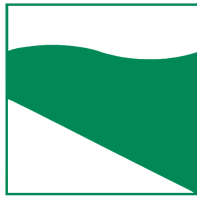




PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Livello 2

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna

Comune di Budrio



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA  Studio realizzato con il contributo di cui all'OCPDC 532/2018 recepita con DGR 2047/2018	Dott. geologo Samuel Sangiorgi	Dicembre 2020

## INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Contenuti dello studio.....	3
1.2	Riferimenti normativi.....	4
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	5
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	7
2.1	Riferimenti bibliografici.....	7
2.2	Sismicità storica.....	7
2.3	Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012.....	9
2.4	Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV.....	11
2.5	Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale.....	13
	2.5.1 <i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica.....</i>	13
	2.5.2 <i>Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitan di Bologna. .</i>	14
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	16
3.1	Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico.....	16
3.2	Geomorfologia storica.....	20
3.3	Idrogeologia.....	25
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	27
4.1	Le nuove indagini eseguite.....	28
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	33
5.1	Litologie sub-affioranti.....	33
5.2	Sottosuolo profondo.....	35
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	41
6.1	Commenti introduttivi.....	41
6.2	Definizione del substrato rigido.....	41
6.3	Liquefacibilità.....	42
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS.....	47
7.1	Cenni introduttivi.....	47
7.2	Sintesi illustrativa delle MOPS.....	47

7.3	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS.....	49
7.4	Calcolo dei fattori di amplificazione.....	49
7.4.1	<i>Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.....</i>	<i>49</i>
7.4.2	<i>Zone di attenzione per instabilità: calcolo dei fattori di amplificazione.....</i>	<i>50</i>
7.5	Elaborazione dei valori di $H_{SM}$ .....	51
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	52
8.1	Carta delle Indagini.....	52
8.2	Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica.....	52
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	53
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS.....	53
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S.....	55
8.6	Carta di microzonazione sismica livello 2.....	55
8.7	Carta della distribuzione dei valori di $H_{SM}$ .....	56
9	BIBLIOGRAFIA.....	57

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Contenuti dello studio

Il Comune di Budrio ha beneficiato di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per la realizzazione di studi comunali di microzonazione sismica (livello 2) e di analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), come previsto dalla Legge 77/2009 e ai sensi dell'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 532/2018, recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 2047/2018. Lo studio di MS di livello e le analisi della CLE sono stati affidati allo Studio scrivente.

Sono state dunque espletate le seguenti attività:

- raccolta dati geognostici e geofisici disponibili ed esecuzione di alcune indagini integrative;
- elaborazione delle analisi di livello 1 su tutto il territorio comunale e la microzonazione di livello 2 per il territorio urbanizzato/urbanizzabile e un'ampia fascia di territorio circostante;
- elaborazione delle analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE);
- archiviazione dei dati e adeguamento delle cartografie secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione previsti per la MS e la CLE.

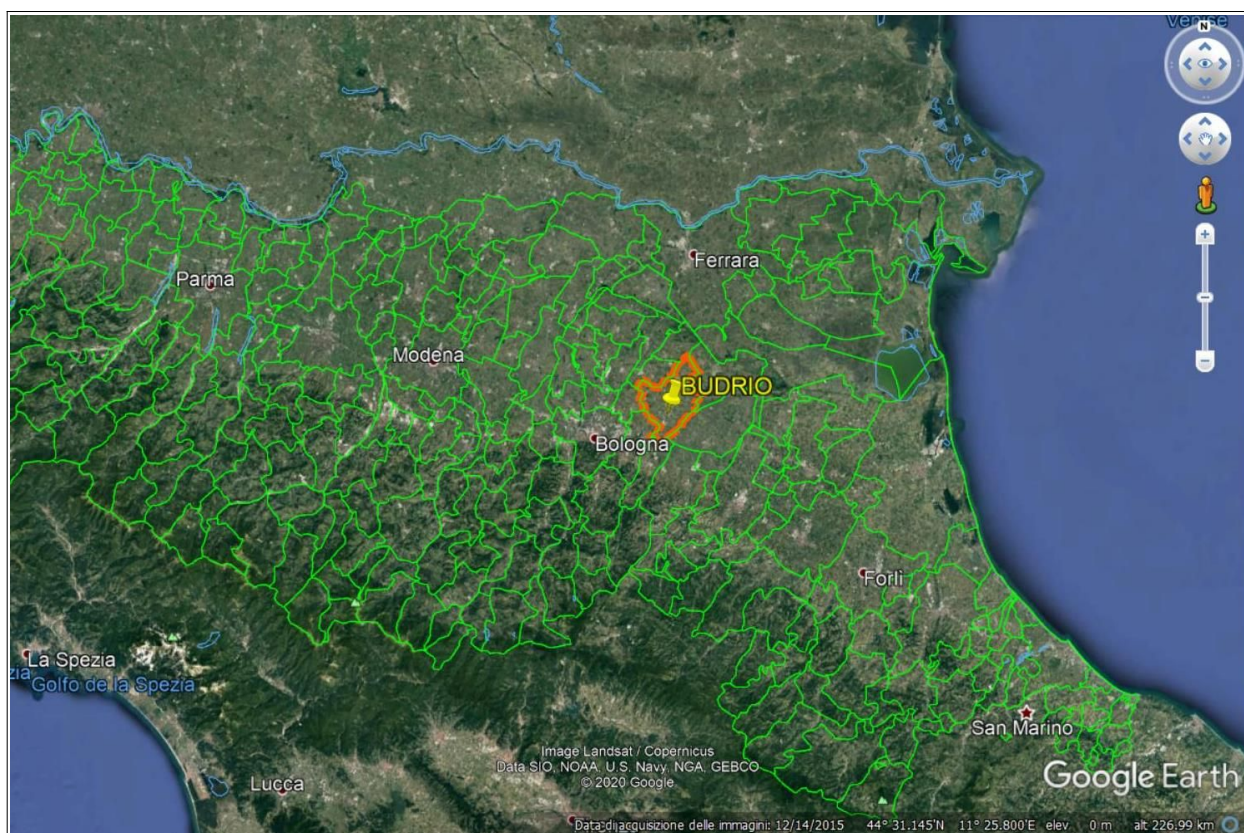


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo del Comune di Budrio (foto aerea: “Google Earth”)

La figura 1.1 offre un inquadramento del limite comunale di Budrio: si tratta di un territorio amministrativo ricadente nella pianura padana a NE di Bologna, di estensione areale totale pari a poco più di 120 kmq e con una popolazione di 18.545 abitanti (dato ISTAT 31/12/2019).

La figura 1.2 localizza con maggior dettaglio il territorio interessato dallo studio di microzonazione sismica di livello 2, che comprende tutte le aree urbane con un suo significativo intorno. La disponibilità di informazioni ha consentito di estendere lo studio di MS di primo livello a tutto il territorio amministrativo.

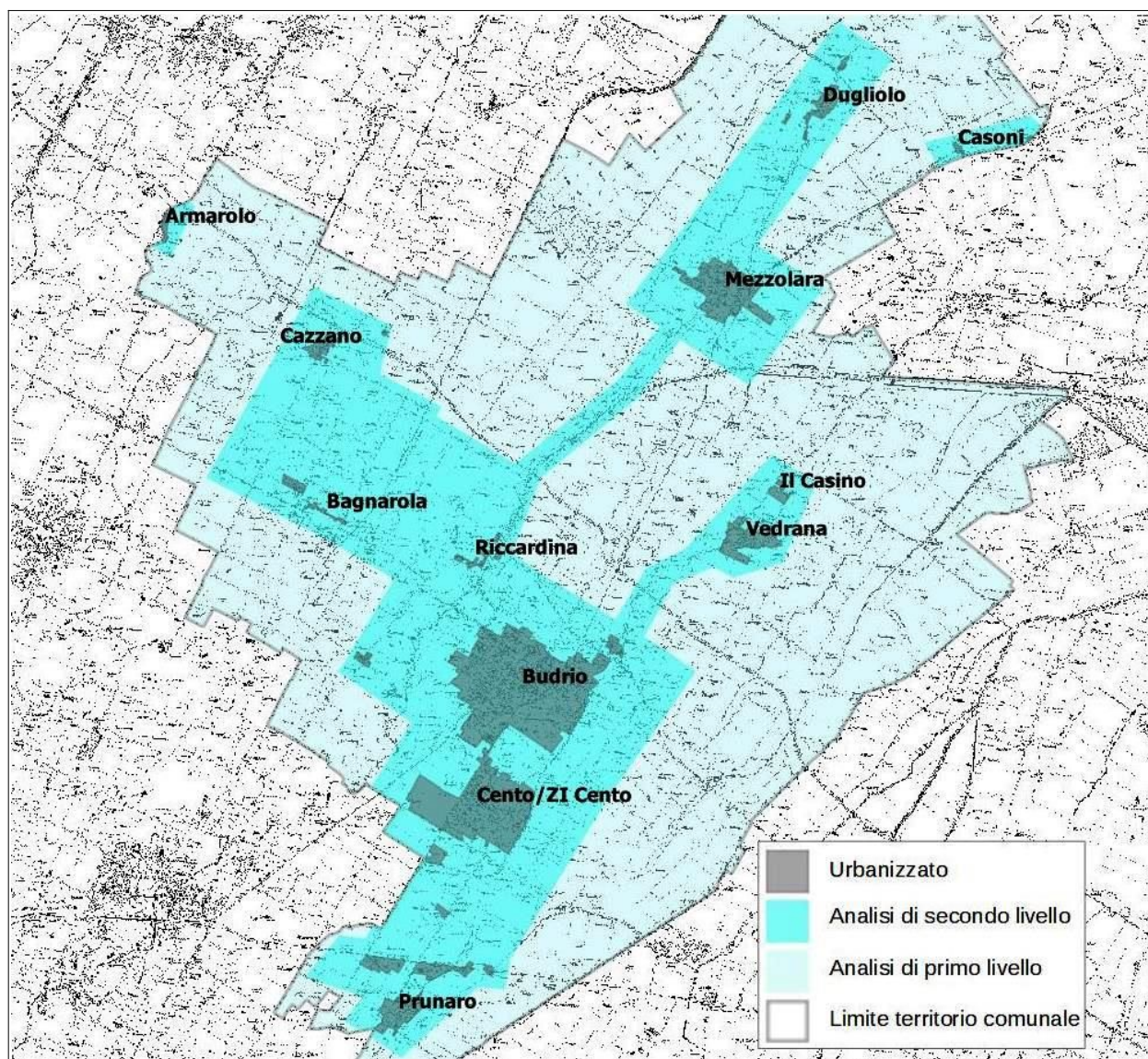


Figura 1.2 - Estensione del territorio comunale interessato dagli approfondimenti sismici di primo e secondo livello (base topografica Regione Emilia-Romagna - CTR 1:25.000)

## 1.2 Riferimenti normativi

Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato A2 della Delibera n. 2047/2018 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna: "Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica e analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui

*all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 532/2018 e Decreto del Capo della Protezione Civile del 9 agosto 2018*”.

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

- ✓ “Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1”, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, novembre 2018), da qui in avanti “Standard MS 4.1”;
- ✓ “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”, approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti “ICMS”.

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

- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale n. 630/2019 “Atto di Coordinamento Tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)”
- ✓ LR 30/10/2008 n.19 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- ✓ LR 21/12/2017 n.24 “Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio”;
- ✓ DM del 17/01/2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”.

### 1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

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

- la presente Relazione Descrittiva (riprodotta in formato \*.pdf) che, oltre a caratterizzare e inquadrare le aree oggetto delle analisi nel contesto geologico, geomorfologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie;
- le tavole cartografiche (riprodotte in formato \*.pdf) elencate in tabella 1.1 e illustrate in dettaglio nel capitolo 8;
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato \*.shp – shapefile);
- le sezioni geologiche di riferimento per il territorio studiato (riprodotte in formato \*.pdf), contenute nell'Allegato 1.

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle indagini	Tavola 1a/b/c	1:10.000
Carta geologico-tecnica	Tavola 2a/b/c	1 Ⓢ :10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3a/b/c	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4a/b/c	1:10.000

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle velocità delle onde di taglio S	Tavola 5a/b/c	1:10.000
Carta di microzonazione sismica livello 2 – FA <sub>PGA</sub>	Tavola 6a/b/c	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – FA <sub>SI1</sub>	Tavola 7a/b/c	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – FA <sub>SI2</sub>	Tavola 8a/b/c	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – FA <sub>SI3</sub>	Tavola 9a/b/c	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – FA <sub>SA1</sub>	Tavola 10a/b/c	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – FA <sub>SA2</sub>	Tavola 11a/b/c	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – FA <sub>SA3</sub>	Tavola 12a/b/c	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – FA <sub>SA4</sub>	Tavola 13a/b/c	1:10.000
Carta della distribuzione dei valori di H <sub>SM</sub>	Tavola 14a/b/c	1:10.000

*Tabella 1.1 – Elaborati cartografici predisposti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Budrio*

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate nella DGR 2047/2018 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS v.4.1 (CTMS, 2018), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. Sono inoltre coerenti con la successiva DGR 630/2019. Si segnala a questo proposito che l’obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento i raster tipografici georeferenziati della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBT scala 1.5.000), aggiornati al 2013. Per questo lavoro, la base topografica raster è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate “WGS\_1984\_UTM\_Zone\_33N”, per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard MS v.4.1 (CTMS, 2018).

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

### 2.1 Riferimenti bibliografici

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

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

- il *CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015* (Rovida et al., 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$  d'interesse nella finestra temporale 1000–2014
- il *DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani* utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000–2014 (Locati et al., 2016 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il *CFT15Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea* (Guidoboni et al., 2018), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull'ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismo-indotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la *Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale* (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ad essi sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del sisma atteso, i valori di accelerazione orizzontale massima del suolo (ag) e dei principali “parametri spettrali”, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica;
- la *Zonazione Sismogenetica ZS9* (Meletti e Valensise, 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il *Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.1* (DISS Working Group, 2018), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore.

### 2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 (Locati et al., 2016), riporta per il Capoluogo 20 eventi sismici, con intensità macrosismiche che arrivano fino al grado VI della scala MCS (Sieberg, 1930) per la sequenza



sismica del 1909 (“Emilia–Romagna orientale”). Anche per le altre località riportate nell'archivio DBMI15 e situate nel territorio comunale, la massima intensità registrata è risultata inferiore o uguale al sesto grado (figura 2.1). La figure 2.2 e 2.3 riportano rispettivamente un elenco dei terremoti più significativi che hanno interessato il Capoluogo (fino al 2015) e un grafico della distribuzione temporale degli eventi con l'indicazione della massima intensità stimata sulla base dei danni e degli effetti percepiti nel territorio in questione.

La figura 2.4 riporta invece la localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi che hanno interessato il territorio studiato (fonte: archivio DBMI15).

Figura 2.1- Massime intensità macrosismiche registrate nelle località del territorio della Città Metropolitana di Bologna (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Budrio

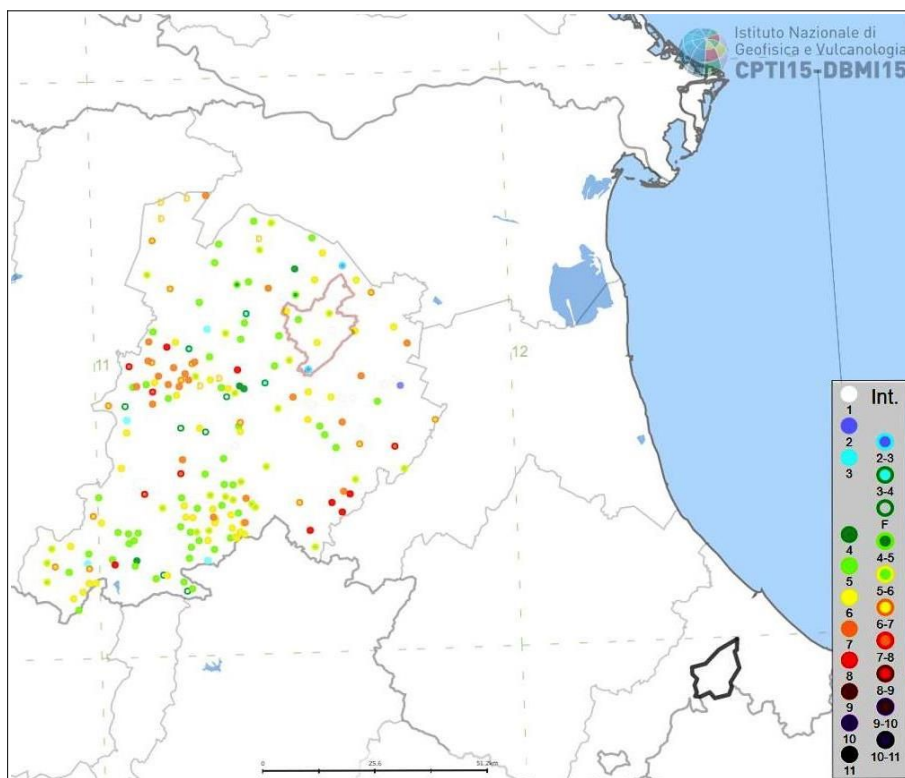


Figura 2.2- Terremoti significativi per il Capoluogo, con macrointensità stimata  $\geq 3$  (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1892	08	09	07	58		Valle d'Alpone	160	6-7	4.91
NF	1895	03	23				Comacchio	33	6	4.65
NF	1904	11	17	05	02		Pistoiese	204	7	5.10
6	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
NF	1913	07	21	22	35		Appennino romagnolo	43	5-6	4.79
NF	1913	11	25	20	55		Appennino parmense	73	4-5	4.65
5	1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63
2-3	1930	10	24	00	52		Appennino tosco-emiliano	12	4	3.97
SF	1930	10	26	07	14		Appennino tosco-emiliano	14	4	4.21
3-4	1936	10	18	03	10		Alpago Cansiglio	269	9	6.06
4	1951	05	15	22	54		Lodigiano	179	6-7	5.17
NF	1965	11	09	15	35		Appennino reggiano	32	5	4.17
2-3	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
2-3	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
3	2000	05	06	22	07	0	Faentino	85	5	4.08
3	2000	05	08	12	29	5	Faentino	126	5	4.67
NF	2000	05	10	16	52	1	Faentino	151	5-6	4.82
NF	2002	11	02	10	57	4	Ferrarese	79	4	4.21
NF	2003	12	07	10	20	3	Forlivese	165	5	4.18
NF	2005	07	15	15	17	1	Forlivese	173	4-5	4.29

Figura 2.3- Grafico temporale dei terremoti significativi per il Capolugo e macrointensità stimata (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)

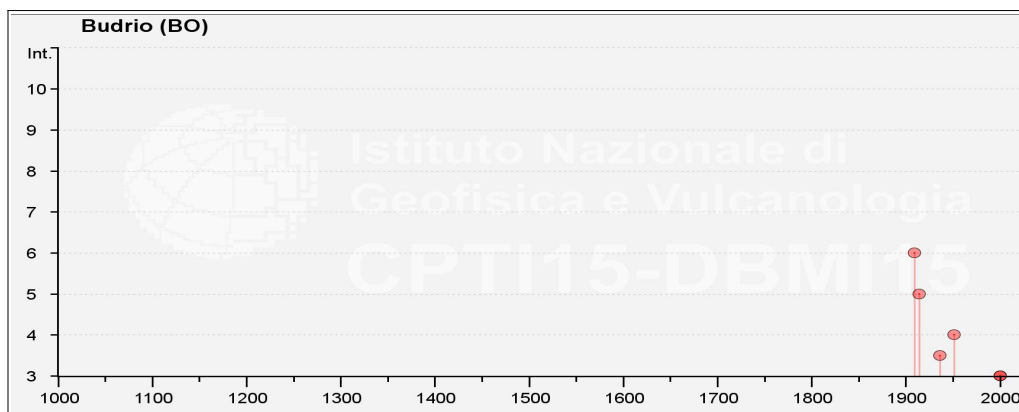
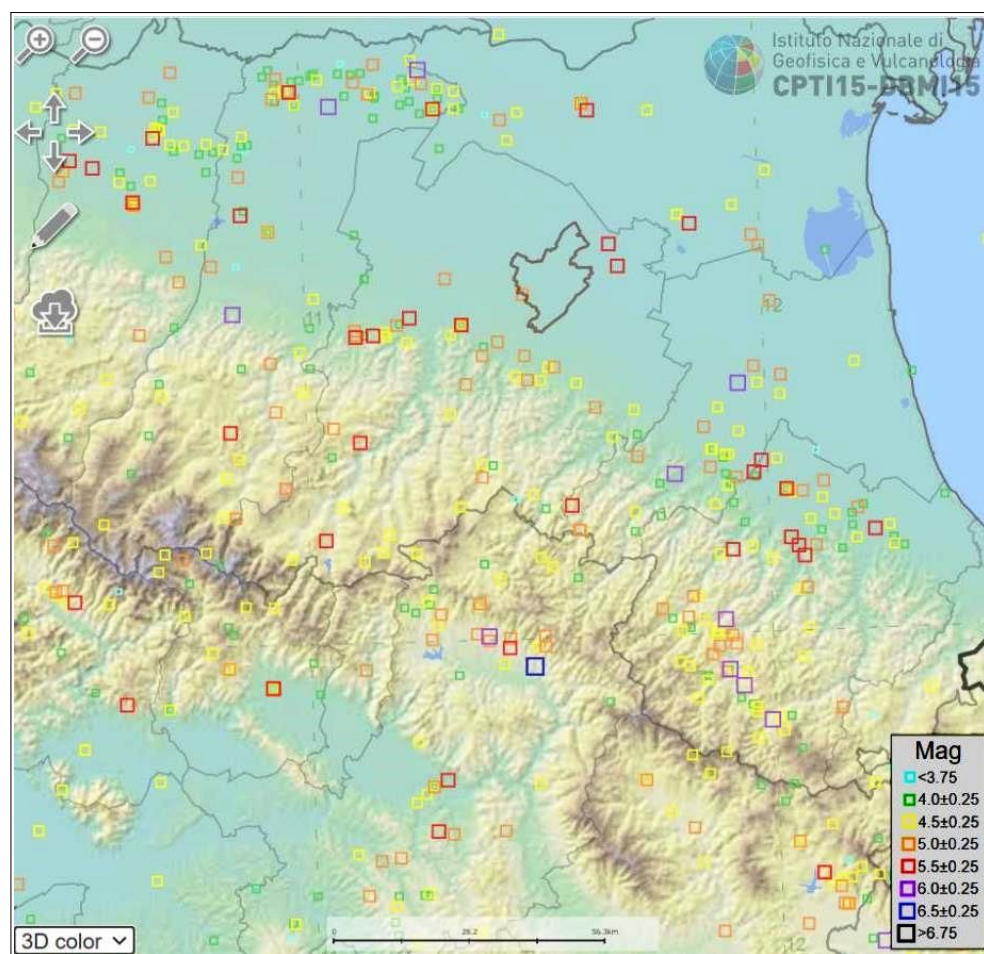


Figura 2.4 - Localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi registrati nel territorio della Città Metropolitana di Bologna (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Budrio



## 2.3 Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012

Dal 20 maggio 2012 una vasta porzione della Pianura Padana<sup>1</sup> è stata interessata da una sequenza sismica, con una prima forte scossa (di magnitudo locale ML=5.9), registrata alle ore 4:03 locali e con epicentro tra Mirandola (MO) e Finale Emilia (MO). A tale sisma sono seguite

<sup>1</sup> Compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara.

dopo pochi minuti altre due scosse importanti, la prima di  $ML = 4,8$  e la seconda di  $ML = 5,1$ , con epicentro nel territorio comunale di Bondeno (FE). Successivamente, tra il 20 maggio e il 3 giugno 2012, si sono state registrate altre 5 forti scosse ( $ML > 5$ ), con epicentri distribuiti tra Novi di Modena (MO) e Vigarano Mainarda (FE). Tra queste, la più forte e disastrosa ( $ML = 5.8$ ) è avvenuta il 29 maggio 2012 con epicentro tra Mirandola (MO) e Medolla (MO).

