

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE



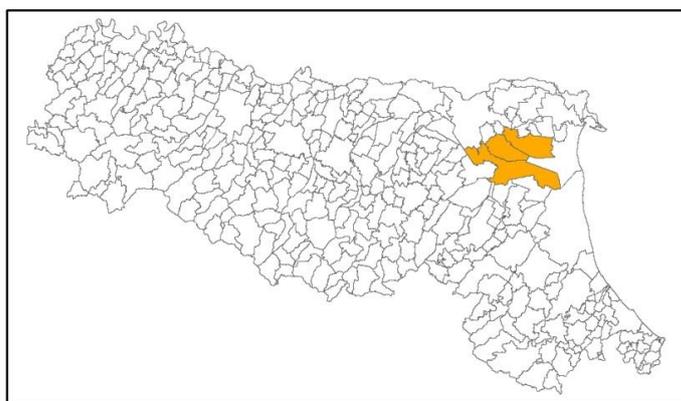
Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Livello 2

Regione Emilia-Romagna

Unione Valli e Delizie



## Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l. Studio di geologia Tarabusi ProgEO S.r.l.	22.06.2015

## Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b> .....	<b>4</b>
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	4
1.2	Lo studio di microzonazione sismica.....	5
1.3	Elaborati prodotti.....	6
<b>2</b>	<b>Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento</b> .....	<b>7</b>
2.1	Sismicità storica.....	8
2.1.1	La sequenza del 2012.....	13
	Argenta.....	14
	Portomaggiore.....	14
	Ostellato.....	15
2.2	Sorgenti sismogenetiche.....	15
<b>3</b>	<b>Assetto geologico e geomorfologico dell'area</b> .....	<b>18</b>
3.1	Quadro geografico e geomorfologico.....	18
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	20
3.3	Evoluzione generale delle successioni del Quaternario Superiore.....	26
<b>4</b>	<b>Dati geotecnici e geofisici</b> .....	<b>27</b>
4.1	Indagini di repertorio.....	28
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica.....	30
4.2.1	Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU).....	30
4.2.2	Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW).....	32
4.2.3	Extended Spatial AutoCorrelation (ESAC).....	36
4.2.4	Misure di microtremore a stazione singola (HVSr).....	38
<b>5</b>	<b>Modello del sottosuolo</b> .....	<b>43</b>
5.1	Substrato.....	45
5.2	Terreni di copertura.....	45
5.2.1	Supersistema Emiliano-Romagnolo.....	45
5.2.2	Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI).....	47
5.2.3	Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES).....	47
5.2.3.1	Subsistema di Bazzano – AES <sub>6</sub> .....	50
5.2.3.2	Subsistema di Villa Verucchio – AES <sub>7</sub> .....	51
5.2.3.3	Subsistema di Ravenna – AES <sub>8</sub> .....	52

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

<b>6</b>	<b>Interpretazioni e incertezze .....</b>	<b>54</b>
6.1	Substrato rigido .....	54
6.2	Terreni potenzialmente liquefacibili.....	57
6.3	Frequenza naturale dei terreni ( $f_0$ ).....	59
6.4	Velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) .....	60
<b>7</b>	<b>Metodologie di elaborazione e risultati.....</b>	<b>61</b>
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali.....	62
7.2	Zone instabili potenzialmente soggette a liquefazione .....	63
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione .....	64
<b>8</b>	<b>Elaborati cartografici .....</b>	<b>73</b>
8.1	Carta delle indagini (Tavole 1) .....	73
8.2	Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica (Tavole 2).....	74
8.2.1	Forme di superficie e sepolte.....	75
8.2.2	Elementi geologici .....	76
8.2.3	Terreni di copertura.....	77
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavole 3).....	84
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavole 4).....	85
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavole 5).....	88
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole 6 - Tavole 7 - Tavole 8).....	89
<b>9</b>	<b>Commenti finali e criticità .....</b>	<b>89</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>93</b>

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

*Coordinamento dello studio di  
Microzonazione Sismica:*

dott. geol. Luca Minarelli

*Redazione della relazione:*

prof. Marco Stefani  
dott. geol. Luca Minarelli  
dott. geol. Gabriele Tarabusi  
dott. geol. Massimiliano Fazzini

*Creazione geodatabase dei dati  
geologici e geotecnici:*

dott. geol. Luca Minarelli  
dott. Andrea Pavanati  
dott. Davide Franciosi  
dott. Fiorenzo Mattiacci  
dott.ssa Sofia Gamberi

*Elaborazione tavole cartografiche:*

dott. geol. Luca Minarelli  
dott. geol. Gabriele Tarabusi  
dott. Davide Franciosi  
dott. Andrea Pavanati  
dott.ssa Sofia Gamberi

*Elaborazione dei dati stratigrafici:*

prof. Marco Stefani  
dott. geol. Luca Minarelli  
dott. geol. Gabriele Tarabusi

---

*Esecuzione ed elaborazione misure  
di microtremore a stazione singola:*

dott. geol. Gabriele Pulelli  
dott.ssa Ambra Mantovani  
dott.ssa Sofia Gamberi  
dott. geol. Gabriele Tarabusi

*Esecuzione ed elaborazione prove  
penetrometriche statiche (CPTu):*

dott. geol. Thomas Veronese

*Esecuzione ed elaborazione  
indagini MASW e ESAC:*

Progeo s.r.l. – Forlì (FC)

## 1 Introduzione

### 1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Lo studio di Microzonazione Sismica di secondo livello dell'Unione dei Comuni Valli e Delizie (Argenta, Ostellato e Portomaggiore) è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna 1919/2013 dal titolo "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione civile 52/13 a favore degli Enti locali".

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

- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 3.0", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), da qui in avanti "Standard MS 3.0";
- "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008) e successive modifiche e integrazioni (AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".

Nella redazione dello studio si è fatto ulteriore riferimento alle seguenti norme:

- Delibera Assemblea Legislativa (D.A.L.) n. 112/2007 Art. 16 c.1 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica";
- Variante al PTCP della Provincia di Ferrara: ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale, adottata dal Consiglio Provinciale il 29/05/2014, contenente una Relazione di Quadro Conoscitivo inerente la sismicità in Provincia di Ferrara;
- L.R. 30/10/2008 n. 19 "Norme per la riduzione del Rischio Sismico";
- D.M. del 14/01/2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni";

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

- Microzonazione sismica di I livello inserita nel Quadro Conoscitivo del PSC associato dei comuni di Argenta, Ostellato e Portomaggiore.

## 1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Strumento fondamentale per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico, la microzonazione conduce alla suddivisione dettagliata del territorio in base alla risposta locale dei terreni durante un evento sismico e ai possibili effetti indotti dallo scuotimento.

Come noto, le caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali possono determinare alterazioni nel moto sismico in superficie. Le conoscenze derivate dagli studi di microzonazione si pongono, dunque, come elementi capaci di indirizzare le scelte di pianificazione urbanistica verso zone a minore pericolosità, di orientare interventi di mitigazione del rischio in zone con particolari criticità e di fornire indicazioni utili anche per la progettazione.

Le finalità di uno studio di microzonazione sismica con approfondimenti di secondo livello possono essere sintetizzate nella definizione di un modello geologico di sottosuolo - in termini litologici, stratigrafici e tettonici - che consenta l'individuazione di aree a diversa pericolosità sismica sulla base della suscettibilità ad effetti cosismici locali. Per queste aree devono essere definiti nel dettaglio gli effetti locali potenzialmente indotti, l'amplificazione attesa ed eventuali ulteriori approfondimenti di terzo livello che si rendessero necessari.

Secondo gli indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007) tali studi, necessari per la redazione e l'approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. 19/2008), devono necessariamente interessare le aree urbanizzate e quelle potenzialmente sottoposte a trasformazioni urbanistiche, comprese le porzioni delle reti infrastrutturali principali.

Gli ambiti insediati e quelli urbanizzabili interessati dalla microzonazione sismica sono stati indicati dal Settore Programmazione Territoriale dell'Unione dei Comuni Valli e Delizie, in relazione a quanto stabilito nello strumento urbanistico generale e nel regolamento urbanistico edilizio (RUE) approvati.

### 1.3 Elaborati prodotti

Gli elaborati di riferimento dello studio di microzonazione sismica sono rappresentati dalle tavole cartografiche di sintesi e dai dati informatizzati, sotto forma di archivi digitali, ad esse associate.

La relazione illustrativa rappresenta, invece, il documento tecnico che accompagna gli elaborati cartografici; illustra i criteri adottati per studio; descrive le metodologie d'analisi dei dati e i risultati del percorso di microzonazione, oltre ad inquadrare il territorio nel contesto geologico e sismotettonico regionale.

Nel complesso il presente studio di microzonazione sismica è costituito da:

- 32 Tavole cartografiche, descritte al capitolo 8;
- 4 Sezioni geologiche;
- Archivi dei dati informatizzati;
- Relazione illustrativa;
- Rapporti di prova delle indagini di nuova esecuzione.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nell'allegato D della Delibera Regione Emilia-Romagna 1919/2013 dal titolo "Indicazioni per l'archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell'analisi della condizione limite per l'emergenza, di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/2013 e decreto del 15 aprile 2013 del Capo del Dipartimento della Protezione Civile".

Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile dal titolo "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 3.0" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. L'obbligo di attenersi in maniera rigorosa ai suddetti standard, ha vincolato lo studio di microzonazione sia a livello di organizzazione della relazione illustrativa, in tema di contenuti, titoli e ordine dei capitoli trattati, sia a livello cartografico, in merito a numerazioni, tematismi, layout, legende e font utilizzati nelle diverse tipologie di elaborati prodotti.

## 2 Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al proprio assetto tettonico - strutturale, dunque alla presenza di quelle che vengono definite strutture “geologicamente attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio, oltre alle conoscenze legate all’evoluzione delle principali strutture deformative esistenti, risultano fondamentali anche quelle relative alla storia sismica dello territorio stesso, vale a dire tutte le informazioni riguardanti i terremoti avvenuti in epoca storica e gli effetti ad essi associati.

L’inquadramento sismotettonico dell’area è stato di conseguenza realizzato anche attraverso la consultazione di diversi *database* pubblici, sviluppati da vari Enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI11 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2011 (Rovida *et al.*, 2011 - <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia fino alla data dell’ultimo aggiornamento;
- il DBMI11 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI11 (Locati *et al.*, 2011 - <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi *et al.*, 2007);
- il CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni *et al.*, 2007 - <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta, per numerose località, i risentimenti di circa 300 tra i più forti terremoti storici italiani, e fornisce informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti. Nel catalogo sono anche presenti dati relativi ai parametri epicentrali, ad effetti locali sismoindotti (fagliazione superficiale, frane, maremoti, ecc.) e danni ai centri storici ed a beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004 - <http://esse1.mi.ingv.it/>), che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di AG (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica;

- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004 - <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica di base a scala nazionale;
- il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.0 (DISS Working Group, 2015 - <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene informazioni relative a sorgenti individuali e composite in grado di generare terremoti di magnitudo pari a 5.5 o superiore. Le sorgenti sono rappresentate in pianta in modo semplificato tramite segmenti o aree georeferenziate che indicano rispettivamente singole faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite). Per ognuna delle sorgenti il database contiene informazioni che consentono la ricostruzione tridimensionale della struttura sismogenetica.
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello *et al.*, 2006 - <http://csi.rm.ingv.it/>), che contiene tutte le registrazioni delle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti tra il 1981 ed il 2002;
- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutte le registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti dal 2003 ad oggi;

### 2.1 Sismicità storica

Per esaminare la sismicità storica dei territori che costituiscono i Comuni dell’Unione Valli e Delizie ci si è innanzitutto basati su quanto presente nel database Macrosismico Italiano - DBMI11 (Locati *et al.*, 2011), il quale consente la consultazione online dei dati macrosismici di tutte quelle località a cui sono associate osservazioni di danno riferibili ad almeno 3 eventi sismici.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

In relazione ai comuni di Argenta, Portomaggiore ed Ostellato, il database contiene rispettivamente 39, 25 e 14 record relativi ad eventi sismici storici. Data l'ampia mole di dati presenti, si è deciso di prendere in considerazione solamente quelli riportanti intensità macrosismiche  $IMCS \geq 5$  (Figura 2-1). Per ciascun terremoto sono quindi riportati i valori d'intensità (IMCS) attribuiti ad ogni Comune in occasione degli eventi considerati, l'epicentro macrosismico (Ax), il numero di località nelle quali il sisma è stato avvertito (Np), l'intensità epicentrale (Io) e la magnitudo momento (Mw) stimata mediante relazioni empiriche. I valori d'intensità sono espressi in accordo con la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2-1.

In occasione del terremoto del:					Effetti Argenta	Effetti Ostellato	Effetti Portomaggiore
Data	Ax	Np	Io	Mw	I [MCS]	I [MCS]	I [MCS]
1570 11 17 19:10	Ferrara	60	7-8	5.46 ±0.25	5-6	-	5-6
1624 03 19 19:45	Argenta	18	7-8	5.47 ±0.49	8-9	-	7-8
1672 04 14 15:45	Riminese	92	8	5.61 ±0.21	5	-	-
1668 04 11 12:20	Romagna	39	8-9	5.78 ±0.35	5	-	-
1781 04 04 21:20	Romagna	96	9-10	5.94 ±0.17	5	-	-
1781 07 17 09:40	Romagna	46	8	5.58 ±0.26	6	-	-
1870 10 30 18:34	Romagna	41	8	5.58 ±0.27	5	-	-
1895 03 23	Comacchio	37	6	4.74 ±0.31	5	6	4
1898 01 16 12:10	Romagna settentrionale	73	6-7	4.79 ±0.33	7	5	6-7
1909 01 13 00:45	Bassa Padana	799	6-7	5.53 ±0.09	6	5	5-6
1916 05 17 12:49	Alto adriatico	132	-	5.95 ±0.14	-	-	6
1931 03 27 02:46	Ferrarese	7	6	4.81 ±0.67	4	6	4
1956 02 20 01:29	Argenta	32	5-6	4.82 ±0.18	5-6	-	-
1967 12 30 04:19	Bassa padana	40	6	5.24 ±0.19	-	6	-

**Tabella 2-1 - Valori d'intensità macrosismica attribuiti ai Comuni di Argenta, Ostellato e Portomaggiore, in occasione dei principali eventi. Estratto da database DBMI11 (Locati *et al.*, 2011).**

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

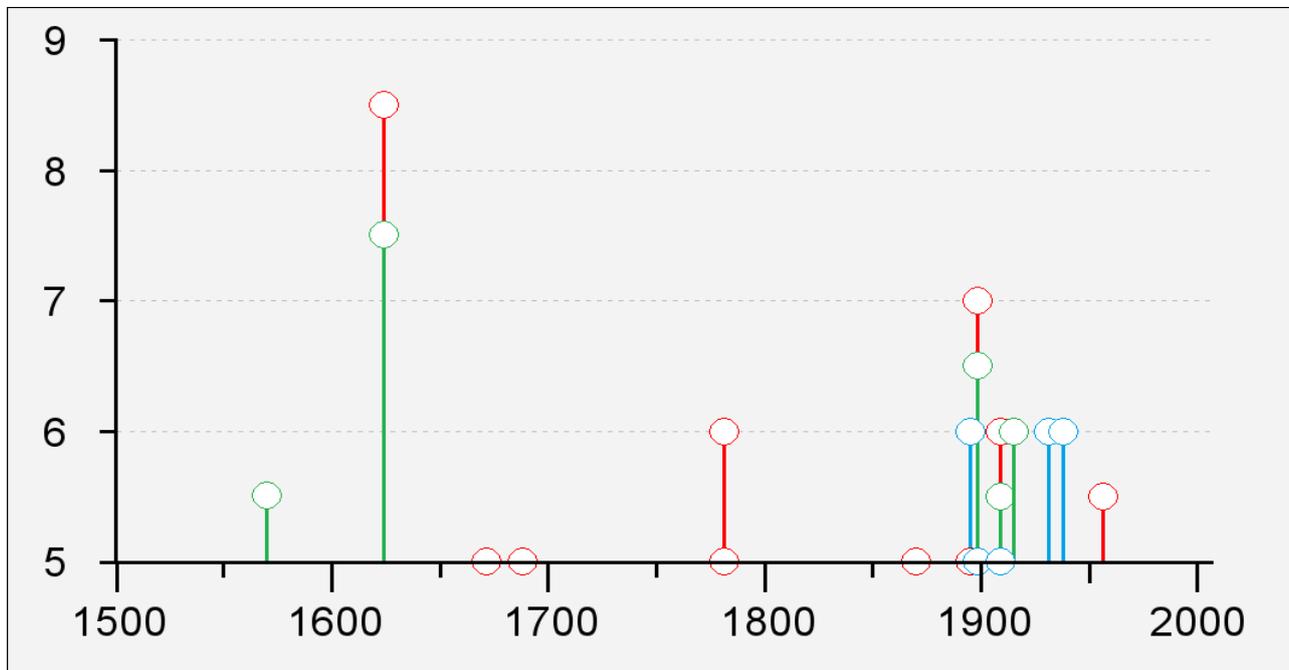


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica  $I_{MCS} \geq 5$  attribuite al Comune di Argenta (in rosso), Ostellato (in blu) e Portomaggiore (in verde), dall'anno 1000 al 2006, tratte dal database DBMI11 (Locati *et al.*, 2011). Nel caso dell'evento del 1570 il medesimo valore di  $I_{MCS}$  è stato attribuito ad Argenta e a Portomaggiore. In grafico, quindi, le due tracce risultano coincidenti e perfettamente sovrapposte.

Come è possibile osservare dai dati disponibili, il terremoto a più elevata intensità ha avuto epicentro proprio nell'area di studio (Argenta) e si è verificato il 19 marzo 1624. D'intensità epicentrale pari al VII°-VIII° grado (MCS) e magnitudo equivalente a 5.47, con massima intensità ad Argenta (VIII°-IX° grado MCS), l'evento sismico è riportato nel catalogo CFTI4med, mentre i commenti storico-critici e le descrizioni degli effetti locali sono al momento in fase di elaborazione.

Ciononostante, dal sito del Comune di Argenta, è stato possibile ricavare la sintesi di alcune fonti storiche, di cui si riporta di seguito un estratto (vedi <http://www.comune.argenta.fe.it/files/moduli/pdf/modulo794.pdf>).

***“Argenta nelle memorie storico-cronologiche raccolte dal dott. Luigi Magrini, Bologna 1988 (ms. sec. XIX), p. 30.***

*1624. Terremoto. Nel giorno 2 febbraio 1624 una fiera scossa di terremoto fu qui sentita, la quale replicava poi nel giorno 3, ma non vi è memoria che recasse danno alcuno di conseguenza.*

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

*Poco prima delle ore 2 di notte dal 18 al 19 marzo con orrendo fragore tre scosse, una immediata all'altra fecero traballare Argenta dalle fondamenta e replicarono così 37 volte in quella medesima notte. Frattanto 164 edifici rovinarono affatto e 200 case rimasero inabitabili. Le robuste mura di cinta in massima parte caddero, e particolarmente quella lungo il Po. Di 24 torri che esistevano, o fracassate del tutte o mozze rimasero; e così le chiese, i campanili, i conventi ed in specie quelli dell'arcipretale di S. Giacomo, de' Minori Conventuali, de' Geronimini e dei Domenicani. Le campane che non caddero si dimenarono, e qualch'una suonò a tocchi. La terra in molti luoghi squarciassi tramandando sabbia ed acqua bollente. Le acque del Po delle Valli Argentane e di Comacchio si alzarono, i pozzi quasi tutti si gonfiarono sin sopra i ripari allagando le vie e parte di essi immischiaronsi colle acque salse.*

*Pensi chi sa, e può pensarlo, quale fosse lo spavento, il terrore del popolo a così terribile flagello, a tante e replicate scosse in una sola notte; meno però forti furono a Boccaleone e Bando ed a S. Biagio. Eppure in mezzo a tanta disgrazia non s'ebbero a deplorare che venticinque vittime. Preservate dalla terribile catastrofe furono le chiese di S. Lorenzo e de' padri Cappuccini e la chiesa della Celletta allora ultimata, da cui non si mosse pietra."*



**Figura 2-2 - Distribuzione degli effetti del sisma del 19 marzo 1624. Dati DBMI11. In rosso sono rappresentate le aree dei comuni di Argenta, Ostellato e Portomaggiore.**

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

In Figura 2-2 è riportata in mappa la distribuzione degli effetti macrosismici relativi al terremoto del marzo 1624, rispetto all'area dei comuni di Argenta, Ostellato e Portomaggiore. Oltre all'evento appena citato, il catalogo DBMI, così come il CFTI4med, riporta un altro terremoto che ha prodotto effetti pari al VII° grado (MCS) in aree attigue al territorio in esame: l'evento del 22 ottobre 1796, la cui localizzazione epicentrale si trova appena al di fuori dei territori dell'Unione dei Comuni Valli e Delizie, nei pressi dell'abitato di Molinella (Figura 2-3).



**Figura 2-3 - Effetti del sisma del 22 ottobre 1796. Dati DBMI11. In rosso sono rappresentate le aree dei comuni di Argenta, Ostellato e Portomaggiore.**

Per la sequenza sismica del 1796 si riporta, di seguito, un estratto degli effetti principali osservati proveniente dal catalogo CFTI4Med:

*La scossa principale, preceduta e seguita da altre di minore entità, avvenne il 22 ottobre 1796 alle ore 4:00 GMT circa (tra le 11 e le 11 e un quarto in orario "all'italiana"). Causò i massimi effetti a Ferrara, dove fu avvertita della durata di circa 60 secondi, a Medicina e a Portonovo. A Ferrara si susseguirono tre scosse: la principale causò danni a moltissimi edifici, fra i quali la Cattedrale e la chiesa di S. Spirito. I danni più diffusi furono caduta di comignoli, di cornicioni e*

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

*lesioni.*

*A Medicina crollò la guglia piramidale della torre dell'orologio e le quattro gugliette laterali risultarono spostate; la chiesa dell'Osservanza fu lesionata; caddero tutti i comignoli. A Portonovo ci furono danni di notevole entità: molte case coloniche furono danneggiate fortemente; furono lesionati i muri e le volte della chiesa parrocchiale e il campanile risultò pericolante.*

*A Mirandola la scossa causò la caduta di 24 comignoli e una lesione alla volta sopra l'altare della chiesa di S. Francesco. A Vicenza, la scossa principale, della durata di circa 30 secondi, causò il crollo della cima del campanile della Misericordia, che, cadendo, danneggiò la chiesa e la sacrestia; nella chiesa di San Marco degli Scalzi si formò una lesione dall'altare di Sant'Anna a quello di S. Giovanni della Croce; caddero molti comignoli e furono lesionati i muri di diverse case.*

*A Bologna la scossa, accompagnata da un forte rombo, fu preceduta da altre due scosse di lieve entità: crollarono molti comignoli e furono lesionate alcune case. La scossa fu fortemente sentita a San Felice sul Panaro e a Mantova, dove causò il crollo di comignoli.*

*L'area di risentimento fu vasta: il terremoto fu avvertito nella Toscana occidentale e in gran parte dell'Italia Settentrionale, fino al Friuli.*

### **2.1.1 La sequenza del 2012**

Relativamente agli effetti delle due scosse principali, del 20 e del 29 maggio, della sequenza sismica emiliana del 2012, i rapporti dei rilievi macrosismici eseguiti (Galli *et al.*, 2012a e 2012b) citano, per la provincia di Ferrara, solo le località più occidentali e non è quindi attribuito alcun valore di intensità ai comuni dell'Unione Valli e Delizie. In ogni caso, poiché ai comuni del ferrarese più prossimi è stata attribuita una intensità pari al grado V° MCS, sulla base delle informazioni raccolte si può stimare anche per l'area in oggetto, come massimo, un analogo valore di intensità macrosismica.

Le scosse, infatti, sono state avvertite in maniera distinta in tutto il territorio dell'Unione ed hanno provocato danni sia al patrimonio edilizio pubblico che privato.

In particolare sono stati danneggiati gli edifici di culto, alcune scuole e gli edifici rurali, quali magazzini, capannoni agricoli e fienili, oltre ad alcuni edifici adibiti a civile abitazione. I danni

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

sono stati tali da rendere parzialmente o totalmente inagibili alcuni fabbricati. Di seguito si riporta una breve sintesi degli effetti rilevati nei territori di Argenta, Portomaggiore ed Ostellato, per poter meglio valutare le differenze riscontrate alla scala dei singoli Comuni.

### **Argenta**

I danni sono essenzialmente riconducibili a lesioni sui paramenti murari e in corrispondenza delle connessioni tra copertura ed elementi strutturali verticali, crolli parziali di coperture, cedimenti a livello delle fondazioni.

Le 43 Ordinanze di inagibilità emesse nel territorio comunale hanno riguardato 13 edifici rurali, 11 abitazioni private, 10 chiese e 9 altri edifici.

Le inagibilità relative agli edifici di culto sono state principalmente dovute alla presenza di lesioni diffuse, probabilmente preesistenti, che si sono acuite a causa degli eventi sismici. Gli elementi di maggior vulnerabilità sono stati rappresentati dalle strutture stesse delle chiese, spesso ad ampie campate e frequentemente addossate ad alti campanili. Le sole chiese a non aver riportato danni sono state quelle di Boccaleone, Ospital Monacale e Campotto, mentre sono risultate inagibili quelle di San Biagio, San Nicolò, Anita, Filo, Consandolo e Bando.

Per quanto riguarda le altre tipologie di edifici, si tenga conto che a seguito degli eventi sismici del 20 e 29 maggio, il Comune di Argenta è stato inserito nei comuni facenti parte del "cratere" (come previsto dall'allegato 1 dell'Ordinanza n. 29 del 28 agosto 2012 della Regione Emilia-Romagna).

### **Portomaggiore**

L'effetto più diffuso sul patrimonio edilizio è stato il manifestarsi di micro-lesioni a livello degli intonaci delle murature. Effetti anche molto gravi hanno invece interessato solo pochi edifici, tra cui alcuni di culto, altri rurali e palazzi antichi. I danni riscontrati si possono ricondurre fondamentalmente a lesioni su i paramenti murari e in corrispondenza delle connessioni tra copertura ed elementi strutturali verticali.

Le Ordinanze Sindacali di inagibilità emesse a seguito del sisma hanno interessato il complesso parrocchiale di S. Clemente in frazione di Portoverrara e la chiesa di S. Giovanni Decollato in frazione di Quartiere.

## Ostellato

Lesioni particolarmente significative, tali da determinarne l'inagibilità, hanno interessato principalmente edifici di culto e locali annessi, oltre a qualche abitazione e fabbricato rurale. Per alcuni di essi, interessati da lesioni diffuse probabilmente preesistenti ed aggravate dal sisma, a seguito di mirati interventi di ripristino e consolidamento, è stato possibile revocare lo stato di inagibilità, come nel caso delle Chiese di Dogato, San Vito e Alberlungo oltre alla canonica di Ostellato. Nel caso invece di dissesti più profondi come rotazione dei muri perimetrali e cedimenti sui pilastri di collegamento, avvenuti nelle Chiese di Bivio Correggi e Rovereto, nella Canonica di Medelana è stato prolungato lo stato di non agibilità dell'edificio.

## 2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il database DISS (*DISS Working Group*, 2015) individua, nell'area dell'Unione dei Comuni Valli e Delizie, due strutture sismogenetiche composite orientate approssimativamente ESE-WNW e denominate rispettivamente Malalbergo-Ravenna (ITCS012) e Poggio Rusco-Migliarino (ITCS050)(Figura 2-4).

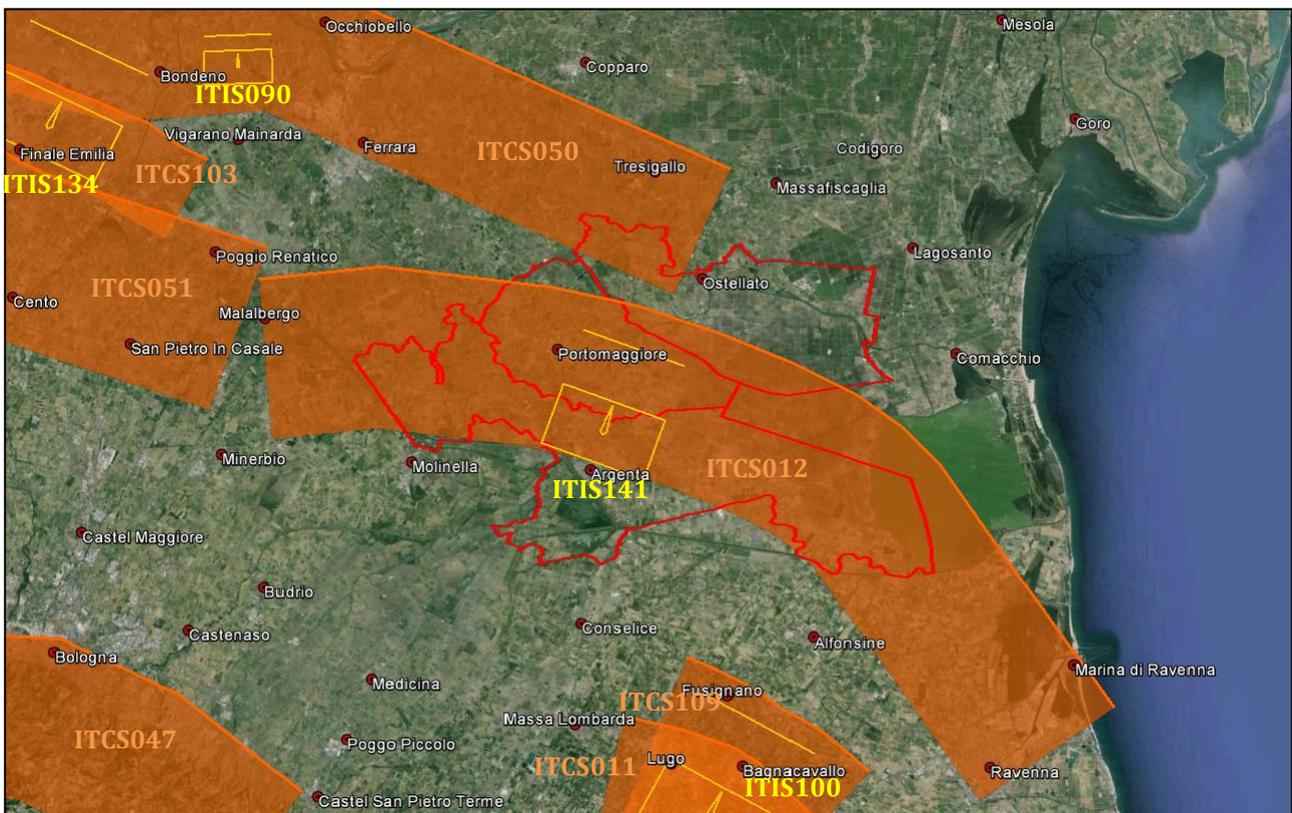
Queste strutture fragili, i cui lineamenti principali mostrano vergenza tendenzialmente nord-est, sono soggette ad un attivo campo di stress tettonico *compressivo*, che induce movimenti inversi o inverso - trascorrenti, associati ad una attività sismica relativamente frequente. Di tale attività esiste significativa documentazione storica (Guidoboni *et al.*, 2007), comunque per sua natura ovviamente incompleta, in particolare prima del XVI secolo.

