



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 3

Regione Emilia-Romagna
Comune di Mirabello



Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	30/09/2016

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi	3
1.2	Lo studio di microzonazione sismica	4
1.3	Elaborati prodotti	5
2	Definizione della pericolosità di base ed eventi di riferimento	6
2.1	Sismicità storica	7
2.1.1	La sequenza del 2012	12
2.2	Sorgenti sismogenetiche	15
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area	18
3.1	Quadro geografico geomorfologico	18
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	21
3.2.1	Subsidenza e movimenti del suolo	24
3.3	Contesto strutturale	26
3.4	Assetto idrogeologico	32
4	Dati geognostici e geofisici	36
4.1	Indagini di repertorio.....	36
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica	38
4.2.1	Prove penetrometriche con punta meccanica (CPT)	38
4.2.2	Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU).....	39
4.2.3	Prova sismica in foro tipo <i>Down-hole</i>	39
4.2.4	Misure di microtremore a stazione singola (HVSR)	41
5	Modello del sottosuolo	43
5.1	Substrato.....	44
5.2	Terreni di copertura.....	45
5.2.1	Quaternario Marino.....	45
5.2.2	Quaternario prevalentemente continentale (Supersintema Emiliano-Romagnolo)	46
5.2.3	Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)	47
6	Interpretazioni e incertezze	49
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0)	49
6.2	Substrato rigido	51

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

6.3	Terreni suscettibili di liquefazione.....	52
6.4	Piezometria.....	54
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	55
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali	56
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche	56
7.2	Zone instabili soggette a liquefazione	64
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione.....	64
8	Elaborati cartografici	69
8.1	Carta delle indagini (Tavola 1)	69
8.2	Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2)	70
8.2.1	Forme di superficie e sepolte	71
8.2.2	Elementi geologici ed idrogeologici	71
8.2.3	Terreni di copertura.....	71
8.3	Carta Geologica di superficie (Tavola 2a)	73
8.4	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)	74
8.5	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4).....	75
8.6	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	77
8.7	Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8, 9).....	78
9	Commenti finali e criticità.....	80
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale.....	81
9.2	Microzonazione sismica e criticità.....	82
9.3	Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione	85
10	Bibliografia	86
11	Allegati	95

1 Introduzione

Il percorso di microzonazione sismica del Comune di Mirabello è stato alquanto articolato ed ha visto la partecipazione diretta del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e di alcune Università e gruppi di ricerca nazionali.

Nella fase immediatamente successiva alla sequenza sismica emiliana del maggio 2012, la Regione Emilia-Romagna, attraverso l'Ordinanza 70/2012, ha infatti realizzato studi di microzonazione sismica negli ambiti urbanizzati e suscettibili di urbanizzazione dei 17 Comuni dell'area epicentrale (Martelli *et al.*, 2013).

Il Comune di Mirabello, a supporto del piano della ricostruzione, ha in seguito ritenuto opportuno commissionare un ampliamento del precedente studio alla totalità del proprio territorio, utilizzando i criteri di microzonazione sismica regionali previsti dalla D.A.L. 112/2007.

Con Delibera di Giunta Regionale (D.G.R.) n. 1227/2015, sono stati infine attribuiti al Comune di Mirabello i contributi per la realizzazione del presente studio di microzonazione sismica con locali approfondimenti di III livello e analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (C.L.E.). Questa fase conclusiva del percorso di microzonazione fornisce l'occasione per uniformare anche i contenuti dei precedenti studi agli "indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" nazionali (Gruppo di Lavoro MS, 2008) ed agli attuali "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" recentemente aggiornati dalla D.G.R. 2193/2015.

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Lo studio di Microzonazione Sismica di terzo livello del Comune di Mirabello è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nella Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna 1227/2015 dal titolo "Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. Attribuzione contributi a favore degli Enti Locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica".

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

- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), da qui in avanti "Standard MS 4.0b";

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

- “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 di Giunta Regionale (D.G.R.) n. 2193/2015 “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”;
- Variante specifica al PTCP della Provincia di Ferrara relativa ad “ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale”, adottata dal Consiglio Provinciale il 29/05/2014. Tale variante contiene, all’interno del proprio Quadro Conoscitivo, un documento relativo la sismicità in Provincia di Ferrara;
- L.R. n. 19 del 30/10/2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- D.M. del 14/01/2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Ordinanza n. 70 del 16 ottobre 2014 del Commissario Delegato Regione Emilia-Romagna “Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica” e relativi elaborati prodotti.

1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Come noto le caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali possono determinare alterazioni nel moto sismico in superficie ed effetti di instabilità, come frane, liquefazioni, o cedimenti, innescati in caso di terremoto.

Gli studi di microzonazione sismica vengono pertanto utilizzati come strumenti per la suddivisione del territorio indagato in aree omogenee, sia sulla base della risposta sismica dei terreni, sia per quanto concerne i possibili effetti locali indotti dallo scuotimento.

Nello specifico lo studio di microzonazione sismica di III livello ha come finalità l’analisi dell’effettivo grado di pericolosità sismica delle aree riconosciute come instabili e potenzialmente instabili. Nel contesto in esame, ciò si applica mediante valutazione approfondita della risposta sismica locale, in termini di amplificazione attesa e stima degli indici di rischio legati alle aree soggette a liquefazione e densificazione.

Gli studi di microzonazione sismica si pongono quindi come strumenti fondamentali per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico, fornendo elementi capaci di indirizzare le scelte di pianificazione urbanistica verso zone a minore pericolosità ed orientare gli interventi di mitigazione in aree a rischio instabilità, fornendo anche utili indicazioni preliminari per la progettazione.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Secondo gli indirizzi regionali (D.G.R. 2193/2015) tali studi, necessari per la redazione e l'approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. 19/2008), devono 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 dall'Ufficio Tecnico del Comune di Mirabello, in relazione a quanto stabilito nello strumento urbanistico generale ed in continuità con le aree già analizzate nei precedenti livelli di approfondimento.

1.3 Elaborati prodotti

Gli elaborati di riferimento dello studio di microzonazione sismica sono rappresentati dalle tavole cartografiche di sintesi e dagli archivi digitali contenenti i dati informatizzati 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 ed 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:

- 9 Tavole cartografiche, compiutamente descritte al capitolo 8;
- 4 Sezioni geologiche;
- Archivi digitali 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 C della Delibera Regione Emilia-Romagna 1227/2015 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. 171/2014 e decreto del 4 agosto 2014 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 4.0b" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), 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

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

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 ed 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 del territorio stesso, cioè tutte le informazioni riguardanti i terremoti avvenuti in epoca storica e gli effetti ad essi associati.

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

- il CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015 (Rovida *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che raccoglie dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000-2014;
- il DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 (Locati *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000-2014);
- il DISS versione 3.2.0 - Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane (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 rettangoli o poligoni georeferenziati 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 Database ISDe (ISDe 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;

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello *et al.*, 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>), che contiene tutte le registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti tra il 1981 ed il 2002;
- 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 a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica;
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e che ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica di base a scala nazionale.

2.1 Sismicità storica

La ricostruzione della sismicità storica del Comune di Mirabello è stata innanzitutto basata sull’analisi del database Macrosismico Italiano - DBMI15 (Locati *et al.*, 2016), il quale consente la consultazione online di una banca dati in cui sono inserite tutte quelle località a cui sono associate osservazioni di danno riferibili ad almeno 3 eventi sismici nella finestra temporale 1000-2014.

In relazione al Comune di Mirabello il database contiene solamente 5 record relativi ad eventi sismici storici (Tabella 2-1). Per ciascun terremoto sono quindi riportati i valori di intensità macrosismica (IMCS) osservata nel territorio comunale in occasione degli eventi considerati, l’area epicentrale, il numero di Macroseismic Data Point (NMDP), l’intensità epicentrale (I_0) e la magnitudo momento (M_w) stimata mediante relazioni empiriche. I valori di intensità sono espressi in gradi secondo la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2-2.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Effetti		In occasione del terremoto del:			
IMCS Mirabello	Data	Area Epicentrale	NMDP	Io	Mw
4	1983/11/09 16:29	Parmense	850	6-7	5.04
F	1986/12/06 17:07	Ferrarese	604	6	4.43
NF	2002/11/13 10:48	Franciacorta	768	5	4.21
6	2012/05/20 02:03	Pianura Emiliana	53	7	6.09
6-7	2012/05/29 07:00	Pianura Emiliana	87	7-8	5.90

Tabella 2-1 - Intensità macrosismiche osservate a Mirabello tratte dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016). Alcuni effetti non sono esprimibili con la scala MCS per cui vengono utilizzati dei codici alternativi come: F = avvertito (*felt*) in caso in cui si ritenga di escludere che si siano verificati danni ($3 \leq I_{MCS} \leq 5$); NF = non avvertito (*not felt*) in presenza di segnalazione esplicita è equiparabile a $I_{MCS} = 1$.

Grado	Scossa	Descrizione degli effetti
IV	Moderata	Avvertita da molte persone, tremito di infissi e cristalli, leggere oscillazioni di oggetti appesi.
V	Piuttosto forte	Avvertita anche da persone addormentate, caduta di oggetti.
VI	Forte	Qualche leggera lesione negli edifici e finestre in frantumi.
VII	Molto forte	Caduta di fumaiole, lesioni negli edifici.
VIII	Rovinoso	Rovina parziale di qualche edificio; qualche vittima isolata.

Tabella 2-2 - Stralcio della scala delle intensità macrosismiche Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930).

Analizzando attraverso i cataloghi la storia sismica dei centri vicini a Mirabello, si può notare come il numero di osservazioni macrosismiche associate a eventi storici cresca notevolmente se si considerano i centri urbani già sviluppati in età basso medievale. La città di Ferrara, ad esempio, annovera ben 137 registrazioni di terremoti, con effetti di danno ampiamente documentati (Guidoboni *et al.*, 2007), nel periodo compreso fra l'anno 1000 ed il 2014 (Figura 2-1). Con intensità epicentrale pari al VIII grado della scala MCS e magnitudo equivalente pari a 5.5, la scossa del 17 novembre 1570, quarta di una lunga sequenza sismica, è quella che ha prodotto i maggiori effetti di danno nella città (Figura 2-2).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

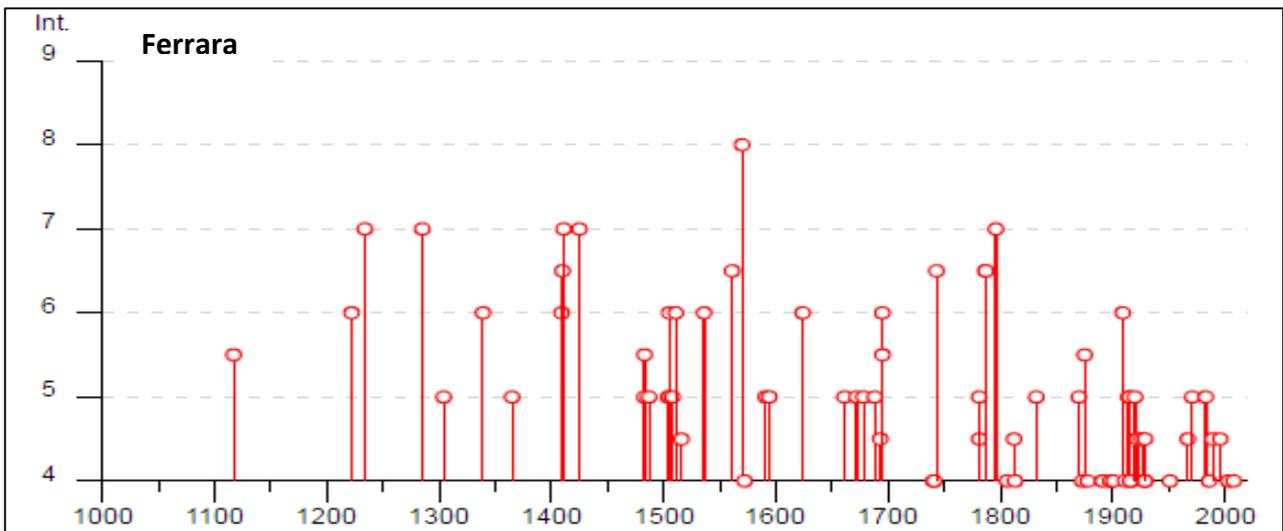


Figura 2-1 - Cronologia dei terremoti noti con effetti di danno nell'area di Ferrara nel periodo compreso fra l'anno 1000 ed il 2014 (Database macrosismico italiano DBMI16).

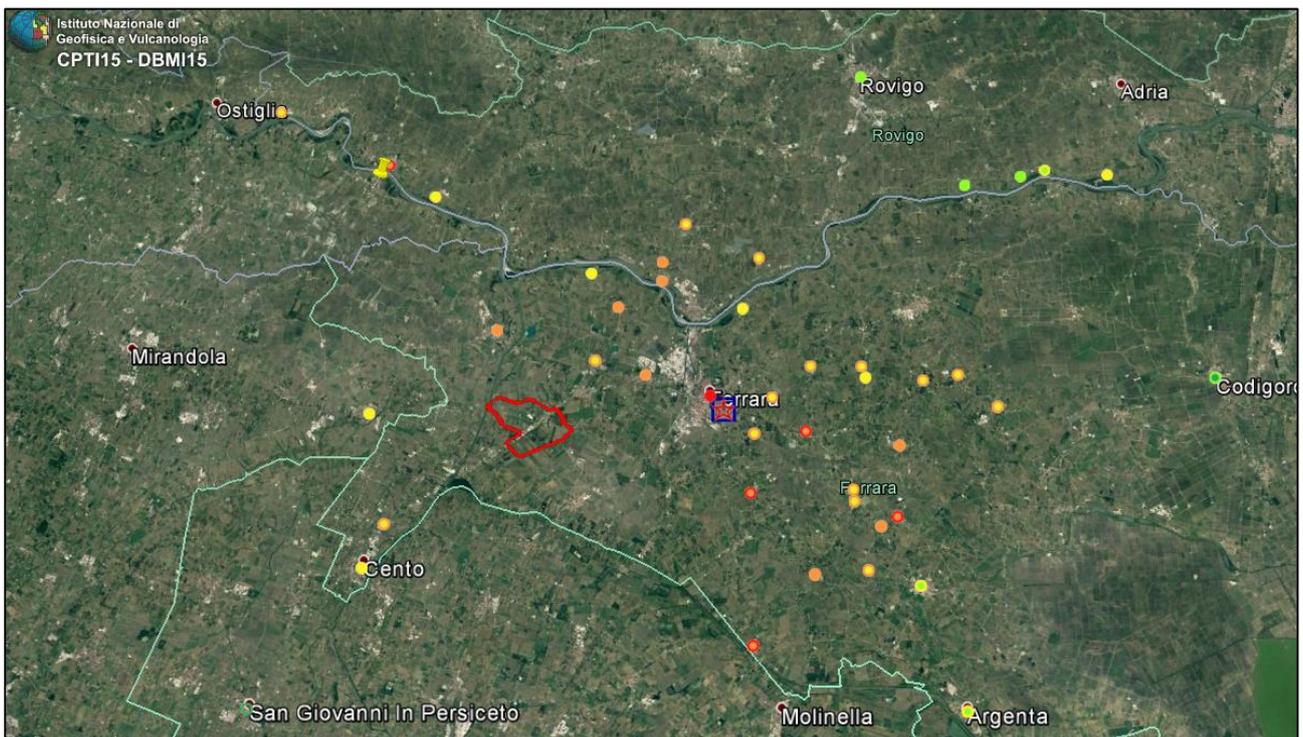


Figura 2-2 - Effetti della scossa del 17 novembre 1570. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il perimetro del Comune di Mirabello che si colloca in una fascia priva di dati, compresa però tra aree in cui le intensità macro-sismiche risultano variabili tra il VI e VII grado della scala MCS.

Dalle osservazioni relative a località vicine all'epicentro, si riscontrano intensità macro-sismiche sostanzialmente comprese tra il VI ed il VII grado, con assenza di dati in un'ampia fascia di territorio compresa tra Ferrara e Cento (Figura 2-2).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

La mancanza di fonti storiche sui danneggiamenti nell'area, legata all'assenza di insediamenti abitativi consolidati almeno fino al XVIII secolo, non permette una valutazione dell'intensità dei maggiori sismi storici nel territorio di Mirabello.

Qualora si volessero ricostruire gli scenari di danno prodotti dagli eventi catalogati, andrebbero applicate relazioni empiriche contenenti diversi parametri fisico-matematici e considerate, per il sito, caratteristiche costruttive simili a quelle dei centri storici circostanti.

Sulla base di quanto realizzato dal gruppo di lavoro del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara nel limitrofo Comune di Sant'Agostino, sono state applicate due distinte relazioni empiriche nel tentativo di quantificare l'intensità macrosismica al sito dei singoli eventi, considerando tutti i terremoti riportati nel DBMI15 (Locati *et al.*, 2016) con distanza epicentrale inferiore ai 200 km.

La prima relazione utilizzata, proposta da Blake (1941), permette di calcolare in maniera deterministica l'intensità sperimentata al sito mediante la seguente equazione:

$$I_0 - I = s * \log \sqrt{1 + (D/h^2)} \quad [1]$$

con I_0 = intensità epicentrale; I = intensità al sito; s = coefficiente di attenuazione; D = distanza epicentrale, in km; h = profondità ipocentrale, in km.

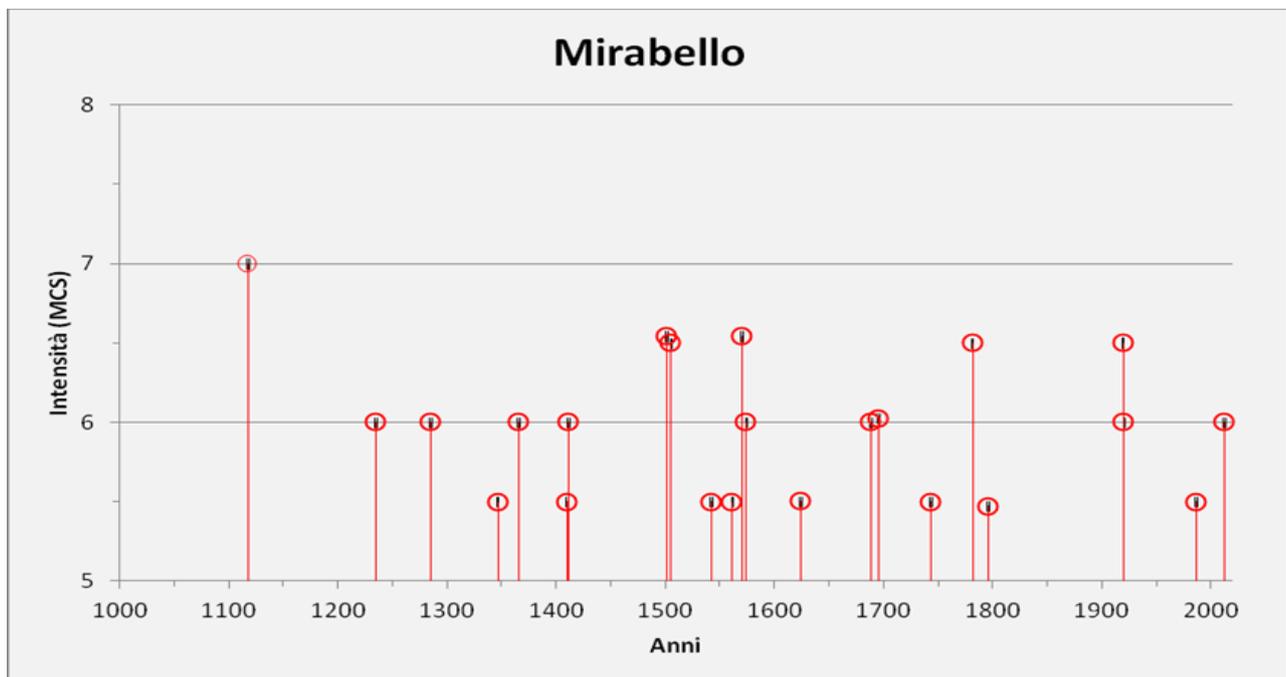


Figura 2-3 - Valori di intensità macrosismica (MCS) stimati per il territorio di Mirabello dall'anno 1000 al 2006 prendendo in considerazione eventi sismici in un raggio di 200 km e calcolando il valore di intensità mediante la relazione empirica di Blake (1941) riportata in equazione [1]. Il terremoto del 2012 è stato aggiunto come riferimento.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

I dati derivati dall'applicazione di questa prima relazione (Figura 2-3) mostrano come in occasione di almeno 15 eventi sismici storici gli effetti sul territorio comunale di Mirabello sarebbero potenzialmente quantificabili con intensità pari o superiori al VI grado della Scala MCS, che corrisponde di norma alla soglia di danneggiamento del patrimonio edilizio. In termini di frequenza media di accadimento, invece, eventi sismici potenzialmente dannosi paiono ripetersi all'incirca ogni 60 anni.

La seconda relazione, sviluppata da Pasolini *et al.* (2008), stima, invece, l'intensità al sito in maniera probabilistica esprimendo la probabilità di superamento di una determinata intensità sulla base delle seguenti equazioni:

$$I = I_E - (0,0086 \pm 0,0005) * (D - h) - (1,037 \pm 0,27) * [\ln(D) - \ln(h)] \quad [2]$$

$$I_E = - (0,893 \pm 0,254) + (1,118 \pm 0,033) * I_0 \quad [3]$$

$$D = \sqrt{R^2 + h^2} \quad [4]$$

con I = intensità al sito; I_E = intensità media attesa all'epicentro; D = distanza focale, in km; h = profondità ipocentrale, in km ($3,91 \pm 0,27$); I_0 = intensità epicentrale; R = distanza epicentrale, in km.

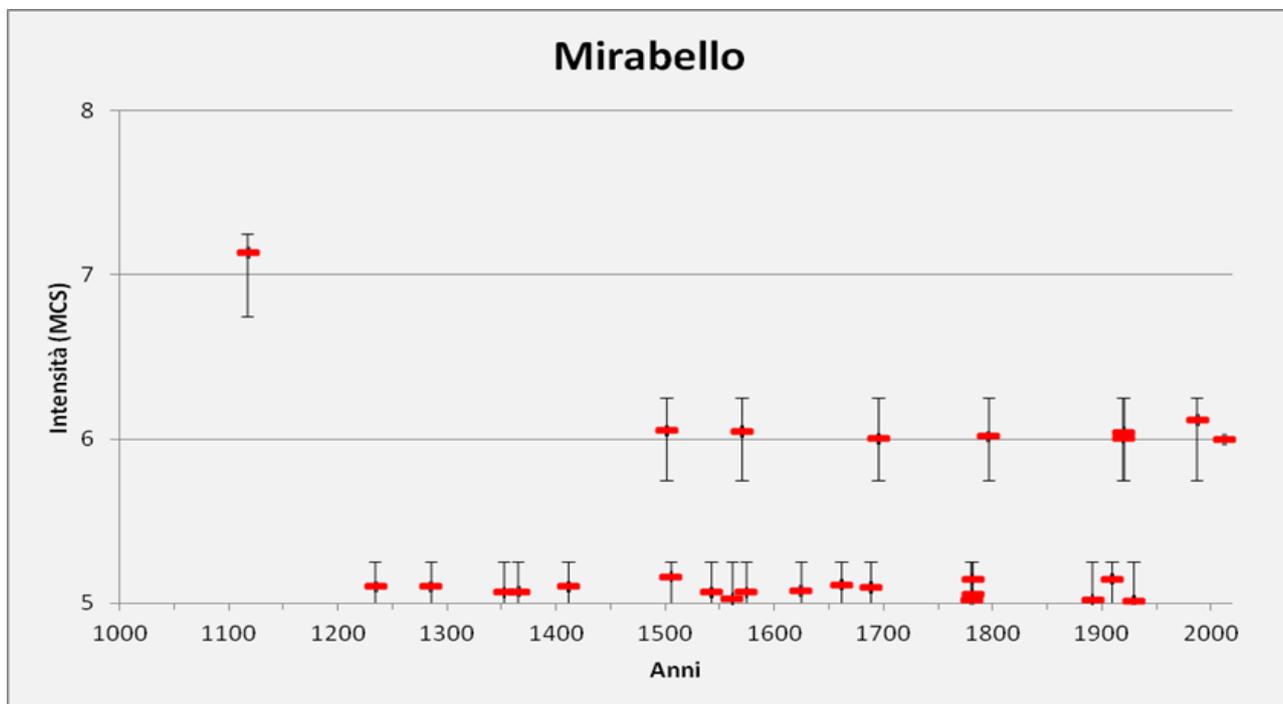


Figura 2-4 - Valori di intensità macrosismica (MCS) stimati per il territorio di Mirabello dall'anno 1000 al 2006 prendendo in considerazione eventi sismici in un raggio di 200 km e calcolando il valore di intensità mediante la relazione empirica di Pasolini *et al.* (2008) riportata in equazione [2]. Il terremoto del 2012 è stato aggiunto come riferimento.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Le intensità stimate mediante la relazione di Pasolini *et al.* (2008), con probabilità di superamento pari o superiore al 50%, sono riportate in Anche in questo caso risulta evidente come potenziali effetti del VI grado della Scala MCS sarebbero stati da considerare tutt'altro che rari in questo territorio e con una frequenza media di circa 100 anni.

2.1.1 La sequenza del 2012

Tra il maggio ed il giugno 2012 un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della Bassa Pianura Padana, compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara.

La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali Figura 2-4. La prima, di magnitudo locale M_L pari a 5.9, si è verificata il 20 maggio alle 4:03 ora locale, con epicentro tra Finale Emilia e San Felice sul Panaro (44°51'50" N, 11°14'31" E, profondità 6,3 km - Figura 2-5), mentre la seconda, di M_L pari a 5.8, è avvenuta il 29 maggio alle 9:00 ora locale con epicentro tra Mirandola e Medolla, (44°50'00" N, 11°03'37" E, profondità 13,5 km - Figura 2-5) (Massa *et al.*, 2012).

Scosse successive hanno interessato un'area estesa oltre 50 km in direzione Est – Ovest; in particolare sono state registrate cinque repliche di $M_w \geq 5,0$, aventi epicentri distribuiti tra Novi di Modena e Vigarano Mainarda (Figura 2-5), ed oltre 3.700 scosse di $M_w \geq 1,5$ (Figura 2-5).

La sequenza sismica ha interessato le strutture fragili costituenti la parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghe Ferraresi (Pieri & Groppi, 1981); serie di pieghe e sovrascorrimenti Nord e Nord-Est vergenti che coinvolgono sia la copertura sedimentaria Terziario-Quaternaria che la successione carbonatica Mesozoica.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

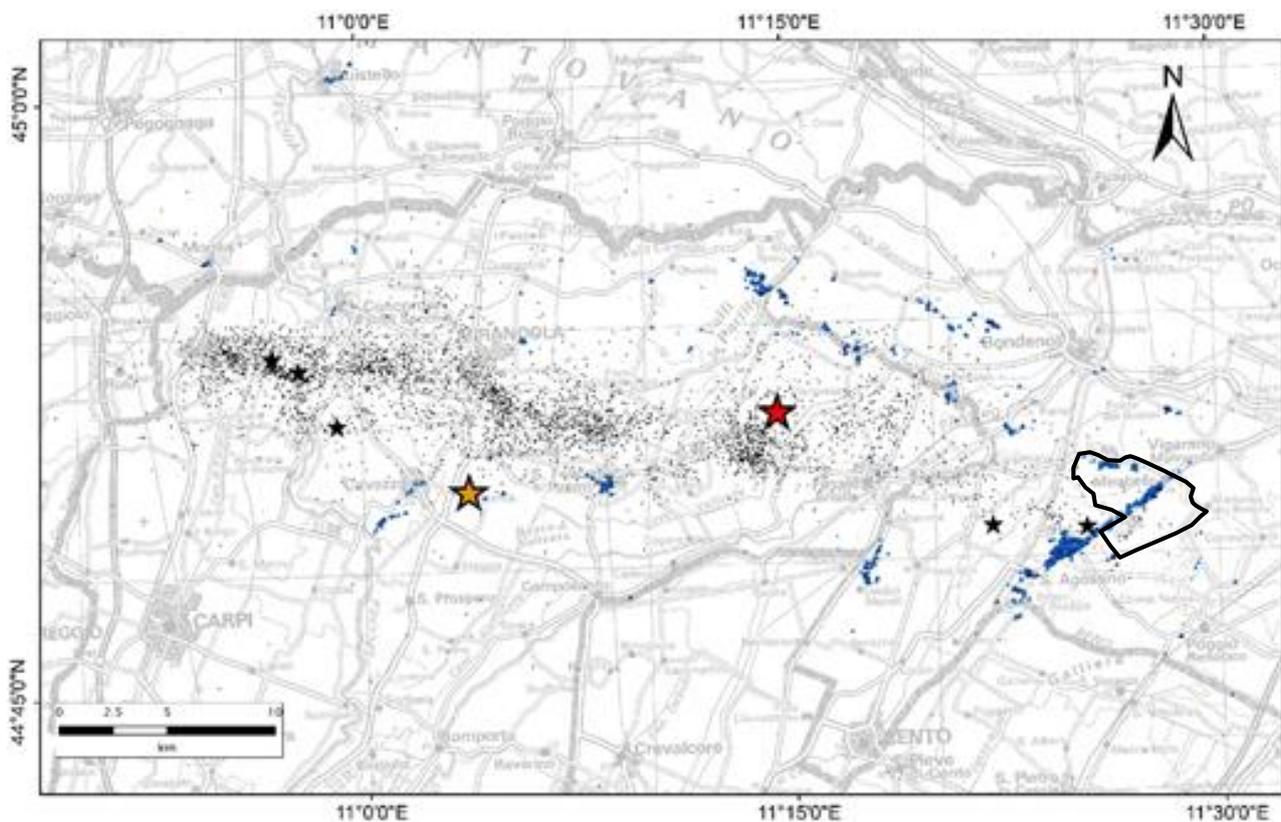


Figura 2-5 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rossa e arancio rappresentano rispettivamente le scosse del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli aftershocks con $M_w \geq 5.0$, mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con $M_w \geq 1.5$. I piccoli punti blu infine evidenziano le liquefazioni osservate (Caputo e Papathanassiou, 2012; *Emergeo Working Group*, 2013; GdL Liquefazione RER, 2012). La linea nera delimita il territorio comunale di Mirabello.

I risultati di diversi studi effettuati sui meccanismi focali degli eventi principali suggeriscono una cinematica di tipo compressivo, quindi un movimento delle faglie sepolte lungo piani orientati essenzialmente Est-Ovest ed immergenti verso Sud (Pondrelli *et al.*, 2012; Scognamiglio *et al.*, 2012). Questi dati sono in accordo con quanto emerso da studi del campo di velocità derivato da misure GPS (Devoti *et al.*, 2011) e dagli indicatori del campo di stress agente su questa area (Montone *et al.*, 2012).

I maggiori effetti locali osservati durante le due principali scosse della sequenza emiliana, sono stati l'amplificazione del moto sismico e i fenomeni di liquefazione, diffusi in corrispondenza di antichi alvei, oggi abbandonati e sepolti, di fiumi a provenienza appenninica (Reno, Panaro, Secchia) e subordinatamente del Po.

Localmente associati a dissesti gravitativi cosismici, i fenomeni di liquefazione sono stati particolarmente evidenti nel Comune di Mirabello in concomitanza delle scosse del 20 maggio 2012.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Tali fenomeni hanno indotto gravi danni all'edificato recente e storico (Galli *et al.* 2012a, Facciorusso *et al.*, 2012), compromettendo la stabilità degli edifici e del loro sistema fondale e danneggiato le infrastrutture stradali e le reti dei sottoservizi.

I rapporti dei rilievi macrosismici eseguiti nei giorni immediatamente successivi le scosse (Galli *et al.*, 2012a e 2012b) hanno determinato per il territorio di Mirabello valori di intensità macrosismica pari al VI grado della Scala MCS.

Oltre alle eruzioni puntuali e lineari di sabbie dal sottosuolo (Figura 2-6) sono stati osservati altri effetti cosismici secondari quali fratture superficiali, dislocazioni laterali e cedimenti differenziali (Caputo e Papathanassiou, 2012; Papathanassiou *et al.*, 2012; GdL Liquefazione RER, 2012; *Emergeo Working Group*, 2013).

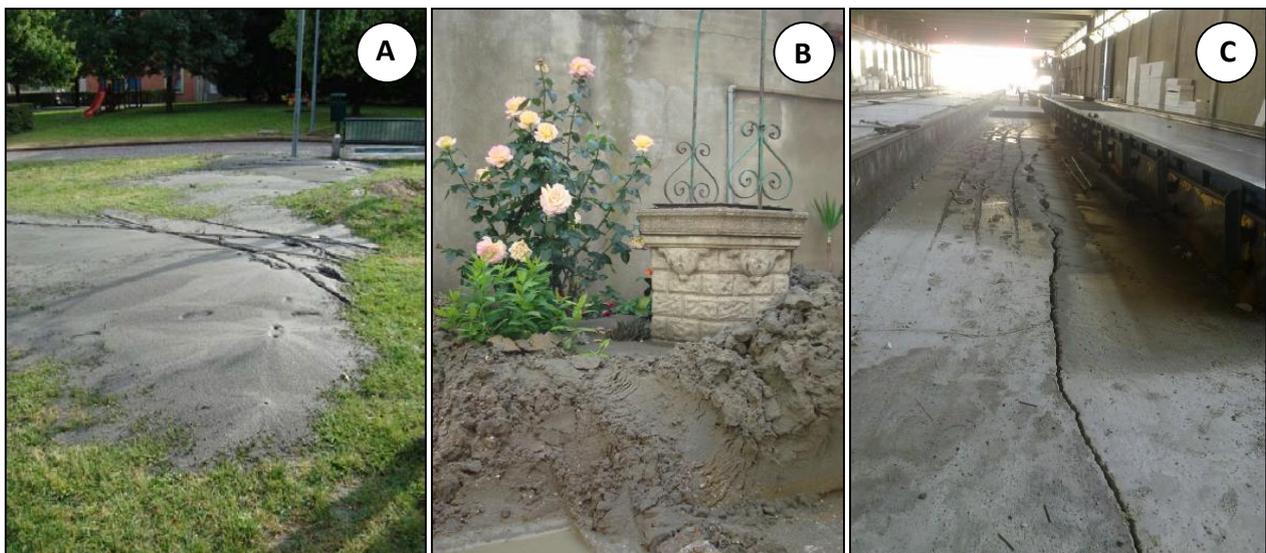


Figura 2-6 - Esempi di fenomeni superficiali dovuti alla liquefazione indotta dal terremoto del 20 maggio. A) vulcanelli di sabbia presso i giardini di Corso Italia; B) fuoriuscita di sabbia da un pozzo nel centro abitato di Mirabello; C) frattura con fuoriuscita di sabbia all'interno di capannoni adiacenti il mobilificio Martinelli, nella zona industriale di Mirabello. Fonte: Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012.