I maggiori effetti locali riscontrati sono riconducibili ad amplificazione del moto sismico e a fenomeni di liquefazione, questi ultimi diffusi soprattutto in corrispondenza di rami abbandonati dei fiumi appenninici (Reno, Panaro e Secchia) e, subordinatamente, del Po<sup>2</sup>. In termini di amplificazione, si sono invece registrate massime accelerazioni orizzontali al sito (Pga) che hanno superato 0,2g e in alcune aree anche 0,3g. La figura 2.5 localizza gli epicentri della citata sequenza emiliana.

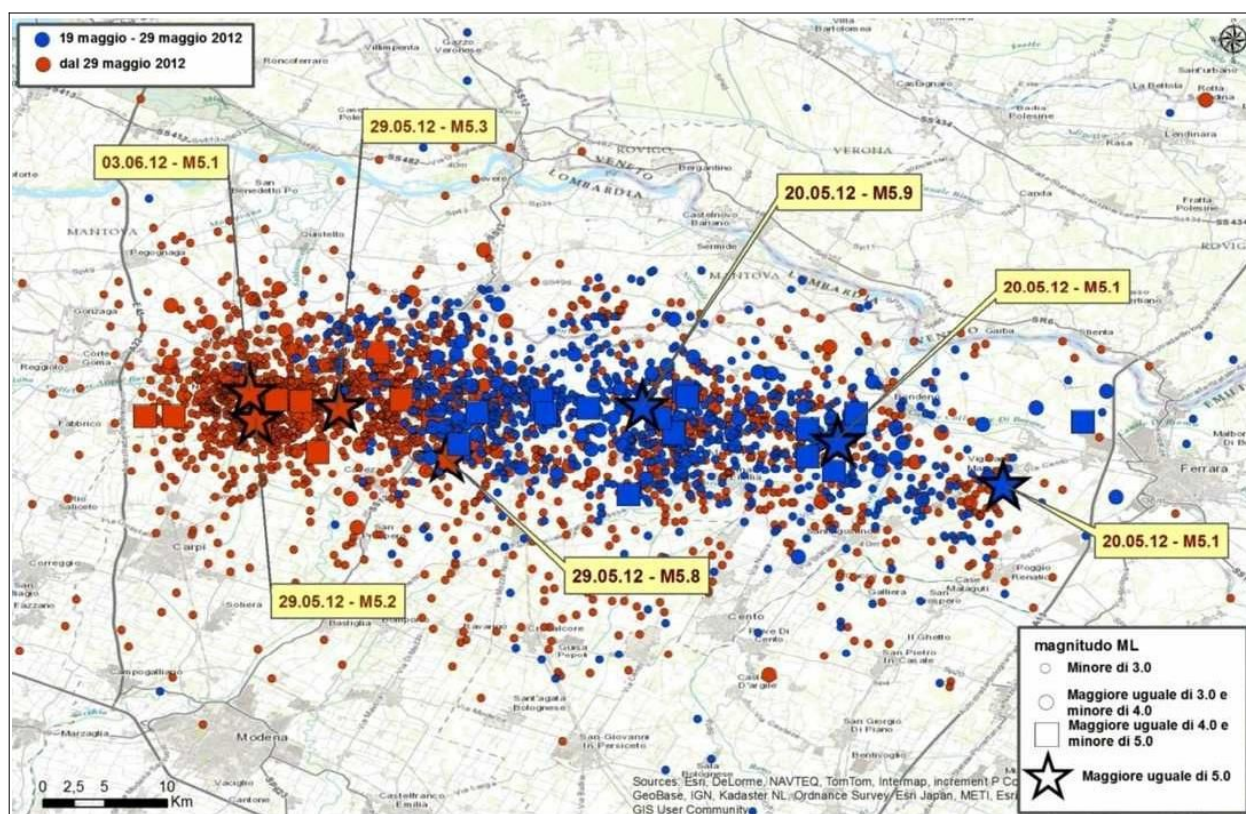


Figura 2.5 – Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (fonte: INGV <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

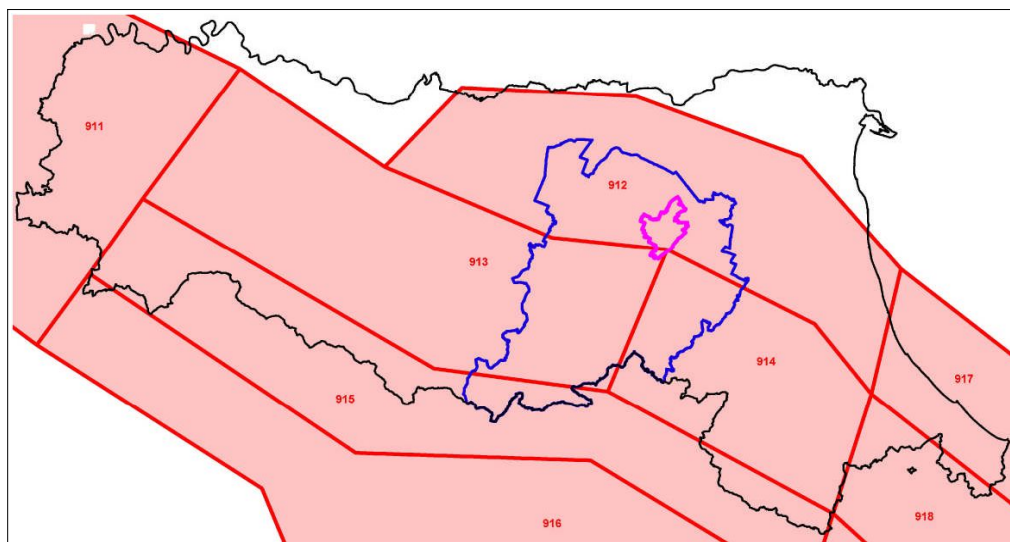
Il DBMI15 (Locati et al., 2016) non attribuisce nessun valore di intensità riferibile al sisma emiliano 2012 per le località comprese nel territorio di Budrio, in quanto i rapporti sui rilievi macrosismici eseguiti (Galli et al., 2012a e 2012b) citano solo i Comuni più settentrionali del territorio della Città Metropolitana di Bologna.

<sup>2</sup> Fonte: “Microzonazione sismica e analisi della CLE delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di maggio-giugno 2012” – Relazione Illustrativa a cura di L. Martelli e M. Romani e “Rilievo macrosismico MCS speditivo – Rapporto Finale” a cura di P. Galli, S. Castenetto e E. Peronace.

## 2.4 Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano – ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), l'area in esame ricade prevalentemente nella Zona 912 e in parte (soltanto la porzione sud del territorio comunale) nelle Zone 913 e 914, tutte caratterizzate da un valore di  $Mw_{max}$  pari a 6.14 (figura 2.6).

Figura 2.6 –  
Zonazione  
sismogenetica  
ZS9 e territorio  
amministrativo  
di Budrio



La figura 2.7 riporta una sovrapposizione del Comune di Budrio con le sorgenti sismogeniche individuate nel database DISS v. 3.2.1 (DISS Working Group, 2018). Questo fondamentale database individua le seguenti sorgenti sismogeniche composite, che tuttavia ricadono esternamente al territorio studiato (non interessato storicamente da epicentri sismici di intensità significativa):

- la <<ITCS012 – Malalbergo–Ravenna>> lambisce a nord il territorio di Budrio ed è caratterizzata da una Magnitudo  $Mw_{max}$  pari a 6,0. In sintesi, la sismicità è legata al fronte compressivo avanzato sepolto (pieghe ferraresi esterne), con terremoti storici (Boschi et al, 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al, 2006; Guidoboni et al, 2007) che raramente hanno raggiunto elevate intensità e tuttavia con profondità relativamente modeste. La magnitudo della zona è infatti derivata dalle magnitudo massime attribuite ai terremoti più significativi associati a questa zona (Classe–Ravenna, 725; Argenta, 1624; bassa padana, 1796 e 1909). Le massime profondità ipocentrali che possono caratterizzare tale area si basano su considerazioni tettoniche (da 2 a 8 km circa).
- la <<ITCS051 – Carpi–Poggio Renatico>> situata più a nord–ovest del territorio di Budrio, questa fascia sismogenetica interessa la pianura bolognese di nord orientale ed è caratterizzata da una Magnitudo  $Mw_{max}$  pari a 6,0. Anche per questa sorgente composta, la sismicità locale è data prevalentemente dall'attività delle faglie compressive delle “Pieghe Ferraresi” (Pieri & Groppi, 1981): questo sistema di pieghe–faglie ha dato origine alle due principali dorsali sepolte (“interne” ed “esterne”) che

descrivono un arco vergente verso nord, esteso tra Reggio Emilia e la costa adriatica e che si spingono fino ed oltre il Po ferrarese (Bigi et al., 1990). Queste dorsali sepolte, sono il risultato dell'attività di faglie inverse (thrust) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio-superiore, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud. Di attivazione più recente sono le strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (backthrust) che interessano soprattutto gli orizzonti più superficiali (Martelli, 2014). Gli eventi sismici della pianura emiliana del 2012 sono risultati la conseguenza della riattivazione di un segmento di questa sorgente sismogenetica;

- la <<ITCS047 - Castelvetro di Modena - Castel San Pietro Terme>> che interessa i territori appenninici e pedeappenninici situati più a sud rispetto al territorio di Budrio, con una magnitudo stimata di  $M_w = 6,0$  e derivata dai terremoti più significativi bolognesi (1505 e 1929) e modenesi (1399). La più vicina sorgente sismogenetica individuale nota è denominata "ITIS091 - Casalecchio di Reno" a cui è attribuita una  $M_w = 5,5$  associata al terremoto bolognese del 3 gennaio 1505 (fonte: CPTI, 2004); la zona epicentrale è stata stimata tra Zola Predosa e Bologna e sono documentati danni più consistenti a Zola Predosa, Bologna e S. Lorenzo in Collina (grado IX della scala Mercalli, cfr. Zecchi, 1882) ed i seguenti effetti indotti dal sisma: frane, fratture superficiali (Boschi et al., 2000), effetti di liquefazione a Zola Predosa (Prestininzi e Romeo, 2000).

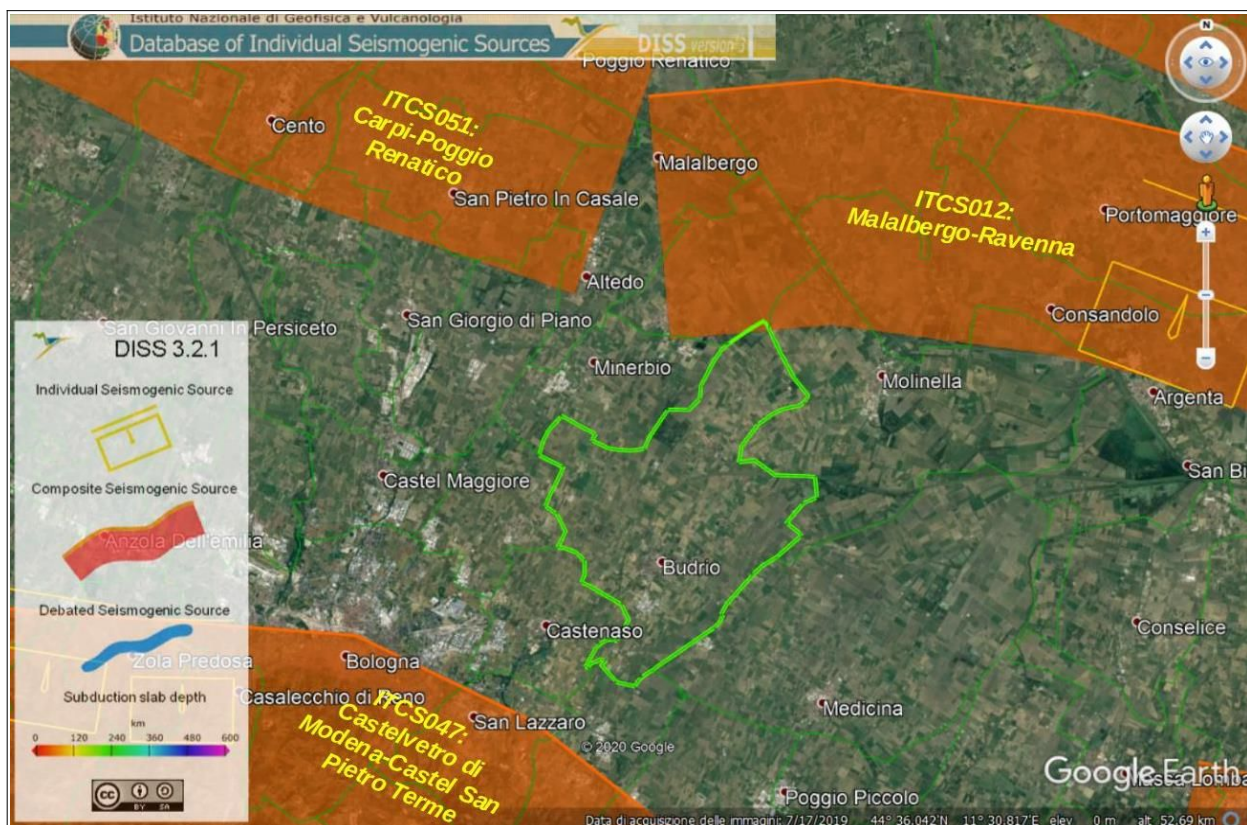


Figura 2.7 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.2.1). Foto aerea: Google Earth

## 2.5 Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale

### 2.5.1 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica

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

Con le più recenti DGR 2193/2015 e DGR 630/2019, la Regione Emilia-Romagna ha introdotto ulteriori aggiornamenti agli indirizzi riportati nella DAL 114/2007. Questa parziale revisione prende quale riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), le ulteriori esperienze scientifiche seguite ai recenti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009; pianura emiliana del 2012) e, infine, le esperienze di applicazione della DAL 112/2007. In sintesi, le principali novità contenute nella la DGR 2193/2015 e nella DGR 630/2019 consistono:

- ✓ nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate (“livello 2”);
- ✓ nella definizione di ulteriori parametri di amplificazione riferiti all'intensità spettrale di Housner (per l'intervallo di periodo  $T$  0,5–1,5 s) e riferiti all'intensità spettrale in accelerazione (per i seguenti intervalli di periodo: 0,1–0,5 s, 0,4–0,8 s, 0,7–1,1 s, 0,5–1,5 s)
- ✓ nella richiesta di produrre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del “primo livello” di approfondimento;
- ✓ nella richiesta di produrre una carta della distribuzione sul territorio dei valori di “Hazard”  $H_{SM}$  (Naso et al., 2019)

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

Per quanto riguarda la  $a_g$  al sito di riferimento ( $a_{g_{ref}}$ ), la figura 2.8 riporta per il territorio comunale di Budrio i punti della griglia INGV e i relativi valori di  $a_{refg}$  (mappa MPS04). Ai punti vengono attribuiti i parametri della pericolosità sismica di base e in particolare si attribuiscono il valore dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. La griglia di punti è costruita per tutto il territorio nazionale (densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km) e la mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale a seguito dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

Si evince che per il territorio urbanizzato/urbanizzabile, i valori di  $a_{refg}$  (per terremoti con TR =475 anni) sono compresi tra circa 0,186g e 0,160g, con una variabilità relativamente modesta della pericolosità “di base”, in diminuzione verso NO.

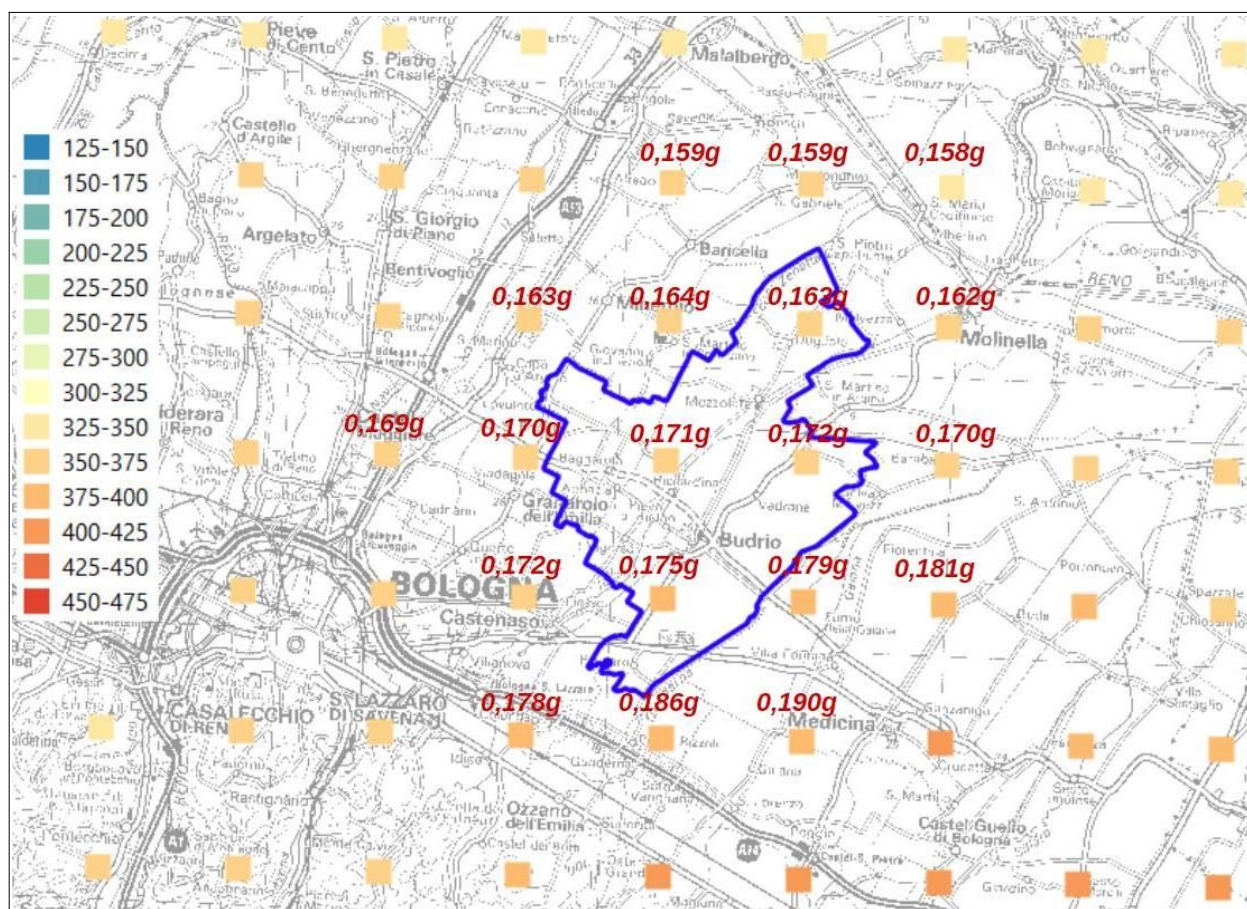


Figura 2.8 - Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura riporta i punti della griglia interni o limitrofi al territorio comunale di Budrio

### 2.5.2 Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna

La Città Metropolitana di Bologna ha provveduto all'aggiornamento<sup>3</sup> degli studi di pericolosità sismica preliminare dell'intero territorio amministrativo, ai sensi della DGR n.630/2019. Gli esiti di tali studi sono stati assunti nella proposta di piano e in particolare è stata redatta la <<Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali>> (alla scala 1:65.000 per la pianura), che:

- costituisce un primo livello di approfondimento e identifica le condizioni geologiche e morfologiche che possono determinare effetti locali sulla base dei quali è possibile definire potenziali scenari di pericolosità sismica locale;
- fornisce come ulteriore dato conoscitivo le isobate del tetto del substrato rigido, i limiti e le isobate dei depositi grossolani di conoide sepolta in grado di condizionare la

<sup>3</sup> aggiornamento dei contenuti della <<Variante al PTCIP in materia di Rischio Sismico>> approvata con Delibera del Consiglio Provinciale del n°57 del 28/10/2013

risposta sismica locale;

- permette di operare una prima distinzione delle aree sulla base degli effetti locali attesi in caso di evento sismico e, per ciascuna tipologia di esse, vengono indicate le indagini e/o le analisi di approfondimento che devono essere effettuate dagli strumenti di pianificazione successivi (figura 2.9).

