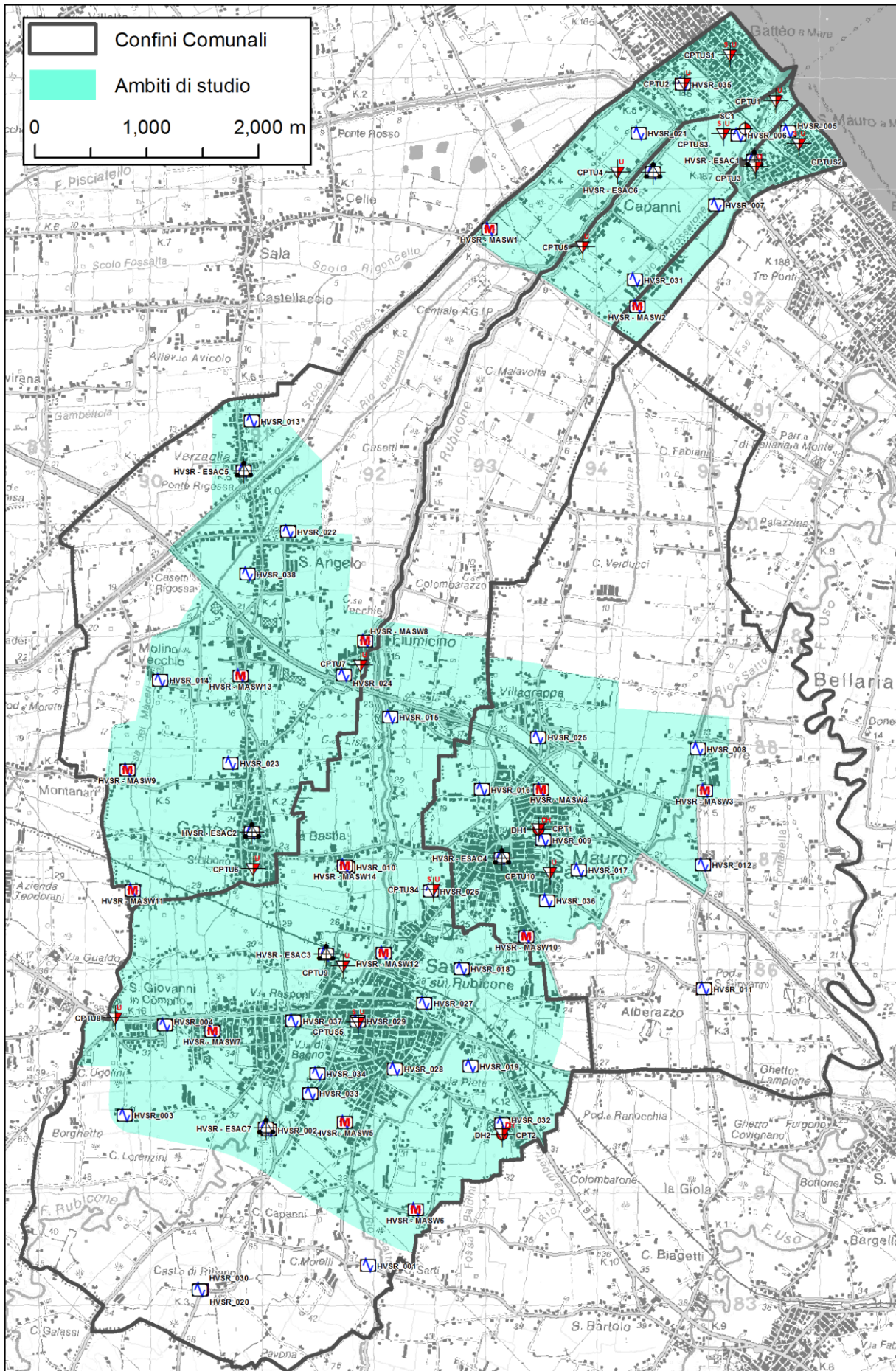


Figura 10. Mappa con la localizzazione delle indagini geognostiche e geofisiche di nuova realizzazione.

In figura 10 è riportata, per ciascuna indagine di nuova esecuzione, distinta per tipologia con il simbolo previsto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), la label con l'indicazione del codice utilizzato come nome del file PDF associato e che è riportato nel rapporto di prova originale (allegato 2). Nello schema seguente (tabella 3) è indicato il numero di prove eseguite per ciascuna tipologia di indagine, nel territorio dei tre comuni dell'Unione Rubicone e Mare.

	Eseguito da	Gatteo	San Mauro Pascoli	Savignano sul Rubicone	Totale
CPT	Sogeo srl	0	1	1	2
CPTU	Sogeo srl	4	2	4	10
CPTU-S	Sogeo srl Progeo srl	1	1	3	5
CAROTAGGIO CONTINUO	Sogeo srl	0	1	2	3
DOWN HOLE	Progeo srl	0	1	1	2
ESAC	Progeo srl	2	2	3	7
MASW	Progeo srl	5	4	5	14
HVSR	Progeo srl Studio Tarabusi	15	15	29	59
Totale		27	27	48	102

Tabella 3: Numero di indagini di nuova esecuzione realizzate a supporto del presente studio di microzonazione sismica, distinte per tipologia e con l'indicazione del soggetto realizzatore.

Tutte le nuove indagini, ad eccezione di 38 misure di microtremore a stazione singola eseguite dallo Studio scrivente, sono state realizzate dalle ditte Progeo s.r.l. e Sogeo s.r.l., sulla base di un incarico distinto da quello relativo al presente studio di microzonazione sismica. La localizzazione delle nuove indagini è stata decisa di concerto tra lo Studio scrivente, Progeo s.r.l., i tecnici dell'Ufficio di Piano dell'Unione Rubicone e Mare e il Dott. Luca Martelli del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, tenendo conto dei possibili elementi di criticità evidenziati nella tavola 6 del PTCP "Rischio sismico. Carta delle aree suscettibili di effetti locali" (Provincia di Forlì-Cesena, 2010), della distribuzione dei dati pregressi disponibili e in relazione alle previsioni urbanistiche. In particolare l'ubicazione dei due sondaggi, con associato down hole e prelievo di campioni indisturbati da sottoporre a prove di laboratorio, è stata scelta in ragione della destinazione urbanistica. Il sondaggio DH1 è localizzato nel tessuto consolidato di San Mauro Pascoli vicino ad un polo scolastico, mentre il sondaggio DH2 in un'area in trasformazione e completamento in cui è prevista un'attrezzatura pubblica destinata alla Protezione Civile.

Su 5 dei 7 campioni indisturbati di terreno prelevati dai 3 sondaggi a carotaggio continuo, sono state eseguite delle prove di laboratorio geotecnico finalizzate alla caratterizzazione dei depositi a diverse profondità, utilizzate a supporto degli approfondimenti di terzo livello (tabella 9).

Si sottolinea che tutte le indagini, sia pregresse e che di nuova esecuzione, sono state archiviate in banca dati con il codice complesso richiesto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), ma mentre per quelle pregresse il file PDF associato è nominato con lo stesso codice complesso, per quelle di nuova esecuzione il file PDF mantiene il nome assegnato all'indagine nel rapporto di prova

originale. Pertanto nella presente relazione si farà sempre riferimento a tale codice, riportato anche nella carta delle indagini e che risulta di più immediata identificazione. Tutti i rapporti di prova delle indagini di nuova realizzazione sono raccolti nell'allegato 2.

Nei paragrafi seguenti vengono descritte brevemente le tipologie delle prove realizzate e le modalità di esecuzione delle stesse, attraverso quella che è di fatto una sintesi di più estesi documenti prodotti dalle ditte esecutrici delle indagini.

4.3.1 Prove penetrometriche statiche (CPTU-S, CPTU e CPT)

La tabella 4 riporta i principali dati associati alle prove penetrometriche statiche eseguite per il presente studio. Si precisa che le 2 prove con punta meccanica (CPT) sono state spinte a 45 metri e realizzate sulla verticale dei sondaggi con down hole prima dell'esecuzione degli stessi, per valutare preventivamente le profondità di prelievo dei campioni indisturbati. Le prove elettriche con piezocono (CPTU) sono state spinte a 20 metri di profondità anche per accertare la presenza di depositi granulari saturi e nel caso valutarne il potenziale di liquefazione (paragrafo 7.3). Le prove elettriche con piezocono e cono sismico (CPTUS) sono state spinte alla profondità di 30 metri per misurare la Vs30, a parte quando si sono arrestate prima per eccesso di resistenza alla punta. In tali casi i valori di Vs30 sono stati ottenuti estendendo l'ultimo valore misurato fino a 30 metri.

Codice prova	Codice BD DPC	Tipo	Data esecuzione	Profondità raggiunta	Quota falda da p.c.	Vs30	Indirizzo
CPT1	040041P60001CPT70001	CPT	16/07/2014	45	1.90		Via Maria Montessori 2 San Mauro Pascoli
CPT2	040045P64004CPT70006	CPT	16/07/2014	45	2.10		Via Ezio Bevilacqua 41 Savignano sul Rubicone
CPTU1	040045P64500CPTU70504	CPTU	01/07/2014	20.56	1		Via Matrice Sinistra Savignano sul Rubicone
CPTU2	040016P60180CPTU64249	CPTU	01/07/2014	20.4	1.50		Via Corelli 2 Gatteo
CPTU3	040041P60214CPTU70217	CPTU	01/07/2014	21.35	1		Via Giovanni da Verrazzano 13 San Mauro Pascoli
CPTU4	040016P60181CPTU64250	CPTU	01/07/2014	20.41	0.80		Via Rubicone 51 Gatteo
CPTU5	040045P64501CPTU70505	CPTU	01/07/2014	20.37	0.90		Via Praga 34 Savignano sul Rubicone
CPTU6	040016P60182CPTU64251	CPTU	17/07/2014	20.50	3.10		Via Giosuè Carducci 15 Gatteo
CPTU7	040016P60183CPTU64252	CPTU	14/07/2014	20.64	non rilevata		Via Fiumicino 100/A Gatteo
CPTU8	040045P64503CPTU70507	CPTU	17/07/2014	20.64	1.50		Via Gatteo Savignano sul Rubicone
CPTU9	040045P64502CPTU70506	CPTU	17/07/2014	20.59	1.30		Via Raffaello Sanzio 72 Savignano sul Rubicone
CPTU10	040041P60215CPTU70218	CPTU	17/07/2014	20.45	2		Via Palmiro Togliatti 13 San Mauro Pascoli
CPTUS1	040016P60002CPTU64070 040016P60002SCPT64071	CPTU	12/08/2014	26.06	non rilevata	164	Via Forlì 22 Gatteo
CPTUS2	040041P60015CPTU70017 040041P60015SCPT70018	CPTU	18/07/2014	30.46	1	178	Via della Libertà 5 San Mauro Pascoli
CPTUS3	040045P64001CPTU70000 040045P64001SCPT70001	CPTU	08/08/2014	30	1	173	Via Matrice Sinistra Savignano sul Rubicone
CPTUS4	040045P64002CPTU70002 040045P64002SCPT70003	CPTU	20/08/2014	22.94	2	206	Via 2 Agosto 10 Savignano sul Rubicone
CPTUS5	040045P64003CPTU70004 040045P64003SCPT70005	CPTU	20/08/2014	19.27	1.8	245	Piazza Papa Giovanni XXIII 16

Tabella 4: Principali dati associati alle prove penetrometriche statiche di nuova esecuzione. Il "Codice prova" indica la codifica presente nei rapporti di prova riportati nell'allegato 2, mentre il "Codice DB DPC" indica il codice con cui l'indagine è stata archiviata in banca dati. Dove sono presenti due codici nella seconda colonna, il primo è relativo all'indagine geognostica, il secondo a quella geofisica.

4.3.1.1 CPTU

Le prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) sono state eseguite con punta conica con apertura di 60° e superficie di 10 cm² per la misurazione della resistenza di punta (Qc) e da manicotto di frizione (friction jacket), con superficie di 150 cm² per la misurazione dell'attrito laterale locale (Fs); le letture sono eseguite ogni centimetro di avanzamento. Le prove sono state realizzate utilizzando uno strumento penetrometrico montato su di un mezzo cingolato leggero del tipo PAGANI TG73-200 autoancorante, con cella di carico elettrica da 20t con sistema di acquisizione dati "PAGANI" mod. TGAS03, nel rispetto delle normative ASTM (D.3441); ISSMFE 1976; AGI 1977 secondo le Istruzioni di Prova "IP11" riportate nel manuale del Sistema Qualità SOGEO – (UNI EN ISO9001:2008).

I risultati delle penetrometrie statiche sono elaborati e rappresentati in forma di grafico (allegato 2), dove sono riportati gli andamenti dei valori di Qc (resistenza alla punta), Fs (resistenza attrito laterale locale) e U (pressione nei pori).

4.3.1.2 CPTU-S - CONO SISMICO

Il sistema in oggetto permette di realizzare un'indagine di tipo sismico (tecnica down hole), complementare alla realizzazione di una prova penetrometrica statica con piezocono (paragrafo 4.3.1.1).

Come per la tecnica in foro di sondaggio di tipo down hole (paragrafo 4.3.2.1) si prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) ed il punto di ricezione mobile in profondità anche se, nel caso del "cono sismico", i singoli valori di velocità sia dell'onda di compressione (per i ricevitori verticali) sia dell'onda di taglio (per i ricevitori orizzontali) vengono determinati per differenza tra i tempi sismici di propagazione fra i due ricevitori posti alle estremità opposte della sonda.

Per effettuare le operazioni di acquisizione dati si utilizza una sorgente di energia a polarizzazione verticale ed orizzontale: con la prima si generano onde di compressione P mentre con la seconda onde di taglio Sh. Come apparato di ricezione è stata utilizzata una sonda originale Progeo realizzata in acciaio temprato nella quale sono inserite due coppie di ricevitori (orizzontali e verticali) interspaziati di 1 metro l'una dall'altra (totale 4 ricevitori).

Si realizza dapprima la prova penetrometrica, dopodiché si procede alla ri-infissione della batteria di aste nella stessa verticale di indagine con la punta sismica. Ad ogni stop di infissione (metro) è stata eseguita una misura geofisica di energizzazione e ricezione dell'energia sismica delle onde di compressione e di taglio.

Per ogni energizzazione si è eseguita una registrazione sui ricevitori in modo tale da ottenere sismogrammi sui quali sarà possibile determinare gli arrivi dell'onda di compressione (P) ed altri sui quali sarà possibile determinare gli arrivi dell'onda di taglio (Sh); la registrazione dei tempi di arrivo tra una energizzazione e la seguente, permette di ottenere il valore della differenza di tempo di percorrenza relativa all'intervallo in oggetto.

Il procedimento di elaborazione dei dati viene sviluppato secondo la tecnica differenziale (cross correlazione). Tale tecnica consiste nel valutare il "ritardo" di arrivo

dell'onda di compressione e/o di taglio fra il geofono inferiore e quello superiore valutando unicamente su base sismografica il valore di tempo che intercorre fra i due arrivi.

Il programma di elaborazione della prova penetrometrica con "Cono sismico" consente di determinare contemporaneamente alla rilevazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche (V_p e V_s) nel sottosuolo, i corrispondenti moduli elastici dinamici del terreno che possono contribuire ad una migliore definizione dei carichi e delle spinte da parte di un eventuale manufatto sul terreno di fondazione:

- Coefficiente di Poisson (ν)
- Peso di volume (γ_{din}) in t/m^3
- Modulo di Elasticità dinamico (E_{din}) in Kg/cm^2
- Modulo di Taglio dinamico (G_{din}) in Kg/cm^2
- Modulo di Compressibilità dinamico (K_{din}) in Kg/cm^2

I moduli dinamici così calcolati risultano comunque sempre più elevati di quelli statici forniti da prove di carico in situ in quanto gli impulsi sismici sono di breve durata e le sollecitazioni ad essi associate sono relativamente modeste e rientrano nel campo delle deformazioni istantanee.

Mediante la prova geofisica con "Cono sismico" potrà inoltre essere caratterizzato il sito d'indagine secondo le classi di terreno previste dal D.M. del 14/01/2008 "Norme tecniche per le costruzioni" fino alle profondità raggiunte dalla prova stessa (V_{s30}).

4.3.1.3 CPT

Le prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT) sono state eseguite con punta conica con apertura di 60° e superficie di 10 cm^2 per la misurazione della resistenza di punta (Q_c) e da manicotto di frizione (friction jacket), con superficie di 150 cm^2 per la misurazione dell'attrito laterale locale (F_s); le letture sono eseguite ogni 20 centimetri di avanzamento. Le prove sono state realizzate utilizzando uno strumento penetrometrico montato su di un mezzo cingolato leggero del tipo PAGANI TG73-200 autoancorante, con cella di carico elettrica da 20t.

I risultati delle penetrometrie statiche sono elaborati e rappresentati in forma di grafico (allegato 2), dove sono riportati gli andamenti dei valori di Q_c (resistenza alla punta), F_s (resistenza attrito laterale).

4.3.2 SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO E DOWN HOLE

Per la caratterizzazione "diretta" delle litologie sono stati eseguiti 3 sondaggi a carotaggio continuo (tabella 5). Uno spinto a profondità di 8 metri, ubicato nella fascia costiera e finalizzato alla caratterizzazione, anche attraverso il prelievo di campioni sottoposti a prove di laboratorio (paragrafo 4.4), dei depositi sabbiosi di spiaggia e dei sottostanti livelli coesivi. Altri due, localizzati nell'entroterra in aree scelte in ragione della loro destinazione urbanistica (paragrafo 4.3), sono stati invece spinti a profondità maggiori (40 e 50 metri) ed hanno consentito la misurazione diretta della velocità delle onde di taglio attraverso l'esecuzione di prove down hole (descritte al paragrafo 4.3.2.1) e la caratterizzazione dei terreni in campo statico e dinamico, attraverso il prelievo di campioni sottoposti a prove di laboratorio (paragrafo 4.4).

Codice prova	Codice DB DPC	Tipo	Data esecuzione	Profondità raggiunta	Quota falda da p.c.	Vs30	VsH	Indirizzo	Numero campioni
DH1	040041P60001S70002 040041P60001DH70003	SONDAGGIO + DOWN HOLE	31/07/2014	40	1.90	174	190	Via Maria Montessori 2 San Mauro Pascoli	2
DH2	040045P64004S70007 040045P64004DH70008	SONDAGGIO + DOWN HOLE	30/07/2014	50	2.10	181	212	Via Ezio Bevilacqua 41 Savignano sul Rubicone	3
S1	040045P64504S70508	SONDAGGIO	07/08/2014	8	0.9	-	-	Via Matrice Sinistra Savignano Mare	2

Tabella 5: Principali dati associati ai tre sondaggi, di cui due con down hole, di nuova esecuzione. Il "Codice prova" indica la codifica presente nei rapporti di prova riportati nell'allegato 2, mentre il "Codice DB DPC" indica il codice con cui l'indagine è stata archiviata in banca dati. Dove sono presenti due codici nella seconda colonna, il primo è relativo all'indagine geognostica, il secondo a quella geofisica.

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti con carotiere di diametro 101 mm, perforatrice ad azionamento oleodinamico C.M.V. mod. MK900/D1 montata su carro cingolato, motore Deutz 120 Hp, ralla di rotazione 360° coppia max 1000 Kgm, velocità max 600 g /min.

4.3.2.1 DOWN HOLE

La tecnica down hole prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) ed il punto di ricezione mobile in profondità entro il foro di sondaggio.

Per effettuare tali operazioni è necessario utilizzare una sorgente di energia, del tipo superficiale, non polarizzata. Lo strumento di ricezione è formato da tre geofoni da 14 Hz smorzati del 70%, dei quali uno con l'asse funzionale verticale (V) e due orizzontali (H1 e H2) fra loro ortogonali.

Gli impulsi sismici ricevuti dalla sonda in foro sono stati acquisiti utilizzando l'apparecchiatura EG&G Geometrics Geode tramite la quale, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, sono trasferiti e registrati su supporto magnetico.

In tal modo, per ogni step di misura di 1 metro in profondità, si possono analizzare i first break imputabili all'arrivo dell'onda di compressione (P) sia sul geofono del canale 1 di riferimento sia sul geofono (V) del canale 2 mentre sui geofoni (H1) e (H2) dei canali 3 e 4 si analizza l'impulso in opposizione di fase relativo all'onda di taglio (S).

Il post-processamento si sviluppa fundamentalmente in due fasi: elaborazione dei sismogrammi ed elaborazione delle sezioni down hole per lo studio delle velocità V_p e V_s lungo la verticale del foro.

Il processing tomografico consiste nell'interpretazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione (P) e di taglio (S) determinando in seguito le velocità intergeofoniche relative alle stesse onde e quindi un modello di velocità più adeguato.

La prospezione down hole con elaborazione tomografica si concretizza nella definizione di celle analitiche elementari; per ogni cella il valore della velocità tomografica rappresenta il valore medio risultante dei valori differenziali relativi a tutti i tragitti elementari dei raggi di investigazione che attraversano la cella considerata. La determinazione delle celle elementari che definiscono la rappresentazione tomografica deriva dalle variazioni dei parametri cinematici V_p e V_s in funzione del grado di consistenza differenziata del materiale.

L'elaborazione finale della prova fornisce i log grafici dei parametri elastici e dinamici relativi ai valori di velocità delle onde di compressione (P) e di taglio (S) nonché ai valori dei moduli elastici dinamici (elasticità o di Young, taglio, compressibilità) e del coefficiente di Poisson. Elaborando ulteriormente i log delle onde di taglio sono inoltre ricavati i valori degli indici V_sH (velocità media pesata delle onde S sino a alla profondità di indagine H).

4.3.3 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)

Per poter disporre di un buon numero di punti di misura di V_s30 nell'intera area dell'Unione, a supporto del presente studio di microzonazione, sono state eseguite 14 indagini geofisiche con tecnica MASW, i cui dati principali sono riportati in tabella 6.

L'analisi della propagazione delle onde superficiali entro il sottosuolo con la metodologia M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) per la determinazione della velocità delle onde di taglio (V_s) è stata effettuata mediante l'utilizzo di uno stendimento sismico di superficie; l'elaborazione, mediante software d'inversione, della prova sismica ha fornito un log di V_s posizionato al centro della sezione il quale permette di individuare eventuali variazioni verticali dei valori cinematici corrispondenti a variazioni delle caratteristiche meccaniche dei terreni indagati.

I dati acquisiti, vengono sottoposti ad una fase di processing che consente di stimare la curva di dispersione caratteristica del sito in oggetto ovvero, la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza.

La curva di dispersione ottenuta, viene successivamente utilizzata per un processo di inversione che fornisce come risultato finale il profilo verticale della velocità delle onde di taglio nel terreno e quindi una stima della rigidità in funzione della profondità.

Le sezioni realizzate sono costituite ciascuna da uno stendimento sismico di superficie composto da 24 geofoni da 4.5 Hz (linee 1 e 2) e da 21 geofoni (linea 3) interdistanti 2.5 m, per una lunghezza complessiva di 57.5 m.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

Codice prova	Codice DB DPC	Data esecuzione	Vs30	Indirizzo
MASW1	040016L6MASW6	20/06/2014	182	Strada Provinciale 108 Gatteo
MASW2	040041L1MASW1	20/06/2014	202	Via Cagnona 1727 San Mauro Pascoli
MASW3	040041L2MASW2	20/06/2014	181	Via Ticino San Mauro Pascoli
MASW4	040041L3MASW3	20/06/2014	204	Via XX Settembre 101 San Mauro Pascoli
MASW5	040045L8MASW8	20/06/2014	230	Viale Luigi Bernardini 1 Savignano sul Rubicone
MASW6	040045L9MASW9	20/06/2014	237	Via Selbelle Prima 621 Savignano sul Rubicone
MASW7	040045L10MASW10	20/06/2014	233	Via S. Lega 28 Savignano sul Rubicone
MASW8	040016L7MASW7	20/06/2014	191	Via Dario Ambrosini 9C Gatteo
MASW9	040016L8MASW8	20/06/2014	222	Strada Provinciale 62 Gatteo
MASW10	040041L4MASW4	20/06/2014	196	Via la Piccozza 31 San Mauro Pascoli
MASW11	040016L9MASW9	20/06/2014	219	Via Ranto I 44 Gatteo
MASW12	040045L11MASW11	20/06/2014	227	Via Rubicone Destra Secondo Tratto 220 Savignano sul Rubicone
MASW13	040016L10MASW10	20/06/2014	191	Via Verga Gatteo
MASW14	040045L12MASW12	20/06/2014	218	Via Lombardia 7 Savignano sul Rubicone

Tabella 6: Principali dati associati alle 14 indagini MASW di nuova esecuzione. Il "Codice prova" indica la codifica presente nei rapporti di prova riportati nell'allegato 2, mentre il "Codice DB DPC" indica il codice con cui l'indagine è stata archiviata in banca dati.

Il sismografo utilizzato è un dispositivo modulare da 24 canali GEODE (Geometrics); l'intervallo di campionamento è stato selezionato a 0.5 millisc. e il tempo di registrazione è stato fissato in 8 secondi.

La fase di processing è quella che segue l'acquisizione dei dati grezzi e permette di stimare, a partire dai sismogrammi acquisiti, le caratteristiche dispersive del sito, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza del segnale sismico (curva di dispersione sperimentale).

Dall'analisi della curva di dispersione ottenuta, si può poi risalire alla determinazione delle caratteristiche dei terreni investigati, individuando una crescita della velocità delle onde di Rayleigh al diminuire della frequenza (e dunque all'aumentare della profondità).

L'elaborazione della prova ha fornito un log sismico posizionato al centro della sezione dal quale sono stati poi ricavati i vari orizzonti sismo-stratigrafici a cui è stato associato il valore della velocità Vs direttamente misurata, consentendo di ottenere la Vs30, cioè la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo, dall'espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

4.3.4 ESAC

Per poter disporre di alcuni punti di misura delle velocità delle onde di taglio a profondità superiori a 50 metri nell'area dell'Unione, a supporto del presente studio di microzonazione sono state eseguite 7 indagini geofisiche con tecnica ESAC, i cui dati principali sono riportati in tabella 7.