Nel territorio in esame la maggior parte delle fuoriuscite di sabbia è avvenuta attraverso fratture nei campi e nella pavimentazione stradale, di lunghezza variabile da pochi centimetri fino ad alcune decine di metri con larghezza massima di 30-40 cm circa (Lai *et al.*, 2012; Papathanassiou *et al.*, 2012; *Emergeo Working Group*, 2013). I vulcanelli di sabbia sono, invece, risultati significativamente subordinati rispetto alle evidenze appena descritte (Papathanassiou *et al.*, 2012).

Come già ricordato, in occasione delle scosse principali della sequenza sismica sono stati rilevati evidenti fenomeni di amplificazione del moto del suolo dovuti ad effetti stratigrafici.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Le stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale e quelle temporanee installate subito dopo le scosse del 20 maggio, hanno infatti registrato, in molte aree, valori di accelerazione orizzontali in superficie decisamente superiori rispetto a quelli massimi attesi su suolo rigido (Figura 2-7), frequentemente superiori a 0,2 g e localmente anche a 0,3 g .

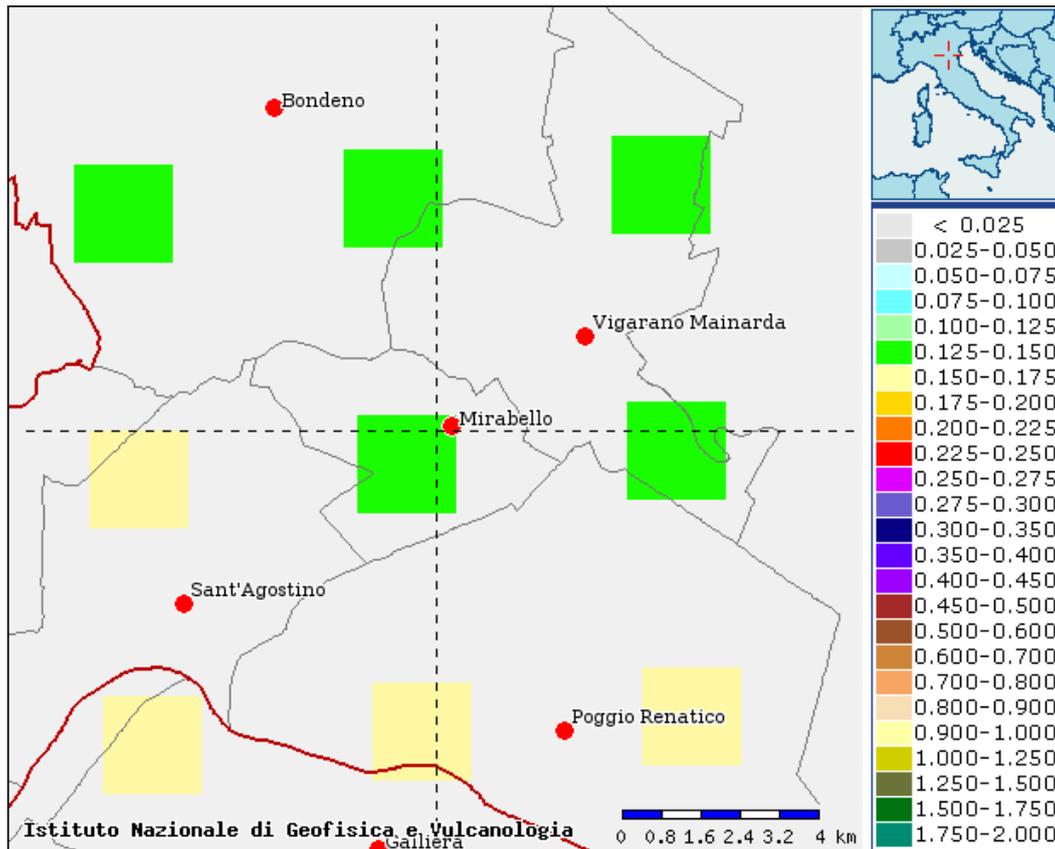


Figura 2-7 - La mappa di Pericolosità Sismica (Gruppo di lavoro MPS, 2004) mostra, per l'area, accelerazioni massime attese su suolo rigido compresa tra 0,125-0,150 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni.

Per questi motivi, nell'ambito degli studi di microzonazione sismica realizzati a fronte dell'Ordinanza 70/2012, il Servizio Geologico Regionale ha effettuato una serie di verifiche e valutazioni in merito ai fattori di amplificazione più idonei da utilizzare in contesti geologici di pianura come quelli dell'area epicentrale.

2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2015) mostra come il territorio di Mirabello sia quasi completamente interessato dalla presenza della sorgente sismogenetica composta ITCS103 (Figura 2-8). La struttura, denominata Finale Emilia - Mirabello, si estende verso occidente in direzione di Mirandola con orientazione ESE-WNW e comprende la sorgente individuale di Finale Emilia

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

(ITIS134), caratterizzata da magnitudo momento massima 6.1 (Mw_{max}), profondità tra 4 e 8.4 km e slip-rate tra 0.25 e 0.5 mm/anno.

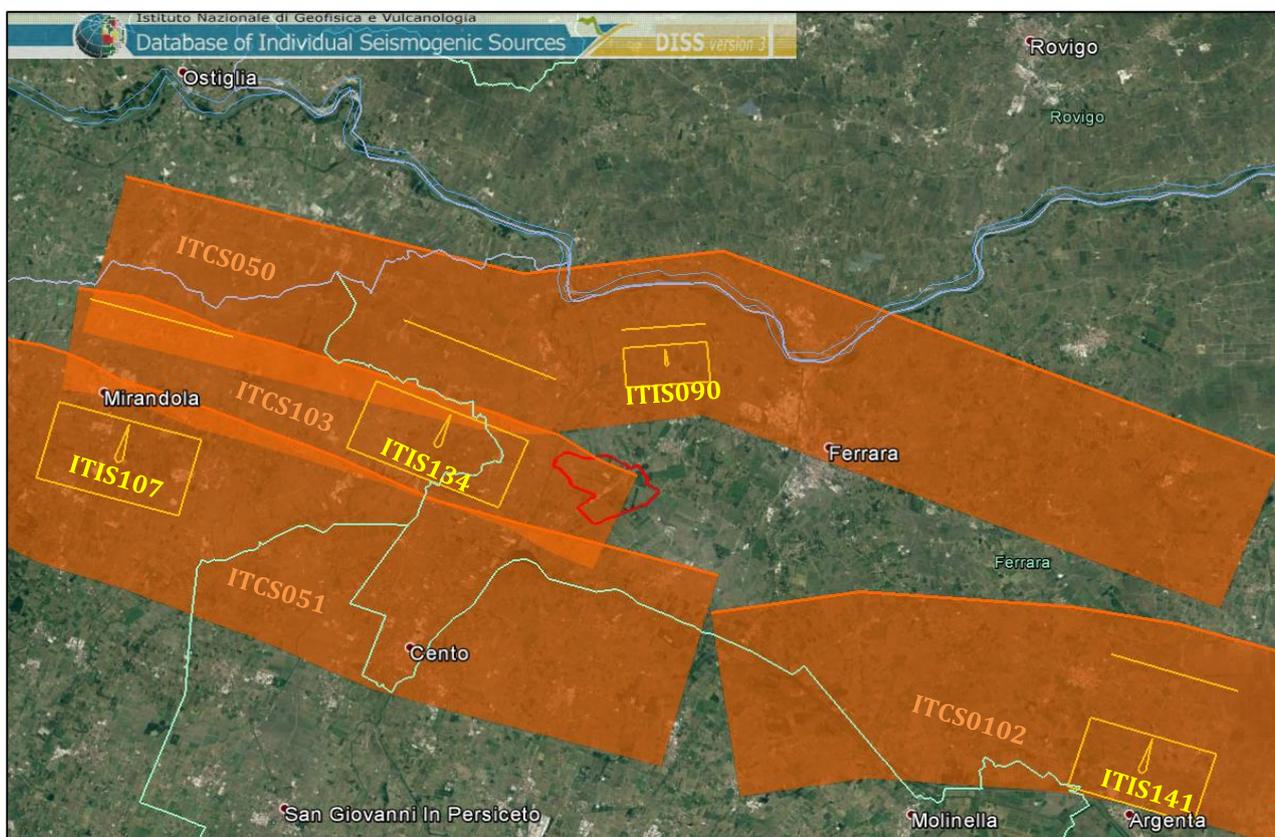


Figura 2-8 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso l'area comunale di Mirabello.

L'area di studio è inoltre bordata, a nord e a sud, da altre due sorgenti sismogenetiche composite anch'esse approssimativamente orientate ESE-WNW e denominate rispettivamente Poggio Rusco - Migliarino (ITCS050) e Carpi - Poggio Renatico (ITCS051). La struttura settentrionale delimita il settore esterno delle Pieghe Ferraresi e comprende la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090), a cui è assegnata una Mw_{max} pari a 5.5, profondità tra 1.4 e 4.5 km e slip-rate compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno.

Alla struttura meridionale è, invece, associata la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107), caratterizzata da una Mw_{max} pari a 6, profondità tra 4 e 7 km e slip-rate compreso tra 0.5 e 1.04 mm/anno. L'arco meridionale si sviluppa ulteriormente verso oriente determinato la sorgente sismogenetica composta Malalbergo - Ravenna (ITCS102) di cui fa parte quella individuale di Argenta (ITIS141).

L'esistenza della sorgente individuale di Ferrara è avvalorata sia da dati di sottosuolo (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti *et al.*, 2004; Burrato *et al.*, 2003; 2012), sia da attività tettonica "relativamente recente", alla

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

quale si riconduce il terremoto di Ferrara del 17 novembre 1570. L'ubicazione della sorgente è stata proposta in base ad anomalie del reticolo idrografico, in particolare alla deviazione dell'alveo del fiume Po in prossimità di Stellata, interpretata come possibile conseguenza della deformazione indotta dall'attività tettonica della struttura sepolta.

La sorgente individuale di Finale - Emilia è invece stata proposta sulla base della localizzazione dell'evento del 20 maggio 2012, mentre quella di Mirandola, coincidente con il sovrascorrimento responsabile della scossa del 29 maggio 2012, era già conosciuta sia in base a prospezioni geologiche profonde, sia mediante osservazione di anomalie nel reticolo idrografico.

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

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 Comune di Mirabello ricade dentro alla Zona 912, caratterizzata da un valore di Mw_{max} pari a 6,14 (Figura 2-9).

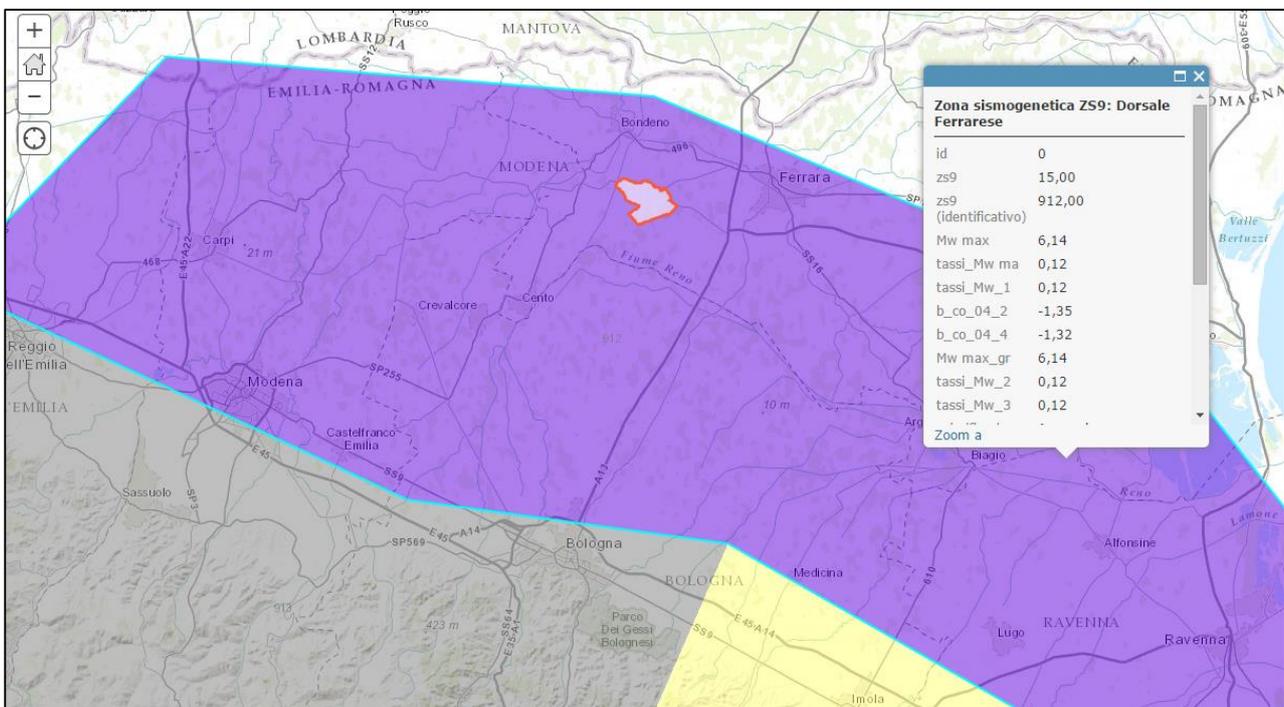


Figura 2-9 - Ubicazione del territorio comunale di Mirabello (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Nei paragrafi seguenti sono delineati i caratteri geografici, geologico-geomorfologici e tettonici dell'area con particolare riguardo alle caratteristiche litostratigrafiche della successione sedimentaria che costituisce le prime centinaia di metri di sottosuolo del Comune di Mirabello. Vengono inoltre ampiamente trattati gli aspetti legati all'idrogeologia ed alla subsidenza in modo da poter fornire un quadro di elementi utili ad individuare le principali criticità del territorio.

3.1 Quadro geografico geomorfologico

Il territorio del Comune di Mirabello è posto nella porzione sud-occidentale della Provincia di Ferrara, a cavallo dell'ex Strada Statale 255 "San Matteo della Decima", ora Provinciale 255, fra Ferrara, Cento e Modena. Il territorio comunale ha estensione di circa 16 km² ed è limitato dai Comuni di Vigarano Mainarda, Poggio Renatico, Sant'Agostino e Bondeno, che lo separano dai non lontani territori di Ferrara e Cento. Verso ovest, l'area del Comune di Mirabello confina, in parte, con il Cavo Napoleonico, grande canale scolmatore, scavato nel secondo dopoguerra per mettere in comunicazione Reno e Po.

Il territorio è attraversato diagonalmente, in direzione sud-ovest – nord-est, dal rilevato continuo del paleoalveo del Reno, su cui si allunga il centro abitato di Mirabello, limitato lateralmente da vaste aree a vocazione agricola, a bassa densità insediativa. Al bordo settentrionale del territorio comunale si sviluppa la Via Correggese, ex Strada Statale 468, che collega Mirabello con Finale Emilia e corrisponde all'antico confine fra lo Stato Estense e quello di Bologna, a cui storicamente apparteneva il territorio qui analizzato. Il Comune di Mirabello è interamente sviluppato in condizioni di pianura alluvionale e mostra quote topografiche comprese fra 9 e circa 18 m quota, rappresentando quindi uno dei territori più elevati della Provincia. Nonostante le quote, il deflusso a mare delle acque in eccesso dipende in significativa parte dal sollevamento meccanico.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

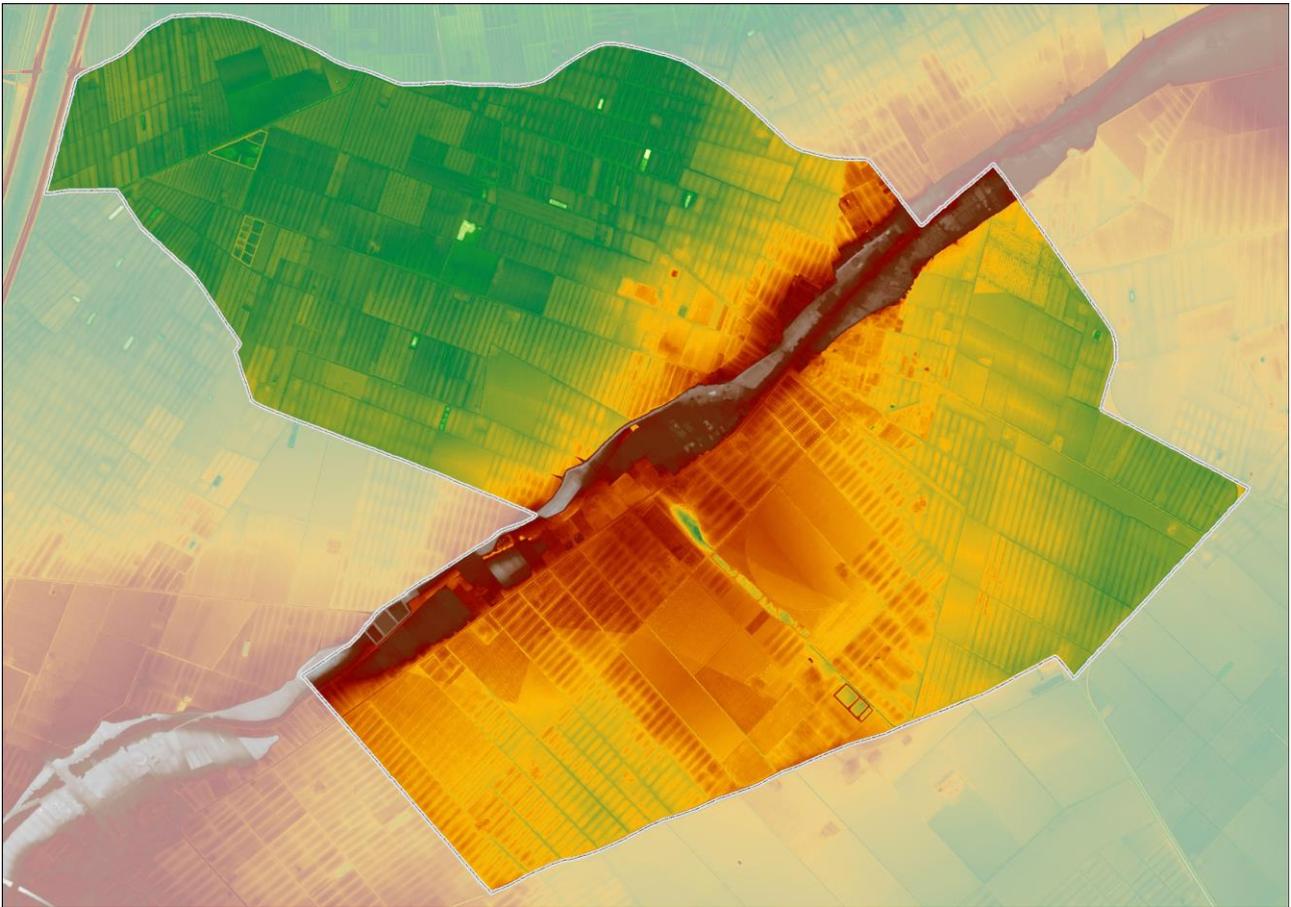


Figura 3-1 - Modello altimetrico LIDAR, basato sui dati acquisiti per conto della Regione Emilia-Romagna. I dati topografici mostrano quanto sia evidente il corpo di paleoalveo del Reno di età storica, allungato in direzione sud-ovest – nord-est e limitato da depressioni interalvee. Sul dosso di paleoalveo è ancora ben visibile il solco dell'ultimo alveo legato alla fase di abbandono (XVIII secolo). Ai lati sono visibili ventagli di rotta, come quello delle Pradine, di notevoli dimensioni, in cui è possibile riconoscere il solco del canale di rotta principale. L'area in chiaro corrisponde all'estensione del territorio comunale.

In questo settore della Pianura Padana affiorano esclusivamente **sedimenti fluviali olocenici di derivazione appenninica**. I sedimenti di età Pleistocenica, più antichi, sono ovunque sepolti mentre quelli più superficiali hanno età storica anche molto recente, in genere successiva al XV secolo d.C. I sedimenti di bassa pianura alluvionale sono stati depositi da fiumi di provenienza appenninica ed anche dal Po, che nel tempo hanno assai frequentemente cambiato corso, sia a causa di fattori di controllo esterni, in particolare quelli climatici e tettonici, sia per fattori interni alla dinamica fluviale. I canali fluviali, infatti, tendono spontaneamente, a divagare lateralmente, soprattutto in sistemi tendenzialmente pensili come quelli dell'area indagata. Questo insieme di concause comporta che la deposizione sedimentaria della pianura avvenga sia verticalmente, sia orizzontalmente, con il giustapporsi laterale di successivi corpi d'alveo. L'effetto di questa evoluzione è un complesso intreccio di corpi a tessitura prevalentemente sabbiosa,

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

corrispondenti ad antichi alvei, e di sedimenti fini, limoso-argillosi, spesso ricchi in torbe e resti organici, corrispondenti ai depositi delle aree interfluviali (Figura 3-2).

Questa evidenza si manifesta in superficie attraverso un articolato microrilievo, costituito dossi fluviali allungati e più o meno sinuosi e zone depresse interalvee (Figura 3-2). Tali caratteristiche morfologiche risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione di elevato dettaglio dell'altimetria al suolo (Figura 3-1).

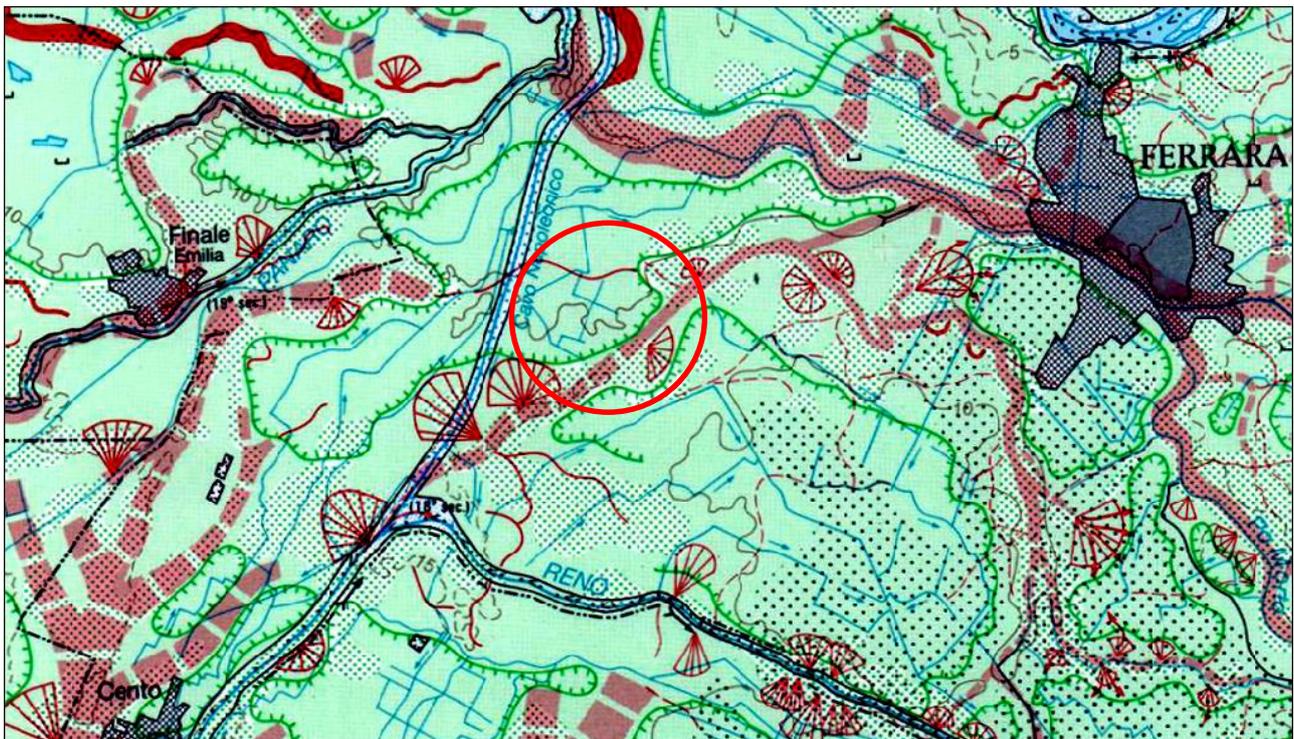


Figura 3-2 - Stralcio dalla Carta Geomorfologica della Pianura Padana 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999), che illustra la complessa alternanza di corpi dossivi di paleoalveo (in rosso) e depressioni interalvee (in verde), limitate da piccole scarpate morfologiche (linee verdi). Nella parte centro-meridionale della carta si osservano i corpi di riempimento di canale distributore di delta interno di età prevalentemente medioevale; nella parte settentrionale corpi di alveo del Po, che si biforcano a Ferrara. I retini puntinati indicano aree di recente colmata fluviale. Il cerchio rosso corrisponde all'ubicazione del territorio comunale di Mirabello, nei cui pressi si osservano numerosi ventagli da rotta fluviale.

Dal punto di vista altimetrico l'area presenta una fascia centrale più rilevata, corrispondente all'antico alveo del Reno, con valori che, come accennato, raggiungono i 18 m s.l.m.. Lateralmente a questo "alto" morfologico, le quote vanno gradualmente digradando fino a giungere a valori minimi nelle porzioni nord e nord-orientali, che si attestano mediamente intorno ai 9 m s.l.m.. I gradienti topografici sono in genere bassi, tranne che ai bordi del corpo rilevato di paleoalveo, limitato da antiche arginature artificiali, associate a brusche variazioni di quota, in alcuni punti anche di oltre 5 m.

3.2 Contesto geologico stratigrafico

Prima degli eventi sismici del 2012, l'area indagata era pressoché priva di studi stratigrafici di sottosuolo e di cartografia geologica di superficie, in quanto gli studi realizzati nell'ambito del Progetto Nazionale di Cartografia Geologica (CARG) erano limitati a territori posti poco più a sud dell'area comunale (cfr. Foglio 203 "Poggio Renatico", Foglio 202 "S. Giovanni in Persiceto").

Da allora le ricerche di numerosi autori hanno consentito di migliorare notevolmente le conoscenze geologiche e geologico-applicative (e.g. Milana *et al.*, 2014; Papathanassiou *et al.*, 2015; Bonini *et al.*, 2015; Bruno *et al.*, 2016; Caputo *et al.*, 2016).

I primi studi, realizzati durante l'emergenza, hanno gettato le basi per i successivi approfondimenti, delineando in maniera sufficientemente chiara i principali caratteri geologico-evolutivi dell'area.

La carta geologica di superficie in scala 1:100.000, allegata allo studio di microzonazione sismica dell'Ordinanza 70/2012 (Figura 3-3), già indicava come i depositi affioranti fossero costituiti da sabbie di canale, argine e rotta fluviale, giustapposte ad argille e limi organici di palude interalvea. Le maggiori conoscenze relative alla distribuzione di questi depositi nelle aree meridionali dei Comuni di Poggio Renatico e di Sant'Agostino, sono derivate dagli approfondimenti eseguiti per il Progetto Nazionale di Cartografia Geologica (CARG).

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, questi sedimenti sono riferibili all'Unità di Modena (AES_{8a}), di età post-romana, che costituisce la porzione sommitale del Subsistema di Ravenna (AES₈), inquadrato a sua volta nella parte terminale del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) (cfr. Note Illustrative Foglio CARG 203 "Poggio Renatico").

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

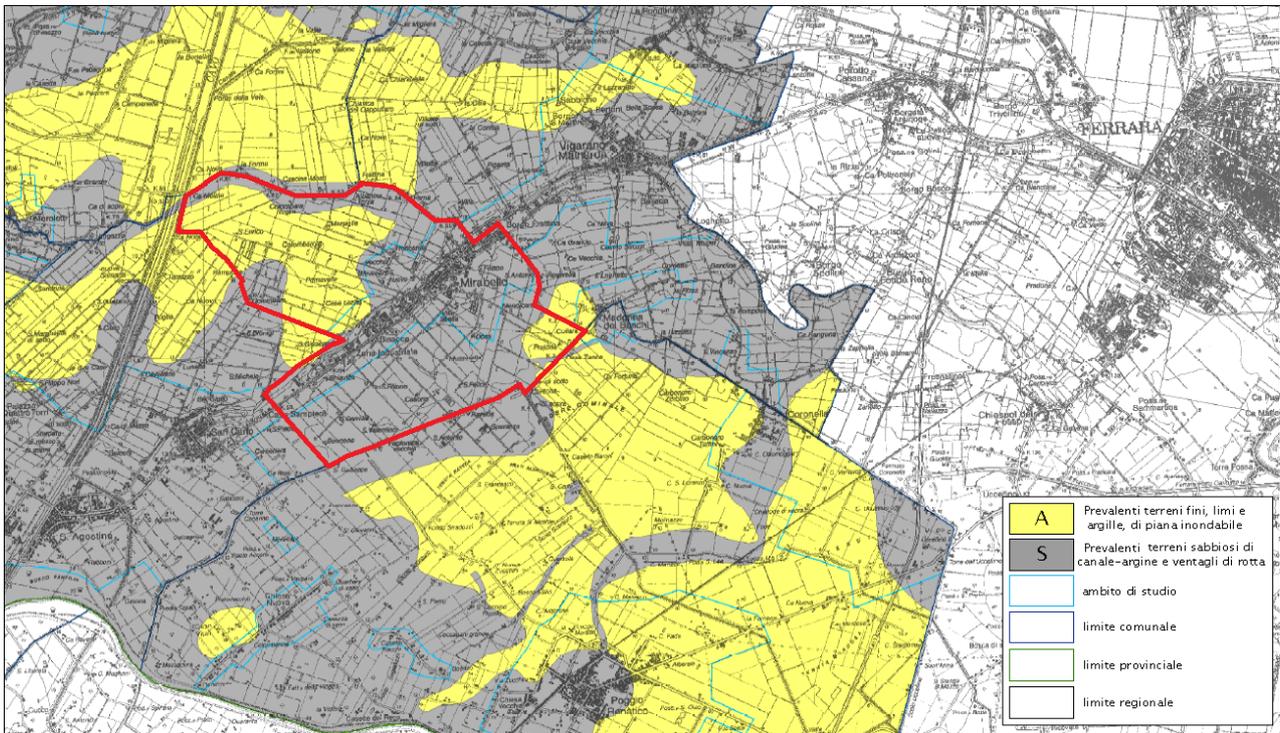


Figura 3-3 - Stralcio dalla carta geologica di superficie 1:100.000. Con la linea rossa è rappresentato il perimetro del Comune di Mirabello. Le linee azzurre delimitano gli ambiti a cui è stato limitato lo studio per la microzonazione sismica svolta nell'ambito dell'Ordinanza 70/2012. La cartografia interessa esclusivamente i territori dei Comuni della zona epicentrale individuata dalla suddetta Ordinanza.

Nell'ambito dei primi studi pubblicati subito dopo la sequenza sismica (eg. Facciorusso *et al.*, 2012, Martelli *et al.*, 2013, Martelli e Romani, 2013), il sottosuolo degli abitati di Mirabello e San Carlo è stato suddiviso in *tre unità informali*, elencate di seguito dalla più superficiale alla più profonda:

- *unità dei canali fluviali*, correlabile con la porzione estesamente affiorante della Unità di Modena (AES_{8a}), che nell'area degli abitati è formata da sabbie del canale di Reno;
- *unità delle paludi*, dominata da argille organiche e torbe che documentano la ambienti di tipo palustre, documentati nella porzione medio-alta del Subsistema di Ravenna (AES₈);
- *unità della piana alluvionale pleistocenica*, correlabile con la successione sabbioso-limosa che caratterizza nella zona il Subsistema di Villa Verucchio (AES₇).

Queste unità hanno evidentemente un significato puramente locale, in quanto, spostandosi lateralmente i corpi di canale passano a depositi fini di piana interalvea ed i pur estesi depositi argillosi dell'unità delle paludi passano a loro volta a depositi di riempimento di alveo. Le attuali conoscenze sul sottosuolo del territorio indagato, notevolmente accresciute dai molti contributi scientifici recentemente prodotti, sono state di seguito sintetizzate ed utilizzate per la descrizione del substrato e dei terreni di copertura che

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

costituiscono il modello di sottosuolo di riferimento per lo studio di microzonazione sismica (capitolo 5). Analogamente, le cognizioni sulla geologia di superficie sono recentemente notevolmente aumentate grazie alla realizzazione della cartografia geologica e geomorfologica della Provincia di Ferrara (Figura 3-4).