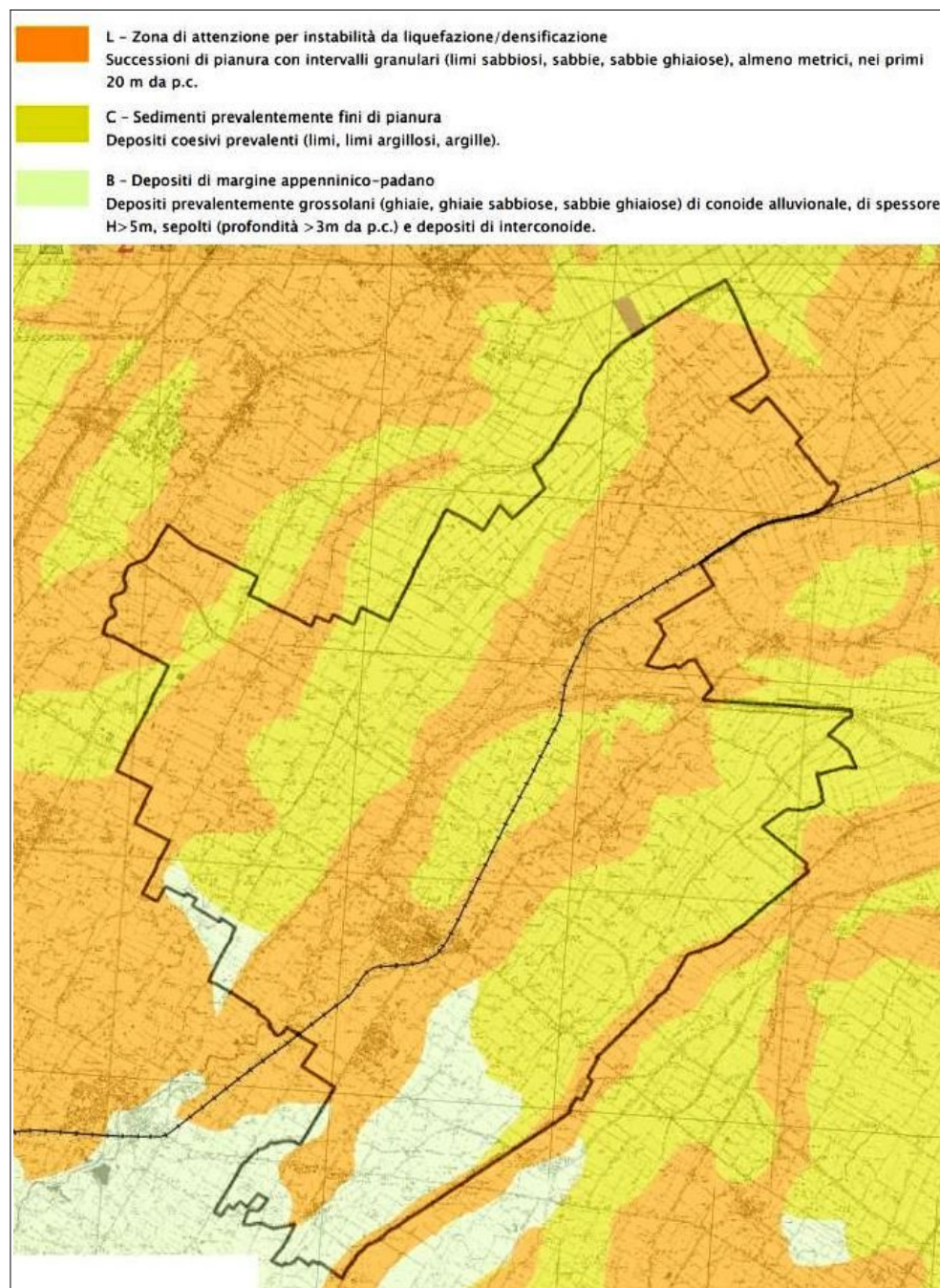


Figura 2.9 – Stralcio del foglio 1 della tavola <<Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali>> alla scala 1:65.000 (PTM di Bologna – Proposta di piano, luglio 2020). È riportato il perimetro del territorio comunale di Budrio



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

#### 3.1 Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico

Dal punto di vista tettonico (figura 3.1), il territorio di Budrio si colloca in zona di “fronte” appenninico sepolto nella Pianura Padana (AGIP 1977, 1981, 1982; Boccaletti et al., 1985, 1987; Bally et al., 1986; Castellarin & Vai, 1986; Castellarin et al., 1992; Pieri, 1992; ecc.), che costituisce la propaggine più settentrionale della catena appenninica che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano veneta (Boccaletti et al., 2004). Tale fronte è individuabile negli archi esterni delle Pieghe Emiliane e Ferraresi (M. Pieri & G. Groppi, 1981).

Nella pianura, gli studi geognostici e sismici (RER-ENI, Agip) permettono di ricostruire l'assetto tettonico ed i meccanismi deformativi del margine fronte sepolto. In sintesi, il fronte di sovrascorrimento sepolto è costituito da un sistema di elementi tendenzialmente arcuati, articolati fra loro da un sistema di faglie trasversali ad andamento antiappenninico che rappresentano veri e propri svincoli cinematici a carattere trascorrente e lungo cui si sono avuti anche importanti movimenti verticali (figura 3.4). Le deformazioni del fronte hanno dato luogo alla formazione di bacini (sinclinali) e accavallamenti (“thrust” nord vergenti, associati ad anticlinali) e il risultato finale è quello di un consistente impilamento dei depositi sedimentari plio-pleistocenici, suturati dai depositi continentali di età più recente (Quaternario).

Mentre la strutturazione dell'Appennino emerso è avvenuta principalmente in età neogenica (Miocene superiore-Pliocene inferiore), la principale attività tettonica del suo margine, ovvero del suo fronte deformato e sepolto, è prevalentemente attribuita al Pliocene medio-superiore e Quaternario (figura 3.1).

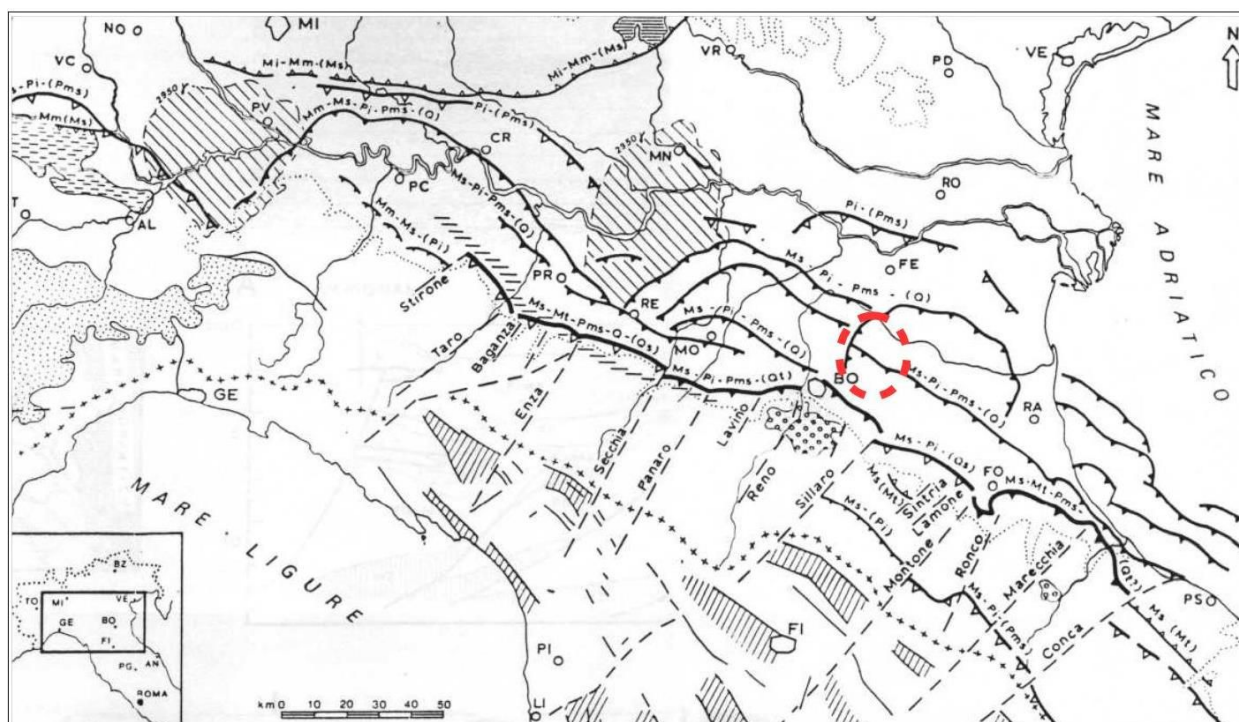


Figura 3.1 - Schema strutturale tettonico del fronte compressivo dell'Appennino settentrionale e ricostruzione temporale delle fasi tettoniche principali (da Castellarin et al., 1985). L'area di studio è localizzata nel cerchiato rosso

La figura 3.2 presenta un ulteriore e più aggiornato schema tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle Note Illustrative della *Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (edizione 2016)*. La figura 3.2 conferma come le strutture appenniniche proseguano ben oltre il limite dell'appennino aforante, proseguendo nella pianura, sepolte dai sedimenti quaternari padani.



Figura 3.2 – Ulteriore schema strutturale tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe” (ed. 2016). L’area di studio è localizzata nel cerchietto fucsia

Il territorio di Budrio ricade nella blanda sinclinale compresa tra le “Pieghe Pedeappenniniche” (a sud e più prossime alla catena appenninica) e il settore orientale dalla “Dorsale Ferrarese Interna”; quest’ultima è un’ampia struttura anticlinale nord-vergente estesa tra Reggio-Emilia e la costa adriatica, caratterizzata da un massimo sollevamento tra Novi di Modena e Medolla, noto anche come Alto di Mirandola”.

Nell’area di studio, le strutture tettoniche del fronte appenninico sono sature da depositi di età più recente (oltre alluvionale del Quaternario), sovrapposti ai depositi marini plio-pleistocenici (figura 3.3).

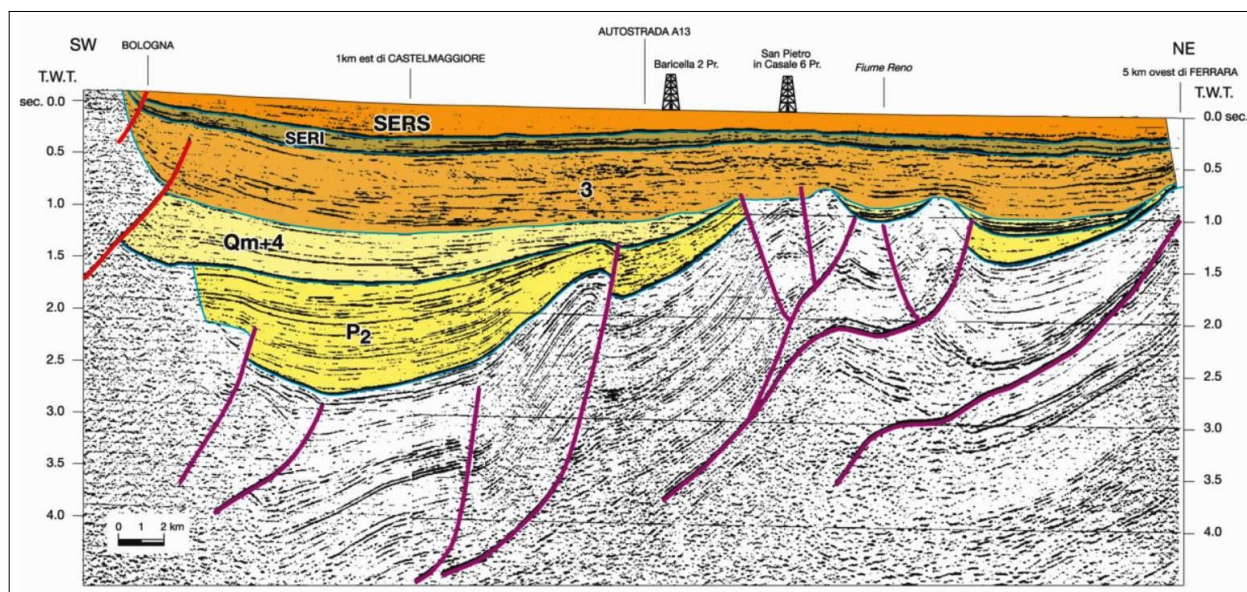


Figura 3.3 – Profilo sismico rappresentativo del territorio di pianura, da Bologna a Ferrara (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe – ed. 2016)

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

La classificazione stratigrafica dei sedimenti alluvionali di riferimento per questo lavoro è quella proposta e utilizzata in Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP (1998), nonché indicata nella Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 e come ulteriormente schematizzato in figura 3.4.

Figura 3.4 – Schema stratigrafico dei depositi plio – quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (RER & ENI-AGIP, 1998)

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

— Superficie di discontinuità principale      — Superficie di discontinuità minore

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

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

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

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

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

SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE (AEI) → nelle stratigrafie di sottosuolo di questo settore della pianura, il limite inferiore dei depositi AEI viene posizionato in corrispondenza del contatto netto fra i depositi fluvio-deltizi basali del supersintema ed i depositi sabbioso-

ghiaiosi litorali e di delta—conoide riferiti al tetto delle Sabbie di Imola (IMO). L'età di questi depositi è attribuita al pleistocene medio (0,70–0,75 Ma → 0,40–0,45 Ma).

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

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

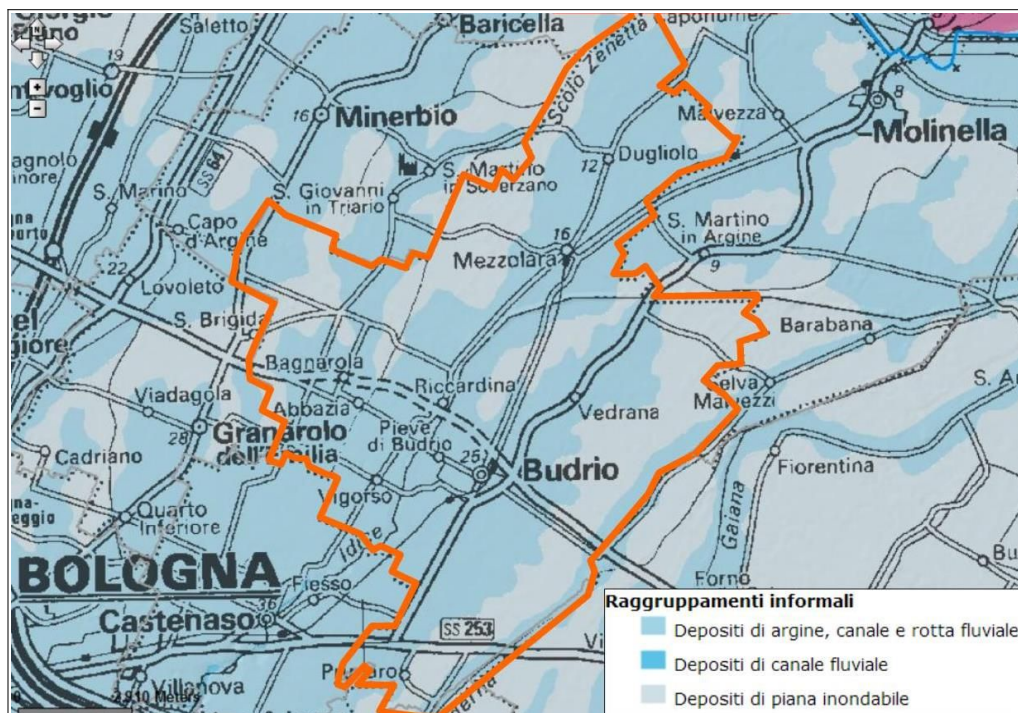
L'unità è chiusa al tetto da depositi argillosi di piana alluvionale e palude del ciclo sovrastante. Età deposizionale: Pleistocene medio (circa 230.000–130.000 anni).

**SUBSINTEMA DI VILLA VERRUCCHIO (AES7)** → La porzione basale trasgressiva del ciclo è costituita da depositi fini di tracimazione fluviale e piana inondabile contenenti livelli metrici di argille e limi localmente ricchi di sostanza organica di origine palustre. Questi depositi passano verso NE ad argille organiche lagunari e sabbie marine di cordone litorale. Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile dove sono frequenti livelli pedogenizzati (paleosuoli). La porzione sommitale del ciclo è caratterizzata da più frequenti depositi sabbiosi di canale fluviale a geometria nastriforme (nell'area di studio riferibili principalmente ai corsi d'acqua Savena e Idice). Lateralmente, questi depositi grossolani di canale fluviale passano a depositi fini di tracimazione fluviale pedogenizzati. Il limite di tetto di AES7 è ricoperto dai depositi trasgressivi, prevalentemente organici di piana alluvionale e di palude, del subsistema sovrastante (AES8). Età deposizionale: Pleistocene superiore (circa 125.000–18.000 anni).

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

In questo subsistema è stata distinta un'unità di rango gerarchico inferiore: l'UNITÀ DI MODENA (AES8a) la quale contiene i depositi più superficiali e più recenti, compresi quelli attualmente in evoluzione. AES8a è un'unità di pochi metri di spessore, che raggiunge i 10 m solo localmente, in corrispondenza dei dossi fluviali. Nella cartografia geologica RER, la sub unità AES8a consiste in depositi di tracimazione fluviale, all'interno dei quali è possibile distinguere depositi più sabbiosi e/o limoso sabbiosi di canale/argine/rotta fluviale dai depositi più argillosi e limosi di piana inondabile (figura 3.6). La base di AES8a è individuata dal contatto in discontinuità delle sue tracimazioni fluviali sul suolo di epoca romana o più antica di AES8.

Figura 3.6 -  
Geologia di sintesi  
dei depositi  
affioranti  
classificati in  
relazione alla facies  
deposizionale  
(fonte: cartografia  
geologica  
interattiva  
pubblicata nel sito  
internet del SGSS  
regionale)



### 3.2 Geomorfologia storica

Il riferimento bibliografico necessario per l'inquadramento geomorfologico del territorio studiato è rappresentato dallo studio geologico (geol. G. Viel, 2007) e dalle sintesi descrittive elaborate per il Quadro Conoscitivo del PSC associato dell'Unione dei Comuni "Terre di Pianura", dal quale si riprendono gli elementi essenziali con alcune integrazioni dello Scrittore.

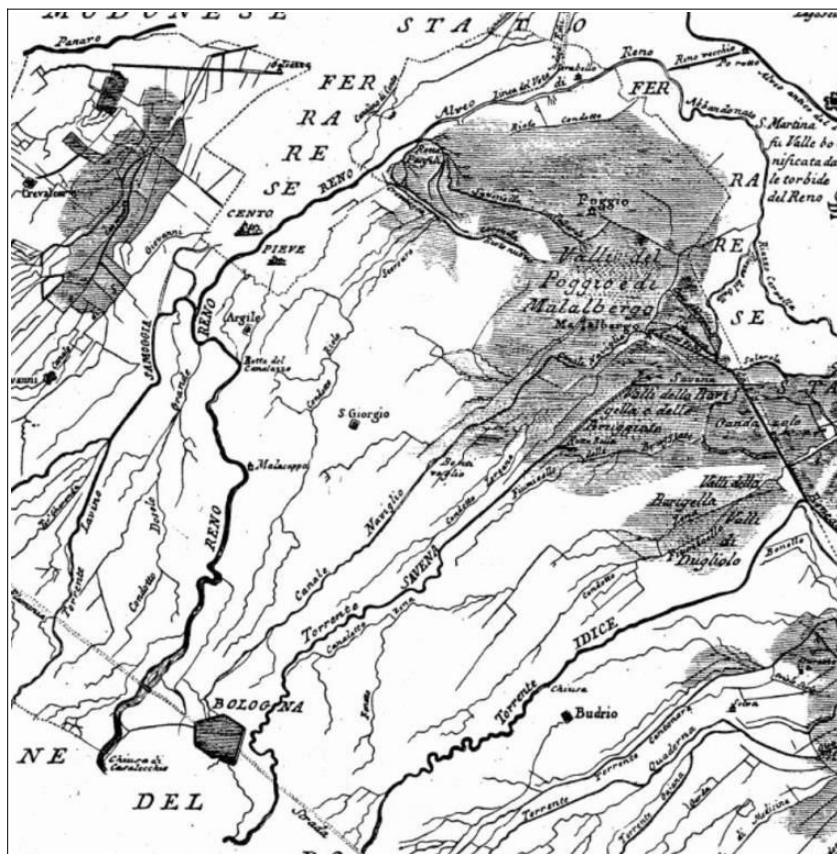
L'evoluzione della pianura olocenica è riconducibile ad un modello semplice, almeno nelle linee generali. I corsi d'acqua appenninici a valle delle conoidi pedemontane, poco attive durante l'Olocene (ultimi 15.000 anni), oggi prevalentemente in erosione, tendono a proseguire verso il collettore principale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

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

A seconda delle condizioni di drenaggio locale le acque possono permanere per tempi più o meno lunghi nelle aree esondate, fino a formare paludi e laghi permanenti, presupposto alla formazione di potenti depositi di argille di decantazione e torbe.

Per corsi d'acqua di pianura non arginati artificialmente, rotte e tracimazioni sono un fenomeno ricorrente che crea le condizioni per modifiche e divagazioni dell'alveo, ciò avviene con frequenza assai alta nei bacini subsidenti che caratterizzano la pianura padana. La velocità di subsidenza naturale condiziona la velocità di accrezione verticale, ma la sua variazione geografica condiziona anche la distribuzione spaziale dei corsi d'acqua.

Figura 3.7- Stralcio di cartografia risalente al 1761 che riporta la delimitazione delle “valli” distribuite a ridosso del Reno e del Po di Primaro (cfr. QC PSC Terre di Pianura, Relazione Geologica, geol G. Viel, 2007)



La distribuzione delle litologie di superficie e del primo sottosuolo, così come l'assetto morfologico della pianura, sono quindi strettamente legati ai processi strutturali e di sedimentazione e alla loro disposizione nel tempo. La figura 3.7 riporta la situazione geografica della pianura bolognese attorno al 1760: la presenza di vaste aree occupate da zone di espansione dei corsi d'acqua superficiali (paludi, acquitrini stagionali) testimonia delle difficoltà di drenaggio connesse all'evoluzione geostrutturale profonda della pianura ed alla presenza dei rilievi costituiti dai depositi sabbiosi (argini naturali) dei maggiori fiumi: Reno e Po di Primaro.