La fascia corrispondente alla sorgente composta ITCS050 delimita il settore esterno dell'Arco Ferrarese; in essa rientra la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090) a cui è assegnata magnitudo massima pari a 5.5, profondità tra 1.4 e 4.5 km e slip-rate compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno. L'esistenza di questa sorgente individuale è avvalorata sia da dati di sottosuolo (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti e Martelli, 2004; Burrato *et al.*, 2003; 2012), sia da attività tettonica "recente" alla quale si riconduce il terremoto di Ferrara del 17 novembre 1570. L'ubicazione della sorgente è stata proposta anche sulla base di anomalie del reticolo idrografico, in particolare in relazione alla deviazione dell'alveo del fiume Po in prossimità di Stellata, interpretata come possibile conseguenza della deformazione cosismica indotta dall'attività tettonica di tale struttura sepolta.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Per quanto riguarda invece la struttura sismogenetica composta ITCS012, in essa rientra la sorgente individuale di Argenta (ITIS141) a cui è assegnata magnitudo massima pari a 5.8, profondità tra 3 e 6.3 km e slip-rate compreso tra 0.49 e 0.55 mm/anno.

A sud dell'area in esame (Figura 2-4), il database DISS indica la presenza di altre due sorgenti sismogenetiche composite orientate, anch'esse, approssimativamente ESE-WNW e denominate Fusignano-Villanova (ITCS109) e Mordano-Guarniera (ITCS011). A quest'ultima è associata la sorgente individuale di Bagnacavallo (ITIS100), caratterizzata da una magnitudo massima pari a 5.8. La presenza di tale sorgente individuale, a cui è stato associato il sisma dell'11 aprile 1668, è stata ipotizzata anche sulla base ad anomalie osservate nel reticolo idrografico. La profondità della struttura è indicata tra 2.5 e 5 km, mentre lo slip-rate è compreso tra 0.1 e 0.3 mm/anno.



**Figura 2-4 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) e individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è riportata l'area occupata dai territori dell'Unione dei Comuni Valli e Delizie.**

#### MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Dalla Figura 2-4 è possibile osservare come il Comune di Argenta sia interessato, per quasi tutta la sua estensione, dalla struttura sismogenetica composta Malalbergo-Ravenna (ITCS012), ad esclusione della zona delle Valli di Campotto.

Anche il territorio del Comune di Portomaggiore è posizionato per la quasi totalità in corrispondenza della medesima struttura sismogenetica, mentre l'estremità settentrionale del proprio territorio risente della sorgente composta Poggio Rusco-Migliarino (ITCS050).

Per quanto concerne il Comune di Ostellato, anche quest'ultimo risulta interessato dalle due strutture sismogenetiche composite, la ITCS012 nella parte meridionale del territorio e la ITCS050 in quella nord-occidentale.

I caratteri strutturali e sismogenetici di queste strutture fragili sepolte, i cui singoli lineamenti tettonici mostrano scarsa estensione areale, determinano – in caso di sisma – la liberazione di un quantitativo di energia normalmente moderato, in grado comunque di determinare effetti significativi in superficie, data la ridotta profondità delle strutture e gli importanti fattori di focalizzazione e amplificazione sismica.

Nonostante siano tra le meglio documentate tra quelle presenti nel sottosuolo della pianura, per le strutture sismogenetiche appartenenti all'Arco Ferrarese permangono tuttavia interrogati relativi ai tempi di ritorno degli eventi associati alle sorgenti individuali e alla magnitudo massima attesa per l'area sottesa alla sorgente composta.

Oltre a quanto trattato finora è necessario considerare che l'intera area di studio può risentire degli effetti provocati da eventi associati a strutture sismogenetiche più distanti rispetto a quelle appena citate, come avvenuto nel caso dei sismi del maggio 2012 originati dalle sorgenti composite ITCS050, ITCS051 e ITCS103.

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, il territorio occupato dall'Unione dei Comuni Valli e Delizie ricade dentro alla Zona 912, caratterizzata da un valore di  $M_{w_{max}}$  pari a 6.14 (Figura 2-5).

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

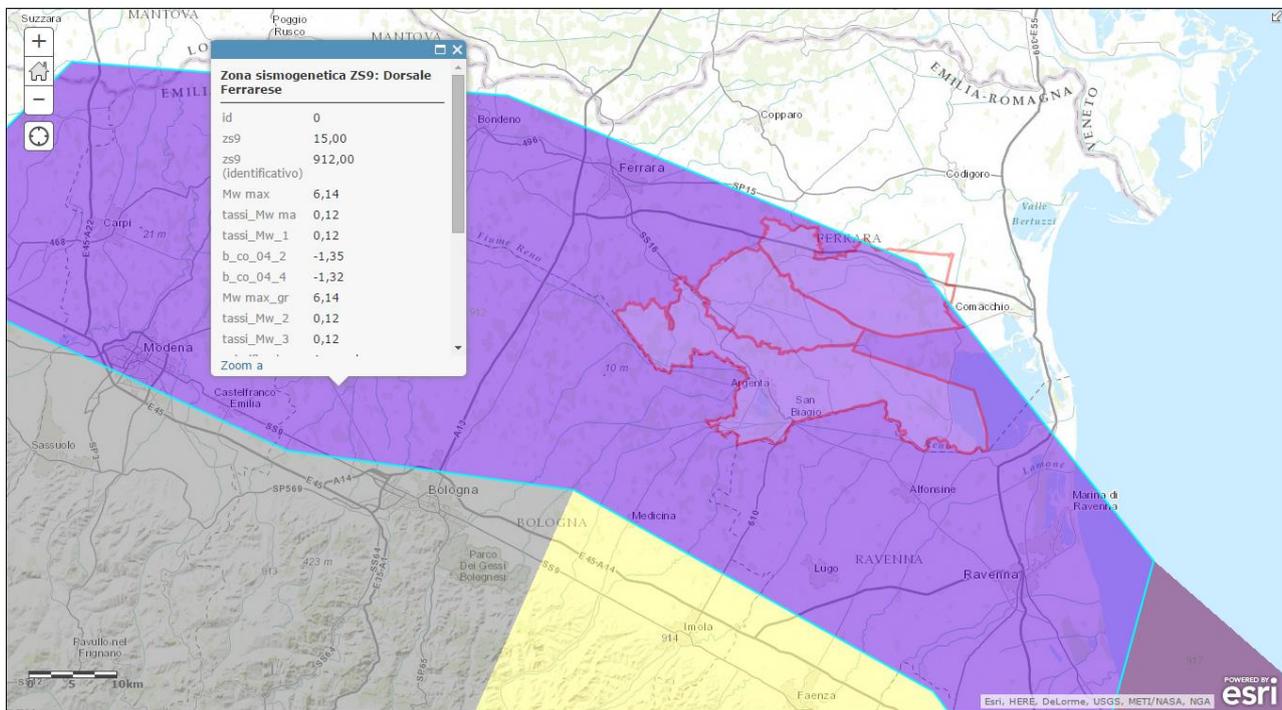


Figura 2-5 - Ubicazione del territorio occupato dall'Unione Valli e Delizie (in giallo) rispetto alla zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

### 3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Nei paragrafi seguenti verranno dapprima delineati i caratteri geografici e geomorfologici dell'area in esame, per poi descriverne l'assetto geologico-strutturale e le caratteristiche litostratigrafiche, sottolineando, con maggior dettaglio, l'evoluzione delle successioni sedimentarie del Quaternario Superiore, che costituiscono generalmente le prime centinaia di metri di sottosuolo dell'Unione, con spessori variabili passando dalle zone di alto strutturale e quelle di sinclinale (v. Allegato 1- Sezione 95).

#### 3.1 Quadro geografico e geomorfologico

Il territorio dell'Unione Valli e Delizie è situato nel settore centro-meridionale della pianura ferrarese. I corsi d'acqua attualmente presenti nell'area sono il fiume Reno, che attraversa il settore sud-occidentale, il Po di Primaro nella porzione occidentale, ed il Po di Volano che

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

lambisce a nord l'area di studio. Nonostante la denominazione, il Volano ed il Primaro sono in realtà canali di drenaggio oggi completamente scollegati dalle rete attiva del fiume Po.

Una fitta rete di canali, fosse e scoli artificiali completa il reticolo idrografico, la cui gestione è affidata ai consorzi di bonifica. Essi regolano lo scolo artificiale, la derivazione, il prelievo e la distribuzione delle acque, a fini irrigui e per usi diversi, e provvedono al corretto funzionamento delle opere di bonifica idraulica.

L'attuale aspetto morfologico dell'area, come per la maggior parte della pianura emiliano-romagnola, è stato pesantemente influenzato dall'attività dell'uomo attraverso opere di regimazione, arginatura e modificazione dei tracciati fluviali, sin dall'antichità, ma con particolare intensità a partire dalle grandi bonifiche idrauliche per sollevamento meccanico, avviate nella seconda metà del XIX secolo e completate solo dopo la Seconda Guerra Mondiale. Nonostante l'apparente omogeneità, l'area di studio mostra un articolato microrilievo e può essere suddivisa, dal punto di vista altimetrico, in tre distinti settori: il settore di sud-ovest, quello centro-settentrionale e quello orientale (Figura 3-1).

Il settore sud-occidentale (Figura 3-1 "A") è limitato a nord dal corpo di paleoalveo del Po di Primaro, di età medievale, ed è solcato dai dossi fluviali del Reno di origine recente, che mostrano un prevalente orientamento Est-Ovest. I dossi hanno quote comprese tra 4 e 14 m s.l.m, anche se le quote più elevate si osservano in corrispondenza degli argini artificiali del Reno, mentre quelle minori sono presenti nelle aree di piana inondabile e di "valle", ad occidente di Argenta e a sud di Marrara.

Il settore centro-settentrionale (Figura 3-1 "B") è caratterizzato da quote comprese tra 5 e 0 m s.l.m. ed è dominato dai dossi di paleoalveo dai canali distributori del delta del Po, di età protostorica e storica. Le quote maggiori si osservano in corrispondenza degli antichi dossi del Po di Primaro e del Po di Volano, di età medievale, mentre le quote minori sono situate nelle aree di intercanale. L'orientazione dei dossi è molto varia, anche se prevale un andamento Nord Ovest-Sud Est.

Il settore orientale (Figura 3-1 "C") appare topograficamente più depresso, ed è costituito da ampie aree interdistributrici occupate da specchi d'acqua fino oggi bonificati (Valle del Mezzano, Valle del Mantello e Valle di Argenta). Le quote topografiche sono generalmente sotto il livello del mare, con valori compresi tra 0 e -4 m s.l.m.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

La particolare conformazione morfologica del territorio fa sì che il dosso di paleoalveo del Po di Primaro rappresenti uno di spartiacque superficiale. Ad ovest di questo, infatti, i corsi d'acqua sono fatti fluire artificialmente nel Reno e nello stesso Primaro.

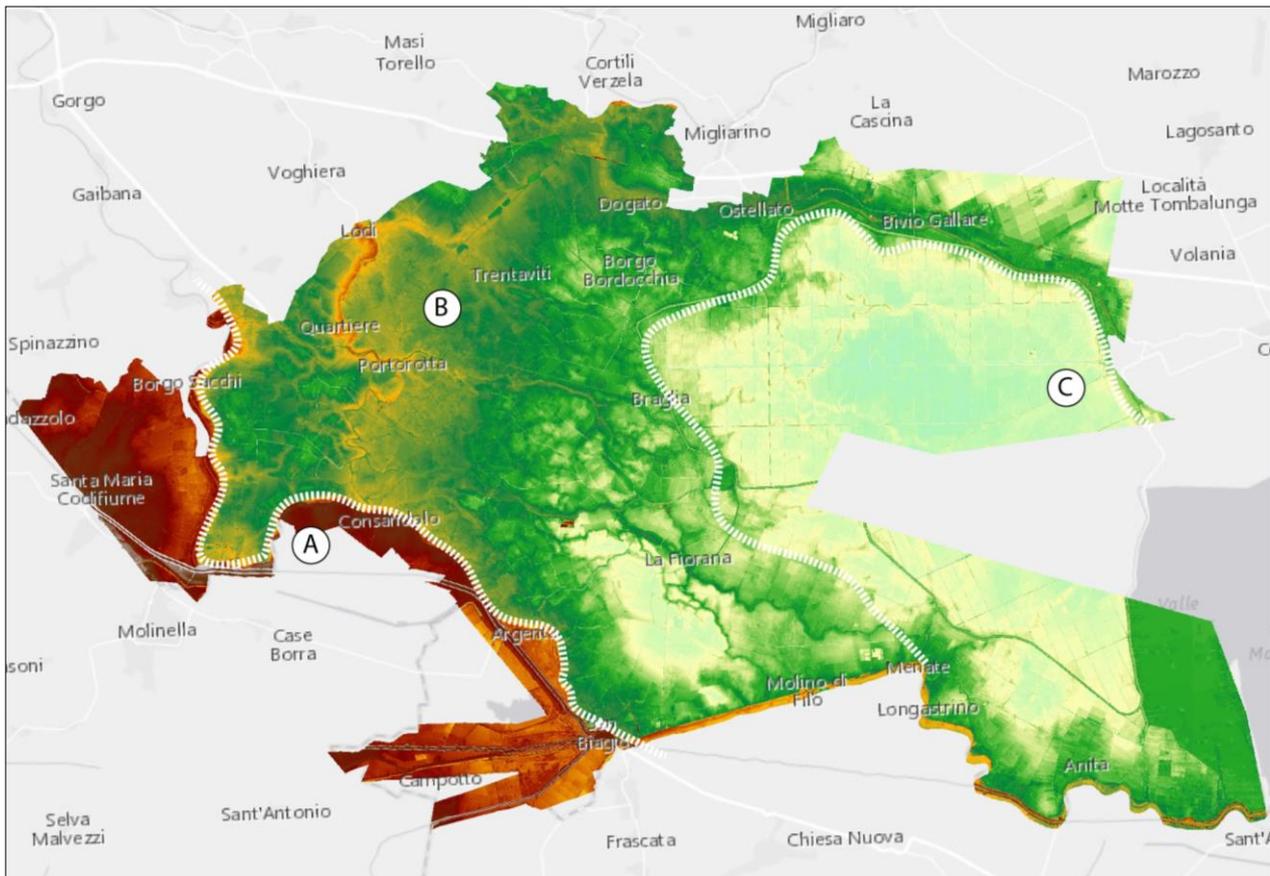


Figura 3-1 - Modello altimetrico Lidar del territorio dell'Unione Valli e Delizie. Nel settore sud-occidentale (A) le quote topografiche sono comprese tra 4 e 14 m s.l.m, mentre nel settore centro-settentrionale (B) esse variano tra 5 e -1 m s.l.m ed, infine, nel settore orientale (C) sono sempre sotto il livello del mare, comprese tra 0 e -4 m s.l.m.

### 3.2 Contesto geologico stratigrafico

Nell'area oggetto di questo studio di zonazione sismica, affiorano esclusivamente sedimenti di pianura alluvionale e deltizia di età molto recente, attribuibili alla parte superiore dell'Olocene e corrispondenti al Subsistema di Ravenna (AES<sub>3</sub>) della cartografia geologica ufficiale della Regione Emilia-Romagna (v. Foglio 203 "Poggio Renatico", Foglio 204 "Portomaggiore", Foglio 205 "Comacchio"). Nel sottosuolo, sono presenti potenti successioni

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

quaternarie, dominate da litotipi argillosi e, subordinatamente, sabbiosi. Queste successioni registrano globalmente un'evoluzione paleoambientale da condizioni di mare aperto e relativamente profondo ad ambienti continentali. L'architettura deposizionale di queste successioni registra sia le grandi fluttuazioni climatiche ed eustatiche quaternarie sia l'attiva deformazione tettonica sindeposizionale. Queste unità si sono sedimentate nella parte sud-orientale del bacino di avanfossa della Pianura Padana. Questa parte corrispondente alla porzione settentrionale della Catena Appenninica sepolta, caratterizzata pieghe e sovrascorrimenti attivi.

L'assetto strutturale di questa regione è stato esplorato con rilievi gravimetrici e numerosi profili sismici a riflessione, realizzati per la ricerca di idrocarburi, da ENI-AGIP e altre compagnie petrolifere, prevalentemente fra gli anni '50 e '60. Queste ricerche sismiche hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti a geometria planimetrica arcuata e vergenza nord-occidentale (Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002; Pieri & Groppi, 1975, 1981). Nella porzione più esterna della Catena Appenninica, oggetto di queste ricerche, sono sviluppati due grandi archi di pieghe anticlinali e sovrascorrimenti, con concavità rivolta verso il margine appenninico (Pieri & Groppi, 1975), denominati, ad ovest, "Arco delle Pieghe Emiliane" ed ad est "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole".

Questo fascio di pieghe e faglie tende a rastremarsi verso sud-est, dove continua nelle strutture sviluppate sotto il Mare Adriatico. L'arco orientale delle pieghe appenniniche può essere suddiviso in tre fasci strutturali minori, dette "Pieghe Ferraresi", "Pieghe Romagnole" e "Pieghe Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990); le Pieghe Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "*Ferrara Folds*" di Pieri & Groppi, 1981) sono le strutture più settentrionali ed avanzate della catena sepolta (Figura 3-2).

Le Pieghe Ferraresi sono limitate a sud da un'ampia area sinclinale e da una fascia di pieghe e sovrascorrimenti sepolti, più prossima al margine appenninico e ad esso sub-parallela, con direzione assiale prevalente N 110° ("Pieghe Romagnole" in Pieri & Groppi, 1981). Al bordo dell'area indagata, si passa ad una monoclinale di avampaese, relativamente poco deformata, che si sviluppa sotto l'attuale Delta del Po e la pianura Veneta, fino ad incontrare le strutture compressive a pieghe e faglie delle Alpi Meridionali.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

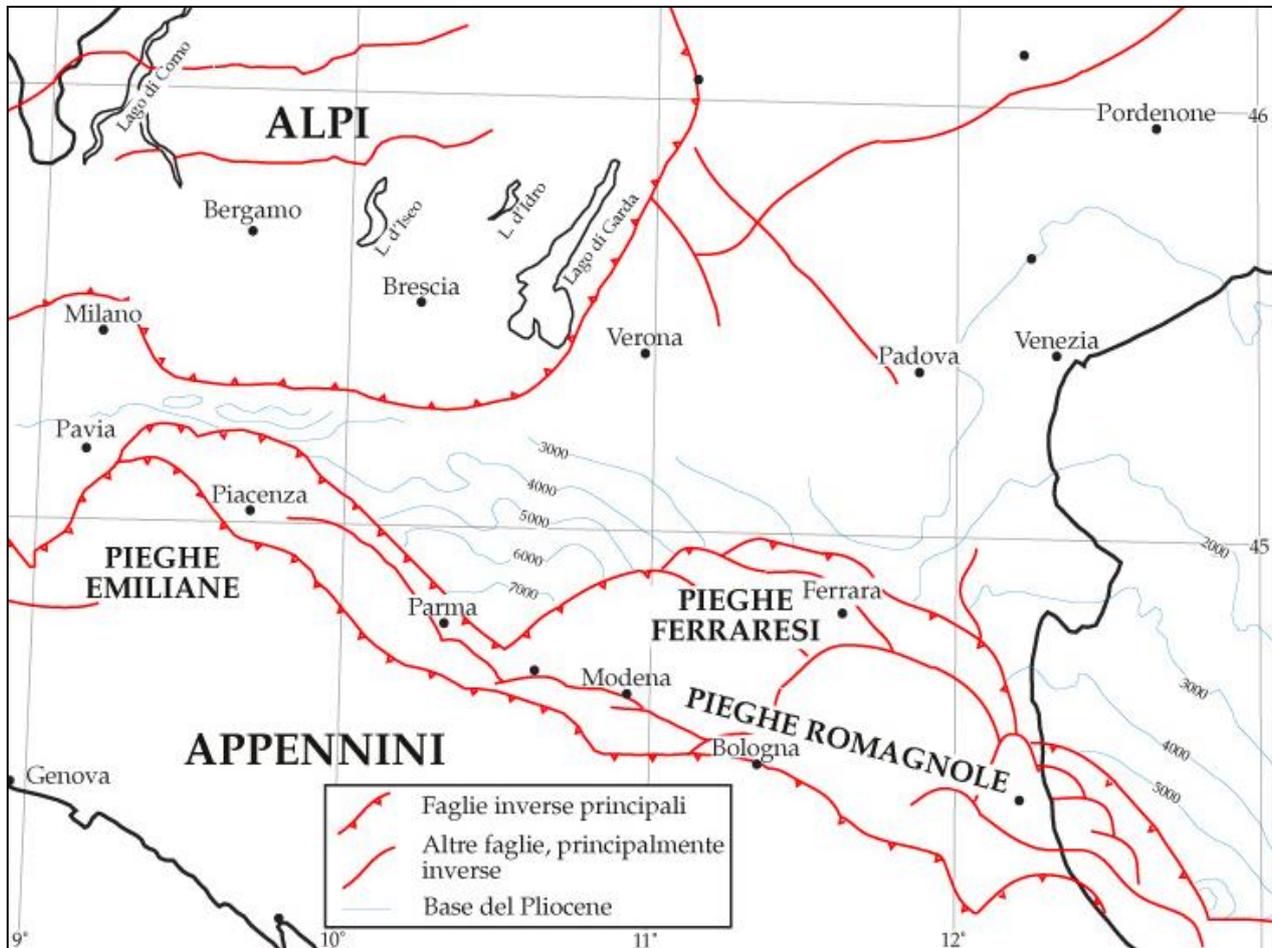
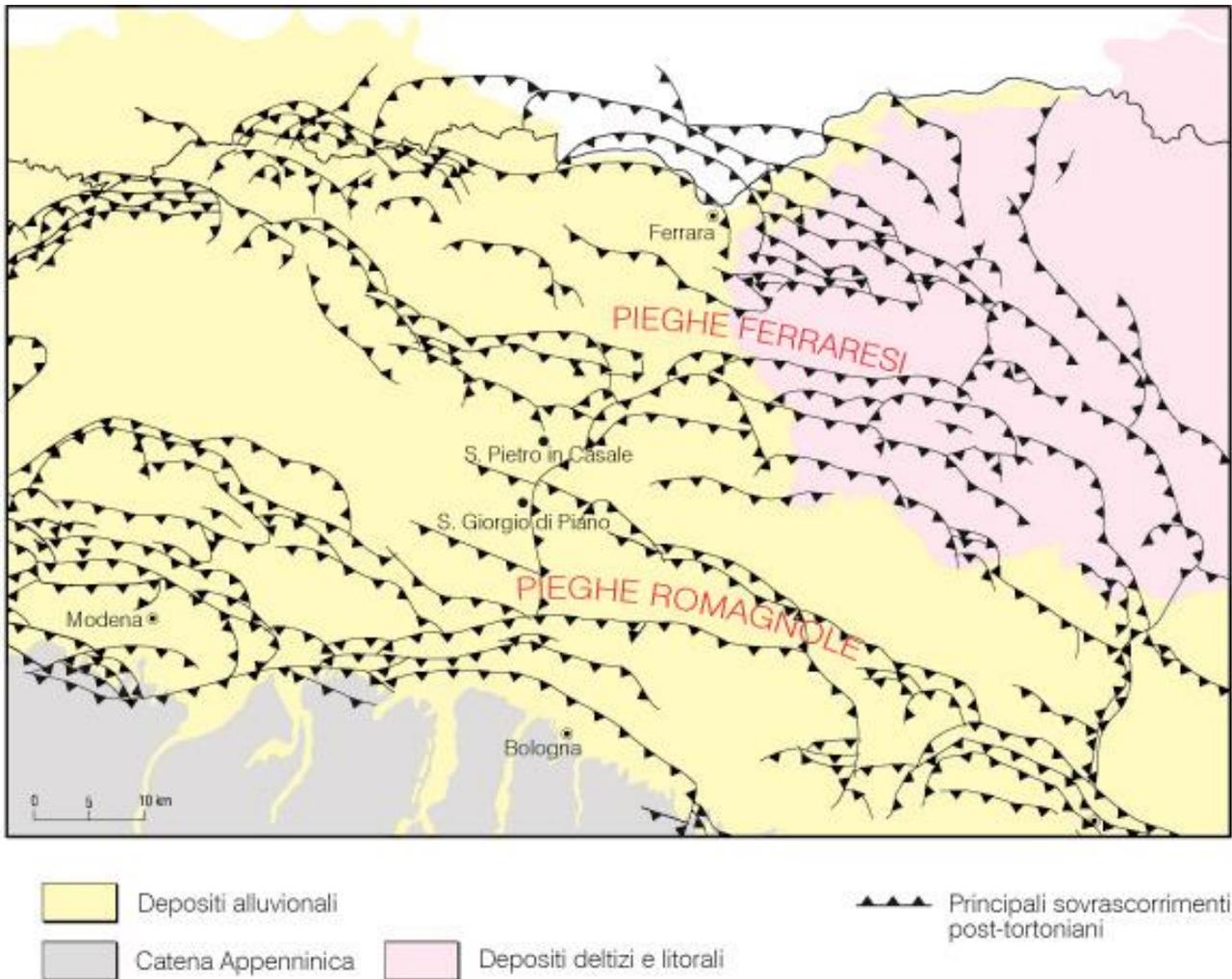


Figura 3-2 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana (da Pieri & Groppi, 1975). Le linee blu rappresentano le isobate della base del Pliocene. Modificata da Burrato *et al.*, 2003.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE



**Figura 3-3 - Inquadramento tettonico che mostra la complessità delle strutture dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203, Poggio Renatico.**

Nell'area analizzata in dettaglio, le strutture dell'Appennino sepolto coinvolgono le unità della copertura meso-cenozoica e spesse successioni plio-pleistoceniche sintettoniche. L'evoluzione temporale di queste complesse strutture compressive ha registrato l'avanzamento verso l'avampese della deformazione del margine appenninico. Nella fascia prossima all'attuale piede dell'Appennino affiorante, nessuna faglia sembra coinvolgere la base dei depositi quaternari che sigillano strutture fragili che paiono attive fino al tetto del Pliocene. Nelle strutture più avanzate, la base dei depositi quaternari è invece tagliata da strutture fragili e ciò testimonia un progressivo avanzamento della deformazione tettonica verso la parte più esterna dell'arco ed il margine frontale della catena appenninica sepolta (es. Picotti &

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Pazzaglia 2008; Toscani *et al.*, 2009). I singoli fasci strutturali sono stati soggetti a fasi parossistiche (Farabegoli *et al.*, 1997; Ricci Lucchi, 1986; Ricci Lucchi *et al.*, 1982), della durata di poche centinaia di migliaia di anni (es. Tortoniano superiore, Messiniano superiore, Pliocene inferiore e medio, Pleistocene inferiore). Queste fasi hanno indotto superfici di discordanza e di riarrangiamento dell'architettura deposizionale, che permettono di suddividere i potenti corpi sedimentari in una serie di grandi unità stratigrafiche a limiti inconformi, quali Supersintemi e Sintemi.