Codice prova	Codice DB DPC	Data esecuzione	Vs30	Profondità VsH	VsH	Indirizzo
ESAC1	040041P60016ESAC_SPAC70019	17/06/2014	183	100	240	Via Sebastiano Caboto 21 San Mauro Pascoli
ESAC2	040016P60003ESAC_SPAC64072	17/06/2014	220	100	276	Via Papa Giovanni XXIII 26A Gatteo
ESAC3	040045P64005ESAC_SPAC70009	17/06/2014	240	100	380	Via Leonardo da Vinci 71 Savignano sul Rubicone
ESAC4	040041P60002ESAC_SPAC70004	17/06/2014	218	120	295	Via Paolo Guidi 18 San Mauro Pascoli
ESAC5	040016P60004ESAC_SPAC64073	18/06/2014	209	80	265	Via Salvador Allende 106 Gatteo
ESAC6	040045P64006ESAC_SPAC70010	17/06/2014	180	100	242	Via Rubicone 79 Savignano sul Rubicone
ESAC7	040045P64007ESAC_SPAC70011	25/08/2014	267	82	364	Strada Provinciale 11 Savignano sul Rubicone

Tabella 7: Principali dati associati alle 7 indagini ESAC di nuova esecuzione. Il "Codice prova" indica la codifica presente nei rapporti di prova riportati nell'allegato 2, mentre il "Codice DB DPC" indica il codice con cui l'indagine è stata archiviata in banca dati. Nella colonna "Profondità VsH" è indicata la profondità massima (H) fino a cui la prova ha consentito di ottenere il valore di Vs.

L'antenna sismica (seismic array) è una configurazione di sensori sismici distribuiti secondo geometrie variabili sull'area di indagine. Le registrazioni di rumore effettuate dai singoli sensori vengono combinate mediante una tecnica ESAC che mette in evidenza la coerenza di fase delle varie registrazioni. Se si utilizzano solo sensori verticali, la componente del segnale identificata da questo sistema di acquisizione risulta essenzialmente costituita dalla combinazione dei diversi modi di vibrazione delle onde di Rayleigh. Sebbene non esistano limitazioni alla profondità di esplorazione di questo metodo di analisi, in realtà si può assumere che la massima profondità di esplorazione, anche in condizioni ottimali, sia dell'ordine di grandezza del diametro dell'array (da D a 2D circa).

Nello specifico alcune caratteristiche strumentali e ambientali possono limitare e condizionare tale metodologia di indagine come la frequenza propria dei sensori utilizzati e la struttura di velocità del sottosuolo indagato. Infatti, in presenza di forti variazioni di impedenza sismica in corrispondenza della transizione fra i sedimenti soffici superficiali e il basamento rigido, l'energia associata alle onde superficiali tende concentrarsi nella parte più superficiale del terreno rendendo la curva di dispersione sostanzialmente insensibile alle caratteristiche del basamento.

La metodologia di indagine prevede che i sensori registrino il rumore di fondo (detto anche "microtremore") prodotto da sorgenti naturali e antropiche. Per l'acquisizione del rumore ambientale con l'Antenna Sismica sono stati utilizzati 24 geofoni da 4.5 hz posti con una configurazione a croce con 12 ricevitori per braccio interspaziati di 5 metri. Per

l'analisi ed interpretazione dei dati sismici acquisiti è stato utilizzato il codice di calcolo ESAC del software Geopsy.

Le informazioni relative alle caratteristiche del sottosuolo vengono ottenute a partire da una analisi di correlazione fra i segnali registrati dai diversi sensori alle diverse frequenze (funzione di coerenza). Utilizzando opportune procedure di analisi è possibile ricavare da queste misure più curve di dispersione delle onde di Rayleigh presenti nel rumore sismico ambientale.

Dato che la forma delle curve di dispersione dipende dalle variazioni delle velocità delle onde S con la profondità, risulta quindi possibile stabilire una relazione fra la forma delle curve di dispersione e la velocità delle onde S nel sottosuolo. Questa relazione è individuata da un processo di inversione delle curve di dispersione ottenute con l'obiettivo di ricostruire un profilo sismico delle onde di taglio. Tale operazione è stata svolta in maniera iterativa fino a raggiungere il fitting migliore fra curve sperimentali e curve calcolate. L'inversione delle curve di dispersione è stata inoltre effettuata in maniera congiunta ai rapporti spettrali H/V realizzati nella medesima area in modo da avere un maggiore controllo sul fitting e quindi un dato sperimentale più efficiente.

4.3.5 Misure di rumore ambientale (microtremore) a stazione singola

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).

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 ($10-15 \text{ m/s}^2$), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive.

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSR – horizontal to vertical spectral ratio). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012; Castellaro e Mulargia, 2011).

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

Codice prova	Codice BD DPC	Lon wgs84	Lat wgs84	Data	Durata	f0	A0	Comune	Eseguito da
HVSR_001	040045P64015HVSR70019	12.4011	44.0721	20140527	20 min	0.31	1.5	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_002	040045P64016HVSR70020	12.3895	44.0828	20140527	20 min	0.28	1.48	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_003	040045P64017HVSR70021	12.3734	44.0836	20140527	20 min	0.28	1.65	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_004	040045P64018HVSR70022	12.3775	44.091	20140527	20 min	0.31	1.45	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_005	040041P60019HVSR70022	12.4441	44.1646	20140527	20 min	0.31	1.6	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_006	040045P64019HVSR70023	12.4385	44.1642	20140527	20 min	0.31	1.74	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_007	040045P64020HVSR70024	12.4363	44.1585	20140527	20 min	0.31	1.6	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_008	040041P60007HVSR70009	12.4361	44.1146	20140527	20 min	0.28	1.9	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_009	040041P60008HVSR70010	12.4192	44.1068	20140527	20 min	0.38	1.78	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_010	040045P64021HVSR70025	12.3973	44.1042	20140527	20 min	0.31	1.53	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_011	040041P60009HVSR70011	12.4377	44.0952	20140610	20 min	0.6	1.44	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_012	040041P60010HVSR70012	12.4371	44.1053	20140610	20 min	0.59	1.6	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_013	040016P60012HVSR64081	12.3851	44.1399	20140711	20 min	0.31	1.5	Gatteo	Studio Tarabusi
HVSR_014	040016P60013HVSR64082	12.3758	44.1187	20140711	20 min	1.13	1.79	Gatteo	Studio Tarabusi
HVSR_015	040045P64022HVSR70026	12.4016	44.1164	20140711	20 min	0.31	1.6	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_016	040041P60011HVSR70013	12.4121	44.1108	20140711	20 min	0.38	1.51	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_017	040041P60012HVSR70014	12.4233	44.1045	20140711	20 min	0.38	1.67	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_018	040045P64023HVSR70027	12.4105	44.0962	20140711	20 min	0.3	1.45	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_019	040045P64024HVSR70028	12.4118	44.0884	20140711	20 min	0.38	1.7	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_020	040045P64025HVSR70029	12.3825	44.0697	20140711	20 min	0.39	1.5	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_021	040016P60014HVSR64083	12.4274	44.1641	20140711	20 min	0.41	1.36	Gatteo	Studio Tarabusi
HVSR_022	040016P60017HVSR64086	12.3895	44.1311	20140711	20 min	0.31	1.37	Gatteo	Studio Tarabusi
HVSR_023	040016P60015HVSR64084	12.3839	44.1122	20140711	20 min	0.38	1.54	Gatteo	Studio Tarabusi
HVSR_024	040016P60016HVSR64085	12.3963	44.1196	20140711	20 min	0.39	1.35	Gatteo	Studio Tarabusi
HVSR_025	040041P60013HVSR70015	12.4183	44.1151	20140711	20 min	0.43	1.5	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_026	040045P64026HVSR70030	12.4068	44.1024	20140711	20 min	0.38	1.62	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_027	040045P64027HVSR70031	12.4065	44.0934	20140711	20 min	1.94	1.65	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_028	040045P64028HVSR70032	12.4034	44.088	20140711	20 min	0.39	1.48	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_029	040045P64029HVSR70033	12.3991	44.0918	20140711	20 min	0.34	1.5	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_030	040045P64030HVSR70034	12.3824	44.0697	20140711	20 min	0.39	1.56	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_031	040045P64031HVSR70035	12.4275	44.1523	20140711	20 min	0.38	2.08	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_032	040045P64033HVSR70037	12.4156	44.0839	20140906	20 min	0.5	1.33	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_033	040045P64034HVSR70038	12.394	44.0858	20140906	20 min	16.7	3.3	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_034	040045P64035HVSR70039	12.3947	44.0874	20140907	20 min	7.81	3.19	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_035	040016P60019HVSR64088	12.4322	44.1681	20140907	20 min	0.31	1.29	Gatteo	Studio Tarabusi
HVSR_036	040041P60014HVSR70016	12.4198	44.102	20140906	60 min	0.3	1.43	San Mauro Pascoli	Studio Tarabusi
HVSR_037	040045P64036HVSR70040	12.3919	44.0916	20140907	60 min	0.38	1.43	Savignano sul Rubicone	Studio Tarabusi
HVSR_038	040016P60018HVSR64087	12.3851	44.1275	20140907	60 min	0.31	1.45	Gatteo	Studio Tarabusi
HVSR_ESAC1	040041P60017HVSR70020	12.4404	44.1622	20140617	20 min	0.38	1	San Mauro Pascoli	Progeo srl
HVSR_ESAC2	040016P60005HVSR64074	12.3865	44.1067	20140617	20 min	2.1	1.4	Gatteo	Progeo srl
HVSR_ESAC3	040045P64008HVSR70012	12.3953	44.0971	20140617	20 min	1.2	1.2	Savignano sul Rubicone	Progeo srl
HVSR_ESAC4	040041P60003HVSR70005	12.4146	44.1053	20140617	20 min	0.56	0.7	San Mauro Pascoli	Progeo srl
HVSR_ESAC5	040016P60006HVSR64075	12.3843	44.1358	20140618	20 min	2.9	0.94	Gatteo	Progeo srl
HVSR_ESAC6	040045P64009HVSR70013	12.4291	44.161	20140617	20 min	3.39	1.26	Savignano sul Rubicone	Progeo srl
HVSR_ESAC7	040045P64032HVSR70036	12.3892	44.0829	20140825	20 min	0.26	1.48	Savignano sul Rubicone	Progeo srl
HVSR_MASW1	040016P60007HVSR64076	12.411	44.156	20140620	20 min	2.5	1.27	Gatteo	Progeo srl
HVSR_MASW2	040041P60018HVSR70021	12.4278	44.1501	20140620	20 min	0.35	1.52	San Mauro Pascoli	Progeo srl
HVSR_MASW3	040041P60004HVSR70006	12.4371	44.1112	20140620	20 min	4.17	1.43	San Mauro Pascoli	Progeo srl
HVSR_MASW4	040041P60005HVSR70007	12.4187	44.1109	20140620	20 min	13.2	1.3	San Mauro Pascoli	Progeo srl
HVSR_MASW5	040045P64010HVSR70014	12.398	44.0836	20140620	20 min	0.28	2.2	Savignano sul Rubicone	Progeo srl
HVSR_MASW6	040045P64011HVSR70015	12.4062	44.0767	20140620	20 min	0.26	1.2	Savignano sul Rubicone	Progeo srl
HVSR_MASW7	040045P64012HVSR70016	12.3828	44.0906	20140620	20 min	0.26	1.15	Savignano sul Rubicone	Progeo srl
HVSR_MASW8	040016P60008HVSR64077	12.3986	44.1224	20140620	20 min	0.28	1.22	Gatteo	Progeo srl
HVSR_MASW9	040016P60009HVSR64078	12.3724	44.1114	20140620	20 min	0.26	2.09	Gatteo	Progeo srl
HVSR_MASW10	040041P60006HVSR70008	12.4176	44.099	20140620	20 min	0.34	1.4	San Mauro Pascoli	Progeo srl
HVSR_MASW11	040016P60010HVSR64079	12.3734	44.1017	20140620	20 min	5.2	1.4	Gatteo	Progeo srl
HVSR_MASW12	040045P64013HVSR70017	12.4017	44.0973	20140620	20 min	2.17	2.1	Savignano sul Rubicone	Progeo srl
HVSR_MASW13	040016P60011HVSR64080	12.3847	44.1193	20140620	20 min	0.35	1.26	Gatteo	Progeo srl
HVSR_MASW14	040045P64014HVSR70018	12.3971	44.1042	20140620	20 min	3.47	1.35	Savignano sul Rubicone	Progeo srl

Tabella 8. Principali dati associati alle 59 misure di microtremore a stazione singola di nuova esecuzione. Il "Codice prova" indica la codifica presente nei rapporti di prova riportati nell'allegato 2, mentre il "Codice DB DPC" indica il codice con cui l'indagine è stata archiviata in banca dati.

Il metodo considera i microtremori come composti in massima parte da onde di superficie (di Rayleigh) nelle componenti orizzontali e verticali, che vengono amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo. È quindi possibile ricostruire la forma spettrale del microtremore, in cui i picchi alle diverse frequenze rappresentano il rapporto tra la componente orizzontale e verticale dei segnali registrati.

A supporto del presente studio di microzonazione sismica sono state eseguite 59 misure, di cui 21 realizzate da Progeo s.r.l., in associazione alle indagini MASW e ESAC, e 38 dallo Studio scrivente.

Progeo s.r.l. ha utilizzato un tromografo digitale SARA modello SL07. L'acquisizione dati è stata fatta con frequenza di campionamento di 200Hz con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti per tutte le registrazioni.

Lo Studio Tarabusi ha utilizzato 3 tromografi digitali TROMINO, modelli Studio, Zero e Engy. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 60 minuti per 3 misure e pari a 20 minuti per le restanti 35.

Nella tabella 8 sono riportati i dati principali associati a ciascuna delle 59 misure di microtremore realizzate e utilizzate per il presente studio di microzonazione.

Questa campagna di indagini geofisiche, proprio perché estesa sul territorio di tutti i comuni, è risultata molto importante ai fini della caratterizzazione sismica dei terreni, in quanto ha permesso di accertare, come vedremo, la presenza di un bedrock profondo per gran parte del territorio dell'Unione (paragrafi 6.1 e 6.2).

4.4 Prove geotecniche di laboratorio

Da ciascuno dei due sondaggi a carotaggio continuo DH1 (realizzato nel territorio del comune di San Mauro Pascoli e nel cui foro è stato eseguito il down hole 1) e DH2 (realizzato nel territorio del comune di Savignano sul Rubicone e nel cui foro è stato eseguito il down hole DH2), sono stati prelevati due campioni indisturbati di terreno a profondità diverse su cui sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio geotecnico: analisi granulometrica, limiti liquido e plastico, peso di volume, umidità, colonna risonante, triassiale anisotropa K_0 con misura della deformazioni locali e misura della velocità di onde elastiche in provino triassiale.

Dal sondaggio a carotaggio continuo S1, eseguito vicino alla costa nel territorio del comune di Savignano sul Rubicone, è stato prelevato un campione indisturbato di terreno su cui sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio geotecnico: Analisi granulometrica, limiti liquido e plastico, peso di volume.

Dai sondaggi DH2 e S1 sono stati prelevati altri 2 campioni indisturbati che sono stati aperti e descritti in laboratorio, ma non sottoposti ad alcuna prova.

Tutte le prove di laboratorio sono state eseguite dall'Istituto Sperimentale Modelli Geotecnici ISMGEO s.r.l. di Seriate (BG).

In tabella 9 sono sintetizzate le tipologie di prova eseguite su ciascun campione per cui è indicata anche la profondità di prelievo.

	profondità di prelievo	litologia	analisi granulometrica	peso di volume	umidità	limiti liquido e plastico	colonna risonante	triassiale anisotropa K_0	$V_{s,vh}$ in provino triassiale
DH1-C1	12 - 12,6 m	Argilla con limo debolmente sabbiosa	X	X	X	X	X	X	162
DH1-C2	34,5 - 35,1 m	Argilla con limo sabbiosa con tracce di ghiaia	X	X	X	X	X	X	222
DH2-C1	8,4 - 9 m	Limo con argilla debolmente sabbioso	X	X	X	X	X	X	153
DH2-C2	10 - 10,6 m	Argilla debolmente limosa grigio scuro	-	-	-	-	-	-	-
DH2-C3	24,2 - 24,8 m	Limo con argilla sabbioso	X	X	X	X	X	X	236
S1-C1	2 - 2,5 m	Sabbia con tracce di argilla e limo	X	X	X	-	-	-	-
S1-C2	6 - 6,5 m	Argilla limosa con lenti sabbiose	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 9: Campioni indisturbati con indicazione delle quote di prelievo e delle prove di laboratorio eseguite.

In particolare le prove di colonna risonante e le prove triassiali anisotrope K_0 hanno fornito le curve di degrado utilizzate per le analisi di risposta sismica locale.

Oltre alle prove di laboratorio di nuova esecuzione e appena descritte, il presente studio ha potuto utilizzare quelle realizzate nel dicembre 1999 su 2 campioni prelevati da un sondaggio eseguito dalla Regione Emilia-Romagna (denominato 256-S10 "foce Rubicone" e archiviato in banca dati con il codice 040016P54455S47543) in località Gatteo a Mare in prossimità della foce del fiume Rubicone (figura 22). Anche queste prove pregresse sono state eseguite da ISMGEO Seriate (BG). Si tratta di analisi granulometriche, determinazione del peso specifico e di volume e prove triassiali cicliche a liquefazione (consolidata isotropicamente non drenata) eseguite su due campioni di sabbie debolmente limose, prelevati rispettivamente a profondità di 3-3.6 m e 6.5-7.1 metri. Tali prove hanno permesso la valutazione della resistenza ciclica a liquefazione dei campioni di terreno e quindi di procedere ad una valutazione locale del potenziale di liquefazione (paragrafo 7.3.4) i cui risultati potranno essere confrontati con quelli ottenuti dalle prove in sito (Pierucci et al., 1999).

Seguono le descrizioni sintetiche delle prove di laboratorio di tipo più complesso tra quelle utilizzate a supporto del presente studio di microzonazione sismica e precedentemente elencate, sintetizzate a partire dal rapporto delle attività di laboratorio redatto da ISMGEO.

4.4.1 Prova di colonna risonante (RC)

La prova di colonna risonante è stata eseguita utilizzando una apparecchiatura del tipo "fixed-free", cioè con la base del provino fissa e la testa libera di ruotare, che impiega un sistema elettromagnetico per applicare una torsione ciclica al provino.

Il sistema elettromagnetico è alimentato da un generatore di onde sinusoidali a frequenza variabile. Il segnale elettrico utilizzato per produrre la torsione e quello dell'accelerometro, che misura il moto della testa, sono visualizzati sugli assi X-Y di un

oscilloscopio e danno luogo ad una configurazione ellittica quando il campione è in risonanza. I valori della frequenza di risonanza e dell'accelerazione indotta sono stati utilizzati per il calcolo del modulo di taglio e delle deformazioni. La curva di decadimento, prodotta interrompendo in risonanza l'eccitazione torsionale, ha permesso di valutare lo smorzamento del materiale espresso come percentuale dello smorzamento critico.

Per la rilevazione dei parametri di prova sono stati collegati all'attrezzatura impiegata i seguenti strumenti elettronici:

- accelerometro piezoelettrico, range 0.1%5 g;
- amplificatore di carica, max. input 10 kpcmb, max. gain 250 mV/pcmb, Max output 5 Vpp con massimo errore + 0.1%;
- trasduttore di spostamento + 5 mm, classe di accuratezza 0.25% del fondo scala;
- trasduttore di pressione, fondo scala 35 bar, classe di accuratezza 0.2% del fondo scala;
- condizionatore di segnale, max. output 5 Vac, frequenza 5 kHz, classe di accuratezza 0.1% del valore di uscita;
- oscilloscopio digitale, range 5 - 5000 mV, classe di accuratezza 2% del range;
- generatore di segnale programmabile, range di frequenza 0.1%5 MHz, 4 forme d'onda, massimo errore + 1%;
- unità di controllo/acquisizione, 16 canali di ingresso;
- multimetro, range da 1 mV a 300 Vac;
- timer-counter programmabile, 10 digits display range 0.1%120 MHz, risoluzione ½ digit.
- trasduttori di spostamento di non contatto aventi fondo scala di 2 mm, classe di precisione 1% del fondo scala e risoluzione di 0.0001 mm;

Il provino, ottenuto mediante fustellazione, è stato assemblato all'interno della cella di prova ed isolato mediante l'applicazione di una membrana in lattice e di tenute O-Ring. Dopo la fase di saturazione, ottenuta mediante l'applicazione di un opportuno valore di contro-pressione, si è passati alla consolidazione isotropa del campione alla tensione prevista dal programma di prova.

Al termine della consolidazione sono state eseguite le misure di modulo e di smorzamento. Per ogni valore di deformazione di taglio γ , sono state prima eseguite le misure di taglio torsionale e successivamente quelle di colonna risonante.

Per ogni prova, oltre ai dati di identificazione del provino ed ai dati relativi alla fase di consolidazione, sono stati riportati sui certificati "Prova di colonna risonante" i valori del modulo di taglio G e dello smorzamento D in funzione della deformazione di taglio γ in singola ampiezza (allegato 4).

4.4.2 Prova in cella triassiale consolidata anisotropicamente non drenata (Tx CK0U) con misura delle deformazioni locali

Per l'esecuzione delle prove triassiali sono state utilizzate celle triassiali costituite da una struttura in acciaio inossidabile a tre colonne e da un cilindro laterale in plexiglass. La pressione viene fornita da aria compressa generata da un compressore centrale e distribuita in rete; tale illimitata riserva consente l'adozione di celle in cui lo scorrimento del

pistone avviene senza attriti non necessitando guarnizioni di tenuta. Quale fluido di confinamento è stata utilizzata acqua ricoperta da un sottile strato di olio per evitare fenomeni di aerazione del provino. Per la misura delle deformazioni radiali all'interno della cella sono stati montati due trasduttori di non contatto posizionati in corrispondenza della mezzeria del provino e posti tra loro a 180°, mentre per la misura delle deformazioni assiali sono stati montati 4 trasduttori di non contatto, 2 nella parte alta del provino e 2 nella parte bassa, uno schema del posizionamento dei trasduttori di spostamento di non contatto è rappresentato in figura in allegato.

Il drenaggio del campione viene consentito attraverso fori contenenti pietre porose di bronzo sinterizzato presenti tanto nel ripartitore di carico superiore che in quello inferiore. Il pistone di carico assiale è solidale con il ripartitore di carico superiore. Le grandezze fisiche di prova sono controllate mediante un pannello contenente la seguente strumentazione:

- valvola proporzionale per l'applicazione della pressione in cella;
- valvola proporzionale per l'applicazione della contro-pressione;
- valvola proporzionale per l'applicazione del carico assiale mediante un attuatore pneumatico fissato sulla traversa della pressa di carico;
- trasduttori per la misura della pressione in cella, della contro-pressione, del carico assiale applicato al provino, delle deformazioni assiali, radiali e delle deformazioni volumetriche.

Le valvole proporzionali ed i trasduttori sono collegati, mediante opportune interfacce, ad un computer dotato di programma di controllo in grado di gestire automaticamente le fasi di saturazione, consolidazione e rottura del provino. In particolare, mediante tale sistema, sono possibili consolidazioni di tipo anisotropo o monodimensionali, secondo rampe di carico prestabilite e rotture secondo un qualsiasi tipo di percorso tensionale.

Per la rilevazione dei parametri di prova sono stati collegati all'attrezzatura impiegata i seguenti strumenti elettronici:

- trasduttore di spostamento avente fondo scala di 20 mm, classe di accuratezza migliore dello 0.3% del fondo scala;
- trasduttori di pressione aventi fondo scala di 10 bar, classe di accuratezza migliore dello 0.2% del fondo scala;
- cella di carico avente fondo scala 5 o 10 kN, accuratezza migliore dello 0.1% del fondo scala;
- trasduttori di spostamento di non contatto aventi fondo scala di 2.5 mm, classe di precisione 1% del fondo scala e risoluzione di 0.0001 mm;
- condizionatori di segnale avente tensione di uscita 5 Vac e frequenza 5 kHz, classe di accuratezza migliore dello 0.1% del valore di uscita;
- sistemi automatici per la misura delle variazioni di volume aventi risoluzione di 0.01 cc.;
- personal computer dotato di programma di acquisizione.

Il provino è stato alloggiato tra il ripartitore di carico superiore e quello inferiore della cella triassiale interponendo tra di esso ed i ripartitori pietre porose e dischi di carta filtro; un foglio di carta filtro nella classica forma di griglia è stato inoltre posizionato tra provino e membrana impermeabile per consentire una migliore distribuzione delle pressioni interstiziali e quindi agevolare la fase di consolidazione. Il provino è stato successivamente

posto in saturazione applicando una contro-pressione sotto una pressione efficace tale da non consentirne il rigonfiamento.

Dopo un conveniente lasso di tempo è stata effettuata una misura del parametro B. Tenuto conto della rigidità dei materiali e della rottura drenata, è stato assunto come accettabile un valore di B maggiore di 0.95. Nel caso di un valore troppo basso, la saturazione è stata prolungata per un ulteriore periodo di tempo, in qualche caso aumentando ancora la contro-pressione. Dopo di ciò il provino è stato portato alla tensione finale efficace di consolidazione prestabilita mediante l'applicazione di un'opportuna rampa di carico mediante il sistema automatico. Durante la saturazione e la consolidazione sono state misurate le variazioni di volume e di altezza del provino; tali valori hanno consentito di calcolare le dimensioni fisiche del campione prima della fase di rottura. Esse sono state utilizzate come base per il calcolo degli sforzi e delle deformazioni durante tale fase.

La rottura in compressione per carico è stata condotta in condizioni non drenate a velocità di deformazione controllata. Per la scelta della velocità di deformazione è stato utilizzato il tempo di consolidazione rilevato per l'ultimo incremento di carico; in ogni caso la velocità adottata è stata inferiore a quella teoricamente applicabile. Durante la rottura sono stati realizzati il monitoraggio e la registrazione del carico deviatorico applicato, della deformazione verticale e dell'incremento della pressione interstiziale, nonché la misura delle deformazioni locali (assiali e radiali) effettuate mediante i 6 trasduttori di non contatto posti all'interno della cella. I dati registrati sono stati successivamente trasferiti ad un computer per le elaborazioni.