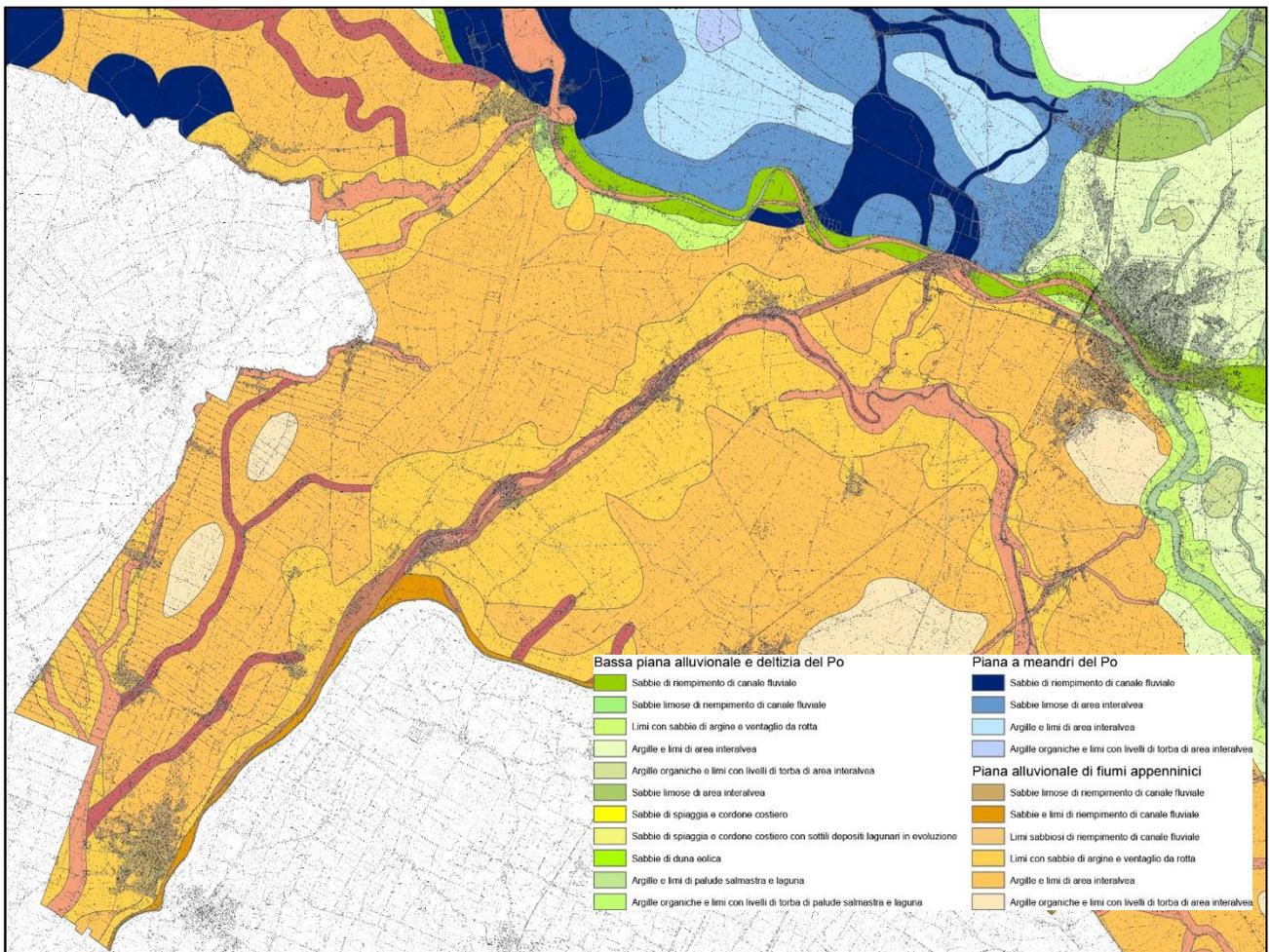


Figura 3-4 - Stralcio della Carta Geologica e Geomorfologica della Provincia di Ferrara (2016), in cui sono visibili a corpi di paleoalveo del Reno e di altri fiumi appenninici e i corpi depositi dal Po. Il territorio comunale indagato è interamente sviluppato a cavallo del più recente paleoalveo del Fiume Reno. Cartografia accessibile online: <http://www.ferradeltapo-unesco.it/>.

La nuova cartografia, realizzata dagli scriventi nel 2016, è basata sull'analisi di immagini telerilevate, modelli altimetrici del terreno ed informazioni derivanti da cartografia storica, integrate da puntuali rilevamenti di terreno e confronti con indagini geognostiche sul sottosuolo prossimo alla superficie.

La carta documenta come la porzione sud-occidentale del Ferrarese sia dominata dai grandi corpi sabbiosi di paleoalveo del Reno e di altri fiumi di provenienza appenninica.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Questi corpi si sono in gran parte depositi in età assai recente, generalmente post-romana e sono quindi attribuibili all'Unità di Modena (AES8a). Verso est e nord-est i sedimenti di provenienza appenninica sono limitati da corpi di paleoalveo del Po, in genere depositi in età medievale. A nord-ovest del capoluogo provinciale la pianura è invece dominata da sabbie deposte dal Po in condizioni di piana a meandri, in età romana e preromana. Il territorio comunale di Mirabello è interamente formato da sedimenti depositi dal Reno in età molto recente. I centri abitati, la rete viaria ed infrastrutturale sono in gran parte costruiti sopra il pronunciato dosso di sabbie e limi, depositi dal fiume durante il XVI e XVII secolo, e sui contigui corpi di limi sabbiosi di argine. Lateralmente, aree più depresse sono formate da sedimenti coesivi fangosi, depositi in aree umide interalvee, talvolta interessate da corpi di sabbie e limi da rotta fluviale.

3.2.1 Subsidenza e movimenti del suolo

Come noto, la pianura alluvionale emiliano-romagnola è interessata da diffusi fenomeni di abbassamento del suolo, di origine in parte naturale. La costante subsidenza naturale ha permesso infatti l'accumulo di potenti successioni quaternarie, con tassi lateralmente fortemente variabili (cfr. paragrafo 3.3 e Figura 3-11), indotti sia dalla subsidenza di origine tettonica che dal graduale costipamento delle potenti successioni quaternarie, associata alla lenta espulsione di fluidi, come acqua e metano biogenico. La subsidenza naturale è stata nell'ultimo secolo fortemente accelerata da alterazioni antropiche, quali bonifiche idrauliche e, soprattutto, forti pompaggi dai corpi acquiferi sotterranei. Tali abbassamenti del suolo inoltre, a causa delle basse pendenze, hanno ostacolato il deflusso delle acque superficiali, provocando diversi problemi nel corretto funzionamento della rete scolante gestita dai Consorzi di Bonifica. La fascia in cui ricade il territorio del Comune di Mirabello, è soggetta ad un abbassamento naturale del suolo dell'ordine del metro al millennio, a cui si è sovrapposto, nel periodo tra gli anni '60 e '70, una componente "artificiale", legata all'estrazione di fluidi dal sottosuolo. Il territorio non registra comunque tassi di subsidenza molto elevati.

Nel corso del 2011-2012, è stato realizzato il progetto "Rilievo della subsidenza nella Pianura Emiliano-Romagnola", per aggiornare le conoscenze sui movimenti verticali del suolo rispetto ai rilievi del 2006. Questo progetto, organizzato dall'A.R.P.A. su incarico della Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua della Regione Emilia-Romagna, ha visto la collaborazione del Dipartimento Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali D.I.C.A.M. dell'Università di Bologna. Lo studio si è basato sull'analisi interferometrica di dati radar satellitari, supportato da 17 stazioni permanenti G.P.S., non disponibili per il rilievo 2006. Rispetto alla precedente analisi, si è potuto contare su di un numero di punti di misura più che doppio (315.371 contro 142.000 punti), ciò ha permesso un'informazione più capillare rappresentare tramite isocinetiche dei

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

movimenti con equidistanza di 2,5 mm/anno. Queste indagini hanno mostrato come l'andamento della subsidenza, nel periodo 2006-2011, sia in gran parte del territorio regionale di pianura simile a quello rilevato nell'intervallo 2002-2006.

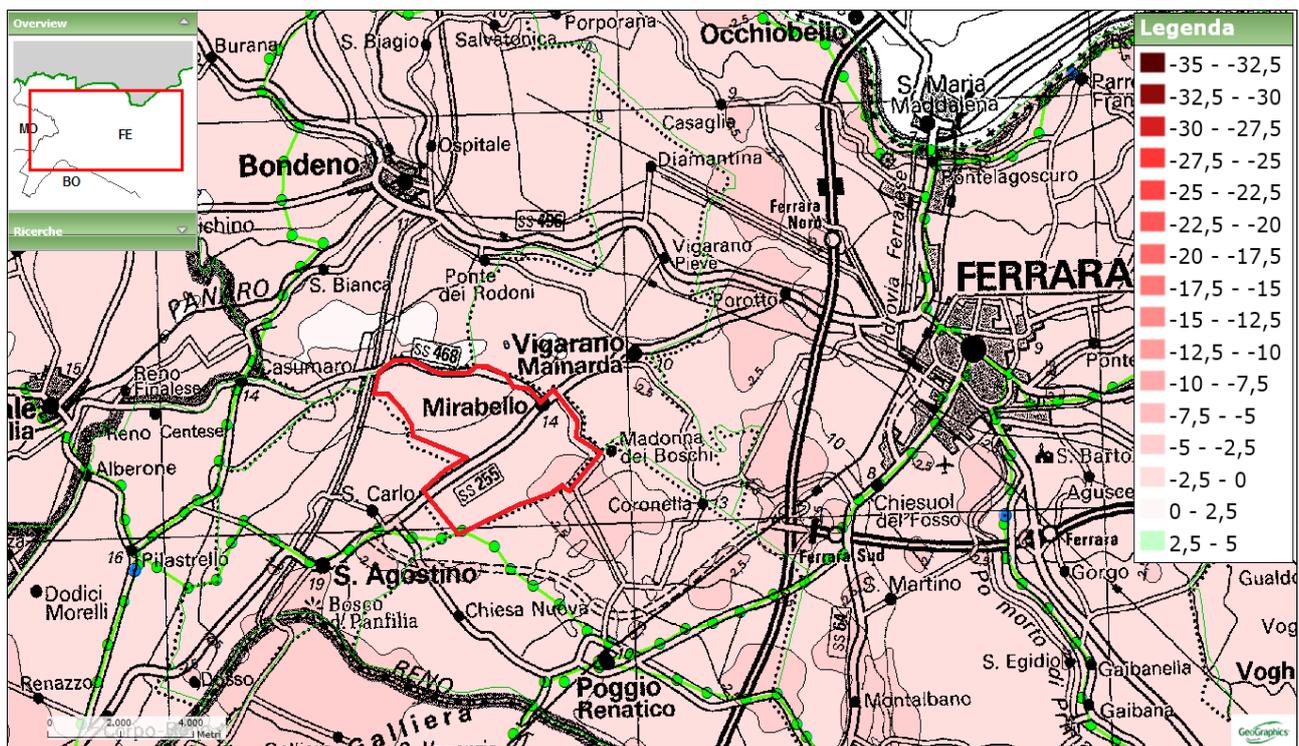


Figura 3-5 - Carta delle velocità di abbassamento verticale del suolo nel periodo 2006-2011. Scala in millimetri per anno; l'equidistanza isocinetiche è di 2,5 mm/anno. La linea rossa rappresenta il perimetro del Comune di Mirabello.

I risultati di queste accurate indagini interferometriche mostrano che il territorio del Comune di Mirabello si abbassa mediamente con velocità comprese fra 1 e 2 mm annui, con valori più elevati, che superano i 2,5 mm, nella porzione orientale, in direzione di Coronella. Valori particolarmente contenuti si rilevano invece lungo la via Correggese, posta a nord del territorio comunale, dove una fascia allungata in direzione est-ovest, a cavallo del Cavo Napoleonico, mostra condizioni di stabilità o di leggerissimo innalzamento.

A questi lenti movimenti si è poi sovrapposta la rapidissima e violenta deformazione del suolo indotta dai sismi del maggio 2012, che hanno prodotto consistenti innalzamenti delle aree epicentrali, corrispondenti ad aree di anticlinale sepolto. Questi movimenti sono stati pure documentati attraverso accurate misure interferometriche (Figura 3-6).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

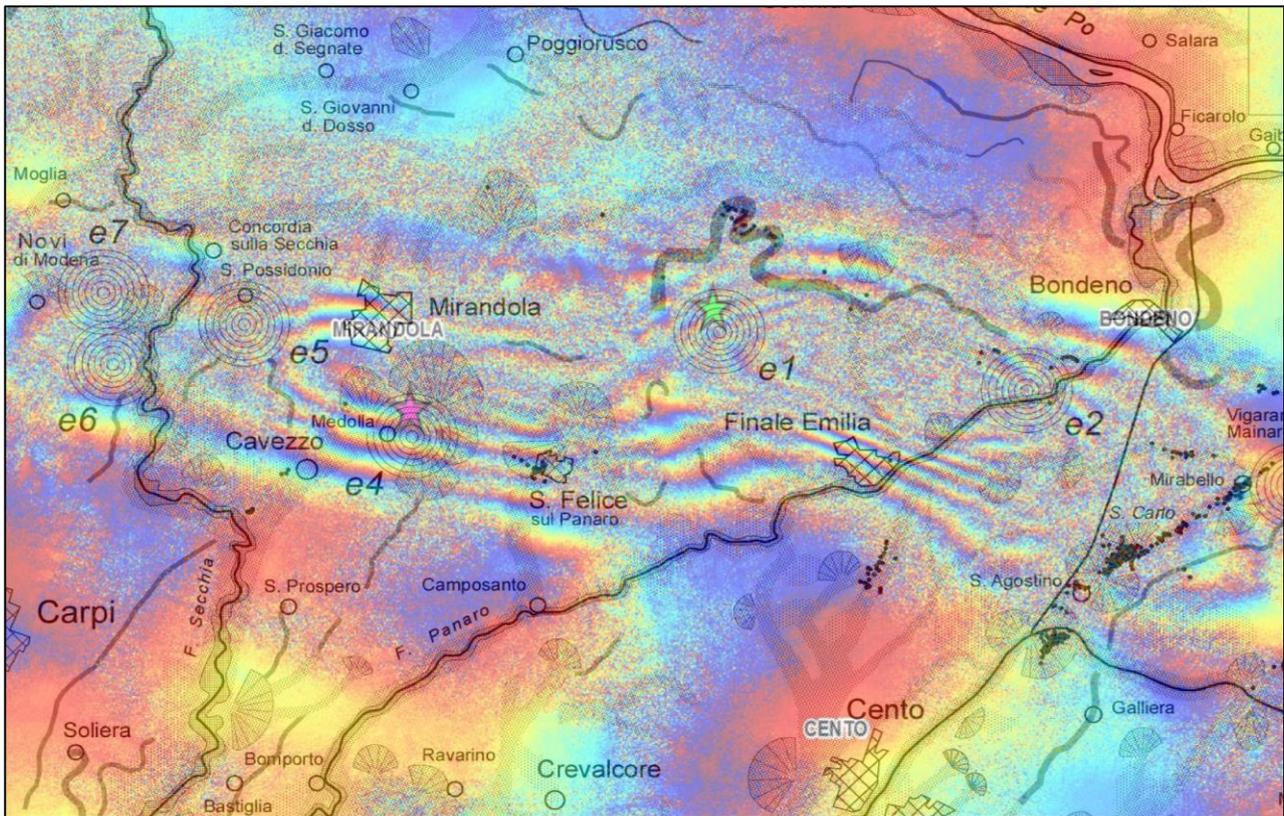


Figura 3-6 - Analisi interferometrica di dati altimetrici RADAR precedenti e successivi ai sismi del maggio 2012, realizzata a cura dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sovrapposta alla carta geomorfologica da Bondesan, 2012. Le frange di interferometria evidenziano le aree che hanno subito un uguale movimento verticale. La distribuzione areale dei movimenti di innalzamento mostra chiaramente che essi sono il frutto del sovrapporsi dei movimenti del 20 maggio, con un innalzamento massimo a nord di Finale Emilia, e di quelli del 29, con un innalzamento massimo nell'area di Mirandola. Ciascuno di questi eventi sismici ha prodotto una bombatura allungata a pianta sub-ellittica ed è l'espressione superficiale dell'innalzamento cosismico delle strutture sinclinaliche sepolte.

L'area del Comune qui esaminata ha subito un innalzamento durante la scosse principali del 20 maggio 2012, che ha prodotto il massimo sollevamento della superficie topografica nell'area a nord di Finale Emilia. Questi innalzamenti cosismici hanno quindi in parte localmente controbilanciato gli abbassamenti avvenuti durante gli anni più recenti, a causa della subsidenza. Aree limitrofe hanno invece subito abbassamenti cosismici, che hanno accentuato i movimenti legati alla subsidenza.

3.3 Contesto strutturale

L'area esaminata fa parte del bacino di Avanfossa dell'Appennino, qui sviluppato nella regione compresa tra la dorsale dell'Appennino settentrionale ed i primi rilievi veneti. Questa regione è costituita dalla catena appenninica affiorante, dall'Appennino sepolto - ricoperto dai depositi recenti della Pianura Padana e

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

dell'Alto Adriatico – e dall'Avanpaese Appennino-Dinarico, solo lievemente tettonizzato e sviluppato sotto la pianura veneta. Questa ristretta porzione di avampaese poco deformato è a sua volta limitata, verso nord, dalla catena Sudalpina, sepolta ed affiorante (Figura 3-7, Figura 3-8).

L'assetto strutturale delle successioni sepolte sotto la Pianura Padana è noto, nelle sue linee generali, attraverso numerosi profili di sismica a riflessione e sondaggi profondi, realizzati per la ricerca di idrocarburi, soprattutto da parte dell'AGIP. Il sottosuolo è caratterizzato da una complessa serie di piani di scollamento e sovrascorrimenti, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud associati ad anticlinali di rampa e più ampie pieghe sinclinaliche, interposte fra i fasci di sovrascorrimento. Queste strutture compressive hanno progressivamente coinvolto l'avanfossa appenninica in età geologica recente, durante il Neogene e il Quaternario. Nella fascia prossima al piede dell'Appennino affiorante, nessuna faglia sembrerebbe tagliare i depositi quaternari che suturano strutture fragili plioceniche.

Nelle strutture più avanzate, la base dei depositi quaternari risulta invece tagliata da strutture fragili e ciò testimonia un progressivo trasferimento dell'attività tettonica verso la parte più esterna dell'arco sepolto (Picotti e Pazzaglia, 2008; Toscani *et al.*, 2009). La deformazione del margine appenninico è infatti avanzata attraverso fasi parossistiche (Farabegoli *et al.*, 1997; Ricci Lucchi, 1986; Ricci Lucchi *et al.*, 1982), della durata di poche centinaia di migliaia di anni (Tortoniano superiore, Messiniano superiore, Pliocene inferiore e medio, Pleistocene inferiore), dall'attuale catena affiorante, verso l'avampaese. L'attività delle grandi faglie inverse (*thrusts*) al fronte dell'Appennino sepolto, sviluppate sotto l'area qui analizzata ai fini della zonazione, è iniziata solo nel Pliocene medio-superiore. Di attivazione ancora più recente sono, invece, le strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (*backthrust*), che interessano soprattutto gli orizzonti più superficiali.

Le prospezioni petrolifere hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti con geometria a pianta arcuata e vergenza nord e nord-est (Pieri e Groppi, 1975, 1981; Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002). All'interno delle pieghe che formano il fronte esterno della catena appenninica sepolta, è possibile distinguere (Pieri e Groppi, 1975) due fasci maggiori di pieghe, con concavità rivolta verso il margine appenninico, denominati "Arco delle Pieghe Emiliane", a nord-ovest, ed "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole", ad sud-est (Figura 3-7).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

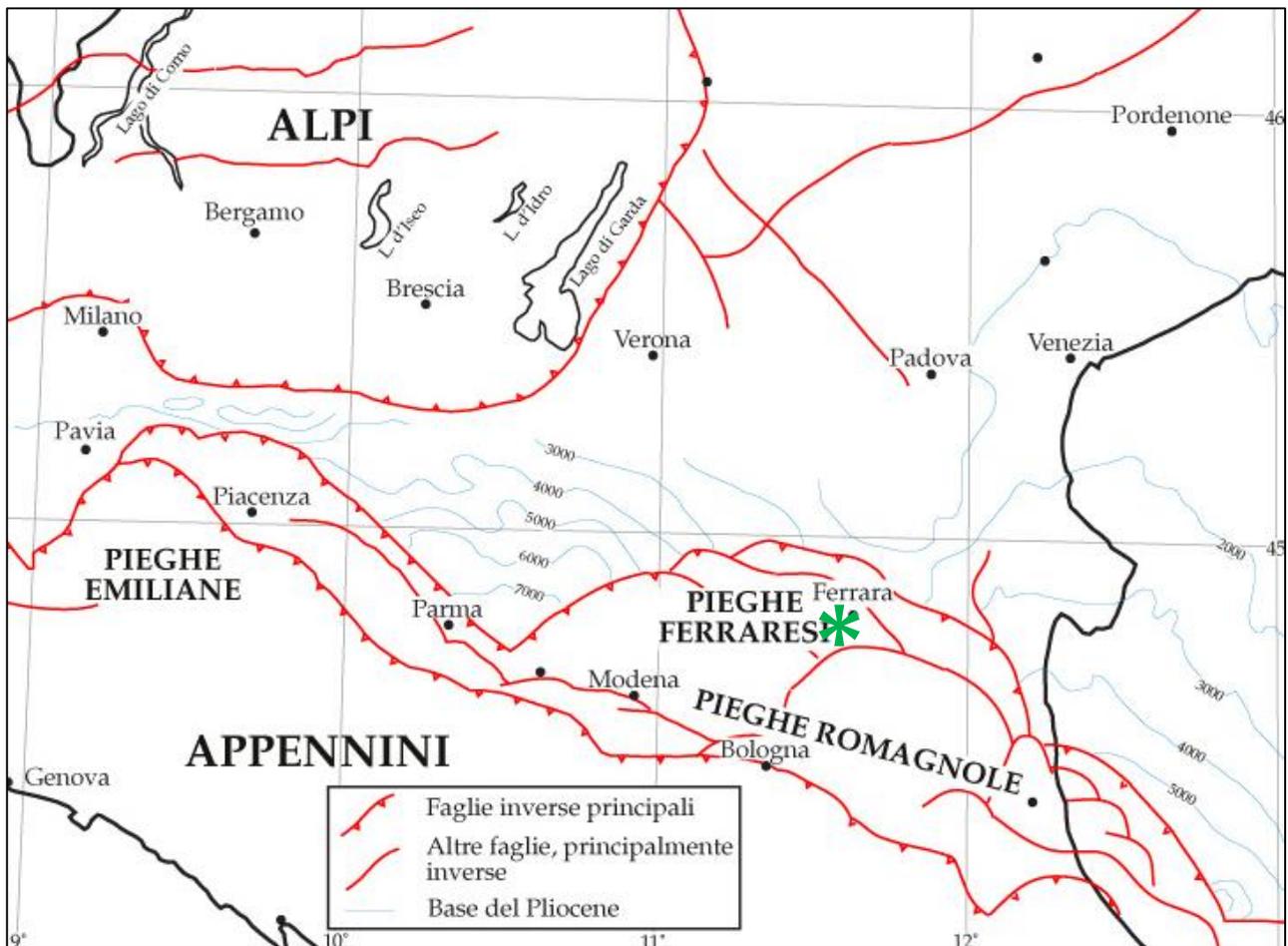


Figura 3-7 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri & Groppi, 1975). L'area analizzata si trova sulla parte interna, meridionale, delle Pieghe Ferraresi.

L'arco orientale può essere a sua volta suddiviso in tre strutture minori dette "Pieghe Ferraresi", "Pieghe Romagnole" e "Pieghe Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990). Le Pieghe Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "Ferrara Folds" in Pieri e Groppi, 1981) rappresentano le strutture più settentrionali, estese tra Reggio Emilia e la costa adriatica (Figura 3-7, Figura 3-8), che si spingono a nord del Po tra Occhiobello e Ferrara (Bigi *et al.*, 1990) e, come accennato, registrano le fasi più recenti e tuttora in atto della deformazione.

La complessa struttura sismogenetica delle Pieghe Ferraresi si sviluppa a nord della direttrice San Pietro in Casale - Pieve di Cento. Verso sud, questa struttura è limitata da una fascia di pieghe e sovrascorrimenti sepolti lungo la direzione Minerbio- San Giorgio di Piano, più prossima al margine appenninico ("Pieghe Romagnole" in Pieri e Groppi, 1981). Nel settore occidentale delle Pieghe Ferraresi, si possono osservare una serie di depressioni tettoniche e pieghe sinclinali che complicano ulteriormente la geometria strutturale (Figura 3-9).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

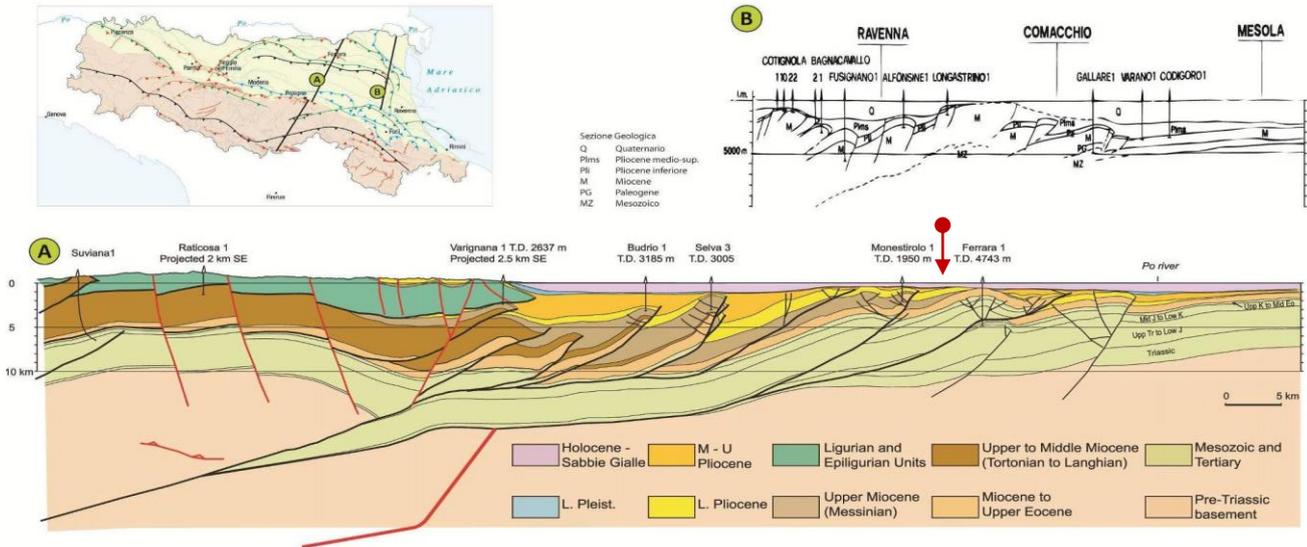


Figura 3-8 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore è presa (A) da Toscani *et al.*, 2009. L'area indagata si sviluppa in una sinclinale fortemente asimmetrica, il cui prolungamento sud-orientale interseca il piano del profilo in corrispondenza della freccia.

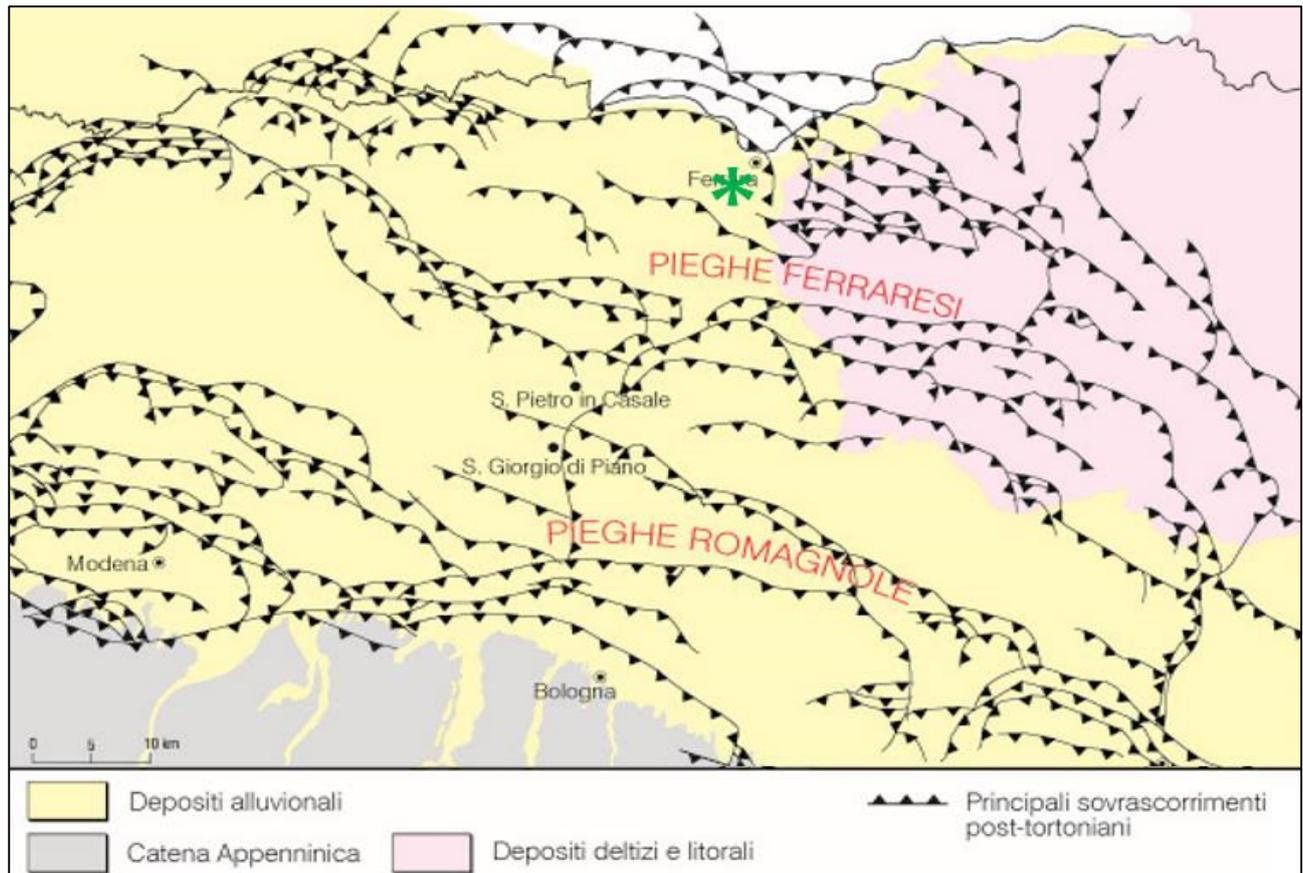


Figura 3-9 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghie Romagnole e Ferraresi. I colori illustrano i caratteri delle unità geologiche affioranti. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203, Poggio Renatico. L'area analizzata si sviluppa nella parte meridionale del fascio di pieghie ferraresi ed è indicata dall'asterisco.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

La Figura 3-8 illustra due profili attraversanti le Pieghe Ferraresi. La sezione A è tratta da Toscani *et al.* (2009), mentre la sezione B, localizzata alcuni km più ad est, è tratta da Pieri e Groppi (1981). Entrambe le sezioni mostrano un sovrascorrimento (*thrust*) principale profondo, che verso l'esterno si apre in ventagli (*splay*) di faglie meno profonde, associati retroscorrimenti di ordine minore. In sezione A, sono evidenti scollamenti multipli a diversi livelli strutturali, mentre la sezione B mostra superfici di scollamento generalmente più profonde. Nella porzione centrale, la struttura di Ferrara presenta un secondo gruppo di anticlinali di rampa, ben evidente in entrambe le sezioni, così come nel profilo di Figura 3-10, in cui viene anche indicata la localizzazione degli ipocentri dei principali eventi sismici del maggio 2012, le cui sorgenti sono state discusse nel paragrafo 2.2.

Il territorio del Comune di Mirabello è situato in corrispondenza di una struttura sinclinalica quaternaria, sviluppata immediatamente a sud della pronunciata anticlinale sepolta di Casaglia, associata al sovrascorrimento frontale appenninico, qui sviluppato a nord dell'attuale corso del fiume Po (Pieri e Groppi, 1981). La sinclinale di Mirabello è fortemente asimmetrica e sviluppata fra il fascio meridionale e quello settentrionale delle Pieghe Ferraresi. Tali strutture sono ben visibili nei profili di sismica a riflessione prodotti negli anni '50 dalla Società Petrolifera Italiana (ora ENI-AGIP) e nelle diverse interpretazioni geologiche degli stessi, proposte in letteratura (es. Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002; Corrado *et al.*, 2010; Pieri e Groppi, 1981; Toscani *et al.*, 2009).

