



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

### Regione Emilia-Romagna Comune di Gambettola



Regione	Soggetto realizzatore	Data
	<p>Responsabile: Dott.Geol. Carlo Copioli</p> <p>Gruppo di lavoro: Dott.Geol. Paolo Ciacci Dott.Arch. Silvia Malpassi Dott.Geol. Alessandro Merli Dott.Geol. Fabio Vannoni</p>	<p>Novembre 2024</p>

## INDICE

1. PREMESSA .....	3
2. INTRODUZIONE .....	4
3. SISMICITA' STORICA E PERICOLOSITA' DI BASE .....	7
4. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA.....	22
4.1. Cartografia di base.....	22
4.2. Inquadramento Geomorfológico.....	23
4.3. Inquadramento Geologico-Strutturale .....	26
4.4. Assetto Stratigrafico .....	28
5. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	37
5.1. Indagini di tipo geofisico.....	38
5.2. Indagini di tipo geotecnico .....	39
6. MODELLO DI SOTTOSUOLO .....	40
6.1. Andamento delle Vs nel sottosuolo.....	40
7. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE .....	44
8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	45
9. ELABORATI CARTOGRAFICI.....	46
9.1 MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I .....	46
9.1.1 Carta geologico-tecnica .....	46
9.1.2 Carta delle frequenze naturali del terreno.....	48
9.1.3 Carta delle MOPS (Microzone Omogene in prospettiva Sismica) .....	50
9.2 MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO II .....	55
9.2.1. carta delle velocità delle onde di taglio Vs.....	55
9.2.2. Carta dei fattori di amplificazione stratigrafica (FA) .....	56
9.2.3 Fattori di amplificazione Topografica (FT).....	61
9.2.4 Carta del parametro di scuotimento sismico assoluto “H <sub>SM</sub> ” .....	61
10. MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO III (ANALISI DI RSL E LIQUEFAZIONE).....	63
10.1 Analisi di Risposta Sismica Locale.....	64
10.1.1 Modellazione numerica e codici di calcolo.....	64
10.1.2 Moto di input.....	64
10.1.3 Modello di sottosuolo e parametri dinamici.....	66
10.1.4 Spettri di Risposta e Fattori di Amplificazione.....	69
10.2 Stabilità di Sito – Potenziale di liquefazione .....	80
10.2.1 Generalità e valutazioni geologico-tecniche .....	80
11. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEGLI EVENTI PASSATI.....	87
12 CONCLUSIONI.....	89
13. BIBLIOGRAFIA .....	92

## ALLEGATI:

- ALLEGATO 1: Prove geognostiche/geofisiche di nuova realizzazione
- ALLEGATO 2: Sezioni geolitologiche
- ALLEGATO 3: Parametri di scuotimento sismico – accelerogrammi di output
- ALLEGATO 4: Dati spettro medio di output
- ALLEGATO 5: Verifiche di liquefazione
- ALLEGATO 6: Tabelle parametriche di sintesi verifiche di liquefazione

## **1. PREMESSA**

La microzonazione sismica, cioè la suddivisione dettagliata del territorio in base alla differente risposta rispetto ad un ipotetico terremoto, è uno degli strumenti più efficaci per la riduzione del rischio sismico in quanto permette, fino dalle prime fasi della pianificazione urbanistica, di valutare la pericolosità sismica nelle aree urbane e urbanizzabili, indirizzare i nuovi interventi verso quelle zone a minore pericolosità e programmare interventi di mitigazione del rischio nelle zone in cui sono presenti particolari criticità.

La L.R. 20/2000 “Disciplina generale sulla tutela e uso del territorio” e la L.R. 19/2008 “Norme per la riduzione del rischio sismico”, richiedono l’esecuzione di studi di microzonazione sismica per la redazione e l’approvazione dei piani urbanistici comunali.

In data 02/05/07 la Regione Emilia-Romagna con deliberazione dell’Assemblea Legislativa n.112/2007 ha approvato gli “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”. Successivamente tali indirizzi sono stati aggiornati con l’atto di indirizzo e coordinamento tecnico approvato con Del. G.R. 2193/2015 ed in ultimo la più recente Del. G.R. 630/2019 “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)”. Infine con *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, la R.E.R. ha pubblicato il recente “AGGIORNAMENTO DELL'”ATTO DI COORDINAMENTO TECNICO SUGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA (ARTT. 22 E 49, L.R. N. 24/2017)” DI CUI ALLA DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 29 APRILE 2019, N. 630” cui poter far riferimento per la redazione di studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna.

Anche il Dipartimento della Protezione Civile e la Conferenza delle Regioni e Province Autonome in data 13 novembre 2008 ha approvato gli “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”, e con OCDPC n. 978/2023 e D.G.R. 1936/2023, sono stati definiti i criteri e le risorse finanziarie per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna.

Il comune di Gambettola, pertanto, essendo in possesso dei requisiti necessari, ha ottenuto il relativo finanziamento e gli studi che sono stati previsti per le aree urbanizzate e urbanizzabili del comune destinatario del contributo sono relativi per studi di Microzonazione Sismica (da qui in avanti MS); allo scopo, tali studi ed analisi sono stati eseguiti secondo le indicazioni/prescrizioni di cui alla Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021* ovvero in ottemperanza agli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica dei dati di MS e CLE, rispettivamente 4.2 del 2020 e 3.2 del 2019.

## **2. INTRODUZIONE**

A seguito di un terremoto, si ha spesso modo di osservare come la distribuzione dei danni sul territorio sia assai eterogenea a parità di vulnerabilità dell'edificio. Le condizioni geologico-tecniche degli strati più superficiali, nonché le caratteristiche geomorfologiche possono concorrere, infatti, a modificare localmente lo scuotimento indotto da un terremoto. Per un'efficace azione di prevenzione, in materia di rischio sismico, è necessario tener conto non solo, quindi, della zonazione sismica nazionale, ma anche di eventuali sfavorevoli condizioni locali, a scala comunale o sub comunale. Particolarmente rilevanti sono i cosiddetti effetti di amplificazione di sito, ossia l'insieme delle variazioni in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, rispetto ad una formazione rocciosa di base, subisce attraversando gli strati sovrastanti, fino alla superficie. Tali effetti sono causati, essenzialmente, da un processo di intrappolamento e risonanza dell'energia del terremoto all'interno di un volume di sottosuolo costituito da materiali sedimentari a bassa impedenza sismica (IS: prodotto della velocità di propagazione dell'onda per la densità del mezzo attraversato) e posto sopra ad un dominio con più alta IS, per esempio un substrato roccioso o un suolo particolarmente rigido. L'identificazione delle aree soggette ad amplificazione sismica è dunque di fondamentale importanza per la pianificazione e lo sviluppo urbanistico comunale. Uno studio di questo genere prende il nome di Microzonazione Sismica ed ha lo scopo di individuare porzioni del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo.

La messa a punto di una procedura condivisa per lo studio di questi fenomeni è stata recentemente oggetto di un intenso lavoro di coordinamento e sintesi delle conoscenze finora disponibili da parte della Conferenza delle Regioni che, con il coordinamento del Dipartimento della Protezione Civile, ha messo all'opera una grande quantità di tecnici ed esperti per la messa a punto, nel 2008, degli **“Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”** (figura 2.1).

Le prime esperienze regionali sulla microzonazione dopo vari eventi sismici e alcune normative regionali su tale ambito hanno rappresentato le condizioni preliminari per creare delle basi comuni e condivise, recependo quanto è stato elaborato e sperimentato a livello scientifico e sviluppando le istanze espresse in vario modo dalle Regioni e dalle amministrazioni.

Il gruppo di lavoro, coadiuvato anche dalle osservazioni da parte di soggetti esterni (Consiglio nazionale dei Geologi, Consiglio nazionale degli Ingegneri, Associazione Geotecnica Italiana, ecc.), nel corso della sua attività ha evidenziato che la sperimentazione e l'applicazione degli **“Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”** rientra a pieno titolo nei programmi nazionali di previsione e prevenzione previsti dall'articolo 4 della legge n°225 del 24 Febbraio 1992.

Questo testo, che rappresenta un punto di riferimento per tutte le attività di microzonazione sismica ad opera degli Enti territoriali, definisce una serie di protocolli e tecniche di indagine del sottosuolo applicabile ai



settori della programmazione territoriale, della pianificazione urbanistica, della pianificazione dell'emergenza e della normativa tecnica per la progettazione.



*Figura 2.1- Copertina dell'elaborato "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica"*

In funzione dei diversi contesti, dei diversi obiettivi e delle disponibilità economiche le linee guida (Indirizzi e Criteri per la Microzonazione sismica) prevedono 3 differenti livelli di approfondimento, con complessità, impegno e costi crescenti.

**Livello 1:** è un livello propedeutico ai veri e propri studi di microzonazione sismica, in quanto consiste nella messa a punto di un quadro conoscitivo generale in base a dati preesistenti ed indagini a basso costo realizzate ex-novo. L'obiettivo è l'individuazione in pianta di una serie di settori definiti "microzone" all'interno dei quali è possibile ipotizzare un comportamento sismico dei terreni omogeneo.

**Livello 2:** introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee definite nel livello 1. A ciascuna microzona viene associato un fattore di amplificazione (FA) computato attraverso appositi abachi realizzati "ad hoc" per tutto il territorio regionale in base alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e sismiche.

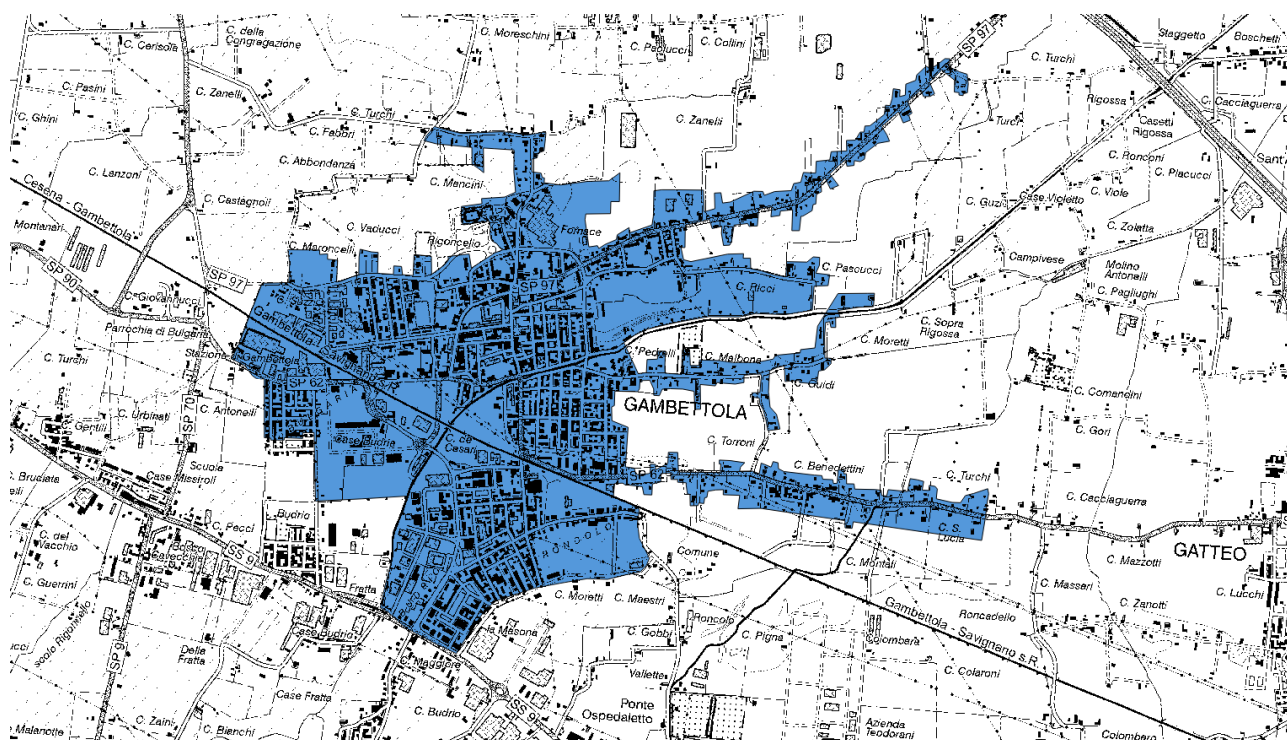
**Livello 3:** restituisce una carta di microzonazione sismica con approfondimenti su tematiche o aree particolari (p.es. fenomenologie legate a cedimenti e liquefazione).

Nel presente rapporto tecnico-scientifico vengono illustrati gli elaborati e i prodotti informatici relativi alle indagini e agli studi svolti nell'ambito della Microzonazione Sismica di I-II Livello e con approfondimenti di III livello di analisi, delle aree urbanizzate e urbanizzabili presenti nel territorio comunale di Gambettola (FC), (figura 2.2). In Tabella 2.1 è riportata una sintesi della documentazione e degli elaborati cartografici redatti per il presente studio:

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

*Tabella 2.1 – sintesi della documentazione e degli elaborati cartografici in allegato alla relazione*

<b>Titolo Elaborato</b>	<b>Scala</b>	<b>N° tavole</b>
Carta delle Indagini	Scala 1:5.000	1
Carte delle Frequenze naturali dei Terreni (F0)	Scala 1:5.000	1
Carta Geologico Tecnica	Scala 1:5.000	1
Carta delle MOPS	Scala 1:5.000	1
Carta delle Velocità delle onde di taglio S	Scala 1:5.000	1
Carta isopotenziali di liquefazione	Scala 1:5.000	1
Carte di Microzonazione sismica di II e III Livello	Scala 1:5.000	12



 Aree abitate ISTAT oggetto di studio

*Figura 2.2- Centri abitati ISTAT nell'ambito del territorio urbanizzato/urbanizzabile del comune di Gambettola.*

### 3. SISMICITA' STORICA E PERICOLOSITA' DI BASE

Il territorio in studio del comune di Gambettola interessa un'area della Provincia di Forlì-Cesena e si estende su un'area complessiva di circa 7.84 km<sup>2</sup>, contando 10.688 abitanti (Figura 3.1), contraddistinto dal Codice Istat: 040015.

Per la definizione della sismicità storica del territorio in studio è stato consultato il Database Macrosismico Italiano DBMI15 (Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2021). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.3>). La successiva Tabella 3.1 riporta i principali eventi sismici (scesse principali "mainshock") risentiti nel comune in esame. Per ogni evento sismico sono riportate: data, area epicentrale, intensità epicentrale  $I_0$  (valori in scala MCS), magnitudo momento  $M_W$  (stimata da correlazioni empiriche o misurata) e intensità al sito  $I_s$  (MCS).



Figura- 3.1: Evidenziato in rosso il territorio appartenente al comune di Gambettola nel settore sud orientale della Provincia di Forlì-Cesena, oggetto del presente studio di MS.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

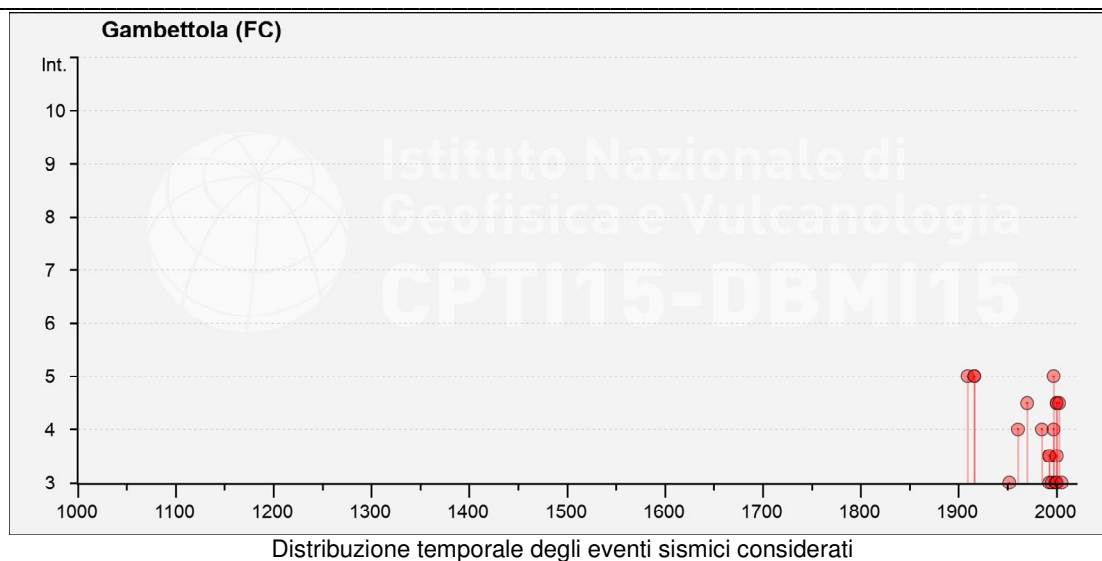
Tabella 3.1 – Storia sismica del Comune di **GAMBETTOLA** (estratta dal DBMI15).

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
5	<a href="#">🔗</a>	1909	01	13	00	45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
5	<a href="#">🔗</a>	1916	05	17	12	50	Riminense	132	8	5.82
5	<a href="#">🔗</a>	1916	08	16	07	06 14	Riminense	257	8	5.82
3	<a href="#">🔗</a>	1952	12	02	06	13 22	Appennino forlivese	53	5	4.42
4	<a href="#">🔗</a>	1961	05	08	22	45 51	Forlivese	40	5	4.37
4-5	<a href="#">🔗</a>	1970	09	26	16	42 28	Cesenate	18	4-5	3.93
4	<a href="#">🔗</a>	1985	11	24	06	54 0	Appennino forlivese	29	5-6	4.29
NF	<a href="#">🔗</a>	1986	12	06	17	07 1	Ferrarese	604	6	4.43
3-4	<a href="#">🔗</a>	1993	11	05	02	01 0	Cesenate	10		3.99
3-4	<a href="#">🔗</a>	1993	11	07	23	21 1	Cesenate	36	4-5	3.95
3	<a href="#">🔗</a>	1993	11	09	13	46 2	Cesenate	28	4-5	3.93
3	<a href="#">🔗</a>	1995	12	27	23	44 2	Forlivese	37	5	3.97
4	<a href="#">🔗</a>	1997	09	26	00	33 1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
5	<a href="#">🔗</a>	1997	09	26	09	40 0	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
3	<a href="#">🔗</a>	1999	01	25	22	45 5	Appennino forlivese	97	5	4.36
3	<a href="#">🔗</a>	2000	05	06	22	07 0	Faentino	85	5	4.08
4-5	<a href="#">🔗</a>	2000	05	08	12	29 0	Faentino	126	5	4.67
3-4	<a href="#">🔗</a>	2000	05	10	16	52 0	Faentino	151	5-6	4.82
4-5	<a href="#">🔗</a>	2000	08	01	02	34 31	Montefeltro	84	5-6	4.27
2	<a href="#">🔗</a>	2001	11	26	00	56 5	Casentino	211	5-6	4.63
2	<a href="#">🔗</a>	2002	11	02	10	57 4	Ferrarese	79	4	4.21
4-5	<a href="#">🔗</a>	2003	01	26	19	57 0	Appennino forlivese	35	6	4.66
2-3	<a href="#">🔗</a>	2003	01	29	23	50 1	Appennino forlivese	71	4-5	4.06
2	<a href="#">🔗</a>	2003	12	07	10	20 3	Forlivese	165	5	4.18
3	<a href="#">🔗</a>	2005	07	15	15	17 18	Forlivese	173	4-5	4.29
NF	<a href="#">🔗</a>	2006	10	21	07	04 1	Anconetano	287	5	4.21

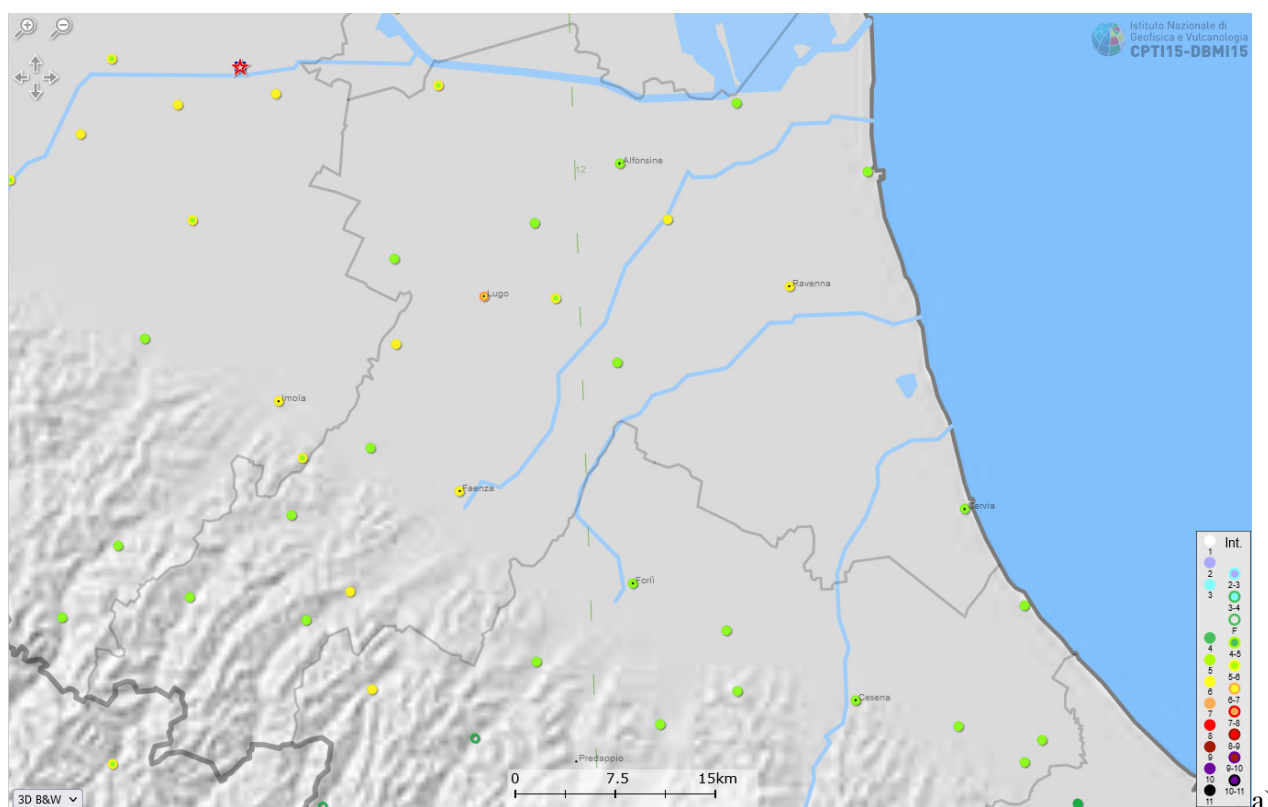
Estratto della tabella esplicativa riportante i parametri che costituiscono il formato sintetico del database:

Field	Description	
<b>N</b>	Record number (in chronological order)	<b>Se</b> Origin time: seconds
<b>Year</b>	Origin time: year	<b>EpicentralArea</b> Epicentral area or area of the largest macroseismic effects
<b>Mo</b>	Origin time: month	<b>Mw</b> moment magnitude
<b>Da</b>	Origin time: day	<b>NMDP</b> Number of macroseismic data point
<b>Ho</b>	Origin time: hour	<b>Imax</b> Maximum intensity
<b>Mi</b>	Origin time: minutes	<b>Io</b> Epicentral intensity
		*N.F (not felt-non avvertito)

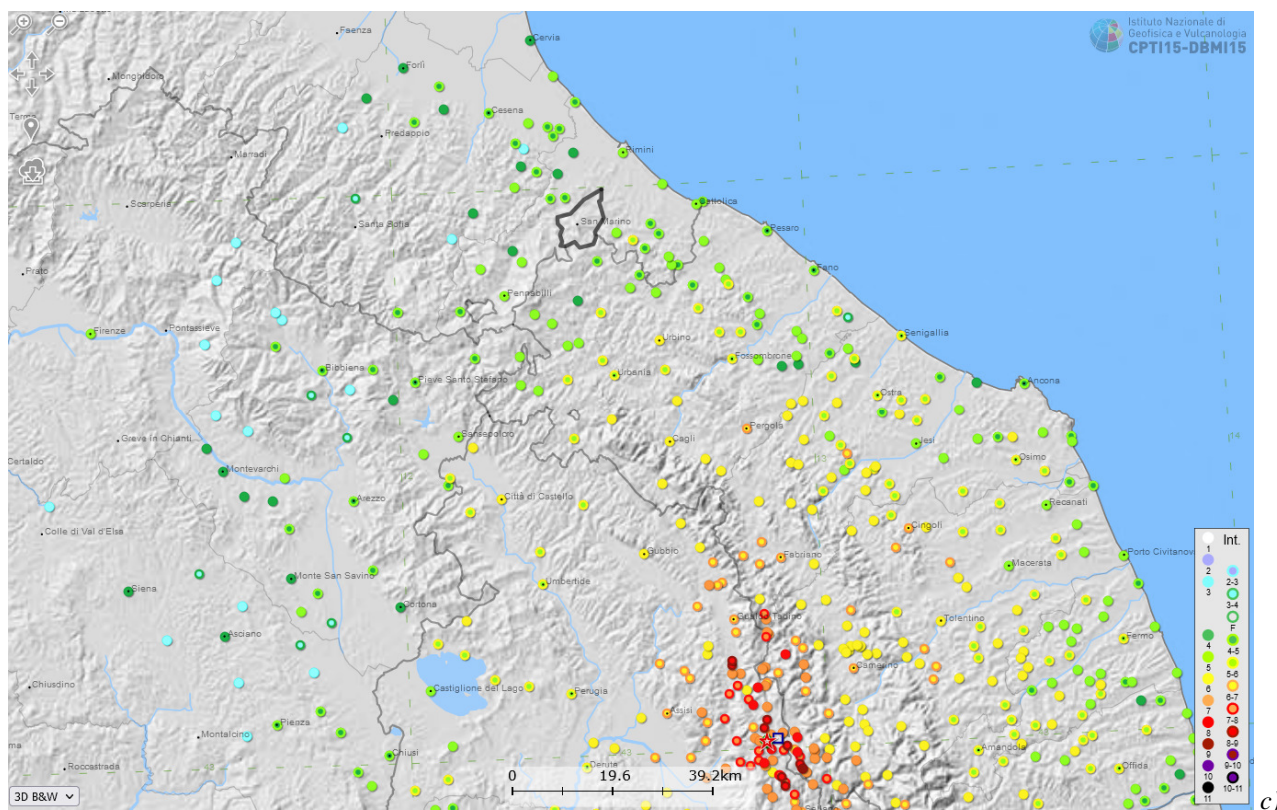
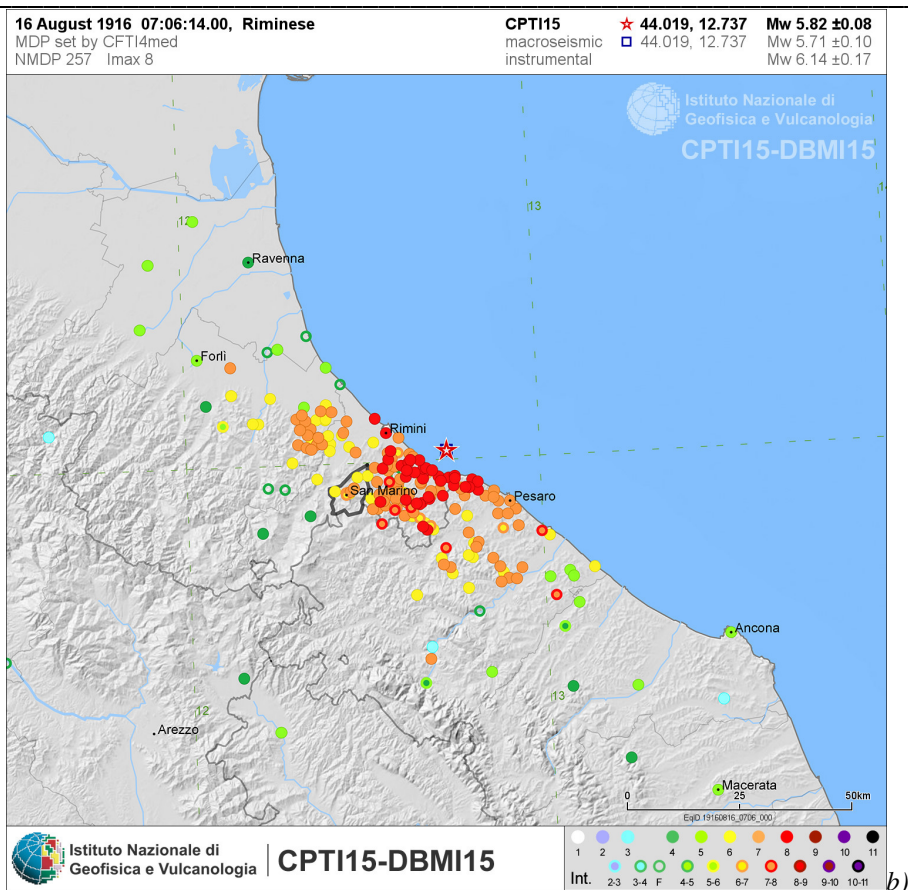




L'esame della storia sismica risulta carente di informazioni storiche (verosimilmente a causa dello sviluppo recente dell'abitato) e, tuttavia, indica quali eventi di maggior rilevanza: il terremoto dell' "Emilia Romagna orientale" del 1909, quello "Riminense" del 1916 e quello dell' "Appennino umbro-marchigiano" del 1997. Tali sismi, hanno generato in prossimità della zona epicentrale il massimo risentimento e danno ( $VI \leq I_s \leq IX$  MCS), mentre in corrispondenza dell'area in studio hanno determinato un risentimento massimo pari a  $I_s = V$ . Di seguito si riportano quindi gli stralci dei risentimenti macrosismici INGV rilevati per questi principali eventi. Inoltre in fig. 3.3 si propongono le carte delle isosisme ricostruite da INGV per i maggiori terremoti storici della Romagna.

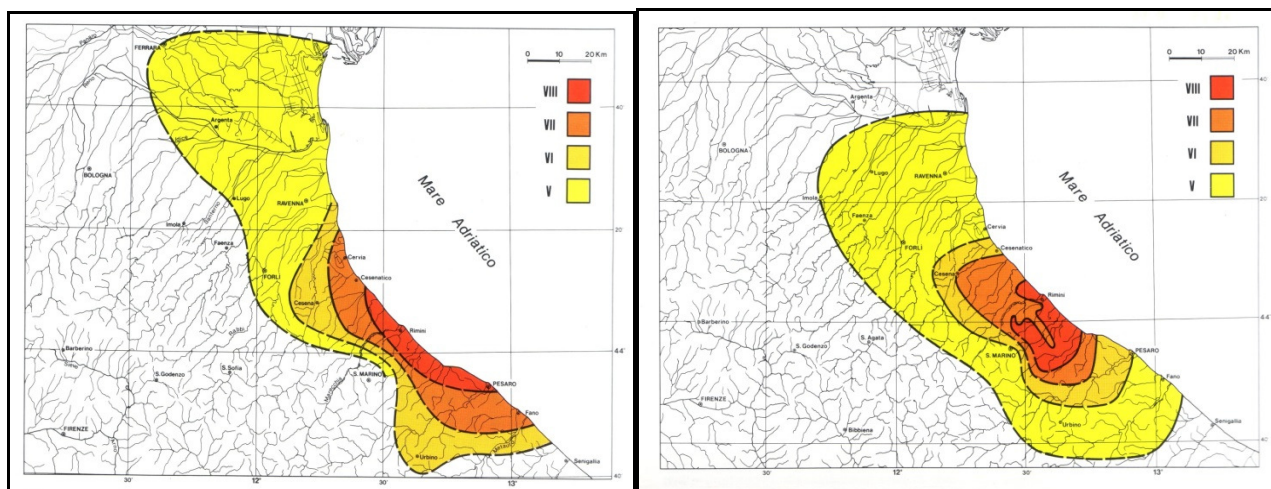


*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**



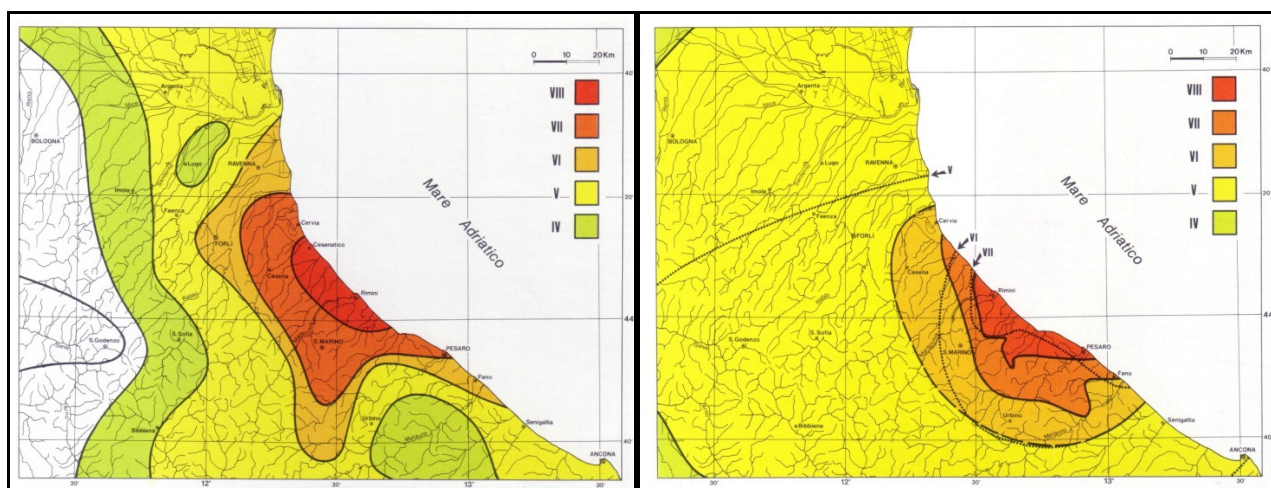
**Figura- 3.2: Stralci carte del risentimento macrosismico DBMI15 – a) terremoto Emilia Romagna orientale, 1909; b) terremoto Riminese, agosto 1916; c) terremoto Appennino umbro-marchigiano, 1997.**





**Terremoto del 14 aprile 1672**

**Terremoto del 25 dicembre 1786**



**Terremoto del 17 marzo 1875**

**Terremoto del 17 maggio – 16 agosto 1916**

*Figura - 3.3: Carte delle isosisme in cui le aree colorate dal rosso al verde corrispondono a parti di territorio colpite da effetti di severità decrescente. (DISS3/INGV).*

In base alla disposizione degli epicentri, nonché da una verifica sul database DISS 3.2 e 3.3 (Database of Individual Seismogenic Sources) realizzato dal'INGV, è possibile risalire alle aree sismogenetiche che hanno contribuito alla sismicità storica della zona in studio ed alla pericolosità sismica dell'area (vedi fig. 3.4); in tal caso, a parte il risentimento lontano del sisma dell' "Appennino umbro-marchigiano" del 1997, si tratta di sistemi di faglia appenninici e costieri prevalentemente di natura compressiva.

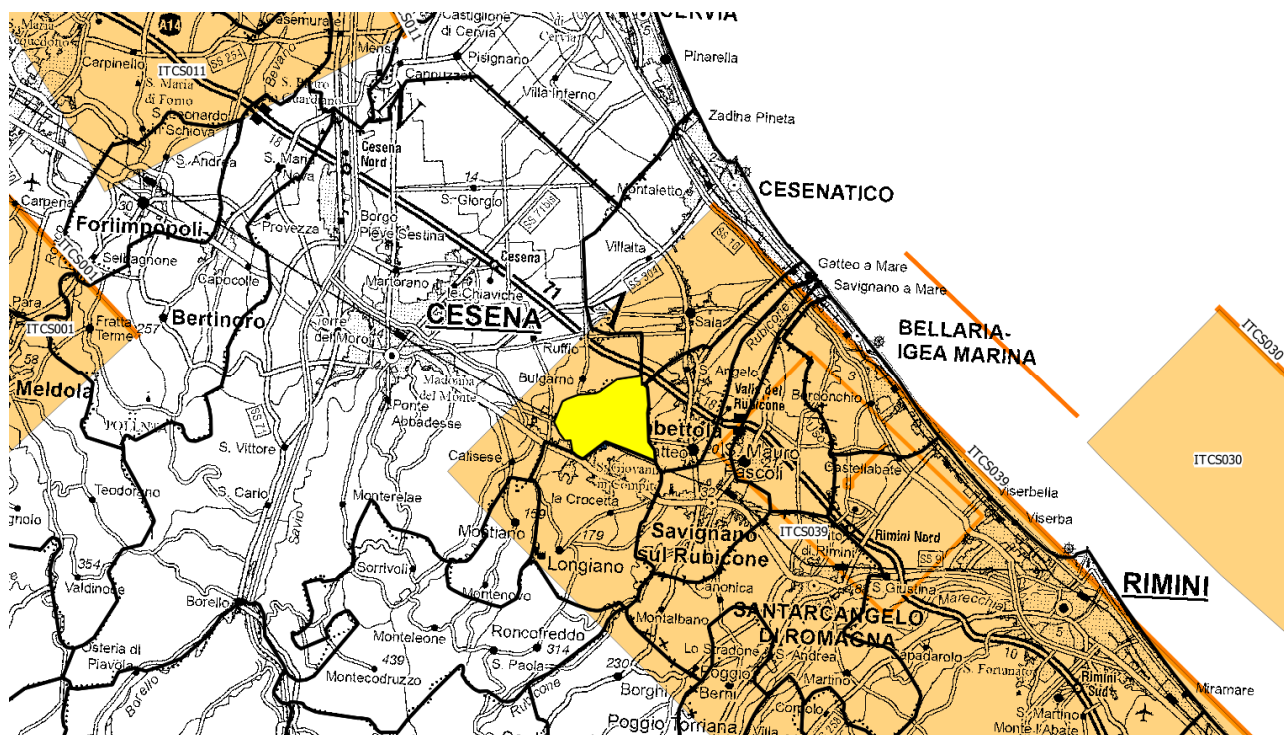
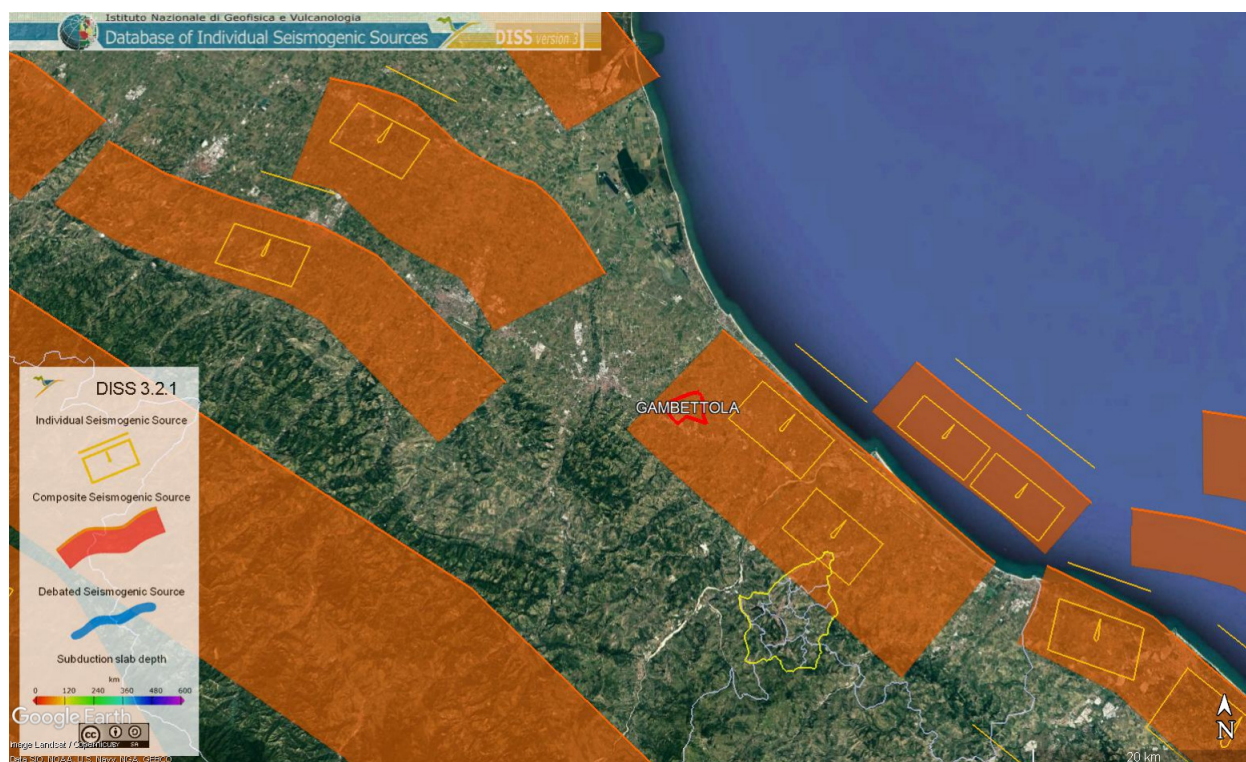
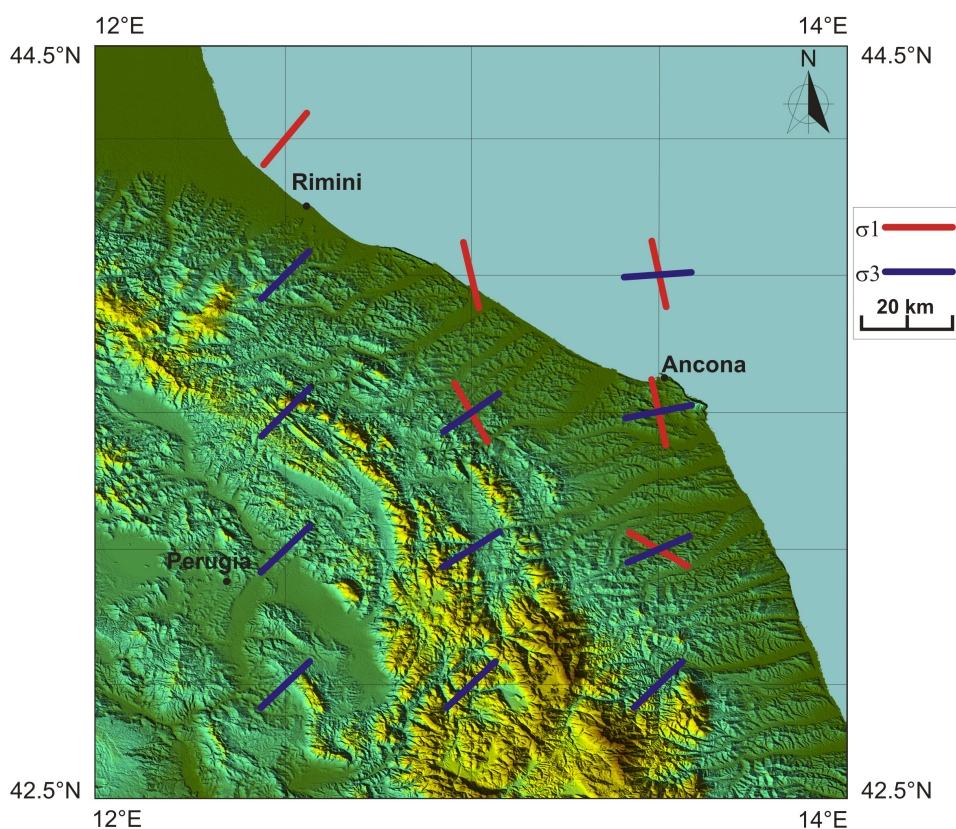


Figura – 3.4: Sorgenti sismogenetiche (Id-Nome-Max Magnitudo) individuate dal catalogo DISS 3.3.0 (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Come riportato da “La sismicità della zona costiera adriatica nord-marchigiana di Stefano Mazzoli e Chiara Macchiavelli” si trae che studi effettuati in tempi recenti da gruppi di ricerca (Borraccini et alii, 2002, 2005;



Di Bucci et alii, 2003; Santini et alii, 2011; Macchiavelli et alii, 2012), la sismicità della zona costiera e delle Marche settentrionali mostra un comportamento complesso, caratterizzato da una notevole variabilità delle orientazioni degli assi di massima e minima compressione (Fig. 3.5)



*Figura 3.5 – Proiezione in mappa degli assi di massima compressione ( $\sigma_1$ ) e minima compressione ( $\sigma_3$ ) per l'area umbro-marchigiano-romagnola (da Macchiavelli et alii, 2012).*

Nonostante un notevole dibattito scientifico esista circa la cinematica delle faglie attive ed campo di stress attualmente dominante nell'area d'interesse (Frepoli & Amato, 1997, 2000; Montone et alii, 1999, 2004, 2012; Boncio et alii, 2000; Di Bucci & Mazzoli, 2002; Vannoli et alii, 2004; Chiarabba et alii, 2005; Pondrelli et alii, 2006; Basili et al., 2007; Boncio & Bracone, 2009; Piccinini et alii, 2009; Pierdominici et alii, 2012; Macchiavelli et alii, 2012), tutti gli Autori concordano sul fatto che le faglie attive principali che controllano la sismicità dell'area siano rappresentate da strutture con direzione circa parallela alla costa e immersione dominante verso sud-ovest (costituite, almeno originalmente, da faglie inverse).