**Figura 3-4 - Domini tettonici dalla Dorsale Appenninica alla Pianura Veneta. Profilo geologico esemplificativo secondo l'interpretazione di Toscani *et al.*, 2009.**

L'architettura stratigrafica dei depositi plio-quadernari fu quindi molto influenzata dalla deformazione di queste fasce di sovrascorrimenti sepolti e presenta quindi spessori massimi nelle depressioni strutturali e minimi sulle anticlinali sepolte (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a; b; Di Dio & Caporale, 1998). La presenza di un'attiva deformazione compressiva ha prodotto tassi di subsidenza arealmente fortemente differenziali, differenze progressivamente accentuate dal diverso potenziale di compattazione delle spesse successioni delle aree di sinclinali o quelle, più sottili e lacunose, delle aree di anticlinale. L'attività delle strutture sepolte più esterne determina un forte controllo sull'evoluzione deposizionale e la precoce deformazione plastica dei sedimenti recenti, oltre ad innescare fenomeni perturbativi dei sedimenti stessi, come la liquefazione cosismica delle sabbie. Il contrasto strutturale influenza anche la risposta sismica locale e la profondità del "substrato rigido", come verificato dalle indagini effettuate anche durante lo svolgimento di questo lavoro.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

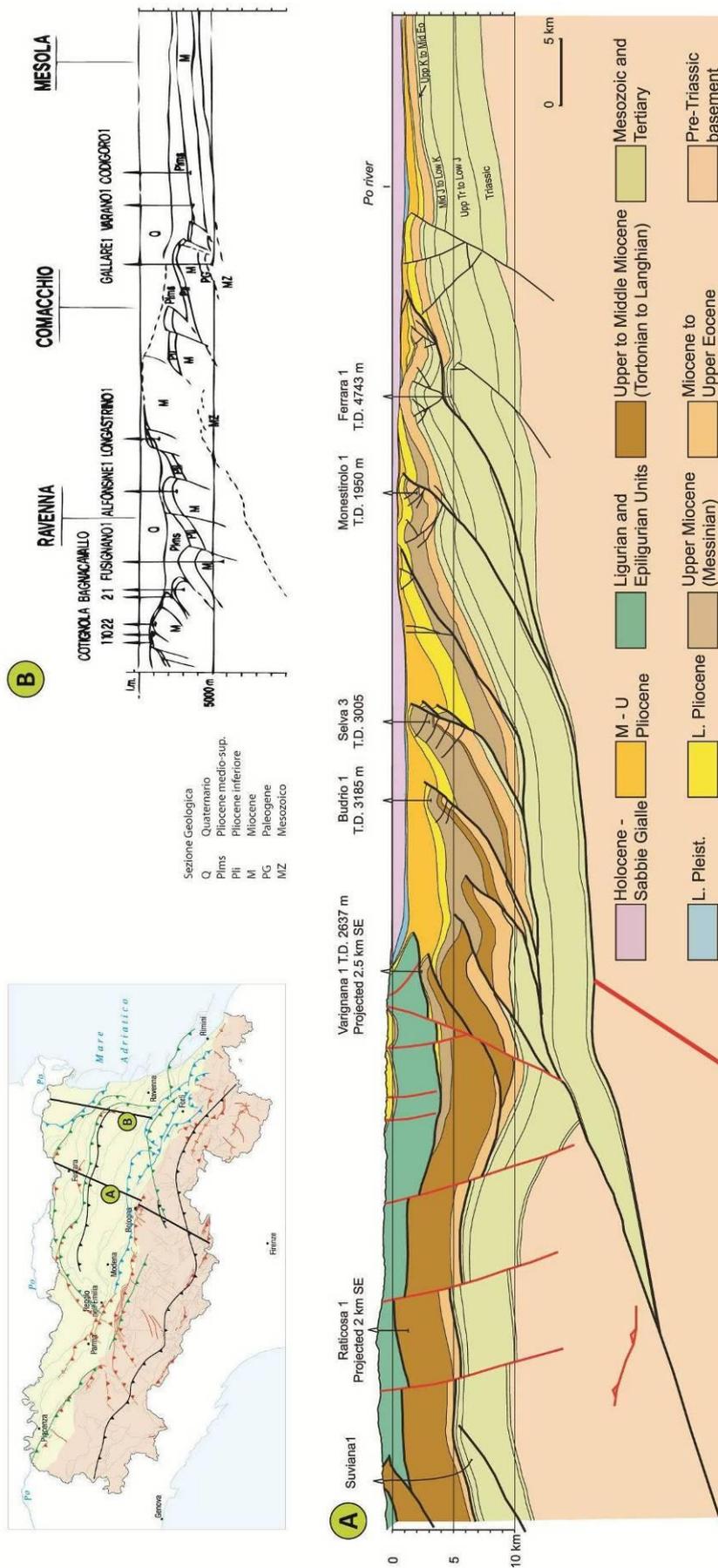


Figura 3-5 - Contesto strutturale della porzione emiliano-Romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) da Pieri & Groppi, 1981 mentre la sezione inferiore (A) da Toscani *et al.*, 2009.

### 3.3 Evoluzione generale delle successioni del Quaternario Superiore

L'architettura deposizionale delle successioni quaternarie è stata, dunque, fortemente influenzata dalla coeva deformazione tettonica, molto attiva in questa porzione del bacino sedimentario Padano, ancora oggi caratterizzata da un'attività sismica relativamente frequente. Durante il Quaternario Superiore, l'area indagata ha registrato elevati tassi di sedimentazione, indotti dalla combinazione tra la rapida subsidenza e gli ingenti apporti terrigeni, accumulati sia dal fiume Po che da fiumi provenienti dalla vicina catena appenninica. Le due sorgenti di sedimento sono ben documentate anche nei depositi di superficie, ove i sedimenti di Po dominano la parte centro-settentrionale dell'area indagata e quelli di origine appenninica la parte meridionale. Nel sottosuolo sono molto probabili anche subordinati apporti di fiumi di origine veneta, come l'Adige. I sedimenti di Po sono caratterizzati dalle frazioni di origine alpina, ricche di rocce intrusive e metamorfiche. I fiumi di origine appenninica sono caratterizzati da un carico sedimentario particolarmente elevato, legato alla rapida erosione di litotipi terrigeni quali argille marine plioceniche, spesso poco litificate, complessi caotici liguridi, le successioni torbiditiche flyscoidi.

Nonostante la rapida subsidenza, particolarmente elevata nelle aree di sinclinale come quella di Campotto, le successioni stratigrafiche quaternarie registrano sempre un andamento marcatamente *shallowing*, con il passaggio da ambienti sedimentari marini aperti e profondi, a condizioni di pianura alluvionale o deltizia. Questa evoluzione sedimentaria fu influenzata dai grandi cicli trasgressivo regressivi, indotti dalle fluttuazioni climatiche e glacio-eustatiche del Quaternario. Unità marine si intercalano perciò ripetutamente a corpi continentali, separati da superfici di discordanza stratigrafica. Le superfici maggiori, spesso associate a discordanze angolari, sono controllate dalle fasi parossistiche di deformazione, che hanno caratterizzato in tempi diversi le strutture tettoniche migranti verso l'avampaese. Superfici minori, comunque marcate, sono state generate da fluttuazioni climatiche e glacio-eustatiche, con una frequenza temporale intorno ai 100.000 anni. Le superfici di discontinuità maggiore delimitano i Sintemi adottati dalla cartografia della Regione Emilia-Romagna e anche qui utilizzati. Le superfici di discordanza minori delimitano invece i Subsintemi. Durante le fasi glaciali, il livello marino stazionava a quote inferiori di circa 120 m rispetto all'attuale e le masse glaciali occupavano gran parte delle valli alpine, sboccando direttamente nella Pianura Padana, mentre i rilievi

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

emergenti dalle coltri glaciali si trovavano in condizioni di diffusa resistasia. In queste condizioni, il Po era frequentemente in grado di alimentare ampi sistemi di fiumi a treccia, con sabbie grossolane, talvolta ghiaiose. L'insieme di questi fattori permetteva ai fiumi singlaciali di depositare sedimenti assai più grossolani di quelli delle fasi interglaciali, con ghiaie e ciottoli allo sbocco della valli e grandi volumi di sabbie e sabbie limose attraverso la pianura alluvionale.

L'accumulo di ghiaccio fu molto più modesto nell'Appennino Settentrionale. Le condizioni climatiche limitavano però, anche qui, la copertura forestale, per cui la catena si trovava spesso in regime di resistasia. Anche i fiumi appenninici singlaciali erano perciò in grado di riversare nel Bacino Padano grandi volumi di sedimenti. Alle fasi glaciali seguiva un rapido scioglimento dei ghiacciai montani, con una veloce risalita del livello marino e diffusa trasgressione.

Durante le ultime centinaia di migliaia di anni, le fasi di massima trasgressione portavano alla deposizione, nell'area indagata, di depositi marini, seguiti da successioni regressive deltizie e continentali. L'evoluzione globalmente regressiva delle successioni ha però fatto sì che durante l'ultimo periodo interglaciale e poi, durante l'Olocene, le facies marine interessassero solo la porzione orientale dell'area considerata. Il tetto dei depositi singlaciali è spesso assai netto, specie nell'area interessata dai sedimenti di Po, mentre risulta meno marcato nell'area meridionale, soggetta esclusivamente ad apporti di origine appenninica, ove è comunque evidente l'alternanza di sedimenti granulari grossolani e coesivi fini.

## 4 Dati geotecnici e geofisici

I dati utilizzati in questo studio sono stati ricavati da indagini sia di tipo diretto sia di tipo indiretto.

Per quanto concerne i metodi di analisi diretta del sottosuolo, sono state esaminate le stratigrafie provenienti sia da sondaggi a carotaggio continuo, sia da sondaggi a distruzione di nucleo, realizzati per la perforazione dei pozzi per acqua e pozzi per esplorazione e sfruttamento di giacimenti di idrocarburi.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

In relazione ai sistemi d'indagine indiretta, sono stati analizzati log parametrici derivanti da prove penetrometriche statiche (CPT) e con piezocono digitale (CPTU e SCPTU), oltre ai rapporti di prova provenienti da indagini di tipo geofisico come HVSR, MASW, ESAC e DOWN HOLE.

Le ubicazioni delle prove utilizzate per lo studio di microzonazione sismica localizzate entro gli ambiti di studio, sono riportate nelle carte delle indagini – scala 1:10.000 (Tavole 1a – 1b – 1c – 1d) descritte al paragrafo 8.1. Nelle banche dati delle indagini sono comunque presenti tutte le indagini utilizzate, anche quelle al di fuori degli ambiti.

#### 4.1 Indagini di repertorio

Come prima fase dello studio di microzonazione sismica si è provveduto al reperimento delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili per i territori comunali di Argenta, Ostellato e Portomaggiore. Questa attività ha portato all'acquisizione della banca dati geognostica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, alla sua integrazione coi dati presenti negli archivi di Geotema S.r.l. e quindi alla raccolta di tutti i dati di sottosuolo utili disponibili presso gli archivi comunali e di alcuni professionisti geologi, che su richiesta hanno fornito i singoli rapporti di prova, con particolare riguardo a quelli derivanti da indagini realizzate a supporto della pianificazione territoriale e delle pratiche edilizie.

L'approfondito lavoro di ricerca negli archivi ha consentito di aggiungere alle 1.274 indagini derivanti dalla banca dati regionale, ben 738 prove pregresse realizzate nell'ultimo decennio nei territori dei tre Comuni appartenenti all'Unione Valli e Delizie, di cui 215 provengono dalla banca dati di Geotema S.r.l.

Da ultimo sono stati consultati dati di sottosuolo ubicati in comuni limitrofi e posti breve distanza dai confini dell'Unione. Pur non essendo inseriti nelle banche dati, né riportati in carta (cfr. Tavole 1a – 1b – 1c – 1d), tali dati sono risultati utili per integrare le conoscenze relative all'area di studio.

Tipologia di prova	Argenta	Ostellato	Portomaggiore
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	506	333	351
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	4	-	-

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

(CPTe)			
Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)	118	87	57
Prove penetrometriche in foro (SPT)	-	-	1
Prove penetrometriche dinamiche super pesanti (DS)	-	-	2
Prove penetrometriche con cono sismico (SCPT)	1	7	1
Prove dilatometriche (DMT)	-	1	-
Sondaggi a carotaggio continuo (S)	32	85	91
Sondaggi a distruzione di nucleo (SD)	35	2	10
Pozzi per acqua (PA)	47	18	20
Pozzi per idrocarburi (PI)	109	4	1
Misure di microtremore a stazione singola (HVSR)	57	3	4
Array sismico (ESAC-SPAC)	-	1	-
Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	13	2	6
Prova REfraction MIcrotremor (ReMi)	-	3	-

**Tabella 4-1 - Numero di indagini pregresse utilizzate per lo studio, suddivise per tipologia.**

In Tabella 4-1 si riporta una sintesi delle indagini pregresse utilizzate nello studio di microzonazione, suddivise per numero e tipologia.

Le indagini ritenute affidabili sono state raccolte, organizzate e archiviate in una banca dati informatizzata e georeferenziata in ambiente GIS ESRI, la cui struttura risponde alle specifiche indicate dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (D.P.C.) per gli studi di microzonazione sismica. Un archivio informatizzato consente di strutturare e sistematizzare il patrimonio informativo disponibile, al fine di renderlo più facilmente consultabile, fruibile ed aggiornabile. La struttura della banca dati consente, inoltre, di associare al dato geografico (sito d'indagine) degli attributi alfanumerici relativi alle diverse prove realizzate come, ad esempio, profondità indagata, livello della falda, spessore degli orizzonti rilevati, ed altro. Oltre a ciò, ad ogni prova archiviata è possibile associare i propri parametri tecnici come, ad esempio, lettura di resistenza alla punta, valori di Vs misurati o frequenze di risonanza.

Per l'archiviazione della mole di dati acquisiti si è fatto ricorso all'applicativo software SoftMS versione 3.0, messo a disposizione dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (D.P.C.). Attraverso maschere dedicate il software consente l'inserimento dei dati all'interno di tabelle costituite da un insieme di record, gerarchicamente organizzate in modo da memorizzare in maniera indipendente le informazioni legate al sito di indagine, alle prove in esso realizzate ed ai parametri tecnici di ognuna di queste.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Nonostante la profondità d'indagine spesso non molto elevata, l'abbondanza e la distribuzione delle indagini geognostiche pregresse ha consentito la ricostruzione di un quadro litostratigrafico tutto sommato chiaro e di buona correlabilità generale, almeno per quanto concerne i terreni più superficiali. Molto meno numerose sono invece risultate le indagini geofisiche pregresse, volte ad accertare la profondità del *bedrock* sismico ed a misurare la velocità delle onde di taglio nei primi trenta metri di sottosuolo ( $V_{s30}$ ).

### 4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

Allo scopo di caratterizzare dal punto di vista geomeccanico e geofisico le aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche negli strumenti di pianificazione comunale, sono state realizzate specifiche campagne di indagini. Le nuove indagini hanno comunque interessato anche gli ambiti urbanizzati consolidati in cui, al termine della fase di raccolta dei dati pregressi si è evidenziata una carenza di informazioni di sottosuolo utili allo studio di microzonazione sismica.

Ai fini dello studio sono, dunque, state eseguite:

- 18 Prove penetrometriche statiche con piezocono digitale (CPTu);
- 20 *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW);
- 144 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr);
- 3 *Array* sismici (ESAC).

In seguito vengono descritte le metodologie di esecuzione e di analisi di tali prove, di cui vengono riportati in formato tabellare i principali dati e risultati, unitamente ai codici identificativi originali e a quelli assegnati in seguito all'archiviazione in banca dati.

#### 4.2.1 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)

Le prove penetrometriche di tipo statico consentono di risalire, mediante correlazioni empiriche, alla natura dei corpi sedimentari presenti nel sottosuolo analizzando il rapporto tra resistenza alla penetrazione ( $q_c$ ) ed attrito laterale ( $f_s$ ) prodotto da una punta conica spinta nel terreno a velocità costante.

Tramite penetrometro dotato di punta elettrica a piezocono (CPTU - *Cone Penetration Test with Pore Pressure measurement*), collegata mediante cavo elettrico ad una unità di acquisizione in

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

superficie, è possibile misurare anche il valore della pressione interstiziale ( $u$ ) presente tra i pori dei sedimenti, in modo da determinare la trasmissività idraulica dei corpi sedimentari indagati.

Questa tecnica consente di discriminare meglio i terreni a scarsa permeabilità e bassa resistenza, oltre a fornire un maggior dettaglio stratigrafico dovuto all'acquisizione in automatico del dato ad ogni centimetro di avanzamento.

Le indagini sono state eseguite mediante penetrometro statico *Deep Drill*, con spinta massima nominale da 12 tonnellate, montato su carrello rimorchio Cresci, equipaggiato di punta elettrica con piezocono Tecnopenta modello G1-CPL2IN matricola 201114, avente superficie di 10 cm<sup>2</sup>, angolo di conicità 60°, manicotto laterale con diametro 36 mm e area laterale di 150 cm<sup>2</sup>.

Le prove penetrometriche realizzate per lo studio di microzonazione sono state ubicate all'interno degli ambiti urbanizzati e di previsione urbanistica, tenendo conto sia delle necessità di pianificazione comunali, sia della distribuzione e delle caratteristiche del dato geologico disponibile. Per quanto concerne gli aspetti geologici, si è tentato di individuare e caratterizzare parametricamente i principali corpi sabbiosi superficiali, la cui presenza nelle aree di studio era già nota attraverso dati di bibliografia.

Le indagini penetrometriche hanno, dunque, interessato le località riportate in Tabella 4-2.

Prova	ID_SPU	Latit.	Long.	Località	data
CPTU1	038017P59150	44,7487	11,8896	Dogato - v. Mazzini	25/09/2014
CPTU2	038017P59151	44,7457	11,9393	Ostellato - v. Chizzolin	25/09/2014
CPTU3	038017P59152	44,7286	12,0472	San Giovanni - v. Kennedy	25/09/2014
CPTU4	038017P59153	44,7739	11,8725	Medelana - v. Cavallotti	24/09/2014
CPTU5	038017P59154	44,7552	11,8734	San Vito - v. Ferrara	25/09/2014
CPTU6	038019P59231	44,6942	11,8169	Portomaggiore - v. Poerio	24/09/2014
CPTU7	038019P59232	44,7225	11,8301	Maiero - v. Farolfa	24/09/2014
CPTU8	038019P59233	44,7019	11,7824	Portorotta - v. delle Anime	24/09/2014
CPTU9	038001P59741	44,5665	12,0759	Anita - v. Guerra	07/10/2014
CPTU10	038001P59742	44,5913	12,0094	Longastrino - v. Cantone	07/10/2014
CPTU11	038001P59752	44,5714	11,7946	Campotto - v. Cardinala	30/10/2014
CPTU12	038001P59753	44,6160	11,8295	Argenta - v. Matterotti	30/10/2014
CPTU13	038001P59754	44,6447	11,8850	Bando - v. Spina	30/10/2014

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

<b>CPTU14</b>	038001P59758	44,6521	11,7736	Consandolo – v. Cavo Spina	09/10/2014
<b>CPTU15</b>	038001P59759	44,6563	11,7757	Consandolo – v. Salvatori	09/10/2014
<b>CPTU16</b>	038001P59760	44,6624	11,6488	S. M. Codifume – v. Terranova	09/10/2014
<b>CPTU17</b>	038001P59761	44,6821	11,7390	Benvignante – str. Nazionale	09/10/2014
<b>CPTU18</b>	038001P59755	44,6411	11,8006	Boccaleone – v. Pozze Androna	16/10/2014

**Tabella 4-2 - Principali dati associati alla prove penetrometriche di nuova esecuzione. Le coordinate sono espresse in gradi decimali riferiti all'ellissoide WGS 84.**

Tutte le prove CPTU sono state spinte fino alla profondità massima di 20 metri, spessore entro il quale possono verificarsi fenomeni di liquefazione cosismica in presenza di terreni granulari poco addensati e saturi in acqua.

Sulla base di consolidate correlazioni empiriche, dai dati penetrometrici ( $q_c$ ,  $f_s$ ) delle indagini sono stati ricavati i principali parametri tessiturali e meccanici dei terreni attraversati, al fine di definire i caratteri litostratigrafici e geotecnici dei sedimenti presenti nelle aree indagate.

I valori di  $q_c$  e  $f_s$ , unitamente ad altri parametri, sono stati utilizzati anche per eseguire la verifica del potenziale di liquefazione mediante metodi semplificati, come approfonditamente trattato al paragrafo 7.2.1. Nei rapporti di prova allegati allo studio di microzonazione sismica sono riportati, in forma tabellare e grafica, i dati relativi alla successione litostratigrafica indagata ed i principali parametri fisico-meccanici e geotecnici dei terreni che la costituiscono.

#### 4.2.2 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)

La stima dell'amplificazione stratigrafica richiede la conoscenza della velocità di propagazione delle onde di taglio volumetrico ( $V_s$ ) nei primi 30 metri di sottosuolo. Per ottenere un maggior numero di registrazioni di tale parametro sul territorio vengono, di norma, utilizzate misure di tipo indiretto, in quanto più economiche e di rapida realizzazione rispetto ad acquisizioni effettuate mediante tecniche di tipo diretto. Il metodo *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) è una tecnica di indagine geofisica non invasiva che stima il profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) alle varie profondità, basandosi sulla registrazione delle onde di superficie effettuata da sensori collocati temporaneamente sulla superficie del terreno. Questa tecnica restituisce una modellazione del sottosuolo sfruttando il fenomeno della **dispersione geometrica** delle onde di *Rayleigh*, onde di superficie ad oscillazione ellittico - retrograda,

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

attraverso le quali si propaga gran parte dell'energia meccanica liberata da una sorgente impulsiva alla superficie topografica.

Come noto, in un mezzo elastico ideale, omogeneo ed isotropo, la velocità di propagazione delle onde di *Rayleigh* è indipendente dalla frequenza e ciò implica che alle diverse lunghezze d'onda corrisponda la stessa velocità di fase ( $V_R$ ). Le onde di *Rayleigh* assumono invece un comportamento dispersivo in un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito da strati con proprietà meccaniche diverse. Ad ogni lunghezza d'onda corrisponde, in questo secondo caso, una determinata velocità di fase che varia al variare delle caratteristiche meccaniche dello strato interessato dalla propagazione delle onde meccaniche. Dalla lunghezza d'onda dipende anche la profondità di sottosuolo raggiunta dalla perturbazione oscillatoria; in particolare, all'aumentare della lunghezza d'onda  $\lambda$ , aumenta la profondità del sottosuolo interessato dalla propagazione dell'onda stessa. Ne deriva che le componenti a frequenza più bassa, con  $\lambda$  e velocità di fase più grandi, penetrano a profondità maggiori e sono quindi influenzate da strati più lontani dalla superficie topografica rispetto a quelle a frequenza più alta, con  $\lambda$  e velocità di fase minori, che risentono solo delle proprietà dei livelli superficiali.

L'andamento delle velocità di fase in funzione della lunghezza d'onda o della frequenza è detta curva di dispersione. Dall'analisi della curva di dispersione è possibile risalire alla distribuzione verticale monodimensionale di  $V_s$  nel sottosuolo, utilizzando la semplice relazione algebrica:

$$V_R = \left( \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \right) V_s$$

dove  $V_R$  è la velocità di fase delle onde *Rayleigh* di superficie,  $V_s$  è la velocità delle onde volumetriche di taglio e  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.

La propagazione delle onde di *Rayleigh* in un mezzo verticalmente eterogeneo è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, sussistono diverse lunghezze d'onda alle diverse profondità. Di conseguenza, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Per discriminare i modi di vibrazione delle onde di *Rayleigh* e rappresentarne la relazione di dispersione, è necessario trasformare la rappresentazione del campo di moto dal dominio spazio-tempo al dominio frequenza-velocità di fase. Diverse metodologie di elaborazione consentono di estrarre dai sismogrammi acquisiti le caratteristiche dispersive del sito in esame. Tra le più diffuse vi è l'analisi spettrale in dominio di frequenza  $f$  (numero di oscillazioni nell'unità di tempo) e numero onda  $k$  (numero di onde nell'unità di lunghezza), che corrisponde ovviamente al reciproco della lunghezza d'onda e che dipende anche dalla velocità di propagazione spaziale dell'onda stessa (Strobbia, 2003). L'analisi spettrale del segnale di sito permette la definizione della curva di dispersione sperimentale attraverso la relazione:

$$V_R(f) = \frac{f}{k}$$

dove  $V_R$  è la velocità di fase delle onde *Rayleigh*,  $f$  è la frequenza e  $k$  il numero d'onda.

La curva di dispersione ottenuta, viene successivamente interpretata attraverso un processo di inversione che fornisce il profilo verticale della velocità delle onde volumetriche di taglio e quindi una stima della distribuzione monodimensionale della rigidità in funzione della profondità del sottosuolo. Questa inversione avviene comunemente attraverso procedure computazionali di affinamento del modello numerico del sottosuolo alla curva di dispersione ricavata dalle misure sul terreno. La procedura di modellazione numerica per tentativi computazionali (*trial and error*) consente di determinare un modello monodimensionale di sottosuolo, che interpreti la distribuzione di  $V_s$  in funzione della profondità stratigrafica. In tale modello, la curva di dispersione misurata viene confrontata con una curva di dispersione teorica progressivamente affinata fino a convergere sulla migliore riproduzione numerica del dato misurato (*best fitting computation*). La buona sovrapposizione fra queste due curve valida la compatibilità del modello di sottosuolo con le misure.

A supporto dello studio di Microzonazione Sismica sono state realizzate indagini MASW di tipo attivo; metodo in cui le onde meccaniche che inducono l'oscillazione nel sottosuolo vengono generate artificialmente e contestualmente misurate da stendimenti lineari di

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

sensori. Questa tecnica consente di ottenere una curva di dispersione sperimentale per frequenze generalmente maggiori di 4-5 Hz fornendo, quindi, informazioni sulle prime decine di metri di sottosuolo, informazioni utili alla determinazione dei valori di  $V_{S30}$ .

I dati acquisiti ed elaborati con le procedure sopra descritte sono stati, poi, confrontati e opportunamente tarati con i dati stratigrafici e litologici presenti in bibliografia (pozzi, sezioni stratigrafiche, ecc.) e con le curve HVSR misurate nei siti (paragrafo 4.2.3) in modo da vincolare le curve ottenute e derivare i valori di  $V_{S30}$ .

La campagna di indagini geofisiche con tecnica MASW è stata condotta dalla società Progeo S.r.l. di Forlì (FC), membro dell'Associazione Temporanea d'Imprese (ATI o RTI) assegnataria dell'incarico per il presente studio. Le 20 indagini geofisiche di tipo attivo sono state realizzate per la ricostruzione di profili verticali di  $V_s$  fino alla profondità di 30 metri, al fine di ottenere il valore del parametro di velocità media  $V_{S30}$ . Tale parametro permette di discriminare la categoria di sottosuolo per la definizione dell'azione sismica (N.T.C. 2008), ma è anche fondamentale per determinare i coefficienti di amplificazione sismica tramite gli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (D.A.L. 112/2007).

I principali dati relativi a queste prove sono di seguito riportati in

Tabella 4-3.

Prova	ID_SPU	Latit.	Long.	Località	data	$V_{S30}$
MASW 1	038017L6	44,7736	11,8729	Medelana - v. Cavallotti	19/09/2014	141
MASW 2	038017L7	44,7553	11,8748	San Vito - v. Ferrara	19/09/2014	172
MASW 3	038017L8	44,7495	11,8963	Dogato - Str. Imola	19/09/2014	189
MASW 4	038017L9	44,7428	11,9432	Ostellato - Str. Mezzano	19/09/2014	154
MASW 5	038017L3	44,7286	12,0496	S. Giovanni - area Sipro	19/09/2014	202
MASW 6	038019L7	44,7225	11,8302	Maiero - v. Farolfa	19/09/2014	156
MASW 7	038019L8	44,7396	11,7745	Runco - v. Runco Gambulaga	19/09/2014	163
MASW 8	038019L9	44,7108	11,7556	Quartiere - Str. Prafitta Bertolina	19/09/2014	179
MASW 9	038019L10	44,6985	11,8078	Portomaggiore - P.zza XX Settembre	20/10/2014	161
MASW 10	038019L11	44,6846	11,7782	Ripapersico - v. del Persico	20/10/2014	138
MASW 11	038019L12	44,6932	11,8351	Portoverrara - v. Portoverrara - San Carlo	25/09/2014	134

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

MASW 12	038001L14	44,6676	11,7005	Ospital Monacale – P.zza Bianchi	07/10/2014	179
MASW 13	038001L15	44,6341	11,6781	Molinella Zuccherificio – Str. Imperiale	07/10/2014	180
MASW 14	038001L16	44,6411	11,8008	Boccaleone – P.zza Cardinal Lercaro	07/10/2014	176
MASW 15	038001L17	44,6535	11,7777	Consandolo – v. Rimembranze	07/10/2014	191
MASW 16	038001L18	44,6447	11,8846	Bando – v. Spina	25/09/2014	127
MASW 17	038001L19	44,5844	11,8739	San Biagio – v. Buriona	25/09/2014	196
MASW 18	038001L20	44,5901	11,9285	Filo di Argenta – Oca Pisana	25/09/2014	127
MASW 19	038001L21	44,5854	12,0116	Longastrino – v. De Gasperi	25/09/2014	161
MASW 20	038001L22	44,5663	12,0761	Anita – v. Guerra	25/09/2014	176

**Tabella 4-3 - Sintesi dei dati principali associati alle 20 MASW realizzate nell'ambito dello studio di MS. Le coordinate sono espresse in gradi decimali riferiti all'ellissoide WGS 84.**

Le acquisizioni sono state effettuate tramite stendimento sismico di superficie di lunghezza pari a 57,5 m, composto da 24 geofoni da 4,5 Hz aventi interdistanza di 2,5 m.

Il sismografo utilizzato è un dispositivo modulare a 24 canali GEODE (Geometrics); l'intervallo di campionamento è stato selezionato a 0,5 millisecc e il tempo di registrazione è stato fissato in 5 secondi.

Come sistema di energizzazione è stato utilizzato un maglio strumentato, attraverso il quale sono state realizzate una sequenza di energizzazioni esterne allo stendimento, rispettivamente ad un capo ed all'altro dello stesso.

L'esecuzione di più registrazioni distinte invece della tradizionale procedura di *stacking*, permette di eseguire una serie di controlli statistici sulla qualità dei dati acquisiti. In particolare è possibile stimare l'incertezza sui punti della curva di dispersione e verificare che l'ipotesi di monodimensionalità sia rispettata dal sito.

### 4.2.3 Extended Spatial AutoCorrelation (ESAC)

Per poter disporre di misure di velocità delle onde di taglio a profondità superiori rispetto ai consueti 30 metri, sono state eseguite 3 nuove indagini geofisiche con tecnica ESAC. I

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

principali dati associati a queste indagini, realizzate a supporto dello studio di microzonazione, sono riportati in

Tabella 4-4.

Prova	ID_SPU	Latit.	Long.	Località	data	Vs30	VsH
ESAC-MASW 4	038017P59158	44,7428	11,9431	Ostellato – Str. Mezzano	21/10/2014	172	185 (60m)
ESAC-MASW 10	038019P59238	44,6845	11,7782	Ripapersico – v. del Persico	21/10/2014	162	182 (40m)
ESAC-MASW 19	038001P59750	44,5854	12,0115	Longastrino – v. De Gasperi	21/10/2014	159	182 (40m)

**Tabella 4-4 - Principali dati associati alle indagini 3 ESAC realizzate nell'ambito dello studio di MS. Le coordinate sono espresse in gradi decimali riferiti all'ellissoide WGS 84.**

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

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

La metodologia di indagine prevede che i sensori registrino il rumore di fondo (detto anche "microtremore") prodotto da sorgenti naturali e antropiche. Per l'acquisizione del rumore ambientale con l'antenna sismica sono stati utilizzati 24 geofoni da 4.5 hz posti con una

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

configurazione a croce con 12 ricevitori per braccio interspaziati di 5 metri. Per l'analisi ed interpretazione dei dati sismici acquisiti è stato utilizzato il codice di calcolo ESAC del *software Geopsy*.

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

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

### **4.2.4 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr)**

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale Tromino e sono finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSr del sottosuolo (Albarello e Castellaro, 2011). Tale strumento, dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

(10-15 m/s<sup>2</sup>), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive.

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

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

Delle 144 misure tromografiche realizzate a supporto dello studio di microzonazione sismica, 20 sono state eseguite con un tromografo digitale Sara mod. SL07 (quelle in corrispondenza delle prove MASW), mentre le restanti 124 con un tromografo digitale Tromino modello "Zero". Tutte le misure sono state orientate secondo il nord geografico, e georiferite tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 metri. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz e con tempo di singola registrazione pari a 20 minuti. Delle 144 misure eseguite, 26 presentavano disturbi nel segnale acquisito e non sono state quindi inserite nelle banche dati poiché non ritenute sufficientemente affidabili.