Questo vasto sistema di zone umide è stato oggetto delle bonifiche che si sono succedute fino a produrre l'assetto attuale della pianura, assetto caratterizzato dalla “pensilità” dei corsi d'acqua, dalla necessità di sollevamento delle acque dei bacini interfluviali per il loro drenaggio, dalla presenza di vaste aree di pianura depressa di forma per lo più ellissoidica (conche morfologiche), ed infine da morfologie allungate nella direzione del drenaggio e topograficamente rilevate sulla restante pianura: gli argini naturali fossili (paleoalvei). Questa ripartizione topografica riproduce la geografia di un passato storico (dal preromano a ciò che si può ricostruire con le cartografie dei secoli scorsi: dall'Atlante Magini, 1620, alle IGMI di primo impianto, 1890).

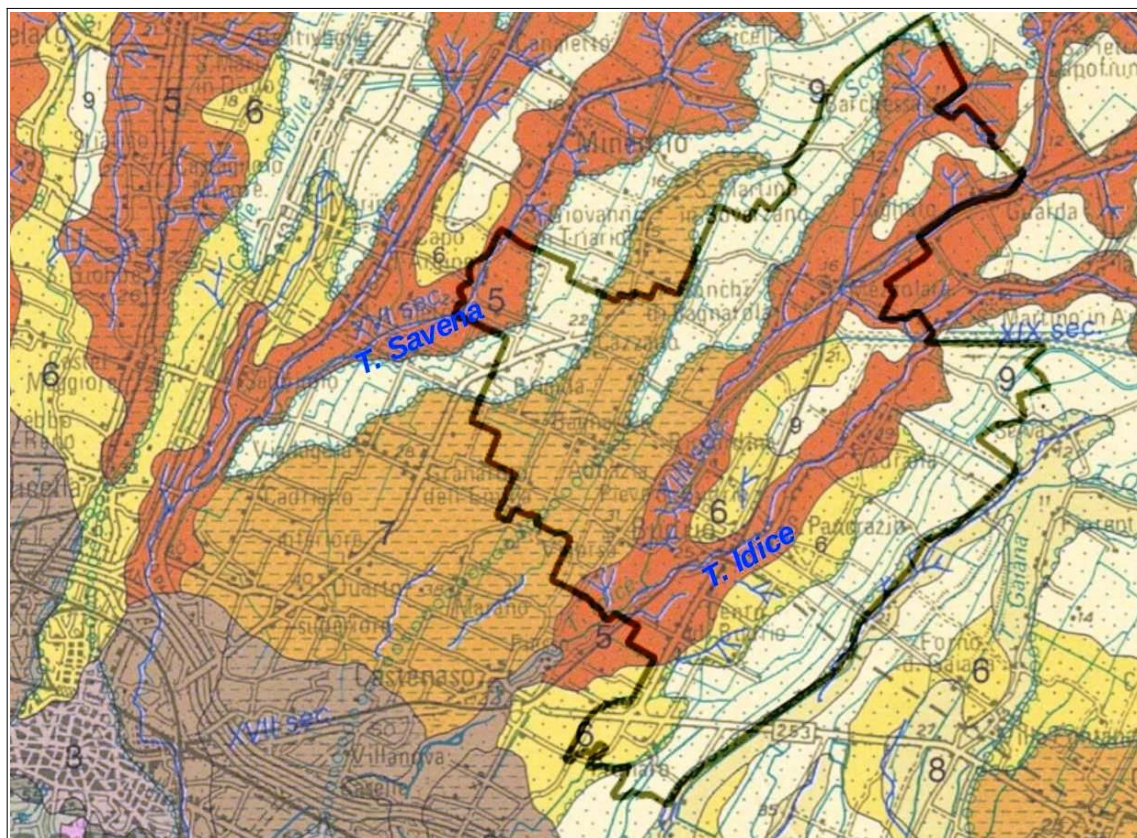


Figura 3.8 – Stralcio della Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna scala 1:250.000 (a cura di D. Preti, RER, 1999). I depositi di piana alluvionale sono numerati progressivamente da n.5 ("canale e argine prossimale" sabbiosi) a n. 9 (depositi "interfluviali e depositi di palude" argillosi). Sono riportate le principali tracce dei paleoalvei con datazione storica

Alla fine degli anni settanta, gli studi pedologici dell'allora "Servizio Cartografico" regionale hanno consentito di avviare un'accurata ricostruzione degli ambienti deposizionali recenti anche attraverso la interpretazione di foto aeree. Ciò ha permesso di giungere a una completa ricostruzione della morfologia del sottosuolo dell'intera pianura regionale, tuttora in continuo aggiornamento e tuttavia ancora basata sui contenuti del primo impianto (D. Preti, 1987). Le successive edizioni della carta morfologica, sempre aggiornate e corrette, hanno anche compreso datazioni storiche di probabile formazione dei corpi geologici più recenti (figura 3.8). L'andamento dei paleoalvei e degli alvei attuali a scala regionale è stato condizionato dall'evoluzione strutturale profonda della Pianura Padana. Ciò è dimostrato a scala regionale dallo stesso andamento del fiume Po che, in corrispondenza delle propaggini occidentali delle Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1982), vede deviato il suo corso verso Nord Est: subisce in modo assai vistoso la dinamica degli elementi strutturali ad "arco" paralleli alla catena appenninica. I fiumi minori, affluenti del Po, sono a loro volta condizionati anche dagli elementi secondari trasversali alle grandi pieghe fagliate.

Se le strutture tettoniche profonde hanno influito in modo preponderante, rispetto ad altri parametri, sull'andamento del reticolato idrografico a grande scala della pianura, l'insieme dei parametri climatici ha certamente avuto un ruolo importante nel gioco delle esondazioni, nella formazione delle paludi e soprattutto nella distribuzione temporale degli eventi. Ciò ha naturalmente influito sulla distribuzione locale delle litologie di superficie, soprattutto negli

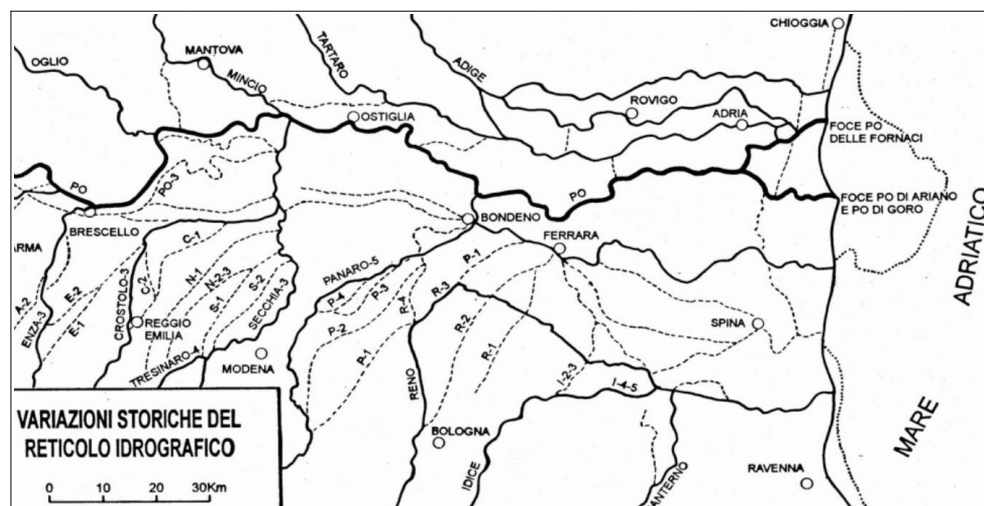
ultimi millenni. In particolare, per gli ultimi 4000 anni gli studi di molti Autori (S. Cremonini, 1980; Cremaschi & Alii, 1980; Veggiani 1985, Ortolani e Pagliuca, 1996) hanno consentito di individuare cicli climatici di piovosità, che si articolano in quattro eventi certi ed uno dubbio:

- 1400-1300 a.C.
- 700-300 a.C.
- 400-700 d.C.
- 1150-1350 d.C. (?)
- 1550-1850 d.C.

Questi cicli, associati ai fattori tettonici di cui si è trattato in precedenza, sono stati responsabili di esondazioni e di considerevoli modifiche dell'assetto idromorfologico della pianura fino a tempi a noi vicini.

L'intervento antropico di bonifica che dall'età preromana è andato sempre intensificandosi ha in gran parte modificato e poi interrotto l'evoluzione degli eventi naturali: il reticolato idrografico, via via sempre meno dinamico, risulta ai nostri giorni in pratica cristallizzato.

*Figura 3.9 - Ricostruzione del reticolo storico del basso Po e dei suoi affluenti di destra realizzata da vari autori (cfr. QC PSC Terre di Pianura, Relazione Geologica, geol G. Viel, 2007)*



Dai tempi preromani al XIV secolo, si osserva come principale "trend" evolutivo uno spostamento verso occidente degli assi drenanti provenienti dalle valli del Reno, diretti verso nord per la confluenza nel Po (figura 3.9). Il corso d'acqua Idice pare avere un comportamento opposto: il suo alveo "migra" verso oriente per la confluenza dapprima nel Po e dal XIV secolo nel Reno. Così tra Reno ed Idice va aprendosi un grande spazio che sarà occupato dalle divagazioni dei fiumi minori della collina del pedecollina bolognese. Questa anomalia potrebbe avere una spiegazione strutturale. In tempi romani, il fiume Reno subisce una netta divagazione verso Ovest lungo un alveo Trebbo - S. Giorgio di Piano - S. Pietro in Casale - Ferrara (indicato in figura 3.9 come R2), abbandonando un percorso preromano lungo l'asse Castelmaggiore - Bentivoglio (R1), mentre l'Idice pare mantenersi in asse sul proprio alveo (I1 e I2).

Questi spostamenti, che pare culminino nell'alto medioevo, è possibile siano stati provocati da una fase di particolare intensità della subsidenza tettonica del modenese, il cui centro è da ubicarsi probabilmente a nord della Via Emilia. Questo processo, sviluppato dal preromano fino al XVII secolo, avrebbe prodotto rotte e nuove divagazioni verso il centro di abbassamento relativo. Osservando la figura 3.9 si nota che allo spostamento dell'asse del Panaro, lungo il



tracciato P3, corrisponde la medesima deriva del Reno che occupa un paleoalveo del Panaro abbandonato (R3). L'asta dell'Idice, invece, continua a permanere approssimativamente nella medesima posizione, a testimonianza che lo spostamento degli assi di drenaggio di Reno e Panaro può essere dovuto a processi strutturali localizzati e non di "basculaggio" generale della pianura.

Il quadro evolutivo si completa considerando l'allineamento Brescello – Bondeno che pare abbia costituito una importante "gronda" di drenaggio dell'alta pianura fino all'Alto Medioevo, quando la probabile attività delle pieghe ferraresi ha provocato leggeri sollevamenti differenziali delle cerniere con allineamento ovest-est. Questi processi, possono essere alla base dello spostamento verso oriente del punto di divaricazione del delta del Po: in età preromana e romana forse collocato nei pressi di Brescello, mentre dal Medioevo a Bondeno e Ferrara. Come si è già detto, la formazione di un alto strutturale ad ovest di Ferrara produrrà lo spostamento verso settentrione anche di parte del corso principale del Po.

L'Alto medioevo coincide con un regime pluviale piuttosto abbondante ed è associato a fenomeni di generale innalzamento degli alvei, con difficoltà di scolo e di drenaggio: ciò comporta la formazione di grandi aree palustri con ristagni d'acqua, sottoposte a bonifica intensiva solamente nei secoli più vicini a noi.

Dopo i grandi dissesti idrogeologici del periodo alto medioevale, che provocarono rotte e imponenti cambiamenti di corso dei fiumi nei loro tratti di pianura, ricerche climatologiche ritengono che si instauri un optimum climatico dal 800 d.C al 1200 d.C per tornare poi ad un nuovo deterioramento.

L'ampia area compresa tra il Reno e l'Idice costituisce l'ambito in cui si attua l'inversione delle direzione tendenziale delle divagazioni d'alveo, ed è solcata da numerosi alvei minori. La storia evolutiva di questi piccoli alvei non pare però risentire dei medesimi condizionamenti strutturali. Nel bolognese, i corsi d'acqua che trovano origine nell'elemento idrografico pedecollinare, hanno decorso condizionato più dai corpi alluvionali depositati dai fiumi maggiori (Reno e Idice-Savena).

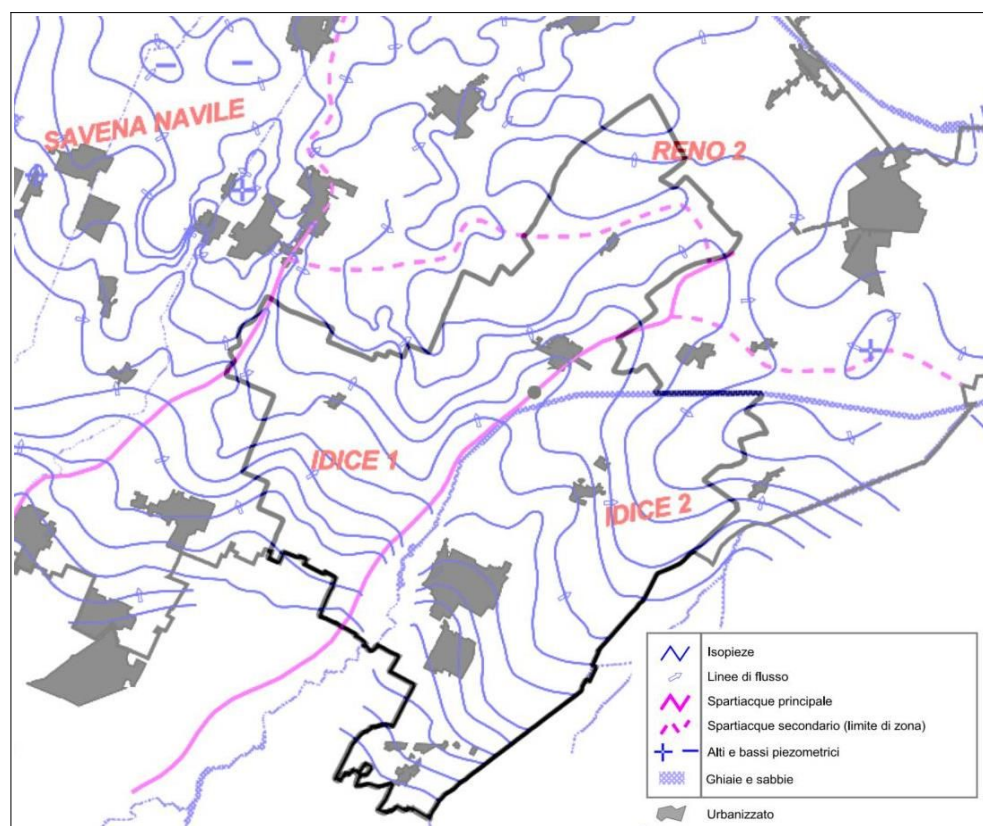
Una limitata porzione di territorio occidentale del Comune di Budrio è interessato da depositi di paleocanale/paleoargine attribuiti al torrente Savena e riconducibili al XVI secolo (cfr. figura 3.8). È necessario rammentare come tra Bologna e il Comune di San Lazzaro di Savena, l'alveo del Savena non è naturale ma è stato creato nel XVIII secolo, facendolo confluire nell'Idice per proteggere il Capoluogo di Provincia dalle periodiche inondazioni. In precedenza, il corso d'acqua naturale del Savena giungeva fino alle mura cittadine bolognesi poi si dirigeva verso nord passando in corrispondenza dell'area fieristica. L'antico alveo è tuttora esistente, canalizzato nel XVI secolo con il nome di "Savena abbandonato" e percorre verso nord la pianura bolognese parallelamente al Navile e al Reno.

### 3.3 Idrogeologia

La conoscenza dei dati idrogeologici, come ad esempio il campo di moto della falda, la tipologia (se libera oppure se confinata) fornisce utili indicazioni anche per le analisi di pericolosità sismica. Per la pianura, a titolo d'esempio, i dati di idrogeologia devono essere considerati per le valutazioni relative alla suscettibilità dei sedimenti alla liquefazione e possono essere considerati anche per la modellazione numerica della risposta sismica locale.

Per il territorio comunale di Budrio, un utile documento conoscitivo è rappresentato dalla Carta Idrogeologica alla scala 1:25:000 (tavole AC.1.2.a/b/c) elaborata per il Quadro Conoscitivo del PSC in forma associata dei Comuni delle unioni Reno Galliera e Terre di Pianura (geol. G. Viel, 2003, 2007).

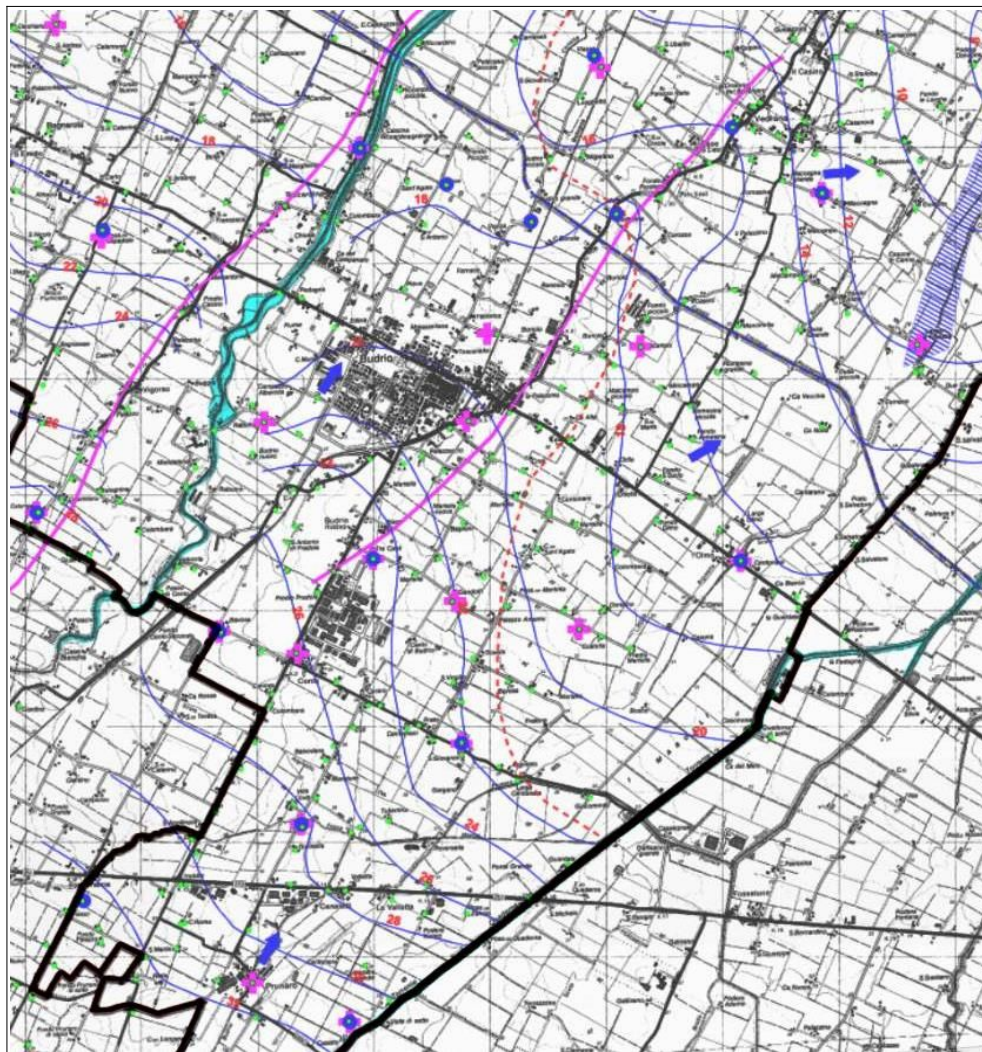
Figura 3.10 – Schema idrogeologico di sintesi (cfr. QC PSC Terre di Pianura, Relazione Geologica, geol. G. Viel, 2007). È evidenziato il limite comunale di Budrio



Lo studio idrogeologico del PSC si è basato sul monitoraggio delle quote d'acqua in pozzi freatici del territorio citato (oltre 850 pozzi complessivi) effettuato nel settembre 2003. I dati raccolti hanno consentito la ricostruzione del tetto dell'insieme della falda meno profonda del territorio studiato, individuando soggiacenze, direzioni di deflusso, spartiacque sepolti ecc.

Le figure 3.10 e 3.11 propongono, rispettivamente, uno schema di sintesi del modello idrogeologico del territorio studiato (geol. G. Viel, 2003) e uno stralcio della citata cartografia idrogeologica relativa al Capoluogo. In sintesi, si evince un generale deflusso sotterraneo verso NE, con un evidente alto piezometrico che funge anche da spartiacque della falda meno profonda (figura 3.10), in corrispondenza delle strutture granulari sepolte (paleoalvei/paleoargini dell'Idice) che si sviluppano anch'essi verso NE e in particolare da Cento

e Budrio verso Mezzolara. Le soggiacenze della prima falda sono generalmente comprese tra 1 m e 3,5 metri, con variabilità locali governate dal reticolo idrografico (compresi scoli e canali di bonifica) che la alimenta per infiltrazione da subalveo e laterale e, come già scritto, anche dall'assetto morfologico locale (alti morfologici in presenza dei principali paleovalvei). Nella zona Capoluogo, a titolo d'esempio, le soggiacenze medie sono stimabili in circa 2,5÷3,0 metri (figura 3.11).



*Figura 3.11 - Stralcio della Carta Idrogeologica (tav. AC.1.2a) scala 1:25.000 elaborata a corredo del QC del PSC in forma associata (Unione Comuni delle "Terre di Pianura")*

## 4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

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

- ✓ dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che ha fornito le prove della propria banca dati geognostica;
- ✓ dal Comune di Budrio che ha fornito l'“Archivio Prove Geognostiche e Geofisiche” già predisposto per il quadro conoscitivo del PSC vigente;
- ✓ da ulteriori indagini raccolte presso l'Ufficio Tecnico comunale (relazioni geologiche redatte per progetti di costruzione e/o Piani Attuativi).

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

- ✓ n. 56 sondaggi a carotaggio continuo (S);
- ✓ n. 69 pozzi per acqua (PA);
- ✓ n. 2 pozzi per idrocarburi (PI);
- ✓ n. 213 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- ✓ n. 10 prove penetrometriche con punta elettrica (CPTE);
- ✓ n. 111 prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU);
- ✓ n. 4 penetrometrie con “Cono Sismico” (SCPT);
- ✓ n. 10 stendimenti sismici attivi MASW;
- ✓ n. 46 registrazioni microtremori a stazione singola (HVSR).