Inoltre dai diagrammi di disaggregazione per magnitudo (M) e distanza (R) in Figura 3.6 ( $T_r$  475 anni), desunti dal Progetto DPC-INGV-S1 (2006) e Iervolino et Al. 2011, si osserva come i maggiori contributi alla pericolosità dell'area siano legati al sistema di faglie costiere adriatiche (onshore e offshore) ed appenniniche entro i 20 Km di distanza (valore medio  $R < 10$  km). In maniera minore sembrano intervenire, quindi, i grandi sistemi appenninici conosciuti in letteratura come Etrurian Fault System (EFS) e Umbria Fault System.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

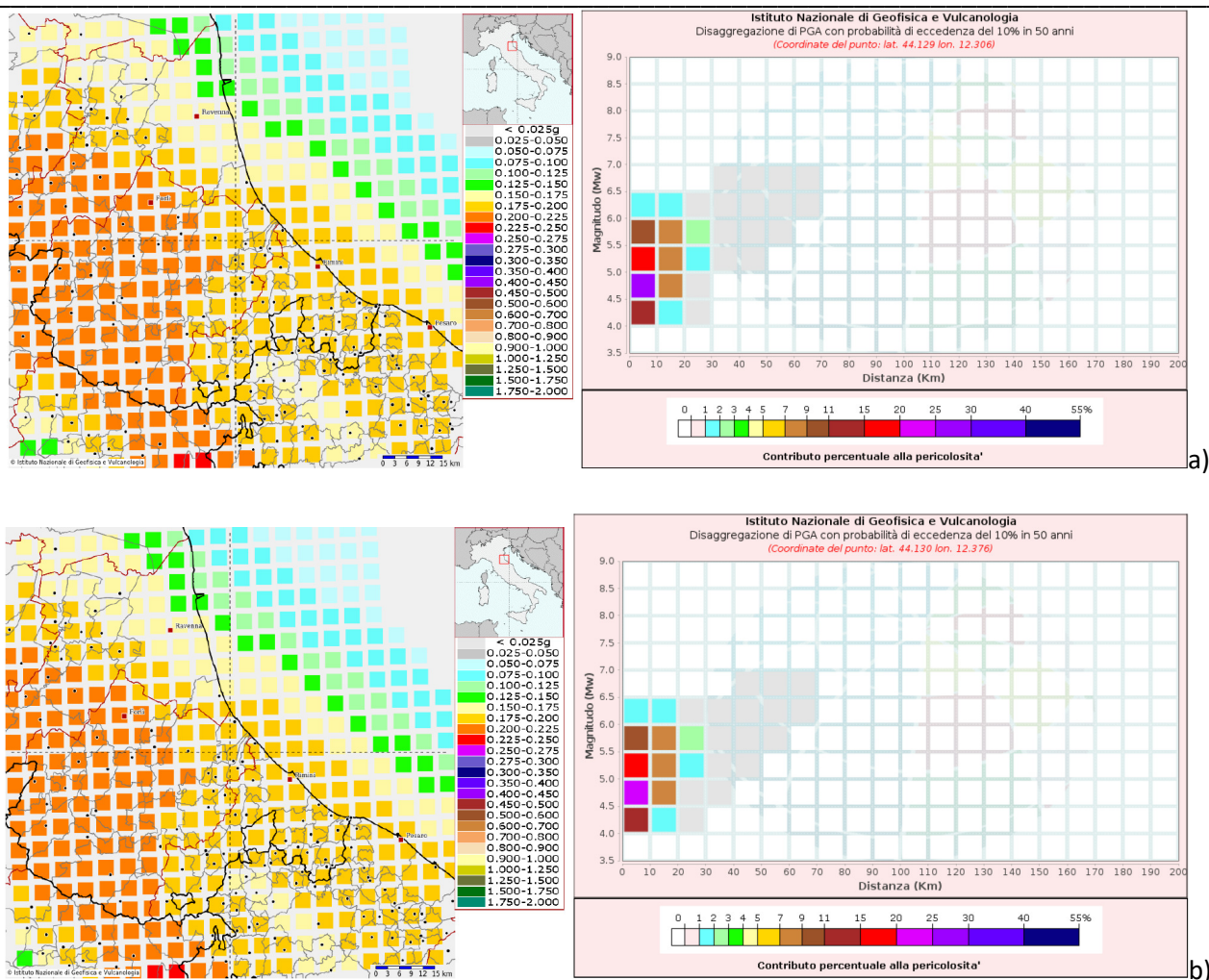
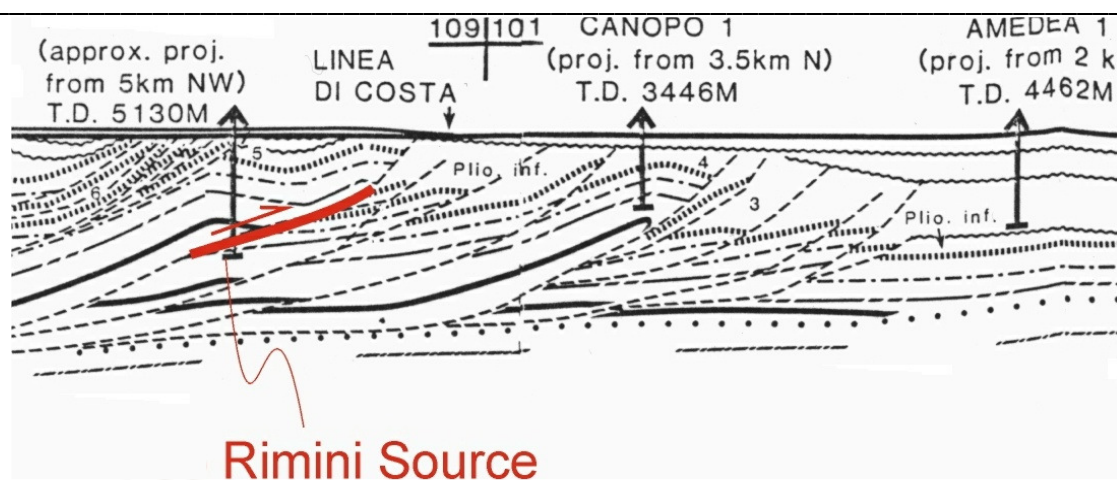


Figura 3.6 – Diagramma di disaggregazione riferito ai nodi del reticolo INGV ID-18520 a) e ID-18521 b).

Nelle tabelle 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 vengono indicate le caratteristiche generali dei principali sistemi sismogenetici composti **ITCS039-030-011-001** sulla base di evidenze empiriche e dati di letteratura da catalogo DISS 3.3.3:

Tabella 3.7 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS039 (da DISS 3.3.0).

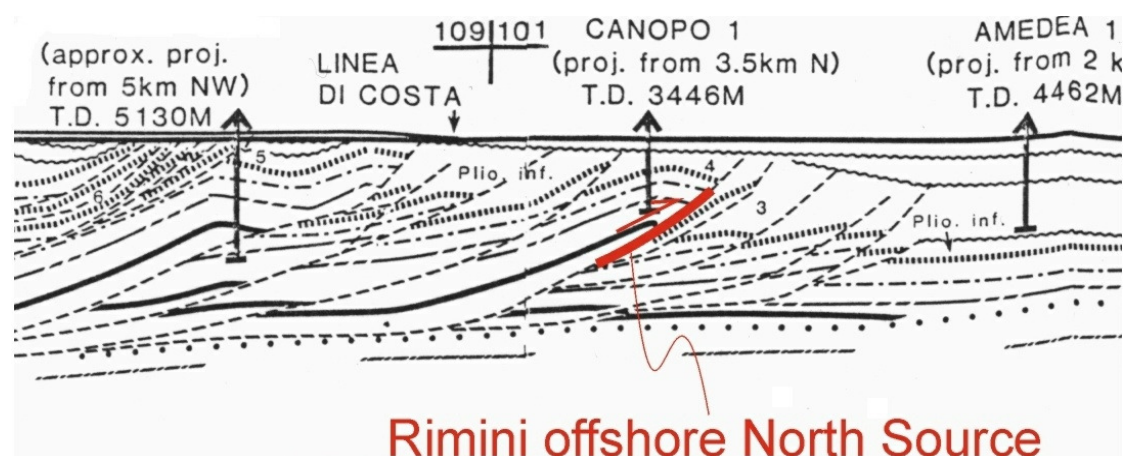
<b>ITCS039 – RIMINESE ONSHORE</b>	
Min Depth (km)	2
Max Depth (km)	10
Strike (deg)	120 - 140
Dip (deg)	25 - 35
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	1.0 - 1.07
Max Magnitude (Mw)	7.0



Sorgente sismogenetica ITC039 - Riminese "on-shore" proiettata su Sezione Amedea-M.te.Amiata di Bally et al. [1986]. Basili, R., U. Fracassi and S. Mariano 2006

Tabella 3.8 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS030 (da DISS 3.3.0).

<b>ITCS030 – RIMINESE OFFSHORE SOUTH</b>	
Min Depth (km)	3
Max Depth (km)	7
Strike (deg)	120 - 140
Dip (deg)	25 - 35
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	0.2 - 0.52
Max Magnitude (Mw)	6.2

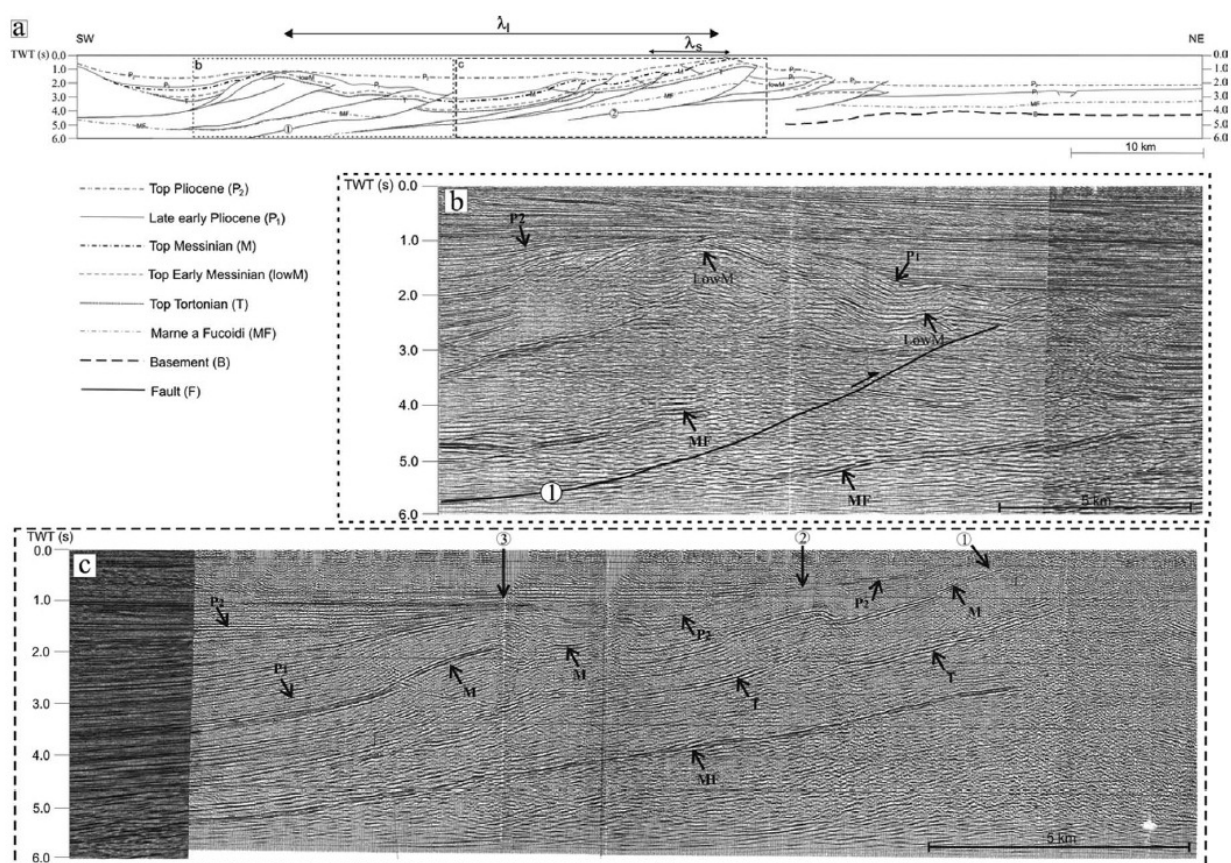


Sorgente sismogenetica ITC030 - Riminese "off-shore" proiettata su Sezione Amedea-M.te.Amiata di Bally et al. [1986]. Basili, R., U. Fracassi and S. Mariano 2006.



*Tabella 3.9 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS011 (da DISS 3.3.0).*

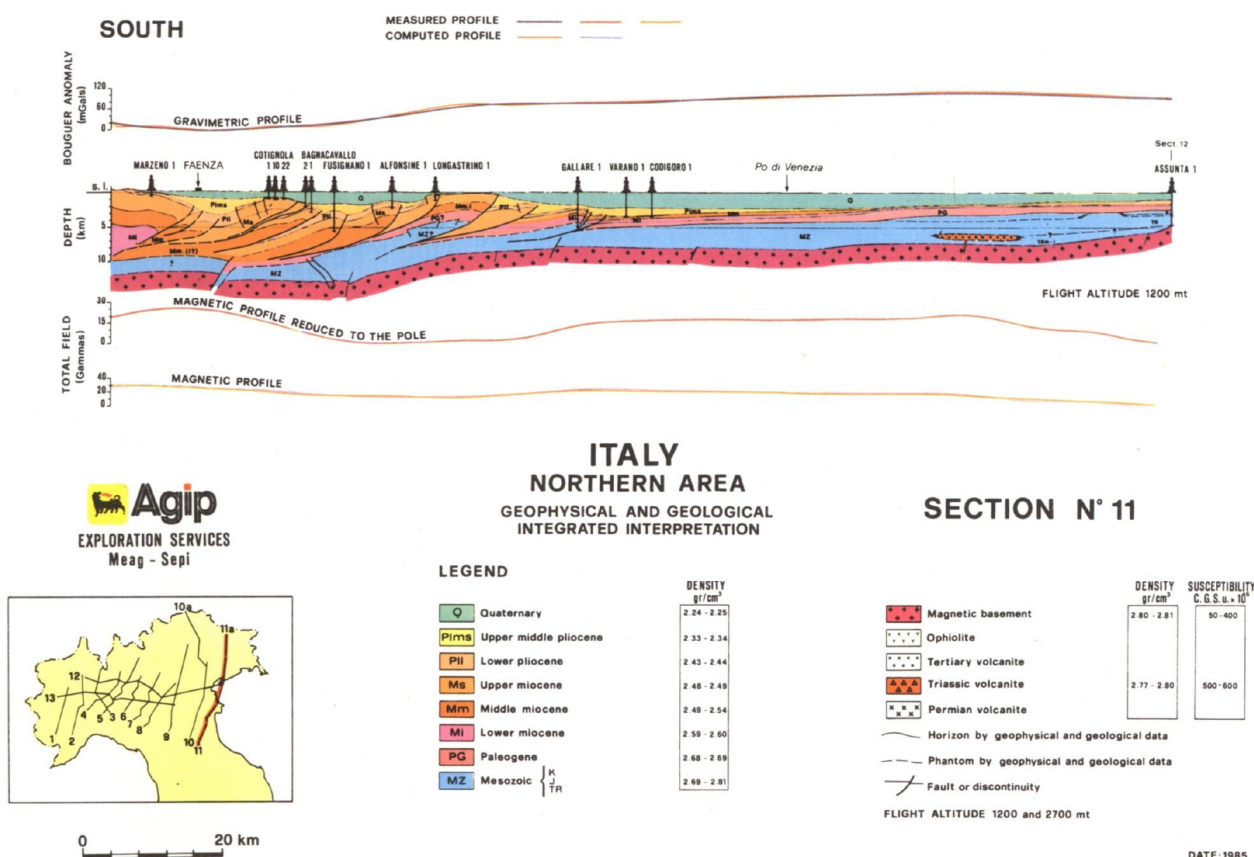
<b>ITCS011 – ASCENSIONE ARMAIA</b>	
Min Depth (km)	2
Max Depth (km)	10
Strike (deg)	110 - 140
Dip (deg)	25 - 45
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	0.15 – 0.33
Max Magnitude (Mw)	7.0



*Seismic profile across the eastern Ferrara-Romagna Arc, (From Massoli et al. [2006]).*

*Tabella 3.10 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS001 (da DISS 3.3.0).*

<b>ITCS001 – Castel San Pietro Terme/Meldola</b>	
Min Depth (km)	2
Max Depth (km)	8
Strike (deg)	110 - 140
Dip (deg)	30 - 40
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	0.24 – 0.63
Max Magnitude (Mw)	6.5



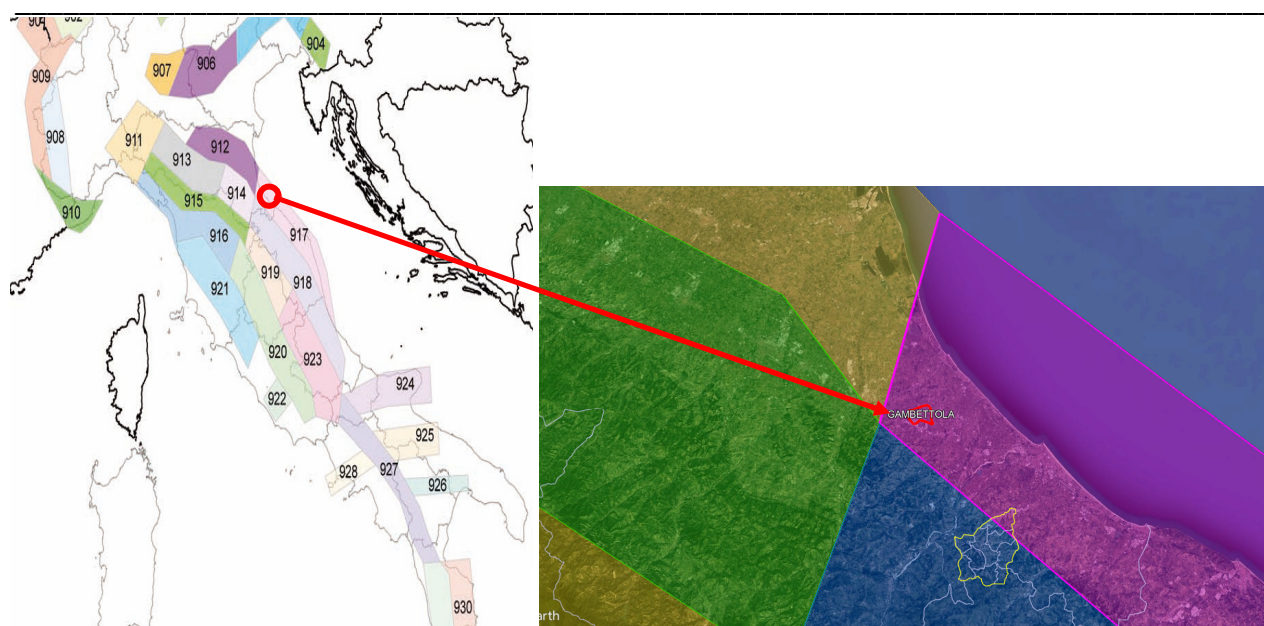
AGIP subsurface geology section. Oil industry geological cross-section. The Faenza Source corresponds with the thrust front at the mountain margin and it is internal with respect to the outermost Ferrara thrust front. Quaternary deposits do not appear to be involved in the deformation probably due to low resolution of the section in the uppermost stratigraphic section (from Cassano et al. [1986]).

In fine per quanto attiene la stima dei valori di Mw attesi nell'area può essere utilizzato lo studio ZS9 del 2004 ("Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica" dell'INGV), il quale è una rielaborazione della precedente sismozonazione ZS4 (Meletti et al, 2000), ripensata in base sia a nuove valutazioni del potenziale sismogenetico sia rispetto a nuove analisi eseguite sui terremoti storici e considerazioni statistiche.

La zona di studio ricade entro la zona "Rimini-Ancona" definita come ZS n. 917 (ad est) come evidenziato in figura 3.7.

Le caratteristiche associate a tali zone prevedono:

- Un meccanismo focale prevalente.
- Una Magnitudo Momento Massima "Osservata" (Mw-max1) definita sia dalle analisi legate agli eventi storici sia su basi geologiche legate al Database of Individual Seismogenic Sources (DISS).
- Una Magnitudo Momento Massima "Cautelativa" (Mw-max2) definita aggiungendo un margine di sicurezza rispetto alla Mw-max1 in relazione alle conoscenze strutturali, geofisiche e sismologiche.



*Figura 3.7–Dettaglio della Zonazione Sismogenetica ZS9 (“Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica” dell’INGV, 2004). Evidenziata in viola la ZS n. 917 “Rimini-Ancona”.*

Per cui in base alla zonazione ZS9 si possono assumere i seguenti parametri:

<b>Zone</b>	<b>917</b>
<b>Meccanismo focale</b>	<b>inverso</b>
<b>Mw-Max</b>	<b>6.14</b>

Tali valori risultano sostanzialmente in linea con la recente carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna – Edizione 2016, di cui in figura 3.8a e 3.8b se ne riporta uno stralcio illustrativo.

Anche in quest’ultima zonazione proposta dalla regione le aree in studio ricadono prevalentemente nella Zona 4 (mentre una piccolissima appendice meridionale del territorio comunale ricade a cavallo delle zone 17 e 20), per la quale i meccanismi focali associabili alle principali faglie attive risultano prevalentemente di tipo inverso, con una orientazione caratteristica SW/30 (direzione di immersione) e profondità ipocentrali comprese fra 5-15 km; la magnitudo massima ivi osservata storicamente risulta pari a  $M_w=6.1$ , mentre quella massima calcolata per scenari futuri, sulla base dei modelli di analisi adottati, porta a valori pari a  $M_{wmax}= 6.16\pm0.21$ .

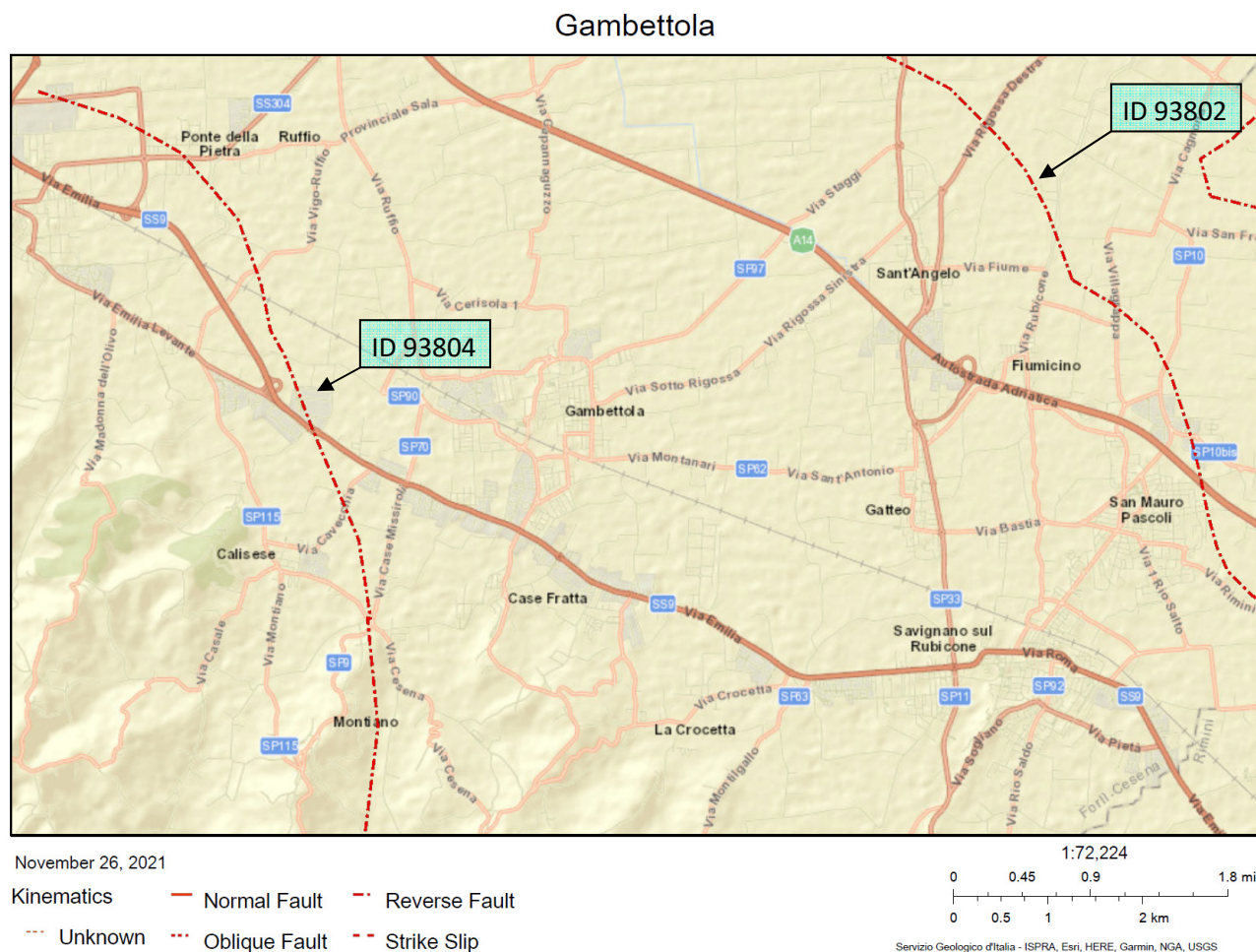




Fig. 3.8 - Stralcio cartografia zonazione carta sismotettonica 2016 Emilia Romagna (a-b)

In conclusione si può osservare come diversi terremoti significativi verificatisi nella storia sismica della Romagna abbiano presentato delle magnitudo inferiori a 5/5.5 e grado di intensità MCS<7-8. Pertanto, considerati i cataloghi storici e le relative incertezze, gli studi dell'INGV, la zonazione ZS9 e le indicazioni I.C.M.S. nonché la recente Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, in relazione alle finalità e tipologia di studio, si ritiene adeguata una magnitudo momento massima di riferimento pari a **Mw=6.16**.

In figura 3.10 invece viene riportato un ulteriore dettaglio dell'area. Oltre alle zone sismogenetiche individuate dal DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia, in quest'altra figura vengono visualizzati gli andamenti delle principali faglie attive e capaci tratte dal catalogo *ITHACA* (ITHACA Working Group (2019). *ITHACA (Italy HAZard from Capable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>*).



*Figura 3.10 – Dettaglio catalogo ITHACA delle faglie attive e capaci e relativo codice identificativo.*

Dalla figure 3.10 si evince come il territorio comunale non sia interessato direttamente da alcuna struttura tettonica attiva e capace. Solo in prossimità ad W e NE dei confini, vengono individuate due strutture tettoniche con cinematismo “inverso” rispettivamente con direzione NNW-SSE, denominata “Cesena - Ravenna” (Fault code 93804) e con direzione NW-SE, denominata “F. Rubicone - Ravenna” (Fault code 93802); peraltro i dati disponibili nel catalogo ITHACA riportano una scarsa conoscenza di tali strutture, trattandosi di sovrascorrimenti profondi post-tortoniani dedotti (secondo carta geologica Web-Gis Emilia Romagna), così come non ci sono evidenze superficiali ne elementi noti su recenti attività, per cui la qualità delle informazioni è ritenuta bassa.

In conseguenza di ciò si può affermare che nel territorio oggetto di studio non vi siano situazioni accertate riconducibili a “zone di faglia attiva e capace” in grado di condizionare la pericolosità sismica locale e che, pertanto, possano essere segnalate negli studi di Microzonazione Sismica, come previsto negli I.C.M.S. (gruppo di lavoro MS 2008), nella versione 1.0 a titolo “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci FAC”.



Per completare l'inquadramento sismico dell'area, in accordo con quanto descritto nell'Allegato A4 alla Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, per ciascuna zona significativa interna al Comune in studio è possibile, infine, calcolare lo spettro di risposta elastico a probabilità uniforme che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) a partire da un moto di riferimento al bedrock ( $a_{refg}$ ).

La definizione del moto sismico di riferimento (in termini di  $a_{refg}$  al bedrock) si basa sui valori di pericolosità elaborati da INGV per il territorio nazionale resi disponibili per il territorio regionale sui punti di una griglia con passo 0.05 gradi (circa 5.5 km) nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema "Sismica Microzonazione Sismica".

Il valore di  $a_{refg}$  relativo a ciascun sito analizzato si ottiene quindi interpolando i valori di  $a_{refg}$  definiti nei punti della griglia più prossimi al sito oppure utilizzando il valore del punto della griglia più vicino (nodi ID-18520 e ID-18521). Tale valore corrisponde all'accelerazione di ancoraggio prevista al bedrock per lo spettro elastico normalizzato regionale e per cui:

- la forma dello spettro di risposta normalizzato è rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%);
- i valori di  $a_{refg}$  di ogni comune sono riferiti al 10% di probabilità di superamento in 50 anni;

In figura 3.11 viene illustrato uno stralcio di insieme della griglia di punti con i valori di  $a_{refg}$  di riferimento sostanzialmente derivato dal progetto DPC-INGV-S1; invece in figura 3.12 viene identificata la linea di demarcazione che suddivide il territorio comunale nelle due aree rispettivamente afferenti ai nodi ID-18520 e ID-18521 per la stima delle azioni sismiche di riferimento e successive analisi di RSL per il III Livello di approfondimento.

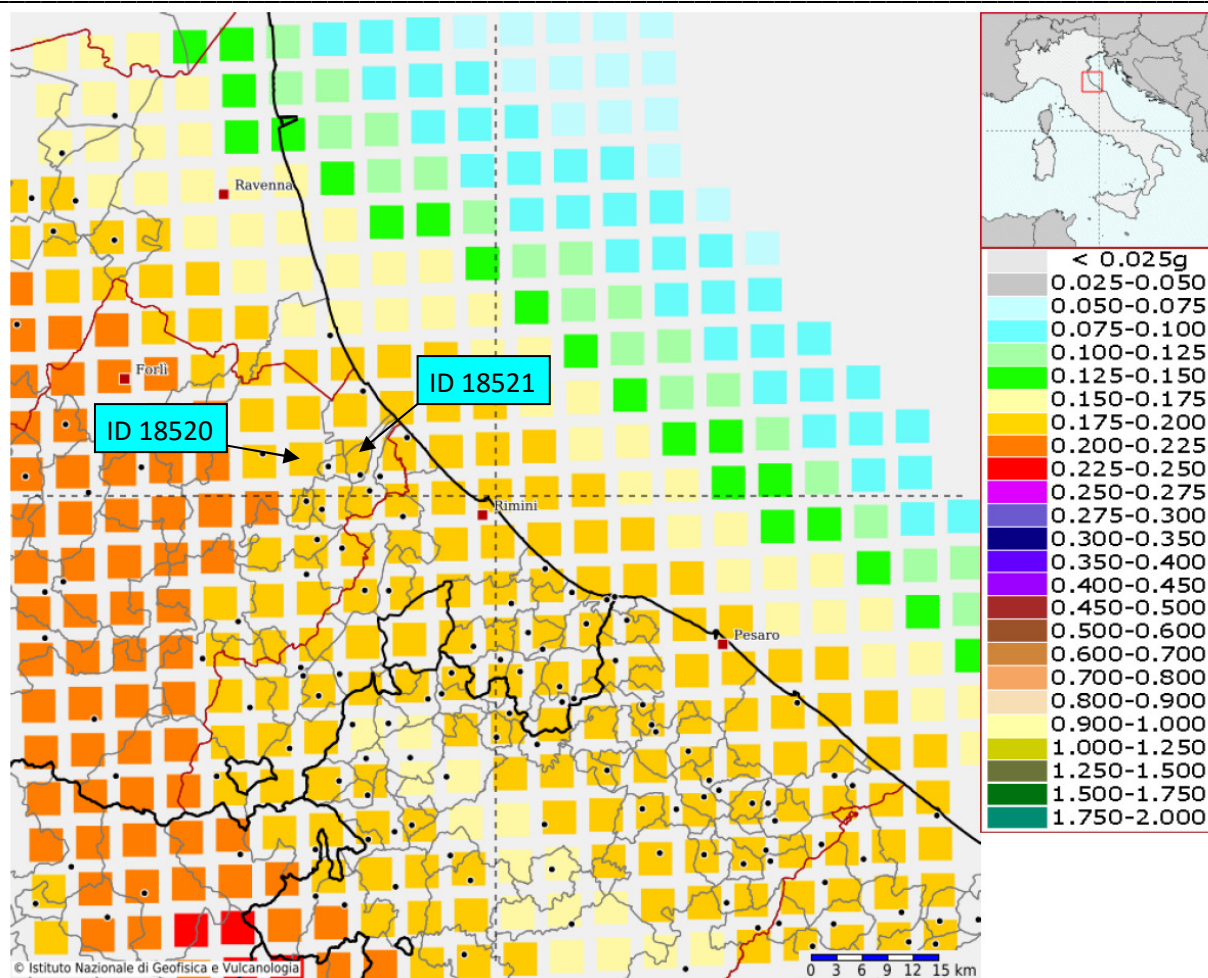


Figura 3.11 – Dettaglio griglia punti di analisi  $a_{ref}$  attraverso disaggregazione, progetto DPC-INGV-SI Web-Gis

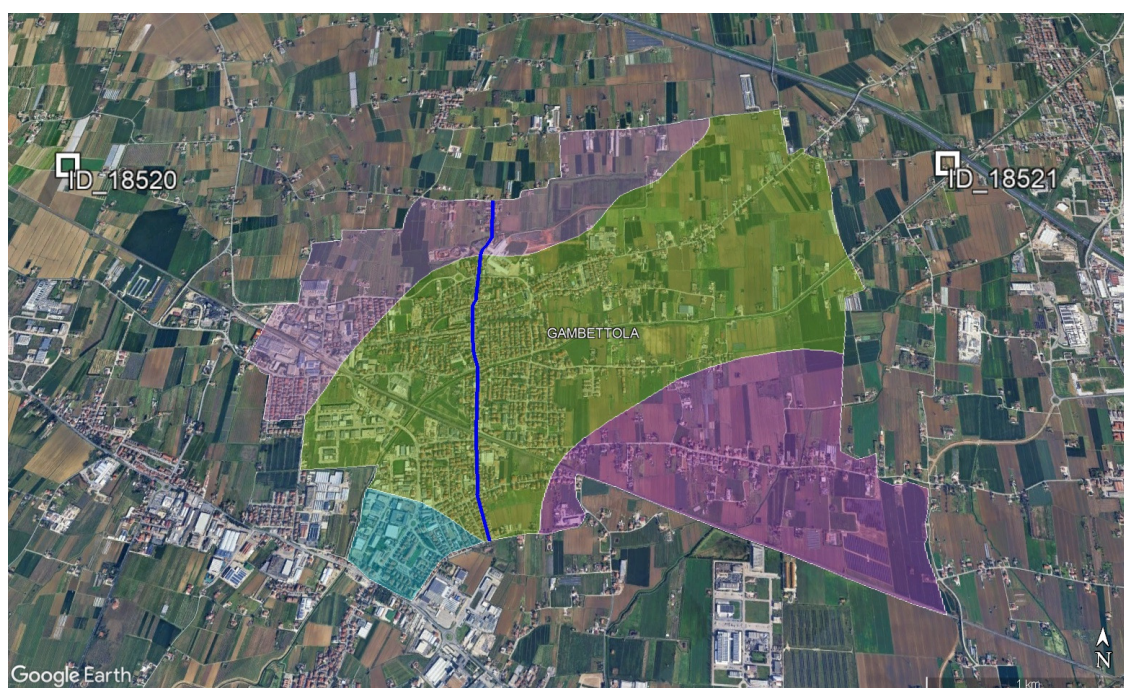


Figura 3.12 – Dettaglio linea di demarcazione (in blu) delle aree afferenti ai nodi ID-18520 (a sx) e ID-18521 (a dx).

## **4. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA**

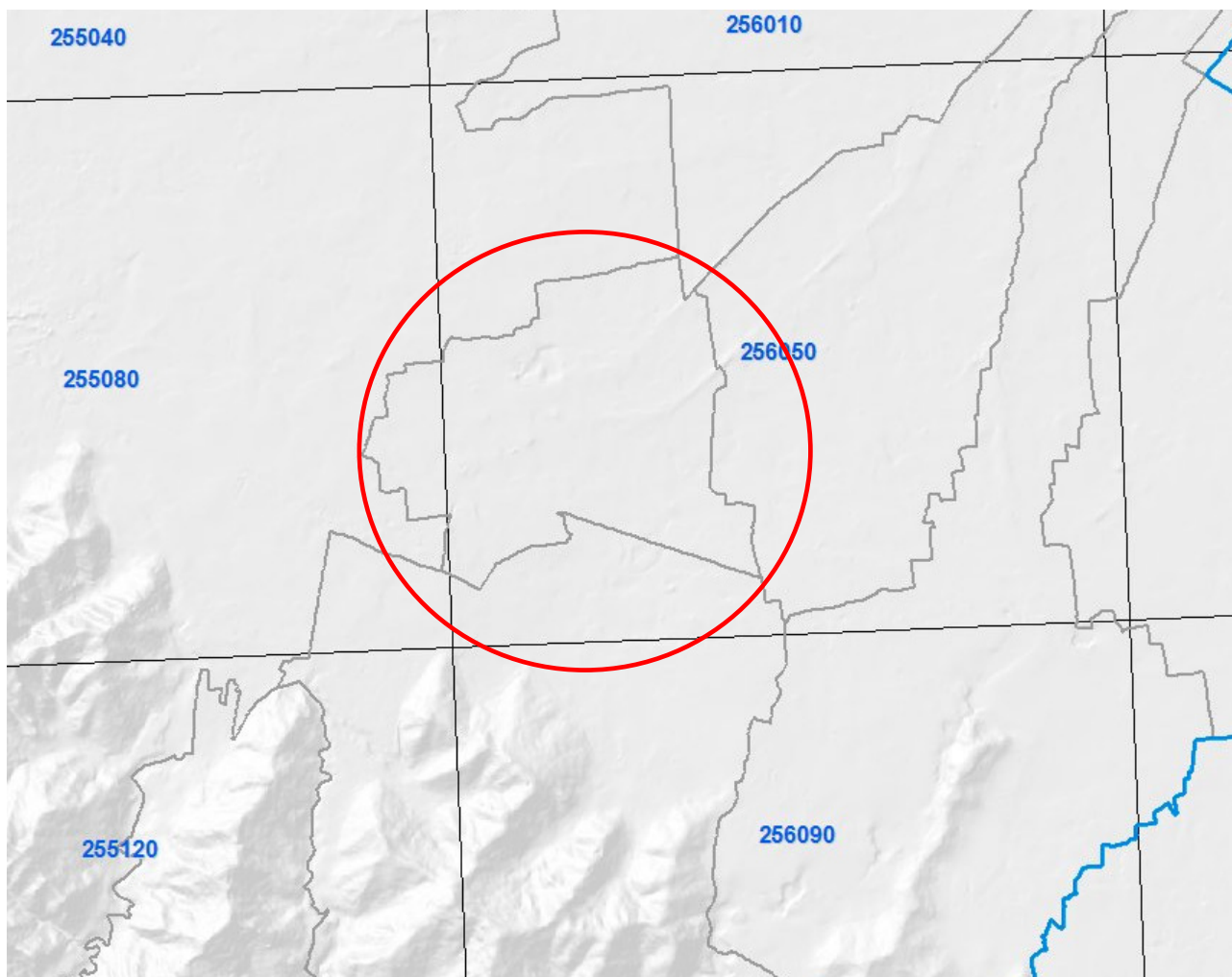
### **4.1. Cartografia di base**

Al fine di realizzare un corretto inquadramento del sito di interesse, è stata reperita la seguente documentazione pregressa:

- Carta Geologica D'Italia Foglio 255 (Cesena) e 256 (Rimini) scala 1:50.000 (Progetto Carg).
- Banca Dati della Carta Geologica in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna.
- Quadro Conoscitivo PTCP – PSC Provincia Forlì-Cesena
- PSC del Comune di Rimini.

### **4.2. Inquadramento geomorfologico**

Il territorio del comune di Gambettola è caratterizzato da una morfologia sostanzialmente pianeggiante che si sviluppa al piede delle ultime pendici collinari.



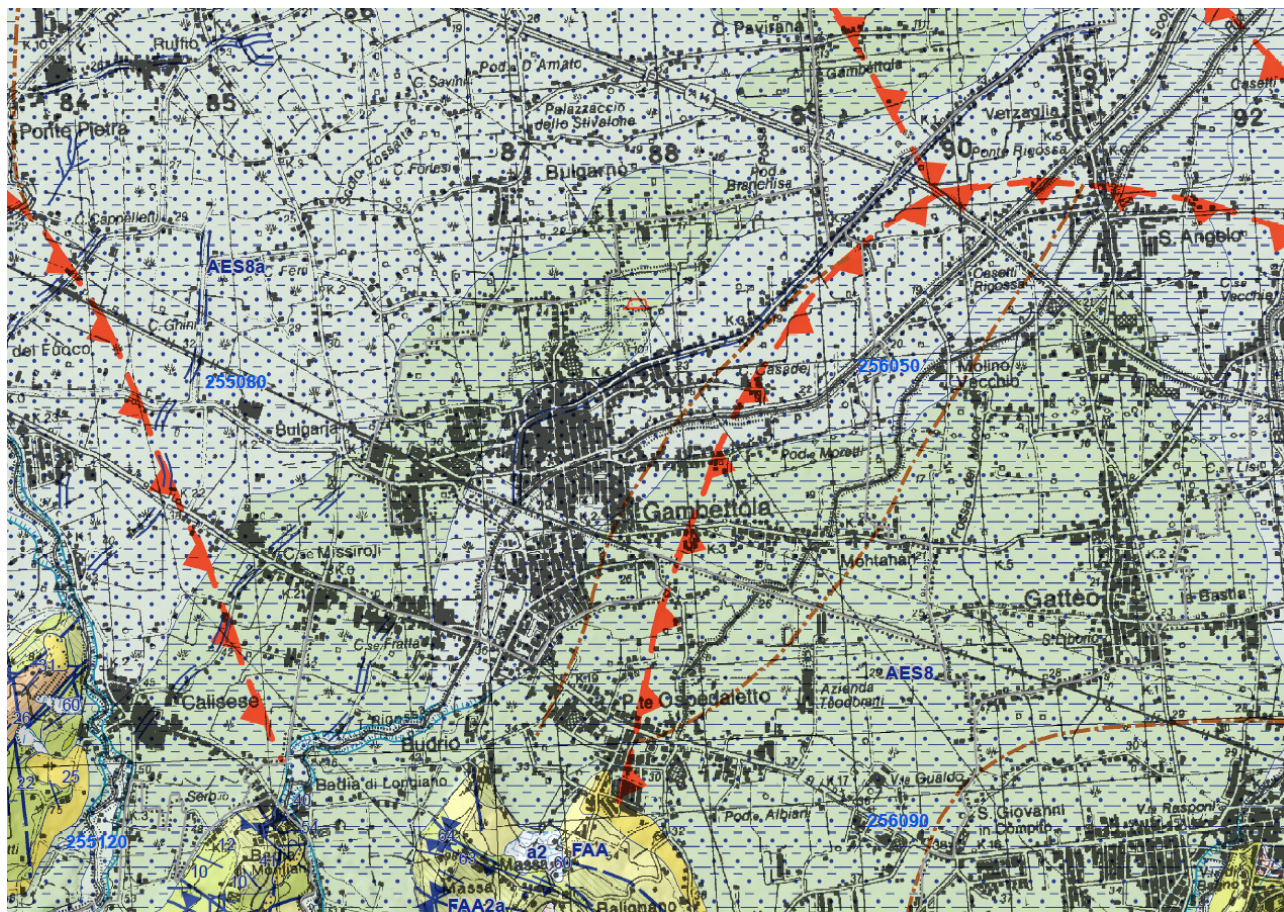
**Assetto morfologico del territorio del Comune di Gambettola**



Come si può osservare dalla carta sopra riportata, la morfologia è su-pianeggiante, modellata prettamente dai processi fluviali e relative strutture erosive/deposizionali. I corsi d'acqua principali nascono presso le vicine vallate intrappenniniche e risultano il Rio Baldone, Scolo Gambettola, Scolo Rigossa, Scolo Rigoncello, i quali alcuni chilometri più a valle arrivano a sfociare in mare.

