

PUG



PIANO URBANISTICO GENERALE

Proposta di Piano | **Assunzione** | QC | Relazione

B SISTEMA AMBIENTALE

QC.B4

MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA

ASSUNZIONE
Delibera C.C. n° 86 del 29/12/2021

ADOZIONE
Delibera C.C. n° del / /

APPROVAZIONE
Delibera C.C. n° del / /



**Comune
di Modena**



Comune
di Modena

Settore Pianificazione e sostenibilità urbana

Ufficio di Piano

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

MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA

Adeguamento dello Studio di microzonazione sismica approvato dal Dip. di Protezione Civile in data 11/08/2016 (Rif. PG RER 2016.0577359) alla D.G.R. n. 630 del 29/04/2019

Regione Emilia-Romagna Comune di Modena



Coordinamento Generale
Dott. Geol. Giorgio Masotti

Collaboratori
Dott. Geol. Alberto Fiori
Dott. Enrico Notari

FASCICOLO 1
RELAZIONE TECNICA

Dicembre 2020

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	4
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	4
3	ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA.....	11
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	23
4.1	Indagini a rifrazione (Onde P).....	23
4.2	Indagini MASW.....	27
4.3	Indagini HVSR.....	28
4.4	Indagini penetrometriche ad infissione dinamica (DMP).....	30
4.5	Indagini penetrometriche ad infissione statica (CPTU).....	30
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO	31
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	40
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	41
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	70
8.1	Carta delle indagini.....	70
8.2	Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica.....	71
8.3	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1).....	72
8.4	Carta di microzonazione sismica (livello 2)	73
8.5	Carta delle frequenze.....	84
8.6	Carta delle velocità (Vs).....	85
9	BIBLIOGRAFIA.....	87

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1: ZONAZIONE SISMOGENETICA ZS9.....	4
FIGURA 2: DETTAGLI EVENTI NELLE ZONE SISMOGENETICHE 912 E 913	5
FIGURA 3: MASSIME INTENSITÀ MACROSISMICHE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA	5
FIGURA 4: STORIA SISMICA DI MODENA (DA INGV - DBMI15)	6
FIGURA 5: GRAFICO STORIA SISMICA DEL COMUNE DI MODENA	7
FIGURA 6: GEOMETRIA DELLE 9 ZONE SISMOGENETICHE PROPOSTE (CONTORNI NERI) E SISMICITÀ STORICA DALL'ANNO 1000.	7
FIGURA 7: I TERREMOTI AVVENUTI DALL'ANNO 1000 NEL MODENESE (CERCHI ROSSI).....	8
FIGURA 8: INTENSITÀ MASSIMA ED ALTRE INFORMAZIONI MACROSISMICHE PER IL COMUNE DI MODENA	8
FIGURA 9: VALORI DI I _{MAX} MCS DEL COMUNE DI MODENA (23)	8
FIGURA 10: VALORI DI RIFERIMENTO DELL'ACCELERAZIONE SU SUOLO RIGIDO PER IL COMUNE DI MODENA	9
FIGURA 11: SPETTRO DI RISPOSTA NORMALIZZATO (TR = 475 ANNI, SMORZAMENTO = 5%) PER MODENA	10
FIGURA 12: RICLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'EMILIA-ROMAGNA, ORDINANZA DEL PCM N. 3274/2003 – AGGIORNAMENTO LUGLIO 2018	10
FIGURA 13: CURVE DI LIVELLO CON EQUIDISTANZA PARI A 1 METRO.....	11
FIGURA 14: MODELLO DTM DEL TERRITORIO COMUNALE.....	12
FIGURA 15: PLANIMETRIA DEL F. SECCHIA.....	12
FIGURA 16: CARTA GEOLOGICA DEL TERRITORIO MODENESE E AREE LIMITROFE (DA GASPERI, 1987).....	13
FIGURA 17: SCHEMA STRATIGRAFICO E IDROSTRATIGRAFICO DEI DEPOSITI PLIO-QUATERNARI DEL SOTTOSUOLO PADANO (DA NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA FOGLIO 201 MODENA)	14
FIGURA 18: SEZIONE GEOLOGICA PROFONDA DELLA PIANURA MODENESE (DA PIERI & GROPPi, 1981)	15
FIGURA 19: PROFONDITÀ (IN M S.L.M.) DEL LIMITE BASALE DEI SEDIMENTI CONTINENTALI (DA NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA FOGLIO 201 MODENA).....	16
FIGURA 20: CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA A CURA DEL SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI DELLA RER (2004) SCALA 1:250.000 A CURA DI MARIO BOCCALETTI E LUCA MARTELLI	17
FIGURA 21: SCHEMA STRATIGRAFICO DEL SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE.....	18
FIGURA 22: SCHEMA GEOLOGICO SEMPLIFICATO DEL TERRITORIO COMUNALE (DA CARTA GEOLOGICA RER).....	19
FIGURA 23: SPESSORE GHIAIE DELLA CONOIDE DEL F. SECCHIA.....	20
FIGURA 24: TABELLA INDAGINI REPERITE DALLA BIBLIOGRAFIA.....	23
FIGURA 25: TABELLA CON INDICAZIONE DELLE INDAGINI EFFETTUATE.....	23
FIGURA 26: CARTOGRAFIA DEL TETTO DEI DEPOSITI GHIAIOSI.....	32
FIGURA 27: TETTO DEI LIVELLI GHIAIOSI SUPERFICIALI (IN METRI DA P.D.C.) (RIQUADRI A E B DI FIGURA 26).....	33
FIGURA 28: UBICAZIONE SEZIONI STRATIGRAFICHE PROFONDE (DA PROGETTO CARG).....	33
FIGURA 29: SEZIONE 1 (DA PROGETTO CARG, RIDISEGNATA).....	34

FIGURA 30: SEZIONE 2 (DA PROGETTO CARG, RIDISEGNATA).....	35
FIGURA 31: CARTOGRAFIA DELLE FREQUENZE FONDAMENTALI DI VIBRAZIONE	36
FIGURA 32: SUDDIVISIONE DEL TERRITORIO IN AREE OMOGENEE.....	37
FIGURA 33: CURVE H/V RAPPRESENTATIVE DELL'AREA B.....	38
FIGURA 34: CURVE H/V RAPPRESENTATIVE DELL'AREA C1.....	38
FIGURA 35: BASE SUBSISTEMA DI BAZZANO (AES6).....	39
FIGURA 36: CURVE H/V RAPPRESENTATIVE DELL'AREA C2.....	39
FIGURA 37: CURVE H/V RAPPRESENTATIVE DELL'AREA D.....	40
FIGURA 38: INDIVIDUAZIONE AREE SOGGETTE A POTENZIALE LIQUEFAZIONE.....	61
FIGURA 39: INDIVIDUAZIONE AREE SOGGETTE A POTENZIALI CEDIMENTI POST-SISMICI.....	62
FIGURA 40: INDIVIDUAZIONE AREE SOGGETTE A POTENZIALI CEDIMENTI POST-SISMICI.....	63
FIGURA 41: EFFETTO VALLE	63
FIGURA 42: TABELLE PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA (2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO) PER SUBSTRATO MARINO NON RIGIDO CARATTERIZZATO DA $V_S \leq 800$ M/S.	67
FIGURA 43: TABELLE PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA (2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO) PER MARGINE DI TIPO A.	68
FIGURA 44: TABELLE PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA (2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO) PER PIANURA 1	69
FIGURA 45: TABELLE PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA (2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO) PER PIANURA 2.	69
FIGURA 46: CARTA DELLE INDAGINI.....	70
FIGURA 47: LEGENDA DELLA CARTA GEOLOGICO-TECNICA	71
FIGURA 48: CARTA GEOLOGICO-TECNICA.....	71
FIGURA 49: CARTA MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA (MOPS).....	72
FIGURA 50: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE PGA	75
FIGURA 51: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE $FH0.1-0.5$ S.....	76
FIGURA 52: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE $FH0.5-1.0$ S.....	77
FIGURA 53: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE $FH0.5-1.5$	78
FIGURA 54: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE $SA0.1-0.5$	79
FIGURA 55: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE $SA0.4-0.8$	80
FIGURA 56: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE $SA0.7-1.1$	81
FIGURA 57: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE $SA0.5-1.5$	82
FIGURA 58: CARTA PARAMETRO H_{SM}	83
FIGURA 59: CAMPO DI VARIABILITÀ DEL PERIODO FONDAMENTALE DEGLI EDIFICI (NTC 2018)	84
FIGURA 60: CARTA CARTE DELLE FREQUENZE NATURALI DEL TERRENO.....	85

TAVOLE ALLEGATE

- Tavole da 1.1 a 1.5 - Carta delle indagini;
- Tavole da 2.1 a 2.5 - Carta geologico-tecnica;
- Tavole da 3.1 a 3.5 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica;
- Tavole da 4.1 a 4.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - F.A.P.G.A.;
- Tavole da 5.1 a 5.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - $FH0.1-0.5$;
- Tavole da 6.1 a 6.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - $FH0.5-1.0$;
- Tavole da 7.1 a 7.5 - Carta delle frequenze naturali dei terreni;
- Tavole da 8.1 a 8.5 - Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s);
- Tavole da 9.1 a 9.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - $FH0.5-1.5$;
- Tavole da 10.1 a 10.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - $SA0.1-0.5$;
- Tavole da 11.1 a 11.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - $SA0.4-0.8$;
- Tavole da 12.1 a 12.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - $SA0.7-1.1$;
- Tavole da 13.1 a 13.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - $SA0.5-1.5$;
- Tavole da 14.1 a 14.5 - Carta di microzonazione sismica - Livello 2 - H_{ms} .

1 INTRODUZIONE

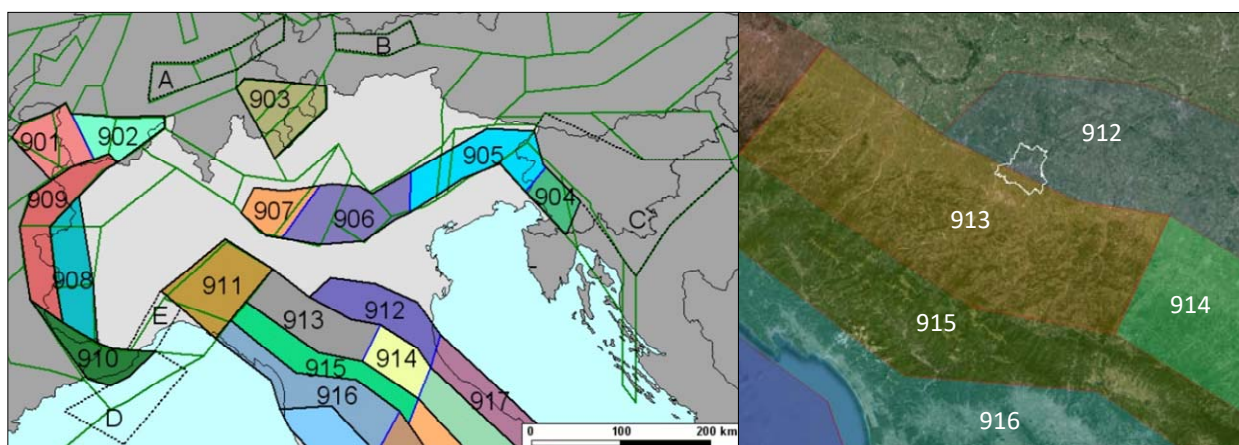
Il presente lavoro costituisce un aggiornamento dello studio di microzonazione sismica del territorio comunale di Modena eseguito nel 2016 per il quale la R.E.R. ha rilasciato in data 11/08/2016 (PG.2016.0577359) certificato di conformità agli "indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" e agli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica", secondo quanto previsto dall'OCDPC 52/2013 e dalla DGR 1919/2013.

In particolare si è fatto riferimento all'aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", assunto con DGR n° 630 del 29/04/2019.

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

La valutazione del rischio sismico di un territorio prevede, inizialmente, la verifica della sua collocazione nell'ambito della zonazione sismogenetica del territorio nazionale denominata ZS9 (C. Meletti e G. Valensise, 2004) (FIGURA 1). Tale zonazione si basa sull'analisi cinematica degli elementi geologici cenozoici e quaternari coinvolti nella dinamica delle strutture litosferiche profonde e della crosta superficiale. Nell'ambito di tale zonazione, a differenza di quanto contenuto nelle versioni precedenti, le zone sorgenti sono state ridisegnate in riferimento alle sorgenti sismogenetiche, sismicità storica e strumentale, ricomprendendo cautelativamente le aree circostanti sulle quali si possono sviluppare effetti di propagazione della pericolosità sismica. Il territorio nazionale risulta suddiviso in 42 zone-sorgente. Il territorio comunale di Modena si colloca, prevalentemente, all'interno della Zona sismogenetica 912 denominata "Dorsale Ferrarese" che rappresenta la fascia più esterna della fascia in compressione dell'arco appenninico settentrionale con la presenza di alcune importanti linee sismotettoniche ed all'interno della quale, al di sotto di spesse coltri di sedimenti alluvionali, sono presenti imponenti strutture compressive.

FIGURA 1: ZONAZIONEISMOGENETICA ZS9



Una porzione meridionale del territorio si colloca all'interno della Zona sismogenetica 913 denominata "Appennino Emiliano-Romagnolo" che costituisce una fascia di transizione nella quale convivono meccanismi di fagliazione diversi, essenzialmente compressivi a Nord-Ovest e distensivi a Sud-Est.

In FIGURA 2 è riportata una tabella relativa alle zone sismogenetiche 912 e 913, con i dati di riferimento pubblicati dal gruppo di lavoro dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (marzo 2004) in termini di numero di eventi distinti per classi di magnitudo, magnitudo massima, classi di profondità e profondità efficace.

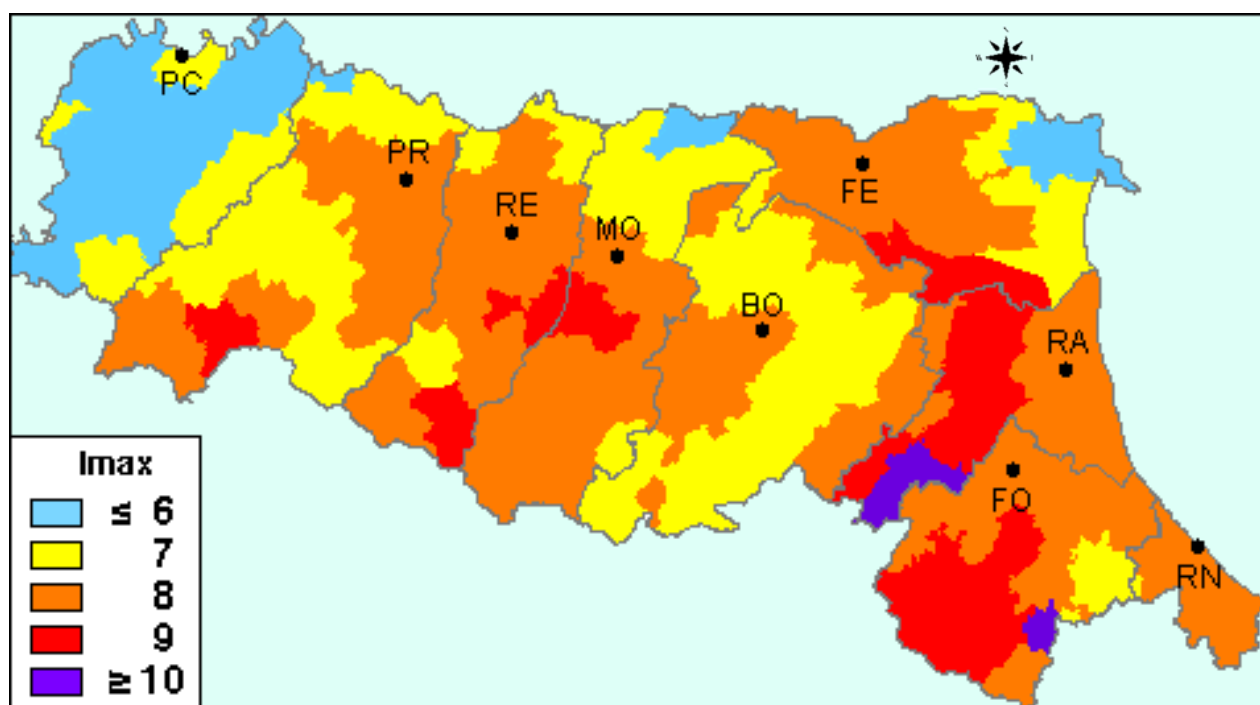
FIGURA 2: DETTAGLI EVENTI NELLE ZONE SISMOGENETICHE 912 E 913

Zona	Numero eventi Md>2	Numero eventi Md>2.5	Numero eventi Md>3	Magnitudo massima Md	Classe di profondità (km)	Profondità efficace (km)
912	180	141	54	4.6	5-8	7
913	767	362	100	4.8	12-20	13

La magnitudo è un parametro importante nella valutazione del rischio sismico in quanto collegata al possibile livello di danneggiamento atteso in un territorio misurando direttamente gli effetti di un terremoto sulle costruzioni, sull'uomo e sull'ambiente e classificandoli in dodici gradi di intensità attraverso la scala Mercalli.

In figura 3 viene riportata la cartografia delle massime intensità macrosismiche osservate nella Regione Emilia-Romagna e valutate a partire dalla banca dati macrosismici del GNDT e dai dati del Catalogo dei Forti Terremoti in Italia di ING/SGA (da D. Molin, M. Stucchi e G. Valensise), da cui si evince che il comune di Modena ricade in un settore con valori di I_{max} pari a 8.

FIGURA 3: MASSIME INTENSITÀ MACROSISMICHE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA



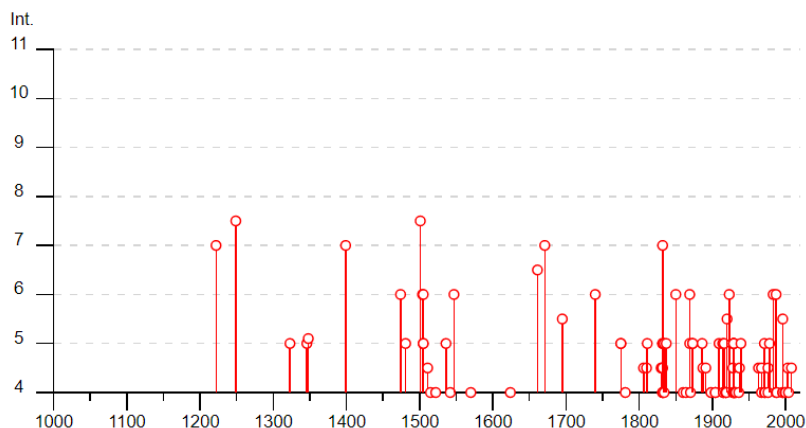
In FIGURA 5 e in FIGURA 5 è riportata la storia sismica di Modena. Si individuano 139 episodi sismici principali con risentimenti che raggiungono una intensità macrosismica massima di 10.

FIGURA 4: STORIA SISMICA DI MODENA (DA INGV - DBMI15)

Seismic history of Modena - [44.647, 10.925] - Total number of earthquakes: 139												
Effects	Earthquake occurred:											
Is (MCS)	Data	Ax	Np	Io	Mw	Is (MCS)	Data	Ax	Np	Io	Mw	
7	1222 12 25 12:30	Basso Bresciano	18	07-ago	5.84 ±0.56	2	1899 06 26 23:17:22	Valle del Bisenzio	138	7	5.06 ±0.15	
07-ago	1249 09	Modena	4	06-lug	4.93 ±0.34	3	1901 10 30 14:49:58	Salò	190	8	5.70 ±0.10	
5	1323 02 25 19:00	Bologna	5		4.30 ±0.34	NF	1903 07 27 03:46	LUNIGIANA	79	07-ago	5.25 ±0.17	
5	1348 01 25 15:30	Carinzia	58	09-ott	7.02 ±0.18	4	1904 02 25 18:47:50	Reggiano	62	6	5.05 ±0.18	
3	1349 09 09 08:15	Viterbese-Umbria	9			4	1904 06 10 11:15:28	Frignano	102	6	5.03 ±0.18	
7	1399 07 20 23:00	Modenese	6	7	5.14 ±0.34	NF	1904 11 17 05:02	Pistoiese	204	7	5.15 ±0.14	
NR	1438 06 11 02:00	Parmense	10	8	5.57 ±0.34	RS	1905 11 26 06:48:44	Irpina	136	07-ago	5.21 ±0.13	
NR	1465 04 07 15:30	Pianura Padana	11	05-giu	4.51 ±0.34	03-apr	1908 06 02 22:30	FRIGNANO	18	04-mag	4.52 ±0.25	
6	1474 03 11 20:30	MODENA	12	5	4.30 ±0.34	5	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	799	06-lug	5.53 ±0.09	
07-ago	1501 06 05 10:00	Appennino modenese	20	9	5.99 ±0.32	RS	1909 08 25 00:22	MURLO	283	07-ago	5.37 ±0.10	
6	1504 12 31 04:00	Bolognese	15			NF	1910 03 22 23:29	Bassa modenese	15	5	4.30 ±0.34	
6	1505 01 03 02:00	Bolognese	31	8	5.57 ±0.25	2	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	181	7	5.28 ±0.11	
5	1505 01 20 23:50	Bolognese	11			RS	1914 10 26 03:43	TAVERNETTE	67	7	5.41 ±0.16	
5	1505 01 27 02:40	Bolognese	2			5	1914 10 27 09:22:36	Garfagnana	618	7	5.76 ±0.09	
04-mag	1511 03 26 14:40	Slovenia	66	9	6.98 ±0.17	4	1915 01 13 06:52	Avezzano	1041	11	7.00 ±0.09	
4	1522 10 05 00:10	Pianura Padana	6	5	4.80 ±0.54	4	1915 10 10 23:08	REGGIO EMILIA	30	6	5.02 ±0.22	
5	1536 08 17 00:05	Appennino tosco-emiliano	10	06-lug	5.29 ±0.56	3	1916 05 17 12:49:50	Alto Adriatico	132		5.95 ±0.14	
4	1542 06 13 02:15	Mugello	46	9	5.94 ±0.21	5	1916 08 16 07:06	Alto Adriatico	257		6.14 ±0.14	
NR	1545 06 09 15:45	Valle del Taro	8	07-ago	5.25 ±0.78	4	1918 05 06 08:05	Reggiano	8	05-giu	4.52 ±0.69	
6	1547 02 10 13:20	Reggio Emilia	13	7	5.14 ±0.34	4	1918 11 10 15:12:28	Appennino romagnolo	187	9	5.88 ±0.11	
F	1561 11 24 01:25	Ferrara	5	05-giu	4.51 ±0.34	4	1919 06 29 15:06:12	Mugello	566	10	6.29 ±0.09	
4	1570 11 17 19:10	Ferrara	60	07-ago	5.46 ±0.25	05-giu	1920 09 07 05:55:40	Garfagnana	756	10	6.48 ±0.09	
NR	1591 05 24	REGGIO EMILIA	4	6	4.72 ±0.34	6	1923 06 28 15:11:30	FORMIGINE	22	6	4.88 ±0.24	
F	1608 01 06 22:20	Reggio Emilia	2	05-giu	4.51 ±0.34	3	1926 01 01 18:04:06	Slovenia	63	07-ago	5.85 ±0.18	
4	1624 03 19 19:45	Argentina	18	07-ago	5.47 ±0.49	4	1928 06 13 08:00	CARPI	35	6	4.78 ±0.23	
06-lug	1661 03 21 23:00	Modenese	4	06-lug	4.93 ±0.34	4	1929 04 10 05:43:12	Bolognese	87	7	5.03 ±0.13	
F	1661 03 22 12:50	Appennino romagnolo	79	9	6.09 ±0.16	NF	1929 04 12 00:32:12	Bolognese	7		5.09 ±0.37	
7	1671 06 20 10:00	Modena-Reggio Emilia	8	7	5.25 ±0.72	5	1929 04 19 04:15:22	Bolognese	82			
F	1779 07 14 19:30	Bolognese	17			5	1929 04 20 01:09:46	Bolognese	109	7	5.34 ±0.13	
F	1779 11 23 18:30	Bolognese	14	5	4.99 ±0.31	4	1929 04 22 08:25:33	Bolognese	41			
F	1779 12 24 17:00	Pistoiese	9	05-giu	4.64 ±0.39	5	1929 04 29 18:35:59	Bolognese	45			
4	1781 04 04 21:20	Romagna	96	09-ott	5.94 ±0.17	5	1929 05 11 19:22:48	Bolognese	64			
04-mag	1806 02 12	NOVELLARA	28	7	5.19 ±0.39	4	1931 06 10 17:01	Modenese	14	4	4.42 ±0.22	
04-mag	1810 12 25 00:45	NOVELLARA	33	6	5.29 ±0.22	3	1934 06 13 09:06:26	BORGIO VAL DI TARO	29	6	4.99 ±0.24	
5	1811 07 15 22:44	SASSUOLO	21	06-lug	5.25 ±0.40	4	1936 10 18 03:10:12	BOSCO CANSIGLIO	267	9	6.12 ±0.09	
3	1818 12 09 18:55	Parmense	26	7	5.28 ±0.35	04-mag	1937 12 10 18:03:46	APP. MOESENSE	28	6	5.17 ±0.25	
3	1828 10 09 02:20	Valle Staffora	114	8	5.76 ±0.15	5	1939 10 15 14:05	Garfagnana	62	06-lug	5.08 ±0.16	
4	1830 01 26 04:30	Appennino bolognese	11	05-giu	4.74 ±0.65	4	1951 05 15 22:54	LODIGIANO	154	06-lug	5.39 ±0.14	
3	1831 07 14 15:30	Reggiano	8	05-giu	4.69 ±0.44	3	1957 08 27 11:54:40	ZOCCA	58	5	4.65 ±0.21	
04-mag	1831 09 11 18:15	Reggiano	25	07-ago	5.54 ±0.32	F	1963 07 19 05:45:28	Mar Ligure	463		6.02 ±0.14	
4	1832 03 11 06:45	Carpi (MO)	14	5	4.80 ±0.37	NF	1965 11 09 15:35:01	ALTA V. SECCHIA	32	5	4.74 ±0.25	
04-mag	1832 03 11 08:45	Reggiano	14			4	1967 04 03 16:36:18	Reggiano	47	05-giu	4.69 ±0.19	
7	1832 03 13 03:30	Reggiano	98	07-ago	5.53 ±0.18	4	1967 12 30 04:19:20	BASSA PADANA	40	6	5.24 ±0.19	
4	1834 02 14 13:15	Valle del Taro-Lunigiana	112	9	5.83 ±0.15	5	1971 07 15 01:33:23	Parmense	229	8	5.64 ±0.09	
3	1834 07 04 00:45	Lunigiana-Parmense	24			4	1971 09 11 23:18:12	Correggio	15	5	4.23 ±0.31	
5	1834 10 04 19:00	Bolognese	12	6	4.85 ±0.43	04-mag	1976 05 06 20:00:12	Friuli	770	09-ott	6.46 ±0.09	
5	1837 04 11 17:00	Alpi Apuane	60	9	5.81 ±0.20	3	1976 09 11 16:35:02	Friuli	40		5.63 ±0.09	
NR	1841 10 15 22:00	SANGUINETTO	19	5	4.19 ±0.44	4	1976 09 15 09:21:19	Friuli	54		5.98 ±0.15	
F	1846 08 14 12:00	Toscana settentrionale	122	9	5.91 ±0.13	5	1978 12 25 22:53:42	Bassa mantovana	28	5	4.22 ±0.22	
6	1850 09 18 06:20	Modenese	7	5	4.30 ±0.34	NF	1980 11 23 18:34:52	Irpina-Basilicata	1394	10	6.89 ±0.09	
F	1857 02 01	PARMENSE	22	06-lug	5.09 ±0.25	04-mag	1980 12 23 12:01:06	Piacentino	38	06-lug	4.60 ±0.09	
4	1864 03 15	ZOCCA	13	06-lug	4.90 ±0.71	6	1983 11 09 16:29:52	Parmense	850	06-lug	5.06 ±0.09	
6	1869 06 25 13:58	Media valle del Reno	18	07-ago	5.42 ±0.48	NF	1984 04 29 05:02:60	GUBBIO/VALFABBRICA	709	7	5.65 ±0.09	
4	1870 10 30 18:34	Romagna	41	8	5.58 ±0.27	02-mar	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	604	6	4.61 ±0.10	
02-mar	1873 03 12 20:04	Marche meridionali	196	8	5.95 ±0.10	6	1987 05 02 20:43:53	Reggiano	802	6	4.74 ±0.09	
5	1873 05 16 19:35	REGGIANO	15	06-lug	5.09 ±0.59	04-mag	1987 05 08 11:10:27	Bassa modenese	17	6	4.57 ±0.23	
5	1873 06 29 03:58	Bellunese	199	09-ott	6.32 ±0.11	2	1988 02 08 11:24:46	Garfagnana	75	6	4.53 ±0.13	
03-apr	1873 09 17	LIGURIA ORIENTALE	67	06-lug	5.43 ±0.15	4	1988 03 15 12:03:18	Reggiano	160	6	4.66 ±0.12	
F	1874 10 07	IMOLESE	60	7	5.02 ±0.18	3	1992 04 17 11:59:09	Montevoglio	56	04-mag	4.32 ±0.18	
3	1881 01 24 16:14	Bolognese	38	7	5.16 ±0.30	3	1995 08 24 17:27:34	Appennino bolognese	56	6	4.48 ±0.09	
F	1885 02 26 20:48	SCANDIANO	78	6	5.19 ±0.15	02-mar	1995 10 10 06:54:23	LUNIGIANA	341	7	4.85 ±0.09	
5	1886 10 15 02:20	COLLECCHIO	44	6	4.70 ±0.24	05-giu	1996 10 15 09:56:02	Correggio	135	7	5.41 ±0.09	
04-mag	1887 02 23 05:21:50	Liguria occidentale	1516	6	6.97 ±0.15	3	1997 05 12 22:13:51	Reggiano	56	04-mag	4.22 ±0.27	
04-mag	1891 06 07 01:06:14	Valle d'Illasi	403	08-set	5.86 ±0.06	3	1997 09 26 09:40:27	Appennino umbro-marchigiano	869	08-set	6.01 ±0.09	
3	1892 01 05	GARDA OCC.	100	06-lug	5.02 ±0.15	03-apr	1998 02 21 02:21:13	Reggiano	104	5	4.34 ±0.17	
NF	1894 02 09 12:48:05	Valle d'Illasi	116	6	4.77 ±0.15	3	1998 03 26 16:26:17	Appennino umbro-marchigiano	408	6	5.29 ±0.09	
3	1894 11 27 05:07	FRANCIACORTA	183	6	5.07 ±0.10	4	1999 07 07 17:16:13	Frignano	32	5	4.70 ±0.09	
3	1895 05 18 19:55:12	Fiorentino	401	8	5.43 ±0.08	4	2000 06 18 07:42:08	Parmense	300	05-giu	4.43 ±0.09	
4	1898 03 04 21:05	Valle del Parma	313	07-ago	5.41 ±0.09	04-mag	2003 09 14 21:42:53	Appennino bolognese	133	6	5.29 ±0.09	

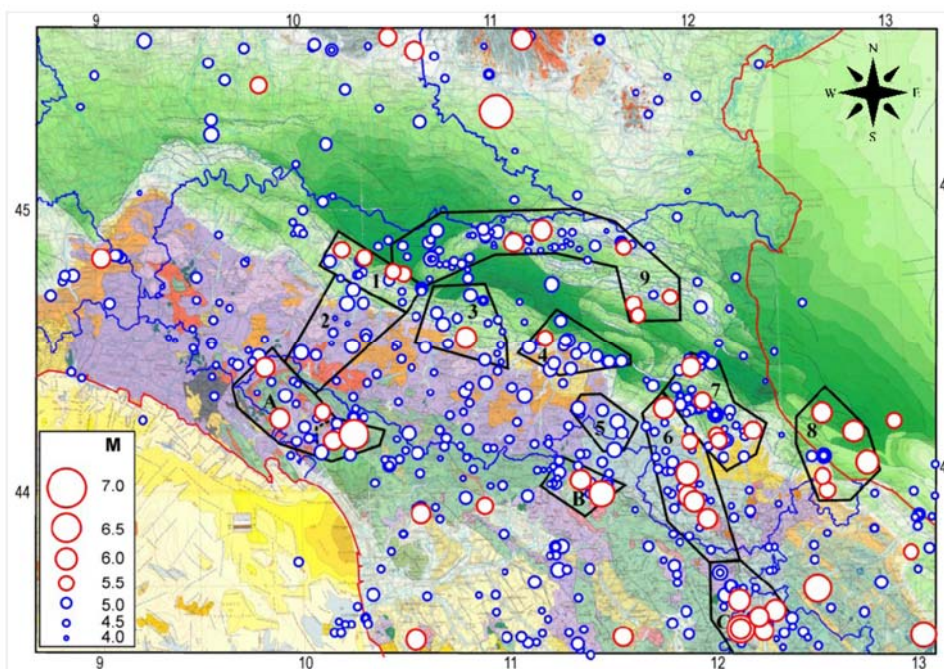
Data	Data del terremoto
Ax	Area epicentrale, area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto
Np	Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto
Io	Intensità macrosismica epicentrale, da CPTI15, espressa in scala MCS, Mercalli-Cancani-Sieberg]
Mw	Magnitudo momento, da CPTI15
Data	Data del terremoto
Ax	Area epicentrale, area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto
Np	Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto
Io	Intensità macrosismica epicentrale, da CPTI15, espressa in scala MCS, Mercalli-Cancani-Sieberg]
Mw	Magnitudo momento, da CPTI15

FIGURA 5: GRAFICO STORIA SISMICA DEL COMUNE DI MODENA



Lo studio effettuato dalla Regione Emilia-Romagna, Regione Toscana e Università di Siena nel 2013 “*Assetto tettonico e potenzialità sismogenetica dell’Appennino Tosco-Emiliano-Romagnolo e Val Padana*”, ha ridefinito le intensità massime attese per tutti i comuni della Regione Emilia Romagna, integrando i dati macrosismici esistenti provenienti dal catalogo DBMI15 (Locati et alii, 2011, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15/>) con le informazioni derivate dalle conoscenze del quadro tettonico attuale. A seguito delle indagini condotte, gli Autori individuano 9 zone sismogenetiche (FIGURA 6).

FIGURA 6: GEOMETRIA DELLE 9 ZONE SISMOGENETICHE PROPOSTE (CONTORNI NERI) E SISMICITÀ STORICA DALL’ANNO 1000.



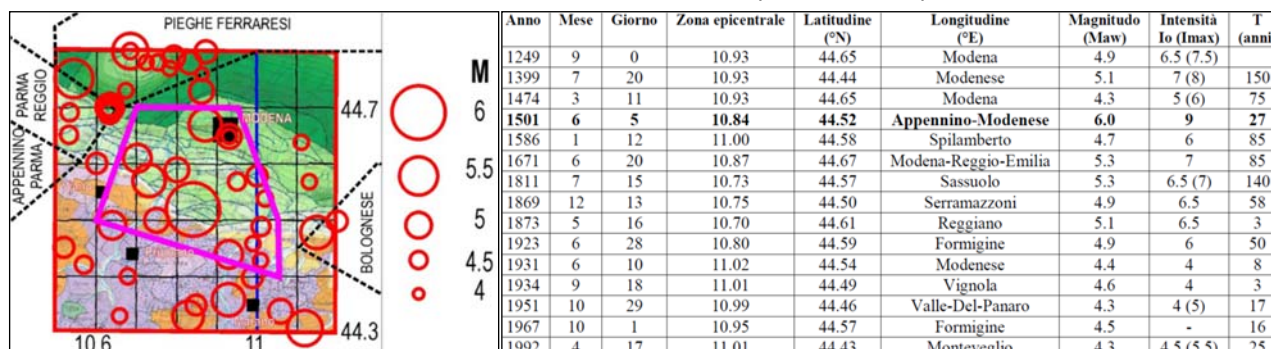
In rosso sono evidenziati gli eventi sismici con $M \geq 5.5$.

- 1) Parma-Reggio Emilia,
- 2) Appennino Parmense,
- 3) Modenese,
- 4) Bolognese,
- 5) Sillaro,
- 6) Appennino romagnolo,
- 7) Forlivese,
- 8) Riminese,
- 9) Pieghe Ferraresi.

Le lettere A, B e C indicano le zone sismiche toscane (rispettivamente Lunigiana-Garfagnana, Mugello e Alta Val Tiberina (da “*Assetto e potenzialità sismogenetica dell’Appennino Tosco-Emiliano-Romagnolo e Val Padana*”, Regione Emilia-Romagna, Regione Toscana, Università di Siena, 2013)

Il territorio Comunale di Modena ricade parzialmente nella zona sismogenetica 3 denominata "Modenese", che presenta una storia sismica eterogenea, in cui si rileva una scossa di $I_{max} = 9$ ($M=6$) circondata da un certo numero di scosse di intensità significativamente più bassa (FIGURA 7). L'origine riferimento non è stata trovata.).

FIGURA 7: I TERREMOTI AVVENUTI DALL'ANNO 1000 NEL MODENESE (CERCHI ROSSI)



La linea blu indica il contorno della zona dove si assume una $I_{max} = 7.5$

La linea rosa comprende la zona dove si assume una $I_{max} = 9$

Al fine di non estendere la potenzialità della scossa principale (1501) a tutta la zona adottata, si è ritenuto di assumere un valore di $I_{max} = 7/8$ per tutta la zona.

Il risultato delle analisi effettuate è stato quindi riferito alle 9 province dell'Emilia-Romagna, proponendo per ogni comune un valore di I_{max} confrontato con i valori di $I_{max}(a)$ suggeriti da Molin et alii (1996), (b) ricavati dal DBMI15, (c) proposti da altri autori.

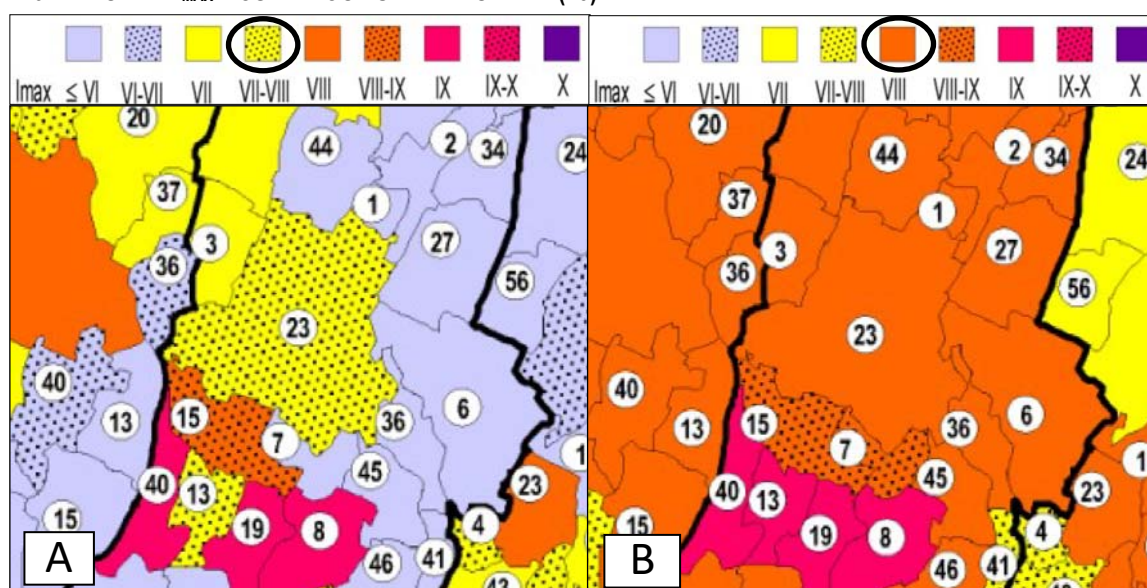
Per il Comune di Modena si è ottenuto un valore di I_{max} di 7-8 come riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e FIGURA 8 e FIGURA 9.

FIGURA 8: INTENSITÀ MASSIMA ED ALTRE INFORMAZIONI MACROSISMICHE PER IL COMUNE DI MODENA

MODENA		Intensità massima				Numero di risentimenti da DBMI15					
N	Comune	NP	MO	DB	AA	Anno	$9 \leq I \leq 10$	$8 \leq I \leq 9$	$7 \leq I \leq 8$	$6 \leq I \leq 7$	$5 \leq I \leq 6$
23	Modena	8	8	7-8	8M	1249-1501			6	10	25

NP=intensità massima proposta; MO=intensità massima proposta da Molin et alii (1996); DB=Intensità massima ricavata dal catalogo DBMI15 (Locati et alii, 2011); AA=massima intensità suggerita da altri lavori (G= Giudoboni et alii, 2005; M=Magri e Molin, 1986) o da scosse riportate dal catalogo CPTI15 (C=Rovida et alii, 2011)

FIGURA 9: VALORI DI I_{max} MCS DEL COMUNE DI MODENA (23)

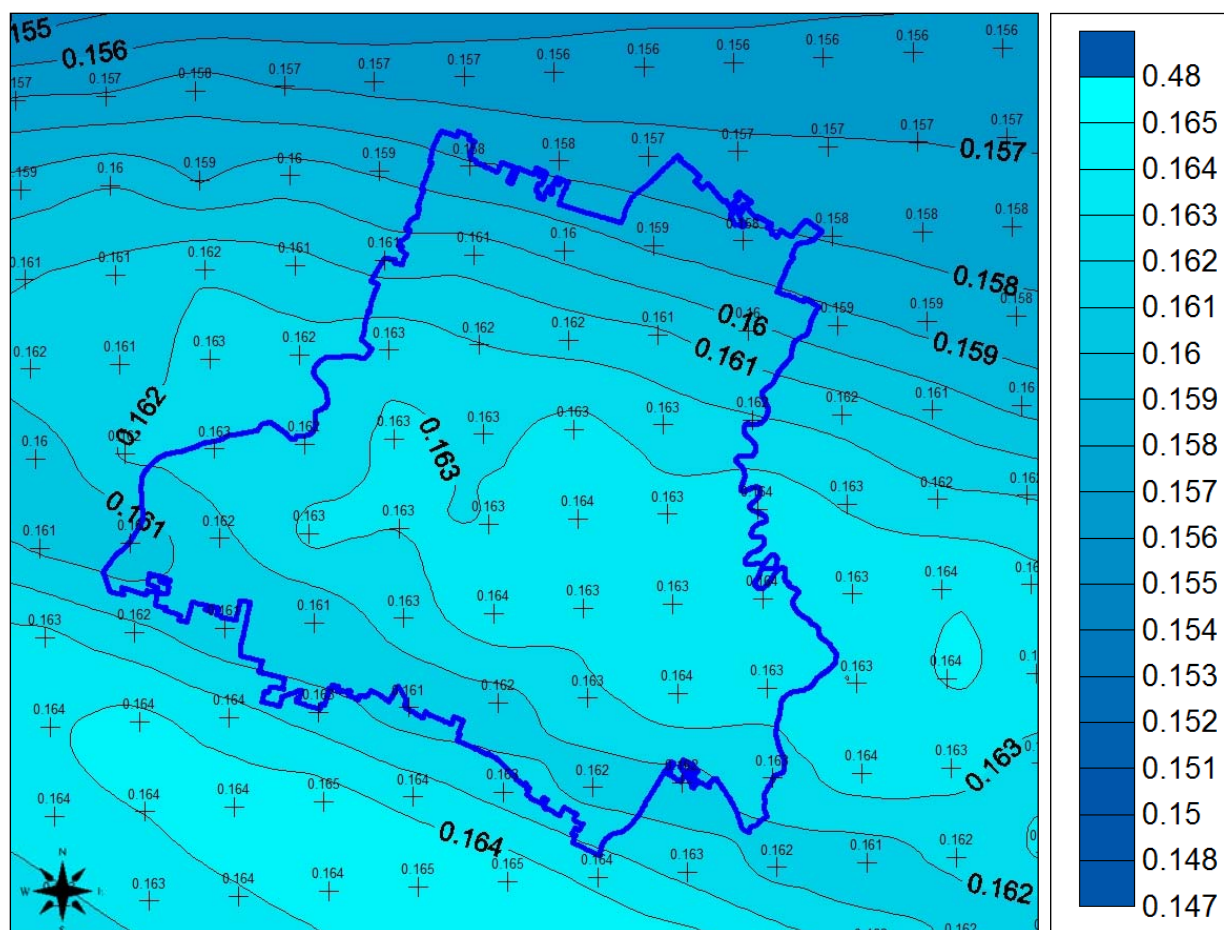


A=Valori desunti dal Catalogo di dati macrosismici DBMI15;

B=Valori proposti nello studio "Assetto e potenzialità sismogenetica dell'Appennino Tosco-Emiliano-Romagnolo e Val Padana", Regione Emilia-Romagna, Regione Toscana, Università di Siena, 2013.