Per ogni prova sono presentati i seguenti certificati riportati nell'allegato 4:

a) "PROVA TRIASSIALE CK0U – Primo foglio": raccoglie alcuni dati iniziali generali relativi al provino. Inoltre vengono rappresentati i valori tensionali di σ'_a e σ'_r di fine consolidazione con le deformazioni assiali e radiali ε_a e ε_r in % fornite dai trasduttori di non spostamento di non contatto sempre riferite a termine consolidazione. Inoltre riporta il percorso di sollecitazione sul piano $p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$ e $q = (\sigma'_a - \sigma'_r)$ in termini di tensioni efficaci;

b) "PROVA TRIASSIALE CK0U - Secondo foglio": raccoglie la curva sforzi-deformazioni $q-\varepsilon_a$ con ε_a deformazioni assiale fornite dal trasduttore di spostamento esterno e l'andamento delle sovrappressioni interstiziali ΔU rispetto alla deformazione assiale;

c) "PROVA TRIASSIALE CK0U – Terzo foglio": raccoglie l'andamento del Modulo E in funzione delle deformazioni assiali ε_a ricavate dalle misure locali (interne). I valori del modulo sono stati calcolati interpolando gruppi di valori sperimentali ritenuti significativi.

4.4.3 Prova triassiale ciclica a liquefazione

Le prove triassiali cicliche sono finalizzate allo studio del comportamento dei terreni ad alti livelli di deformazione (superiori a 10^{-3}), in particolare alla determinazione della resistenza ultima e all'osservazione del comportamento "post-ciclico", ovvero di ciò che avviene quando il terreno viene sottoposto nuovamente ad un carico, dopo aver già raggiunto la rottura.

L'apparecchiatura è composta da:

- una cella triassiale, analoga a quella utilizzata in prove statiche ;
- un sistema elettropneumatico per l'applicazione del carico ciclico desiderato, comprendente un generatore di funzioni elettrico ed un attuatore pneumatico operante con frequenze comprese tra 0.01 e 1 Hertz;
- un registratore oscillografico su supporto sia cartaceo che magnetico;
- un registratore digitale a quattro vie, per le variazioni dei carichi verticali, delle deformazioni assiali, delle pressioni di cella e delle pressioni interstiziali;
- gli accessori necessari, quali alimentatori di corrente elettrica, amplificatori di carica e di segnale per i trasduttori preposti alla misura di pressioni e spostamenti.

La prova avviene solitamente in tre stadi (di cui il terzo non interessa per l'analisi del rischio di liquefazione):

- 1) consolidazione isotropa o anisotropa in condizioni drenate;
- 2) applicazione del carico assiale ciclico *one-* o *two-ways* per N cicli fino a rottura in condizioni non drenate;
- 3) riconsolidazione e successiva prova statica fino a rottura in condizioni drenate o anche non drenate.

I risultati di ogni singola prova vengono rappresentati su grafici, che sono riportati nell'allegato 4. Il valore della resistenza a liquefazione, inteso come sforzo di taglio massimo sopportabile dal terreno prima di raggiungere la soglia definita come inizio liquefazione (soglia prefissata di deformazione o di pressioni neutre raggiunte), viene segnato su di un grafico in funzione del numero di cicli di carico corrispondente. Con più prove, eseguite per diversi valori dello sforzo di taglio ciclico su provini diversi di uno stesso campione, si ottengono più punti, a formare la cosiddetta "curva di resistenza" del terreno (Pierucci et al., 1999).

5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Al fine di ricostruire il modello geologico di sottosuolo del territorio dell'Unione sono stati inizialmente analizzati i dati di tutte le indagini di repertorio disponibili, indicate in tabella 2 all'inizio del capitolo 4. Sulla base di questa prima caratterizzazione e tenendo conto delle principali previsioni urbanistiche indicate dai tecnici dell'Ufficio di Piano, sono state ubicate e quindi eseguite le indagini geognostiche e geofisiche di nuova realizzazione che hanno permesso nel complesso una buona caratterizzazione degli ambiti di studio, al di fuori dei quali, pur con i pochi dati a disposizione, è stata comunque prodotta una modellazione geologica anche se inevitabilmente di minor dettaglio.

A seguito del lavoro di raccolta e sistematizzazione dei dati di repertorio e dell'esecuzione delle nuove indagini, i dati stratigrafici oggi disponibili per l'area di studio possono considerarsi molto numerosi e, pur con evidenti concentrazioni in alcune aree, anche abbastanza ben distribuiti sull'intero territorio dell'Unione. Questo consente di ottenere una ricostruzione delle caratteristiche litologiche e sismiche dei primi 20-30 metri di sottosuolo attendibile nelle aree urbanizzate, ma che diventa via via più approssimata passando agli ambiti di studio attualmente non urbanizzati fino ad arrivare alle aree esterne agli ambiti stessi.

In generale la litostratigrafia del sottosuolo dei comuni dell'Unione Rubicone e Mare desunta dalle indagini conferma l'assetto descritto nell'inquadramento, riportato nel capitolo 3, che vede la presenza di 3 ambienti genetico-deposizionali distinti, da nord verso sud: costiero, fluvio-lacustre e di versante (margine appenninico) (figura 5).

La carta geologico tecnica (tavole 2 e paragrafo 8.2), che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5 metri) e la carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavole 4 e paragrafo 8.4), che presenta la suddivisione del territorio dei comuni sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica nei primi 20 metri circa, sintetizzano le conoscenze litostratigrafiche dell'area di studio e permettono di distinguere, procedendo da NE a SO:

- una fascia larga tra 900-1000 metri lungo la costa, caratterizzata dalla presenza di depositi sabbiosi ben assortiti: di spiaggia in prossimità della linea di riva, con spessori compresi tra 7 e 9 metri) e quindi di cordone litorale con spessori compresi tra 3 e 8 metri, in calo progressivo allontanandosi dalla costa. In prossimità del corso del Rubicone sono presenti sabbie poco assortite e limi, per spessori analoghi ai precedenti. Tali livelli abbondantemente sabbiosi sono seguiti da depositi prevalentemente argillosi;

- una fascia larga tra 1100 (Gatteo) e 1300 (San Mauro Pascoli) metri parallela alla costa, caratterizzata dalla presenza di depositi di piana inondabile costituiti da una alternanza di argille e limi argillosi organici a consistenza variabile da bassa a media. In corrispondenza di diversi punti di indagine si rinvengono, a diverse profondità, livelli torbosi di ambiente palustre di retroduna. In prossimità del corso del fiume Rubicone si rinvengono, nei primissimi metri di profondità, depositi limo-sabbiosi di argine e canale fluviale;

- un'ampia area che arriva fino agli abitati di San Mauro Pascoli e Gatteo e che si spinge più a sud solo nella porzione est di Savignano sul Rubicone, è costituita da una

prevalente alternanza di argille limose e limi argillosi di piana inondabile. La granulometria media dei depositi tende ad aumentare gradualmente allontanandosi dalla costa, passando da una prevalenza di argille nella zona più settentrionale, ad una prevalenza di limi all'altezza degli abitati di Gatteo e San Mauro Pascoli, dove si rinvencono localmente livelli limo-sabbiosi e di sabbie fini. Un analogo aumento della granulometria si riscontra inoltre in prossimità del corso del Fiume Rubicone e di altri corsi minori in cui sono presenti depositi di argine e canale fluviale;

- un'area posta ad ovest dell'abitato di Savignano, in corrispondenza della conoide del fiume Rubicone, in cui si rinvencono nei primi 10 metri, spessori variabili di sabbie limose e limi sabbiosi poco addensati, con intercalazioni limo-argillose, seguiti da depositi prevalentemente limo-argillosi;

- il tratto più meridionale del corso del torrente Uso, nel comune di San Mauro Pascoli, lungo il quale sono presenti depositi di argine e canale fluviale con spessori variabili tra 1 e 3 metri di argille sabbiose seguite da ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose ad addensamento medio con locali intercalazioni limose;

- una porzione nella zona centro-meridionale del comune di Savignano sul Rubicone che ricade nel margine collinare che si spinge verso nord col sottile ed allungato crinale che culmina in località Castelvecchio, costituito da depositi limo-argillosi e limo-sabbiosi di versante e terrazzo fluviale, con spessori compresi tra 3 e 12 metri, che poggiano al di sopra di un substrato stratificato molto alterato. Il substrato è costituito nella zona più a nord (Castelvecchio) dalle Arenarie e Argille di Savignano (SVG), mentre in quella più a sud dalla Formazione delle Argille Azzurre (FAA) (figura 3).

Per quanto riguarda la ricostruzione della litologia a maggiore profondità sono disponibili numerosi dati puntuali: in larga parte pozzi per acqua e alcuni sondaggi provenienti dalla banca dati geognostica regionale (i più profondi si spingono fino a poco oltre i 200 metri, ma spesso con un basso dettaglio della stratigrafia) e i due carotaggi (con associato down hole) eseguiti per il presente studio di microzonazione sismica (raggiungono profondità di 40 e 50 metri con un ottimo dettaglio della stratigrafia). Sono inoltre disponibili le 9 sezioni geologiche (realizzate dalla Regione Emilia-Romagna e per il progetto CARG) riportate nell'allegato 1, le cui tracce sono presenti nella carta geologico tecnica (tavole 2). Sono inoltre stati raccolti i dati stratigrafici derivati dai 4 pozzi per idrocarburi presenti entro l'area di studio o in prossimità della stessa, utili per la ricostruzione della stratigrafia profonda (oltre 2-300 metri di profondità). Tali dati, ed in particolare quelli che raggiungono le maggiori profondità (sezione 9 e pozzi per idrocarburi), si sono rivelati di grande importanza perché hanno reso possibile l'individuazione del bedrock sismico della zona di pianura alluvionale (paragrafo 6.2 e figura 11).

6. INTERPRETAZIONI ED INCERTEZZE

Nel presente capitolo vengono esaminate le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, partendo dall'esposizione del percorso logico seguito per delineare la struttura dello studio, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando anche di valutarne le inevitabili incertezze e le eventuali criticità.

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0)

A supporto del presente studio sono state realizzate 59 misure di rumore ambientale (microtremore a stazione singola), a cui, per l'archiviazione in banca dati, si sono aggiunte ulteriori 4 misure pregresse. In realtà le indagini di questa tipologia raccolte negli archivi erano in origine circa un centinaio, ma poiché la maggior parte presentava problemi di affidabilità o completezza del dato (ubicazione incerta, taglio del grafico H/V per frequenze inferiori a 1 Hz, disturbi non filtrati, misure non sufficientemente lunghe in rapporto alle frequenze indagate, ecc.), si è deciso di recuperare solo alcune misure eseguite sulla dorsale di Castelvechio (comune di Savignano sul Rubicone), che, con picchi evidenti a frequenze relativamente alte, presentano minori incertezze interpretative.

Nella tabella 8 del capitolo 4 sono riportati i dati principali associati a ciascuna delle 59 misure di microtremore realizzate e utilizzate per il presente studio di microzonazione, i cui rapporti di indagine sono presenti nell'allegato 2. Alcune di esse sono state appositamente eseguite a breve distanza l'una dall'altra con strumenti differenti per verificare la ripetibilità delle misure e la sostanziale coerenza dei dati registrati con i diversi strumenti (paragrafo 4.3.5). Per ciascun comune è inoltre stata realizzata una misura da 60 minuti analizzata con finestre di 60 secondi (tutte le restanti sono di 20 minuti analizzate con finestre di 20 secondi), che ha permesso di "validare" i picchi a più bassa frequenza individuati dalla maggior parte delle misure eseguite in quanto, per soddisfare i criteri "Sesame", dovrebbe essere rispettata la condizione per cui $f_0 > 10 / L_w$ (lunghezza finestra).

Le numerose misure di rumore ambientale eseguite per il presente studio e distribuite su tutto il territorio dell'Unione, hanno evidenziato in tutta la zona di pianura l'assenza di picchi di rilievo nei tracciati delle curve H/V, che risultano sostanzialmente piatti fino a frequenze in genere molto basse. Sono infatti caratterizzati da un rapporto H/V basso, anche sotto 1 in presenza di inversioni di velocità (Castellaro e Mulargia, 2009). A parte alcuni rari casi in cui sono presenti blandi innalzamenti a frequenze superiori a 1 Hz (con valore dell'ampiezza sempre inferiore a 2), legati a modesti contrasti di impedenza locali, si riscontra generalmente una frequenza fondamentale dei depositi piuttosto bassa, compresa tra 0,25 e 0,5 Hz, anche questa caratterizzata da picchi di ampiezza assai modesta, con la maggior parte delle misure che registra il massimo tra 0,28 e 0,38 Hz. Tale risultanza trova riscontro in analoghe indagini eseguite nei comuni limitrofi (Castellaro, 2009 e Nori e Di Marcantonio, 2014). Si evidenzia come anche le tre misure "lunghe" (HVSR 036, 037 e 038) hanno fornito risultati analoghi a quelle delle misure più brevi, individuando solamente picchi molto poco pronunciati a frequenze comprese tra 0,3 e 0,38 Hz.

Nella zona del margine collinare, ed in particolare nel tratto più prossimo all'abitato di Savignano sul Rubicone, sono invece stati riscontrati picchi, anche pronunciati (ampiezza

superiore a 3), a frequenze superiori a 5 Hz, legati al contrasto di impedenza tra i ridotti spessori depositi di versante e di terrazzo fluviale e il substrato alterato.

La carta delle frequenze naturali dei terreni prevista dall'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013) e descritta nel paragrafo 8.3, evidenzia quanto sopra descritto ed in particolare che: mentre per i comuni di Gatteo (tavola 3a) e San Mauro Pascoli (tavola 3c) l'intero territorio è attribuito alla classe di frequenza " $f_0 < 1$ ", nel comune di Savignano sul Rubicone (tavola 3b) sono anche presenti, in corrispondenza della porzione più settentrionale del margine collinare (dorsale di Castelvecchio), un'area con classe di frequenza " $2\text{Hz} < f_0 \leq 8 \text{ Hz}$ " e una con classe di frequenza " $f_0 > 8 \text{ Hz}$ ".

6.2 Substrato rigido

Il confronto fra i risultati della campagna di misure di microtremore descritti nel paragrafo precedente e i dati derivati dai pozzi per idrocarburi presenti entro l'area di studio o in prossimità della stessa hanno permesso di correlare le basse frequenze naturali dei terreni misurate con i dati stratigrafici profondi.

Come evidenziato in figura 11, la sezione geologica 9 associata al foglio CARG 256 (ISPRA et al., 2009) e riportata in maggior dettaglio nell'allegato 1, che attraversa parte del territorio dei comuni di Savignano sul Rubicone e San Mauro Pascoli, con direzione SW-NE, si basa essenzialmente sulla taratura eseguita coi dati dei pozzi per idrocarburi, i cui report sono disponibili dal sito web dell'UNMIG e sono stati raccolti ed archiviati nelle banca dati realizzate a supporto del presente lavoro (tabella 10).

Denominazione CARG	Denominazione originale UNMIG	Codice sito DB	Lon wgs84	Lat wgs84	Tetto Formazione Argille Azzurre
Bellaria 1	BELLARIA_001	040041P60218	12,44522	44,14875	523
Rubicone 1	RUBICONE_001	040041P60219	12,447511	44,15991	544
Bellaria 2	BELLARIA_002	040016P60184	12,412868	44,15434	448
Santarcangelo 2	S.ARCANGELO_002	040045P64508	12,415131	44,09659	384

Tabella 10. Dati di pozzi per idrocarburi disponibili sul territorio dell'Unione (o in aree limitrofe), con l'indicazione delle diverse denominazioni, dei codici con cui sono archiviati nelle banche dati comunali e della profondità del tetto della Formazione delle Argille Azzurre.

A seguito di verifiche eseguite attraverso procedure di inversione delle curve H/V di misure di rumore ambientale, si può affermare che tra le superfici stratigrafiche individuate nella sezione 9, l'unica che può ben correlarsi con le basse frequenze di risonanza individuate dalle misure di rumore ambientale (0,30-0,35 Hz) è il tetto della Formazione delle Argille Azzurre. Tale superficie è la stessa che viene individuata da Nori e Di Marcantonio in un caso di studio di risposta sismica locale eseguito nel comune di Bellaria Igea Marina, attraverso il confronto dei risultati di misure di rumore ambientale con i dati del pozzo Bellaria 1 (Nori e Di Marcantonio, 2014).

È possibile quindi stabilire che per l'intero territorio dei comuni di Gatteo e San Mauro Pascoli e che almeno per tutta la zona di pianura e di costa del comune di Savignano sul Rubicone, il substrato rigido (bedrock sismico) è rappresentato dalla Formazione delle Argille Azzurre, al cui tetto, che le separa dalle Arenarie e Argille di Savignano, si genera

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

un contrasto di impedenza assai poco accentuato, ma che risulta visibile quasi in tutta l'area di pianura dell'Unione attraverso le misure di rumore ambientale.

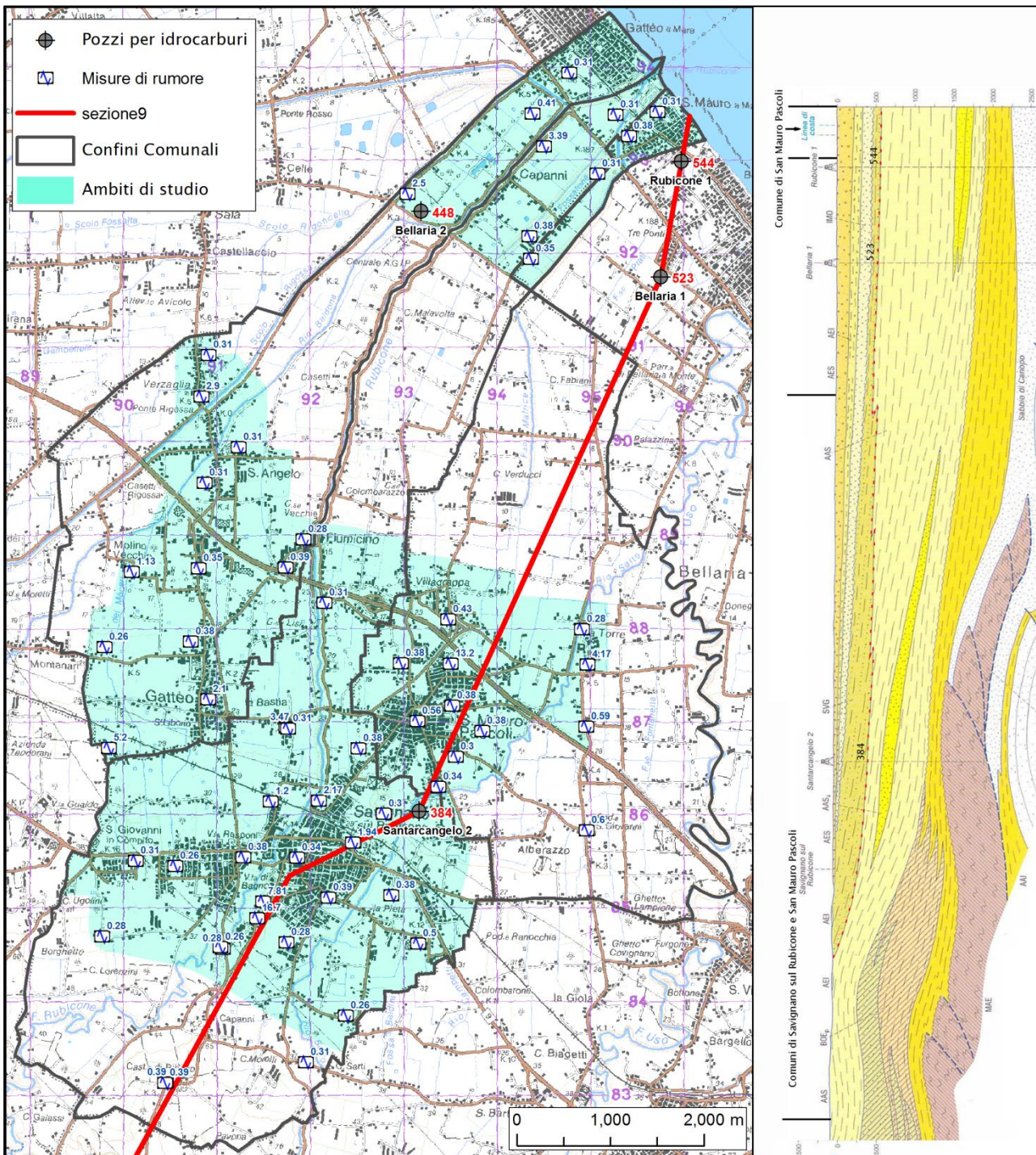


Figura 11. Elementi utili all'individuazione del bedrock profondo in mappa e in sezione: a destra la sezione geologica CARG denominata "9" nel presente lavoro, con evidenziata a tratteggio rosso la base delle Arenarie e Argille di Savignano (SVG), tetto delle Argille Azzurre Superiori (AAS). In mappa sono riportate la traccia di sezione (in rosso), tutte le misure di microtremore a stazione singola (con indicazione del valore di F0) eseguite per il presente lavoro e i pozzi per idrocarburi con indicazione (in rosso) della profondità in metri del tetto della Formazione delle Argille Azzurre.

L'unica area in cui lo studio ha, come detto, accertato la presenza di un bedrock (o pseudo-bedrock) più superficiale è rappresentata della porzione più settentrionale del

marginale collinare (dorsale di Castelvecchio) in comune di Savignano sul Rubicone. Le misure di rumore ambientale eseguite per il presente studio, coerenti con altre pregresse (paragrafo 6.1), hanno permesso di individuare un'area con classe di frequenza " $2\text{Hz} < f_0 \leq 8\text{ Hz}$ " e un'altra con classe di frequenza " $f_0 > 8\text{ Hz}$ ", in ragione dei picchi delle curve H/V originati dal contrasto di impedenza tra i ridotti spessori di depositi di versante e di terrazzo fluviale e il substrato alterato. Tale substrato alterato, sismicamente caratterizzato anche da indagini MASW di repertorio, non raggiunge, almeno nelle prime decine di metri, la velocità di 800 m/s. In ogni caso, il marcato contrasto di impedenza (ampiezza del picco H/V anche maggiore di 3) originato dall'interfaccia tra depositi e substrato alterato, suggerisce di classificare quest'ultimo come bedrock (o comunque pseudo-bedrock) sismico dell'area del margine collinare (con $V_s < 800\text{ m/s}$).

6.3 Individuazione della conoide del fiume Rubicone e distribuzione dei depositi granulari saturi nella pianura alluvionale.

La tavola 6 del PTCP dal titolo "Rischio sismico. Carta delle aree suscettibili di effetti locali" (Provincia di Forlì-Cesena, 2010), indica come unica area del territorio dell'Unione in cui sono presenti depositi granulari saturi potenzialmente liquefacibili, la fascia costiera di spiaggia e cordone litorale, per la quale, al momento di iniziare lo studio, erano previsti i locali approfondimenti di terzo livello.

A seguito degli approfondimenti condotti per il presente studio di microzonazione sismica, sono state individuate altre aree della pianura alluvionale, ascrivibili all'ambiente fluvio-lacustre di figura 5, in cui sono presenti, anche se in misura minore, livelli significativi di depositi granulari saturi potenzialmente liquefacibili, che nelle carte delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavole 4) sono indicate come "Zone di attenzione per liquefazione" e che vengono di seguito descritte.

Nella carta geologico tecnica del comune di Savignano sul Rubicone (tavola 2b e paragrafo 8.2) viene mappata un'ampia area di conoide alluvionale del fiume Rubicone. Tale perimetrazione è stata possibile grazie alla dettagliata e puntuale descrizione presente nella relazione del PRG del comune di Savignano (Fabbri, 2000), utilizzata per l'inquadramento geomorfologico e litologico (paragrafo 3.3) e che ha anche permesso di individuare la traccia di un paleoalveo sepolto nella zona sud-ovest del territorio del comune di Savignano. Tale descrizione ha trovato conferma nei dati stratigrafici raccolti per questa porzione di territorio, in cui sono presenti, già nei primi metri e a varie profondità, significativi livelli di sabbie limose e limi-sabbiosi. L'elevata disponibilità di dati di prove penetrometriche e di alcuni sondaggi hanno permesso una buona definizione del limite settentrionale dell'area della conoide alluvionale, con particolare riferimento agli aspetti litologici, delimitando la presenza di depositi rilevanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie e dei possibili effetti locali, piuttosto che dal punto di vista geomorfologico (secondo il quale l'area potrebbe forse essere ulteriormente estesa verso nord).

Lungo tutto il corso del fiume Rubicone, lungo alcuni tratti del corso del torrente Rigossa e lungo l'asse dei due paleoalvei indicati nelle tavole 2, le indagini disponibili hanno

permesso di individuare livelli di limi-sabbiosi e sabbie fini limose superficiali, attribuibili ad un ambiente genetico-deposizionale di argine e canale fluviale.

Nell'ampia porzione di territorio dell'Unione ascrivibile all'ambiente fluvio-lacustre (figura 5, paragrafo 3.3 e zona 2004 della carta MOPS descritta al paragrafo 8.4) sono presenti inoltre altre aree, in genere di estensione limitata, in cui i dati geognostici disponibili hanno permesso di rinvenire litologie limose e/o sabbiose potenzialmente liquefacibili. Per queste aree si sottolinea che, secondo quanto si evince dai dati disponibili, tali depositi granulari risultano in genere organizzati in corpi di spessore variabile, a geometria lenticolare, con frequenti e repentine chiusure laterali, che rendono difficile sia la loro individuazione che la loro perimetrazione in carta nell'ambito di uno studio a scala comunale. In ogni caso col presente studio sono state individuate diverse aree circoscritte il cui perimetro segnato sulla cartografia risulta maggiormente attendibile per le zone di interesse della microzonazione sismica di dettaglio, cioè nelle aree urbanizzate e in misura minore nel resto degli ambiti di studio (definiti al paragrafo 1.2 e delimitati in azzurro nelle tavole), per cui sono disponibili sufficienti dati geognostici. Al di fuori degli ambiti di studio, in ragione delle minori informazioni disponibili, la stessa cartografia (tavole 4) può fornire solo un'indicazione di massima.

Più in generale, in ragione della suddetta variabilità laterale della granulometria dei depositi, sia all'interno che fuori dagli ambiti, anche nelle aree in cui non sono specificamente indicate "Zone di attenzione per liquefazione" non può essere esclusa la presenza di locali livelli granulari saturi, il cui reale potenziale di liquefazione dovrebbe sempre essere puntualmente valutato con specifiche indagini geognostiche.

6.4 Determinazione della velocità delle onde di taglio (V_s)

Per poter essere correttamente applicati, gli abachi indicati nell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007) prevedono la conoscenza della profondità del substrato rigido (paragrafo 6.2) e della velocità delle onde di taglio dei primi metri di depositi (V_{s30} o V_{sH}).