La morfologia di piana alluvionale rappresenta l'intero territorio comunale. Parallelamente allo sviluppo dei corsi d'acqua principali si imposta altresì la viabilità principale di collegamento fra le varie frazioni e località.

Il territorio collinare del comune è quindi caratterizzato dalla presenza di lineamenti geologico-strutturali profondi (pieghe, contatti stratigrafici, ecc.) ad andamento prevalentemente appenninico orientato in direzione NW-SE impostati su formazioni geologiche plio-pleistoceniche marnoso-argilloso-arenacee (vedi figura sottostante), caratterizzate da coperture superficiali alluvionali di spessore talora significativo.



Le quote massime e minime rilevabili nell'ambito del territorio comunale, espresse in metri sul livello del mare, sono riportate nella seguente tabella riassuntiva:

Comune	Altitudine Minima	Altitudine Massima	Altitudine Media
<a href="#"><u>Gambettola</u></a>	14	34	31

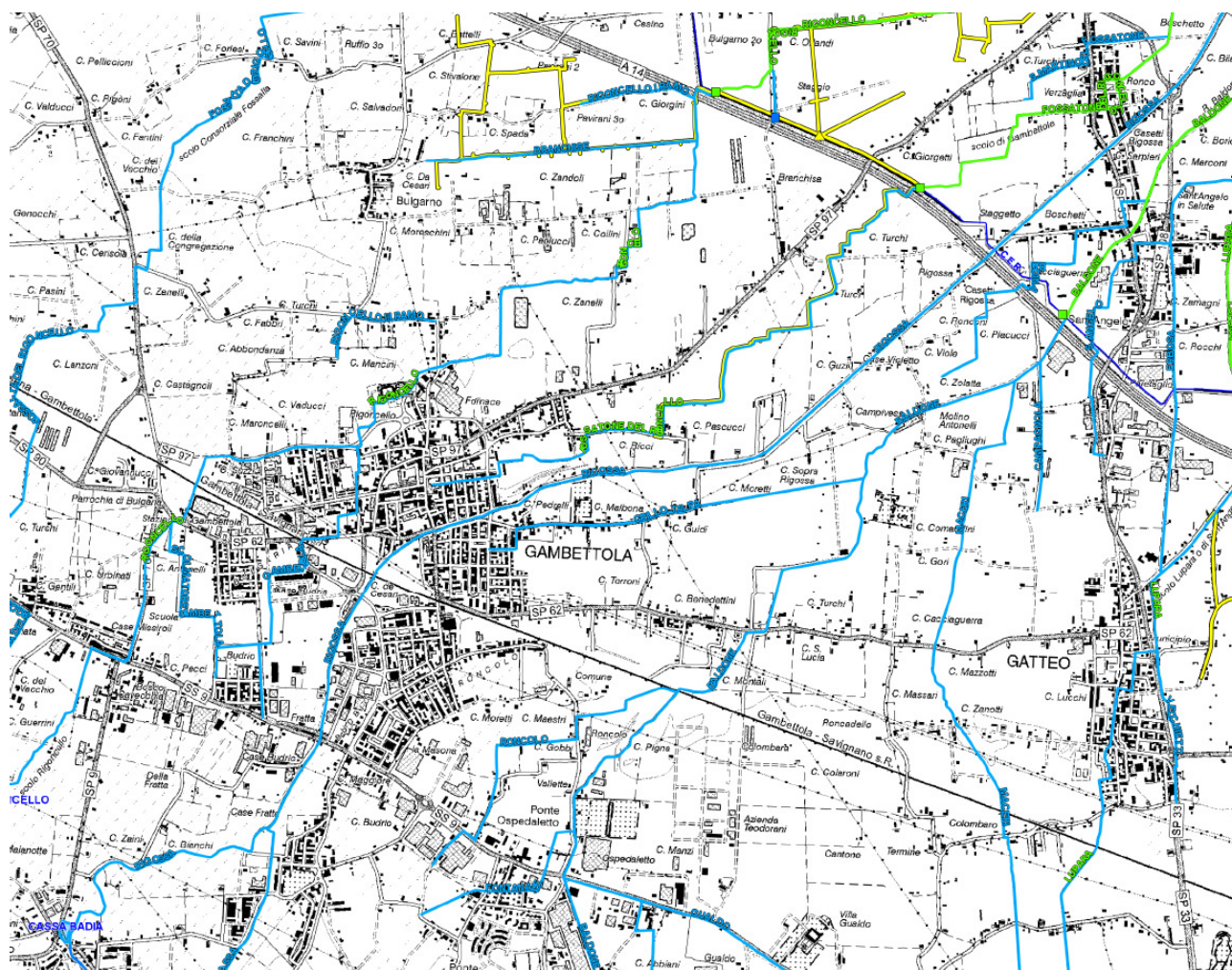


I depositi alluvionali superficiali risulta prevalentemente limoso-argillosi, con intercalazioni più sabbiose in corrispondenza delle strutture deposizionali di paleo alveo dei corsi d'acqua locali.

Soprattutto nelle zone laterali allo Scolo Rigossa, si sono sviluppate le espansioni urbanistiche, specialmente del comparto artigianale e produttivo. Anche le arterie della viabilità locale (es. S.P. 97) tendono a svilupparsi lungo direzioni sub parallele ai corsi d'acqua principali.

Diversamente le principali infrastrutture ferroviarie della linea Bologna-Ancona, attraversano l'abitato trasversalmente a tale corso d'acqua con direzione NW-SE. Tale infrastruttura risulta parallela alla Via Emilia (S.S. 9) che passa in prossimità dei confini comunali a SW.

Lo schema generale del reticolo idrografico nel territorio comunale è riportato nella seguente carta di inquadramento generale.



**Carta del reticolo idrografico principale**

In linea generale, anche per i corsi d'acqua principali, si tratta di corsi d'acqua a carattere torrentizio con forti magre estive e piene nei periodi autunno-invernali. Tale situazione di portate estreme è dovuta

principalmente al regime pluviometrico (deflussi legati agli afflussi meteorici) ed alla presenza di terreni scarsamente permeabili (argille, marne, argille marnose).

La rete idrografica minore è caratterizzata da criticità connesse a problematiche assai dissimili a quelle relative alle aste principali: negli areali di pianura le situazioni di pericolosità sono infatti essenzialmente legate a difficoltà nello smaltimento delle acque piovane in occasione di eventi di pioggia particolarmente intensi, in relazione ai tombinamenti dei tratti urbani ma, per gli scarsi gradienti di deflusso, anche con potenziale allagamento delle aree extraurbane ed agricole.

#### ***4.3 Inquadramento geologico-strutturale***

Il bordo appenninico esterno e l'attuale fascia costiera sono il prodotto del sistema ad embrici e accavallamenti che regola il sollevamento e lo sviluppo della catena appenninica.

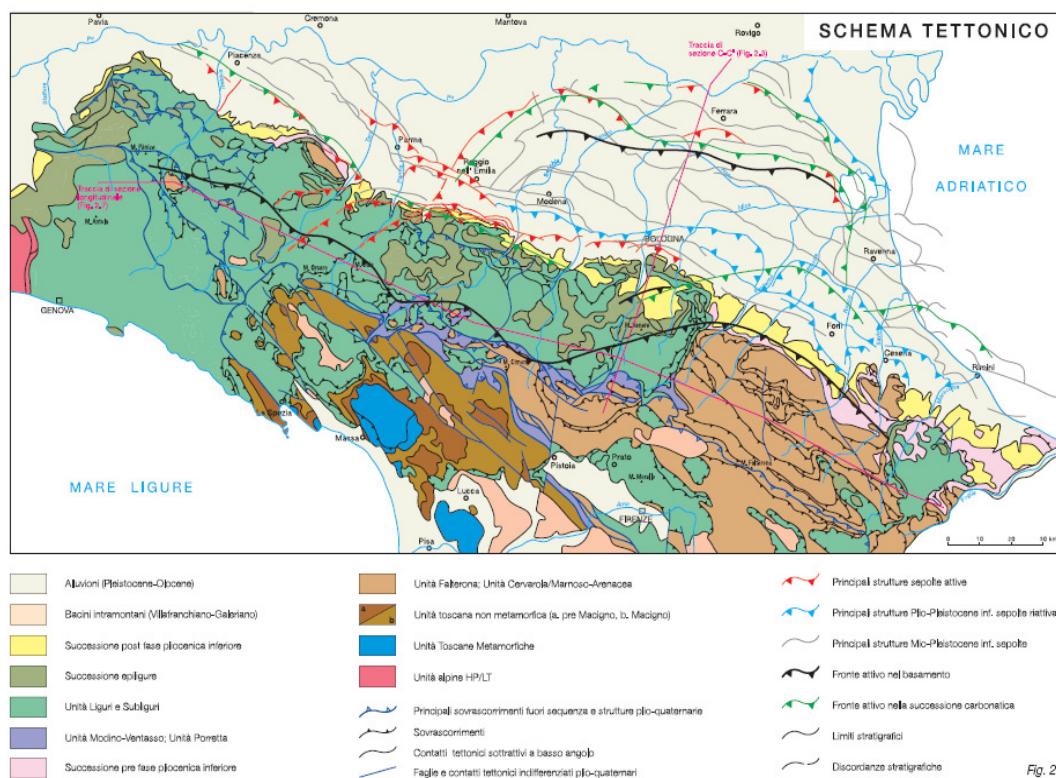
Secondo le recenti ricerche dell'AGIP (Pieri e Groppi, 1981) la Pianura Padana meridionale costituisce una stretta fascia allungata parallelamente ai rilievi del bordo appenninico entro cui si è verificato un consistente accumulo di depositi soprattutto neogenici. La presenza di strutture tettoniche sepolte drappeggiate ed annegate da tali depositi, storicamente ipotizzata, è stata accertata attraverso la realizzazione di "sezioni sismiche".

Lungo il bordo appenninico esterno e la fascia di pianura antistante gli elementi strutturali accatastati vengono a formare un prisma di accrezione che per la complessa interferenza tra l'attività tettonica e quella sedimentaria assume i caratteri di una pronunciata fossa tettonica (Scandone, 1980) denominata "Avanfossa appenninico-adriatica" (Ori G.G., Roveri M. e Vannoni F., 1986). L'intrecciarsi di complessi meccanismi sedimentari e tettonici hanno dato luogo alla formazione di bacini alla fronte e sulla parte retrostante degli accavallamenti traslando con essi all'interno della avanfossa. Il risultato finale è quello di un consistente impilamento di sedimenti caratteristici della successione sedimentaria plio-peistocenica sino a quelli olocenici della zona di studio.

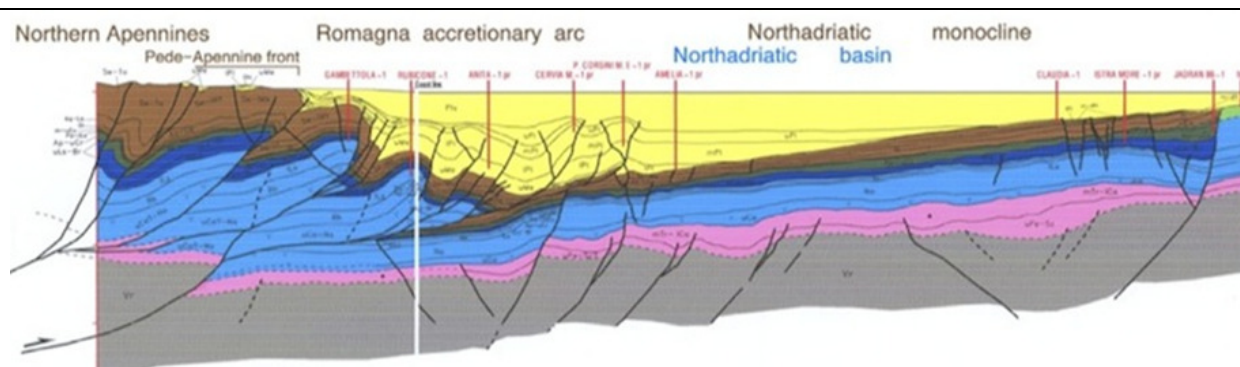
Di seguito si riporta uno schema tettonico dell'Appennino Settentrionale - Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Servizio Geologico, 2004) e una sezione trasversale regionale (Fantoni e Franciosi, 2009) (Figure 4.1 e 4.2).

La tettogenesi della nostra area inizia nel Tortoniano, in corrispondenza di una fase tettonica molto accentuata ad occidente, quando la fascia romagnolo - marchigiana interna, ubicata sul fronte della catena, costituisce una depressione fortemente articolata in piccoli bacini con sviluppo parallelo all'asse appenninico ("Bacini minori intrappenninici"; Ricci Lucchi, 1975). Il bordo appenninico esterno e l'avanfossa appenninico - adriatica propriamente detta, iniziano a delinarsi durante il Messiniano migrando nella fascia esterna e trovano il loro massimo sviluppo nel pliocene inferiore quando la tettogenesi appenninica raggiunge il suo acme e la catena si estende ormai su tutta l'area.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa



*Figura 4.1 – Schema tettonico dell'Appennino Settentrionale - Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna.*



*Figura 4.2 – Sezione trasversale regionale (Fantoni e Franciosi, 2009)*

Durante il pliocene medio - superiore la distensione, legata all'avanzamento del fronte estensionale tirrenico, comincia ad interessare la parte più interna della catena mentre i principali fronti compressivi sono ubicati nella fascia romagnolo - marchigiana esterna determinandone il sollevamento e la parziale emersione.

Nel pleistocene inferiore - medio i fronti compressivi migrano in Adriatico. Si hanno movimenti differenziali verticali delle aree che continuano anche nel “Pleistocene glaciale” influenzando lo sviluppo e la tipologia della sedimentazione. L’attività tettonica non si è ancora esaurita, almeno nella fase avanzata dell’orogenesi (Pianura Padana, Adriatico) come è dimostrato dalla frequente attività sismica della regione. Lo schema tettonico-strutturale generale è quindi apprezzabile nelle figure 4.3 e 4.4.



#### **4.4 Assetto stratigrafico**

Le caratteristiche geologiche del territorio comunale non risultano di particolare complessità; esso comprende infatti sostanzialmente, le alluvioni continentali terrazzate della pianura (Pleistocene- Olocene). Dal punto di vista geologico-idrogeologico l'ambito comunale si trova interposto fra le conoidi del Savio a NW e quella del Marecchia a SE, entro un settore in cui i caratteri di posizionali vengono condizionati dall'assetto dei corsi d'acqua del reticolo minore, il cui modesto bacino idrografico è attestato sulle ultime pendici collinari, in presenza di formazioni argillose e argilloso sabbiose.

Il prisma deposizionale, costituito da depositi quaternari continentali si è sviluppato coerentemente alle limitrofe conoidi e presenta un rapido approfondimento del substrato geologico, con contestuale accrescimento delle sequenze deposizionali (sintemi e sub-sintemi), le quali divengono via via più spesse allontanandosi dal piede delle colline in direzione NE (verso la costa) ed in cui risulta prevalente una matrice fine di tali depositi.

Le unità di fatto cartografate, quindi, corrispondono a pacchi di sedimenti delimitati da superfici-tempo e, per questo, coincidono con unità stratigrafico-deposizionali, di cui le sequenze deposizionali costituiscono un estremo. I subsintemi sono stati inoltre caratterizzati dal punto di vista litologico e paleoambientale; la rappresentazione dei caratteri di facies dei principali corpi sedimentari riconosciuti attraverso l'impiego dei più comuni criteri litostratigrafici, è stata in questo modo sviluppata all'interno di unità inquadrate dal punto di vista cronostratigrafico.

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è l'unità stratigrafica che comprende l'insieme dei depositi quaternari di origine continentale affioranti al margine appenninico padano ed i sedimenti ad essi correlati nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola. Questi ultimi includono depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini organizzati in cicli deposizionali di vario ordine gerarchico. In affioramento, al margine appenninico padano, il Supersintema Emiliano-Romagnolo coincide con il ciclo Qc di RICCI LUCCHI et alii (1982) e presenta un limite inferiore inconforme, evidenziato da una discordanza angolare sui depositi litorali delle Sabbie di Imola o su quelli marini riferibili al Gruppo del Santerno. Nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola, il Supersintema Emiliano-Romagnolo appoggia generalmente in discordanza angolare su depositi correlati alle Sabbie di Imola. Il limite superiore coincide col piano topografico. All'interno di questa unità, una superficie di discordanza angolare di pochi gradi che separa depositi prevalentemente limosi e sabbiosi di piana alluvionale (Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore, AEI) da sovrastanti ghiaie di conoide o terrazzo alluvionale (Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, AES).

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore costituisce la parte più antica del Supersintema Emiliano-Romagnolo. Sono stati tentativamente attribuiti a questa unità alcuni affioramenti di depositi alluvionali ghiaiosi molto grossolani del margine appenninico immediatamente a monte di Savignano sul Rubicone.

Il contatto inferiore è erosivo e discordante su SVG ed è caratterizzato da una grossa lacuna erosiva, testimoniata dalla mancanza di depositi litorali e marino marginali riferibili ad IMO e SVGa. Secondo questa



interpretazione i depositi di AEI devono essere riferiti ad un contesto paleogeografico molto diverso dall'attuale in cui (a) la valle del F. Marecchia era meno incisa ed il fiume poteva raggiungere quest'area, (b) il fronte appenninico era più arretrato e (c) i torrenti Uso e Rubicone avevano bacini molto più piccoli di oggi o erano del tutto assenti. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) costituisce la porzione superiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo e comprende la gran parte dei depositi continentali sia affioranti che sepolti presenti nel Foglio 256 e 255 del progetto CARG.

In affioramento locale AES è costituito da ghiaie e sabbie di canale fluviale e da alternanze argilloso-limoso-sabbiose di tracimazione fluviale. Nel sottosuolo della pianura AES è costituito dall'alternanza ciclica di argille organiche, limi, sabbie e ghiaie di ambiente alluvionale. Nel sottosuolo della pianura più distale (settore di nord est e Foglio 240) il limite inferiore è interpretato come un contatto erosivo e discordante sui depositi di conoide e di piana alluvionale di AEI. Il limite superiore corrisponde all'attuale superficie topografica. In affioramento AES è stato suddiviso in 5 subsintemi (vedi figura 4.5). Nei settori intravallivi ogni subsintema è costituito da depositi alluvionali di un singolo terrazzo o di un gruppo di terrazzi separati da quelli immediatamente sopra e sottostanti da scarpate di erosione particolarmente ampie, che delimitano depositi geometricamente discordanti tra loro. La superficie sommitale affiorante dei diversi subsintemi (cioè dei diversi gruppi di terrazzo) è caratterizzata da uno specifico grado di alterazione dei suoli, le cui differenze sono generalmente meglio evidenti fra i subsintemi più recenti. I depositi dei 5 subsintemi individuati nelle porzioni intravallive si immergono rapidamente verso nord est nel sottosuolo della pianura.

I tre cicli più superficiali del sottosuolo (corrispondenti quindi ad AES6, AES7 e AES8) sono quelli meglio definiti dato il numero relativamente alto di pozzi che li attraversano e sono costituiti da una porzione basale caratterizzata dalla frequente presenza di argille ricche in sostanza organica di piana alluvionale e palude che poggiano con un contatto molto spesso brusco sulle ghiaie e sulle sabbie fluviali che costituiscono il tetto del ciclo sottostante. Questi depositi fini, spesso organici, passano sottocorrente, nel sottosuolo a ridosso dell'attuale linea di costa (Fogli 240 e 241), a depositi lagunari e marini. Il limite inferiore di ognuno di questi cicli, così come è stato definito e correlato con il settore costiero, rappresenta quindi una superficie di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana coincidente con una superficie trasgressiva. Essa ha una espressione fisica molto evidente ed è pertanto ben riconoscibile nel sottosuolo come un forte contrasto di facies.

La porzione regressiva di ciascun ciclo è spessa fino a varie decine di metri ed è suddivisa in due parti. La parte inferiore è costituita da depositi fini di tracimazione fluviale dominati da limi alternati a sabbie e/o argille e comprendenti ghiaie e sabbie di canale fluviale sotto forma di corpi lenticolari, isolati, a geometria nastriforme. La parte superiore del ciclo è data da sedimenti prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi di canale fluviale, che formano depositi compositi, organizzati complessivamente in corpi relativamente tabulari ed interpretati come lobi di conoide alluvionale. Dove ben spazati tra loro, lo spessore complessivo di ciascuno dei cicli così individuati è dell'ordine di varie decine di metri. Lo spessore di AES varia da pochi metri al margine appenninico a c.a. 200 m nel sottosuolo del margine NE, fino a quasi 300 m nel sottosuolo della

pianura costiera. L'età della base del sintema è attribuita per posizione stratigrafica, al Pleistocene medio (350-450 .000 anni secondo Regione Emilia Romagna & Eni-Agip, 1998). I depositi del tetto dell'unità sono attualmente in evoluzione e pertanto la loro età è olocenica (VEDI figura 4.5 e sezioni geologiche profonde allegate).

Di seguito si fornisce una descrizione dettagliata delle formazioni geologiche presenti e affioranti nei territori studiati, tratta dal Catalogo dei Dati Geografici del Servizio Geologico e Sismico della Regione Emilia Romagna.

## DEPOSITI QUATERNARI CONTINENTALI

### **b1 Alluvioni attuali**

Depositi dei fondovalle attuali, eterometrici (dalle ghiaie alle argille), che costituiscono le forme di letto dei fiumi e che vengono rimaneggiati durante gli eventi alluvionali principali.

## SINTEMA EMILIANO - ROMAGNOLO - SUPERIORE (AES).

Sabbie e ghiaie con subordinati limi argillosi costituenti terrazzi intravallivi e conoidi, talora con indizi di pedogenesi, e i depositi attualmente in evoluzione nei fondovalle.

Sintema parzialmente suddiviso in subsintemi limitati, in affioramento, dalle principali scarpate di terrazzo fluviale e paleosuoli e, nel sottosuolo della pianura, da bruschi contatti fra depositi trasgressivi marino-marginali e palustri su depositi di conoide e di piana alluvionale. Contatto inferiore erosivo e discordante sui vari terreni prequaternari.

*Pleistocene superiore-Olocene*

### **AES8 - Subsintema di Ravenna.**

Ghiaie da molto grossolane a fini con matrice sabbiosa, sabbie e limi stratificati con copertura discontinua di limi argillosi, limi e limi sabbiosi, rispettivamente depositi di conoide ghiaiosa, intravallivi terrazzati e di interconoide. Argille, limi ed alternanze limoso-sabbiose di tracimazione fluviale (piana inondabile, argine, e tracimazioni indifferenziate). Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico. A tetto suoli, variabili da non calcarei a calcarei, a basso grado di alterazione con fronte di alterazione potente meno di 150 cm, e a luoghi parziale decarbonatazione; orizzonti superficiali di colore giallobruno. I suoli non calcarei e scarsamente calcarei hanno colore bruno scuro e bruno scuro giallastro, spessore dell'alterazione da 0,5 ad 1,5 m, contengono frequenti reperti archeologici di età del Bronzo, del Ferro e Romana. I suoli calcarei appartengono all'unità AES8a. nel sottosuolo della pianura: depositi argillosi e limosi grigi e grigio scuri, arricchiti in sostanza organica, di piana inondabile non drenata, palude e laguna passanti, verso l'alto, a limi-sabbiosi, limi ed argille bruni e giallastri di piana alluvionale ben drenata con suoli calcarei e non calcarei al tetto; depositi deltizi, litorali e, localmente, marini. I depositi di piana alluvionale includono ghiaie di canale fluviale e geometria nastriforme; lungo la fascia costiera passano con contatto netto ed erosivo a sabbie litorali. Il contatto di base è discontinuo, spesso erosivo e discordante, sugli altri subsintemi e sulle unità più antiche. Lo spessore massimo dell'unità circa 28 metri.

*Pleistocene superiore-Olocene*

#### **AES8a - Unità di Modena.**

Ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, talora organizzate in corpi a geometrie lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi. Depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, deltizi, litorali, di conoide e, localmente, di piana inondabile. Limite superiore coincidente con il piano topografico dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (meno di 100 cm). Può ricoprire resti archeologici di età romana del VI secolo d.C. Limite inferiore inconforme, marcato da una superficie di erosione fluviale lateralmente correlata a un suolo da decarbonatato a parzialmente carbonatato contenente resti archeologici di età dal Neolitico al Romano..

*Olocene*

#### **Subsistema di Villa Verucchio (AES7)**

ghiaie, sabbie, limi ed argille di origine fluviale affioranti nei settori intravallivi. Limite inferiore dato, in affioramento, da una superficie di erosione fluviale che incide AES6 ed i depositi marini preesistenti.

*Pleistocene medio-superiore*

#### **Subsistema di Bazzano (AES6)**

ghiaie, sabbie, limi ed argille di origine fluviale affioranti nei settori intravallivi. Limite inferiore dato da una superficie di erosione fluviale che incide, in discordanza, i depositi marini preesistenti.

*Pleistocene medio;*

<b>SUCCESSIONE NEOGENICO-QUATERNARIA DEL MARGINE PADANO</b>
---

#### **SABBIE DI IMOLA (IMO)**

Arenarie e sabbie da medie a finissime, generalmente poco cementate, in strati spessi e molto spessi, mal definiti, frequentemente amalgamati fra loro, con livelli di ghiaia contenente abbondanti ciottoli silicei. Stratificazione incrociata ad alto e basso angolo, piano-parallela e con strutture tipo hummocky. Sono presenti rare intercalazioni, centimetriche e decimetriche, di peliti, talora fortemente bioturbate, con locali laminazioni ondulate tipo ripples da onda.

Nella parte alta, sono localmente presenti intercalazioni conglomeratiche a matrice sabbiosa (IMOa) con ciottoli derivanti da unità liguridi e dalla successione epiligure.

Potenza massima affiorante circa 60 metri, superiore ai 150 m nel sottosuolo.

Limite inferiore discordante su SVG e SVGa. Limite superiore erosivo discordante con AEI e AES.

Depositi di ambiente litorale.

*Pleistocene medio (0,8-0,65 MA)*

#### **ARENARIE E ARGILLE DI SAVIGNANO (SVG)**

Alternanza di strati sottili e molto sottili, raramente medi, di argille grigie chiare, beige all'alterazione, e arenarie fini e finissime, poco cementate, talora lenticolari, A/P da <<1 crescente verso l'alto e lateralmente; verso SW l'aumento delle arenarie è tale da permettere la distinzione di una litofacies sabbiosa (SVGa). Potenza massima affiorante circa 200 metri.

Limite inferiore graduale su AAS per aumento della frazione pelitica. Limite superiore graduale, parzialmente eteropico, con SVGa e discordante con IMO.

Depositi di piattaforma.

*Pleistocene inferiore*

### **Litofacies della Grotta Rossa (SVGa)**

Arenarie medie e fini, mal cernite, in strati spessi e molto spessi frequentemente amalgamati, con tritume conchigliare associato a laminazione ondulata. Sono presenti intercalazioni metriche e decimetriche di peliti grigio-azzurre contenenti faune marino-marginali.

Potenza estremamente variabile, fino ad una massimo di circa 100 metri.

Limite inferiore graduale rapido, parzialmente eteropico, con SVG. Limite superiore discordante con IMO.

*Pleistocene inferiore*

### **FORMAZIONE DELLE ARGILLE AZZURRE (FAA)**

Argille di colore grigio-azzurro con rare intercalazioni di arenarie giallastre in letti da sottili a spessi, e argille marnose e siltose grigie in letti sottili e molto sottili.

Sono fossilifere ricche in foraminiferi e macrofossili, spesso bioturbate, a stratificazione poco marcata. Sono talora diffusi slumps con olistoliti di gesso derivati da unità evaporitiche. Limite inferiore netto, probabilmente discontinuo, su FAA2; paraconcordante su FCO. Depositi di scarpata e base scarpata. Potenza complessiva affiorante di circa 700 m.

*Piacenziano-Gelasiano*

### **Membro arenaceo di Borello (FAA2).**

Membro interamente suddiviso in litofacies caratterizzate da variabilità del rapporto A/P e spessore medio degli strati, che si ripetono a più altezze stratigrafi che e mostrano rapporti di eteropia. Passaggio rapido a FAA. Spessore estremamente variabile, raggiunge i 1000 m e localmente si riduce fino ad annullarsi.

*Pliocene inferiore*

### **FAA2pa - litofacies pelitico-arenacea.**

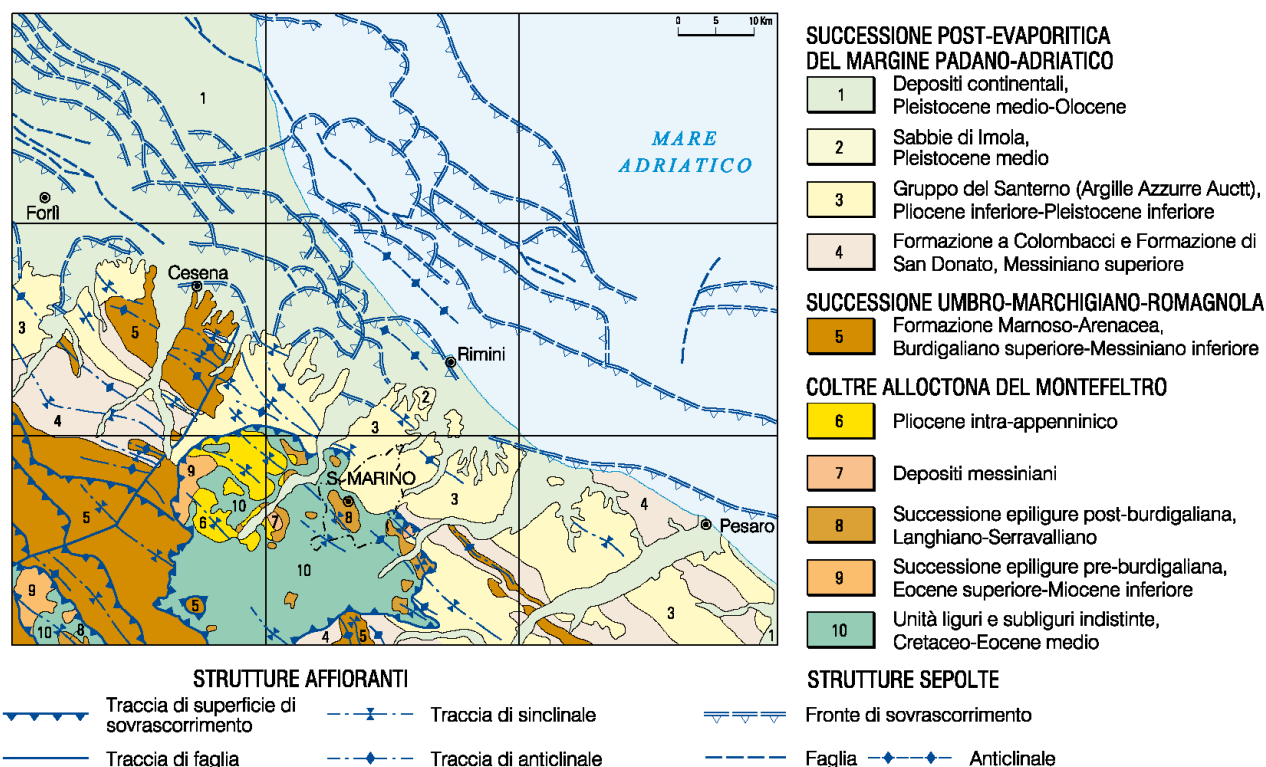
Alternanza tra argille e argille sabbiose grigio azzurre, ricche in foraminiferi e macrofossili (Lamellibranchi, Scafopodi, radioli di Echinidi etc. ), spesso bioturbate, a stratificazione poco marcata, con alterazione biancastra e con veli e laminazioni sabbiose; rari gli strati di sabbie, grigio giallastre gialle generalmente molto sottili. Rapporto A/P generalmente < 1/2..

### **FAA2ap - Litofacies arenaceo-pelitica**

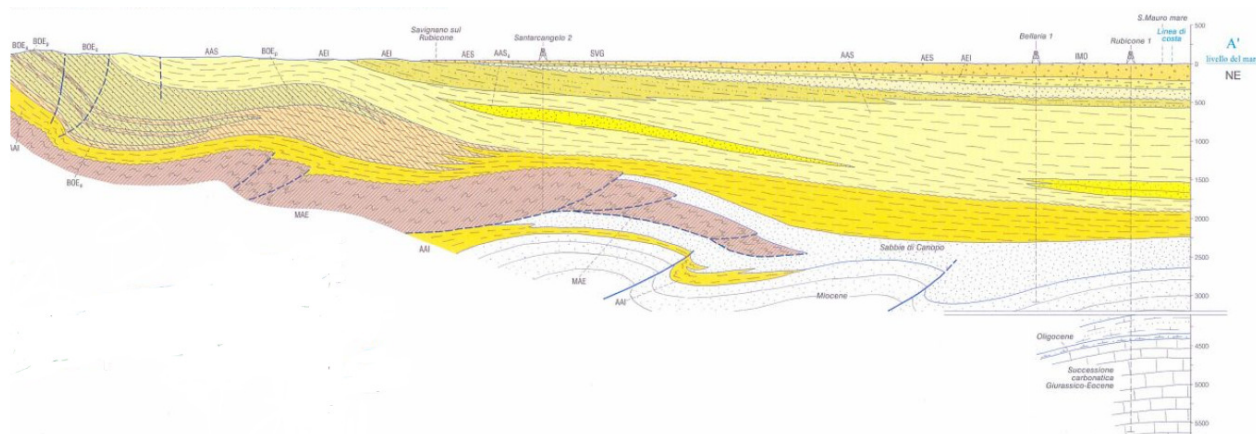
Alternanze di argille sabbiose grigie, localmente marnose, fortemente fossilifere, biancastre all'alterazione, e arenarie silicoclastiche grigio-giallastre in livelli sottili e medi, poco cementate, con A/P variabile da 1/2 a 2; talora arenarie prevalenti in strati da spessi a molto spessi, mal definiti, a laminazione inclinata e con livelli di tritume conchigliare; sono presenti livelli siltosi; le arenarie, solitamente poco cementate presentano nuclei a maggiore cementazione (cogoli).

Di seguito si riporta altresì una sintesi grafica degli assetti geologico-strutturali e dell'assetto cronostatigrafico del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), rappresentativi per la definizione del contesto geologico delle aree in studio (fig. 4.11-4.12-4.13). Le sezioni geologiche rappresentative vengono riportate in Allegato 2 alla presente relazione, mentre la relativa traccia viene individuata planimetricamente nella Carta Geologico-Tecnica.

## SCHEMA DI INQUADRAMENTO REGIONALE



a)



b)

Figura 4.3 – Schema di inquadramento generale – progetto CARG (Foglio 526 Rimini) a); Stralcio di sezione geologica A-A' tratto Montalbano - Savignano sul R. - S. Mauro a mare – progetto CARG (Foglio 526 Rimini) b).

# SCHEMA TETTONICO

Scala 1:200.000

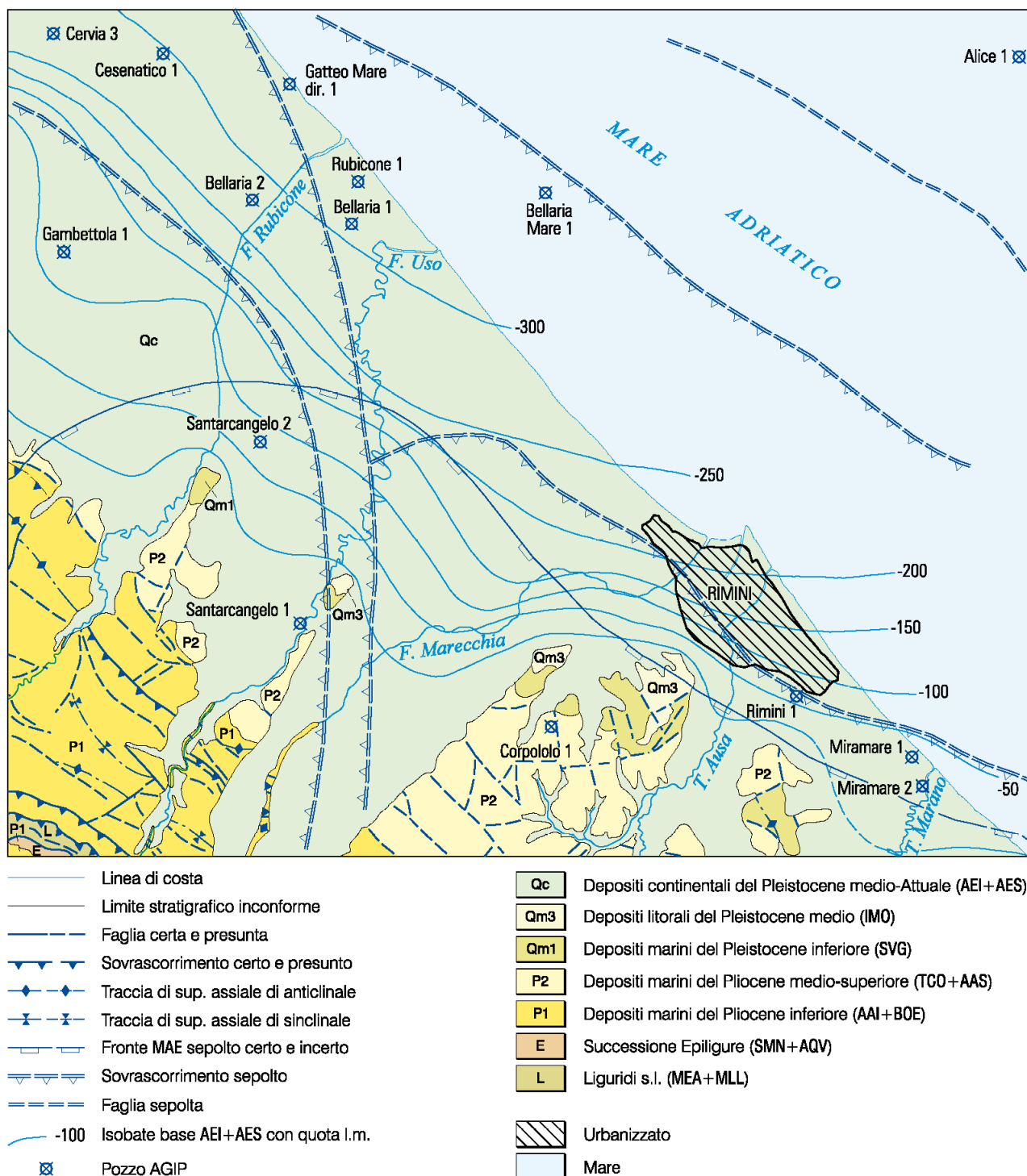
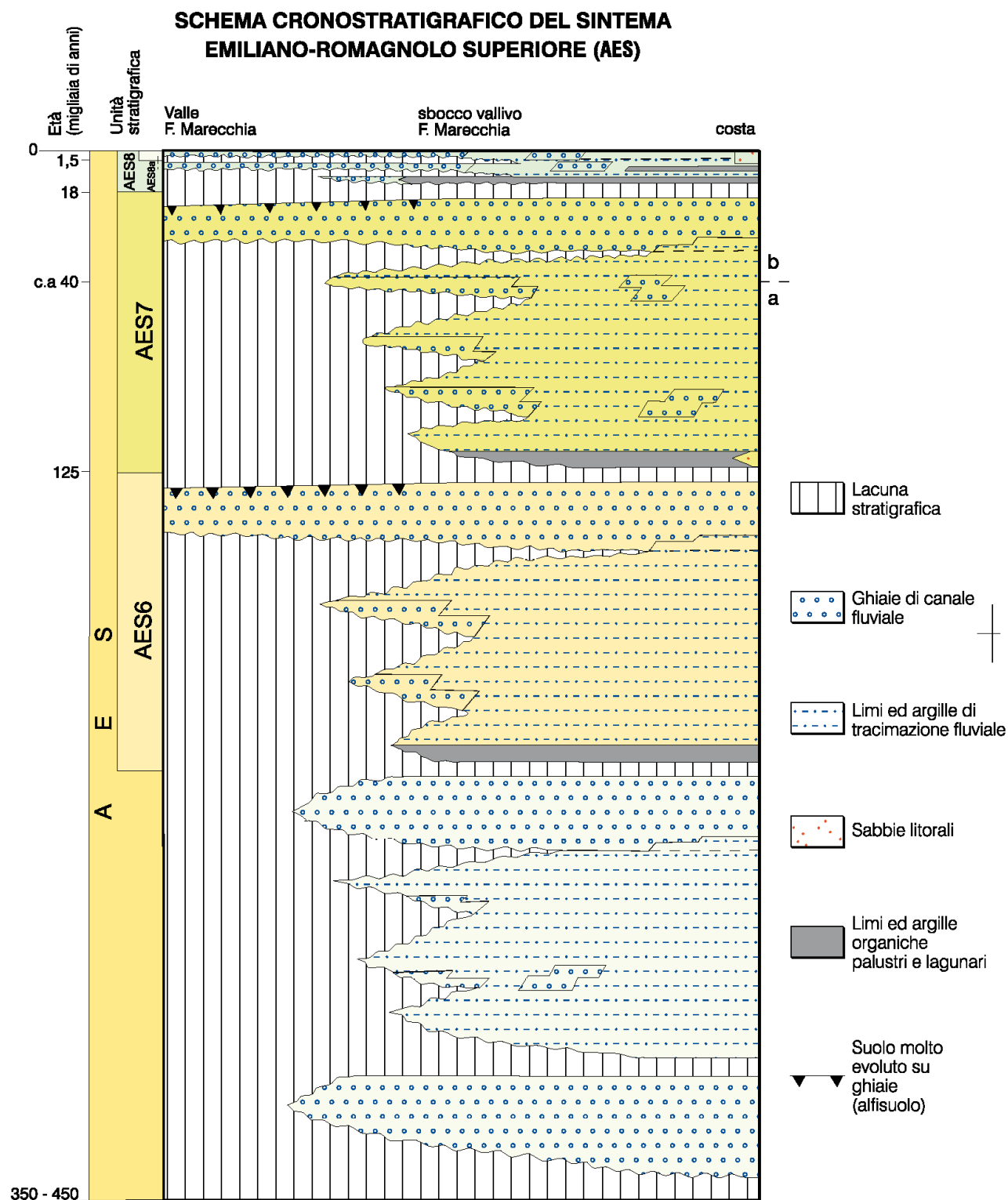
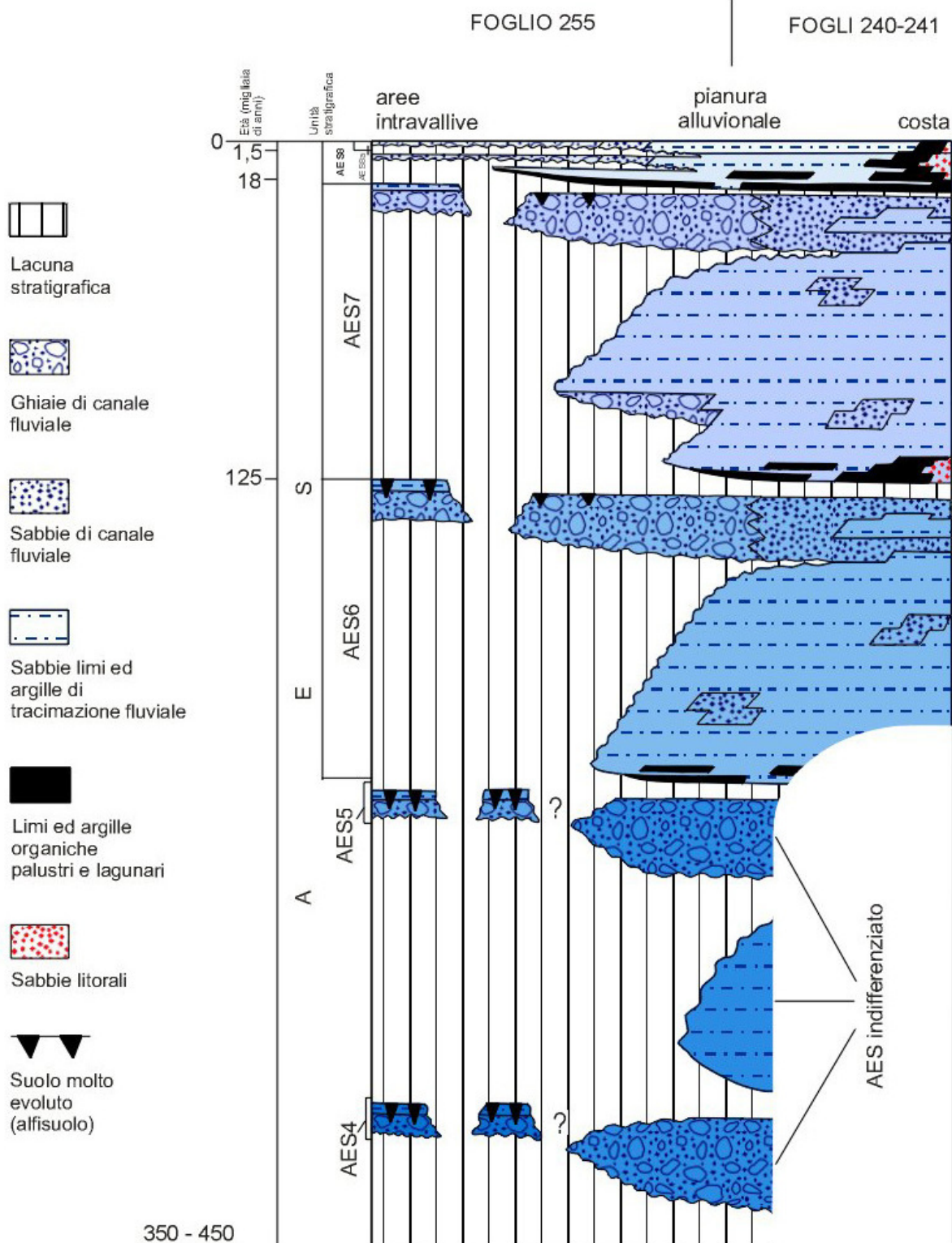


Figura 4.4 – Schema tettonico generale – progetto CARG (Foglio 526 Rimini)



a)





b)

Figura 4.5 – Schema cronostratigrafico del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), Foglio 256 Rimini e Foglio 255 Cesena - CARG



## 5. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Le indagini realizzate ex novo, associate a quelle del precedente studio di Microzonazione Sismica di I-II Livello, degli strumenti urbanistici ed a quelle realizzate da privati e dalla Regione Emilia Romagna, hanno permesso di delineare una quadro conoscitivo indispensabile per gli approfondimenti del di III livello della Microzonazione Sismica. Nel corso degli anni, le amministrazioni hanno sia realizzato nuove indagini (per lo più finalizzate all'edilizia pubblica) sia raccolto ed archiviato indagini dell'edilizia privata, così come la Regione Emilia Romagna ha supportato una serie di prove volte alla conoscenza del territorio. Anche in occasione del presente studio sono state condotte ulteriori prove geognostico-geofisiche ad integrazione del quadro conoscitivo e delle esigenze dell'amministrazione.