Tra le prove di repertorio, è risultato molto utile disporre, come vedremo, anche dei dati numerici delle penetrometrie CPTE/CPTU eseguite sia dalla RER (nell'ambito del Progetto Carta Geologica d'Italia), sia messe a disposizione dal Comune di Budrio.

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

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

## 4.1 Le nuove indagini eseguite

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

- fornire la caratterizzazione sismostratigrafica più raffinata del sottosuolo negli insediamenti urbani, più "vulnerabili" (es. centro storico del Capoluogo e frazioni) e già inclusi in zone suscettibili di effetti locali (es. potenzialmente liquefacibili) dagli studi di pericolosità sismica pregressi;
- proporre una "base dati" (geognostica e geofisica) di riferimento per gli ulteriori approfondimenti sismici nelle zone caratterizzate da potenziale instabilità. I precedenti studi di pericolosità sismica territoriale avevano già evidenziato potenziali criticità (es. liquefacibilità e potenziali cedimenti post sisma), pertanto con la necessità espletare di ulteriori approfondimenti locali di "livello 3.

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

- ✓ *n. 13 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU)* → realizzate con strumento penetrometrico di contrasto massimo pari a 200 kN e montato su semovente cingolato "Pagani", quest'ultimo dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.1). Le prove sono state spinte fino a -20 metri di profondità e hanno permesso di definire le caratteristiche tessiturali e geotecniche nell'intervallo più utile anche ai fini delle verifiche della possibilità di liquefazione e cedimenti post-sisma. Si rammenta come le prove penetrometriche elettriche consentano una migliore definizione tessiturale dei sedimenti attraversati rispetto alle altre tipologie di prove penetrometriche (CPT; DPSH; ecc.), potendo registrare dati delle resistenze dei sedimenti pressoché continui (una lettura ogni cm di avanzamento).



Foto 4.1 - Prove CPTU eseguite nel Capoluogo – centro storico – (a sx) e presso la frazione Mezzolara (a dx)

- ✓ *n. 3 stendimenti sismici in array bidimensionale ESAC* (foto 4.2) → Per questo studio, sono stati elaborati tre modelli sismostratigrafici profondi mediante tecniche di investigazione sismiche basate sulla raccolta ed analisi del rumore sismico ambientale, utilizzando il metodo ESAC (Autocorrelazione Spaziale Migliorato). L'utilizzo delle tecniche passive sull'analisi spettrale delle onde Rayleigh (R) è giustificata dal fatto che il rumore sismico ambientale è ricco di onde superficiali tipo R e che in un mezzo omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione  $V_s$  può essere ricavata indirettamente dall'analisi spettrale delle onde R secondo equazioni sperimentali. Tale tecnica permette di ottenere i profili verticali (1D) della velocità media delle onde di taglio "S" anche molto profonde, favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock sismico. Nel caso specifico di Budrio le tre prove hanno consentito l'elaborazione di modelli sismostratigrafici profondi da 125 metri a 150 metri circa. Un secondo vantaggio della tecnica ESAC riguarda lo svincolo dal problema della direzionalità della/e sorgente/i di rumore sismico ambientale in quanto è già implicito nella stessa geometria utilizzata di tipo 2D, impiegando geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz). Nel caso specifico di Budrio le geometrie degli stendimenti sono "a elle" con spaziatura tra i geofoni di 5 metri (lunghezza complessiva degli stendimenti 115 metri).

Le prove ESAC sono state eseguite nel Capoluogo e presso le frazioni Mezzolara e Vedrana.



Foto 4.2 - Prova ESAC\_SPAC eseguita nel Capoluogo (Parco Giovanni XXIII)

- ✓ *n. 4 stendimenti in array lineare MASW/RE.MI* → eseguiti rispettivamente nel Capoluogo e nelle frazioni Bagnarola, Cento (zona industriale) e Prunaro. Le prove MASW/ReMi hanno consentito la stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ) nel sottosuolo fino a circa  $-35 \div -40$  metri di profondità. La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW/ReMi ha previsto acquisizioni dei segnali sismici con sismografo multicanale ABEM RAS24 a 24 canali, passivi e attivi (generati da sorgenti energizzanti artificiali lungo lo stendimento dei geofoni).

- ✓ n. 28 registrazioni del *microtremore sismico a stazione singola con tecnica HVSR* → Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale “Tromino” (figura 4.3) e sono finalizzate all’elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo (Albarello e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l’amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).



Foto 4.4 - Registrazione HVSR effettuata nella frazione Vedrana

Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all’attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ( $10-15 \text{ m/s}^2$ ), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive. L’acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti e/o 60 minuti (6 misure).

Le figure 4.1 e 4.2 rappresentano la distribuzione nel territorio studiato delle prove geognostiche e geofisiche disponibili.

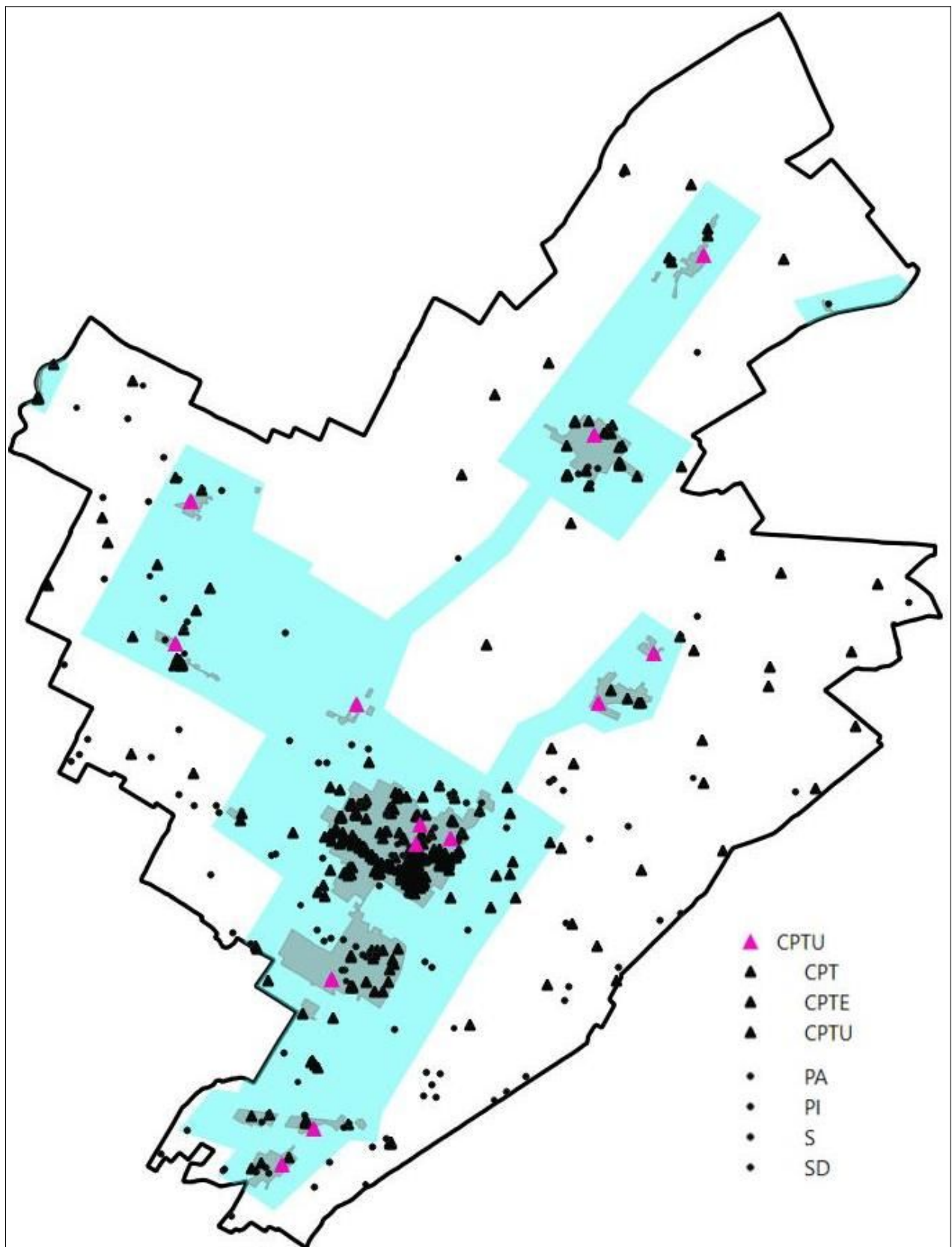


Figura 4.1- Localizzazione delle indagini geognostiche disponibili per lo studio di microzonazione sismica. Con simbologia in colore nero: prove di repertorio. Con simbologia in colore fucsia: prove eseguite per questo studio



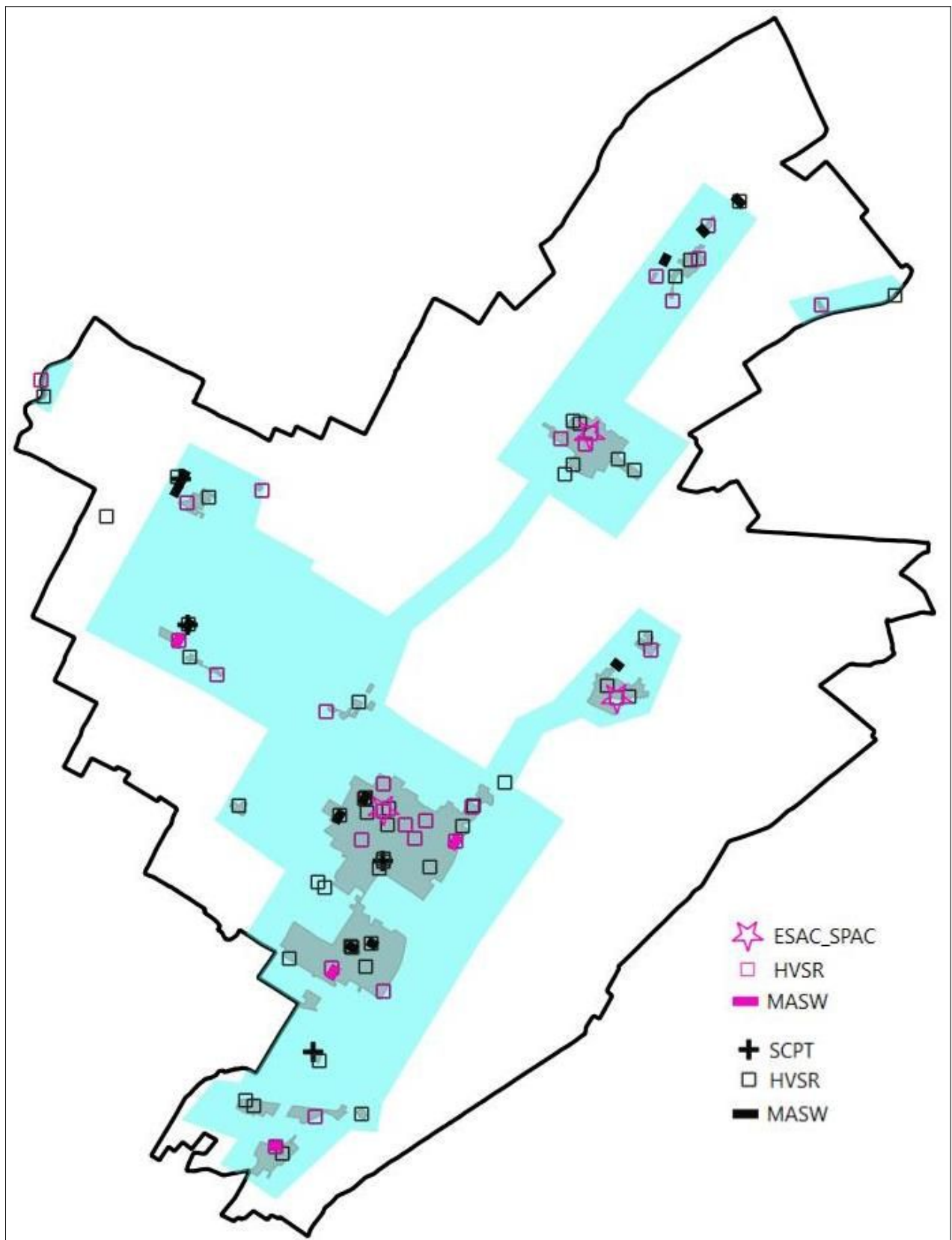


Figura 4.2 - Localizzazione delle indagini geofisiche disponibili per lo studio di microzonazione sismica. Con simbologia in colore nero: prove di repertorio. Con simbologia in colore fucsia: prove eseguite per questo studio

## 5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

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

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

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

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

### 5.1 Litologie sub-affioranti

Per la caratterizzazione geologico tecnica dei sedimenti superficiali, lo studio si è basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo. Si sono inoltre considerati anche gli esiti tessiturali delle prove penetrometriche disponibili. In particolare, le prove CPTU/CPTU di repertorio (delle quale si dispongono dei dati numerici) e le prove CPTU eseguite per questo lavoro permettono di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

Tutte queste informazioni, hanno permesso la classificazione dei punti di controllo basata sulle classi tessiturali definite secondo gli "standard di microzonazione sismica" (v.4.1) e sulla prevalenza tessitoriale riscontrata nella "colonna" di sedimenti profonda fino a circa -5÷6 metri dal piano campagna (cfr. tavola 2). La profondità considerata, è da ritenersi confrontabile con il "volume significativo" caratteristico della maggior parte degli edifici di normale impegno costruttivo (e dotati di fondazioni "dirette") presenti nel territorio di studio. Nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è fatta particolare attenzione agli spessori di sedimenti insaturi più superficiali, in quanto le condizioni di essiccamento portano molto spesso a correlazioni tessiturali e meccaniche falsate.

I dati disponibili nelle aree urbanizzate/urbanizzabili del Comune di Budrio evidenziano come i sedimenti superficiali siano riconducibili a differenti classi geotecniche USCS/AGI in relazione al diverso contesto deposizionale recente degli areali di studio (figura 5.1).

In questo senso, il sottosuolo più superficiale del Capoluogo e delle principali frazioni è classificato da “SM” a “ML” per la presenza sabbie di canale/argine del torrente Idice (es. Budrio; Prunaro; Mezzolara; Vedrana; ecc.) e, in minor misura del Savena Abbandonato (es. Armarolo). Ampi settori di territorio comunale sono invece classificabili “CL” per la presenza di argille e argille limose più o meno consistenti di piana inondabile.

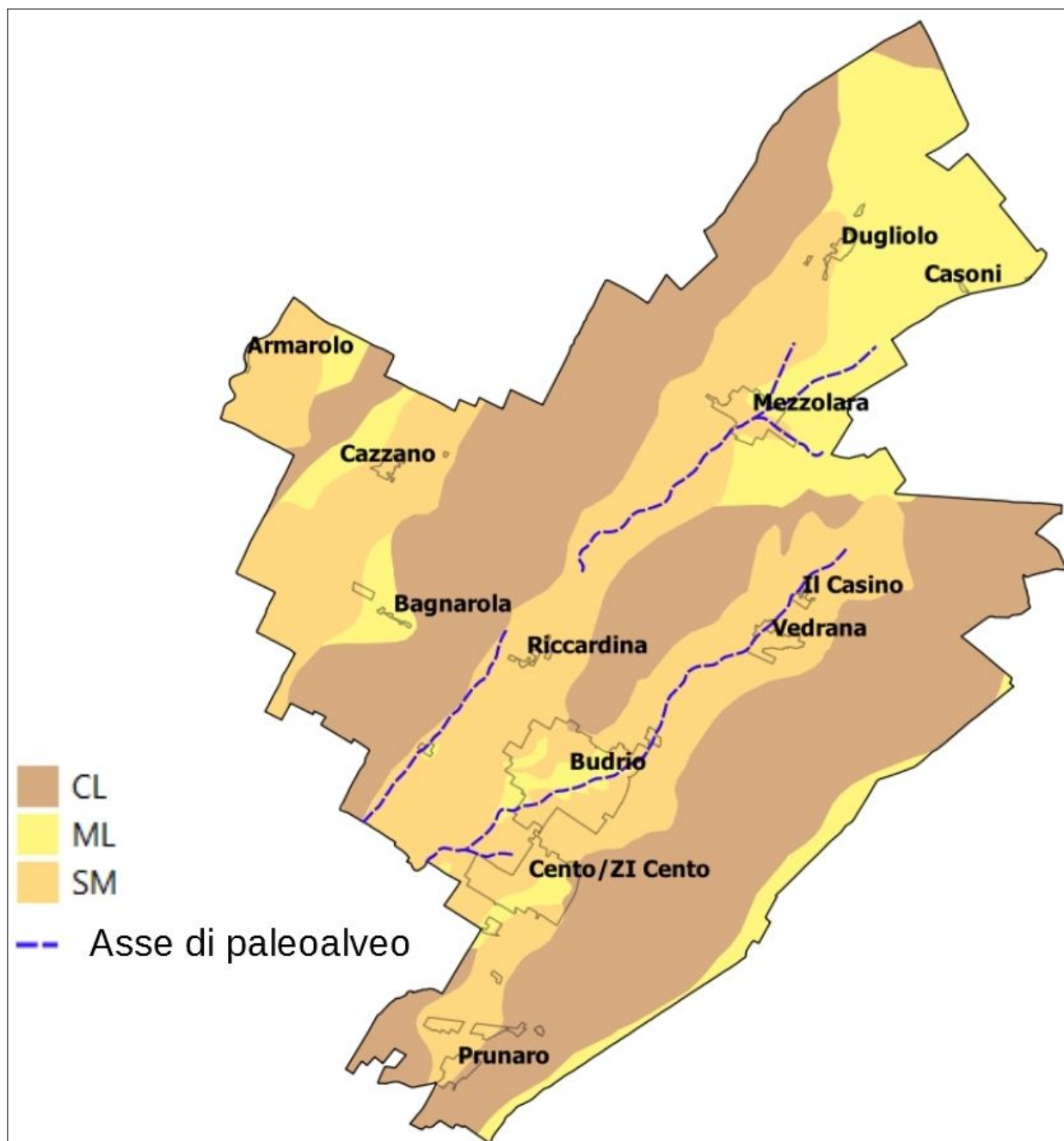


Figura 5.1 – Schema litotecnico del sottosuolo meno profondo del territorio comunale di Budrio. La figura riporta i principali assi di paleoalveo più recenti individuati nella cartografia geologica RER

## 5.2 Sottosuolo profondo

Una ricostruzione del modello geologico profondo del territorio studiato è possibile attraverso l'analisi e delle sezioni geologiche già disponibili e riportate nelle cartografie di microzonazione sismica (figure 5.2 e 5.3). Si tratta di sette sezioni geologiche profonde elaborate dal Servizio Geologico della Regione Emilia Romagna nell'ambito degli studi del progetto CARG<sup>4</sup>.

Figura 5.2 – Sezioni geologiche di riferimento per lo studio di MS di Budrio. In azzurro, il territorio comunale compreso nella microzonazione

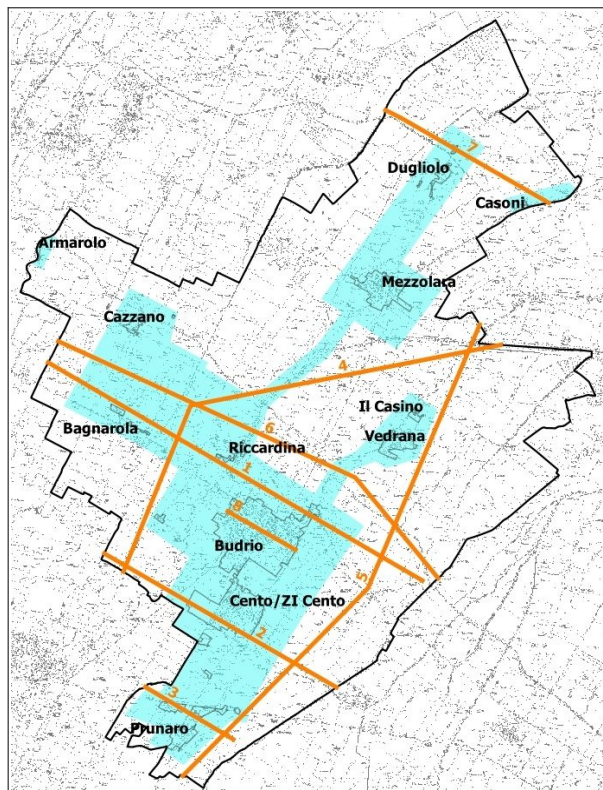
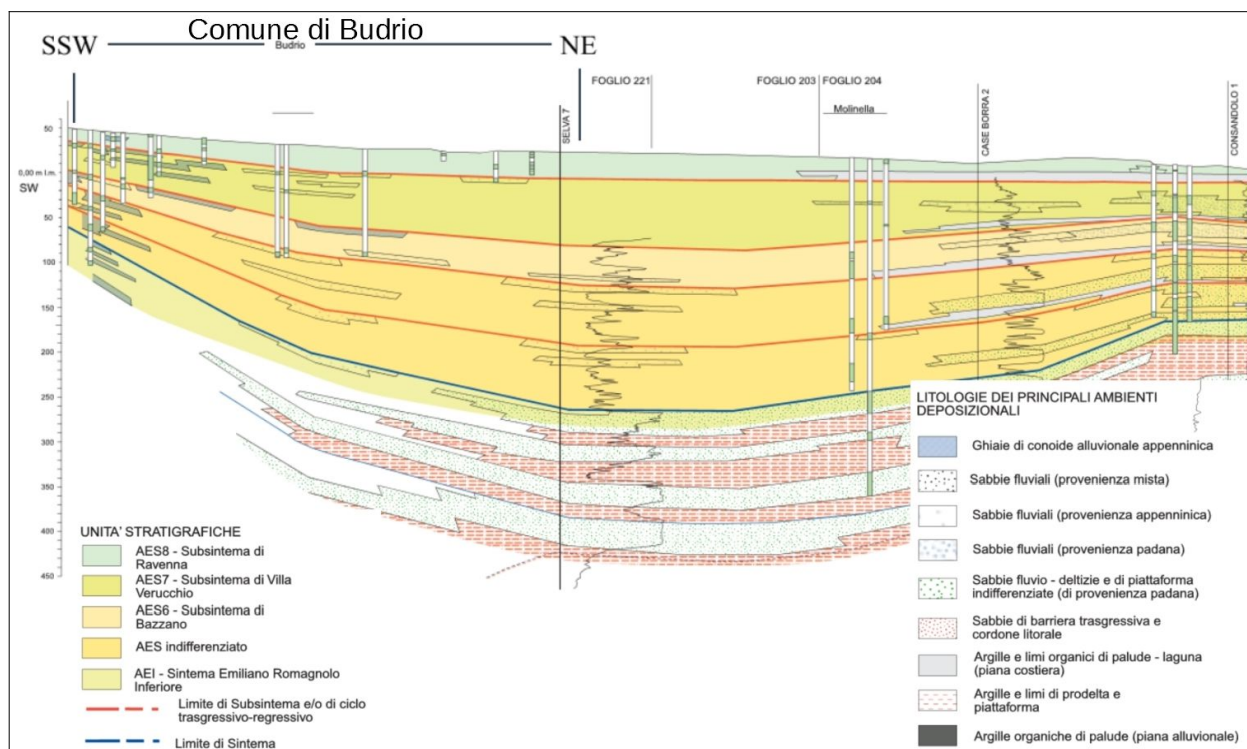


Figura 5.3 – Stralcio della sezione RER (pubblicata nello studio di MS con numero progressivo 5)



<sup>4</sup> <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/sezioni-geologiche-prove-geognostiche-pianura>

La nuova sezione realizzata per il Capoluogo include i dati litotecnici di una delle prove CPTU realizzate per questo studio (P37637) e altre penetrometrie CPT, CPTe e CPTU disponibili: evidenza come il sottosuolo, nei primi 10 metri circa, benchè risulti una sequenza di depositi prevalentemente fini, sia tuttavia caratterizzato da involuppi di canali/argini sabbioso limosi attribuibili al torrente Idice, di modesta estensione laterale ma di spessore anche significativo (>1 metro). La sezione riporta anche l'andamento delle quote piezometriche desunte dalle terebrazioni riportate.