Per questa ragione, a integrazione dei dati geofisici pregressi finalizzati alla misurazione diretta del parametro V_s (2 coni sismici e 20 MASW recuperati da precedenti relazioni geologiche e ritenuti sufficientemente affidabili), sono state realizzate, per il presente studio, 14 indagini con tecnica MASW, 7 ESAC, 5 coni sismici (CPTUS) e 2 down hole (paragrafo 4.3 e tabella 11). Sono così in tutto disponibili 50 punti di misura diretta del valore di V_s fino ad almeno 30 metri di profondità (figura 12), che sono riportati nelle tavole 5 e i cui contenuti sono illustrati in dettaglio nel paragrafo 8.5. Considerando le indagini geofisiche di nuova realizzazione, la distribuzione dei dati puntuali è ora buona, per lo meno nelle aree di interesse della microzonazione sismica di dettaglio (aree urbanizzate, suscettibili di trasformazioni urbanistiche e fasce a cavallo delle reti infrastrutturali). In ogni caso, anche attraverso opportune correlazioni con altri dati geognostici e geofisici, è stato possibile suddividere il territorio indagato in macro-aree per classi di V_s (V_{sH} nella zona di margine collinare nel comune di Savignano sul Rubicone e V_{s30} nel resto dell'area dell'Unione), così come definite dagli abachi dell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007). Una volta scelto l'abaco di riferimento, questo dato,

associato a quello della profondità del bedrock (o pseudo-bedrock) sismico, ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione per ogni singola area (paragrafo 7.1.1). Come descritto nel capitolo successivo e riscontrabile nella tavola 5b, i dati disponibili indicano un generale e graduale aumento di velocità a partire dalla costa, dove si riscontrano Vs30 inferiori ai 200 m/s, verso la zona prossima margine collinare in cui si superano i 250 m/s. Velocità che aumenta ulteriormente nell'area collinare dove la successione è costituita da pochi metri di depositi di versante o terrazzati al di sopra del substrato, sebbene inizialmente molto alterato.

Indagine	Comune	Vs30	Indagine	Comune	Vs30
CPTUS1	Gatteo	164	MASW01	Gatteo	182
CPTUS2	San Mauro Pascoli	178	MASW02	San Mauro Pascoli	202
CPTUS3	Savignano sul Rubicone	173	MASW03	San Mauro Pascoli	181
CPTUS4	Savignano sul Rubicone	206	MASW04	San Mauro Pascoli	204
CPTUS5	Savignano sul Rubicone	245	MASW05	Savignano sul Rubicone	230
DH1	San Mauro Pascoli	174	MASW06	Savignano sul Rubicone	237
DH2	Savignano sul Rubicone	181	MASW07	Savignano sul Rubicone	233
ESAC1	San Mauro Pascoli	183	MASW08	Gatteo	191
ESAC2	Gatteo	220	MASW09	Gatteo	222
ESAC3	Savignano sul Rubicone	240	MASW10	San Mauro Pascoli	196
ESAC4	San Mauro Pascoli	218	MASW11	Gatteo	219
ESAC5	Gatteo	209	MASW12	Savignano sul Rubicone	227
ESAC6	Savignano sul Rubicone	180	MASW13	Gatteo	191
ESAC7	Savignano sul Rubicone	267	MASW14	Savignano sul Rubicone	218

Tabella 11. Dati di Vs30 misurati attraverso le diverse indagini geofisiche realizzate per il presente studio. I valori delle CPTUS 1, 4 e 5, che si sono arrese prima dei 30 metri (paragrafo 4.3.1.2), sono stati ottenuti estendendo l'ultimo valore misurato fino a 30 metri.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

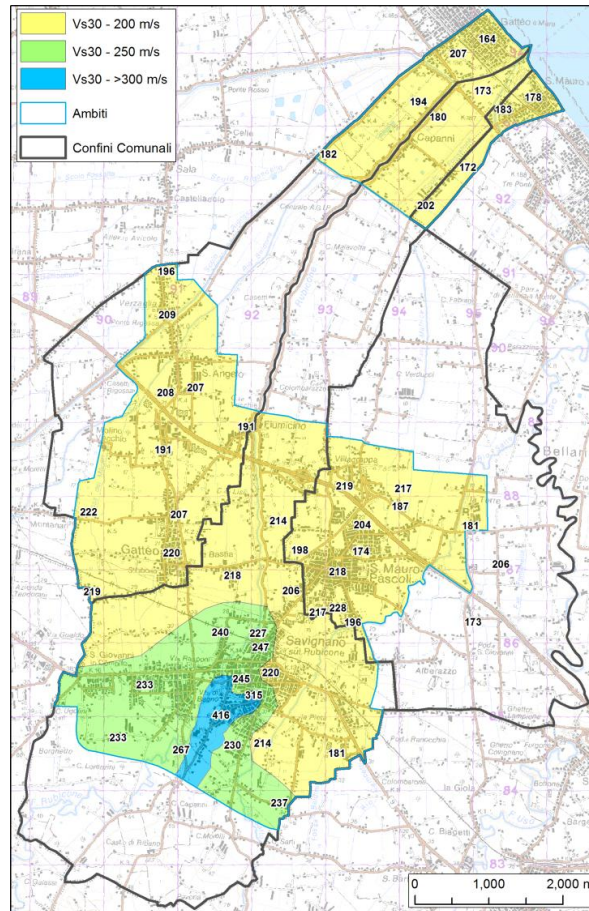


Figura 12. Carta delle Vs30 ottenute attraverso misure dirette della velocità delle onde di taglio pregresse e di nuova realizzazione. L'area con Vs30 > 300 m/s è quella della prima collina, per cui è stata puntualmente calcolata la VsH ai fini dell'utilizzo degli abachi regionali per la stima dei fattori di amplificazione.

L'esecuzione delle prove di laboratorio (paragrafo 4.4) sui campioni indisturbati prelevati dai fori di sondaggio DH1 e DH2 (figura 10), ha permesso di misurare la velocità delle onde di taglio in provino triassiale a profondità diverse sulle due verticali e di metterle a confronto con le Vs ottenute, per il corrispondente intervallo di un metro, attraverso le prove down hole (tabella 12). Tale confronto ha evidenziato un'ottima corrispondenza di valori, migliore per i campioni più superficiali (DH1-C1 e DH2-C1), con differenze del 2-3%, che per i campioni più profondi (DH1-C2 e DH2-C3), con differenze del 7-8%, che possono comunque considerarsi contenute.

Campione	profondità di prelievo	litologia	Vs in provino triassiale	Vs down hole
DH1-C1	12 - 12,6 m	Argilla con limo debolmente sabbiosa	162	160 (13m)
DH1-C2	34,5 - 35,1 m	Argilla con limo sabbiosa con tracce di ghiaia	222	236 (35 m)
DH2-C1	8,4 - 9 m	Limo con argilla debolmente sabbioso	153	159 (9 m)
DH2-C3	24,2 - 24,8	Limo con argilla sabbioso	236	255 (25 m)

Tabella 12. Confronto delle misure di Vs ottenute da prove di laboratorio e misurate con l'indagine down hole.

6.5 Piezometria

Come definito in sede di inquadramento (capitolo 3), nelle aree di piana alluvionale e costiera dell'Unione è stata accertata l'esistenza di un acquifero multifalda costituito da un primo complesso di falde superficiali ed un secondo di falde profonde (figura 7). L'acquifero superficiale risulta invece assente o legato a piccole falde sospese nell'area del margine collinare.

In particolare, relativamente alla piezometria della falda acquifera superficiale, quella di maggior interesse per uno studio di microzonazione sismica, i dati disponibili per tutti e 3 i comuni indicano una soggiacenza abbastanza regolare, con valori mediamente compresi tra 1 e 3 m di profondità dal piano di campagna nella zona di piana alluvionale e tra 0,5 e 2 m nella zona costiera con alimentazione che avviene almeno in parte tramite l'infiltrazione delle acque meteoriche dalla superficie (paragrafo 3.5).

I livelli idrici misurati nei fori delle 20 indagini geognostiche realizzate nell'estate 2014 per il presente studio confermano tale indicazione con valori di soggiacenza compresi tra 0,9 e 1,5 metri da p.c. per le 7 prove eseguite nella zona costiera e valori compresi tra 0,8 e 3,1 per le 13 prove eseguite nella zona di pianura alluvionale (tabelle 4 e 5).

7. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Il fine ultimo di uno studio di microzonazione di secondo livello è quello di pervenire ad una suddivisione del territorio indagato in zone stabili (non presenti nell'area in esame), zone suscettibili di amplificazioni locali, a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione, e zone instabili, per cui si richiedono approfondimenti di terzo livello (tavole da 6 a 8). I paragrafi del presente capitolo illustrano quindi i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio e per identificare le aree instabili, che nell'area di studio sono essenzialmente quelle soggette a potenziali fenomeni di liquefazione. Su tali aree sono stati condotti specifici approfondimenti di livello 3 per la stima puntuale del potenziale di liquefazione finalizzata all'individuazione di aree a diverso livello di rischio.

È opportuno evidenziare come, in ragione delle inevitabili incertezze dei metodi di calcolo utilizzati, in questo genere di valutazioni (per il calcolo degli indici di liquefazione, ma in misura minore anche per gli stessi fattori di amplificazione) non siano tanto importanti i valori assoluti ottenuti, quanto piuttosto i valori relativi ricavati dal confronto dei diversi valori numerici, che permettono di individuare le aree o i punti a maggiore o minore pericolosità relativa.

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali - Calcolo dei fattori di amplificazione

Innanzitutto si precisa che il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato solo le aree di interesse della microzonazione sismica di dettaglio, cioè gli ambiti di studio costituiti dalle aree urbanizzate, quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (Regione Emilia-Romagna, 2013).

7.1.1 Calcolo dei fattori di amplificazione con gli abachi regionali

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, devono essere calcolati, nel secondo livello di microzonazione sismica, i fattori di amplificazione, scegliendo se utilizzare gli abachi nazionali degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) o quelli di riferimento regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007). Nel presente studio la scelta è caduta su questi ultimi, poiché si ritiene che, per come sono strutturati, consentano una migliore e più corretta modellazione per lo specifico caso dell'Unione Rubicone e Mare.

La prima scelta da fare, per poter determinare i fattori di amplificazione (F_{PGA} , $FA_{0,1-0,5s}$, $FA_{0,5-1s}$) secondo i criteri regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007), è quella relativa a quali abachi utilizzare. A questo proposito vale la pena di citare un breve estratto dell'allegato C della DGR 1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013):

Si ricorda che la scelta degli abachi per la stima dell'amplificazione non dipende dalle sole caratteristiche litologiche e morfologiche dell'area, ma deve essere attentamente valutata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, in particolare della profondità del substrato rigido. Per questa valutazione si raccomanda di porre particolare attenzione alla cartografia di primo livello, in particolare alla carta delle MOPS e degli elementi geologici sepolti che possono modificare il moto in superficie e alla carta delle frequenze naturali dei terreni.

Nel caso in esame si è tenuto conto proprio di quanto sopra citato e sono stati utilizzati 3 abachi distinti per le 3 aree del territorio dell'Unione caratterizzate da differenze stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie e descritte in dettaglio nei capitoli 5 e 6. Tali aree corrispondono ai tre ambienti genetico-deposizionali principali (come da tabella 1.1.2-1 degli Standard 3.0 MS) descritti al paragrafo 3.3 (costiero, fluvio-lacustre e di versante) e cartografati in figura 5:

- A2.1.2 - Pianura Padana e Costa Adriatica (Costa 3, substrato > 100m da p.c.)
Utilizzato per l'area in cui si estende il cordone sabbioso costiero (per un tratto largo poco meno di un chilometro a partire dalla linea di riva) caratterizzata dalla presenza di un bedrock profondo, rappresentato dal tetto della Formazione delle Argille Azzurre, posto ad almeno 500 metri di profondità (paragrafo 6.2). I dati delle indagini geofisiche disponibili, di repertorio e di nuova realizzazione, permettono di attribuire l'intera area costiera alla classe con Vs30 di 200 m/s (tavole 5).

- A2.1.2 - Pianura Padana e Costa Adriatica (Pianura2, substrato > 100m da p.c.)
Utilizzato per l'intera area di pianura alluvionale, dal limite interno della fascia costiera fino al confine col margine collinare, caratterizzata dalla presenza di un bedrock profondo, rappresentato dal tetto della Formazione delle Argille Azzurre, posto ad oltre 100 metri di profondità (paragrafo 6.2). I dati delle indagini geofisiche disponibili, di repertorio e di nuova realizzazione, permettono di attribuire la porzione settentrionale dell'area di pianura alluvionale alla classe con Vs30 di 200 m/s, mentre quella più meridionale alla classe con Vs30 di 250 m/s (tavole 5). Alla prima classe (200 m/s) sono ascrivibili i terreni dell'intera area comunale di Gatteo e San Mauro Pascoli, oltre che di un'ampia porzione del comune di Savignano sul Rubicone. Alla seconda classe (250 m/s) sono invece associati i terreni della porzione più meridionale del comune di Savignano sul Rubicone, che coincidono in larga parte con i depositi di conoide alluvionale del fiume Rubicone perimetrata nella carta geologico tecnica (tavole 2 e paragrafo 8.2).

- A2.1.1 - Appennino e margine appenninico-padano (Vs substrato < 800 m/s)
Utilizzato per la stretta dorsale collinare di Castelvecchio, immediatamente a sud dell'abitato di Savignano sul Rubicone, caratterizzata dalla presenza di limitati spessori di depositi di versante e terrazzati poggianti su un substrato alterato. Sulla base dei dati geognostici (sondaggi e penetrometrie) e geofisici (misure di rumore ambientale e MASW) disponibili sono state distinte 2 aree: una più meridionale in cui si rileva un evidente contrasto di impedenza ad alte frequenze (> 11 Hz), che suggerisce la presenza di uno pseudo-bedrock (che non raggiunge gli 800 m/s) a bassa profondità, per la quale si utilizza l'abaco assumendo 5 metri di terreni di copertura con VsH di 200 m/s; un'altra più a nord in cui il contrasto di impedenza si sposta a frequenze relativamente più basse (< 5-8 Hz), che suggerisce la presenza di uno pseudo-bedrock (che non raggiunge gli 800 m/s) a una profondità relativamente superiore, per la quale si utilizza l'abaco assumendo 15 metri di terreni di copertura con VsH di 300 m/s.

Attraverso la realizzazione di sezioni topografiche con sistemi GIS a partire dal modello digitale del terreno (griglia con passo 5 metri), si è potuto verificare che la zona rilevata a sud dell'abitato di Savignano sul Rubicone presenta pendii con inclinazione media sempre inferiore a 15°. Inoltre non affiorano nell'area rilievi in roccia, gli unici per cui gli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013) richiedono l'inserimento del fattore di amplificazione topografico Ft.

7.1.2 Risposta sismica locale con modellazioni numeriche

Sulla base dei dati stratigrafici, geofisici e geotecnici disponibili sono state eseguite le modellazioni numeriche della risposta sismica locale su 2 siti "tipo" all'interno dell'area dell'Unione, per cui si dispone di dati che permettono una buona definizione del modello sismo-stratigrafico in profondità, denominati RSL1, valido per la zona costiera, e RSL2, valido per la zona di pianura alluvionale in cui ricadono i capoluoghi comunali. Si può ritenere che le due simulazioni eseguite siano rappresentative delle due principali classi MOPS presenti nell'area di studio (paragrafo 8.4), rispettivamente la zona MOPS 2002 (dove si registra la maggiore suscettibilità per liquefazione in corrispondenza della zona costiera fortemente antropizzata) e la zona MPOS 2004 (la più estesa, che comprende i capoluoghi di Gatteo e San Mauro Pascoli e buona parte di quello di Savignano sul Rubicone). I due siti in cui si è eseguita la modellazione, entrambi nel territorio del comune di San Mauro Pascoli, sono stati scelti sia per la presenza di dati di dettaglio, stratigrafici e di VS, per i primi 30-40 metri (da prove CPTUS e down hole), sia per la vicinanza di prove ESAC che forniscono un modello di VS fino a 100-120 metri, sia soprattutto perché collocati lungo la traccia della sezione 9, che, sulla base dei dati di pozzi per idrocarburi prossimi ai due siti, fornisce un'attendibile stratigrafia in profondità. Tale stratigrafia profonda permette di individuare il bedrock sismico dell'area di pianura e costiera, anche sulla base della correlazione con i risultati delle misure di rumore ambientale. Per le curve di decadimento di argille e limi sono stati utilizzati i dati ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite per il presente studio, anche se in parte relative a campioni prelevati da verticali differenti, mentre per quelle dei livelli granulari si è fatto riferimento a dati di letteratura. In tabella 13 sono indicate, per ciascuno dei due siti (RSL1 e RSL2), le indagini utilizzate per la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico di riferimento.

	RSL1	RSL2
Stratigrafia superficiale	Cono sismico CPTUS2 (fino a 30 metri)	Carotaggio DH1(fino a 40 metri)
Stratigrafia in profondità	Pozzo per acqua 040041P23944PA47621 e sezione 59 (fino a 222 metri)	Pozzo per acqua - 040041P26684PA47932 - (fino a 125 metri)
	Pozzo per idrocarburi RUBICONE 1 - 040041P60219PI70231 (fino al bedrock)	Pozzo per idrocarburi SANTARCANGELO 2 - 040045P64508PI70523 (fino al bedrock)
Bedrock sismico	Sezione 9 e HVSR_005	Sezione 9 e HVSR_009
VS superficiale	Cono sismico CPTUS2 (fino a 30 metri)	Down hole DH1 (fino a 40 metri)
VS in profondità	ESAC 1 (fino a 100 metri)	ESAC4 (fino a 120 metri)
Curve di decadimento argille	Prove di laboratorio su C1-DH1 e C2-DH1	Prove di laboratorio su C1-DH1 e C2-DH1
Curve di decadimento limi	Prove di laboratorio su C1-DH2	Prove di laboratorio su C1-DH2 e C3-DH2

Tabella 13. Indicazione delle indagini e delle sezioni da cui sono stati tratti i dati per la ricostruzione dei due modelli sismo-stratigrafici di riferimento per le simulazioni di risposta sismica locale.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

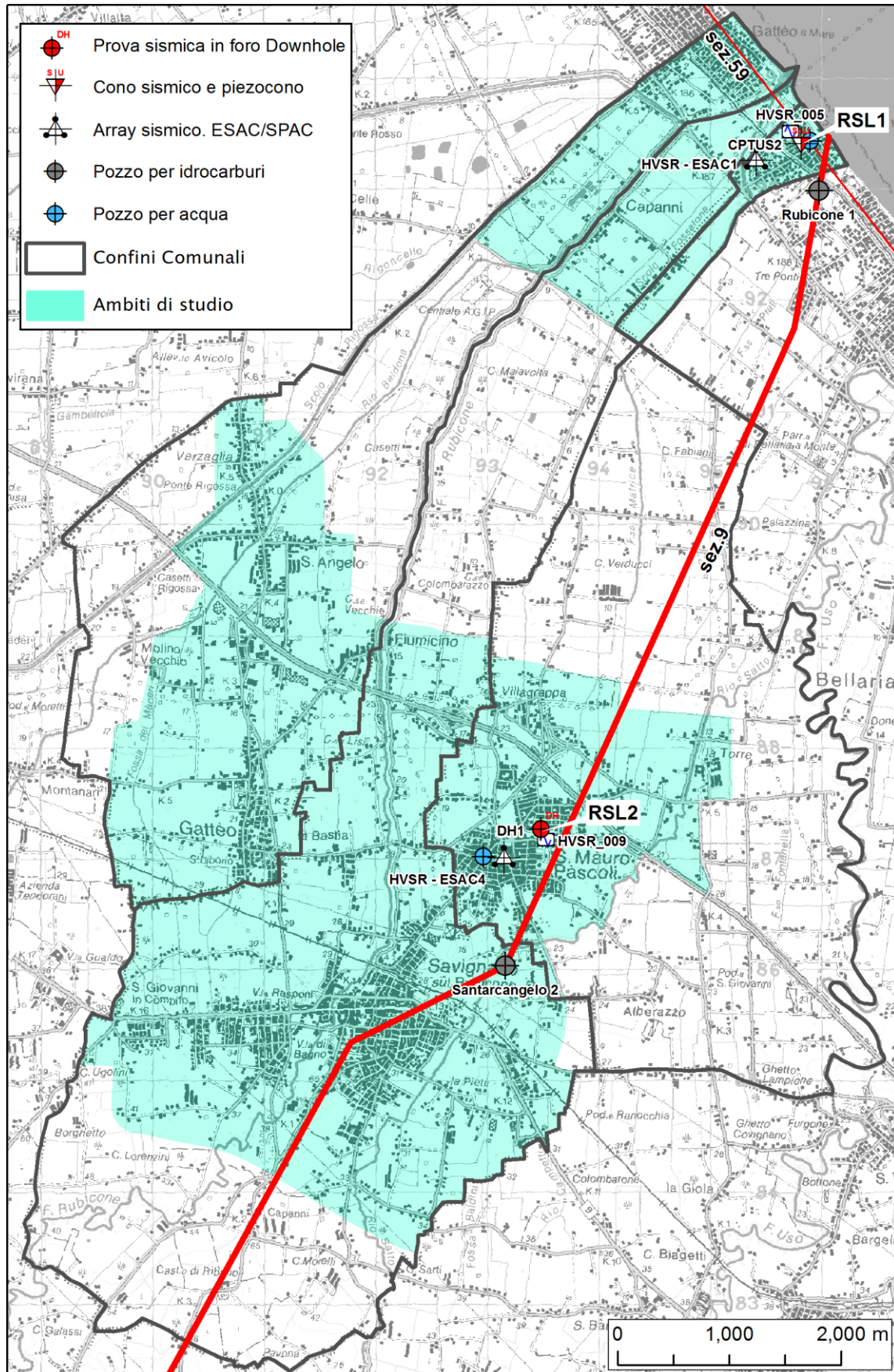


Figura 13. Localizzazioni dei due siti in cui sono state eseguite le modellazioni numeriche di risposta sismica locale con l'indicazione delle indagini e delle sezioni utilizzate per la ricostruzione dei modelli sismo-stratigrafici di riferimento.

Per il calcolo delle simulazioni numeriche è stato utilizzato il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013). Gli accelerogrammi utilizzati in input (bedrock) per il calcolo sono i 3 segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla DAL 112/2007, che risultano già scalati in modo che la loro accelerazione massima corrisponda al valore a_{refg} del comune. Poiché per i tre comuni dell'Unione Rubicone e Mare il valore di a_{refg} risulta sostanzialmente identico (0.186g per Gatteo e Savignano e 0.185g per San Mauro Pascoli), gli accelerogrammi di input forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla DAL 112/2007 sono di fatto gli stessi.

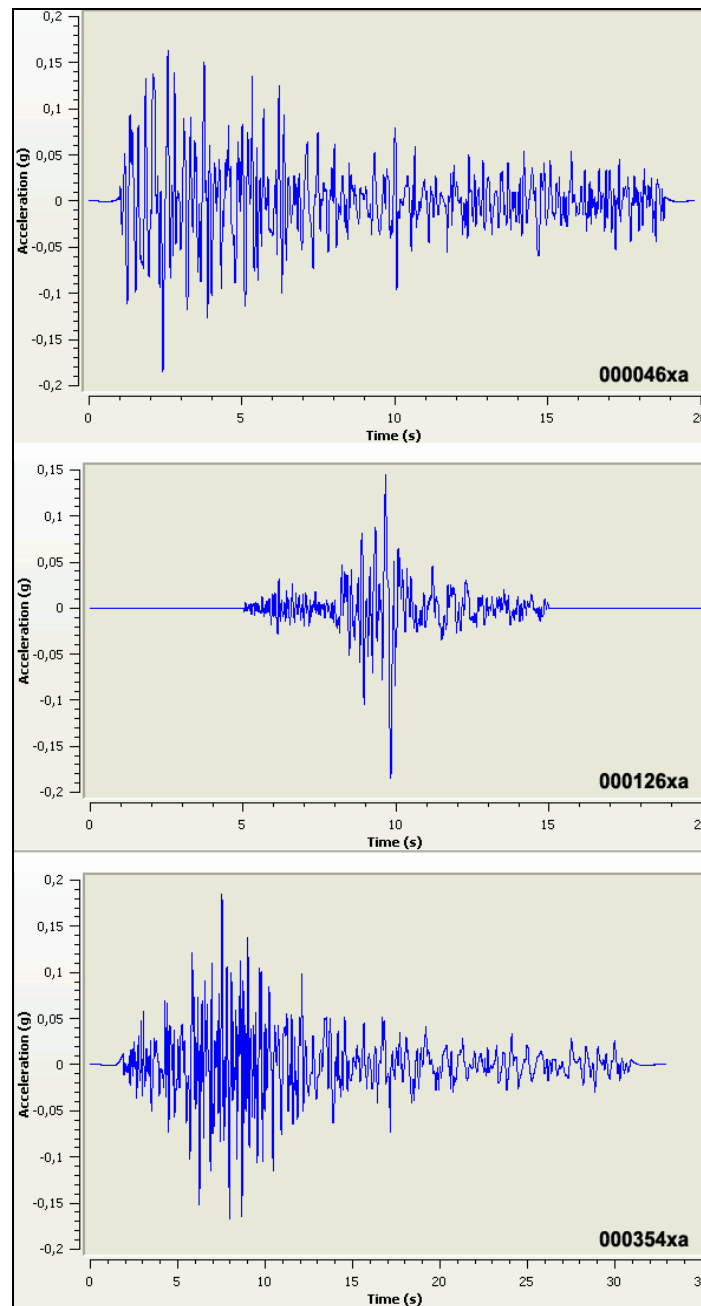


Figura 14. Segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla DAL 112/2007 e utilizzati come input per le simulazioni numeriche della risposta sismica locale.

Dal momento che il presente studio ha distinto il territorio dell'Unione in microzone sulla base delle caratteristiche stratigrafiche indipendentemente dai confini amministrativi e gli

accelerogrammi di input sono gli stessi per i tre comuni, si ritiene che le due simulazioni numeriche eseguite (RSL1 e RSL2) siano rappresentative delle zone MOPS 2002 e 2004 per tutti e tre i comuni oggetto dello studio.