L'insieme delle Pieghe Ferraresi e delle Pieghe Romagnole rappresenta la culminazione strutturale che delimita, a nord, un ampio bacino di *piggy-back* (Ori e Friend, 1984), all'interno del quale si sono depositi notevoli spessori sedimentari che costituiscono la successione pliocenica marina e quaternaria marino-continentale (Figura 3-8). L'architettura stratigrafica dei depositi plio-quaternari è stata fortemente influenzata dalla deformazione tettonica e presenta quindi spessori massimi nelle aree di sinclinale e minimi sulle anticlinali sepolte (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a, b; Di Dio e Caporale, 1998; Di Dio e Molinari, 2000). Questo andamento è ben visibile anche nelle enormi variazioni laterali dello spessore delle successioni più recenti, in buona parte deposte in condizioni di pianura alluvionale. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, deposto negli ultimi 350-450.000 anni (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998) e limitato al tetto da una superficie topografica considerabile come orizzontale, mostra spessori che variano da meno di 70 m in corrispondenza della culminazione dell'Anticlinale di Casaglia, a nord di Mirabello, ad anche oltre 400 m nelle aree di sinclinale e al fronte dell'Appennino sepolto, come nei pressi di Codigoro. Queste grandi variazioni di spessore registrano quindi altrettanto grandi variazioni laterali di subsidenza, indotte anche dalla deformazione delle strutture tettoniche sismogenetiche.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

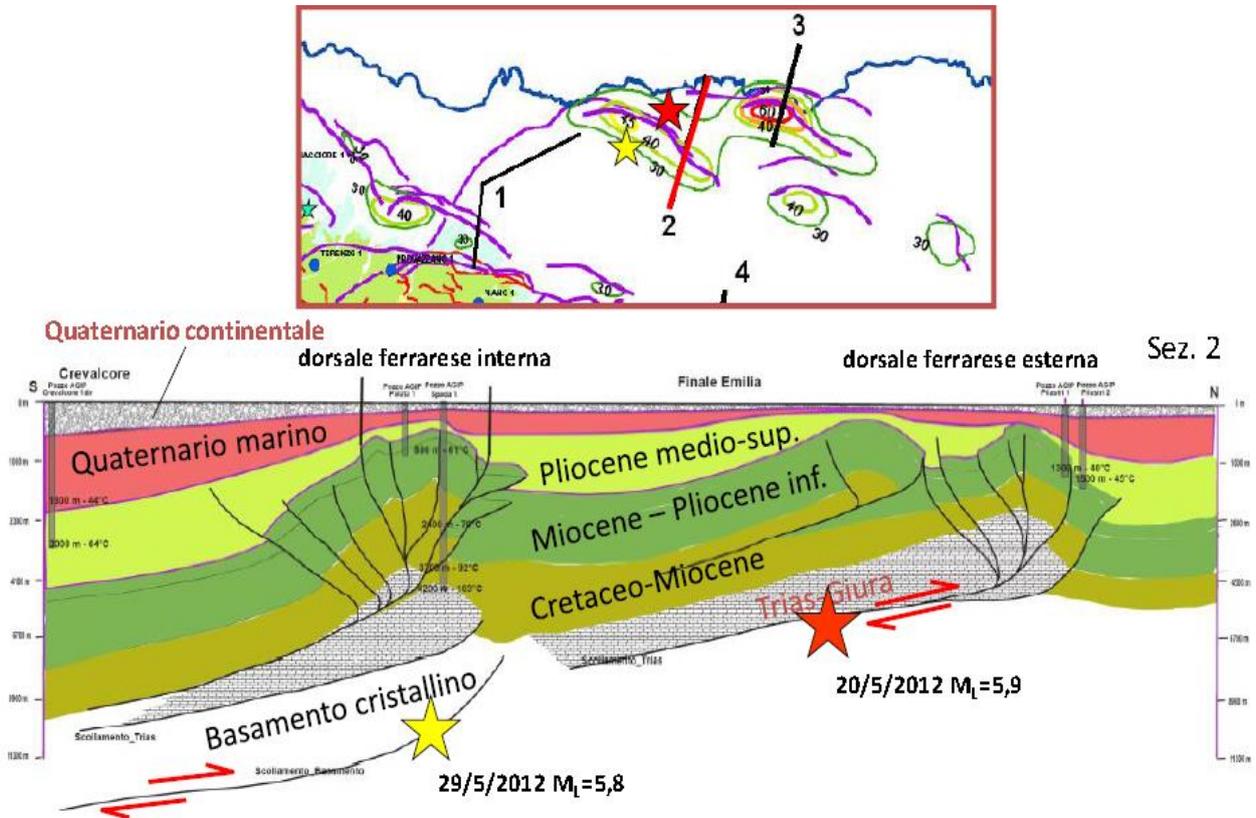


Figura 3-10 - Sezione geologica profonda, da Crevalcore (BO) al Po, con proiezione degli ipocentri delle scosse principali, e sua carta di localizzazione. (Relazione illustrativa elaborati Ordinanza 70/2012). I sismi del maggio 2012 sono avvenuti sia nella parte alta del basamento metamorfico varisico che lungo scollamenti nella copertura carbonatica del Mesozoico inferiore. Il profilo passa poco ad ovest del territorio comunale di Mirabello, il cui territorio corrisponde all'area di sinclinale subsidente interposta fra la Dorsale Ferrarese interna ed esterna.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

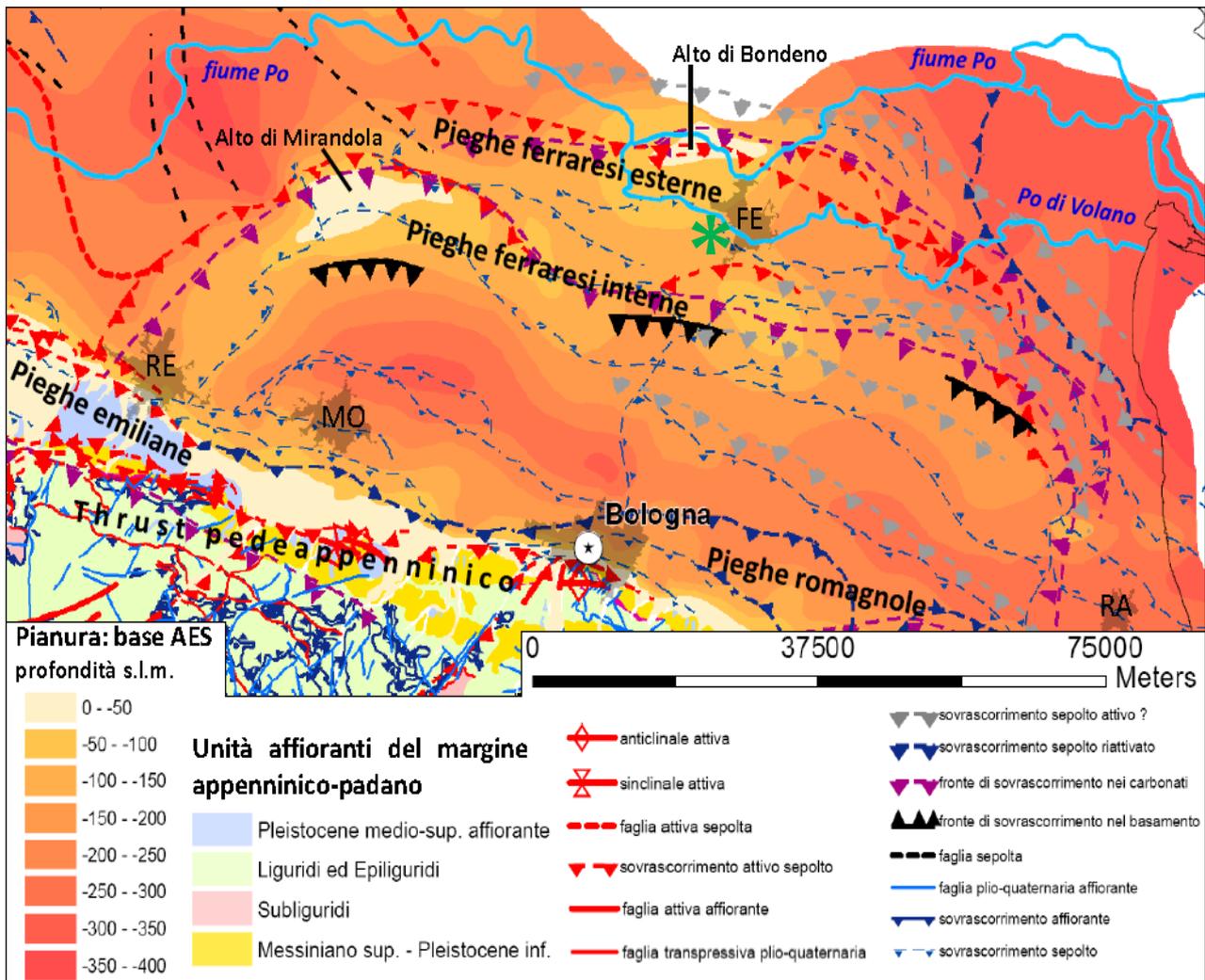


Figura 3-11 - Inquadramento tettonico dell'area interessata dalla sequenza sismica del 2012 (da Martelli, 2011). La profondità molto variabile della base del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore registra le grandi variazioni laterali dei tassi di subsidenza durante la parte recente del Quaternario. La posizione del territorio qui indagato è indicato dall'asterisco.

3.4 Assetto idrogeologico

Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico dell'area di Mirabello, gli studi post-sismici hanno confermato la presenza di un sottile corpo acquifero freatico, spesso meno di una decina di metri, sovrapposto ad un complesso sistema multifalda di acquiferi confinati, profondo alcune centinaia di metri (Figura 3-12). Questo sistema di acquiferi è illustrato dalla sezione geologica di Figura 3-12 estratta dal Foglio Geologico CARG 203 Poggio Renatico al 1:50.000. La sezione descrive l'assetto dei corpi idrogeologici poco a sud-est del territorio analizzato e mostra la chiara influenza esercitata sull'architettura idrostratigrafica dalla subsidenza differenziale, controllata dalla tettonica in atto ed enfatizzata dall'esagerazione verticale dell'elaborato grafico.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

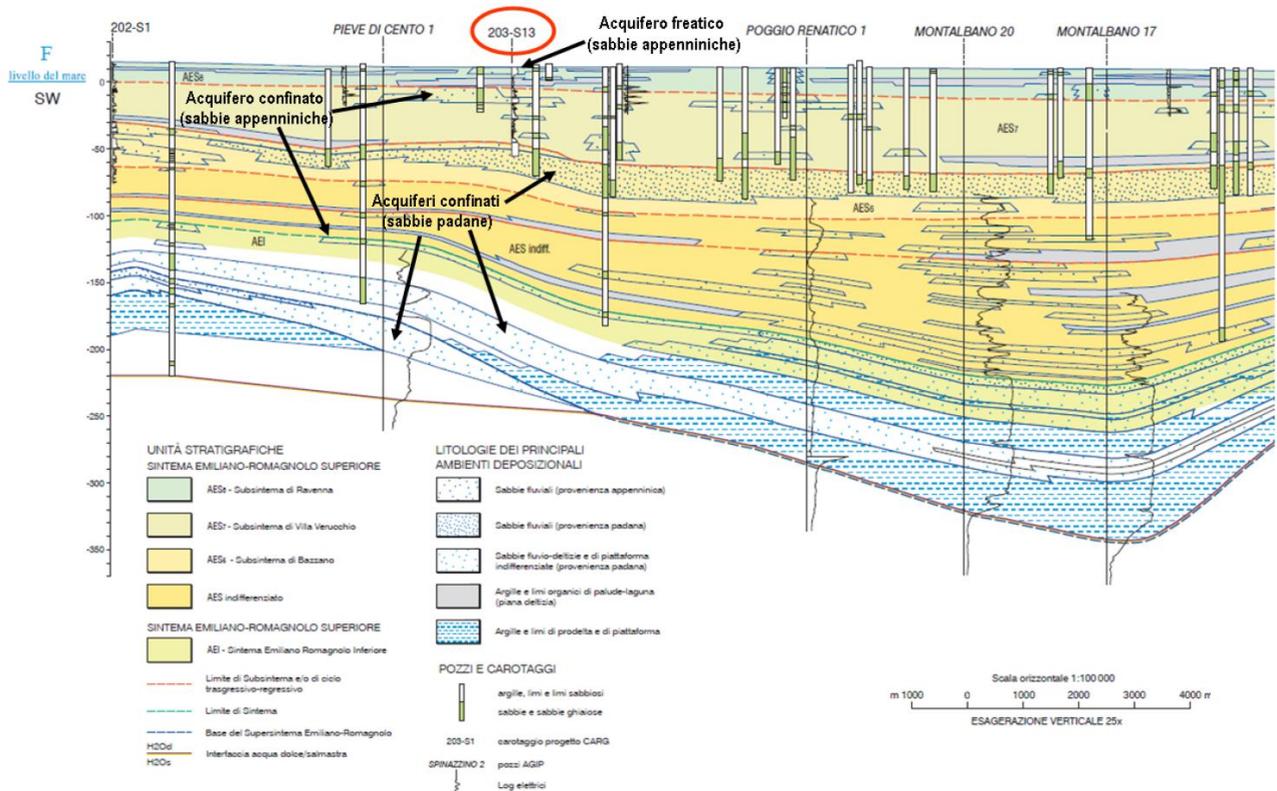


Figura 3-12 - Sezione geologica che sintetizza l'architettura idrostratigrafica del sistema multifalda nella zona in esame. L'ellisse con contorno rosso indica il sondaggio "S13", terebrato nei pressi del Comune di Mirabello. Nel sottosuolo si osservano vari corpi acquiferi contenuti in sabbie fluviali, particolarmente nei grossi corpi sabbiosi accumulatisi durante le fasi glaciali. Tratto dalle Note illustrative Foglio 203 - Poggio Renatico.

Nel sottosuolo dell'area indagata, sono presenti diversi corpi acquiferi, formati da sabbie fluviali e deltizie, di provenienza sia appenninica che padana, separati tra loro da ingenti spessori di depositi fini impermeabili. I corpi acquiferi sono confinati dai prevalenti volumi di fanghi di piana alluvionale e piana costiera, ricchi di intervalli organici a bassissima permeabilità. Verso il basso, le falde dolci sono progressivamente sostituite da acque salmastre, spesso ricche di metano biogenico. L'emungimento idrico ha contribuito alla depressurizzazione degli acquiferi confinati, il che ha determinato l'accelerazione della subsidenza superficiale.

Per le finalità dello studio correlate alla definizione della suscettibilità a liquefazione è di fondamentale importanza considerare i caratteri idrogeologici dei primi 20 m di sottosuolo, che nel caso in oggetto si trovano prevalentemente in condizioni di acquifero freatico.

La falda libera, presente nei corpi sabbiosi di paleoalveo e ventaglio da rotta del Reno, è ovviamente soggetta a notevoli variazioni stagionali con fluttuazioni della superficie piezometrica anche dell'ordine di alcuni metri.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Gli studi pubblicati dalla Regione Emilia-Romagna nel *“Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello (Provincia di Ferrara)”*, indicano che l’acquifero freatico presenta uno spessore limitato, compreso tra 6 e 12 m circa. Esso è costituito da sabbie medie e fini, nella sua parte inferiore, che passano a sabbie limose/limi sabbiosi verso l’alto, in particolare nei corpi deposti durante le fasi terminali di evoluzione degli alvei.

Per determinare l’andamento della falda freatica la struttura regionale ha commissionato, tra giugno e luglio 2012, 9 sondaggi attrezzati con piezometro finestrato per tutto lo spessore dell’acquifero. In data 23 luglio 2012 è stata condotta una campagna di misure piezometriche che ha permesso di elaborare la mappa di Figura 3-13.

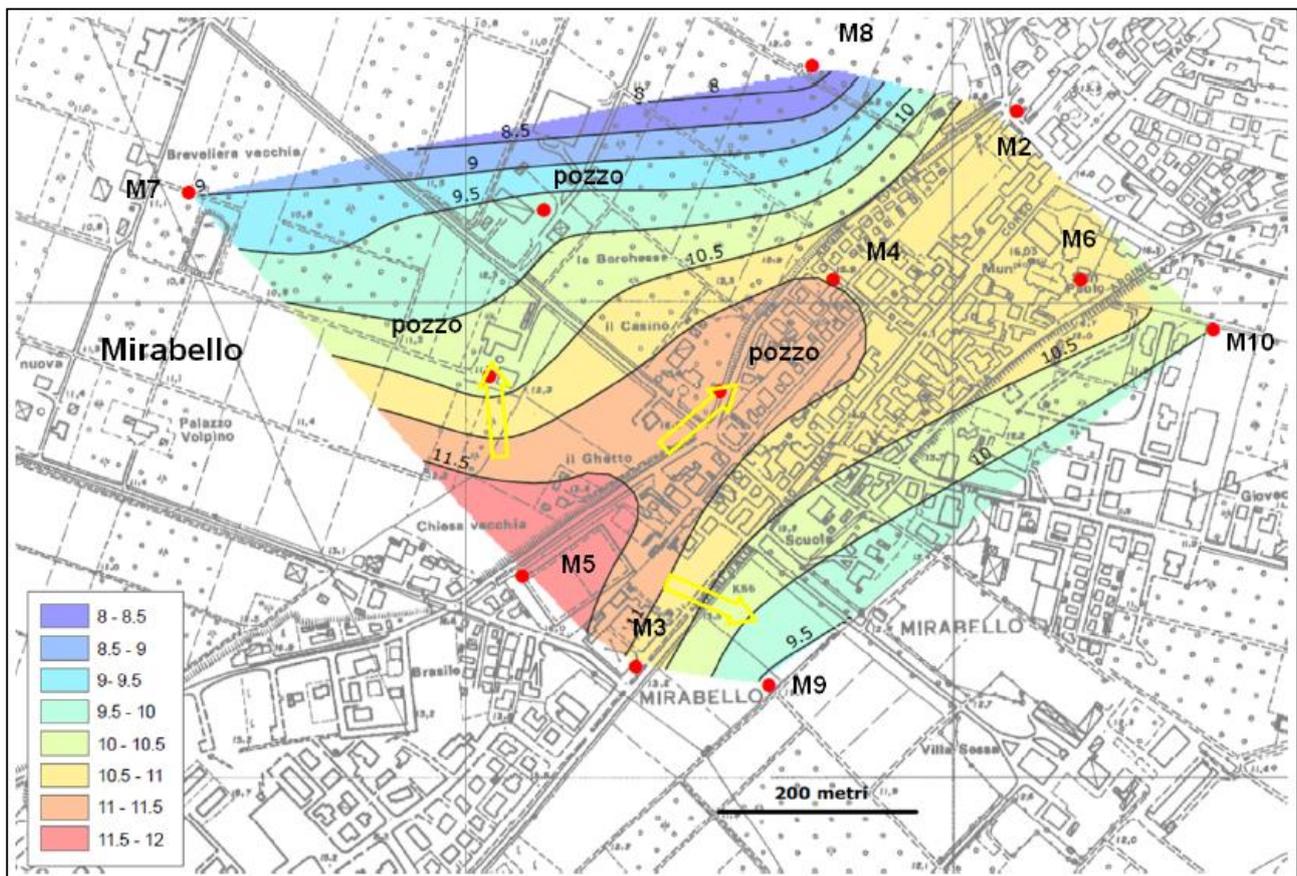


Figura 3-13 - Carta delle isofreatiche estive nella zona di Mirabello, da dati piezometrici acquisita in data 23 luglio 2012 (dati riferiti al l.m.). In questa figura sono mostrate le ubicazioni dei piezometri utilizzati, le isofreatiche e la direzione di moto della falda. Da Gruppo di Lavoro Liquefazione, 2012, Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello.

La Figura 3-13, riferita al livello medio del mare, mostra come l’andamento della falda freatica riproponga la morfologia della superficie topografica, muovendosi dalle zone più elevate del corpo di riempimento dell’alveo di Reno verso le aree laterali più depresse. Il corpo affiorante di paleoalveo rappresenta quindi la

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

zona di ricarica della falda freatica, sia perché topograficamente rilevato, sia perché costituito da terreni più grossolani che consentono una maggiore infiltrazione rispetto alle aree limitrofe. Il flusso della freatica, proveniente da sud-ovest lungo il corpo di sabbie di riempimento di alveo, è ricaricato sia dalle precipitazioni meteoriche sia dalle infiltrazioni dall'attuale corso del fiume Reno e, in misure ridotta, dal Cavo Napoleonico e dal Canale Emiliano Romagnolo, essendo questi ultimi in gran parte rivestiti ed impermeabilizzati.

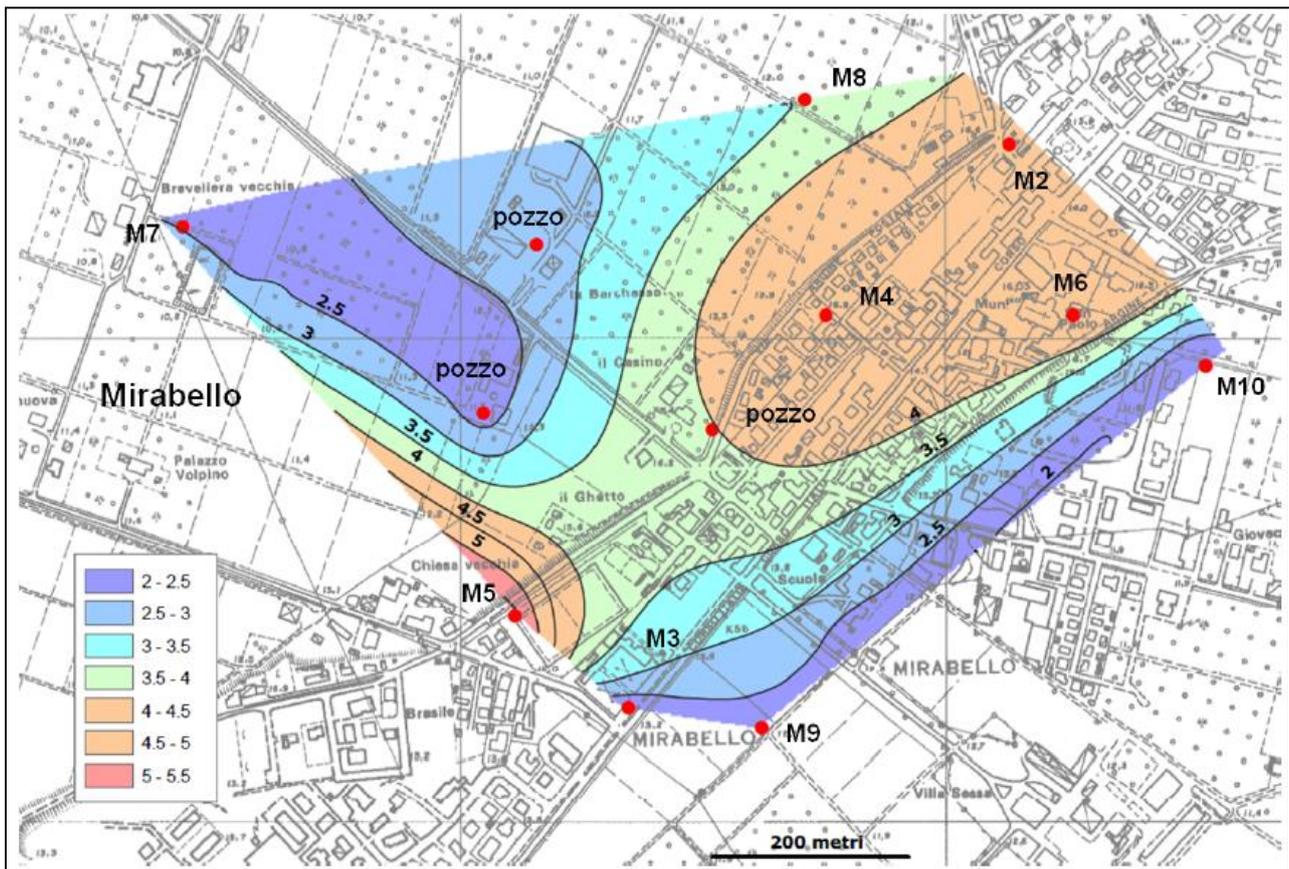


Figura 3-14 - Carta di soggiacenza della falda freatica nella zona di Mirabello in data 23 luglio 2012, con profondità riferite al piano campagna. Gruppo di Lavoro Liquefazione, 2012, Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello.

La Figura 3-14 mostra l'andamento della stessa falda di Figura 3-13, ma con isofreatiche riferite al piano campagna. La profondità della falda è quindi maggiore nel corpo di paleoalveo, con valori di soggiacenza fino a 5,5 m, e minore nelle zone circostanti, verso nord - ovest e sud - est, fino ad arrivare a meno di 2 m dalla superficie topografica. Data la morfologia relativamente accentuata del corpo di paleoalveo, le aree in cui la falda mostra minore soggiacenza sono quindi quelle più depresse topograficamente.

4 Dati geognostici e geofisici

I dati utilizzati in questo studio sono stati ricavati da indagini sia di tipo diretto quanto 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, che seppur meno dettagliate delle prime, offrono informazioni sui corpi sepolti a maggiori profondità.

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 Down-hole, HVSr, MASW e ARRAY sismico. Le ubicazioni delle prove utilizzate per lo studio di microzonazione sismica sono riportate nella carta delle indagini - scala 1:10.000 (Tavola 1) descritta al paragrafo 8.1.

4.1 Indagini di repertorio

Nella prima fase dello studio di microzonazione sismica si è provveduto al reperimento delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili sul territorio comunale. Questa attività ha portato all'acquisizione della banca dati geognostica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, oltre che alla raccolta dei dati di sottosuolo disponibili presso l'archivio comunale, con particolare riguardo a quelli derivanti dalle indagini realizzate dopo il sisma.

Aggiungendo alle indagini della banca dati regionale quelle recuperate negli archivi comunali e quelle provenienti da raccolte mirate presso alcuni geologi liberi professionisti, si sono potute utilizzare, ai fini di microzonazione sismica, ben 410 prove pregresse di buona affidabilità.

Da ultimo sono stati considerati dati di sottosuolo di altri Comuni, ubicati in prossimità dal confine amministrativo. Tali dati, di cui è riportata in carta l'ubicazione (cfr. Tavola 1), hanno permesso di aumentare le conoscenze geologiche in tali aree e meglio definire geometrie e limiti dei corpi deposizionali cartografati e delle aree a diverso rischio liquefazione lungo le fasce di confine.

Tipologia di prova	Numero
Prove Penetrometriche statiche (CPT)	205
Prove Penetrometriche elettriche (CPTE)	1
Prove Penetrometriche con piezocono (CPTU)	74
Prove Penetrometriche con cono sismico (SCPT)	34

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Prove Dilatometriche (DMT)	1
Sondaggi a carotaggio continuo (S)	27
Sondaggi da cui sono stati prelevati campioni (SC)	3
Sondaggi a distruzione di nucleo (SD)	7
Pozzi per acqua (PA)	26
Prove di colonna risonante (CR)	11
Microtremore a stazione singola (HVSr)	5
Prova sismica in foro tipo Downhole (DH)	1
Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)	12
Extended Spatial Autocorrelation (ESAC-SPAC)	3

Tabella 4-1 - Numero di indagini pregresse raccolte e 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 DPC 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 4.0.1, messo a disposizione dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (DPC). 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.

L'abbondanza e la distribuzione tutto sommato omogenea delle indagini geognostiche pregresse, unita alla limitata estensione del territorio comunale, ha consentito una chiara ed accurata ricostruzione del quadro litostratigrafico, con buona correlabilità generale delle proprietà geotecniche e geofisiche dei terreni presenti nei primi trenta metri di sottosuolo.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Scarse sono invece risultate le indagini geofisiche pregresse volte ad accertare la profondità del bedrock sismico, ad individuare i principali contrasti di impedenza ed a fornire indicazioni sulle velocità delle onde di taglio a maggiori profondità.

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto degli studi di microzonazione sismica del Comune di Mirabello sono state direttamente realizzate diverse campagne di indagini, con lo scopo di caratterizzare dal punto di vista geotecnico e geofisico le aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche e gli ambiti urbani consolidati, estendendo, in alcuni casi, le misure alle aree rurali al fine di migliorare la definizione dei confini le diverse microzone.

In Tabella 4-2 si riporta una sintesi delle indagini direttamente realizzate con finalità di microzonazione sismica, mentre in seguito sono descritte le metodologie di esecuzione e di analisi delle stesse.

Tipologia di prova	Numero
Prove Penetrometriche statiche (CPT)	10
Prove Penetrometriche con piezocono (CPTU)	10
Microtremore a stazione singola (HVSr)	24
Prova sismica in foro tipo Downhole (DH)	1

Tabella 4-2 - Numero e tipologia di indagini realizzate direttamente con finalità di microzonazione sismica.

4.2.1 Prove penetrometriche con punta meccanica (CPT)

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.

Esistono diverse tipologie di prove penetrometriche statiche CPT (*Cone Penetration Test*); quelle classiche sono caratterizzate da una registrazione dei valori di resistenza mediante punta "meccanica".

Le indagini sono state eseguite mediante penetrometro statico, con spinta massima nominale di 20 ton, montato su cingolato Pagani Tg63, equipaggiato di punta elettrica Mh297 con diametro $\varnothing = 36$ mm, angolo di apertura 60° , area di 1.000 mm^2 e manicotto laterale di frizione con diametro $\varnothing = 36$ mm, lunghezza 133,7 mm, area laterale 15.000 mm^2 .

L'acquisizione dei dati è avvenuta ogni 20 cm di avanzamento della punta, sino a 30 m di profondità, elaborando i valori relativi a q_c , f_s per ricavare i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

4.2.2 Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU)

A differenza delle prove penetrometriche statiche CPT, le CPTU (*Cone Penetration Test with Pore Pressure measurement*) si eseguono tramite un penetrometro dotato di punta elettrica a piezocono la quale, collegata mediante cavo elettrico ad un'unità di acquisizione in superficie, permette di 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 meglio discriminare i terreni a scarsa permeabilità e bassa resistenza, oltre a fornire un maggior dettaglio stratigrafico dovuto all'acquisizione in automatico del dato, con una precisione centimetrica all'avanzamento.

L'acquisizione dei dati avviene infatti ogni 2 cm di avanzamento della punta; le prove sono state spinte fino alla profondità massima di 20 m, profondità entro la quale possono verificarsi fenomeni di liquefazione cosismica in presenza di terreni granulari poco addensati e saturi in acqua. Le CPTU sono state realizzate in zone d'ambito prive di dati pregressi o in cui erano disponibili dati di scarsa qualità.

I dati penetrometrici (q_c , f_s) sono stati elaborati sia per ricavare i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati, sia per eseguire verifiche a liquefazione con i metodi semplificati.

4.2.3 Prova sismica in foro tipo *Down-hole*

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

L'indagine geofisica è quindi finalizzata alla determinazione in dettaglio delle variazioni verticali di velocità sismica delle onde di compressione (V_p) e delle onde di taglio (V_s) in corrispondenza del sondaggio.

Il down-hole a supporto della microzonazione è stato eseguito in corrispondenza di un pozzo profondo che attraversa buona parte della successione quaternaria, recentemente perforato per finalità di emungimento idrico in località Santa Teresa (sigla 038016P390SD390). Il pozzo, cementato e rivestito con tubo in PVC di diametro interno di 162,8 mm sino a quota 265 m, ha permesso l'acquisizione delle onde di compressione (V_p) e delle onde di taglio (V_s).

Per la prova sono state impiegate tre differenti sorgenti sismiche: una impulsiva da 250 kg (Figura 4-1) che, colpendo verticalmente una piastra di acciaio da un'altezza di 3 m, ha permesso di generare le onde (P) di compressione e due martelli a pendolo simmetrici che, colpendo in orizzontale una base in acciaio, hanno generato le onde di taglio (S) trasversalmente polarizzate.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

L'apparato di ricezione è invece costituito da una sonda calettata (Figura 4-1) contenente tre geofoni monoassiali da 10 Hz, di cui due orizzontali ed uno verticale.



Figura 4-1 - A sinistra, macchina operatrice con funzione di sorgente delle onde sismiche. A destra, apparato di ricezione dei segnali costituito da sonda calettata contenete geofoni monoassiali da 10 Hz.

Sette geofoni da 14 Hz, tre verticali e quattro orizzontali, sono stati inoltre collocati in superficie. Uno dei quattro geofoni orizzontali (di *time break*) è stato applicato all'apparato di energizzazione, con funzioni di dispositivo di trigger per l'inizio delle registrazioni. Gli altri sei geofoni sono stati accoppiati e disposti in prossimità della bocca del foro, come illustrato nello schema di Figura 4-2. Questi sensori sono stati lasciati fissi per tutta la durata del down-hole per poter fungere da dispositivi di controllo e consentire il rifasamento dei sismogrammi registrati alla diverse profondità, al momento del pre-processing dei dati.

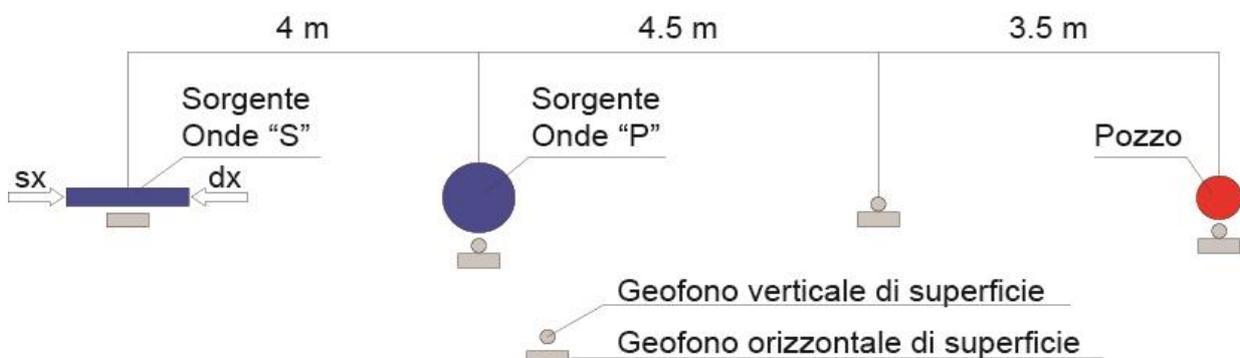


Figura 4-2 - Configurazione planimetrica schematica delle sorgenti e dei ricevitori utilizzati per l'indagine in foro di tipo down-hole.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Gli impulsi sismici sono stati acquisiti utilizzando una apparecchiatura EG&G Geometrics GEODE (a 24 canali) ad elevato dettaglio di campionatura (0.018 millisecc) collegata ad un computer portatile, che mediante operazioni automatiche di amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, ha permesso di trasferire e registrare i dati su supporto magnetico.

I valori di Vs e Vp sono stati acquisiti nell'intervallo di profondità compreso tra 18 e 265 m, a causa della presenza di un doppio rivestimento con anima in acciaio nella parte più superficiale del sondaggio. I valori medi, massimi e minimi per i diversi intervalli di profondità sono riportati in Tabella 4-3.

Profondità (m)	Unità	Vs Min. (m/s)	Vs Max. (m/s)	Vs Med. (m/s)
0 - 22	AES8	116	200	161
23 - 58	AES7	207	326	281
59 - 85	AES6	310	356	334
86 - 160	AESi	355	464	394
161 - 265	AEI	310	525	434

Tabella 4-3 - Valori massimi, minimi e medi di velocità delle onde di taglio (S) per intervalli di profondità corrispondenti alle diverse unità litostratigrafiche riconosciute.

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 state finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed alle analisi HVSr del sottosuolo (Albarello e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), presente diffusamente sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici sia all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ($10-15 \text{ m/sec}^2$), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione di tipo "passivo".

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

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Il metodo considera i microtremori derivanti da onde di superficie (onde 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.

Le ventiquattro misure per la microzonazione sismica sono state direttamente eseguite con tromografi digitali "Tromino" modello Studio e modello Engy, tecnicamente equivalenti in relazione al tipo di misura richiesta. Tuttavia, per confermare l'analoga risposta dei due strumenti ed effettuare una taratura reciproca, sono state realizzate 2 coppie di misure, in cui gli strumenti sono stati posti a circa 7 metri di distanza l'uno dall'altro. Tutti i punti di misura sono stati georiferiti tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m. La distribuzione sul territorio delle 24 misurazioni ha tenuto conto anche della localizzazione dei dati disponibili provenienti da indagini pregresse di analoga tipologia. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz e con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti.