La pericolosità sismica di un territorio consiste nella valutazione dello scuotimento del suolo atteso con una certa probabilità di eccedenza in un dato intervallo temporale, ovvero della probabilità che un certo valore di scuotimento si verifichi in un dato intervallo di tempo. Con l'Ordinanza PCM 3274/2003 (GU n. 108 dell'8 maggio 2003), sono state definite le mappe di pericolosità sismica del territorio nazionale attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa (PGA) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni) su suolo rigido e pianeggiante, valutata su una griglia di calcolo che ha una densità di 20 punti per grado corrispondente, quindi, a circa un punto ogni 5 km.

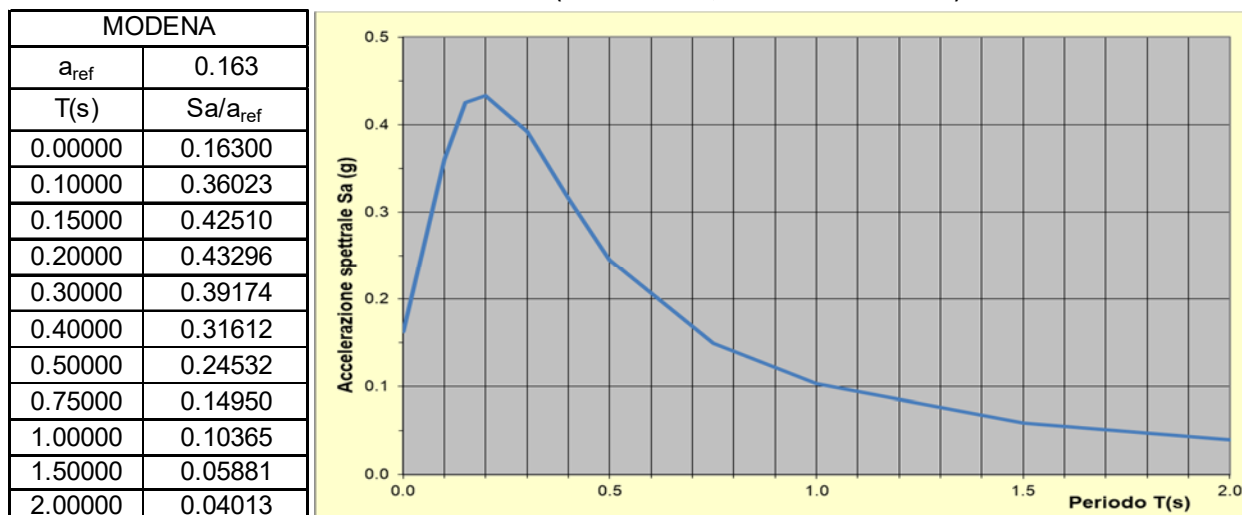
FIGURA 10: VALORI DI RIFERIMENTO DELL'ACCELERAZIONE SU SUOLO RIGIDO PER IL COMUNE DI MODENA



I valori di accelerazione di picco su suolo rigido (a_g) attesi sul territorio comunale di Modena sono compresi tra 0,158 e 0,163 g con la distribuzione in fasce riportata nella FIGURA 10.

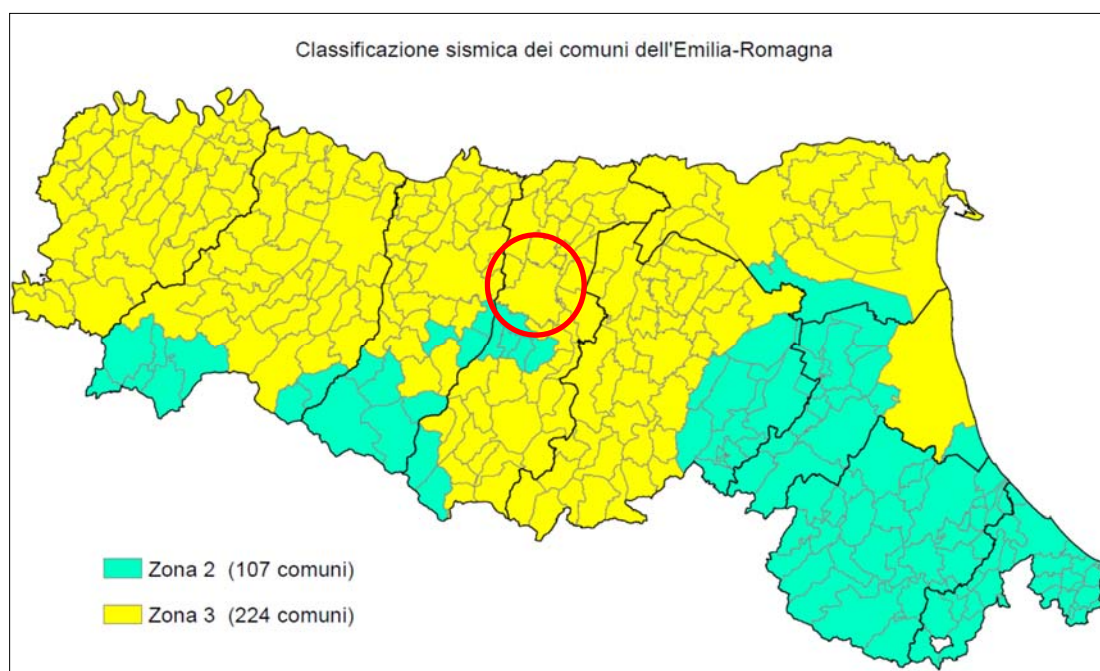
Il valore della a_g di riferimento riportato nell'allegato A4 della Delibera dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n° 112/2007, corrisponde, per il comune di Modena, a 0,163 g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Lo spettro di risposta di riferimento al bedrock sismico o suolo A è visualizzato nella figura seguente.

FIGURA 11: SPETTRO DI RISPOSTA NORMALIZZATO (TR = 475 ANNI, SMORZAMENTO = 5%) PER MODENA



Il comune di Modena appartiene alla zona 3 a sismicità bassa così come definito in base alla pericolosità sismica dall'Ordinanza del PCM n. 3274 / 2003 (Allegato 1, punto 3 "prima applicazione") e dalla nuova classificazione della Regione Emilia-Romagna (DGR n° 1164 del 23/07/2018).

FIGURA 12: RICLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'EMILIA-ROMAGNA, ORDINANZA DEL PCM N. 3274/2003 – AGGIORNAMENTO LUGLIO 2018



3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

Il territorio del Comune di Modena risulta interamente compreso nella Pianura Padana. La rete idrografica, oltre ai fiumi principali Secchia e Panaro, è rappresentata da una serie di torrenti appenninici minori tra cui la fossa di Spezzano, affluente del F. Secchia, il Cerca-Naviglio, il Grizzaga e il Tiepido affluenti del Fiume Panaro. Da un punto di vista geomorfologico ricomprende un tratto dell'alta pianura, per poi svilupparsi a valle nella media e bassa pianura regolarmente inclinate verso NE. Le due zone sono caratterizzate da differenti gradienti della superficie topografica (figure 13 e 14); l'alta pianura presenta pendenze dell'ordine di 0.5-0.6%, mentre la media e bassa pianura del 0.1-0.2%, con la fascia di transizione compresa tra le isoipse 35 e 45 m s.l.m.m.

FIGURA 13: CURVE DI LIVELLO CON EQUIDISTANZA PARI A 1 METRO.

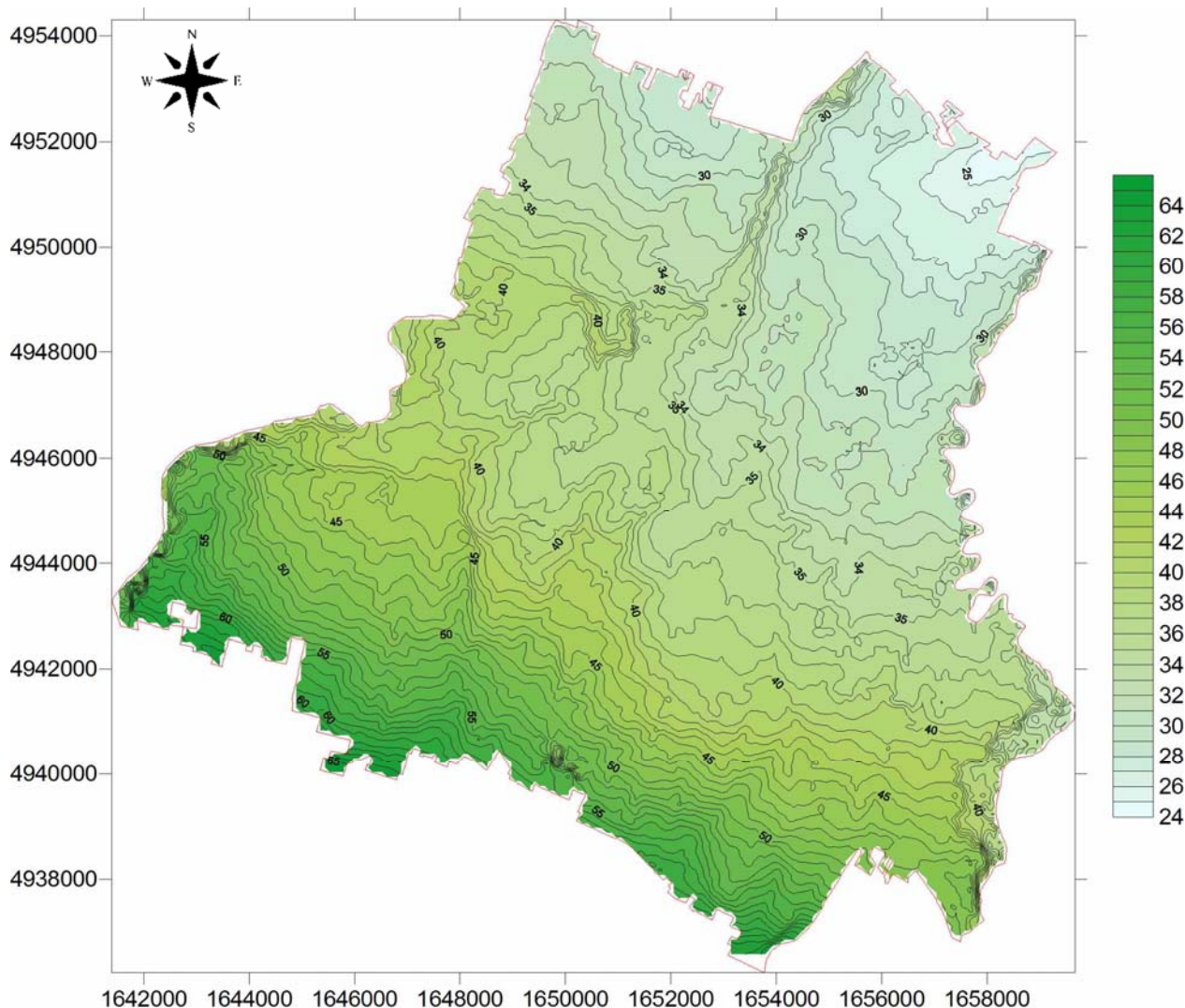
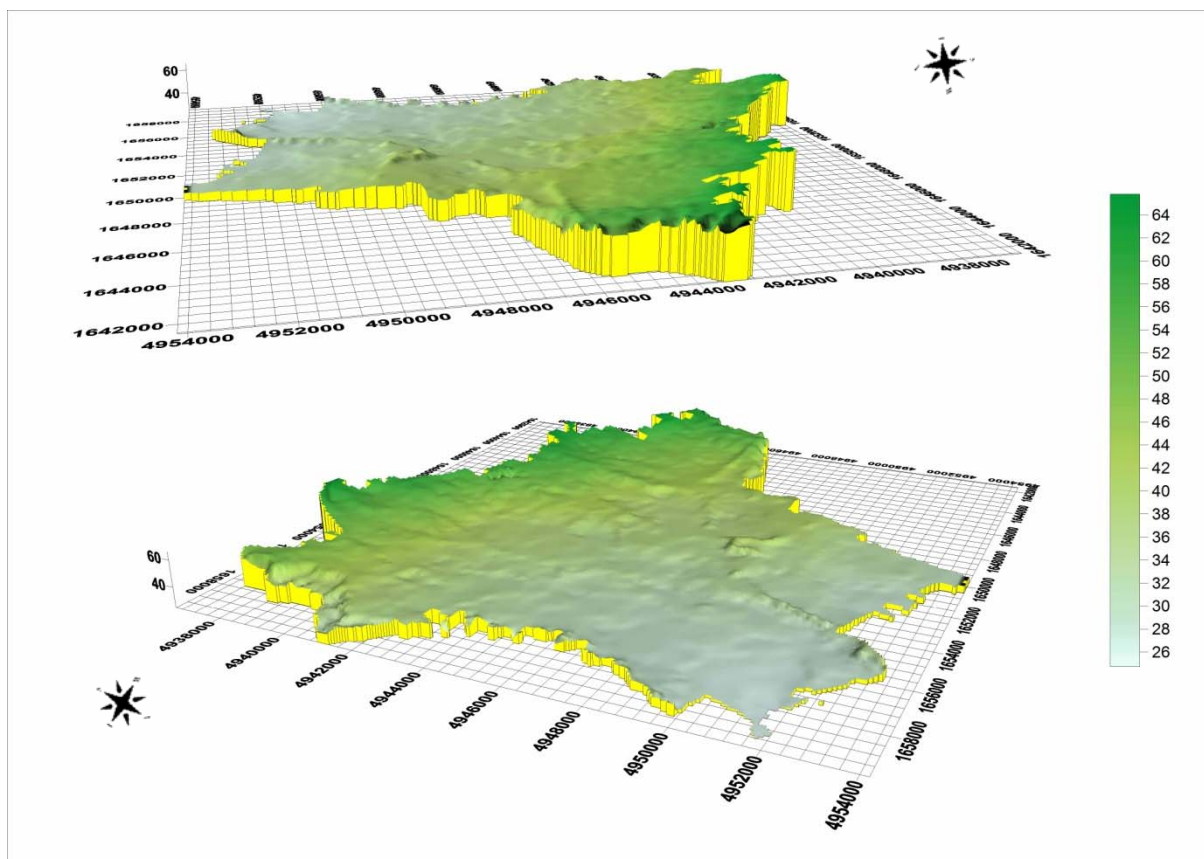


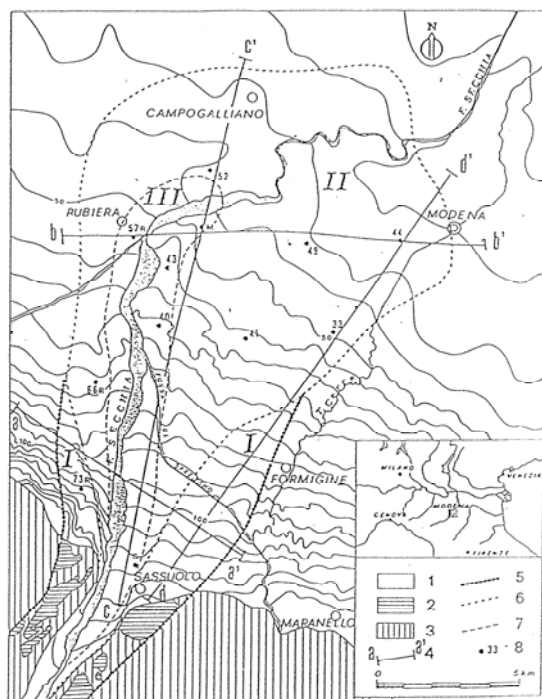
FIGURA 14: MODELLO DTM DEL TERRITORIO COMUNALE.



Da un punto di vista geomorfologico di evidenziano forme caratteristiche costituite nella zona di alta pianura dalle conoidi alluvionali dei corsi d'acqua principali, di cui quella del F. Secchia ricomprende un esteso settore del territorio Comunale, e in cui si distingue una conoide attuale, recente e antica (FIGURA 15) .

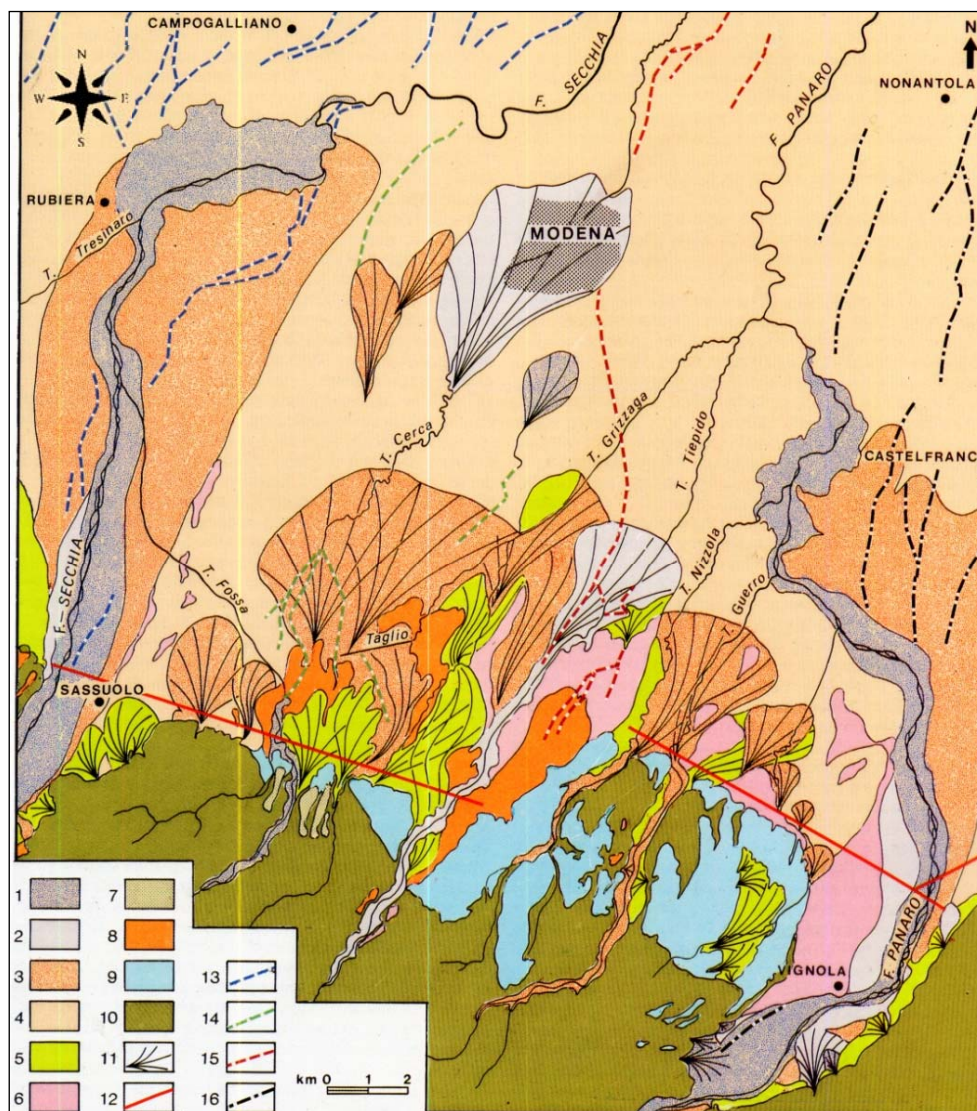
FIGURA 15: PLANIMETRIA DEL F. SECCHIA.

- 1) Alta e media pianura costituita da ghiaia, sabbie, limi e argille;
- 2) Terrazzi collinari di vario ordine con suolo ocraceo;
- 3) Formazioni limo-argillose Plio-quaternarie del margine collinare;
- 4) tracce sezioni litostratigrafiche;
- 5) limite della conoide antica (I);
- 6) limiti della conoide recente (II);
- 7) limiti della conoide attuale (III);
- 8) numero d'ordine pozzi con litostratigrafie.



Nella media e bassa pianura si riconoscono numerosi paleoalvei (figura 16), che morfologicamente costituiscono una forma rilevata ("dosso") che si eleva di qualche metro rispetto alle quote circostanti e allungate anche di chilometri, disposte parallelamente all'idrografia principale, oltre a conoidi alluvionali dei corsi d'acqua minori, tra cui si evidenzia quella del torrente Cerca-Fossa di Spezzano, che è responsabile del sovralluvionamento medioevale della Modena romana ("Mutina").

FIGURA 16: CARTA GEOLOGICA DEL TERRITORIO MODENESE E AREE LIMITROFE (DA GASPERI, 1987)

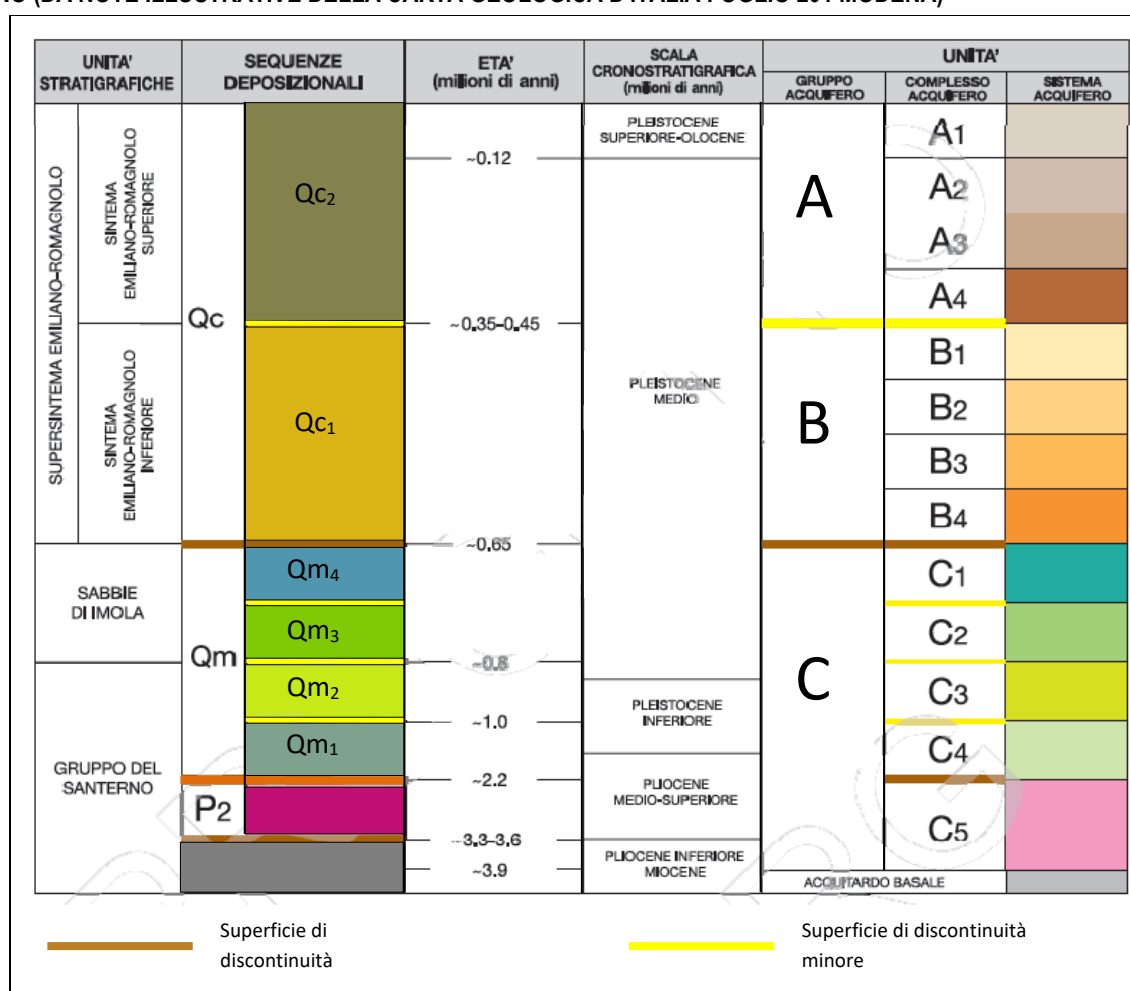


- 1,2, 3 Unità dei corsi d'acqua minori e principali (depositi 1 - tra il XV e XX sec, 2 - durante il medioevo, 3 - tra il neolitico e l'età romana);
- 4 Pianura alluvionale (neolitico-medioevo);
- 5 Unità di Maranello e Savignano (Pre-neolitico);
- 6 Unità di Vignola (Pleistocene sup.);
- 7 Unità di Spezzano (Pleistocene m.);
- 8 Unità di Ubersetto (Pleistocene m.);
- 9 Unità Cà di Sola (tardo Pleistocene inf. - Pleistocene m.);
- 10 Unità marine Pre-Pleistoceniche medie
- 11 Conoidi alluvionali dei corsi d'acqua minori
- 12 Faglie
- 13-16 (13 del F. Secchia, 14 del Torrente Fossa, 15 del Torrente tiepido, 16 del Fiume Panaro).

Da un punto di vista geologico il territorio del Comune di Modena appartiene al bacino sedimentario della Pianura padana, formatosi, a partire dal Miocene, con l'avanzata delle falde appenniniche che ha determinato sprofondamenti flessurali nell'antistante avampaese padano, con il formarsi di un bacino subsidente. In termini stratigrafici (figura 17), a partire dal Pleistocene, inizia un ciclo sedimentario (Qm in Ricci Lucchi te alii, 1982), che porta al colmamento del bacino padano e che si chiude con depositi sabbioso-ciottolosi di spiaggia noti come "Sabbie gialle".

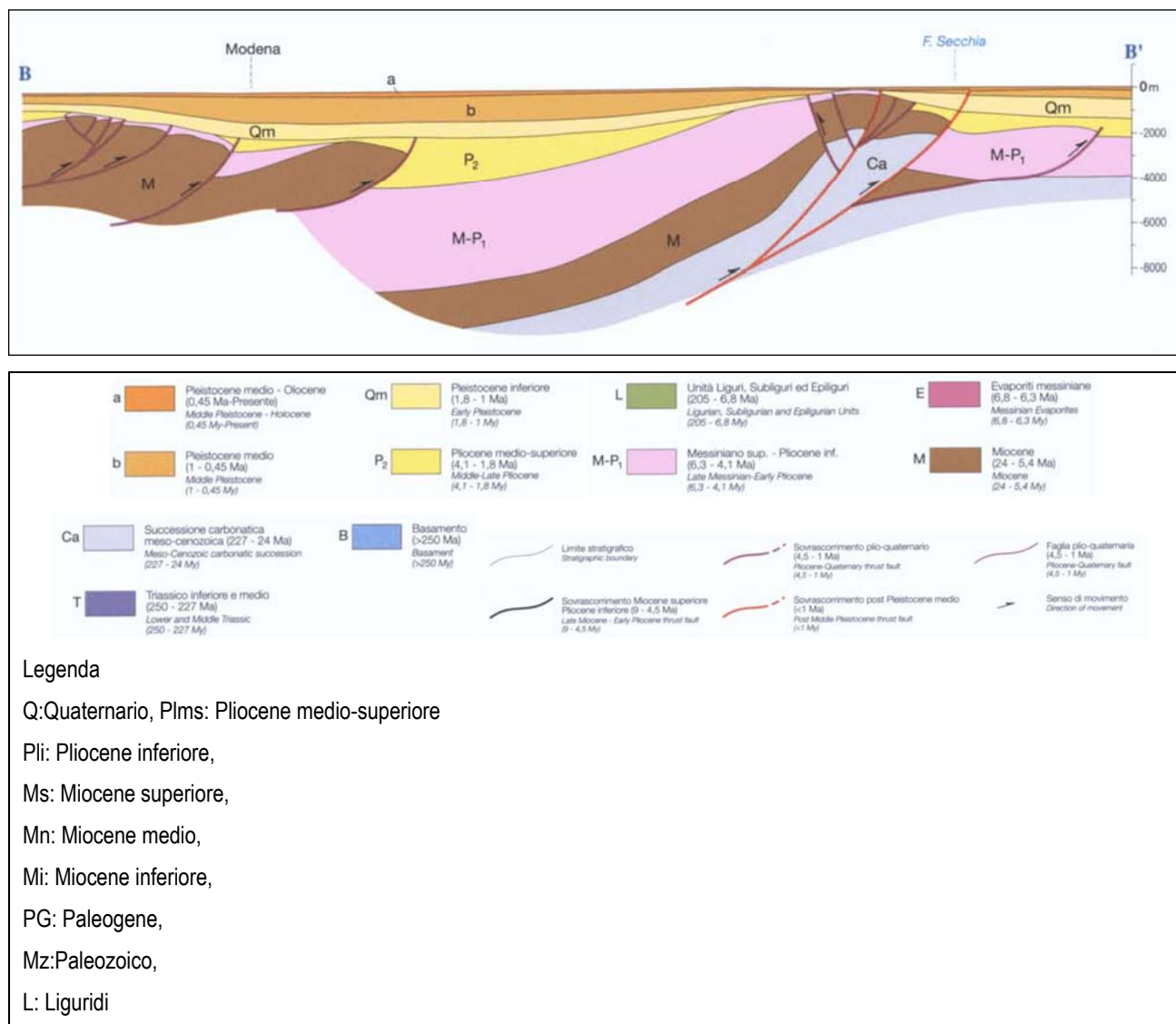
Si evidenzia come il bacino padano sia fortemente coinvolto dalla tettonica appenninica, che porta alla formazione di sistemi di thrust (Castellarin e altri, 1985), a sviluppo planimetrico arcuato, che delimitano strutture positive antiformali (Arco delle pieghe emiliane, Dorsale ferrarese), separate da analoghe strutture sinformi, sulle quali sovrascorrono parzialmente, e che coinvolgono direttamente i sedimenti del Pliocene inferiore e del Pliocene medio superiore. Le strutture padane derivano da una tettonica di embricazione con accavallamenti lungo superfici a basso angolo (20-30°), la cui inclinazione aumenta andando verso sud. Le parti frontali dei sovrascorrimenti sono spesso caratterizzate da pieghe anticlinali fortemente asimmetriche.

FIGURA 17: SCHEMA STRATIGRAFICO E IDROSTRATIGRAFICO DEI DEPOSITI PLIO-QUATERNARI DEL SOTTOSUOLO PADANO (DA NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA FOGLIO 201 MODENA)



Tale situazione è schematizzata dalla sezione geologica della pianura modenese riportata nella figura 18, che parte da Castelnuovo Rangone sino ad oltre il confine Provinciale (ubicazione come da figura 20).

FIGURA 18: SEZIONE GEOLOGICA PROFONDA DELLA PIANURA MODENESE (DA PIERI & GROPPI, 1981)



Al di sopra del quaternario marino si sviluppano i depositi quaternari continentali, che costituiscono un supersistema denominato "Emiliano-Romagnolo" a sua volta suddiviso in due sistemi (*Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore* e *Sistema Emiliano Romagnolo Superiore*) separati da una discontinuità rilevabile nelle aree marginali della pianura legata a una fase tettonica di importanza regionale di sollevamento delle strutture appenniniche, che ha determinato un forte incremento della deposizione grossolana.

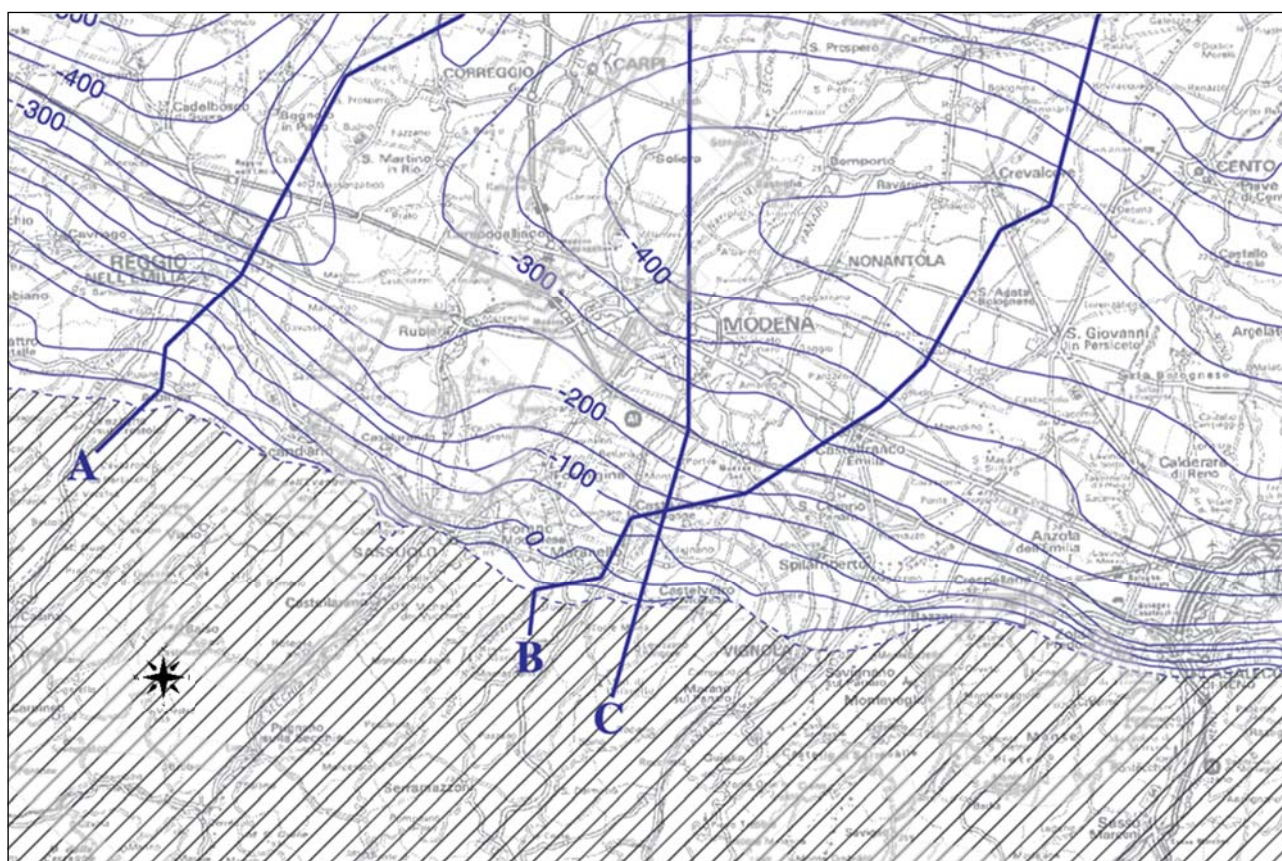
In tale Sistema si individuano cicli deposizionali ("subsistemi") che presentano una porzione inferiore costituita da litologie prevalentemente fini, per lo più argillose e le ghiaie e sabbie, quando presenti, sono spesso canalizzate e comunque molto meno estese di quelle che caratterizzano la parte superiore. Al di sopra di questa, la porzione superiore è caratterizzata da granulometrie più grossolane, limi e sabbie e ghiaie; le ghiaie hanno tetto tabulare e sono molto più estese e potenti rispetto a quelle presenti nella porzione inferiore.

Sono unità cicliche caratterizzate dall'alternarsi di due litologie; le discontinuità che dividono i subsistemi sono rappresentate nelle aree di alta pianura da paleosuoli ben sviluppati legati a periodi di interruzione della sedimentazione talora molto ampia, che hanno consentito la pedogenesi della parte sommitale dei depositi ghiaioso sabbiosi; più a valle la superficie di separazione tra due subsistemi non è più contrassegnata da paleosuoli e la superficie di separazione può essere seguita solo basandosi sulla differenza litologica.

Il sistema emiliano romagnolo inferiore è costituito prevalentemente da depositi fini con gli intervalli ghiaioso sabbiosi confinati a sud della via Emilia, mentre il sistema Emiliano Romagnolo superiore presenta alternanze di sedimenti grossolani e fini che si spingono a nord ben oltre la Via Emilia.

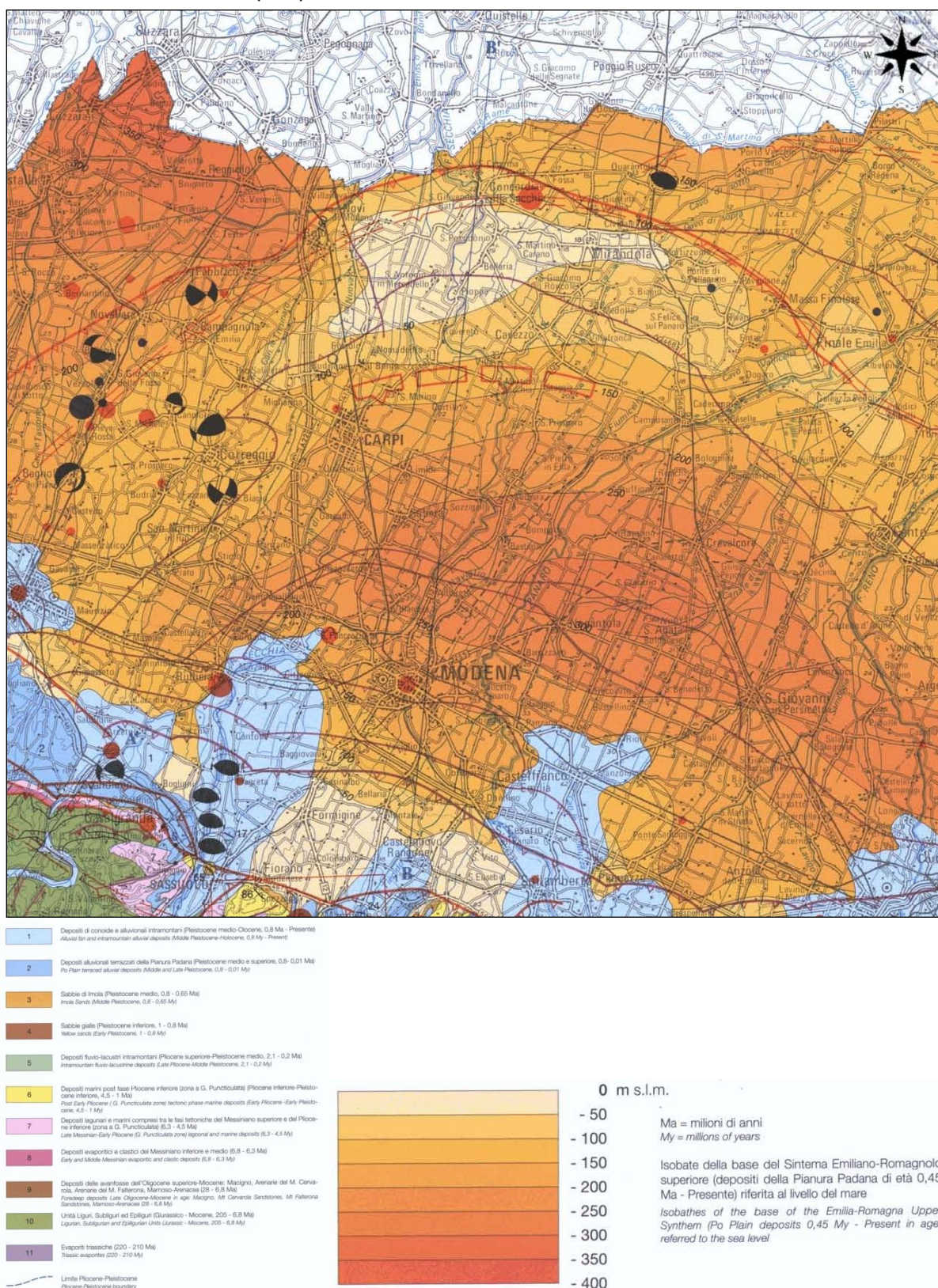
La figura 19 individua la profondità in m. s.l.m del limite basale dei depositi continentali, con spessori di conseguenza variabili spostandoci da Sud verso Nord del territorio Comunale da circa 250 a oltre 450 metri.

FIGURA 19: PROFONDITÀ (IN M S.L.M.) DEL LIMITE BASALE DEI SEDIMENTI CONTINENTALI (DA NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA FOGLIO 201 MODENA).



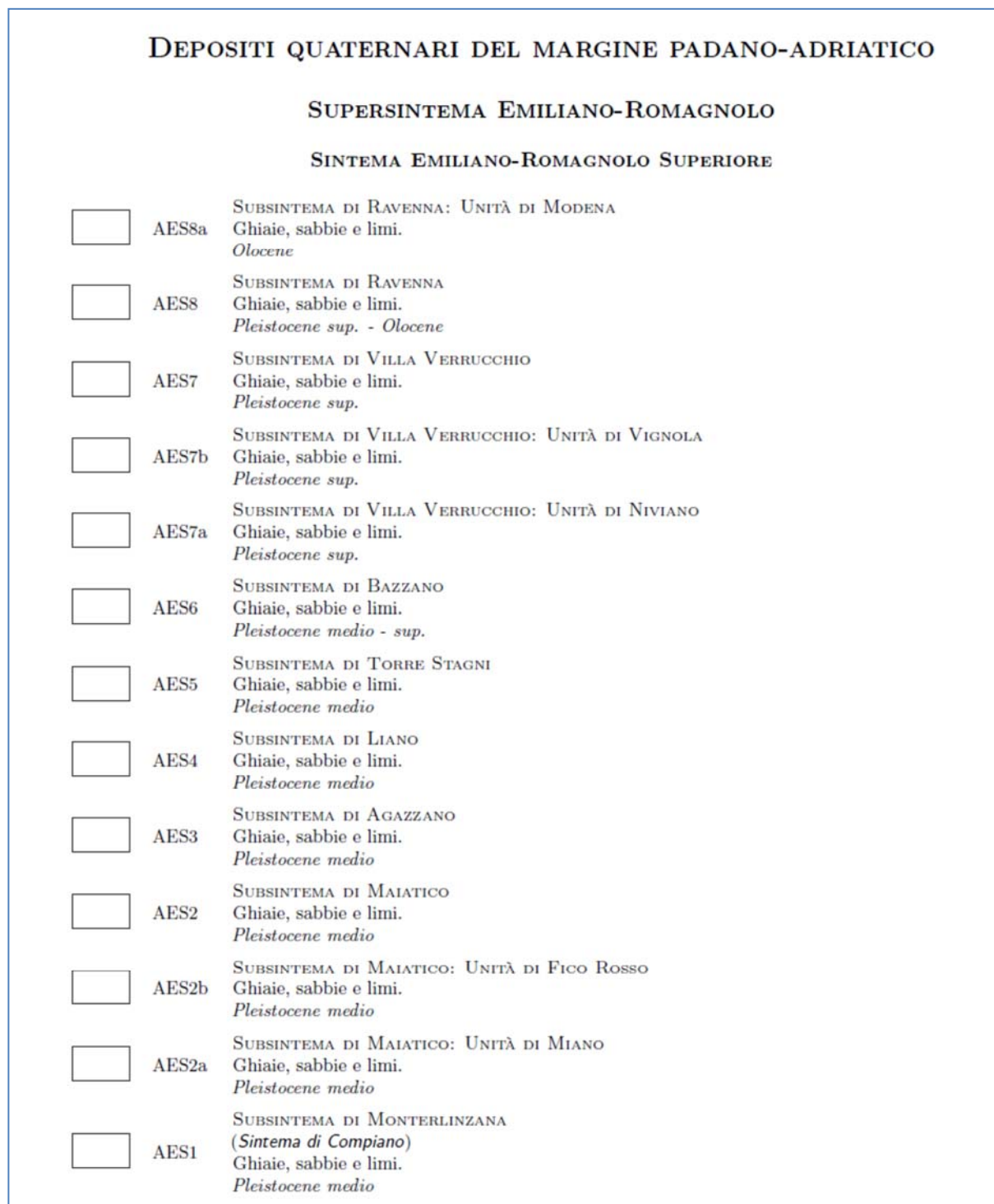
Per quanto concerne la base del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore, quest'ultimo, come si evidenzia nella figura 20, è collocato a profondità variabili da -100 m s.l.m. nel settore meridionale a circa -250/-300 in quello settentrionale.