In dettaglio, si tratta di complessive N. 70 prove selezionate e rappresentative di più ampio database e per l'assetto territoriale, di cui N. 29 di tipo geotecnico e N. 41 di tipo geofisico, per un totale di N. 55 prove puntuali e n. 15 in array lineare 1D e 2D distribuite sul territorio in studio (fig. 5.1).

IND. GEOGNOSTICHE	
TIPO	NUMERO
CPTe	18
SC	11
TOTALE	29

IND. GEOFIS./DINAM.	
TIPO	NUMERO
MASW	12
HVSR	23
ESAC/SPAC	3
SCPT	3
TOTALE	41

Quindi, ad integrazione del database di archivio nelle aree ritenute rappresentative per l'assetto territoriale sono stati realizzati ex novo: n. 10 prove CPTe , n. 20 prove HVSR, n. 12 prove MASW.

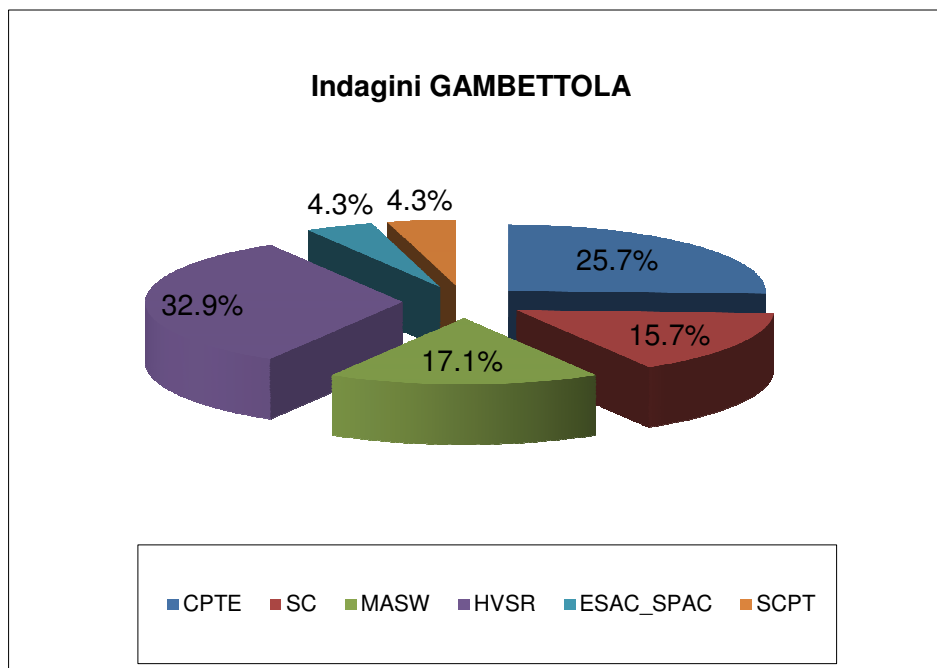


Figura 5.1 – Totale indagini geognostiche e geofisiche rappresentative sul territorio del comune di Gambettola ed utilizzate per lo studio di MS.

Tutte le tipologie di prospezioni sia integrative che pregresse sono state classificate e archiviate all'interno di un sistema informativo territoriale (G.I.S.) come previsto dagli standard di rappresentazione e archiviazione dati per la Microzonazione Sismica versione 4.2.

([http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/standard\\_studi\\_ms.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/standard_studi_ms.wp)).

Nella “Carta delle Indagini”, in allegato alla relazione, è possibile visualizzare l'ubicazione delle differenti indagini in sito; i risultati di ciascuna prova e le modalità di esecuzione sono riportate, a mezzo di semplici “report”, nel data-base associato alla mappa.

### **5.1. Indagini di tipo geofisico**

L'analisi dei fenomeni di amplificazione locale coincide con lo studio degli effetti di risonanza legati alle onde trasversali o di taglio. Per tale ragione, quantificare l'andamento delle velocità di propagazione di questa tipologia di onde nel primo sottosuolo (profilo Vs) rappresenta un'informazione essenziale ai fini della caratterizzazione meccanica (in campo dinamico) dei terreni. Stime del profilo Vs vengono realizzate in sito attraverso appropriate prospezioni di tipo geofisico condotte, in base alle condizioni logistiche e alle profondità da esplorare, con differenti modalità esecutive:

**Indagini sismiche di tipo indiretto:** Sono metodologie basate sull'analisi delle proprietà dispersive delle onde Superficiali (onde di Rayleigh) nei mezzi stratificati. Lo scopo di questa tipologia di prospezioni è risalire ad una funzione caratteristica del terreno (curva di dispersione) univocamente correlata alla struttura meccanico-stratigrafica del sito. Considerando che le onde Superficiali sono essenzialmente un prodotto delle onde di Volume e in particolar modo delle onde trasversali (S) è possibile, a partire dalla curva di dispersione, risalire in maniera indiretta al profilo di velocità Vs attraverso opportune procedure numeriche di inversione dati.

Le indagini di tipo indiretto vengono spesso diversificate, in base alla sorgente energizzante utilizzata per sollecitare i sensori, in “attive” e “passive”:

Indirette Attive: Come le più comuni tecniche dirette, sfruttano sorgenti di tipo artificiale (colpo di martello) e una distribuzione lineare dei sensori sul terreno (MASW). Il principale vantaggio di questa tipologia di acquisizione consiste, oltre alla velocità ed al basso costo della prova, nell'ottima risoluzione che si ottiene nel caratterizzare gli strati di terreno maggiormente superficiali.

Indirette Passive: Utilizzano come fonte di energia la continua vibrazione del terreno, sia di origine antropica sia naturale, definita Rumore Sismico Ambientale o semplicemente Vibrazione Ambientale. I rilievi di tipo passivo sono generalmente realizzati attraverso distribuzioni bidimensionali dei sensori e raggiungono profondità di esplorazione dell'ordine delle centinaia di metri. Il principale svantaggio di questa tipologia di prova consiste in una scarsa risoluzione per gli strati più superficiali e in un'ambiguità interpretativa, spesso,

non trascurabile. Tuttavia, tali indagini, se associate ad una conoscenza preliminare delle condizioni del sito che ne “guidi” l’interpretazione, risultano essere strumenti conoscitivi molto potenti. La sismica passiva può essere applicata su stendimenti monodimensionali che prevedono l’utilizzo congiunto di più sensori (elaborazione Re.Mi. – refraction microtremors - Louie, 2001) oppure stendimenti bidimensionali a interspaziatura geofonica anche variabile, a formare una vera e propria antenna sismica di significative dimensioni, elaborandone i dati registrati con tecnica ESAC per la computazione della curva di dispersione legata alle onde di Rayleigh (Ohori et al, 2002). L’indagine passiva può inoltre essere realizzata attraverso un’unica stazione di misura. Questa ultima tecnica, conosciuta come metodologia HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), differentemente da ogni altra prospezione di tipo indiretto non ha lo scopo di ricavare le proprietà dispersive dei materiali bensì le modalità di vibrazione del terreno (Nakamura 1983-2008). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare, infatti, le principali frequenze di vibrazione del suolo (fra cui la più importante “f0”, detta frequenza fondamentale) e sfruttarle per scopi stratigrafici. Tale tecnica consente di effettuare altresì interpretazioni congiunte con altri metodi geofisici e la conoscenza di vincoli stratigrafici per la definizione di profili profondi di Vs. Inoltre è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli sintetici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali, basato sulla propagazione delle onde di Rayleigh e di Love nel modo fondamentale e superiori.

Dall’analisi congiunta di prove sismiche attive in media alta risoluzione, sulla scorta delle conoscenze stratigrafiche locali da prove geognostiche in sito, sono stati stimati i valori di VsH (i profili associati alle misure sono visualizzabili nei report associati al DB della Microzonazione Sismica) utilizzati sia per le carte di MS mediante approccio semplificato tabellare che per lo sviluppo dei modelli di risposta sismica locale a supporto delle analisi di Livello 3.

## **5.2. Indagini di tipo geognostico/geotecnico**

Le indagini geognostiche utilizzate per lo studio, sia di nuova realizzazione che di archivio, sono costituite da sondaggi meccanici a carotaggio continuo, prove CPT con punta meccanica, elettrica e talora piezocono e, all’occorrenza, stratigrafie di pozzi per lo sfruttamento delle acque di falda.

I sondaggi meccanici (indagini geognostiche di tipo diretto) hanno consentito di valutare l’effettivo assetto stratigrafico dei terreni sino alle profondità raggiunte e, talora, il prelievo di campioni e relative analisi di laboratorio per la caratterizzazione granulometrica nonché dei parametri di resistenza meccanica e deformabilità. Tale metodologia consente di attraversare gli orizzonti competenti e ghiaiosi spesso presenti nel primo sottosuolo alluvionale.

Al proposito anche le stratigrafie dei pozzi per acqua hanno consentito di superare gli orizzonti ghiaiosi raggiungendo talora profondità elevate.



Le prove penetrometriche (indagini geognostiche di tipo indiretto) risultano spinte a profondità variabile, a volte anche sino a rifiuto nel substrato geotecnico, consentendo di desumere i caratteri stratigrafici e di resistenza meccanica alla penetrazione.

La caratterizzazione geomeccanica delle coperture ed i relativi spessori risultano di estrema importanza anche per l'elaborazione ed interpretazione delle prove geofisiche limitrofe.

Tra le indagini geotecniche sono riportate anche prove di laboratorio in colonna risonante, di particolare interesse comprendere il comportamento dinamico dei terreni nel campo delle basse medie deformazioni.

La campagna geognostica realizzata "ex-novo" e le numerose informazioni pregresse hanno quindi permesso di definire un chiaro quadro litostratigrafico e geomeccanico delle aree in esame (l'ubicazione di ciascuna prova è visualizzabile nella Carta delle Indagini ed i risultati di ciascuna prova sono riportati nell'apposito database secondo le modalità definite negli standard di archiviazione dei dati.).

## **6. MODELLO DI SOTTOSUOLO**

### ***6.1. Andamento delle Vs nel sottosuolo***

Come evidenziato nell'inquadramento geologico (Capitolo 4) le profondità del substrato geologico attese per l'area di studio vanno dall'ordine della decina di metri sino a centinaia di metri di profondità nella zona più profonda della conoide deposizionale. Data la quantità di informazioni geofisiche distribuite sul territorio si sono sfruttate le prove HVSR congiuntamente ai dati geognostici profondi per individuare i picchi di frequenza di maggior rilevanza per la risposta sismica locale, tra cui quelli associabili ad interfacce compatibili con un bedrock geofisico. Invece per caratterizzare i depositi di copertura (e talora del bedrock geologico) in termini di valori di velocità delle onde di taglio (profili Vs), per gli scopi dello studio, si è potuto fare riferimento ad indagini sismiche indirette attive (tipo MASW) e passive sia a stazione singola (HVSR) che in array bidimensionale del tipo ESAC/SPAC.

A supporto dello studio di I e II Livello, con approccio semplificato, si è data priorità alla definizione dei profili di velocità e stima di  $V_{seq}$  sino alle profondità richieste per la stima dei fattori di amplificazione; tuttavia ove assenti si è fatto riferimento ai soli valori stimati tramite inversione delle curve H/V. In presenza di coperture di elevato spessore, le tabelle utilizzate hanno previsto l'utilizzo di valori di velocità equivalente sino a 30 mt di profondità (VS30), mentre per profondità inferiori, soprattutto in prossimità dei rilievi collinari, si sono stimati valori di  $V_{seq}$  sino all'interfaccia copertura-substrato formazionale (generalmente caratterizzato da un sensibile incremento di rigidità sismica sebbene con  $V_s < 800$  m/s). I risultati ottenuti per i siti in studio sono visualizzabili nei report associati alla Carta delle Vs e delle Indagini (Data-Base-Microzonazione Sismica).

Diversamente, per lo sviluppo dei modelli di sottosuolo utili alle analisi di RSL, si è data priorità alle prove sismiche in foro (SCPT) eseguite in corrispondenza/prossimità di prove in Array bidimensionale (ESAC/SPAC) ed HVSR (con sensore a frequenza propria pari a 2Hz), al fine di elaborare profili di Vs tramite inversione congiunta. Tale modalità di analisi consente un'interpretazione del sottosuolo sino ad elevate profondità e, all'occorrenza, stimare con buona approssimazione la profondità del bedrock sismico e la sua velocità/rigidezza rappresentativa. Generalmente le procedure di inversione non portano ad un unico modello di velocità (non esiste l'univocità della soluzione), pertanto si sono scelti i profili che avessero le seguenti caratteristiche:

- la miglior compatibilità tra dato sperimentale e teorico
- maggior coerenza con l'assetto geologico di sito (da evidenze dirette e dati di bibliografia)
- profondità del substrato sismico prossimo ai valori attesi per il sito di studio.

I modelli Vs, determinati con le modalità appena descritte, sono stati ulteriormente "ottimizzati" aggiungendo un ulteriore vincolo alle procedure di inversione, ovvero utilizzare la stratigrafia sismica superficiale ad alta risoluzione derivata dalle indagini sismiche in foro (SCPT) effettuate in sito o nelle immediate vicinanze.

Pertanto, sulla scorta di tali elaborazioni (e dei dati di correlazione presenti nel database ed in bibliografia), l'area in studio è stata suddivisa secondo 3 zone rappresentative (vedi figura 6.1), caratterizzate da modelli di sottosuolo e profili di Vs caratteristici (figura 6.2), con individuazione del bedrock sismico, utilizzati nel seguito per le successive modellazioni di RSL, al fine di addivenire alle azioni sismiche di progetto per la stima dei fattori di amplificazione attesi e per le successive analisi di liquefazione.

In particolare muovendosi lungo lo Scolo Rigossa, dal piede della collina a SW verso la costa a NE, l'interfaccia con il bedrock geologico (contatto tra la copertura deposizionale AEI e substrato geologico IMO) risulta approfondirsi secondo un gradiente significativo ed i contrasti di impedenza sismica risultano maggiormente evidenti nelle zone più a monte, ove lo spessore delle coperture è ridotto e l'interfaccia è individuabile nel range di frequenze di risonanza pari a 2.3-2.5 Hz. Il bedrock sismico viene rilevato più in profondità, anche all'interno della formazione geologica di base, generalmente associabile picchi di frequenza H/V significativi compresi tra 0.85-1.1 Hz. Tali zone caratteristiche di verifica vengono denominate, procedendo da SW a NE, come GAM\_01, GAM\_02, GAM\_03 (vedi Figure 6.1 e 6.2). In profondità occasionalmente sono presenti livelli a maggior velocità imputabili alla presenza di orizzonti ghiaioso-sabbiosi di significativo spessore. Come osservabile dalle prove geofisiche ad alta risoluzione (vedi figura 6.3) i profili comparati di Vs evidenziano una sostanziale coerenza di comportamento e, a tratti, coerentemente ai valori di resistenza alla punta delle penetrometrie, sensibili fenomeni di indurimento della crosta superficiale.

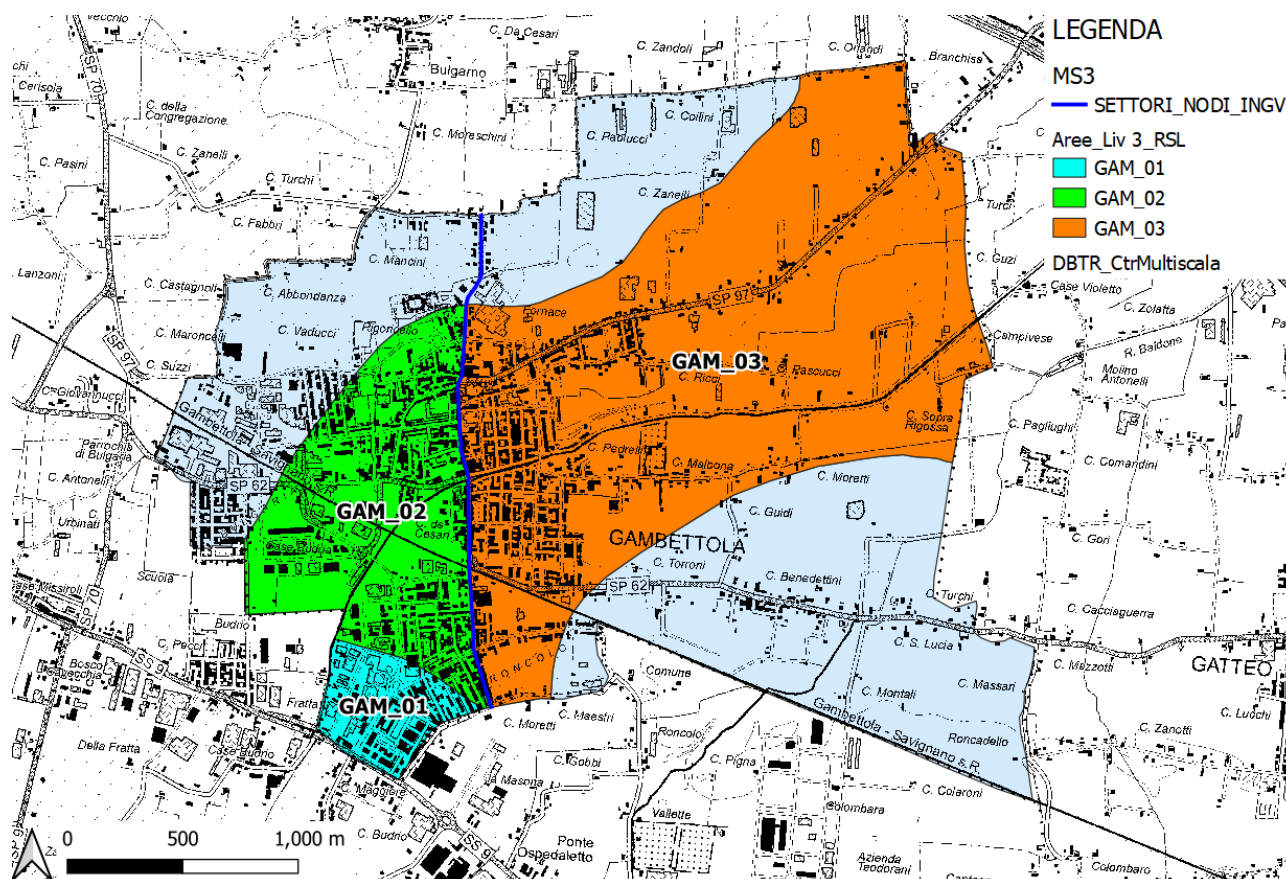
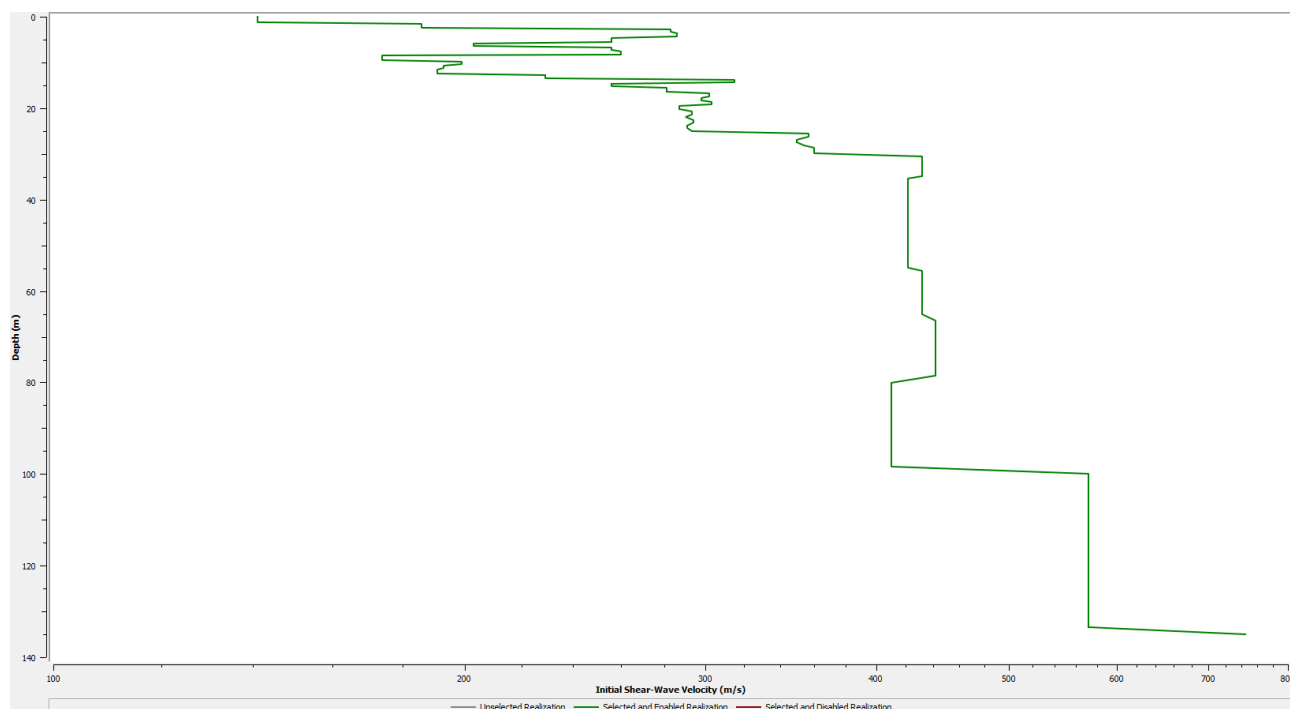
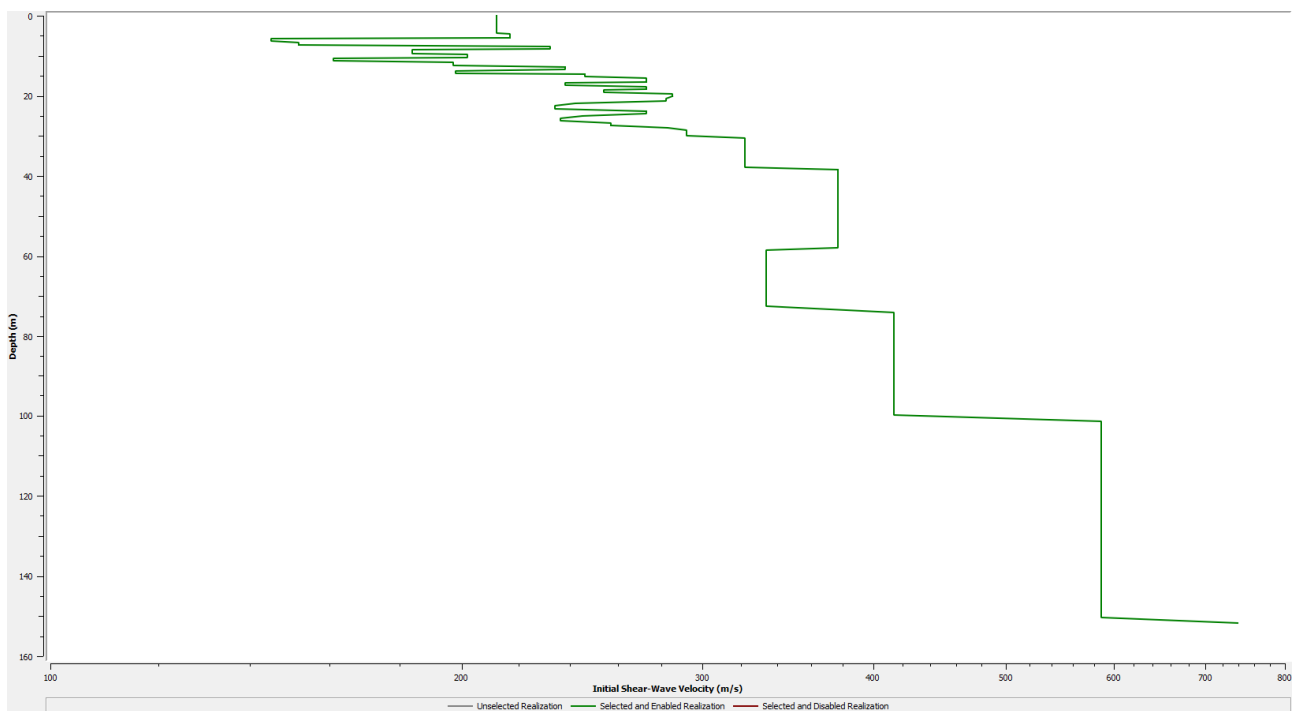


Figura 6.1- Zone a comportamento dinamico rappresentativo per le RSL presso le aree in studio.

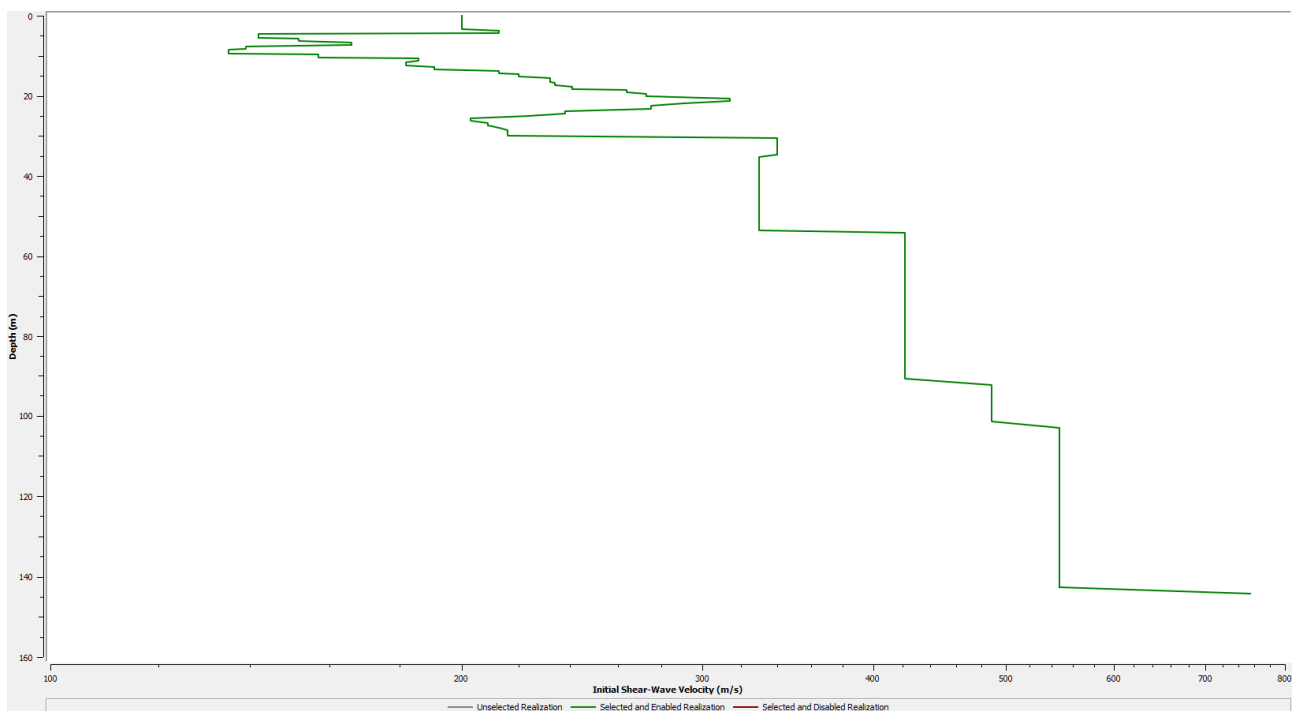


**Zona GAM\_01**

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa



**Zona GAM\_02**



**Zona GAM\_03**

*Figura 6.2- Profili di Vs rappresentativi per ciascuna zona di RSL in cui è stato suddiviso l'areale in studio, in successione da SW verso NE.*



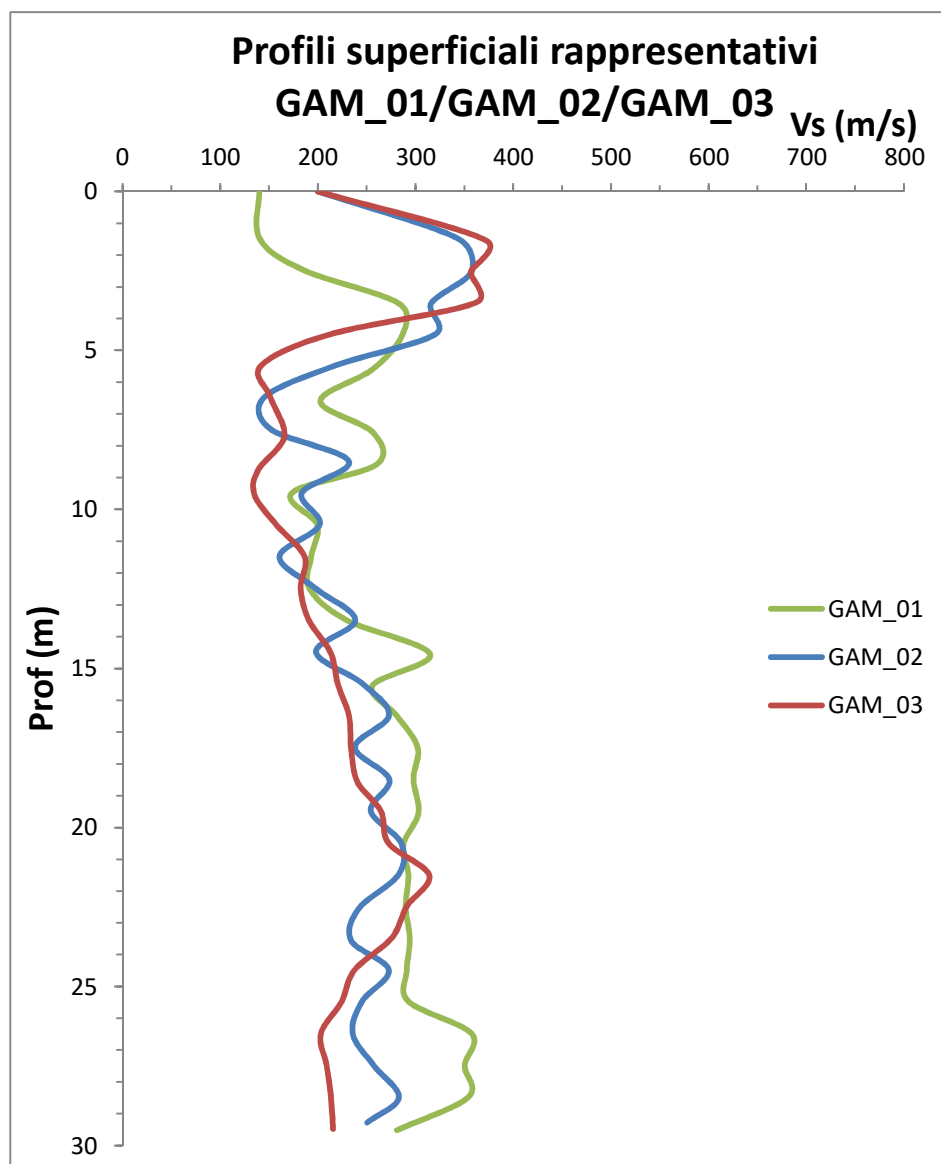


Figura 6.3- Profili di Vs superficiali rappresentativi delle zone caratteristiche GAM\_01, GAM\_02, GAM\_03

## 7. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

L'areale studiato risulta caratterizzato da un assetto geologico alluvionale spazialmente variabile, soprattutto in funzione dello spessore dei depositi di copertura e delle strutture sedimentarie relative ai corsi d'acqua locali (es. paleo canali, argini ecc.). La ricostruzioni di tali assetti richiede, pertanto, una diffusa e capillare rete di informazioni geognostiche, talora non sempre possibile, soprattutto nelle aree più urbanizzate. A livello geologico profondo altri elementi di incertezza sono relativi all'elevato spessore dei depositi di copertura alluvionale, interessati da frequenti ed articolate interdigitazioni di litotipi differenti, talora sino a ad oltre cento di metri di profondità, ampliando i margini di incertezza sull'interpretazione degli assetti geologici profondi.

Diversamente gli assetti geologici superficiali, si ritengono adeguatamente investigati, a meno di anomalie geologiche/idrogeologiche locali, determinate soprattutto dall'azione dei corsi d'acqua locali nel tempo e alla loro capacità di divagazione areale.

Tali aspetti rivestono particolare importanza anche per quanto riguarda poi la definizione dei modelli geofisici e di comportamento dinamico di riferimento; infatti la mancanza di un adeguato numero e distribuzione di sondaggi sufficientemente profondi e relative indagini geofisiche dirette in foro, nelle aree alluvionali *non consente di rilevare "direttamente"* la posizione e caratteristiche del bedrock sismico così come definito e richiesto dalle norme di settore. Pertanto all'occorrenza ciò è attualmente possibile solo attraverso l'utilizzo di metodi di indagine congiunta (soventi indiretti), basati sul prevalente utilizzo di rumore ambientale quale forzante/ eccitazione energetica. Chiaramente tali metodi e le relative metodologie di elaborazione, portano con se una certa aliquota di incertezze attribuibili sia a fattori strumentali quanto ai modelli numerici interpretativi; per cui nelle analisi di tali dati sperimentali e relative valutazioni di sintesi si ritiene sempre e comunque estremamente necessario attribuire un significativo peso alle conoscenze/evidenze geologiche disponibili ed alla coerenza con il modello geologico di riferimento.

Il programma delle indagini geotecniche va perciò commisurato, oltre che al problema sismico e geotecnico, anche ai codici di calcolo impiegati nelle analisi numeriche (Microzonazione Sismica di livello superiore al I) nonché all'accuratezza dei modelli utili ad affrontare le diverse problematiche di pericolosità sismica (analisi della risposta sismica locale, stima del potenziale di liquefazione, analisi della stabilità dei pendii, valutazione dei cedimenti).

## **8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI**

Nella prima fase di studio, sono stati acquisiti tutti i dati derivanti dal precedente studio di Microzonazione Sismica di I-II Livello e quelli bibliografici e d'archivio riguardanti la cartografia geologica, geomorfologica e le indagini geognostiche pregresse nel Comune di Gambettola. Nella seconda fase sono state definite, di concerto con l'amministrazione comunale ed in funzione delle risorse disponibili agli approfondimenti di indagine, le aree da sottoporre con maggior attenzione allo studio di Microzonazione Sismica di III Livello; chiaramente l'attenzione prioritaria è stata volta alle zone urbanizzate ed urbanizzabili così come previste nei piani urbanistici comunali e/o di previsione, definendo quindi i settori territorio sul quale eseguire con maggior dettaglio la campagna di nuove indagini geognostiche/geofisiche di approfondimento per le finalità di MS.

Chiaramente tali indagini sono state progettate e pianificate nell'ottica di un perfezionamento ed approfondimento, per quanto possibile, delle conoscenze sui vari assetti geologici e, quindi, per la partizione del territorio di interesse in macro/microzone a comportamento sismico omogeneo sulla scorta di una base di dati sufficientemente robusta.

Quindi i dati sperimentali di nuova e mirata acquisizione, così come quelli derivati dagli archivi pubblici e privati (ritenuti adeguatamente rappresentativi), sono stati utilizzati per analizzare problematiche di MS attraverso modelli numerici di riconosciuta validità scientifica nonché secondo le procedure ed indicazioni raccomandate dalle linee guida regionali e della Protezione Civile.

I risultati di tali elaborazioni sono stati esplicitati, quindi, attraverso le basi dati numeriche allegate al presente studio e gli elaborati grafici di sintesi richiamati al successivo Par. 9.

## **9. ELABORATI CARTOGRAFICI**

### **9.1 MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I**

#### ***9.1.1 Carta Geologico-Tecnica***

La “Carta Geologico-Tecnica” rappresenta un modello integrato di sottosuolo funzionale alle valutazioni sismiche legate agli studi di Microzonazione Sismica, che permette di individuare in modo semplice ed efficace, i rapporti stratigrafici tra le litologie che rappresentano il substrato formazionale e le coperture.

Tale elaborato, in generale, è costruito in base ad un’attenta valutazione delle Carte Geologiche e Litologiche di riferimento e da un’accurata analisi delle prove geognostiche, geotecniche e geofisiche a disposizione.

In dettaglio, la carta viene costruita codificando le litologie e le formazioni affioranti in differenti unità litotecniche specificate dagli standard di archiviazione informatica 4.1 allegati alle linee guida “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”.

Nel caso specifico, è necessario ricordare (come già descritto al capitolo 4) che i depositi di superficie prettamente alluvionali affioranti nelle aree di studio, risulteranno sostanzialmente omogenei in virtù degli ambiti deposizionali, processi sedimentari e aspetti litogenetici caratteristici.

Pertanto le unità geo-litologiche alluvionali di superficie sono sostanzialmente rappresentate dall’Unità di Modena (AES8a) e dal Sub-Sintema di Modena Ravenna (AES<sub>8</sub>).

Pertanto, per ottenere una Carta Geologico-Tecnica che rappresentasse adeguatamente le condizioni del territorio in esame, in ambito di pianura alluvionale subpianeggiante, è stato scelto di procedere come segue:

- Dai risultati dei numerosi dati geognostici sono state estrapolate le stratigrafie che consentivano di caratterizzare ed individuare con certezza (ove possibile) la posizione del substrato geotecnico;
- Per i settori di pianura con substrato profondo ci si è avvalsi di dati e informazioni desumibili dalle sezioni geologiche profonde CARG e dal database associato alla carta geologica regionale;
- E’ stata valutata, in ciascun log stratigrafico estrapolato, la litologia prevalente, la natura geologica e il possibile ambiente deposizionale;
- Le differenti litologie evidenziate, derivate dai dati puntuali di sondaggio, sono state interpolate in pianta per ottenere una realistica distribuzione sul territorio;
- Ciascuna litologia (ed ovviamente ciascun poligono ad essa associato) è stata codificata in unità litotecnica per la realizzazione della Carta Geologico-Tecnica.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

- Sono stati cartografati i terreni di copertura (con spessori > 3 metri) suddivisi su base granulometrica con l'indicazione dell'ambiente genetico/deposizionale.
- Sono state cartografate le forme di superficie e sepolte.
- Sono stati cartografati gli orli di terrazzo fluviale.

Questi dati si sono resi necessari alla definizione del modello geologico del sottosuolo per l'intero territorio e propedeutici per la definizione in chiave sismica degli effetti attesi al suolo.

In carta sono inoltre rappresentate le tracce delle sezioni litotecniche (di superficie e profonde) elaborate e/o ritenute rappresentative per l'ambito comunale, generalmente ortogonali fra loro e passanti per gli abitati principali. Tali sezioni, realizzate sul profilo topografico del terreno e lungo una rete di sondaggi, vengono riportate in allegato alla presente relazione ed a scala varia, in funzione del grado di risoluzione necessario ad illustrare l'assetto locale, permettendo di definire gli andamenti e lineamenti geologici principali nonché di definire le dinamiche evolutive dell'area e gli aspetti geomorfologici e strutturali salienti.

In particolare tali sezioni (denominate 1-1', 2-2', 3-3') risultano un importante ausilio per la stima della profondità del bedrock geologico, nonché un robusto riferimento per la correlazione dei picchi di frequenza H/V con strutture geologiche profonde e, all'occorrenza, poter individuare il bedrock sismico di riferimento nei vari punti di verifica.