Solamente in corrispondenza del sondaggio profondo (sigla 038016P390SD390), in località Santa Teresa, sono state realizzate due misure della durata di 40 minuti ciascuna al fine di meglio indagare le basse frequenze.

Prova	ID_SPU	f ₀	a ₀	Long. (Wgs84)	Lat. (Wgs84)
MIR 0001	038016P311HVSR311	0,81	2,01	11.4825	44.8146
MIR 0002	038016P312HVSR312	0,94	2,20	11.4328	44.8225
MIR 0003	038016P313HVSR313	0,75	2,04	11.4694	44.8123
MIR 0004	038016P314HVSR314	0,88	2,18	11.4468	44.816
MIR 0005	038016P315HVSR315	1,00	2,22	11.456	44.8222
MIR 0006	038016P316HVSR316	0,88	2,16	11.4371	44.8271
MIR 0007	038016P317HVSR317	0,72	2,69	11.4276	44.8342
MIR 0008	038016P318HVSR318	1,03	2,11	11.4692	44.8253
MIR 0009	038016P319HVSR319	1,19	1,84	11.4592	44.8326
MIR 0010	038016P320HVSR320	1,03	2,02	11.4178	44.8403
MIR 0011	038016P321HVSR321	0,84	1,94	11.4147	44.8332
MIR 0012	038016P322HVSR322	0,88	1,91	11.4775	44.8252
MIR 0013	038016P323HVSR323	1,03	2,13	11.4489	44.8353
MIR 0013a	038016P324HVSR324	1,06	2,23	11.449	44.8352
MIR 0014	038016P325HVSR325	1,13	2,14	11.4578	44.8076
MIR 0015	038016P326HVSR326	1,09	1,94	11.4499	44.8129
MIR 0016	038016P327HVSR327	0,78	2,12	11.456	44.8179
MIR 0017	038016P328HVSR328	0,69	1,77	11.4747	44.8289

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

MIR 0018	038016P329HVS329	0,81	2,05	11.445	44.81
MIR 0019	038016P330HVS330	0,81	2,20	11.4378	44.8047
MIR 0020	038016P331HVS331	0,91	1,99	11.4367	44.8109
MIR 0021	038016P332HVS332	1,67	1,68	11.4265	44.8071
ST01	038016P346HVS346	0,94	2,20	11.4266	44.8101
ST02	038016P345HVS345	0,92	2,40	11.4264	44.8100

Tabella 4-4 - Principali dati associati alle 24 misure di microtremore a stazione singola. f_0 Frequenza naturale – a_0 Ampiezza del picco di f_0 .

La campagna di indagine geofisica ha permesso la redazione di una carta di dettaglio delle frequenze naturali dei terreni (cfr. Tavola 3) che nell'area del Comune di Mirabello variano tra 0,7 e 1,1 Hz, con ampiezza dei picchi generalmente contenuta e comunque inferiore a 2,5.

5 Modello del sottosuolo

Le prime centinaia di metri di sottosuolo dell'area indagata sono interamente costituite da successioni terrigene estremamente spesse, che registrano un andamento globalmente regressivo, mostrando una evoluzione da ambienti marini profondi a condizioni continentali di pianura alluvionale. Queste potenti unità sedimentate di età quaternaria presentano spessori estremamente variabili ed una grado di litificazione molto basso o del tutto assente. La loro organizzazione stratigrafica è stata fortemente controllata sia dalla ciclicità eustatica e climatica legata all'alternanza di fasi glaciali ed interglaciali, sia dalla deformazione tettonica sin-sedimentaria di questa porzione sismicamente attiva dell'Avanfossa Appenninica.

Le unità quaternarie sono caratterizzate da un progressivo aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, causata da fenomeni come il costipamento e parziale cementazione dei sedimenti granulari ed il consolidamento dei litotipi coesivi, legato 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 dalle misure di Vs eseguite in pozzo durante gli studi di Microzonazione dell'Ordinanza 70/2012 e da quelle profonde realizzate a supporto di questo studio (Minarelli *et al.* 2016). Tali superfici corrispondono spesso ai limiti disconformi fra Sintemi e Subsintemi, a riflettori sismici e passaggi fra unità sismo-stratigrafiche.

Per l'individuazione delle profondità dei limiti discordanti e per la loro classificazione sono stati utilizzati diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale del sottosuolo. I principali contrasti

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

di impedenza associati a tali limiti, sono stati identificati mediante misure di microtremore 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 regionale ha permesso l'individuazione, con buona affidabilità, della superficie che genera il principale contrasto di impedenza rilevabile con la tecnica HVSR.

La superficie è associata ad un aumento non troppo marcato della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, all'interno della successione del Quaternario superiore.

Questo limite stratigrafico, come dettagliato al paragrafo 5.2.3, è posto a circa 85 m di profondità e corrisponde alla base del Subsistema di Bazzano "AES₆".

I dati rilevati mediante down-hole profondo (cfr. paragrafo 4.2.3), mostrano come a tali profondità le Vs siano ancora sostanzialmente basse con valori minori di 400 m/s, non compatibili con quelli caratteristici del "bedrock sismico" di riferimento per un'analisi di risposta sismica locale.

Tale livello di riferimento deve quindi essere ricercato a profondità più elevate in a cui corrisponda un picco a più bassa frequenza.

Sulla base delle misure disponibili e dei dati noti sul contesto stratigrafico e regionale risulta plausibile che tale picco a bassa frequenza sia correlabile con il tetto dei depositi pliocenici, che possono essere quindi assunti come bedrock sismico dell'area di studio.

5.1 Substrato

Con il termine "substrato" sono qui definite tutte le successioni sottostanti il Quaternario Marino (QM). Sopra i depositi prevalentemente carbonatici mesozoici e paleogenici, poggiano le potenti successioni in gran parte terrigene del Neogene. Queste ultime sono qui costituite per tutto il Miocene da fanghi depositi in ambienti marini profondi anche anossici, ricoperti da spesse unità torbiditiche plioceniche.

Le unità plioceniche sono state progressivamente coinvolte nella rapida deformazione tettonica compressiva di questa porzione dell'Avanfossa appenninica che ne ha fortemente influenzato spessori e ambienti deposizionali.

Questi movimenti hanno indotto diffuse superfici di discordanza stratigrafica e lacuna, legate a periodi di non deposizione od erosione (Ghielmi *et al.*, 2010). Lacune e discordanze, anche angolari, sono particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte, come quella di Renazzo-Corporeno a sud dell'area comunale indagata, o di Casaglia, a nord di essa. Fra questi due fasci anticlinalici complessi si

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

sviluppa la sinclinale di Mirabello, dove gli spessori delle sequenze Plioceniche superano i 1500 m. Il Pliocene è infatti dominato da potentissime successioni di torbiditi di tipo flyshoide, deposte in ambienti di mare profondo ed alimentate da sabbie di provenienza alpina. Nella loro parte alta sono presenti anche orizzonti conglomeratici, anch'essi di provenienza alpina e sudalpina (Ghielmi *et al.*, 2010). Seguendo la terminologia AGIP, queste successioni torbiditiche sono ascrivibili in gran parte alle Formazioni di Porto Corsini e Porto Garibaldi. Queste successioni non presentano discordanze stratigrafiche marcate o prolungate lacune, al contrario di quanto avviene in corrispondenza delle aree di anticlinale.

Nell'area di sinclinale considerata, approssimativamente al limite Plio-Pleistocene, è presente invece una discontinuità stratigrafica associata ad un netto cambio litologico e di facies deposizionale, indotto da una fase di importante riorganizzazione strutturale. In questa area, la sedimentazione torbiditica della Formazione di Porto Garibaldi è stata infatti bruscamente interrotta, al limite delle sequenze deposizionali PL3 e PL4 (Ghielmi *et al.*, 2010), dall'innalzamento del fondo marino a nord-ovest dell'area bacinale di Mirabello, legato al rapido sviluppo di strutture anticlinali di rampa transpressiva sinistra, in aree attualmente poste poco a est del corso del Fiume Secchia, a nord di Mirandola. Gli spessi corpi di arenarie e arenarie-conglomeratiche sono quindi limitati superiormente da una superficie netta, a cui seguono centinaia di metri di argille poco litificate di provenienza appennina a foraminiferi platonici, ascrivibili alla Formazione di Ravenna di età quaternaria (cfr. paragrafo 5.2.14.2.3). Il deciso cambio litologico, di facies e di provenienza sedimentaria crea un netto contrasto di impedenza acustica associato ad un marcato aumento delle velocità sismiche.

5.2 Terreni di copertura

Come già in precedenza accennato la successione quaternaria è formata da sedimenti non litificati e poco consolidati, attribuibili, in base alle proprietà elasto-meccaniche e alla posizione stratigrafica ai "terreni di copertura" (cfr. parte introduttiva capitolo 5).

Questi terreni presentano comunque notevoli variazioni petrofisiche e litologiche interne che ne hanno permesso la suddivisione in una serie di unità stratigrafiche descritte di seguito.

5.2.1 Quaternario Marino

Le successioni quaternarie inferiori inquadrare nell'unità stratigrafica del Quaternario Marino, sono formate da argille a foraminiferi platonici, passanti superiormente a facies di prodelta e sabbie di fronte

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

delizio. Queste sequenze si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell'antico Mare Adriatico, soggetta a forte subsidenza ed apporto sedimentario.

Nell'area considerata l'unità del Quaternario Marino è in gran parte costituita da argille di mare aperto con spessori di oltre 500 m.

Questa unità, nella pianura ferrarese e bolognese, è raggiunta solo da un limitato numero di sondaggi stratigrafici descritti in modo sufficientemente accurato e realizzati per fini di ricerca di idrocarburi.

Facies deposizionali analoghe sono però studiabili in affioramento, nella fascia collinare ai piedi dell'Appennino, in aree ove queste unità sono state innalzate dalla deformazione compressiva tardo-quaternaria. Questi sedimenti argillosi erano tradizionalmente conosciuti come Calabriano, talvolta anche Piacenziano, mentre sono oggi inquadrati nelle unità litostratigrafiche affioranti della Formazione di Castell'Arquato, Argille di Riolo Terme ed Argille di Terra del Sole (Ricci Lucchi *et al.*, 1982). Nel sottosuolo litologie analoghe sono invece riferite alla Formazione di Ravenna, da non confondersi con l'omonimo recente Subsistema.

Il Quaternario Marino è frequentemente limitato al tetto da una discordanza stratigrafica, anche angolare, associata ad una lacuna cronologica, che lateralmente passa in condizioni di paraconcordanza. La discordanza è legata alla fase di riorganizzazione strutturale datata a circa 650.000 (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

Nel contesto in esame i depositi deltizi si sovrappongono, in condizioni di relativa continuità, ai fanghi di mare più aperto e profondo.

5.2.2 Quaternario prevalentemente continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo)

La discordanza regionale sopradescritta è stata scelta come limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo, formato, in questa area, da depositi fluviali continentali, intercalati inferiormente da subordinati livelli marini, costieri o salmastri. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo registra la prosecuzione di un'evoluzione complessivamente regressiva, che porta da condizioni marine alle attuali condizioni francamente continentali. Nell'area indagata, questo Supersistema si accumulava nella fascia di interazione fra i sedimenti di provenienza appenninica e quelli del Po. Nel tempo geologico, il fronte dei sedimenti di provenienza appenninica è migrato verso nord, a discapito di quelli padani.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è formato da ripetute alternanze di livelli dominati da sedimenti granulari sabbiosi ed altri ricchi di sedimenti fini (Figura 3-12). Questa alternanza è stata fortemente influenzata dal susseguirsi di fasi glaciali ed interglaciali. Le fasi glaciali sono registrate da depositi fluviali di pianura alluvionale fredda, con granulometrie marcatamente più grossolane di quelle delle fasi interglaciali.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Le fasi di massima trasgressione sono caratterizzate da influenze marine, qui presenti solo nella parte bassa del Supersintema.

5.2.3 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghe Ferraresi sepolte, fra 400.000 ed 350.000 anni fa circa. La discordanza corrisponde, in questa area, alla scomparsa di intervalli con chiari caratteri marini. In aree di culminazione anticlinale, la superficie di discordanza può sovrapporsi direttamente al Pliocene, mentre a sud di Cento diventa meno marcata e si sviluppa all'interno di depositi continentali di provenienza esclusivamente appenninica.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo- regressivi, con uno spessore di circa 30-40 metri ciascuno, in corrispondenza delle aree di sinclinale. Le facies marino-costiere interessano quasi esclusivamente i due cicli inferiori, mentre i restanti risultano francamente continentali. Questa evoluzione testimonia sia il progressivo riempimento del bacino sedimentario, 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.

Lo sviluppo di questi cicli sedimentari è stato controllato dalle grandi fluttuazioni glacio-eustatiche, che hanno influenzato sia il clima dei bacini idrografici padano-appenninici, sia il livello eustatico. Il limite inferiore dei cicli è formato da una superficie netta di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana singlaciale. La porzione trasgressiva basale di ciascun ciclo è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie continentali, seguiti da argille organiche di piana alluvionale, palude e piana costiera, che solamente nella parte inferiore del Sintema mostrano intercalazioni di sabbie litorali o fanghi salmastri. Le porzioni regressive sono invece costituite da spesse successioni di depositi fini di piana alluvionale, con subordinati corpi nastriformi isolati di sabbie di canale fluviale. Nella parte superiore dei cicli, le sabbie di canale fluviale divengono più abbondanti, fino alla formazione di corpi sabbiosi continui, lateralmente estesi in tutto il sottosuolo della pianura ferrarese. Questi grandi corpi di sabbie sono stati depositi in ambienti di media pianura alluvionale fredda, durante le fasi di stazionamento basso singlaciale del livello del mare.

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* (AES₄) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES₅) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 204 Portomaggiore), ed in 3 cicli superiori, inquadrati nei

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Subsintemi di *Bazzano* (AES₆), di *Villa Verucchio* (AES₇) e di *Ravenna* (AES₈). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES_{8a}) di età post-romana.

I cicli più antichi registrano eventi trasgressivi maggiormente sviluppati verso l'entroterra rispetto a quelli più recenti. I tre Sintemi superiori (AES₆, AES₇, AES₈), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica.

Questi cicli sono i meglio definiti a scala regionale dato il numero relativamente alto di pozzi che li attraversano, compresi diversi sondaggi a carotaggio continuo appositamente eseguiti per la cartografia geologica (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998; Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 - es. Fogli 202-203-204). La base di ciascun Subsintema, corrisponde ad una superficie erosiva incisa in sabbie fluviali singlaciali o, in aree meridionali soggette a forti apporti appenninici, ad un paleosuolo carbonatico maturo sviluppato su depositi continentali. La fase di massima ingressione della linea di costa è qui registrata da depositi palustri dulcicoli di pianura costiera, ricchi di argille organiche e torbe. La fase di stazionamento alto è invece caratterizzata da sabbie di canale fluviale intercalate a potenti successioni di fanghi di piana interalvea. La parte superiore dei Subsintemi AES₆ e AES₇ è caratterizzata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda, diffusi soprattutto nelle porzioni meridionali. Spostandosi verso aree meridionali, la parte superiore è dominata da corpi ghiaioso-sabbiosi di riempimento di canale fluviale, che registrano lobi di conoide alluvionale ad alimentazione appenninica. Nell'area considerata, la parte superiore del Subsintema di Bazzano (AES₆) è dominata da grandi corpi di sabbie di Po, il cui limite meridionale è migrato progressivamente verso nord nelle fasi successive.

L'organizzazione stratigrafica delle prime decine di metri di sottosuolo è particolarmente rilevante sia ai fini geotecnici sia per quelli di microzonazione sismica. La legislazione vigente impone, infatti, di valutare la velocità delle onde di taglio (Vs) nei primi 30 m di sottosuolo, qui costituiti da sedimenti del Pleistocene terminale e dell'Olocene, intervalli di tempo che corrispondono a fasi dell'ultima glaciazione e all'intervallo post-glaciale. La porzione singlacial è ascritta al Subsintema di Villa Verucchio (AES₇), mentre la parte più recente è attribuita al Subsintema di Ravenna (AES₈), di cui è affiorante solo l'intervallo di età post-romana, attribuito all'Unità di Modena (AES_{8a}).

Nella parte meridionale del territorio comunale, la porzione superiore del Subsintema di Villa Verucchio (AES₇) è prevalentemente costituita di alternanze di sabbie ed abbondati limi di provenienza appenninica. Nell'area settentrionale, invece, lo stesso intervallo è formato da estesi corpi di sabbie grossolane di riempimento di canali del Po. La porzione superiore di AES₇ si è infatti deposta nella zona di interferenza fra

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

i canali a treccia del Po ed i fiumi di origine appenninica, che presentavano canali di dimensioni relativamente più contenute e granulometrie più fini. Il Subsistema di Ravenna (AES₈) è formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso depositi in ambienti umidi, stagni e paludi di acqua dolce. La parte inferiore è però più ricca di limi, che possono mostrare paleosuoli carbonatici maturi, assenti nella porzione superiore dell'unità. All'interno di questi corpi di piana interalvea sono presenti corpi sabbiosi nastriformi, depositi dal Reno e da altri fiumi appenninici.

La distribuzione dei sedimenti affioranti è ovviamente nota con dettaglio e accuratezza molto maggiore rispetto a quella dei corpi di sottosuolo. L'area indagata è interamente formata da sedimenti della porzione più recente dell'Olocene, di età post-romana, ascritti all'Unità di Modena (AES_{8a}). Questi sedimenti sono stati depositi in età moderna, a partire dal XV secolo dopo Cristo, fino all'interruzione settecentesca della dinamica deposizionale. Il territorio è dominato dalle sabbie e limi di riempimento del canale di Reno, corrispondenti al pronunciato dosso morfologico che attraversa il territorio di Mirabello e su cui si sviluppa l'abitato. Lateralmente, affiorano vaste plaghe di sedimenti fangosi depositi in aree di depressione interalvea e palude dulcicola, affiancati da larghe fasce di limi sabbiosi di argine naturale. Una più completa descrizione delle parti affioranti dell'Unità di Modena è fornita nel paragrafo 8.3, che analizza in dettaglio la carta geologica appositamente rilevata per la realizzazione di questo studio.

6 Interpretazioni e incertezze

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

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0)

A supporto degli approfondimenti di microzonazione sono state realizzate 24 misure di rumore ambientale (microtremore a stazione singola), che si aggiungono alle 5 misure pregresse archiviate in banca dati. In realtà le indagini di questa tipologia raccolte negli archivi comunali erano in origine in numero maggiore, ma a causa di incertezze legate ad affidabilità o completezza del dato (ubicazione dubbia, taglio del grafico H/V per frequenze inferiori a 1 Hz, disturbi non filtrati, misure non sufficientemente lunghe in rapporto alle frequenze indagate, ecc.), si è deciso di archiviare solo le misure considerate attendibili.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Nella Tabella 4-4 del paragrafo 4.2.4 sono riportati i dati principali associati a ciascuna delle 24 nuove misure di microtremore realizzate per la microzonazione, i cui rapporti di indagine sono presenti nell'Allegato 2. Alcune di esse sono state appositamente eseguite a breve distanza l'una dall'altra e con strumenti differenti per verificare la ripetibilità delle misure e la sostanziale coerenza dei dati registrati con i diversi strumenti (paragrafo 4.2.4).

Gran parte delle acquisizioni hanno avuto durata di 20 minuti e sono state analizzate con finestre di 20 secondi. In corrispondenza del sondaggio profondo (sigla 038016P390SD390), in località Santa Teresa, sono state però realizzate due misure da 40 minuti ciascuna, analizzate con finestre di 40 secondi, che hanno permesso di "validare" i picchi a più bassa frequenza (compresi tra 0,25 e 0,3 Hz) individuati dalle alcune delle misure eseguite in quanto, per soddisfare i criteri "Sesame" (AA.VV., 2004), dovrebbe essere rispettata la condizione per cui $f_0 > 10 / L_w$ (lunghezza finestra). Bisogna inoltre ricordare che i picchi di H/V a frequenze inferiori a 0,5 Hz possono essere influenzati dalle condizioni meteorologiche che li rendono in generale più o meno visibili (con ampiezza più o meno pronunciata) se le misure sono realizzate in tempi diversi (Albarello e Castellaro, 2011).

Le numerose misure di rumore ambientale eseguite per gli approfondimenti di microzonazione e distribuite su tutto il territorio comunale, hanno permesso la redazione di una carta di dettaglio delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3, paragrafo 8.4), che nell'area comunale variano tra 0,7 e 1,1 Hz, con ampiezza dei picchi generalmente contenuta e comunque inferiore a 2,5. Tali picchi risultano legati a modesti contrasti di impedenza a media profondità (indicativamente tra i 60 e gli 85 metri) e potrebbero corrispondere, almeno in alcuni casi, alla base dell'unità AES6 (Allegato 1, sezione D-D' Cento-Occhiobello). Alcune misure mostrano però anche un secondo, ed ancor meno marcato, picco a frequenze molto inferiori (tra 0,2 e 0,3 Hz), ben evidente nelle misure appositamente realizzate con tempi più lunghi ed analizzate con finestre più ampie (Figura 6-1). Tale picco è stato riconosciuto anche in letteratura attraverso l'utilizzo di strumentazione maggiormente sensibile alle basse frequenze (Milana *et al.*, 2014). In base ai dati stratigrafici disponibili ed ai valori di V_s profondi, si può ragionevolmente supporre che il picco a più bassa frequenza possa corrispondere al passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici, dove questi ultimi rappresenterebbero il bedrock sismico dell'area (paragrafo 6.2).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

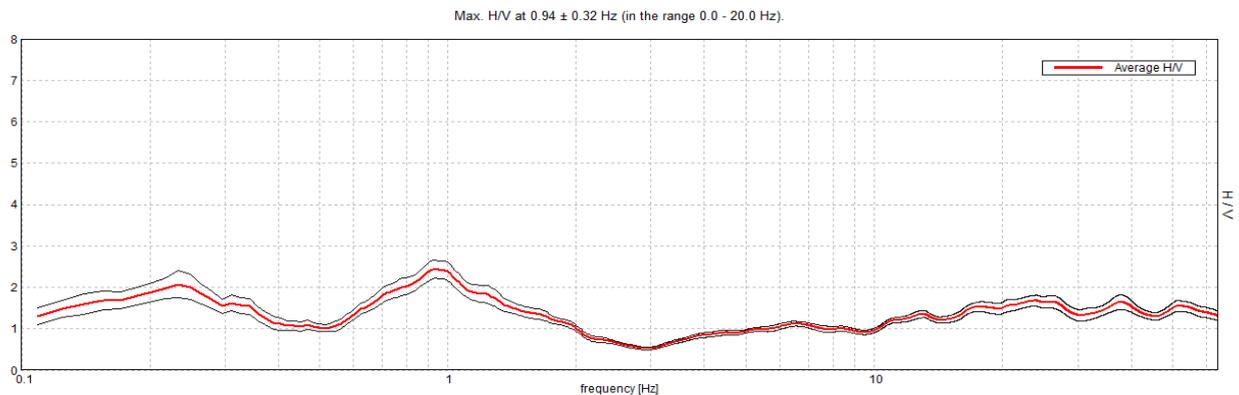


Figura 6-1 - Curva HVSR di una delle due misure di rumore ambientale realizzate in località Santa Teresa (prova 038016P346HVSR346) allo scopo di evidenziare eventuali picchi a bassa frequenza. Si nota che oltre al picco a 0,94 Hz se ne distingue bene un secondo a circa 0,25 Hz.

La carta delle frequenze naturali dei terreni prevista dalla D.G.R. 2193 del 2015 e descritta nel paragrafo 8.4, riporta comunque il valore in frequenza del primo e in genere più significativo picco (f_0), sempre comunque visibile in tutte le misure a frequenze comprese tra 0,7 e 1,1 Hz.

6.2 Substrato rigido

Il confronto fra i risultati della campagna di misure di microtremore, descritti nel paragrafo precedente, ed i dati derivati da sezioni geologiche e da pozzi per idrocarburi presenti in aree limitrofe, hanno permesso una correlazione fra i picchi registrati alle basse frequenze (0,25 Hz circa) ed orizzonti stratigrafici profondi.

Come evidenziato dalla sezione geologica Cento-Occhiobello (Martelli e Romani, 2013; Paolucci *et al.*, 2015), riportata in dettaglio nell'Allegato 1 (sezione D-D'), che attraversa il territorio del Comune di Mirabello, con direzione SW-NE, si basa essenzialmente sulle correlazioni eseguite con i dati dei pozzi per idrocarburi e dei sondaggi archiviati nella banca dati geognostica della Regione Emilia-Romagna.

A seguito di verifiche eseguite attraverso procedure di inversione delle curve H/V di misure di rumore ambientale, si può affermare che tra le superfici stratigrafiche individuate nella sezione D-D' Cento-Occhiobello (Martelli and Romani, 2013; Paolucci *et al.*, 2015), l'unica che potrebbe correlarsi con le basse frequenze di risonanza individuate dalle misure di rumore ambientale (0,25 Hz circa) è rappresentata dal tetto dei depositi pliocenici, che nell'area di studio (sinclinale) si trova ad una profondità certamente superiore ai 600 metri raggiunti dalla sezione stessa. L'interfaccia posta tra la base dei depositi del Quaternario Marino e il tetto dei quelli del Pliocene è stata riconosciuta, in aree di anticlinale più pronunciata, come quella che origina il maggiore contrasto di impedenza e quindi il maggiore picco di H/V: a Casaglia, così come a Mirandola sondaggi e misure dirette di Vs hanno inoltre permesso di definire tale

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

superficie come il bedrock (o pseudo bedrock) sismico, poiché i depositi pliocenici più superficiali raggiungono velocità superiori a 600/800 m/s (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Martelli e Romani, 2013). Sulla base dei dati stratigrafici e di velocità di dettaglio disponibili per le aree di anticlinale (Cento e Casaglia), con l'aiuto di misure di H/V, tale superficie può essere estrapolata anche in area di sinclinale quale quella di Mirabello. Attraverso l'analisi dei picchi di H/V a bassa frequenza registrati da misure di microtremore effettuate lungo la sezione Cento-Occhiobello (molte delle quali realizzate dagli scriventi per altri studi di microzonazione sismica), che diminuiscono in frequenza passando dalle aree di anticlinale a quelle di sinclinale, è possibile ipotizzare con buona approssimazione che la profondità del bedrock sismico (tetto dei depositi pliocenici) in corrispondenza dell'area comunale di Mirabello sia circa 800 metri. Per la determinazione della velocità del bedrock a tale elevata profondità è stato assunto un valore sufficiente a riprodurre indicativamente l'ampiezza del picco a più bassa frequenza osservato dalle misure di HVSR. Tali valori di profondità e di velocità del bedrock sono stati utilizzati nel modello sismostratigrafico alla base del calcolo della risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1, Tabella 7-1).

6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

La principale criticità che interessa il territorio comunale di Mirabello è certamente dovuta alla presenza di terreni suscettibili a liquefazione.

La manifestazione di effetti di sito legati a fenomeni di liquefazione è stata ampiamente documentata in occasione del sisma del 2012 e la presenza di condizioni predisponenti a tali fenomeni è stata accertata per ampie aree costituenti gli ambiti urbanizzati ed urbanizzabili.

Gli studi realizzati durante la fase di emergenza dalla Regione Emilia-Romagna ed i precedenti livelli di approfondimento di microzonazione sismica hanno consentito di mappare chiaramente limiti ed estensione delle aree con presenza di terreni aventi caratteristiche predisponenti la liquefazione. Queste ultime sono state indicate come Zone di Attenzione per Liquefazione nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4, paragrafo 8.5).

L'abbondanza e la distribuzione delle indagini geognostiche ha consentito inoltre di discriminare spessore e geometrie dei principali corpi liquefacibili, con buona approssimazione anche per aree al di fuori degli ambiti urbanizzati ed urbanizzabili. Questo è stato possibile anche grazie all'utilizzo di tecniche di interpolazione automatica tridimensionale dei dati geognostici, che hanno condotto alla ricostruzione di un accurato modello geologico tridimensionale di sottosuolo (Figura 6-2, cfr. Stefani *et al.*, 2014).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

L'elevato numero di indagini di tipo CPTU, ha infine permesso l'esecuzione di diverse decine di analisi puntuali del rischio liquefazione, effettuate mediante metodi semplificati (cfr. paragrafo 7.2.1). L'interpretazione dei risultati ottenuti rispetto al contesto geologico locale, ha portato alla definizione dei limiti delle Zone di Suscettibilità per Liquefazioni, ed alla loro suddivisione in base al diverso grado di rischio (paragrafo 8.7).

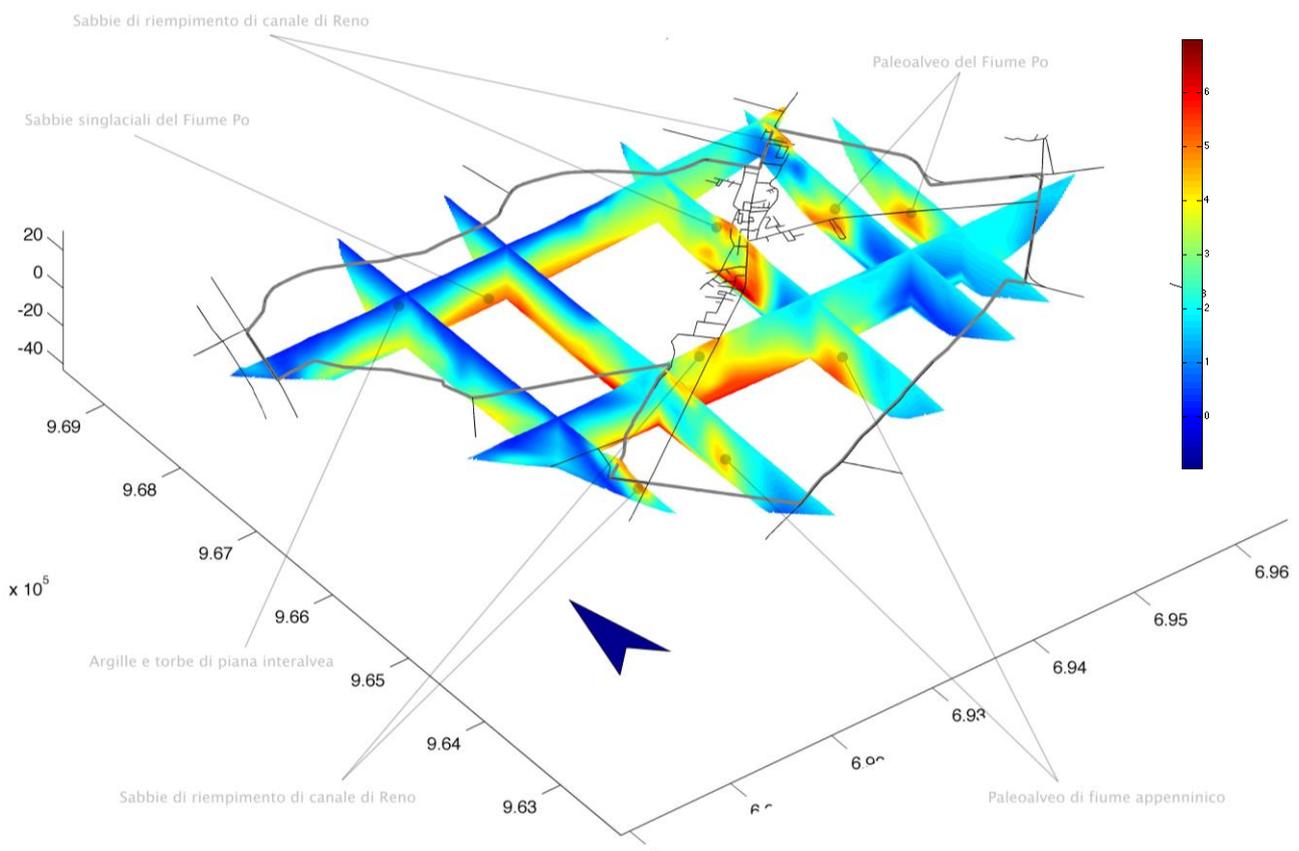


Figura 6-2 - Esempio di restituzione del modello tridimensionale mediante diagramma a graticcio, ritagliato sull'area comunale. I colori indicano le diverse classi granulometriche (argille = 2, sabbie = 6).

Gli approfondimenti di terzo livello compiuti per lo studio di Microzonazione hanno dunque ridotto notevolmente le incertezze relative alla distribuzione ed alle caratteristiche geotecniche dei corpi suscettibili a liquefazione. Preme comunque sottolineare che sia il contesto deposizionale, sia l'elevata variabilità laterale nella distribuzione dei depositi sedimentari, non permettono di escludere in senso assoluto la presenza di locali livelli granulari saturi in acqua anche in quelle porzioni di territorio non classificate come "Zone di Attenzione per Liquefazione". Questa affermazione risulta ancora più veritiera nelle aree meno documentate da prove geognostiche, che nel caso specifico sono generalmente confinate in zone rurali.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Per tali ragioni la valutazione sito specifica del rischio di liquefazione è comunque sempre delegata ad ulteriori indagini geognostiche, da realizzarsi, ad esempio, in occasione di nuove fasi di pianificazione territoriale e/o nella progettazione esecutiva di eventuali interventi.

6.4 Piezometria

Gli studi idrogeologici compiuti nel territorio comunale hanno accertato l'esistenza di un acquifero superficiale dello spessore di alcuni metri, ospitato nei corpi sabbiosi di paleoalveo e ventaglio da rotta del Reno (paragrafo 3.4). Come definito in sede di inquadramento, il flusso freatico proveniente da sud-ovest, si muove dalle zone più elevate del corpo sabbioso di riempimento del Reno verso le aree laterali topograficamente più depresse, con soggiacenze massime di circa 5 m in corrispondenza dell'asse del paleoalveo, e minime nelle aree a nord - ovest e sud - est, con livelli anche molto prossimi al piano campagna (Figura 3-13, Figura 3-14).