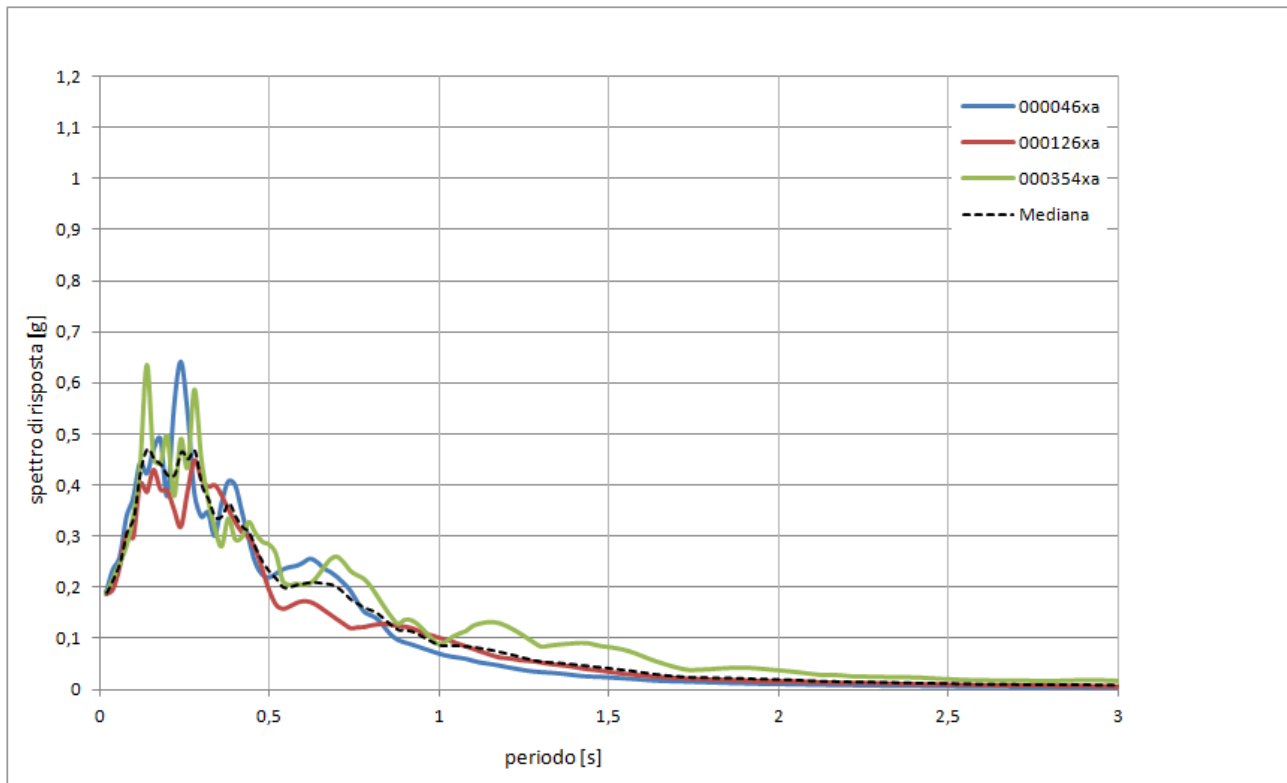


Figura 15. Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi e il loro spettro mediano.

Sono stati quindi calcolati e confrontati (figura 16 e figura 19) gli spettri di risposta al bedrock (figura 15) e in superficie (figura 17 e figura 20) per un periodo di ritorno di 475 anni con uno smorzamento assunto pari al 5%. Gli spettri elastici in pseudo accelerazione in input e in output, relativi alle due simulazioni di risposta sismica locale, sono stati quindi archiviati nei database dei tre comuni in formato txt (compressi in un unico file zip per ciascuna simulazione) secondo quanto richiesto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

7.1.2.1 Risposta sismica locale zona mare (RSL1)

In figura 16 si riporta il rapporto tra lo spettro atteso al bedrock e quello atteso in superficie, in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro mediana. Si osserva una prima amplificazione a frequenza di 0.3 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale e a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

In Figura 17 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di figura 14 e lo spettro mediano. Risulta evidente di come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso

lo spettro mediano risulta caratterizzato da un'altra deviazione standard, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati in input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento DAL 112/2007).

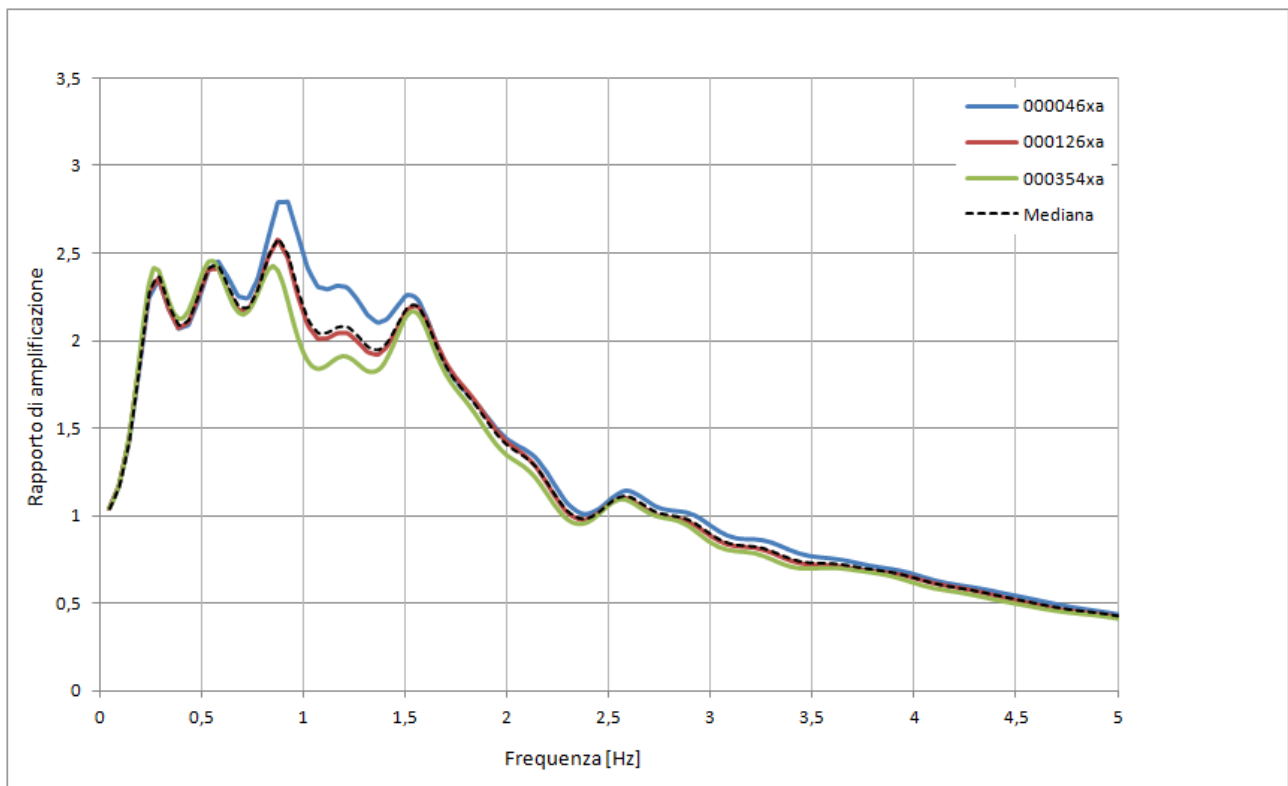


Figura 16. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 14 e per la mediana. L'armonica fondamentale è a frequenza di 0.3 Hz.

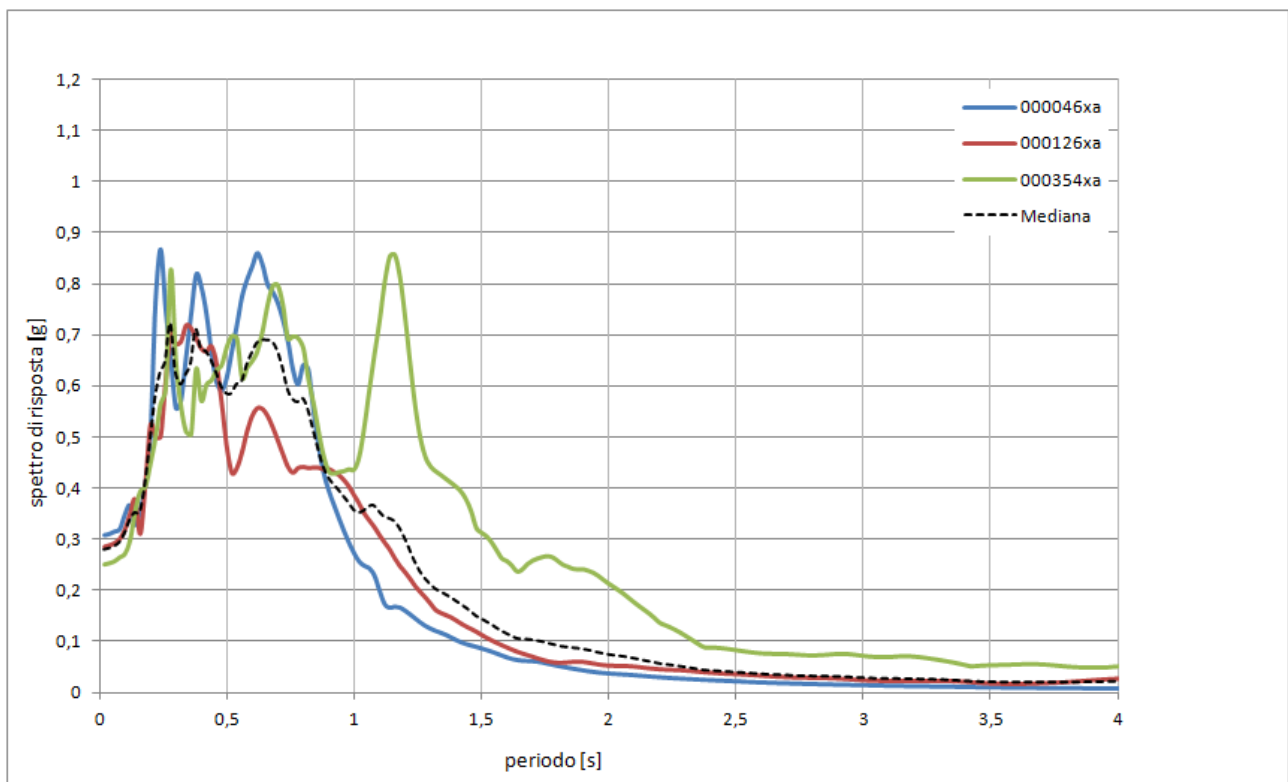


Figura 17. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi e il loro spettro mediano.

In figura 18 è riportato l'andamento, nei primi 20 metri al di sotto del piano campagna, dell'accelerazione massima (PGA) attesa in funzione della profondità per i tre terremoti di input e la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra 5 metri e la superficie.

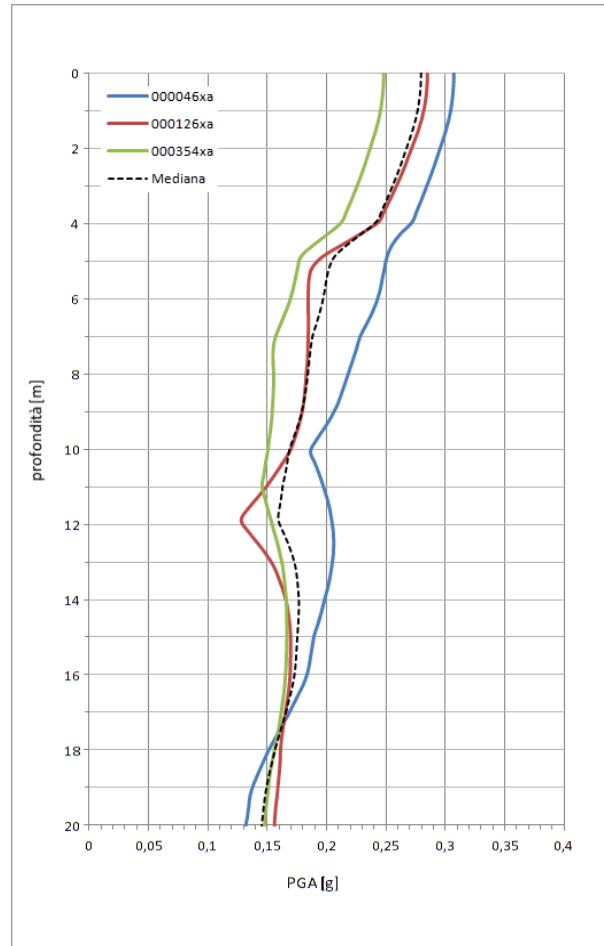


Figura 18. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

7.1.2.2 Risposta sismica locale zona capoluogo (RSL2)

In figura 19 si riporta il rapporto tra lo spettro atteso al bedrock e quello atteso in superficie, in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro mediana. Si osserva una prima amplificazione a frequenza di 0.38 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale e poi, più marcatamente, a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

In Figura 20 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di figura 14 e lo spettro mediano. Risulta evidente di come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso lo spettro mediano risulta caratterizzato da un'altra deviazione standard, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati in input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento DAL 112/2007).

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

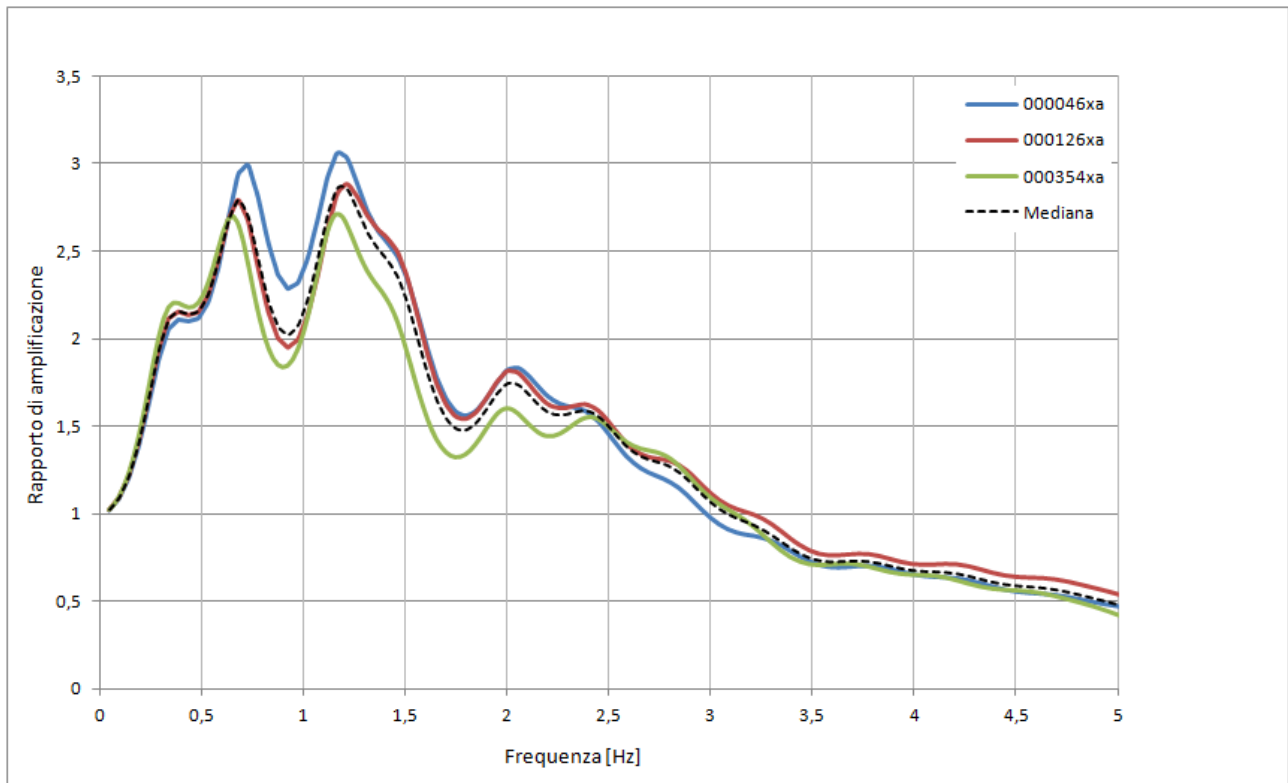


Figura 19. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 14 e per la mediana. L'armonica fondamentale è a frequenza di 0.38 Hz.

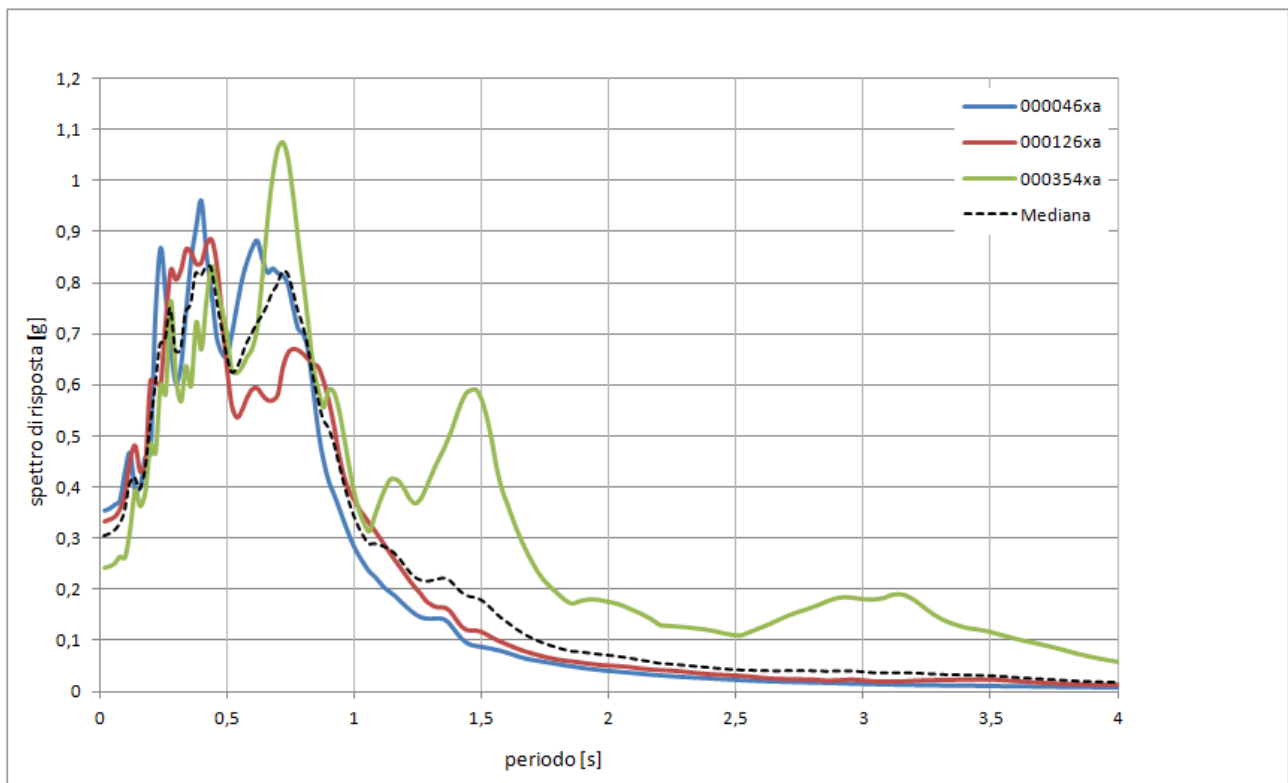


Figura 20. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi e il loro spettro mediano.

In figura 21 è riportato l'andamento, nei primi 20 metri al di sotto del piano campagna, dell'accelerazione massima (PGA) attesa in funzione della profondità per i tre terremoti di input e la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra 5/6 metri e la superficie.

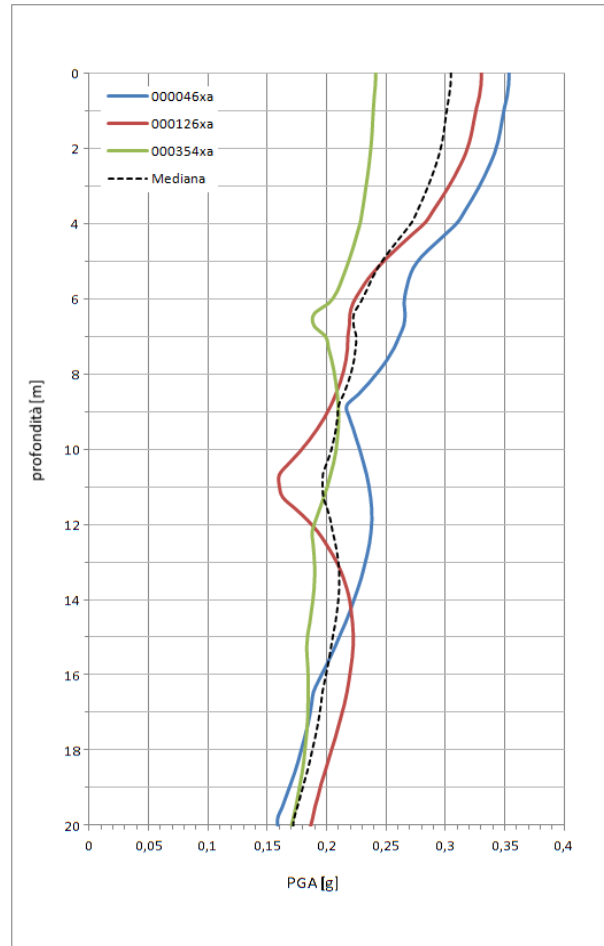


Figura 21. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

7.2 Identificazione delle aree instabili potenzialmente soggette a liquefazione

I numerosi dati geognostici raccolti sono stati singolarmente valutati rispetto alle possibili criticità legate alla natura dei terreni attraversati. La principale di queste criticità è senza dubbio la presenza, in corrispondenza di diverse verticali, di orizzonti più o meno spessi di depositi granulari saturi potenzialmente liquefacibili.

La carta MOPS (tavole 4), riporta, per l'intero territorio dei comuni, l'estensione delle aree instabili in ragione della presenza di depositi potenzialmente liquefacibili (codice 3050), descritte in dattaglio nel paragrafo 6.3. È opportuno ribadire che tali perimetrazioni risultano maggiormente attendibili per le aree di interesse della microzonazione sismica di dettaglio ed in particolare per le aree urbanizzate, per cui si dispone di un numero elevato di dati, quindi, in misura minore, per quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche, per cui sono disponibili comunque in genere sufficienti dati geognostici. Al di fuori di tali "ambiti di studio" (delimitati in azzurro nelle tavole) la stessa perimetrazione può invece fornire solo un'indicazione di massima. In ogni caso va evidenziato come nell'ampia porzione di territorio dell'Unione ascrivibile all'ambiente fluvio-lacustre (figura 5 e paragrafo 3.3) sia stata riscontrata una certa variabilità nella distribuzione dei depositi granulari saturi anche su verticali di indagine molto ravvicinate, per cui non è raro che a distanza di poche decine di metri si assista alla chiusura laterale di lenti sabbiose anche significative (paragrafo 6.3). Tale dato indica la necessità per un geologo professionista di accertare sempre puntualmente la stratigrafia e evidenza che risulta assai difficile estrapolare delle valutazioni puntuali sulla liquefacibilità dei depositi granulari saturi su un areale più o meno esteso.

7.3 Verifiche del potenziale di liquefazione

Le verifiche del potenziale di liquefazione, assai delicate e complesse da compiere alla scala territoriale, richiedono la stima del "fattore scatenante" (evento sismico atteso), dei "fattori predisponenti" (caratteristiche meccaniche dei sedimenti) e dei possibili "effetti" sulle strutture esistenti o di progetto (Crespellani et al., 1991; Pierucci et al., 1999). Le caratteristiche dell'evento sismico atteso sono la magnitudo e l'accelerazione a_g su suolo rigido di riferimento. I fattori predisponenti sono indicati nelle carte di microzonazione sismica di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3, in particolare il dato di FA_{PGA} per le diverse zone (paragrafo 7.1) e quello relativo alla presenza dei depositi granulari saturi (tavole 6).

Su tutte le verticali delle prove penetrometriche eseguite per il presente studio di microzonazione sismica (10 prove CPTU, 5 CPTU-S e 2 CPT) si è proceduto alla verifica del potenziale di liquefazione con metodi semplificati, indipendentemente dalla loro localizzazione e anche se non evidenziavano la presenza di livelli significativi di depositi granulari saturi. Lo stesso tipo di verifica è stato poi condotto su altre 69 prove penetrometriche di repertorio, scelte tra quelle disponibili sia perché collocate in aree in cui sono presenti livelli di depositi potenzialmente liquefacibili e sia perché idonee per tipologia e qualità del dato ad essere processate con i software di calcolo. Per la quasi totalità di queste prove si disponeva solo di rapporti di prova in formato raster PDF, da cui si sono ricavati i dati numerici (necessari per il processamento con il software di calcolo)

attraverso specifiche procedure di riconoscimento caratteri (qualora fossero presenti i dati numerici tabellari) o di vettorializzazione e digitalizzazione (qualora fossero presenti i soli grafici di andamento di Q_c e F_s in profondità). Sono stati quindi calcolati gli indici di liquefazione su un totale di 86 verticali distribuite nel territorio dei 3 comuni oggetto dello studio.

7.3.1 Stima della magnitudo attesa

Secondo quanto indicato al paragrafo 2.8 degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008), nelle verifiche di liquefazione, così come in quelle di stabilità dei versanti, si deve tener conto della magnitudo attesa. Nelle verifiche di liquefazione il valore di magnitudo determina:

- se sia possibile non effettuare la verifica (insieme ad altre condizioni);
- il valore del coefficiente MSF (Magnitude Scale Factor) che corregge il valore del rapporto fra CRR e CSR (fattore di sicurezza).

La ragione per la quale la magnitudo entra in gioco è che, tanto più è elevata, tanto maggiore è l'energia rilasciata e, quindi, la capacità di generare cicli di deformazione del terreno di numero ed ampiezza tali da produrre sovrappressioni neutre e fenomeni di liquefazione.

La magnitudo è quindi una grandezza molto importante per la definizione della pericolosità e quindi dell'azione sismica (Galli et al., 1999), ma la stima della magnitudo attesa al sito presenta caratteri di incertezza e imprevedibilità evidenziati anche negli studi di pericolosità.

Un metodo semplice e in favore di sicurezza che può essere utilizzato per stimare quale sia il valore di magnitudo da considerare ai fini delle valutazioni per il sito o la microzona di interesse, preferibilmente per le verifiche di liquefazione, viene indicato negli stessi ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008). Secondo tale metodo, per i siti che cadono in una delle 36 zone della la zonazione sismogenetica nazionale - ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), si assume come M il valore di $M_{w_{max}}$ della zona relativa.