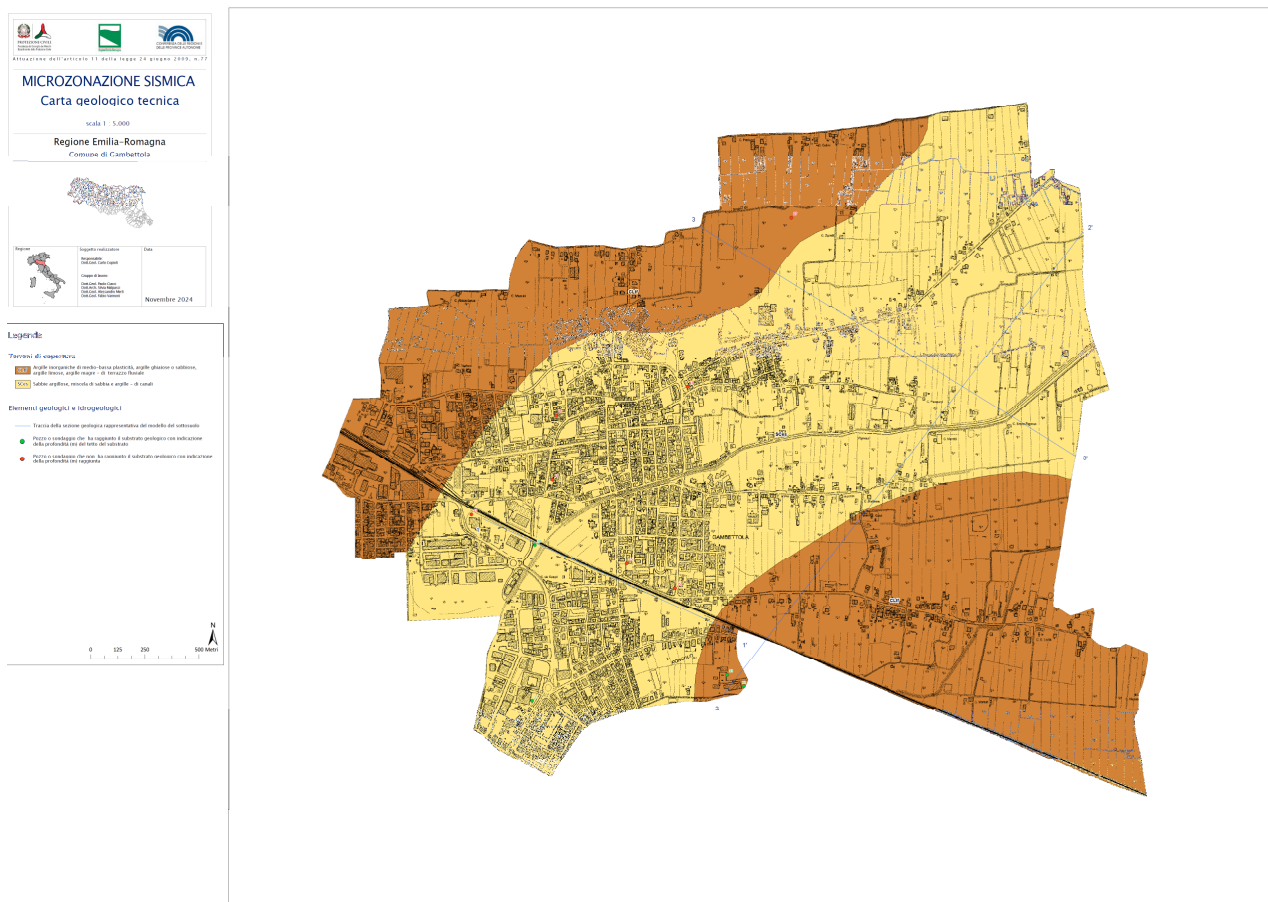


Figura 9.1.1 – Miniatura esemplificativa di una Carta Geologico-Tecnica



### 9.1.2 Carta delle Frequenze Naturali del Terreno

Sulla base dei risultati delle registrazioni a stazione singola HVSR, ritenute più rappresentative (sia di nuova realizzazione che pregresse), si è sviluppata la mappa delle Frequenze Naturali dei terreni dell'ambito comunale studiato.

Nonostante, comunemente, negli studi di Microzonazione Sismica venga prodotta un'unica carta delle Frequenza Naturali, è stato scelto in questo caso di sviluppare 2 differenti elaborazioni (frequenze  $f_0$  ed  $f_1$ ) contenute nella medesima carta per non perdere importanti informazioni legate a massimi risonanti secondari, talora significativi ai fini della risposta sismica di sito; questi ultimi risultano particolarmente condizionati dall'assetto geologico locale, caratterizzato dalla presenza di spessi depositi di copertura talora con orizzonti risonanti interclusi (es. orizzonti ghiaiosi) o, comunque, per interfacce con contrasti di rigidità particolarmente significativi (es. copertura alluvionale/substrato geologico).

Al fine di chiarire quanto appena espresso viene di seguito riportato un esempio sui criteri di elaborazione adottati; talora, a seguito degli effetti di smorzamento indotti da depositi soffici e profondi e/o dalla presenza di situazioni stratigrafiche con inversioni di velocità, il giudizio e la definizione dei picchi di frequenza sono stati guidati anche dal reciproco andamento delle singole componenti verticali ed orizzontali del moto registrato. In figura 9.1.2 è riportata, a titolo di esempio, la misura 040015P54.

Ad es. la misura con codice 040015P54, così come la maggior parte dei rilievi realizzati, è caratterizzata da più massimi in Frequenza. Quello a significativa ampiezza e minor valore in frequenza viene indicato come  $f_0$  che, nell'esempio, presenta una frequenza di circa 0.4 Hz con ampiezza media di circa 1.9; parimenti viene rilevato anche il picco superiore  $f_1$ , caratterizzato da una frequenza di circa 0.84 Hz con ampiezza media di circa 2.1.

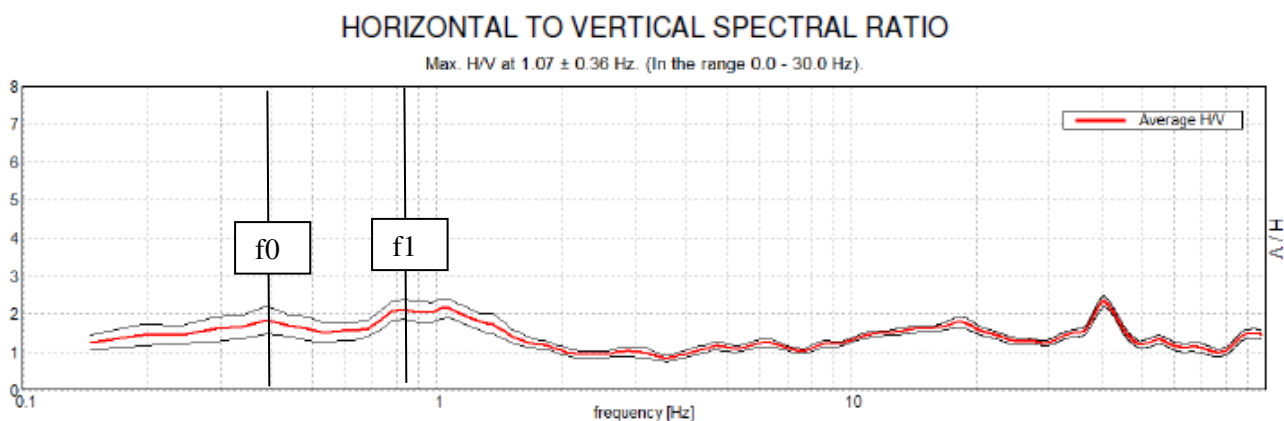


Figura 9.1.2-Curva dei rapporti spettrali relativa alla registrazione 040015P54.

Tutti i picchi di frequenza rappresentativi ricadono nell'intervallo di frequenze ingegneristico di risonanza delle strutture (compreso all'incirca tra 0.5 e 15 Hz) e, dunque, risultano potenzialmente pericolosi per fenomenologie di amplificazione locale o, comunque, di alterazione del moto sismico atteso. Il picco a

# *Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)* Relazione Tecnico Illustrativa

maggior ampiezza ed a più bassa frequenza  $f_0$  indica il “contrasto d’impedenza sismico” più significativo in profondità ed a cui è associata la maggior aliquota di trasferimento dell’energia del moto vibratorio/sismico e, pertanto, risulta informativo ai fini della ricostruzione del substrato sismico dell’area. Inoltre tutti i valori di frequenza individuati con tale tecnica, essendo il frutto di medie statistiche, sono affetti da una deviazione standard che ne può comportare uno scostamento talora di entità pari al 20-25% del valore definito.

Per la correlabilità dei picchi/range di frequenza rappresentativi con elementi stratigrafici significativi ci si può riferire alle indicazioni contenute nella DGR 564/2021 nonché alle analisi e modelli definiti in Mascandola et al., 2019. Al proposito, quale elemento distintivo riconoscibile su tutto il territorio, si constata la presenza in bassa frequenza, di un massimo con ampiezza variabile da misura a misura, presente in quasi tutte le acquisizioni a stazione singola realizzate nel Comune. Tuttavia si possono osservare dei trend generali per cui, muovendosi dall’entroterra (SW) verso mare (NE) si assiste ad una modesta migrazione dei picchi rappresentativi di minor frequenza verso valori leggermente più bassi così come ad un generale appiattimento dei rapporti H/V (imputabile in parte anche ad un effetto di smorzamento ad opera del maggior spessore delle coperture sedimentarie). In ogni caso massimi secondari particolarmente significativi ai fini delle analisi di RSL risultano essere i picchi H/V presenti nel range 0.8-1.1 Hz, generalmente rappresentativi del contrasto di impedenza associabile all’interfaccia di riferimento adottata per le analisi numeriche.

I valori di ampiezza rappresentativi per ciascuna classe di frequenza, vengono quindi illustrati tramite diversa colorazione dei simboli secondo specifici range caratteristici per l’area, modulando l’ampiezza del simbolo in funzione dell’ampiezza dei relativi picchi H/V, secondo la seguente schematizzazione (vedi figura 9.1.3):

Ampiezze (A) dei picchi ( $F_0$ )

$F_0 \leq 0.6\text{Hz}$	$0.6\text{Hz} < F_0 \leq 1.0\text{Hz}$	$1.0\text{Hz} < F_0 \leq 2.0\text{Hz}$	$2.0\text{Hz} < F_0 \leq 8.0\text{Hz}$	$F_0 > 8\text{Hz}$
• $1.5 \leq A < 2$	• $1.5 \leq A < 2$	• $1.5 \leq A < 2$		
	• $2 \leq A < 3$	• $2 \leq A < 3$		

In corrispondenza dei punti è indicato il valore di frequenza ( $f_0$ ) in Hz.

Ampiezze (A) dei picchi ( $F_1$ )

$F_1 \leq 0.6\text{Hz}$	$0.6\text{Hz} < F_1 \leq 1.0\text{Hz}$	$1.0\text{Hz} < F_1 \leq 2.0\text{Hz}$	$2.0\text{Hz} < F_1 \leq 8.0\text{Hz}$	$F_1 > 8\text{Hz}$
• $1.5 \leq A < 2$	• $1.5 \leq A < 2$	• $1.5 \leq A < 2$		
		• $2 \leq A < 3$		

In corrispondenza dei punti è indicato il valore di frequenza ( $f_1$ ) in Hz.

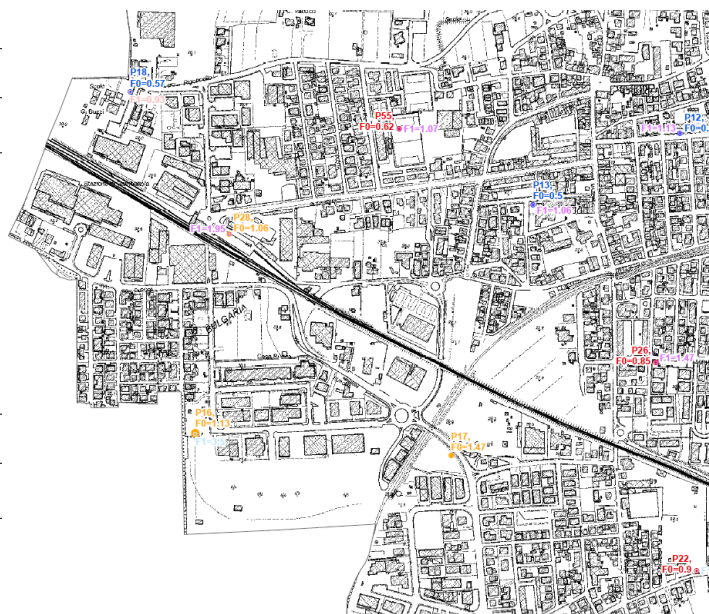


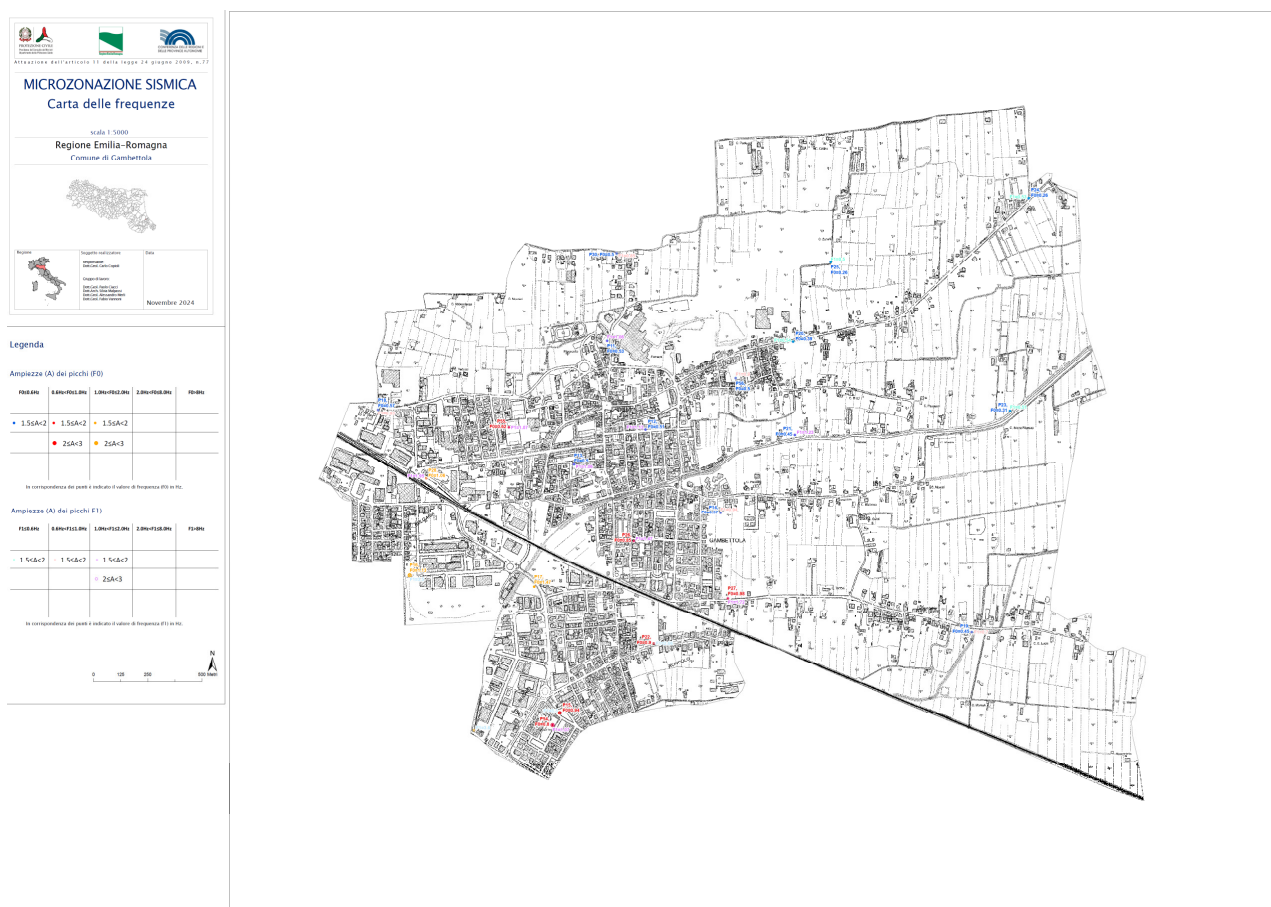
Figura 9.1.3 - Codifiche per la visualizzazione in mappa delle Frequenze e della Ampiezze individuate dai rilievi HVSR.

In base a quanto esposto in figura 9.1.4 ne viene riportata un esempio in miniatura della tavola.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

E' necessario precisare che, talora, esistono anche ulteriori massimi con frequenza  $F > 15$  Hz che, differentemente dai precedenti, non sono stati caratterizzati perché ritenuti non particolarmente significativi per la pericolosità sismica dell'area. Questa tipologia di massimi rappresenterebbe infatti occasionali contrasti di impedenza molto superficiali che, in relazione al normale piano di fondazione degli edifici, è ragionevolmente non significativo.

E' opportuno comunque ricordare che esiste abbondante letteratura comprovante il fatto che l'ampiezza del picco H/V, pur essendo legata all'entità del contrasto di impedenza tra strati, non è correlabile all'amplificazione sismica in modo semplice (cfr. Mucciarelli e Gallipoli, 2001; SESAME, 2005 e referenze ivi contenute) e può essere sensibilmente influenzata da altre variabili naturali e strumentali.



geognostiche, è stata redatta la Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica, restituita a scala 1:10.000.

In funzione delle informazioni rappresentate, la legenda è distinta nelle seguenti parti:

- Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.
- Zone suscettibili di instabilità.
- Forme di superficie e sepolte.
- Tracce di sezione topografica.
- Punti di misura del rumore ambientale.

In riferimento agli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica del Dipartimento di Protezione Civile e gli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica MS versione. 4.2, sono state individuate e delimitate le zone a comportamento equivalente in occasione di sollecitazione sismica.

Per la copertura dell'area di studio è stata sviluppata 1 tavola dell'elaborato MOPS di cui nel seguito se ne riporta una miniatura.

Le microzone possono essere classificate in tre categorie:

- a) zone stabili, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di rilievo di alcuna natura (substrato geologico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata – pendii con inclinazione inferiore a circa 15°);
- b) zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, per effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale;
- c) zone suscettibili di instabilità, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a deformazioni permanenti nel territorio. I principali tipi di instabilità sono: instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci e cedimenti differenziali.

In base a tale modalità di classificazione ed alle peculiarità del territorio studiato si possono trarre le seguenti considerazioni:

#### Zone stabili

All'interno del territorio del territorio comunale non sono state riscontrate microzone definibili come “stabili”. Questo è dovuto in particolare al fatto che non è presente in affioramento a bassa acclività il bedrock sismico né quello geologico inalterato.

#### Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

All'interno dei territori in studio sono presenti Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali per soli motivi stratigrafici. La litologia prevalente delle coperture è sicuramente influenzata dai processi deposizionali e genetici di messa in posto dei sedimenti, costituita da depositi di piana alluvionale prevalentemente limoso-



*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

argillosi di significativo spessore (dell'ordine da alcune decine di metri sino ad oltre 100 mt nei settori più profondi della conoide alluvionale entro il territorio comunale) con subordinati depositi di canale localmente più grossolani (strutture di canale e paleoalveo) rappresentate dalle colonnine stratigrafiche con codice 2001-2002.

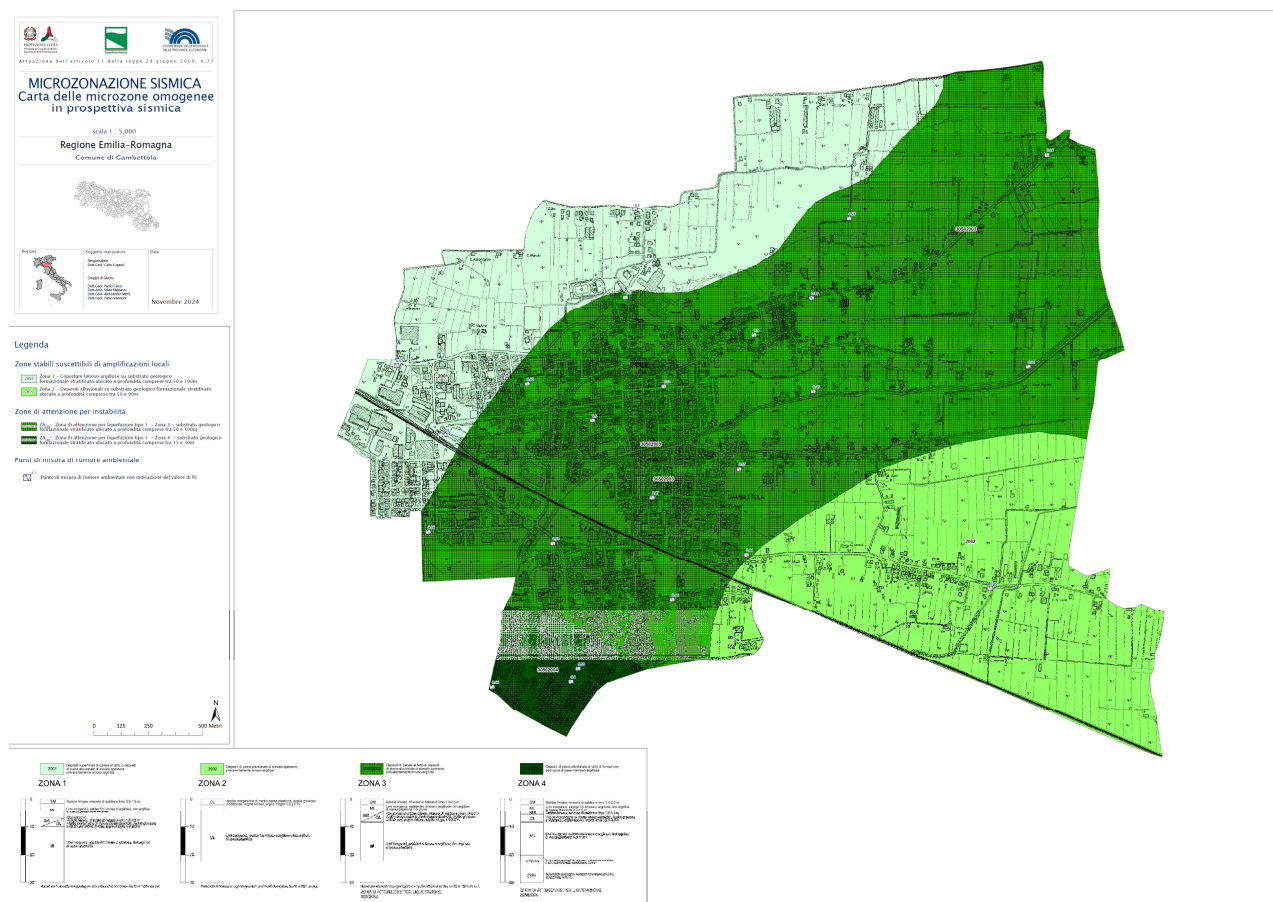


Figura 9.1.5 - Miniatura esemplificativa della Carta delle MOPS.

Le problematiche di instabilità per potenziale liquefazione risultano interessare una parte significativa dell'urbanizzato e delle strutture/infrastrutture strategiche (viabilità, linea ferroviaria, stazioni ferroviarie, scuole, ecc.). A tal proposito si rammenta come a seguito degli approfondimenti di Livello III, svolti secondo scenari di pericolosità sismica definiti per un tempo di ritorno di  $Tr \leq 475$  anni, una parte delle zone individuate nello studio di II Livello come 30502003 ("instabili per liquefazione"), in virtù di particolari aspetti deposizionali o di assetto stratigrafico, siano risultate contraddistinte da valori di potenziale di liquefazione  $0 \leq IL \leq 2$ , generalmente indice di una bassa probabilità di occorrenza oltreché de modeste manifestazioni superficiali e ridotti cedimenti post-sismici attesi..

Tuttavia si ribadisce come tali valutazioni siano afferibili solo a  $Tr \leq 475$  anni, mentre per tempi di ritorno superiori, in virtù degli assetti stratigrafici ed idrogeologici ivi rilevati, possa permanere il rischio per liquefazione.

La corrispondenza tra elementi di copertura geologico-tecnici prevalenti e le Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali della Carta delle MOPS diventano quindi le seguenti:

Zone stabili: n. 2

	<b>codice colonnina</b>	<b>copertura</b>
2001		SM
2002		CL

#### Zone suscettibili di instabilità

Le zone suscettibili di instabilità individuate all'interno delle aree urbanizzate e urbanizzabili del comune fanno riferimento ad aree con potenziale presenza di fenomeni di instabilità per liquefazione, soprattutto in corrispondenza/prossimità di strutture sedimentarie di canale/paleocanale, maggiormente ricche in orizzonti sabbiosi incoerenti con modesto stato di addensamento:

Zone Instabili: n. 2

	<b>codice colonnina</b>	<b>copertura</b>
2003		SM
2004		SM

Per i dettagli delle singole zonazioni si rimanda pertanto alla tavola delle MOPS.

Nell'area di studio, con particolare riferimento alle zone urbanizzate ed urbanizzabili, non sono presenti elementi strutturali (faglie, ecc..) certi, in quanto dalla consultazione del database Itaca non è stato rilevato alcun elemento tettonico attivo e capace, certo e documentato, che possa determinare effetti superficiali nelle aree urbanizzate in oggetto.

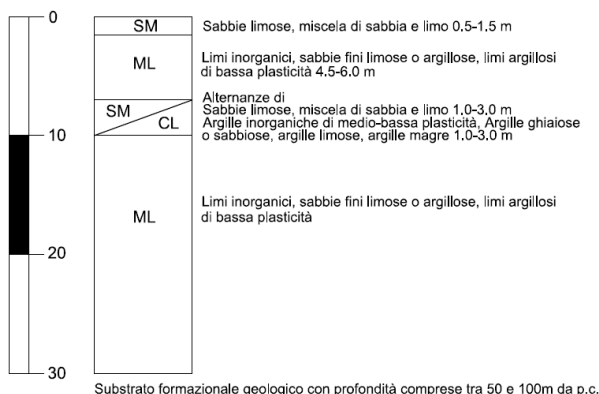
Di seguito si riporta una descrizione delle microzone omogenee in prospettiva sismica, definibili per le aree in esame, con gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi (ogni colonnina riporta le litologie prevalenti con una breve descrizione ed è associata ad una microzona in pianta):

# Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)

## Relazione Tecnico Illustrativa

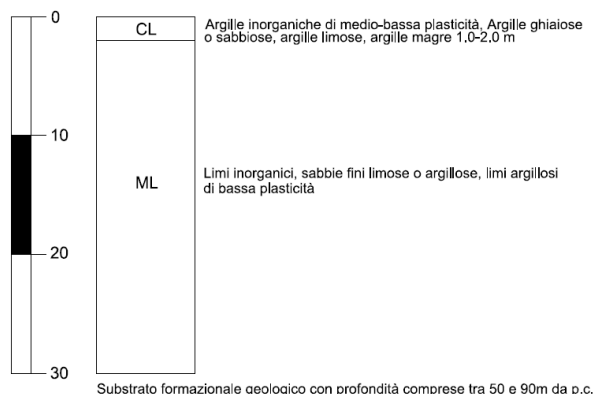
**2001** Depositi superficiali di canale al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi

### ZONA 1



**2002** Depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi

### ZONA 2



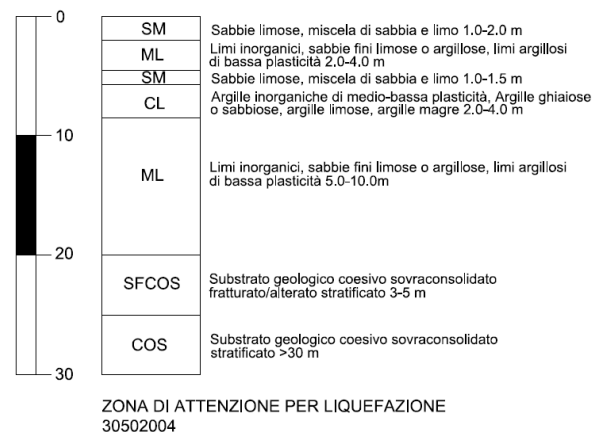
**30502003** Depositi di canale al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi

### ZONA 3



**30502004** Depositi di piana alluvionale al tetto di formazione geologica di base marnoso-argillosa

### ZONA 4



Per tutte le zone illustrate sono attese amplificazioni del moto sismico per soli motivi stratigrafici (in quanto le aree risultano sub pianeggianti).

Tali fenomeni, ove ipotizzabili, sono stati successivamente quantificati tramite gli approcci semplificati indicati nelle ICMS 2008 per scarpate e versanti con conformazione a cresta (paragrafo 3.3, pag. 158-160, Volume 3).

## **9.2 MICROZONAZIONE SISMICA AL II LIVELLO DI ANALISI**

### ***9.2.1 Carta delle velocità delle onde di taglio “Vs”***

Per la costruzione della carta delle velocità delle onde di taglio sono state utilizzate le indagini di misura indiretta maggiormente rappresentative che hanno consentito di raggiungere profondità  $\geq 30$  m, avvalendosi a titolo correlativo di tutte le altre prove a minor penetrazione.

I test di misura geofisica diretta utilizzati risultano suddivisi come segue:

- 23 prove Puntuali HVSR;
- 3 prove Puntuali SCPT;
- 12 Lineari in array monodimensionale (Masw);
- 3 Lineari in array bidimensionale (ESAC/SPAC);

In Figura 9.2.1 è possibile osservare la distribuzione sul territorio delle differenti indagini sismiche: ogni rilievo è stato codificato come riportato negli standard di archiviazione e rappresentazione informatica 4.2 riferiti a “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”.

In base alle caratteristiche dei depositi di copertura ed alla profondità del substrato geologico di misura, per ciascun sito si è valutato il valore rappresentativo di Vs30 o all’occorrenza VsH (H=spessore delle coperture) in corrispondenza dei terreni con coperture su substrato non rigido, caratterizzato da Vs  $\ll$  800 m/s.



## Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC) Relazione Tecnico Illustrativa

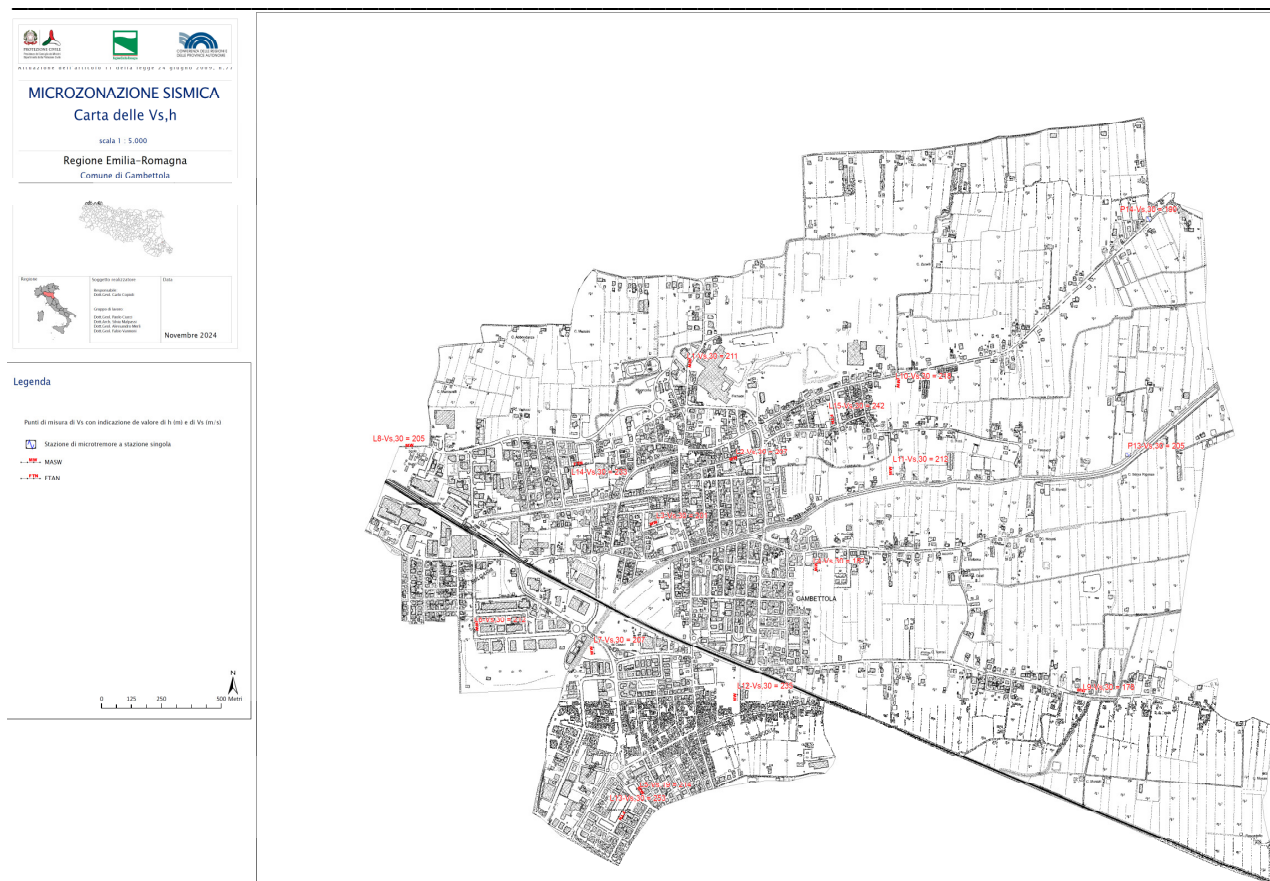


Figura 9.2.1 – Miniatura esemplificativa della carta delle velocità delle onde di taglio  $V_sH$ .

### 9.2.2 Carte dei Fattori di Amplificazione Stratigrafica

I terreni in studio di Gambettola, data la conformazione ed estensione del territorio comunale, presentano caratteristiche litologiche solo a tratti differenti (vedi Cap. 4), per cui le maggiori variazioni risultano nello spessore delle coperture alluvionali sul substrato formazionale geologico.

Per quanto attiene la microzonazione di II Livello il territorio in studio è stato discretizzato schematizzando situazioni geologiche omogenee al fine di poter stimare in maniera consona i fattori di amplificazione sismica tramite metodo semplificato tabellare proposto nella DGR 630/2019 e successivo aggiornamento DGR 476/2021. Quindi sulla base della descrizione del contesto geologico di applicazione di ciascuna tabella e delle profondità attese per il substrato, si sono utilizzati i parametri di amplificazione definiti nelle tabelle denominate: Appennino – “coperture su substrato non rigido” e Pianura 1. In figura 9.2.2 viene illustrato lo schema di applicazione delle tabelle succitate per i diversi ambiti geologici.

In ambito di transizione alla pianura, per cogliere in modo maggiormente significativo a livello locale la variazione dei fattori di amplificazione (FA) in funzione degli effetti stratigrafici, l’assegnazione di tali coefficienti è stata definita attraverso la stima puntuale del parametro di velocità equivalente  $V_sH$ , secondo la seguente formulazione:

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N h_i / V_{si}}$$
 dove N è il numero di strati del profilo sismico corrispondenti alla copertura, H è lo spessore totale (in m) dei terreni di copertura o profondità del tetto del substrato,  $h_i$  = spessore (in m) dello strato i-esimo (fino al substrato),  $V_{si}$  = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino al substrato).

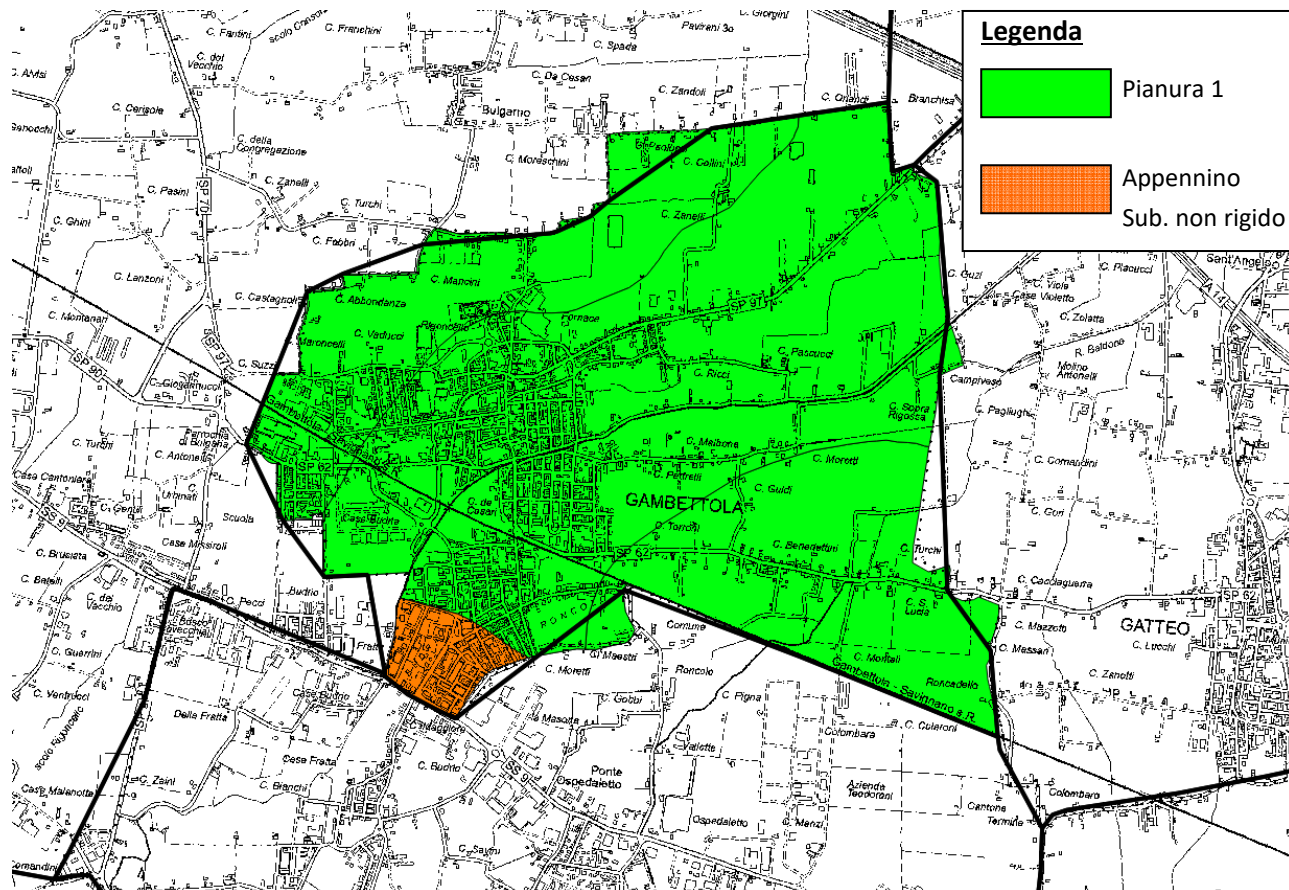


Figura 9.2.2 – Schema di applicazione delle tabelle di approccio semplificato per la stima dei fattori di amplificazione sismica nei diversi ambiti geologici del territorio comunale.

In particolare, date le caratteristiche di rigidità sismica delle formazioni geologiche locali, per la stima di H si è assunta la profondità del tetto del substrato “non rigido”, ovvero il substrato geologico inalterato contraddistinto da una  $V_s \ll 800$  m/s.

In tal senso per l’applicazione della Tabella “Appennino - coperture su substrato non rigido” si è adottato il valore di  $V_{sH}$  per la profondità media rappresentativa dei depositi di copertura su materiali di base più rigidi, stimata pari ad H=19-30 m, al fine di ottenere una lettura omogenea e calibrata sullo specifico contesto geologico/territoriale.

Per la tabella Pianura 1 invece ci si è avvalsi del valore di  $V_{s30}$  utile alla stima dei fattori di amplificazione sismica di ciascuna relativa microzona. Tali scelte sono state guidate anche sulla scorta delle considerazioni

ed esperienze illustrate nello studio “Revisione della suddivisione del territorio regionale in ambiti geolitologici omogenei (A. Tento, L. Martelli, A. Marcellini, 2015)”, alla base della definizione delle nuove tabelle di approccio semplificato per MS2.

Gli ambiti vengono quindi caratterizzati dai seguenti Fattori di amplificazione per effetto stratigrafico che intervengono sulle ampiezze spettrali (in accelerazione e velocità):

$F_{PGA} = PGA/PGA0$ , dove  $PGA0$  è l’accelerazione massima orizzontale a periodo  $T=0$  al suolo di riferimento e  $PGA$  è l’accelerazione massima orizzontale a periodo  $T=0$  alla superficie del sito;

$FA = SA/SA0$ , dove  $SA0$  è l’integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e  $SA$  è l’integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi  $T$ :  $SA1$  per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ,  $SA2$  per  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $SA3$  per  $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ,  $SA4$  per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;

$FH = SI/SI0$ , dove  $SI0$  è l’integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e  $SI$  l’integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi  $T$ :  $SI1$  per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ,  $SI2$  per  $0,5s \leq T \leq 1,0s$ ,  $SI3$  per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ .

A tal proposito si evidenzia come per gli ambiti caratterizzati dalla Tabella Appennino - coperture su substrato non rigido, in virtù degli spessori delle copertura e della tipologia di risposta sismica caratteristica, non vengano definiti i fattori di amplificazione  $SA4$  ed  $SI3$ , venendo pertanto stralciati dalle relative carte di MS2.

In dettaglio, le 8 carte di Microzonazione di II Livello (Fa-PGA - Fa\_SA1 - Fa\_SA2 - Fa\_SA3 - Fa\_SA4 - Fa\_SI1 - Fa\_SI2 - Fa\_SI3) sono state costruite come segue:

- A ciascuna Microzona individuata nella carta delle MOPS è stato assegnato, in base ai rilievi disponibili riportati nella mappa delle velocità, un unico valore rappresentativo di  $V_s$ . Tale valore è stato assegnato in termini di  $V_{s30}$  o  $V_{sH}$  (in funzione del contesto geologico e profondità del bedrock geofisico o contrasti di impedenza significativi); al proposito si rileva come rigidità proprie di substrati con  $V_s \geq 800$  m/s si possano riscontrare solo a profondità elevate.
- In base a ciascun valore  $V_s$  assegnato alle varie zone ( $V_{s30}$  o  $V_{sH}$ ) è stato successivamente possibile identificare e/o accoppiare Microzone con caratteristiche dinamiche simili, suddividendo il territorio in zone a caratteristiche amplificative omogenee.
- In base agli abachi proposti nella DGR 630/2019 e successivo aggiornamento DGR 476/2021 (riportati in Figura 9.2.3) denominati rispettivamente A2.1.2- “PIANURA 1” e A2.1.1- “Appennino - coperture su substrato non rigido”, sono stati quindi assegnati i Fattori di Amplificazione corrispondenti alla classe di  $V_{s30}$  o  $V_{sH}$  precedentemente determinata.

# Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)

## Relazione Tecnico Illustrativa

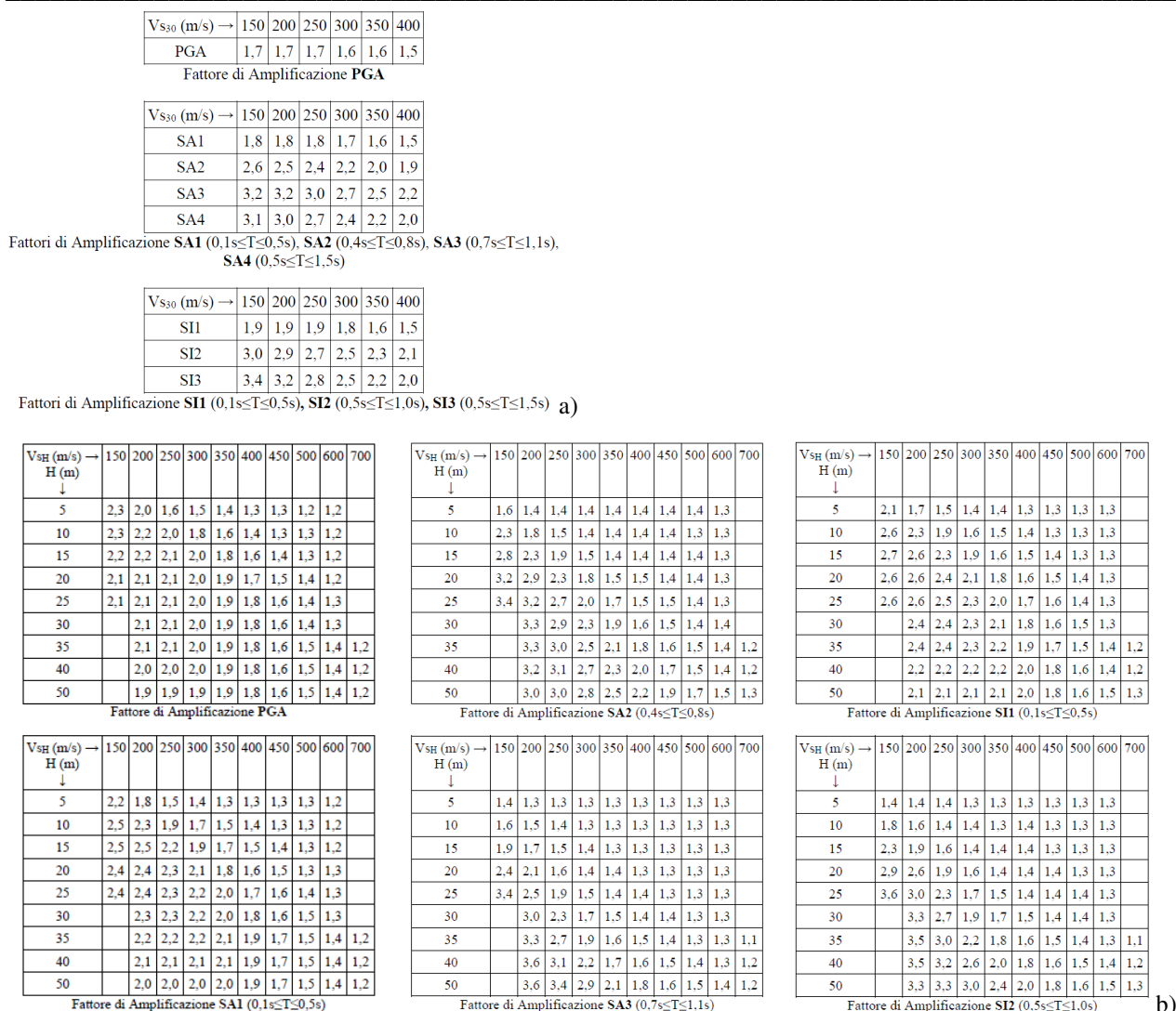


Figura 9.2.3 - Abachi definiti dalla Regione Emilia Romagna per il calcolo dei Fattori di Amplificazione al II livello di analisi di Microzonazione Sismica: Pianura 1 (a), Appennino - coperture su substrato non rigido (b).

Quindi gli elaborati finali sono stati realizzati accoppiando aree con valori di FA simili, come riportato negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica 4.2 in allegato alle linee guida per la Microzonazione Sismica. In Figura 9.2.4 vengono mostrate le classi di colore assegnate per ciascun range di amplificazione ottenuto.











Per ciascuna microzona, tramite specifiche etichette sovrimposte a livello grafico, è stato altresì riportato il relativo valore numerico del Fa ottenuto sia per le zone stabili che di attenzione per instabilità, nonostante possano essere caratterizzate da complessi fenomeni di amplificazione sismica e, spesso, da significative deformazioni e condizioni di comportamento non lineare, per cui è opportuno svolgere approfondite verifiche tramite specifici approfondimenti di III Livello.

In linea generale nelle aree di piana alluvionale, data la profondità del bedrock e la natura/rigidezza dei depositi superficiali, i fattori di amplificazione (sia in accelerazione che in velocità) tendono a risultare

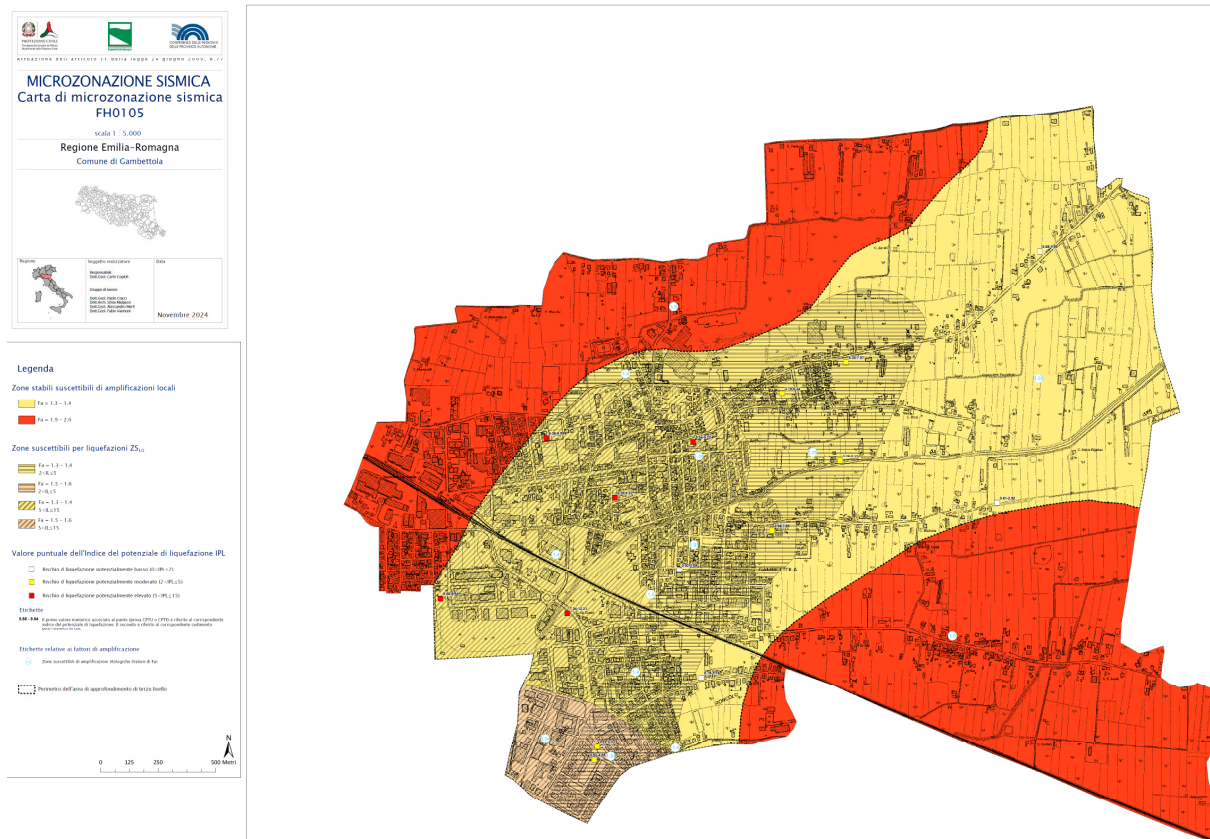


correlati tra loro, sia nei range spettrali di media-alta frequenza (PGA, 0.1-0.5s, 0.5-1.0s, 0.7-1.1s) che a bassa frequenza (0.5-1.5s). Una maggior differenza si rileva nel settore di territorio più a monte, (in prossimità della Via Emilia S.S 9), in cui il bedrock geologico comincia velocemente a divenire più superficiale con progressivo assottigliamento delle coperture alluvionali normal consolidate. Qui si evidenzia infatti un maggior incremento degli effetti amplificativi nell'ambito delle alte e medie frequenze ed al proposito, in corrispondenza delle zone di Appennino - coperture su substrato non rigido, la direttiva regionale non prevede la stima (e conseguente mappatura) dei parametri di amplificazione nel range 0.5-1.5s (SA4 ed SI3).

Diversamente, a seguito degli approfondimenti di III Livello, in corrispondenza delle microzone potenzialmente soggette a potenziale liquefazione, i relativi fattori di amplificazione sono stati calcolati tramite analisi di risposta sismica locale, sostituendoli a quelli preliminarmente stimati da approccio tabellare

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (classe del parametro di amplificazione). <sup>14</sup>	
	1.1 - 1.2
	1.3 - 1.4
	1.5 - 1.6
	1.7 - 1.8
	1.9 - 2.0
	2.1 - 2.2
	2.3 - 2.4
	2.5 - 3.0
	3.1 - 3.5
	>3.5

*Figura 9.2.4-Classi di colore riferite ai Fattori di Amplificazione (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. MS. Versione 4.2)*



**Figura 9.2.5 - Miniatura della carta di MS per periodi dello spettro di risposta in velocità (Housner) tra 0.1-0.5 s ( $F_{a\_SII}$ ).**

### **9.2.3 Fattori di Amplificazione Topografica**

Considerato che il territorio studiato si conforma secondo un assetto sub pianeggiante, in cui sono assenti elementi morfologici locali potenzialmente comportanti fenomeni di amplificazione di tipo topografico, coerentemente a quanto previsto dalle linee guida regionali (Par. A2.2 - Del. G.R. 564/2021 R.E.R.) ed alle linee guida della protezione civile (ICMS 2008), non si è ritenuta necessaria una stima di tali fattori di amplificazione, assumendo come unico e prevalente motivo di amplificazione sismica il solo fattore stratigrafico.

### **9.2.4 Carta del parametro di scuotimento sismico assoluto " $H_{SM}$ "**

Per rappresentare in maniera assoluta e più realistica la pericolosità sismica del territorio, tenendo conto sia della pericolosità di base sia degli effetti di sito la Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021, richiede altresì una carta della distribuzione sul territorio dei valori di intensità sismica  $H_{SM}$  (Naso et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in "cm/s<sup>2</sup>" o "g"), dato dal prodotto del parametro di intensità spettrale  $ASI_{UHS}$  (Acceleration Spectrum Intensity), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione

calcolato per l'intervallo di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , diviso per  $\Delta T$  (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

I valori di riferimento  $ASI_{UHS}/\Delta T$ , calcolati per ogni punto della griglia INGV, sono riportati nel file all\_4\_coord.kmz sviluppato a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna, adottando di volta in volta quelli del nodo più vicino.

Tale parametro consente una rappresentazione assoluta della pericolosità sismica del territorio, la zonazione del territorio in termini di  $H_{SM}$  permette di stabilire una reale graduatoria di pericolosità tra le varie zone omogenee ed è quindi un elemento conoscitivo fondamentale per una più realistica valutazione del rischio sismico; in particolare l'intervallo di periodi compreso tra 0,1 s e 0,5 s, risulta di grande interesse per il governo del territorio e per la pianificazione urbanistica, in quanto è noto da vari studi che i periodi propri della maggior parte degli edifici dei centri storici, e dei centri abitati in generale, sono compresi in questo intervallo e, pertanto, consente anche eventuali valutazioni preliminari sul danneggiamento potenziale atteso. Al proposito Naso et al., 2019 propongono una discretizzazione secondo classi di valori di  $H_{SM}$  in relazione all'intensità macrosismica e danneggiamento potenziale attesi (vedi Tabella 9.2.1).

*Tabella 9.2.1 – Ipotetiche classi di intensità  $H_{SM}$  in relazione ad altri fenomeni fisici (Naso et al., 2019 modificato)*

Seismic hazard	low-very / low	moderate / low	moderate	high	very high
$H_{SM}$ (g)	$\leq 0.183$	$0.183 < H_{SM} \leq 0.347$	$0.347 < H_{SM} \leq 0.663$	$0.663 < H_{SM} \leq 1.264$	$> 1.264$
Potential damage	none - very light	very light – moderate	moderate – heavy	heavy	very heavy
Instrumental intensity	$\leq VI$	VII	VIII	IX	$\geq X$

Secondo gli autori infatti tale relazione empirica, correlata alla PGA ed ai fattori di amplificazione, risulta congrua con i risultati ed altri parametri sismici adottati per la classificazione sismica del territorio (Gomez Capera et al. 2007, 2015 - Faenza e Michelini, 2010 - Bramerini e Di Pasquale, 2002).

Nella rappresentazione cartografica si sono adottate le classi di pericolosità e relativa vestizione indicate dalla Regione Emilia Romagna in conformità alle recenti “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni” – versione 2.0 (2022). In tabella 9.2.2. si riportano le classi di  $H_{SM}$  di riferimento:

*Tabella 9.2.2 – Classificazione di  $H_{SM}$  per i 3 intervalli di periodo spettrale (LG “Amplificazioni” – versione 2.0, 2022).*

Intervalli di periodo	Classificazione $H_{SM}$ [g]			
	Basso (ZS4 <sub>SM</sub> )	Medio (ZS3 <sub>SM</sub> )	Alto (ZS2 <sub>SM</sub> )	Molto alto (ZS1 <sub>SM</sub> )
$T1_{(0.1-0.5)}$	$\leq 0.21$	0.22-0.54	0.55-0.85	$\geq 0.86$
$T2_{(0.4-0.8)}$	$\leq 0.14$	0.15-0.34	0.35-0.55	$\geq 0.56$
$T3_{(0.7-1.1)}$	$\leq 0.09$	0.10-0.22	0.23-0.35	$\geq 0.36$

Anche per quanto riguarda la definizione di tale parametro di pericolosità sismica, i valori preliminarmente stimati per il solo  $H_{SM}$ , a seguito di analisi di RSL, sono stati aggiornati ed integrati sia per l'intervallo di periodo  $0,1s \leq T \leq 0,5s$  che  $H_{0408}$ ,  $H_{0711}$ ,  $H_{0515}$ , ovvero lo scuotimento in accelerazione (g) atteso al sito per gli intervalli di periodo  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ .

Di seguito si riporta uno stralcio esemplificativo della tavola relativa al parametro di scuotimento assoluto  $H_{SM}$  (figura 9.2.6), alla quale si potrà fare riferimento per un maggior dettaglio.

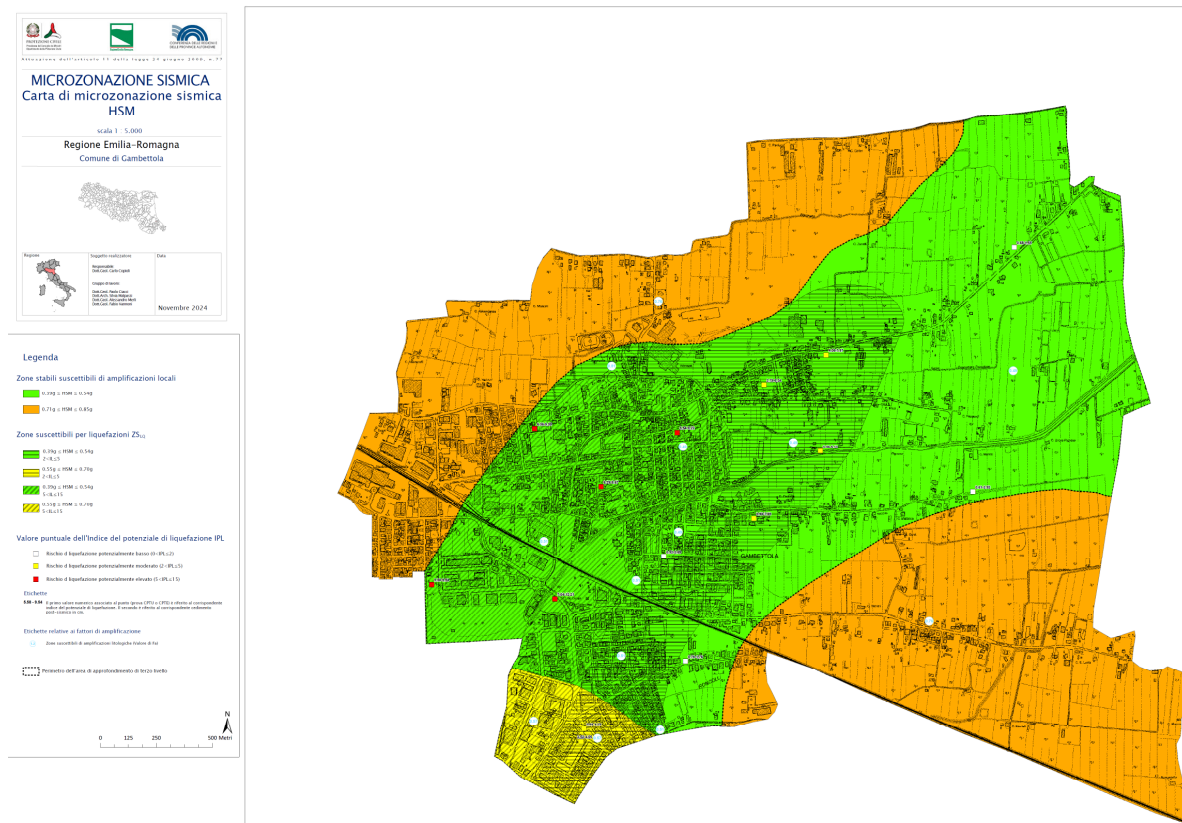


Figura 9.2.6 – Miniatura esemplificativa della carta di scuotimento assoluto  $H_{SM}$ .

## 10. MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO III (ANALISI DI RSL E LIQUEFAZIONE)

Sulla base delle informazioni stratigrafiche profonde e superficiali, nonché sulla scorta delle analisi di laboratorio geotecnico e ciclico e delle indagini geognostiche e geofisiche effettuate in sito, sono state realizzate una serie di analisi di RSL sulle verticali ritenute maggiormente significative. Il territorio costiero è stato quindi suddiviso in 3 microzone contraddistinte da condizioni di pericolosità sismica omogenee, in base alle quali sono state condotte le verifiche a liquefazione tramite metodologie semplificate sulla scorta di prove Cpte/u, adottando metodi ritenuti congrui ed adeguati alle condizioni litostratigrafiche e suggeriti dalle linee guida di settore nonché contemplati fra i metodi della Geotecnica Sismica.

Dall'esito congiunto di queste metodologie di indagine si sono quindi sviluppate le cartografie di Microzonazione Sismica di Terzo Livello di approfondimento per liquefazione.



## **10.1. Analisi di Risposta Sismica Locale**

### *10.1.1 Modellazione numerica e codici di calcolo*

Le analisi numeriche sono state effettuate in condizioni monodimensionali tramite il codice STRATA (Kottke e Rathje, 2008), che modella una colonna di terreno come un continuo stratificato a comportamento visco-elastico lineare. Le equazioni del moto sono risolte nel dominio della frequenza attraverso il calcolo e la successiva convoluzione delle funzioni di trasferimento di ogni strato, analogamente a quanto fatto dal ben noto codice di calcolo SHAKE91 (Idriss e Sun, 1992). La non linearità delle proprietà dinamiche, assunte indipendenti dalla frequenza, è portata in conto tramite l'approccio *lineare equivalente*. Secondo tale modello, il modulo di taglio  $G$  e il fattore di smorzamento  $D$ , che descrivono il comportamento meccanico di un materiale sotto sollecitazioni cicliche, vengono fatti dipendere dal livello della deformazione tangenziale  $\gamma_c$  indotta dalle sollecitazioni sismiche. A partire dai valori iniziali dei parametri di rigidità e smorzamento con una prima analisi si determina un primo valore caratteristico (o effettivo) della deformazione tangenziale  $\gamma_{eff}$ . Dalle curve  $G/G_0-\gamma_c$  e  $D-\gamma_c$ , che esprimono il comportamento non lineare, si determinano quindi nuovi valori di  $G$  e  $D$  e si esegue una nuova analisi determinando un nuovo valore caratteristico. Il procedimento viene ripetuto fino a quando lo scarto percentuale tra i valori di  $G$ ,  $D$  e  $\gamma_{eff}$  viene ritenuto accettabile.

Per le analisi sui segnali/spettri in fase di input/output sono stati utilizzati i software SeismoSignal e SeismoMatch, sviluppati dalla soc. SeismoSoft, di cui si dispone della relativa licenza d'uso.

### *10.1.2 Moto di input*

Come previsto da Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, le analisi di Risposta Sismica Locale (*RSL*) sono state condotte considerando, in ciascuna simulazione, differenti storie temporali applicate al bedrock sismico, in modo da poter investigare, quanto più possibile, il comportamento del sottosuolo e la sua suscettibilità ai fenomeni amplificativi/dissipativi quando sottoposto ad azioni sismiche differenti. In dettaglio, sono stati utilizzati i 7 segnali di riferimento indicati dalla Regione Emilia Romagna in DGR 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*. Si tratta di **Accelerogrammi Naturali** estratti da una specifica banca dati tramite piattaforma WebGIS realizzata dall'istituto EUCENTRE: <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html>

Tali accelerogrammi vengono selezionati secondo il principio di spettro compatibilità, utilizzando una procedura simile a quella adottata per la creazione di SEISM-HOME (Rota et al., 2012), considerando le prescrizioni delle NTC08 e NTC18 (ossia lo scarto tra lo spettro medio ottenuto dai 7 accelerogrammi e lo spettro di riferimento non deve superare una specifica soglia all'interno di un prefissato campo di periodi).

L'adattamento dei singoli segnali, selezionati tramite uno specifico algoritmo, avviene tramite scalatura lineare all'accelerazione di ancoraggio prevista al bedrock, risultando quindi spettro-compatibili con lo

spettro elastico in accelerazione definito per un determinato  $T_r$  (tempo di ritorno) al nodo del reticolo INGV più vicino, individuato secondo le modalità definite al precedente Capitolo 3.

La “forma generale” dei 7 accelerogrammi (la cui sigla è definita dal tempo di ritorno+codice identificativo del nodo di riferimento+suffisso\_1,2 ....es. TR475\_ID18520\_1) è indicativamente riportata in figura 10.1.

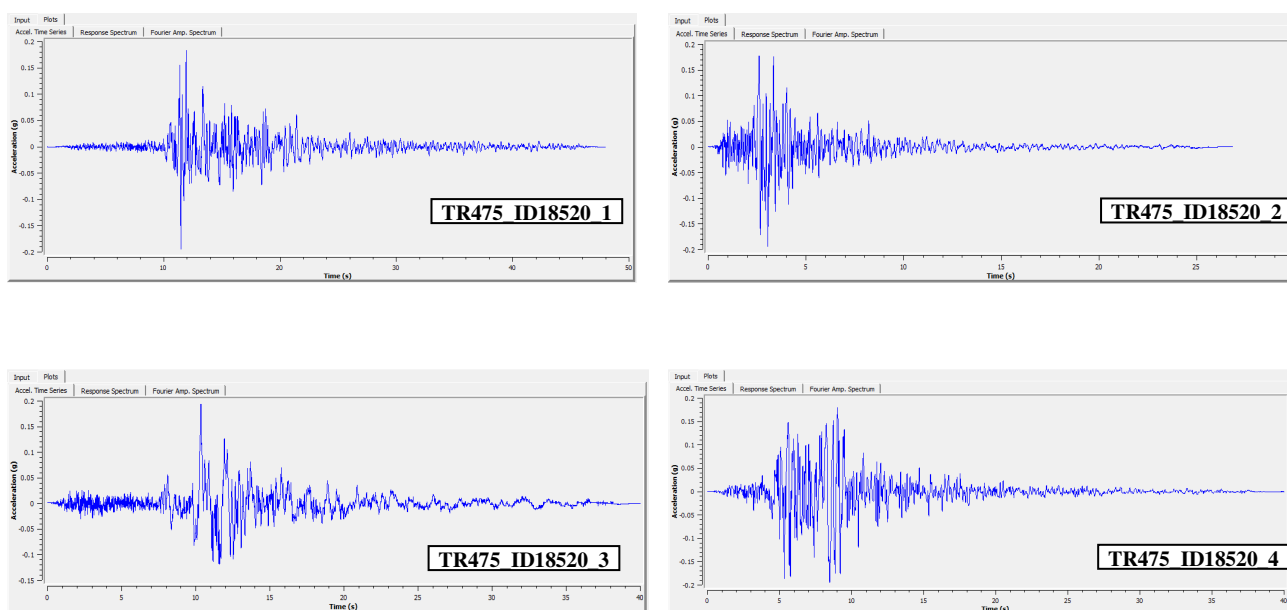
***Gli accelerogrammi, opportunamente scalati, sono stati estrapolati ai nodi di riferimento più vicini al sito di indagine, scalandoli successivamente all’accelerazione stimata al suolo rigido di tipo A tramite il documento excel “Spettri-NTCver.1.0.3” fornito dal CSLP.***

Il valore di profondità del bedrock sismico, al quale sono stati applicati in “outcrop” i 7 segnali di riferimento, è stato determinato sia sulla base dell’analisi congiunta delle diverse prove geofisiche in sito sia sulle informazioni derivanti da indagini geognostiche. A tal proposito i profili di  $V_s$  di riferimento sono sintetizzati in figura 6.2 del precedente Capitolo 6.

Il comportamento geomeccanico/geofisico di tale interfaccia è stato descritto mediante i seguenti parametri:  $\delta=22 \text{ kN/m}^3$ ,  $700 < V_s < 800 \text{ m/sec}$  e  $D_0=0.005$  (smorzamento/damping = 0.5 %). In particolare il gradiente di  $V_s$  profondo, dalla base del profilo SCPT sino al bedrock sismico, è stato definito tramite le indagini ESAC coerentemente al fit con i picchi H/V, ed il valore di  $V_s$  stimato per il bedrock sismico, sebbene lievemente inferiore alla soglia di 800 m/s, risulta comunque coerente alle esperienze di Crespellani e Simoni (2007) e Crespellani et Al. (2008) per terreni fini sovraconsolidati di analoga natura e simili profondità.

Al di sotto del bedrock si ipotizza un modesto e progressivo incremento della velocità in onde  $V_s$  e, quindi, nel comportamento geofisico e di rigidezza dei materiali, con sostanziale assenza di significativi fenomeni amplificativi nei campi di interesse ingegneristico.

Il livello freatico medio utilizzato per la modellazione numerica risulta variabile in relazione al sito di verifica e, comunque, mediamente identificato a circa -1.5 m dal p.c. locale, quale massimo innalzamento stagionale ipotizzabile.



*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

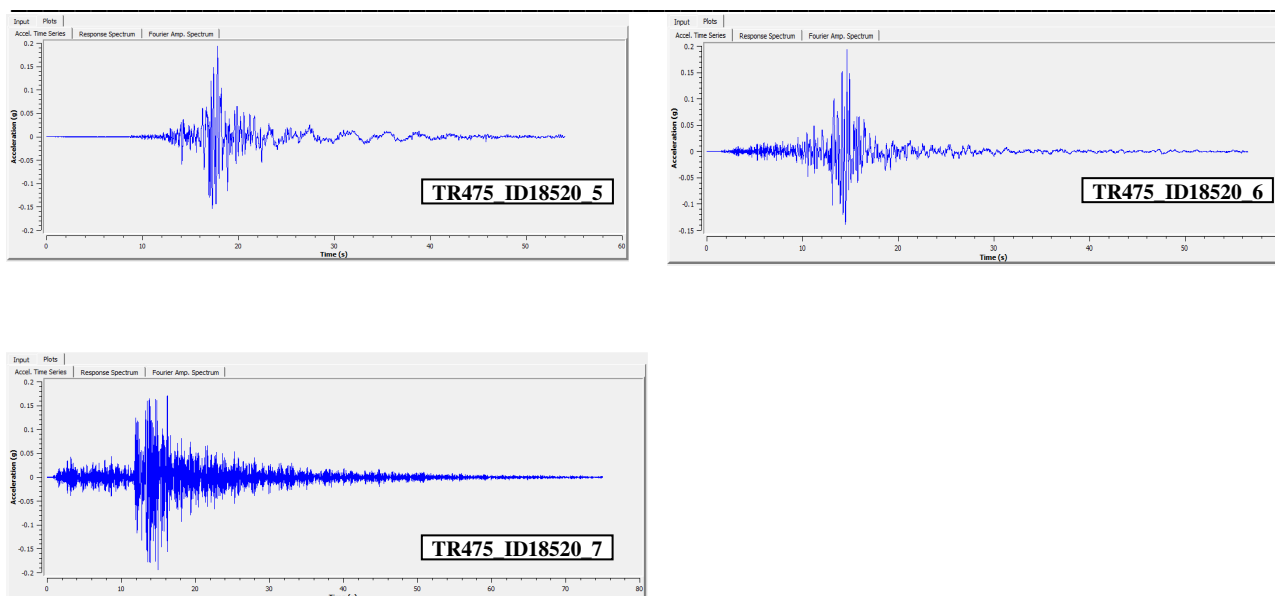


Figura 10.1-Sismogrammi di riferimento al nodo ID18520, utilizzati come “Input” al bedrock per le analisi di RSL.

### 10.1.3 Modello di sottosuolo e parametri dinamici

Per quanto riguarda la caratterizzazione dinamica dei terreni, al fine di ottenere curve di decadimento del Modulo di taglio normalizzato ( $G/G_0$ ) e dello smorzamento ( $D\%$ ) rappresentative per l'area, sono state utilizzate sia curve di letteratura sviluppate su campioni di alta qualità di terreno analoghi (per caratteristiche granulometriche e costitutive).

In virtù di recenti esperienze di laboratorio dinamico condotte su terreni analoghi ed in zone limitrofe a quelle di studio i modelli di terreno di letteratura utilizzati a tale scopo per i terreni prevalentemente sabbiosi (Sabbie Limose) e limoso-argillosi (Limi\_Arg NC) superficiali sono quelli sviluppati rispettivamente da: Seed & Idriss “Sand Mean”, Idriss (1990) “Clay”.

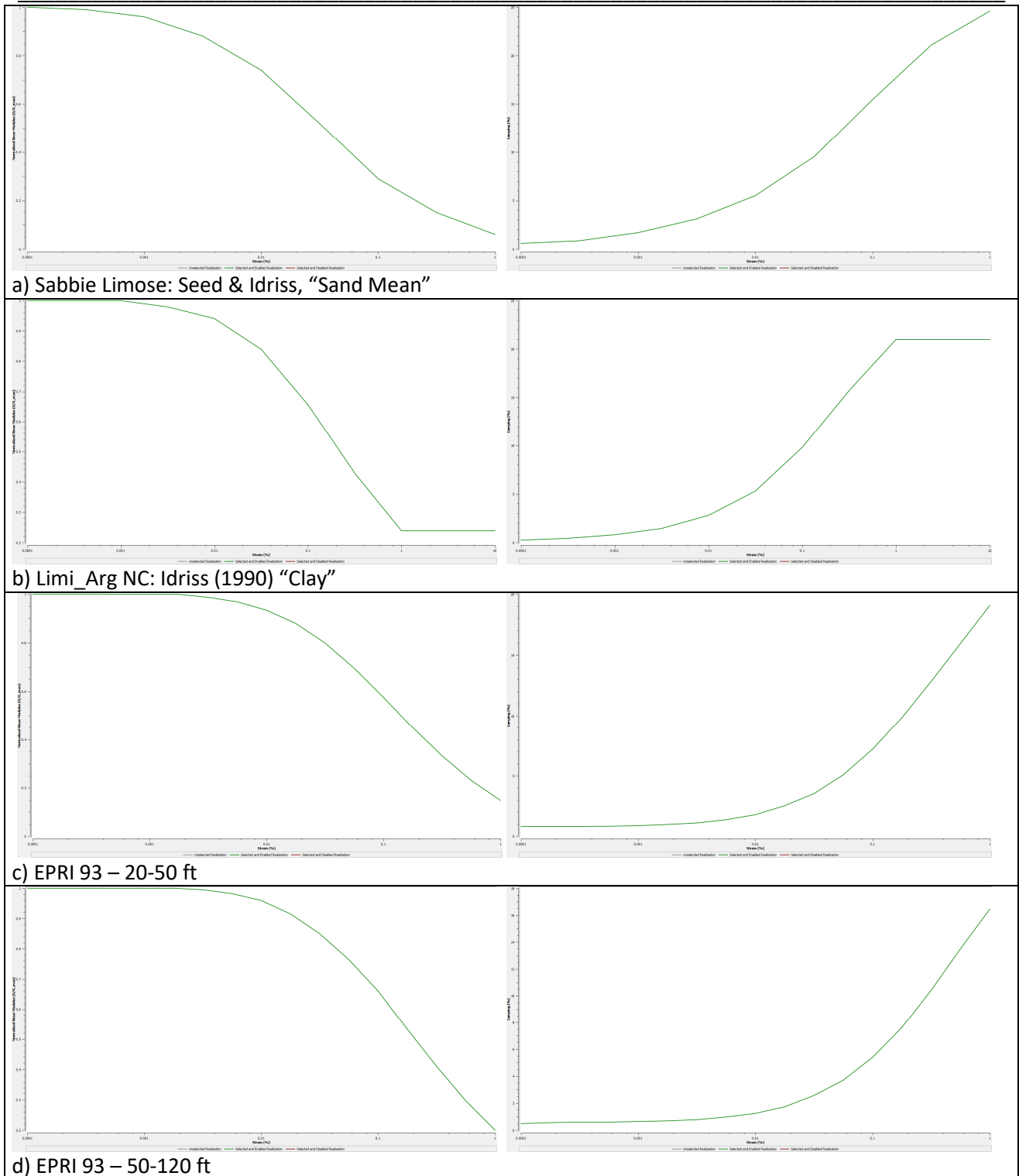
Per i sismostrati più profondi, non sondati e campionati direttamente, data la varietà tipologica dei materiali presenti (frequenti alternanze di limi-argillosi e, talora, orizzonti ghiaioso-sabbiosi), si sono utilizzate le curve di letteratura EPRI 93, formulate per terreni generici in funzione della profondità/carico litostatico (20-50 ft / 50-120 ft).

Per quanto riguarda invece i terreni appartenenti prevalentemente alla formazione geologica di base, prevalentemente di natura marnoso-arenacea, denominata “Sub Marnoso”, si sono utilizzate le curve sperimentali di Crespellani et al. 2007/2008, sviluppate a seguito di studi condotti in località vicine (Senigallia) su terreni appartenenti alla stessa formazione geologica e profondità comparabili (Crespellani et Al., 2007/2008 - Plio-Pleistocene Mean).

La scelta delle curve utilizzate per ciascun sismostrato è stata condotta, quindi, sull'assunzione che il comportamento dei materiali, oltre che su parametri litologici, varia anche in funzione di:

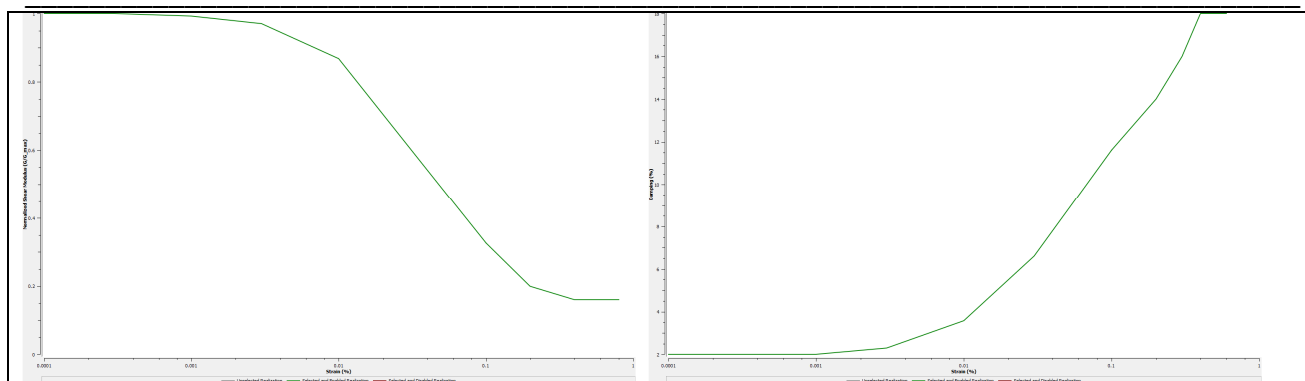
- Profondità/pressione di confinamento • OCR • IP • Frequenza • N. cicli

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa





# Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC) Relazione Tecnico Illustrativa



e) Sub Marnoso: Crespellani et Al. (2007-2008)

Figura 10.2- Curve di caratterizzazione dinamica dei terreni, curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G/G_0$  e Curve di smorzamento  $D\%$  per il sismo strato “Sabbie Limose” (a), “Limi\_Arg NC” (b), EPRI 93 – 20-50 ft (c), EPRI 93 – 50-120 ft (d) e “Sub Marnoso” (e).

In Figura 10.2 vengono riportate le curve di decadimento/damping utilizzate per la caratterizzazione dei terreni presso le aree in studio.

Pertanto in figura 10.3 si riportano i modelli di sottosuolo utilizzati per le analisi di RSL in corrispondenza delle verticali rappresentative per le Zone GAM\_01, GAM\_02 e GAM\_03 in cui è stata suddivisa l'area oggetto di approfondimento di analisi.

I gradienti di velocità  $V_s$  sono stati definiti attraverso le numerose prove geofisiche svolte in sito e la calibrazione con prove geognostiche e geofisiche profonde in zone vicini e terreni analoghi. In dettaglio, gli orizzonti più superficiali sono stati caratterizzati utilizzando i risultati delle prove simiche di tipo attivo e diretto (SCPT) mentre, per le  $V_s$  in profondità, sono stati utilizzati i risultati delle analisi ESAC/SPAC tramite inversione congiunta con gli spettri HVSR (per maggiori dettagli capitolo 5-6).

Per il Bedrock sismico si è assunto generalmente un valore di Damping pari a 0.5 %.

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Average Vs (m/s)				
0	1.5	Sabbie-limose	141	18.5	1	EPRI 50-120	303
1.5	1	Sabbie-limose	186	19.5	1	EPRI 50-120	287
2.5	1	Limi_Arg NC	283	20.5	1	EPRI 50-120	293
3.5	1	Sabbie-limose	286	21.5	1	EPRI 50-120	290
4.5	1	Sabbie-limose	256	22.5	1	EPRI 50-120	294
5.5	1	Limi_Arg NC	203	23.5	1	EPRI 50-120	291
6.5	1	Sabbie-limose	256	24.5	1	EPRI 50-120	293
7.5	1	Sabbie-limose	260	25.5	1	EPRI 50-120	357
8.5	1	EPRI 20-50	174	26.5	1	EPRI 50-120	350
9.5	1	EPRI 20-50	199	27.5	1	EPRI 50-120	354
10.5	1	EPRI 20-50	193	28.5	1.5	EPRI 50-120	360
11.5	1	EPRI 20-50	191	30	5	EPRI 50-120	432
12.5	1	EPRI 20-50	229	35	10	Sub Marnoso	422
13.5	1	EPRI 20-50	315	45	10	Sub Marnoso	422
14.5	1	EPRI 20-50	256	55	10	Sub Marnoso	432
15.5	1	EPRI 50-120	281	65	14	Sub Marnoso	442
16.5	1	EPRI 50-120	302	79	20	Sub Marnoso	410
17.5	1	EPRI 50-120	298	99	35	Sub Marnoso	572
				134	---	Bedrock	745

a)

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Average Vs (m/s)
0	1.5	Lim. Arg. NC	212
1.5	1	Lim. Arg. NC	212
2.5	1	Lim. Arg. NC	212
3.5	1	Sabbie-limose	212
4.5	1	Sabbie-limose	217
5.5	1	Sabbie-limose	145
6.5	1	Sabbie-limose	152
7.5	1	EPRI 20-50	232
8.5	1	EPRI 20-50	184
9.5	1	Sabbie-limose	202
10.5	1	Sabbie-limose	161
11.5	1	EPRI 20-50	197
12.5	1	EPRI 20-50	238
13.5	1	Sabbie-limose	198
14.5	1	Sabbie-limose	246
15.5	1	EPRI 50-120	273
16.5	1	EPRI 50-120	238
17.5	1	EPRI 50-120	273

18.5	1	EPRI 50-120	254
19.5	1	EPRI 50-120	285
20.5	1	EPRI 50-120	282
21.5	1	EPRI 50-120	242
22.5	1	EPRI 50-120	234
23.5	1	EPRI 50-120	273
24.5	1	EPRI 50-120	245
25.5	1	EPRI 50-120	236
26.5	1	EPRI 50-120	257
27.5	1	EPRI 50-120	283
28.5	1.5	EPRI 50-120	292
30	8	EPRI 50-120	322
38	20	EPRI 120-250	377
58	15	EPRI 120-250	334
73	27	EPRI 250-500	414
100	51	Sub Mamoso	587
151	—	Bedrock	739

b)

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Average Vs (m/s)
0	1.5	Lim. Arg. NC	200
1.5	1	Sabbie-limose	200
2.5	1	Sabbie-limose	200
3.5	1	Sabbie-limose	213
4.5	1	EPRI 20-50	142
5.5	1	EPRI 20-50	152
6.5	1	EPRI 20-50	166
7.5	1	EPRI 20-50	139
8.5	1	EPRI 20-50	135
9.5	1	EPRI 20-50	157
10.5	1	EPRI 20-50	186
11.5	1	EPRI 20-50	182
12.5	1	EPRI 20-50	191
13.5	1	EPRI 20-50	213
14.5	1	EPRI 50-120	220
15.5	1	EPRI 50-120	232
16.5	1	EPRI 50-120	234
17.5	1	EPRI 50-120	241

18.5	1	EPRI 50-120	264
19.5	1	EPRI 50-120	273
20.5	1	EPRI 50-120	314
21.5	1	Sabbie-limose	291
22.5	1	Sabbie-limose	275
23.5	1	Sabbie-limose	238
24.5	1	EPRI 50-120	224
25.5	1	EPRI 50-120	203
26.5	1	EPRI 50-120	209
27.5	1	EPRI 50-120	213
28.5	1.5	EPRI 50-120	216
30	5	EPRI 50-120	340
35	19	EPRI 120-250	330
54	38	EPRI 120-250	422
92	11	EPRI 250-500	488
103	40	Sub Mamoso	547
143	—	Bedrock	755

c)

Figura 10.3- Modelli di sottosuolo adottati per le analisi di RSL nelle zone GAM\_01 (a), GAM\_02 (b), GAM\_03 (c).

#### 10.1.4 Spettri di Risposta e Fattori di Amplificazione

Di seguito sono riportati risultati delle simulazioni RLS condotte in condizioni di *free field* con il software STRATA.

Per ciascuna verticale di calcolo nelle figure successive vengono visualizzati:

- i profili di accelerazione (Ag/g) riferiti a ciascuno dei 7 segnali di input congiuntamente a quello medio (media aritmetica dei 7 segnali);
- la media degli spettri elastici di accelerazione con smorzamento al 5% (riferita ai 7 segnali di Input);
- lo spettro elastico medio di output in accelerazione (media aritmetica dei 7 segnali di Output);
- la funzione di trasferimento;
- il profilo delle deformazioni di taglio massime.

Inoltre, in ossequio alle direttive approvate con 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, per ciascuna area di verifica sono state calcolate le relative “PGA” al suolo libero (media dei 7 segnali) ed i fattori di amplificazione e di intensità spettrale determinati sulla base di:

- $F_{PGA} = PGA/PGA0$  (ove  $PGA0 = a_{gbedrock}$ )
- $FA = SA/SA0$ , ovvero rapporti spettrali in accelerazione fra i seguenti periodi T(s) di riferimento: SA1 per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , SA2 per  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ , SA3 per  $0,7s \leq T \leq 1,1s$ , SA4 per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;
- $FH = SI/SI0$ , ovvero rapporti spettrali in pseudovelocità (*Intensità di Housner*) fra i seguenti periodi T(s) di riferimento: SI1 per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , SI2 per  $0,5s \leq T \leq 1,0s$ , SI3 per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;
- Parametro di scuotimento assoluto  $H_{SM}$  (g) (Naso et al., 2019), calcolato per l'intervallo di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$  ed  $H_{0408}$ ,  $H_{0711}$ ,  $H_{0515}$ , ovvero lo scuotimento in accelerazione ( $cm/s^2$ ) atteso al sito per gli intervalli di periodi  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;

i quali vengono sinteticamente riepilogati per ciascuna zona in coda ai relativi profili e spettri.