FIGURA 20: CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA A CURA DEL SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI DELLA RER (2004) SCALA 1:250.000 A CURA DI MARIO BOCCALETTI E LUCA MARTELLI



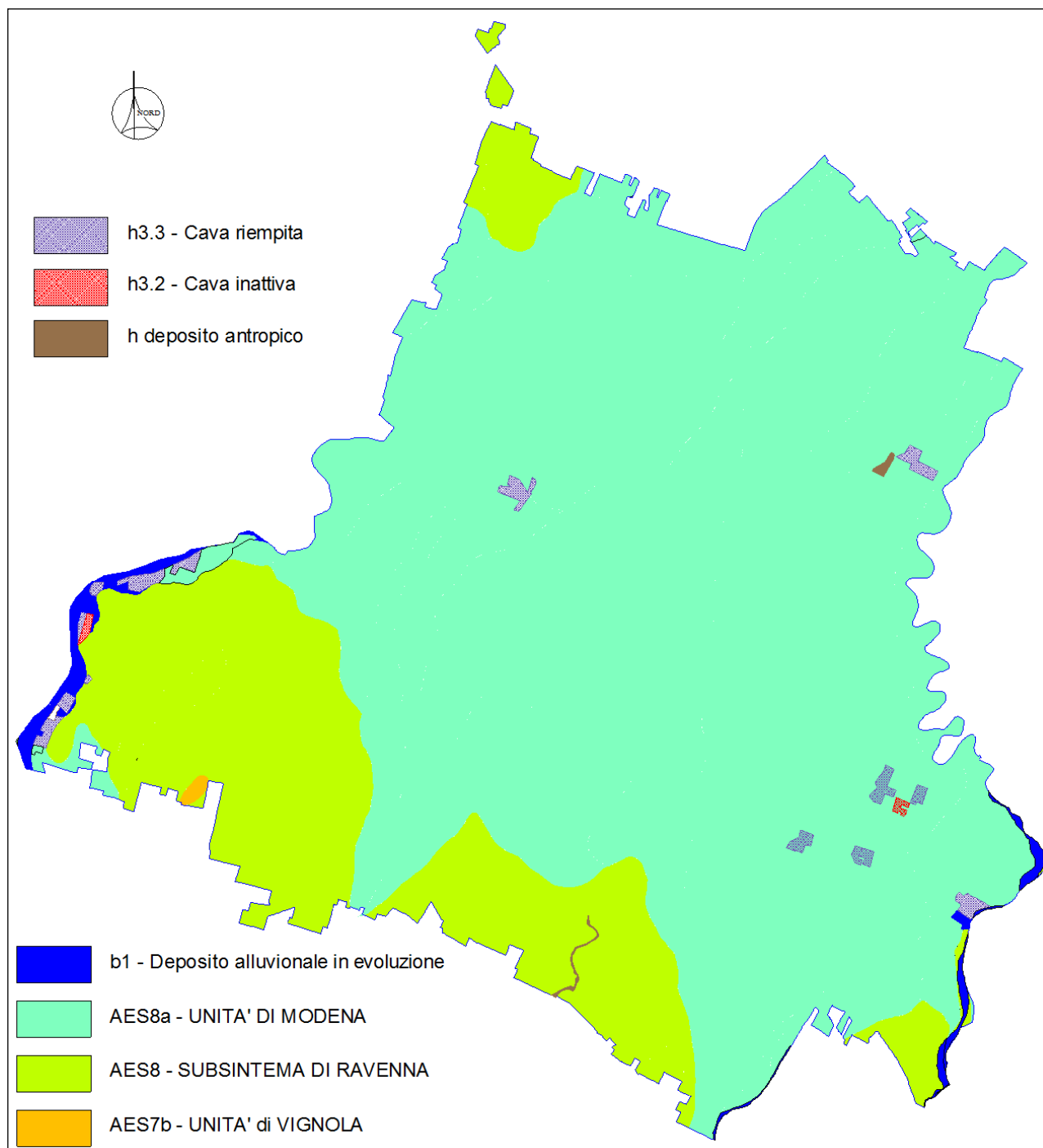
Nel territorio Comunale affiorano i depositi del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore, di cui in figura 21 viene riportato lo schema stratigrafico.

FIGURA 21: SCHEMA STRATIGRAFICO DEL SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE.



In particolare si individuano terreni appartenenti all'unità di Vignola (AES7b), al Subsintema di Ravenna (AES8), e all'unità di Modena (AES(a)) (figura 22), di cui si riporta di seguito una descrizione estratta dalle note illustrative della Carta Geologica d'Italia Foglio 201 "Modena" a cura di G. Gasperi e M. Pizziolo, 2009.

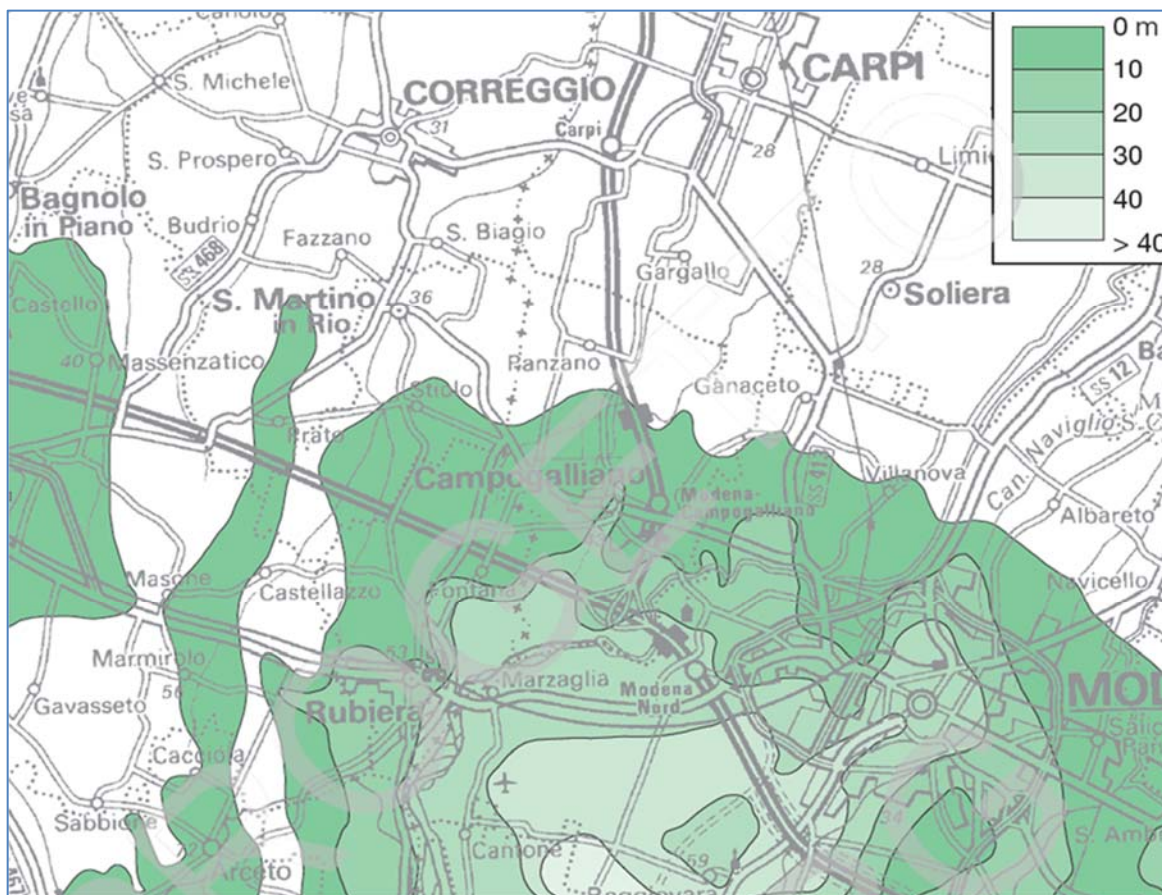
FIGURA 22: SCHEMA GEOLOGICO SEMPLIFICATO DEL TERRITORIO COMUNALE (DA CARTA GEOLOGICA RER).



Subsistema di Villa Verucchio (AES7)

E' facilmente riconoscibile nel sottosuolo a causa del corpo ghiaioso tabulare presente al tetto, alterato nelle zone di alta pianura in un suolo molto evoluto (*alfisuolo*): costituisce il gruppo di depositi terrazzati più estesi e facilmente riconoscibili delle aree pedecollinari. Potenza da 0 a 70 metri circa. L'età è pleistocenica compresa tra 120.000 anni b.p. e i 15.000 anni circa, età della più antica datazione attribuibile al subsistema di Ravenna.

FIGURA 23: SPESSORE GHIAIE DELLA CONOIDE DEL F. SECCHIA



Il subsistema di Villa Verucchio è costituito da limi prevalenti con subordinate ghiaie e sabbie nella porzione inferiore e da depositi prevalentemente ghiaioso-sabbiosi di conoide del fiume Secchia. Nelle aree meridionali, in prossimità del fiume Secchia l'intera unità è costituita da ghiaie. E' suddivisa in unità di rango inferiore, l'unità di Vignola, che comprende la parte superiore a granulometria grossolana con sedimentazione caratteristica dell'ultima fase glaciale e l'unità di Niviano che ne rappresenta la porzione inferiore generalmente più fine che rappresenta il deposito del penultimo interglaciale. La base dell'unità è caratterizzata nel sottosuolo dall'inizio della deposizione fine susseguente alle ghiaie che caratterizzano la sommità del subsistema di Bazzano.

Il limite superiore del subsistema di Villa Verucchio è posto in corrispondenza del passaggio tra le ghiaie presenti al tetto dell'unità e i depositi prevalentemente limoso argillosi che caratterizzano la parte inferiore del successivo subsistema di Ravenna. Nelle zone meridionali le ghiaie sono intensamente pedogenizzate sino a costituire un suolo molto evoluto, testimoniando una prolungata lacuna nella sedimentazione.

Lo spessore complessivo delle ghiaie relative alla conoide del fiume Secchia raggiunge i valori massimi a sud di Modena (>40 m) e diminuisce rapidamente verso Nord e verso est e ovest della paleoconoide (figura 23).

UNITA' DI VIGNOLA (AEST7b)

E' riconoscibile soprattutto nelle aree di alta pianura ove vi è continuità laterale dei corpi ghiaiosi e il loro tetto è tabulare. E' formata da ghiaie a matrice limo-sabbiosa della conoide del fiume Secchia, che passano distalmente e lateralmente a limi e limi-sabbiosi con rare ghiaie, di ambiente di interconoide e ancora a valle a limi e limi-argillosi di piana alluvionale. La conoide del fiume secchia è quella maggiormente cartografabile. In essa le ghiaie, ai bordi e verso valle della conoide, passano a ghiaie e sabbie e quindi a sabbie, ma meno estese delle ghiaie, e più distalmente ancora ai depositi limoso-argillosi di piana inondabile. A est della paleoconoide del Secchia sono presenti le estreme propaggini occidentali della conoide del Panaro. Per quanto concerne gli

spessori delle ghiaie i massimi si hanno a sud di Modena, con oltre 20 metri, mentre spostandosi a nord e lateralmente, pur aumentando la potenza dell'unità considerata i depositi grossolani sono intercalati a quelli fini in alternanze plurimetriche e lo spessore complessivo delle ghiaie diminuisce. Nelle aree prossimali della conoide del Secchia al tetto dell'unità è presente un paleosuolo (Magreta nel Comune limitrofo di Formigine), che presenta un fronte di alterazione di circa 1.2-1.5 metri, che costituisce il limite con il sovrastante Subsistema di Ravenna. Nelle aree distali di conoide questo manca e il tetto dell'unità è posto al passaggio tra le ghiaie ed i sovrastanti depositi fini attribuiti al Subsistema di Ravenna. A valle della conoide mancano del tutto le ghiaie e non è possibile tracciare con sicurezza il limite superiore dell'unità, e viene collocato dove si verificano variazioni granulometriche, cioè dai livelli sabbiosi sottostanti si passa a livelli prevalentemente limo-argillosi. Le ghiaie dell'unità di Vignola hanno una estensione superiore a quella del sub sistema di Ravenna: infatti i depositi ghiaiosi della conoide del fiume Secchia appartenenti all'unità di Vignola si estendono sino a valle della città di Modena, ove si rinvencono alla profondità di 20-30 m. L'età della base è superiore a 30.000 anni B.P; l'età del tetto è più antica dei 15.000 anni B.P. La deposizione dell'Unità di Vignola sembra legata a condizioni idrauliche e climatiche diverse da quelle che caratterizzano il successivo sub sistema di Ravenna e comunque caratterizzate da maggiori portate, da maggiore carico solido e da un diverso pattern di distribuzione delle ghiaie rispetto all'attuale, e si può ipotizzare che la deposizione di tale unità sia avvenuta nel corso dell'ultima glaciazione e, forse, anche durante il periodo immediatamente successivo.

Subsistema di Ravenna (AES8)

Tale Subsistema si sviluppa in condizioni di piana inondabile, e rappresenta l'intero spessore dei sedimenti, prevalentemente fini, depositi nell'ultimo postglaciale, in parte al di sopra dell'esteso corpo ghiaioso attribuito all'unità di Vignola. La base è caratterizzata nell'area tipo da una superficie di discontinuità corrispondente ad una lacuna stratigrafica di entità variabile e marcata da un netto contrasto di facies: i depositi alluvionali di età pleistocenica (parte sommitale di Villa Verucchio) sono sovrastati da depositi di ambiente paralic e marino-marginale riconducibili all'ultimo ciclo trasgressivo-regressivo di età olocenica. Nella zona emiliana la base del sub sistema non è facilmente riconoscibile. Nella zona di Magreta la base affiora in alcune cave, in cui limi e limi-argillosi poggiano con un contatto netto sulle ghiaie e limi di colore bruno-rossastro alterati dal paleosuolo a tetto dell'unità di Vignola.

Verso la pianura ed allontanandosi dall'asse principale dei fiumi, questo paleosuolo non è più presente, ma sono presenti solo ghiaie inalterate ed il limite inferiore del sub sistema viene posto convenzionalmente al tetto dei corpi ghiaioso-sabbiosi ad elevata estensione laterale che caratterizzano la porzione sommitale di Villa Verucchio. Ancora più a nord mancano le ghiaie ed il limite con l'unità di Vignola non è più contrassegnato da un netto cambiamento litologico, perché presumibilmente qui la sedimentazione si è sviluppata con continuità e senza grandi variazioni. In queste aree la base del sub sistema è contrassegnata da alcuni metri di argille più o meno limose alle quali sono intercalati, a profondità variabili tra 15 e 25 metri, livelli centimetrici o decimetrici di sostanza organica. Il limite superiore del sub sistema coincidente sempre con la superficie topografica, è caratterizzato dalla presenza di suoli a basso grado di alterazione con profilo di alterazione inferiore ai 150 cm.

La risalita del livello del mare dopo l'ultima fase glaciale non deve essere stata di breve durata, come sembrano indicare lo spessore relativamente potente (circa 5 metri) dei sedimenti argillosi, la frequente presenza in essi di resti organici vegetali discontinui di spessore relativamente modesto, e infine le datazioni radiometriche effettuate su questi livelli torbosi che hanno fornito età variabili tra 15.130 e 9.935 anni B.P. La sedimentazione della porzione basale del sub sistema di Ravenna di sarebbe sviluppata su una piana alluvionale mal drenata caratterizzata da estese paludi, in un arco di tempo di almeno 5000 anni.

All'intervallo basale ricco di sostanza organica segue una sedimentazione prevalentemente fine, più o meno spessa. A profondità variabili a seconda delle zone è presente un secondo livello nerastro, torboso, assai esteso lateralmente, con datato tra i 4580 e 3.970 anni B.P (7.5 – 11.6 m di profondità).

I depositi del Subsistema di Ravenna, affioranti estesamente nella parte Sud-Occidentale del territorio Comunale, sono granulometricamente fini, e vanno dalla sabbia media all'argilla, depositi in ambienti di piana alluvionale sviluppata a valle delle

conoidi. Solo nelle aree a sud dell'autostrada A1 presso il fiume Secchia sono presenti i depositi ghiaiosi di conoide. A valle delle conoidi il territorio presenta una uniforme inclinazione verso NNE interrotta da blande ondulazioni positive allungate in senso N-S e NNE-SSO, rilevabili con cartografia con isoipse di 1 metro.

I depositi di questo subsintema sono il prodotto della sedimentazione prevalentemente verticale dovuta a processi di tracimazione di corsi d'acqua sinuosi, che si sviluppano a valle dei corsi d'acqua braided caratteristici delle conoidi pedemontane. I processi deposizionali hanno portato alla formazione di argini naturali prevalentemente sabbiosi, crevasse e piane inondabili limose e argillose, mentre la migrazione dei menadi e delle barre di mendo ha condotto alla deposizione di corpi sabbiosi nastriformi allungati nel senso di scorrimento delle acque.

La parte superiore del Subsintema, sino al piano di campagna, è caratterizzata da maggiore frequenza di livelli sabbioso limosi o limoso argillosi con frequenti intercalazioni sabbiose, a testimonianza di un aumento areale degli ambienti di argille e di rotta fluviale legati ad una maggiore dinamica dei corsi d'acqua.

La sedimentazione grossolana, ghiaiosa che si rinviene alla base dell'unità in eteropia con i livelli argillosi torbosi, è localizzata nelle aree prossime al fiume Secchia, e nel suo insieme si presenta drasticamente più ridotta rispetto a quella dell'Unità di Vignola.

La potenza massima del sub sintema supera i 20 metri. Lo spessore aumenta, oltre che allontanandosi dalla catena, anche lateralmente agli assi vallivi principali; a Magreta si registrano spessori di 3.5 m, spostandosi verso est superano i 10 metri. Infatti il sub sintema aggrada su una topografia più articolata dell'attuale, legata alla precedente fase deposizionale prevalentemente ghiaiosa e a morfologia convessa dell'Unità di Vignola. L'età è pleistocenica superiore-olocenica. Le datazioni della base oscillano tra i 15.000 e 9.000 circa BP.

Unità di Modena (AES8a)

Tale unità, affiorante estesamente su tutto il territorio comunale, è caratterizzata dalla presenza al tetto di un suolo a bassissimo grado di alterazione con profilo di alterazione inferiore a 100 cm. Ad essa appartengono i sedimenti deposti dopo l'età romana (post V secolo d.C.). La base dell'unità è ben riconoscibile dalla presenza di un suolo evoluto al tetto del subsintema di Ravenna. L'unità di Modena è suddivisa ulteriormente in base alla granulometria dei depositi affioranti; le ghiaie affiorano nelle aree circostanti il fiume Secchia, le sabbie sono poco diffuse mentre limi e le argille costituiscono la litologia prevalente.

Nel sottosuolo della città al di sopra delle ghiaie dell'unità di Vignola abbiamo il subsintema di Ravenna che qui appare a costituzione relativamente omogenea, essendo formata da argille con la presenza sporadica di piccoli corpi lenticolari limo-sabbiosi. A profondità tra i 5 e 8 metri dal piano campagna è presente l'unità di Modena; la litologia è prevalentemente argillosa, frequenti vi si intercalano lenti estese anche oltre la decina di metri, limose e sabbiose, evidentemente legate a corsi d'acqua, che si ripetono spesso sulla stessa verticale. Frequenti sono pure le lenti torbose che nella periferia sud della città appaiono costituire, alla profondità di 2 metri, un corpo esteso con spessori anche superiori ai 3 metri. Nel sottosuolo della città sono caratteristici della unità valori modesti di consistenza di solito molto inferiori rispetto a quelli che caratterizzano il sottostante Subsintema di Ravenna. La base è molto irregolare e sembra colmare precedenti solchi di canali e torrenti.

I fenomeni alluvionali che seppellirono Modena sembrano legati prevalentemente a un torrente, denominato fossa di Spezzano, deviato in Secchia tra il XV e il XVI secolo a monte della città poiché con le sue piene inondava frequentemente la periferia della città, che precedentemente proseguiva a valle della deviazione secondo l'attuale Rio Corlo.

Lo spessore può raggiungere gli 8 metri, profondità alla quale si rinviene il piano archeologico romano in alcune aree della città di Modena. L'età è post V sec - Attuale.

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

La prima fase del lavoro ha comportato la raccolta delle indagini geognostiche e geofisiche precedentemente eseguite, per diverse finalità, sul territorio comunale. La ricerca è stata effettuata presso gli Uffici Tecnici Comunali, liberi professionisti e Ditte di indagini geognostiche operanti sul territorio e il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna.

La ricerca bibliografica ha consentito l'implementazione di una banca dati contenente 2273 indagini. Tipologia e numero delle indagini disponibili sono indicate in figura 24.

FIGURA 24: TABELLA INDAGINI REPERITE DALLA BIBLIOGRAFIA

INDAGINI GEOGNOSTICHE		INDAGINI GEOFISICHE	
Tipologia indagine	N°	Tipologia indagine	N°
Prove penetrometriche CPT	1367	Down Hole	13
Prove penetrometriche CPTE	57	HVSR	25
Prove penetrometriche CPTU	75	Sismica a Rifrazione	27
Prove penetrometriche dinamiche PD	38	MASW	41
Sondaggi a carotaggio continuo	290	REMI	27
Sondaggi a distruzione di nucleo	1	SCPTU	3
Sondaggi con prove di laboratorio	22	TOTALE	136
Trincee o pozzetti esplorativi	21		
Pozzi per acqua	263		
Pozzi per idrocarburi	3		
TOTALE	2137		

In una fase successiva, sulla base della distribuzione territoriale delle indagini esistenti in bibliografia e della finalità del lavoro, sono stati eseguiti specifici approfondimenti (Figura 25) volti alla verifica delle caratteristiche dinamiche dei terreni in termini di velocità delle onde di taglio e di volume, delle frequenze di vibrazione naturale dei terreni, delle caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni superficiali ai fini di una verifica del rischio potenziale di liquefazione e di possibili cedimenti post-sismici. I risultati forniti dalle prove condotte sono presentati nei fascicoli n° 2.1 (Indagini sismiche MASW), n° 2.2 (Indagini sismiche a rifrazione) n° 2.3 (Indagini sismiche HVSR) n° 2.4 (Prove penetrometriche statiche con piezocono – CPTU) e n° 2.5 (Prove penetrometriche dinamiche leggere).

FIGURA 25: TABELLA CON INDICAZIONE DELLE INDAGINI EFFETTUATE

INDAGINI GEOFISICHE		INDAGINI GEOGNOSTICHE	
Tipologia indagine	N°	Tipologia indagine	N°
HVSR	115	CPTU	24
Sismica a Rifrazione	50	PD	10
MASW	50	TOTALE	34
TOTALE	215		

4.1 INDAGINI A RIFRAZIONE (ONDE P).

Le indagini di sismica a rifrazione hanno consentito di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un'onda sismica che incide su una discontinuità individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio).

Condizione necessaria per la significatività di uno studio di sismica a rifrazione è che la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

Le prove si basano sulla misura dei tempi di percorso delle onde elastiche per le quali, ipotizzando le superfici di discontinuità estese rispetto alla lunghezza d'onda o, comunque, con deboli curvature, i fronti d'onda sono rappresentati mediante i relativi raggi sismici. L'analisi si avvale, poi, del principio di Fermat e della legge di Snell.

Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore.

La legge di Snell descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde o, equivalentemente, da diversi indici di rifrazione. L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r .

La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità.

Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

Il metodo per analizzare i dati di rifrazione consiste nel costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi. Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

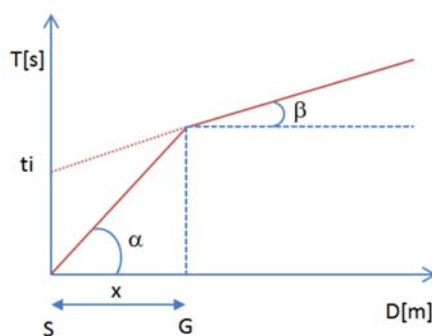
$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione.

L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze e il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come

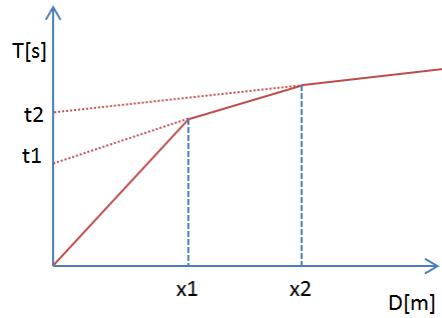
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.



La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati *punti di ginocchio* e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno dei segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.

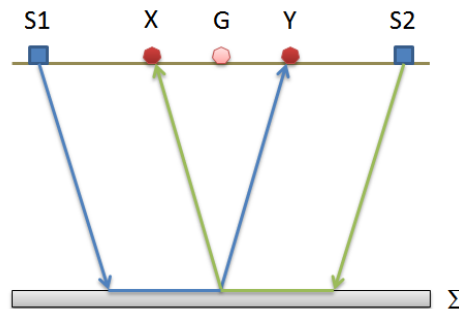


Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

In situazioni morfologiche complesse può essere utilizzato come metodo di elaborazione il Metodo Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method) discusso da Palmer nel 1980.

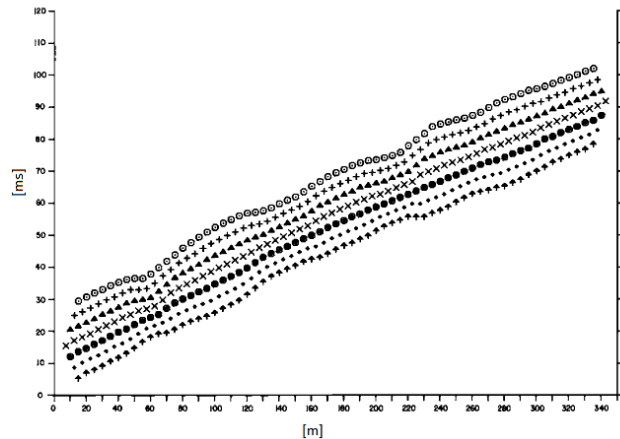
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno dello stendimento. Ciò permette di individuare con maggiore accuratezza i tempi relativi ad un medesimo rifrattore utili a caratterizzare le dromocrone, fondamentali all'interpretazione. Nelle interpretazioni multistrato, la generazione delle dromocrone può sfruttare tecniche di phantomining per sopperire alla mancanza dei dati per alcuni rifrattori.

Dalla costruzione delle dromocrone è possibile determinare *la funzione velocità* secondo l'equazione

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$



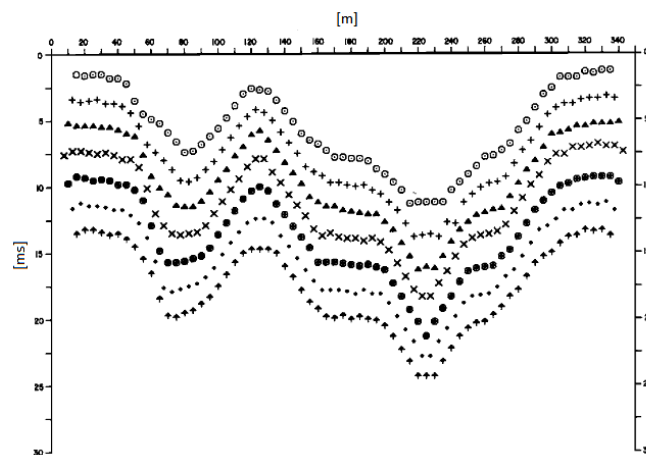
dove T_{S1Y} e T_{S2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici necessari per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre T_{S1S2} è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento. T_V è il tempo calcolato su un geofono G posto tra X ed Y, non necessariamente coincidente con la posizione di un geofono dello stendimento.

Il calcolo della funzione T_V viene eseguito per ogni valore di XY compreso tra zero e metà dello stendimento con variazione pari alla distanza reale tra i geofoni dello stendimento. La migliore retta di regressione delle funzioni velocità ottenute, permette di determinare l'XY ottimo e la velocità del rifrattore che è ricavata dal coefficiente angolare.

Per mezzo della **funzione tempo-profondità** è possibile trovare la profondità del rifrattore espressa in unità di tempo. L'espressione di tale funzione è:

$$T_G = \frac{T_{S1Y} + T_{S2X} - \left(T_{S1S2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Dove V_n è la velocità del rifrattore.



Analogamente a quanto avviene per la funzione velocità si determinano diverse funzioni tempo-profondità per l'insieme dei valori XY di studio. Tra le funzioni trovate, quella che presenta la maggiore articolazione compete al valore di XY ottimo.

Infine, è possibile determinare lo spessore del rifrattore in corrispondenza delle posizioni dei geofoni G mediante la relazione:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

h rappresenta la profondità minima dal geofono

G. La morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio h .

Operativamente, ciò che viene eseguito in campagna è una disposizione lungo una retta di trasduttori velocimetrici (geofoni) lungo la sezione che si desidera investigare. In funzione della risoluzione e delle profondità ricercate, quindi, si dispongono i punti di produzione dell'energia elastica che viene generata con l'utilizzo di una mazza battente da Kg. 9 su di un piattello di alluminio per gli stendimenti aventi una lunghezza limitata, mentre per gli stendimenti più lunghi l'energia viene generata mediante l'utilizzo di un fucile sismico funzionante con cartucce cal. 8 industriale KILN.

L'elaborato finale consiste nella ricostruzione di un profilo sismo-stratigrafico lungo l'allineamento geofonico di investigazione con identificazione degli spessori di ogni sismostrato attraversato dalle onde elastiche determinate dall'energizzazione.

4.2 INDAGINI MASW

La determinazione della velocità delle onde sismiche di taglio (V_s) è stata effettuata mediante elaborazione con il metodo MASW, allo scopo di determinare la categoria sismica del terreno (A, B, C, D, E) secondo quanto indicato dalle NTC 2018 (Ordinanza P.C.M. 2003 e s.m.i.) e dagli Eurocodici 7 e 8.

In base all'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente, non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è uno strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità (k) - frequenza (f) è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f - k è detta curva di dispersione sperimentale e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

Modellizzazione

Con riferimento al modello geotecnico sintetico determinato con le indagini in sito, viene tracciata una curva di dispersione teorica che lega velocità e lunghezza d'onda secondo la relazione:

$$v = \lambda \times v$$

In seguito, i parametri del modello geotecnico preliminare vengono modificati al fine di ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale. Questa fase, definita come processo di inversione, consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi caratterizzati da valori di rigidità differenti.

Modi di vibrazione

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. Per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.

Profondità di indagine

Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

Le indagini MASW sono state eseguite disponendo sul terreno 24 sensori velocimetrici (geofoni), posti ad intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante un cavo multipolare. Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si sono generate

artificialmente le energizzazioni in corrispondenza di un punto prestabilito lungo il profilo. Nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (trigger). Da questo istante inizia l'acquisizione digitale, con campionamento ad intervallo costante e predeterminato, dei segnali ricevuti dai sensori.

L'elaborazione ha riguardato l'intero campionamento della registrazione avente durata 2048 mS e una frequenza di campionamento di 500 microS.

I dati principali delle indagini geofisiche sono stati riassunti in schede appositamente predisposte con l'indicazione dell'ubicazione, delle coordinate UTM WGS84 32N e del Valore $V_{s,30}$, unitamente ai dati di registrazione, alle specifiche di elaborazione, alla documentazione fotografica dello stendimento, al grafico della registrazione, alla curva di dispersione e all'andamento delle velocità delle onde di taglio (V_s).

4.3 INDAGINI HVSR

L'analisi dei rapporti spettrali, nota anche come metodo HVSR, viene effettuata a partire dall'acquisizione delle vibrazioni sismiche ambientali denominate anche rumore sismico.

Il rumore sismico, presente ovunque sulla superficie terrestre, risulta generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che dall'attività dinamica terrestre.

Il rumore, convenzionalmente suddiviso in microsisma (frequenze $< 1\text{Hz}$, sorgenti naturali lontane) e microtremore (frequenze $> 1\text{Hz}$, sorgenti antropiche locali) è dovuto sia ad onde di volume (onde P e onde S) sia ad onde superficiali in proporzione variabile. Il microsisma è prevalentemente costituito da onde di Rayleigh mentre il microtremore, oltre alle onde di volume, è formato dalla sovrapposizione sia di onde di Love sia di onde di Rayleigh.

I metodi che si basano sull'acquisizione del rumore sismico si definiscono "passivi" in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio nella sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente "s" al sito "x" le onde elastiche (sia di terremoto che di microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamento per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che, se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica di "raytracing", è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale e, in particolare, alla struttura locale prossima al sensore. Questa informazione è "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

La tecnica maggiormente utilizzata per lo studio dei microtremori è la tecnica dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e verticale, conosciuta come HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). In breve, la metodologia dei rapporti spettrali H/V permette di valutare la variazione di ellitticità dell'onda di Rayleigh in funzione della frequenza, consentendo di ricavare la frequenza fondamentale di un sito. Tale parametro risulta essere legato alla presenza di una superficie di discontinuità con un sufficiente contrasto di impedenza sismica.

Le registrazioni del rumore sismico ambientale sono state effettuate mediante tromografo digitale della Micromed S.p.A. "Tromino®", che permette sia l'acquisizione digitale in alta risoluzione in modo passivo e non intrusivo sia il pre-processing dei dati.

Tale strumento è costituito da tre sensori elettrodinamici (velocimetri) ortogonali (Nord-Sud, Est-Ovest e in senso verticale) con autobloccaggio in fase di non acquisizione.

Le principali note tecniche di questo tromografo digitale sono di seguito indicate:

DATI TECNICI STRUMENTALI

Numero di canali: 3+1 analogici
Amplificatori: tutti canali con input differenziali
Rumore: < 0.5 μ V r.m.s. @128 Hz sampling
Impedenza dell'input: 106 Ohm
Range di frequenze: DC - 360 Hz
Frequenza di campionamento: 16384 Hz per canale
Frequenze di sovracampionamento: 32x, 64x, 128x
Conversione A/D: equivalente a 24 bit
Massimo input analogico: 51.2 mV (781 nV/digit)
Accoppiamento col terreno: su punte e cuscinetto reologico
Sensori: 3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione autobloccaggio quando non in acquisizione

I risultati sono stati elaborati attraverso software "Geopsy.org package, release 3.2.0".

In sintesi, il segnale dei velocimetri è acquisito in ciascun sito per un tempo t (20 min), e digitalizzato a 24 bit.

Per le registrazioni significative è stata operata una verifica dell'attendibilità del picco H/V secondo i criteri Sesame 2005 e definita la classe di qualità della prova utilizzando il metodo di D. Albarello et alii, 2011 che prevede le seguenti tre classi:

Classe A: H/V affidabile e interpretabile: può essere utilizzata anche da sola.

1. la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura (stazionarietà);
2. le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo (isotropia);
3. non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse (assenza di disturbi);
4. i massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale (plausibilità fisica);
5. i criteri di SESAME per una curva H/V attendibile (primi 3 criteri) sono verificati (robustezza statistica);
6. la misura è durata almeno 15/20 minuti (durata);

Classe B: curva H/V sospetta (da "interpretare"): va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

1. almeno una delle condizioni della classe A non è soddisfatta, a condizione che non si rientri nell'ECCEZIONE citata per la Classe A;

Classe C: curva H/V scadente e di difficile interpretazione: non utilizzabile

1. misura di tipo B nella quale la curva H/V mostra una ampiezza crescente al diminuire della frequenza (deriva), indice di un movimento dello strumento durante la misura;
2. misura di tipo B nella quale si evidenzia la presenza di rumore elettromagnetico nell'intervallo di frequenze di potenziale interesse;

Per le sole Classi A e B si possono pertanto definire due sottoclassi delle classi precedenti, ossia:

Tipo 1. Presenta almeno un picco "chiaro" secondo i criteri di SESAME: possibile risonanza

Tipo 2. Non presenta picchi "chiaro" nell'intervallo di frequenze di interesse: assenza di risonanza.

I dati principali delle indagini geofisiche eseguite sono stati riassunti in schede appositamente realizzate e contenenti le seguenti informazioni: ubicazione, coordinate GAUSS-BOAGA, dati di registrazione, specifiche di elaborazione, documentazione fotografica dello stendimento, grafico del rapporto H/V con individuazione della frequenza fondamentale, classe di qualità della registrazione.

4.4 INDAGINI PENETROMETRICHE AD INFISSIONE DINAMICA (DMP)

Le indagini penetrometriche di tipo dinamico sono state realizzate utilizzando un penetrometro Pagani DMP 3020 motorizzato avente le caratteristiche tecniche di seguito elencate.

Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DMP 3020 PAGANI

Rif. Norme	DIN 4094	
Peso Massa battente	30	Kg
Altezza di caduta libera	0,20	m
Peso sistema di battuta	15,25	Kg
Diametro punta conica	35,68	mm
Area di base punta	10	cm ²
Lunghezza delle aste	1	m
Peso aste per metro	2,4	Kg/m
Profondità giunzione prima asta	0,80	m
Avanzamento punta	0,10	m
Numero colpi per punta	N(10)	
Coeff. Correlazione	0,783	
Rivestimento/fanghi	No	
Angolo di apertura punta	60	°

I dati principali delle indagini penetrometriche eseguite sono stati riassunti in schede appositamente realizzate e contenenti le seguenti informazioni: ubicazione, data di esecuzione, grafico del numero di colpi penetrazione punta, grafico dell'Rpd (Kg/cm²) e interpretazione stratigrafica.

4.5 INDAGINI PENETROMETRICHE AD INFISSIONE STATICA (CPTU)

Le indagini penetrometriche CPTU sono state realizzate utilizzando un penetrometro attrezzato con piezocono G1-CPL2IN della Tecnopenta srl avente le caratteristiche tecniche di seguito elencate.

PIEZOCONO G1 - CLP2IN					
PUNTA CONICA		PIEZOCONO			
Diametro	35,7	Area di punta	9.0 cm ²	Area inferiore manicotto	3.31 cm ²
Altezza nominale	30.9 m	Diametro	35.7 mm	Lunghezza totale punta elettrica	600.0 mm
Angolo d'apertura	60°	Area netta	6.6 cm ²	Peso complessivo	3 kg
Area nominale	1000 mm ²	Superficie	150.0 cm ²	RACCORDO PIEZOCONO -ASTE	
Altezza : base cilindro - filtro	10 mm	Lunghezza	133.7 m	Diametro	35.7 mm
Altezza quadring	3.5 mm	Area superiore	2.22 cm ²	Lunghezza	250.0 mm

Sensori di Resistenza alla punta (Qc)		Sensori di Cella Resistenza laterale (Fs)	
Sensori	8 estensimetri da 350 ohm a ponte completo con bilanciamento di zero	Sensori	8 estensimetri da 350 ohm a ponte completo con bilanciamento di zero
Fondo Scala	50 Mpa	Fondo Scala	500 kPa
Risoluzione	10 kPa	Risoluzione	0.1 kPa
Precisione	< ± 1% F.S.	Precisione	< ± 2% F.S.
Valore minimo misurabile	-100 kPa	Valore minimo	-20 kPa
Deriva termica di zero	< 0.05% F.S./°C	Deriva termica di zero	< 0.05% F.S./°C
		Influenza di Qc su Fs	< 1.5% F.S. di Fs

Sensori di Pressione neutrale (U)		Sensori di Inclinazione (I)	
Sensore	:Trasduttore di pressione piezoresistivo	Sensore	: Inclinometro biassiale
F.S.	2000 kPa	F.S.	±10 gradi
Risoluzione	1 kPa	Risoluzione	0.1 grado
Precisione	< ±0.005 % F.s./°C	Precisione	±0.25 % della lettura
Valore minimo misurabile	- 100 kPa	Deriva termica dello zero	< ± 1% della lettura
Filtro	bronzo poroso (sinterizzazione di granuli di bronzo diametro 5 micron)	Corsa	190 mm
Altezza filtro	5 mm		
Diametro	35.7 mm		
Olio siliconico di saturazione	100 cS		

5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Come già evidenziato Il territorio comunale di Modena è caratterizzato a Est e ad Ovest dai depositi delle conoidi dei due fiumi maggiori, Secchia e Panaro, che si protendono verso la pianura sino circa all'altezza della Via Emilia.

Le conoidi più recenti, quelle tra il Neolitico e il XX Secolo, si presentano asimmetriche rispetto ai corsi attuali; questi occupano una posizione spostata verso occidente, più accentuata nel Fiume Panaro, indicante una costante loro migrazione.

La conoide del Pleistocene superiore del Fiume Secchia affiora a Sassuolo mentre a valle è sepolta ed è stata rinvenuta sino nei pressi della città di Modena, alla profondità di circa 15-25 dei metri al di sotto dei depositi fini di piana alluvionale.

Dal punto di vista litologico le conoidi maggiori hanno composizione prevalentemente ghiaiosa nelle aree apicali, che si estendono qualche chilometro a valle rispettivamente di Sassuolo e Vignola, e di corpi ghiaiosi alternati a peliti che diventano sempre più potenti e frequenti allontanandosi dall'apice; la transizione ai sedimenti fini dell'antistante piana alluvionale, avviene quindi in modo graduale.

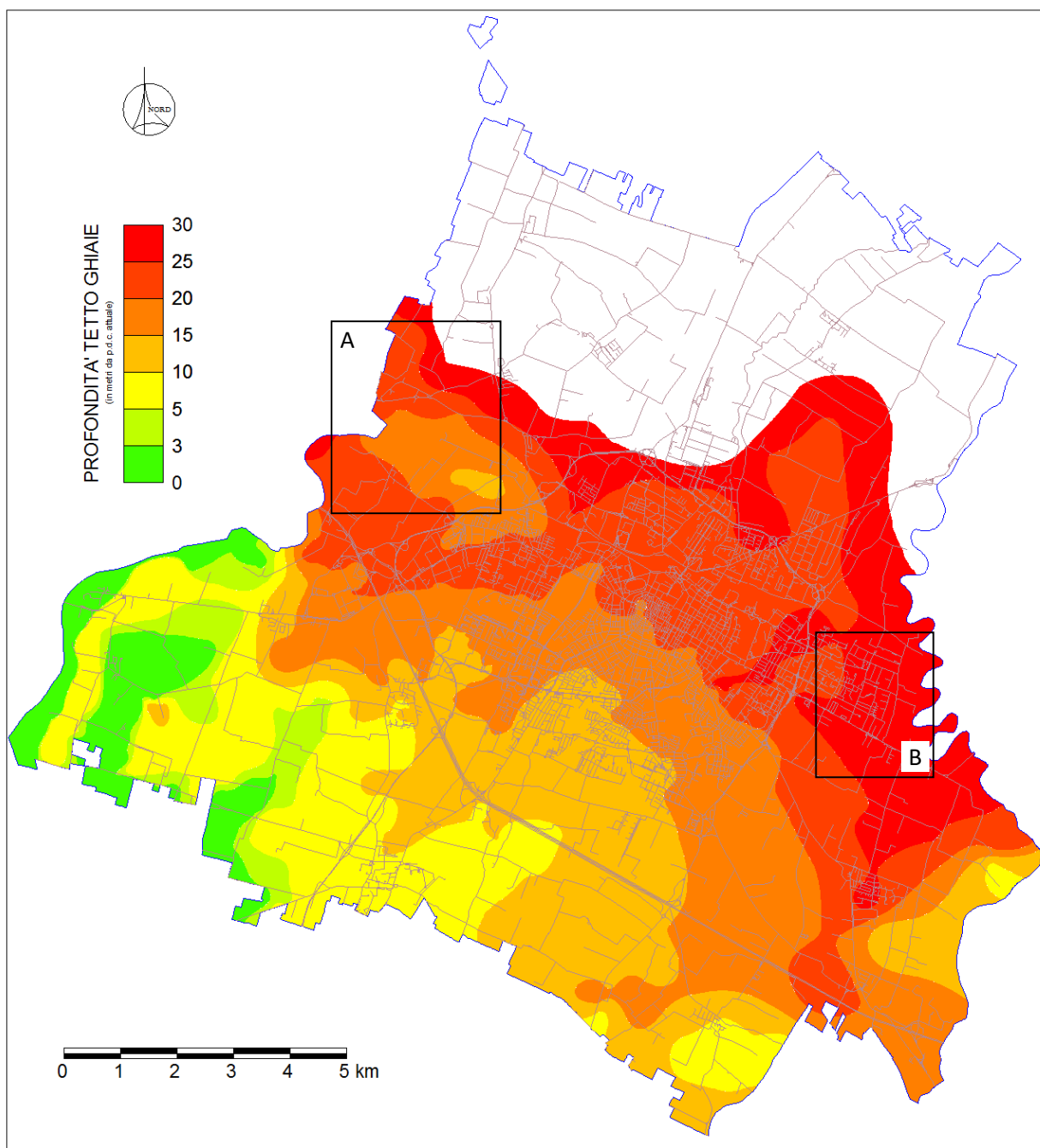
Le peliti intercalate alle ghiaie fanno parte sia della sedimentazione di conoide sia del sistema deposizionale della piana alluvionale che si sviluppa contemporaneamente alla fronte e ai lati delle conoidi stesse.