La ricostruzione dell'andamento della falda freatica eseguita dalla struttura regionale in base a misurazioni piezometriche del luglio 2012, concorda con lo schema generale presentato nella Tavola B.2.13 - "Carta della superficie freatica", realizzata nel 2010 per il Quadro Conoscitivo del PSC Associato dell'Alto Ferrarese. Anche i livelli piezometrici misurati in corrispondenza delle indagini eseguite per la microzonazione sismica, sembrano confermare l'andamento della falda superficiale riportato nel rapporto regionale (paragrafo 3.4), poiché le misurazioni sono state effettuate nello stesso periodo, ma in anni diversi.

I dati disponibili sono però purtroppo riferiti a serie temporali fortemente discontinue e limitate a brevi intervalli di tempo, non in grado di rappresentare le importanti variazioni stagionali della falda.

Considerato che le variazioni piezometriche e l'andamento della falda superficiale sono particolarmente rilevanti per la valutazione del rischio di liquefazione, l'analisi qualitativa degli indici di rischio (I_L) è stata eseguita adottando un principio cautelativo. Sulla base dei dati piezometrici disponibili si è deciso di utilizzare valori di soggiacenza minimi, variabili in un intervallo compreso tra 1 e 3 m a seconda delle caratteristiche morfologiche ed altimetriche del sito in esame (cfr. paragrafo 7.2.1), in accordo con quanto attuato per gli studi di microzonazione sismica redatti per mezzo dell'Ordinanza 70/2012.

Una migliore conoscenza dell'influenza delle fluttuazioni freatiche sul rischio di liquefazione delle sabbie potrebbe essere ottenuta mediante monitoraggio pluriennale della falda superficiale, acquisendo serie temporali estese a condizioni climatiche e pluviometriche diverse. Anche la misura della soggiacenza della falda potrebbe essere migliorata con l'utilizzo di un modello topografico di dettaglio, come quello generato con tecniche LIDAR (Figura 3-1).

7 Metodologie di elaborazione e risultati

La finalità di uno studio di microzonazione sismica è quella di giungere ad una suddivisione del territorio esaminato in zone a diversa pericolosità sismica, in base alla loro suscettibilità ad effetti locali cosismici.

Le zone sono classificate come **stabili**, nel caso in cui non si ipotizzino effetti locali di alcuna natura e come **suscettibili di amplificazioni locali** qualora siano attese esclusivamente amplificazioni del moto sismico dovute all'assetto litostratigrafico e morfologico. Qualora siano invece possibili, oltre ai fenomeni di amplificazione, effetti di deformazione permanente del territorio, le zone sono identificate come **suscettibili di instabilità** e per esse sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

Una corretta suddivisione in aree a diversa pericolosità, deve essere necessariamente basata su un modello di sottosuolo di dettaglio, la cui definizione compete al geologo. La bontà del modello è certamente funzione della disponibilità di dati geognostici e geofisici, ma altrettanto dell'esperienza del tecnico che lo definisce.

In contesti di pianura in cui la ricostruzione del sottosuolo è basata essenzialmente su informazioni derivanti da indagini puntuali, in numero anche molto rilevante e con distribuzione eterogenea, il compito del geologo può risultare particolarmente gravoso.

Per tale regione in questo studio è stato adottato un approccio sperimentale per la definizione di un modello geologico-stratigrafico in grado di fungere da solida base per gli studi di microzonazione sismica. La ricostruzione dei primi 30 metri di sottosuolo è stata ottenuta affiancando alla tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali, restituita tramite sezioni stratigrafiche (Allegato 1 – sezioni A-A', B-B', C-C'), un'interpolazione statistica tridimensionale della totalità dei dati geognostici e geofisici disponibili (Figura 6-2).

Nei paragrafi seguenti saranno descritte le metodologie utilizzate per la definizione del modello sismo-stratigrafico, per la determinazione dei fattori di amplificazione locale, per la perimetrazione delle aree a diversa pericolosità e per l'identificazione delle aree instabili, essenzialmente soggette a fenomeni di liquefazione.

La conformazione geologica del territorio, le evenienze di amplificazione del moto sismico e le fuoriuscite di sabbie dal sottosuolo osservate nel 2012, hanno permesso di escludere la presenza di zone stabili, e di attribuire a quelle instabili problematiche principalmente connesse alla liquefazione dei terreni. Nelle aree definite come instabili sono state, dunque, eseguite stime puntuali del potenziale di liquefazione mediante

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

metodologie semplificate proposte dalla letteratura internazionale, applicate e verificate sul territorio comunale in seguito agli eventi sismici del 2012.

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

Gli eventi sismici del 2012 hanno permesso di verificare come l'intera area di pianura emiliana colpita, sia interessata da fenomeni di amplificazione stratigrafica (eg. Bordoni *ed al.*, 2012; Govoni *ed al.*, 2014). La determinazione del valore dell'amplificazione attesa può avvenire sia attraverso l'utilizzo degli abachi nazionali (ICMS - Gruppo di lavoro MS, 2008) o regionali di riferimento (D.G.R. 2193/2015), sia mediante analisi di risposta sismica locale.

In questo studio di terzo livello è stata realizzata un'analisi di risposta sismica locale per le aree soggette ad effetti di sito (liquefazione), allo scopo di quantificare l'accelerazione massima attesa in superficie (PGA) e verificare, inoltre, che i fattori di amplificazione sismica proposti dai nuovi abachi regionali possano essere applicati, in maniera corretta, all'intero territorio comunale.

La sostanziale omogeneità delle condizioni sismo-stratigrafiche e la ridotta estensione del territorio comunale, hanno suggerito, sin dallo studio di microzonazione eseguito per l'Ordinanza 70/2012, l'adozione di fattori di amplificazione stratigrafica omogenei per tutta l'area di studio (Martelli e Romani, 2013). Anche gli approfondimenti di terzo livello confermano tale omogeneità e pertanto viene proposta un'analisi di risposta sismica locale unica, ritenuta sostanzialmente valida per l'intero territorio comunale (paragrafo 7.1.1). Si precisa che la modellazione proposta nel presente studio, finalizzato alla pianificazione territoriale, può essere di solo riferimento per le analisi di risposta sismica locale prescritte dalle vigenti norme tecniche per le costruzioni. Tali analisi dovranno infatti essere realizzate ex-novo sulla base di dati geologici e geofisici puntualmente acquisiti in relazione all'opera in progetto.

7.1.1 Risposta sismica locale con modellazioni numeriche

Sulla base dei dati stratigrafici, geofisici e geotecnici disponibili è stata eseguita una modellazione numerica di risposta sismica locale in un sito "tipo" (Figura 7-1) in cui l'abbondanza e la qualità dei dati ha permesso una buona definizione del modello sismo-stratigrafico in profondità.

Il sito tipo, indicato come "Santa Teresa", è stato scelto per la disponibilità sia di dati stratigrafici profondi ottenuti da un recente pozzo di circa 400 m, sia di valori di V_s acquisiti, nell'ambito di questo studio, mediante indagine geofisica down-hole (v. paragrafo 4.2.3 - Minarelli *et al.*, 2016).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

La successione stratigrafica riconosciuta nel pozzo profondo è stata correlata con la sezione D-D' "Cento – Occhiobello" (Martelli e Romani, 2013; Paolucci *et al.*, 2015); ciò ha permesso di comprendere l'andamento delle principali unità stratigrafiche nel sottosuolo indagato, e di stimare la profondità e la natura della bedrock sismico nell'area di sinclinale di Mirabello (paragrafo 6.2). In base a queste considerazioni il bedrock sismico è stato individuato ad una profondità di 800 m, in corrispondenza del tetto del Pliocene (base del Quaternario Marino – v. Allegato 1, sezione D-D'). Questa posizione è confermata anche dall'interpretazione delle misure di microtremore sismico.

Per la ricostruzione della risposta sismica locale il modello sismo-stratigrafico e geotecnico è stato definito associando alle varie unità geotecniche individuate: (i) i valori di velocità delle onde di taglio Vs ottenuti dall'indagine geofisica profonda down-hole; (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$) ottenute da indagini in sito con dilatometro (Amoroso *et al.*, 2014) e da prove dinamiche di laboratorio su campioni indisturbati; (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in sito e di laboratorio disponibili.

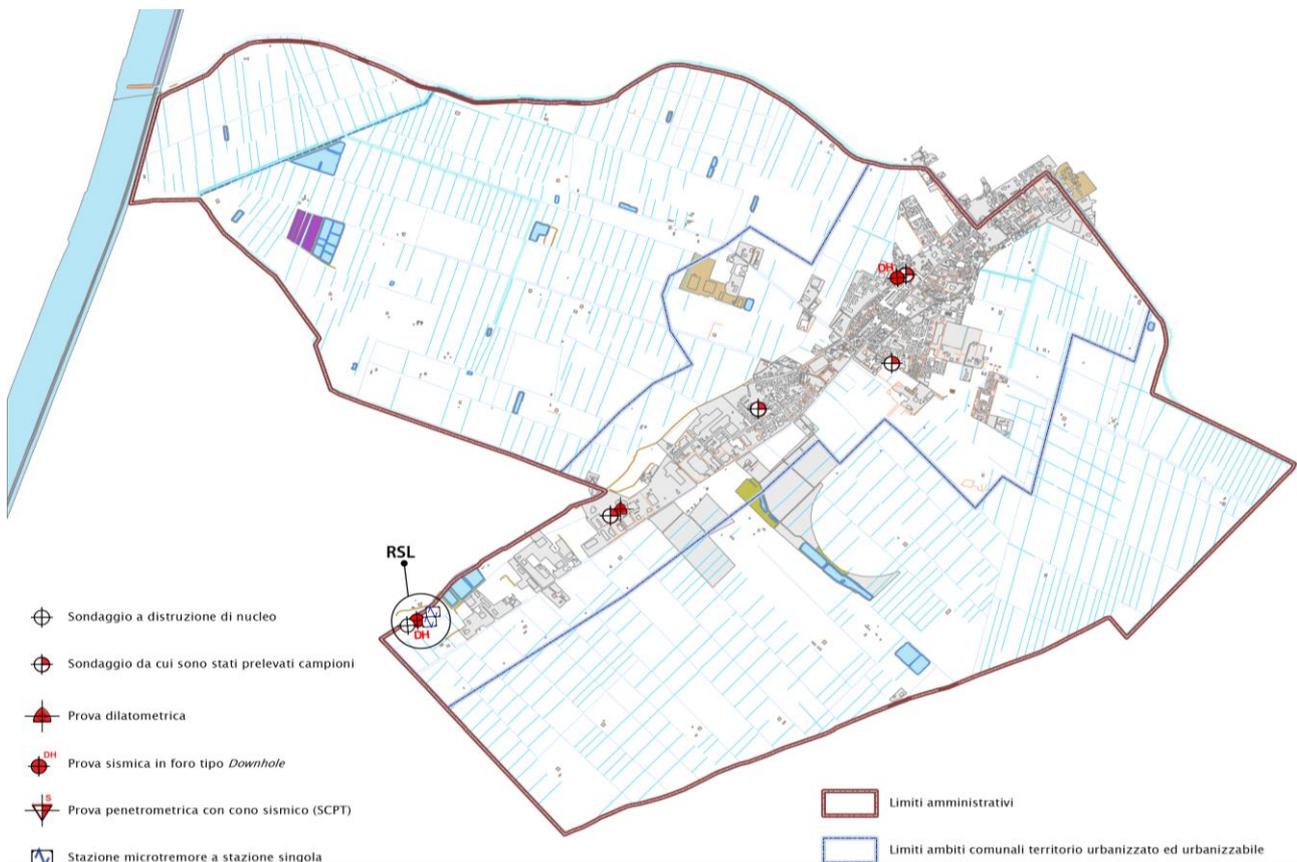


Figura 7-1 - Localizzazione del sito in cui è stata eseguita la risposta sismica locale (RSL) e distribuzione delle indagini e delle sezioni utilizzate per la definizione del modello sismo-stratigrafico di riferimento.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Per le porzioni inferiori non direttamente indagate delle successioni stratigrafiche, l'attribuzione dei caratteri geotecnici e geofisici è avvenuta mediante interpolazione e estrapolazione di dati disponibili o di bibliografia, considerando il contesto geologico e stratigrafico regionale. Al di sotto dei 265 metri di profondità, il dato di Vs è stato estrapolato fino al bedrock utilizzando un gradiente medio velocità derivato dall'andamento dei valori di velocità delle ultime decine di metri, tenendo conto delle diverse litologie attraversate ed in accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi di H/V.

Per l'intervallo stratigrafico compreso fra i 400 metri ed il bedrock, costituito da successioni del Quaternario Marino, sono stati invece estrapolati i dati utilizzati per la porzione della stessa unità indagata tra i 364 e 400 metri, considerando i fattori legati all'aumento della profondità e del carico litostatico. Per la velocità sismica del bedrock è stato infine assunto un valore sufficientemente elevato da poter riprodurre indicativamente l'ampiezza del picco a più bassa frequenza osservato dalle misure di HVSr (paragrafo 6.1) e riconosciuto anche in letteratura attraverso l'utilizzo di strumentazione maggiormente sensibile alle basse frequenze (Milana *et al.*, 2014). In Tabella 7-1 è sintetizzato il modello sismo-stratigrafico di riferimento.

Tetto	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	Vs
0	2.3	M1 C1 - Sabbia fine limosa	116
2.3	5.7	M1 C1 - Sabbia fine limosa	151
8	8.2	M1 C2 - Argilla limosa organica	151
16.2	2.8	S10 C2 - Sabbia limosa debolmente argillosa	183
19	8	M1 C3 - Argilla limosa con torbe	206
27	4	S10 C2 - Sabbia limosa debolmente argillosa	242
31	14	M1 C4 - Argilla limosa con torbe	279
45	12.6	M1 C4 - Argilla limosa con torbe	320
57.6	18.4	SDMT - Sabbia fine con limo	323
76	7	S1 C4 - Limo argilloso	355
83	17	SDMT - Sabbia fine con limo	357
100	27	S1 C4 - Limo argilloso	399
127	11	SDMT - Sabbia fine con limo	410
138	19	S1 C4 - Limo argilloso	397
157	21	SDMT - Sabbia fine con limo	449
178	16	S1 C4 - Limo argilloso	410
194	21	SDMT - Sabbia fine con limo	453
215	33	S1 C4 - Limo argilloso	419
248	17	SDMT - Sabbia fine con limo	446
265	27	S1 C4 - Limo argilloso	504
292	11	SDMT - Sabbia fine con limo	514
303	7	S1 C4 - Limo argilloso	518
310	17	SDMT - Sabbia fine con limo	527
327	23	S1 C4 - Limo argilloso	534
350	14	SDMT - Sabbia fine con limo	544
364	11	SDMT - Sabbia fine con limo	550

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

375	25	S1 C4 - Limo argilloso	562
400	25	S1 C4 - Limo argilloso	573
425	25	S1 C4 - Limo argilloso	583
450	25	S1 C4 - Limo argilloso	593
475	25	S1 C4 - Limo argilloso	603
500	25	S1 C4 - Limo argilloso	612
525	25	S1 C4 - Limo argilloso	621
550	25	S1 C4 - Limo argilloso	630
575	25	S1 C4 - Limo argilloso	639
600	25	S1 C4 - Limo argilloso	647
625	25	S1 C4 - Limo argilloso	655
650	25	S1 C4 - Limo argilloso	663
675	25	S1 C4 - Limo argilloso	671
700	25	S1 C4 - Limo argilloso	679
725	25	S1 C4 - Limo argilloso	686
750	25	S1 C4 - Limo argilloso	693
775	25	S1 C4 - Limo argilloso	700
800		Bedrock	2000

Tabella 7-1 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL.

Definito il modello (Tabella 7-1) sono state eseguite alcune simulazioni numeriche variando i profili stratigrafici dei primi 30 metri di sottosuolo, sulla base delle caratteristiche delle diverse MOPS individuate nello studio. Le simulazioni, realizzate mediante il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013), hanno permesso di concludere che un'unica modellazione numerica, quale quella di seguito proposta, possa essere considerata rappresentativa per l'intero territorio comunale, viste la ridotta estensione areale e le modeste variazioni dei parametri geotecnici e geofisici dei corpi sedimentari presenti.

Come accelerogrammi di input (bedrock) per il calcolo della risposta sismica locale, sono stati utilizzati i tre segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193/2015 (Figura 7-2). I segnali sono stati scalati in modo da far corrispondere la loro accelerazione massima con il valore di a_{gref} derivante dei punti della griglia delle mappe di pericolosità sismica elaborate da INGV per il territorio nazionale.

L'unico punto della griglia ricadente nell'area comunale ha valore di a_{gref} pari a 0,15 g che è stato pertanto assunto come riferimento.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

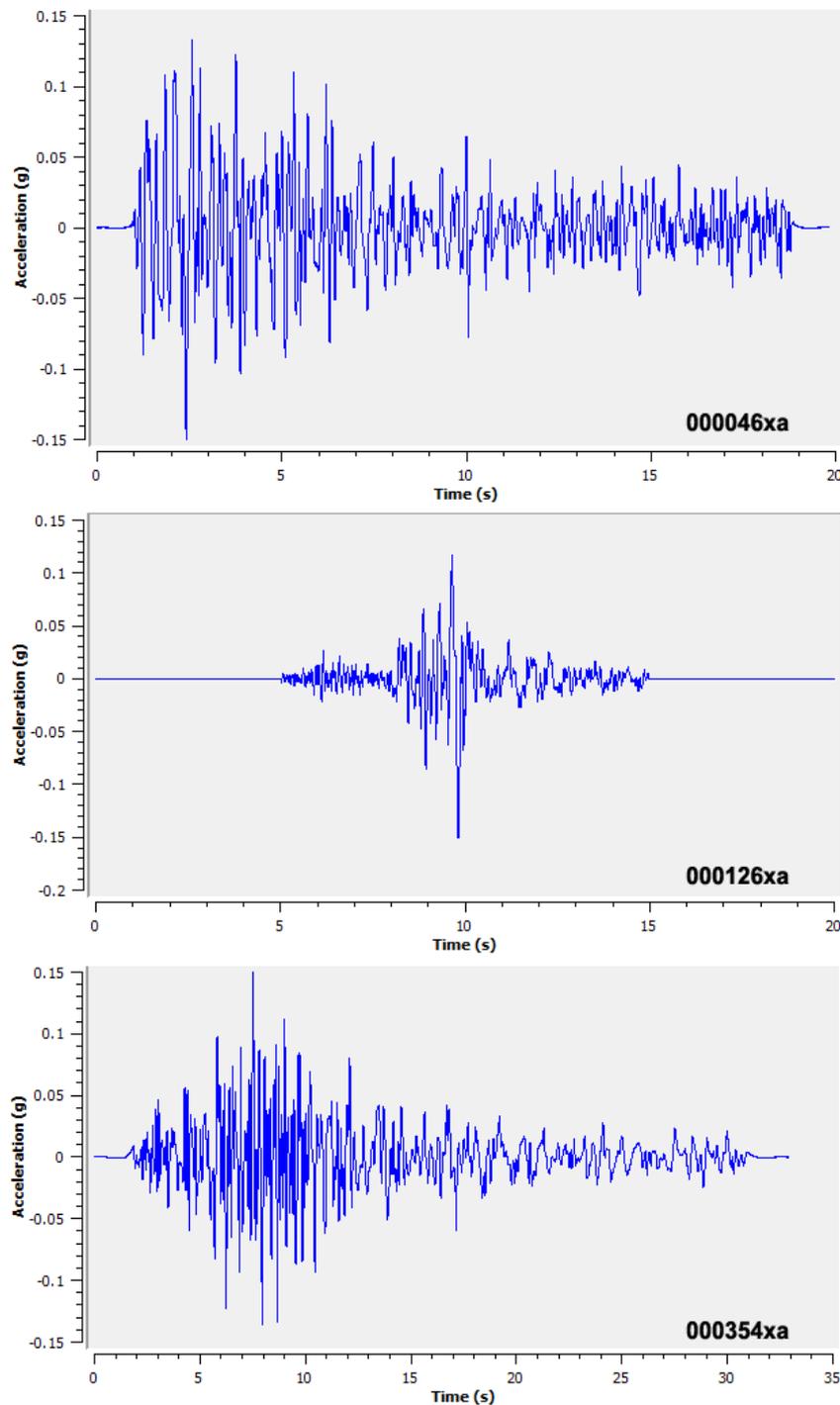


Figura 7-2 - Plot eseguito con il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013) dei segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193 del 2015, scalati per una a_{gref} pari a 0,15 e utilizzati come input per le simulazioni numeriche della risposta sismica locale.

Sono stati quindi calcolati e confrontati gli spettri di risposta al bedrock (Figura 7-3) e in superficie (Figura 7-5) per un periodo di ritorno di 475 anni con uno smorzamento assunto pari al 5%. Gli spettri elastici in

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

pseudo accelerazione in input e in output, relativi alla simulazione di risposta sismica locale, sono stati quindi archiviati nel database in formato *.txt* secondo quanto richiesto dagli Standard MS 4.0b (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2015).

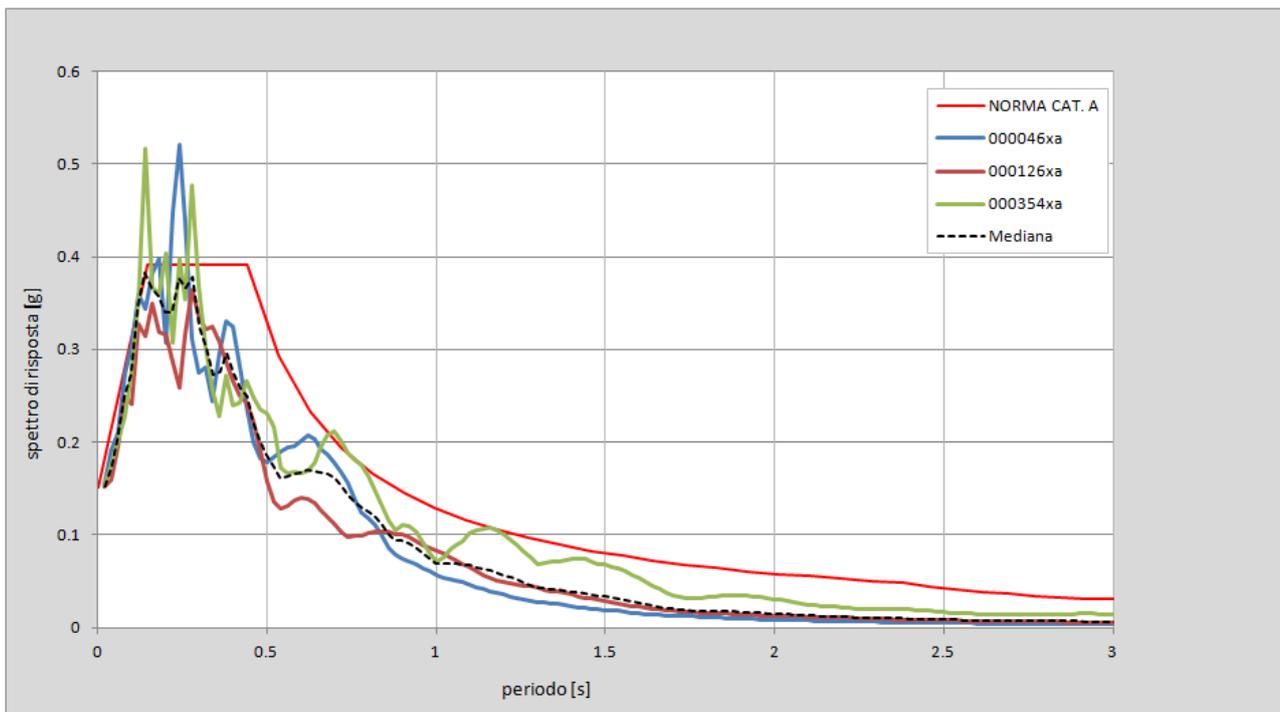


Figura 7-3 - Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi e il loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria A secondo le NTC2008.

In Figura 7-4 si riporta il rapporto tra lo spettro atteso al bedrock e quello atteso in superficie, in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro mediana. Si osserva una prima amplificazione a frequenza di circa 0.2 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale e a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

In Figura 7-5 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 e lo spettro mediano. Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso lo spettro mediano risulta caratterizzato da una deviazione standard relativamente alta, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati come input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento D.G.R. 2193/2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

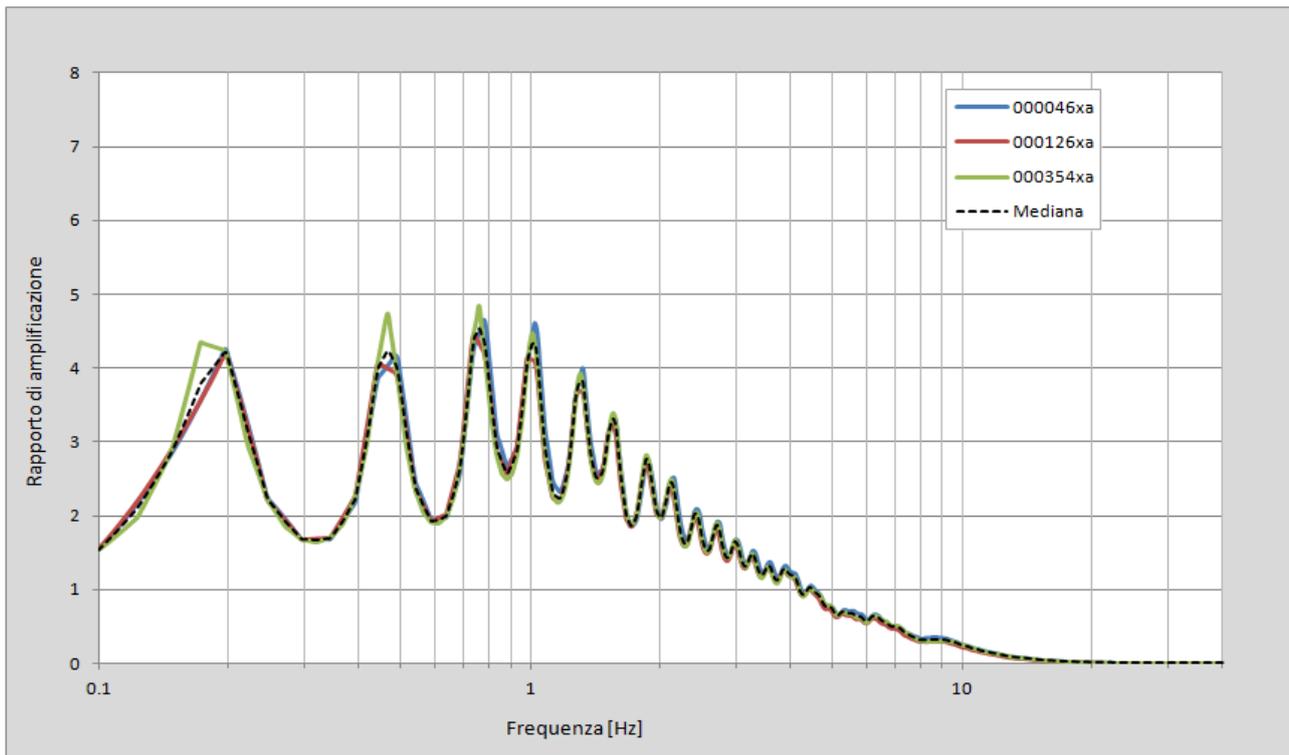


Figura 7-4 - Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-1 e per la mediana.

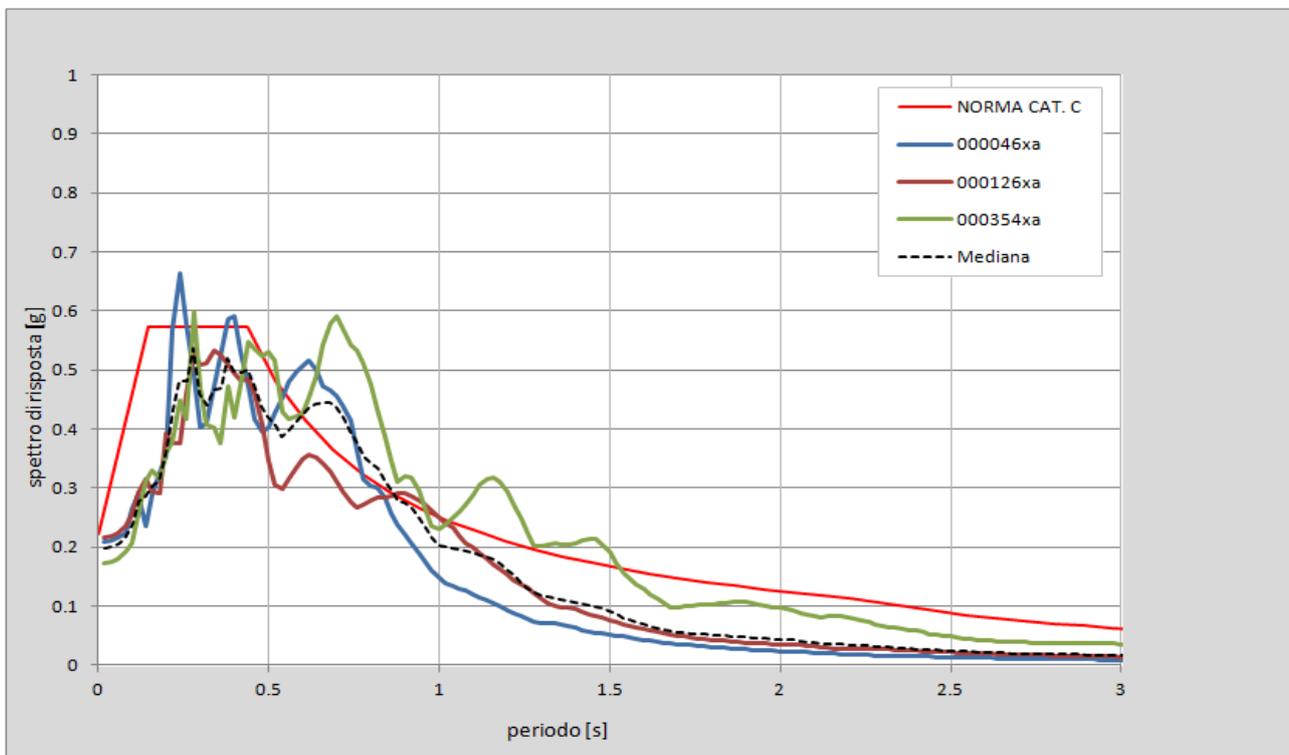


Figura 7-5 - Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi e il loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

In Figura 7-6 è infine riportato l'andamento, nei primi 20 metri di sottosuolo, dell'accelerazione massima (PGA) attesa in funzione della profondità per i tre terremoti di input e la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra 8 metri e la superficie.

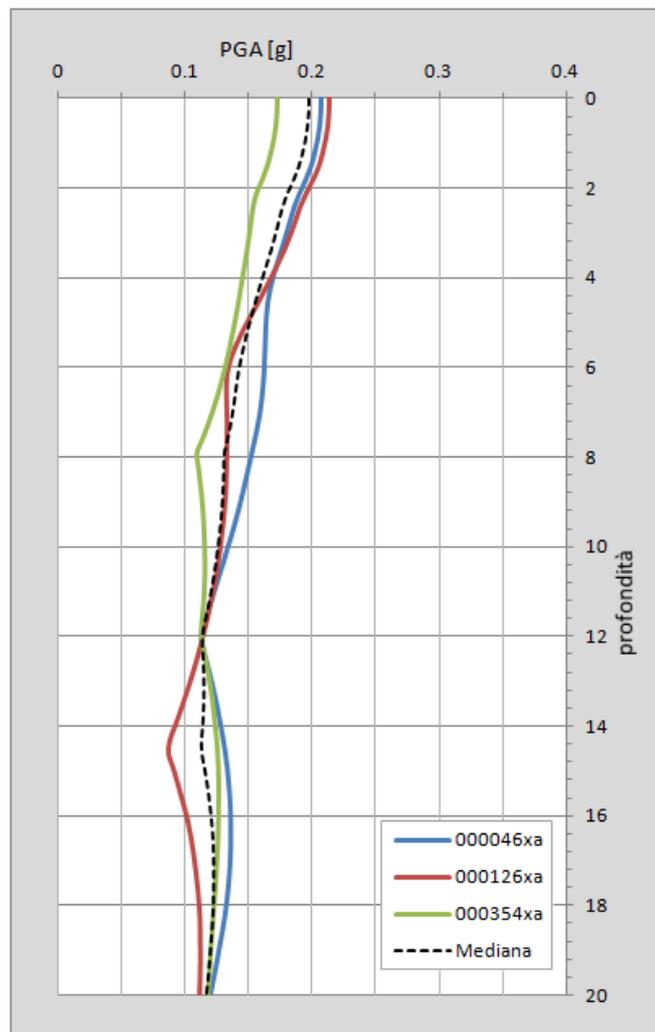


Figura 7-6 - Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,19 g (Figura 7-6) si ottiene un fattore di amplificazione $FA(PGA) = 1,3$. I fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente pari a: $SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1,7$, $SI2-FH_{(0.5-1)} = 2,7$, $SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2,8$. Questi dati appaiono coerenti con il modello sismo-stratigrafico del sito in esame e complessivamente in linea con quanto indicato dagli abachi della D.G.R. 2193/2015 per le zone di "Pianura 3" caratterizzate da una $Vs30$ pari a 200 m/s e riportato in Tabella 7-2.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

VS ₃₀ (m/s)	150	200	250	300	350	400
FA _{PGA}	1.3	1.3	1.3	-	-	-
FA _{S11}	1.5	1.5	1.5	-	-	-
FA _{S12}	2.3	2.3	2.2	-	-	-
FA _{S13}	2.6	2.6	2.4	-	-	-

Tabella 7-2 - Fattori di amplificazione per le aree di "Pianura 3" (bedrock a profondità non inferiore a 300 m dal p.c.) secondo quanto previsto dagli abachi della D.G.R. 2193/2015.

7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

Tra le tipologie d'instabilità sismoindotte osservate in occasione della sequenza sismica del 2012, le liquefazioni sono quelle che certamente hanno maggiormente interessato l'abitato di Mirabello.

I numerosi dati geognostici raccolti a supporto del presente studio, sono stati singolarmente valutati rispetto alle possibili criticità legate alla natura dei terreni attraversati. Le valutazioni hanno confermato le evidenze del 2012, indicando come principale criticità la frequente presenza di orizzonti di depositi granulari saturi potenzialmente liquefacibili.