In Tabella 4-5 sono riportati i principali dati associati a ciascuna alle 118 misure di microtremore realizzate e utilizzate per lo studio di microzonazione. La natura progressiva ma non continua della numerazione delle stesse (cfr. campo Prova - Tabella 4-5) dipende dal fatto che, come detto, alcune acquisizioni sono state scartate e ripetute.

La campagna di misure realizzate per lo dello studio di microzonazione, ha consentito la caratterizzazione sismica dei terreni presenti negli ambiti d'interesse, attraverso l'individuazione della loro frequenza fondamentale di risonanza. In particolare, le 98 misure

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

realizzate con il medesimo strumento, hanno fornito una serie di dati con caratteristiche omogenee, dunque tra loro confrontabili, che correlati con i dati geognostici disponibili hanno permesso di stimare la profondità di quello che può essere definito “substrato sismico” (paragrafo 6.1), attraverso la caratterizzazione delle superfici di discontinuità stratigrafica in grado di influenzare il moto sismico in superficie.

Prova	ID_SPU	data	$f_0$	$A_0$	Latit.	Long.
HVSR-MASW1	038017P59155	19/09/2014	0,45	1,54	44,7736	11,8730
HVSR-MASW2	038017P59156	19/09/2014	0,88	1,08	44,7554	11,8747
HVSR-MASW3	038017P59157	19/09/2014	0,97	1,02	44,7490	11,8963
HVSR-MASW4	038017P59158	19/09/2014	0,45	1,35	44,7429	11,9432
HVSR-MASW5	038017P59159	19/09/2014	0,29	1,7	44,7387	12,0326
HVSR-MASW6	038019P59234	19/09/2014	0,49	3,96	44,7226	11,8304
HVSR-MASW7	038019P59235	19/09/2014	0,42	0,98	44,7394	11,7746
HVSR-MASW8	038019P59236	19/09/2014	0,36	1,24	44,7107	11,7556
HVSR-MASW9	038019P59237	20/10/2014	0,81	3,31	44,6979	11,8078
HVSR-MASW10	038019P59238	20/10/2014	0,24	2,28	44,6845	11,7783
HVSR-MASW11	038019P59239	25/09/2014	0,86	1,82	44,6931	11,8351
HVSR-MASW12	038001P59743	07/10/2014	0,37	5,02	44,6675	11,7007
HVSR-MASW13	038001P59744	07/10/2014	1,5	1,12	44,6342	11,6780
HVSR-MASW14	038001P59745	07/10/2014	0,49	6,5	44,6410	11,8009
HVSR-MASW15	038001P59746	07/10/2014	0,43	4,16	44,6536	11,7777
HVSR-MASW16	038001P59747	25/09/2014	0,35	5,3	44,6448	11,8848
HVSR-MASW17	038001P59748	25/09/2014	0,93	1,94	44,5845	11,8739
HVSR-MASW18	038001P59749	25/09/2014	0,94	2	44,5902	11,9286
HVSR-MASW19	038001P59750	25/09/2014	2,48	3,37	44,5854	12,0115
HVSR-MASW20	038001P59751	25/09/2014	1,13	1,78	44,5664	12,0762
AG_01	038001P59718	15/09/2014	1,16	2,63	44,5658	12,0813
AG_02	038001P59719	15/09/2014	1,16	3,34	44,5837	12,0142
AG_03	038001P59720	15/09/2014	0,84	3,76	44,5905	11,9494
AG_05/2	038001P59721	06/10/2014	0,88	3,11	44,5865	11,8659
AG_06/2	038001P59722	06/10/2014	1,06	3,07	44,6420	11,8875
AG_07/2	038001P59756	06/10/2014	1,13	2,75	44,6390	11,9357
AG_08	038001P59723	15/09/2014	0,78	3,89	44,6134	11,8408
AG_09/2	038001P59724	06/10/2014	0,94	3,05	44,6090	11,8360
AG_10/2	038001P59725	06/10/2014	0,91	3,1	44,6297	11,8217
AG_11	038001P59726	15/09/2014	0,59	3,85	44,6184	11,8162
AG_12/2	038001P59727	06/10/2014	0,94	3,61	44,5706	11,7986
AG_13/2	038001P59728	06/10/2014	0,84	2,79	44,6418	11,8004

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

AG_14	038001P59729	15/09/2014	0,63	4,63	44,6828	11,7376
AG_15	038001P59730	17/09/2014	0,91	3,03	44,6578	11,7855
AG_16	038001P59731	17/09/2014	0,91	3,48	44,6569	11,7742
AG_17	038001P59732	26/09/2014	0,75	2,46	44,7062	11,7103
AG_18	038001P59733	26/09/2014	0,78	2,8	44,6694	11,6991
AG_19	038001P59734	26/09/2014	0,94	3,2	44,6415	11,6846
AG_20	038001P59735	26/09/2014	0,69	2,98	44,6399	11,6883
AG_21	038001P59736	26/09/2014	0,94	3,05	44,6356	11,6729
AG_22	038001P59737	26/09/2014	0,78	2,99	44,6563	11,6537
AG_23	038001P59738	26/09/2014	0,78	2,77	44,6643	11,6501
AG_24/2	038001P59739	06/10/2014	0,78	2,98	44,6722	11,6581
AG_25/2	038001P59740	06/10/2014	0,78	2,64	44,6882	11,6393
AG_24	038001P59757	26/09/2014	1,16	1,73	44,6726	11,6565
OS_01	038017P59113	08/09/2014	0,78	3,4	44,7745	11,8701
OS_02	038017P59114	08/09/2014	0,78	3,51	44,7739	11,8744
OS_03	038017P59115	08/09/2014	0,81	3,34	44,7701	11,8747
OS_04	038017P59116	08/09/2014	0,91	2,96	44,7669	11,8700
OS_05	038017P59117	08/09/2014	0,91	3,36	44,7644	11,8739
OS_06	038017P59118	08/09/2014	0,91	3,05	44,7655	11,8719
OS_07	038017P59119	08/09/2014	0,94	3,33	44,7659	11,8746
OS_08	038017P59120	08/09/2014	0,78	2,89	44,7565	11,8743
OS_09	038017P59121	08/09/2014	0,81	2,51	44,7552	11,8733
OS_10	038017P59122	08/09/2014	0,78	3,05	44,7541	11,8746
OS_11	038017P59123	08/09/2014	0,91	3,37	44,7457	11,8842
OS_12	038017P59124	08/09/2014	0,78	2,5	44,7502	11,8859
OS_13	038017P59125	08/09/2014	0,84	2,99	44,7499	11,8927
OS_14	038017P59126	08/09/2014	0,78	2,87	44,7505	11,8983
OS_15	038017P59127	08/09/2014	0,91	3,24	44,7444	11,9036
OS_16	038017P59128	08/09/2014	0,91	3	44,7444	11,9070
OS_17	038017P59129	08/09/2014	0,81	3,39	44,7532	11,9095
OS_18	038017P59130	08/09/2014	0,81	3,28	44,7582	11,9180
OS_19	038017P59131	08/09/2014	0,75	3,45	44,7436	11,9358
OS_20	038017P59132	08/09/2014	0,59	3,75	44,7429	11,9366
OS_21	038017P59133	09/09/2014	0,72	3,39	44,7401	11,9410
OS_22	038017P59134	09/09/2014	0,72	2,89	44,7475	11,9422
OS_23	038017P59135	09/09/2014	0,78	3,4	44,7466	11,9382
OS_24	038017P59136	09/09/2014	0,72	3,27	44,7469	11,9443
OS_25	038017P59137	09/09/2014	0,63	3,19	44,7466	11,9504
OS_26	038017P59138	09/09/2014	0,75	3,26	44,7440	11,9480
OS_27	038017P59139	09/09/2014	0,63	3,57	44,7450	11,9497
OS_28	038017P59140	09/09/2014	0,78	3,22	44,7456	11,9523
OS_29	038017P59161	09/09/2014	0,72	3	44,7490	11,9600

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

<b>OS_30-2</b>	038017P59141	07/10/2014	0,84	2,93	44,7493	11,9651
<b>OS_31/2</b>	038017P59142	07/10/2014	0,75	3,06	44,7467	12,0215
<b>OS_32</b>	038017P59143	09/09/2014	0,59	3,31	44,7498	12,0496
<b>OS_33</b>	038017P59144	09/09/2014	0,59	3,06	44,7369	12,0470
<b>OS_34</b>	038017P59145	09/09/2014	0,53	2,95	44,7312	12,0398
<b>OS_35</b>	038017P59146	09/09/2014	0,59	2,88	44,7271	12,0513
<b>OS_36</b>	038017P59147	09/09/2014	0,63	3,17	44,7781	11,8667
<b>OS_37</b>	038017P59148	17/09/2014	1,06	2,38	44,6756	11,9933
<b>OS_39/2</b>	038017P59149	07/10/2014	0,78	3,89	44,7133	11,9200
<b>PM_01/2</b>	038019P59205	07/10/2014	0,53	2,75	44,7392	11,7720
<b>PM_03</b>	038019P59240	11/09/2014	0,81	1,79	44,7448	11,7909
<b>PM_04/2</b>	038019P59206	07/10/2014	0,63	2,76	44,7445	11,7850
<b>PM_05/2</b>	038019P59207	07/10/2014	0,88	2,94	44,7255	11,8146
<b>PM_06/2</b>	038019P59208	07/10/2014	0,63	3,3	44,7228	11,8154
<b>PM_07/2</b>	038019P59209	07/10/2014	0,56	3,28	44,7238	11,8282
<b>PM_08</b>	038019P59241	11/09/2014	0,97	2,14	44,7050	11,7879
<b>PM_09</b>	038019P59210	11/09/2014	0,94	2,5	44,7053	11,7978
<b>PM_10</b>	038019P59211	11/09/2014	1,03	2,96	44,7052	11,8059
<b>PM_11</b>	038019P59212	11/09/2014	1,09	3	44,7030	11,8031
<b>PM_12</b>	038019P59213	11/09/2014	0,91	3,13	44,7017	11,8081
<b>PM_14</b>	038019P59214	11/09/2014	0,91	2,36	44,6992	11,8140
<b>PM_15</b>	038019P59215	11/09/2014	0,97	2,97	44,6980	11,8174
<b>PM_17</b>	038019P59216	12/09/2014	0,56	2,71	44,7096	11,7591
<b>PM_18</b>	038019P59242	12/09/2014	0,72	2,9	44,7019	11,7814
<b>PM_18/2</b>	038019P59217	07/10/2014	0,63	2,88	44,7018	11,7803
<b>PM_20</b>	038019P59243	12/09/2014	1,09	2,48	44,6951	11,8328
<b>PM_21</b>	038019P59218	12/09/2014	0,91	2,93	44,6911	11,8366
<b>PM_22/2</b>	038019P59219	06/10/2014	1,69	3,35	44,6768	11,9180
<b>PM_24</b>	038019P59244	12/09/2014	1,13	3,19	44,6928	11,8182
<b>PM_25</b>	038019P59245	12/09/2014	0,94	2,4	44,6906	11,8154
<b>PM_25/2</b>	038019P59220	07/10/2014	0,75	3,33	44,6908	11,8157
<b>PM_26/2</b>	038019P59221	06/10/2014	0,91	3,11	44,6914	11,8104
<b>PM_27</b>	038019P59246	12/09/2014	0,94	2,53	44,6963	11,8028
<b>PM_27/2</b>	038019P59222	07/10/2014	0,81	3,35	44,6968	11,8023
<b>PM_28</b>	038019P59247	12/09/2014	1,13	2,98	44,6983	11,7964
<b>PM_29</b>	038019P59248	12/09/2014	0,94	2,7	44,6972	11,7847
<b>PM_29/2</b>	038019P59223	07/10/2014	0,78	2,37	44,6963	11,7806
<b>PM_30</b>	038019P59224	17/09/2014	0,88	2,84	44,6864	11,7748
<b>PM_31</b>	038019P59225	17/09/2014	0,78	2,63	44,6870	11,7847
<b>PM_32</b>	038019P59226	17/09/2014	0,78	2,91	44,6830	11,7818
<b>PM_33</b>	038019P59227	17/09/2014	0,84	3	44,6864	11,7876
<b>PM_34</b>	038019P59228	17/09/2014	0,81	3,38	44,6885	11,7882

PM_35	038019P59229	17/09/2014	0,81	3,51	44,6887	11,7943
PM_36/2	038019P59230	06/10/2014	0,88	2,82	44,6644	11,8361

**Tabella 4-5 - Sintesi dei principali dati associati alle misure HVSR di nuova esecuzione inserite in banca dati. Le coordinate sono espresse in gradi decimali riferiti all'ellissoide WGS 84.**

## 5 Modello del sottosuolo

Poiché le prime centinaia di metri di sottosuolo dell'area indagata sono interamente formate da sedimenti di pianura alluvionale e deltizia, non litificati, non è presente un contatto netto fra unità rocciose rigide e depositi sciolti di copertura che normalmente permette di definire il concetto di substrato rigido (*bedrock*) in aree collinari e montuose. Le unità di sottosuolo sono caratterizzate da un aumento della rigidità graduale, ma non spazialmente uniforme, dato che superfici di non deposizione e discordanza stratigrafica possono corrispondere a bruschi aumenti di questo parametro meccanico. Tali superfici corrispondono spesso ai limiti disconformi fra Sintemi e Subsintemi e frequentemente a riflettori sismici e passaggi fra unità sismo-stratigrafiche. Come dettagliato al paragrafo 6.1, la buona correlazione tra i dati geologici e geofisici raccolti per il presente studio ha permesso di identificare alcune di queste superfici ed in particolare di individuare il passaggio tra i depositi del Quaternario Continentale (Qc) e quelli del Quaternario Marino (Qm) come superficie al di sotto della quale può essere definita la presenza del substrato sismico (*seismic bedrock*). Sulla base di inversioni congiunte tra dati stratigrafici e geofisici, per il cui dettaglio si rimanda al paragrafo 6.1, si è infatti potuto determinare che, nelle zone di alto strutturale, i depositi del Qm, presenti a profondità di almeno 250 metri, sono caratterizzati da una velocità di almeno 650 m/s, che si può supporre anche più elevata in zone di sinclinale. Sono quindi di seguito descritte in dettaglio le unità stratigrafiche che costituiscono i terreni di copertura e del sottostante substrato sismico (figura 5-1), sulla base di quanto indicato nelle note illustrative della cartografia ufficiale CARG della Regione Emilia-Romagna (ISPRA & RER, 2009).

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

PRINCIPALI UNITÀ STRATIGRAFICHE				ETA (milioni di anni)	SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni)	
AFFIORANTI		SEPOLTE				
QUATERNARIO CONTINENTALE ⑥	TERRE ROSSE, DILUVIUM, ALLUVIUM, TERRAZZI E ALLUVIONI ①	FORMAZIONE FLUVIO - LACUSTRE ②  FORMAZIONE DI OLMATELLO ③  UNITÀ DI VILLA DEL BOSCO ④  UNITÀ DI CA' DI SOLA ⑤	SUPERSINTEMA EMILIANO-ROMA GNOLO  SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE ⑦	UNITÀ DI BORGO PANIGALE ⑧	~0.12  ~0.35-0.45  ~0.65  ~0.8  ~1.0  ~2.2  ~3.3-3.6	PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE 0.125
	DILUVIUM p.p. ①		SUPERSINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO  SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE ⑦	UNITÀ ALLUVIONALE INFERIORE ⑧		PLEISTOCENE MEDIO
	MILAZZIANO ① SABBIE di CASTELVETRO p.p. ⑤ SABBIE GIALLE di IMOLA p.p. ⑥		SUBSINTEMA QUATERNARIO MARINO 3"			
	MILAZZIANO e CALABRIANO p.p. ① SABBIE di CASTELVETRO p.p. ⑤ SABBIE GIALLE di IMOLA p.p. ⑥		SUBSINTEMA QUATERNARIO MARINO 3'			
QUATERNARIO MARINO ⑥	CALABRIANO p.p. ① SABBIE di MONTERICCO ⑥ FORMAZIONE di TERRA del SOLE p.p. ⑥	SINTEMA ⑦ QUATERNARIO MARINO 2			0.89	
	CALABRIANO p.p. ① FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p. ①	SINTEMA ⑦ QUATERNARIO MARINO 1			PLEISTOCENE INFERIORE 1.72	
P <sub>2</sub> ⑥	FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p. ①	SUPERSINTEMA DEL PLIOCENE MEDIO-SUPERIORE		PLIOCENE ⑨ MEDIO-SUPERIORE	~2.2  PLEISTOCENE INFERIORE 1.72  PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE 0.125  PLEISTOCENE MEDIO  PLEISTOCENE INFERIORE 1.72  PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE 0.125  PLEISTOCENE MEDIO  PLEISTOCENE INFERIORE 1.72  PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE 0.125	PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE INFERIORE 1.72  PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE 0.125  PLEISTOCENE MEDIO  PLEISTOCENE INFERIORE 1.72  PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE 0.125
						PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE INFERIORE 1.72  PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE 0.125  PLEISTOCENE MEDIO  PLEISTOCENE INFERIORE 1.72  PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE 0.89  PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE 0.125

Riferimenti Bibliografici

- ⑥ Ricci Lucchi et Al. (1982)                      ③ Vai (1984) - Marabini et Al. (1987)    ⑥ Nuova Carta Geologica d'Italia 1:50.000  
F. 218 (2002) - F. 254 (2001)
- ① Carta Geologica d'Italia 1:100.000    ④ Farabegoli (1985)
- ② Cremaschi (1982)                              ⑤ Gasperi et Al. (1987)
- ⑦ Di Dio et Al. (1997 a/b)
- ⑧ Amorosi & Farina (1995)
- ⑨ AGIP S.p.A. (1982)

**Figura 5-1 - Schema geologico-stratigrafico regionale dei depositi quaternari di sottosuolo tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna (RER-ENI/AGIP, 1998) e recentemente rivisto ed aggiornato nella stesura delle Note Illustrative del Foglio 199 "Parma Sud". Le linee marroni indicano le discontinuità principali, mentre le blu quelle minori. Le aree tratteggiate indicano aree lacuna stratigrafica. Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia - 1:50.000. Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto".**

## 5.1 Substrato

Il termine “substrato” inquadra qui tutte le successioni al di sotto Supersistema Emiliano-Romagnolo. Le successioni costituenti il substrato sono quindi formate dai carbonati mesozoici, dalle potenti successioni terrigene terziarie, e da depositi terrigeni marini quaternari.

Le sequenze plioceniche, e pleistoceniche inferiori e medie sono formate da depositi marini, con foraminiferi platonici e bentonici, prevalentemente inquadrate nel Supersistema Quaternario Marino (Figura 5-1). Queste sequenze si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell’antico Mare Adriatico, bacino sedimentario soggetto a forte subsidenza e elevati apporti sedimentari. Facies deposizionali analoghe sono evidenti in affioramento nella fascia collinare ai piedi dell’Appennino, ove queste unità sono state innalzate dalla deformazione compressiva quaternaria. Questi sedimenti terrigeni erano tradizionalmente conosciuti come Calabriano, talvolta anche Piacenziano e sono oggi inquadrati come Formazione di Castell’Arquato, Argille di Riolo Terme ed Argille di Terra del Sole (Figura 5-1), con strato tipi posti nella fascia pedecollinare emiliana e romagnola (Ricci Lucchi *et al.*, 1982). Le unità francamente marine sono superiormente troncate da una superficie di discordanza stratigrafica, anche angolare, più marcata nelle aree di anticlinale. Tale superficie corrispondente ad un netto riflettore sismico ed è associata ad una lacuna cronologica, indotta dal coinvolgimento dell’area nella propagazione verso l’Avanfossa nella deformazione compressiva della catena.

## 5.2 Terreni di copertura

In base alle proprietà elasto-meccaniche e alla posizione stratigrafica, le successioni inquadrate nel Supersistema Emiliano-Romagnolo (cfr. Foglio 203 “Poggio Renatico”, 204 “Portomaggiore”, 205 “Comacchio”), sono state qui attribuite ai “terreni di copertura” (cfr. parte introduttiva capitolo 5).

### 5.2.1 Supersistema Emiliano-Romagnolo

L’organizzazione stratigrafica di questi depositi registra il progressivo riempimento sedimentario di questa porzione del bacino d’avanfossa Padano in concomitanza con il

#### MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

sollevamento del margine appenninico ed il conseguente avanzamento verso NE dei sistemi deposizionali appenninici.

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo comprende l'insieme dei depositi quaternari di origine continentale affioranti in corrispondenza del margine appenninico padano (ciclo Qc di Ricci Lucchi *et al.*, 1982) ed i sedimenti ad essi correlati nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola. Questi ultimi, nel settore orientale, includono depositi alluvionali che passano verso est a depositi deltizi e marini, organizzati in cicli deposizionali di vario ordine gerarchico. Il limite inferiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo affiora esclusivamente a ridosso del margine appenninico e nei settori intravallivi dove è fortemente discordante sui depositi marini di età variabile tra il Miocene e il Pleistocene medio. Verso NE, la superficie di discordanza diviene sepolta e passa ad una superficie di continuità stratigrafica e/o paraconcordanza, ad eccezione delle zone di anticlinale delle pieghe ferraresi dove la discordanza è netta. Il limite superiore coincide con la superficie topografica. L'età dell'unità è compresa tra Pleistocene medio - Attuale (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998). Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è suddiviso in due Sintemi distinti: quello Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e quello Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) riconosciuti e tracciati anche nelle porzioni di sottosuolo della pianura emiliano-romagnola (Amorosi & Farina, 1995; Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998). Le analisi petrografiche e composizionali eseguite in vari Fogli della Carta Geologica d'Italia (v. ad esempio Fogli 202, 203, 204) hanno permesso di individuare l'area di provenienza delle unità sabbiose. I corpi sabbiosi tabulari continui (decine di chilometri) con tendenza a chiudersi verso il margine appenninico, spessore pluridecametrico e granulometria medio-grossolana, registrano una provenienza alpina e di Po. I corpi sabbiosi più discontinui e sottili, di granulometria più fine, con geometrie più variabili e tendenza a saldarsi verso il margine appenninico con i corpi ghiaiosi di conoide, mostrano una chiara provenienza appenninica. Nelle sezioni geologiche profonde della cartografia ufficiale CARG della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1) il Supersintema mostra la progradazione delle facies deposizionali alluvionali da SO verso NE ed il conseguente arretramento di quelle deltizie e marine. Due fasi principali di avanzamento delle facies deposizionali sono attribuite rispettivamente ai due Sintemi AEI e AES.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Nell'area di studio il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) è dominato dalle facies marine, mentre quello superiore (AES) da facies continentali e deltizie, inizialmente formate esclusivamente da sedimenti di provenienza padana, e successivamente anche da sedimenti a provenienza appenninica, particolarmente sviluppati nella parte meridionale.

### 5.2.2 Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI)

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) costituisce la parte più antica del Supersintema Emiliano-Romagnolo riconosciuto nel sottosuolo dell'area di studio sulla base di sondaggi profondi, di profili sismici ENI-AGIP e delle geometrie delle unità stratigrafiche ricostruite attraverso le sezioni geologiche.

Il limite inferiore coincide con quello del Supersintema Emiliano-Romagnolo. Al suo interno l'unità è costituita da alternanze cicliche di prevalenti depositi di fanghi marini, argille e limi, e depositi grossolani sabbiosi organizzati spesso in sequenze di tipo *coarsening-upward*, di circa 30-40 metri di spessore, costituite da facies deltizie e di piattaforma del sistema padano.

Lo spessore dell'unità varia arealmente a causa della subsidenza fortemente differenziale, raggiungendo gli spessori massimi, almeno 130 metri, tra Budrio e la porzione meridionale del territorio dell'Unione Valli e Delizie, in corrispondenza dell'asse della sinclinale. Gli spessori minimi, dell'ordine degli 80 metri, sono presenti in corrispondenza delle culminazioni strutturali, tra Consandolo ed Argenta.

Sulla base della posizione stratigrafica, l'unità è attribuita al Pleistocene Medio, cioè l'intervallo temporale compreso tra 650.000 e 350.000 anni (Regione Emilia-Romagna RER & ENI-AGIP, 1998).

### 5.2.3 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) costituisce la porzione superiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo.

L'organizzazione dei suoi corpi sedimentari è interpretata nelle sezioni geologiche profonde (v. Allegato 1). In affioramento AES è costituito da depositi di piana deltizia ed alluvionale. Nel sottosuolo è, invece, formato da un'alternanza di depositi di ambiente deltizio, marino e continentale.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Il limite inferiore del Sintema affiora solamente nelle aree più prossime al margine appenninico, ove è assai marcato e localmente può corrispondere alla base del Supersintema. In tal caso la sua base corrisponde ad una discordanza erosiva ed angolare che taglia depositi marini mio-pleistocenici.

Nel sottosuolo di vasti settori di alta pianura, il limite inferiore è marcato dalla sovrapposizione di corpi ghiaiosi di conoide alluvionale su una discordanza erosiva, incisa in depositi fluviodeltizi di AEI. Procedendo verso NE, in porzioni più distali della pianura, il limite risulta meno marcato e paraconcordante. Nel sottosuolo del territorio dell'Unione, il limite fra i due Sintemi corrisponde alla brusca sovrapposizione di sedimenti fluviali (AES) su depositi prevalentemente deltizi e marine (AEI).

Lo spessore di AES varia da poche decine di metri, nei pressi della fascia pedeappenninica (es. Foglio 240 "Forlì", fino ad oltre 500 m in corrispondenza del margine costiero (es. Foglio 187 "Codigoro"). Gli spessori medi si aggirano sui 200-300 m in corrispondenza delle zone di bassa pianura (es. Foglio 204 "Portomaggiore").

La base del Sintema è attribuita, per posizione stratigrafica, al Pleistocene medio (350-450.000 anni secondo Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998). Il limite superiore corrisponde invece all'attuale superficie topografica ed appartiene alla parte più recente dell'Olocene.

L'intero Sintema è organizzato in quattro o cinque cicli deposizionali trasgressivo- regressivi, ciascun avente uno spessore massimo di circa un centinaio di metri, in corrispondenza delle aree di sinclinale. Le facies trasgressive marino-costiere non sembrano estendersi in AES più a sud dell'allineamento Lugo-Altedo-S.Pietro in Casale, e risultano particolarmente sviluppate nella porzione meridionale e nord-orientale dell'area di studio. La porzione *trasgressiva* basale di ciascun ciclo è caratterizzata dalla frequente presenza di argille organiche di piana alluvionale, palude e piana costiera, con occasionali intercalazioni di sabbie litorali o fanghi salmastri.

Il limite inferiore di ciascun ciclo rappresenta una superficie di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana singlaciale.

Nella porzione regressiva di ciascun ciclo fanghi marini e sabbie deltizie sono seguite da una spessa successione di depositi fini di piana alluvionale, in cui le sabbie di canale fluviale sono

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

subordinate e presenti solo come corpi nastriformi isolati. Al tetto del ciclo, le sabbie di canale fluviale divengono più abbondanti, fino alla formazione di corpi sabbiosi compositi, lateralmente estesi in tutto il sottosuolo della bassa pianura ferrarese.

Nell'ambito del Progetto di Cartografia Geologica Nazionale, i cinque cicli che compongono il Sintema sono stati suddivisi in 2 cicli inferiori definiti rispettivamente Subsintema di *Liano* (AES<sub>4</sub>) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES<sub>5</sub>) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 204 Portomaggiore), ed in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES<sub>6</sub>), *Villa Verucchio* (AES<sub>7</sub>) e *Ravenna* (AES<sub>8</sub>). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>), un'unità di età post-romana, definita sulla base di eventi di riorganizzazione idrografica, accelerazione dei processi sedimentari e cambiamenti nei caratteri archeologici associati alla fine dell'Impero Romano.

I cicli più antichi, scarsamente noti nell'area in quanto solo raramente indagati da sondaggi geognostici di grande profondità, mostrano caratteri marini più pronunciati e registrano eventi trasgressivi maggiormente sviluppati verso l'entroterra, rispetto a quelli più recenti. Essi mostrano inoltre corpi sabbiosi fluvio-deltizi in aree più sud-occidentali rispetto a quelli dei 3 cicli più recenti. Questa evoluzione registra sia il progressivo riempimento del bacino sedimentario di Avolfossa, sia lo spostamento verso nord degli assi depocentrali e del reticolo fluviale padano, legato al prevalere degli apporti terrigeni rispetto alla creazione di spazio di accomodamento sedimentario.

I tre Sintemi superiori (AES<sub>6</sub>, AES<sub>7</sub>, AES<sub>8</sub>), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica. La base di ciascun ciclo, corrisponde ad una superficie erosiva incisa in sabbie fluviali singlaciali o – in aree più meridionali soggette a forti apporti appenninici – ad un paleosuolo carbonatico maturo, sviluppato su depositi continentali fini. Nell'attuale regione costiera, la porzione inferiore trasgressiva di ciascun ciclo presenta spessori di alcuni metri ed è caratterizzata da argille di piana alluvionale e palude, ricche in sostanza organica e passanti a fanghi lagunari, troncate al tetto da una superficie di rimaneggiamento trasgressivo o *ravinement surface* (Bruun, 1962; Swift *et al.*, 1972; Swift, 1975; Dominguez & Wanless, 1991), a cui seguono sottili sabbie costiere e fanghi marini. In queste aree costiere, la parte regressiva è spessa fino al centinaio di metri ed è costituita da depositi marini con evoluzione *shallowing*, da fanghi di prodelta e sabbie fronte deltizio,

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

seguiti da una spessa successione di piana alluvionale. La parte superiore del ciclo è formata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda, diffusi soprattutto nelle porzioni meridionali. Spostandosi verso il piede dell'Appennino, nei cicli sedimentari scompaiono le intercalazioni marine e la parte superiore è dominata da corpi ghiaioso-sabbiosi di riempimento di canale fluviale, che registrano lobi di conoide alluvionale ad alimentazione certamente appenninica.