Tra i due apparati maggiori e occupanti un'area meno profonda, abbiamo le conoidi dei fiumi minori: Fossa di Spezzano, Tiepido, Guerro e degli altri torrenti più piccoli. Questi apparati si congiungono tra loro formando conoidi composite o fasce pedemontane. La loro litologia è prevalentemente fine, sabbioso-limosa con piccoli corpi ghiaiosi che, sottoforma di strette fasce potenti qualche metro, si dipartono dalle zone apicali dei singoli apparati.

Nelle aree antistanti le conoidi, cioè verso Nord, abbiamo la piana alluvionale che si estende da qui sino al Fiume Po. Si osservano depositi sabbiosi che sono generalmente disposti in fasce parallele ai corsi d'acqua attuali, larghe anche qualche centinaio di metri e lunghe qualche chilometro. Gli altri depositi, limi e argille, hanno una distribuzione del tutto irregolare.

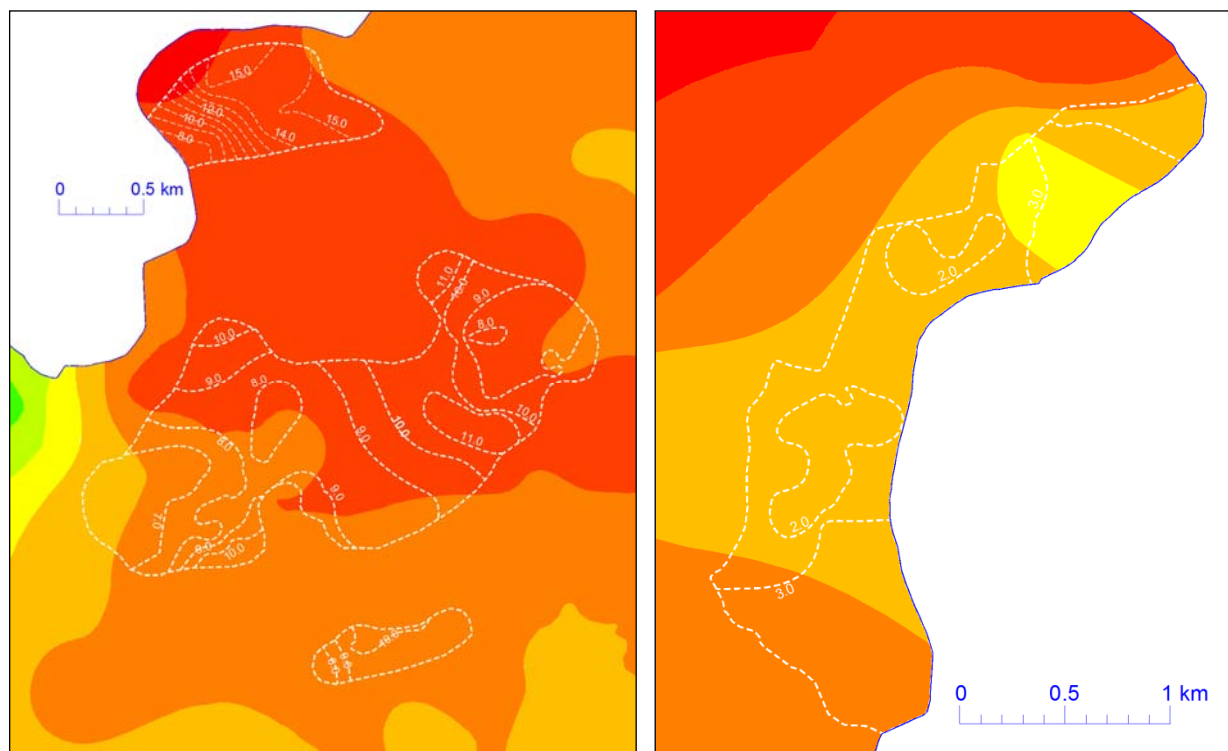
Sulla base dei numerosi dati disponibili si è proceduto con la ricostruzione del tetto dei depositi ghiaiosi, ottenendo quanto riportato in figura 26. Si noti come il tetto delle ghiaie si approfondisce progressivamente procedendo verso NE, sino a valori di circa 30 metri.

FIGURA 26: CARTOGRAFIA DEL TETTO DEI DEPOSITI GHIAIOSI



Dall'analisi della cartografia si evidenzia la presenza di livelli ghiaiosi più superficiali sia a ridosso del F. Secchia che del F. Panaro, che hanno di solito spessori di qualche metro (riquadri A e B di figura 26 riportati nella figura seguente).

FIGURA 27: TETTO DEI LIVELLI GHIAIOSI SUPERFICIALI (IN METRI DA P.D.C.) (RIQUADRI A E B DI FIGURA 26)



In profondità si alternano i diversi cicli deposizionali del quaternario continentale come riportato nelle sezioni geologiche 1 e 2 (figure 28 e 29), ubicate come da figura 28.

FIGURA 28: UBICAZIONE SEZIONI STRATIGRAFICHE PROFONDE (DA PROGETTO CARG)

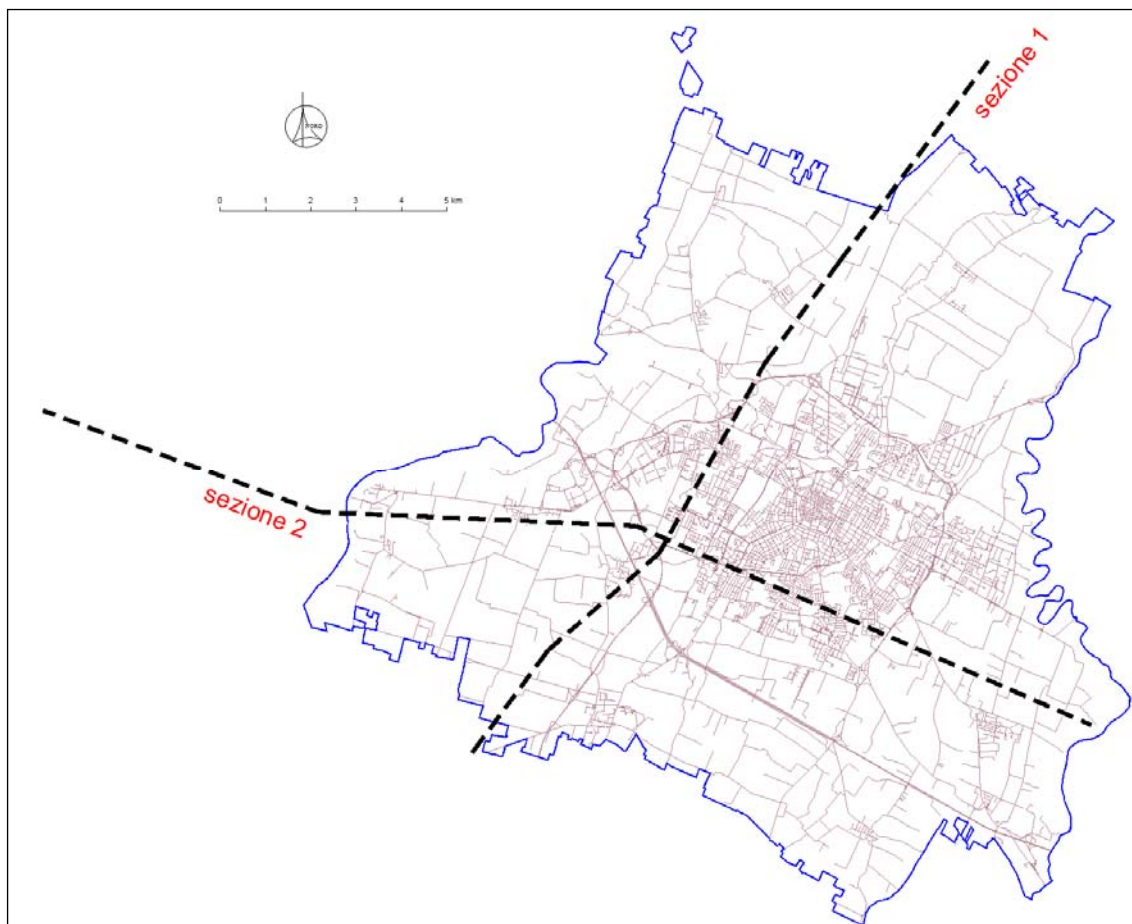


FIGURA 29: SEZIONE 1 (DA PROGETTO CARG, RIDISEGNATA)

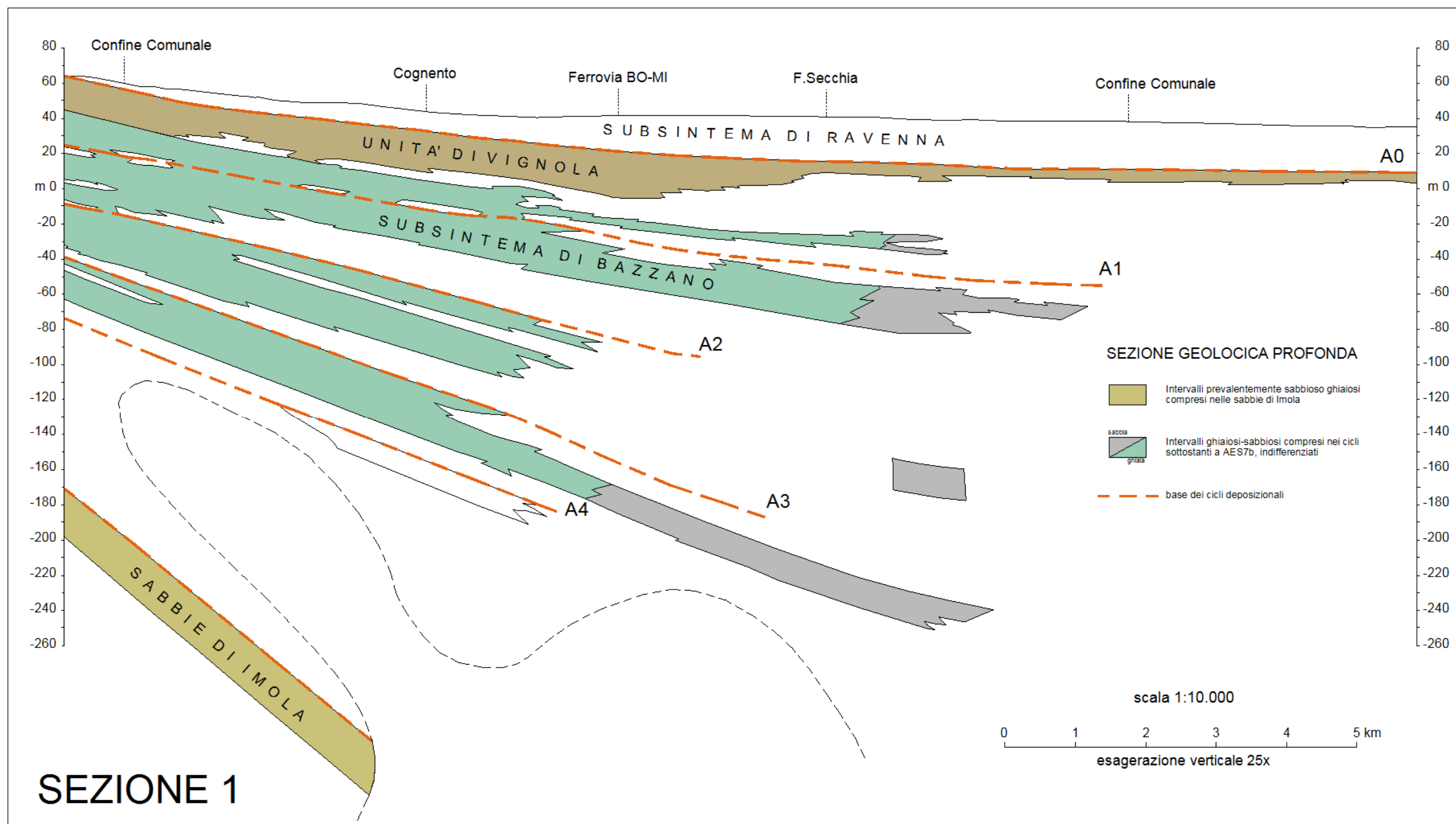
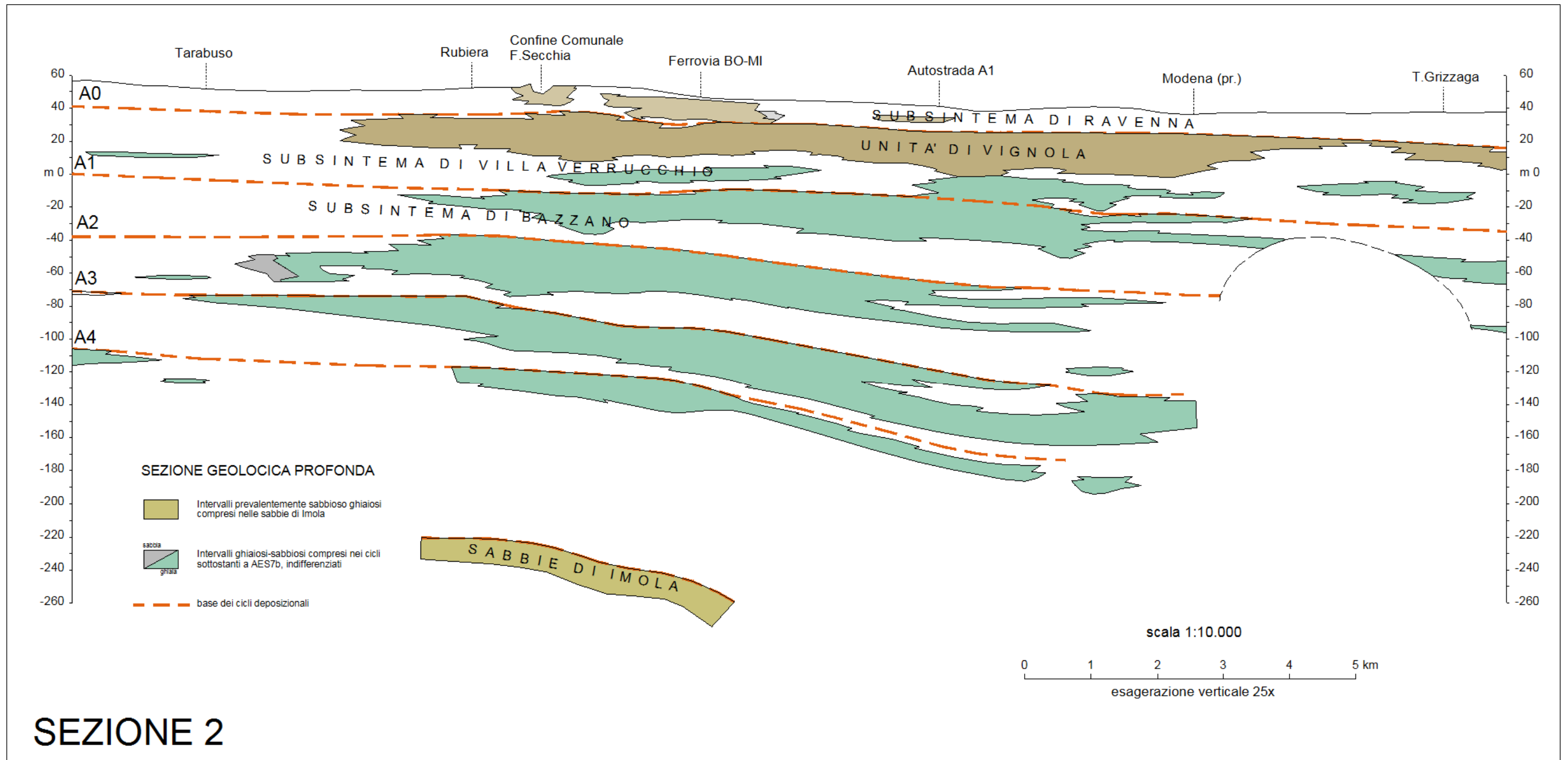


FIGURA 30: SEZIONE 2 (DA PROGETTO CARG, RIDISEGNATA)



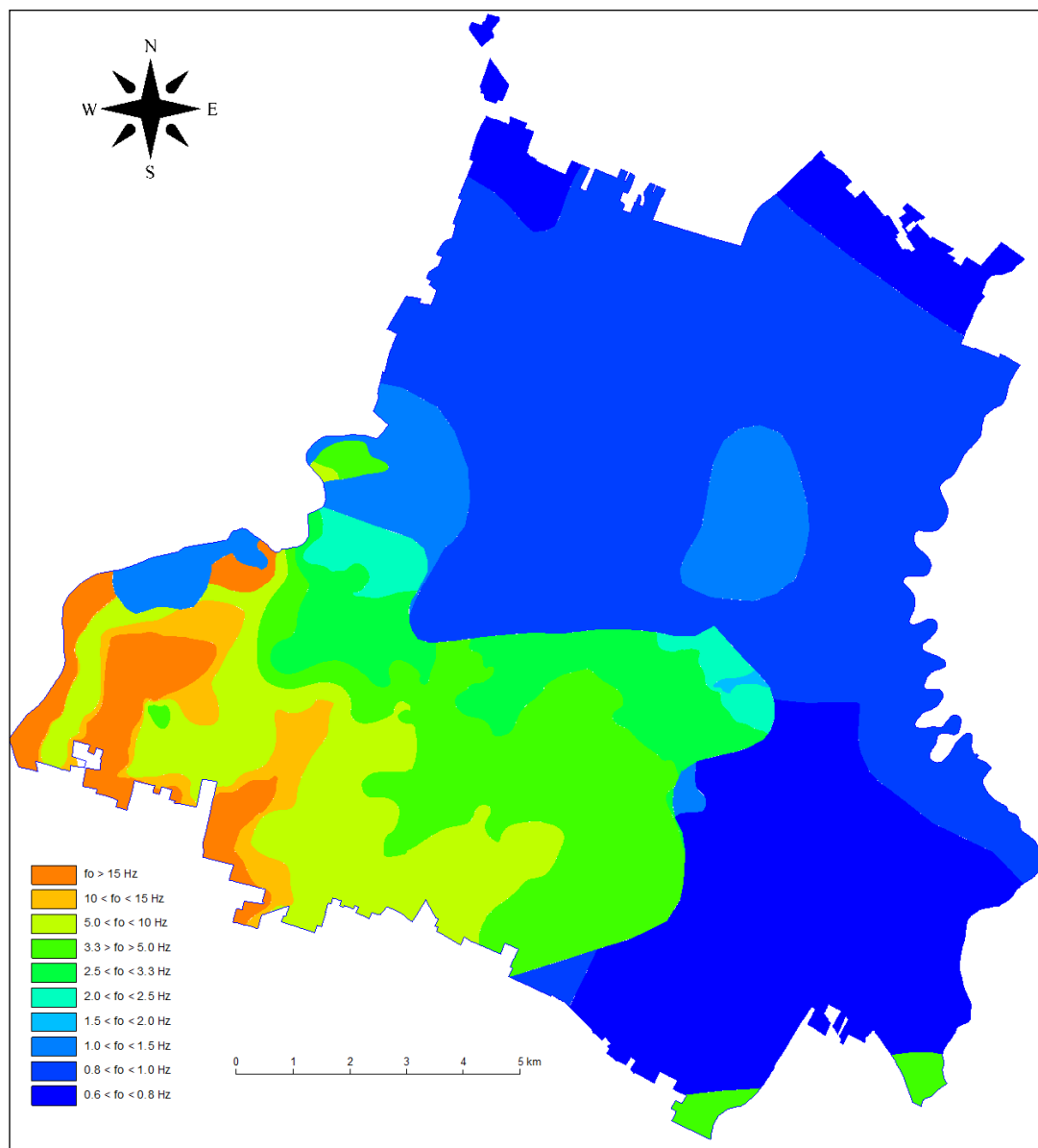
Tali sezioni evidenziano come i depositi prevalentemente fini del Subsistema di Ravenna, di solito sede dell'acquifero A0 ed originatesi in condizioni di piana alluvionale durante l'ultimo postglaciale, siano caratterizzati, nel settore di pertinenza del F. Secchia, da spessori di pochi metri nella zona sud del territorio Comunale, per poi aumentare progressivamente sino ad oltre 20 metri a nord. Solo a ridosso del corso d'acqua sono sostituiti da depositi ghiaioso-sabbiosi della conoide recente ed attuale. Nella sezione 2 ad andamento E-W, tali depositi raggiungono spessori massimi paragonabili ai precedenti.

Al di sotto si rinvenivano i cicli deposizionali del Subsistema di Villa Verrucchio (AES7) e Subsistema di Bazzano (AES6), individuando la base di quest'ultimo a profondità di circa 80-90 metri nel settore del F. Secchia, per poi approfondirsi verso O e verso Nord raggiungendo valori di oltre 140 m. Si evidenzia come nel settore sud-orientale del territorio comunale i depositi prevalenti sono rappresentati da ghiaie con percentuali di tali depositi in profondità che raggiungono anche l'80-90%, e che si riducono drasticamente sia verso nord che verso il F. Panaro a Ovest.

La base del sistema emiliano-Romagnolo superiore è stata rilevata a profondità variabili da circa 160 a 220 m.

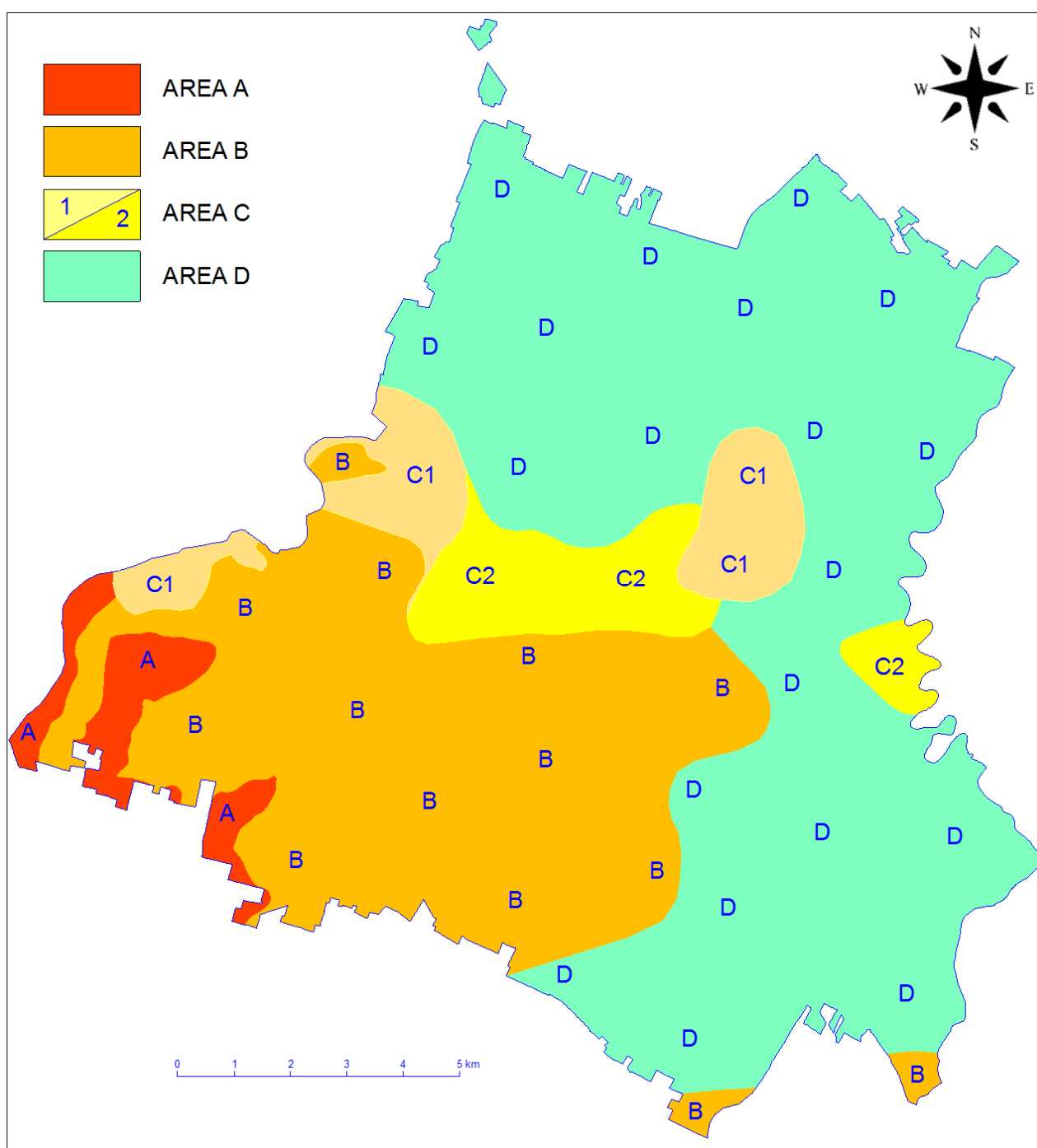
Tale modello litostratigrafico è stato confermato dai risultati delle indagini HVSR eseguite sull'intero territorio, e che hanno consentito di evidenziare le frequenze fondamentali di vibrazione dei terreni associabili a contrasti di impedenza sismica presenti in profondità la cui distribuzione è riportata in figura 31.

FIGURA 31: CARTOGRAFIA DELLE FREQUENZE FONDAMENTALI DI VIBRAZIONE



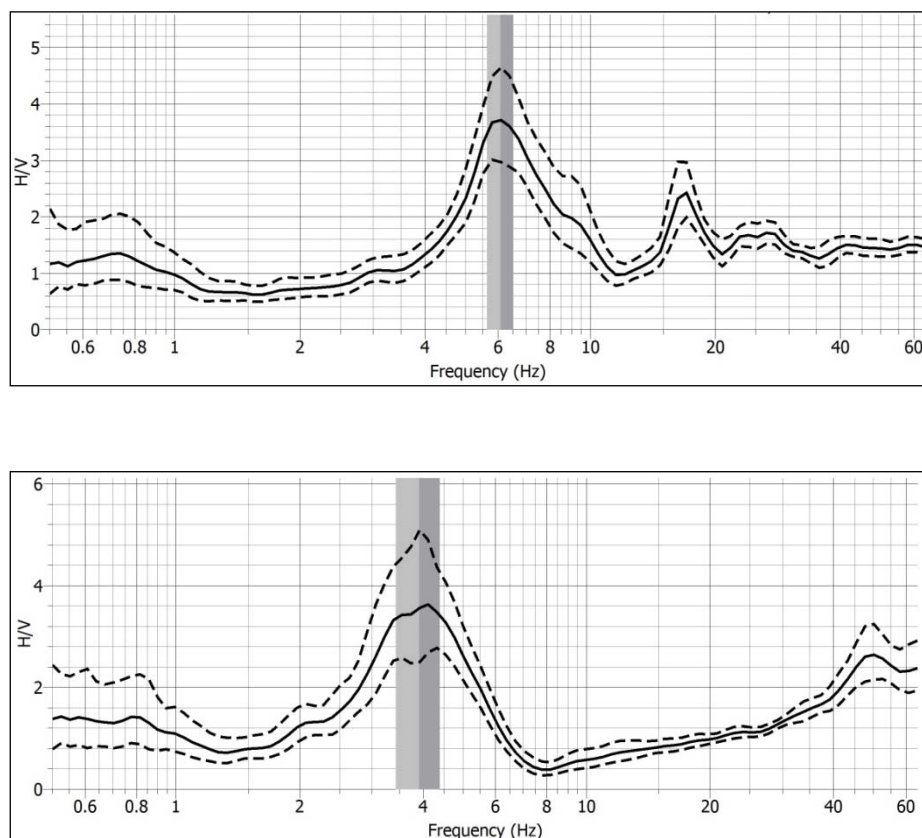
Si è potuto rilevare come nell'area del F. Secchia, Le frequenze di vibrazione risultino determinate dal contrasto di impedenza tra i terreni di copertura che presentano spessori massimi di circa 30 metri e i depositi ghiaiosi sottostanti, che presentano spessori pluridecametrici. Si è infatti rilevato velocità medie delle onde di taglio dei terreni di copertura di circa 200 m/s, mentre i terreni ghiaiosi sottostanti presentano velocità molto più elevate e mediamente pari a circa 450/500 m/s. Si è quindi individuato un settore denominato "Area A" in cui si registrano frequenze > di 15 Hz, che corrispondono a quelle zone caratterizzate da spessori di copertura inferiori a 3 metri, ed un altro con frequenze comprese tra 1.5 e 15 Hz denominato "Area B" con spessore di copertura sino a 30 m. Si evidenzia che non sono stati rilevati ulteriori contrasti di impedenza sismica in profondità. L'individuazione di tali aree viene riportata in figura 32.

FIGURA 32: SUDDIVISIONE DEL TERRITORIO IN AREE OMOGENEE



Nella figura 33 viene riportato l'andamento caratteristico delle curve H/V dell'area B.

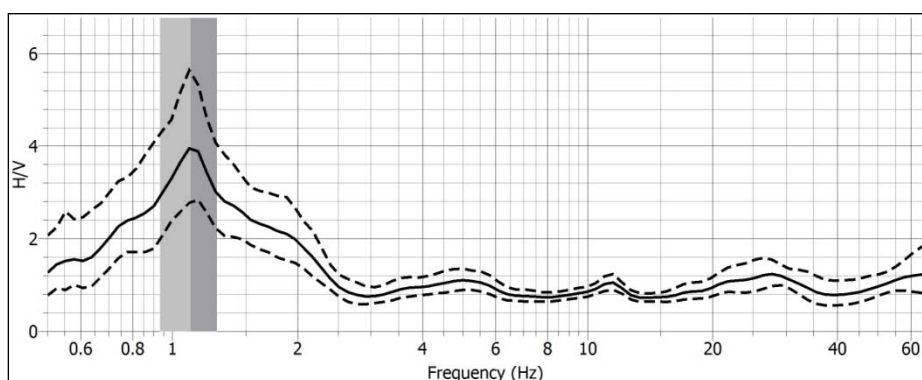
FIGURA 33: CURVE H/V RAPPRESENTATIVE DELL'AREA B



Si è poi individuato un settore intermedio (denominato C in figura 32) in cui la frequenza fondamentale di vibrazione risulta compresa tra 0.8 e 1.5 Hz, che ricomprende due situazioni differenti.

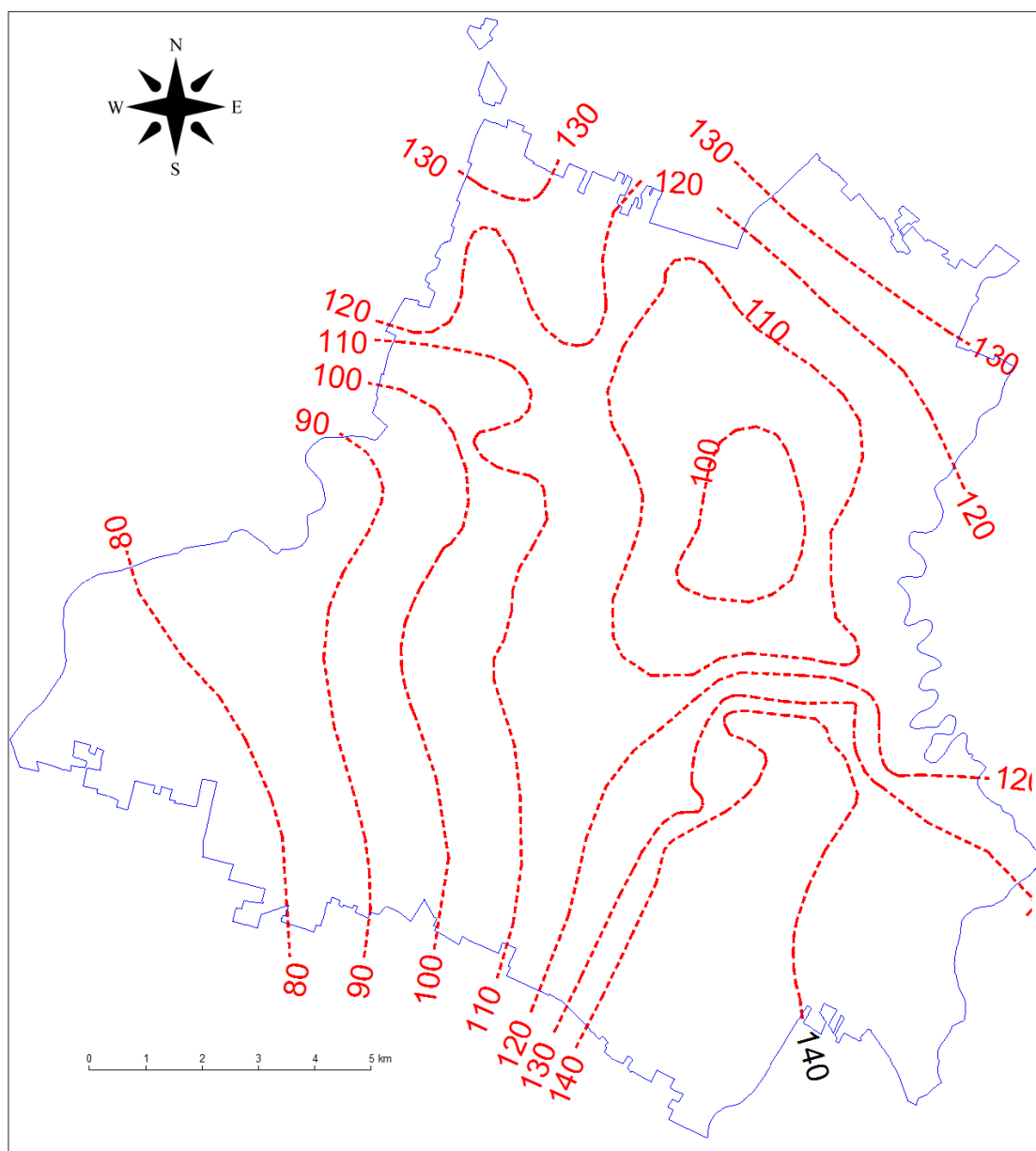
La prima (Area C1) è caratterizzata dalla presenza di un contrasto di impedenza significativo ad una profondità inferiore a 100 m con frequenze fondamentali comprese tra 1 e 1.5 Hz, con profilo tipico H/V riportato in figura 34.

FIGURA 34: CURVE H/V RAPPRESENTATIVE DELL'AREA C1



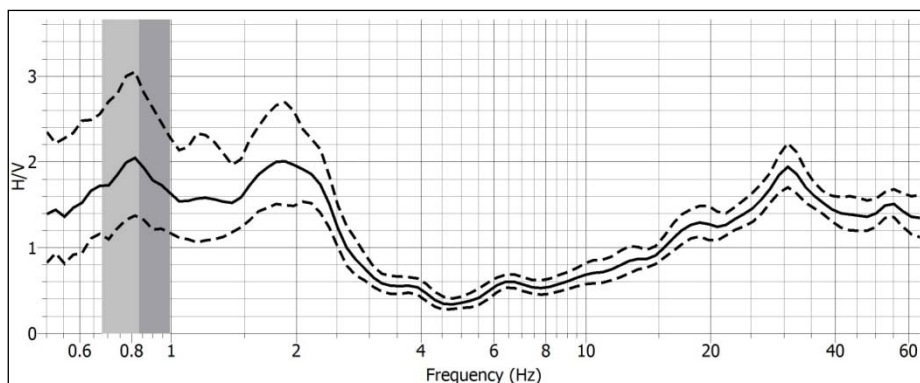
Una valutazione della profondità di tale contrasto è stata eseguita considerando un valore di V_{SH} medio delle coperture pari a 400 m/s, ed ottenendo per tutto il territorio comunale l'andamento riportato in figura 35, che si ritiene coincidente, anche sulla base delle ricostruzioni litostratigrafiche, con la base del subsistema di Bazzano (AES6). Tale limite è stato considerato a tutti gli effetti un substrato a comportamento rigido per lo studio di microzonazione sismica ("bedrock sismico").

FIGURA 35: BASE SUBSISTEMA DI BAZZANO (AES6)



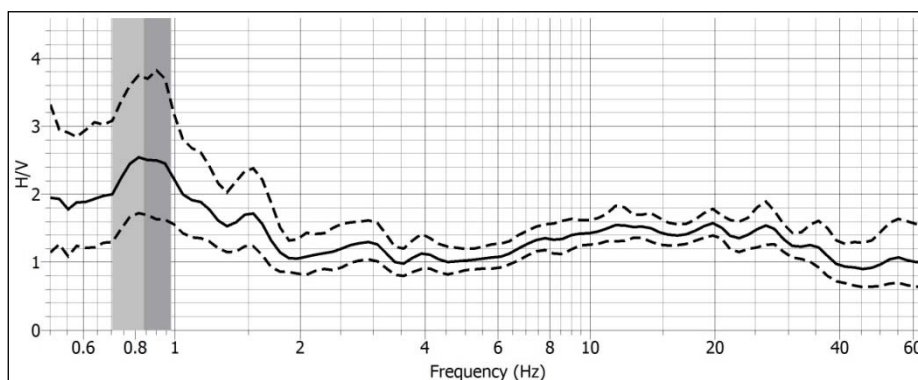
La seconda (Area C2) risulta caratterizzata dalla presenza di un contrasto di impedenza a profondità sicuramente maggiori di 100 metri, ma in cui viene anche rilevata una frequenza di vibrazione secondaria (f_1) associata al tetto dei primi depositi ghiaiosi (a profondità di circa 15-25 m), ma che presentano ampiezza H/V inferiore rispetto a quella della frequenza fondamentale (Figura 36) .

FIGURA 36: CURVE H/V RAPPRESENTATIVE DELL'AREA C2



L'ultimo settore individuato (Area D di figura 32) presenta esclusivamente picchi H/V a frequenze fondamentali comprese tra 0.7 e 1 Hz (Figura 37), associabile a un contrasto di impedenza collocato a profondità sicuramente superiore ai 100 m e come nel caso precedente ritenuto coincidente con la base del Subsistema di Bazzano (AES6).

FIGURA 37: CURVE H/V RAPPRESENTATIVE DELL'AREA D



6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Considerando la scala territoriale dell'analisi effettuate, nonostante la buona densità di informazioni della banca dati, si ritiene che lo studio di microzonazione sismica risenta comunque del fatto che derivi da un processo interpretativo "soggettivo", con il quale si tenta di inquadrare i risultati nell'ambito di una struttura generale, che non può necessariamente considerare tutte le variabili che caratterizzano un contesto come quello di pianura, in cui si alternano spazialmente e temporalmente fenomeni morfogenetici differenti e a volte piuttosto complessi.

L'obiettivo è stato quello di ipotizzare un modello il più possibile coerente con i dati oggettivi, cercando, nel contempo, di renderlo facilmente comprensibile a tutti e non solo dai tecnici di settore.

Tra le scelte effettuate quella che di fatto ha inciso in maniera significativa sui risultati dello studio di microzonazione è rappresentata dalla definizione del bedrock sismico, che secondo la consuetudine viene associato a un terreno rigido caratterizzato da velocità delle onde di taglio ≥ 800 m/s. Nel contesto geologico del territorio Comunale di Modena, non disponendo di indagini geofisiche di dettaglio in profondità, si è ritenuto cautelativamente di considerare il bedrock sismico coincidente la base del Subsistema di Bazzano (AES6) che dalle ricostruzioni stratigrafiche effettuate di fatto coincide con il contrasto significativo di impedenza sismica rilevato su quasi tutto il territorio con la tecnica HVSR, con i terreni del substrato che, da bibliografia, risultano essere caratterizzati da Vs di circa 600-650 m/s.

Tale assunzione ha come effetto diretto, per la stima dei fattori di amplificazione, l'adozione di specifici abachi regionali contenuti nell'Allegato A2 del DAL 112/2007, che si basano proprio sulla distinzione della profondità del substrato (maggiore o minore di 100 m da p.c.).

Un'altra assunzione che occorre sottolineare è stata quella relativa all'applicazione della tabella prevista dalla DAL 112/2007 per il margine appenninico-padano con substrato marino caratterizzato da $V_s \leq 800$ m/s, per l'area di conoide del F. Secchia, in cui la tecnica HVSR ha evidenziato forti contrasti di impedenza sismica tra le coperture che possono raggiungere i 25-30 metri di spessore e caratterizzate da Vs medie di circa 200 m/s, e il substrato ghiaioso che presenta spessori pluridecametrici e velocità medie nettamente superiori di 450/500 m/s. Si ritiene infatti che tale situazione stratigrafica possa determinare modifiche significative del moto sismico sia in termini di ampiezza, durata e contenuto in frequenza.

7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Lo studio di microzonazione sismica del Comune di Modena è stato effettuato facendo riferimento ai seguenti strumenti legislativi ed indirizzi:

- *"Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"* approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (ICMS)- 2008;
- Delibera di Giunta Regionale n° 630/2019 aggiornamento degli *"Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"*;

Per l'esecuzione dello studio si è preliminarmente prodotta la Carta geologico-tecnica dell'intero territorio Comunale, all'interno della quale sono riportate le informazioni geologiche di base per la definizione del modello di sottosuolo funzionali alla realizzazione della carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (livello 1), ed in cui sono state individuate e suddivise le unità geologico-litotecnica, in riferimento alle caratteristiche litologiche delle coperture presenti.

A partire dagli elementi contenuti nella Carta geologica tecnica, si è costruita la **carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (livello 1)**, che descrive localmente il territorio individuando e delimitando le zone a comportamento equivalente in situazioni di sollecitazione sismica, descrivendo, conseguentemente, le condizioni di pericolosità sismica del territorio.

In tale cartografia sono state individuate le seguenti classi di zone:

- Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali;
- Zone di attenzione per instabilità (ZA);

Le **zone stabili suscettibili di amplificazioni locali** ricomprendono le aree con specifiche caratteristiche stratigrafiche, e coperture tali da indurre effetti locali con amplificazione del moto sismico. Sono state distinte 19 zone differenti.