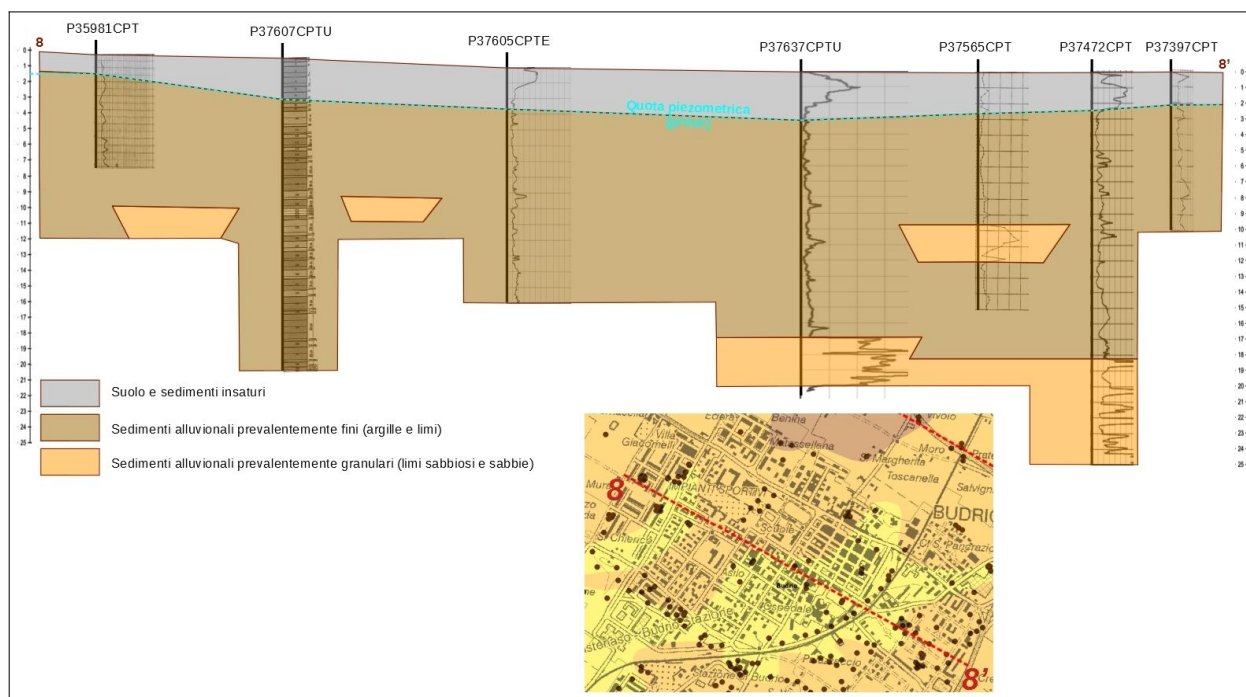


Figura 5.4- Sezione geologica 8-8' elaborata per questo studio nell'abitato di Budrio

A maggiori profondità (oltre 12÷13 metri), nel territorio comunale più meridionale (vedi frazioni Prunaro e Cento; Z.I. Cento), le terebrazioni disponibili indicano una diffusa presenza di ghiaie più o meno sabbiose di spessore pluri metrico: si tratta di depositi attribuibili all'apparato di conoide distale del torrente Idice. Verso nord, le ghiaie passano gradualmente a sequenze ancora pluri metriche di sabbie grossolane e medie, attraversate a maggiori profondità (a oltre 17÷18 metri dal p.c.), come dimostrano i sondaggi e le penetrometrie eseguite presso il Capoluogo (vedi anche sezione 8).

La successiva figura 5.5 riporta una parziale rappresentazione dei depositi sepolti di conoide ghiaiosa (prevalentemente attribuiti al tetto dell'unità "AES7") nel territorio bolognese. Occorre segnalare che tale ricostruzione, basata su dati forniti dal SGSS regionale, è stata prodotta e pubblicata a corredo dello studio di pericolosità sismica preliminare di area vasta per il PTM di Bologna<sup>5</sup>, ed ha inoltre permesso la ricostruzione delle isobate dei corpi ghiaiosi meno profondi fino a interessare, come già scritto, anche il settore sud del territorio comunale di Budrio.

<sup>5</sup> Vedi <<proposta di Piano Territoriale Metropolitano di Bologna>> – Quadro conoscitivo diagnostico – Allegato 3 "Rischio Sismico" (luglio 2020)

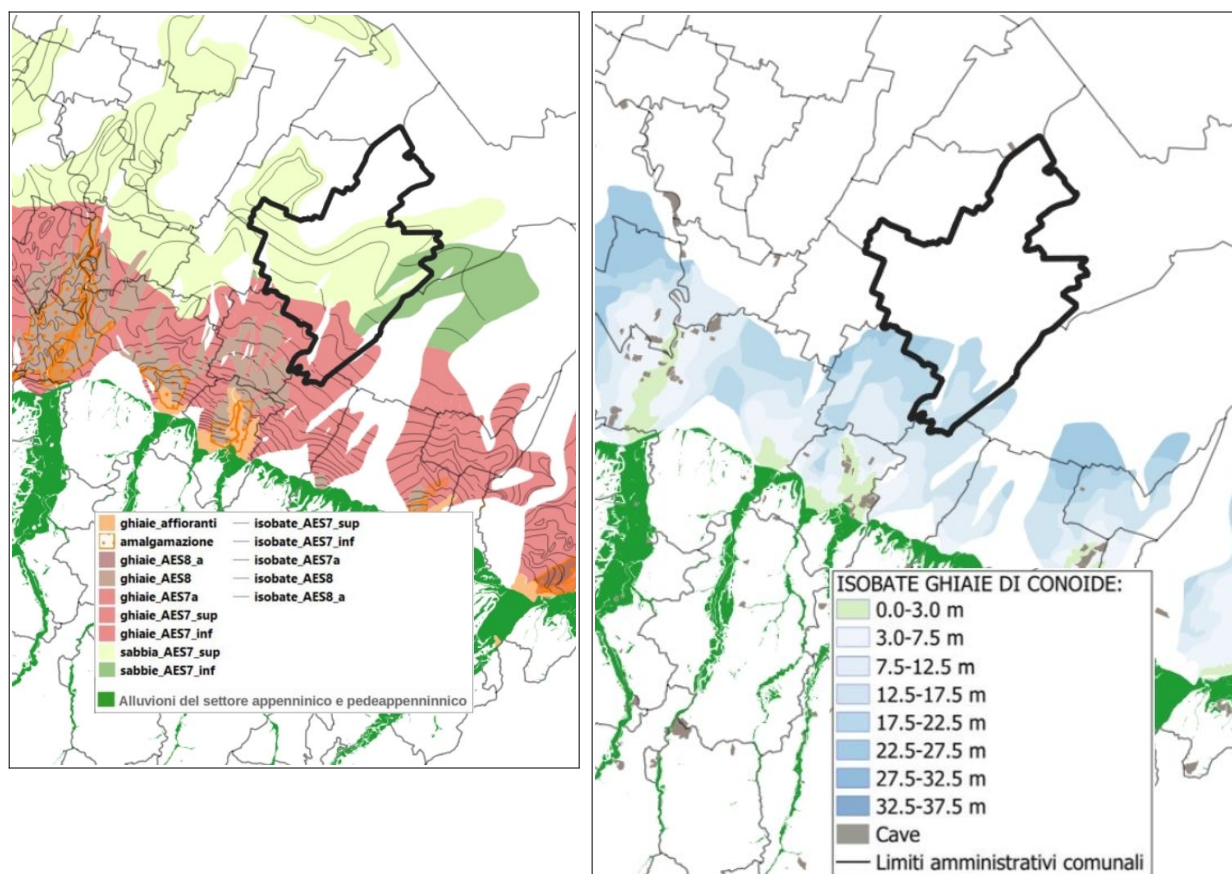


Figura 5.5 – Rielaborazione dei dati di sottosuolo forniti dal GSSS regionale per ricostruire la profondità del tetto dei depositi grossolani di conoide rispetto alle quote di campagna (cfr. <<proposta di Piano Territoriale Metropolitan di Bologna>> - Quadro conoscitivo diagnostico - Allegato 3 "Rischio Sismico" - luglio 2020)

Le indagini e analisi effettuate per lo studio di MS comunale hanno infine consentito un'ulteriore approfondimento riguardo alla modellazione sismostratigrafica del sottosuolo. Le registrazioni sismiche HVSR, ad esempio, sfruttando la teoria ormai consolidata dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quello verticale, permettono la stima delle più significative frequenze di amplificazione del sottosuolo.

Gli spettri H/V ottenuti dalle registrazioni tromografiche evidenziano, per quasi tutto il territorio comunale di Budrio, i principali alti spettrali a frequenze comprese tra 0,7 Hz e 1,0 Hz. Tali frequenze possono essere considerate come "frequenze fondamentali" locali, tuttavia le amplificazioni spettrali risultano da "basse" fino a "moderate" ( $2 < H/V < 3$ ).

Alcune registrazioni tromografiche HVSR eseguite nel territorio comunale più meridionale (nelle frazioni Prunaro e Cento, fino a sud del Capoluogo) hanno riscontrato spettri H/V con bassi o moderati picchi di amplificazione anche a frequenze medio-alte (figure 5.6 e 5.7), imputabili alla presenza di deboli riflettori sismici corrispondenti al tetto delle già descritte ghiaie sabbiose di conoide distale dell'Idice. Come già detto, si tratta di basse o moderate amplificazioni del segnale spettrale riscontrate a frequenze medio-alte e in un numero limitato di registrazioni HVSR.

Figura 5.6 – Dettaglio della ricostruzione del tetto delle ghiaie sabbiose del torrente Idice nel territorio comunale di Budrio (rielaborazione basata sulle analisi della MS).

La figura riporta la localizzazione delle prove HVSR, con evidenziate in giallo le registrazioni caratterizzate da picchi spettrali H/V a frequenze >2 Hz

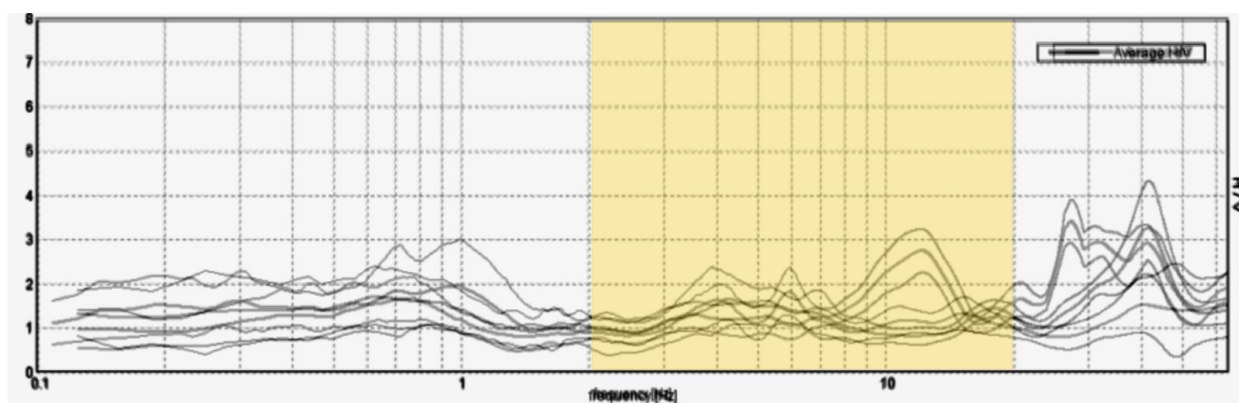
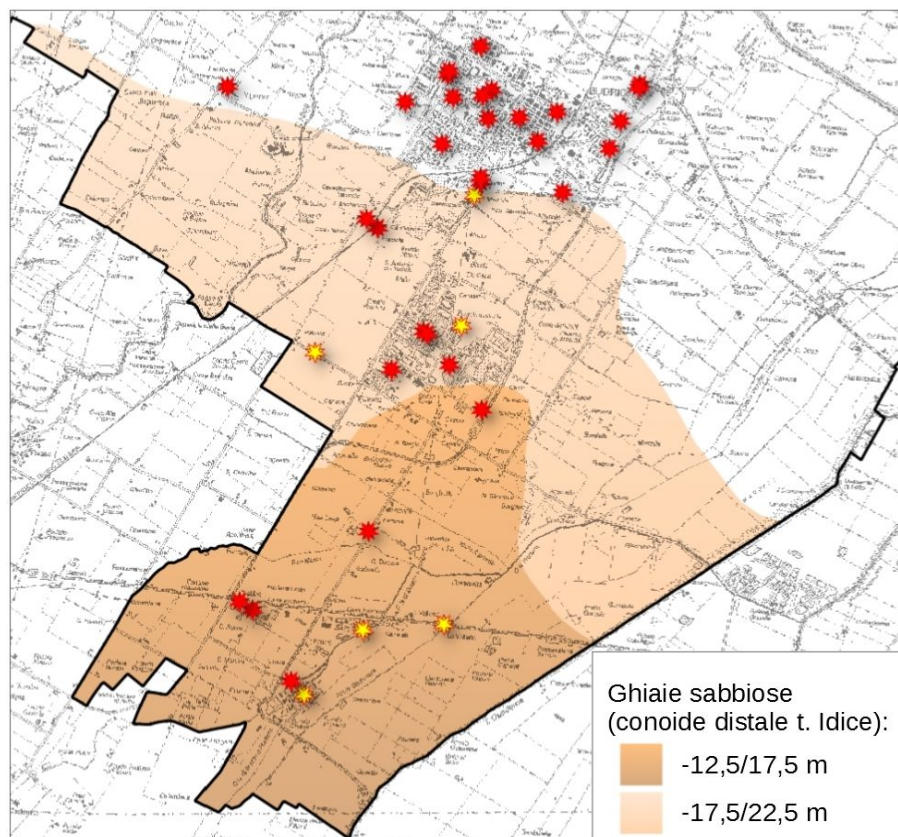


Figura 5.7 – Confronto tra spettri H/V ricavati da registrazioni tomografiche effettuate nel territorio comunale meridionale. Sono evidenziate le amplificazioni (generalmente basse o moderate) riscontrate alle frequenze >2 Hz

Le registrazioni effettuate nel territorio comunale di Budrio riscontrano, pertanto, frequenze fondamentali <1 Hz. Il massimo picco spettrale sembra dunque correlabile a riflettori sismici situati a profondità >80÷100 metri, cioè a depositi alluvionali (ghiaie/sabbie più addensate) più “rigidi” rispetto alla colonna sedimentaria sovrastante e tuttavia non attribuibili ad un vero e proprio “bedrock sismico”. Già nei precedenti studi di MS comunali (Sangiorgi, 2011–2016), questo primo significativo riflettore sismico era ricondotto al limite stratigrafico inferiore del subsistema AES6 (“Subsistema di Bazzano”), costituito da alternanze di sabbie anche ghiaiose e sedimenti più fini (limi e argille), come si evince dal controllo delle sezioni geologiche RER. In alcune registrazioni, sono anche percettibili amplificazioni a frequenze più basse (circa 0,6 Hz),

imputabili a riflettori ancora più profondi e certamente caratterizzati da maggiori rigidità; tuttavia, non è chiaramente possibile discriminare con certezza ulteriori picchi, sia per la debole intensità del segnale acquisito, sia i limiti strumentali dell'apparecchio di misura tomografica.

Un importante contributo per la modellazione geologico-sismica profonda è fornito dagli studi del SGSS, sintetizzati nella Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (scala 1:250.000). Uno stralcio di tale cartografia, riprodotto in figura 5.8, evidenzia la profondità della base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore AES (cfr. capitolo 3) nel territorio studiato.

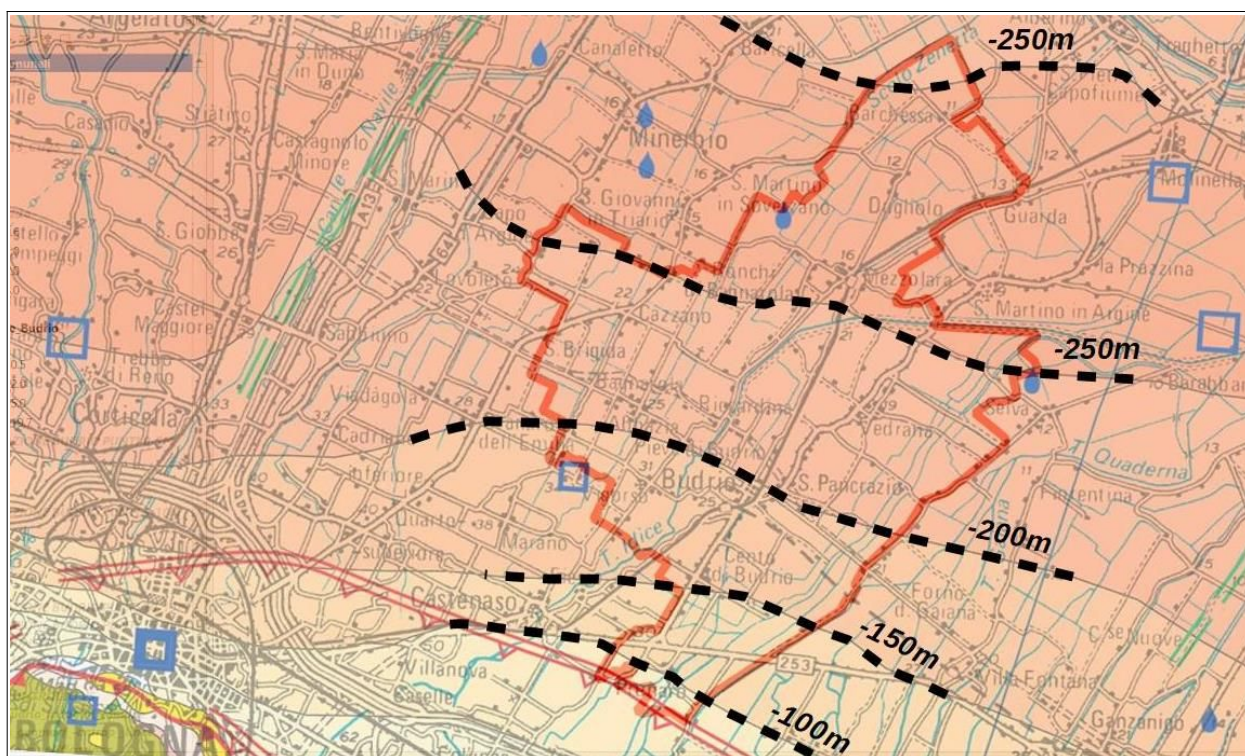


Figura 5.8 - Stralcio della "Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe" (RER, 2016). Sono sovrapposti i confini comunali di Budrio e rimarcate le isobate della base del Sintema SERS/AES (metri slm)

Come già descritto nel capitolo 3, il territorio comunale di Budrio è situato su una blanda sinclinale compressiva retrostante la struttura plicativa ferrarese interna. Nell'area studiata, la base del Sintema AES viene stimata a profondità variabili da circa -130 metri (nel settore meridionale) a circa -260 metri (nel settore settentrionale) rispetto al piano campagna.

Dal punto di vista sismostratigrafico, le ulteriori prove geofisiche disponibili ("Coni Sismici"; MASW; ESAC-SPAC) consentono sufficienti ricostruzioni sismostratigrafiche del sottosuolo utili ai fini delle analisi sismiche di "livello 2". In particolare, i quattro "Coni Sismici" eseguiti a nord di Prunaro, nel Capoluogo, a Bagnarola e nei pressi di Cazzano hanno evidenziato Vs30 variabili da 254 m/s a 188 m/s (figura 5.9). I quattordici stendimenti sismici MASW (di repertorio e di nuova esecuzione) hanno inoltre ricavato Vs30 variabili tra 232 m/s (Prunaro) a 194 m/s. La prova MASW eseguita nella frazione Prunaro ha inoltre consentito una stima delle Vs relativa alle ghiaie sabbiose, localmente intercettate a profondità comprese tra -12,5 m e -17,5 metri. Si tratta di sequenze granulari comunque caratterizzate da mediocre rigidità, con Vs stimate



pari a circa 270÷300 m/s (figura 5.9).

Per questo studio, sono stati realizzati anche tre stendimenti ESAC-SPAC, ricavando modelli sismostratigrafici più profondi (fino a circa -125÷150 metri) e con Vs30 comprese tra 219 m/s e 198 m/s (figura 5.10).