### 5.2.3.1 Subsistema di Bazzano – AES<sub>6</sub>

L'unità affiora solo nei pressi del fronte appenninico (es. Fogli 220 "Casalecchio di Reno"), mentre nella fascia costiera emiliano-romagnola, come nell'area di studio, è presente nel solo sottosuolo dove è attraversata dai sondaggi 204-S4, 204-S15, 204-S16, 204-S17 del Foglio CARG "Portomaggiore".

Costituita da un ciclo completo trasgressivo-regressivo, la parte inferiore dell'unità è composta di depositi deltizi e litorali che poggiano, a volte con un forte contrasto di facies, su depositi alluvionali del ciclo sottostante. Verso sud, nei Fogli 221 "Bologna" e 222 "Lugo", le facies marino-marginali passano a facies continentali ed il limite con il ciclo sottostante diviene meno netto e più difficilmente identificabile. Nella porzione intermedia e superiore il ciclo è costituito da depositi fluvio-deltizi, organizzati generalmente in una sequenza di tipo *coarsening-upward*, caratterizzata al tetto dallo sviluppo di uno spesso ed esteso corpo di sabbie medio-grossolane di origine padana, deposte in ambienti di media pianura continentale fredda, verosimilmente durante la penultima glaciazione.

Localmente si osserva, intercalato ai depositi alluvionali, un sottile livello di depositi fini palustri e lagunari che registra un'ingressione marina di entità minore rispetto a quella documentata alla base dell'unità.

In prossimità del margine appenninico, l'unità inizia con sedimenti fini fluvio-palustri, seguiti da argille, limi e sabbie di pianura alluvionale, e superiormente da sabbie e ghiaie di conoide fluviale, che formano estesi corpi tabulari, con facies polliniche periglaciali.

Spostandosi verso la fascia costiera, i fanghi fluvio-palustri passano lateralmente e verticalmente ad argille organiche lagunari, sabbie costiere e fanghi marini (es. sondaggio 223-S12 del Foglio 223 "Ravenna").

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

L'unità è limitata al tetto, con contatto netto, dai depositi trasgressivi marino marginali e dai depositi alluvionali fini ad essi laterali del ciclo sovrastante.

Lo spessore del Subsistema varia dai 30 ai circa 70 metri, nei settori settentrionali ed orientali dell'area di studio, mentre spessori ancora maggiori sono raggiunti nell'area meridionale di Campotto.

Per la posizione stratigrafica, l'unità è riferibile al Pleistocene medio. La correlazione ciclostratigrafica con la scala delle fluttuazioni climatico-eustatiche di Martinson *et al.*, (1987) suggerisce un'età fra c.a. 230.000 e 130.000 anni.

### 5.2.3.2 Subsistema di Villa Verucchio – AES<sub>7</sub>

I depositi di questa unità rappresentano un ciclo trasgressivo-regressivo completo ed affiorano solamente nella fascia pedeappenninica romagnola ed emiliana (es. Foglio 256 "Rimini"). Nel resto della pianura emiliano-romagnola questi depositi sono sempre sepolti nel sottosuolo e nell'area di studio sono attraversati e descritti dai sondaggi 204-S4, 204-S15, 204-S16, 204-S17 del Foglio CARG "Portomaggiore".

La porzione inferiore trasgressiva del ciclo è costituita, nel settore nord orientale ed orientale dell'area di studio, da depositi marino-marginali che passano verso sud e verso ovest a depositi lagunari e palustri della piana deltizia e quindi a depositi alluvionali prevalentemente fini, spesso con presenza abbondante di sostanza organica. Il contatto basale di queste associazioni di facies sui depositi alluvionali di AES<sub>6</sub> costituisce il limite inferiore dell'unità. Nella porzione intermedia e superiore il ciclo è costituito da alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di piana alluvionale. Questi depositi sono generalmente organizzati in sequenze di tipo *coarsening-upward*, caratterizzate nel settore orientale e settentrionale dallo sviluppo al tetto di corpi sabbiosi di origine padana, estesi, continui e spessi fino a 10-20 metri. Il limite superiore dell'unità viene posto, nel sottosuolo, al tetto dei depositi grossolani di canale fluviale o, verso sud, in corrispondenza del tetto dei depositi fini di piana inondabile che ne costituiscono l'equivalente laterale. In gran parte del territorio dell'Unione tale superficie è ricoperta dai depositi di piana alluvionale e deltizia e di palude/laguna, che corrispondono alla base del Subsistema sovrastante (AES<sub>8</sub>).

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Nei settori verso mare il tetto del Subsistema è definito dal contatto dei depositi trasgressivi di estuario di AES<sub>8</sub> sui depositi di sabbie grossolane di AES<sub>7</sub> riferibili all'ultima glaciazione Würmiana.

Nel sottosuolo della fascia pedeappenninica, l'organizzazione interna *coarsening* è del tutto analoga a quella del Subsistema sottostante. La porzione inferiore trasgressiva del ciclo è costituita da depositi fluviali che passano ad argille di palude dolce e quindi a depositi di pianura alluvionale. La parte sommitale dei cicli è caratterizzata da depositi ghiaiosi e sabbiosi, di canale fluviale e conoide alluvionale, spessi fino a 15-20 m che si sfrangiano verso valle in corpi nastriformi di canale.

Sulla base di datazioni radiometriche, analisi di distribuzione pollinica ed analogie con aree limitrofe ricavate nell'ambito del progetto nazionale di cartografia geologica, il Subsistema di Villa Verucchio può essere correlato con il ciclo glacio-eustatico compreso fra gli stadi isotopici 5e (Tirreniano Auct.) e 2, della curva isotopica dell'ossigeno di Martinson *et al.*, (1987). Sulla base di queste considerazioni, il Subsistema è attribuito all'intervallo compreso fra c.a. 125.000 anni e c.a. 17.000 anni BP (Pleistocene superiore).

### 5.2.3.3 Subsistema di Ravenna – AES<sub>8</sub>

Il Subsistema forma la parte sommitale del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore e comprende i sedimenti affioranti e formanti le prime decine di metri di sottosuolo dell'area di studio. Esso è attraversato dalla maggioranza delle indagini della Banca Dati Geognostica Regionale e dunque risulta il deposito Quaternario meglio noto dell'interna pianura emiliano-romagnola. I depositi di AES<sub>8</sub> poggiano in contatto netto sui corpi di canale e di tracimazione fluviale del ciclo sottostante e costituiscono la porzione trasgressiva e quella iniziale regressiva di un ciclo simile a quelli precedenti, ma incompleto poiché ancora attualmente in corso di evoluzione deposizionale. Nel settore meridionale dell'area, il limite fra AES<sub>8</sub> ed AES<sub>7</sub> è meno netto e si trova all'interno di facies di piana alluvionale prevalentemente limosa.

Nell'area di studio i depositi affioranti del Subsistema sono in gran parte costituiti da argille, limi ed alternanze limoso-sabbiose da tracimazione fluviale, intercalate a sabbie di riempimento di canale di piana deltizia del fiume Po. Nelle aree centro orientali sono invece

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

molto sviluppati fanghi organici di laguna salmastra che al limite sud-orientale sono in contatto con sabbie costiere di piana e fonte deltizio.

Nel margine sud-occidentale la porzione affiorante dell'unità è formata da argille, limi ed alternanze limoso-sabbiose di piana inondabile, e palude di Reno ed altri fiumi appenninici minori. Nei terreni affioranti sono ovunque assenti suoli maturi, a causa della recente bonifica e della messa a coltura di molte aree.

Nel sottosuolo dei settori centrale, orientale e settentrionale i depositi inferiori e trasgressivi di AES<sub>8</sub> sono costituiti da argille e limi con abbondante sostanza organica che testimoniano lo sviluppo di estesi ambienti di palude e laguna della piana deltizia e costiera. Nei settore occidentale e meridionale i depositi inferiori del Subsistema sono, invece, costituiti da alternanze di argille limi e sabbie di piana alluvionale meglio drenata, con paleosuoli decarbonatati, scarsamente differenziabili dalle facies alluvionali di provenienza appenninica dell'unità sottostante.

Nella zona costiera, la parte inferiore di AES<sub>8</sub> è caratterizzata da depositi di pianura alluvionale mal drenata che sfumano verso l'alto e verso mare in sedimenti di palude salmastra e laguna, con faune da ipoaline a mesoaline. Questi depositi costieri sono troncati dalla superficie eterocrona di rimaneggiamento trasgressivo o *ravinement*, a cui seguono sabbie di cordone litorale e depositi fini marini.

La transizione alla porzione regressiva del ciclo è generalmente graduale ed è rappresentata dalla progradazione dei depositi di palude-laguna sui depositi litorali e di retrobarriera nel settore orientale e da quella dei depositi di piana alluvionale sui depositi di palude-laguna nel settore sud-orientale.

Lo spessore del Subsistema varia dai 15 ai circa 25 metri, nei settori settentrionali ed orientali dell'area di studio, mentre spessori ancora maggiori sono raggiunti nell'area meridionale di Campotto.

Sulla base dei dati radiometrici <sup>14</sup>C, l'età del Subsistema è compresa fra c.a.13.450 anni (B.P. non calibrata) e l'attuale, e corrisponde all'ultima fase di rapida risalita eustatica e di miglioramento climatico che si sviluppa a partire dal tardo Pleistocene fino a tutto l'Olocene.

## 6 Interpretazioni e incertezze

Le principali scelte interpretative che hanno condotto alla definizione del modello geologico di sottosuolo e all'identificazione di aree a diversa pericolosità e suscettibilità ad effetti locali cosismici, sono di seguito analizzate tentando di evidenziarne i punti di forza e gli elementi a sostegno, senza trascurarne gli aspetti di incertezza ed eventuali criticità non risolvibili a questo livello di approfondimento.

### 6.1 Substrato rigido

Le prime centinaia di metri di sottosuolo dell'area indagata sono interamente formate da sedimenti di pianura alluvionale e deltizia, non litificati. Manca quindi il contatto netto fra unità rocciose rigide antiche e depositi sciolti di copertura che normalmente permette di definire il concetto di substrato rigido in microzonazioni di aree collinari e montuose, come, ad esempio, nel caso dell'Abruzzo. Risulta quindi necessario definire con precisione i concetti di substrato e terreno di copertura utilizzati in questo lavoro, rispetto a quanto previsto negli standard emanati dalla commissione tecnica di microzonazione sismica (ICMS, 2008). Le unità di sottosuolo sono caratterizzate da un progressivo aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, causata da fenomeni come il costipamento e cementazione precoce dei sedimenti granulari ed il consolidamento dei litotipi coesivi, legati all'espulsione di fluidi dal sottosuolo, come acqua e metano biogenico. L'aumento della rigidità nel sottosuolo si attua in modo progressivo, ma non spazialmente uniforme, dato che superfici di non deposizione e discordanza stratigrafica corrispondano a bruschi aumenti di questo parametro meccanico, come dimostrato anche dalle misure della velocità delle onde sismiche realizzate in pozzo durante gli studi dell'Ordinanza 70/2012. Queste superfici corrispondano spesso ai limiti disconformi fra Sintemi e Subsintemi e frequentemente a riflettori sismici e passaggi fra unità sismo-stratigrafiche. La difficoltà ed il notevole costo dell'acquisizione di dati diretti di sottosuolo, tramite sondaggi geofisico-stratigrafici profondi, rende necessaria la stima della profondità dei limiti discordanti mediante metodi geofisici indiretti, inquadrati ed interpretati nel contesto stratigrafico regionale del sottosuolo. Per identificare i principali contrasti di impedenza associati a tali limiti, sono state realizzate misure di microtremore

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

sismico che hanno permesso di ricostruire la variazione del rapporto tra le componenti orizzontali e verticali (H/V o HVSR) alle diverse frequenze. L'analisi di questi dati, unita ad una stima delle proprietà meccaniche delle diverse unità stratigrafiche note dal contesto stratigrafico regionale del sottosuolo di pianura ha permesso l'individuazione di due superfici principali, associate ad un significativo aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, all'interno della successione del Quaternario superiore. Queste superfici, come dettagliato in seguito, sono poste a profondità diverse e corrispondono con ogni probabilità al tetto e alla base stratigrafica del Subsistema di Bazzano AES<sub>6</sub> della cartografia ufficiale CARG della Regione Emilia-Romagna. Attraverso l'inversione congiunta dei dati di Vs misurati per gli strati più superficiali (da prove MASW e ESAC), con i risultati delle misure di microtremore a stazione singola (HVSR), si può facilmente stabilire che, in ragione delle basse velocità registrate nelle coperture (fino a 40-60 metri) e dei valori non troppo elevati dei contrasti di impedenza, entrambe le superficie stratigrafiche suddette (base e tetto di AES<sub>6</sub>), corrispondenti in genere ai principali picchi di H/V, non individuano il passaggio al *bedrock* sismico. L'unità stratigrafica sottostante (AES indifferenziato), sempre sulla base dell'inversione congiunta, può essere caratterizzata infatti, nella sua porzione superiore, da velocità che non arrivano ai 500 m/s. Poiché in genere non si evidenziano significativi contrasti di impedenza al di sotto di quelli principali, anche se è ragionevole ritenere che tale unità presenti un certo aumento graduale di velocità con la profondità, risulta difficile stabilire quali velocità possa raggiungere e a quali profondità. Una eccezione è rappresentata dalla zona di Consandolo, che si trova in corrispondenza dell'alto strutturale più pronunciato presente nell'area in esame. Qui si registra, su tutte le verticali di misura effettuate, un picco significativo di H/V a frequenze attorno a 0,4 Hz. Le inversioni vincolate realizzate su tali tracce di H/V, di cui è riportato un esempio grafico del risultato in Figura 6-1, correlate con i dati stratigrafici profondi dei pozzi per idrocarburi presenti nell'area e quanto sintetizzato nella sezione 95 (v. Allegato 1), hanno permesso di ricostruire un profilo di velocità (Figura 6-2) che consente di correlare in maniera convincente tale picco a più bassa frequenza con la base dell'unità AEI (base Qc) in corrispondenza della discontinuità che marca il tetto del Quaternario francamente marino (Qm). Sulla base di tale calcolo, l'unità sottostante (Qm) caratterizzata da una velocità almeno superiore a 650 m/s, a profondità superiori ai 250

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

metri, può essere ragionevolmente considerata il substrato sismico (*seismic bedrock*) per l'intera area di studio. Tale superficie però viene ben evidenziata da contrasti sempre visibili con le misure di microtremore a stazione singola solo nella zona di culminazione strutturale di Consandolo, poiché laddove essa si approfondisce entra in un range di frequenze ( $< 0,4$  Hz) in cui si risente del limite strumentale del tomografo digitale impiegato, che fatica a registrare picchi significativi a meno di condizioni meteo particolarmente perturbate (Mulargia e Castellaro, 2007). Va tenuto comunque presente che questo substrato quaternario, pur presentando un aumento della rigidità e velocità sismica rispetto ai sedimenti di origine continentale più prossimi alla copertura, è comunque formato da depositi ancora assai imperfettamente litificati. Tali successioni presentano valori di rigidità e quindi velocità comunque inferiori rispetto agli 800 m/s caratteristici di un substrato roccioso, formato ad esempio da carbonati mesozoici come quelli presenti nelle aree epicentrali abruzzesi e friulane.

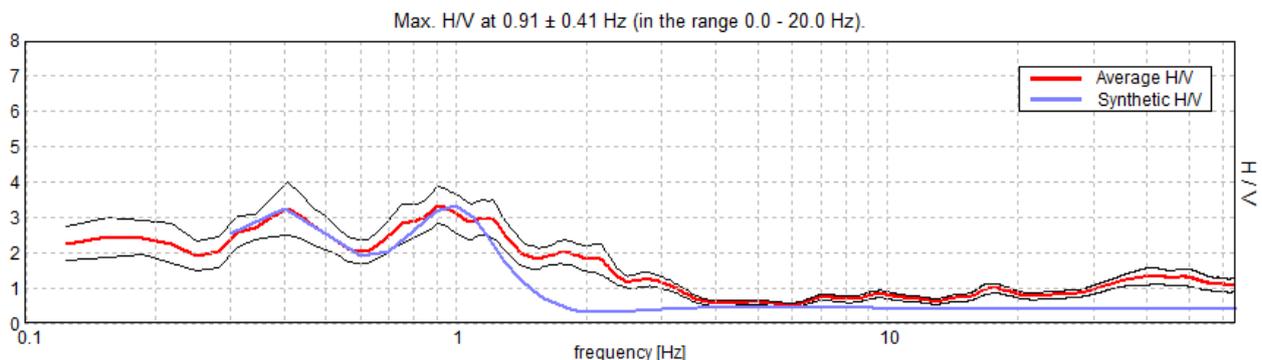


Figura 6-1 - Confronto tra curva H/V misurata presso Consandolo (rossa) e sintetica ottenuta dall'inversione congiunta tra dati geofisici e stratigrafici (blu). Tale esempio costituisce il modello di riferimento per la zona di maggiore alto strutturale, in cui è possibile "vedere" strumentalmente il picco di H/V a più bassa frequenza (0,4 Hz) in corrispondenza del passaggio al *bedrock* sismico.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

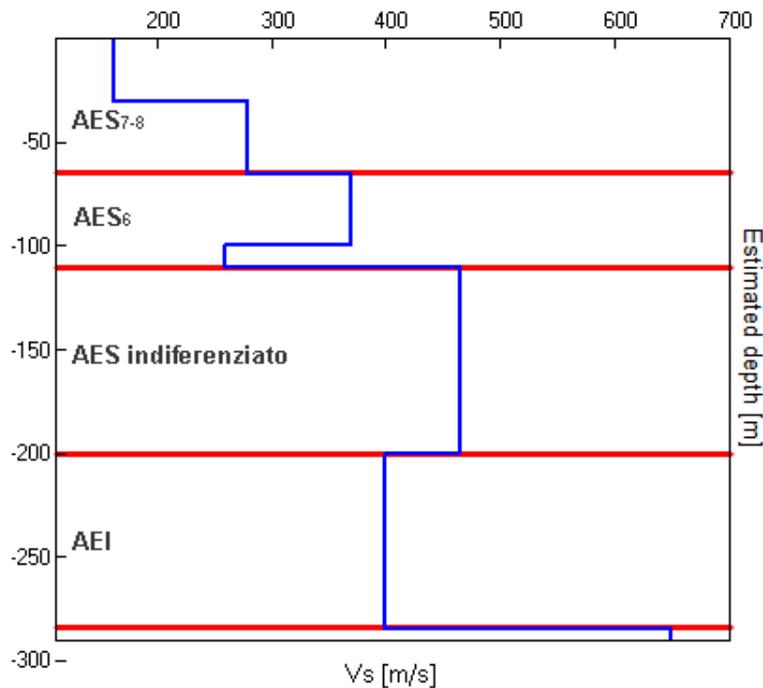


Figura 6-2 - Profilo di velocità ricostruito a partire dall'inversione della curva H/V misurata presso Consandolo (Figura 6-1) e correlazione coi principali limiti stratigrafici descritti al capitolo 5. Tale esempio costituisce il modello di riferimento per la zona di maggiore alto strutturale, in cui è possibile "vedere" strumentalmente il picco di H/V a più bassa frequenza (0,4 Hz) in corrispondenza del passaggio al *bedrock* sismico.

## 6.2 Terreni potenzialmente liquefacibili

Una delle maggiori incertezze messa in evidenza dallo studio di microzonazione sismica riguarda la distribuzione e l'estensione dei terreni potenzialmente liquefacibili presenti nella parte sommitale delle coperture quaternarie. In questa fase, per individuare e definire l'estensione delle aree instabili potenzialmente soggette a liquefazione (v. paragrafo 8.4) si è proceduto all'analisi dettagliata delle verticali disponibili, con lo scopo di verificare l'esistenza di importanti spessori di terreni granulari nei primi 20 m di sottosuolo. L'importanza di tali spessori è stata valutata applicando i criteri adottati da Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per gli studi di microzonazione realizzati nei Comuni appartenenti all'area epicentrale della sequenza sismica del maggio 2012, dettagliati al paragrafo 7.2. Nonostante il numero considerevole di indagini disponibili all'interno degli ambiti interessati dalla microzonazione la loro distribuzione non è purtroppo omogenea e

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

molte si fermano entro i primi 10-12 metri di profondità non permettendo di eseguire una valutazione attendibile della potenziale liquefacibilità dei depositi che sappiamo essere possibile entro i primi 20 metri di profondità. Considerando tali fattori e considerando che l'applicazione alle prove penetrometriche con punta meccanica (CPT) dei principali metodi speditivi per il calcolo del potenziale di liquefazione può fornire stime anche scarsamente affidabili (Veronese, 2014), appare chiaro come non sia sempre possibile discriminare con sufficiente dettaglio distribuzione ed estensione dei terreni liquefacibili.

Per questa ragione in alcuni casi si è ritenuto opportuno classificare tra le **zone di attenzione per liquefazione di tipo 1** (v. Tavola 4) aree meno indagate degli ambiti comunali oggetto della microzonazione. Tali ambiti saranno sicuro oggetto di approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello, nella cui sede, a fronte di nuove indagini e calcoli puntuali degli indici del potenziale di liquefazione, ne verrà rivalutata l'estensione e quantificato il rischio, mediante l'individuazione di zone a diverso grado di suscettibilità alla liquefazione. Anche in questa fase comunque, a supporto della prima valutazione qualitativa del rischio liquefazione, non ci si è limitati all'analisi delle stratigrafie, ma, sono state eseguite le stime dell'indice di liquefazione  $I_L$  con le procedure semplificate indicate dagli indirizzi regionali (paragrafo 7.2.1) sulle verticali d'indagine (prove penetrometriche statiche con piezocono CPTU) realizzate a supporto dello studio di microzonazione.

Come dettagliato in seguito (paragrafi 7.2 e 8.4), in ragione dell'analisi di dettaglio dei dati stratigrafici disponibili, entrambe le aree che, a seguito di tale calcolo, sono risultate a rischio basso sono state considerate come non liquefacibili, ma soggette solo ad amplificazione stratigrafica.

Preme comunque sottolineare che la variabilità nella distribuzione dei depositi sedimentari, anche su brevi distanze, non permette di escludere in senso assoluto la presenza di locali livelli granulari saturi in acqua anche in quelle porzioni di territorio attualmente non classificate come "Zone di attenzione per liquefazione". Per tali ragioni la valutazione sito specifica è comunque sempre delegata ad ulteriori indagini geognostiche, da realizzarsi in successive fasi di pianificazione e nella progettazione esecutiva di eventuali interventi.

Rispetto alla distribuzione areale del rischio da liquefazione, non deve essere dimenticato come questa sia stata fortemente influenzata dalle strette relazioni fra la storia idrografica

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

dell'area, l'accumulo dei corpi sedimentari e lo sviluppo in epoca storica dell'insediamento umano.

Nel complesso, i sedimenti granulari di alveo formano corpi acquiferi superficiali a buona permeabilità e trasmissività idraulica. I corpi di paleoalveo, più o meno dossivi, hanno rappresentato fino ad oggi dei percorsi attrattivi all'insediamento umano, che perciò si è storicamente focalizzato sulle aree che presentano il maggiore pericolo di liquefazione cosismica. Solo gli insediamenti industriali recenti si sono talvolta sviluppati indipendentemente dalla rete stradale ed infrastrutturale storica e sono perciò collocati in aree di depressione interalvea, meno soggetta a fenomeni di liquefazione, ma comunque interessate da amplificazione sismica. Particolare attenzione va invece posta alle aree ove gli argini artificiali di fiumi pensili, fortemente sopraelevati sulle piane circostanti, insistono su corpi sabbiosi, potenzialmente soggetti a fenomeni di liquefazione e sifonamento, in particolare lungo le sponde dei corsi d'acqua principali.

### **6.3 Frequenza naturale dei terreni ( $f_0$ )**

Le misure di rumore ambientale a stazione singola sono fortemente influenzate dal contesto del sito nel quale viene effettuata la registrazione e dalle condizioni meteorologiche.

Tra i fattori ambientali il vento è l'agente atmosferico con maggiore influenza, in grado di indurre perturbazioni a bassa frequenza ( $< 1$  Hz) non legate alle caratteristiche del sito.

I transienti principali sono provocati da sorgenti di breve durata, come il passaggio di automobili e treni, la cui influenza dipende dall'energia e dalla distanza. Il traffico urbano di una strada ad elevato scorrimento ad esempio, è una sorgente di onde a grande ampiezza e breve periodo, mentre i disturbi di natura industriale possono generare picchi estremamente ampi, o massimi locali multipli, in alcun modo connessi alle condizioni geologiche del sito.

Considerando le incertezze e le problematiche esposte, è stato necessario realizzare ben 144 registrazioni per ottenere i risultati delle 118 indagini di sismica passiva a stazione singola inserite poi in banca dati e quindi disponibili a supporto dello studio di microzonazione. In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta accertare la presenza di diffusi disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare alcune delle misure realizzate.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

La serie di microtremori realizzati a supporto dello studio di microzonazione (paragrafo 4.2.4) ha fornito dati con distribuzione areale e caratteristiche strumentali omogenee che, correlati con i dati geognostici disponibili, hanno permesso di stimare la profondità del substrato geologico assimilato al *bedrock* (paragrafo 6.1).

Le frequenze fondamentali ( $f_0$ ) acquisite con lo stesso tromografo digitale Tromino (escludendo quindi le "HVSr-MASW" di

Tabella 4-3), mostrano, a parte casi isolati, valori compresi tra 0,6 e 1,15 Hz. In ragione delle velocità molto basse delle coperture, anche le frequenze inferiori a 1Hz, fino anche a 0,8 Hz individuano discontinuità presenti entro i 100 metri di profondità dal piano compagna. In ogni caso, i picchi che rappresentano le frequenze fondamentali possono essere associati a discontinuità presenti a profondità diverse all'interno dei cicli deposizionali più superficiali del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, originate da depositi con velocità ancora decisamente basse (anche minori di 400 m/s), mentre il *bedrock* sismico ( $V_s$  almeno pari a 650 m/s) può essere ragionevolmente posizionato a maggiore profondità, in corrispondenza del passaggio tra i depositi quaternari continentali e quelli marini. Tale importante discontinuità può però essere individuata, con picchi evidenti di H/V a frequenza di circa 4 Hz, solo nelle porzioni di territorio caratterizzate dalla presenza di un alto strutturale, dove essa si trova a profondità relativamente ridotte (Figura 6-1 e Figura 6-2). Dove la sua profondità aumenta si arriva al limite della sensibilità della strumentazione impiegata e tale contrasto di impedenza diviene via via più sfumato a frequenze inferiori a 3 Hz e quindi difficilmente identificabile (paragrafo 6.1). Le carte delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3) sono descritte in dettaglio al paragrafo 8.3.

### 6.4 Velocità delle onde di taglio ( $V_s$ )

La stima dei Fattori di Amplificazione (F.A.) mediante procedura semplificata richiede sia la conoscenza della profondità del substrato rigido (paragrafo 6.1), sia quella della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 metri di sottosuolo. Quest'ultimo parametro permette sia di discriminare la categoria di sottosuolo per la definizione dell'azione sismica (N.T.C. 2008), sia di determinare i coefficienti di amplificazione sismica tramite gli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (D.A.L. 112/2007).

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Ad integrazione dei dati geofisici pregressi, sono state realizzate sette nuove indagini per la determinazione della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), 3 mediante tecnica ESAC (paragrafo 4.2.13), e 20 con metodo MASW (paragrafo 4.2.12).

La nuova campagna di indagini ha portato ad una distribuzione più omogenea dei dati di  $V_{s30}$  sul territorio indagato sulla cui base è stato possibile determinare che tutta l'area dell'Unione è caratterizzata da valori di  $V_{s30}$  minori di 225 m/s.

Questo dato, associato a quello della profondità del *bedrock* sismico (paragrafo 6.1), ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione per ogni singola area, mediante l'utilizzo degli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (paragrafo 7.1).

## 7 Metodologie di elaborazione e risultati

La finalità di uno studio di microzonazione sismica con approfondimenti di secondo livello è quella di giungere a una suddivisione del territorio indagato in zone a diversa pericolosità sismica, sulla base della suscettibilità delle stesse ad effetti locali cosismici.

Queste zone sono classificate come **stabili**, nel caso in cui non si ipotizzino effetti locali di alcuna natura, come **suscettibili di amplificazioni locali** qualora siano attese esclusivamente amplificazioni del moto sismico dovute all'assetto litostratigrafico e morfologico, e come **suscettibili di instabilità** se, oltre a fenomeni di amplificazione, si sospettino effetti di deformazione permanente del territorio.

Nei paragrafi seguenti saranno descritte le metodologie utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione previsti e identificare le caratteristiche dei locali fenomeni di instabilità che interessano le aree esaminate, nonché i risultati ottenuti dalle elaborazioni effettuate ai fini dello studio di microzonazione sismica.

Si specifica che all'interno dei territori dei Comuni dell'Unione risultano completamente assenti le zone stabili, in quanto sono sempre attesi fenomeni di amplificazione locale del moto sismico. Le aree classificate come suscettibili di instabilità, per le quali sono richiesti approfondimenti di terzo livello, presentano tutte potenziali problematiche legate a fenomeni di liquefazione.

## 7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

Come precedentemente accennato nelle zone classificate come **suscettibili di amplificazioni locali** sono attesi fenomeni di amplificazioni del moto sismico dipendenti dall'assetto litostratigrafico e morfologico locale.

Per suddividere il territorio in aree a maggiore e minore pericolosità in base all'amplificazione attesa, è stato necessario calcolare i fattori di amplificazione per ogni singola area analizzata, scegliendo se utilizzare gli abachi nazionali degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) o quelli di riferimento regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007).

Nel caso specifico si è ritenuto più opportuno utilizzare gli abachi regionali in quanto in grado di fornire una più corretta stima dell'amplificazione sismica rispetto agli abachi nazionali degli ICMS, poiché costruiti sulla base di esperienze dirette e modelli di risposta sismica locale specifici per il contesto litologico-stratigrafico regionale.

I diversi abachi proposti nell'Allegato 2 della D.A.L. 112/2007 sono stati costruiti sulla base dei differenti contesti geologici regionali, delle locali variazioni di profondità del *bedrock* sismico e della velocità delle onde volumetriche di taglio (onde S) a varie profondità nel sottosuolo.

La scelta dell'abaco più corretto per il contesto geologico-stratigrafico locale è stata effettuata tenendo conto di quanto riportato nella D.G.R. 1919/2013. L'allegato C ricorda come tale scelta vada effettuata non solo considerando le caratteristiche litologiche e morfologiche dell'area, ma valutando attentamente le peculiarità stratigrafiche del sottosuolo, in particolare la profondità ed il tipo di substrato.