Facendo riferimento alla figura 32 che suddivide il territorio in porzioni omogenee da un punto di vista sismico le zone individuare ricomprendono:

- La zona 1 corrisponde all'area individuata dalla lettera A;
- Le zone da 2 a 11 sono ricomprese nell'area B (in particolare le zone omogenee 2, 3, 4, 6, 8, e 10 presentano esclusivamente come effetti attesi l'amplificazione stratigrafica, mentre le 5, 7, 9 e 11 sono ricomprese all'interno di zone di attenzione della liquefazione);
- Le zone da 12 a 15 risultano essere ricomprese nelle aree C1 e C2 (in particolare le zone omogenee 12 e 14 presentano esclusivamente come effetti attesi l'amplificazione stratigrafica, mentre la 13 e 15 sono ricomprese anche all'interno di zone di attenzione della liquefazione);
- La zona da 16 a 19 ricadono all'interno dell'area D (in particolare le zone omogenee 16 e 18 presentano esclusivamente come effetti attesi l'amplificazione stratigrafica, mentre la 17 e 19 sono ricomprese all'interno di zone di attenzione della liquefazione).

Di seguito sono riassunte le caratteristiche principali delle zone individuate.

ZONA 1

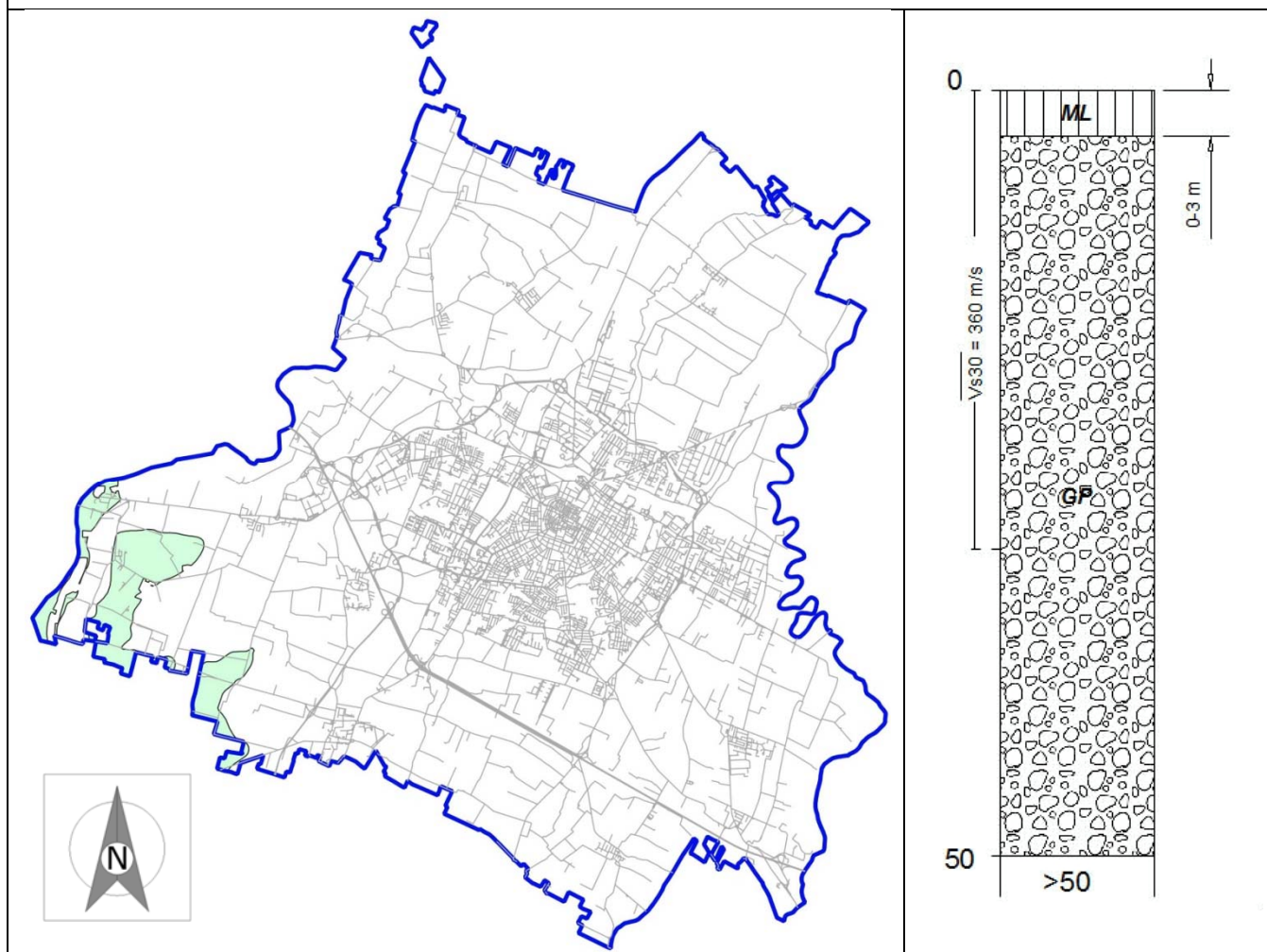
Le zone 1 corrispondono ad aree con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore inferiore a 3 metri, caratterizzato da valori di Vs30 medi pari a circa 360 m/sec e valori di Vs dei depositi ghiaiosi di 450/500 m/sec. Profondità substrato sismico 70-90 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: indagini per caratterizzare le Vs; è prevista la valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Studi richiesti: Valutazione del coefficiente di amplificazione dovuto alle caratteristiche litologiche;

Microzonazione sismica: 2° livello di approfondimento;



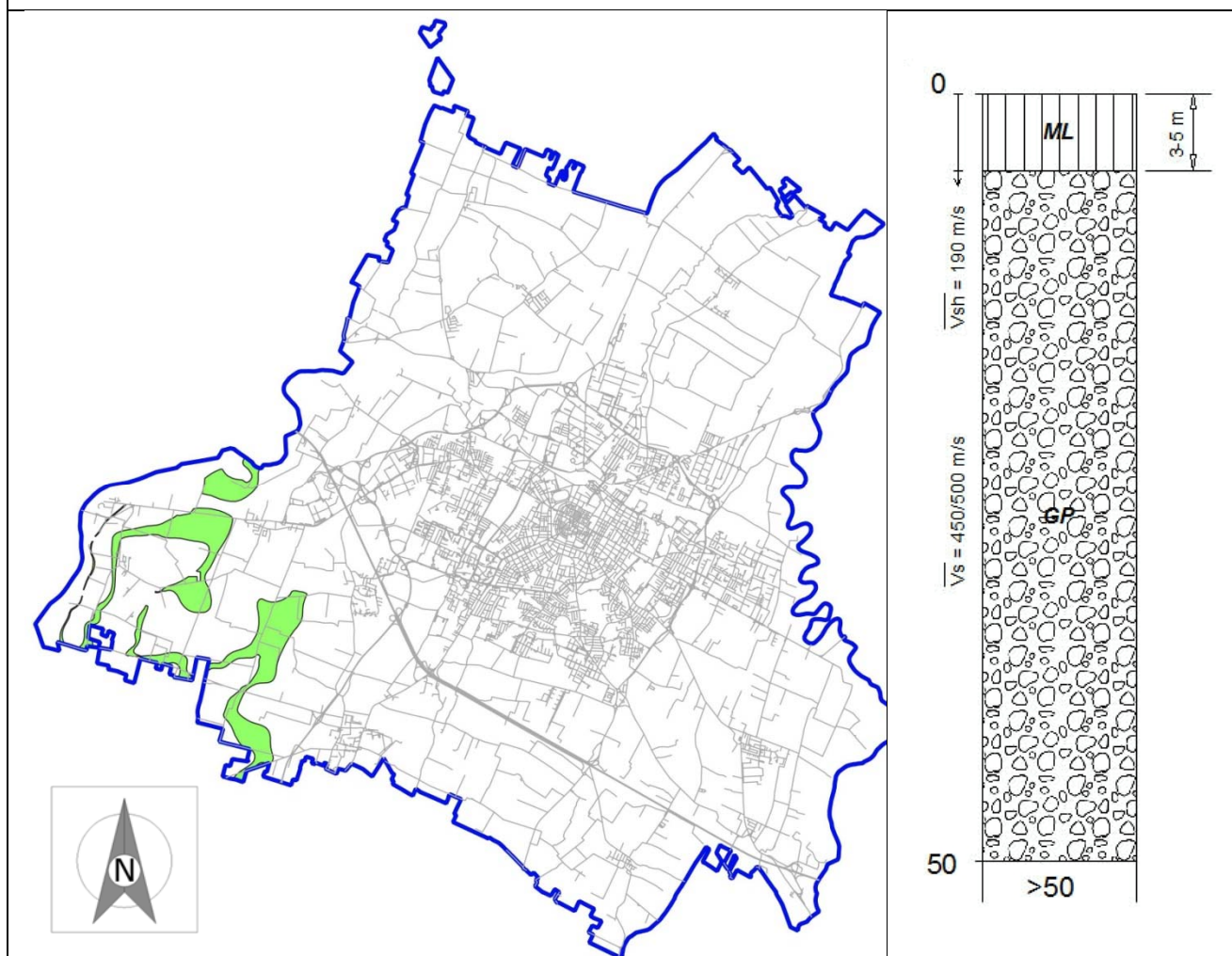
ZONA 2

La zona 2 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 3 a 5 metri. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 190 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 70-90 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: 2° livello di approfondimento;



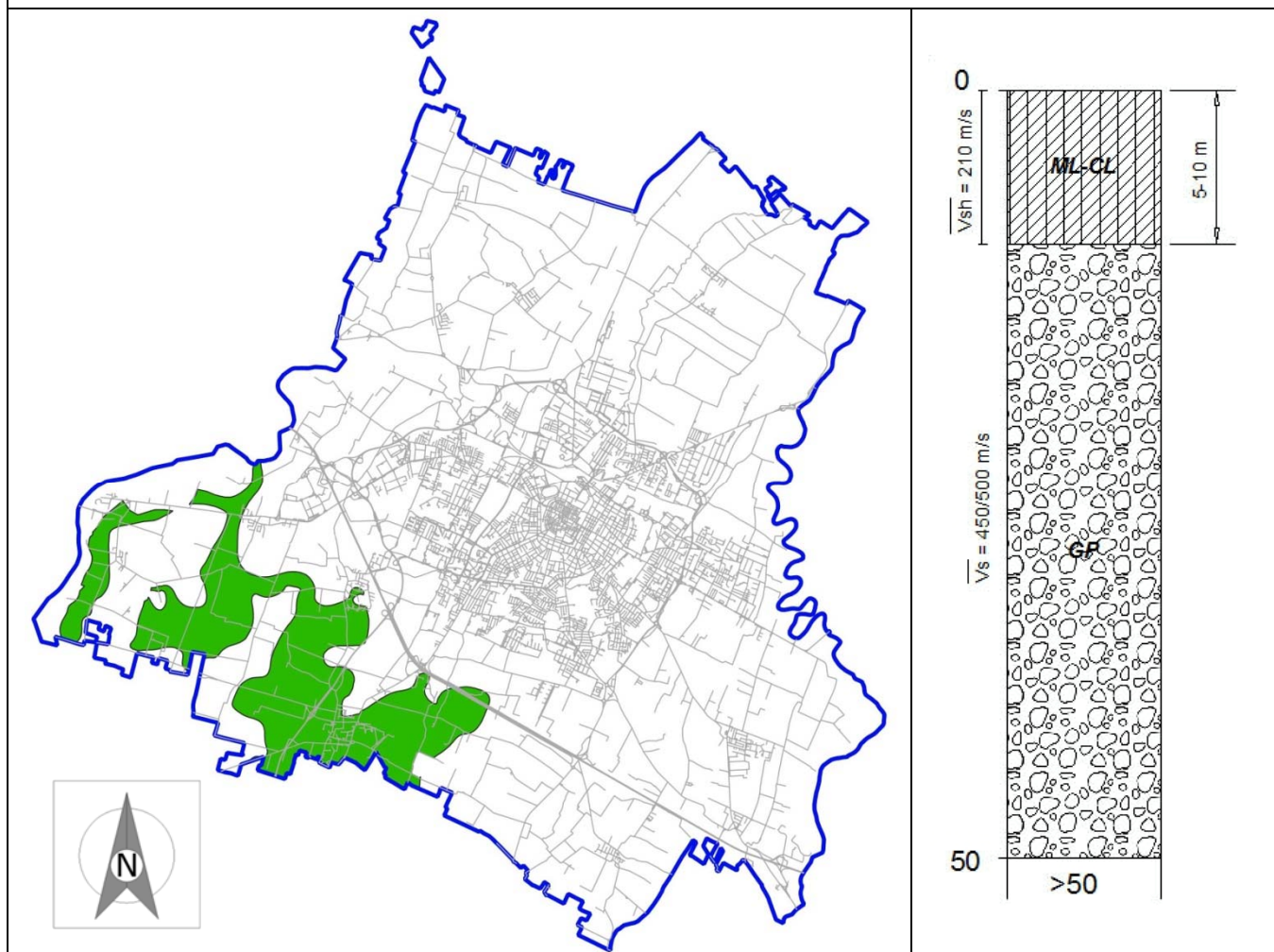
ZONA 3

La zona 3 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 5 a 10 metri. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 210 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 70-110 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



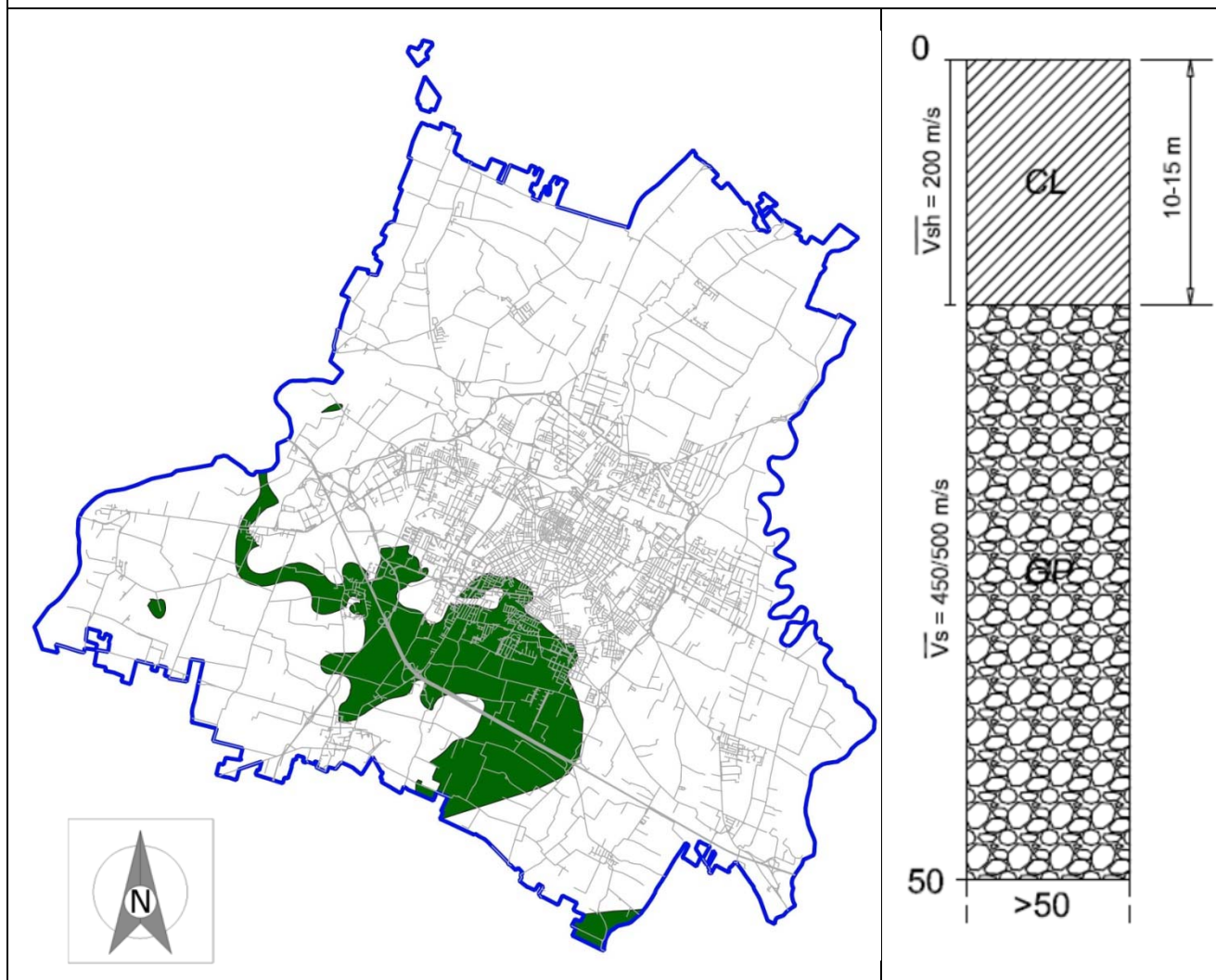
ZONA 4

La zona 4 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 10 a 15 metri. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 200 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 80-140 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



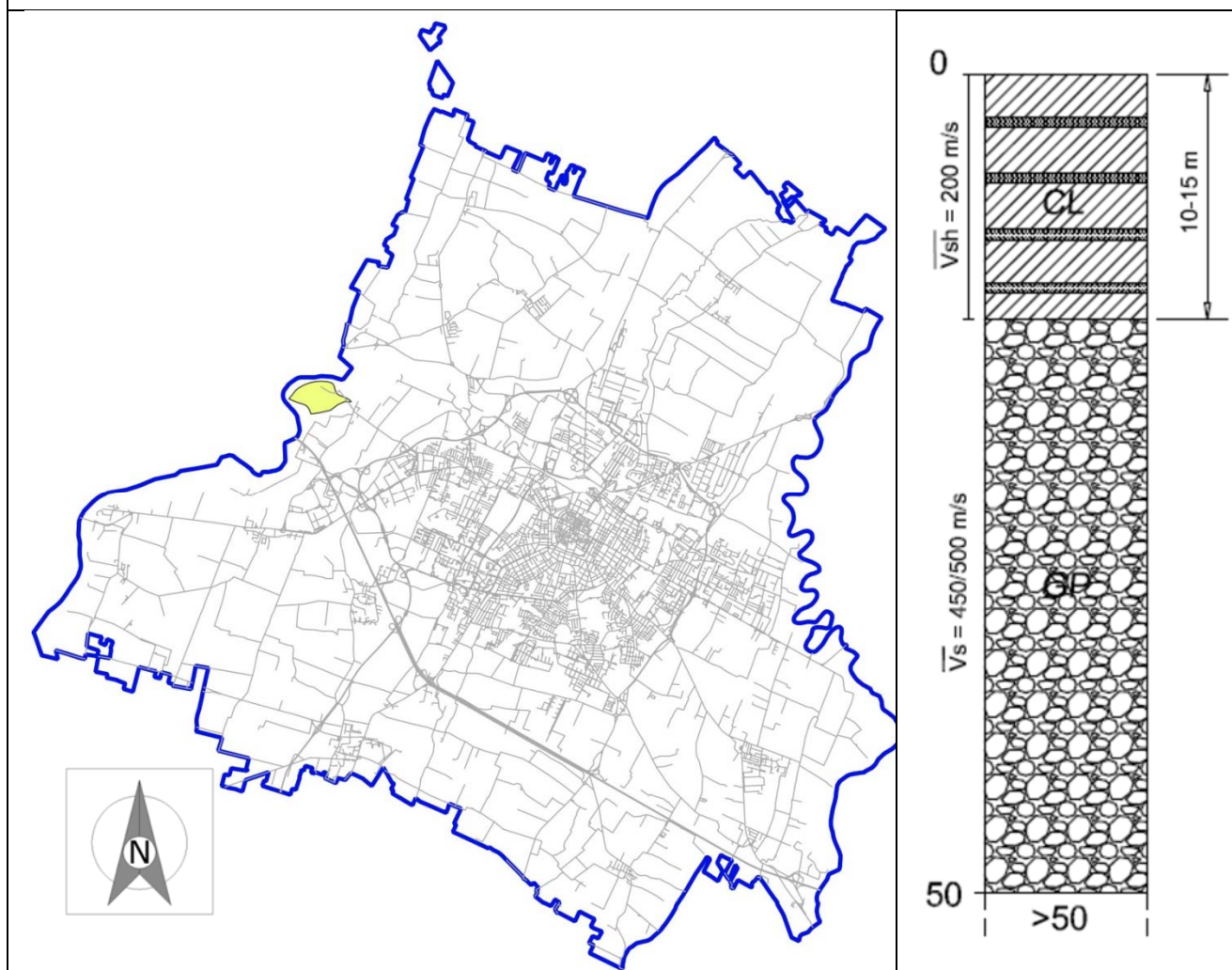
ZONA 5

La zona 5 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 10 a 15 metri e presenza di livelli sabbiosi potenzialmente liquefacibili nei primi 20 metri. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 200 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 80-140 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica e potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione



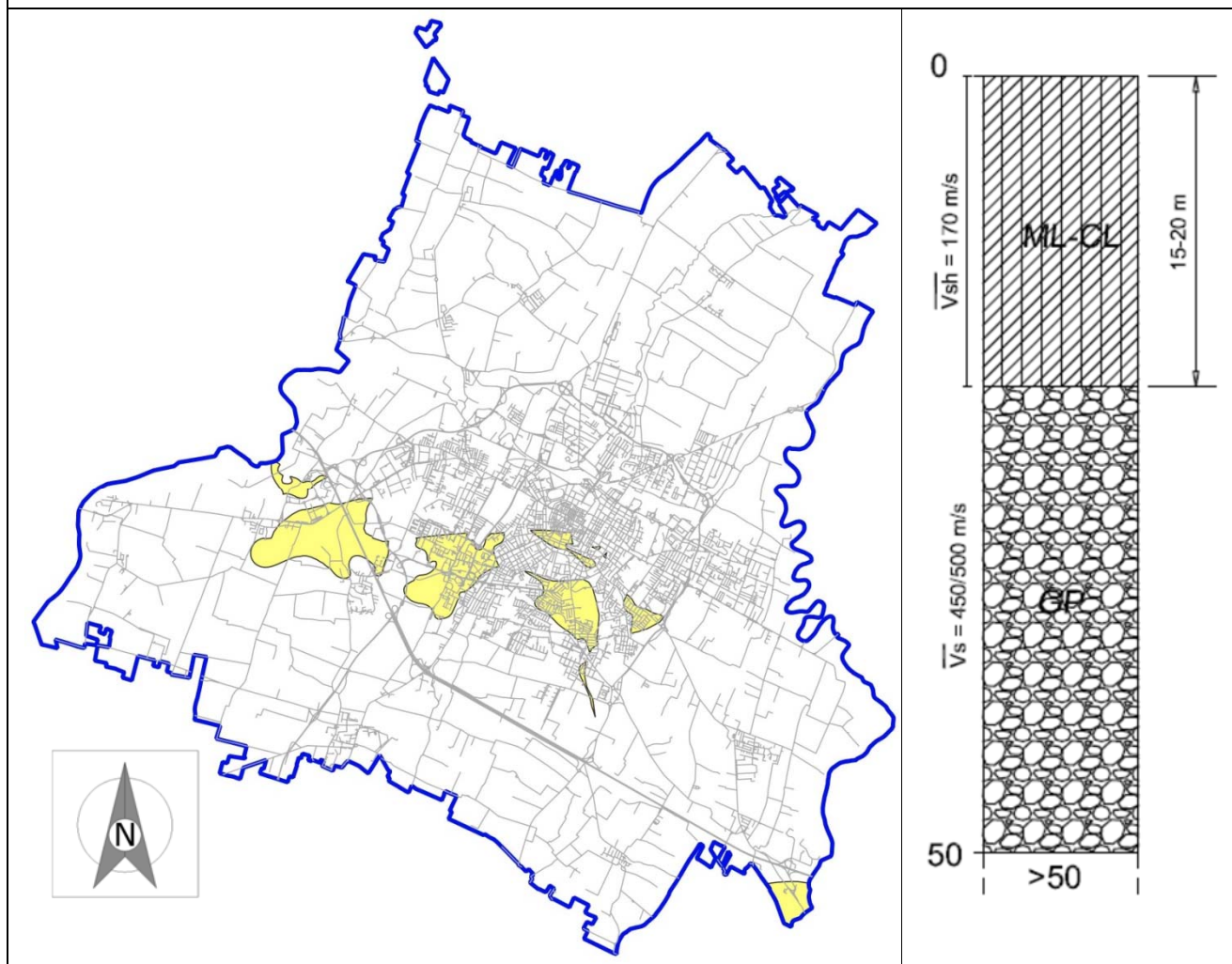
ZONA 6

La zona 6 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 15 a 20 metri. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 170 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 90-140 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



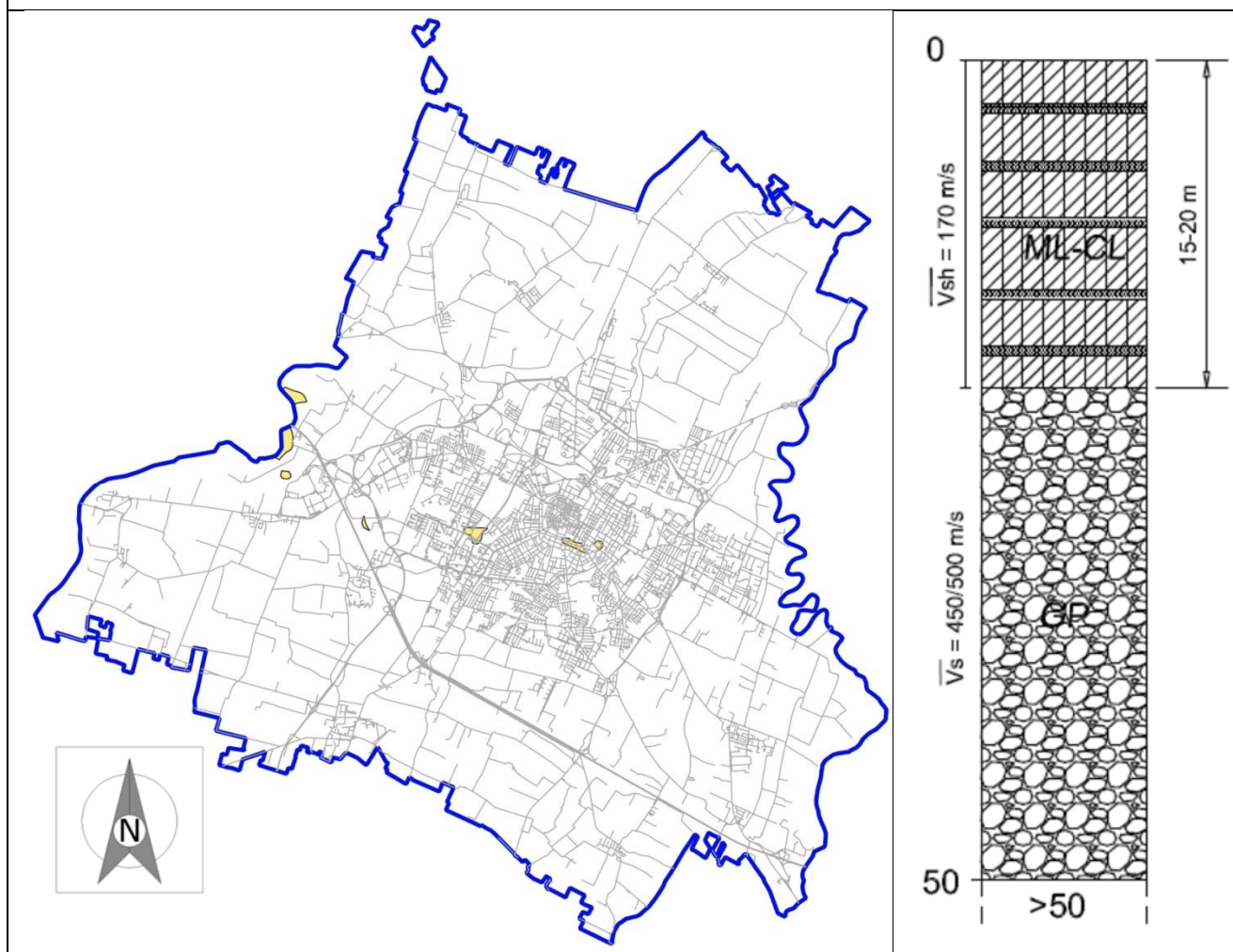
ZONA 7

La zona 7 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 15 a 20 metri e presenza di livelli sabbiosi potenzialmente liquefacibili nei primi 20 metri.. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 170 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 90-140 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione.



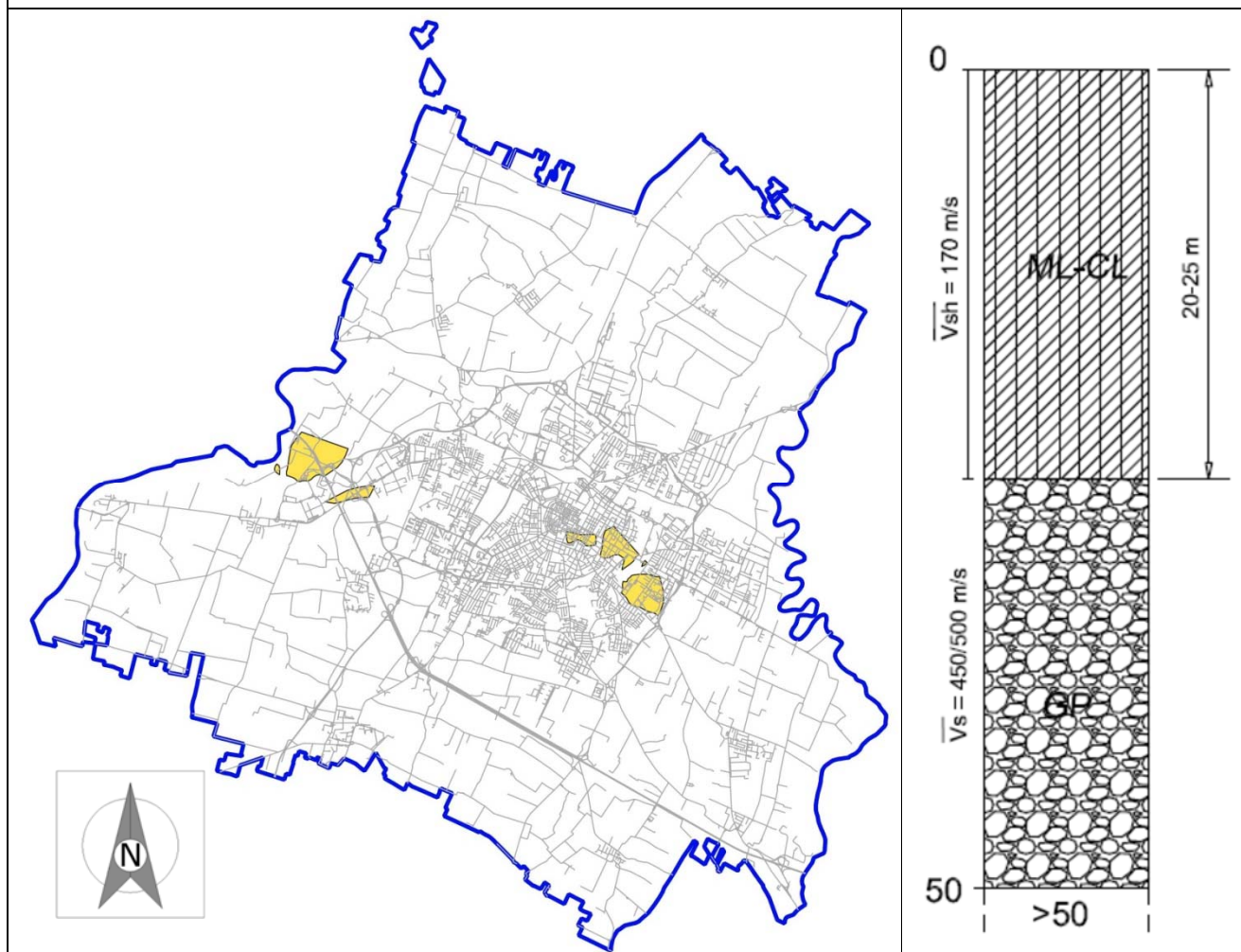
ZONA 8

La zona 8 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 20 a 25 metri. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 170 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 90-140 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



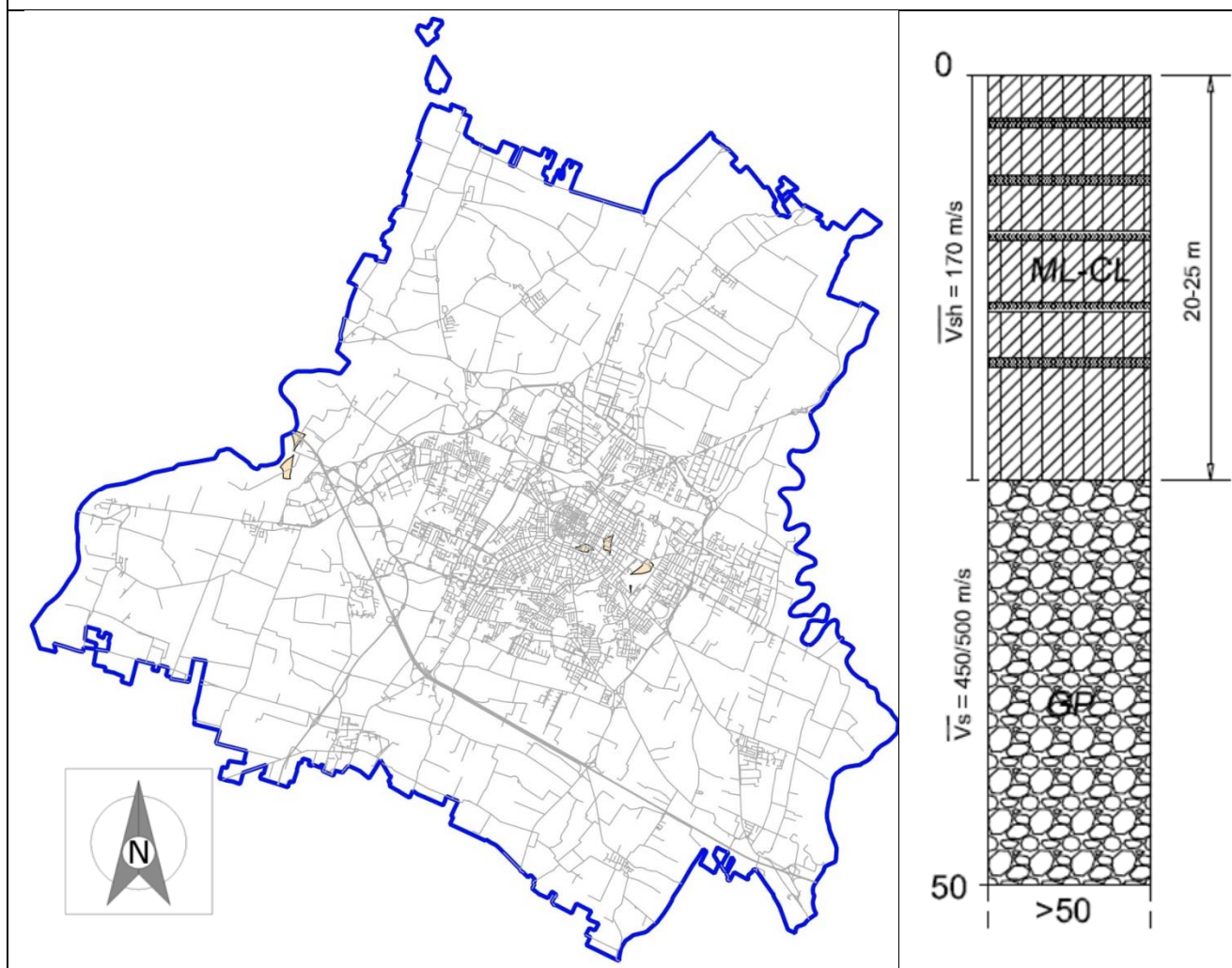
ZONA 9

La zona 9 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 20 a 25 metri e presenza di livelli sabbiosi potenzialmente liquefacibili nei primi 20 metri.. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 170 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 90-140 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione.



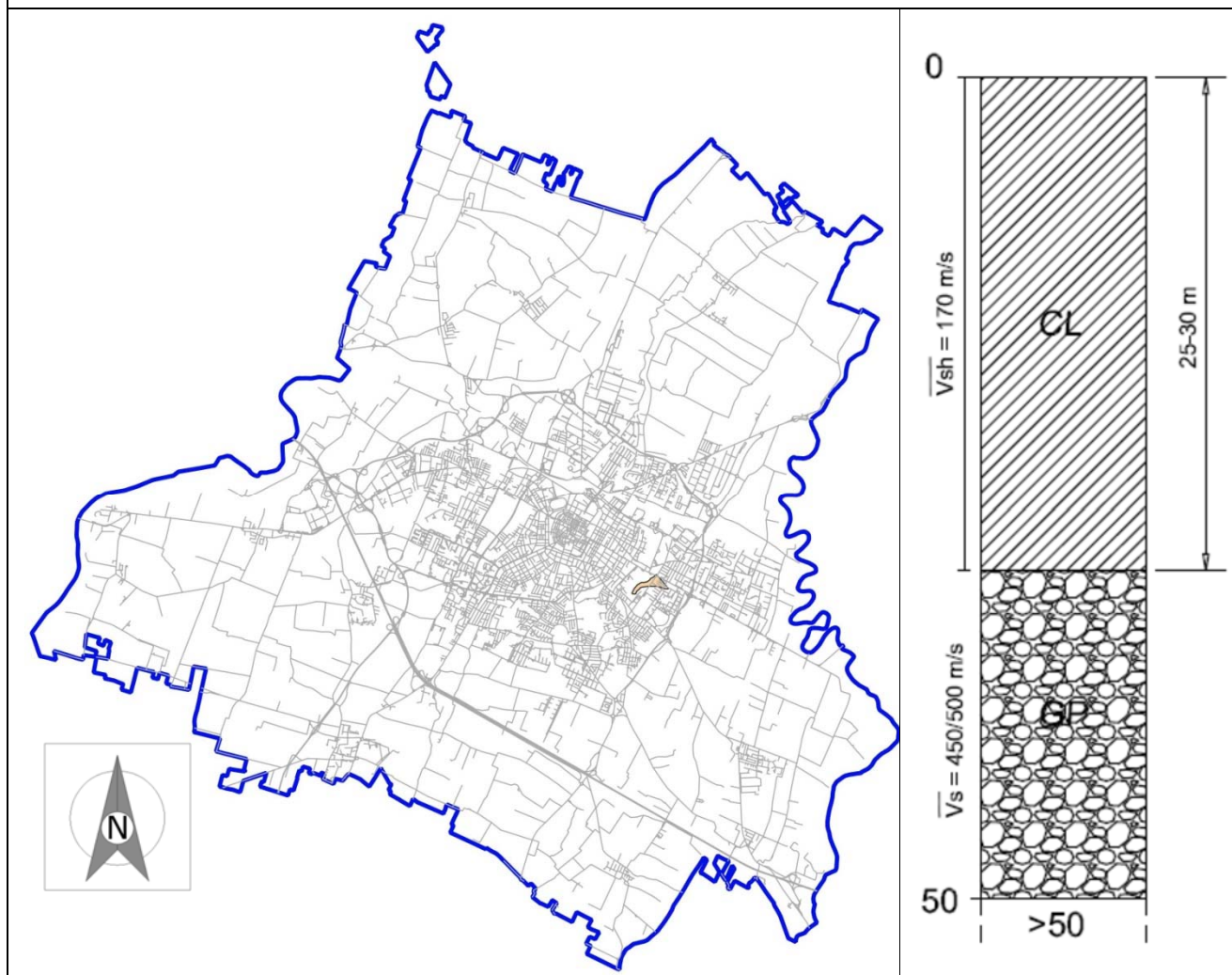
ZONA 10

La zona 10 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 25 a 30 metri. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 170 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 90-140 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



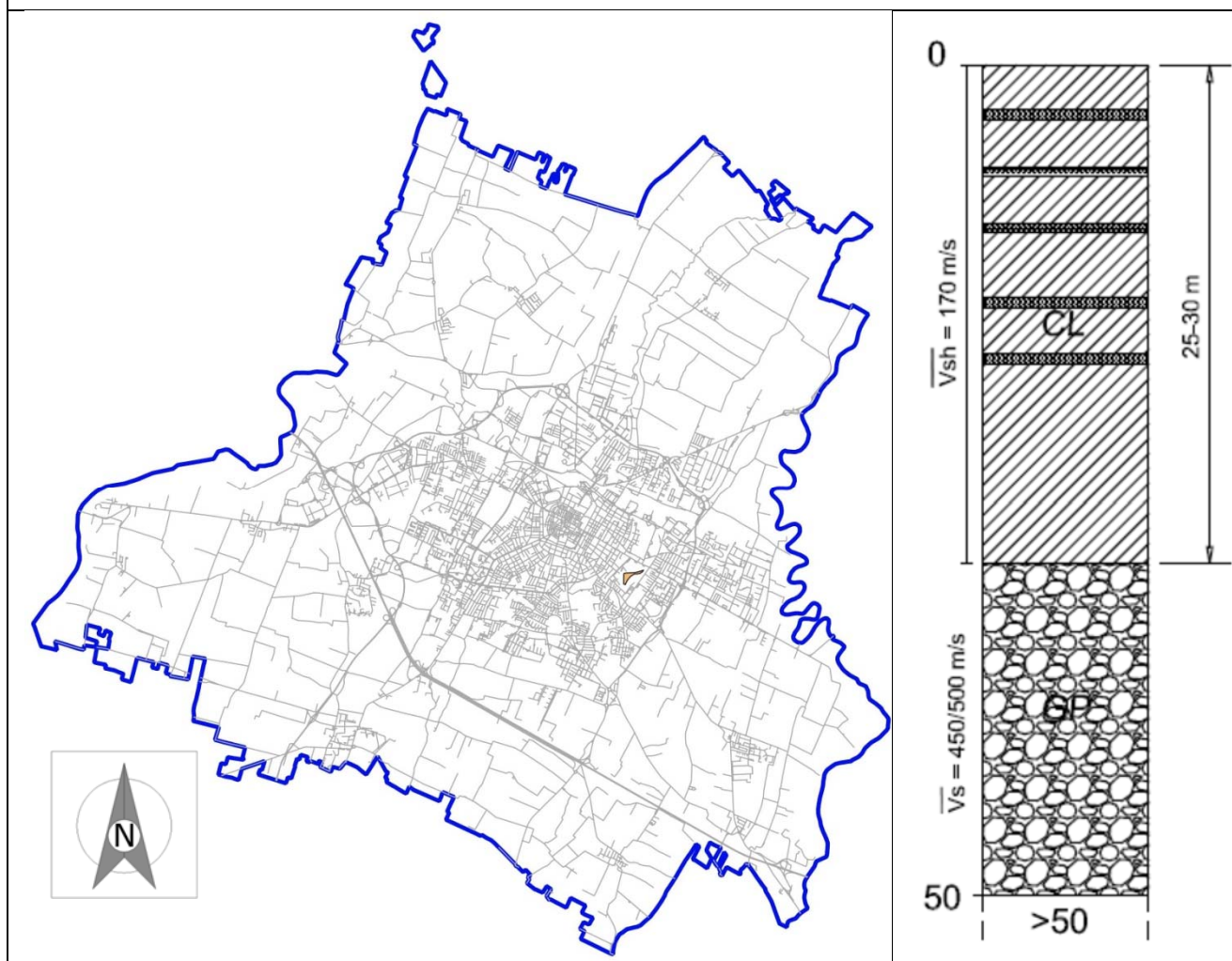
ZONA 11

La zona 11 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido costituito da banchi ghiaiosi pluridecametrici con terreni limoso-argillosi di copertura di spessore variabili da 25 a 30 metri e presenza di livelli sabbiosi potenzialmente liquefacibili nei primi 20 metri.. I terreni di copertura presentano valori medi di V_{sh} pari a 170 m/s, mentre i sottostanti livelli ghiaiosi V_s medie di 450/500 m/s. Profondità substrato sismico 90-140 m.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione.