Le indagini ESAC-SPAC evidenziano un moderato incremento di rigidità dei sedimenti con la profondità, ricavando esiti di Vs ancora inferiori a 400 m/s alla massima profondità investigata.

La “Carta delle Velocità delle Onde di taglio S” elaborata per questo studio localizza le prove geofisiche e i rispettivi esiti di Vs equivalente.

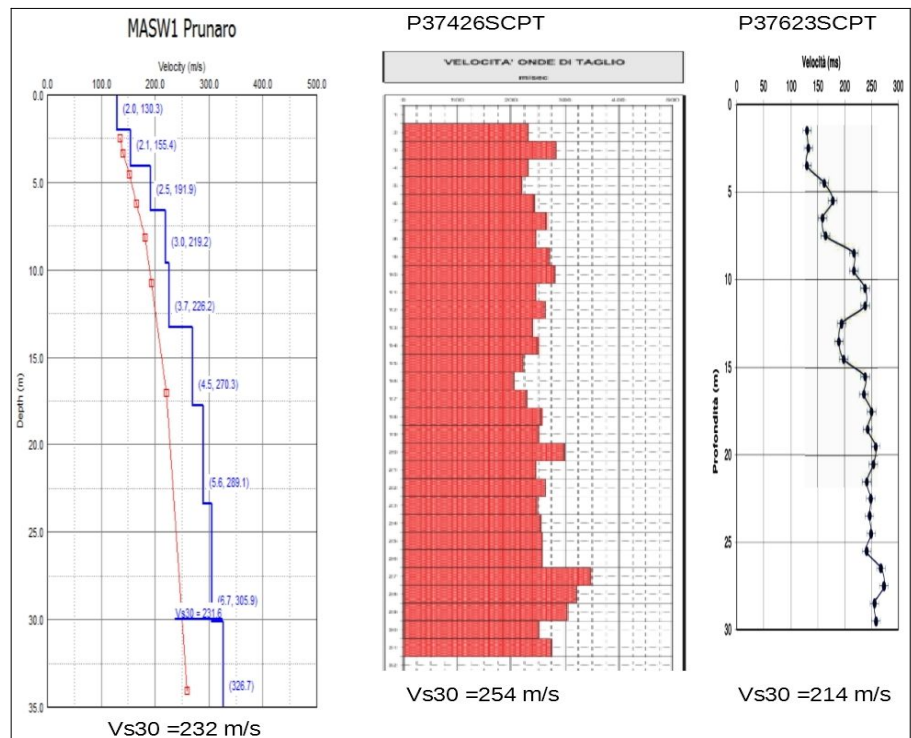


Figura 5.9 - Confronto tra sismostratigrafie MASW (Prunaro) e SCPTU (“Coni Sismici”) di repertorio, realizzati a nord di Prunaro (P37426) e nel Capoluogo (P37623)

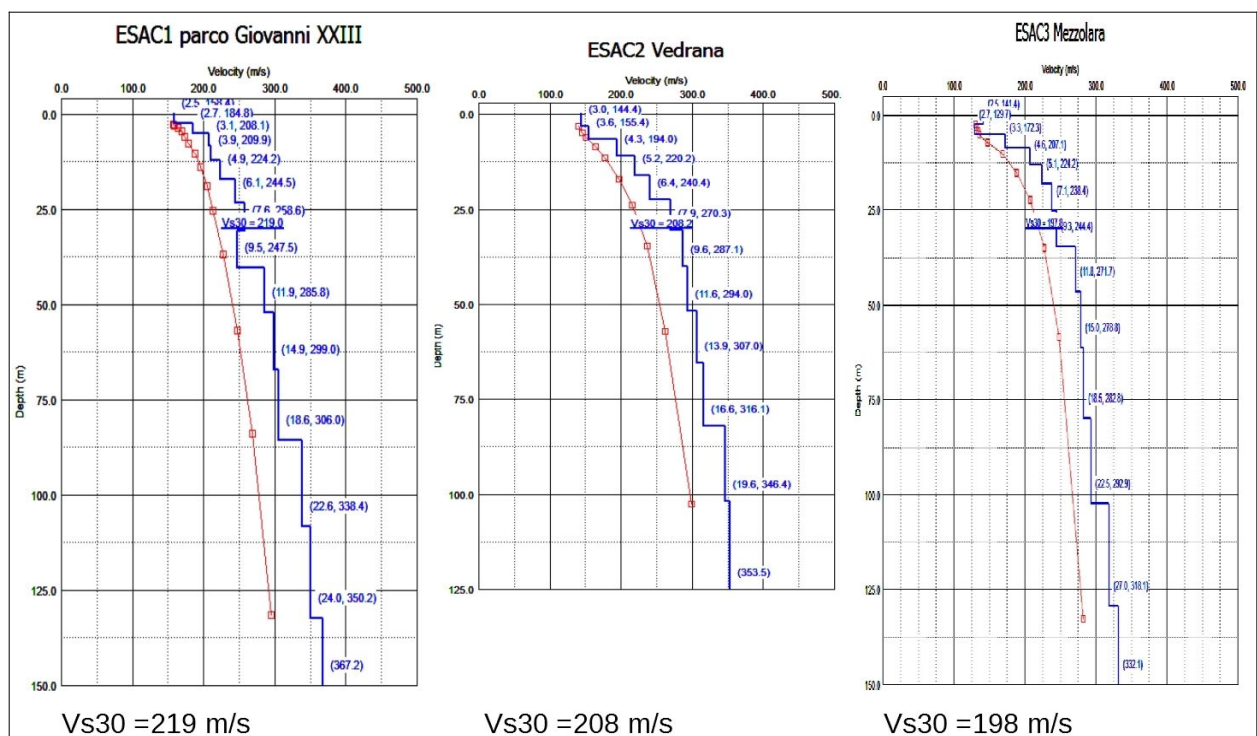


Figura 5.10 - Confronto tra le sismostratigrafie ricavate dagli stendimenti ESAC-SPAC eseguiti per questo studio

## 6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

### 6.1 Commenti introduttivi

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

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

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

### 6.2 Definizione del substrato rigido

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

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

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

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

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

tra 200 metri 80 m dal p.c. Le massime amplificazioni spettrali H/V sono dunque correlabili a spessori di sedimenti più grossolani e/o addensati compresi nelle unità alluvionali “AES6” e fino alla base del sub Sistema SERS (AES). Secondo la nomenclatura scientifica in materia, si tratterebbe, peraltro, di un “pseudobedrock” sismico, in quanto caratterizzato da  $V_s$  inferiori a 800 m/s, come emerge dalle indagini effettuate (prove ESAC-SPAC) e, più in generale, anche dagli studi geofisici di microzonazione sismica effettuati nei Comuni limitrofi.

Anche le indagini effettuate nel settore più meridionale del territorio comunale, caratterizzato dalla presenza di sequenze ghiaioso sabbiose a profondità comprese tra -12,5 m e 22,5 metri (depositi di conoide distale del torrente Idice) evidenziano basse/moderate amplificazioni a frequenze medie e alte, tuttavia con massimi spettrali a frequenze  $>1$  Hz (tranne alcuni isolati casi inficiati da errori di acquisizione), a dimostrazione dell'assenza di riflettori sismici significativi più superficiali cioè a profondità  $<30$  metri.

### 6.3 Liquefacibilità

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

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

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

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

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

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

anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni<sup>6</sup>. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Lo studio di microzonazione sismica di Budrio ha consentito un'accurata analisi qualitativa delle condizioni di propensione alla liquefazione dei sedimenti, basata innanzitutto sugli accertamenti tessiturali predisponenti, desunti dalle prove geognostiche (sondaggi e prove penetrometriche). In questo senso, si è potuto disporre di dati tessiturali diretti, ricavati da sondaggi di repertorio (fusi granulometrici; limiti di Atterberg; prove di taglio; ecc.), in numero tuttavia non esaustivo per effettuare una valutazione a una scala territoriale. Si sono pertanto considerati gli esiti delle prove penetrometriche CPT e CPTE/CPTU disponibili, prevalentemente realizzate negli ultimi 10÷12 anni. Si rammenta che le prove penetrometriche elettriche consentono una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili, rispetto alle altre tipologie di penetrometrie statiche o dinamiche in quanto restituiscono diagrammi litotecnici molto più definiti (letture delle resistenze alla penetrazione fino a 1 cm/avanzamento). In conclusione, si è potuto disporre di 138 prove CPTE/CPTU e di 402 punti di controllo complessivi che raggiungono almeno 10 metri di profondità (sondaggi; CPT).

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

Nell'analisi della potenziale liquefacibilità dei sedimenti si è inoltre considerato il contesto idrogeologico locale, desunto dal quadro conoscitivo del PSC di Budrio (cfr. paragrafo 3.3) e dal controllo delle quote d'acqua rilevate dalle prove geognostiche considerate. Occorre anche rammentare che i dati idrogeologici locali evidenziano soggiacenze che appaiono generalmente modeste (inferiori a 3,0÷3,5 metri, considerando anche le quote d'acqua ricavate dalle prove).

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

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

Tabella 6.1

<sup>6</sup> Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

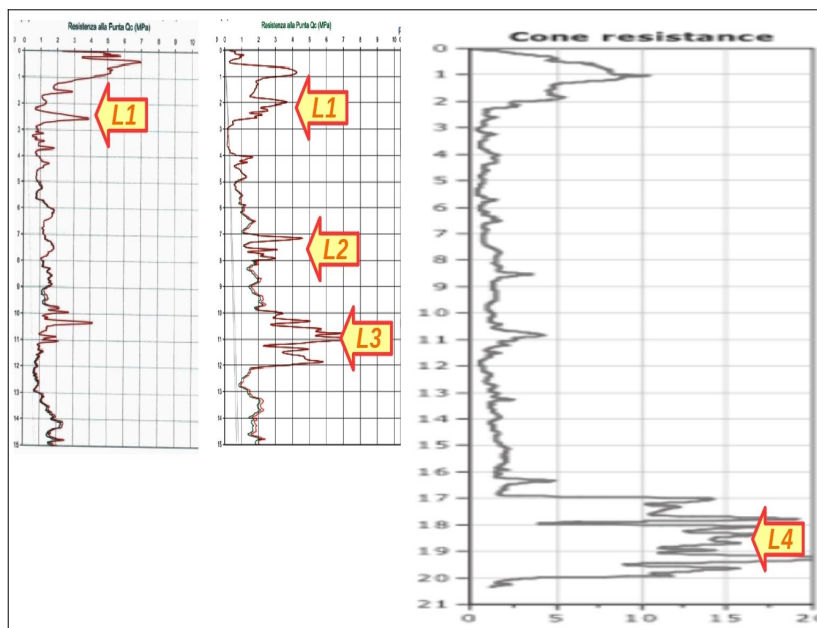


Figura 6.1 – Esempi di classificazione dei diagrammi di prove CPTE/CPTU (realizzate nel Capoluogo) per l'identificazione di condizioni predisponenti la liquefazione

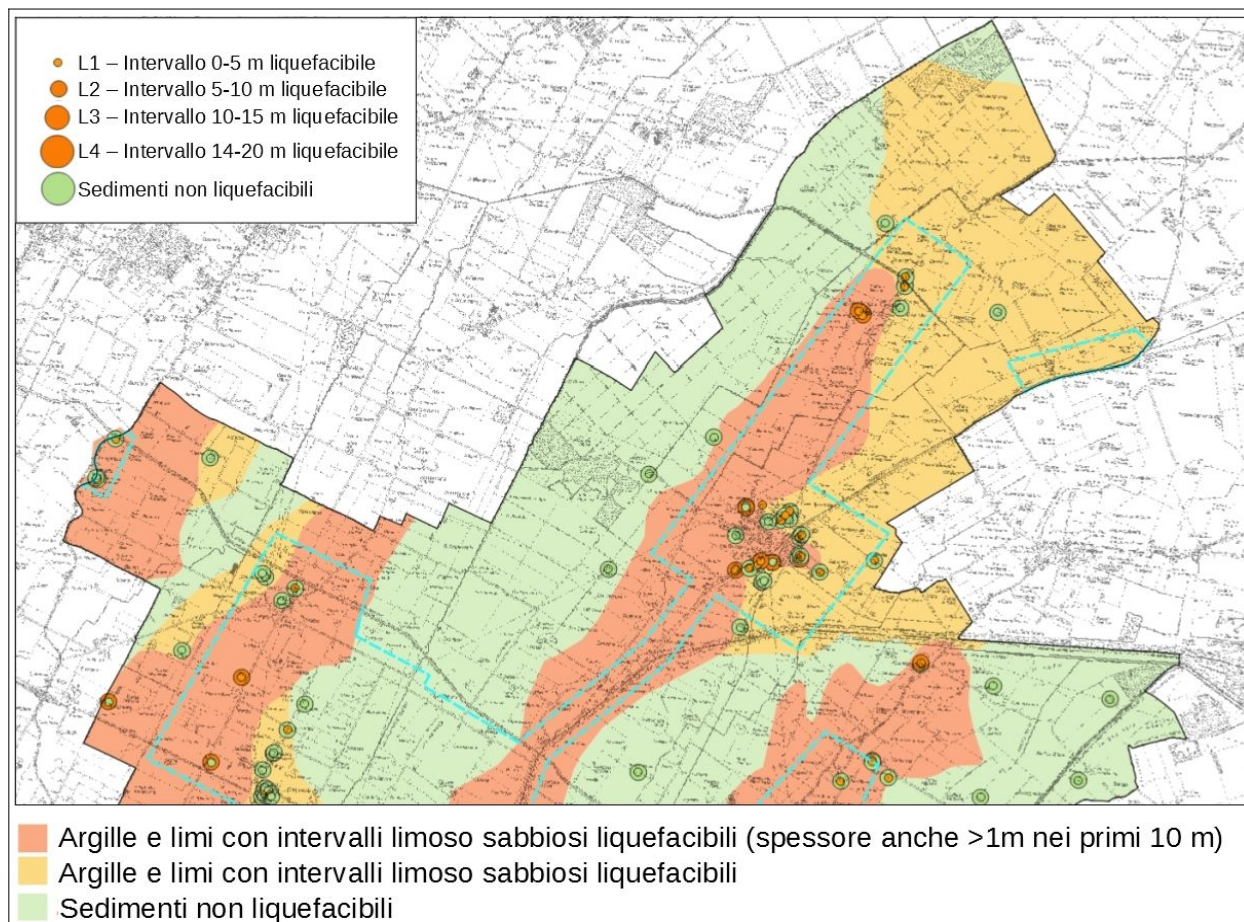


Figura 6.2 – Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefabilità in base alla presenza di strati granulari in falda (territorio comunale nord)

L'analisi delle indagini disponibili ha consentito di delimitare con maggiore accuratezza le zone caratterizzate da involuipi di paleoalvei/argini attribuibili prevalentemente al torrente Idice e, in minima parte, anche al Savena abbandonato (per quanto riguarda il settore ovest del territorio

comunale). In particolare, il controllo e la classificazione delle prove ha permesso di distinguere quelle le aree da ritenersi più critiche anche per gli edifici di costruzione ordinaria, cioè le quelle aree caratterizzate da intervalli limoso sabbiosi liquefacibili di spessore anche significativo (>1 metro) nei primi 10 metri di sottosuolo. Dalle figure 6.2 e 6.3, si evince come ampi settori del territorio comunale vengano incluse nelle aree più critiche dal punto di vista della possibilità di liquefazione. La figura 6.4 offre un maggior dettaglio per quanto riguarda il Capoluogo, con la classificazione completa (da L1 a L4) dei punti di controllo disponibili.

Occorre tuttavia evidenziare come l'attribuzione alle zone potenzialmente liquefacibili sia da ritenersi necessariamente cautelativa per la difficile ricostruzione dei corpi nastriformi sabbiosi di canale/argine, che nel territorio studiato risultano generalmente di limitata estensione laterale (vedi sezione n.8).

Il confronto tra esiti tessiturali e contesto idrogeologico locale ha quindi consentito di delimitare le “zone di attenzione per liquefazioni”, in coerenza con gli standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v. 4.1).

Occorre precisare che per le zone di potenziale propensione al fenomeno della liquefazione dovranno essere eseguiti ulteriori approfondimenti per accertare le effettive condizioni di pericolosità. Gli approfondimenti dovranno quantificare con gli opportuni metodi (cfr. Allegato A3 DGR 630/21019) il potenziale di liquefazione locale, necessario per le valutazioni sul rischio per i manufatti esistenti e di previsione.

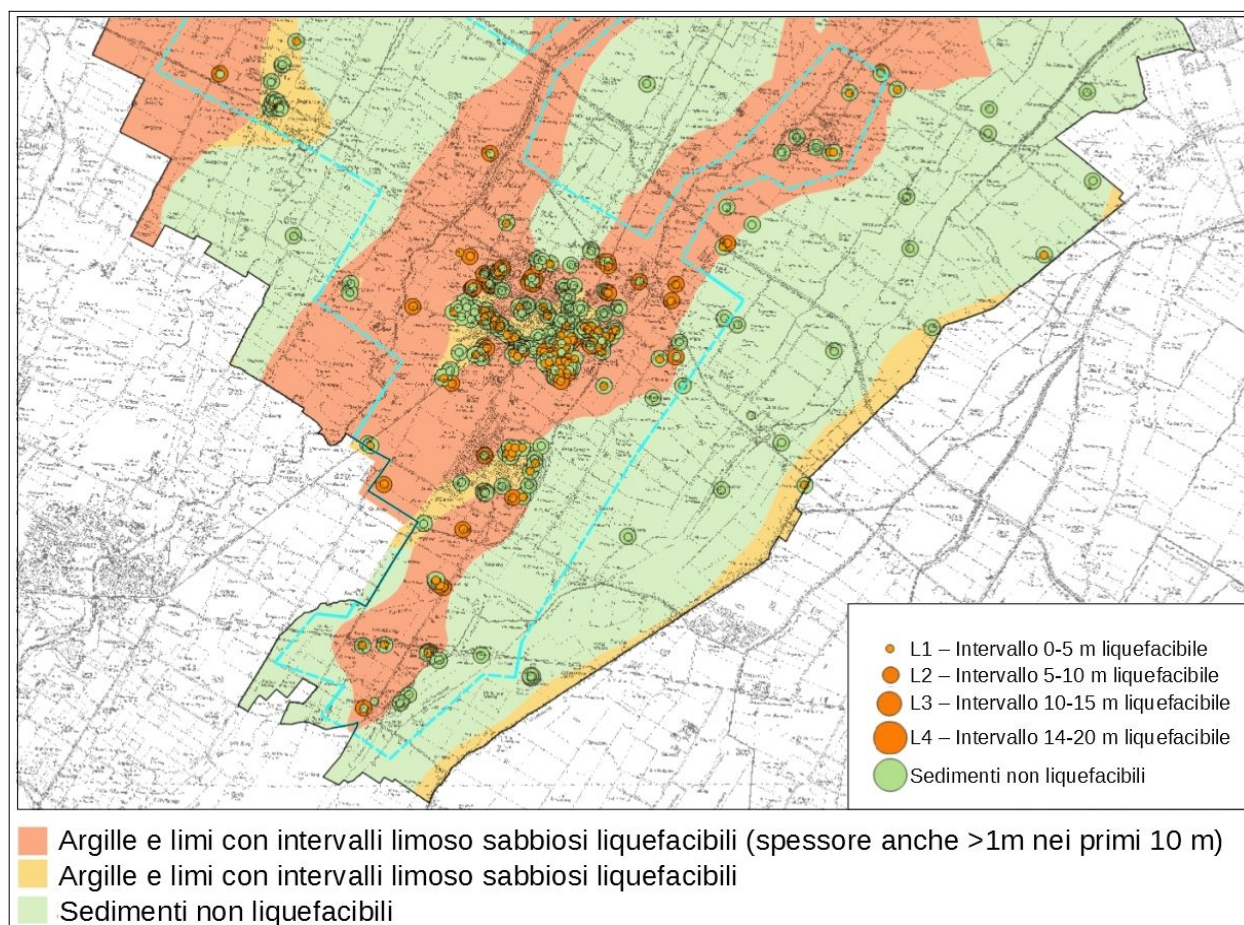


Figura 6.3 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefabilità in base alla presenza di strati granulari in falda (territorio comunale sud)

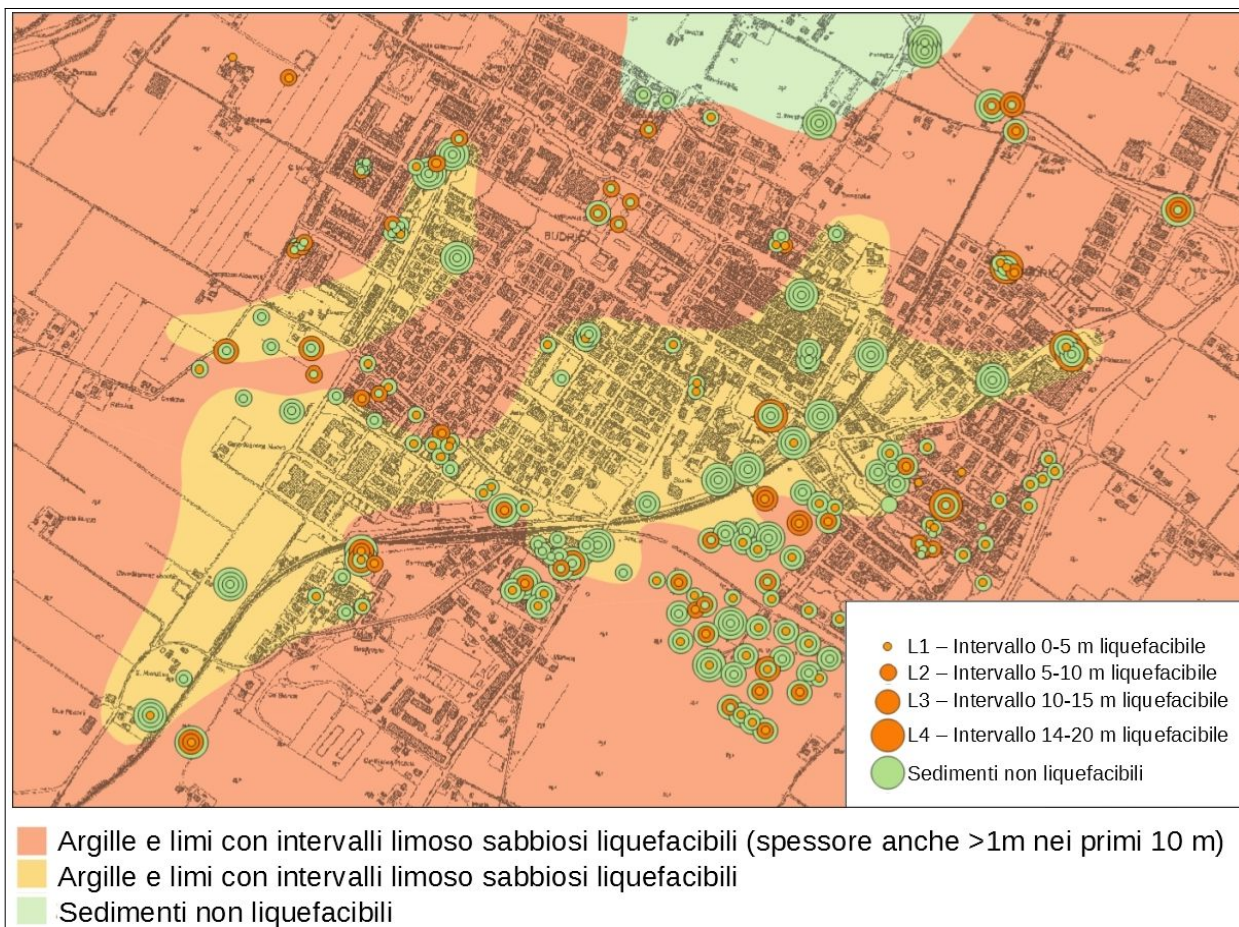


Figura 6.4 - Dettaglio della classificazione dei punti di controllo geognostici e delle zone di potenziale liquefabilità relativo al Capoluogo

## 7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS

### 7.1 Cenni introduttivi

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

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

Come riportato nelle note introduttive degli standard di MS (v.4.1), i risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica).