In coda a ciascuna verticale di verifica viene riportato anche il relativo valore di  $V_{SH}$  onde consentire un eventuale confronto con i parametri tabellari proposti negli abachi regionali e/o delle ICMS.

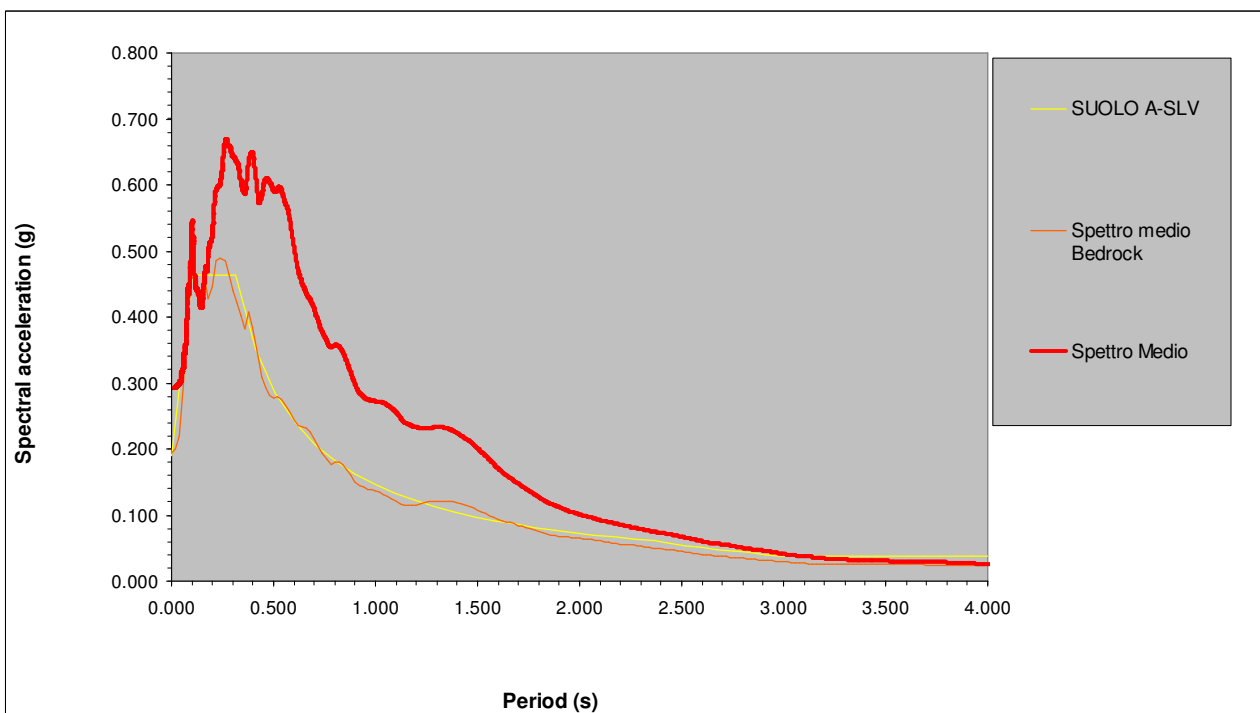
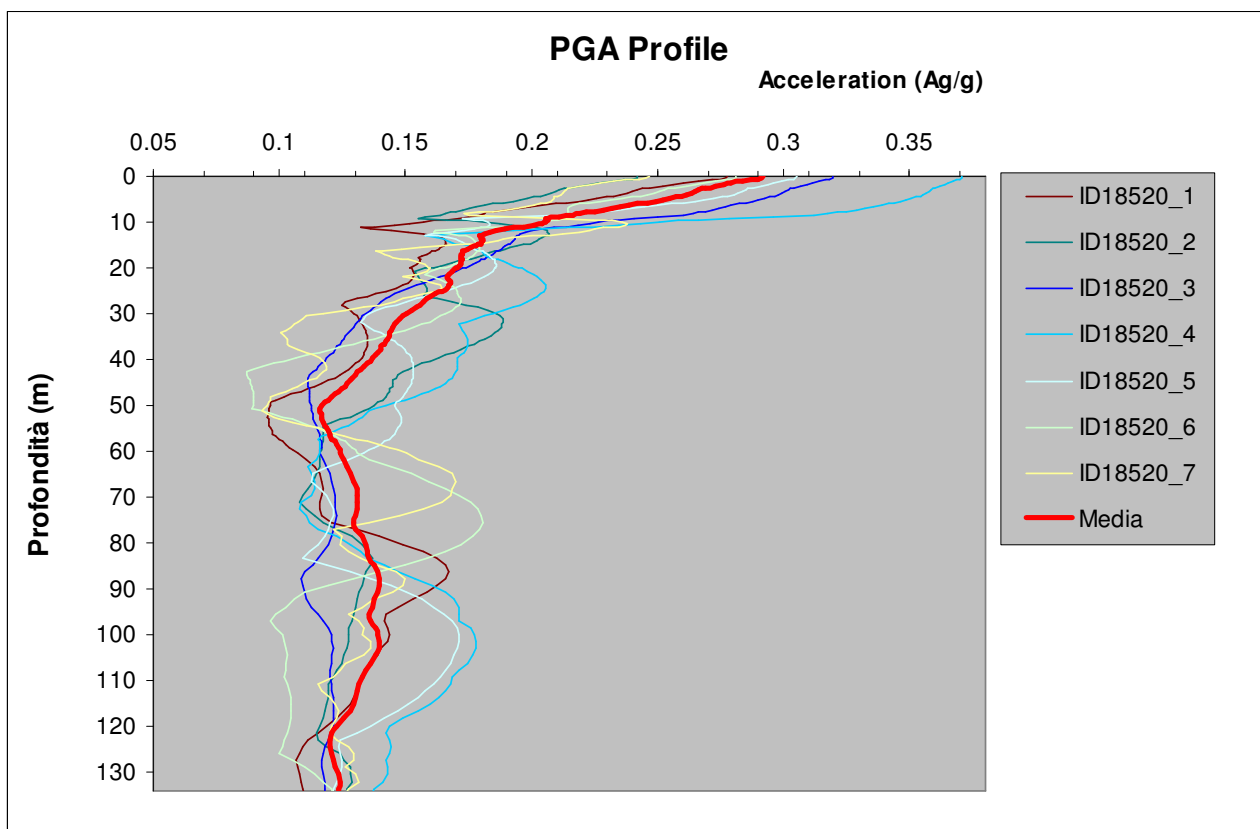
In allegato n. 3 vengono riportati i parametri di scuotimento desumibili per ciascun accelerogramma di output, mentre in allegato n. 4 vengono riportati i dati afferenti allo spettro elastico medio di output.

*Le aree assoggettate a III Livello di approfondimento, dato l'assetto stratigrafico rilevato, non risultano sostanzialmente interessate da situazioni amplificanti per configurazione/effetto bidimensionale e, quindi, non si ritiene necessario condurre analisi tramite metodi bidimensionali.*

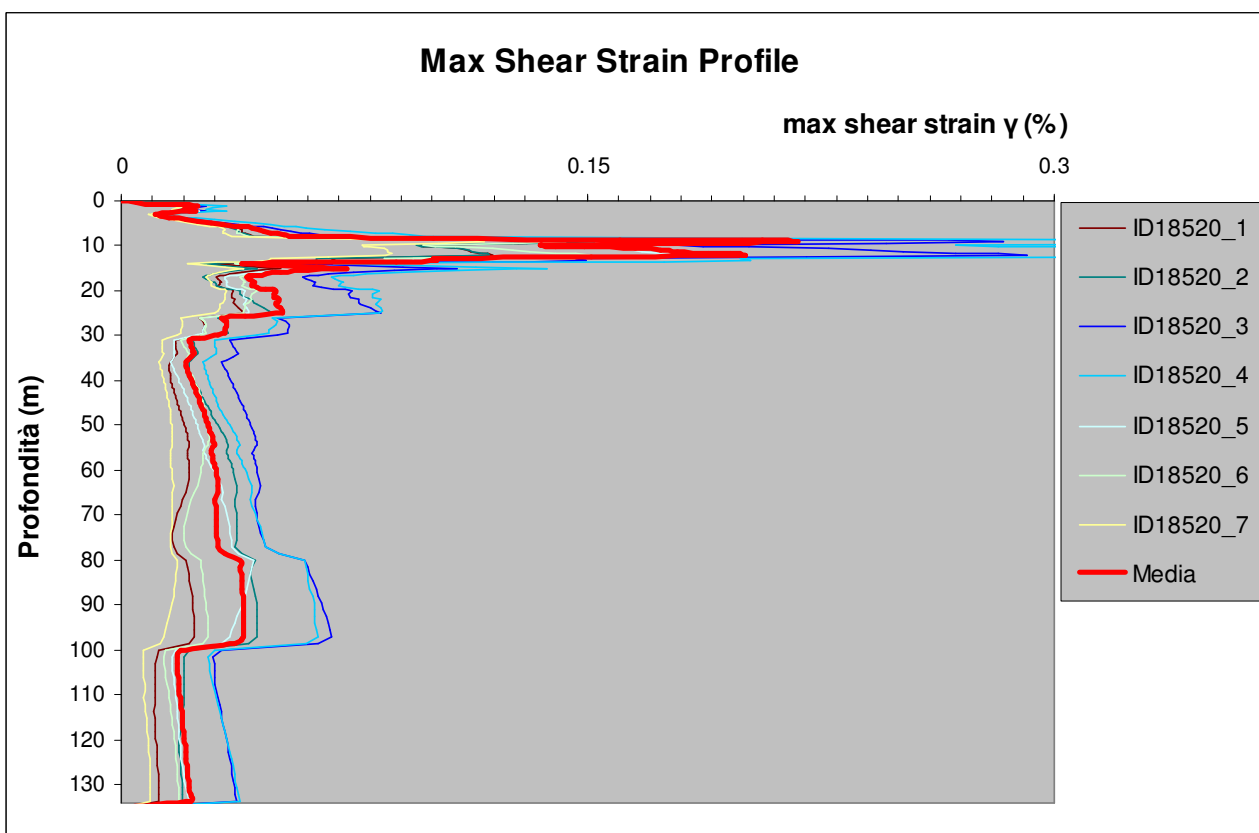
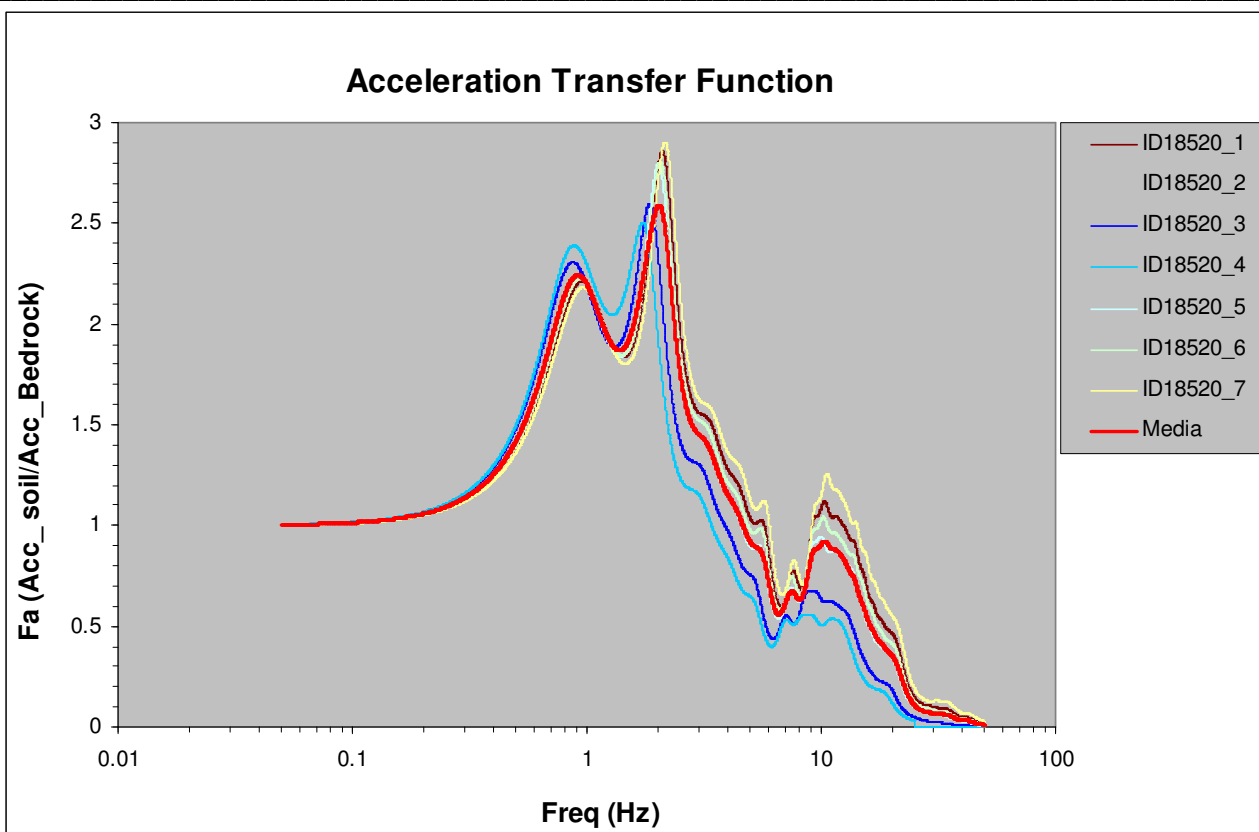
I dati numerici relativi ai singoli accelerogrammi ed agli spettri medi rappresentativi per ciascuna zona vengono inoltre forniti nell'apposito database secondo le modalità definite negli standard di archiviazione dati.

Di seguito si riportano i dati di sintesi rappresentativi per ciascuna zona rappresentativa:

## GAM\_01







**Vs30 (0-30)=253 (m/s)**

**PGA=0.291**

**F<sub>PGA</sub>=1.533**

**Fattori SA:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	SA1	0.1-0.5	0.171942	0.231587	1.347
INT SPETT.	SA2	0.4-0.8	0.108015	0.199447	1.846
INT SPETT.	SA3	0.7-1.1	0.067682	0.126039	1.862
INT SPETT.	SA4	0.5-1.5	0.165634	0.319416	1.928

**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	SI1	0.1-0.5	7.344356	11.281810	1.536
INT SPETT.	SI2	0.5-1.0	11.581385	23.242424	2.007
INT SPETT.	SI3	0.5-1.5	23.132532	46.131088	1.994

**AS<sub>Ipu</sub>/ΔT= 414.705487**

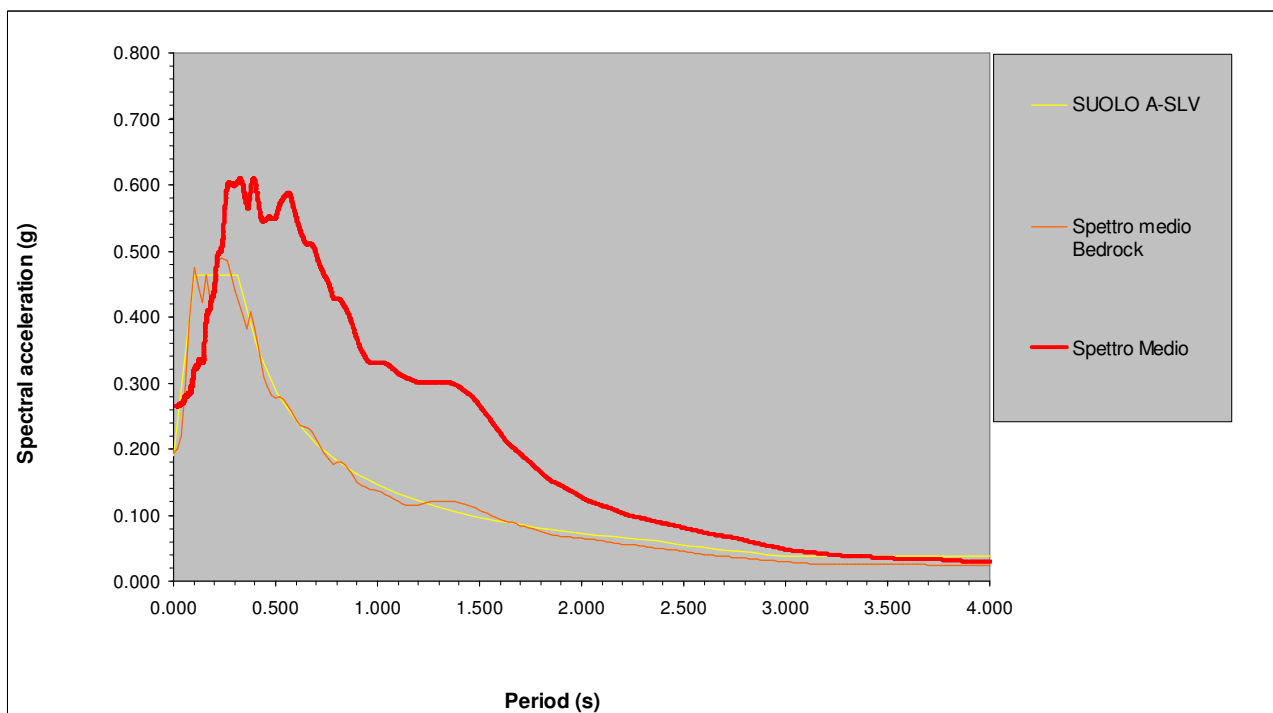
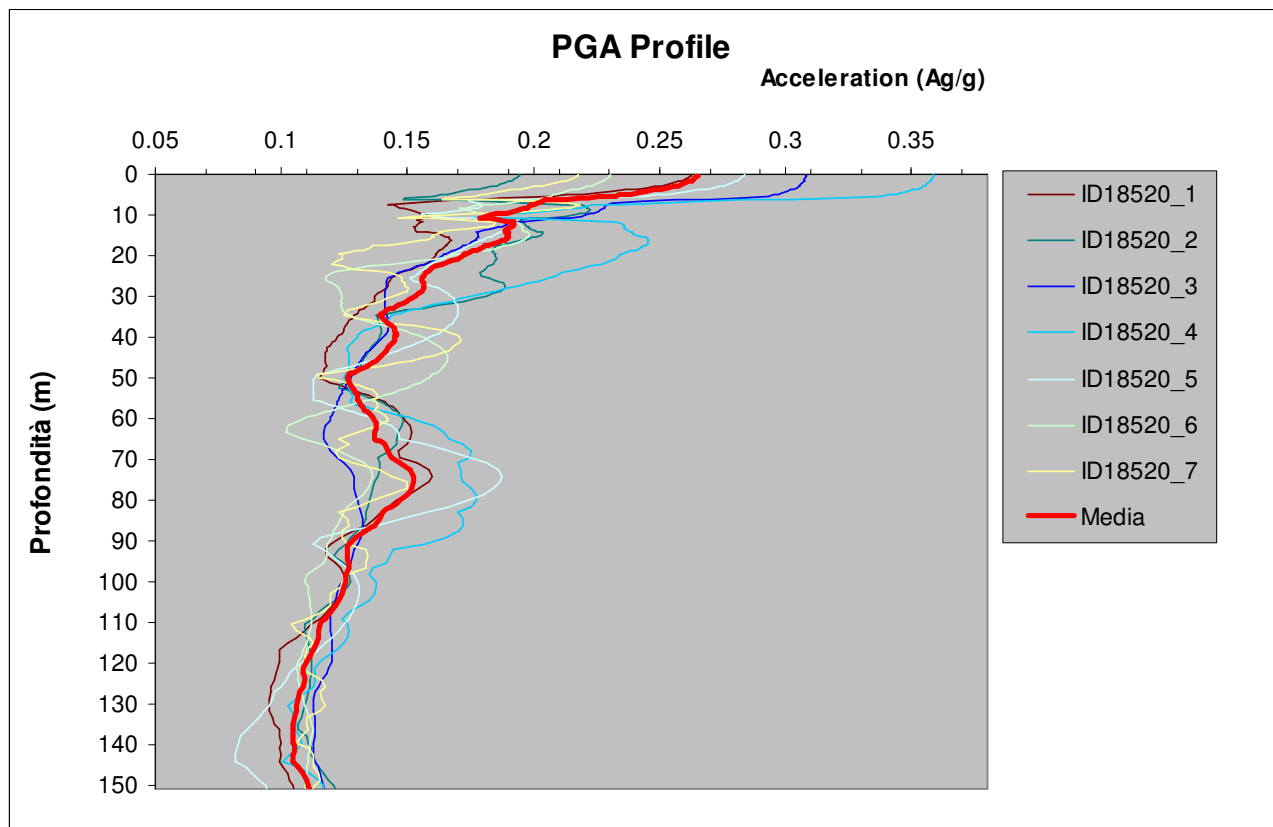
**H<sub>SM</sub> (g) = 0.569**

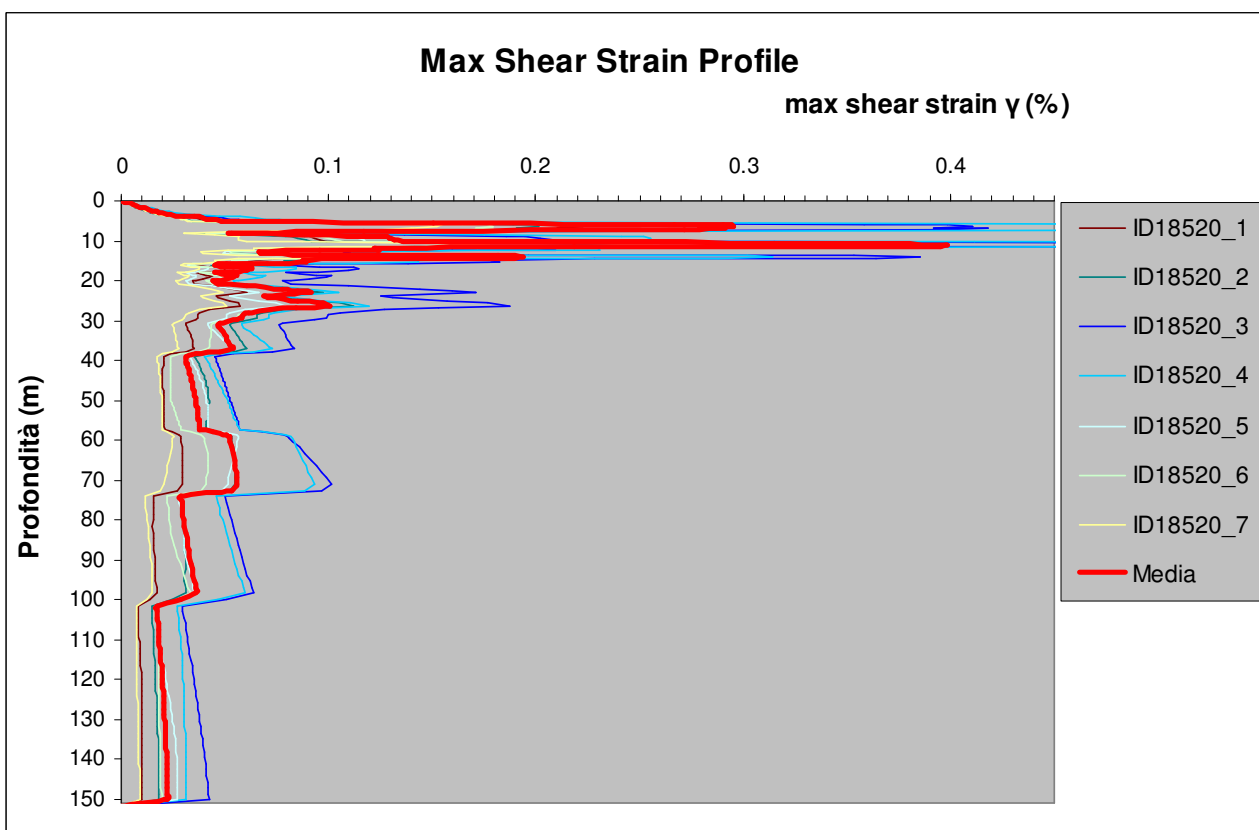
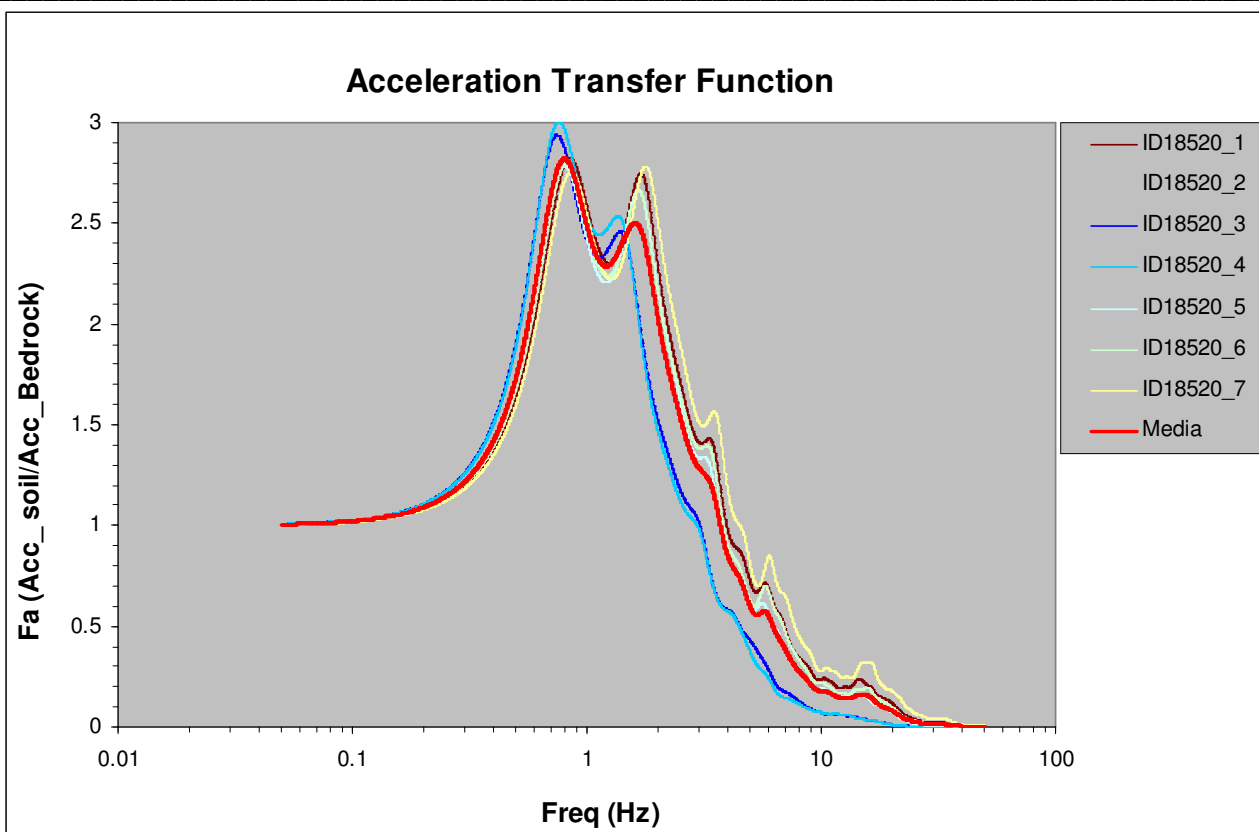
**H<sub>0408</sub> (g) = 0.498**

**H<sub>0711</sub> (g) = 0.315**

**H<sub>0515</sub> (g) = 0.319**

## GAM\_02





**Vs30 (0-30)=233 (m/s)**

**PGA=0.265**

**F<sub>PGA</sub>=1.389**



**Fattori SA:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	SA1	0.1-0.5	0.171942	0.207170	<b>1.205</b>
INT SPETT.	SA2	0.4-0.8	0.108015	0.210565	<b>1.949</b>
INT SPETT.	SA3	0.7-1.1	0.067682	0.153312	<b>2.265</b>
INT SPETT.	SA4	0.5-1.5	0.165634	0.381104	<b>2.301</b>

**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	SI1	0.1-0.5	7.344356	10.266587	<b>1.398</b>
INT SPETT.	SI2	0.5-1.0	11.581385	26.699340	<b>2.305</b>
INT SPETT.	SI3	0.5-1.5	23.132532	56.087527	<b>2.425</b>

**ASlpu/ΔT= 414.705487**

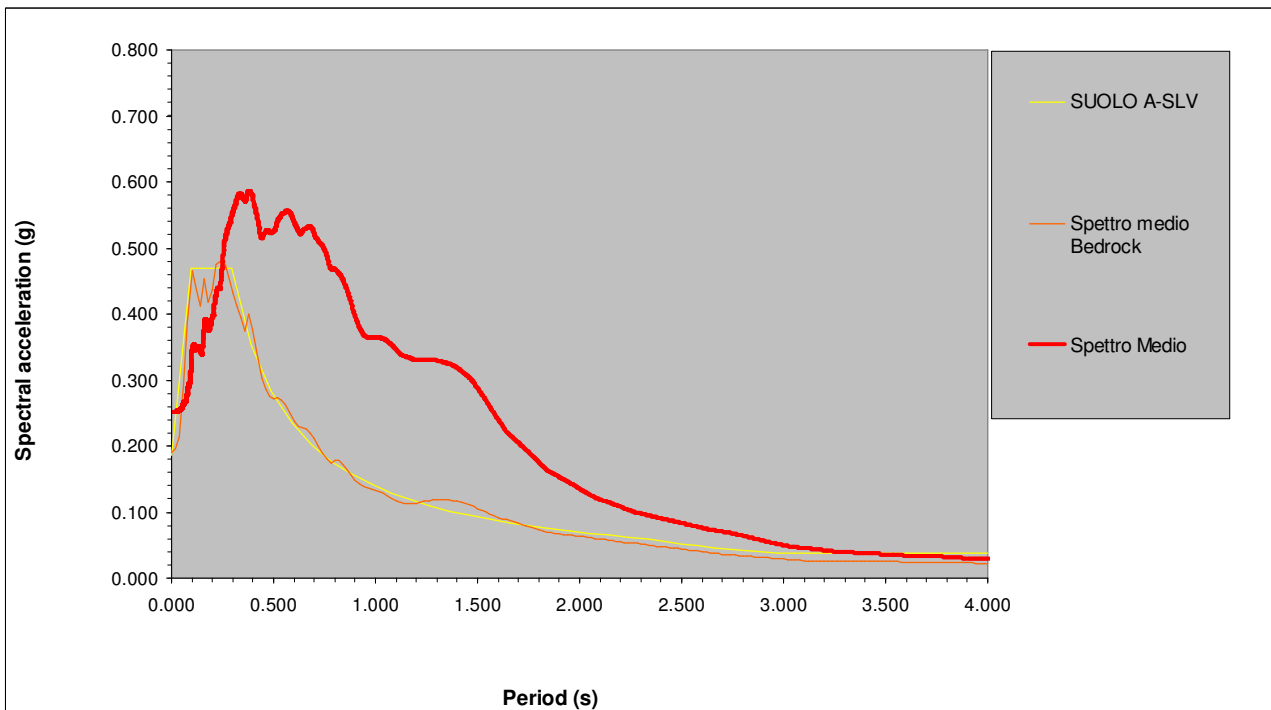
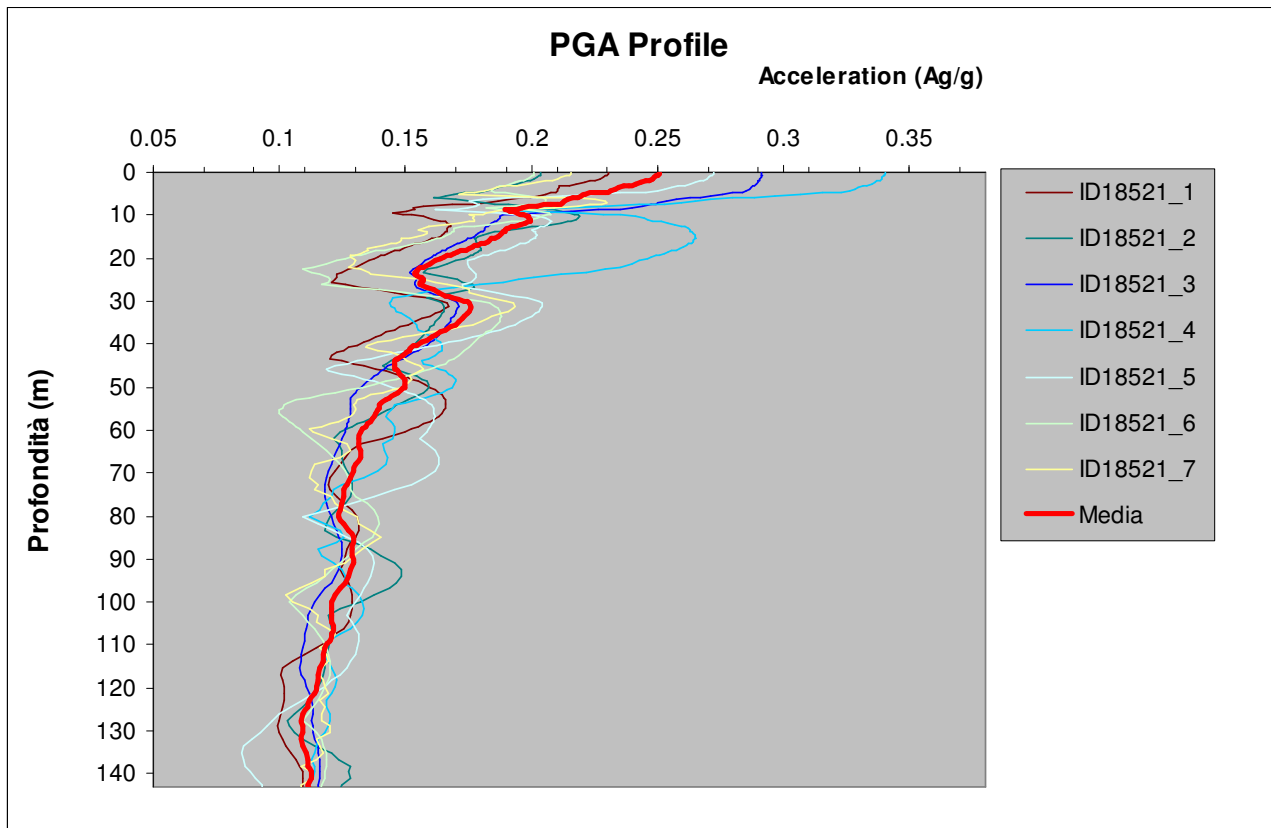
**H<sub>SM</sub> (g) = 0.509**

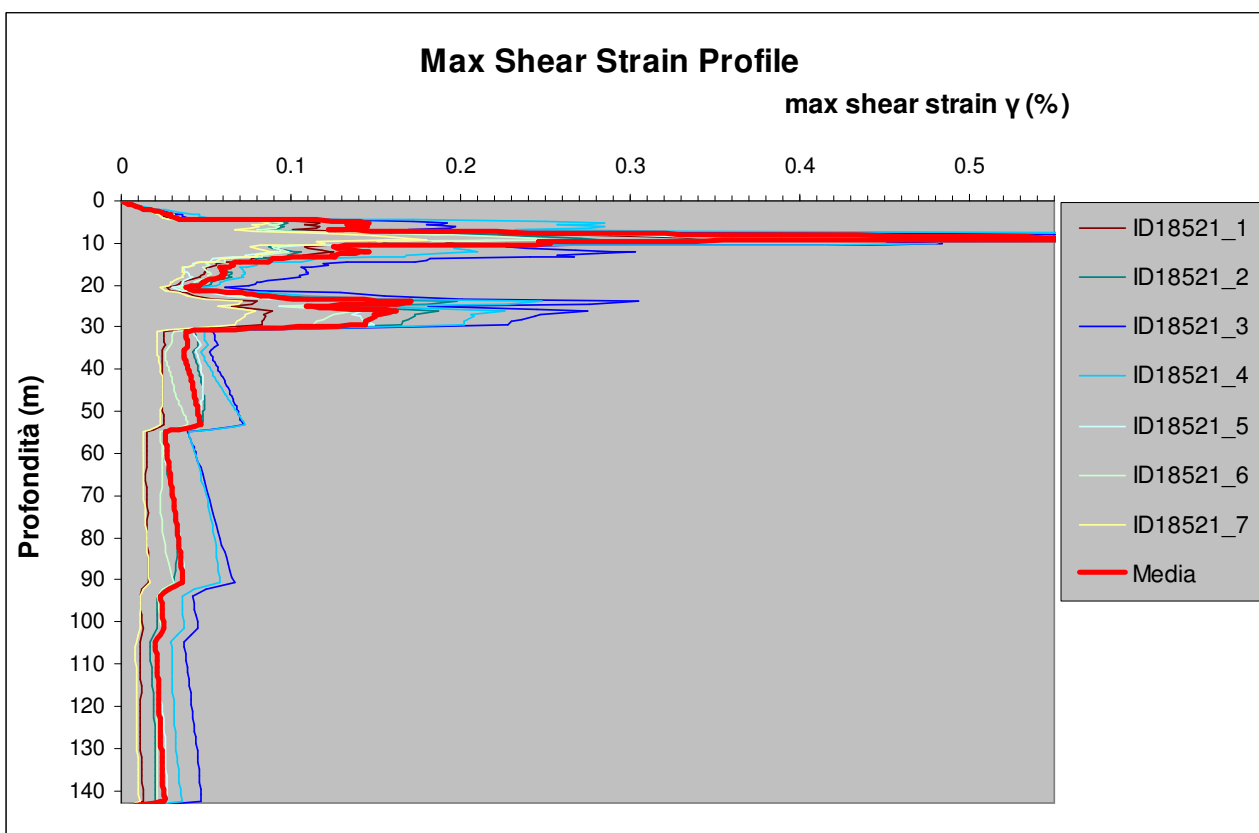
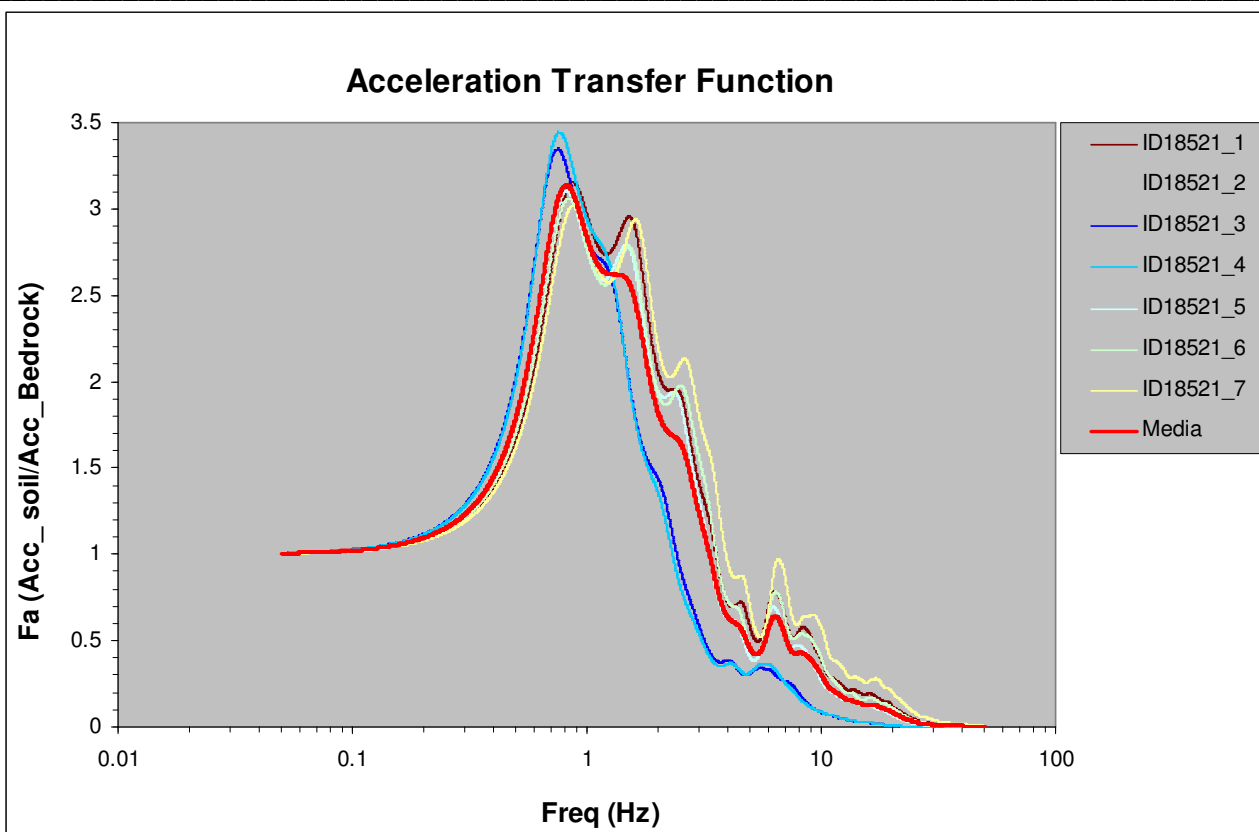
**H<sub>0408</sub> (g) = 0.526**

**H<sub>0711</sub> (g) = 0.383**

**H<sub>0515</sub> (g) = 0.381**

## GAM\_03





**Vs30 (0-30)=242 (m/s)**

**PGA=0.251**

**F<sub>PGA</sub>=1.351**

**Fattori SA:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	SA1	0.1-0.5	0.168345	0.195486	1.161
INT SPETT.	SA2	0.4-0.8	0.105755	0.210197	1.988
INT SPETT.	SA3	0.7-1.1	0.066266	0.167010	2.520
INT SPETT.	SA4	0.5-1.5	0.162169	0.403866	2.490

**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	SI1	0.1-0.5	7.190716	9.712146	1.351
INT SPETT.	SI2	0.5-1.0	11.339109	27.930472	2.463
INT SPETT.	SI3	0.5-1.5	22.648612	60.008627	2.650

**AS<sub>Ipu</sub>/ΔT= 415.269562**

**H<sub>SM</sub> (g) = 0.492**

**H<sub>0408</sub> (g) = 0.525**

**H<sub>0711</sub> (g) = 0.417**

**H<sub>0515</sub> (g) = 0.404**

## **10.2. Stabilità di Sito – Potenziale di liquefazione**

### *10.2.1 Generalità e valutazioni geologico-tecniche*

Dai dati della campagna geognostica si rileva la presenza di un corpo sedimentario maggiormente sabbioso sviluppato longitudinalmente in direzione SW-NW, all'incirca lungo la direttrice del Scolo Rigossa e che progressivamente tende a chiudersi nella zona più distale, procedendo dal piede della collina verso il mare. Tale corpo sedimentario risulta quindi costituito da orizzonti di sabbie limose interdigitati ed alternati in profondità con limi argillosi coesivi depositati in ambito di piana alluvionale, talora organizzate in corpi a geometrie lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi.

I singoli orizzonti sabbioso-limosi presentano spessori da metrici generalmente da 1 a 3 m e sono presenti, talora sino a profondità significative e, all'interno del corpo sedimentario potenzialmente liquefacibile, risultano presenti con maggior frequenza negli orizzonti più superficiali.

Data l'estensione dell'area in studio, si sono adottate le azioni sismiche derivate dalla suddivisione in 3 settori omogenei in relazione agli assetti geologici e stratigrafici adottati per la modellazione di RSL.

La stima del potenziale di liquefazione può essere effettuata in condizioni "free-field" con i "metodi semplificati" indicati in Allegato A3 della DGR 630/2019, come aggiornata dalla DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021 e, a tal fine, per ogni verticale si è utilizzato il picco di accelerazione massima in superficie  $a_{\max}$  (PGA) desunto, per ciascuna zona di RSL, mediante analisi della risposta locale sotto l'azione sismica di riferimento.

Per il caso in esame risulta possibile analizzare la potenziale liquefacibilità dei terreni attraverso metodi basati sullo stato tensionale in cui il fattore di sicurezza alla liquefazione viene definito tramite il rapporto tra resistenza ciclica  $CRR$  e azione sismica di progetto  $CSR$  (Cyclic Stress Ratio) per cui  $FS = CRR/CSR$ ; in particolare ci si può avvalere di metodologie di tipo storico – empirico fra cui quelle basate su prove CPT come raccomandato nelle Linee Guida AGI 2005 e ICMS 2008.