La carta MOPS (Tavola 4), riporta, per l'intero territorio comunale, l'estensione delle aree classificate come instabili in ragione della presenza di depositi potenzialmente liquefacibili (codice 3050). Tali aree, descritte in dettaglio nel paragrafo 6.3, sono state individuate e perimetrate anche sulla base dei risultati e delle considerazioni effettuate negli approfondimenti di microzonazione precedenti (Ordinanza 70/2012 – Determinazione Area Tecnica n. 21/2014). È opportuno ribadire che tali perimetrazioni risultano maggiormente attendibili nelle aree urbanizzate e suscettibili di trasformazioni urbanistiche, per le quali sono disponibili numerosi dati geognostici e nelle quali sono stati condotti specifici approfondimenti di terzo livello (paragrafo 7.2.1). Al di fuori degli ambiti d'interesse per le per la microzonazione sismica (delimitati in azzurro nelle Tavole) le stesse perimetrazioni devono essere considerate solamente come indicazione di massima.

7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

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

Durante l'evento sismico la pressione interstiziale dell'acqua, che è fluido incompressibile, aumenta fino ad eguagliare le tensioni efficaci che legano i sedimenti granulari. L'annullamento della resistenza al taglio

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

dovuto alle sovrappressioni indotte dallo scuotimento conduce alla liquefazione dei terreni, con conseguente perdita di capacità portante degli stessi e manifestazione di deformazioni permanenti, come osservato in occasione della sequenza sismica del 2012.

Già durante gli studi relativi all'Ordinanza 70/2012, furono effettuate stime del potenziale di liquefazione su una trentina di indagini penetrometriche (v. Allegato 1.7 – Ordinanza 70/2012) mediante diverse procedure semplificate indicate degli indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007, Allegato 3) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008).

Il confronto tra i vari metodi di letteratura utilizzati, tutti basati su analisi di prove penetrometriche, aveva permesso di concludere che i valori degli indici di liquefazione I_L (Iwasaki *et al.*, 1982) ottenuti con il metodo di Idriss & Boulanger (2008) fossero i meglio compatibili con gli effetti osservati, e venissero dunque utilizzati per la redazione delle mappe.

Per gli approfondimenti di terzo livello di questo studio di Microzonazione sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione anche con il più recente metodo di Boulanger & Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015. Tale metodo ha mediamente fornito indici di liquefazione più elevati rispetto ai metodi precedenti (cfr. Idriss & Boulanger, 2008; Robertson NCEER 2001 e Robertson 2009 - Figura 7-7)

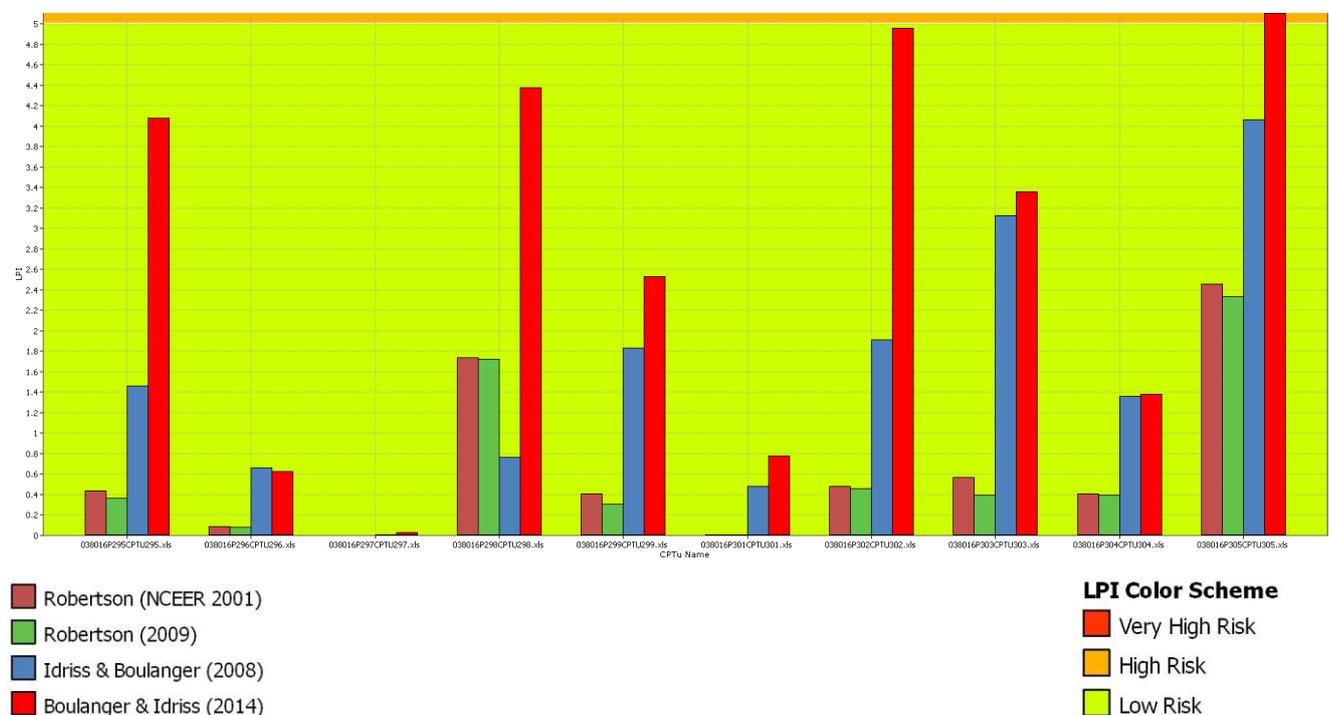


Figura 7-7 - Confronto tra diversi metodi di letteratura per la stima del potenziale di liquefazione, applicati allo stesso set di prove penetrometriche CPTU.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Considerando che il recente metodo si basa su di un set più numeroso di dati e dovrebbe quindi mediamente dimostrarsi più affidabile, si è deciso di utilizzare il metodo di Boulanger & Idriss (2014) come riferimento per la stima del potenziale di liquefazione. Sono state quindi analizzate 84 verticali d'indagine realizzate con punta elettrica, distribuite come riportato in Tavola 6. Come noto, i metodi semplificati 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 ed in genere ad una sottostima del valore di I_L (Veronese e Romagnoli, 2014). In ragione dell'elevato numero di prove penetrometriche a punta elettrica disponibili, si è ritenuto opportuno non eseguire verifiche sulle indagini eseguite con punta meccanica.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-3, che, a meno della PGA, coincidono con quelli utilizzati per le stime eseguite per l'Ordinanza 70/2012 dalla Regione Emilia-Romagna. Il valore di Mw_{max} corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), mentre il valore di PGA coincide con quello ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale. La soggiacenza della falda è stata considerata variabile in un intervallo compreso tra 1 e 3 m a seconda che il sito di verifica ricadesse in area di piana interalvea o di dosso (v. Allegato 1.7 – Ordinanza 70/2012).

Parametri	Mw_{max}	PGA	Falda
	6,14	0,19	1-3 m

Tabella 7-3 - Parametri di input utilizzati per la verifica puntuale del potenziale di liquefazione mediante metodo di Boulanger & Idriss (2014).

I valori puntuali di I_L , ottenuti mediante il software "Cliq 1.7" della Geologismiki Geotechnical Software, sono rappresentati in carta (Tavole 6-7-8-9) suddivisi per classi, secondo Sonmez (2003), in modo da poter distinguere tra siti a rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), moderato ($2 < I_L \leq 5$) e alto ($5 < I_L \leq 15$).

In Tabella 7-4 sono riportati i valori di I_L relativi alle 84 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate per gli approfondimenti di terzo livello dello studio, mentre nell'Allegato 3 sono raccolti i rapporti di calcolo delle verifiche a liquefazione eseguite sulle prove CPTU realizzate per fini di microzonazione di sismica.

Codice	Lat.	Lon.	Falda (m)	I_L B&I (2014)
038016P204CPTU396	44.8275	11.4626	3	2.8
038016P205CPTU397	44.8276	11.4659	3	5.5

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

038016P206CPTU398	44.8208	11.4604	1	9.5
038016P207CPTU399	44.8125	11.4342	3	4.4
038016P208CPTU400	44.8099	11.4322	3	1.7
038016P209CPTU401	44.8253	11.4595	3	3.6
038016P210CPTU402	44.8307	11.4462	1	4.4
038016P211CPTU403	44.8264	11.4609	3	2.1
038016P212CPTU404	44.8329	11.4376	1	1.2
038016P213CPTU405	44.8266	11.4611	3	2.9
038016P214CPTU406	44.8223	11.4607	1	8.1
038016P215CPTU407	44.8208	11.4508	3	8.6
038016P216CPTU408	44.8226	11.4549	3	6.6
038016P217CPTU409	44.8241	11.4565	3	5.9
038016P218CPTU410	44.8257	11.4626	3	2.9
038016P219CPTU411	44.8278	11.4621	3	1.8
038016P220CPTU412	44.8289	11.4507	1	1.1
038016P221CPTU413	44.8162	11.4425	3	2.4
038016P278CPTU278	44.826	11.4605	3	5.1
038016P279CPTU279	44.8206	11.4609	1	11.5
038016P280CPTU280	44.8212	11.4607	1	10.2
038016P281CPTU281	44.8208	11.4612	1	9.6
038016P282CPTU282	44.8284	11.4645	3	2.1
038016P283CPTU283	44.8248	11.4601	3	2.7
038016P284CPTU284	44.8247	11.4605	3	0.6
038016P285CPTU285	44.8203	11.4512	3	5.9
038016P286CPTU286	44.8204	11.4515	3	7.5
038016P287CPTU287	44.8226	11.4612	1	6.3
038016P288CPTU288	44.8133	11.4384	3	1.7
038016P289CPTU289	44.8181	11.4467	3	2.4
038016P290CPTU290	44.8135	11.4606	1	2.3
038016P291CPTU291	44.82	11.4489	3	6.7
038016P292CPTU292	44.8236	11.4581	3	5.5
038016P293CPTU293	44.8289	11.4669	3	2.2
038016P294CPTU294	44.829	11.4504	1	0.6
038016P295CPTU295	44.8342	11.4505	1	4.1
038016P296CPTU296	44.8252	11.4692	1	0.6
038016P297CPTU297	44.8205	11.4419	1	0.0
038016P298CPTU298	44.8327	11.459	1	4.4
038016P299CPTU299	44.8226	11.4763	1	2.5
038016P300CPTU300	44.8158	11.4437	1	8.5
038016P301CPTU301	44.8104	11.4363	1	0.8
038016P302CPTU302	44.837	11.4168	1	5.0
038016P303CPTU303	44.8133	11.4505	1	3.4

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

038016P304CPTU304	44.8169	11.4654	1	1.4
038016P305CPTU305	44.8188	11.4554	1	5.1
038016P306CPTU306	44.8231	11.4652	1	2.7
038016P307CPTU307	44.8281	11.4585	1	4.3
038016P308CPTU308	44.8086	11.4269	3	2.0
038016P333CPTU333	44.8287	11.4645	3	3.8
038016P334CPTU334	44.8287	11.4643	3	4.2
038016P335CPTU335	44.8289	11.4646	3	5.5
038016P341CPTU341	44.8227	11.4217	1	0.9
038016P342CPTU342	44.8291	11.4649	3	6.5
038016P347CPTU347	44.826	11.4382	1	0.9
038016P348CPTU348	44.826	11.4609	3	9.5
038016P350CPTU350	44.8246	11.4573	3	3.4
038016P351CPTU351	44.826	11.4382	1	3.2
038016P358CPTU358	44.8128	11.4353	3	4.9
038016P359CPTU414	44.8117	11.4357	3	2.4
038016P361CPTU416	44.8282	11.4642	3	5.2
038016P362CPTU417	44.8238	11.4566	3	3.6
038016P363CPTU418	44.8239	11.4567	3	4.3
038016P364CPTU419	44.8131	11.4346	3	6.3
038016P366CPTU420	44.8187	11.4462	3	6.4
038016P367CPTU421	44.8129	11.4355	3	5.9
038016P369CPTU422	44.8127	11.436	3	5.8
038016P370CPTU423	44.8121	11.4364	3	0.9
038016P373CPTU424	44.826	11.4621	3	3.8
038016P374CPTU425	44.8249	11.4604	3	6.9
038016P379CPTU426	44.8137	11.4358	3	5.2
038016P382CPTU382	44.8155	11.4403	3	5.6
038016P383CPTU383	44.8146	11.4412	3	2.3
038016P385CPTU385	44.8278	11.4667	1	0.6
038016P386CPTU427	44.8297	11.4726	1	14.5
038016P387CPTU428	44.828	11.4664	3	0.5
038016P388CPTU388	44.826	11.4615	3	9.5
038016P389CPTU389	44.8245	11.4572	3	3.4
038016P391CPTU391	44.8154	11.4425	3	2.2
038016P392CPTU392	44.8151	11.4413	3	3.1
038016P393CPTU393	44.8146	11.442	3	2.8
038016P394CPTU429	44.8157	11.4415	3	3.5
038016P395CPTU395	44.8159	11.441	3	4.0
038016P87CPTU87	44.8262	11.4568	3	1.2

Tabella 7-4 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche elettriche. In tabella è riportato anche il valore di della profondità della falda utilizzata per il calcolo di I_L su ciascuna verticale.

8 Elaborati cartografici

Per la redazione delle 10 tavole grafiche (Tabella 8-1) predisposte per questo studio, si è fatto in primo luogo riferimento agli “standard di rappresentazione e archiviazione informatica” - versione 4.0b, emanati dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica 2015), di seguito semplicemente richiamate come *Linee Guida*, a cui rimandano anche le specifiche della D.G.R. 1227/2015 della Regione Emilia-Romagna.

La modesta estensione geografica dell’area di studio ha permesso di descrivere i caratteri geologici, individuare le aree suscettibili di effetti locali e definire il tipo di effetti attesi in tutto il territorio comunale. Questo ha reso possibile la redazione delle cartografie di primo livello per l’intera area alla scala 1:10.000 (Tavole da 1 a 5).

La base cartografica utilizzata in tutti gli elaborati è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000, messa a disposizione dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. In ogni tavola è sempre riportato il limite amministrativo comunale, che rappresenta anche l’effettivo areale di studio.

Elaborato	Riferimento	Scala
<i>Carta delle indagini</i>	Tavola 1	1:10.000
<i>Carta geologica</i>	Tavola 2a	1:10.000
<i>Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica</i>	Tavola 2	1:10.000
<i>Carta delle frequenze naturali dei terreni</i>	Tavola 3	1:10.000
<i>Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica – MOPS</i>	Tavola 4	1:10.000
<i>Carta delle velocità delle onde di taglio - Vs</i>	Tavola 5	1:10.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA_{PGA}</i>	Tavola 6	1:5.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA_{0,1 - 0,5 s}</i>	Tavola 7	1:5.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA_{0,5 - 1 s}</i>	Tavola 8	1:5.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA_{0,5 - 1,5 s}</i>	Tavola 9	1:5.000

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

8.1 Carta delle indagini (Tavola 1)

La carta delle indagini consente di visualizzare l’ubicazione delle prospezioni geologiche e geofisiche utilizzate per lo studio di microzonazione sismica e comprende, pertanto, sia quelle di repertorio (410) che quelle realizzate per gli approfondimenti di microzonazione (45).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Nella cartografia a scala 1:10.000, le indagini sono raffigurate mediante simboli definiti dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica - versione 4.0b - della Commissione tecnica nazionale per la microzonazione sismica (anno 2015).

Attraverso l'utilizzo del 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 presente a fianco di ogni simbolo identifica il quantitativo di prove di un determinato tipo realizzate nel sito.

Utilizzando il metodo sopra citato, il posizionamento dei simboli in cartografia avviene in maniera automatica e non modificabile. Ciò implica che per un sito ubicato in prossimità del limite amministrativo, il contrassegno della prova possa cadere anche al di fuori del territorio comunale.

Esternamente ai limiti amministrativi comunali sono riportate, in azzurro, le ubicazioni delle indagini geognostiche presenti nella banca dati della Regione Emilia-Romagna. Questa indagini sono state considerate per una migliore comprensione dello sviluppo dei corpi sedimentari nelle aree di confine. Per ulteriori dettagli relativi a provenienza, tipologia e qualità delle indagini riportate in carta, si rimanda al capitolo 4.

8.2 Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2)

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

In questa cartografia, a scala 1:10.000, sono rappresentati gli elementi geologici e morfologici in grado di modificare il moto sismico in superficie o determinare eventuali effetti locali, la distribuzione dei terreni di copertura ed 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 esclusivamente descritte le forme di superficie e sepolte, i terreni di copertura e gli altri elementi geologici riportati in cartografia.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

8.2.1 Forme di superficie e sepolte

Tra le numerose forme di superficie e sepolte elencate nelle *Linee Guida*, sono state individuate e riportate nella Carta Geologico Tecnica solamente quelle relative agli assi di paleoalveo. Tali forme evidenziano l'andamento di antichi alvei oggi sepolti a debole profondità, come quello di Reno presente nella porzione nord del territorio comunale, in corrispondenza della strada provinciale "Correggese". Le paleo-direzioni del corso fluviale, indicate dal verso delle frecce del simbolo grafico, sono state ricostruite mediante l'utilizzo di fonti e cartografie storiche o attraverso l'analisi di prove geognostiche di repertorio e di nuova esecuzione.

8.2.2 Elementi geologici ed idrogeologici

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.

Le *Linee Guida* prevedono che i pozzi ed i sondaggi vengano tematizzati in colore verde nel caso in cui la loro profondità raggiunga il substrato geologico, mentre in colore rosso nel caso contrario. Nello specifico nessuna delle 60 perforazioni riportate in carta intercetta il substrato.

Allo studio sono allegate 4 sezioni geologiche considerate rappresentative del modello geologico di sottosuolo.

Nelle tre sezioni superficiali (A-A', B-B', C-C') viene proposta l'interpretazione delle geometrie deposizionali dei corpi sedimentari che caratterizzano i primi trenta metri di sottosuolo. Queste sono state realizzate nell'ambito dello studio di microzonazione sismica attraverso interpretazione e correlazione delle prove penetrometriche e dei carotaggi continui disponibili.

La sezione geologica profonda (D-D'), realizzata dal Servizio Geologico Regionale durante gli studi post-sisma, mostra invece i rapporti stratigrafici principali delle unità sedimentarie riconosciute nel sottosuolo profondo comunale. Tali rapporti sono stati ricostruiti alla scala regionale mediante l'utilizzo di linee sismiche e correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi. Le unità sono state interpretate sia in chiave idrostratigrafica, in termini di acquiferi e acquicludo, sia in base ai limiti stratigrafici inconformi secondo la classificazione e la nomenclatura adottata dalla Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1 - Sezioni Geologiche).

8.2.3 Terreni di copertura

In base ai criteri utilizzati per la definizione del modello geologico descritti al paragrafo 5.2, sono state distinte tre unità nella parte sommitale ed affiorante dei terreni di copertura alluvionale olocenici, ognuna delle quali associabile ad una delle classi predefinite delle linee guida proposte dalla Commissione tecnica

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

nazionale per la microzonazione sismica. 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 carta 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 definite unità riconducibili a:

- **depositi di depressione interalvea** costituiti da argille, argille limose anche organiche e limi organici diffusamente bioturbati, a plasticità generalmente medio-bassa, deposti in ambienti di piana inondabile, stagno e palude dolce, soggetti a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione fluviale (**OLpl**). Questi sedimenti conservano spesso le originarie colorazioni scure unitamente ad elevati contenuti in umidità; caratteri che li rendono ben identificabili anche attraverso analisi di immagini telerilevate acquisite nello spettro nell'infrarosso vicino. Questi sedimenti, principalmente coesivi, presentano in genere una permeabilità molto bassa e rappresentano un efficace livello di acquicludo superficiale.
- **corpi di argine naturale** deposti fra le vaste aree interalvee ed i corpi fluviali. Sono formati da limi inorganici, sabbie fini limose, limi argillosi a bassa plasticità (**MLes**), in cui talvolta si osservano gradazioni dirette o abbondanti intraclasti fangosi o resti organici. Questi corpi sono caratterizzati da una permeabilità media, che aumenta in genere avvicinandosi ai corpi di paleoalveo.
- **depositi dell'alveo del Reno** costituiti da sabbie medio fini con prevalenti sabbie fini limose passanti a limi sabbiosi e limi (**SMes**) nelle porzioni sommitali più recenti. Questi sedimenti possono contenere intraclasti argillosi piatti, palle di fango corazzate e resti di legno. Le sabbie formano strati medio-sottili, con gradazione diretta e base erosiva, in cui sono evidenti laminazioni e strutture trattive (Caputo *et al.*, 2016). In superficie esse formano il corpo dossivo ad andamento quasi rettilineo dell'antico alveo del Reno. Questo corpo mostra uno spessore medio di circa 8 m, ma può localmente raggiungere i 10 metri.

8.3 Carta Geologica di superficie (Tavola 2a)

Per non essendo prevista come elaborato cartografico specifico dalle *Linee Guida*, la carta geologia di superficie è stata inserita come elemento di supporto allo studio, in accordo con il Servizio Geologico Regionale. La cartografia si basa sui risultati di studi cartografici a livello provinciale e locale recentemente realizzati da Geotema S.r.l. (v. paragrafo 3.2) e mostra la distribuzione in superficie dei sedimenti alluvionali di origine appenninica depositi in età storica dal fiume Reno.

la ricostruzione delle geometrie deposizionali e l'interpretazione dei rapporti stratigrafici di superficie è stata inizialmente basata sull'analisi di diverse serie di immagini satellitari ed aeree, acquisite nello spettro del visibile e dell'infrarosso a partire dalla Seconda Guerra Mondiale, oltre che del modello altimetrico di dettaglio LIDAR, derivato dai dati di telemetria laser aviotrasportata.

Il modello topografico ha permesso una lettura di grande dettaglio delle strutture geomorfologiche e consentito un posizionamento estremamente preciso delle osservazioni di terreno e delle prove di sottosuolo.

Considerata l'età molto recente dei depositi affioranti (v. paragrafo 5.2.3), in gran parte successivi al XV secolo, l'interpretazione delle strutture geologiche affioranti è stata notevolmente raffinata con l'ausilio delle abbondanti fonti storiche, scritte e cartografiche, riguardanti l'evoluzione idrografica del Reno, attiva nell'area tra il rinascimento e la fine del XVIII secolo.

L'insieme dei dati di superficie è stato successivamente confrontato con le informazioni contenute nella banca dati geognostiche, in particolare con le curve penetrometriche dei primi metri di sottosuolo, che hanno permesso di confermare le interpretazioni stratigrafiche derivanti dal rilevamento di superficie e di misurare lo spessore dei corpi sedimentari affioranti.

La geologia di superficie del territorio è dominata dal grande corpo di sabbie di riempimento del paleoalveo del Reno, allungato in direzione Nord-Est, Sud-Ovest, deposto fra l'inizio del XVI secolo e la seconda metà del XVIII, che determina un elevato rilievo.

Costituito di terreni sabbioso-limosi ben drenati, il corpo dossivo continuo è suddiviso in tre unità, distinte da caratteri sia cronologici che granulometrico-sedimentologici. In marrone sono rappresentati i depositi corrispondenti alla prima fase di sviluppo dell'alveo di età cinquecentesca, mentre quelli relativi alla fase principale di deposizione, caratterizzata da granulometrie sabbiose più grossolane, sono rappresentati in color marrone-rossiccio. I depositi più limosi che riempiono la depressione dell'ultimo alveo, sono infine legati alla fase di crisi e di abbandono di età settecentesca. Questo corpo di riempimento, rappresentato in rosa, conserva tuttora gli originari caratteri geomorfologici ove non alterati dalle recenti modifiche

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

antropiche, ed è limitato lateralmente da un ristretto rilevato arginale artificiale in buona parte di età rinascimentale.

I sedimenti di alveo, sono quindi affiancati da ampie aree di sabbie limose, limi e limi argillosi di argine naturale, generato dalla sovrapposizione di numerose rotte del Reno, avvenute in genere nelle stagioni autunnali e primaverili.

Nonostante ripetuti interventi di contenimento, registrati dalla documentazione storica, l'estensione di questi depositi è molto ampia, come ben visibile dal grande ventaglio da sfondamento arginale legato alla grande Rotta delle Pradine del 1731.

I corpi granulari di argine naturale e ventaglio da rotta mostrano una distribuzione marcatamente asimmetrica, con uno sviluppo molto maggiore in destra idrografica, sul lato sud-est, in direzione delle antiche paludi di Poggio-Sammartina ed uno sviluppo assai più contenuto verso nord-ovest. I principali canali da rotta, ancora molto ben visibili sono stati riportati in carta come elementi lineari.

I depositi di argine sfumano, a loro volta, in argille, argille limose e argille organiche deposte negli ambienti umidi di depressione interalvea, ampiamente sviluppati nelle porzioni orientali ed occidentali del territorio comunale. Le aree morfologicamente più depresse, sede di paludi dolci e stagni permanenti, sono documentate da plaghe di argille organiche e torbe, in superficie assai alterate dall'ossidazione e dalle alterazioni legate alle pratiche agricole.

Oltre alla descrizione e distribuzione dei corpi geologici di superficie, in cartografica sono riportate le tracce delle sezioni geologiche sulle quali si basa il modello geologico di sottosuolo utilizzato per gli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello.

8.4 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

In questa 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 2 sono restituite con colori arancio e rosso, mentre il verde è utilizzato per valori uguali o inferiori a 1.8.

I differenti simboli grafici in carta (cerchi e rombi) indicano rispettivamente le indagini realizzate per gli approfondimenti di microzonazione sismica (24), per il cui dettaglio si rimanda al paragrafo 4.2.4, e quelle di repertorio (5) recuperate dagli archivi comunali e dalla banca dati geognostica regionale.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Sulla base dei dati ottenuti dalle misure di microtremore sismico non è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo differenti classi di frequenza. Le frequenze fondamentali (f_0), infatti, sono discretamente omogenee su tutto il territorio e, a parte alcune limitate variazioni locali, sostanzialmente comprese tra 0,75 e 1 Hz. Tali valori associati a picchi significativi di ampiezza modesta indicano come i fenomeni di risonanza siano dovuti alla presenza di riflettori sismici posti a circa 100 m di profondità e con bassi contrasti di impedenza.

8.5 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 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 sismica.

L'elaborato, realizzato alla scala 1:10.000, mostra la suddivisione del territorio comunale in **zone suscettibili di amplificazioni locali** e **zone suscettibili di instabilità**, in quanto non sono presenti zone classificabili come stabili. Nella tavola sono riportate le stesse forme di superficie e sepolte già presenti nella carta geologico tecnica (tavola 2, paragrafo 8.2.1) e le ubicazioni dei punti di misura del rumore ambientale (tavola 3, paragrafo 8.4) come richiesto dagli standard della Commissione Tecnica di microzonazione sismica (versione 4.0b – 2015).

Le diverse microzone sono state definite sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche dei primi trenta metri di sottosuolo (Figura 8-1) e ad esse sono stati associati codici identificativi progressivi e colorazioni distinte come previsto dagli standard sopra citati.

Le 4 zone cartografate come **instabili** presentano tutte problematiche legate a fenomeni di liquefazione e sono quindi state classificate come **zone di attenzione per liquefazione** (ZA_{LQ}) e rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. È stata invece identificata un'unica area **suscettibile di sola amplificazione locale** a cui è stato attribuito il codice 2005.

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. Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

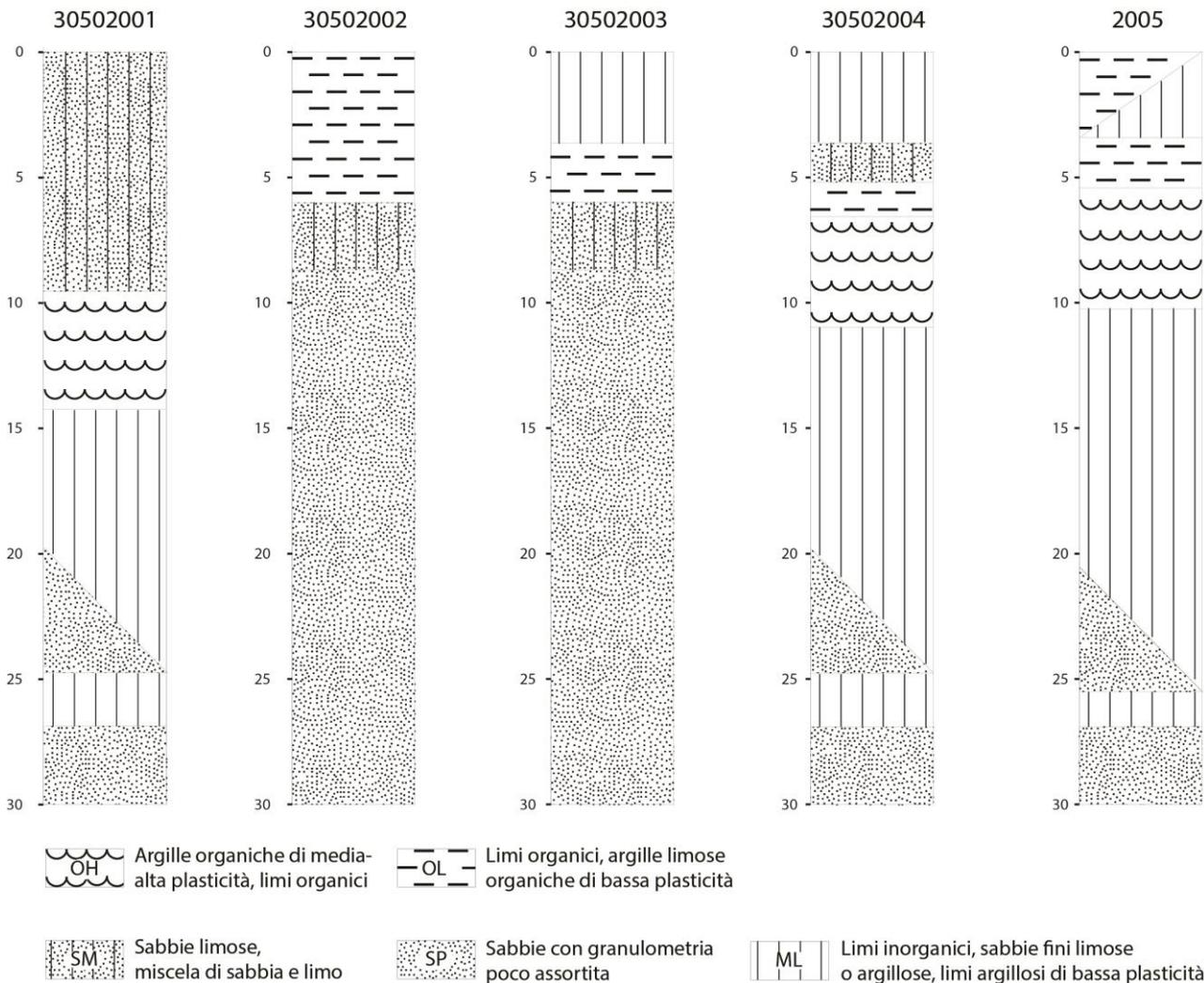


Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale

Zona 30502001

Corpi sabbiosi e sabbioso-limosi poco addensati e liquefacibili, con spessore massimo di 9 metri, poggiano su argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe.

Questi livelli sono seguiti da limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi di bassa plasticità, con intercalazioni anche plurimetriche di sabbie frequentemente organizzate in corpi lenticolari.

Zona 30502002

Terreni argilloso-limosi organici di bassa plasticità, con intercalazioni di torbe, dello spessore complessivo di circa 6 metri, poggiano su 2-3 metri di limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate liquefacibili. Segue una

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

spessa successione di sabbie prevalentemente fini e maggiormente addensate, che nella parte inferiore dell'unità possono mostrare granulometrie medio-grossolane. La porzione superiore di quest'unità può risalutare potenzialmente liquefacibile.

Zona 30502003

Limi inorganici e subordinate sabbie fini limose, dello spessore complessivo di circa 3 metri, poggiano su argille-limose organiche di analogo spessore e quindi su 2-3 metri di limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate liquefacibili. Segue una spessa successione di sabbie prevalentemente fini e maggiormente addensate, che nella parte inferiore dell'unità possono mostrare granulometrie medio-grossolane. La porzione superiore di quest'unità può risalutare potenzialmente liquefacibile.

Zona 30502004

Limi inorganici e subordinate sabbie fini limose, dello spessore complessivo di circa 3 metri, poggiano su sottili livelli di limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate e liquefacibili dello spessore massimo di circa 1 metro. Seguono argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe con spessori dell'ordine dei 6 metri, e quindi limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi di bassa plasticità, con intercalazioni anche plurimetriche di sabbie frequentemente organizzate in corpi lenticolari.

Zona 2005

Limi inorganici, talvolta debolmente sabbiosi, e argille limose organiche di bassa plasticità dello spessore complessivo di circa 3 metri, poggiano su argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe dello spessore complessivo di circa 7 metri. Questi livelli sono seguiti da limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi di bassa plasticità, con intercalazioni anche plurimetriche di sabbie frequentemente organizzate in corpi lenticolari.

8.6 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5)

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, a scala 1:10.000, i 50 punti di misura di V_s utilizzati per lo studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di V_{S30} .

I valori di V_{S30} sono stati ricavati dall'elaborazione dei dati di velocità acquisiti mediante misure geofisiche di tipo sia diretto che indiretto (Tabella 8-2). Le differenti tipologie di indagini sono rappresentate in

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

cartografia mediante simboli grafici distinti, rispondenti agli standard di rappresentazione utilizzati anche per la carta delle indagini (Tavola 1, paragrafo 8.1).

Misure dirette		Misure indirette	
SCPT	34	MASW	12
DH	1	ESAC-SPAC	3

Tabella 8-2 - Numero di indagini, suddivise per tipologia, utilizzate per la redazione della carta delle velocità delle onde di taglio.

Osservando le V_{s30} si nota come le indagini indirette forniscano generalmente valori lievemente sovrastimati rispetto a quelli derivati da misure dirette tipo cono sismico (SCPT) o down-hole (DH).

La distribuzione e l'andamento dei valori di V_{s30} indicano una sostanziale omogeneità mantenendosi comunque sempre entro i 200 m/s.