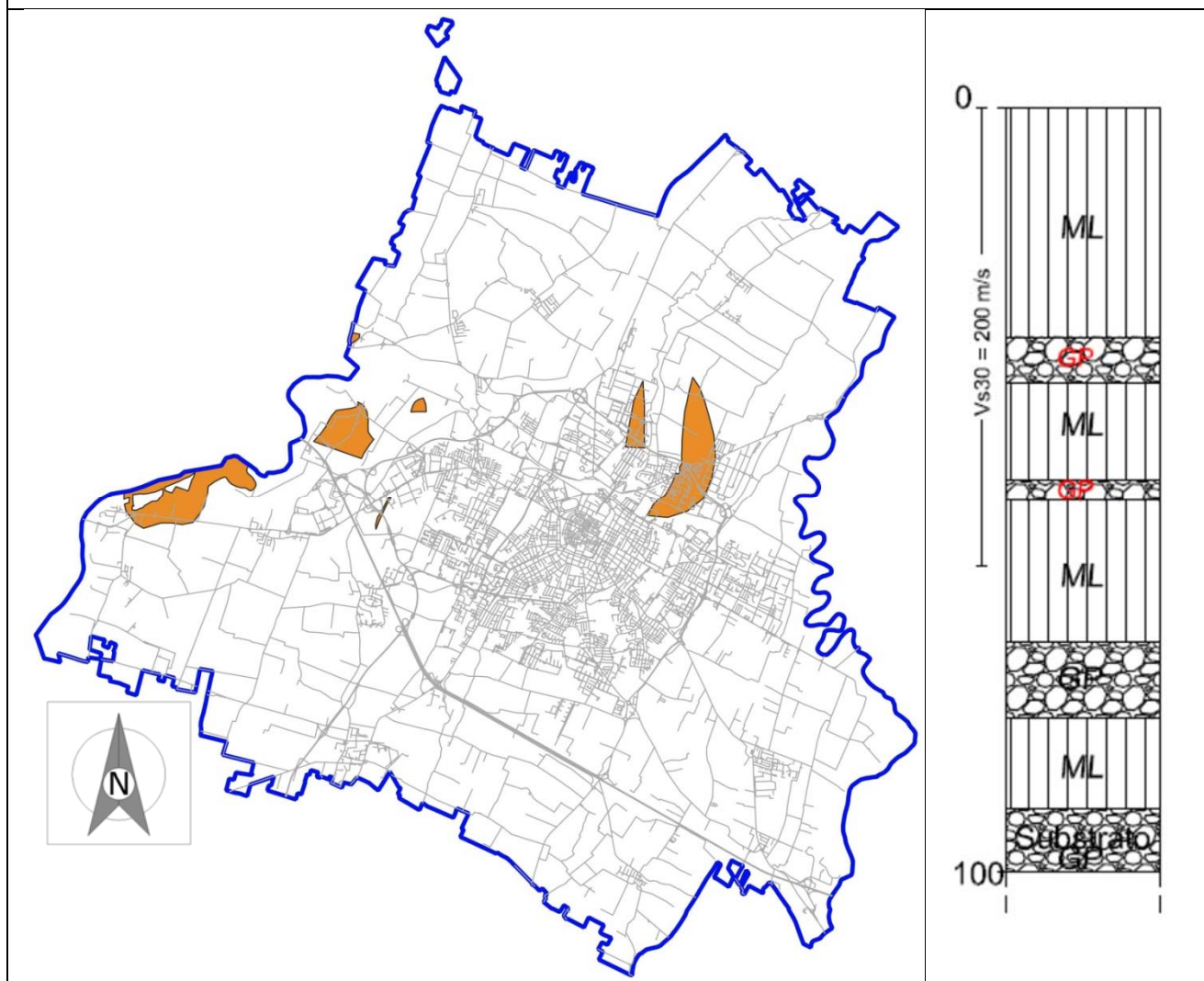
ZONA 12

La zona 12 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido individuato con la tecnica HVSR e dalle ricostruzioni litostratigrafiche collocato a profondità inferiori a 100 m dal piano di campagna. I terreni sovrastanti sono rappresentati da alternanza di litotipi argilloso-limosi e ghiaiosi, con i primi che risultano prevalenti. In tali zone si registrano valori di Vs30 mediamente pari a circa 200 m/s.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



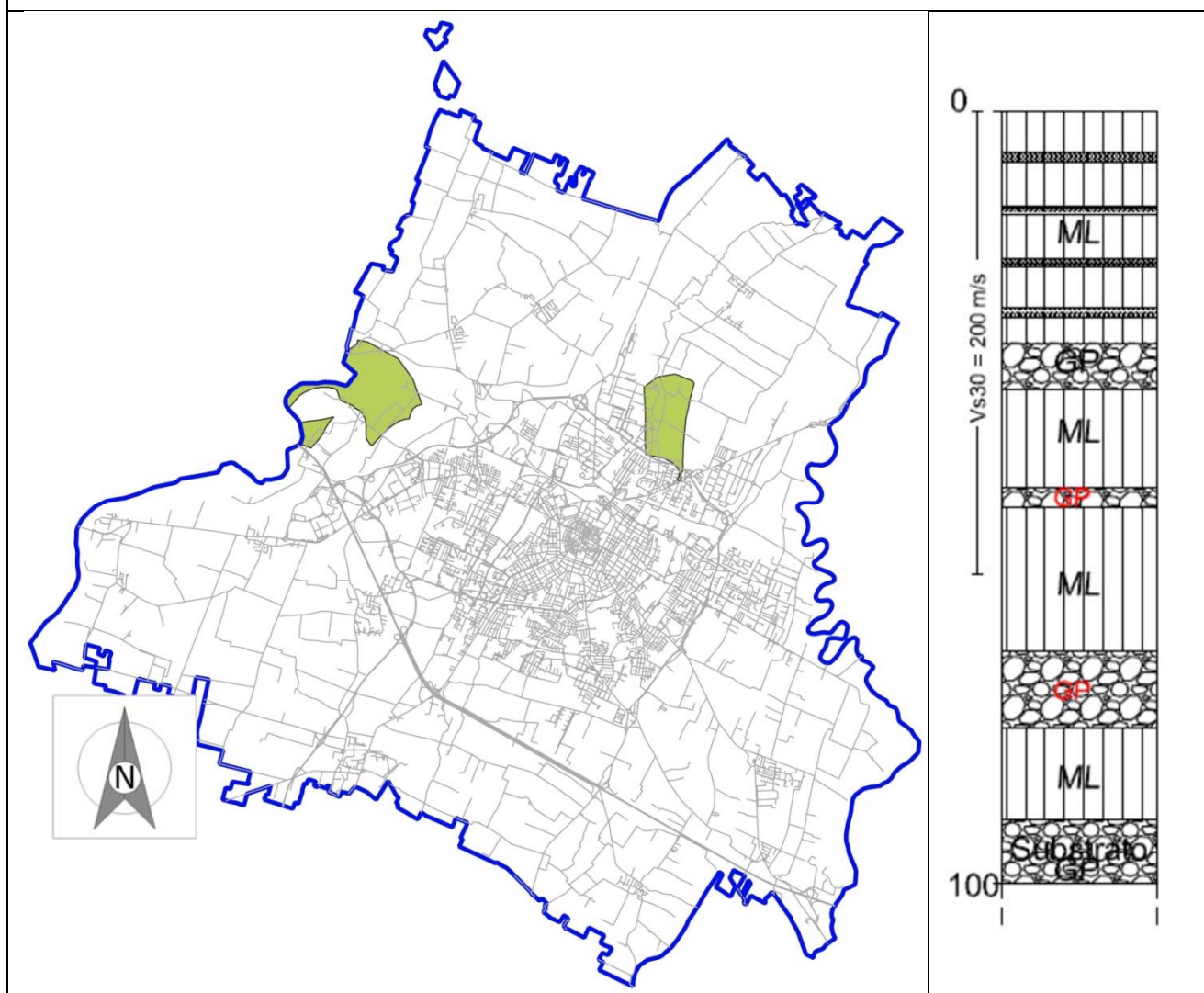
ZONA 13

La zona 13 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido individuato con la tecnica HVSR e dalle ricostruzioni litostratigrafiche collocato a profondità inferiori a 100 m dal piano di campagna. I terreni sovrastanti sono rappresentati da alternanza di litotipi argilloso-limosi e ghiaiosi, con i primi che risultano prevalenti. Presenza di livelli sabbiosi potenzialmente liquefacibili nei primi 20 metri. In tali zone si registrano valori di Vs30 mediamente pari a circa 200 m/s.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione.



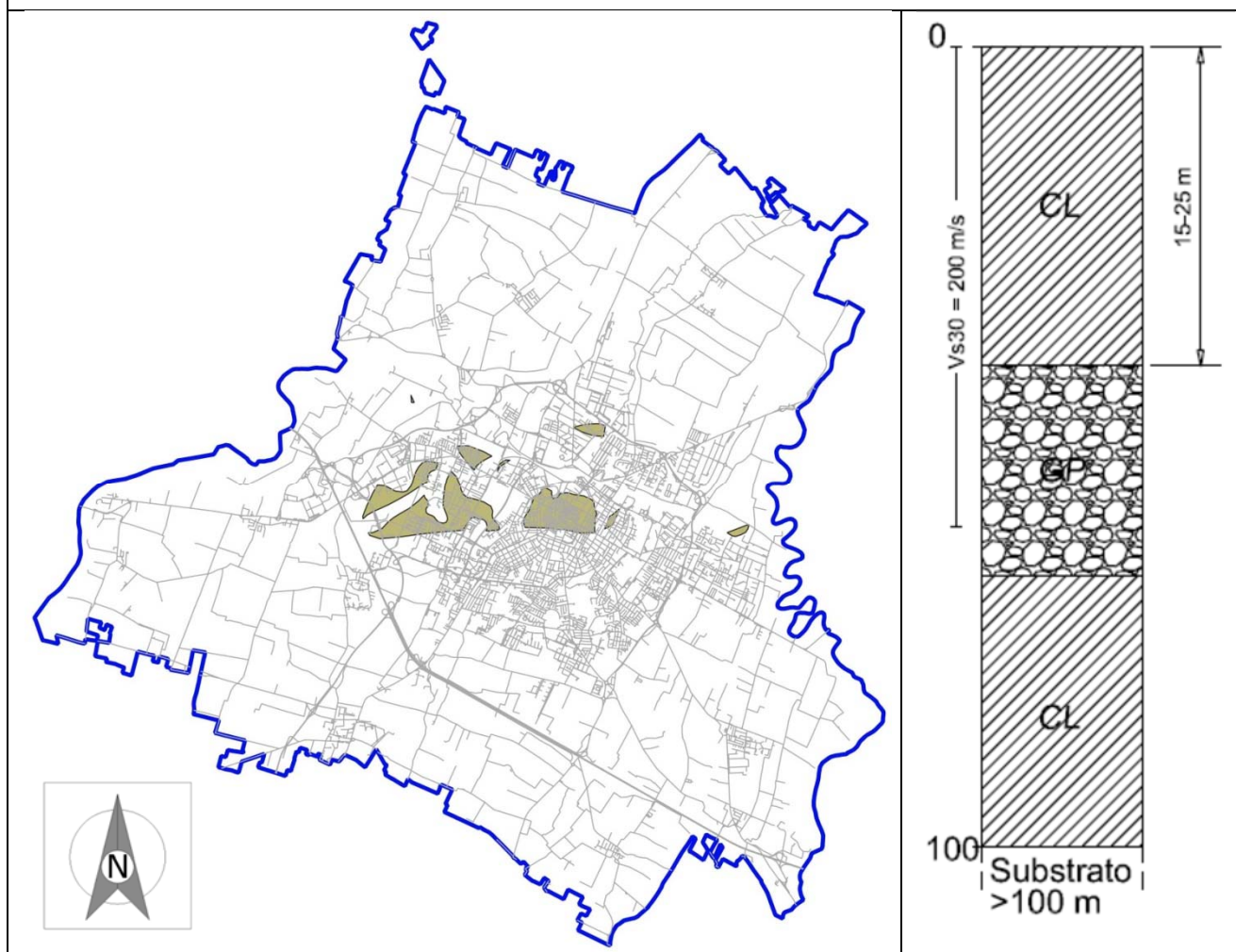
ZONA 14

La zona 14 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido individuato con la tecnica HVSR e dalle ricostruzioni litostratigrafiche a profondità maggiori di 100 m dal piano di campagna (100-120 m), in cui sono comunque presenti tra 15-25 m di profondità dal piano campagna livelli ghiaiosi di spessore significativo e tali da determinare contrasti di impedenza con le coperture sovrastanti. La frequenza fondamentale di vibrazione (f_0) risulta compresa tra 0.8 e 1 Hz. . In tali zone si registrano valori di Vs30 mediamente pari a circa 200 m/s.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



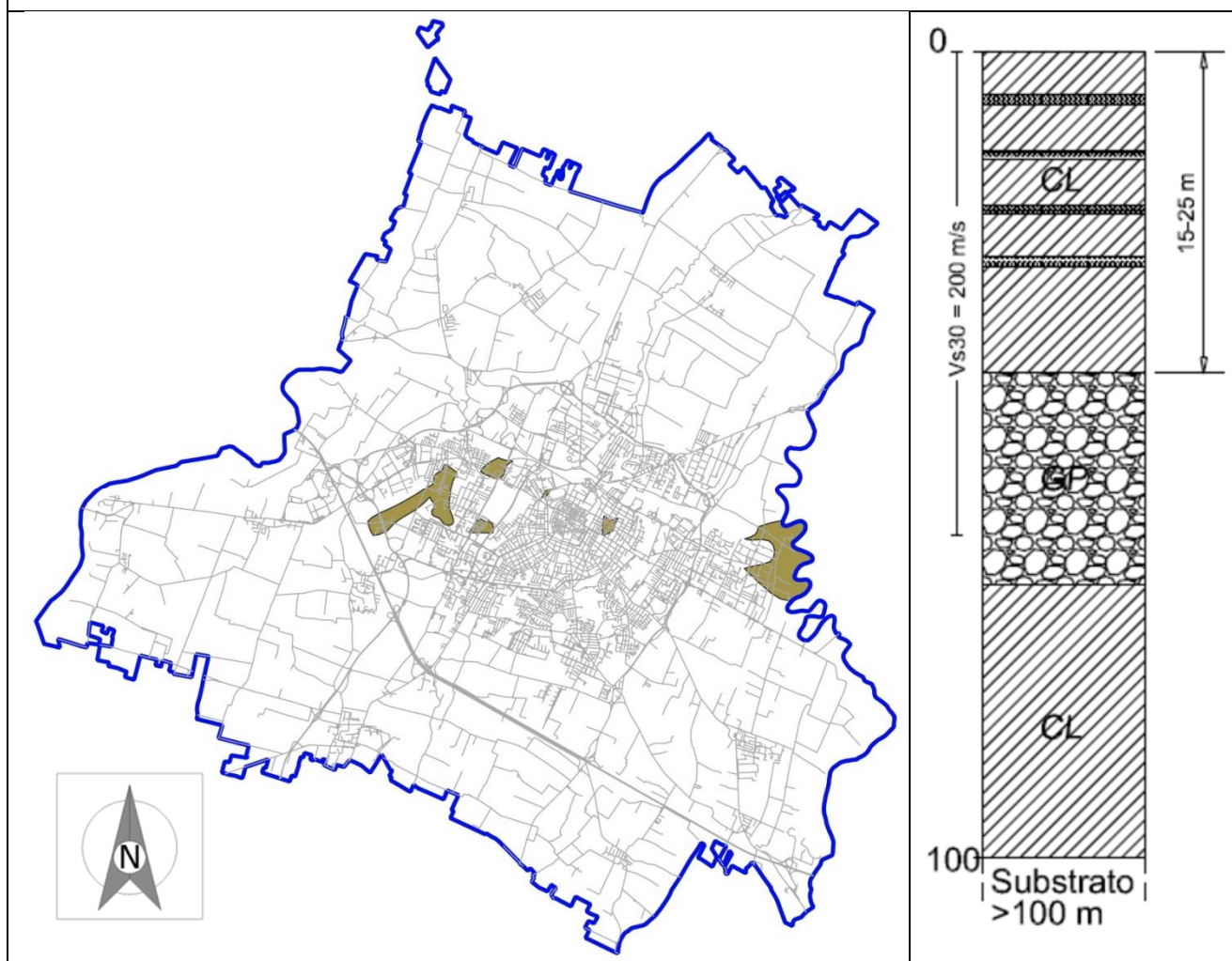
ZONA 15

La zona 15 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido individuato con la tecnica HVSR e dalle ricostruzioni litostratigrafiche a profondità maggiori di 100 m dal piano di campagna (100-120 m), in cui sono comunque presenti tra 15-25 m di profondità dal piano campagna livelli ghiaiosi di spessore significativo e tali da determinare contrasti di impedenza con le coperture sovrastanti. Presenza di livelli sabbiosi potenzialmente liquefacibili nei primi 20 metri. La frequenza fondamentale di vibrazione (f_0) risulta compresa tra 0.8 e 1 Hz. . In tali zone si registrano valori di V_{s30} mediamente pari a circa 200 m/s.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione.



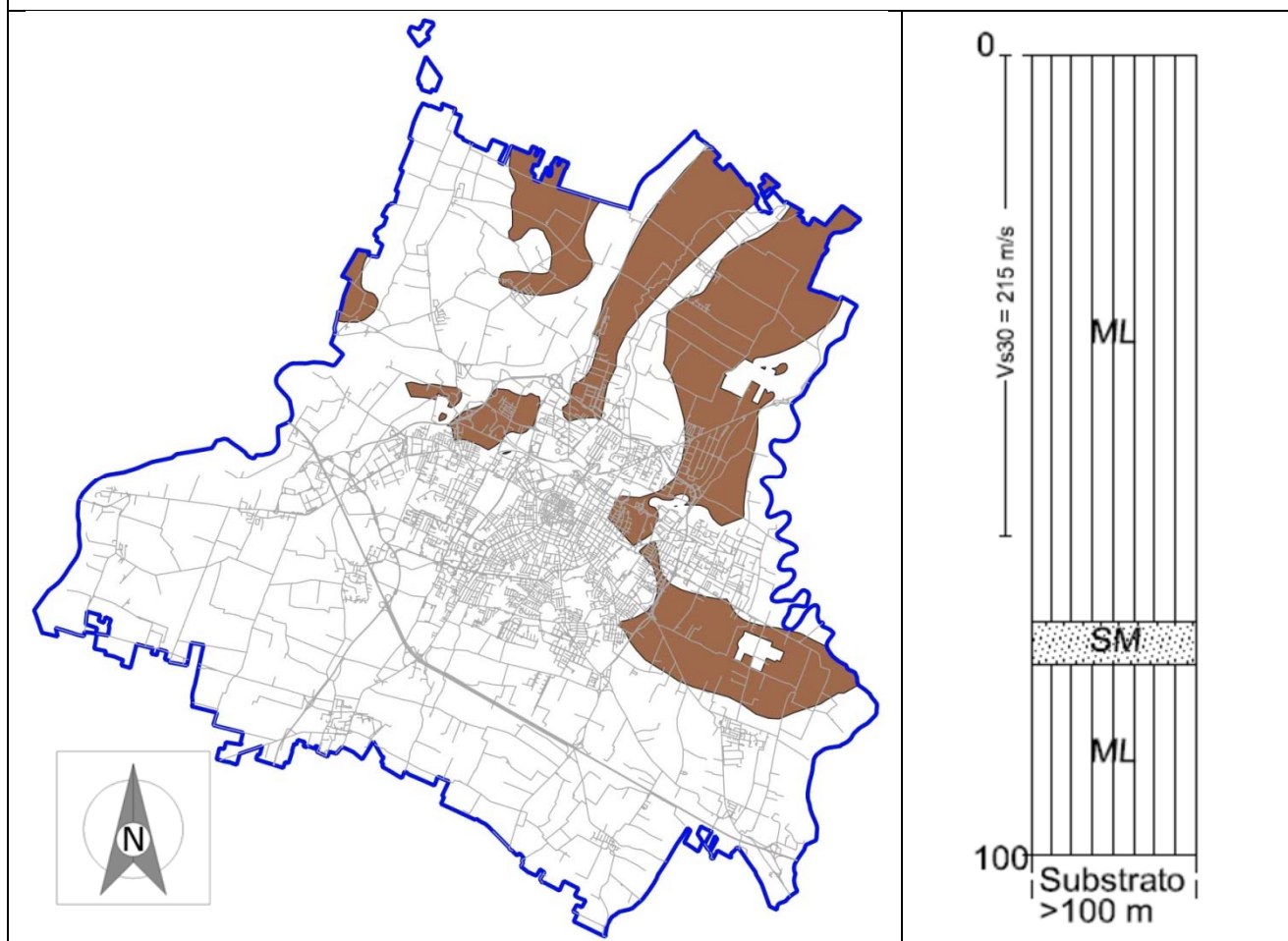
ZONA 16

La zona 16 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido individuato con la tecnica HVSR e dalle ricostruzioni litostratigrafiche a profondità maggiori di 100 m dal piano di campagna. Terreni prevalentemente limosi e limo-argillosi con sottili intercalazioni di limi-sabbiosi e sabbie. La frequenza fondamentale di vibrazione (f_0) risultano compresa tra 0.6 e 1 Hz. . In tali zone si registrano valori di V_{s30} mediamente pari a circa 215 m/s.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



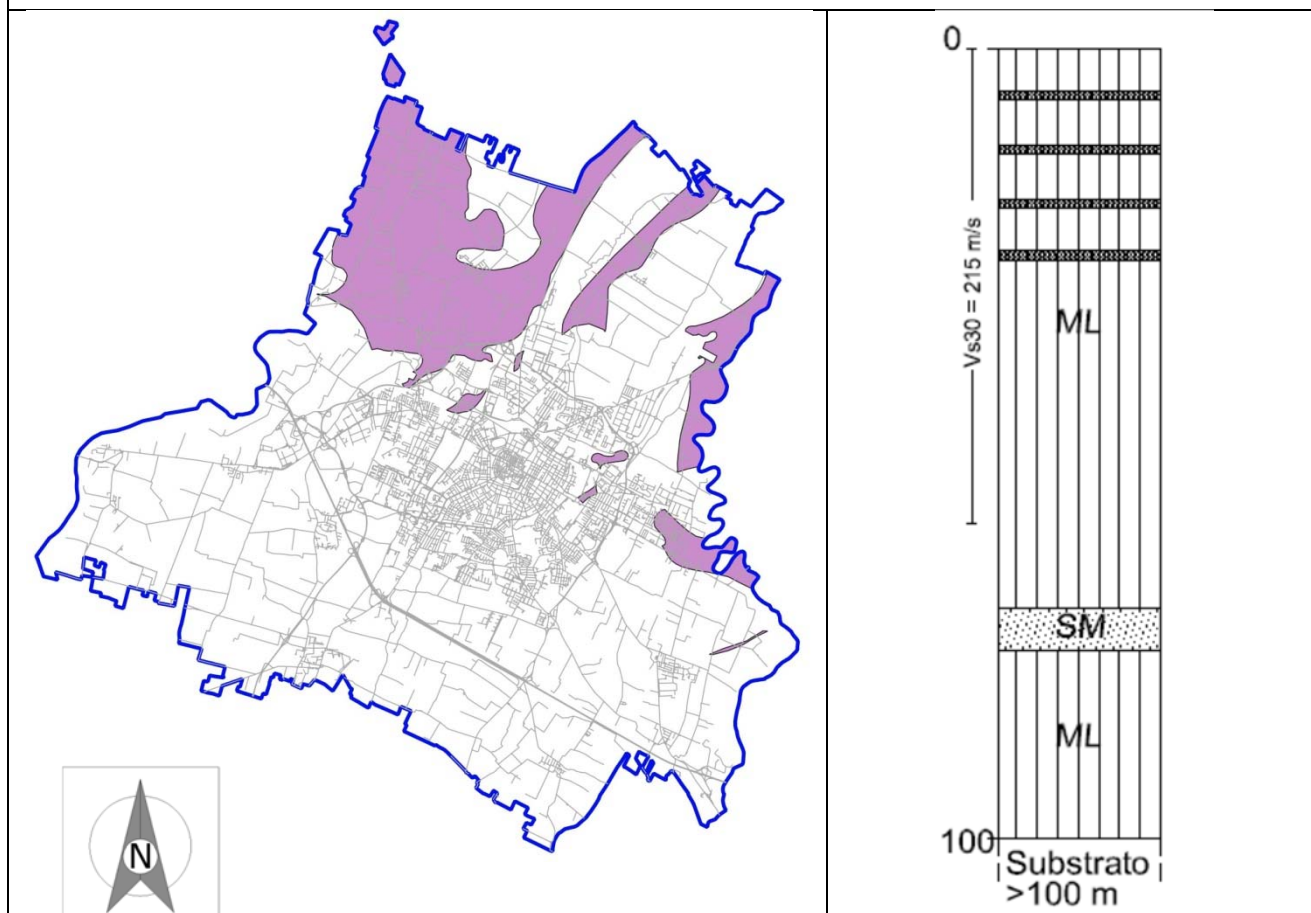
ZONA 17

La zona 17 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido individuato con la tecnica HVSR e dalle ricostruzioni litostratigrafiche a profondità maggiori di 100 m dal piano di campagna. Terreni prevalentemente limosi e limo-argillosi con la presenza di livelli sabbiosi potenzialmente liquefacibili nei primi 20 metri.. La frequenza fondamentale di vibrazione (f_0) risultano compresa tra 0.6 e 1 Hz. . In tali zone si registrano valori di V_{s30} mediamente pari a circa 215 m/s.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione.



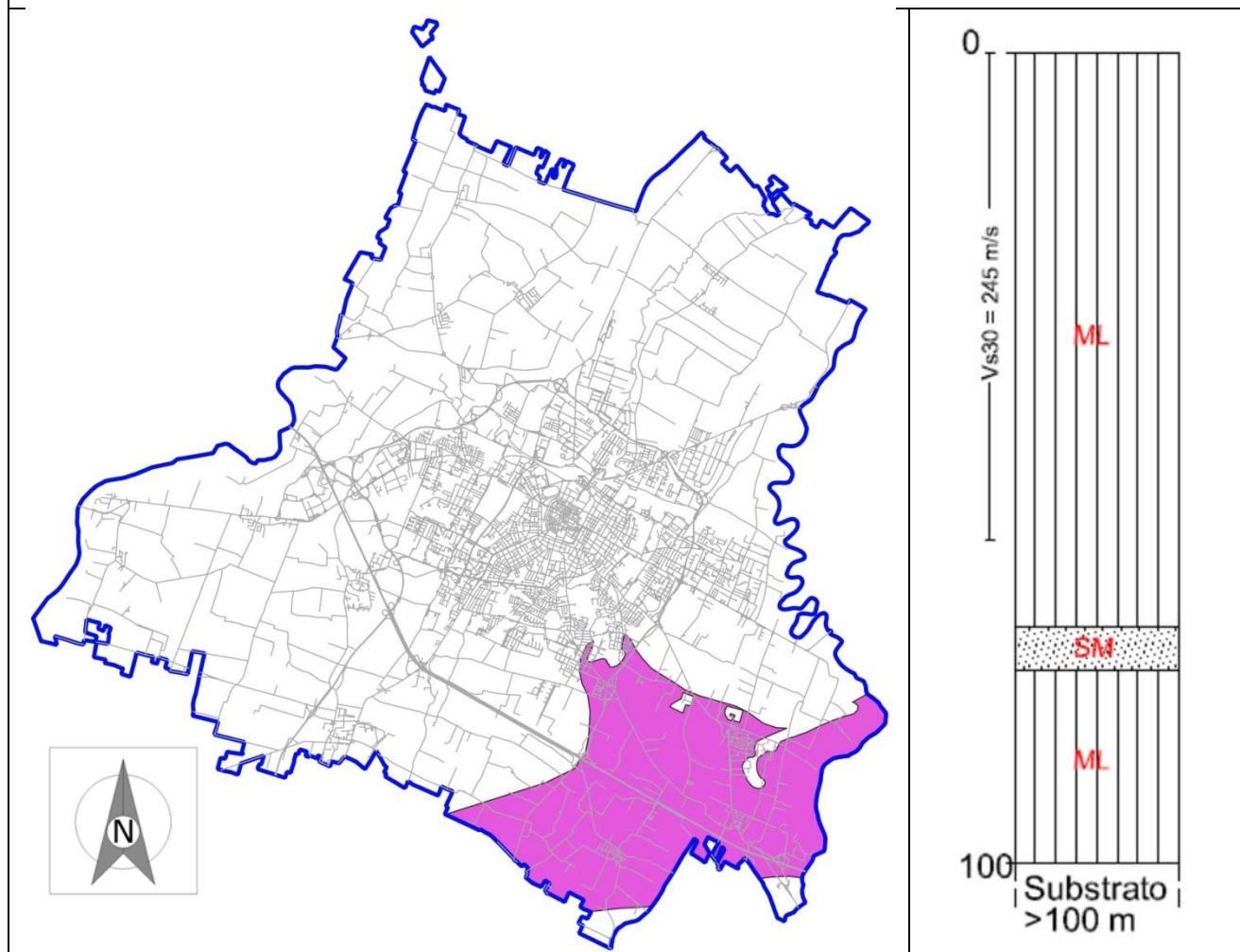
ZONA 18

La zona 18 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido individuato con la tecnica HVSR e dalle ricostruzioni litostratigrafiche a profondità maggiori di 100 m dal piano di campagna. Terreni prevalentemente limosi e limo-argillosi con sottili intercalazioni di limi-sabbiosi e sabbie. La frequenza fondamentale di vibrazione (f_0) risultano compresa tra 0.6 e 1 Hz. . In tali zone si registrano valori di V_{s30} mediamente pari a circa 245 m/s.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica;

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche;

Microzonazione sismica: secondo livello di approfondimento;



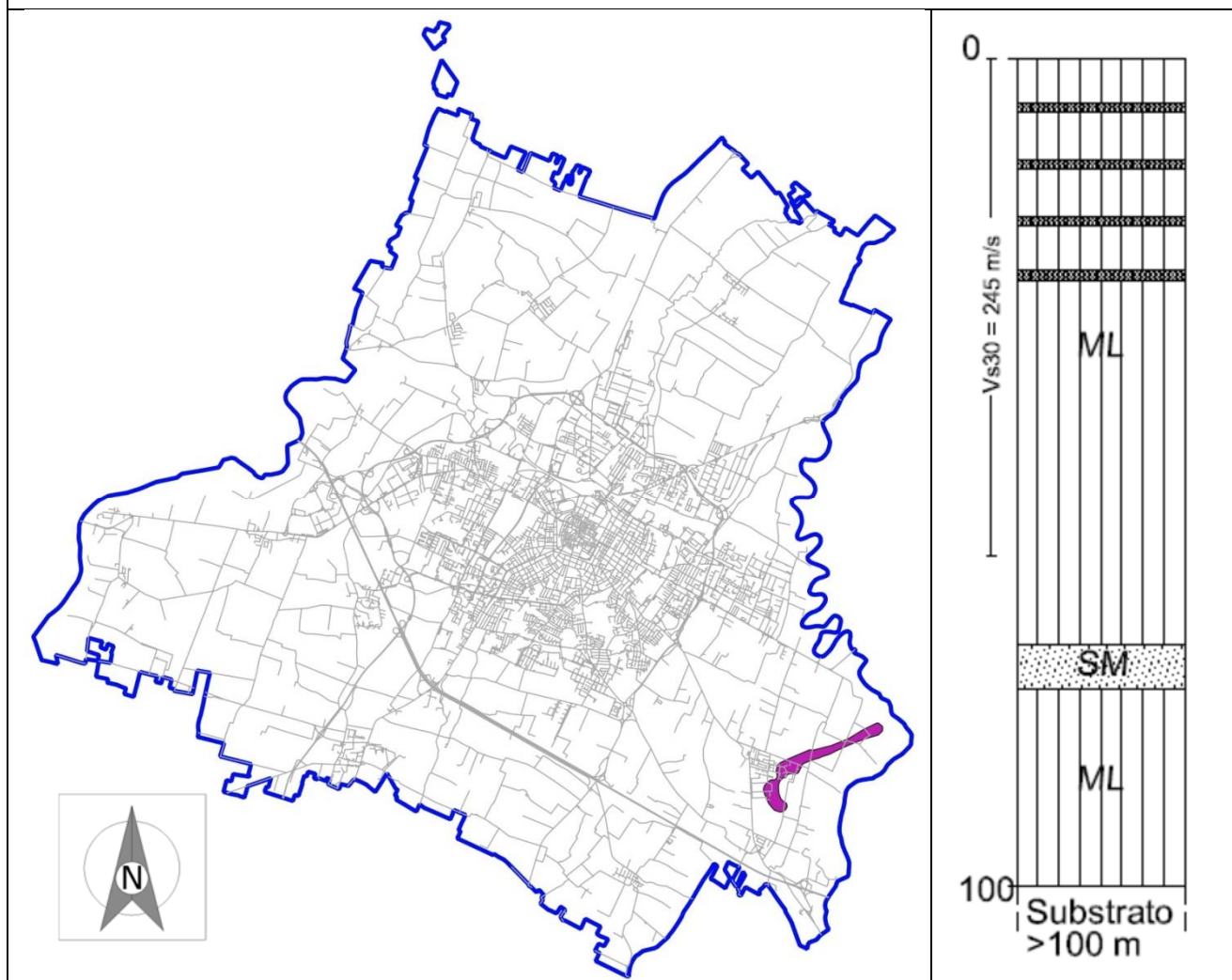
ZONA 19

La zona 19 corrisponde ai settori del territorio con substrato rigido individuato con la tecnica HVSR e dalle ricostruzioni litostratigrafiche a profondità maggiori di 100 m dal piano di campagna. Terreni prevalentemente limosi e limo-argillosi con presenza di livelli sabbiosi potenzialmente liquefacibili nei primi 20 metri. La frequenza fondamentale di vibrazione (f_0) risultano compresa tra 0.6 e 1 Hz. . In tali zone si registrano valori di V_{s30} mediamente pari a circa 245 m/s.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione.

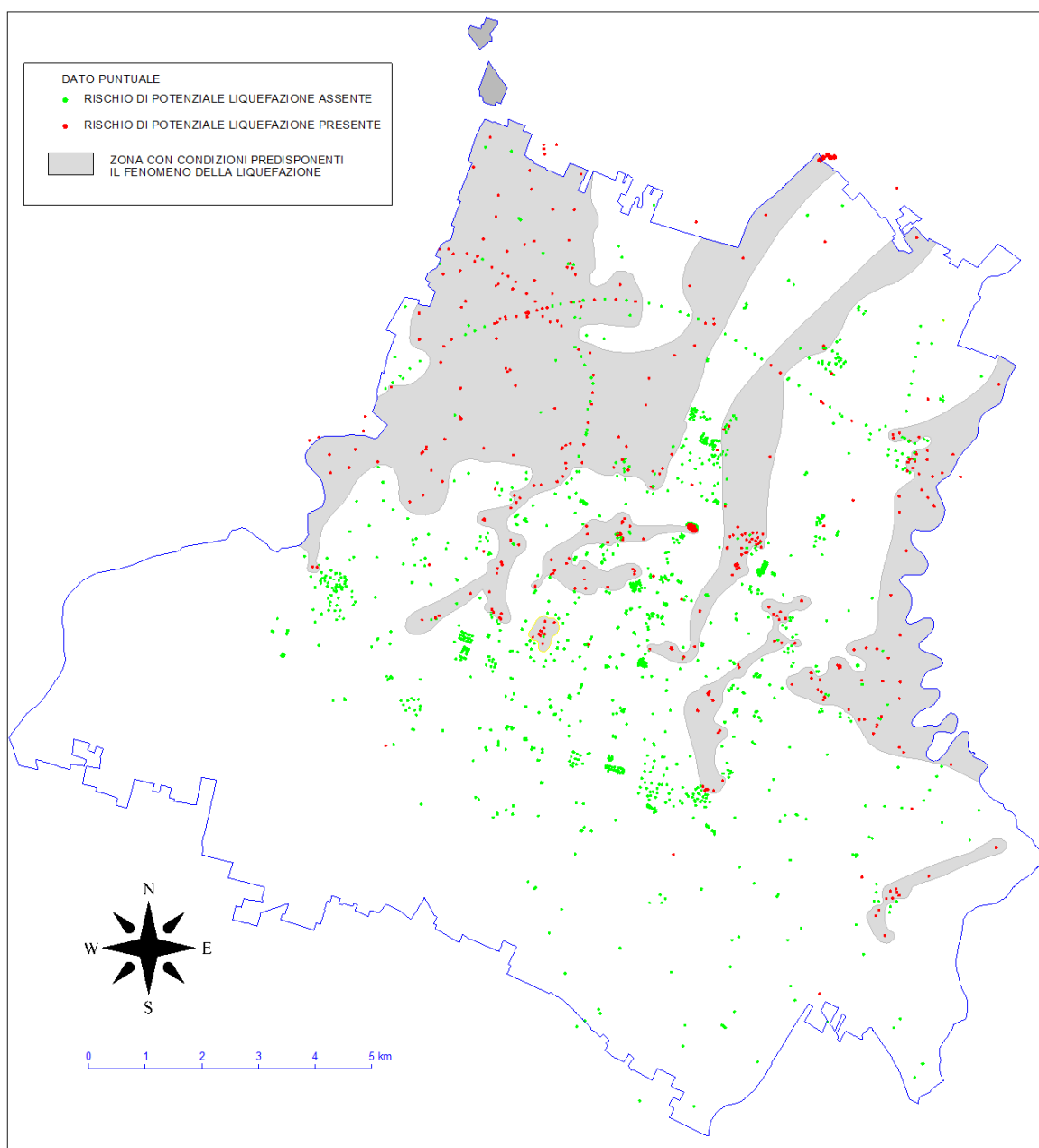


Le **zone di attenzione per instabilità** individuano le porzioni di territorio in cui è stata individuata la presenza di fattori predisponenti il fenomeno della liquefazione ("*zone di attenzione per liquefazioni*") e le condizioni per il verificarsi di cedimenti differenziali post-sismici ("*Cedimenti differenziali*") e di conseguenza le zone caratterizzate da "*sovrapposizione di zone di attenzione per instabilità differenti*".

Per il primo aspetto è stata effettuata un'analisi dettagliata delle indagini geognostiche della banca dati, al fine di verificare la sussistenza di condizioni predisponenti il fenomeno della liquefazione. In particolare si è valutata la presenza di livelli sabbiosi sottofalsa nei primi 20 metri di profondità, considerando significativi spessori complessivi cumulati di 0.5 metri entro la profondità di 5 metri dal p.c., 1 metro tra 5 e 10 metri e 2 metri tra 10 e 20 m.

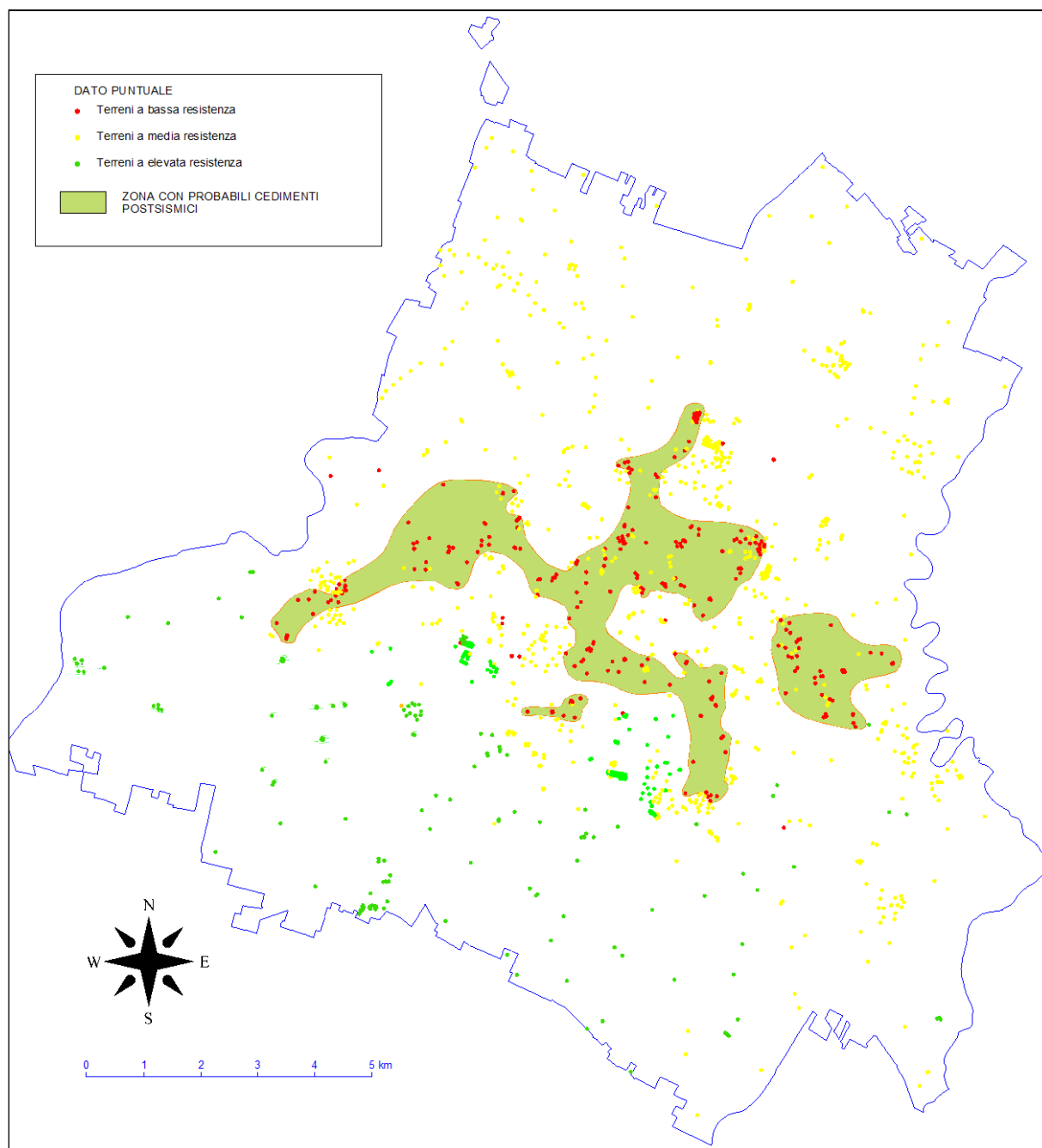
Si è eseguita quindi una interpolazione grafica con l'individuazione delle aree omogenee di attenzione potenzialmente soggette a tale fenomeni, con singoli dati discordanti che sono stati esclusi. I risultati di tale elaborazione viene riportato nella figura seguente.