Per quanto riguarda la scelta del metodo si è adottata la formulazione di Robertson 2009-2015 (R09), ritenuta particolarmente idonea e riconosciuta per affidabilità e diffusione a livello internazionale e nel mondo accademico; in particolare la stima in continuo del contenuto in fine %  $FC$  (Robertson & Fear, 1995) risulta ben calibrata sulla situazione litostratigrafica e granulometrica dei sedimenti in posto. Tale metodo, in assenza di puntuali e diffuse prove di laboratorio, consente una stima della resistenza ciclica di riferimento sulla scorta della resistenza alla punta in funzione del parametro di comportamento del terreno  $I_c$  (soil behavior index), in quanto il valore di resistenza ciclica finale dei terreni è influenzato da diversi fattori genetici e costitutivi oltre al solo "contenuto in fine apparente".

Fra gli altri metodi altrettanto riconosciuti quali ad es. quello proposto Idriss-Boulanger (2014), nonostante abbia comportato un ulteriore aggiornamento di alcuni parametri e delle case-history di riferimento, a parere dello scrivente risulta molto sensibile alle valutazioni/stime del contenuto in fine di tali terreni e, pertanto, il modello di interpretazione dell' $FC$ , insito nel metodo, richiederebbe un'approfondita e specifica calibrazione basata su di un vasta base di dati di laboratorio.



In tal senso per l'analisi di tipo areale ed in base ai riscontri ottenuti da studi pregressi in aree limitrofe del medesimo ambito depszionale, al grado di conoscenza della stratigrafia, di affidabilità delle prove e dei dati utilizzati, si è scelto quindi di utilizzare il metodo di Robertson 2009-2015 (*R09*) secondo un adeguato fattore di sicurezza di riferimento  $FS$  ( $FS=CRR/CSR$ ), al fine di garantire lo stesso livello di confidenza, in termini probabilistici, degli altri metodi CPT maggiormente diffusi in letteratura (*IB2014*, *IB08*, *Moss 2006*), adottando una curva limite che discrimini gli ambiti di liquefazione/non liquefazione secondo un livello di confidenza minimo pari all'85% (curva con probabilità di liquefazione  $PL=15\%$ ).

A attraverso la formulazione di Ku et al. (2012), per cui  $P_L = 1 - \Phi \left[ \frac{0.102 + \ln(F_s)}{0.276} \right]$  (con  $\Phi$  = distribuzione standard normale), si evince come l'adozione di  **$FS=1.2$**  garantisca il livello di confidenza richiesto ( $PL=15\%$ ).

Inoltre secondo un approccio prettamente deterministico, tale soglia di  $FS=1.2$  viene altresì raccomandata dall'autore stesso per valutazioni inerenti opere ordinarie, in quanto il metodo mantiene insito, comunque, un certo grado di conservatività (comunicazione personale).

L'adozione dei metodi semplificati di verifica a liquefazione, in relazione alle condizioni di pericolosità sismica generale ed alla stima dei carichi ciclici ipotizzabili, richiede l'adozione di una  $M_w$  (magnitudo momento) di riferimento che, per il caso in esame, viene assunta pari a  **$M_w=6.16$** .

La verifica di calcolo, riportata in allegato n. 5, è stata effettuata come da normativa attraverso l'utilizzo del software CLiq vers. 2.3.1.15 della software house Geologismiki, utilizzando le prove Cpte/u identificate nella "Carta delle Indagini" e riportate nel database, la cui stratigrafia è stata discretizzata mediando i valori ottenibili secondo orizzonti di 5 cm.

Il metodo *R09* è basato su un proprio fattore caratteristico di scalatura della magnitudo ( $MSF$ ) e specifici coefficienti riduttivi ( $Rd-K\alpha-K\sigma$ ) atti a determinare i valori di  $CRR$  (cyclic resistance ratio) e  $CSR$  (cyclic stress ratio) necessari a definirne il  $FS$  (fattore di sicurezza) per ciascuno strato rispetto ad una soglia limite di riferimento prefissata. Essendo uno studio di tipo areale ed in assenza di specifiche indicazioni progettuali il calcolo è stato effettuato assumendo condizioni di free-field ed un livello di falda ipotizzabile in condizioni di massimo innalzamento medio stagionale.

Dall'analisi congiunta degli accelerogrammi utilizzati per le analisi di *RSL*, oltre alla *PGA* media attesa a suolo libero è stato definito anche il profilo medio di  $CSR$ . Tuttavia ai fini dell'azione sismica, trattandosi di ampie aree di studio nonché in riferimento alle indicazioni contenute nel NASEM Report-2016, si è optato per l'utilizzo della sola *PGA* ricavata per ciascuna delle zone studiate, per cui i rispettivi valori (arrotondati), muovendosi da SW a NE, risultano pari a:

ZONE RSL	PGA (ag/g)
GAM_01	0.292
GAM_02	0.265
GAM_03	0.251

Il piano/quota di riferimento utilizzato per le verifiche è pari al piano campagna attuale (p.c.).

Come indicatore di rischio complessivo, oltre al valore di  $FS$  per ciascun singolo strato, viene stimato anche il potenziale di liquefazione “ $IPL$ ” o “ $IL$ ” lungo la colonna stratigrafica fino alle profondità sondate secondo il metodo di Iwasaki et Al. 1982, come recentemente rivisto ed aggiornato da Sonmez (2003), integrando in modo pesato il potenziale di liquefazione di ciascuno strato su tutto il profilo stratigrafico indagato e per cui:

#### IWASAKI 1982

$IPL=0$	Rischio liquefazione molto basso
$0 < IPL \leq 5$	Rischio liquefazione basso
$5 < IPL \leq 15$	Rischio liquefazione alto
$IPL > 15$	Rischio liquefazione molto alto

#### SONMEZ 2003

$IPL=0$	Rischio liquefazione molto basso
$0 < IPL \leq 2$	Rischio liquefazione basso
$2 < IPL \leq 5$	Rischio liquefazione moderato
$5 < IPL \leq 15$	Rischio liquefazione alto
$IPL > 15$	Rischio liquefazione molto alto

In funzione del  $FS$  calcolato sono stati determinati, altresì, le deformazioni massime ( $\gamma_{max}$  -  $LDI$ ) ed i cedimenti attesi ( $\varepsilon_v$  -  $\Delta S_i$ ) nei terreni sia in falda che fuori falda (Zhang, 2002, Priebe, 1998), siano essi incoerenti che coesivi (rispettivamente per deformazione volumetrica/riaddensamento e riconsolidazione; Robertson metodo “All Soil, 2009”).

In allegato n. 5-6 viene altresì illustrata l’entità dei cedimenti post-sismici attesi  $\Delta S$ , cumulativa sia per terreni incoerenti che coesivi i quali, all’interno di ciascuna zona, presentano una modesta variabilità areale.

A titolo di riferimento Ishihara e Yoshimine (1992), in relazione ai cedimenti stimati ed al grado di danneggiamento/effetti attesi al suolo, identificano tre ambiti di pericolosità per cui:

Cedimento (cm)	Grado/severità di danneggiamento
$\Delta S < 10$	Assente - Lieve
$10 < \Delta S < 30$	Medio
$\Delta S > 30$	Esteso - Severo

Inoltre, in relazione al rapporto di spessore fra strati liquefacibili/non liquefacibili ) e la relativa profondità, altri autori (Crespellani et. al. 1988; Ishihara, 1985; Youd e Garri 1994, 1995) schematizzano la possibilità di propagazione verso l’alto e/o di avere manifestazioni superficiali in funzione del moto sismico atteso (vedi figura 10.5).

In ultimo, a supporto del giudizio complessivo e sui potenziali effetti sulla stabilità del terreno e delle strutture ivi insistenti, è opportuno valutare anche altri indicatori di pericolosità quale il parametro  $LSN$  (Van Ballegooy et al., 2013) (vedi allegato 6).

Il valore di  $LSN$  viene ricavato tramite l’integrazione, su tutta la colonna stratigrafica, del coefficiente di riconsolidazione verticale  $\varepsilon_v$  calcolato con il metodo di Zhang et al. (2002). In tal modo vengono definiti i seguenti valori e scenari di riferimento:

$$LSN = 1000 \cdot \int \frac{\varepsilon_v}{z} \cdot dz$$

<i>LSN Range</i>	<i>Predominant performances</i>
<i>0 ÷ 10</i>	<i>Little to no expression of liquefaction, minor effects</i>
<i>10 ÷ 20</i>	<i>Minor expression of liquefaction some sand boil</i>
<i>20 ÷ 30</i>	<i>Moderate expression of liquefaction, with sand boil and structural damage</i>
<i>30 ÷ 40</i>	<i>Moderate to severe expression of liquefaction, settlement can cause structural damage</i>
<i>40 ÷ 50</i>	<i>Major expression of liquefaction, undulations and damage to ground surface, severe total and differential settlement of structure</i>
<i>&gt;50</i>	<i>Severe damage, extensive evidence of liquefaction at surface, severe total and differential settlement affecting structure, damage to services</i>

Gli scenari di danno stimabili con il parametro *LSN* risultano significativamente condizionati dal rapporto tra strati liquefacibili/non liquefacibili, la loro posizione e la relativa deformabilità, cosa che il metodo, sulla scorta di prove ad alta risoluzione (quali CPTe/u), riesce a discriminare con buona attendibilità.

Questi indicatori, infatti, portano a stimare rispettivamente la probabilità di sviluppo del fenomeno in relazione all'IPL e gli scenari di deformazione/danno attesi in superficie sulla base dell'assetto stratigrafico rilevato e del rapporto fra orizzonti liquefacibili/non liquefacibili; ciò consente un giudizio più approfondito sul potenziale di danneggiamento e sulla severità delle manifestazioni superficiali attese.

In linea generale, osservando la carta di microzonazione e delle isopotenziali di liquefazione, è possibile apprezzare trend generali per cui i valori di IPL e cedimento e, quindi, di pericolosità per liquefazione, risultano condizionati dalla frequenza dei livelli sabbiosi e intensità delle azioni sismiche, diversificate anche in relazione alla distanza dai nodi INGV per la stima delle azioni sismiche di riferimento al suolo rigido.

Come osservabile dalla "Carta delle isopotenziali di liquefazione" (vedi figura 10.4) i parametri di pericolosità tendono a diminuire progressivamente spostandosi verso NE e allontanandosi dall'asse del corso d'acqua locale; fa eccezione una circoscritta area rilevata a valle della ferrovia ed in destra idrografica dello Scolo Rigossa caratterizzata da depositi superficiali maggiormente argilloso-limosi e, quindi a basso potenziale di liquefazione. Le zone più distali dal centro cittadino risultano caratterizzate da una modesta scarsa presenza di livelli sabbiosi e, da un basso potenziale di liquefazione in relazione alle azioni sismiche attese.

Quindi, per un giudizio complessivo circa i parametri di pericolosità stimati, si rileva quanto segue:

- In corrispondenza di zone o prove a medesimo grado di pericolosità per IPL, i valori di cedimento post-sismico atteso risultano sostanzialmente correlabili allo spessore dei materiali potenzialmente liquefacibili, fornendo un valore conservativo senza contemplare il rapporto fra strati liquefacibili/non liquefacibili e la relativa profondità; tale aspetto talora può comportare valori di cedimento non sempre direttamente proporzionali agli andamenti di IPL.
- IPL offre una stima pesata con la profondità del grado di pericolosità in funzione della presenza e spessore lungo la verticale dei vari orizzonti liquefacibili/non liquefacibili (discretizzati secondo le situazioni  $FS < 1$  o  $FS > 1$ ), consentendo di discriminare specifiche soglie di rischio secondo valori di

riferimento riconosciuti nella comunità scientifica e professionale, a livello nazionale ed internazionale ( $IPL=0, 2, 5, 15, >15$ ).

- I cedimenti post-sismici attesi nelle zone caratterizzate da  $IPL < 5$  e, tanto più, da  $IPL < 2$  risultano generalmente contenuti e significativamente inferiori a 10 cm (soglia definibile per un grado di danneggiamento basso); solamente presso gli areali con valori di  $IPL \geq 5$  i cedimenti attesi risultano ricadere a cavallo della soglia dei 10 cm ( $9 < \Delta S < 12$  cm), in relazione allo spessore e frequenza dei livelli sabbiosi presenti nel primo sottosuolo.
- LSN è un estimatore della severità di danno atteso in superficie; esso risulta maggiormente sensibile allo spessore della crosta superficiale, al rapporto fra strati liquefacibili/non liquefacibili ed alla relativa profondità. LSN segue generalmente i trend di pericolosità evidenziati da IPL ma rispetto a quest'ultimo, poiché  $\varepsilon_v$  varia in modo maggiormente progressivo in funzione dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione, talora risulta esaltare maggiormente (in eccesso o in difetto di pericolosità) situazioni stratigrafiche specifiche.
- A fronte di valori di IPL generalmente caratterizzanti un rischio Alto ( $IPL \geq 5$ ), le caratteristiche geomeccaniche e stratigrafiche dei depositi presso tali zone, determinano valori di LSN e di cedimento massimo generalmente riconducibili a manifestazioni con grado/severità di danneggiamento atteso generalmente basso ( $10 < LSN < 20$ ). In tutte le zone con  $IPL < 5$  i valori di LSN ( $LSN < 10$ ) indicano una bassa o limitata possibilità che si verifichino manifestazioni superficiali e con eventuali modesti effetti.

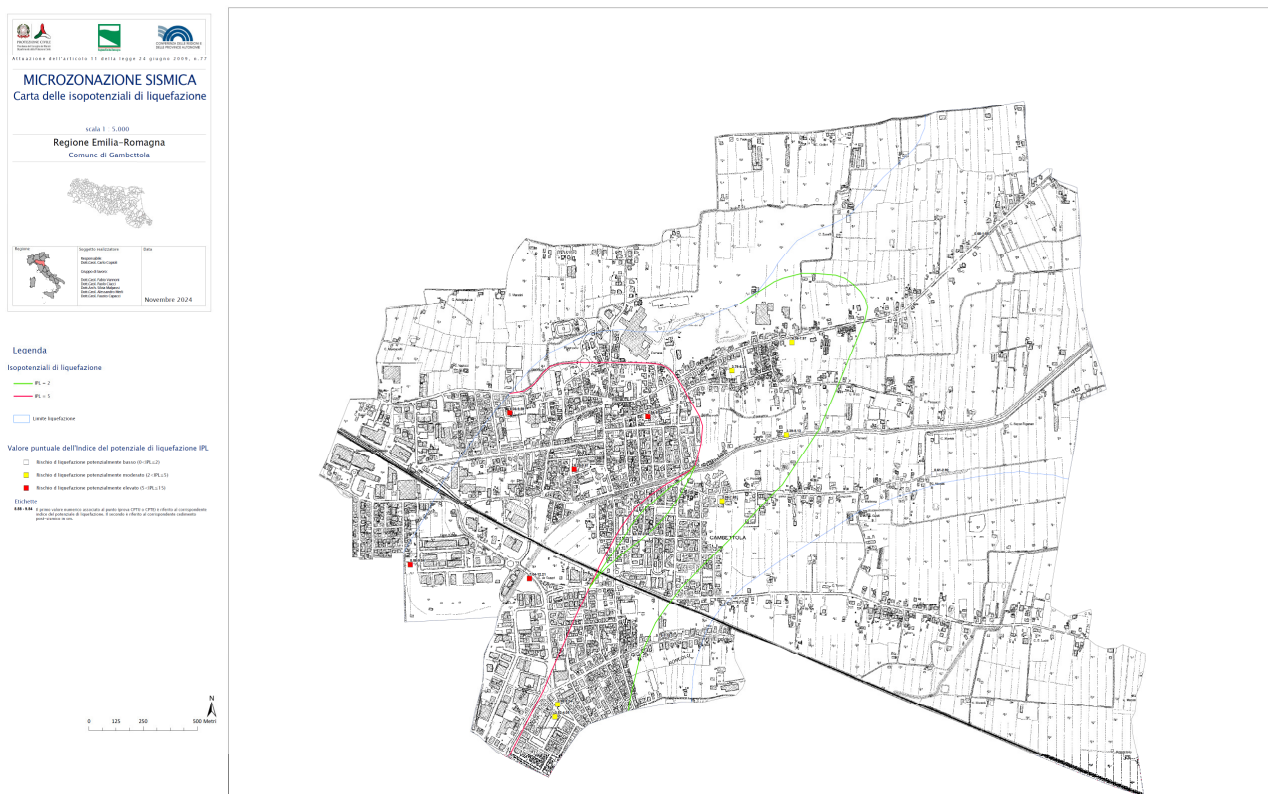


Figura 10.4 – Miniatura esemplificativa della carta delle isopotenziali di liquefazione.

Chiaramente gli scenari attesi e derivabili dai metodi semplificati possono essere significativamente influenzati da ulteriori variabili sito specifiche e sismogenetiche quali:

- Fenomeni di direzionalità dell'azione sismica e tipologia di faglia
- Distanza epi/ipocentrale, contenuto in frequenza, durata della fase forte, ecc.
- condizioni idrogeologiche e/o di drenaggio locale
- configurazioni geomorfologiche particolari e/o mancanza di contenimento laterale dei terreni (es. presenza di declivio, corsi d'acqua di significative dimensioni e profondità, fronti non sostenuti, strutture arginali, ecc.)
- presenza di carichi piezometrici e/o falde in pressione
- presenza di gas nel sottosuolo
- fenomeni di interazione terreno struttura e/o presenza di sovraccarichi o carichi concentrati
- preesistenza di sforzi di taglio in condizioni statiche

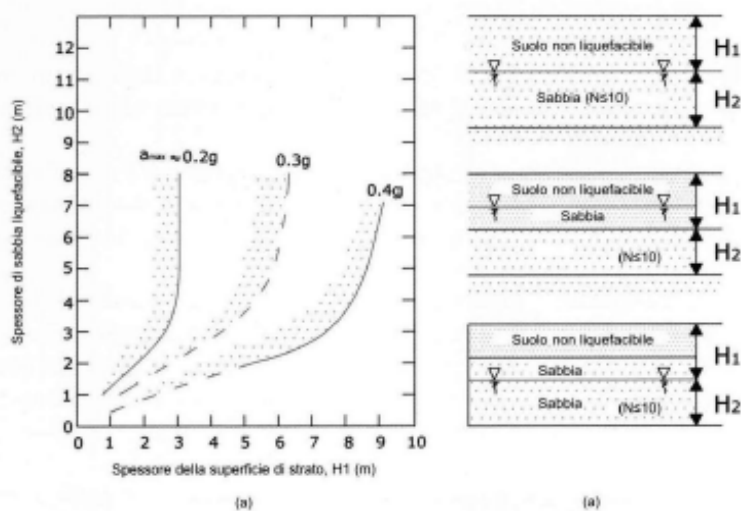
In allegato n. 5 si riportano i report sintetici delle verifiche a liquefazione effettuate su ciascuna area, mentre in allegato n. 6 vengono illustrate le tabelle parametriche riepilogative di tutti i corrispondenti valori di IPL, LSN e cedimento calcolati per ciascuna zona di RSL ed in condizioni di campo libero (free-field).

*Qualora opere edilizie, infrastrutture o aree di previsione urbanistica ricadano a cavallo dei limiti di potenziale di liquefazione di riferimento (es.  $IPL=2$  o  $IPL=5$ ) e/o di zone caratterizzate da differente fattore di amplificazione sismica, sarà opportuno associare ad esse il parametro di pericolosità più conservativo nell'ambito di variazione; nel caso le aree o infrastrutture interessate da tale intersezione risultino di significativa estensione, tale approccio andrà adottato per un congruo tratto od estensione funzionale al mantenimento delle prestazioni attese per l'infrastruttura e/o area interessata.*



Valutazione delle manifestazioni superficiali in funzione del rapporto fra lo spessore dello strato superficiale non liquefacibile e quello sottostante liquefacibile

Accelerazione [gal] 1 gal = 1 cm/s <sup>2</sup>	Condizione	Propagazione della liquefazione verso l'alto	Manifestazioni superficiali
200	$h_1 \geq 3 \text{ m e } h_2 < 3 \text{ m}$	IMPEDITA	NO
	$h_1 \leq 3 \text{ m e } h_2 > 3 \text{ m}$	NON IMPEDITA	SI
300	$h_1 < 5 \text{ m e } h_2 > 4 \text{ m}$	NON IMPEDITA	SI
	$h_1 > 5 \text{ m e } h_2 < 4 \text{ m}$	IMPEDITA	NO
400 - 500	$h_1 < 7 \text{ m e } h_2 > 3 \text{ m}$	NON IMPEDITA	SI
	$h_1 > 7 \text{ m e } h_2 < 3 \text{ m}$	IMPEDITA	NO



Relazione fra lo spessore dello strato liquefacibile e lo spessore dello strato sovrapposto (Ishihara, 1985)

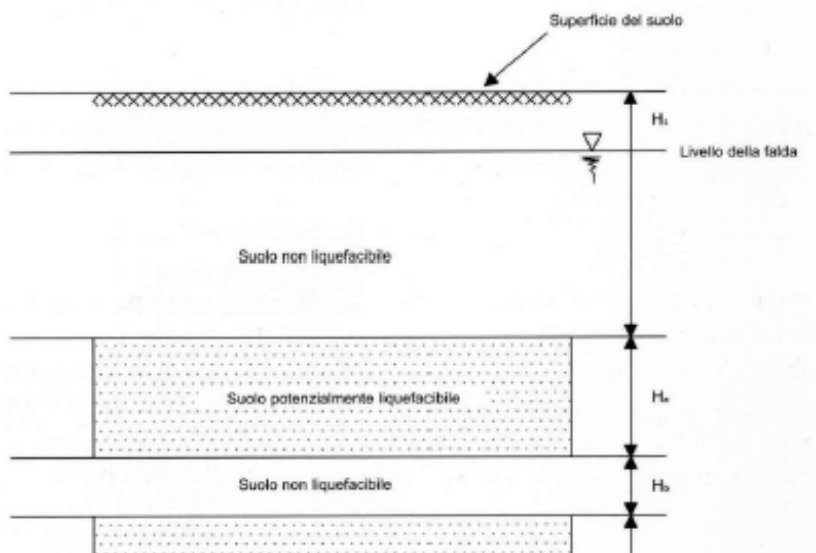
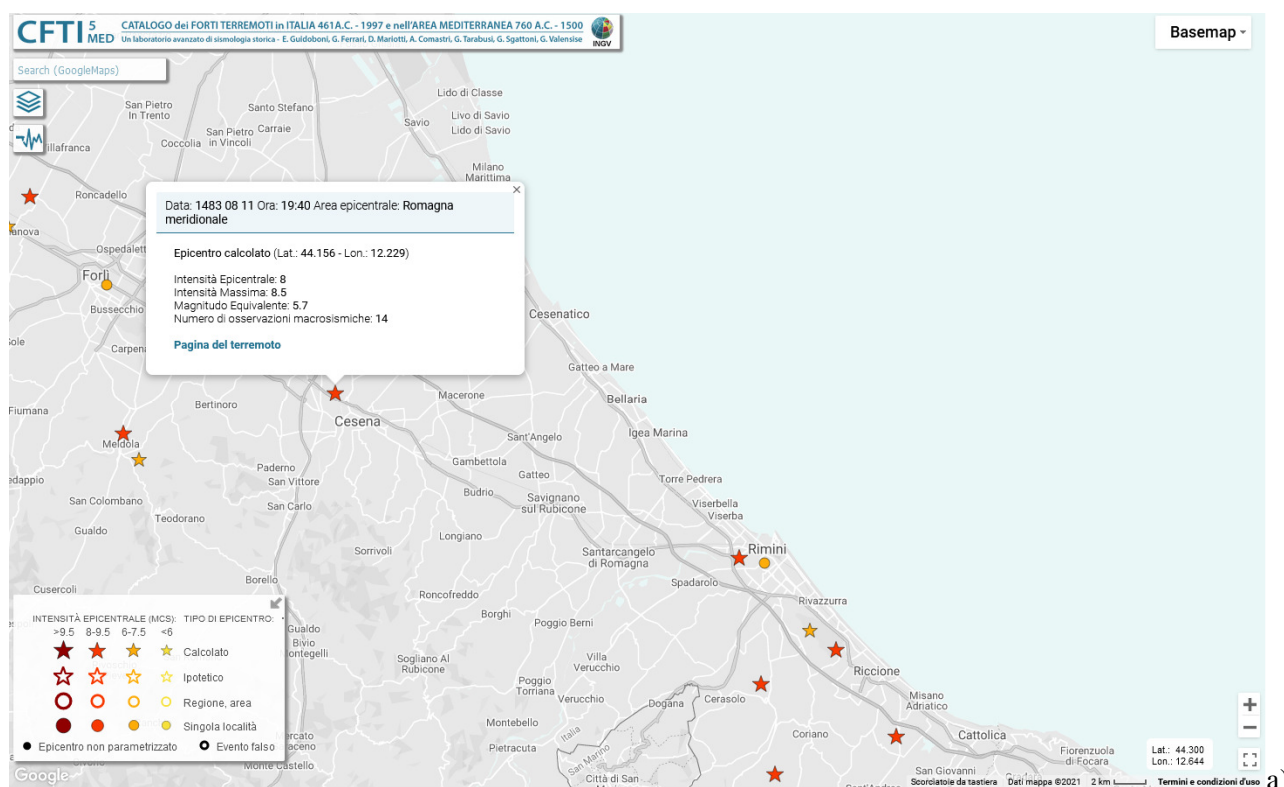


Figura 10.5 – Schema per la valutazione delle manifestazioni superficiali per liquefazione (Crespellani et. al. 1988; Ishihara, 1985; Youd e Garri 1994, 1995)

## 11. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEGLI EVENTI PASSATI

Come già ampiamente trattato nel precedente capitolo 3, le informazioni relative agli eventi sismici storici di riferimento specificamente per il territorio comunale di Gambettola, sono desumibili prioritariamente dall'analisi del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), il quale fornisce dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima  $> 5$  o magnitudo  $> 4.0$  di interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2019 e che si riferisce al DataBase Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15) vers. 3.0. La consultazione per località di tale catalogo, disponibile liberamente all'indirizzo <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>, ha quindi fornito i risultati mostrati nel Capitolo 3. Purtroppo, tale catalogo non contempla risentimenti di eventi sismici storicamente occorsi in comuni vicini spesso con magnitudo  $M > 5$ . Non se ne conosce il motivo ma verosimilmente solo recentemente l'abitato di Gambettola ha conosciuto un significativo sviluppo urbanistico, essendo storicamente poco abitata ed essendo passata sotto diverse giurisdizioni. Ad es. nel catalogo di cui sopra non vengono citati gran parte dei terremoti dell'adiacente Riminese (eccetto quello del 1916) ne quello del 1483 con epicentro stimato presso Cesena ( $M_{eq}=5.7$  e  $I_{MCS}=8-8.5$ ) o, verosimilmente, quelli con epicentro presso la vicina Meldola occorsi nel 1870 ( $M_{eq}=5.6$  e  $I_{MCS}=8$ ) e 1911 ( $M_{eq}=5.3$  e  $I_{MCS}=7$ ). A completezza dell'argomentazione in figura (11.1 a-b-c) si riportano stralci del Catalogo CPTI<sub>5</sub><sub>MED</sub> con le informazioni circa tali terremoti limitrofi.



# Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC) Relazione Tecnico Illustrativa

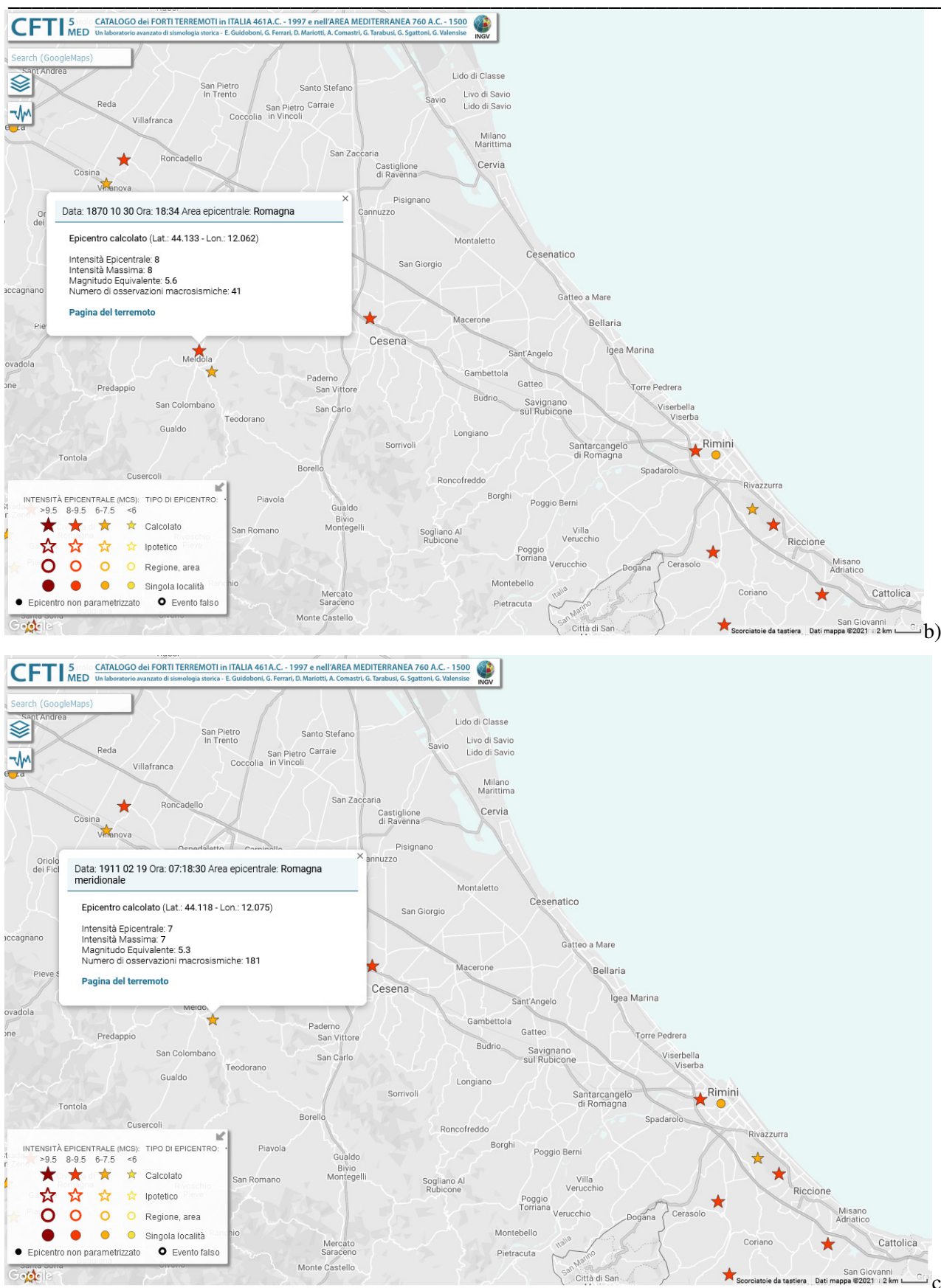


Figura 11.1 – Stralci Catalogo CFTI5<sub>MED</sub> con rappresentazione dei terremoti storici con epicentro presso Cesena (1483) a), Meldola (1870) b) e Meldola (1911) c),

Peraltro tali epicentri, riferibili a sorgenti sismogenetiche vicine, risultano congruenti con i diagrammi di disaggregazione proposti da INGV – Progetto S1 (paragrafo 3 – figura 3.6) relativi ai nodi di riferimento per il comune in oggetto. Inoltre nelle valutazioni generali si deve tener conto del fatto che l'areale comunale ricade pienamente nell'ambito della struttura sismogenetica ITCS039 così come individuata nel Catalogo DISS 3.2.1 (INGV).

Pertanto ai fini della pericolosità sismica le valutazioni espresse al Capitolo 3 si ritengono coerenti con i dati di sismicità storica generale del riminese e del contesto territoriale romagnolo

## 12. CONCLUSIONI

Lo studio di microzonazione sismica effettuato sul territorio del Comune di Gambettola, integrando le analisi di III Livello di Approfondimento con lo studio di I-II Livello, conformemente ai contenuti della DGR 630/2019 e successiva DGR 476/2021 come integrata dalla DGR 564/2021, ha permesso di valutare la pericolosità sismica sia nelle aree urbane che in quelle di prevista urbanizzazione. I dati sono stati elaborati e restituiti secondo i più recenti standard di rappresentazione e archiviazione dati per la Microzonazione Sismica versione 4.2. Data anche l'abbondanza delle conoscenze litostratigrafiche e vista la estesa campagna geognostica/geofisica di riferimento, la microzonazione sismica è stata estesa anche a porzioni del territorio rurale limitrofo.

Le carte di microzonazione sismica riportano i valori dei Fattori di Amplificazione (FA) individuati per tutto il territorio comunale, di riferimento generale per tutte le valutazioni di carattere urbanistico.

In base alle condizioni stratigrafiche e topografiche locali ed ai relativi profili di Vs il moto sismico atteso è stato definito secondo specifici fattori di amplificazione della PGA (FA\_PGA), dello spettro elastico in accelerazione, denominati Fa\_SA1 - Fa\_SA2 - Fa\_SA3 e localmente anche Fa\_SA4 (rispettivamente per intervalli compresi tra  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ,  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) nonché dell'intensità di Housner denominati Fa\_SI1 - Fa\_SI2 e localmente Fa\_SI3 (riferiti ad intervalli spettrali compresi tra 0,1-0,5 s, 0,5-1.0 s e 0,5-1.5 s).

Per una rappresentazione assoluta della pericolosità sismica del territorio si è definita anche una zonazione del territorio in termini di intensità sismica assoluta  $H_{SM}$  (definita in "g" e valida per l'intervallo spettrale di periodo  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ), al fine di consentire una reale graduatoria di pericolosità tra le varie zone omogenee ed una più diretta valutazione semi-quantitativa del rischio sismico.

In corrispondenza delle aree oggetto di III Livello di Approfondimento il parametro di intensità sismica assoluta è stato definito anche per gli intervalli di periodo  $0,4s \leq T \leq 0,8s$  ( $H_{0408}$ ),  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  ( $H_{0711}$ ) e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$  ( $H_{0515}$ ).

Non sono state individuate zone stabili con assenza di effetti amplificativi. Pertanto sono presenti zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, con effetto dell'assetto litostratigrafico e zone suscettibili di instabilità, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a possibili deformazioni permanenti nel territorio e nel primo sottosuolo. In tal caso si tratta di zone soggette ad instabilità per potenziale rischio per liquefazione, a cui risultano soggette soprattutto le aree prospicienti e limitrofe allo Scolo Rigossa, che la carta delle MOPS individua con il codice 30502003 e 30502004; non sono state rilevate zone  $ZR_{LQ}$  ( $IL > 15$ ), mentre le zone  $ZS_{LQ}$  interessano una significativa parte dell'urbanizzato e delle strutture/infrastrutture strategiche (viabilità, linea ferroviaria, stazioni ferroviarie, scuole, ecc.).

In tal senso le numerose verifiche di *RSL* e del *Potenziale di Liquefazione* hanno permesso di quantificare i possibili effetti conseguenti ad un ipotetico sisma sul territorio oggetto di studio. Nella carta di Microzonazione con approfondimenti (III livello), che rappresenta l'elaborato finale degli studi, ogni microzona è stata caratterizzata mediante 3 importanti fattori: il primo quantifica l'entità e le amplificazioni attese del moto sismico (in termini di accelerazione massima al suolo *PGA* nonché dei vari Fattori di Amplificazione spettrale secondo vari intervalli temporali di interesse), il secondo (potenziale di liquefazione *IPL*) è un indicatore della pericolosità dei terreni nei confronti di potenziali fenomeni di liquefazione nonché della severità delle potenziali manifestazioni superficiali attese, il terzo (espresso numericamente al fianco di ciascun punto di indagine) contempla i cedimenti post-simici attesi a seguito di un eventuale innescio della liquefazione in condizioni di free-field.

Ulteriori considerazioni, per un giudizio complessivo in merito a ciascuna zona di indagine, potranno essere condotte valutando anche i corrispondenti valori di *LSN*, utili a stimare la severità delle manifestazioni e gli scenari di danneggiamento atteso in superficie (vedi allegato n. 6).

L'innescio e sviluppo della liquefazione, quale fenomeno complesso dal punto di vista dei fattori predisponenti e scatenanti, risulterà comunque fortemente condizionato da specifiche condizioni sismogenetiche (distanza epi/ipocentrale, fenomeni di direttività, contenuto in frequenza del segnale, durata della fase forte, ecc.) e/o dalla presenza di stati tensionali preesistenti, imputabili alla presenza di opere/strutture o situazioni morfologiche ed idrogeologiche particolari.

Considerata la continuità dei depositi incoerenti, l'entità dei fenomeni e gli aspetti di non linearità ipotizzabili per il comportamento dinamico/ciclico dei terreni, all'occorrenza e/o in fase di progettazione esecutiva per opere strategiche (e/o di rilevanza) potrà essere opportuno condurre ulteriori approfondimenti di studio tramite analisi con prove di laboratorio ciclico/dinamico ed eventualmente di risposta sismica di sito con metodi di calcolo non lineari ed in tensioni efficaci opportunamente calibrati; tali approfondimenti, all'occorrenza, consentiranno di simulare con maggior precisione i fenomeni di amplificazione sismica, gli aspetti deformativi e le sovrappressioni interstiziali attesi nelle condizioni sismiche di progetto.



Qualora opere edilizie, infrastrutture o aree di previsione urbanistica ricadano a cavallo dei limiti di potenziale di liquefazione di riferimento (es.  $IPL=2$  o  $IPL=5$  ) e/o di zone/microzone caratterizzate da differente fattore di amplificazione sismica, sarà opportuno associare ad esse il parametro di pericolosità più conservativo nell'ambito di tale variazione; nel caso le aree o infrastrutture interessate da tale intersezione risultino di significativa estensione, tale approccio andrà adottato per un congruo tratto od estensione funzionale al mantenimento delle prestazioni attese per l'infrastruttura e/o area interessata.

In particolare, conformemente a quanto indicato nelle “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ)” (D.P.C., versione 1.0, 2018), qualora risulti necessario valutare/verificare situazioni di maggior dettaglio a cavallo o nell'ambito delle zone  $ZS_{LQ}$ , o una revisione/riperimetrazione di maggior dettaglio di tali aree, si renderà necessario un adeguato approfondimento di indagine con applicazione di appropriate metodologie di analisi di suscettibilità alla liquefazione.

Dalla consultazione del database Ithaca, inoltre, non risultano presenti elementi tettonici attivi e capaci, certi e documentati, che possano determinare effetti superficiali nelle aree urbanizzate in studio.

Qualora si voglia procedere ad approfondimenti di particolare dettaglio attraverso analisi di risposta sismica locale (RSL), eseguite con criteri di innegabile scientificità e supportate da adeguate indagini geognostiche, geofisiche e di laboratorio, le risultanze ottenute saranno di grande utilità nel confronto con i dati ottenuti nelle carte di microzonazione e potranno essere utilizzate in sostituzione dei valori di FA previsti sul territorio oggetto di RSL nonché a supporto di approfondite analisi circa le aree a potenziale instabilità.

Tali informazioni potranno essere pertanto di ausilio sia per la progettazione urbanistica che per la pianificazione territoriale ai fini della mitigazione del rischio sismico nelle aree di interesse e per la pubblica incolumità.

Tutte le analisi e verifiche sono state condotte in ottemperanza alla Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021 della Regione Emilia Romagna nonché alle indicazioni nazionali ICMS 2008, trattando i dati secondo gli standard di rappresentazione ed archiviazione 4.2.

### 13. BIBLIOGRAFIA

Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 CPTI15 <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

Dipartimento della Protezione Civile, "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica", 2008

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 630/2019 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)"

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 476/2021 "Aggiornamento dell' Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017) di cui alla deliberazione della giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630"

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 564/2021 del 26/04/2021, INTEGRAZIONE DELLA PROPRIA DELIBERAZIONE N. 476 DEL 12 APRILE 2021 MEDIANTE APPROVAZIONE DELL'ALLEGATO A, "ATTO DI COORDINAMENTO TECNICO SUGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA (ARTT. 22 E 49, L.R. N. 24/2017)"

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2021). *Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 3.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.3>

DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) - vers. 3.3.0 <https://diss.ingv.it/mapper/>

EMIDIUS [http://emidius.mi.ingv.it/GNDT/ZONE/zone\\_sismo.html](http://emidius.mi.ingv.it/GNDT/ZONE/zone_sismo.html)

INGV <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>

ISIDE <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>

ITHACA (ITHACA Working Group (2019). ITHACA (ITaly HAZard from CApable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>).

PROTEZIONE CIVILE <http://www.protezionecivile.gov.it>

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

Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area, Scientific Data 6, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>

Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio 256-Rimini (2005) - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna . . S .EL .CA ., Firenze

Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio 255-Cesena (2008) - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna . . S .EL .CA ., Firenze.

Chen, C. J., & Juang, C. H., (2000). "Calibration of SPT- and CPT based liquefaction evaluation methods." Innovations applications in geotechnical site characterization, P. Mayne and R. Hryciw, eds., Geotechnical Special Publication No. 97, ASCE, New York, pp: 49-64.

Facciorusso, J., 2008. Calcolo del potenziale di liquefazione su vasta scala: approccio deterministico e approccio probabilistico. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Catania.

Galli, P. (2000). New Empirical Relationships between Magnitude and Distance for Liquefaction. Tectonophysics, 324, 169 - 187.

Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Gambettola (FC)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

---

Ishihara, K., (1996) "*Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*". Clarendon, Oxford.

Ishihara, K. & Yoshimine, M. (1992). *Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes*, Soils and Foundations, 32 (1), 173–188.

Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S. (1978). "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan." Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, 885-896.

Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K. (1982). "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes." Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton UK, 925-939.

Juang, C. H., et Al. (2001). Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering "*Assessing Probability-based Methods for Liquefaction Potential Evaluation*".

Linee Guida AGI – Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica – 2005

Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni – versione 2.0, anno 2022

Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni – versione 1.0, anno 2018

NASEM Report (2016). State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake - Induced Soil Liquefaction and Its Consequences. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). ISBN: 978 - 0 - 309 - 44027 - 1. DOI: <https://doi.org/10.17226/23474>.

Papathanassiou, G. (2008). "LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence." Engineering Geology, 96(1/2), 94-104.

Report ASCE, (2011), Ku, C.S., et Al., "*Liquefaction Probability by Probabilistic Version of Robertson and Wride Model*". ASCE.

Robertson P.K., "Performance based earthquake design using the CPT". In proceedings of IS-Tokyo 2009: International conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering- From case history to practice, Tokyo, Japan, 15-18 June(2009).

Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Rep. No. EERC 72 - 12, EERI, Berkeley, Calif.

Seed, H.B., and Idriss, I.M., (1971). "Simplified Procedure for evaluating soil liquefaction potential". Journal Soil Mechanics and Foundations, ASCE .

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.

S. Toprak, T.L. Holzer, M.J. Bennett, J.C. Tinslay, "*CPT and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction potential*." Proceedings of 7th U.S.–Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction, Seattle, Technical Report MCEER-99-0019(1999).

S. van Ballegooy, P.J. Malan, M.E. Jacka, V.I.M.F. Lacrosse, J.R. Leeves & J.E. Lyth / Tonkin & Taylor Limited - H. Cowan / New Zealand Earthquake Commission, "Methods for characterising effects of liquefaction in terms of damage severity", 15WCEE Lisboa, 2012.

Tonkin and Taylor Ltd (2013) Liquefaction vulnerability study, Tonkin and Taylor Report for The Earthquake Commission 52020.0200/v1.0. February 2013.

Toprak, S. and Holzer, T. L. (2003). "Liquefaction potential index: field assessment." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(4), 315–322.

Zhang, G., Robertson, P. K., Brachman, R. W. I. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, Canadian Geotechnical Journal, 39, 1168–80.

Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. I., (2004). Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 861.