Basandosi sulle valutazioni effettuate analizzando la cartografia e gli elaborati di primo livello e confrontando le indagini geognostiche e geofisiche (paragrafo 4.1 e 4.2) con le sezioni geologiche disponibili (v. Allegato 1), è stato possibile scegliere, tra quelli proposti per Pianura Padana e Costa Adriatica, l'abaco relativo alla "Pianura 2".

Quest'abaco risulta, infatti, rappresentativo dell'intero contesto geologico-stratigrafico dell'Unione, sintetizzabile attraverso un profilo stratigrafico costituito da alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, con substrato profondo ( $\geq 100$  m da p.c.).

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Le indicazioni relative alla profondità del substrato sono state ottenute attraverso la correlazione tra dati geologici e geofisici così come dettagliato nel paragrafo 6.1, a cui si rimanda per approfondimenti.

Per la stima dei Fattori di Amplificazione (F.A.) con procedura semplificata in aree di pianura dell'Emilia-Romagna, risulta necessaria, oltre alla definizione dello spessore del deposito di copertura e della profondità del *bedrock*, la conoscenza della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 metri di sottosuolo.

Sulla base della distribuzione dei valori di  $V_{s30}$ , ottenuti dall'elaborazione delle misure geofisiche disponibili (Tavola 5), è stato possibile definire che l'intero territorio indagato è caratterizzato da valori di  $V_{s30}$  inferiori a 225 m/s. Ciò ha consentito di attribuire a tutte le aree oggetto di studio nei tre comuni un'unica terna di fattori di amplificazione sia in termini di accelerazione di picco al suolo ( $FA_{PGA}$ - Tavole 6) sia di intensità di Housner per vari periodi di vibrazione ( $FA_{0.1-0.5s}$  - Tavole 7,  $FA_{0.5-1s}$  - Tavole 8).

## 7.2 Zone instabili potenzialmente soggette a liquefazione

Tra le principali instabilità sismoindotte in grado di determinare deformazioni permanenti del territorio, gli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) annoverano:

- instabilità di versante;
- liquefazioni;
- faglie attive e capaci;
- cedimenti differenziali.

Per le zone suscettibili di tali possibili effetti la normativa vigente richiede approfondimenti di terzo livello.

Considerando il carattere pianeggiante del territorio ed il contesto sismotettonico in cui si colloca l'Unione Valli e Delizie, le instabilità attese si riducono a potenziali fenomeni di liquefazione e, in aree limitate, a cedimenti differenziali.

Le indagini geognostiche disponibili (paragrafi 4.1 e 4.2) hanno permesso di stabilire che la principale e più diffusa causa di instabilità potenziale negli ambiti indagati è legata alla presenza di condizioni predisponenti la liquefazione.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Al fine d'individuare e definire l'estensione delle aree instabili potenzialmente soggette a liquefazione (v. paragrafo 8.4) si è proceduto all'analisi dettagliata delle verticali disponibili, con lo scopo di verificare l'esistenza di importanti spessori di terreni granulari nei primi 20 m di sottosuolo. L'importanza di tali spessori è stata valutata applicando i criteri adottati da Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per gli studi di microzonazione realizzati nei Comuni appartenenti all'area epicentrale della sequenza sismica del maggio 2012. Sono stati quindi considerati rilevanti, ai fini della liquefazione, orizzonti granulari poco addensati e saturi in acqua dello spessore di:

- almeno 40 cm, se presenti nei primi 5 m di sottosuolo;
- almeno 1 m se presenti tra 5 e 10 m;
- almeno 2 m se presenti oltre i 10 m rispetto alla superficie topografica.

Per ottenere infine, una prima valutazione qualitativa del rischio liquefazione, sono state eseguite alcune stime dell'indice di liquefazione  $I_L$  con le procedure semplificate indicate dagli indirizzi regionali (paragrafo 7.2.1). Tali stime sono state effettuate esclusivamente sulle verticali d'indagine realizzate a supporto dello studio di microzonazione (Tabella 7-3).

### **7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione**

La liquefazione è un fenomeno che si verifica in occasione di terremoti con magnitudo  $M > 5.5$  nelle aree in cui sono presenti, nei primi 15-20 m di sottosuolo, sedimenti granulari poco addensati e saturi in acqua, quali limi sabbiosi, sabbie e ghiaie sabbiose.

Durante l'evento sismico la pressione interstiziale dell'acqua, che è fluido incomprimibile, aumenta fino ad eguagliare le tensioni efficaci che legano i sedimenti granulari. L'annullamento della resistenza al taglio dovuto alle sovrappressioni indotte dallo scuotimento conduce alla liquefazione dei terreni, con conseguente perdita di capacità portante degli stessi e manifestazione di deformazioni permanenti.

Tra le cause principali di danneggiamento e crollo, la liquefazione è un effetto di sito dipendente dalla combinazione di una serie di fattori suddivisi tra "scatenanti" (eventi sismici attesi) e "predisponenti" (caratteristiche meccaniche dei sedimenti).

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Nell'effettuare le verifiche del potenziale di liquefazione è necessario, dunque, considerare le caratteristiche degli eventi sismici attesi tra cui magnitudo e accelerazione su suolo rigido di riferimento.

Per la stima della magnitudo attesa si è fatto riferimento alla zonazione sismogenetica nazionale - ZS9 (Meletti e Valensise, 2004) come indicato al paragrafo 2.8 degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008), che indica per i territori che ricadono nella Zona 912, valori di magnitudo  $M_{w_{max}}$  pari a 6,14. Tale zonazione, tra l'altro, propone il valore di magnitudo più cautelativo (elevato) tra quelle proposte in letteratura.

In relazione all'accelerazione su suolo rigido di riferimento a livello nazionale sono, invece, disponibili le mappe di pericolosità sismica realizzate nell'ambito della Convenzione INGV-DPC 2004-2006 (<http://esse1.mi.ingv.it/>). A scala regionale con la redazione e l'approvazione dei "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" (D.A.L. 112/2007) sono disponibili tabelle e formule propedeutiche alla valutazione preliminare dell'amplificazione locale oltre a dati fondamentali per valutazioni più accurate della risposta sismica, quali:

- lo spettro di risposta normalizzato per l'Emilia-Romagna ( $T_r = 475$  anni e smorzamento del 5%);
- i valori di accelerazione massima orizzontale al suolo rigido  $a_{refg}$  (10% probabilità di superamento in 50 anni) di ogni Comune dell'Emilia-Romagna.

Vista la presenza di terreni di copertura in grado di amplificare il moto sismico, per la verifica del potenziale di liquefazione il valore di  $a_{refg}$  deve essere moltiplicato per il  $FA_{PGA}$  (paragrafo 7.1 e 8.6), in modo da ottenere il valore di accelerazione di picco alla superficie ( $a_{g_{max s}}$ ).

In Tabella 7-1 sono riportati i valori dei parametri appena descritti, relativi ad ogni Comune dell'Unione. Il valore di  $a_{refg}$  è stato derivato dall'allegato 4 della D.A.L. 112/2007, mentre quello di  $FA_{PGA}$  è stato definito nell'ambito del presente studio di microzonazione attraverso gli abachi regionali (paragrafo 7.1 e 8.6). Essendo il valore di  $FA_{PGA}$  costante per l'intero territorio dell'Unione, l'accelerazione di picco alla superficie ( $a_{g_{max s}}$ ) dipenderà dalla sola  $a_{refg}$  e risulterà la stessa per l'intero territorio di ciascun comune.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Comune	$a_{refg}$		$F_{APGA}$		$a_{gmax s}$
Ostellato	0,133	x	1,5	=	0,20
Portomaggiore	0,152	x	1,5	=	0,23
Argenta	0,160	x	1,5	=	0,24

**Tabella 7-1 - Valori di accelerazione massima attesa su suolo rigido ( $a_{refg}$ ) e alla superficie ( $a_{gmax s}$ ) per i tre Comuni dell'Unione Valli e Delizie.**

Tra i metodi semplificati di analisi del rischio liquefazione raccomandati dagli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (Allegato 3 della D.A.L. 112/2007), sono presenti quelli basati su prove CPT. Come noto, tali metodi sono stati sviluppati sulla base di dati ottenuti da indagini penetrometriche con punta elettrica. Esperienze e raffronti diretti dimostrano come l'applicazione di tali metodi a dati ottenuti da prove penetrometriche con punta meccanica porti a risultati a volte sensibilmente differenti e in genere ad una sottostima del valore di  $I_L$  (Veronese T., Romagnoli M, 2014).

Numerose verifiche effettuate su verticali di indagine nelle aree interessate da liquefazione nel maggio 2012, hanno mostrato come, tra i vari metodi speditivi proposti dalla letteratura internazionale, quello di Idriss e Boulanger (2008) risulti di norma maggiormente cautelativo rispetto, ad esempio, a quello di Robertson e Wride (1998), suggerito dagli indirizzi regionali (Martelli *et al.*, 2013).

Come accennato al paragrafo 7.2, per ottenere delle prime valutazioni puntuali del rischio liquefazione nelle aree classificate come instabili, sono state eseguite stime dell'indice di liquefazione  $I_L$ . Queste ultime sono state effettuate solamente sulle 18 prove penetrometriche con punta elettrica realizzate per gli approfondimenti di secondo livello del presente studio di microzonazione.

Le ragioni sopra esposte hanno condotto al calcolo dell'Indice di Liquefazione ( $I_L$ ) (Iwasaki, 1978) mediante il metodo proposto da Idriss e Boulanger (2008), implementato in un foglio di calcolo Excel. Per l'elaborazione sono stati utilizzati, come parametri di input, l'accelerazione massima attesa in superficie ( $a_{gmax s}$ ) nei diversi Comuni dell'Unione (tabella 7-1), la magnitudo massima attesa ( $M_{wmax}$ ) e la profondità della falda rispetto alla superficie topografica, i cui valori sono riportati in

Tabella 7-2.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Parametri	Valori
$Mw_{max}$	6,14
	0,20 (Ostellato)
$a_{gmax s}$	0,23 (Portomaggiore)
	0,24 (Argenta)
Soggiacenza falda	1 m

Tabella 7-2 - Valori dei parametri utilizzati per il calcolo del Indice di Liquefazione ( $I_L$ )

Per le verifiche speditive è stato considerato un valore di soggiacenza della falda pari ad 1 m. In mancanza di uno studio idrogeologico dettagliato e di un'analisi storico-statistica dell'andamento delle isofreatiche, il valore di soggiacenza adottato è stato considerato maggiormente cautelativo rispetto a quello medio misurato nel corso delle indagini geognostiche e a quelli riportati nel Quadro Conoscitivo del PSC Associato Unione Valli e Delizie.

I valori puntuali di  $I_L$  ottenuti sono stati, infine, raggruppati in classi, secondo Sonmez (2003), in modo da poter distinguere tra siti a rischio di liquefazione basso ( $0 < I_L \leq 2$ ), medio ( $2 < I_L \leq 5$ ) ed elevato ( $I_L > 5$ ). Delle diciotto verticali analizzate (Tabella 7-3) solo 2 hanno evidenziato un rischio basso (in località Campotto e Benvignante), 9 un rischio medio e 7 un rischio elevato. Si sottolinea che, in ragione dell'analisi di dettaglio dei dati stratigrafici disponibili, entrambe le aree che risultano a rischio basso sono state considerate come non liquefacibili, ma soggette solo ad amplificazione stratigrafica (tavole 4, 6, 7 e 8).

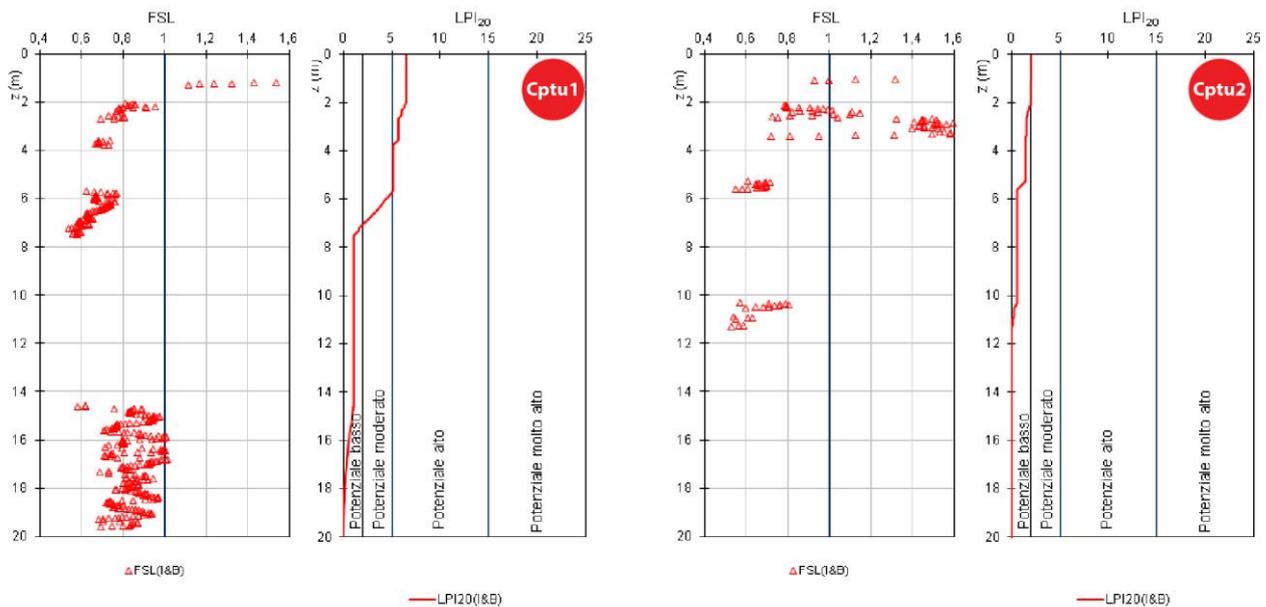
Verticale	$a_{max s}$	$I_L$ (I&B)	Verticale	$a_{max s}$	$I_L$ (I&B)
CPTu 1	0,1995	6,48	CPTu 10	0,240	7,96
CPTu 2	0,1995	2,04	CPTu 11	0,240	1,25
CPTu 3	0,1995	2,57	CPTu 12	0,240	9,66
CPTu 4	0,1995	3,19	CPTu 13	0,240	4,27
CPTu 5	0,1995	10,77	CPTu 14	0,240	12,79
CPTu 6	0,228	3,82	CPTu 15	0,240	2,5
CPTu 7	0,228	2,77	CPTu 16	0,240	4,72
CPTu 8	0,228	5,66	CPTu 17	0,240	1,85
CPTu 9	0,240	14,42	CPTu 18	0,240	4,91

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

**Tabella 7-3 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche a piezocono realizzate per gli approfondimenti di secondo livello. In tabella è riportato anche il valore di accelerazione di picco alla superficie utilizzata per il calcolo di  $I_L$ .**

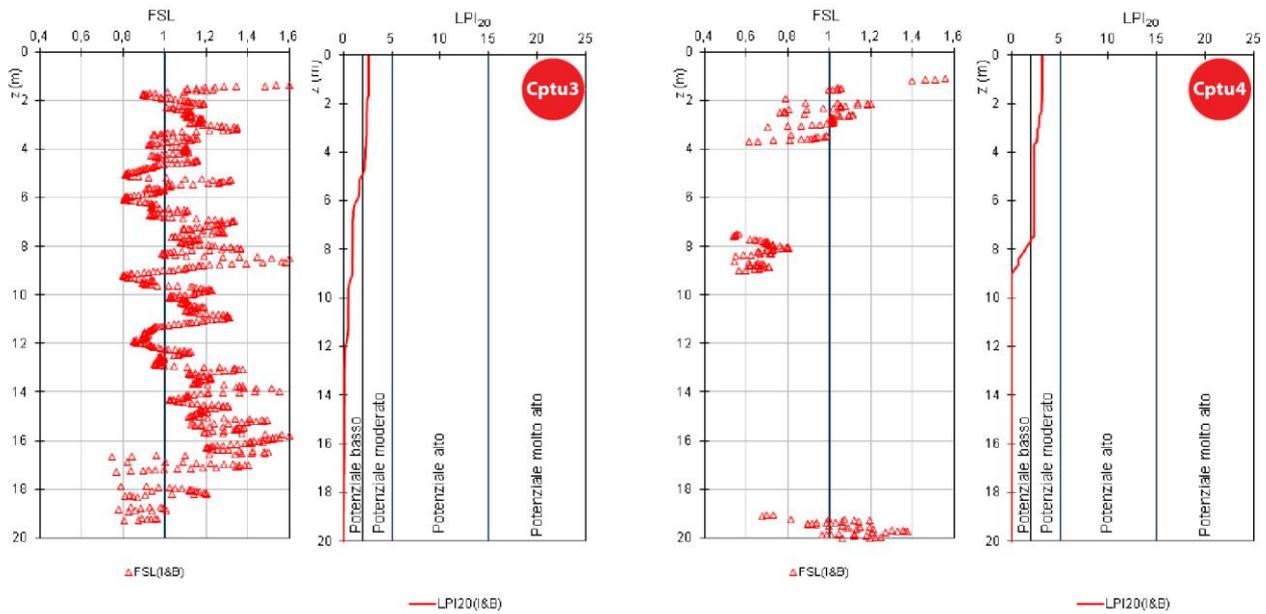
Per tutte le verticali analizzate sono di seguito riportati i grafici relativi all'andamento in profondità dell'indice del potenziale di liquefazione ( $I_L$ ) e del fattore di sicurezza (FSL). Tali andamenti consentano di stimare il contributo dei diversi orizzonti litostratigrafici all'indice totale ( $I_L$ ).

Quando il fattore  $FSL > 1$  i corrispondenti orizzonti litostratigrafici vengono considerati non liquefacibili, al contrario, se  $FSL < 1$ , gli stessi sono potenzialmente soggetti a fenomeni di liquefazione. Non va dimenticato che anche quando  $FSL > 1$  si possono verificare dopo il terremoto cedimenti permanenti del terreno.

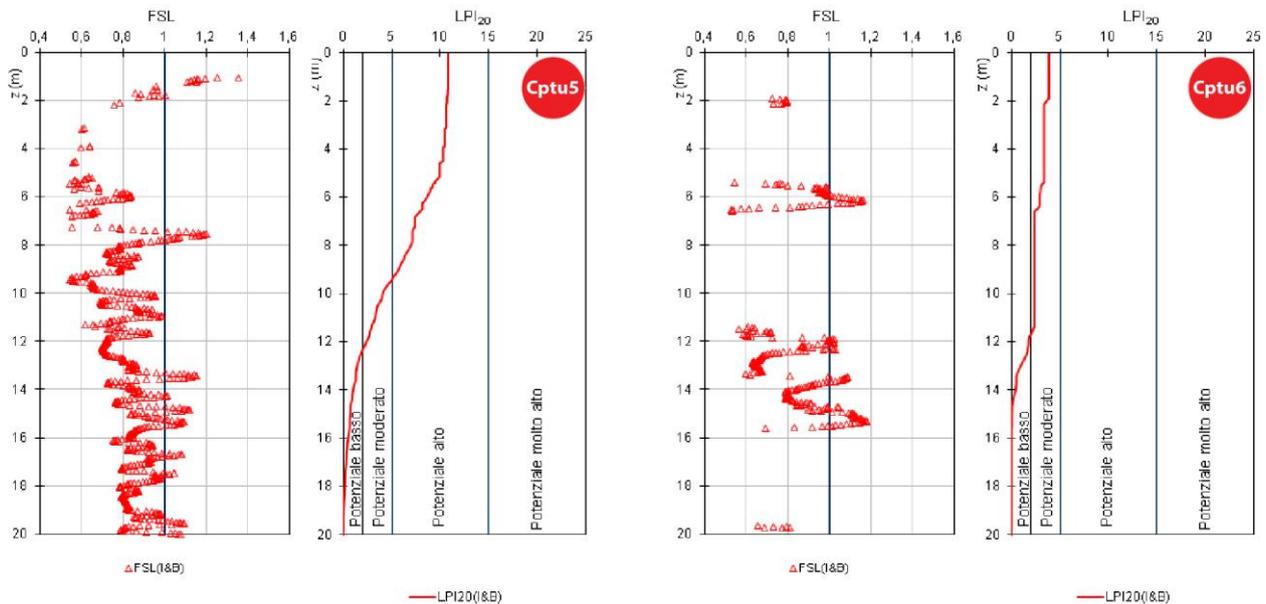


**Figura 7-1 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu1 e CPTu2. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).**

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE



**Figura 7-2 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu3 e CPTu4. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).**



**Figura 7-3 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu5 e CPTu6. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).**

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

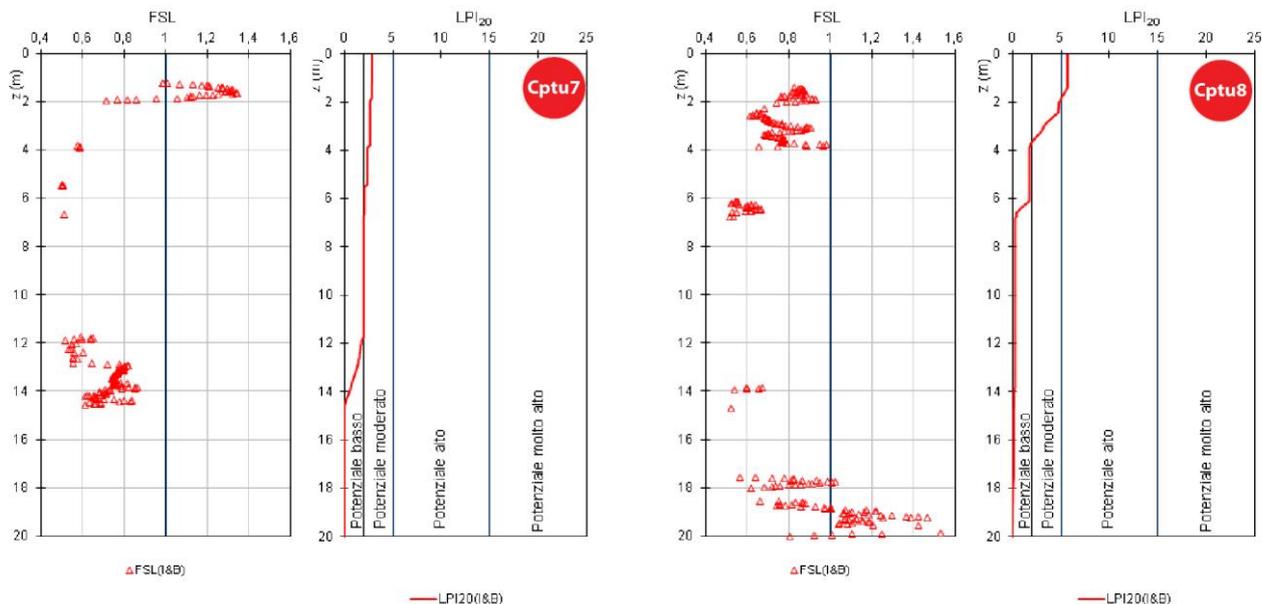


Figura 7-4 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu7 e CPTu8. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).

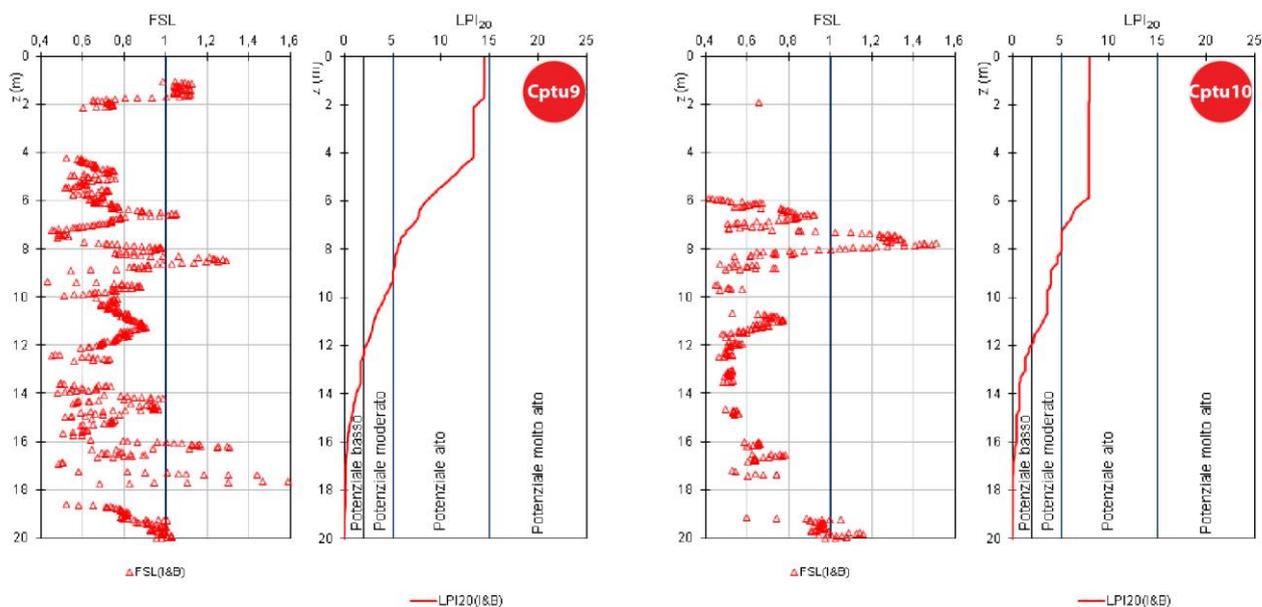


Figura 7-5 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu9 e CPTu10. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

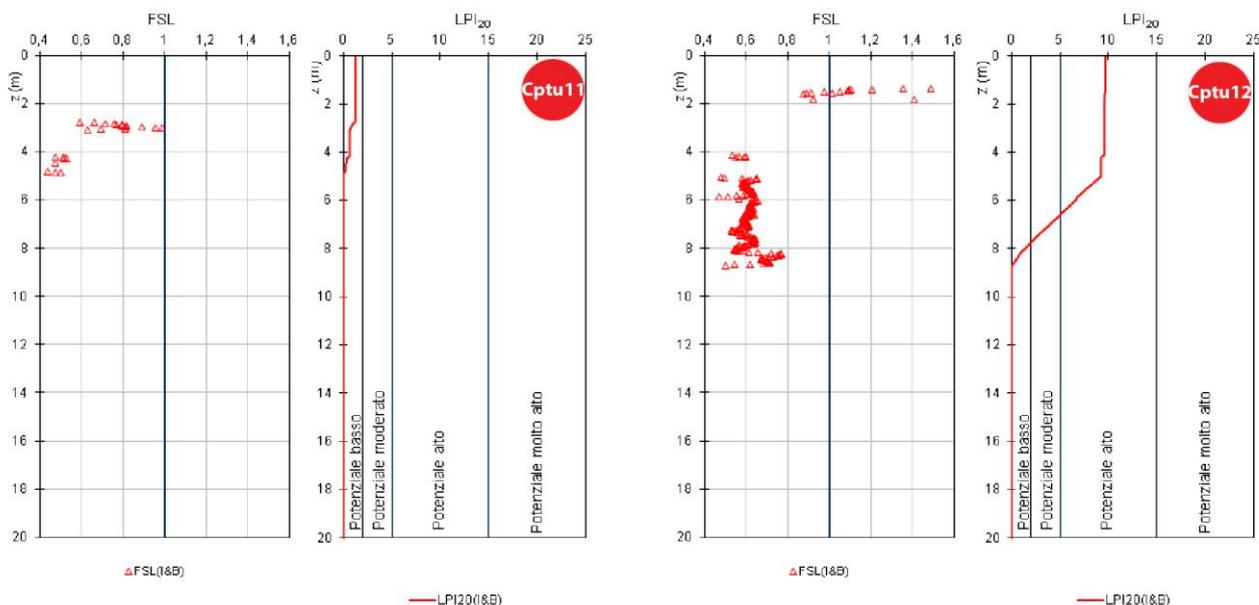


Figura 7-6 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu11 e CPTu12. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).

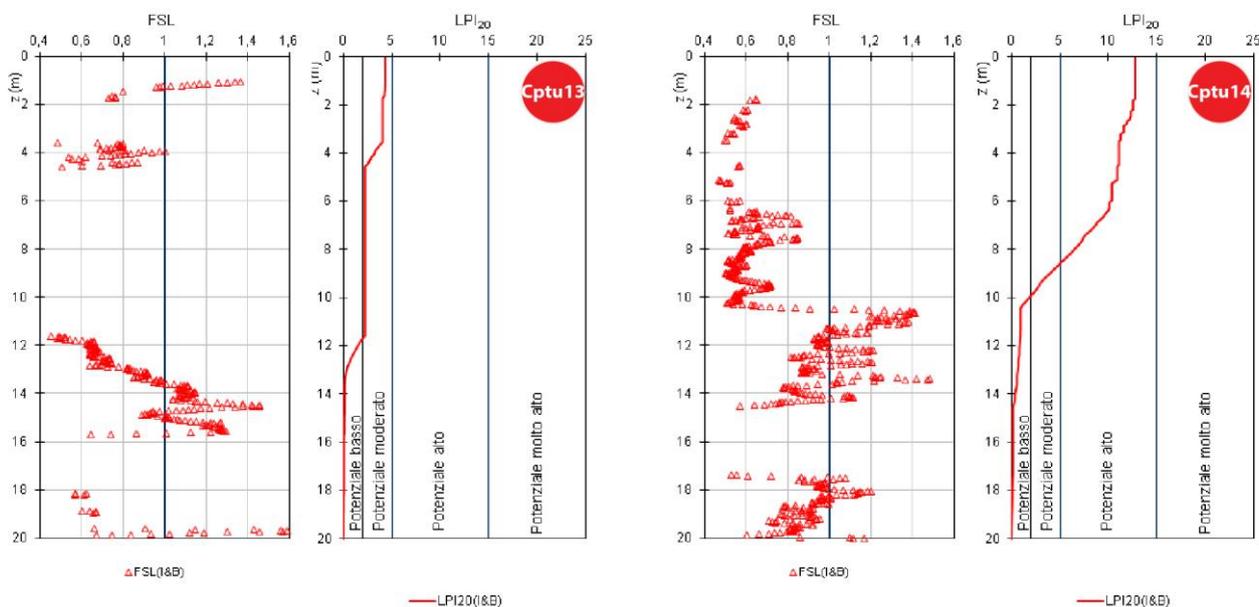


Figura 7-7 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu13 e CPTu14. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).



MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

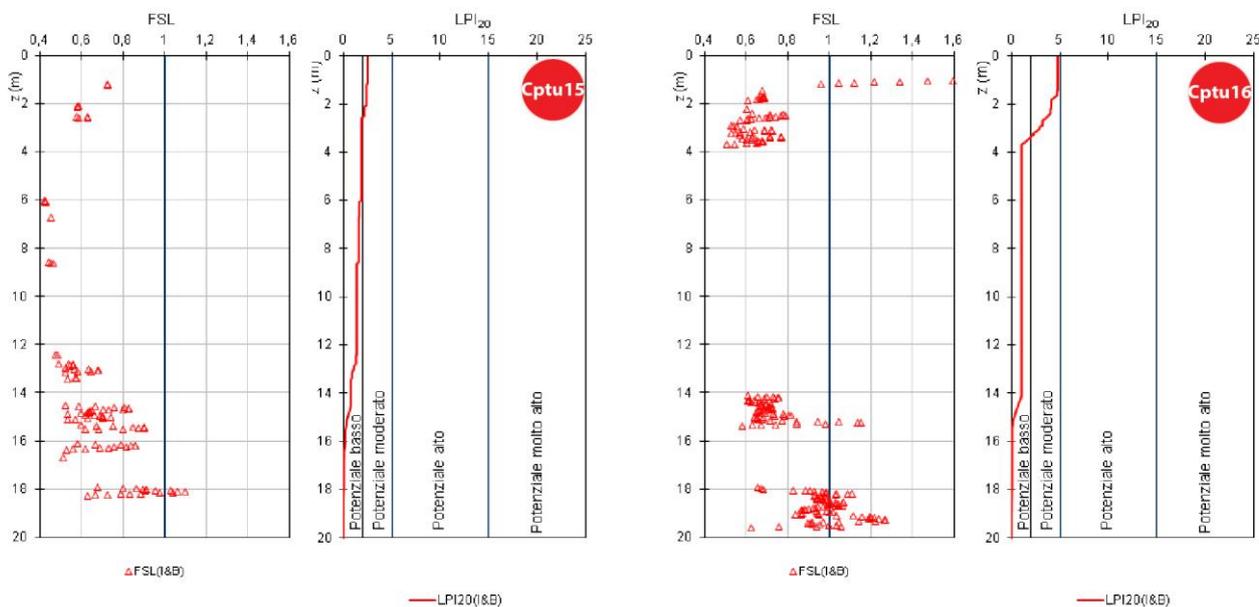


Figura 7-8 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu15 e CPTu16. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).

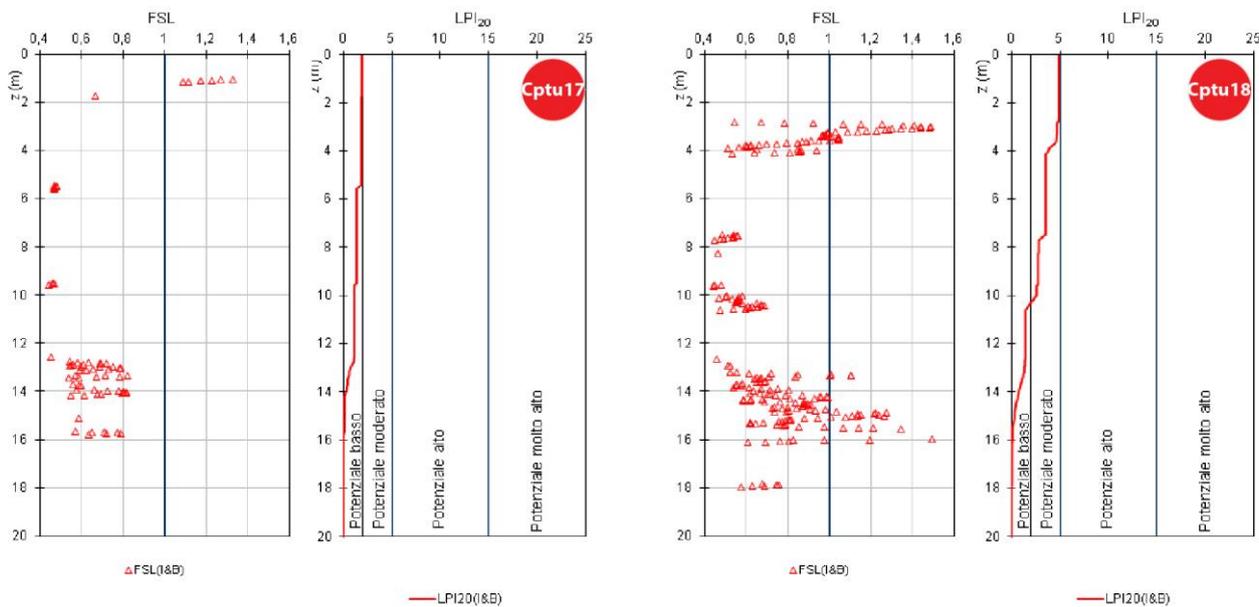


Figura 7-9 - Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu17 e CPTu18. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).

## 8 Elaborati cartografici

Le 32 tavole cartografiche realizzate in scala 1:10.000 per gli approfondimenti di primo e secondo livello di questo studio di microzonazione sismica, sono state redatte secondo quanto indicato nella Delibera n. 1919/2013 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna ed in conformità con le linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

La forma e soprattutto la notevole estensione del territorio dei 3 comuni, hanno reso necessaria la rappresentazione in riquadri centrati sugli ambiti di approfondimento della microzonazione sismica così come definiti al paragrafo 1.2. L'elevato numero delle frazioni del comune di Argenta ha richiesto la redazione di 2 tavole per ciascuna cartografia (contrassegnate dalle lettere "a" e "b"), mentre è tutto raccolto in una sola tavola per i comuni di Ostellato ("c") e Portomaggiore ("d").

La base cartografica di ognuna delle 32 tavole prodotte è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000, messa a disposizione dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

<b>Elaborato</b>	<b>Riferimento</b>	<b>Scala</b>
<i>Carta delle indagini</i>	Tavole 1 (a; b; c; d)	1:10.000
<i>Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica</i>	Tavole 2 (a; b; c; d)	1:10.000
<i>Carta delle frequenze naturali dei terreni</i>	Tavole 3 (a; b; c; d)	1:10.000
<i>Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1)</i>	Tavole 4 (a; b; c; d)	1:10.000
<i>Carta delle velocità delle onde di taglio (Vs)</i>	Tavole 5 (a; b; c; d)	1:10.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FA<sub>PGA</sub></i>	Tavole 6 (a; b; c; d)	1:10.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FA<sub>0.1-0.5 s</sub></i>	Tavole 7 (a; b; c; d)	1:10.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FA<sub>0.5-1 s</sub></i>	Tavole 8 (a; b; c; d)	1:10.000

**Tabella 8-1 - Elenco degli elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica.**

### 8.1 Carta delle indagini (Tavole 1)

La carta delle indagini consente di visualizzare l'ubicazione delle prospezioni geologiche e geofisiche utilizzate per lo studio di microzonazione sismica e comprende, quindi, sia quelle di

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

repertorio che quelle di nuova esecuzione, realizzate per l'attuale approfondimento di secondo livello.

Nelle diverse tavole, gli ambiti di microzonazione sono rappresentati attraverso riquadri alla scala 1:10.000 e le indagini che in essi ricadono raffigurate mediante simboli definiti dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica - versione 3.0 - della Commissione tecnica nazionale per la microzonazione sismica (anno 2013).

Utilizzando il metodo di rappresentazione proposto all'Appendice 2 dei suddetti standard, ad ogni sito d'indagine (punto viola in carta) sono associati i simboli grafici delle diverse tipologie di prove in esso realizzate (es. prova penetrometrica statica con piezocono, sondaggio a distruzione ecc.). Il numero a fianco di ogni simbolo identifica il quantitativo di prove di un determinato tipo realizzate nel medesimo sito.

Con l'impiego del metodo appena descritto, il posizionamento dei simboli cartografici avviene in maniera automatica e non modificabile. Ciò implica che il contrassegno della prova possa cadere anche al di fuori del limite che definisce un ambito di microzonazione.

Il rispetto delle procedure indicate negli standard non consente, inoltre, di differenziare graficamente le prove pregresse da quelle realizzate per lo studio di microzonazione sismica.

Per risalire alle ubicazioni delle indagini di nuova realizzazione si rimanda quindi al paragrafo 4.2 e all'allegato 2 della Relazione Illustrativa, contenete i rispettivi rapporti di prova.

## **8.2 Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica (Tavole 2)**

Nella Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica sono riportate tutte le informazioni di base quali, geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche o geotecniche, derivate dalla revisione critica di studi, elaborati e cartografie disponibili.

Per la sua redazione sono state dunque reinterpretate e sintetizzate le informazioni provenienti da diversi elaborati disponibili, tra cui di fondamentale importanza sono risultati:

- la Carta Geomorfologica della Pianura Padana scala 1:250.000 (Castiglioni *et al.*, 1998);
- i fogli 203, 204, 2005 della Carta Geologica d'Italia scala 1:50.000;
- il rilievo altimetrico ad alta risoluzione da telemetria laser aviotrasportata (LIDAR);
- le carte geologico-geomorfologiche allegare al Quadro Conoscitivo del P.S.C. dell'Unione Valli e Delizie.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Nella Carta Geologico-Tecnica, a scala 1:10.000, sono stati rappresentati gli elementi geologici e morfologici in grado di modificare il moto sismico in superficie o determinare effetti locali, la distribuzione dei terreni di copertura più superficiali e altre informazioni necessarie alla definizione del modello di sottosuolo e funzionali alla realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica.

Non essendo presenti unità deposizionali affioranti, o sub-affioranti, riconducibili a substrato geologico, verranno in seguito descritte esclusivamente le forme di superficie e sepolte, i terreni di copertura superficiali e gli altri elementi geologici riportati in cartografia.

### **8.2.1 Forme di superficie e sepolte**

Tra le numerose forme di superficie e sepolte elencate nelle linee guida, nel territorio dell'Unione Valli e Delizie sono state individuate quelle riferibili ad assi di paleoalveo e tracce di sezioni geologiche.

Gli assi di paleoalveo riportati in carta evidenziano l'andamento di antichi alvei di Po, Reno ed altri fiumi appenninici minori, oggi sepolti a debole profondità. Le paleo-direzioni dei corsi fluviali, indicate dal verso delle frecce del simbolo grafico, sono state ricostruite mediante la ricostruzione del contesto paleogeografico, l'utilizzo di fonti e cartografie storiche o attraverso l'analisi di prove geognostiche di repertorio (Tavole 2).

Pur essendo diffusamente presenti nel territorio dell'Unione Valli e Delizie, i paleoalvei sepolti a debole profondità interessano solo un numero limitato degli ambiti studiati. Tracce di paleoalveo sepolto sono visibili in carta negli ambiti di San Nicolò, Ospital Monacale, Benvignante e Quartiere. La traccia dell'importante corpo di paleoalveo del Po di Primaro è visibile a sud di Consandolo e ad Argenta, dove attraversa una significativa porzione dell'area urbana.

Allo studio sono allegate 4 sezioni geologiche (v. Allegato 1) considerate rappresentative del modello geologico di sottosuolo, realizzate sia dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per il Progetto CARG (sezioni 81 e 95), sia dalla Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, (1998) per il progetto riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna (sezione 32), che dalla Provincia di Ferrara per il progetto risorse idriche

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

sotterranee provinciali (sezione 86), quest'ultima reinterpretata dagli scriventi in chiave stratigrafico-sequenziale.

Le sezioni geologiche mostrano i principali rapporti stratigrafici delle unità sedimentarie riconosciute nel sottosuolo dell'Unione. Tali rapporti sono stati ricostruiti alla scala regionale mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi, mentre le unità sono state interpretate in chiave idro-stratigrafica, in termini di acquiferi e acquicludo (v. Allegato 1).

### 8.2.2 Elementi geologici

Come indicato negli standard della Commissione Tecnica di microzonazione sismica (versione 3.0 - 2013), tra gli elementi funzionali alla definizione del modello di sottosuolo, sono stati riportati in carta tutti i pozzi e sondaggi disponibili, con i rispettivi valori di profondità rispetto alla superficie topografica.

I 57 sondaggi e pozzi riportati in carta sono stati tematizzati in colore verde nel caso in cui la loro profondità raggiunga il substrato geologico (paragrafo 5.1), mentre in colore rosso in caso contrario. Come è possibile osservare dalla cartografia (Tavole 2) nessun pozzo raggiunge però il substrato geologico. L'andamento nel sottosuolo della superficie assimilabile al tetto del cosiddetto *bedrock sismico* (substrato rigido paragrafo 6.1) è stato ricostruito mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi realizzati da ENI-AGIP, Regione Emilia-Romagna ed altri per scopi di ricerca idrica, petrolifera e stratigrafica, questi ultimi collegati al progetto nazionale di cartografia geologica (CARG). Il numero di sondaggi disponibili tra la fascia pedappenninica e territorio indagato consente una ragionevole caratterizzazione e ricostruzione della superficie di tetto del cosiddetto *bedrock sismico*.

Relativamente ad altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica dagli standard di rappresentazione e archiviazione, si precisa che, vista la quasi totale assenza di dati geognostici sul sottosuolo profondo, non è stato possibile ricostruire in pianta, tramite isobate, l'andamento della superficie considerata come tetto del *bedrock* sismico in questo studio. Infine, gli esigui dati freatimetrici disponibili non sono stati riportati in carta in quanto disomogenei e di dubbia qualità, dunque ritenuti non utili, se non addirittura forvianti, ai fini dello studio.

### 8.2.3 Terreni di copertura

Sulla base dei criteri per la definizione del modello geologico già descritti al capitolo 5, nella parte sommitale e affiorante dei terreni di copertura olocenici sono state distinte sei unità, ognuna delle quali associabile ad una delle classi predefinite negli standard di microzonazione. Tali classi sono state definite mediante l'*Unified Soil Classification System* (USCS - modificato, ASTM, 1985), un sistema di classificazione dei suoli utilizzato sia in ingegneria sia in geologia, che può essere applicato alla maggioranza dei materiali non consolidati.

Per ognuna delle unità perimetrate sono stati riportati in cartografia colorazione e codici alfabetici corrispondenti alle rispettive classi (USCS) individuate negli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica. Il codice alfabetico che identifica le unità, costituito da una prima porzione maiuscola e da una seconda minuscola (es. **SMes**), indica rispettivamente i caratteri litotecnici e gli ambienti di genesi deposizionale che contraddistinguono i terreni di copertura.

Sulla base della classificazione sopra citata, sono state individuate e cartografate le unità descritte in seguito e rappresentate nella carta geologico-tecnica degli ambiti soggetti a microzonazione sismica. Le unità sono l'espressione di processi sedimentari attivi nell'ambiente sedimentario della pianura deltizia del Po, in età protostorica e storica. Le diverse categorie granulometrico-litologiche possono essere perciò riferite ai vari elementi deposizionali, quali canali fluvio-deltizi, argini naturali, piana interalvea/interdistributrice, palude costiera.

- **SPes -- Sabbie pulite con granulometria poco assortita di canale**

Sabbie medie e fini, talvolta con laminazioni trattive a festone, che passano lateralmente a sabbie fini limose e limi. I corpi sabbiosi mostrano strati amalgamati e mal definiti, a gradazione diretta, e l'unità è spesso organizzata in sequenze positive (*fining upward*). Queste sequenze passano gradualmente da sabbie medie a sabbie fini limose e possono chiudersi bruscamente verso l'alto o sfumare in limi ed argille organiche da abbandono fluviale, talvolta assai spesse. Queste sabbie formano lunghi corpi nastriformi, a sezione lenticolare biconvessa, base più o meno nettamente erosiva, spessori anche di oltre 12 m e

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

larghezze comprese tra i 500 e gli 800 m. In affioramento, questi corpi mostrano uno sviluppo planimetrico ondulato, con complesse relazioni d'intersezione e articolate espressioni morfologiche e geometriche.

Lateralmente, queste sabbie di alveo fluviale passano ai termini granulometricamente più fini che rappresentano corpi di canale o, localmente, a canali e ventagli da rotta fluviale. Questi corpi granulari di sabbie presentano un addensamento medio, buona permeabilità ed un'elevata trasmissività idraulica, nella direzione di allungamento del corpo di paleoalveo. Ben visibili in affioramento per le morfologie spesso dossive, sono identificabili anche attraverso immagini aeree e satellitari, per i colori chiari e l'elevata riflettività ottica.

Il principale corpo di sabbie fluviali corrisponde al riempimento dell'alveo del Po dell'Eridano che attraversa la maggior parte degli ambiti di microzonazione del Comune di Ostellato. Questo canale ha rappresentato il principale alveo del Po, dalla seconda metà del I° Millennio a.C. alla prima metà del I° Millennio d.C. Poco a valle del territorio qui analizzato, questo canale si apriva in una serie di canali terminali, che innervavano un ampio lobo deltizio. Questo alveo fu abbandonato dal Po in epoca tardo antica o altomedievale, lasciando un lungo e pronunciato dosso morfologico. Un altro corpo di sabbie di riempimento di alveo fluviale corrisponde al ramo principale del Po medievale, quello del Volano, entrato progressivamente in crisi a partire dal XII secolo ed estinto nel XVI. Questo importante corpo sedimentario interessa però solo marginalmente il limite nord-occidentale del territorio comunale oggetto di questo studio di microzonazione. Il grande corpo di sabbie dell'Eridano forma ampie porzioni degli ambiti di zonazione di Rovereto, San Vito, Dogato, Ostellato Capoluogo, San Giovanni di Ostellato. La piccola porzione di sabbie fluviali nella parte settentrionale dell'ambito di Medelana è invece da attribuire al corso medievale del Volano.

Sabbie di riempimento del paleoalveo del Po dell'Eridano affiorano inoltre nel territorio comunale di Portomaggiore negli ambiti di Runco e Gambulaga.

Sabbie pulite con granulometria poco assortita attribuire al corso medievale del Primario affiorano a San Nicolò, e i più limitatamente ad Ospital Monacale, Traghetto, Boccaleone e San Biagio. A valle di Traghetto il corpo di paleoalveo del Primario è ben sviluppato ma

risulta molto frequentemente ricoperto da alcuni metri di sedimenti fini di provenienza appenninica deposti tra il XIII e IVX secolo in grandi casse di espansione lungo il Reno.

- **SMes -- “Sabbie limose, miscela di sabbia e limo, di canale”**

Questi terreni presentano forti analogie sedimentologiche con le sabbie pulite con granulometria poco assortita di canale (SPes), ma hanno una granulometria media decisamente minore, registrando spesso condizioni di minore energia idrodinamica. Gran parte della descrizione sedimentologica precedente è quindi applicabile anche a questa unità. Nella **parte settentrionale dell’area indagata**, queste sabbie fini limose e limi rappresentano il riempimento di una serie di canali di rotta e delta interno, che uscivano verso sud dal lato destro del canale dell’Eridano, come nei pressi di Sandalo e Maiero e a sud di Dogato. **Nella parte meridionale dell’area indagata**, sedimenti di analoga granulometria corrispondono invece al riempimento finale del canale del Po di Primaro, in cui, fra XV e XVIII secolo scolavano a tratti le acque di Savena, Zena, Sillaro, Santerno. In questo caso, queste sabbie fini e limi presentano ovviamente una composizione geochemica e petrografica diversa da quella delle sabbie padane, presenti soprattutto nella parte settentrionale dell’area indagata.

Questi sedimenti granulari relativamente fini sono presenti a nord, nell’ambito di Libolla e marginalmente a San Giovanni di Ostellato. Nell’ambito del territorio di Portomaggiore, essi affiorano a Sandolo e Maiero, dove sono legati ad un sistema di delta interno, a Quartiere; e nei pressi di Portorotta e Ripapersico, ove questi sedimenti sono legati ad un paleoalveo minore che si stacca dal Po dell’ Eridano e che successivamente fu sede del corso del Sandolo.

- **MHes -- “Limi inorganici, sabbie fini di argine e canale”**

Questi sedimenti sono formati da limi inorganici, sabbie fini limose, miscele di varie granulometrie di tipo *loam*, limi argillosi a bassa plasticità. Nei livelli granulari si osservano frequentemente gradazioni dirette e si rinvencono intraclasti fangosi o frammenti organici, spesso attribuibili a piante superiori legnose. Questi litotipi si sono deposti in fasce relativamente strette di argine naturale, parallele, sui due lati opposti,

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

all'alveo dei canali distributori deltizi. Questi corpi arginali diventano lateralmente più fini e sfumano in vaste aree interdistributrici, più o meno topograficamente depresse. Gli argini hanno ovviamente età analoga a quella dei contigui depositi di canale; essi si sono deposti quindi nella seconda metà del I millennio a.C. nella parte settentrionale dell'area studiata, lungo l'alveo dell'Eridano, mentre sono di età medievale nella parte meridionale, ove si sviluppano gli argini del Primaro. I sedimenti del corpo di argine naturale del Po mostrano granulometrie più grossolane di quelle associate ai canali secondari, sviluppati in sistema di delta interno minore. Questi corpi sono caratterizzati da una permeabilità media, che aumenta, in genere, avvicinandosi ai corpi di paleoalveo.

Nelle aree sud-occidentali indagate appartenenti al **Comune di Argenta**, sedimenti granulometricamente simili formano lo stretto corpo di riempimento dell'ultimo canale lasciato nel Primaro dall'abbandono della acque del Po, durante il XVI secolo. Il canale residuale è stato poi riempito da limi e sabbie fini limose, portati da fiumi appenninici minori, come il Savena e lo Zena. Questo corpo di riempimenti terminale ha una larghezza in genere variabile fra i 50 e i 150 m e spessori sempre inferiori a 7-8 m.

Nel **Comune di Ostellato**, questi corpi di argine fiancheggiano quasi ovunque le sabbie dell'alveo dell'Eridano, da Rovereto fino ad est di San Giovanni di Ostellato. Il corpo di argine destro (meridionale) del Volano affiora invece nell'ambito di Medelana.

All'interno del **Comune di Portomaggiore**, questi sedimenti sono presenti al margine settentrionale e meridionale dell'ambito di Gambulaga e, in piccola parte, a nord di Sandolo; in entrambe le località questi sedimenti rappresentano i depositi di argine e ventaglio da rotta dell'Eridano. Questi sedimenti affiorano anche nella parte centrale degli ambiti di Portorotta, Portomaggiore capoluogo e Portoverrara, dove rappresentano il riempimento di alveo minore, che, provenendo da Portorotta, attraversava Portomaggiore e Portoverrara e si dirigeva nell'area delle Valli di Comacchio.

- **MLes -- "Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità di argine e canale"**

Si tratta di sedimenti granulari fini, dominati da granulometrie limose (*silt*), spesso più o meno amalgamati dalla bioturbazione, indotta sia da organismi limivori che da apparati

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

radicali; altrove, si osservano strati centimetrici gradati e laminazioni orizzontali piano-parallele o piccoli sets di lamine trattive. La composizione geochimica e petrografica è diversa da quella del Po ed indica una provenienza dalla Catena Appenninica. Questi sedimenti sono stati depositi da eventi di piena e tracimazione in ambienti di argine naturale. Essi perciò formano due fasce allungate, fra loro parallele, sui due lati contrapposti dei corpi di sabbie di riempimento di canale fluviale. In genere, questa fasce arginali sono sorprendentemente ben sviluppate, se paragonate con le dimensioni più ristrette dei contigui alvei fluviali. Questi corpi sedimentari presentano una permeabilità media, che si riduce fortemente allontanandosi dal corpo di sabbie di riempimento di paleoalveo. Questi sedimenti di argine naturale sono associati ai paleoalvei del Sillaro, Santerno, Claterna, Idice, Zena, Savena e Reno, di età geologicamente molto recente. Sedimenti analoghi formano anche la parte più recente del canale del Primaro, abbandonato dalle acque del Po e divenuto collettore terminale di fiumi appenninici. In particolare, questi sedimenti formano i ventagli da rotta ed i corpi arginali presenti a Filo, Longastrino ed Anita, ove si sono depositi a partire dal XVII secolo.

- **CLdl -- “Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille limose di piana deltizia”**

Questi depositi di depressione interalvea sono costituiti da argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa. Le argille contengono frequentemente tracce d'apparati radicali o sono intensamente bioturbate da organismi limivori, tanto da rendere non più visibili le originarie stratificazioni e strutture sedimentarie. Di rado, sono preservate fitte laminazioni piano-parallele d'aspetto varvato o sottili interstrati sabbioso-limosi gradati a base netta, contenenti intraclasti argillosi e frammenti legnosi. I sedimenti fangosi possono contenere sparsi bioclasti di molluschi continentali, quali gasteropodi polmonati e lamellibranchi d'acqua dolce (es. *Limnea palustris*), frustoli carboniosi e foglie di piante arboree e ninfee, talvolta in ottimo stato di conservazione. In aree orientali, sono presenti anche fossili di ambienti salmastri, come foraminiferi e bioclasti di *Cerastoderma*. Le parti topograficamente più depresse e frequentemente inondate sono caratterizzate da argille a

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

maggior plasticità, argille limose, argille organiche, ricche di livelli torbosi, oggi ossidati nei pressi della superficie. Questi sedimenti si sono depositi in ambienti di piana interdistributrice inondabile, stagno e palude dolce, stagno salmastro, soggetti a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione dei canali distributori deltizi. Questi sedimenti conservano spesso le originarie colorazioni scure unitamente ad elevati contenuti in umidità; caratteri che li rendono ben identificabili in superficie, anche attraverso analisi di immagini aeree e satellitari a falsi colori nell'infrarosso vicino. Queste unità coesive presentano in genere una permeabilità molto bassa e rappresentano, quindi, un livello di acquicludo superficiale.

I sedimenti qui discussi formano ampie porzioni dei territori comunali, ma sono presenti molto più limitatamente all'interno degli ambiti analizzati. All'interno del **Comune di Ostellato**, piccole aree sono presenti negli ambiti di Medelana, nella parte meridionale dell'ambito di Dogato, a sud-est di Ostellato capoluogo e nell'area dell'Industria Bompani e nei terreni adiacenti ad essa, verso nord.

Nel territorio comunale di **Portomaggiore**, questi litotipi fangosi sono presenti ad est di Sandolo, a nord di Maiero, a nord-est di Quarterie; essi costituiscono poi ampie porzioni dei terreni presenti negli ambiti di Ripapersico e Portomaggiore capoluogo, oltre ad affiorare estesamente a Portoverrara.

All'interno del **Comune di Argenta**, questo tipo di sedimenti di piana deltizia sono presenti, in modo più o meno esteso, ad Argenta capoluogo, San Biagio, Filo, Longastrino, Bando, oltre ad affiorare a nord di Consandolo, ad est di Ospital Monacale e a Benvignante.

- **OLfl -- "Limi organici, argille limose organiche di bassa plasticità di deposito fluvio-lacustre"**

Questi sedimenti sono dominati da argille limose, ricche in resti organici vegetali indecomposti, passanti a limi argillosi, a limi ricchi in sostanza organica e a intercalazioni francamente torbose. La composizione mineralogica e geochimica di questi sedimenti è dissimile da quella del Po, come ad esempio visibile dal loro contenuto in manganese decisamente più basso. Questi fanghi limosi sono in genere amalgamati dalla bioturbazione, ma possono mostrare resti di laminazioni piano-parallele assai fini. Questi

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

sedimenti presentano una permeabilità molto bassa; le loro parti affioranti si sono deposte in età molto recente, a partire dal XVII secolo. Questi sedimenti, deposti in ampie depressioni interalvee sono assai diffusi nella parte più meridionale del territorio indagato, a sud dell'antico corso del Po di Primaro. In alcune aree limitrofe sussistono ancora ambienti umidi di sedimentazione attiva di litotipi relativamente analoghi, come nelle casse di espansione di Campotto e Vallesanta. Dato che questo tipo di sedimenti di depressione interalvea è tendenzialmente repulsivo all'insediamento umano, essi sono relativamente poco sviluppati all'interno degli ambiti oggetto di microzonazione. Sono invece presenti nei pressi di Argenta, Campotto, nella parte meridionale di Consandolo, a Traghetto – e nello zuccherificio, Santa Maria Codifiume. Le porzioni più recenti di questo tipo di sedimenti sono associate a casse di espansione, create, a partire dal XVIII secolo e poi spesso rapidamente riempite da sedimenti di origine appenninica, come nella grande cassa di espansione delle acque del Reno a sud di Consandolo, i cui depositi coprono in gran parte i precedenti sedimenti dell'alveo del Po di Primaro.

- **PTpl -- “Torbe ed altre terre fortemente organiche di palude laguna e stagno”**

L'unità si è deposta in ambienti umidi salmastri e schizoalini ed è costituita da torbe, argille torbose, argille e argille limose, spesso bioclastiche, di colore scuro, talvolta con subordinate intercalazioni di limi e talvolta sottili strati sabbiosi gradati. Questi sedimenti organici si sono deposti sia in ambienti dulcicoli che in lagune fortemente salmastre, con episodi iperalini. I sedimenti deposti in ambienti salmastri sono in genere molto ricchi in bioclasti di molluschi, generalmente dominati da associazioni oligospecifiche o monospecifiche, dominate dalle valve del lamellibranco *Cerastoderma glaucum*. **Nella parte orientale dell'area cartografata**, si registra, in genere, un'evoluzione da ambienti prevalentemente subaerei a paludi dolci, ad ambienti salmastri, fino a condizioni francamente lagunari. Questa evoluzione registra il progressivo allagamento della piana deltizia dell'Eridano, in gran parte emersa in età romana, progressivamente impaludata in età medievale e trasformata in laguna salmastra in età moderna, fino alle grandi opere di bonifica idraulica del secondo dopoguerra. Un'evoluzione analoga fu registrata anche nelle aree nord-orientali, in direzione di Massafiscaglia ed Ostellato. Questo tipo di fanghi

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

organici sono estesamente affioranti nella parte orientale del territorio dell'Unione, ma, essendo storicamente per nulla attrattivi per gli insediamenti umani, sono scarsamente rappresentati negli ambiti esaminati ai fini del presente studio. All'interno di questi ambiti, questi sedimenti sono presenti nei pressi di San Giovanni di **Ostellato**, nell'area Sipro, e, all'interno del ambito di **Argenta** a Consandolo e Bando.