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

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

La stima dell’amplificazione si è basata sul modello di sottosuolo locale valutato per le aree studiate (cfr capitolo 5), in particolare considerando gli abachi predisposti dalla Regione Emilia-Romagna e riportati nella DGR 630/2019 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

Si rammenta che la DGR 630/2019 ha determinato l’aggiornamento dei precedenti indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna (DAL 112/2007 e DGR2193/2015).

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

### 7.2 Sintesi illustrativa delle MOPS

La raccolta ed elaborazione dei dati disponibili ha consentito la suddivisione del territorio studiato in aree qualitativamente omogenee in prospettiva sismica (MOPS). La delimitazione delle MOPS ha tuttavia considerato, in relazione alle caratteristiche sismostratigrafiche locali, anche il



contesto deposizionale caratteristico, in quanto può risultare strettamente connesso alla variabilità della risposta sismica e alla possibilità di innesco di altri fenomeni cosismici (es. liquefazioni), come già descritto nei capitoli capitoli.

Nel territorio studiato non si riscontrano “zone stabili”, tuttavia si sono distinte tre “zone stabili suscettibili di amplificazioni”. Nello schema seguente sono riportate le descrizioni sintetiche delle MOPS così classificate.

- 2001** Zona 1 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) prevalentemente argilloso-limose di facies interfluviale, con intervalli sabbioso-ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità maggiori di 12,5-17,5 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie).
- 2002** Zona 2 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) prevalentemente argilloso-limose di facies interfluviale, con intervalli sabbioso-ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità maggiori di 17,5-22,5 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie).
- 2003** Zona 3 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) prevalentemente argilloso-limose di facies interfluviale e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie).

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

- 2004** ZA\_LQ 4 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi di spessore anche significativo (>1 metro) nei primi 10 metri (paleoalvei e depositi di traccimazione dell'Idice). Intervalli sabbioso-ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità maggiori di 12,5-17,5 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie).
- 2005** ZA\_LQ 5 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi di spessore anche significativo (>1 metro) nei primi 10 metri (paleoalvei e depositi di traccimazione dell'Idice). Intervalli sabbioso-ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità maggiori di 17,5-22,5 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie).
- 2006** ZA\_LQ 6 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi (paleoalvei e depositi di traccimazione dell'Idice). Intervalli sabbioso-ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità maggiori di 17,5-22,5 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie).
- 2007** ZA\_LQ 7 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi di spessore anche significativo (>1 metro) nei primi 10 metri (paleoalvei e depositi di traccimazione dell'Idice) e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie).
- 2008** ZA\_LQ 8 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi (paleoalvei e depositi di traccimazione dell'Idice) e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie).
- 2009** ZA\_LQ 9 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi di spessore anche significativo (>1 metro) nei primi 10 metri (paleoalvei e depositi di traccimazione indifferenziati) e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie).
- 2010** ZA\_LQ 10 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi (paleoalvei e depositi di traccimazione indifferenziati). Intervalli sabbioso-ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità maggiori di 12,5-17,5 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie).
- 2011** ZA\_LQ 11 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi (paleoalvei e depositi di traccimazione indifferenziati). Intervalli sabbioso-ghiaiosi discontinui poco consolidati a profondità maggiori di 17,5-22,5 metri e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi, sabbie e ghiaie).
- 2012** ZA\_LQ 12 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi (paleoalvei e depositi di traccimazione indifferenziati) e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie).



ZA\_LQ 13 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi di spessore anche significativo (>1 metro) nei primi 10 metri (paleoalvei e depositi di tracimazione del Savena) e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie).



ZA\_LQ 14 – Coperture alluvionali recenti (AES8a; AES8) con intervalli limoso-sabbiosi saturi (paleoalvei e depositi di tracimazione Savena) e sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di argille/limi e sabbie).

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

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, sono stati calcolati i fattori di amplificazione di ogni zona studiata. I fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 630/2019 sono calcolati per un tempo di ritorno dell'evento sismico pari a  $T_r = 475$  (con smorzamento  $\zeta = 5\%$ ) e si riferiscono a:

- FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento "rigido" ( $PGA/PGA_0$ ). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento  $D$  e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- FA SA – Rapporto dell'intensità spettrale in accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento "rigido". I fattori di amplificazione calcolati si riferiscono ai quattro seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio  $T$ :
  - SA1 → 0,1s–0,5s [FA0105]
  - SA2 → 0,4s–0,8s [FA0408]
  - SA3 → 0,7s–1,1s [FA0411]
  - SA4 → 0,5s–1,5s [FA0515] solo per le aree di pianura/costa
- FA SI – Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si devono determinare i fattori di amplificazione per i tre seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio  $T$ :
  - SI1 → 0,1s–0,5s [FH0105]
  - SI2 → 0,5s–1,0s [FH0510]
  - SI3 → 0,5s–1,5s [FH0515] solo per le aree di pianura/costa

### 7.4 Calcolo dei fattori di amplificazione

#### 7.4.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, nello studio di microzonazione sismica di livello 2, i fattori di amplificazione vengono calcolati con approccio semplificati mediante l'utilizzo di abachi. In tal senso, si sono utilizzati gli abachi di riferimento per gli studi di MS in Emilia-Romagna (DGR 630/2019), sulla

base delle differenti caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista della risposta sismica locale (cfr. capitolo 5).

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

Tabella 7.1 – Calcolo dei fattori di amplificazione per le zone “stabili suscettibili di amplificazioni”

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2001	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali argilloso limosi con intervalli ghiaiosi discontinui e poco consolidati a profondità >12,5 metri
2002	MARGINE B	VS30 =200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1	Depositi alluvionali argilloso limosi con intervalli ghiaiosi discontinui e poco consolidati a profondità >17,5 metri
2003	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	Depositi alluvionali argilloso limosi nei primi 20 metri

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

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato anche le aree perimetrate come “zone di attenzione per instabilità” per liquefazioni, come indicato negli Standard di MS v. 4.1 (CTMS, 2018). Tuttavia, sono aree ove vengono richiesti ulteriori approfondimenti (livello 3).

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

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

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2004	MARGINE B	VS30 =250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7	Depositi alluvionali con intervalli limoso sabbiosi e ghiaie discontinue e poco consolidate a profondità >12,5 metri
2005	MARGINE B	VS30 =200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1	Depositi alluvionali con intervalli limoso sabbiosi e ghiaie discontinue e poco consolidate a profondità >17,5 metri

MOPS	MACRO CONTESTO	VS30	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2006	MARGINE B	VS30 =200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1	Depositi alluvionali con intervalli limoso sabbiosi e ghiaie discontinue e poco consolidate a profondità >17,5 metri
2007	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	
2008	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	
2009	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	
2010	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	
2011	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	
2012	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	
2013	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	
2014	PIANURA 2	VS30 =200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	

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

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

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

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

Le elaborazioni evidenziano valori relativamente poco difforni ( $H_{SM}$  variabile da 690 a 649) con un blando decremento verso nord.

## 8 ELABORATI CARTOGRAFICI

### 8.1 Carta delle Indagini

Gli studi di microzonazione sismica hanno consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative. Si tratta, complessivamente, di 569 prove archiviate.

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

La cartografia identifica il tipo di prova con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> CTMS (v.4.1), distinguendo la tipologia delle prove e indicando il sito oggetto delle indagini.

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

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

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

L'elaborazione di questa cartografia è basata sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.1). La carta geologico tecnica riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5–6 metri). Il territorio di studio è stato quindi suddiviso nelle classi USCS/AGI riportate in figura 8.1.

In sintesi, si può evidenziare come nel settore di pianura i terreni più superficiali siano attribuibili a classi tessiturali da ghiaioso sabbiose a prevalentemente fini (limi e argille) in relazione al contesto deposizionale più recente (da depositi di conoide attribuibili al Reno e al Savena a depositi di piana e/o di interbacino). Nel settore pedecollinare, la cartografia riporta ampie aree con substrato affiorante/subaffiorante da pelitico ad arenaceo poco cementato (formazioni CIG, TER, FAA, IMO) che risulta detensionato e/o fratturato per deformazioni legate ad attività tettoniche relativamente recenti (si rimanda ai capitoli 3 e 5 per i dettagli).

La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ forme di superficie e sepolte (assi di paleoalvei)
- ✓ elementi geologici e idrogeologici (sondaggi/pozzi; punti controllo falda in aree con sabbia)

- ✓ le tracce delle sezioni geologiche di riferimento per questo lavoro.

Terreni di copertura	
<b>SM</b>	Sabbie limose, miscela di sabbia e limo – argine/barre/canali (es)
<b>ML</b>	Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità – argine/barre/canali (es)
<b>CL</b>	Argille e argille limose più o meno consistenti – piana inondabile (pi)

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

### 8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

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

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

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

Si rimanda al capitolo 5 per un'illustrazione più dettagliata dei risultati ottenuti dalle registrazioni sismiche HVSR, tuttavia si evidenzia come tutte le misure (salvo alcune registrazioni, inficiate da errori di acquisizione) abbiano ricavato frequenze fondamentali  $< 1 \text{ Hz}$ .

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

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

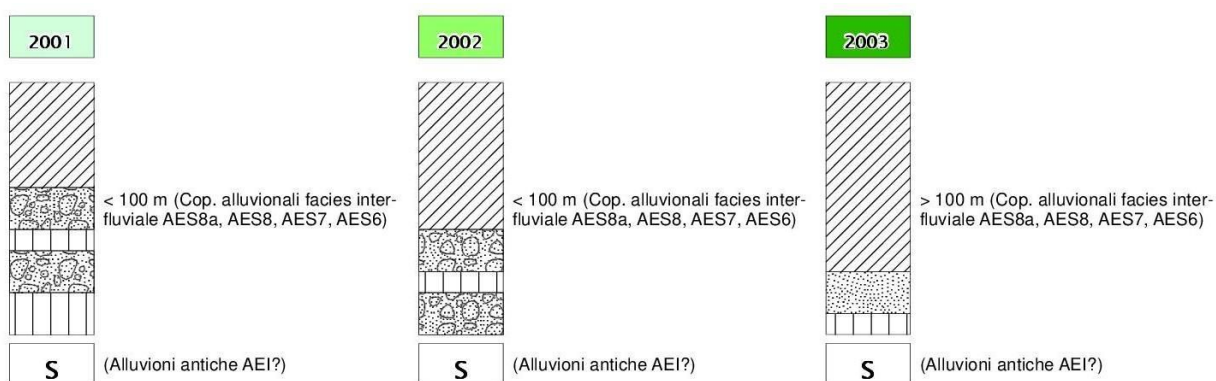
La carta riporta, inoltre, le "forme di superficie e sepolte" (paleoalvei, già presenti nella carta geologico-tecnica), i punti di misura di rumore ambientale (con l'indicazione della frequenza fondamentale) e limiti delle aree interessate dalla microzonazione sismica di livello 2.

Rispetto alle diverse litologie (superficiali) distinte nella carta geologico-tecnica, estendendo la valutazione a profondità maggiore, si è cercato di arrivare a delle semplificazioni, accorpando alcune stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle criticità locali.

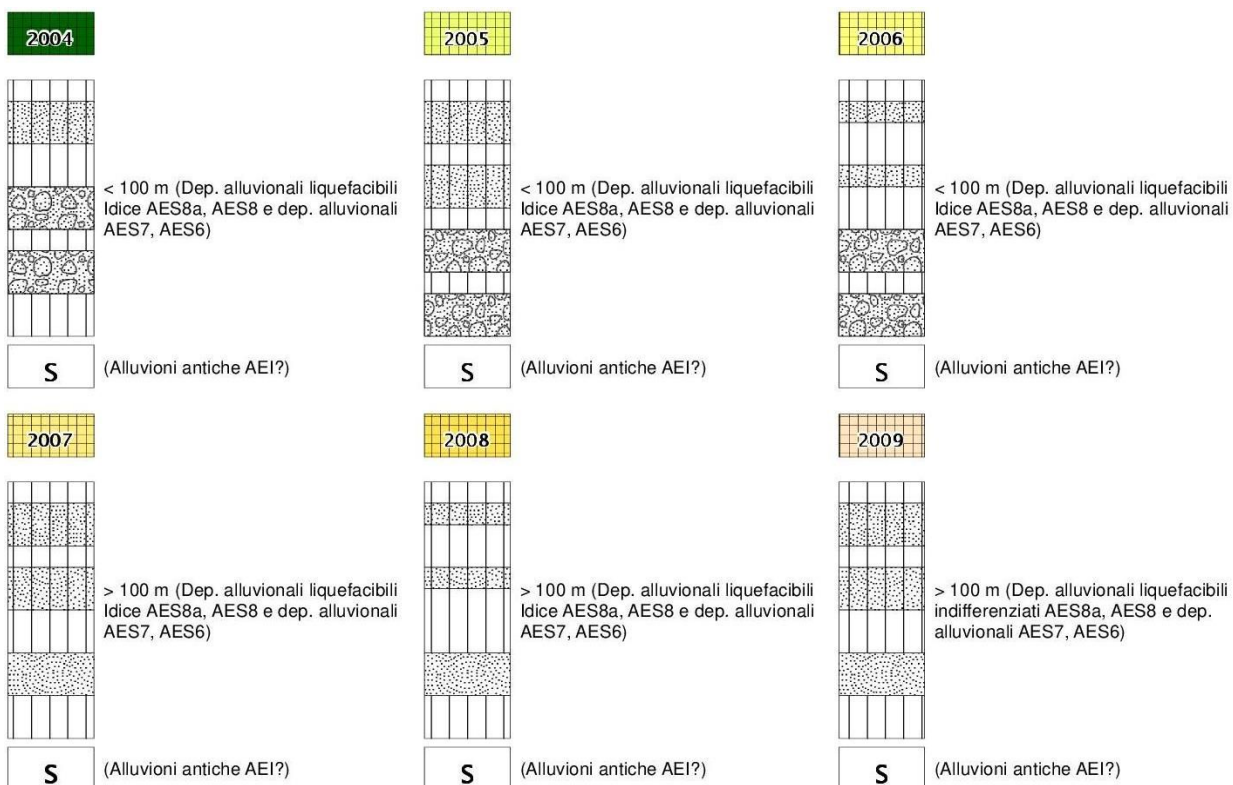
Sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, nel territorio studiato non si riscontrano “zone stabili”, tuttavia sono distinte 3 zone stabili suscettibili di amplificazioni.

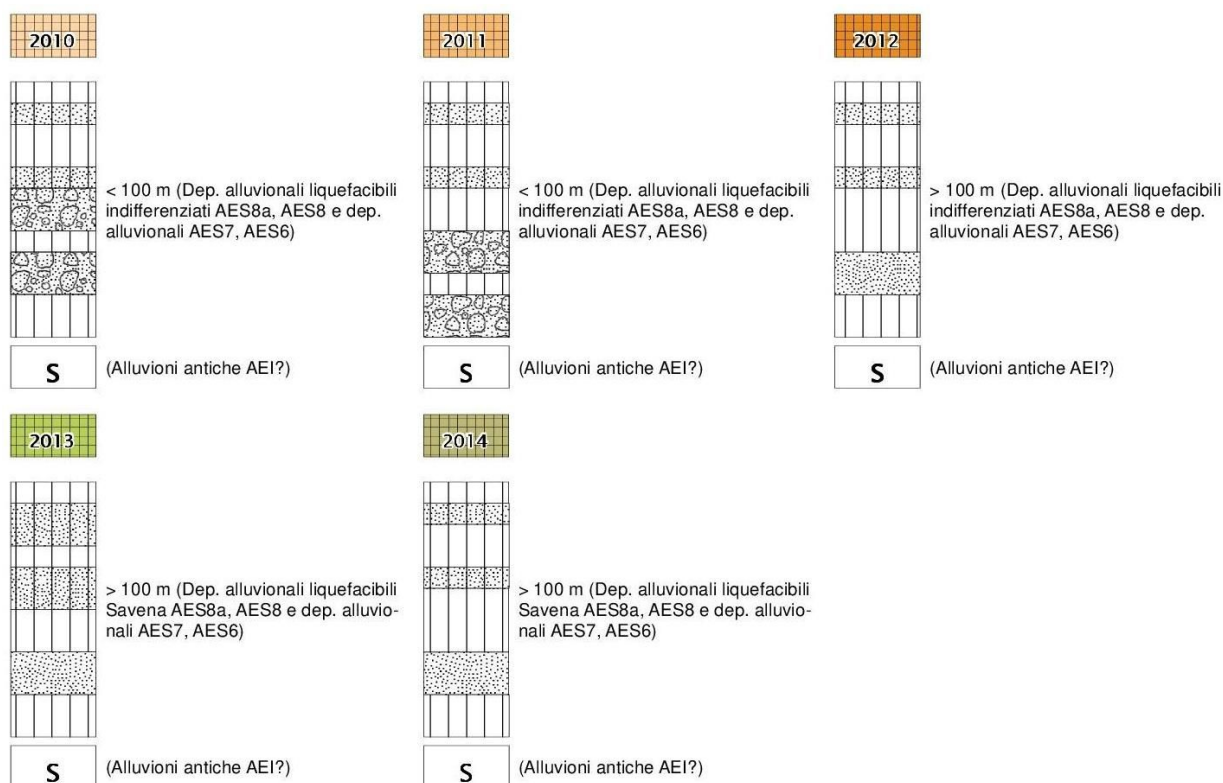
Per ciascuna zona, in legenda si riportano le principali caratteristiche litostratigrafiche e il contesto deposizionale (vedi paragrafo 7.2).

Il seguente schema riporta per le medesime zone i rispettivi rapporti stratigrafici rappresentativi:



Il seguente schema riporta per le zone di attenzione (per liquefazioni) i rispettivi rapporti stratigrafici rappresentativi.





Per una descrizione sintetica di tutte le singole zone di rimanda al precedente paragrafo 7.2.

## 8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S

La <<Carta delle velocità delle onde di taglio S>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura di  $V_s$ , con indicazione, per ogni punto di controllo, del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ( $V_{s_{30}}$ ). Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale, sia valutata con approccio semplificato (DGR 2047/2018; DGR 630/2019; criteri nazionali ICMS 2008), sia da valutare con modellazioni numeriche.

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

## 8.6 Carta di microzonazione sismica livello 2

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

Rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica in quanto riportano per ogni zona i fattori di amplificazione calcolati. In questo senso è necessario specificare che sia alle “zone stabili suscettibili di amplificazioni”, sia alle “zone di attenzione”



per instabilità da liquefazioni vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SA; FA SI) attraverso la suddivisione del territorio studiato in classi di amplificazione, come previsto dagli Indirizzi della CTMS e come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.1). Si rammenta che per gli areali studiati i fattori di amplificazione vengono attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. DGR 630/2019, allegato A2).

La microzonazione sismica di livello 2 ha inoltre interessato il territorio urbano e un'ampia fascia circostante.

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

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

- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2 -  $FA_{PGA}$  → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0));
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SA1}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SA2}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,4 e 0,8 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SA3}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,7 e 1,1 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SA4}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SI1}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SI2}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,0 secondi);
- ✓ Tavola di microzonazione sismica di livello 2  $FA_{SI3}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi).

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

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

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

## 9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) – Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Albarello D. e Castellaro S. (2011) – Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P., Vannucci G. (2004): Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000. Con note illustrative. Regione Emilia-Romagna-SGSS, CNR-IGG. SELCA, Firenze.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) – *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32–56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6): 641–52.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) – Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) – Seismic soil classification from a different perspective. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13–15.
- Castellaro S. (2012) – H/V: un contributo oltre Vs30. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M.
- Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) – Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2018) – Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1. <https://www.centromicrozonationesismica.it/it/download/category/23-standard-ms-e-cle>.
- Comune di Budrio – Quadro Conoscitivo del PSC sovracomunale (2004–2006) e comunale (aggiornamento 2016).
- Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*.

Zanichelli, Bologna.

DISS Working Group (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: *A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; doi:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D’Amico S., Conte S., Rocchetti E., Antonucci A. (2019).

Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.2>.

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

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

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

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

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

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

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

Provincia di Bologna – *Variante al PTCP in materia di riduzione del rischio sismico. Adeguamento alla L.R. 19/2008*. 2013.

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

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

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

Regione Emilia Romagna – Legge Regionale n.19/2008 – *“Norme per la riduzione del rischio sismico, con le modifiche apportate dalla L.R. 6 luglio 2009, n.6 “Governo e*

*riqualificazione solidale del territorio*". BURER n. 184 del 30/10/2008.

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

*Regione Emilia Romagna – Delibera Regionale n.112/2007 – “Approvazione dell’atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell’art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>”*. BURER n. 64 del 17 maggio 2007.

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

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

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