8.7 Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8, 9)

Le carte di microzonazione sismica con locali approfondimenti di livello 3, o carte dei fattori di amplificazione delle aree, sono state realizzate in accordo con quanto previsto dall'Allegato C della D.G.R. n. 1227/2015 e dagli Standard MS 4.0b e rappresentano gli elaborati finali di sintesi dello studio di microzonazione.

A differenza della carta MOPS (Tavola 4 e paragrafo 8.4), queste cartografie sono state realizzate solamente per gli ambiti urbanizzati e suscettibili di trasformazioni urbanistiche, oltre che per le fasce a ridosso delle reti infrastrutturali, cioè per tutte le aree soggette ad approfondimenti di microzonazione di terzo livello.

Gli elaborati in scala 1:5.000, riportano la classificazione delle aree indagate in base all'amplificazione attesa, quantificata tramite fattori parametrici (FA) espressi in termini di accelerazione di picco al suolo e di intensità di Housner¹ per i diversi periodi di vibrazione previsti dagli indirizzi regionali dell'Emilia-Romagna (D.G.R. 2193/2015):

- FA_{PGA} (tavola 6) - fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- $FA_{0,1-0,5s}$ (tavola 7) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;

¹ L'Intensità di Housner corrisponde all'area sottesa dallo spettro di risposta di pseudovelocità e rappresenta un indicatore della pericolosità sismica poiché correlabile all'energia dissipata nelle strutture durante un terremoto.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

- $FA_{0,5-1s}$ (tavola 8) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI_0) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi.
- $FA_{0,5-1,5s}$ (tavola 9) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI_0) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi.

I fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte (Tabella 8-3) sono stati derivati mediante risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1) e risultano comparabili con quelli proposti nell'abaco "Pianura 3" degli indirizzi regionali (Tabella 7-2).

FA_{PGA}	$FA_{0,1-0,5s}$	$FA_{0,5-1s}$	$FA_{0,5-1,5s}$
1,3	1,7	2,7	2,8

Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte di microzonazione sismica.

In ragione dell'omogeneità dei caratteri sismostratigrafici di sottosuolo e della correlabilità tra i fattori di amplificazione ottenuti e quelli degli abachi regionali (D.G.R. 2193/2015), i coefficienti di Tabella 8-3 sono stati considerati validi per l'intera area di studio e riportati in carta tramite la colorazione corrispondente alla propria classe di amplificazione.

Le zone suscettibili di instabilità per liquefazione sono distinte da quelle soggette a sola amplificazione locale per mezzo di sovrassegno cartografico.

Le "Zone di suscettibilità per liquefazione" sono state derivate dalle "Zone di attenzione per liquefazione" della carta MOPS (Tavola 4 e paragrafo 8.4) utilizzando geometrie e indicazioni diverse rispetto a queste ultime, come concesso dagli standard di MS 4.0b (2015).

Le "Zone di suscettibilità per liquefazione" sono state inoltre definite e arealmente suddivise per classi di rischio, sulla base dell'indice del potenziale di liquefazione (I_L). Le classi individuate sono riportate in carta mediante l'utilizzo dei retini previsti per le aree a rischio moderato ($2 < I_L \leq 5$) ed elevato ($5 < I_L \leq 15$). Si ricorda che gli indirizzi di microzonazione 4.0b non prevedono l'utilizzo di un retino per le aree a rischio basso ($2 < I_L$) che comunque rimangono classificate come aree instabili ed indicate nella carta MOPS come "zone di attenzione", in ragione della presenza delle condizioni predisponenti alla liquefazione. Questo aspetto determina buona parte della mancata corrispondenza tra le "Zone di suscettibilità per liquefazione" e le "Zone di attenzione per liquefazione" della carta MOPS, che però dipende anche dalle nuove indagini e dalle verifiche effettuate per gli approfondimenti di terzo livello.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Rispetto a quanto previsto dagli Standard MS 4.0b, nelle carte sono rappresentati anche i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali d'indagine. Considerata l'elevata disponibilità di prove elettriche e il maggior grado di affidabilità degli indici da esse ottenute si è ritenuto opportuno non riportare in carta indici derivati da precedenti verifiche effettuate su prove meccaniche.

I valori di I_L ottenuti sono esplicitati attraverso etichette numeriche associate a simboli quadrati con colorazioni distinte a seconda del grado di rischio. I quadrati bianchi indicano rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), quelli gialli rischio moderato ($2 < I_L \leq 5$) e quelli rossi rischio elevato ($5 < I_L \leq 15$).

Con lo stesso principio sono rappresentati anche i valori puntuali di I_L derivati dalle stime effettuate dalla Regione Emilia-Romagna nei territori dei Comuni limitrofi a Mirabello, non ricalcolati secondo i criteri adottati per il presente studio. Le stime, eseguite nell'ambito degli studi di microzonazione sismica realizzati dopo il sisma del 2012, sono state utilizzate per definire con maggior accuratezza l'estensione e le geometrie delle zone di suscettibilità per liquefazione nelle aree prossime ai limiti comunali.

9 Commenti finali e criticità

Gli approfondimenti di terzo livello eseguiti per lo studio di microzonazione sismica hanno permesso di determinare, per le aree urbanizzate e urbanizzabili, oltre che per le fasce a ridosso delle reti infrastrutturali, l'amplificazione sismica attesa e quantificare il grado di rischio nelle aree caratterizzate dalla presenza di condizioni predisponenti la liquefazione.

L'amplificazione attesa è stata determinata mediante analisi numerica di risposta sismica locale, basata su dati stratigrafici e velocità delle onde di taglio (V_s) acquisiti in foro sino ad elevate profondità. Si precisa che la modellazione e l'analisi di risposta sismica eseguita per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) può fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, ma non può in alcun modo sostituirle poiché queste ultime devono essere realizzate sulla base di dati geologici e geofisici di sito acquisiti nell'area di progetto.

Per la determinazione del rischio di liquefazione sono state, inoltre, eseguite numerose verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti si è deciso di considerare il recente metodo di Boulanger & Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015, come maggiormente affidabile per il calcolo degli indici di liquefazione I_L (paragrafo 7.2.1).

Nei paragrafi successivi viene dunque proposta una sintesi riassuntiva dei principali caratteri geologici ed evolutivi dell'area ed una analisi di come questi abbiano determinato la stretta correlazione tra rischio

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

liquefazione e insediamento antropico. Infine sono riepilogati i risultati dello studio condotto e le principali criticità rilevate, anche attraverso il confronto tra quanto prodotto e considerato nei precedenti elaborati di microzonazione sismica (cfr. Ordinanza 70/2012).

9.1 Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale

La parte inferiore dei corpi indagati è costituita da **sedimenti pleistocenici** di media pianura alluvionale (Figura 9-1), depositi durante fasi dell'ultima glaciazione. La parte settentrionale dell'area di studio è formata da estesi corpi di sabbie grossolane del Po con Vs anche superiori ai 300 m/sec. Verso sud si passa ad alternanze di sabbie di provenienza appenninica e grossi volumi di limi, con Vs mediamente inferiori alle precedenti, comprese tra 200 e 250 m/sec. La profondità del tetto stratigrafico dei corpi sedimentari singlaciali aumenta verso sud, in direzione dell'asse della sinclinale attiva, a causa delle deformazioni indotte dalla subsidenza differenziale.

I **sedimenti post-glaciali** presentano caratteri notevolmente diversi nella parte meridionale e settentrionale, nonostante la contenuta estensione in senso longitudinale dell'area. A sud si sviluppa una spessa successione di prevalenti limi continentali, con intercalazioni di sabbie e argille di provenienza appenninica (Figura 9-1). Sono presenti importanti livelli di paleosuoli a concrezioni carbonatiche nei quali l'alterazione diagenetica influenza notevolmente i parametri geotecnici e geofisici. Le velocità sismiche tipiche di questa unità superano di poco i 200 m/s, con bruschi incrementi in corrispondenza dei livelli di paleosuolo più evoluti. Nella parte settentrionale dell'area di studio, invece, la successione limosa si assottiglia notevolmente e corpi di sabbie di meandro di Po possono saldarsi direttamente a quelle singlaciali.

I **sedimenti più recenti**, depositi negli ultimi 5.000 anni, sono infine dominati da fanghi argillosi organici di origine appenninica con estesi orizzonti di torbe (Figura 9-1) di ambienti di palude continentale. Questi depositi coesivi presentano scadenti proprietà geotecniche e sono caratterizzati dai più bassi valori di velocità (Vs) pari a circa 120 m/s.

Le ampie paludi furono però nel tempo attraversate da numerosi canali fluviali di origine appenninica, che hanno depositato importanti corpi allungati di sabbie, sabbie limose e limi di riempimento di canale, fiancheggiati da estesi corpi di argine naturale, limoso-sabbiosi. Particolarmente evidente è il corpo affiorante di sabbie deposte dal Reno (Figura 9-1) in età molto recente, fra 1450 e 1750 circa, che forma il pronunciato dosso fluviale che innerva il territorio di Mirabello e su cui si è sviluppato l'abitato.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Ai lati delle strutture arginali si sviluppano ampi corpi da rotta, come quello delle Pradine nella porzione sudorientale dell'area comunale, ben noti e precisamente databili grazie le abbondanti fonti storiche, scritte e cartografiche.

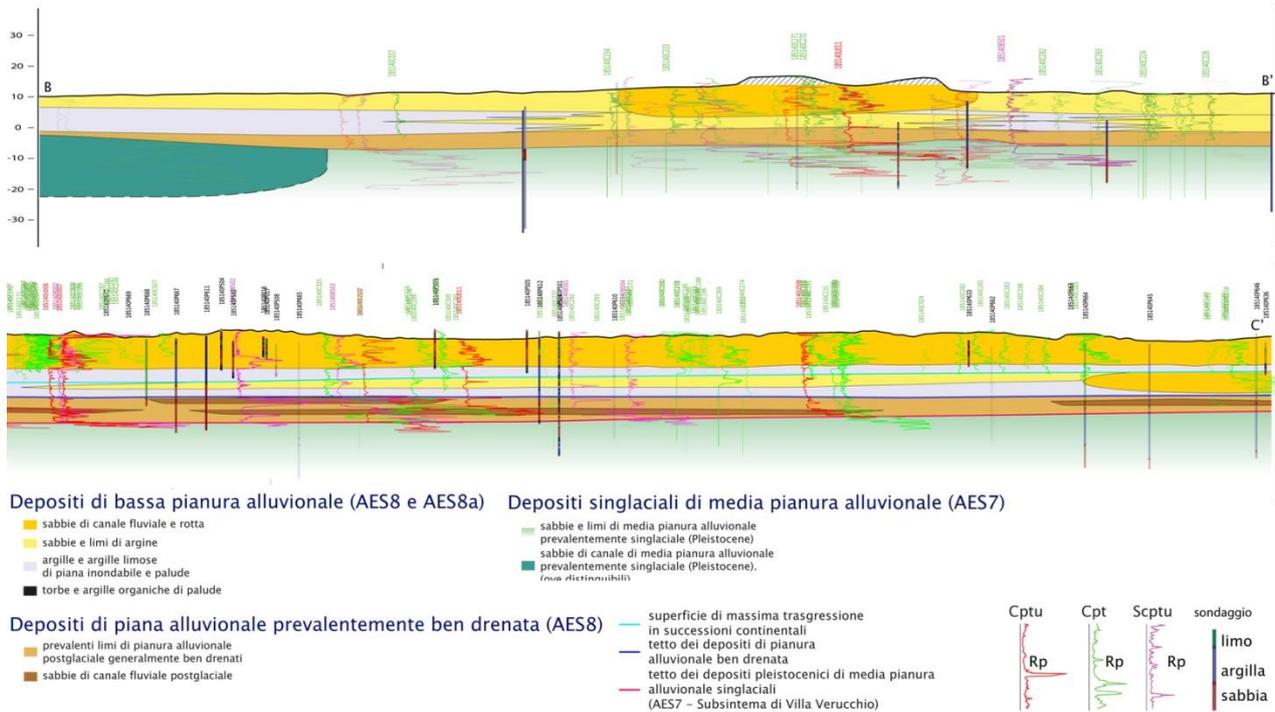


Figura 9-1 - Sezioni geologiche superficiali che mostrano le principali caratteristiche stratigrafiche dell'area di studio. Realizzate mediante interpretazione classica delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali, hanno contribuito alla definizione del modello di geologico.

9.2 Microzonazione sismica e criticità

Sulla base dello nuove conoscenze acquisite mediante gli approfondimenti di terzo livello dello studio di microzonazione sismica, il territorio di Mirabello è stato suddiviso in tre distinte aree a diversa pericolosità sismica, in base alla suscettibilità alla liquefazione dei terreni presenti. Tali aree riflettono fedelmente la distribuzione tridimensionale dei corpi sedimentari di origine fluviale.

- a) La parte centrale, comprendente quasi tutto il centro abitato, formata da sabbie e limi di riempimento di canale e argine prossimale del Reno e sede di una significativa falda freatica. Questa fascia mostra nel primo sottosuolo spessi corpi granulari saturi ad elevato indice di liquefazione (valori puntuali di I_L localmente anche superiori a 11). I notevoli gradienti topografici, legati alla presenza del dosso fluviale ed ai riporti arginali antropici, favoriscono l'insorgere di movimenti gravitativi di espansione laterale e franamento cosismici, come quelli verificatisi nel 2012 e, in precedenza, nel 1570 (Caputo *et al.*, 2012).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

La fascia centrale, densamente abitata e attraversata dalla ex. SS 225 e dalla maggior parte delle infrastrutture, appare quindi la più problematica dal punto di vista del rischio da liquefazione.

Questo rischio si riduce progressivamente lateralmente nei depositi da rotta e tracimazione, dati gli spessori ridotti ed i minori gradienti topografici.

Il maggior rischio di liquefazione interessa, dunque, gran parte delle aree appartenenti alla zona MOPS 30502001 e porzioni di quelle inquadrata nella zona MOPS 30502004.

- b) La parte settentrionale del territorio di Mirabello, confinante con i Comuni di Vigarano Mainarda e Bondeno, e quella orientale, confinante con Poggio Renatico, non presentano importanti corpi di sabbie liquefacibili affioranti. Le indagini di sottosuolo hanno però rivelato la presenza di spessi corpi di sabbie fluviali sepolti, riferibili a canali di Po nella parte settentrionale più profonda, a cui localmente si sovrappongono canali di origine appenninica, verosimilmente attribuibili al fiume Reno a nord-ovest e al torrente Lavino ed altri nella parte orientale. La locale presenza di sabbie appenniniche più prossime alla superficie è responsabile dei moderati indici di liquefazione ottenuti in questo settore ($2 \leq I_L \leq 5$). Queste aree, attribuite alle zone MOPS 30502002 e 30502003, sono soggette ad un rischio di liquefazione comunque significativo, anche se meno evidente rispetto a quello dell'agglomerato urbano, confermato dalle eruzioni di sabbie avvenute lungo la strada provinciale Correggese durante il sisma del 2012. In alcune aree del settore settentrionale, invece, in cui le sole sabbie del Po compaiono a profondità superiori ai 10 metri, i bassi indici di liquefazione ottenuti ($0 \leq I_L \leq 2$) dipendono sostanzialmente dalle diverse caratteristiche di assortimento, granulometria e addensamento delle sabbie padane rispetto a quelle appenniniche. La dettagliata ricostruzione geometrica di questi corpi sepolti è però assai più complessa e relativamente incerta rispetto ai corpi affioranti e pertanto tali aree richiedono maggiori attenzioni e approfondimenti di indagine in caso di interventi edilizi.
- c) Le parti orientali e occidentali, topograficamente depresse, del territorio comunale non presentano invece significativi corpi di sabbie fluviali nei primi 15-20 m di sottosuolo, essendo caratterizzati dalla presenza di sedimenti argillosi coesivi, spesso organici, deposti in condizione di palude e depressione interalvea. Sabbie fluviali possono essere presenti solo a maggiore profondità, comunemente associate alle unità sedimentatesi durante l'ultima glaciazione. Il significativo carico litostatico impedisce però in ogni caso il manifestarsi di fenomeni di liquefazione in superficie. Queste aree, inquadrata nella zona MOPS 2005, possono essere quindi considerate esenti da rischio di liquefazione cosismica, ma risultano comunque soggette a fenomeni di amplificazione del moto sismico in superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Il **valore di accelerazione** (PGA) utilizzato per il calcolo degli indici di liquefazione è stato determinato mediante risposta sismica locale e considerato rappresentativo a scala comunale, vista la sostanziale omogeneità delle condizioni sismo-stratigrafiche e la ridotta estensione del territorio, in analogia con quanto riportato nella microzonazione dell'Ordinanza 70 (Martelli e Romani, 2013).

Rispetto a quanto considerato nel precedente studio (cfr. Ordinanza 70/2012), i coefficienti di amplificazione ed i valori di **accelerazione** di picco (PGA) sono stati rivisti e risultano inferiori, passando rispettivamente da 1,5 a 1,3 e da 0,22 g a 0,19 g. La rimodulazione è stata dettata sia dai risultati della risposta sismica locale, sia dall'introduzione dei nuovi abachi regionali (D.G.R. 2193/2015) che prevedono coefficienti di amplificazione della PGA pari a 1,3 in contesti di pianura caratterizzati da elevati spessori di coperture sedimentarie (> 300 m).

Gli indici ottenuti dalle nuove analisi di liquefazione, con l'utilizzo del recente metodo di Boulanger & Idriss (2014) per il calcolo degli indici (I_L), confermano sostanzialmente quanto indicato nei precedenti approfondimenti di microzonazione sismica (cfr. Figura 9-2) nonostante l'abbassamento del valore di accelerazione di picco (PGA). Le aree e le classi di rischio individuate tramite interpolazione degli indici sono sostanzialmente analoghe alle precedenti e mostrano valori puntuali paragonabili ai predetti.

Questa sostanziale corrispondenza è dovuta all'effetto di compensazione che la riduzione del valore dell'accelerazione di picco produce sul generale e comprovato incremento dei valori di I_L ottenuti applicando il metodo di Boulanger & Idriss (2014), in media maggiormente cautelativo rispetto ad altri metodi semplificati in aree analoghe a quella in esame (cfr. paragrafo 7.2.1).

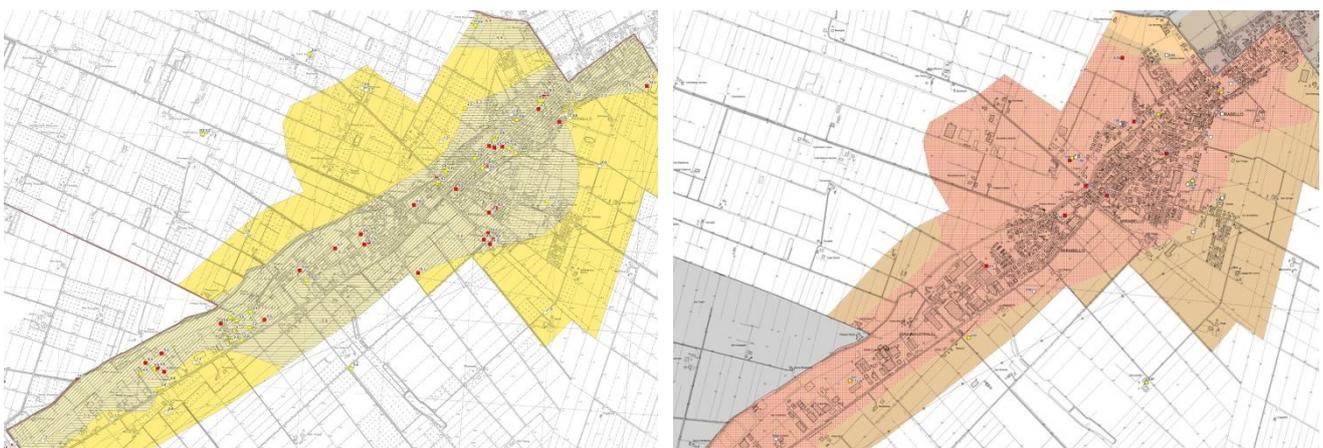


Figura 9-2 - Carte dei fattori di amplificazione (PGA) e del rischio liquefazione. A sinistra la cartografia ottenuta dagli approfondimenti di MS di terzo livello; a destra quella redatta per l'Ordinanza 70/2012.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Infine gli approfondimenti di terzo livello hanno permesso la ridefinizione del bedrock sismico sulla base dei risultati delle misure di microtremore e delle velocità delle onde di taglio (V_s) acquisite in foro sino ad elevate profondità. Tali misure, correlate con i dati stratigrafici utilizzati per la definizione della sezione Cento – Occhiobello (Allegato 1, sezione D-D'), hanno permesso di individuare il bedrock sismico ad una profondità di 800 m in corrispondenza del tetto dei depositi torbiditici di età Pliocenica.

9.3 Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione

Nel territorio in esame emerge una forte correlazione fra la distribuzione dell'edificato storico e di quello precedente il II Conflitto Mondiale, e le zone a più elevato potenziale di liquefazione.

Questa infelice correlazione non è casuale ed interessa gran parte dei centri abitati e nuclei storici della bassa Pianura Padano-Veneta, in quanto i fattori che hanno controllato la nucleazione e lo sviluppo degli insediamenti sono gli stessi che hanno prodotto i corpi sabbiosi liquefacibili. In questi vasti territori di bassa pianura i limitati gradienti morfologici e gli alvei fluviali naturalmente pensili rendono lo scolo delle acque molto difficoltoso, particolarmente nelle aree più subsidenti. La diffusione storica di aree umide, paludi, stagni e lagune costiere ha, quindi, fortemente limitato le possibilità di sviluppo agricolo ed insediativo. In questo contesto i corpi arginali e i dossi sabbiosi di paleoalveo costituivano le sole strutture stabilmente emerse e drenate, percorribili anche nei periodi più umidi. La natura continua degli alvei fluviali consentiva il tracciamento di percorsi e strade, mentre gli alvei attivi hanno rappresentato, storicamente, importanti vie di trasporto fluviale. La presenza di falda libera all'interno dei corpi acquiferi freatici consentiva l'approvvigionamento idrico attraverso pozzi superficiali, fornendo al contempo acqua agli apparati radicali delle piante coltivate anche nei periodi siccitosi. La combinazione di questi fattori ha fatto sì che i centri antichi si enucleassero nella quasi totalità dei casi su corpi sabbiosi di alveo fluviale. A seguito delle diffuse bonifiche idrauliche e allo sviluppo economico e tecnologico in epoca più recente, questi condizionamenti territoriali si sono fortemente ridotti, anche se la correlazione fra zone sabbiose liquefacibili e insediamento permane. Infatti le zone morfologicamente depresse con sedimenti fangoso-torbosi presentano scarse caratteristiche geotecniche e gli insediamenti moderni tendono a svilupparsi intorno ai centri preesistenti e buona parte della rete stradale attuale ripercorre percorsi storici su corpi di paleoalveo.

10 Bibliografia

- AA.VV., (2004): *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SEASAME project, April, [Online], <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV., (2011): *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2.
- Albarello D., Castellaro S., (2011): *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. In AA.VV. (2011): "Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica", supplemento alla rivista Ingegneria sismica, 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.
- Amoroso S., Monaco P., Lehane B. And Marchetti D., (2014): *Examination of the potential of the seismic dilatometer (SDMT) to estimate in situ stiffness decay curves in various soil types*. *Soils and Rocks*, Vol. 37, No. 3, 177-194. ISSN: 1980-9743. Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ABMS) and Portuguese Geotechnical Society (SPG). São Paulo, Brazil.
- 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.
- Blake A., (1941): *On the estimation of focal depth from macroseismic data*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 31, 3.
- 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, 1:250000*. Regione Emilia-Romagna – CNR.
- Bonini L., Toscani G., Seno S., (2014): *Three-dimensional segmentation and different rupture behavior during the 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy)*. *Tectonophysics* 630, 33-42.
- Bordoni P., Azzara R.M., Cara F., Cogliano R., Cultrera G., Di Giulio G., Fodarella A., Milana G., Pucillo S., Riccio G., Rovelli A., Augliera P., Luzi L., Lovati S., Massa M., Pacor F., Puglia R., Ameri G., (2012):

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

Preliminary results from EMERSITO, a rapid response network for site-effect studies. Ann. Geophys. 55 (4), 599–607. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6153>.

Boulanger R. W., Idriss I. M., (2014): *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp.

Bruno L., Amorosi A., Severi P., Costagli B., (2016): *Late Quaternary aggradation rates and stratigraphic architecture of the southern Po Plain, Italy*. Basin Research 1–15 [http:// dx.doi.org/10.1111/bre.12174](http://dx.doi.org/10.1111/bre.12174).

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 Geophys., 46 (5), 865-882.

Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R., Valensise G., (2012): *Is blind faulting truly invisible? Tectoniccontrolled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy)*. Annals of Geophys., 55(4), 525-531, doi: 10.4401/ag-6182.

Caputo R., Papathanasiou G., (2012): *Ground failure and liquefaction phenomena triggered by the 20 May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake: case study of Sant'Agostino - San Carlo - Mirabello zone*. Nat. Haz. Earth System Sciences, 12(11), 3177-3180, doi:10.5194/nhess-12-3177-2012.

Caputo R., Iordanidou K., Minarelli L., Papathanassiou G., Poli M.E., Rapti-Caputo D., Sboras S., Stefani M., Zanferrari A., (2012): *Geological evidence of pre-2012 seismic events, Emilia-Romagna, Italy*. Ann. Geophysics, 55(4), 743-749, doi: 10.4401/ag-6148.

Caputo R., Poli M.E., Minarelli L., Rapti D., Sboras S., Stefani M., Zanferrari A., (2016): *Palaeoseismological evidence for the 1570 Ferrara earthquake, Italy*. Tectonics 35 (6), 1423-1445.

Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 202 - San Giovanni in Persiceto*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.

Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 203 - Poggio Renatico*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.

Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 204 - Portomaggiore*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.

Carta Geomorfologica Provincia di Ferrara - Geotema S.r.l. (2016), <http://visore.cgu-ferrara.it/Html5Viewer/Index.html?configBase=http://visore.cgu-ferrara.it/Geocortex/Essentials/REST/sites/UNESCO/viewers/VisoreHTML5/virtualdirectory/Resources/Config/Default>.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

- 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., 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/>.
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. Earth Surf. Proc. Land., 24, 1115-1120.
- 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 per la microzonazione sismica, (2015): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b*. http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard_MS_4_0b.pdf.
- Corrado, S., Aldega, L., Zattin, M., (2010): *Sedimentary vs. tectonic burial and exhumation along the Apennines (Italy)*. Journal of the Virtual Explorer 36.
- Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., Penitenti D., (1992) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. Rapport CIESM 33:125.
- D.A.L. 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica*. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.
- D.C.P. Provincia di Ferrara n. 32/2014: *Adozione della Variante al PTCP: ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale*.
- Devoti, R., Esposito A., Pietrantonio G., Pisani A. R., Riguzzi F., (2011): *Evidence of largescale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary*, Earth Planet. Sci. Lett., 311, 230-241, doi:10.1016/j.epsl.2011.09.034.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 1227/2015: *Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. Attribuzione contributi a favore degli enti locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica*.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

D.G.R. Emilia-Romagna n. 2193/2015: *Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112.*

Di Capua G., Tarabusi G., (2013): *DPC-INGV S2 2012-2013 project Annex2 to D4.1 – Site-specific hazard assessment in priority areas - MIRANDOLA (MO) seismo-stratigraphic models*, Online <https://sites.google.com/site/ingvdpc2014projetto2/tasks/task-4/d4-1>.

Di Dio G., Caporale L., (1998): *Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza*. In: *Geofluid '98 - Problemi di ingegneria: Estrazione di fluidi e subsidenza* (a cura di G. Brighenti & E. Mesini), Piacenza, 3 ottobre 1998, 67-76.

Di Dio G., Molinari F., (2000): *A study of the groundwater resources in the Ferrara Province (Po River Basin, Northern Italy)*. Proceedings of III Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, 24-27/10/2000. Bavaria, Munich, Germany: 84-86.

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/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.

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.

Facciorusso J., Madaia C., Vannucchi G., (2012): *Risposta sismica locale e pericolosità di liquefazione a S. Carlo e Mirabello*. Rapporto 3 ottobre 2012. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.

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.

Garofalo F., Foti S., Hollender F., Bard P.Y., Cornou C., Cox B.R., Ohrnberger M., Sicilia D., Asten M., Di Giulio G., Forbriger T., Guillier B., Hayashi K., Martin A., Matsushima S., Mercerat D., Poggi V., Yamanaka H.,

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

(2016): *InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods, Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 82, pp. 222-240, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.12.010i.

Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., Vignolo A., (2010): *Sedimentary and Tectonic Evolution in the Eastern PoPlain and Northern Adriatic Sea Area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy)*, in F.P. Sassi, G. Dal Piaz, and C. Doglioni, (eds.), *Nature and Geodynamics of the Northern Adriatic Lithostere*: Rend. Fis. Acc. Lincei, v. 21/1, p. 131-16.

Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F.P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti L., Piana Agostinetti N., Di Giovambattista R., Latorre D., Anselmi M., Ciaccio M.G., Moretti M., Castellano C., Piccinini D., (2014): *The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): imaging the thrust fault system by accurate aftershocks location*. *Tectonophysics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.013>.

Gruppo di Lavoro Liquefazione, (2012): *Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello*. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.

Gruppo di lavoro MPS, (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapp. 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.

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>.

Iwasaki T., Arakawa T., Tokida K., (1982): *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Proceedings of the Conference on Soil Dynam.

Lai C. G., Bozzoni F., Mangriotis M-D., Martinelli M, (2012): *Geotechnical Aspects of May 20, 2012 M5.1 Emilia Earthquake, Italy*, EUCENTRE, July 2012.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

- 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.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., (2016): *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.
- Martelli L., (2011): *Quadro sismotettonico dell'Appennino emiliano-romagnolo e della Pianura Padana centrale*. Atti del 30° convegno nazionale GNGTS, Trieste 14-17 novembre 2011, sessione 1.2, 152-156.
- 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.
- Martelli L., Romani M., (2013): *Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012* (Ordinanza del commissario delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012), Relazione Illustrativa.
- Massa M., Augliera P., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Lovati S., Monachesi G., Moretti M., Piccinini D., (Seismological projects DPC-INGV 2012-2013): *May-June 2012 Emilia seismic sequence: relocated seismicity, Project S1, Base-knowledge improvement for assessing the seismogenic potential of Italy*, Deliverable D18, Task b2, <https://sites.google.com/site/ingvdpcprojects1/home>.
- 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.
- Milana G., Bordoni P., Cara F., (2014): *1D velocity structure of the Po River plain (Northern Italy) assessed by combining strong motion and ambient noise data*. Bull Earthquake Eng (2014) 12: 2195. DOI:10.1007/s10518-013-9483-y.
- Minarelli L., Amoroso S, Tarabusi G., Stefani M., Pulelli M., (2016): *Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy*. Annals of Geophysics, 2016.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

- Montone P., Mariucci M.T., Pierdominici S., (2012): *The Italian present-day stress map*, Geophys. J. Int., 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.
- Mucciarelli M. (a cura di), (2012): *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.
- NTC, (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, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. Geology, 12, 475-478.
- Papathanassiou G., Caputo R., Rapti-Caputo D., (2012): *Liquefaction-induced ground effects triggered by the 20th May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake*. Annals of Geophys., 55(4), doi: 10.4401/ag-6147.
- Papathanassiou G., Mantovani a., Tarabusi G., Rapti D., Caputo R. (2015): *Assessment of liquefaction potential for two liquefaction prone areas considering the May 20, 2012 Emilia (Italy) earthquake*, Engineering Geology, vol. 189, April, pp. 1-16, DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.02.002.
- Pasolini C., Gasperini P., Albarello D., Lolli B., D'Amico V., (2008): *The Attenuation of Seismic Intensity in Italy, Part I: Theoretical and Empirical Backgrounds*, Bull Seism. Soc. Am., Vol. 98(2), 682-691.
- Paolucci E., Albarello D., D'Amico S., Lunidei E., Martelli L., Mucciarelli M., Pileggi D. (2015): *A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy*, Bulletin of Earthquake Engineering, 13 (11) pp. 3187-3206.
- 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.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence*. Annals of Geophys., 55(4), 615-621, doi: 10.4401/ag-6146.
- Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

- RER & 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. S.EL.CA., 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., (2009): *Performance based earthquake design using the CPT*, Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009
- Robertson P.K., Wride C.E., (1998): *Cyclic Liquefaction and its Evaluation based on the CPT Canadian*. *Geotechnical Journal*, 1998, Vol. 35, August.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016): *CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M. Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marcocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., (2012): *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes*. *Annals of Geophys.*, **55**(4), 549-556, doi: 10.4401/ag-6159
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. *Handbuch der Geophysik*, **2**(4), 552-555.
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. *Handbuch der Geophysik*, **2**, 4, pp. 550-555.
- Stefani, Minarelli L., Pavanati A., Furin S., Tarabusi G., Gamberi S., (2014): *Studio di microzonazione sismica di dettaglio dell'area del Comune di Mirabello (FE) basata sull'interpolazione tridimensionale di dati geologici e geofisici puntuali*.
- 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.
- Trincardi F., Correggiari A., Roveri M., (1994): *Late Quaternary transgressive erosion and deposition in a modern epicontinental shelf: The Adriatic Semienclosed Basin*. *Geo-Marine Letters*, **14**, 41-51.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

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*.

Waelbroeck C., Labeyrie L., Michel E., Duplessy J.C., McManus J., Lambeck K., Balbon E., Labracherie M., (2002): *Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records*. *Quaternary Science Reviews*, 21, 295-305.

Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J.T., Dobry R., Finn W.D.L. Harder L.F., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J., Liao S., Marcuson III W.F., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaki Y., Power M.S., Robertson P.K., Seed R., Stokoe K.H.,: *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF*. Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, October, pp 817-833.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRABELLO

11 Allegati

Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta Geologico – Tecnica per la Microzonazione Sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta Geologica di superficie	Tavola 2a	1:10.000
Carta delle frequenze naturali del terreno	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 6 - FA _{PGA}	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 7 - FA _{0,1 - 0,5 s}	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 8 - FA _{0,5 - 1,0 s}	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 9 - FA _{0,5 - 1,5 s}	1:5.000

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTU MS