FIGURA 38: INDIVIDUAZIONE AREE SOGGETTE A POTENZIALE LIQUEFAZIONE



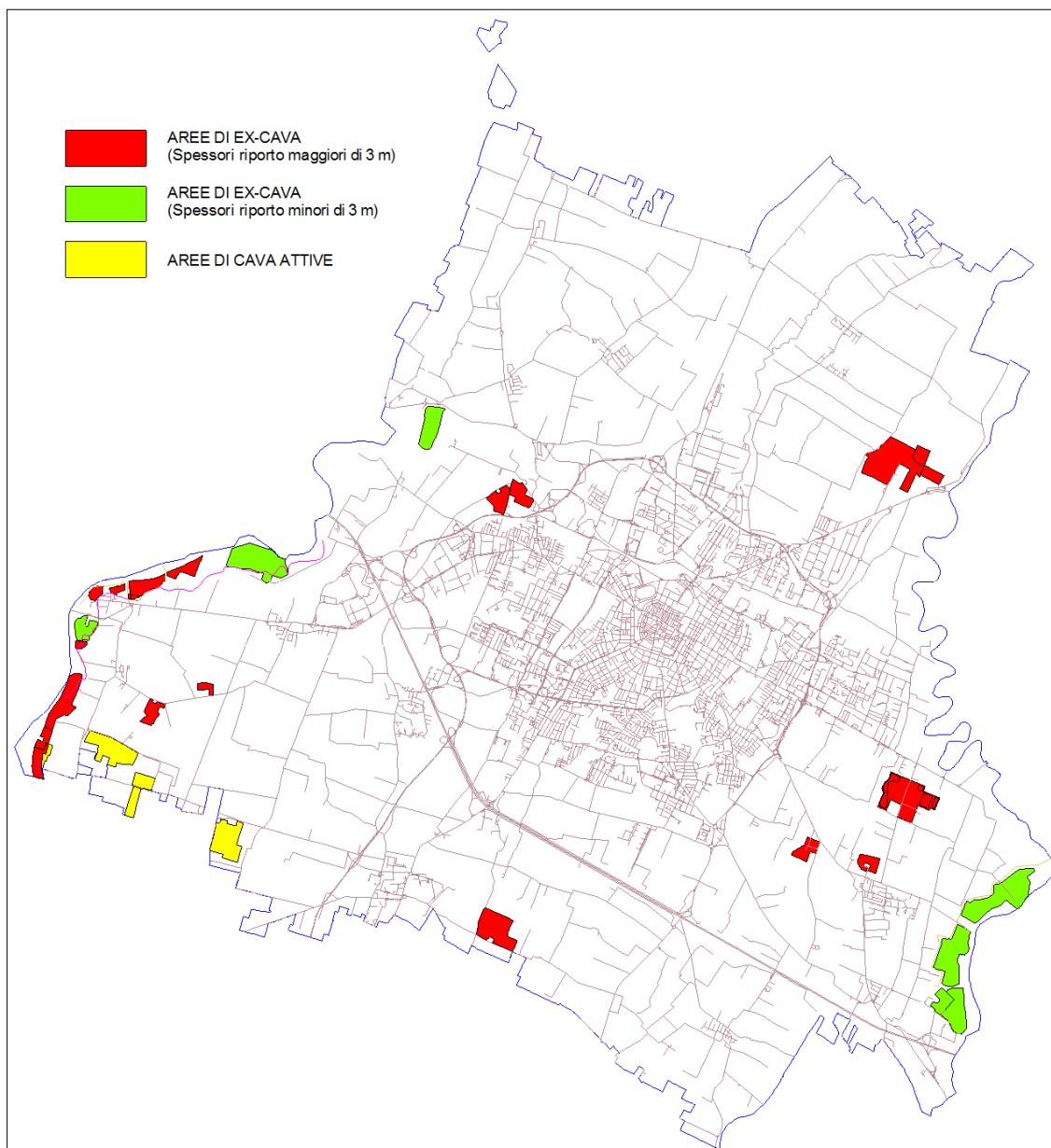
Si è inoltre effettuata l'individuazione, sulla base dei risultati delle prove penetrometriche, delle aree caratterizzate dalla presenza di terreni a scarsa resistenza (R_p inferiore a 7 kg/cm^2) al fine di identificare le zone potenzialmente suscettibili di cedimenti post-sismici e sulle quali di conseguenza prevedere approfondimenti di III livello. Sono quindi stati individuati i punti che presentano spessori cumulati di tali materiale nei primi 10 metri pari ad almeno 2 metri, ed eseguita come nel caso precedente una interpolazione grafica ottenendo i risultati riportati nella figura seguente.

FIGURA 39: INDIVIDUAZIONE AREE SOGGETTE A POTENZIALI CEDIMENTI POST-SISMICI



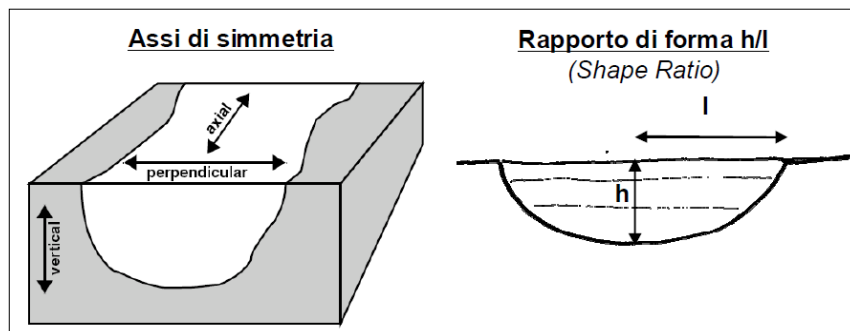
Sono state inoltre individuati i settori del territorio oggetto in passato attività estrattiva di argille e ghiaie (Aree di ex-cava), che, sulla base delle informazioni raccolte, presentano spessori di materiali di riporto superiori ai 3 metri (figura 40), e che da un punto di vista sismico sono da considerare zone di attenzione per fenomeni di cedimenti differenziali, in cui sussiste anche la possibilità che, oltre alle normali cause di amplificazione di tipo stratigrafico, si possano determinare fenomeni di amplificazione dovuti a morfologie sepolte in cui si sommano gli effetti connessi alla geometria (riflessioni multiple delle onde sismiche, effetti di bordo, focalizzazioni delle onde sismiche per fenomeni di interferenza costruttiva tra i campi d'onda riflesso e rifratto, ect).

FIGURA 40: INDIVIDUAZIONE AREE SOGGETTE A POTENZIALI CEDIMENTI POST-SISMICI



Si tratta di fenomeni comunemente denominati “effetto valle” (figura 40), che in tali condizioni geometriche, caratterizzate solitamente da fattori di forma elevati ($H/L > 0.25$, in cui H è lo spessore massimo del materiale di tombamento e L la semi-larghezza della cava) determinano fenomeni di interazione tra le onde di volume e quelle di superficie molto complessi e tali da ritenere, in alcuni casi, poco attendibile la modellazione monodimensionale per cui, e la necessità di elaborazioni di analisi di tipo bi-dimensionale (2D) o tri-dimensionale (3D).

FIGURA 41: EFFETTO VALLE



Di seguito sono riassunte le caratteristiche delle zone suscettibili di instabilità individuate.

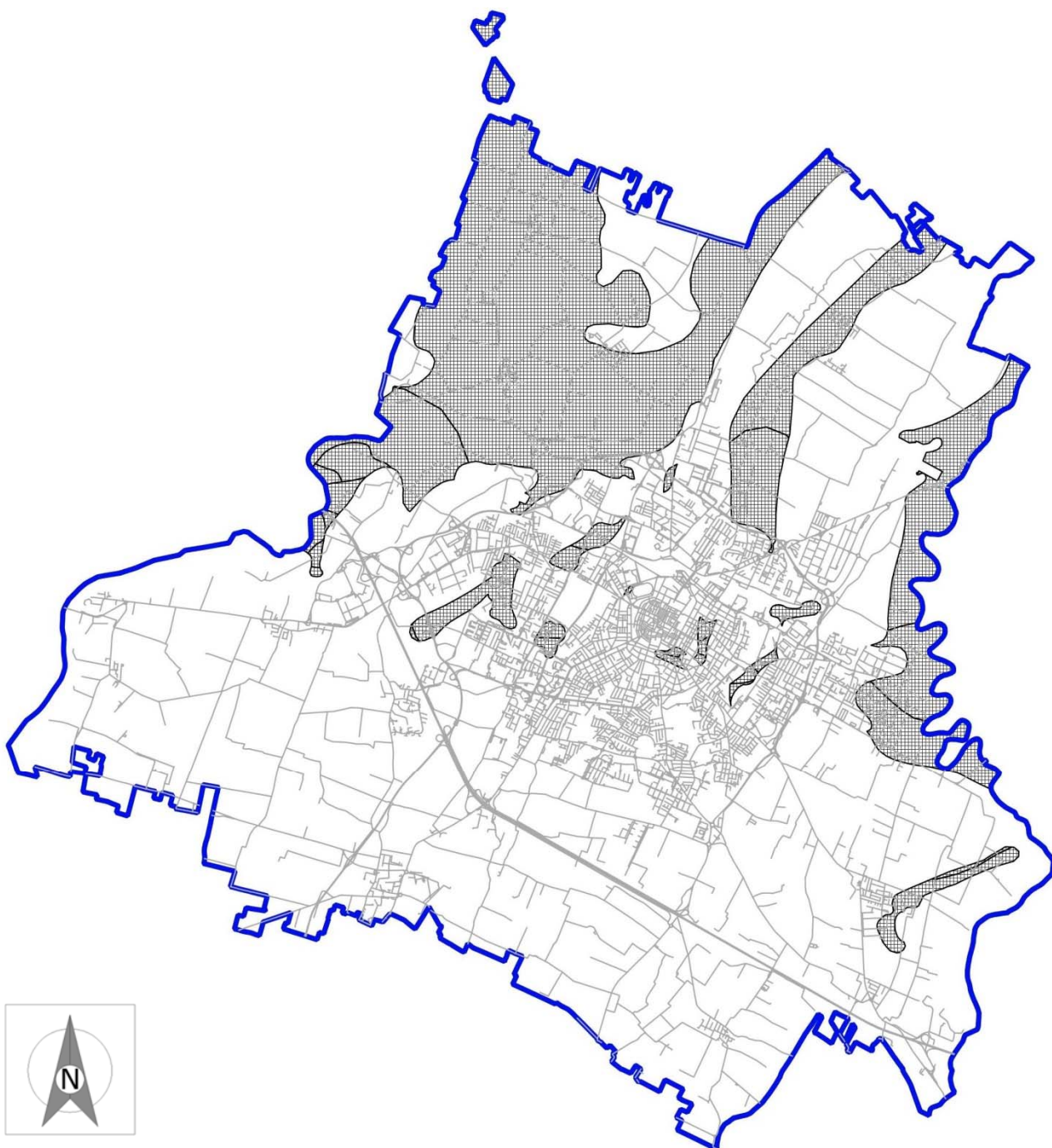
ZONA DI ATTENZIONE PER LIQUEFAZIONI

Tale zona corrisponde ai settori del territorio in cui le analisi eseguite hanno evidenziato nei primi 20 metri di profondità l'esistenza di condizioni predisponenti il fenomeno della liquefazione.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la valutazione della suscettività alla liquefazione



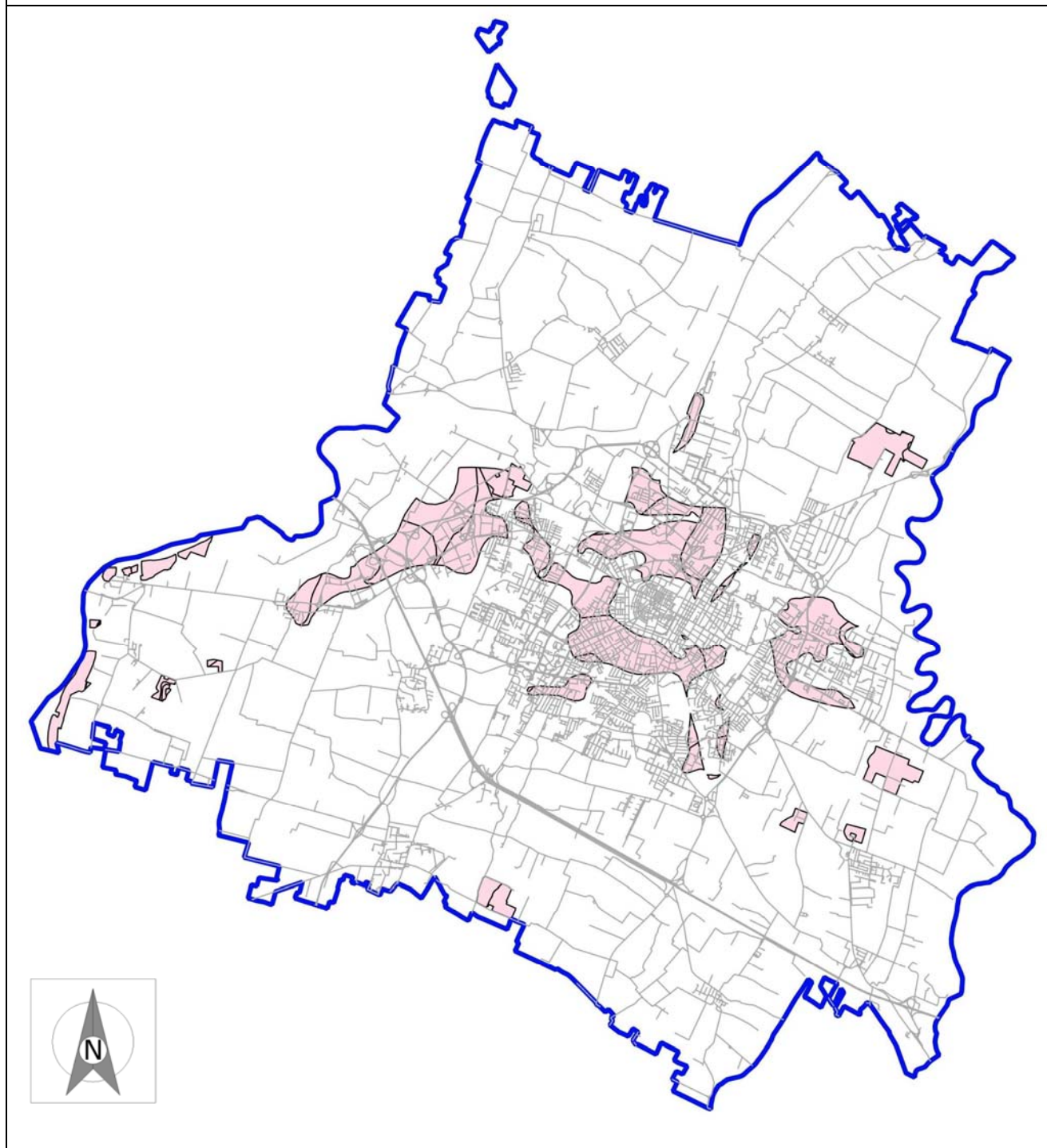
CEDIMENTI DIFFERENZIALI

Tale zona corrisponde ai settori del territorio in cui le analisi eseguite hanno evidenziato nei primi 10 metri di profondità l'esistenza di terreni a scarsa resistenza.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, cedimenti differenziali.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche e dei cedimenti post-sismici attesi;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la stima dei cedimenti differenziali.



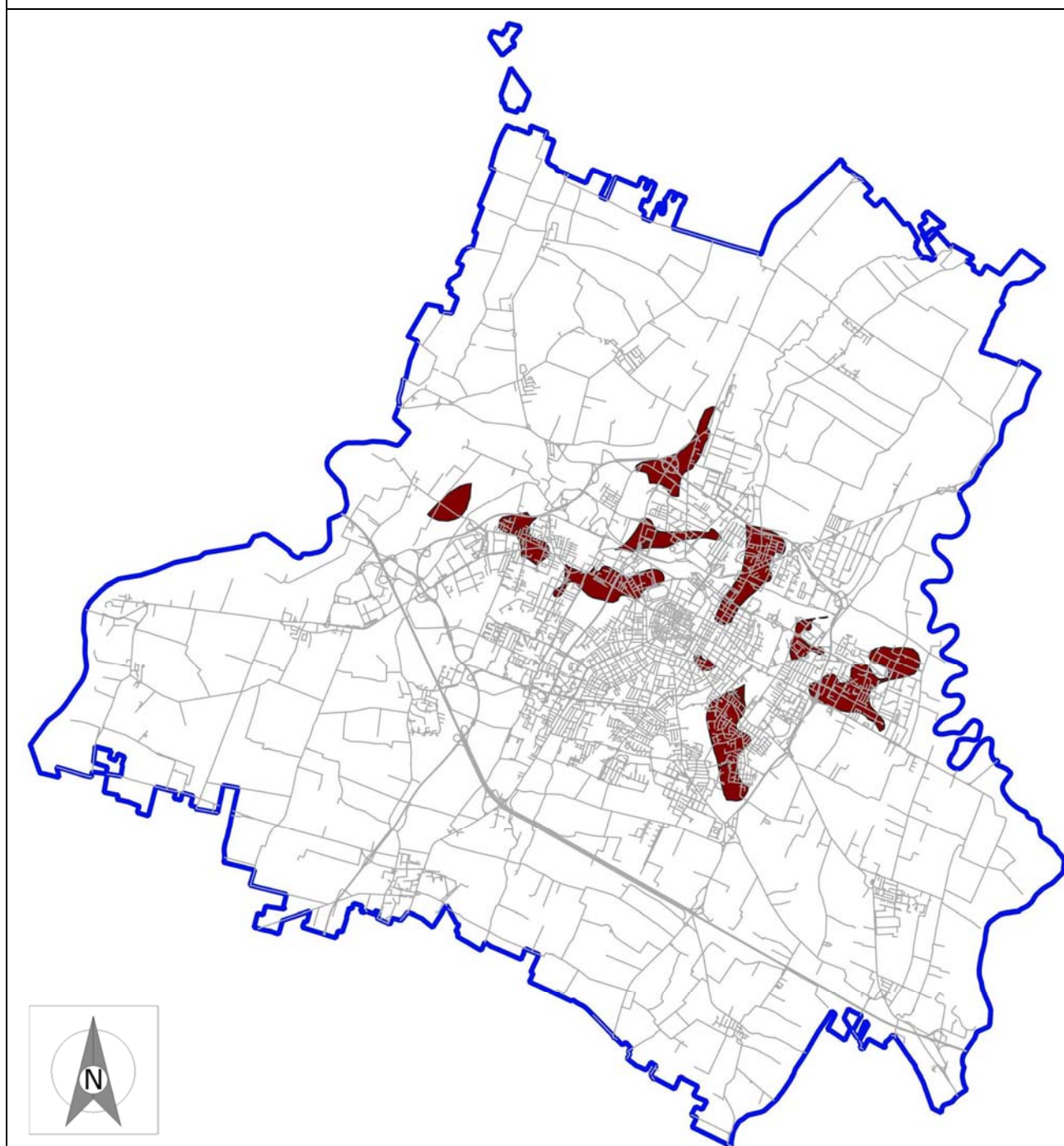
ZONA DI SOVRAPPOSIZIONE DI ZONE DI ATTENZIONE PER INSTABILITA' DIFFERENTI

Tale zona corrisponde ai settori del territorio in cui le analisi eseguite hanno evidenziato sia la presenza nei primi 10 metri di profondità di terreni a scarsa resistenza, che i fattori predisponenti il fenomeno della liquefazione.

Effetti attesi: amplificazione stratigrafica, potenziale liquefazione e cedimenti differenziali.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione correlato alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche, dei cedimenti post-sismici attesi e del potenziale di liquefazione;

Microzonazione sismica: approfondimenti di III livello per la stima dei cedimenti differenziali e per la valutazione della suscettività alla liquefazione.



La carta delle MOPS, realizzata su tutto il territorio Comunale, individua le aree a comportamento equivalente in situazioni di sollecitazione sismica. Ad ognuna di queste aree sono stati attribuiti indici quantitativi che definiscono, in base alle condizioni stratigrafiche e topografiche, l'amplificazione sismica attesa ($T_r = 475$ anni; $\zeta = 5\%$) in termini di fattore di amplificazione. I parametri analizzati sono i seguenti parametri:

- PGA
- SA1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$
- SA2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$
- SA3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$
- SA4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$
- SI1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$
- SI2 per $0,5s \leq T \leq 1,0s$
- SI3 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$

dove :

$FPGA = PGA/PGA_0$, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ al suolo di riferimento e PGA è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ alla superficie del sito e dell'intensità spettrale negli intervalli di periodo compresi tra 0,1 - 0,5 s, e 0,5 - 1,0 s;

$FA = SA/SA_0$, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi;

$FH = SI/SI_0$, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi

I fattori di amplificazione sono stati stimati in base agli abachi regionali contenuti nell'Allegato A2 del DGR 630/2018, che meglio si adattano al contesto geologico del territorio in esame, basandosi sullo spessore delle coperture e i parametri VS_{30} e V_{SH} .

Per il settore delle conoidi caratterizzate dalla presenza di depositi prevalentemente ghiaiosi (Zona 1) si è ritenuto di applicare, adattandole quindi al caso in esame, le tabelle di seguito riportate relative al **substrato marino non rigido**, cioè caratterizzato da $V_s < 800$ m/s, affiorante o subaffiorante (copertura di spessore inferiore a 3 m).

FIGURA 42: TABELLE PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA (2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO) PER SUBSTRATO MARINO NON RIGIDO CARATTERIZZATO DA $V_s \leq 800$ M/S.

Fattore di Amplificazione PGA										
$V_{S30}(m/s)$	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
PGA					1.9	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1

Fattori di Amplificazione SA1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), SA2 ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), SA3										
$V_{S30}(m/s)$	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
SA1					1.9	1.7	1.6	1.4	1.2	1.1
SA2					1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3
SA3					1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2

Fattori di Amplificazione SI1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), SI2 ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)										
$V_{S30}(m/s)$	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
SI1					1.9	1.7	1.6	1.4	1.3	1.2
SI2					1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3

Per le zone di conoide caratterizzate da spessori di copertura al substrato ghiaioso superiori ai 3 metri (zone 2, 3, 4, 6, 8, 10), sulla base del modello geologico adottato, si sono utilizzate le tabelle di seguito riportate previste per il settore di transizione tra la zona collinare (Appennino) e la pianura, ed in particolare quelle relative al **MARGINE A** caratterizzato da terreni fini o grossolani poco consolidati, di spessore non superiore a 30 m, sovrastanti orizzonti prevalentemente grossolani a comportamento più rigido.

In questo settore ricadono anche le zone 5, 7, 9 e 11 che, come vedremo in seguito, sono comunque ricomprese all'interno delle aree potenzialmente soggette a liquefazione per la presenza di livelli sabbiosi entro i primi 20 m di profondità, dove sono previste la seguenti tabelle di riferimento.

FIGURA 43: TABELLE PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA (2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO) PER MARGINE DI TIPO A.

Fattore di Amplificazione PGA						
V_{SH} (m/s)	150	200	250	300	350	400
H (m)						
5	2.3	2.1	1.8	1.5		
10	2.3	2.2	2.0	1.8		
15	2.1	2.1	2.0	1.8		
20	2.1	2.1	2.0	1.9		
25	2.0	2.0	2.0	1.9		
30	1.9	1.9	1.9	1.9		

Fattori di Amplificazione SA1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)						
V_{SH} (m/s)	150	200	250	300	350	400
H (m)						
5	2.3	2.0	1.7	1.5		
10	2.5	2.3	2.0	1.8		
15	2.4	2.4	2.1	1.9		
20	2.3	2.3	2.1	2.0		
25	2.2	2.2	2.1	2.0		
30	2.0	2.0	2.0	1.9		

Fattori di Amplificazione SA2 ($0,4s \leq T \leq 0,8s$)						
V_{SH} (m/s)	150	200	250	300	350	400
H (m)						
5	1.9	1.7	1.7	1.6		
10	2.7	2.2	1.9	1.8		
15	3.3	2.9	2.3	2.0		
20	3.4	3.1	2.6	2.2		
25	3.3	3.2	2.8	1.4		
30	3.1	3.1	2.8	2.5		

Fattori di Amplificazione SA3 ($0,7s \leq T \leq 1,1s$)						
V_{SH} (m/s)	150	200	250	300	350	400
H (m)						
5	1.6	1.6	1.6	1.6		
10	2.0	1.8	1.7	1.7		
15	2.9	2.3	2.0	1.9		
20	3.4	2.8	2.3	2.0		
25	3.9	3.4	2.7	2.3		
30	3.8	3.6	3.0	2.5		

Fattori di Amplificazione SI1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)						
V_{SH} (m/s)	150	200	250	300	350	400
H (m)						
5	2.2	1.9	1.7	1.6		
10	2.6	2.4	2.0	1.8		
15	2.6	2.5	2.2	1.9		
20	2.5	2.5	2.3	2.0		
25	2.3	2.3	2.2	2.1		
30	2.1	2.1	2.1	2.0		

Fattori di Amplificazione SI2 ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)						
V_{SH} (m/s)	150	200	250	300	350	400
H (m)						
5	1.8	1.7	1.6	1.6		
10	2.3	2.0	1.8	1.7		
15	3.2	2.6	2.1	2.0		
20	3.5	3.1	2.5	2.1		
25	3.7	3.4	2.8	2.4		
30	3.6	3.5	3.0	2.6		

Per le Zone 12 e 13 il riferimento è stato quello della tabelle previste per l'ambito di Pianura 1 caratterizzato da sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di un'importante discontinuità stratigrafica responsabile di un contrasto di impedenza significativo, tale da essere considerato coincidente con il tetto del substrato rigido, a profondità ≤ 100 m da p.c., di seguito riportate.

FIGURA 44: TABELLE PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA (2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO) PER PIANURA 1

Fattore di Amplificazione PGA						
V_{S30} (m/s)	150	200	250	300	350	400
PGA	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5

Fattori di Amplificazione SA1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), SA2 ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), SA3 ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), SA4						
V_{S30} (m/s)	150	200	250	300	350	400
SA1	1.8	1.8	1.08	1.7	1.6	1.5
SA2	2.6	2.5	2.4	2.2	2.0	1.9
SA3	3.2	3.2	3.0	2.7	2.5	2.2
SA4	3.1	3.0	2.7	2.4	2.2	2.0

Fattori di Amplificazione SI1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), SI2 ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), SI3 ($1,0s \leq T \leq 1,5s$)						
V_{S30} (m/s)	150	200	250	300	350	400
SI1	1.9	1.9	1.9	1.8	1.6	1.5
SI2	3.0	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1
SI3	3.4	3.2	2.8	2.5	2.2	2.0

La Zona 13 è anche ricompresa all'interno delle aree potenzialmente soggette a liquefazione per la presenza di livelli sabbiosi entro i primi 20 m di profondità.

Per le Zone 14, 15, 16, 17, 18 e 19 il riferimento è stato quello della tabelle previste per l'ambito di Pianura 2 con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di una importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100 m da p.c. e dal tetto del substrato rigido a circa 150 m da p.c., di seguito riportate.

FIGURA 45: TABELLE PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA (2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO) PER PIANURA 2.

Fattore di Amplificazione PGA						
V_{S30} (m/s)	150	200	250	300	350	400
PGA	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5

Fattori di Amplificazione SA1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), SA2 ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), SA3 ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), SA4						
V_{S30} (m/s)	150	200	250	300	350	400
SA1	1.8	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5
SA2	2.7	2.7	2.4	2.1	1.9	1.8
SA3	3.3	3.2	2.8	2.5	2.3	2.1
SA4	3.3	3.1	2.7	2.4	2.1	1.9

Fattori di Amplificazione SI1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), SI2 ($0,5s < T \leq 1,0s$), SI3 ($1,0s < T \leq 1,5s$)						
$V_{S30}(m/s)$	150	200	250	300	350	400
SI1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6
SI2	3.1	3.0	2.7	2.4	2.1	2.0
SI3	3.6	3.3	2.9	2.5	2.2	2.0

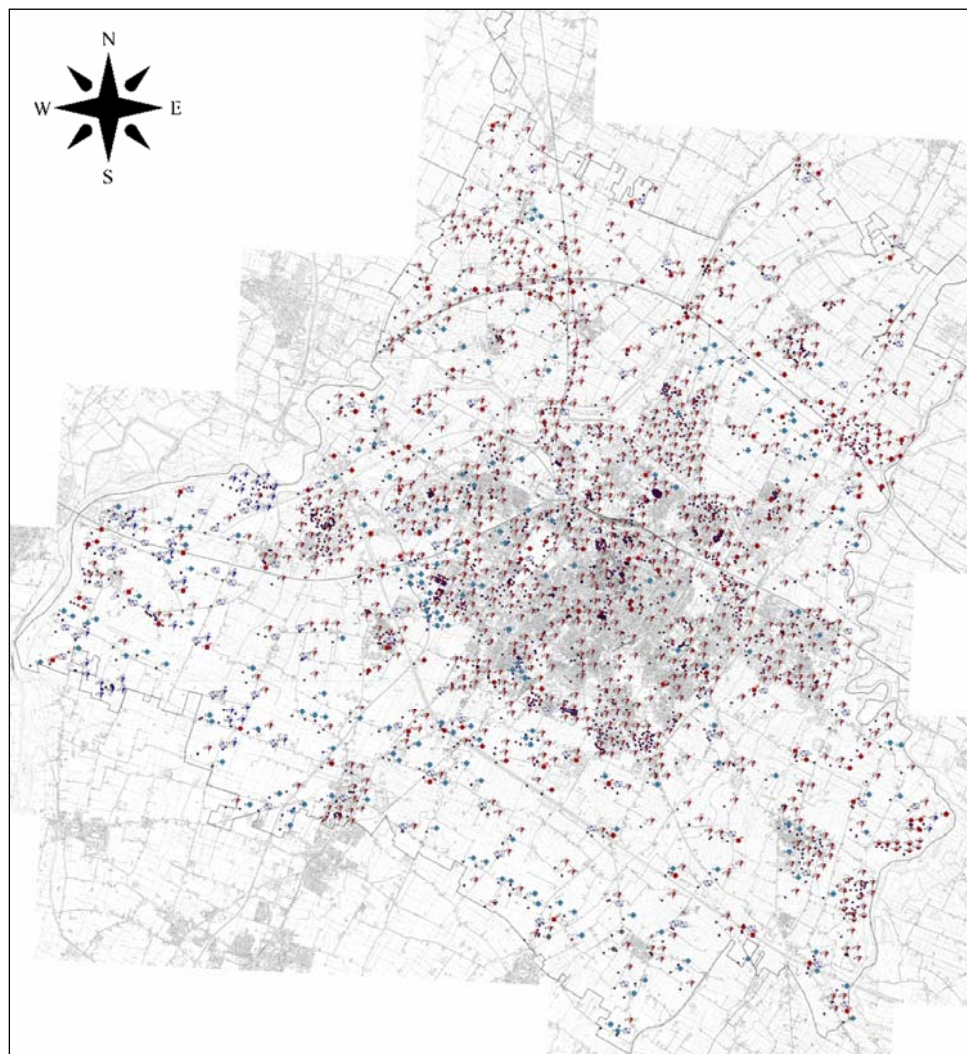
Le zone 15, 17 e 19 sono anche ricomprese all'interno delle aree potenzialmente soggette a liquefazione per la presenza di livelli sabbiosi entro i primi 20 m di profondità.

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

8.1 CARTA DELLE INDAGINI

La cartografia prodotta (figura 42 - tavole da 1.1 a 1.5) riporta localizzazione e tipologia delle indagini di natura geotecnica e geofisica, preesistenti e di nuova esecuzione, incluse nel database allegato allo studio che risulta composto da circa 2500 dati puntuali. Sono state utilizzate simbologie e campiture previste dagli Standard di rappresentazione della Commissione tecnica per la Microzonazione sismica.

FIGURA 46: CARTA DELLE INDAGINI



Le indagini mostrano un'ottima distribuzione areale su tutto il territorio, con una maggiore concentrazione in corrispondenza del centro urbano e delle principali frazioni.

8.2 CARTA GEOLOGICO TECNICA PER LA MICROZONAZIONE SISMICA

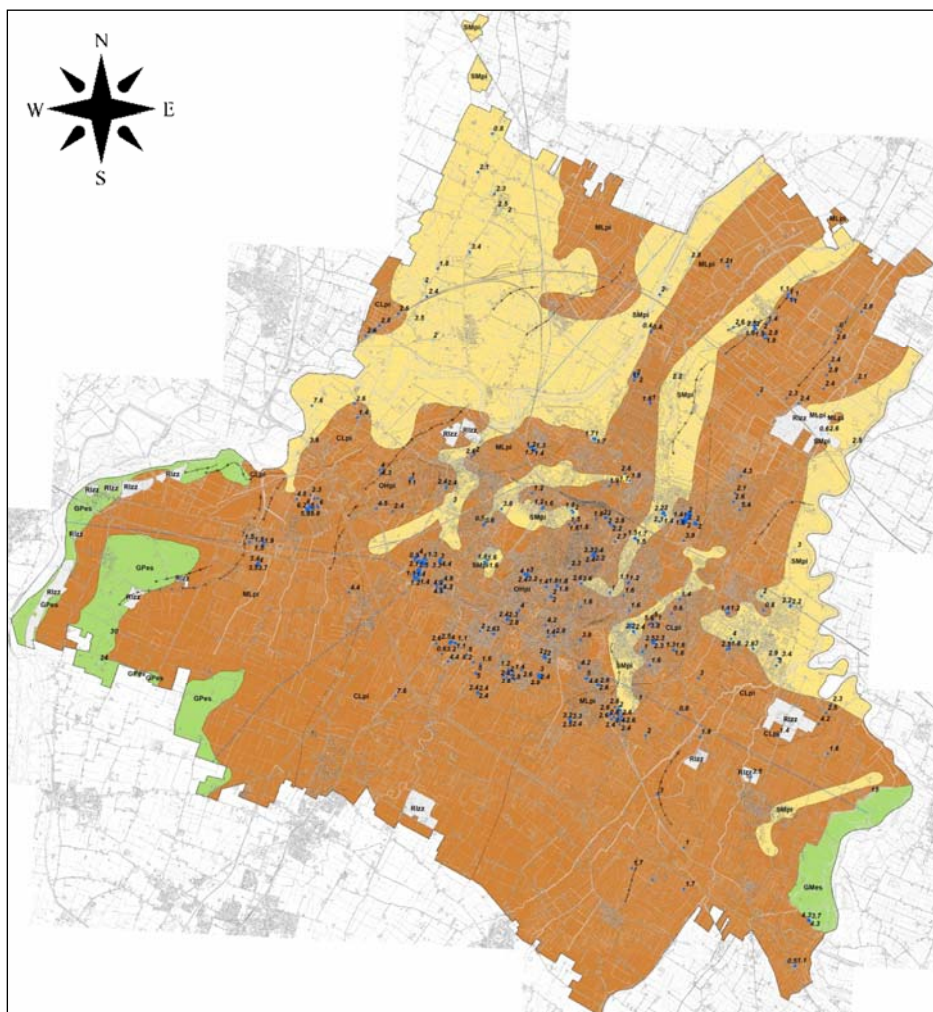
Le tavole da 2.1 a 2.5 (figura 48) riportano gli aspetti geologici e geomorfologici dell'intero territorio Comunale. In particolare la cartografia riporta (figura 47).

FIGURA 47: LEGENDA DELLA CARTA GEOLOGICO-TECNICA

- **Terreni di copertura** - La tavola riporta le caratteristiche litologiche medie delle coperture significative da un punto di vista sismico (con spessori superiori ai 3 metri), distinte in base alle prevalenti caratteristiche tessiturali medie. Sono inoltre evidenziate le aree con presenza di spessori di terreni di riporto maggiori di 3 metri, ricomprendendo tra queste ultime l'area della discarica di Via Caruso, e le aree di ex-cava parzialmente e/o totalmente ritombate;
- **Forme di superficie e sepolte** - Nella cartografia sono individuati gli assi dei principali paleovalle che caratterizzano in territorio;
- **Elementi geologici e idrogeologici** - Tra gli elementi presenti in tale cartografia si evidenziano le tracce delle due sezioni geologiche che sono riportate nelle figure 29 e 30 della presente relazione. Tra gli elementi idrogeologici sono individuati i punti di misura e relativi valore di soggiacenza della prima falda rilevati nei sondaggi e durante l'esecuzione di indagini penetrometriche (circa 500 misure);



FIGURA 48: CARTA GEOLOGICO-TECNICA



8.4 CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA (LIVELLO 2)

- Tavole da 4.1 a 4.5 - Fattori di amplificazione PGA
- Tavole da 5.1 a 5.5 - Fattori di amplificazione FH0.1-0.5
- Tavole da 6.1 a 6.5 - Fattori di amplificazione FH0.5-1.0
- Tavole da 9.1 a 9.5 - Fattori di amplificazione FH0.5-1.5
- Tavole da 10.1 a 10.5 - Fattori di amplificazione FA0.1-0.5
- Tavole da 11.1 a 11.5 - Fattori di amplificazione FA0.4-0.8
- Tavole da 12.1 a 12.5 - Fattori di amplificazione FA0.7-1.1
- Tavole da 13.1 a 13.5 - Fattori di amplificazione FA0.7-1.1
- Tavole da 14.1 a 14.5 - H_{SM}

Complessivamente l'amplificazione delle accelerazioni al suolo in termini di PGA attese (figura 50), ottenuti per le diverse microzone secondo la procedura riportata nel paragrafo 7, vedono una distribuzione caratterizzata da valori più elevati in corrispondenza del settore sud occidentale del territorio (caratterizzato dalla presenza di un substrato rigido costituito da depositi alluvionali ghiaiosi, e da terreni superficiali fini di copertura con spessori sino a circa 30 metri). Questi ultimi variano da valori minimi di 1.9-2.0 nella zona caratterizzata da assenza di coperture significative al substrato ghiaioso, per aumentare progressivamente a valori maggiori di 2.2 nella fascia di spessore della copertura tra 10 e 15 metri. Per spessori maggiori il fattore di amplificazione diminuisce sino a valori di 2.1. Procedendo verso Nord ed Est, i fattori di amplificazione si riducono a 1.7-1.8.

Per quanto concerne i fattori di amplificazione dell'Intensità spettrale di Housner, si evidenzia come tale parametro è direttamente correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto e quindi collegata al danno potenziale atteso dagli edifici, e viene definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità; nel nostro caso si sono determinati i fattori di amplificazione per i 3 intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s, da $0.5 < T_0 < 1$ s e da $0.5 < T_0 < 1.5$ s.

L'andamento generale dei fattori di amplificazione dell'intensità spettrale tra 0.1-0.5 s (figura 51), risulta essere coincidente con quelli della PGA, con valori che superano 2.5 nel settore centro occidentale del territorio, mentre valori decisamente più bassi (1.8-1.9) caratterizzano l'alta pianura e la zona a ridosso del Fiume Panaro. Nell'intervallo tra 0.5 e 1.0 s (figura 52) si assiste ad un progressivo aumento dei valori da 1.5-1.6 a maggiori di 3.5 a partire dal settore S-O sino a ricomprendere il centro abitato di Modena, mentre si attestano a valori compresi tra 2.5-3.0 nella restante parte del territorio comunale.

Il fattori di amplificazione dell'intensità spettrale tra 0.5-1.5 s (FIGURA 53) nella zona di pianura risultano compresi tra 2.5 e 3.5.

Per quanto concerne i fattori di amplificazione delle accelerazioni spettrali nell'intervallo 0.1-0.5 s (FIGURA 54) si evidenzia come nel settore caratterizzato dalla presenza di un substrato rigido costituito da depositi alluvionali ghiaiosi, e da terreni superficiali fini di copertura con spessori sino a circa 30 metri, tali valori risultano variabili da 1.9 a 2.4 con valori massimi in corrispondenza della fascia di spessore della copertura tra 10 e 15 metri. nella restante parte del territorio i valori di amplificazione risultano invece compresi tra 1.7-1.8.

Nell'intervallo 0.4-0.8 s (FIGURA 55) i fattori di amplificazione nel settore meridionale del territorio Comunale assumono valori compresi tra 1.7-1.8 e 2.1-2.2 con valori massimi in corrispondenza della fascia di spessore della copertura tra 15 e 20 metri, mentre nel settore centrale e settentrionale sono ricompresi prevalentemente nella classe 2.5-3.0.

Nell'intervallo 0.7-1.1 s (FIGURA 56) i fattori di amplificazione nel settore ricompreso nella conoide del Fiume Secchia registrano un aumento progressivo a partire da valori di 1.4 a 3.0 seguendo l'aumento dello spessore dei depositi di copertura al substrato ghiaioso. Nella restante parte del territorio tali fattori sono ricompresi prevalentemente nella classi 2.5-3.0.

Il fattori di amplificazione delle accelerazioni spettrali tra 0.5-1.5 s (FIGURA 57) nella zona di pianura risultano compresi tra 2.5 e 3.5.

Il parametro H_{SM} è stato introdotto per una più corretta rappresentazione della pericolosità sismica dei territori in quanto consente di considerare oltre alla pericolosità sismica di base anche i fattori di amplificazione calcolati con gli studi di microzonazione sismica (MS), stabilendo di fatto una graduatoria di pericolosità tra le varie zone omogenee presenti.

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

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

Si è quindi proceduto partendo dai valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$, calcolati per ogni punto della griglia INGV, operando una discretizzazione di tali valori sul territorio su una griglia 5 x 5 metri, ed moltiplicandoli per i valori del fattore di amplificazione in accelerazione (FA) delle varie zone omogenee individuate.

Si è quindi ottenuta la distribuzione riportata in FIGURA 58 con 3 classi di valori del parametro H_{SM} . La maggiore pericolosità sismica con valori H_{SM} tra 800 e 900 è concentrata nel settore di media pianura caratterizzato dalla presenza di un substrato rigido costituito da depositi alluvionali ghiaiosi con spessori di terreni superficiali fini di copertura tra 10 e 15 metri, mentre lateralmente dove tali spessori risultano tra 5 e 10 metri si rileva una pericolosità media con valori H_{SM} tra 700 e 800. La restante parte del territorio Comunale presenta valori di H_{SM} più contenuti compresi tra 600 e 700.

Si evidenzia che nelle "Zone di attenzione per liquefazioni di tipo 1 (Z_{ALQ1})" sono riportati i Fattori di Amplificazione previsti per le zone stabili suscettibili di amplificazione sottostanti, in modo tale da avere una memoria dei Fattori di Amplificazione calcolati per tali aree, permettendo pertanto, se gli approfondimenti di Livello 3 non confermassero l'instabilità per liquefazione, di trattare le zone Z_{ALQ1} come zone stabili suscettibili di amplificazione locale e caratterizzarle secondo i parametri inseriti.