Nel caso dell'Unione Rubicone e Mare, che ricade entro la Zona 917 "Rimini - Ancona", il valore di $M_{w_{max}}$ è pari a 6.14, valore che può essere quindi utilizzato per le verifiche di liquefazione con le procedure che nell'ingegneria geotecnica sismica vengono denominate "metodi semplificati".

Sulla base delle attuali conoscenze relative alle sorgenti sismogenetiche che interessano l'area di studio e riportate nel paragrafo 2.2, si ritiene che tale valore cautelativo di magnitudo (**$M_w=6.14$**) possa essere opportunamente adottato al fine di tenere conto del livello di incertezza proprio sulla magnitudo massima possibile per l'area di studio.

7.3.2 Calcolo dell'accelerazione al suolo

Per la determinazione del valore di accelerazione su suolo rigido di riferimento sono disponibili le mappe di pericolosità sismica realizzate per la Convenzione INGV-DPC 2004

- 2006 (progetto S1). Nell'ambito del progetto è stata calcolata una "pericolosità di base" fondata su un reticolo di punti di riferimento, costruito per l'intero territorio nazionale. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo, come definita dall'OPCM 3519/2006, corrispondente a quella che in ambito internazionale viene chiamata PGA) e dei principali "parametri spettrali" riferiti all'accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica (fattore di amplificazione massima f_0 e periodo di inizio del tratto a velocità costante T^*c). Il reticolo di riferimento ed i dati di pericolosità sismica vengono forniti dall'INGV e sono pubblicati nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/> (INGV, 2004).

In questo contesto nazionale la Regione Emilia-Romagna ha elaborato ed approvato (con la Delibera Regionale 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 L.R. n.20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio".

Gli Indirizzi sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle specifiche indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale. In questo senso, la delibera fornisce abachi e formule propedeutiche alla valutazione preliminare dell'amplificazione locale, dati che tengono conto delle caratteristiche sismiche riscontrate nel contesto regionale. Il documento fornisce anche i dati fondamentali per valutazioni più accurate della risposta sismica:

- lo spettro di risposta normalizzato per l'Emilia-Romagna (per $T_r = 475$ anni e smorzamento del 5%);
- i valori di a_{gref} di ogni comune ed i segnali di riferimento (accelerogrammi), già scalati per ogni singolo comune.

Per il comuni dell'Unione Rubicone e Mare il valore di a_{gref} varia da 0.186g (Gatteo e Savignano) a 0.185g (San Mauro Pascoli).

Per ottenere il valore di $a_{gmax s}$ (picco di accelerazione alla superficie dei depositi) su ogni sito analizzato, si deve moltiplicare a_{gref} per il valore di FA_{PGA} indicato per l'area in esame nella carta di microzonazione sismica di livello 2 con locali approfondimenti livello 3 (tavole 6).

Nel caso dei tre comuni dell'Unione Rubicone e Mare, per la zona costiera avremo un valore di $a_{gmax s}$ di **0.33g** ($0.185/0.186 \times 1.8$), mentre per quella di pianura alluvionale avremo un valore di $a_{gmax s}$ di **0.28g** ($0.185/0.186 \times 1.5$).

Tali valori sono stati quindi utilizzati in input per le verifiche a liquefazione con i metodi semplificati, operando una scelta dell' $a_{gmax s}$ di riferimento sulla base della localizzazione della singola verticale di indagine (zona di costa o di pianura alluvionale).

Si evidenzia come i valori di accelerazione ottenuti mediante le analisi di risposta sismica locale (paragrafo 7.1.2) permetterebbero, forse, di ottenere risultati più accurati nei calcoli del potenziale di liquefazione, fornendo tra l'altro la variazione del valore lungo la verticale. Il limite sta nel fatto che tale dato puntuale non può normalmente essere esteso su ampie aree, né si potrebbero confrontare dati ottenuti con procedure differenti (in parte

con a_g da abachi, in parte con a_g da RSL). Al contrario l'utilizzo dei fattori di amplificazione determinati attraverso gli abachi (paragrafo 7.1.1) permette di eseguire valutazioni con criteri omogenei e garantisce la confrontabilità dei dati ottenuti, che consente di individuare le aree o i punti a maggiore o minore pericolosità relativa.

7.3.3 Verifiche con i metodi semplificati

Come indicato nella DAL n. 112/2007, tra i metodi semplificati sono raccomandati quelli basati su prove CPT. Come noto, tali metodi, sono stati sviluppati sulla base di dati ottenuti attraverso indagini penetrometriche con punta elettrica. Recenti esperienze e raffronti diretti dimostrano come la loro applicazione a dati ottenuti da prove penetrometriche eseguite con punta meccanica portino a risultati a volte sensibilmente differenti e in genere ad una sottostima del valore di IL (Facciorusso et al., 2012b e Veronese, 2014). Per tale ragione, pur avendo eseguito il calcolo sulle verticali di entrambi i tipi di prove, i risultati sono stati tenuti sin da subito distinti, rappresentando nella cartografia finale (tavole 6, 7 e 8) gli indici ottenuti da prove penetrometriche con punta elettrica (23 tra CPTe e CPTU) con un simbolo e una label più grandi, proprio in quanto ritenuti maggiormente affidabili. Nella zona della costa i depositi potenzialmente liquefacibili si ritrovano entro i primi 7-8 metri di profondità, mentre più in generale in tutta l'area di studio, i depositi potenzialmente liquefacibili si rinvencono entro i primi 12 metri. Per questa ragione si è ritenuto possibile, valutandone caso per caso l'opportunità, eseguire il calcolo dell'indice di liquefazione anche su prove penetrometriche meccaniche spinte a profondità inferiore ai 15 metri, distinguendole comunque in carta con una diversa simbologia.

Per il presente studio sono state quindi eseguite le verifiche a liquefazione sulle 86 verticali selezionate (paragrafo 7.3) , utilizzando il programma di calcolo "Cliq 1.7" della Geologismiki Geotechnical Software, sviluppato in collaborazione col Prof. Peter Robertson. L'algoritmo di calcolo utilizzato si basa sul metodo di Robertson e Wride (1998), quello utilizzato in letteratura per questo tipo di verifiche nell'area di studio e più in generale lungo la costa romagnola (Pierucci et al., 1999; Cipriani et al., 2000; Crespellani et al., 2000; Crespellani et al., 2003; Facciorusso e Vannucchi 2009; Facciorusso et al., 2012a).

I parametri di input scelti per definire l'evento sismico atteso sono:

- **Mw = 6.14** (come definito nel paragrafo 7.3.1)
- **a_g = 0.28g o 0.33g** a seconda del valore di F_{APGA} (come definito nel paragrafo 7.3.2). In tabella 14 è indicato il valore utilizzato per ciascuna verticale.

Come livello della falda, parametro che condiziona sensibilmente i risultati di questo tipo di verifiche, è stato cautelativamente assunto un valore prossimo a quello che i dati disponibili indicano come massimo per le due diverse aree: 0,5 m per la zona costiera e 1 m per la pianura alluvionale.

Al termine della procedura, per ogni verticale è stato valutato l'indice del potenziale di liquefazione IL (Iwasaki et al., 1982), riportato nelle tabelle 14a e 14b. I valori ottenuti sono stati associati a classi, secondo Sonmez (2003), distinguendo tra siti a rischio di liquefazione basso ($0 < IL \leq 2$), medio ($2 < IL \leq 5$), elevato ($5 < IL \leq 15$) e molto elevato ($IL > 15$).

Si precisa che la carta di microzonazione sismica di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 (tavole 6, 7 e 8), caratterizza con l'indicazione areale dell'indice del potenziale di liquefazione (IL), tutte le aree individuate come "Zone di attenzione per liquefazione" nella carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavole 4). La suddivisione prevista coincide solo in parte con quella di Sonmez (2003), poiché unisce le ultime due classi in una unica con $IL > 5$.

Codice prova	Codice DB DPC	Tipo	Comune	Ag	IL	Lon wgs84	Lat wgs84
CPT1	040041P60001CPT70001	CPT	San Mauro Pascoli	0.28	0	12.4186	44.1077
CPT2	040045P64004CPT70006	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.01	12.4156	44.083
CPTU1	040045P64500CPTU70504	CPTU	Savignano sul Rubicone	0.33	16.15	12.4426	44.167
CPTU2	040016P60180CPTU64249	CPTU	Gatteo	0.33	9.03	12.4323	44.1682
CPTU3	040041P60214CPTU70217	CPTU	San Mauro Pascoli	0.33	8.46	12.4406	44.1617
CPTU4	040016P60181CPTU64250	CPTU	Gatteo	0.28	0	12.4251	44.1609
CPTU5	040045P64501CPTU70505	CPTU	Savignano sul Rubicone	0.28	0.06	12.4215	44.1548
CPTU6	040016P60182CPTU64251	CPTU	Gatteo	0.28	1.62	12.3868	44.1038
CPTU7	040045P64502CPTU70506	CPTU	Savignano sul Rubicone	0.28	10.5	12.3972	44.0962
CPTU8	040045P64503CPTU70507	CPTU	Savignano sul Rubicone	0.28	0.17	12.3719	44.0914
CPTU9	040016P60183CPTU64252	CPTU	Gatteo	0.28	0.03	12.3981	44.1205
CPTU10	040041P60215CPTU70218	CPTU	San Mauro Pascoli	0.28	0.43	12.42	44.1043
CPTUS1	040016P60002SCPT64071	CPTUS	Gatteo	0.33	30.27	12.4373	44.1706
CPTUS2	040041P60015SCPT70018	CPTUS	San Mauro Pascoli	0.33	17.27	12.4454	44.1637
CPTUS3	040045P64001SCPT70001	CPTUS	Savignano sul Rubicone	0.33	8.12	12.4368	44.1643
CPTUS4	040045P64002SCPT70003	CPTUS	Savignano sul Rubicone	0.28	3.13	12.4071	44.1026
CPTUS5	040045P64003SCPT70005	CPTUS	Savignano sul Rubicone	0.28	0.42	12.3991	44.0917

Tabella 14a. Valutazione dell'indice del potenziale di liquefazione per ciascuna delle 17 verticali di indagine di nuova esecuzione. Il "Codice prova" indica la codifica riportata nei rapporti di prova presenti nell'allegato 2, mentre il "Codice DB DPC" indica il codice con cui l'indagine è stata archiviata in banca dati.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

Codice DB DPC	Tipo	Comune	Ag	IL	Lon wgs84	Lat wgs84
040045P47925CPT47880	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.8	12.4	44.1187
040016P42376CPT47879	CPT	Gatteo	0.28	0.62	12.3767	44.1297
040045P32255CPTU47623	CPTU	Savignano sul Rubicone	0.28	1.18	12.4251	44.1576
040016P60042CPT64111	CPT	Gatteo	0.33	11.83	12.4308	44.1701
040045P64057CPT70061	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	0.75	12.4406	44.1642
040045P64056CPT70060	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	5.3	12.441	44.1638
040045P64055CPT70059	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	1.74	12.4405	44.1638
040041P60042CPT70045	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	7.09	12.4421	44.1606
040041P60028CPT70031	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	8.63	12.4494	44.1627
040041P60128CPT70131	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	0.92	12.4386	44.1611
040041P60142CPT70145	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	8.64	12.4437	44.164
040041P60176CPT70179	CPT	San Mauro Pascoli	0.28	0.63	12.4153	44.1086
040041P60180CPT70183	CPT	San Mauro Pascoli	0.28	0.73	12.4302	44.1105
040041P60188CPT70191	CPT	San Mauro Pascoli	0.28	0.13	12.4196	44.1045
040016P60024CPT64093	CPT	Gatteo	0.33	8.55	12.4381	44.1724
040016P60051CPT64120	CPT	Gatteo	0.28	0.41	12.3881	44.1109
040016P60067CPT64136	CPT	Gatteo	0.33	7.46	12.4372	44.173
040016P60099CPT64168	CPT	Gatteo	0.33	3.26	12.4367	44.1689
040016P60160CPT64229	CPT	Gatteo	0.28	0.35	12.3874	44.1036
040045P64044CPT70048	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	11.87	12.4448	44.1669
040045P64046CPT70050	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	16.3	12.4418	44.1657
040045P64047CPT70051	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	16.6	12.4433	44.1657
040045P64051CPT70055	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	0.65	12.439	44.162
040045P64085CPT70089	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	1.54	12.438	44.1621
040045P64152CPT70156	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.07	12.4089	44.0983
040045P64156CPT70160	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.32	12.4022	44.0988
040045P64187CPT70191	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	1.17	12.3822	44.0871
040045P64192CPT70196	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	2.47	12.3908	44.0874
040045P64204CPT70208	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.5	12.3753	44.0883
040045P64206CPT70210	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.24	12.3873	44.0941
040045P64213CPT70217	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	1.11	12.3754	44.0942
040045P64214CPT70218	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.58	12.3745	44.093
040045P64233CPT70237	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.17	12.4069	44.0881
040045P64280CPT70284	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	1.29	12.3957	44.0826
040045P64311CPT70315	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.36	12.3977	44.0937
040045P64333CPT70337	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.92	12.4021	44.0957
040045P64375CPT70379	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.63	12.4006	44.1235
040045P64389CPT70393	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.54	12.4045	44.0927
040045P64430CPT70434	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	0.2	12.4389	44.1644
040045P64434CPT70438	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	0.88	12.4363	44.1622
040045P64470CPT70474	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.22	12.3785	44.0934
040045P64490CPT70494	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.86	12.398	44.0943
040045P64505CPT70509	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	1.38	12.41	44.0897
040045P64506CPT70510	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	1.32	12.4106	44.09
040041P60216CPT70219	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	2.51	12.4395	44.1601
040045P51710CPT47426	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	1.39	12.4354	44.1626
040041P60028CPT70031	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	0.19	12.4423	44.1617
040041P5305CPT47423	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	1.06	12.4392	44.1595
040041P47018CPT47406	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	12.21	12.4484	44.1616
040016P60025CPT64094	CPT	Gatteo	0.33	0.25	12.4313	44.1667
040045P64054CPT70058	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	1.35	12.4366	44.1635
040045P64042CPT70046	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	10.4	12.4436	44.1676
040041P60145CPT70148	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	1.5	12.4434	44.1632
040016P26669CPT47436	CPT	Gatteo	0.33	13.7	12.4409	44.1693
040016P10803CPT47742	CPT	Gatteo	0.28	3.72	12.3847	44.1345
040016P39641CPT47432	CPT	Gatteo	0.33	19.58	12.4406	44.1671
040016P43283CPT47437	CPT	Gatteo	0.33	12.08	12.4379	44.1677
040045P64507CPT70511	CPT	Savignano sul Rubicone	0.33	16.25	12.4392	44.1663
040016P60175CPT64244	CPT	Gatteo	0.33	0.21	12.4306	44.1689
040016P60177CPT64246	CPT	Gatteo	0.33	1.03	12.4305	44.1686
040045P64160CPT70164	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	2.57	12.3972	44.0952
040045P64384CPT70388	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0.77	12.3786	44.084
040045P64461CPT70465	CPT	Savignano sul Rubicone	0.28	0	12.3826	44.0909
040016P60173CPT64242	CPT	Gatteo	0.33	0.28	12.4318	44.1683
040041P60143CPT70146	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	5.7	12.4433	44.1638
040041P60144CPT70147	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	7.33	12.443	44.1637
040041P60146CPT70149	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	8.81	12.4439	44.1635
040041P60035CPT70038	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	2.83	12.4405	44.1611
040041P60036CPT70039	CPT	San Mauro Pascoli	0.33	2.48	12.4404	44.161

Tabella 14b. Valutazione dell'indice del potenziale di liquefazione per ciascuna delle 69 verticali di indagine pregresse selezionate per il calcolo. Nella prima colonna è indicato il codice della prova archiviata nella banca dati.

7.3.4 Valutazione locale del potenziale di liquefazione da prove di laboratorio

Come indicato nel paragrafo 4.4, per il presente studio si sono potuti acquisire i risultati delle prove triassiali cicliche a liquefazione, consolidate isotropicamente non drenate (allegato 5), eseguite su 7 provini (uno indisturbato e 6 ricostruiti) di due campioni di sabbie debolmente limose, prelevati rispettivamente a profondità di 3-3.6 m e 6.5-7.1 m da un sondaggio eseguito in località Gatteo a Mare in prossimità della foce del fiume Rubicone denominato 256-S10 "foce Rubicone" e archiviato in banca dati con il codice 040016P54455S47543 (figura 22).

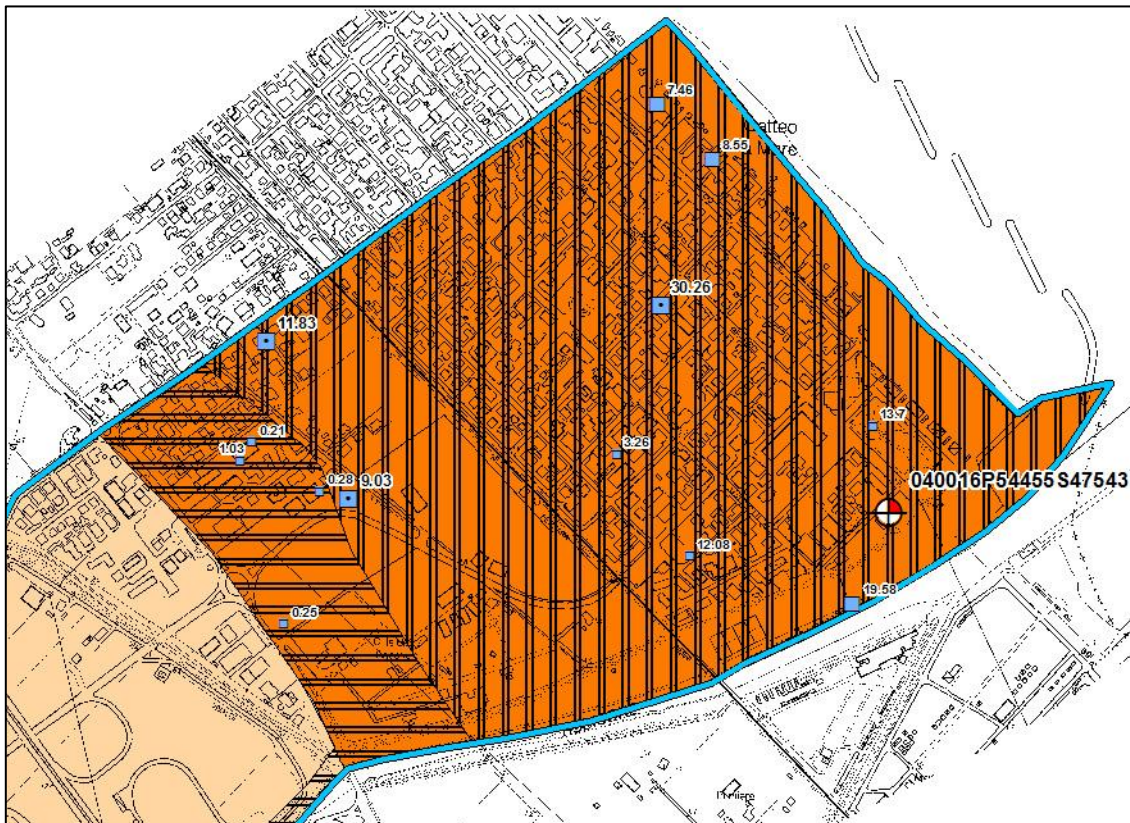


Figura 22. Ubicazione del sondaggio (cerchio bianco e rosso) eseguito alla foce del Rubicone in comune di Gatteo, da cui sono stati prelevati i campioni sottoposti a prove di laboratorio (allegato 5), sulla base della tavola 6a - F_{PGA} alla scala 1:10.000, a cui si rimanda per la legenda.

Tali prove hanno permesso di ricavare la curva di resistenza a liquefazione dei singoli campioni e quindi procedere ad una valutazione locale del potenziale di liquefazione per confrontarli con quelli ottenuti dalle indagini in sito. La metodologia seguita è sostanzialmente la stessa descritta in Pierucci et al., 1999, di cui di seguito si riporta in sintesi la descrizione, rispetto alla quale variano gli input dell'azione sismica ed in particolare si ha un aumento dell'accelerazione a_g (o a_{max}) che nel precedente studio era assunta pari a 0,275g e che nel nostro caso invece è assunta pari 0.33g (paragrafo 7.1).

Il rapporto di sforzo ciclico di taglio CSR (azione sismica) viene calcolato con il metodo semplificato in base alla sola accelerazione superficiale orizzontale massima:

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma_{v0}'} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \cdot r_d$$

τ_{cyc} è lo sforzo di taglio ciclico indotto dal terremoto, σ_{v0} è la tensione verticale, σ_{v0}' la tensione verticale iniziale, rispetto a cui si esegue la normalizzazione, e r_d un coefficiente di riduzione delle tensioni funzione della profondità.

Per il campione 1, estratto ad una profondità media di 3.30 metri, si ottiene un CSR pari a 0.319; per il campione 2, con la profondità di riferimento di 6.80 metri, si ottiene un CSR pari a 0.352.

Con una magnitudo pari a 6.14, dalla curva di corrispondenza tra magnitudo del terremoto e numero di cicli equivalenti di sforzo uniforme, si ricava un numero di cicli pari a 6 che corrisponde a un valore SR_m (stress-ratio applicato) di 0.186 per il primo campione e di 0.164 per il secondo (figura 1 dell'allegato 5).

Ora,

$$SR_m \cong SR = \frac{\Delta\sigma_m'}{2 \cdot p'} \cong \frac{\Delta\sigma_m'}{2 \cdot \sigma_a'} = CRR_{tx}$$

con CRR_{tx} che rappresenta il rapporto di resistenza ciclica a liquefazione risultante dalla prova triassiale; siccome poi il valore del CRR ricavato da prove di laboratorio va ridotto del 10% per l'analisi in campo libero

$$CRR_{(ff)} = 0.9 \cdot CRR_{(ss)} = 0.9 \cdot c_r \cdot CRR_{(tx)}$$

con un coefficiente $c_r = 1$ per $K = 1$ si ottiene $CRR_{(ff)} = 0.167$ per il primo campione, $CRR_{(ff)} = 0.148$ per il secondo.

è quindi possibile calcolare il fattore di sicurezza in campo libero

$$FSL = \frac{CRR}{CSR}$$

FSL risulta pari a 0.52 per il campione 1 e a 0.42 per il campione 2, quindi ben al di sotto della soglia di sicurezza in ambedue i casi.

Tali valori sono confrontabili con quelli ottenuti coi metodi semplificati sulle verticali delle più vicine prove penetrometriche alle stesse profondità. Rispetto alle più vicine prove meccaniche, il fattore di sicurezza ottenuto dalle prove di laboratorio risulta di circa il 20% inferiore, mentre risulta analogo a quello ricavato dalla prova penetrometrica con piezocono e cono sismico CPTUS1 (allegato 4) eseguita, sempre in comune di Gatteo, a circa 400 metri in direzione NO, alla stessa distanza dalla costa.

7.3.5 Considerazioni conclusive sulle stime del potenziale di liquefazione

La valutazione degli indici sulle 86 verticali riportate in tabella 13 ha permesso di suddividere le zone in cui sono presenti depositi liquefacibili in aree a rischio basso medio ed elevato (tavole 6, 7 e 8). Tali determinazioni numeriche, e la loro estensione ed estrapolazione con relativa perimetrazione in aree prive di valutazioni puntuali di IL, sono state possibili grazie alla disponibilità di numerosi dati stratigrafici di natura diversa che hanno permesso di integrare e interpolare, con giudizio esperto.

Il maggior numero di dati disponibili lungo il litorale si riflette senza dubbio in una maggiore attendibilità delle perimetrazioni delle aree a diverso rischio per la zona costiera rispetto a quelle per le zone della piana alluvionale.

Le verifiche eseguite per il presente studio hanno innanzitutto confermato l'elevato rischio liquefazione lungo la fascia costiera, per cui erano inizialmente previsti gli approfondimenti di livello 3, dove le numerose indagini disponibili permettono di identificare e perimetrare in dettaglio un'ampia area caratterizzata da indici alti ($5 < IL \leq 15$) e molto alti ($IL > 15$). La valutazione locale del potenziale di liquefazione da prove di laboratorio (paragrafo 7.3.4) su una verticale di indagine prossima alla foce del fiume Rubicone, ha confermato l'elevato rischio associato a tali depositi costieri. Spostandosi dalla costa in direzione della Strada Statale Adriatica si assiste ad un generale abbassamento dei valori di IL, che diventano bassi ($0 < IL \leq 2$) quando si riducono gli spessori di sabbie proprio in prossimità della statale, che come detto può essere assunta come limite tra la zona di cordone litorale e quella di piana alluvionale in cui predominano le argille.

Le stime puntuali degli indici di liquefazione hanno inoltre permesso di valutare come basso ($0 < IL \leq 2$), ma non nullo, il potenziale di liquefazione dei depositi di conoide alluvionale del fiume Rubicone, permettendo di individuare alcune aree caratterizzate da indici più elevati (anche $IL > 5$) in prossimità del corso attuale del fiume all'altezza dell'abitato di Savignano. Sono inoltre state valutate, con indici generalmente bassi ($0 < IL \leq 2$), alcune altre aree dei comuni di Gatteo e San Mauro Pascoli che sono caratterizzate dalla presenza di orizzonti in genere limitati, ma piuttosto superficiali, di depositi limo-sabbiosi saturi.

7.3.6 Confronto con studi pregressi sul potenziale di liquefazione

Rispetto ai precedenti studi, per lo più accademici, che hanno eseguito stime del potenziale di liquefazione nell'area dell'Unione Rubicone e Mare (Pierucci et al., 1999; Crespellani et al., 2000) o più in generale lungo la costa romagnola (Cipriani et al., 2000; Crespellani et al., 2003; Facciorusso e Vannucchi 2009; Facciorusso et al., 2012a), si evidenzia come col presente lavoro si siano ottenuti valori degli indici di liquefazione

mediamente superiori e di conseguenza siano state mappate aree più estese con classi di rischio maggiori. Gli studi precedenti, che comunque hanno prodotto in genere sintesi cartografiche di minor dettaglio, se si considera ad esempio la fascia costiera, hanno distinto un'area a rischio elevato solo in prossimità della foce del fiume Rubicone, mentre nell'entroterra, disponendo di un numero di dati insufficiente, non hanno identificato, o comunque non perimetrato in dettaglio, le aree a diverso rischio individuate dal presente studio di microzonazione.