### 8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavole 3)

Nella tavola, sono riportati, in scala 1:10.000, i punti di misura di microtremore a stazione singola con i rispettivi valori acquisiti della frequenza di risonanza fondamentale ( $f_0$ ).

I punti di misura utilizzati per lo studio sono tematizzati con colori diversi in relazione al valore di ampiezza massima del picco di H/V. Ampiezze superiori a 3 sono distinte con un simbolo con uno sfondo di colore rosso, mentre il bianco è utilizzato per valori inferiori.

Sulla base dei dati ottenuti dalle misure microtremore sismico è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo due delle classi di frequenza proposte nell'allegato C della Delibera di Giunta Regionale 1919/2013. Nel territorio indagato la frequenza fondamentale ( $f_0$ ), infatti, mostra sia valori inferiori ad 1 Hz che superiori (sempre comunque inferiori a 2) indicando la presenza di riflettori sismici anche al di sopra dei 100 m di profondità (paragrafo 6.1). A scala intercomunale è quindi possibile riconoscere un trend di variazione della frequenza ( $f_0$ ) che tende ad un generale aumento spostandosi verso sud-est, permettendo di individuare una zona caratterizzata da picchi ( $f_0$ ) compresi tra 1 e 2 Hz nella parte sud orientale dell'area indagata. Tale zona, individuata in cartografia con un colore giallo più intenso, interessa gli ambiti di approfondimento dello studio di microzonazione solo di una parte del comune di Argenta (tavola 3a). In ogni caso, negli *shapefile* consegnati a corredo della banca dati, così come richiesto dall' nell'allegato C della Delibera di Giunta Regionale 1919/2013, sono state inserite due aree (una con  $f_0$  maggiore di 1 e una con  $f_0$  compresa tra 1 e 2) che caratterizzano l'intero territorio dell'Unione. Si sottolinea che i picchi di H/V corrispondenti alle frequenze naturali dei terreni sopra descritte, sono originati da depositi con velocità ancora decisamente basse (anche minori di 400 m/s) e che il *bedrock* sismico è invece individuabile a frequenze ancora inferiori ( $\leq 0,4$  Hz) e solo nelle zone di alto strutturale (paragrafi 6.1 e 6.3)

## 8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavole 4)

La carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) o carta delle aree suscettibili di effetti locali è l'elaborato di sintesi fondamentale del primo livello di approfondimento degli studi microzonazione.

Questa tavola è stata realizzata per le sole aree oggetto dello studio di microzonazione sismica di dettaglio (zone urbanizzate e urbanizzabili), i cui ambiti sono presentati in carta mediante riquadri alla scala 1:10.000.

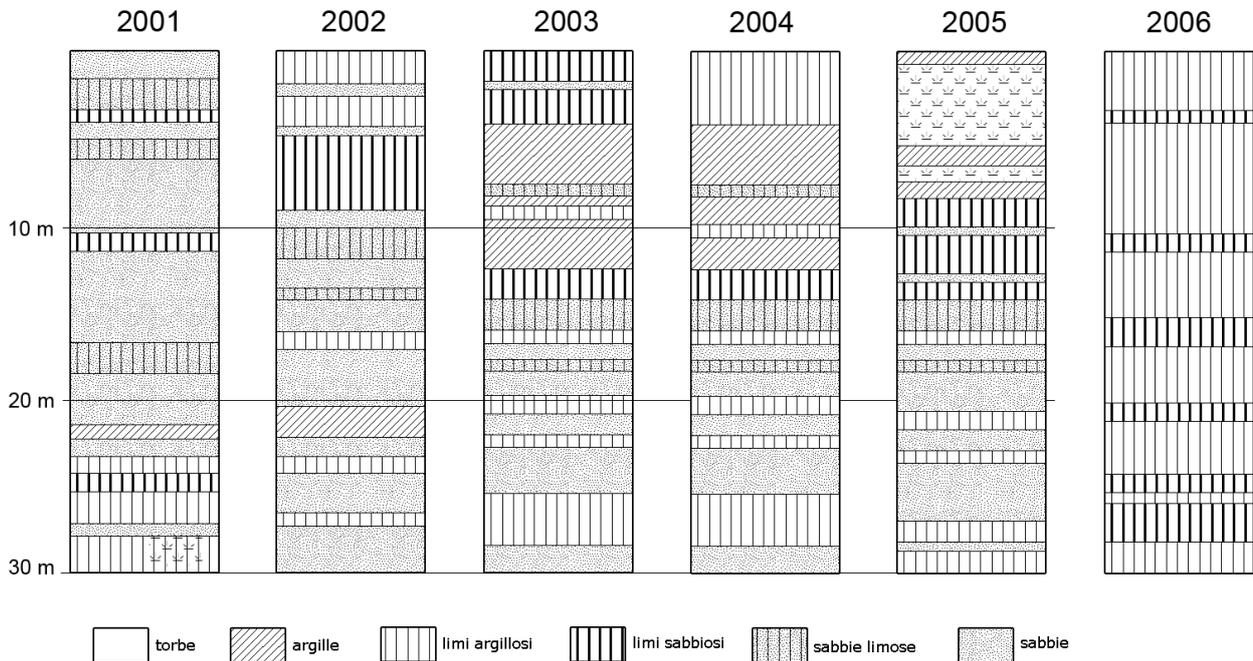
Come indicato nell'allegato C dalla D.G.R. 1919/2013, questa cartografia riporta la classificazione del territorio indagato in **zone suscettibili di amplificazioni locali** e **zone suscettibili di instabilità** in quanto nell'area risultano completamente assenti zone classificabili come stabili. Nelle tavole sono, inoltre, riportate le ubicazioni dei punti di misura del rumore ambientale (tavola 3, paragrafo 8.3) come richiesto dagli standard della Commissione Tecnica di microzonazione sismica (versione 3.0 - 2013).

**Le zone suscettibili di amplificazioni locali** sono state definite sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica (Figura 8-1) e distinte in 6 classi di cui in carta sono visibili le perimetrazioni.

Alle classi individuate sono stati associati codici identificativi numerici progressivi (2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006) e successivamente attribuite colorazioni distinte, utilizzando toni in sequenza del verde, giallo e marrone, come previsto da dagli standard sopra citati.

Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi (Figura 8-1) con la descrizione delle relative successioni in base alle quali sono state definite le classi zonali. Tali descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE



**Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale.**

### Zona 2001

Terreni di copertura costituiti prevalentemente da depositi sabbiosi con alternanze limo-sabbiose per i primi 20-25 metri, caratterizzati da un generale aumento della granulometria e dell'addensamento al di sotto dei 10 metri, seguiti da depositi in prevalenza limo-argillosi a consistenza media.

### Zona 2002

Terreni di copertura costituiti da un primo intervallo di 3-6 metri di depositi in prevalenza limo-argillosi a consistenza media, a cui seguono spessori significativi di limi sabbiosi e sabbie caratterizzati da un generale aumento della granulometria e dell'addensamento con la profondità, intervallati, oltre i 10 metri di profondità, da limitati spessori di depositi limo-argillosi.

### Zona 2003

Terreni di copertura costituiti da un primo intervallo di 3-5 metri di depositi in prevalenza limo-sabbiosi, a cui seguono spessori di almeno 7 metri di argille e limi a consistenza da media

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

a bassa, con rare intercalazioni limo-sabbiose di spessore decimetrico. Oltre i 10 metri sono presenti livelli almeno metrici di limi sabbiosi e sabbie ad addensamento da medio ad elevato, intervallati da spessori variabili e in genere in aumento con la profondità, di limi argillosi e argille a consistenza media.

**Zona 2004**

Terreni di copertura costituiti da un primo intervallo di almeno 10 metri di depositi in prevalenza limo-argillosi a consistenza da media a bassa seguiti da livelli almeno metrici di limi sabbiosi e sabbie ad addensamento da medio ad elevato, intervallati da spessori variabili e in genere in aumento con la profondità, di limi argillosi e argille a consistenza media.

**Zona 2005**

Terreni di copertura costituiti da un primo intervallo di almeno 7 metri di depositi argillosi a consistenza bassa con diffusi livelli torbosi, seguiti da livelli metrici di limi sabbiosi e sabbie ad addensamento da medio ad elevato, intervallati da spessori variabili e in genere in aumento con la profondità di limi argillosi e argille a consistenza media.

**Zona 2006**

Terreni di copertura costituiti da almeno 20 metri di depositi in prevalenza limo-argillosi a consistenza da media a bassa, con rare intercalazioni limo-sabbiose ad addensamento da basso a medio di spessore decimetrico, la cui frequenza aumenta in genere con la profondità.

**Le zone** cartografate come **suscettibili di instabilità** (corrispondenti a tutte le zone MOPS eccetto la zona 2006), per le quali sono richiesti approfondimenti di terzo livello, presentano tutte potenziali problematiche legate a fenomeni di liquefazione. Considerato il livello di approfondimento dello studio ed il contesto sismotettonico locale, tali aree sono state classificate come **zone di attenzione per liquefazione di tipo 1** e rappresentate in carta mediante retino con relativo codice identificativo (3050), come previsto dagli standard di microzonazione adottati. Alcune aree che presentano spessori significativi di depositi potenzialmente liquefacibili, sono anche caratterizzate dalla presenza di riporto antropico in superficie e quindi possono essere interessate da cedimenti differenziali cosismici. All'interno degli ambiti studiati questa situazione è stata individuata solo nell'area urbana di Argenta in

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

corrispondenza dell'antichi fossati oggi tombati. Queste aree sono indicate in carta come **sovrapposizione di zone di attenzione per instabilità differenti** e rappresentate con colore pieno rosso scuro (3050). Si sottolinea che, in due distinte zone 2006 (frazioni di Campotto e Benvignante), il calcolo degli indici di liquefazione sulle verticali delle prove CPTU ha individuato un rischio basso, con indice del potenziale di liquefazione inferiore a 2, ma comunque superiore ad 1 (paragrafo 7.2). In ogni caso, in ragione dell'analisi di dettaglio dei dati stratigrafici disponibili, entrambe le aree sono state considerate come non liquefacibili, ma soggette solo ad amplificazione stratigrafica.

Si segnala infine che le zone 2005, ed in misura minore le zone 2006, possono essere interessate da cedimenti cosismici a causa della presenza di spesse successioni di depositi di palude formate da argille organiche plastiche e torbe con caratteristiche meccaniche particolarmente scadenti (bassi valori di  $C_u$  e alto indice plastico). Tale criticità in ogni caso non rientra nelle tipologie di instabilità previste dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

## 8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavole 5)

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, attraverso riquadri alla scala 1:10.000, tutti i punti di misura di  $V_s$  archiviati in banca dati ed utilizzati ai fini dello studio di microzonazione sismica, ed i rispettivi valori di  $V_{S30}$  associati.

Per gli approfondimenti di secondo livello qui descritti, sono state eseguite 23 nuove indagini geofisiche, 3 delle quali di tipo ESAC e 20 di tipo MASW.

Considerando la distribuzione e l'andamento dei valori di  $V_{S30}$ , ottenuti dall'elaborazione delle misure geofisiche disponibili, è stato possibile stabilire che l'intero territorio indagato presenta valori inferiori a 225 m/s.

Questo dato, associato a quello della profondità del *bedrock* sismico (paragrafo 6.1), ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione, mediante l'utilizzo degli gli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (paragrafo 7.1).

## 8.6 Carte di microzonazione sismica (Tavole 6 - Tavole 7 - Tavole 8)

Le tre Carte di Microzonazione Sismica di secondo livello o Carte dei fattori di amplificazione delle aree (Tavola 6, Tavola 7, Tavola 8), sono state realizzate in accordo con quanto previsto dall'Allegato C dalla D.G.R. 1919/2013 e rappresentano gli elaborati di sintesi finale per gli studi di microzonazione con approfondimenti di secondo livello. Esse riportano la classificazione delle aree indagate in base all'amplificazione attesa, quantificata tramite fattori parametrici di amplificazione in termini di accelerazione di picco al suolo ( $FA_{PGA}$  - Tavole 6) e di intensità di Housner per vari periodi di vibrazione ( $FA_{0.1-0.5s}$  - Tavole 7,  $FA_{0.5-1s}$  - Tavole 8).

I fattori di amplificazione utilizzati ( $FA_{PGA}$ ,  $FA_{0.1-0.5s}$ ,  $FA_{0.5-1s}$ ) sono stati calcolati sulla base dell'abaco "Pianura 2" proposto dagli indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007), in quanto in grado di fornire una più corretta stima dell'amplificazione sismica rispetto agli abachi nazionali degli ICMS, poiché costruiti sulla base di esperienze dirette e modelli di risposta sismica locale specifici per il contesto litologico-stratigrafico regionale.

All'intero territorio dell'unione è stato, quindi, attribuito un valore per ognuno dei tre fattori di amplificazione considerati ( $FA_{PGA}$ ,  $FA_{0.1-0.5s}$ ,  $FA_{0.5-1s}$ ), riportato in carta tramite la colorazione corrispondente alla propria classe parametrica di valori di amplificazione (standard Commissione Tecnica di microzonazione sismica, versione 3.0 - 2013).

Le zone suscettibili di amplificazioni locali soggette, inoltre, ad instabilità dovute a potenziali fenomeni di liquefazione (zone di attenzione per liquefazione di tipo 1) sono rappresentate in carta mediante retino, come previsto dagli standard di microzonazione sopra citati. Le aree che presentano sovrapposizione di zone di attenzione per instabilità differenti presentano sia la suscettibilità a fenomeni di liquefazione, che a cedimenti differenziali dovuti alla presenza di riporti antropici.

## 9 Commenti finali e criticità

La conclusione del percorso di microzonazione sismica di secondo livello ha condotto sia alla determinazione dell'amplificazione attesa, in termini di accelerazione di picco al suolo ( $FA_{PGA}$  - Tavola 6) e di intensità di Housner per vari periodi di vibrazione ( $FA_{0.1-0.5s}$  - Tavola 7,  $FA_{0.5-1s}$  - Tavola 8), sia all'individuazione delle zone in cui la presenza di terreni granulari,

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

potenzialmente saturi in acqua, potrebbe indurre fenomeni di liquefazione cosismica. Per queste aree interessate da questi fenomeni di instabilità, risultano necessari approfondimenti di terzo livello.

Pur essendo questa la principale criticità rilevata su scala comunale, le verifiche sul potenziale di liquefazione, quando effettuate, sono state in passato eseguite su dati derivanti da indagini penetrometriche statiche di tipo meccanico (CPT) che - come visto al paragrafo 4.1 - costituiscono la maggior parte del patrimonio geognostico disponibile sul territorio indagato. Tenendo inoltre presente che recenti esperienze dimostrano come gli indici di liquefazione calcolati su prove di tipo CPT con punta meccanica risultino spesso scarsamente affidabili a causa di una sovrastima del valore dell'attrito laterale (Veronese, 2014), è opportuno segnalare come dall'analisi delle relazioni geologiche acquisite presso gli archivi comunali, è emerso come tali verifiche siano state di norma effettuate utilizzando valori di magnitudo e di accelerazione assai meno cautelativi di quelli suggeriti dalle procedure indicate negli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008). Tali scelte hanno quindi in molti casi portato ad una sottostima del rischio di liquefazione nelle aree indagate.

Per le stime quantitative effettuate, mediante metodi semplificati, sulle indagini CPTU eseguite per la microzonazione sismica sono stati, invece, utilizzati i parametri di input suggeriti dagli ICMS (Tabella 7-2). I risultati, sintetizzati in Tabella 7-3 evidenziano un rischio elevato per 7 delle 18 aree indagate. Valori di  $I_L > 5$ , sono stati rilevati a Dogato, Portorotta, Longastrino e Argenta, mentre indici ancora più rilevanti, con  $I_L > 10$ , si ritrovano nelle località di San Vito, Anita e Consandolo. I terreni liquefacibili di Dogato e San Vito sono legati alla presenza del paleoalveo del Po dell'Eridano, mentre per Anita e Longastrino, le maggiori criticità derivano dalla presenza di spessi depositi di sabbie costiere saturi. Fenomeni di liquefazione cosismici dovuti dalla presenza delle sabbie di paleoalveo del Primaro, sono invece probabili nelle aree di Argenta e Consandolo, come nell'area di Portorotta interessata da sedimenti granulari di canale fluviale minore.

Per quanto concerne il potenziale di liquefazione dei terreni granulari descritti si tenga inoltre presente che i valori di accelerazione massima in superficie attesi ad Ostellato sono significativamente inferiori rispetto a quelli attesi nei Comuni di Portomaggiore ed Argenta.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

A tal proposito si sottolinea che per le future fasi di pianificazione territoriale o di progettazione esecutiva di interventi, il calcolo del potenziale di liquefazione andrebbe eseguito riferendosi alle procedure (metodi semplificati su prove penetrometriche statiche con punta elettrica spinte ad almeno 20 metri di profondità) e ai parametri di input (magnitudo attesa in particolare) utilizzati per lo studio di microzonazione. Scelte meno cautelative andrebbero di conseguenza adeguatamente motivate dai tecnici incaricati delle verifiche, anche attraverso una approfondita indagine sul contesto idrogeologico locale (indicazione delle soggiacenze minime).

Il numero di prove penetrometriche a piezocono realizzate sinora sul territorio comunale, purtroppo esiguo in rapporto alla sua estensione, permette solamente di perimetrare in modo cautelativo, le aree potenzialmente soggette a fenomeni di liquefazione (v. paragrafo 6.2).

Dal quadro fin qui descritto, emerge la necessità di approfondimenti di terzo livello per la quasi totalità delle aree urbanizzate e urbanizzabili oggi indicate cautelativamente come "Zone di attenzione per liquefazioni di tipo I". Allo stato attuale, è comunque possibile effettuare considerazioni di tipo qualitativo, secondo le quali le zone MOPS "2001" e "2002" (cfr. paragrafo 8.4) dovrebbero essere caratterizzate da rischio mediamente maggiore rispetto alle rimanenti, mentre le zone MOPS "2005" e "2006" dovrebbero essere interessate da rischi tendenzialmente molto bassi (2005) se non del tutto assenti (2006), ma da possibili cedimenti postsismici.

Gli approfondimenti di terzo livello dovrebbero essere in primo luogo finalizzati alla definizione dell'effettivo potenziale di liquefazione dei depositi, attraverso l'esecuzione di un congruo numero di prove penetrometriche statiche con piezocono.

L'esecuzione di queste nuove indagini, su cui sarà possibile applicare in maniera affidabile i principali metodi semplificati per il calcolo degli indici di liquefazione, permetterà di rivalutare sia l'estensione che le caratteristiche del rischio, mediante l'individuazione di zone a diverso grado di suscettibilità.

Negli approfondimenti di terzo livello dovrà essere posta particolare attenzione a tutte quelle aree in cui la distribuzione e la qualità dei dati geognostici non risulta attualmente sufficiente per una caratterizzazione di dettaglio e soprattutto a quegli ambiti non direttamente interessati da specifiche indagini durante gli studi di secondo livello.

## MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

Nelle aree ritenute a maggior rischio, si ritiene inoltre opportuno realizzare prove di tipo diretto (sondaggi geognostici) che consentano il prelievo di campioni dei depositi granulari posti entro i 20 metri di profondità, da sottoporre ad analisi granulometriche e prove cicliche di laboratorio, al fine di quantificare l'effettiva suscettibilità alla liquefazione. Sulla base di prove cicliche sui campioni, potranno essere quantificati anche i possibili cedimenti.

Queste prove dovranno considerarsi indispensabili qualora si rinverano spessori significativi di depositi i cui fusi granulometrici rientrano nelle fasce di possibile liquefazione, o in caso di interventi edilizi di elevata entità previsti dagli strumenti urbanistici comunali.

Da ultimo, occorre rammentare come anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità risultino sempre rappresentative di volumi di terreno limitati, specie in un contesto come quello di pianura in cui la variazione laterale dei caratteri stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. Ciò considerato, in fase di piano urbanistico attuativo (PUA) e di progettazione degli interventi, si dovrà sempre prevedere una adeguata campagna di indagini geognostiche, anche in funzione della rilevanza e della destinazione d'uso delle opere da realizzare, in quanto può risultare alquanto pericoloso estendere valutazioni puntuali sulla liquefacibilità ad areali contigui più o meno estesi.

Nelle aree caratterizzate dalla presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche meccaniche particolarmente scadenti (bassi valori di Cu e alto indice plastico), concentrate in particolare nella microzona 2005 (e in misura minore nelle zone 2004 e 2006), dovranno essere attentamente valutati e quantificati i possibili cedimenti postsismici, attraverso adeguate campagne di indagini geognostiche in situ e prove geotecniche di laboratorio. Si sottolinea che in ogni caso gli attuali standard di microzonazione sismica nazionali (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), non prevedono l'indicazione di specifiche zone caratterizzate da questo tipo di criticità, a meno che non si decida di utilizzare le zone instabili per "Cedimenti differenziali, crollo di cavità sotterranee/*shinkhole*", che paiono però destinate a rappresentare altri tipi di instabilità.

## 10 Bibliografia

- AA.VV., (2011) - *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n.2.
- Albarello D., Castellaro S., (2011) - *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. In "Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica", Ingegneria sismica, a. XXVIII, n. 2.
- Amorosi A., (1997a) - *Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony: a tool for provenance research*. Sedimentary Geology, 109: 135-153.
- Amorosi A., (1997b) - *Miocene shallow-water deposits of the northern Apennines: A stratigraphic marker across a dominantly turbidite foreland-basin succession*. Geologie en Mijnbouw, v. 75, p. 295-307.
- Amorosi A. & Farina M., (1995) - *Large-scale architecture of a thrust-related alluvial complex from subsurface data: the Quaternary succession of the Po Basin in the Bologna area (Northern Italy)*. Giornale di geologia, 57: 3-16.
- ASTM, (1985) - *Classification of Soils for Engineering Purposes*. Annual Book of ASTM Standards, D 2487-83, 04.08, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395-408.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone, P., (1990) - *Structural model of Italy - Sheet n. 1*, in: Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V., Sartori R., Scandone P., Vai G.B. (Eds.), Structural model of Italy. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Roma.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Tanini C. and Vannucci G., (2004) - *Seismotectonic Map of the Emilia-Romagna Region, 1:250.000*. Regione Emilia-Romagna - CNR.
- Boccaletti M., Martelli L., (Coords) (2004) - *Carta sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna scala 1:250.000 e note illustrative*. SELCA, Firenze
- Bruun P., (1962) - *Sea-level rise as a cause of shore erosion*. American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Waterways and Harbors Division 88, 117-130.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003) - *An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*. ANNALS OF GEOPHYSICS 46.
- Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R., Valensise G., (2012) - *Is blind faulting truly invisible? Tectonic-controlled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (Northern Italy)*. ANNALS OF GEOPHYSICS 55.
- Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2009) - *Foglio 187-Codigoro*. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2005) - *Foglio 199-Parma Sud*. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2009) - *Foglio 203-Poggio Renatico*. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2009) - *Foglio 204-Portomaggiore*. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2009) - *Foglio 205-Comacchio*. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2009) - *Foglio 202-San Giovanni in Persiceto*. ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2005) - *Foglio 240-241 Forlì-Cervia*. APAT-Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- 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 Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.
- 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.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006) - *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002, versione 1.1*. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

CDS - Centro ricerche Documentazione Studi economico-sociali (2007) - Quadro Conoscitivo del PSC associato "Unione Valli e Delizie".

Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002) - *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1:250.000*. SELCA, Firenze.

Commissione tecnica MS3907, (2014) - *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS vers. 3.0*.  
[http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS\\_3.0\\_open.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_3.0_open.pdf).

Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., and Penitenti D., (1992b) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. Rapport CIESM 33:125.

D.A.L. Regione Emilia-Romagna n. 40 del 21 dicembre 2005 - *Piano di Tutela delle Acque*. Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 20 del 13/02/2006.

D.A.L. Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02 febbraio 2007 - Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della LR 20/2000 per *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica*. Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.

D.C.P. Provincia di Ferrara n. 32 del 29/05/2014 - Variante al PTCP della Provincia di Ferrara: ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale, contenente una Relazione di Quadro Conoscitivo inerente la sismicità in Provincia di Ferrara;

D.G.R. Emilia-Romagna n. 1919/2013: Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/13 a favore degli Enti locali.

DISS Working Group, (2015) - *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>. INGV 2015 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Di Dio G. & L. Caporale - *"Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza."* BRIGHENTI G. & MESINI E. (a cura di), *Problemi di Geoingegneria: estrazione di fluidi e subsidenza*, GEOfluid 98 (1998): 67-76.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

- Dominguez J.M.L. & Wanless H.R., (1991) - *Facies architecture of a falling sea-level strandplain, Doce river coast, Brazil*. In: Swift djp and oertel gf (Eds), Shelf Sandstone Bodies (special issue). Int Assoc Sedimentol 14: 259-289.
- Emergeo Working Group, (2013) - *Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May-June 2012 (Northern Italy)*. Nat. Haz. Earth Syst. Sci., 13, 935-947.
- Farabegoli E., Onorevoli G., Ruffino C., Costantini B., (1997) - *Subsurface structure of southern Po Plain Quaternary deposits (Ravenna Province, Italy)*. Special publication, Bologna University-Agip (Eds.) 12.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012a) - *Terremoti dell'Emilia - Maggio 2012. Rilievo macrosismico MCS speditivo. Rapporto finale. 15 giugno 2012*, <http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/TerremotoEmiliaMCS.pdf>.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012b) - *The MCS macroseismic survey of the Emilia 2012 earthquakes*. Annals of Geophysics Vol. 55, No 4.
- Gruppo di Lavoro MPS, (2004) - *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapporto conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.
- Gruppo di Lavoro MS, (2008) - *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. [http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view\\_pub.wp?contentId=PUB1137](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137).
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G., (2007) - *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*. INGV-SGA; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- Idriss I. M., Boulanger R. W., (2008) - *Soil Liquefaction during earthquakes*. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 469 pp.
- ISIDe Working Group, (INGV, 2010) - *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. <http://iside.rm.ingv.it>.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S., (1978) - *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan*". 3rd International conference on microzonation, San Francisco, pp. 885-896.
- Locati M., Camassi R. & Stucchi M. (eds.), (2011) - *DBMI11, the 2011 version of the Italian Macroseismic Database*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>.
- L.R. Emilia-Romagna n. 19 del 30 ottobre 2008 - *Norme per la riduzione del rischio sismico*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 44 del 12 marzo 2010.
- Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi G., Madiari 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., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C., Ricci L., (2013) - *Microzonazione Sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura emiliana del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti 32° Convegno Nazionale Gngts, Trieste. Isbn: 978-88-902101-7-4.
- Meletti C. & 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.
- Mulargia F. e Castellaro S.; 2007: *Single station passive seismic stratigraphy to almost 2 km depth, Roma, GNGTS*.
- Mucciarelli M. (a cura di), (2012) - *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.
- N.T.C., (2008) - *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14 gennaio 2008*. Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, [www.cslp.it](http://www.cslp.it), Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- O.P.C.M. 3274/2003. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003: *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. G.U. n. 155, 08/05/2003, suppl. ord. n. 72.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

- Picotti V., Pazzaglia F.J., (2008) - *A new active tectonic model for the construction of the Northern Apennines mountain front near Bologna (Italy)*. Journal of Geophysical Research, 113(B8), pp. 1-24.
- Pieri M. & Groppi G., (1975) - *The structure of the base of the Pliocene-Quaternary sequence in the subsurface of the Po and Veneto Plains, the Pedepennine Basin and the Adriatic Sea*. Structural model of Italy, Quaderni de "La Ricerca Scientifica" 90, 409-415.
- Pieri M. & Groppi G., (1981) - *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl., **414**, 1-13.
- Regione Emilia-Romagna Ordinanza n. 29 del 28 agosto 2012 - *Criteri e modalità di assegnazione di contributi per la riparazione e il ripristino immediato di edifici e unità immobiliari ad uso abitativo danneggiati dagli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 e temporaneamente o parzialmente inagibili*.
- Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, (1998) - *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico - ENI-Agip, Divisione Esplorazione & Produzione. SELCA, Firenze, pp 120.
- Ricci Lucchi F., (1986) - *The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines*. In: Allen, P., Homewood, P. (Eds.), Foreland basins. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 105-139.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi S., Rio D., (1982) - *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico*. In: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.). Guida alla Geologia del margine appenninico-padano Pitagora-Technoprint, Bologna, pp. 17-46.
- Robertson P.K. & Wride C.E., (1998) - *Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the CPT*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, No. 3.
- Rovida A., Camassi R., Gasperini P., Stucchi M., (2011) - *CPTI11, La versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*, Milano Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>.
- Sieberg A., (1930) - *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**(4), 552-555.

MICROZONAZIONE SISMICA UNIONE COMUNI VALLI E DELIZIE

- Sonmez H., (2003) - *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey)*. Environ Geology 44(7), 862–871.
- Strobbia C., (2003) - *Surface Wave Methods: acquisition, processing and Inversion*. PhD dissertation, Politecnico di Torino, 317 pp.
- Stucchi M., Camassi R., Rovida A., Locati M., Ercolani E., Meletti C., Migliavacca P., Bernardini F., Azzaro R., (2007) - *DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04*. Quad. Geofis. 49, 38 (in Italian), available at <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04>.
- Swift D.J.P., (1975) - *Barrier-island genesis: evidence from the central Atlantic shelf, eastern USA*. Sedimentary Geology 14, 1–43.
- Swift D.J.P., Kofoed J.W., Saulsbury F.B., Sears P.C., (1972) - *Holocene evolution of the shelf surface, central and southern Atlantic shelf of North America*. In: Swift, D.J.P., Duane, D.B., Pilkey, O.H. (Eds.), *Shelf Sediment Transport: Process and Pattern*, Stroudsburg, Pennsylvania. Dowden Hutchinson & Ross, Stroudsburg, PA, pp. 499–574.
- Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., (2009) - *Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications*. Bollettino della Società Geologica Italiana 128.
- Veronese T., (2014) - *Esperienze nei territori colpiti dal sisma dell'Emilia (maggio 2012) - Casi di studio*, Il Geologo dell'Emilia-Romagna, n. 50.
- Veronese T., Romagnoli M., (2014) - *Considerazioni sulla valutazione del rischio di liquefazione indotta da sisma, sui terreni della bassa pianura padana*. Il Geologo dell'Emilia-Romagna.