FIGURA 50: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE PGA

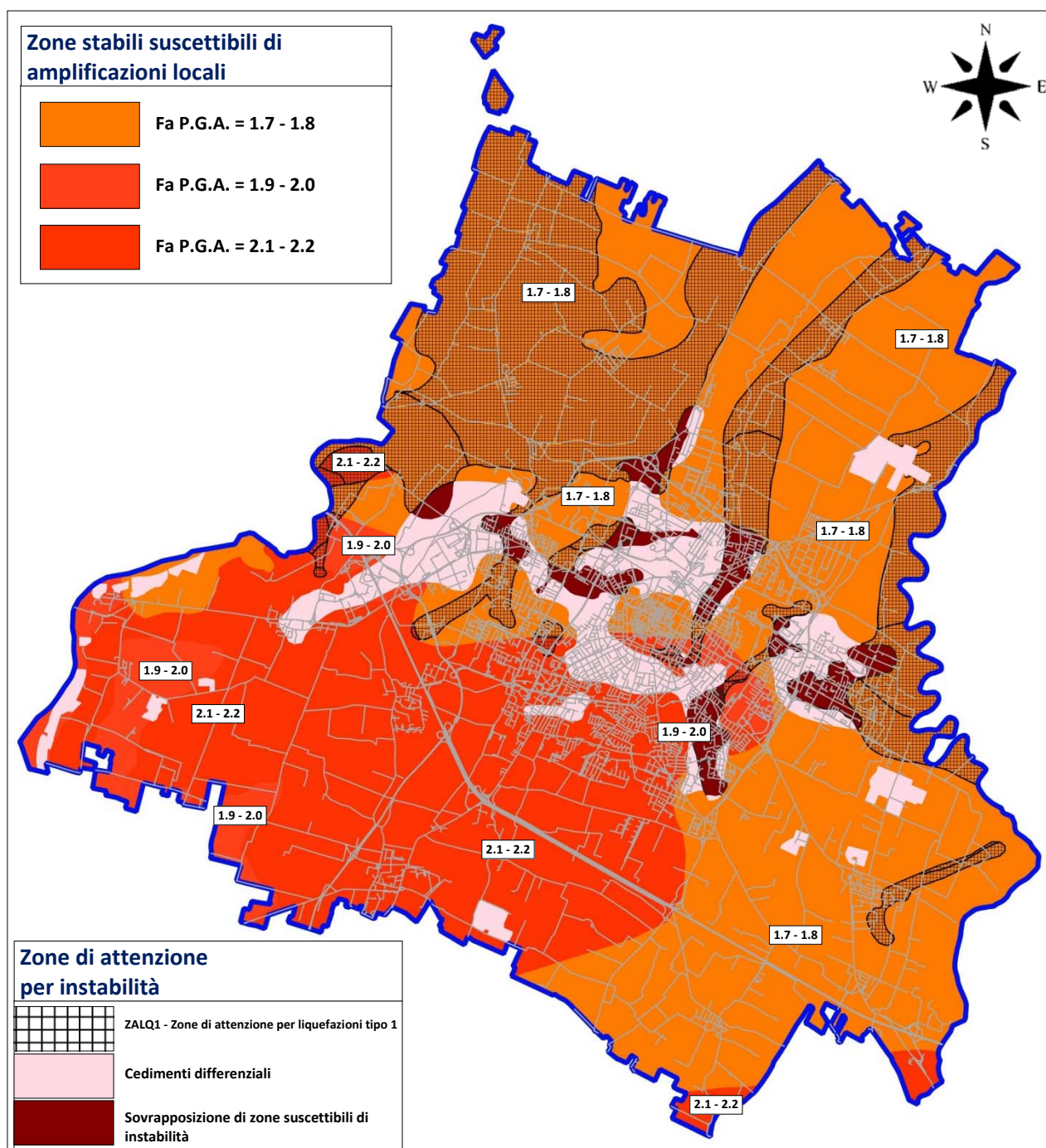


FIGURA 51: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE FH0.1-0.5 S

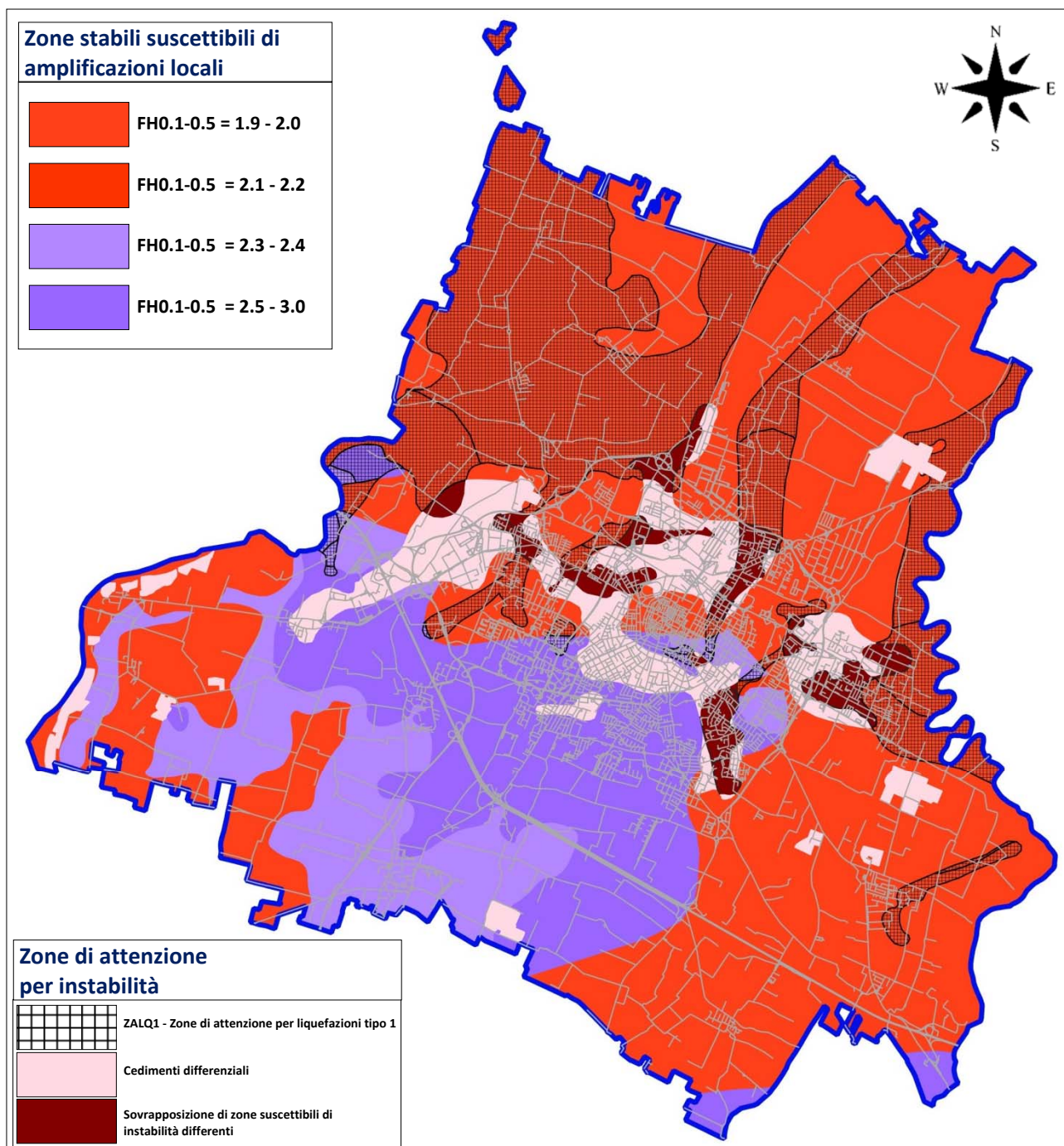


FIGURA 52: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE FH0.5-1.0 S

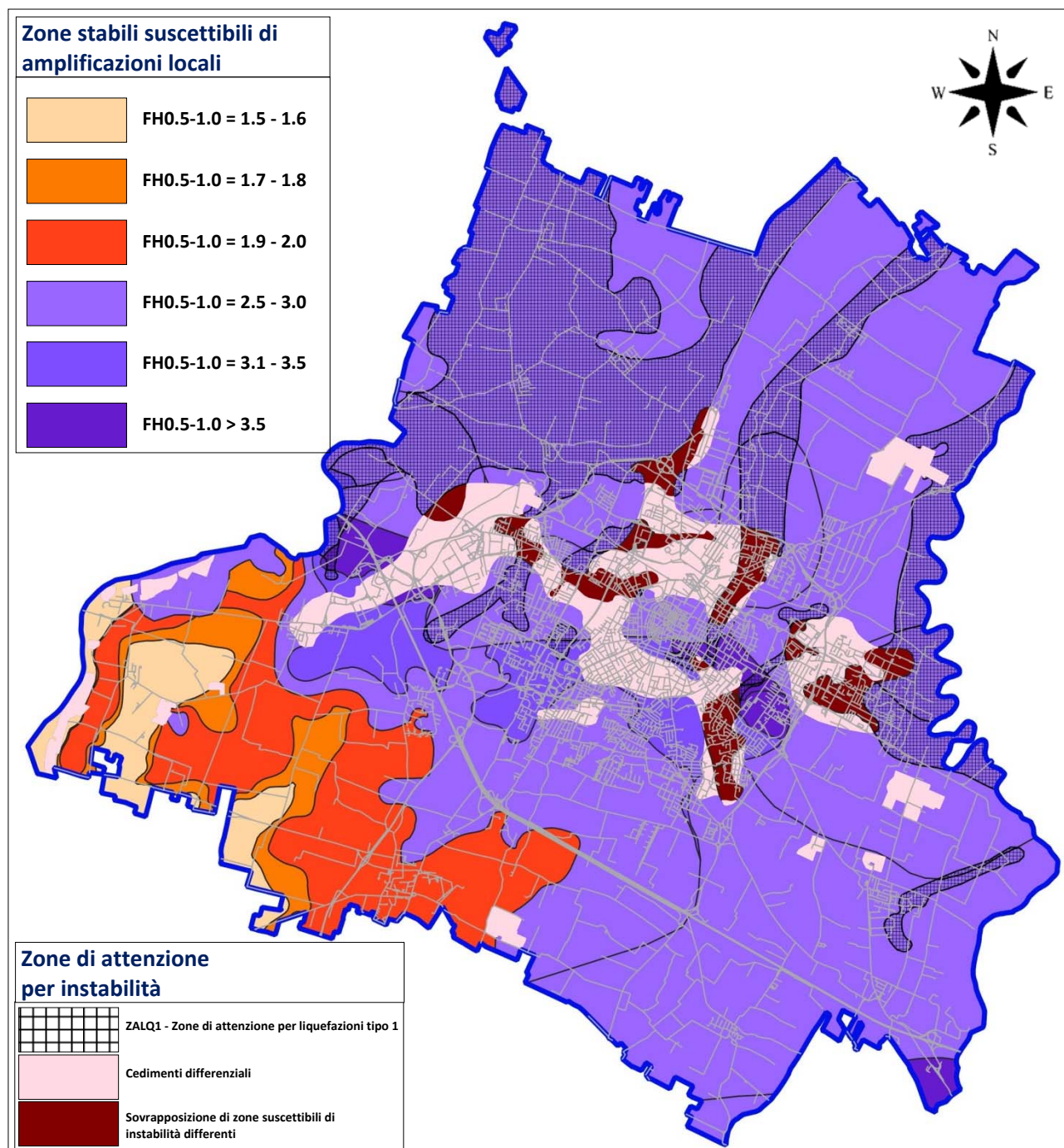


FIGURA 53: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE FH0.5-1.5

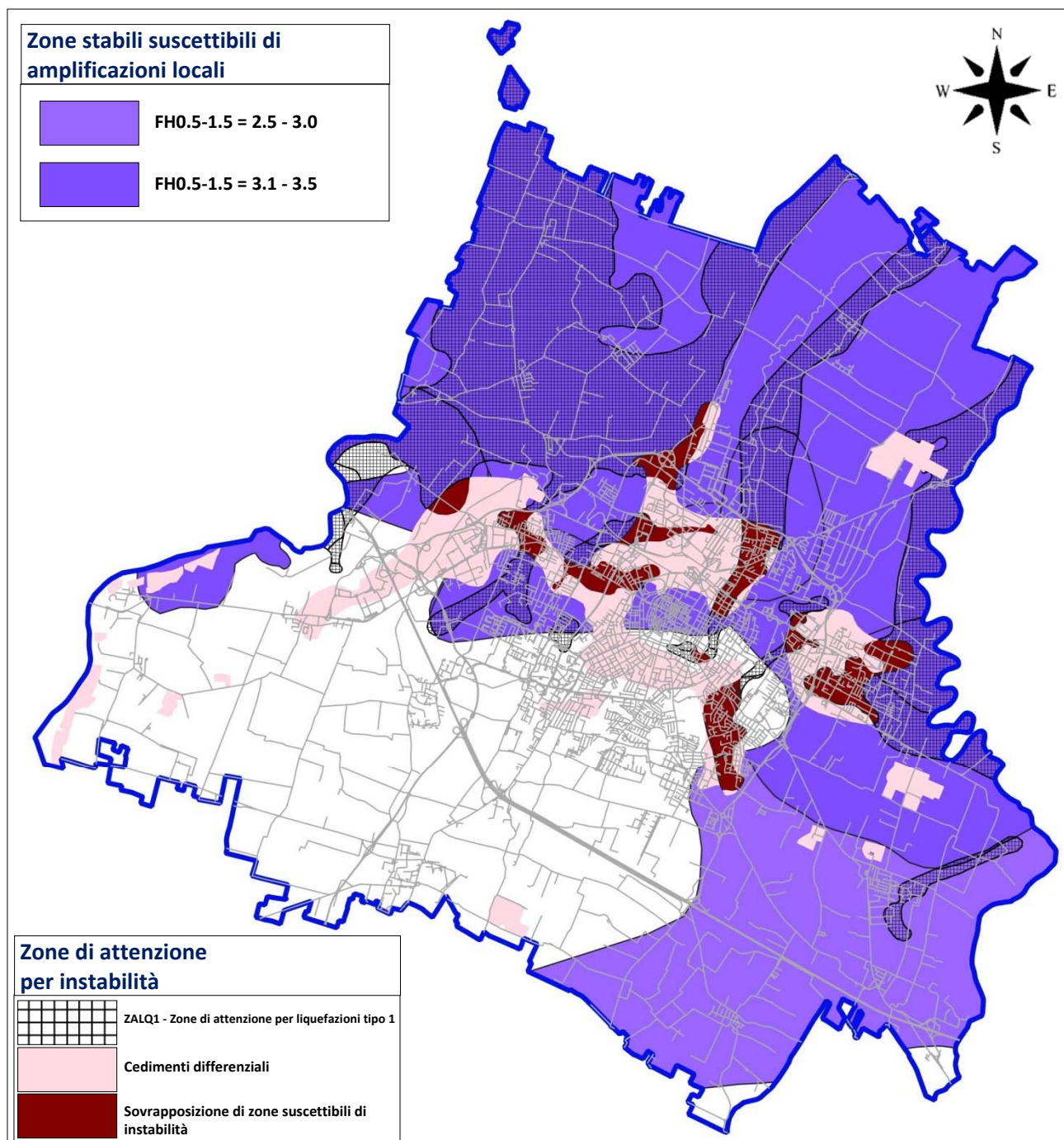


FIGURA 54: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SA0.1-0.5

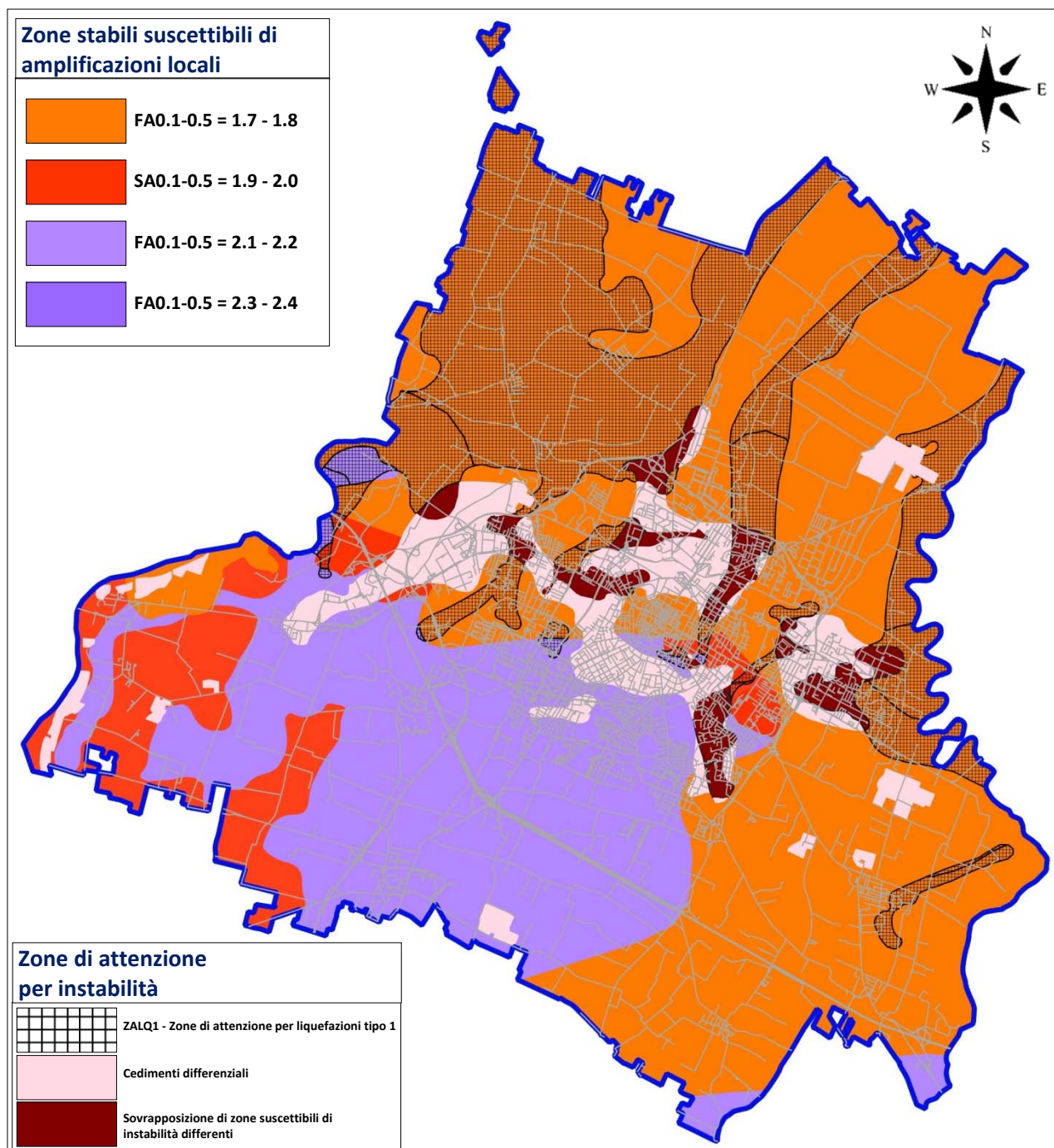


FIGURA 55: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SA0.4-0.8

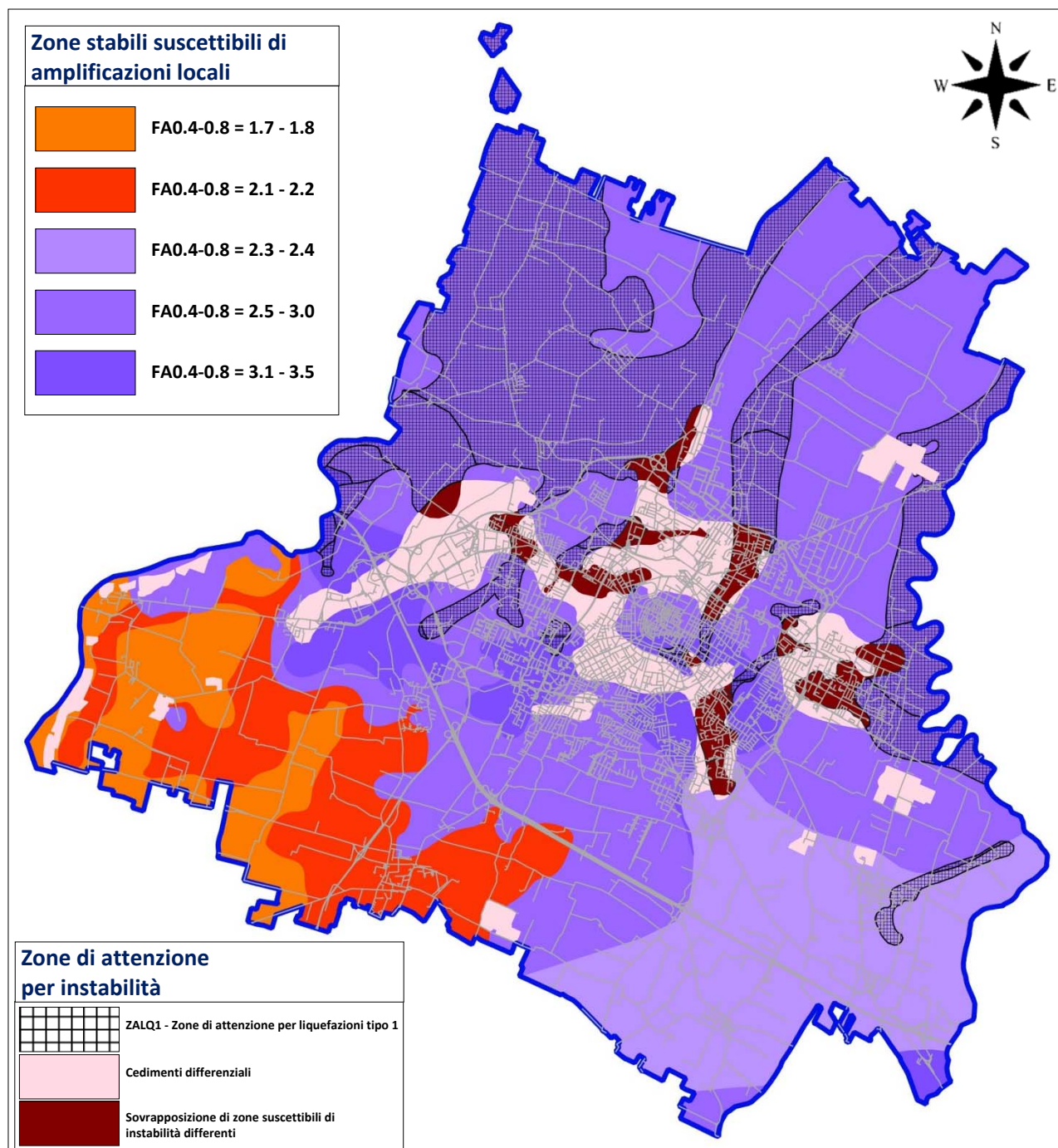


FIGURA 56: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SA0.7-1.1

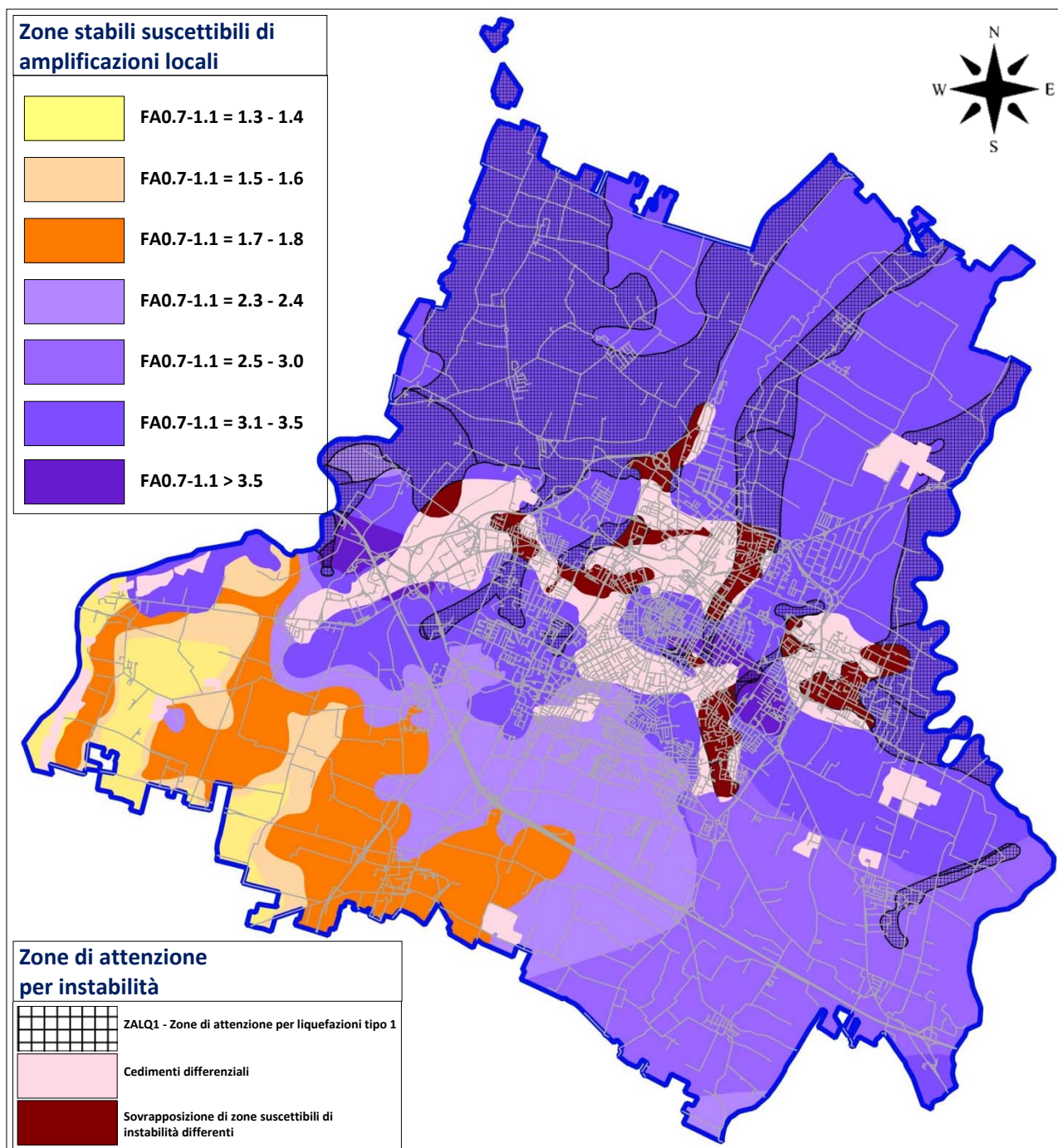


FIGURA 57: CARTA FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SA0.5-1.5

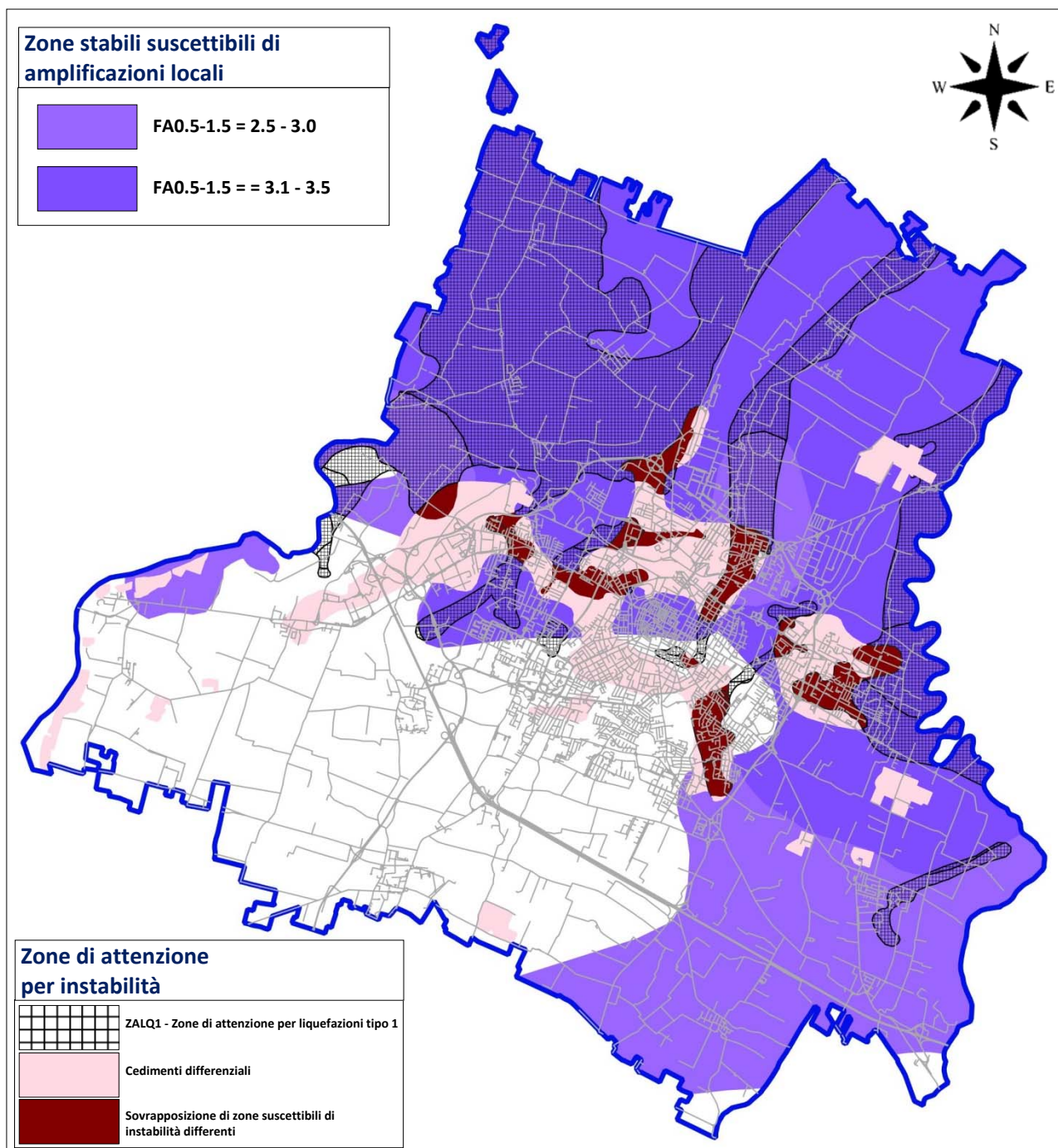
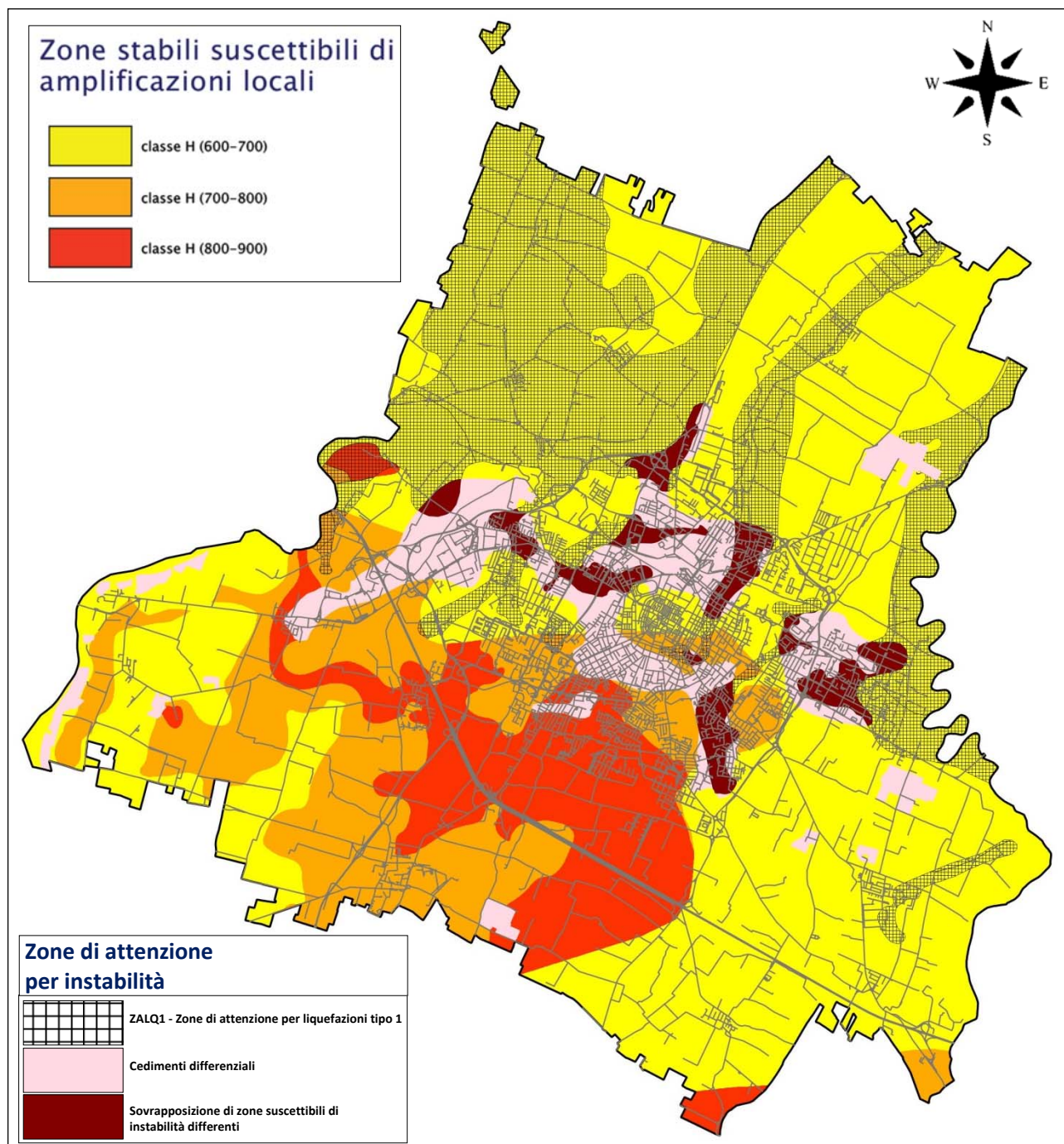


FIGURA 58: CARTA PARAMETRO H_{SM}



8.5 CARTA DELLE FREQUENZE

Nel contesto delle indagini effettuate e reperite in bibliografia, particolare interesse rivestono le informazioni fornite da acquisizione di microtremori con stazione singola (HVSr). I dati ottenuti consentono, infatti, di definire le modalità di vibrazione del terreno ed individuare sia la frequenza di risonanza (f_0) che l'ampiezza (A_0) del rapporto spettrale, evidenziano la presenza di eventuali frequenze secondarie (f_1).

In relazione alla distribuzione delle frequenze fondamentali, sono state individuate 9 classi di Frequenza, e 2 per quanto riguarda le ampiezze (maggiore e minore di 3).

Tali associazioni sono state riportate nella "Carte delle Frequenze Naturali del terreno" (Tavole da 7.1 a 7.5) in cui i valori di frequenza sono identificati attraverso una serie di simboli con colori e dimensioni differenti. Il colore è correlato alle diverse classi di frequenza mentre la dimensione alla classe di ampiezza.

In generale si osservano frequenze e ampiezze maggiori (>2 Hz) nel settore occidentale del territorio comunale che indicano un significativo contrasto di impedenza sismica superficiale (maggiore di 2-2.5) in corrispondenza del passaggio tra i depositi fini di copertura ed il substrato ghiaioso, che tendono progressivamente e gradualmente a ridursi sino a valori di circa 1.5 Hz verso ovest e nord con l'approfondimento di tale passaggio stratigrafico e la riduzione degli spessori dei depositi grossolani.

Nella restante parte del territorio si registrano valori di ampiezze inferiori con riduzione anche delle ampiezze. La FIGURA 59 mostra indicativamente il valore del periodo fondamentale degli edifici in funzione dell'altezza degli stessi e della loro tipologia che può essere utile al fine di una valutazione preliminare della possibilità che possano verificarsi fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico e quella dei manufatti presenti e/o in progetto, che determinerebbe effetti quantomeno gravosi sugli stessi.

FIGURA 59: CAMPO DI VARIABILITÀ DEL PERIODO FONDAMENTALE DEGLI EDIFICI (NTC 2018)

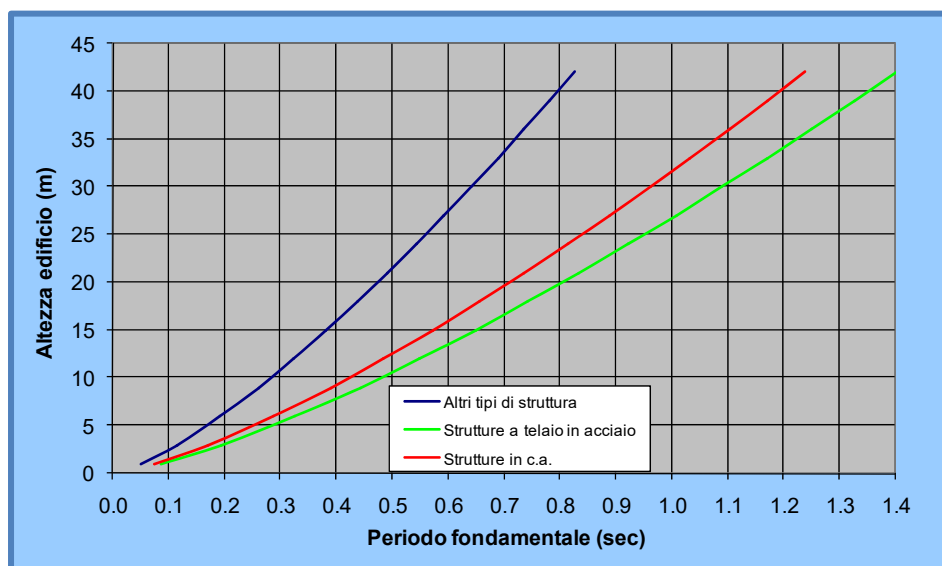
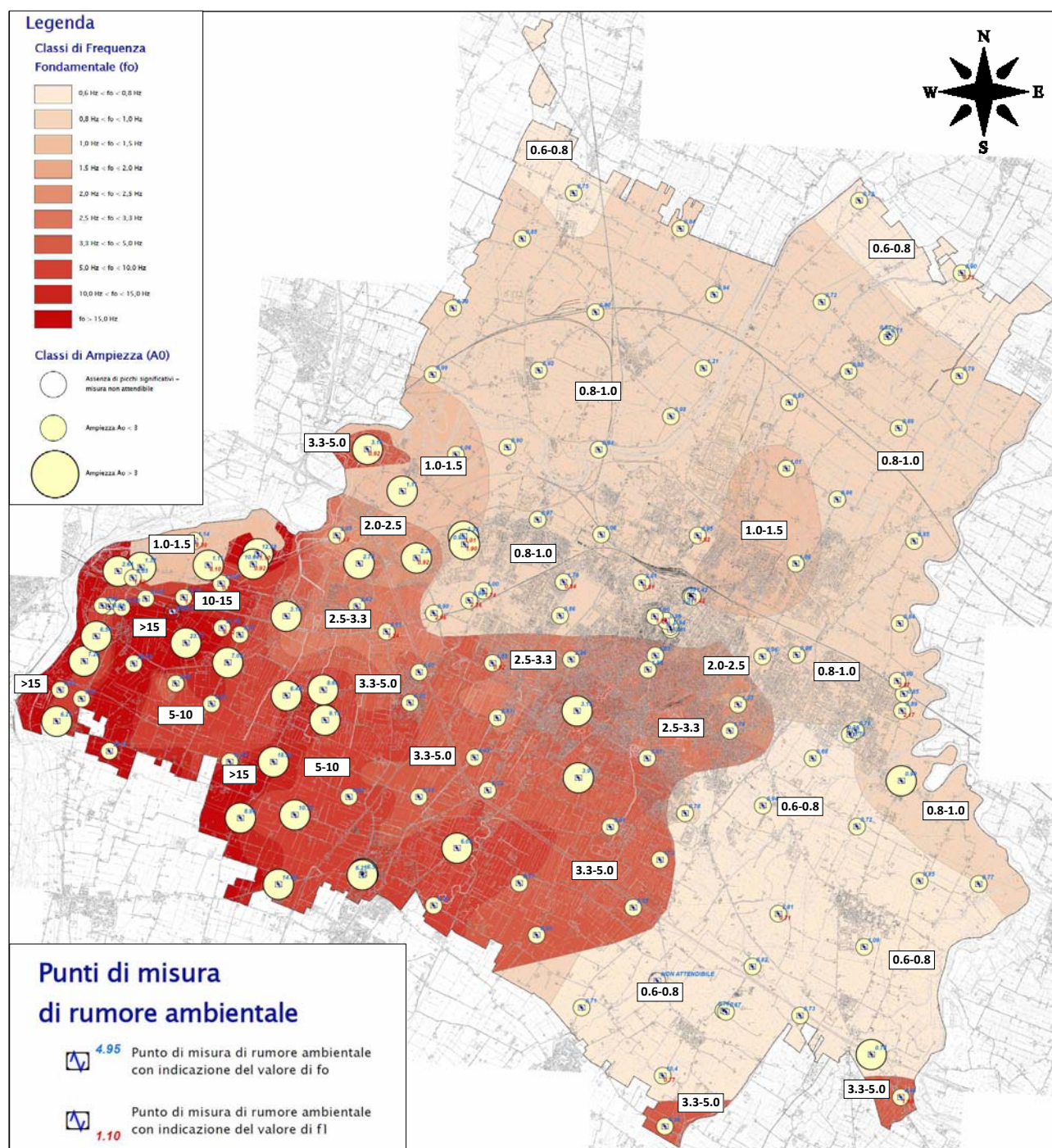


FIGURA 60: CARTA CARTE DELLE FREQUENZE NATURALI DEL TERRENO



8.6 CARTA DELLE VELOCITÀ (Vs)

Nella Tav. da 8.1 a 8.5 sono riportati in forma sintetica i risultati delle indagini geofisiche effettuate e disponibili in bibliografia, specificando, in particolare, il valore di V_{S30} o quello di V_{SH} e il relativo spessore di calcolo.

A Vs. disposizione per ogni chiarimento e/o informazione si porgono distinti saluti

Dicembre 2020

La ditta incaricata per l'aggiornamento della Microzonazione Sismica alla D.G.R. 630/19



Coordinamento Generale

Dott. Geol. Giorgio Masotti



Collaboratori

Dott. Geol. Alberto Fiori



Recapiti dello Studio Incaricato

GEO-XPert ITALIA SRL
Via di Mezzo, 90
41058 Vignola (MO)
Tel. 059.761644 – Fax: 059.779111
Cell: 348.3803823
e-mail: info@geo-xpert.com
e-mail PEC: geo-xpert@pec.it

9 BIBLIOGRAFIA

NOTE ILLUSTRATIVE della CARTA GEOLOGICA D'ITALIA (2009) alla scala 1:50.000, foglio 201 MODENA. ISPRA SGI Enti realizzatori Regione Emilia – Romagna SGSS, a cura di G. Gasperi, M. Pizziolo;

NOTE ILLUSTRATIVE della CARTA GEOLOGICA D'ITALIA (2005) alla scala 1:50.000, foglio 219 SASSUOLO. ISPRA SGI Enti realizzatori Regione Emilia – Romagna SGSS, a cura di G. Gasperi, G. Bettelli, F. Panini, M. Pizziolo;

DGR1919/2011. Deliberazione della Giunta Regionale n. 1919 GPG/2013/1640, "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione e concessione dei contributi di cui all'OPCM 52/2013;

GRUPPO DI LAVORO MS,2008. "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Conferenza delle Regioni e delle province Autonome – Dipartimento della protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd;

DAL 112/2007. Deliberazione dell'assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 oggetto n° 3121 del 2/5/2007: Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art.16 comma 1, della L.R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". Boll. Uff. Reg. Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007;

COMMISSIONE TECNICA PER LA MICROZONAZIONE SISMICA, 2013 - "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica MICROZONAZIONE SISMICA Versione 3.0 - Roma, 2013;

ANNOVI A. (2010) - "VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITA' SISMICA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE ED URBANISTICA IN COMUNE DI MODENA" - Quadro conoscitivo PRG 2003. Modena, 2010;

AA.VV. (1990-2015) - Relazioni geologiche effettuate sul territorio Comunale.

AA.VV. (2013) – "Assetto tettonico e potenzialità sismogenetica dell'Appennino tosco-emiliano-romagnolo e della Val Padana". Regione Emilia Romagna, Regione Toscana, Università di Siena, Bologna, Aprile 2013, 1 Vol., pp 168.

AA.VV. (2011) – "Sismotettonica dell'Appennino settentrionale". Regione Toscana, Università di Siena, Firenze, Marzo 2011, 1 Vol., pp 85;

Gelmini R., Paltrinieri N., Marino L, 2003 - Relazione geologica per la variante Generale al Piano Regolatore del Comune di Modena - Modena, 2003;

BOCCALETTI M. – MARTELLI L. – AA.VV. (2004) – Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna. scala 1:250.000 - S.E.L.C.A. Firenze 2004;

CREMONINI S., LABATE D., 2015 - "Modena: un "dissesto" di lungo periodo. Nuovi dati sull'alluvionamento solido della città" - Geologia dell'ambiente - Trimestrale SIGEA - 1/2015. Roma, 2015;

GASPERI G, et all, 1989 - Evoluzione Plio-Quaternaria del margine appenninico modenese e dell'antistante pianura. Note illustrative alla Carta Geologica. Mem. Soc. Geol. It., 39(1987), 375-431, 8 ff.,1 tab., 1 carta geologica scala 1:15.000. Roma, 1989;

CREMASCHI M, GASPERI. G., 1989 - L' <<Alluvione>> alto-medioevale di Mutina (Modena) in rapporto alle variazioni ambientali oloceniche. Mem. Soc. Geol.It., 42(1989), 179-190, 7 ff., 1 tab, Roma, 1989;

MAZZETTI G.P., 2010 - Rapporto Tecnico di Indagine geofisica mediante stendimenti Refraction Microtremor (Re.Mi.) sul territorio Comunale di Modena. Modena, 2010

MELETTI C. E VALENSISE G., 2004. Zonazione sismogenetica ZS9-App. 2 al rapporto Conclusivo. In: "Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCm 3274 del 20 marzo 2003". Rapporto per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici;

PAREA G.C., 1987 - Paleogeografia e tettonica tardo-Pleistoceniche del pedeappennino modenese. Mem. Soc. Geol. It., 39(1987), 433-446, 5 ff. Roma, 1989;