Poiché il metodo scelto per le verifiche è sostanzialmente lo stesso (Robertson e Wride, 1998), la ragione principale delle differenze sopra descritte risiede nel fatto che, per i precedenti studi, i parametri di input scelti per definire l'evento sismico atteso sono in tutti i casi inferiori: ad esempio, per la zona costiera, quasi tutti adottano valori di a_g inferiori a 0,3g e tutti adottano valori di magnitudo pari a 6 o inferiori (cfr. paragrafo 7.3.3).

Per il presente studio di microzonazione sono state inoltre consultate quasi 300 relazioni geologiche eseguite dai primi anni 2000 ad oggi (in maniera sistematica dal 2009) presenti negli archivi comunali. Dalla loro analisi è emerso che nelle verifiche a liquefazione, quando eseguite, sono stati quasi sempre utilizzati valori di magnitudo e di accelerazione assai meno cautelativi di quelli suggeriti dalle procedure indicate negli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) e adottati per le verifiche del presente studio, con il risultato di una generale sottostima del rischio rispetto a quanto determinato in questo lavoro, specialmente nelle zone di pianura alluvionale.

8. ELABORATI CARTOGRAFICI

Le 24 tavole cartografiche, 8 per comune (tabella 1) sono state realizzate secondo le specifiche indicate, per il primo e il terzo livello di approfondimento, nell'allegato D della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013) e risultano conformi alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

L'estensione e la forma dei territori facenti parte di ciascuno dei 3 comuni dell'Unione Rubicone e Mare hanno consentito di rappresentarli per intero alla scala 1:10.000 entro la dimensione massima di una singola tavola (A0) prevista dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), ricorrendo, nel caso di Savignano sul Rubicone e San Mauro Pascoli, alla realizzazione di due riquadri cartografici per ogni singola tavola. Eccetto la carta di microzonazione sismica di secondo livello con locali approfondimenti di terzo livello (tavole 6, 7 e 8), tutte le cartografie (tavole 1, 2, 3, 4 e 5) sono state realizzate per l'intero territorio dei comuni, senza limitarsi agli ambiti di studio. Questa scelta permette una visione di insieme dei dati rappresentati per l'intero territorio, che risulta di grande importanza anche per una migliore comprensione delle criticità presenti entro gli ambiti di studio. Va comunque tenuto sempre presente che quanto individuato al di fuori degli ambiti di studio, in ragione del minor numero di dati disponibili, è comunque affetto da una incertezza maggiore.

Per tutte le 24 carte realizzate, la base cartografica è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000.

8.1. Carta delle indagini (tavole 1)

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 dei tre comuni, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio (in tutto 1324), comprendendo sia quelle di nuova realizzazione (102), sia quelle di repertorio (1222) (capitolo 4).

Tutte le indagini sono distinte con le simbologie definite negli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013). Per le sole indagini di nuova realizzazione sono indicati i codici univoci che le identificano, attraverso i quali è possibile risalire ai rapporti di prova riportati negli allegati 2 e 4).

Per maggiori dettagli sulle indagini riportate in carta, relativi alla provenienza, alla tipologia e alla qualità dei dati, si rimanda al capitolo 4.

8.2. Carta geologico-tecnica (tavole 2)

La carta geologico tecnica, è un elaborato differente da una classica carta geologica o litologica, in quanto è finalizzata alla definizione del modello di sottosuolo utile per uno studio di microzonazione sismica. Si tratta quindi sostanzialmente di una carta della litologia superficiale, che considera indicativamente i primi 5 metri dal piano di campagna, ma che comunque valuta con attenzione, attribuendogli un peso maggiore, l'eventuale

presenza di orizzonti di sabbie e/o limi estesi con una certa continuità, che possano essere potenzialmente soggetti al fenomeno della liquefazione in occasione di un sisma.

Nei paragrafi seguenti vengono descritti i principali elementi rappresentati nella carta geologico-tecnica, oltre ai quali sono presenti due piccole aree caratterizzate da "Instabilità di versante", tematizzate per tipologia, così come previsto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

Per descrivere la carta geologico tecnica è opportuno partire dalle "forme di superficie e sepolte" presenti nell'area di studio, poiché la definizione dell'area di "conoide alluvionale" viene ripresa nella descrizione relativa ai "terreni di copertura".

8.2.1 Forme di superficie e sepolte

Tra le numerose forme di superficie e sepolte elencate nelle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), solo nel territorio del comune di Savignano sul Rubicone se ne individua una di tipo areale (conoide alluvionale), mentre negli altri due comuni (Gatteo e San Mauro Pascoli) non ve ne sono:

Conoide alluvionale: Identifica l'area che si sviluppa pressoché totalmente nel ristretto lembo di territorio delimitato fra lo stesso crinale di Castelvecchio e quello di Montilgallo ed è caratterizzata dalla presenza dei depositi sabbiosi e limosi di conoide alluvionale del fiume Rubicone, individuati grazie ai numerosi dati stratigrafici disponibili. Per la descrizione dettagliata dei criteri utilizzati per l'identificazione di tale area si rimanda al paragrafo 6.3.

Asse di paleoalveo: Lo studio ha permesso di individuare con ragionevole sicurezza la presenza di due paleoalvei sepolti: un primo, già presente nella carta geologica regionale, lungo il confine tra il comune di Gatteo e quello di Cesenatico, all'altezza della frazione di Casine di San martino a nord del capoluogo (tavola 2a) e un secondo, il cui andamento è ben descritto nella relazione geologica del PRG del comune di Savignano (Fabbri, 2000) che è attribuibile a un asse fluviale abbandonato del fiume Rubicone che attraversa la frazione di San Giovanni in Compito, all'altezza della zona di conoide alluvionale (tavola 2b).

8.2.2 Terreni di copertura

Relativamente alle unità geologico-litotecniche previste dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013) per la carta geologico-tecnica, nel territorio dell'Unione Rubicone e Mare sono presenti i soli "terreni di copertura", mentre non si rinvenivano unità affioranti ascrivibili a "substrato geologico rigido o non rigido". Secondo i criteri dettagliati al capitolo 5 per la definizione del modello geologico dell'area, sono state distinte, all'interno dei "terreni di copertura", 12 differenti unità, prodotte dalla combinazione della litologia (sigla in maiuscolo e colore in carta) e dell'ambiente genetico-deposizionale (sigla in minuscolo) così come previsto dalla figura 1.1.2-1 e dalla tabella 1.1.2-1 degli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013):

GCes: *Ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose prevalenti*

Ambiente genetico-deposizionale: argine e canale fluviale

Rientrano in questa classe alcune aree a ridosso del corso del torrente Uso, in cui la carta geologica regionale evidenzia la presenza di depositi grossolani già nei primi metri di profondità.

SWsp: Sabbie ben assortite

Ambiente genetico-deposizionale: spiaggia (costiero)

Rientra in questa classe una stretta fascia lungo la costa, corrispondente grossomodo all'attuale spiaggia, in cui nei primi metri sono presenti sabbie ben assortite di spiaggia da sciolte (in superficie) a poco addensate.

SWcl: Sabbie ben assortite

Ambiente genetico-deposizionale: cordone litorale (costiero)

Rientrano in questa classe le aree costiere tra la spiaggia e la piana alluvionale, in cui sono presenti sabbie ben assortite e poco addensate di cordone litorale, con spessori che tendono a diminuire in direzione SO, fino a ridursi a soli 3 metri, seguite da prevalenti argille.

SPes: Sabbie poco assortite con livelli limo-sabbiosi e limo-argillosi

Ambiente genetico-deposizionale: argine e canale fluviale (fluvio-lacustre/costiero)

Rientra in questa classe la porzione della zona costiera più prossima al corso del fiume Rubicone, in cui sono presenti prevalenti sabbie poco addensate, meno assortite di quelle di spiaggia e cordone litorale, con intercalazioni limo-sabbiose e limo-argillose, con spessori che tendono a diminuire in direzione SO, seguite da prevalenti argille.

SMca: Sabbie limose e limi sabbiosi con intercalazioni limo-argillose

Ambiente genetico-deposizionale: conoide alluvionale (fluvio-lacustre)

Rientra in questa classe l'area della conoide alluvionale del fiume Rubicone caratterizzata dalla prevalenza, nei primi metri, di spessori variabili di sabbie limose e limi sabbiosi poco addensati con intercalazioni limo-argillose.

SMes: Sabbie limose e limi sabbiosi

Ambiente genetico-deposizionale: argine e canale fluviale (fluvio-lacustre)

Rientrano in questa classe le fasce lungo il torrente Uso e il fiume Rubicone, in corrispondenza della zona di conoide alluvionale, caratterizzate dalla presenza nei primi metri di sabbie limose e limi sabbiosi di argine e canale fluviale ad addensamento in genere basso.

MLes: Limi sabbiosi e sabbie fini prevalenti in superficie, che passano a limi argillosi e argille in profondità

Ambiente genetico-deposizionale: argine e canale fluviale (fluvio-lacustre)

Rientrano in questa classe le fasce lungo il fiume Rubicone ed altri corsi minori, caratterizzate dalla presenza nei primissimi metri di limi sabbiosi e sabbie fini, che passano a limi argillosi e argille in profondità. I livelli coesivi presentano consistenza media, quelli granulari addensamento da basso a medio.

MLpi: Limi argillosi e argille limose prevalenti con locali livelli di limi sabbiosi e sabbie fini

Ambiente genetico-deposizionale: piana inondabile (fluvio-lacustre)

Rientra in questa classe un'ampia area di pianura posta tra il limite settentrionale dei capoluoghi e il limite della conoide del fiume Rubicone (a ovest) e il margine collinare (a est), in cui sono presenti limi argillosi e argille limose a consistenza media con locali livelli di limi sabbiosi e sabbie fini (ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose nella zona sud-est, prossima al torrente Uso, del comune di San Mauro Pascoli). Passando da SO verso NE si assiste alla progressiva diminuzione della granulometria media dei depositi con l'aumento della frazione argillosa.

MHec: Limi sabbiosi e argillosi e argille limose - eluvi/colluvi

Ambiente genetico-deposizionale: eluvi/colluvi (versante)

Rientra in questa classe la maggior parte delle aree collinari a sud di Savignano sul Rubicone dove si rinvencono depositi di versante di natura variabile (limo-sabbiosi, limo-argillosi e

argilloso-limosi) e di spessore minimo di 3 metri, che poggiano su un substrato molto alterato costituito dalle Arenarie e Argille di Savignano (a nord, nella zona di Castelvecchio) e dalla Formazione delle Argille Azzurre (a sud)

MHtf: *Limi sabbiosi e argillosi*

Ambiente genetico-deposizionale: terrazzo fluviale (fluvio-lacustre)

Rientrano in questa classe alcune aree collinari a sud di Savignano sul Rubicone dove si rinvencono depositi limo-sabbiosi e limo-argillosi terrazzati, con spessori in genere superiori ai 5 metri, che poggiano su un substrato molto alterato costituito dalle Arenarie e Argille di Savignano (a nord, nella zona di Castelvecchio) e dalla Formazione delle Argille Azzurre (a sud).

CLpi: *Argille limose e limi argillosi di media-bassa plasticità*

Ambiente genetico-deposizionale: piana inondabile (fluvio-lacustre)

Rientra in questa classe un'ampia area di pianura posta a nord del limite settentrionale dei capoluoghi, in cui sono presenti argille limose e limi argillosi di media-bassa plasticità. Passando da SO verso NE si assiste alla progressiva diminuzione della granulometria media dei depositi con l'aumento della frazione argillosa.

OHpi: *Argille e limi argillosi organici di media-alta plasticità*

Ambiente genetico-deposizionale: piana inondabile (fluvio-lacustre)

Rientra in questa classe l'area di piana inondabile posta immediatamente a SO della fascia costiera (cordone litorale), caratterizzata dalla presenza di argille e limi argillosi organici plastici, poco consistenti, con zone anche ampie in cui si rinvencono a profondità diverse livelli torbosi significativi in corrispondenza di zone un tempo paludose.

I colori utilizzati per i diversi terreni di copertura rappresentati sono quelli indicati Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

8.2.3 Elementi geologici

Sono riportati in carta i sondaggi, sia quelli che non hanno raggiunto il substrato, sia quelli che lo hanno raggiunto, e le tracce delle sezioni geologiche allegate allo studio di microzonazione.

Sondaggi: Sono riportati in carta tutti i sondaggi, a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo, i pozzi per acqua e i pozzi per idrocarburi, raccolti e archiviati nella banca dati, compresi i 3 sondaggi di nuova realizzazione (paragrafo 4.3.2.1). I soli pozzi per idrocarburi (5 in tutto) hanno raggiunto il substrato rigido profondo delle zone di pianura e costiera (paragrafo 6.2) e sono rappresentati in verde, con l'indicazione della profondità del substrato. I restanti sondaggi sono rappresentati in rosso, con l'indicazione della profondità raggiunta.

Tracce di sezione geologica: Vengono riportate le tracce delle 9 sezioni geologiche riportate nell'allegato 1 alla presente relazione. L'orientamento delle sezioni, la cui traccia è riportata in carta, è sia trasversale (9, 23, 139, 140) che longitudinale (59, 141, 143, 144, 153) rispetto al margine appenninico e alla linea di costa. La sezione 9 è la sezione CARG allegata al foglio 256 (ISPRA et al., 2009) e caratterizza l'area in esame in profondità, fino a circa 2000 metri con una risoluzione alla scala della singola formazione ed è risultata di importanza fondamentale per la definizione del bedrock sismico delle aree costiera e di pianura alluvionale (paragrafo 6.2). Le restanti sezioni sono invece realizzate dal Servizio

Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e caratterizzano, con un discreto dettaglio litologico, le prime decine di metri di profondità, spingendosi a caratterizzare, via via con risoluzione inferiore, i primi 200-250 metri dal piano campagna. La ricostruzione litostratigrafica generale e l'estensione dei principali corpi sabbiosi (della costa, della conoide alluvionale del Rubicone e nell'intorno dei principali corsi d'acqua), appare coerente coi dati stratigrafici puntuali disponibili e con le suddivisioni areali realizzate per il presente studio.

Relativamente ad altri tematismi previsti dalle linee guida per la carta geologico tecnica, si specifica che non sono presenti elementi tettonico strutturali superficiali noti, ma solo dei sovrascorrimenti profondi indicati nella carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna in scala 1:250.000 (Boccaletti et al., 2004) di cui un estratto è riportato nell'inquadramento (capitolo 3), che non si è ritenuto utile, ai fini dello studio di microzonazione, riportare in carta.

8.3. Carta delle frequenze naturali dei terreni (tavole 3)

La carta delle frequenze naturali dei terreni, realizzata alla scala 1:10.000, riporta la suddivisione del territorio dei comuni in aree per classi di frequenza, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013): $f_0 \leq 1$ Hz, $1 < f_0 \leq 2$ Hz, $2 < f_0 \leq 8$ Hz, $f_0 > 8$ Hz. Mentre per i comuni di Gatteo (tavola 3a) e San Mauro Pascoli (tavola 3c) l'intero territorio è attribuito alla classe di frequenza " $f_0 < 1$ ", nel comune di Savignano sul Rubicone (tavola 3b) sono presenti, in corrispondenza della porzione più settentrionale del margine collinare (dorsale di Castelvecchio), anche un'area con classe di frequenza " $2\text{Hz} < f_0 \leq 8\text{ Hz}$ " e una con classe di frequenza " $f_0 > 8\text{ Hz}$ ".

Nelle tavole 3 sono inoltre riportati i 63 (4 di archivio e 59 di nuova realizzazione) punti di misura di rumore ambientale, con l'indicazione del valore della frequenza di risonanza fondamentale (f_0) registrata. I dati acquisiti attraverso l'estesa campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio (paragrafo 4.3.5), correlati coi dati geognostici disponibili (Castellaro, 2005), hanno permesso di individuare la profondità del tetto di quello che può essere definito il substrato rigido (paragrafo 6.2) e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione (paragrafo 7.1).

Si limitano infine a poche unità le verticali di misura in cui si sono registrati valori del picco di frequenza fondamentale non in linea con la classe di appartenenza, probabilmente in ragione di qualche anomalia locale.

8.4. Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavole 4)

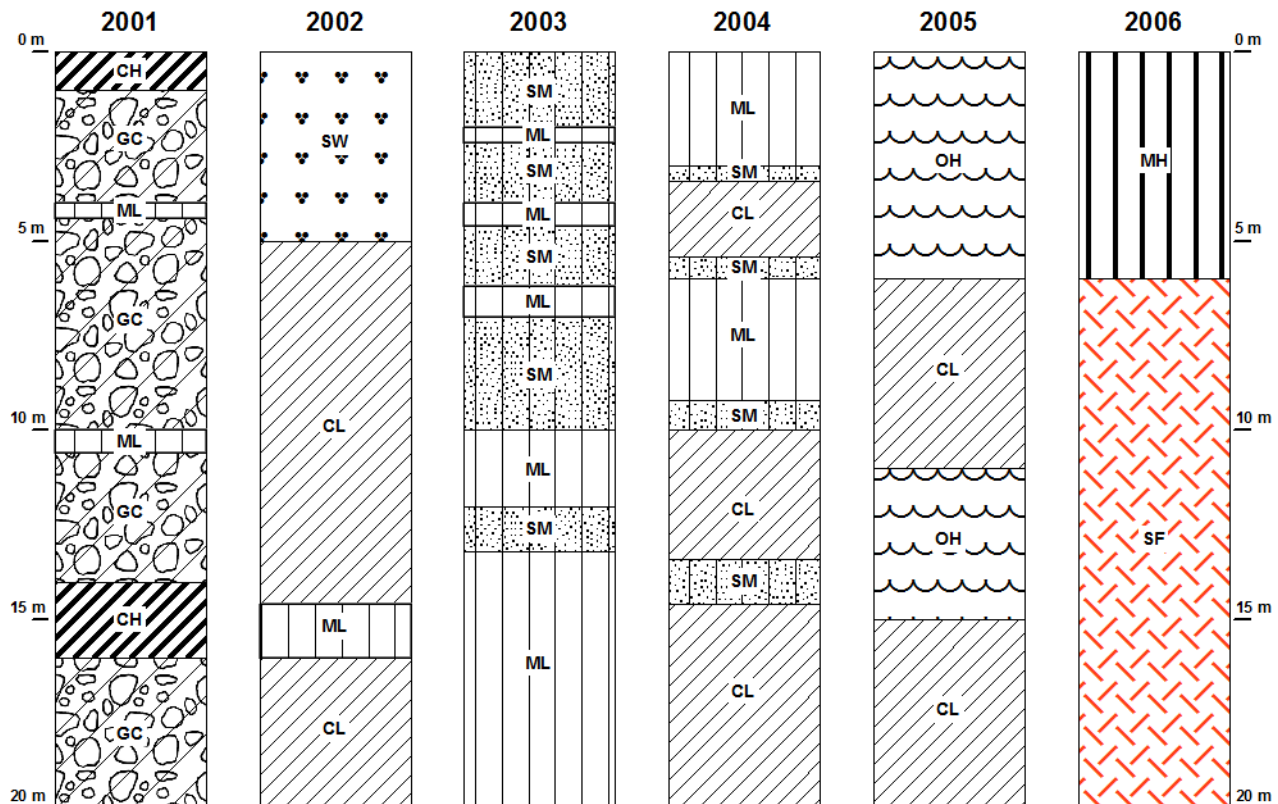
La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013), presenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone di attenzione per instabilità" e "Zone suscettibili di amplificazioni locali", oltre a riportare le stesse "forme di superficie e sepolte" già presenti nella carta geologico tecnica (tavole 2, paragrafo 8.2.1) e i punti di

misura di rumore ambientale, a cui è stato associato il valore di f_0 come label. Tale carta rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di primo livello.

Le "Zone di attenzione per instabilità" presenti all'interno del territorio dell'Unione Rubicone e Mare sono di due tipi: le "Zone di attenzione per liquefazione" (codice 3050), identificate sulla base dei criteri descritti al paragrafo 7.2 e le "Zone di attenzione per instabilità di versante attiva", che identificano due aree di ridotta estensione della zona collinare a sud dell'abitato di Savignano sul Rubicone (tavola 4b), di cui una ricade al di fuori degli ambiti di studio (codici 3012 e 3015).

Le "Zone suscettibili di amplificazioni locali" sono distinte, sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, in 6 classi (codici da 2001 a 2006), che sono cartografate per l'intero territorio dell'Unione in figura 23. Rispetto alle 12 litologie (superficiali) distinte nella carta geologico-tecnica, estendendo la valutazione a profondità maggiore, si è cercato di arrivare a delle semplificazioni, accorpendo alcune stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle eventuali criticità locali.

Per le sei classi individuate vengono di seguito riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi, così come richiesto gli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013):



2001: *Spessori variabili tra 1 e 3 metri di argille sabbiose seguite da ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose ad addensamento medio con locali intercalazioni limose.* Queste aree si concentrano lungo la porzione più meridionale del corso del torrente Uso, interamente fuori dagli ambiti di studio.

2002: *Spessori variabili tra 3 e 9 metri, di sabbie ben assortite ad addensamento crescente con la profondità, che in prossimità dell'attuale corso del Rubicone passano lateralmente a sabbie poco assortite e limi, seguite da depositi prevalentemente argillosi.* Si tratta della fascia costiera caratterizzata dalla presenza di sabbie di spiaggia e cordone litorale (argine e canale fluviale in subordine), che in profondità passano a depositi di piana inondabile/palude. L'intera area rientra nelle "Zone di attenzione per liquefazione". A questa classe è stato associata, per la microzonazione di livello 3, una modellazione di risposta sismica locale con metodi numerici.

2003: *Spessori variabili di sabbie limose e limi sabbiosi poco addensati, con intercalazioni limo-argillose nei primi 10 metri, seguiti da depositi prevalentemente limo-argillosi.* Queste aree rientrano nelle "Zone di attenzione per liquefazione" e sono presenti nel comune di Savignano sul Rubicone (conoide alluvionale del fiume Rubicone) e nel comune di San Mauro Pascoli (fuori ambiti, lungo il corso del torrente Uso)

2004: *Alternanza di limi argillosi e argille limose a consistenza media con locali livelli anche metrici di limi sabbiosi e sabbie fini a profondità variabili.* Si tratta di un'ampia area a prevalenza di depositi fini, con diminuzione della granulometria passando dalla zona dei capoluoghi comunali (prevalenza di limi argillosi) al confine con la zona 2005 (prevalenza di argille limose). Nella zona più meridionale sono più frequenti locali livelli lenticolari di limi sabbiosi e sabbie fini che, in ragione della quota, dello spessore e della granulometria possono essere identificate come "Zone di attenzione per liquefazione". L'individuazione e la mappatura in carta delle "Zone di attenzione per liquefazione" all'interno di questa microzona (2004) si rivela spesso complicata in quanto i livelli limosi e sabbiosi in questione sono distribuiti senza continuità areale e spesso si rinvencono solo in aree molto ristrette. A questa classe è stato associata, per la microzonazione di livello 3, una modellazione di risposta sismica locale con metodi numerici.

2005: *Alternanza di argille e limi argillosi organici a consistenza variabile da bassa a media.* Si tratta dell'area di piana inondabile posta immediatamente a SO della fascia costiera (cordone litorale), in cui non sono mappate "Zone di attenzione per liquefazione", ma che è caratterizzata dalla presenza di argille e limi argillosi organici plastici, poco consistenti, con zone anche ampie in cui si rinvencono a profondità diverse livelli torbosi significativi in corrispondenza di aree un tempo paludose. Si ritiene che in alcune aree di questa microzona, caratterizzate dalla presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche meccaniche particolarmente scadenti (bassi valori di Cu e alto indice plastico), possano verificarsi cedimenti postsismici. Purtroppo i dati disponibili per questa microzona non appaiono al momento sufficienti per l'identificazione e la mappatura di tali aree, che in ogni caso non rientrerebbero nelle tipologie di instabilità previste dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

2006: *Depositati limo-argillosi e limo-sabbiosi di versante e terrazzo fluviale con spessori compresi tra 3 e 12 metri su un substrato stratificato molto alterato.* Si tratta dell'area collinare a sud dell'abitato di Savignano sul Rubicone, in cui non sono presenti "Zone di attenzione per liquefazione".

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE RUBICONE E MARE (GATTEO, SAN MAURO PASCOLI E SAVIGNANO SUL RUBICONE)

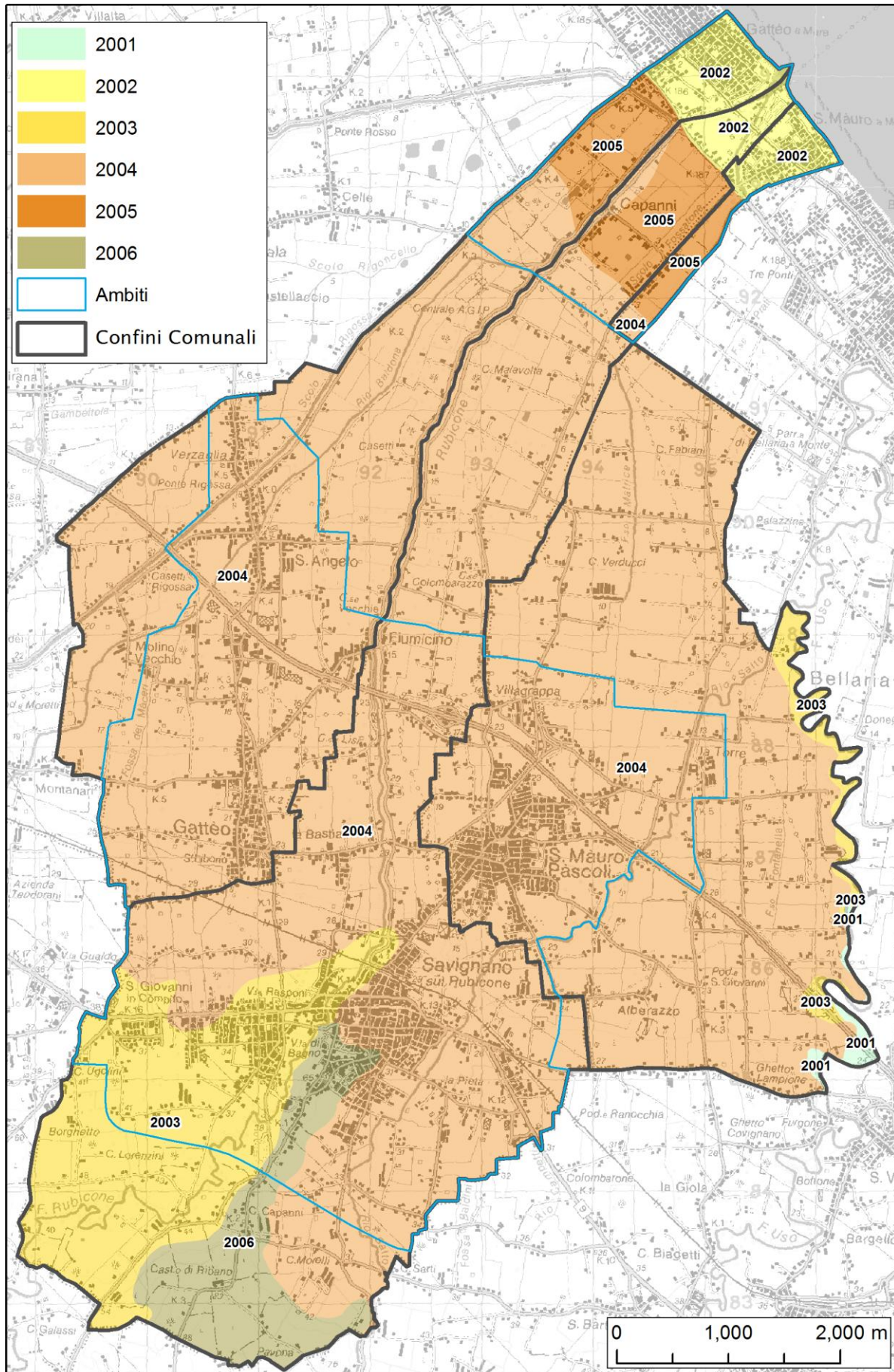


Figura 23. Carta in cui sono riportate, per l'intera area di studio, le Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, con gli stessi colori utilizzati nelle tavole 4 e i codici inseriti nelle banche dati.

8.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavole 5)

Nella carta della velocità delle onde di taglio, realizzata alla scala 1:10.000, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2012), sono riportati tutti i punti di misura di Vs (50), di archivio (22) e nuova realizzazione (28), con indicazione del valore di Vs30 o VsH e del tipo di prova da cui è stato ricavato il dato (paragrafo 6.3). Per le prove di nuova realizzazione (paragrafo 4.3 e tabella 11) è indicato con una label il codice della prova originale riportato nel rapporto di indagine (allegato 2) e nei file PDF associati ai record di banca dati, per consentirne il riconoscimento diretto in carta.

I dati di velocità riportati in questa cartografia, sintetizzata per l'intero territorio dell'Unione in figura 12, e opportunamente correlati con altri dati geognostici e geofisici, hanno permesso di suddividere il territorio indagato in macro-aree per classi di Vs (VsH nella zona del margine collinare nel comune di Savignano sul Rubicone e Vs30 nel resto dell'area di studio), così come definite dagli abachi dell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007): 200-250-300 m/s. Questo dato, associato a quello della profondità del bedrock (o pseudo-bedrock) sismico, ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione per ogni singola area (paragrafo 7.1).

8.6. Carta di microzonazione sismica di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 (tavole 6, 7 e 8)

Le 9 carte di microzonazione sismica di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3, realizzate secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013) e dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), identificano le "Zone suscettibili di instabilità" e le "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

A differenza della carta MOPS di primo livello (tavole 4 e paragrafo 8.4), queste cartografie sono state realizzate solamente per le aree oggetto dello studio di microzonazione sismica di dettaglio (aree urbanizzate, suscettibili di trasformazioni urbanistiche e fasce a cavallo delle reti infrastrutturali).

Tali carte aggiungono, alle "Zone suscettibili di amplificazioni locali" già individuate nella carta MOPS, attraverso la suddivisione del territorio analizzato sulla base di classi predefinite contraddistinte da colori differenti (paragrafo 7.1), la quantificazione dei tre fattori di amplificazione previsti dagli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007):

- FA_{PGA} (tavola 6): fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA_0);
- $FA_{0,1-0,5s}$ (tavola 7): fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI_0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- $FA_{0,5-1s}$ (tavola 8): fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI_0) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi.

L'Intensità di Housner corrisponde all'area sottesa dallo spettro di risposta di pseudovelocità e rappresenta un indicatore della pericolosità sismica poiché correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto.

Nella tabella 15 vengono sintetizzati i criteri utilizzati per la definizione dei diversi fattori di amplificazione calcolati sulla base degli abachi regionali e esplicitati nel paragrafo 7.1.

ZONA MOPS	ABACO	VS	H	FAPGA	FA0,1-0,5s	FA0,5-1s
2002	Costa 3	200 (Vs30)	>100 m	1.8	2.2	2.5
2003	Pianura 2	200 (Vs30)	>100 m	1.5	1.8	2.5
2003	Pianura 2	250 (Vs30)	>100 m	1.5	1.8	2.3
2006	Marg. App. Vs substr < 800 m/s	300 (VsH)	15	1.9	1.9	1.5
2006	Marg. App. Vs substr < 800 m/s	200 (VsH)	5	2	1.7	1.4

Tabella 15. Schema riassuntivo dei criteri utilizzati per la definizione delle aree a diverso fattore di amplificazione sulla base degli abachi regionali.

Le "Zone di suscettibilità per liquefazione" corrispondono alle "Zone di attenzione per liquefazione" della carta MOPS, ma presentano una suddivisione areale sulla base dell'indice del potenziale di liquefazione (IL) in 3 classi: $0 < IL \leq 2$, $2 < IL \leq 5$ e $IL > 5$. In aggiunta a quanto previsto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), nelle carte sono rappresentati i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali delle prove CPT/CPTE/CPTU. In ragione del diverso grado di affidabilità degli indici ottenuti con prove elettriche e meccaniche (paragrafo 7.3.3), si è voluto distinguerli in carta, rappresentando gli indici ottenuti da prove penetrometriche con punta elettrica (23 tra CPTE e CPTU) con un simbolo e una label più grandi, proprio in quanto ritenuti maggiormente affidabili. Sono stati inoltre distinti gli indici ottenuti da prove CPT spinte a profondità inferiori ai 15 metri (paragrafo 7.3.3).

Poiché non vi erano elementi sufficienti a caratterizzarne il grado di attività, nel presente studio non sono stati eseguiti approfondimenti di terzo livello sulla piccola area verde, non edificata, soggetta ad instabilità di versante ad ovest del toponimo "Villa di Bagno" in comune di Savignano sul Rubicone, che pertanto viene indicata in carta come "Zona di attenzione per instabilità di versante attiva" come previsto per il secondo livello di approfondimento.

9. Commenti finali e criticità

Il presente studio di microzonazione sismica di secondo livello con locali approfondimenti di terzo livello ha permesso di suddividere il territorio del Unione Rubicone e Mare (Gatteo, Savignano Sul Rubicone e San Mauro Pascoli) sulla base dell'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità sismica e di individuare le zone in cui sono presenti spessori di terreni potenzialmente liquefacibili in caso di sisma, quantificandone la propensione attraverso il calcolo degli indici di liquefazione. Sono state inoltre condotte specifiche analisi di risposta sismica locale con metodi numerici finalizzate ad un confronto coi fattori di amplificazione calcolati sulla base degli abachi regionali (DAL 112/2007) e a fornire un riferimento dal punto di vista metodologico e della ricostruzione del modello sismo-stratigrafico per le analoghe analisi richieste dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni.

9.1 Confronto con la distribuzione degli effetti dei terremoti passati

Sulla base dei dati macrosismici relativi ai quattro terremoti principali noti (paragrafo 2.1), risulta evidente la caratteristica di propagazione efficace degli effetti in direzione parallela alla costa e come alcuni degli epicentri paiano ragionevolmente localizzati in mare, ma comunque tutti si collochino in prossimità della costa dell'area in esame. In questo senso è importante notare come i centri capoluogo oggetto del presente studio siano collocati tutti nell'entroterra ad alcuni chilometri dalla linea di riva (circa 6 per Gatteo e San Mauro Pascoli, circa 8 per Savignano sul Rubicone), pertanto più distanti dalla zona che si può considerare essere stata soggetta al massimo scuotimento. Considerare quindi la sismicità storica dei capoluoghi come rappresentativa delle intere aree comunali porterebbe certamente ad una sottostima per gli ambiti costieri. Non essendo disponibili informazioni dalle fonti storiche per le frazioni e quindi nemmeno per le zone costiere dell'Unione Rubicone e Mare (oggi intensamente antropizzate, ma un tempo scarsamente popolate), per avere, anche per tali ambiti, un quadro indicativo dei possibili effetti di terremoti di analoga intensità, è possibile fare riferimento alla storia sismica del vicino abitato di Cesenatico, porto della città di Cesena sin dal 1300.

In particolare il terremoto del 1875, per cui si evidenzia il massimo danneggiamento a Rimini e Cesenatico (VIII MCS), deve avere prodotto il massimo scuotimento lungo la costa, per cui, per analogia, agli ambiti di studio più prossimi al mare può ragionevolmente essere attribuita una intensità ipotetica pari al grado VIII della scala MCS (sulla base degli immaginabili effetti che si sarebbero potuti riscontrare se ci fosse stato un edificio analogo a quello dei due centri per cui si hanno informazioni) e quindi superiore all'intensità associata all'abitato di Savignano sul Rubicone. Anche per gli effetti sull'ambiente può valere, sebbene in misura minore perché si tratta di fenomeni in parte legati alle condizioni locali, l'analogia precedentemente proposta, per cui, per lo stesso sisma del 1875, si può ipotizzare per la fascia costiera dei comuni dell'Unione Rubicone e Mare si siano verificati effetti analoghi a quelli osservati nel vicino abitato di Cesenatico. Sappiamo inoltre che il fenomeno della liquefazione tende a ripetersi laddove si è già verificata (Crespellani et al., 2000).

Il presente studio (tavole 6, 7 e 8) definisce l'area costiera come quella caratterizzata dalla più alta amplificazione, sia in termini di PGA (seconda solo alla ristretta porzione di territorio collinare), che in termini di Intensità di Housner (paragrafi 7.1 e 8.6) e dai più alti indici di liquefazione.

La zona costiera risulta quindi interessata dai maggiori effetti dei terremoti passati, che sembrano dipendere più che altro dalla vicinanza agli epicentri rispetto ai capoluoghi, ma anche caratterizzata dai più alti fattori di amplificazione secondo il presente studio, ricavati sulla base del modello sismostratigrafico. Si tratta di ragioni diverse che, insieme alla presenza di depositi ad elevata propensione alla liquefazione, portano a definire la zona costiera come quella a pericolosità maggiore nel territorio dei comuni dell'Unione Rubicone e Mare.

La zona costiera presenta inoltre una elevata esposizione in quanto densamente popolata nei mesi estivi ed una vulnerabilità che andrebbe certamente valutata con attenzione, in quanto la maggior parte degli edifici presenti lungo la costa risultano costruiti in tempi precedenti alle recenti norme sismiche, senza tenere nella dovuta considerazione i possibili effetti legati ad eventuali fenomeni di liquefazione dei terreni.

9.2 Ulteriori criticità

Oltre a quanto illustrato in dettaglio nei capitoli precedenti della presente relazione e mappato nelle tavole cartografiche, si ritiene importante sottolineare alcune criticità, la cui trattazione non è strettamente prevista dagli Standard MS 3.0, né dagli ICMS, ma che meritano di essere trattati, sia pur sinteticamente.

Nel quadro della elevata pericolosità della zona costiera dell'area di studio, illustrato nel paragrafo precedente, si inserisce la complessa valutazione relativa all'influenza della presenza degli edifici rispetto al rischio di liquefazione. L'argomento, proprio per l'area in esame viene diffusamente trattato in Pierucci et al., 1999, di cui si riportano le principali conclusioni sull'argomento:

"...In generale si può affermare che un aumento del rischio di liquefazione rispetto alle condizioni di campo libero si può avere quando la falda si avvicina molto al piano di campagna, oppure quando il piano di posa è talmente profondo (2-3 metri) che difficilmente si può compensare con l'edificio il peso del terreno sottratto: in tal caso l'aumento del livello di rischio è tanto maggiore quanto più basso e leggero è l'edificio, vale a dire quanto minore è il numero di piani, oppure quanto più ampia è la base di appoggio specialmente se costituita da un piano totalmente impermeabile (ad esempio fondazioni a platea) che facilita l'accumulo di pressioni interstiziali.

Viceversa una diminuzione del potenziale di liquefazione si può avere al calare del livello di falda, o in presenza di edifici con fondazione non sovracompensata, quanto più essi incrementano la pressione geostatica, ovvero quanto più sono alti o quanto più stretta è la base di appoggio, oppure quando lo scavo toglie del terreno liquefacibile.

Che l'area più ampia peggiori le cose sembra in contrasto con quanto detto [...] riguardo ad osservazioni nei siti colpiti da terremoti, ma in realtà bisogna tener conto che mentre nella letteratura citata ci si riferiva agli effetti tangibili del fenomeno, nell'analisi qui svolta si è studiata la possibilità che si inneschi il fenomeno liquefazione ma non si è mai parlato di una stima dei danni possibili conseguenti: per completare il quadro occorrerebbe appunto stimare tali effetti analogamente a quanto fatto per il potenziale di liquefazione, cioè sia a livello locale che su vasta scala."

È evidente che il problema è complesso e necessita di approfondimenti specifici con

valutazioni fatte caso per caso e non può essere certamente sottovalutato.

La microzona 2005 (tavole 4), visibile a scala dell'Unione in figura 23, individua l'area di piana inondabile posta immediatamente a SO della fascia costiera (cordone litorale) caratterizzata dalla presenza di argille e limi argillosi organici plastici, poco consistenti, con zone anche ampie in cui si rinvergono a profondità diverse livelli torbosi significativi in corrispondenza di aree un tempo paludose. Si ritiene che in alcune aree di questa microzona, caratterizzate dalla presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche meccaniche particolarmente scadenti (bassi valori di Cu e alto indice plastico), possano verificarsi cedimenti postsismici. Purtroppo i dati disponibili per questa microzona non sono al momento sufficienti per l'identificazione e la mappatura in dettaglio di tali aree. In ogni caso gli attuali standard di microzonazione sismica nazionali (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), non prevedono l'indicazione di specifiche zone caratterizzate da questo tipo di criticità, a meno che non si decida di utilizzare le zone instabili per "Cedimenti differenziali, crollo di cavità sotterranee/shinkhole", che paiono però destinate ad altri tipi di instabilità.

9.3 Considerazioni conclusive e indicazioni per la riduzione del rischio sismico

Sulla base delle evidenze riscontrate nello studio di microzonazione sismica di secondo livello con locali approfondimenti di terzo livello, si indicano di seguito in estrema sintesi le analisi e gli approfondimenti richiesti per la riduzione del rischio sismico, in ragione delle principali criticità emerse, da realizzarsi negli studi geologici a supporto dei diversi livelli di pianificazione (POC/PUA) e in fase esecutiva. Tali indicazioni potranno essere recepite nelle norme del PSC.

L'analisi integrata dei dati delle numerose indagini raccolte a supporto dello studio di microzonazione sismica ha evidenziato come, nel territorio dei comuni indagati, la presenza di livelli sabbiosi e limo-sabbiosi saturi risulta distribuita in modo abbastanza uniforme lungo la costa, mentre si presenti arealmente discontinua nell'entroterra. Pertanto la definizione dei limiti delle aree potenzialmente suscettibili di liquefazione in caso di sisma presenta inevitabili incertezze, soprattutto là dove non si dispone di dati stratigrafici attendibili o adeguatamente distribuiti. Per tale ragione su tutto il territorio dell'Unione è raccomandata l'esecuzione di specifici approfondimenti volti ad accertare l'effettiva presenza di orizzonti potenzialmente liquefacibili, attraverso una adeguata campagna di indagini geognostiche: prove penetrometriche con punta elettrica, preferibilmente con piezocono, spinte ad almeno 20 metri di profondità, che permettano una più affidabile valutazione il potenziale di liquefazione e una quantificazione dei cedimenti a seguito di terremoto. Nella programmazione della campagna di indagine è necessario tenere presente che, poiché è stata riscontrata una certa variabilità nella distribuzione dei depositi granulari saturi anche su verticali di indagine molto ravvicinate, risulta pericoloso estendere delle valutazioni puntuali sulla liquefacibilità ad un areale più o meno esteso.

Il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione (IL) dovrà essere eseguito riferendosi alle procedure (metodi semplificati da prove penetrometriche statiche con punta elettrica spinte ad almeno 20 metri di profondità) e ai parametri di input (magnitudo attesa in particolare) utilizzati per lo studio di microzonazione. Scelte meno cautelative dovranno

essere adeguatamente motivate dai tecnici incaricati delle verifiche. A tal fine dovrà essere realizzato anche un approfondimento relativamente al contesto idrogeologico locale (stima delle soggiacenze minime).

Nelle aree caratterizzate dalla presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche meccaniche particolarmente scadenti (bassi valori di Cu e alto indice plastico), concentrate in particolare nella microzona 2005 (figura 23), dovranno essere attentamente valutati e quantificati i possibili cedimenti postsismici, attraverso adeguate campagne di indagini geognostiche in situ e prove geotecniche di laboratorio.

10. BIBLIOGRAFIA

- 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.
- Amorosi A., Colalongo M. L., Pasini G. e Preti D. (1999) - Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy). *Sedimentology*, 46, 99-121.
- Arpa Emilia-Romagna (2011) - Erosione Costiera. *Annuario regionale dei dati ambientali*.
- Arpa Ingegneria Ambientale (2007) - Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. *Analisi interferometrica*.
- ARPA Ingegneria Ambientale (2013) - Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola 2011-2012. http://www.arpa.emr.it/dettaglio_generale.asp?id=2969&idlivello=1423
- Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M. e Boschi E. (2008) - The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. *Tectonophysics*.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P. e Vannucci G. (2004) - Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna; Note illustrative. A cura di : Boccaletti M. e Martelli L., Servizio geologico sismico e dei suoli.
- C.A.I.R.E., Cooperativa Architetti e Ingegneri (1995) - P.R.G.I. Piano Regolatore Generale Intergionale Analisi geologica. Note illustrative alle tavole di analisi. Provincia di Forlì-Cesena. Comuni di Gatteo, S. Mauro Pascoli, Savignano sul Rubicone.
- Castellaro S. (2009) - Zonazione sismica di II livello del Comune di Cesenatico.
- 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. (2009) - The effect of velocity inversions on H/V. *Pure Appl. Geophys.*, 166, 567-592.
- 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.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e Amato A. (2006) - CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002, versione 1.1. INGV-CNT, Roma <http://csi.rm.ingv.it/>
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2013) - Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 3.0. http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_3.0_open.pdf
- Cipriani S., Crespellani T., Madiati C., Pierucci D., Vannucchi G., Marcellini A., Martelli L., Frassinetti G. (2000) - Carta del rischio di liquefazione in un'area ricca di beni storico culturali: la costiera romagnola, International Symposium Geo-Ben 2000 'Geological and Geotechnical influences in the Preservation', Torino, International Symposium Geo-Ben 2000 'Geological and Geotechnical influences in the Preservation' - Torino, Italia, pp. 61-71, 7-9 giugno 2000.
- Crespellani T., Madiati C. e Vannucchi G. (2003) - CPT-based liquefaction hazard map for an Italian coastal area. *Rivista Italiana di Geotecnica*, Vol. 4, pp. 46-65
- Crespellani T., Nardi R. e Simoncini C. (1991) - La liquefazione del terreno in condizioni sismiche. Zanichelli, Bologna.
- Crespellani T., Vannucchi G., Madiati C., Cipriani S., Pierucci D. (2000) - Studio per la valutazione del rischio di liquefazione in un'area del territorio riminese e forlivese ricadente nel foglio 256 della carta tecnica regionale (Comuni di Gatteo, Savignano sul Rubicone, S. Mauro Pascoli). Convezione di ricerca per la realizzazione della carta di rischio geo-ambientale (progetto di ricerca sulla microzonazione sismica – indagine sulla liquefazione dei terreni) tra la regione Emilia-Romagna e il dipartimento di ingegneria civile

dell'Università di Firenze (delibera della giunta regionale e.r. n. 740/98). Università degli Studi di Firenze. Dipartimento di Ingegneria Civile. Sezione Geotecnica.

DISS Working Group (2010) - Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2010 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1

Dondi L. e D'Andrea M. G. (1986) - La Pianura Padana e Veneta dall'Oligocene superiore al Pleistocene. *Giornale di Geologia*, ser3°, 48/1-2, 197-225.

Dondi L., Mostardini F. e Rizzini A. (1982) - Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nella Pianura Padana. In: Guida alla geologia del margine appenninico padano (a cura di: Cremonini G. e Ricci Lucchi F.), Guida Geol. Reg., S. G. I., 47-58.

Fabbri (2000) - Relazione geologica per la Variante generale al PRG di Savignano sul Rubicone.

Facciorusso J. e Vannucchi G. (2009) - Esempio di valutazione del potenziale di liquefazione su scala regionale secondo l'approccio deterministico e probabilistico. *Rivista Italiana di Geotecnica*, Aprile-Giugno 2009.

Facciorusso J., Madiari C., Vannucchi G. e Martelli L. (2012a) - Capitolo 5: Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa emiliano-romagnola in Microzonazione sismica, uno strumento consolidato per la riduzione del rischio. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna. Editore Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli.

Facciorusso J., Madiari C. e Vannucchi G. (2012b) - Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT.

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>

Farabegoli E. (1997) - Struttura del sottosuolo quaternario continentale della Pianura Padana meridionale, Università degli Studi di Bologna.

Frassinetti G. e Viel G., CNR-IDPA (1997) - Masterplan del Rubicone presentato al Convegno sulla Geologia delle Aree Urbane, Bologna.

Galli, P. e Meloni F. (1993) - Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia. *Il Quaternario*, 271-292

Galli P., Meloni F. e Rossi A. (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) – ICMS, 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"

http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833

Guidoboni E. e Ferrari G. (1986) - Il terremoto di Rimini e della costa romagnola: 25 dicembre 1786. Analisi e interpretazione. Edizioni SGA.

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. e Valensise G., INGV-SGA (2007) - CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-1500). <http://storing.ingv.it/cfti4med/>

ISIDE Working Group (2010) - Italian Seismological Instrumental and parametric database. <http://iside.rm.ingv.it>

ISPRA, Regione Emilia-Romagna, Università di Bologna (2009) - Progetto CARG , Carta geologica Foglio 256 e "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia" – Foglio 256.

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2004) - I dati online della pericolosità sismica in Italia. <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>

Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S. and Sato H. (1982) - Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods, Proc., 3rd Int. Conf. on Microzonation, Seattle, Vol.3, pp1319-1330.

Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (a cura di) (2011) - DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11> DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11

- Meletti C. e 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>
- Mucciarelli M. (a cura di) (2012) - Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici.
- Nori L. e Di Marcantonio P. (2014) - Manuale pratico di risposta sismica locale. Dal sismogramma allo spettro di progetto con Rexel e Strata. Territorio. Quaderni per la progettazione. Editore EPC.
- Ori G. G. (1993) - Continental depositional systems of the Quaternary of the Po Plain (northern Italy). *Sedimentary Geology*, 83, 1-14.
- Ori G.G., Roveri M. and Vannoni F. (1986) - Plio-Pleistocene sedimentation in the Apenninic-Adriatic Foredeep (Adriatic Sea). In: P.A. Allen, P. Homewood and G. Williams (eds.), *Foreland Basins*, International Association of Sedimentologists Special Publication, 8: 183-198.
- Pierucci D. (candidato), Crespellani T., Vannucchi G., Madaia C. e Martelli L. (relatori) (1999) - Valutazione del rischio di liquefazione dei terreni in condizioni sismiche nell'area costiera romagnola: analisi in campo libero ed influenza della presenza di edifici. Tesi di laurea, Corso di Laurea in Ingegneria per l'ambiente ed il territorio, Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Firenze.
- Pieri M. (1984) - Storia delle ricerche nel sottosuolo padano fino alle ricostruzioni attuali. In: Cento anni di geologia italiana. Vol. giub. I Centenario della S.G.I., 155-176, Bologna.
- Pieri M. e Groppi G. (1981) - Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy). Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.
- Provincia di Forlì-Cesena (2010) - Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP), Forlì-Cesena.
- Rathje E. M. e Kottke A. (2013) - "Strata", <https://nees.org/resources/strata>.
- Regione Emilia-Romagna (2011) - SICELL – Nuovi strumenti di gestione dei litorali in Emilia-Romagna.
- Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, ENI - AGIP (1998) - Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000, Bologna.
- Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, CNR - Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino (2002) - Carta Geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo - scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze.
- Regione Emilia-Romagna - Delibera Assemblea Legislativa 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".
- Regione Emilia-Romagna - Delibera Giunta Regionale n.1919/2013 - Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile 52/13 a favore degli Enti locali.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M. L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi I. e Rio D. (1982) - Evoluzione sedimentaria e paleogeografia del margine appenninico. In: "Guida alla geologia del margine appenninico-padano" a cura di Cremonini G. e Ricci Lucchi F., Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. Ital., 17-46.
- Robertson P.K. e Wride C.E. (1998) - Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the CPT, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 3
- Rovida A., Camassi R., Gasperini P. e Stucchi M. (a cura di) (2011) - CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>. DOI:10.6092/INGV.IT-CPTI11
- Sieberg A. (1930) - *Geologie der Erdbeben*, Handbuch der Geophysik, 2, 4, 552-555
- Sonmez H. (2003) - Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). *Environ. Geology* 44(7): 862-871
- Stucchi M., Camassi R., Rovida A., Locati M., Ercolani E., Meletti C., Migliavacca P., Bernardini F. e Azzaro R. (2007) - DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. Quaderni di Geofisica, Vol 49, pp.38. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>

- Venturini L. (2003) Relazione geologica per la Variante generale al PRG di San Mauro Pascoli.
- Veronese T., Romagnoli M.; 2014 in stampa: "Considerazioni sulla valutazione del rischio di liquefazione indotta da sisma, sui terreni della bassa pianura padana. Il Geologo dell'Emilia-Romagna.
- Viel G. e Frassinetti G. (2000) - Relazione geologica per la Variante generale al PRG del Comune di Gatteo
- Viel G. e Frassinetti G. (2001) - Relazione geologica per la Variante generale al PRG del Comune di San Mauro Pascoli
- Vittori E. e Ventura G. (1995) - Grain size of fluvial deposits and late Quaternary climate: A case study in the Po River valley (Italy). *Geology*, 23(8), 735-738.
- Zoetemeijer R. (1993) - Tectonic Modelling of Foreland Basins, thin skinned thrusting, syntectonic sedimentation and lithospheric flexure. PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam.