

## 1 - Modello Geologico

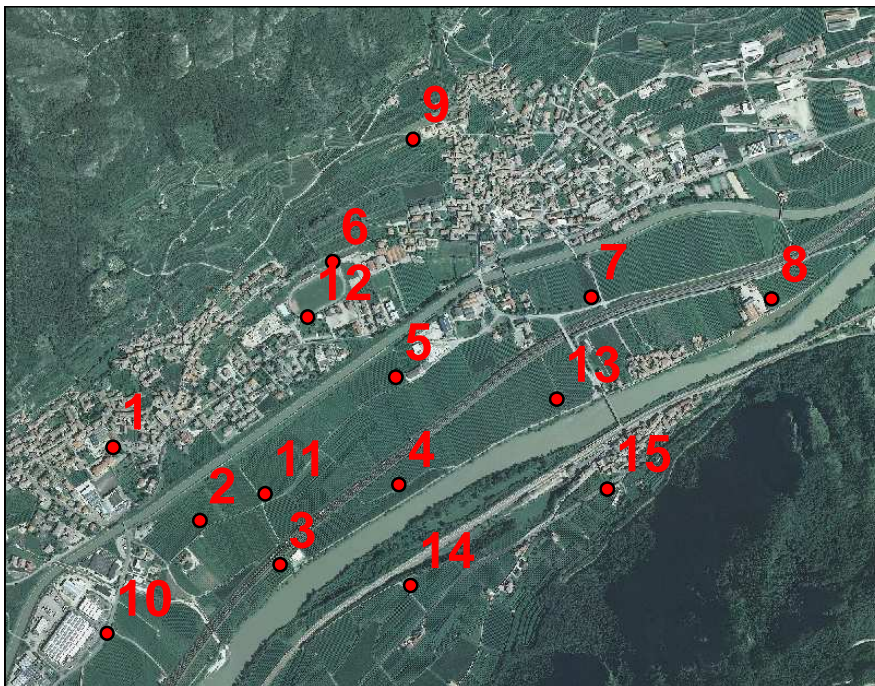
Il comune di Avio si colloca nella margine meridionale della provincia di Trento lungo la Valle dell'Adige.

Il substrato litoide è presente unicamente in corrispondenza delle pareti rocciose che delimitano il solco vallivo mentre il centro abitato, comprensivo di Sabbionara, del Vò Destro e del Vò Sinistro, si sviluppa su depositi di origine quaternaria che, sotto l'aspetto geomorfologico possono essere ricondotti a quattro tipologie genetiche e, in particolare alle conoidi del t. Aviana e del rio Sabbionara, ai terrazzi alluvionali, al fondovalle con deposizioni alluvionali "recenti" ed ai depositi di falda gravitativa comprensivi di cono di deiezione..

### 1.1 indagini

Le indagini preesistenti sono costituite da una decina di sondaggi meccanici (catasto sondaggi SG) la cui profondità massima non supera i 25 metri. Escludendo un unico livello limoso incontrato nel sondaggio 2682, i depositi attraversati dai rimanenti sondaggi sono unicamente granulari a prevalenza ghiaiosa.

Al fine di definire con maggiore dettaglio le caratteristiche stratigrafiche dell'area analizzata sono state effettuate 15 analisi H/V unitamente ad altrettante indagini MASW; l'elaborazione delle analisi H/V è stata effettuata vincolandola ai risultati delle indagini MASW.



*fig. 1 – ubicazione indagini geofisiche*

### 1.2 sezioni

Utilizzando le indagini geofisiche sono state elaborate alcune sezioni rappresentative della valle delle quali 3 trasversali ed una longitudinale (fig. 2 e fig. 3).

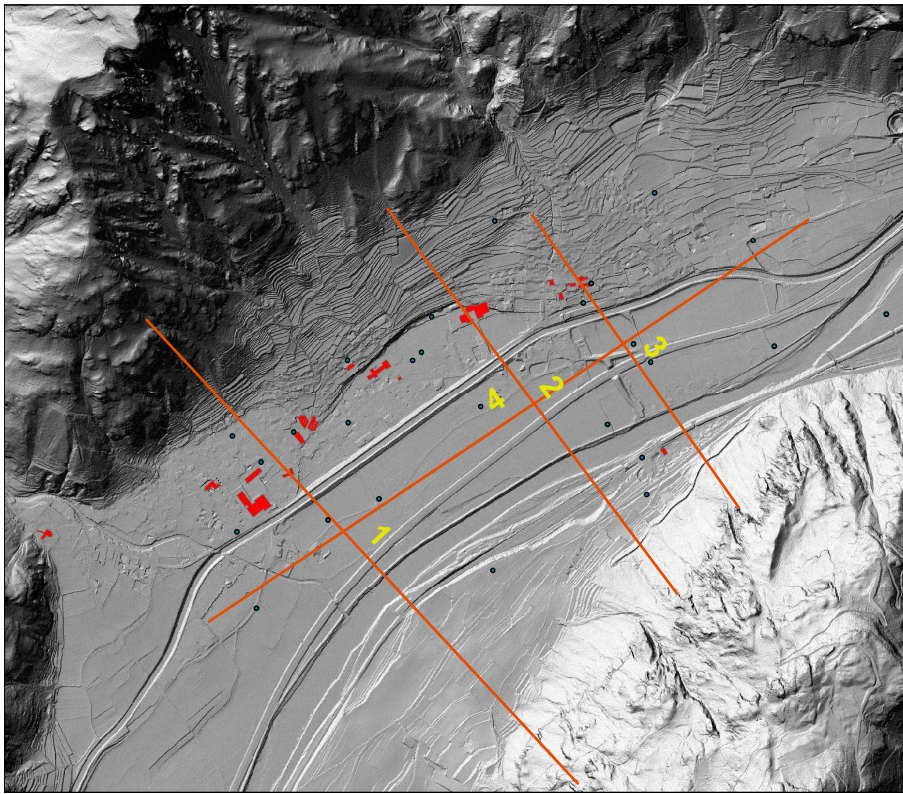
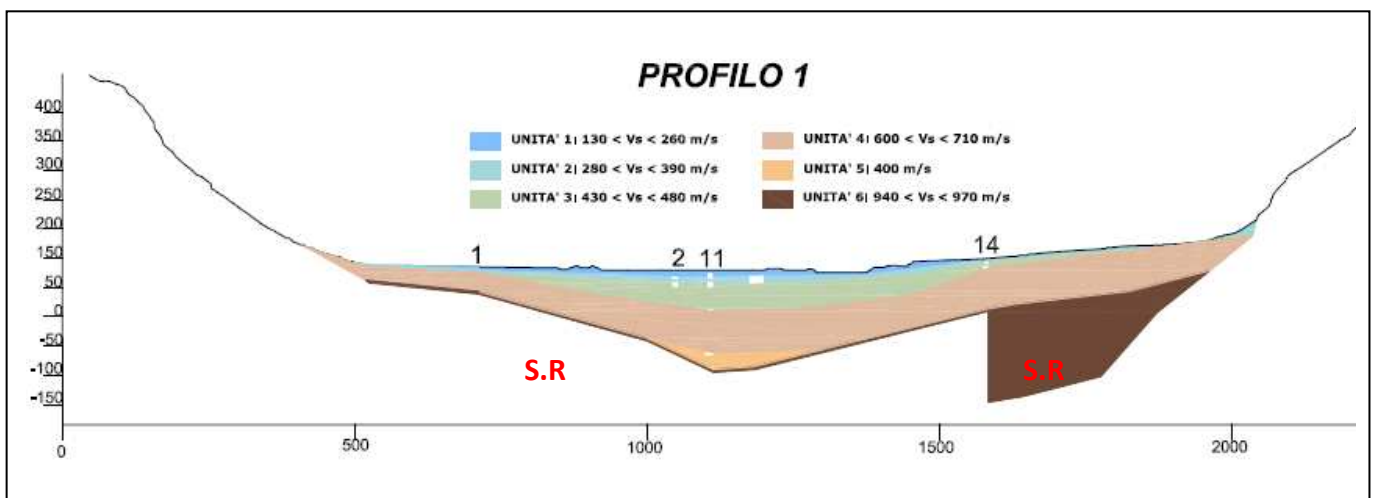


fig. 2 – parte del fondovalle comprendente l'abitato di Avio e delle principali frazioni, con indicazione delle tracce di sezione e, in rosso, gli edifici classificati come di importanza "strategica o rilevante" (Classe d'uso III e IV D.M. 14.01.2008)

Si osserva una buona correlabilità dei livelli litologici individuati che consentono l'individuazione di 5 o 6 unità litologiche caratterizzate da omogenee velocità delle onde di taglio.

L'unità che risulta caratterizzata da maggiore variabilità è quella dei livelli più superficiali, molto influenzata dalle variazioni locali.

Si individua un bedrock sismico, caratterizzato da velocità  $V_s$  comprese tra 850 e 1000 m/s circa che, in alcuni punti, si osserva in sovrapposizione al probabile bedrock geologico che evidenzia velocità ( $V_s$ ) comprese tra 1300 e 1500 m/s circa.



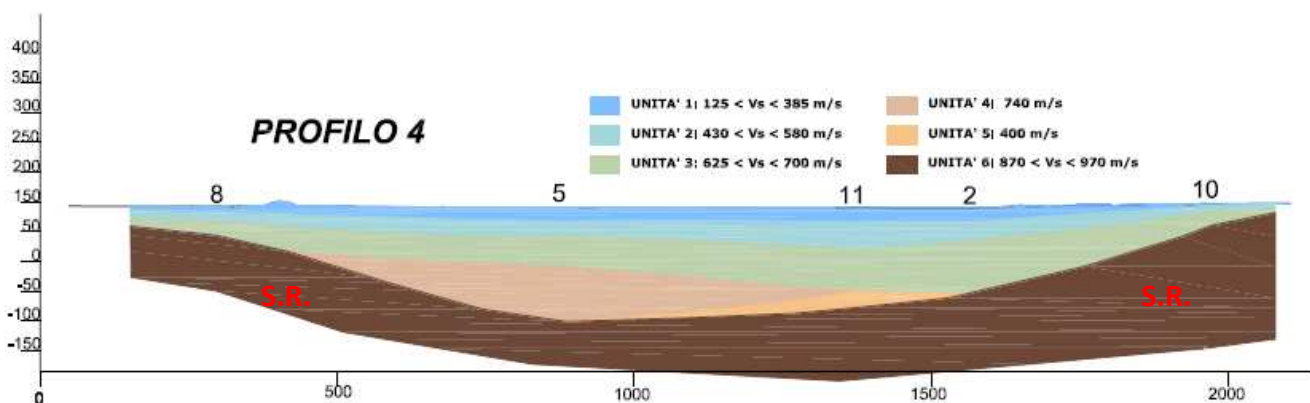
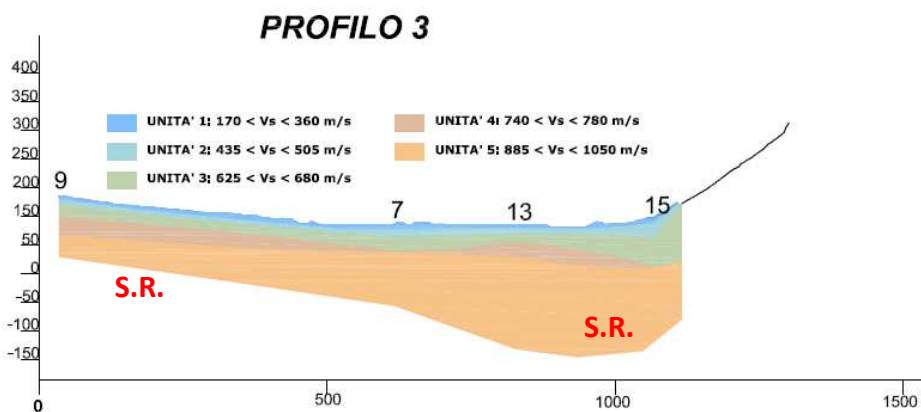
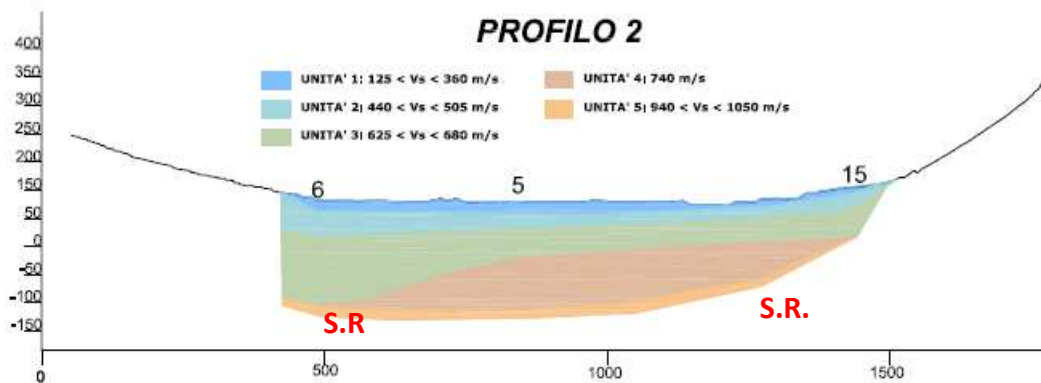


fig. 3: profili rappresentativi analizzati

Il bedrock sismico, ragionevolmente costituito da una morena di fondo si colloca a profondità variabili tra un minimo di 40 ed un massimo di 160 m, quello geologico, dove individuato, tra i 200 ed i 250 m circa di profondità.

L'andamento geometrico delle unità, particolarmente per quelle sovrapposte al bedrock sismico può, a piccola scala essere assunto suborizzontali.

Al fine di verificare l'utilizzabilità di una modellazione monodimensionale è stato utilizzato l'approccio semplificato di Bard e Bouchon calcolando la formula:

$$\frac{h}{l} \leq 0.65 / \sqrt{C_v - 1}$$

dove

h = è il massimo spessore del deposito

l = semiampiezza della valle

C<sub>v</sub> = rapporto tra la velocità V<sub>s</sub> nel basamento sismico e quella media nei terreni di riempimento

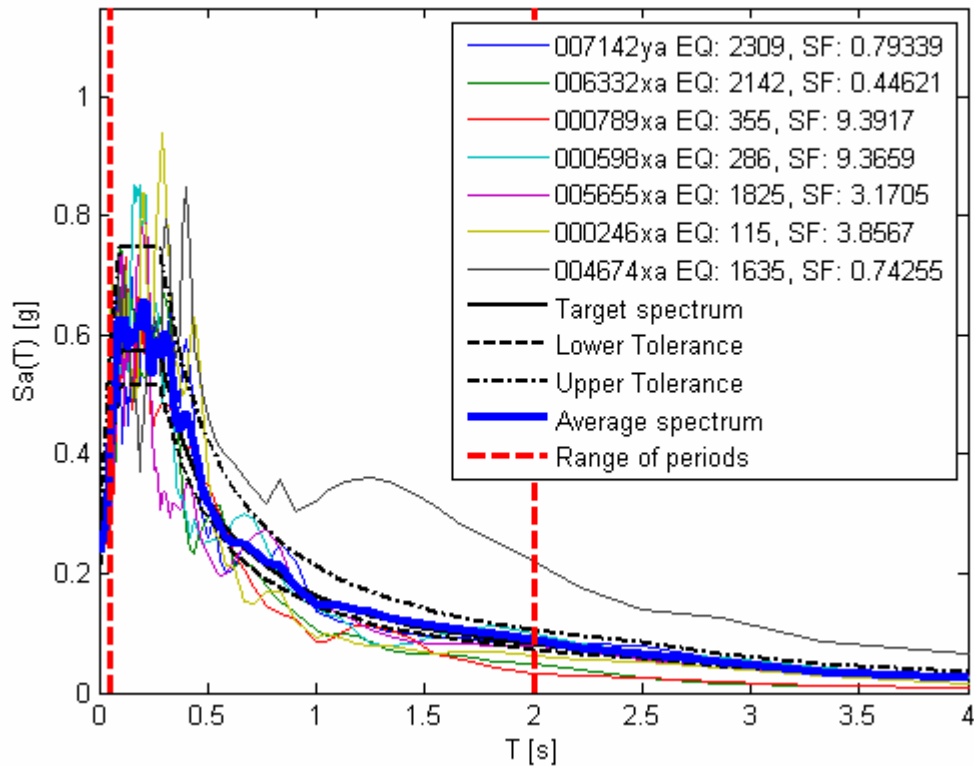
I risultati sono riassunti nella tabella seguente nella quale si osserva come le caratteristiche geometriche e di velocità sismica delle unità individuate siano rispondano ai requisiti richiesti.

	<b>h/l</b>	<b>0.65/(C<sub>v</sub>-1)<sup>0.5</sup></b>
<b>Profilo 1</b>	0.24	0.59
<b>Profilo 2</b>	0.38	0.77
<b>Profilo 3</b>	0.16	0.82

## 2 – Input sismico

Utilizzando il programma Rexel (Iervolino I., Galasso C., Cosenza E. – 2009. REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362), in accordo alle normativa vigente sono stati acquisiti 7 accelerogrammi spettro compatibili con i quali effettuare le simulazioni monodimensionali.

Di seguito sono elencati gli eventi selezionati compatibili con lo spettro di normativa relativo ad un tempo di ritorno di 1424 anni (classe d'uso III, vita nominale 100 anni, classe suolo A) (fig. 4).



Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	$M_w$
7142	2309	ST539	Bingol	01/05/03	6.3
6332	2142	ST2483	South Iceland (aftershock)	21/06/00	6.4
789	355	ST225	Umbria Marche (aftershock)	12/10/97	5.2
598	286	ST222	Umbria Marche	26/09/97	6
5655	1825	ST2950	NE of Banja Luka	13/08/81	5.7
246	115	ST61	Valnerina	19/09/79	5.8
4674	1635	ST2486	South Iceland	17/06/00	6.5

fig. 4: input sismici utilizzati nell'analisi di RSL

### 3 – RSL delle strutture analizzate

Sono state elaborate tre RSL relativamente a 3 strutture presenti nel territorio comunale di Avio, che per tipologia sono considerate di classe d'uso 3 (di rilevante interesse) o classe d'uso 4 (strategiche) ai sensi della normativa vigente e, nello specifico il teatro comunale (1) la caserma di VVFF volontari (2) e il ponte della S.P. sul fiume Adige (3) (fig. 5).

Per ognuno di queste strutture la modellazione monodimensionale è stata realizzata con un programma di calcolo che adotta l'analisi lineare equivalente (EERA - Bardet ed al. 2000).

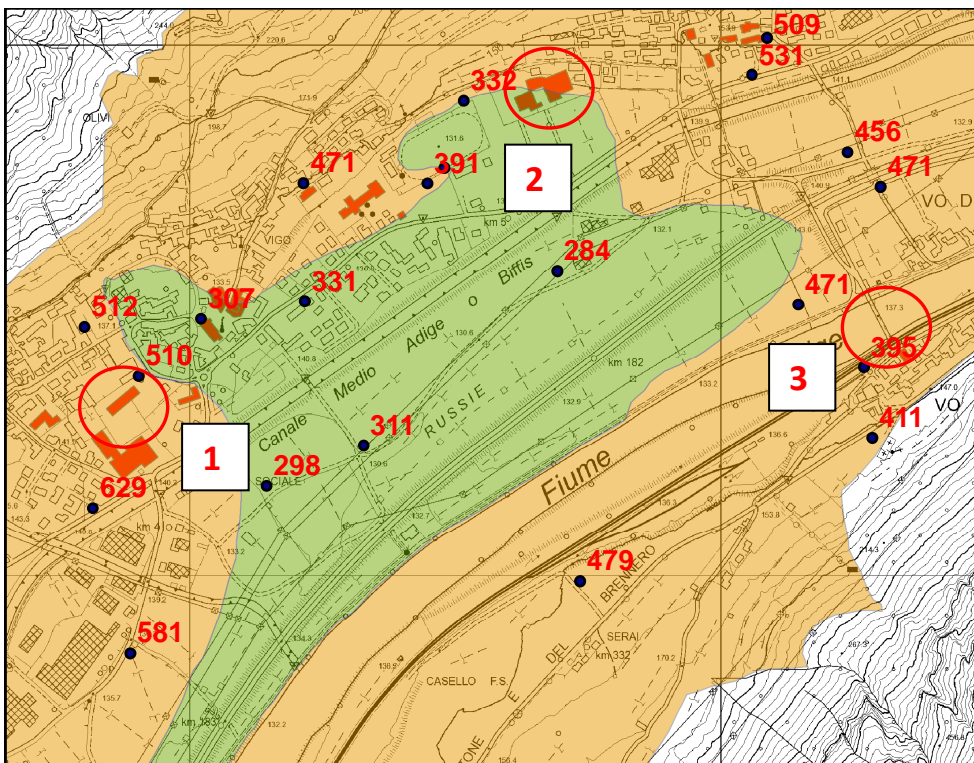


fig. 5 : ubicazione strutture analizzate e parametri Vs30 calcolati (Categoria C 0 = verde, Categoria B = arancione)

L'analisi del parametro  $V_{s30}$  evidenzia come il suolo di fondazione in corrispondenza del teatro (1) e del ponte sul fiume Adige (3) sia classificabile in categoria B mentre quello della caserma dei VVFF sia (parzialmente) classificabile in categoria C.

Le analisi di RSL sono state realizzate determinando lo spettro di risposta in accelerazione per ciascuno dei 7 terremoti di input operando poi la media tra di loro.

Infine lo spettro calcolato è stato confrontato con lo spettro di normativa (terreno categoria B per le strutture 1 e 3 e terreno categoria C per la struttura 2).

### 3.1 – RSL Teatro (1)

Si trova sulla conoide del t. Aviana a breve distanza dal nucleo storico del paese.

La stratigrafia sismica utilizzata è quella dedotta dall'indagine n° 1 (ubicazione in fig. 1).



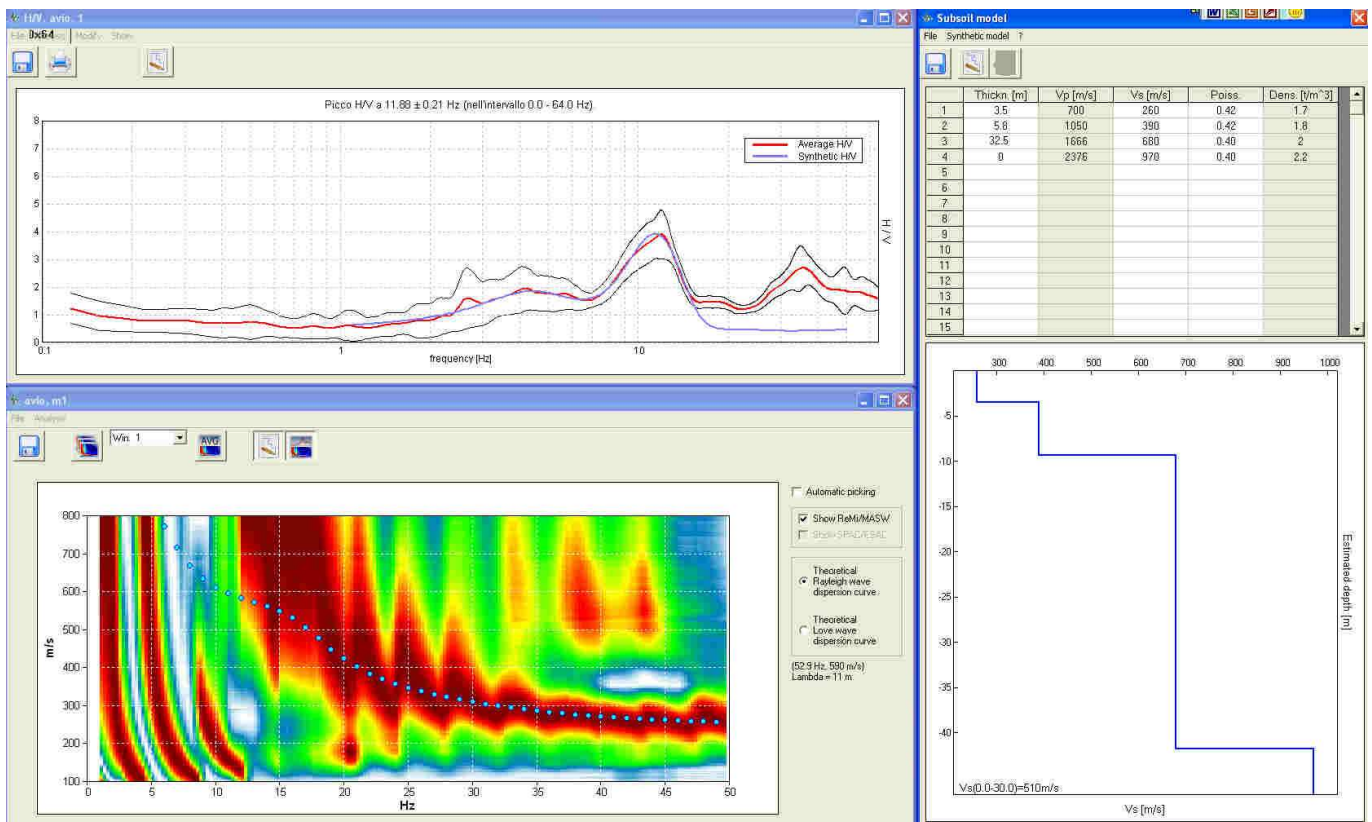


fig. 6: indagine 1: indagine MASW e analisi HVSR

)

Il modello utilizzato in EERA vede:

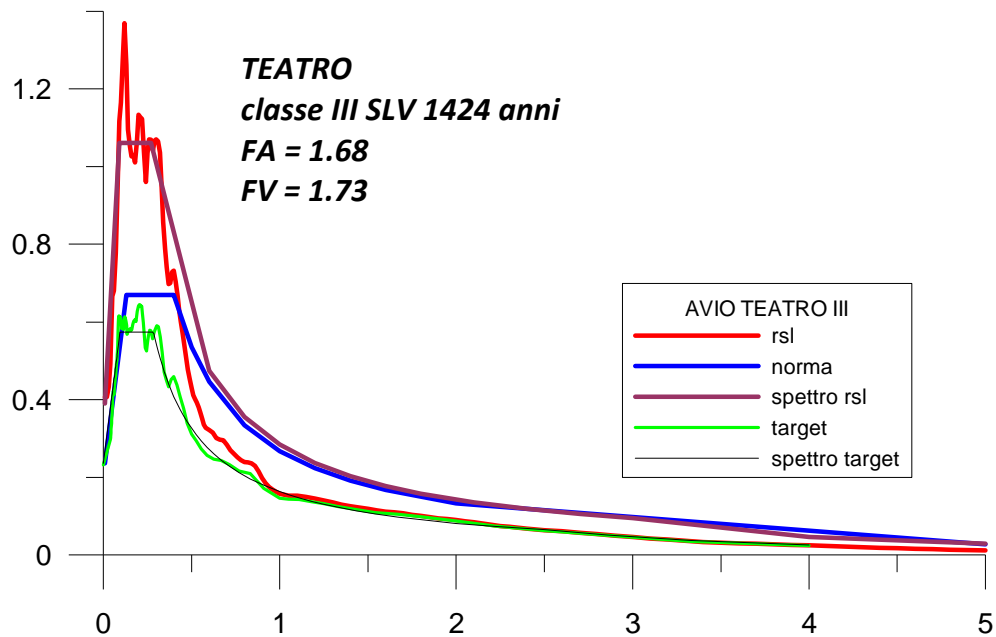
da 0 – 3.5 m sabbie: curva di smorzamento utilizzata da Seed,  $V_s = 260$ ,  $\rho = 17 \text{ kN/m}^3$

da 3.5 a 10.3 sabbie e ghiaie medie: curva di smorzamento da Rollins lower range,  $V_s = 390$ ,  $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$

da 10.3 a 42.8 ghiaie: curva di smorzamento da Seed lower range,  $V_s = 680$ ,  $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$

da 42.8 m substrato sismico,  $V_s = 980$ ,  $\rho = 22 \text{ kN/m}^3$

L'immagine seguente riporta i risultati dell'elaborazione unitamente ai dati in input con i valori di FA e FV calcolati in accordo al par. 2.5.3.3 degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica :



Si osserva come i risultati della modellazione evidenzino come l'approccio semplificato della normativa (linea colore Blu) sottostimi significativamente gli effetti di amplificazione stratigrafica in corrispondenza del teatro comunale ed in modo particolare nell'intervallo 0.0 s – 0.6 s.

Le coordinate dello spettro determinato con l'analisi di RSL sono state calcolate in accordo a quanto previsto al par. 2.5.4.3.1 degli Indirizzi e Criteri sopra citati e sono i seguenti:

SA (0) = 0.389 g  
 SA ( $T_B$ ) = 1.061 g  
 $T_B$  = 0.089 s  
 $T_C$  = 0.268 s  
 $T_D$  = 3.159 s

### 3.2 – RSL Caserma VVFF volontari (2)

La stratigrafia utilizzata è quella dedotta dall'indagine n° 6 (ubicazione fig. 1).





Il modello utilizzato in EERA vede:

da 0 – 4 m sabbie: curva di smorzamento da Seed,  $V_s = 170$ ,  $\rho = 17 \text{ kN/m}^3$

da 4 a 18 sabbie e ghiaie medie: curva di smorzamento da Rollins lower range,  $V_s = 355$ ,  $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$

da 18 a 61 sabbie e ghiaie medie: curva di smorzamento da Rollins lower range,  $V_s = 390$ ,  $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$

da 61 a 182 ghiaie: curva di smorzamento da Seed lower range,  $V_s = 630$ ,  $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$

da 182 m substrato sismico :  $V_s = 950$ ,  $\rho = 22 \text{ kN/m}^3$

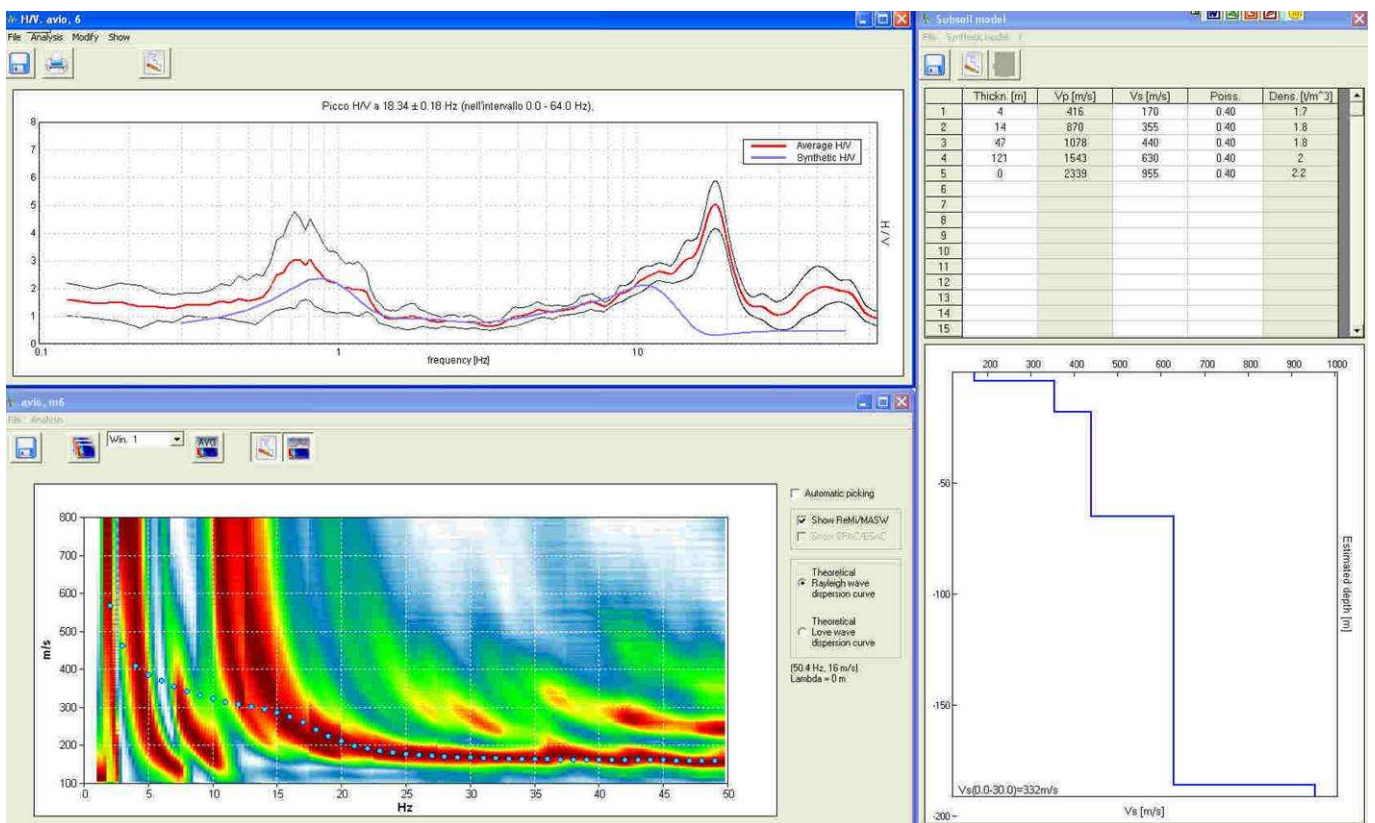
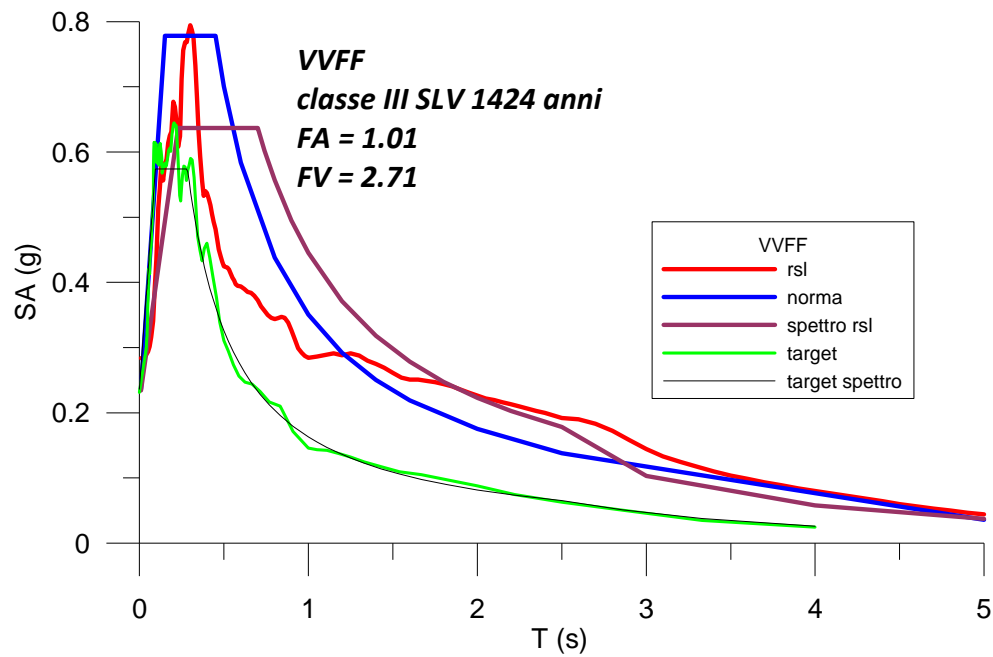


fig. 7: indagine 9: indagine MASW e analisi HVSR

L'immagine seguente riporta i risultati dell'elaborazione unitamente ai dati in input con i valori di FA e FV calcolati in accordo al par. 2.5.3.3 degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica :



Si osserva come rispetto allo spettro di input (target su suolo A) i principali effetti di amplificazione si abbiano con periodi maggiori di circa 0.5 s (vedi Fa e FV) mentre il valore massimo di  $a_g$  (plateau ad accelerazione costante) sia inferiore a quello che si desume assumendo il suolo di fondazione come appartenente alla categoria C

Le coordinate dello spettro determinato con l'analisi di RSL sono state calcolate in accordo a quanto previsto al par. 2.5.4.3.1 degli Indirizzi e Criteri sopra citati e sono i seguenti:

SA (0) = 0.234 g  
 SA ( $T_B$ ) = 0.636 g  
 $T_B$  = 0.233 s  
 $T_C$  = 0.699 s  
 $T_D$  = 2.536

### 3.3 – RSL ponte sul fiume Adige (3)



La stratigrafia utilizzata è quella dedotta dall'indagine n° 13 (ubicazione fig. 1)

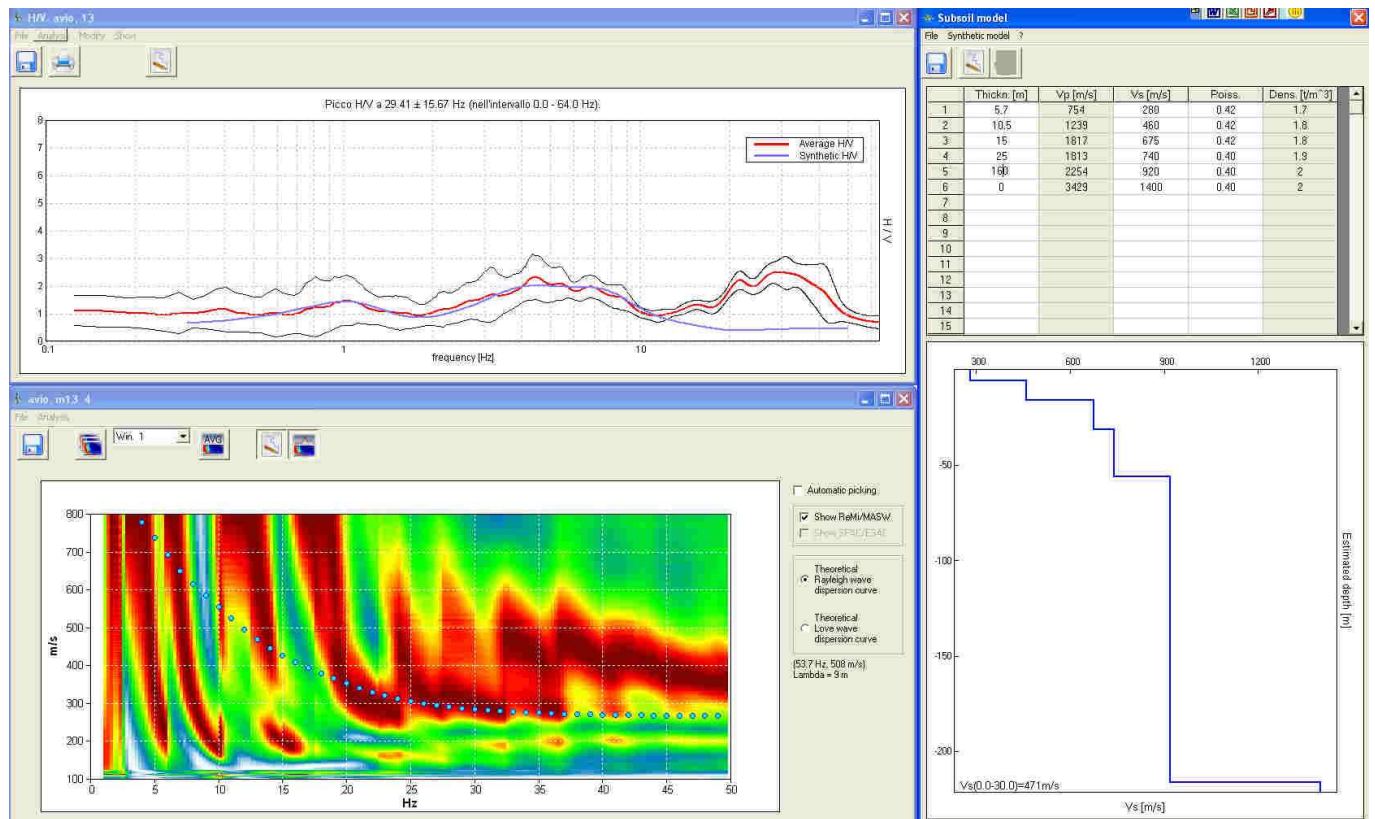


fig. 8 : indagine 13: indagine MASW e analisi HVSR

Il modello utilizzato in EERA vede:

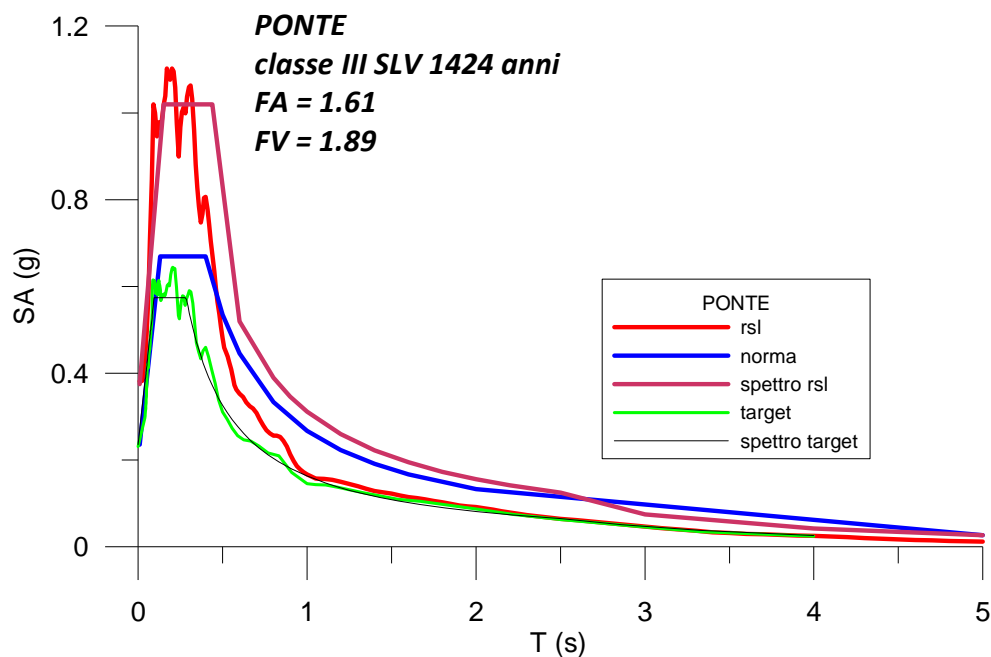
da 0 – 5.7 m sabbie: curva di smorzamento da Seed,  $V_s = 280$ ,  $\rho = 17 \text{ kN/m}^3$

da 5.7 a 16.2 sabbie e ghiaie medie: curva di smorzamento da Rollins lower range,  $V_s = 460$ ,  $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$

da 16.2 a 31.2 sabbie e ghiaie medie: curva di smorzamento da Rollins lower range,  $V_s = 675$ ,  $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$

da 31.2 a 56.2 ghiaie: curva di smorzamento da Rollins lower range,  $V_s = 740$ ,  $\rho = 19 \text{ kN/m}^3$

da 56.2 m substrato sismico :  $V_s = 920$ ,  $\rho = 22 \text{ kN/m}^3$



Si osserva come i risultati della modellazione evidenzino come l'approccio semplificato della normativa (linea colore Blu) sottostimi significativamente gli effetti di amplificazione stratigrafica in corrispondenza del teatro comunale ed in modo particolare nell'intervallo 0.0 s – 0.6 s circa.

Le coordinate dello spettro determinato con l'analisi di RSL sono state calcolate in accordo a quanto previsto al par. 2.5.4.3.1 degli Indirizzi e Criteri sopra citati e sono i seguenti:

SA (0) = 0.374 g  
 SA ( $T_B$ ) = 1.019 g  
 $T_B$  = 0.101 s  
 $T_C$  = 0.305 s  
 $T_D$  = 3.098 s

### 3.4 - Sintesi

Le analisi di RSL realizzate per tre strutture presenti all'interno del Comune di Avio ha mostrato come, in termini generali, lo spettro di risposta elastico in accelerazione determinato utilizzando l'approccio semplificato previsto dal D.M. 14.01.2014 (Cap. 3.2.2) sia sottostimato rispetto a quello calcolato tramite un approccio più rigoroso.

Le simulazioni mostrano risultati significativamente differenti all'interno del medesimo contesto, evidenziando come, perlomeno nell'ambito della progettazione di interventi su strutture "strategiche" e "rilevanti", siano opportuni specifici studi di RSL.

Per questo motivo sono state individuate delle possibili aree di “applicabilità” dei risultati delle simulazioni sopra realizzate.

A oltre all’utilizzo della relazione  $L = \frac{V_s}{f_0}$  in cui:

L = raggio di applicabilità (in m)

$V_s$  = velocità media onde SH del deposito soprastante il Substrato Rigido

$f_0$  = frequenza propria del deposito

sono state applicate delle considerazioni sulle caratteristiche geomorfologiche della valle e disposizione geometrica dei terreni presenti.

In fig. 9 sono quindi riportate le aree nelle quali, previa verifica delle caratteristiche geologiche presenti che devono risultare coerenti con quelle utilizzate nella presente analisi, possono essere ritenuti validi i risultati del presente studio.

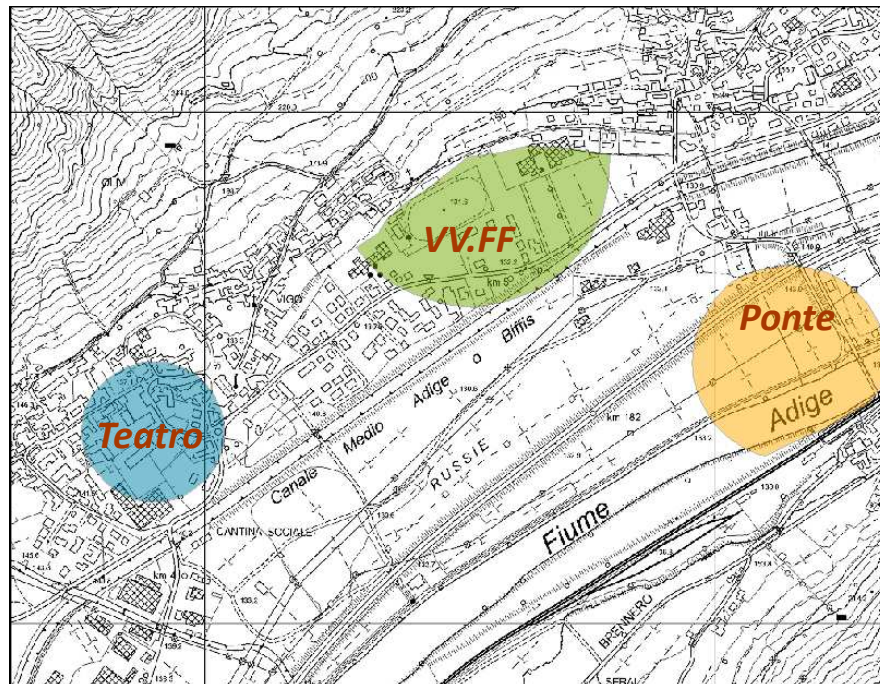


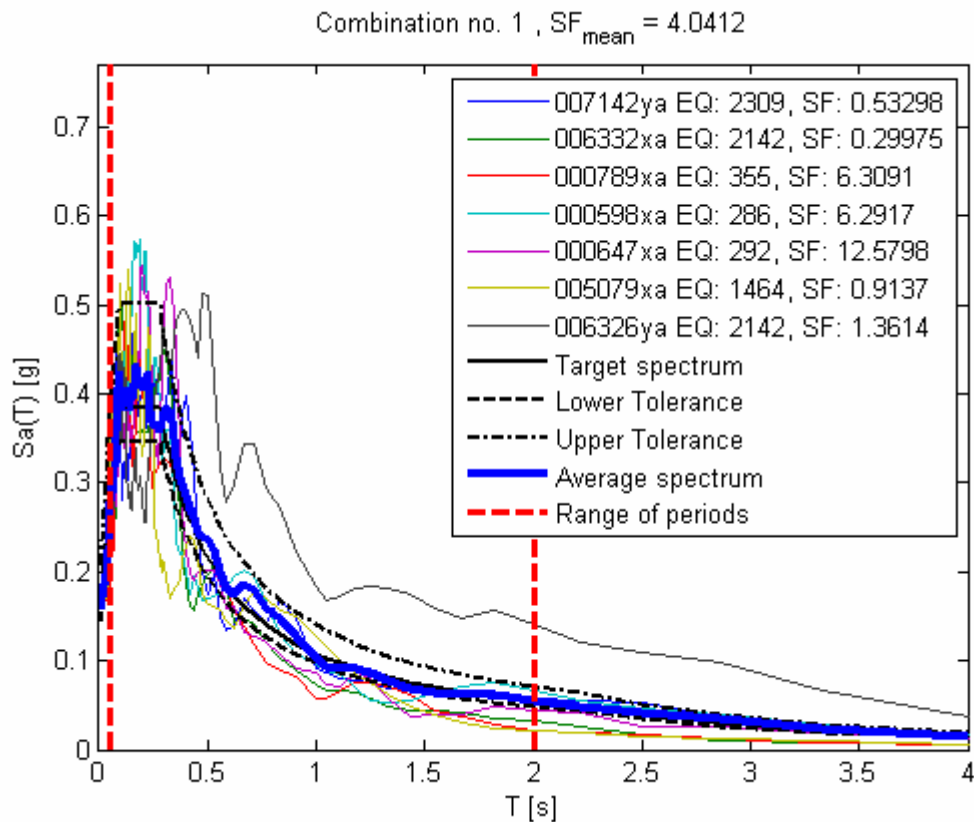
fig. 9 :aree di possibile applicabilità dei risultati dello studio

#### 4 – Analisi RSL bidimensionali

Al fine di effettuare uno studio a carattere areale da assimilare ad una analisi di Microzonazione sismica di 3° livello è stato utilizzato il software LSR 2d (Stacec) che consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Il modello geologico, stratigrafico e geotecnico sono quelli esposti nei paragrafi precedenti mentre l'input sismico è stato assunto, con le medesime modalità sopra esposte, quello con un TR di 475 anni su suolo di categoria A.

Di seguito sono quindi elencati gli eventi selezionati utilizzando il programma Rexel (Iervolino I., Galasso C., Cosenza E. – 2009. REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bullettin of Earthquake Engineering*, 8:339-362), compatibili con lo spettro di normativa relativo ad un tempo di ritorno di 475 anni (classe d'uso II, vita nominale 50 anni, classe suolo A) (fig. 4) relativo alle coordinate geografiche (WGS84) LAT: 45,7439 LONG: 10,959.



Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance [km]	EC8 Site class
7142	2309	ST539	Bingol	01/05/2003	6.3	strike slip	14	A
6332	2142	ST2483	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	6	A
789	355	ST225	Umbria Marche (aftershock)	12/10/1997	5.2	oblique	22	A
598	286	ST222	Umbria Marche	26/09/1997	6	normal	27	A
647	292	ST222	Umbria Marche (aftershock)	14/10/1997	5.6	normal	27	A
5079	1464	ST2552	Mt. Hengill Area	04/06/1998	5.4	strike slip	6	A
6326	2142	ST2496	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	14	A
mean:					5.9		16.57143	

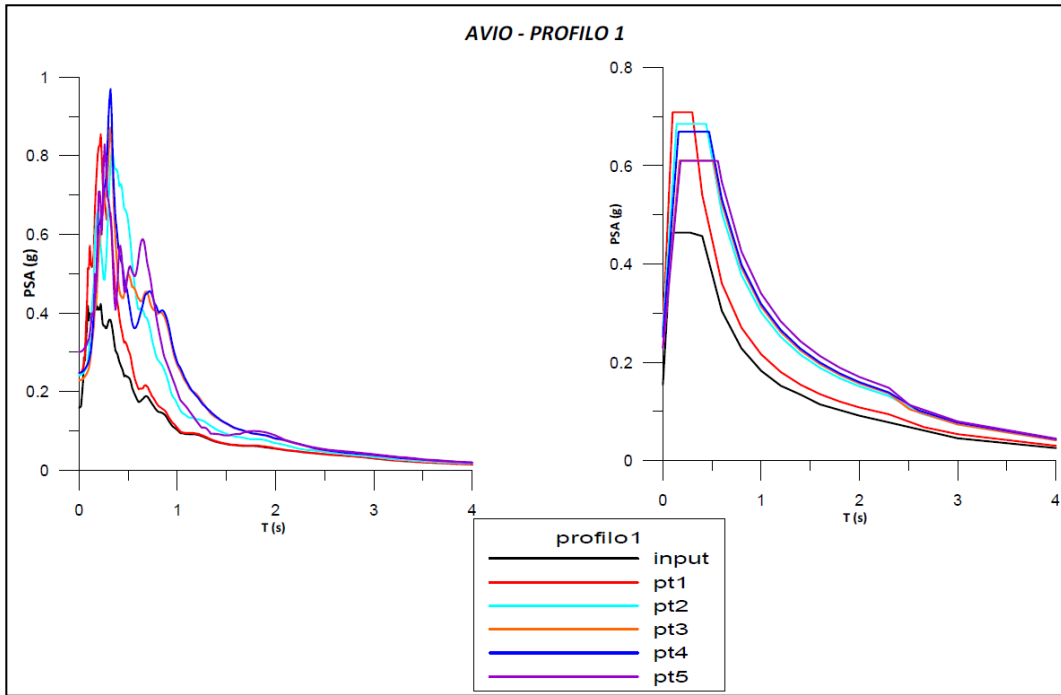
Lungo i tre profili sopra definiti sono stati individuati 5 o 6 punti di controllo in corrispondenza di ciascuno dei quali è stato calcolato lo spettro elastico in accelerazione (per compressivi 16 punti – fig. 10).

Le figure seguenti (fig. 11, 12 e 13) mostrano per ciascun profilo il confronto tra spettri di risposta elastica dei singoli punti analizzati in rapporto allo spettro medio di input (sx) e il confronto tra spettri normalizzati (dx).

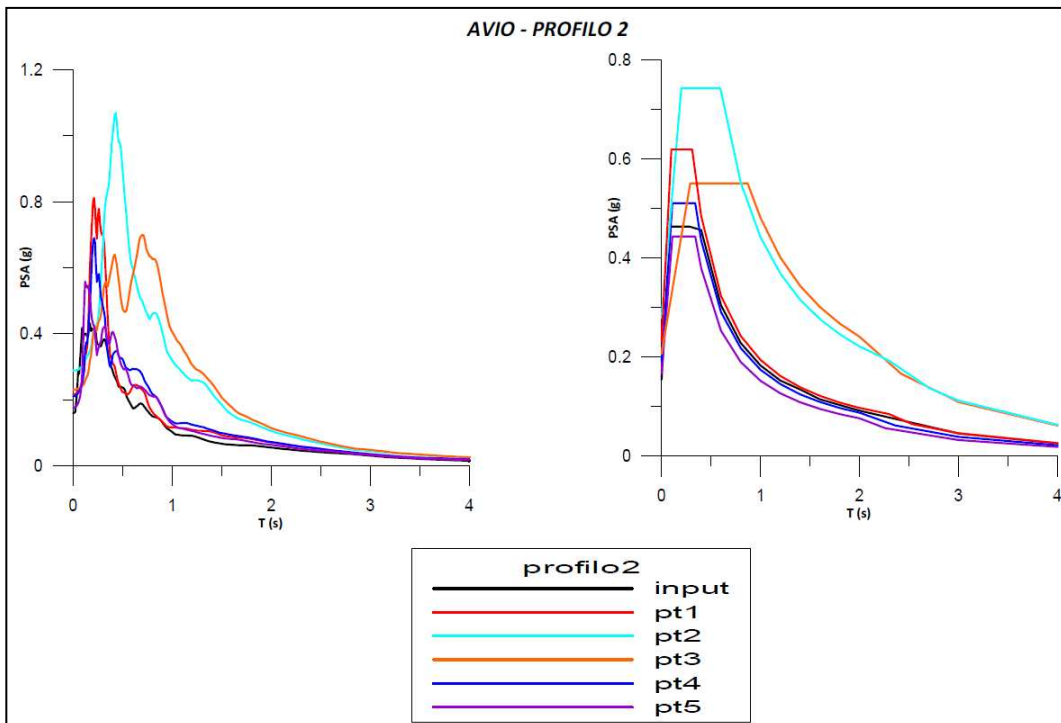


fig. 10 ubicazione punti di controllo

Da un primo confronto qualitativo si osserva come in alcuni punti l'amplificazione calcolata sia molto elevata ed in modo particolare in corrispondenza del profilo 2 (pt. 2 e 3) e del profilo 3 (pt. 3 e 4) che si collocano nel fondovalle nella porzione più occidentale.



*fig. 11: confronto spettri profilo 1*



*fig. 12: confronto spettri profilo 2*



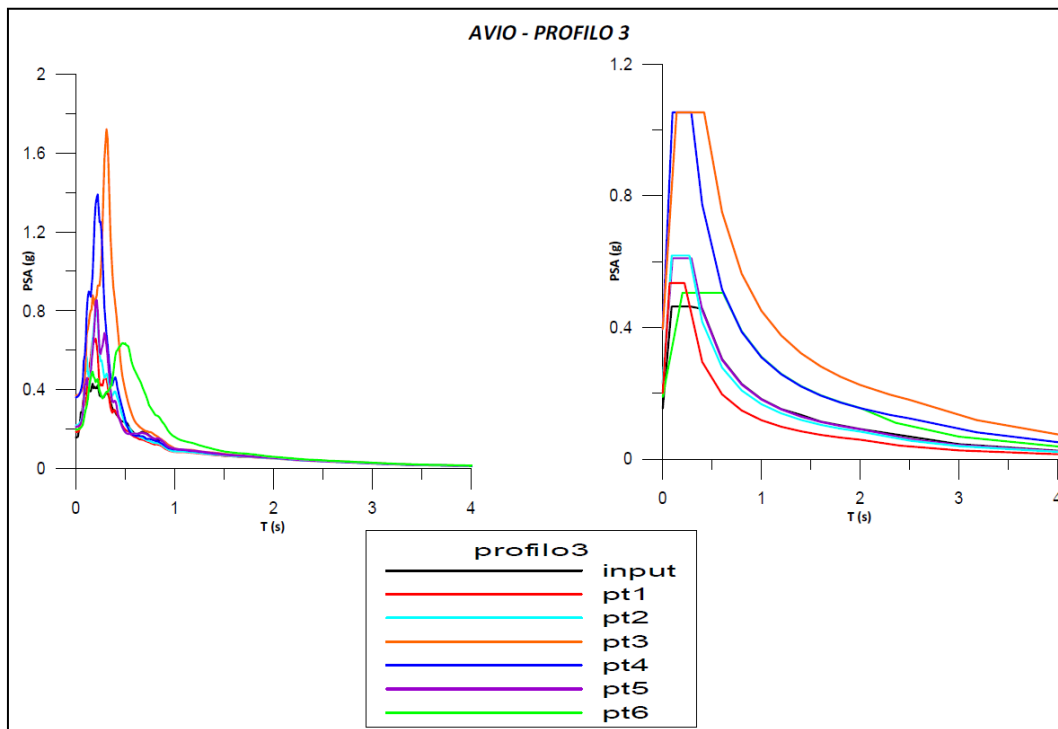


fig. 13: confronto spettri profilo 3

Per ogni punto di controllo è stato calcolato, a parità di input sismico, lo spettro di risposta in accelerazione e, in accordo a quanto previsto dagli Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica (par. 2.5.3.3) i fattori FA e FV e le coordinate di ciascun spettro a probabilità uniforme (par. 2.5.4.3.1); le tabelle seguenti riassumono i risultati suddivisi per profilo.

<b>PROFILO 1</b>	<b>punto 1</b>	<b>punto 2</b>	<b>punto 3</b>	<b>punto 4</b>	<b>punto 5</b>
<b>FA</b>	1.67	1.62	1.44	1.58	1.44
<b>FV</b>	1.75	2.44	2.54	2.58	2.75

<b>PROFILO 2</b>	<b>punto 1</b>	<b>punto 2</b>	<b>punto 3</b>	<b>punto 4</b>	<b>punto 5</b>
<b>FA</b>	1.46	1.75	1.3	1.21	1.05
<b>FV</b>	1.57	3.58	3.89	1.41	1.23

<b>PROFILO 3</b>	<b>punto 1</b>	<b>punto 2</b>	<b>punto 3</b>	<b>punto 4</b>	<b>punto 5</b>	<b>punto 6</b>
<b>FA</b>	1.26	1.46	2.49	2.49	1.44	1.19
<b>FV</b>	0.96	1.35	3.64	2.50	1.46	2.51

Si osserva con ancora più chiarezza come le più elevate amplificazioni sia in termini di accelerazione (FA) che di velocità (FV) si localizzino nel fondovalle in destra Adige.

Al fine di definire l'andamento areale delle amplificazioni attese sono stati analizzati i risultati, finalizzati alla loro valutazione, espressi in termini sia di fattori di amplificazione Fa, sia in termini di spettri di risposta elastici in pseudo-accelerazione al 5% dello smorzamento critico.

Dagli spettri elastici in pseudo-velocità al 5% dello smorzamento critico (PSV) è stata calcolata l'intensità spettrale (SI) nei seguenti intervalli di periodo:

0.1-0.5 s : assunto come rappresentativo di edifici con strutture particolarmente rigide e sviluppo verticale indicativamente fino a 5 piani.

$$SI_{0.1-0.5}(PSV) = \int_{0.1}^{0.5} PSV(T, \mu) dt$$

0.5-1.5 s : assunto come rappresentativo del periodo proprio di edifici con strutture flessibili e sviluppo verticale indicativamente compreso tra i 5 e i 15 piani

$$SI_{0.5-1.5}(PSV) = \int_{0.5}^{1.5} PSV(T, \mu) dt$$

0.1-2.5 s : così come definito da Housner

$$SI_{0.1-2.5}(PSV) = \int_{0.1}^{2.5} PSV(T, \mu) dt$$

Il fattore di amplificazione Fa è stato definito come il rapporto tra le intensità spettrali calcolate sugli spettri di risposta in pseudo-velocità al 5% dello smorzamento critico del moto in superficie e del moto di input, calcolati per i diversi intervalli di periodo:

$$Fa_{0.1-0.5} = \frac{SI_{0.1-0.5}(output)}{SI_{0.1-0.5}(input)} \quad Fa_{0.5-1.5} = \frac{SI_{0.5-1.5}(output)}{SI_{0.5-1.5}(input)} \quad Fa_{0.1-2.5} = \frac{SI_{0.1-2.5}(output)}{SI_{0.1-2.5}(input)}$$

Pertanto gli spettri di risposta medi in pseudo-accelerazione ottenuti per ogni punto di analisi sono stati confrontati con lo spettro di risposta corrispondente alla categoria di sottosuolo A e TR 475 anni.

I risultati ottenuti sono riportati puntualmente nelle figure seguenti mentre in allegato sono presentati due elaborati grafici (relativi a  $Fa_{0.1-0.5}$  e  $Fa_{0.5-1.5}$ ) nei quali i valori puntuali sono stati interpolati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche note al fine di individuare aree omogenee sulla base dei valori di amplificazione attesi.

Si osserva come le aree in cui sono previste le maggiori amplificazioni, in tutti i campi di frequenza, sono quelle del fondovalle e, in particolare modo quelle collocate al piede del versante su cui si sviluppa l'abitato di Avio; parallelamente il conoide su cui sorge l'abitato di Sabbionara evidenzia amplificazioni attese praticamente nulle.

A titolo comparativo in allegato viene presentato uno stralcio della Carta delle Caratteristiche Sismiche dei Suoli in cui i depositi dell'area indagata sono distinti sulla base del valore del parametro Vs30 ai sensi della norma vigente (tab. 3.2.2 D.M. 14.01.2008); è facile osservare come l'analisi di RSL realizzata consenta di definire in maniera molto più dettagliata il perimetro delle aree caratterizzate da valori omogenei di amplificazione e che questi ultimi siano assai variabili, in valore assoluto, da punto a punto.

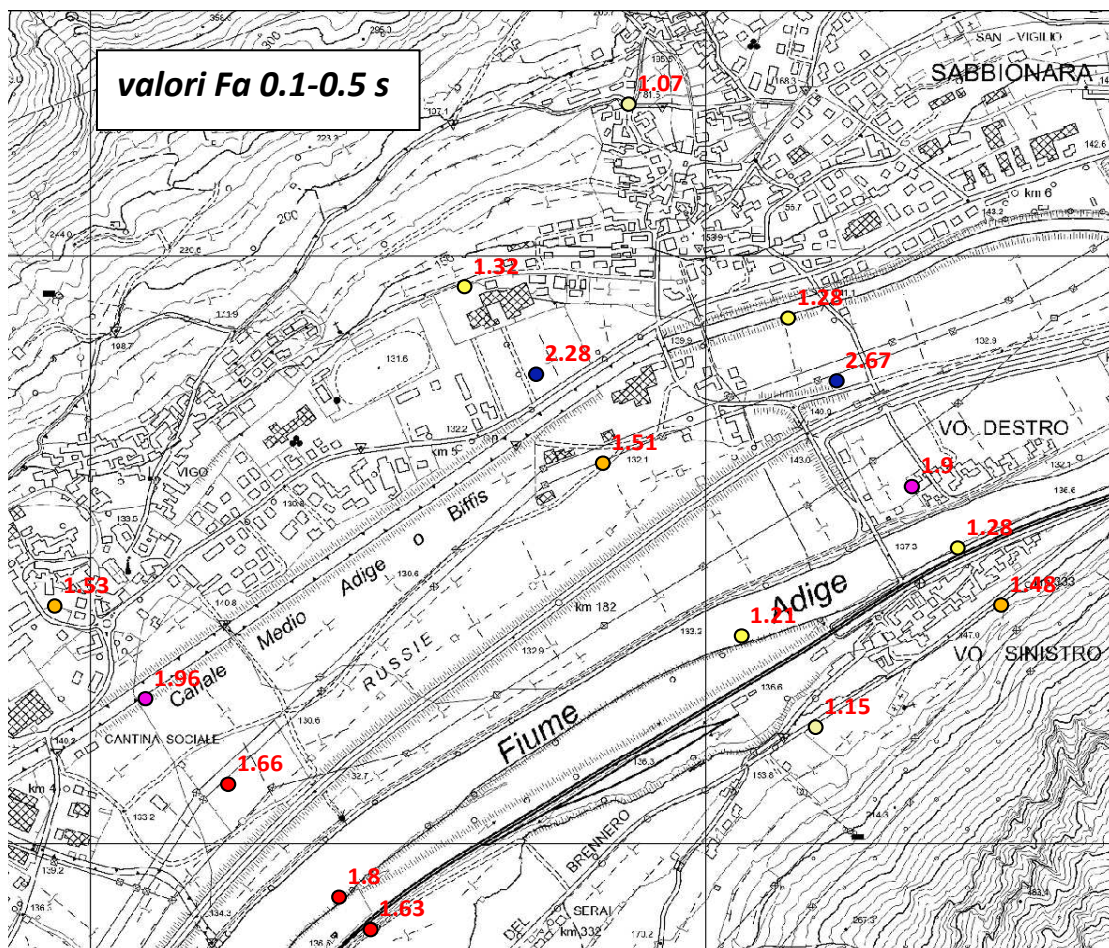


fig. 14: valori di Fa nell'intervallo 0.1-0.5 s

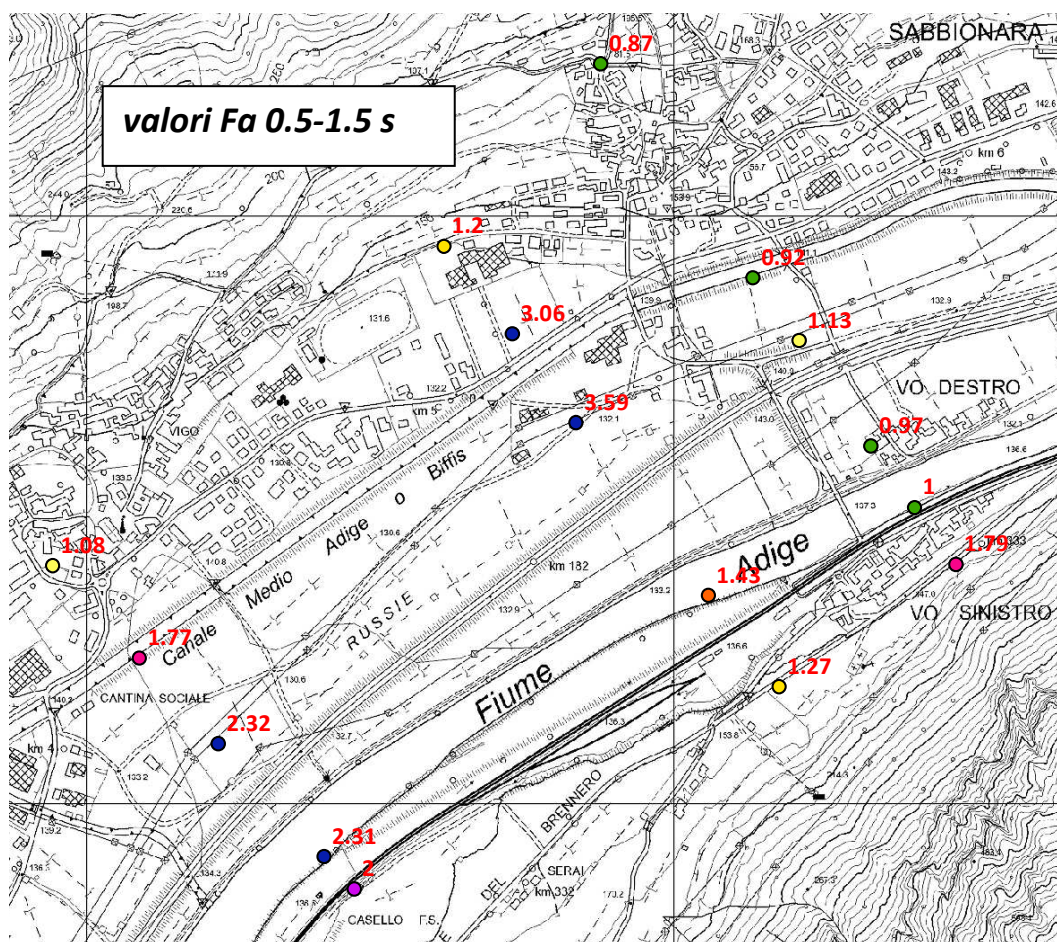


fig. 14: valori di Fa nell'intervallo 0.5-1.5 s

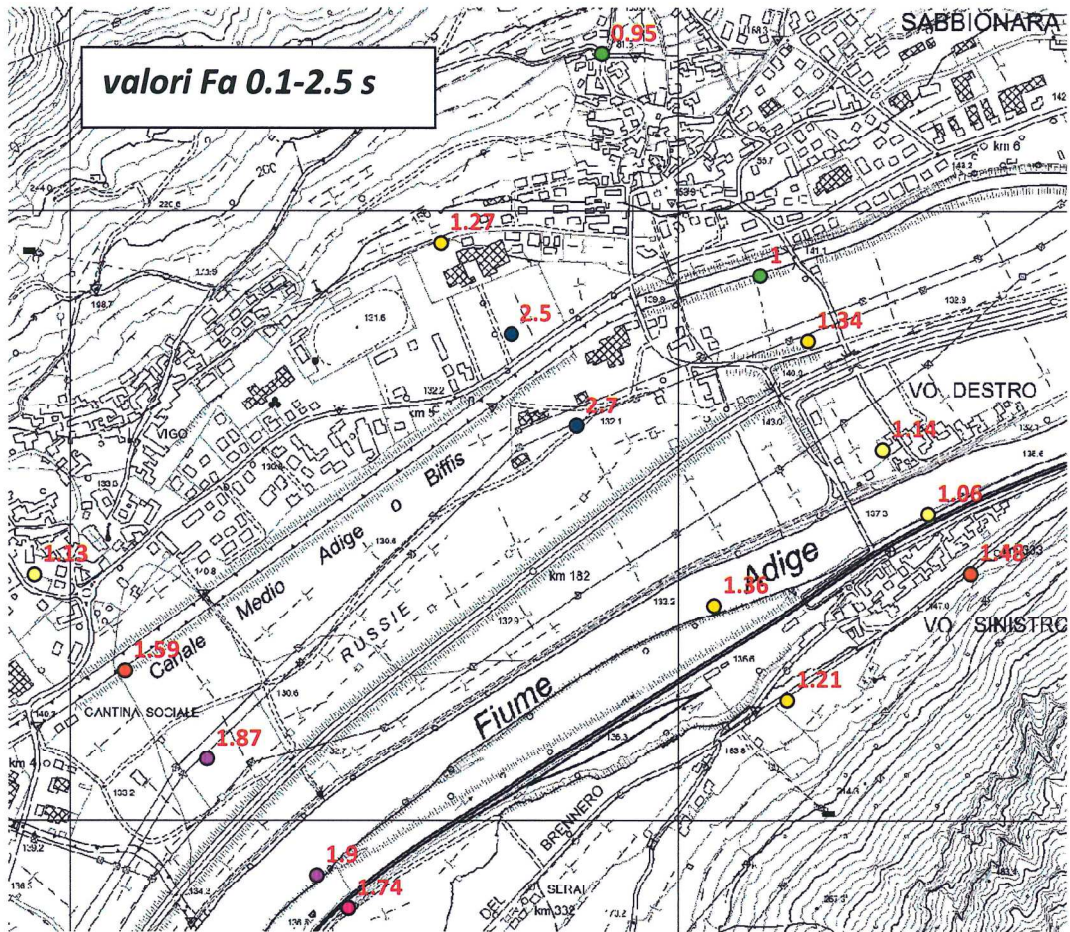
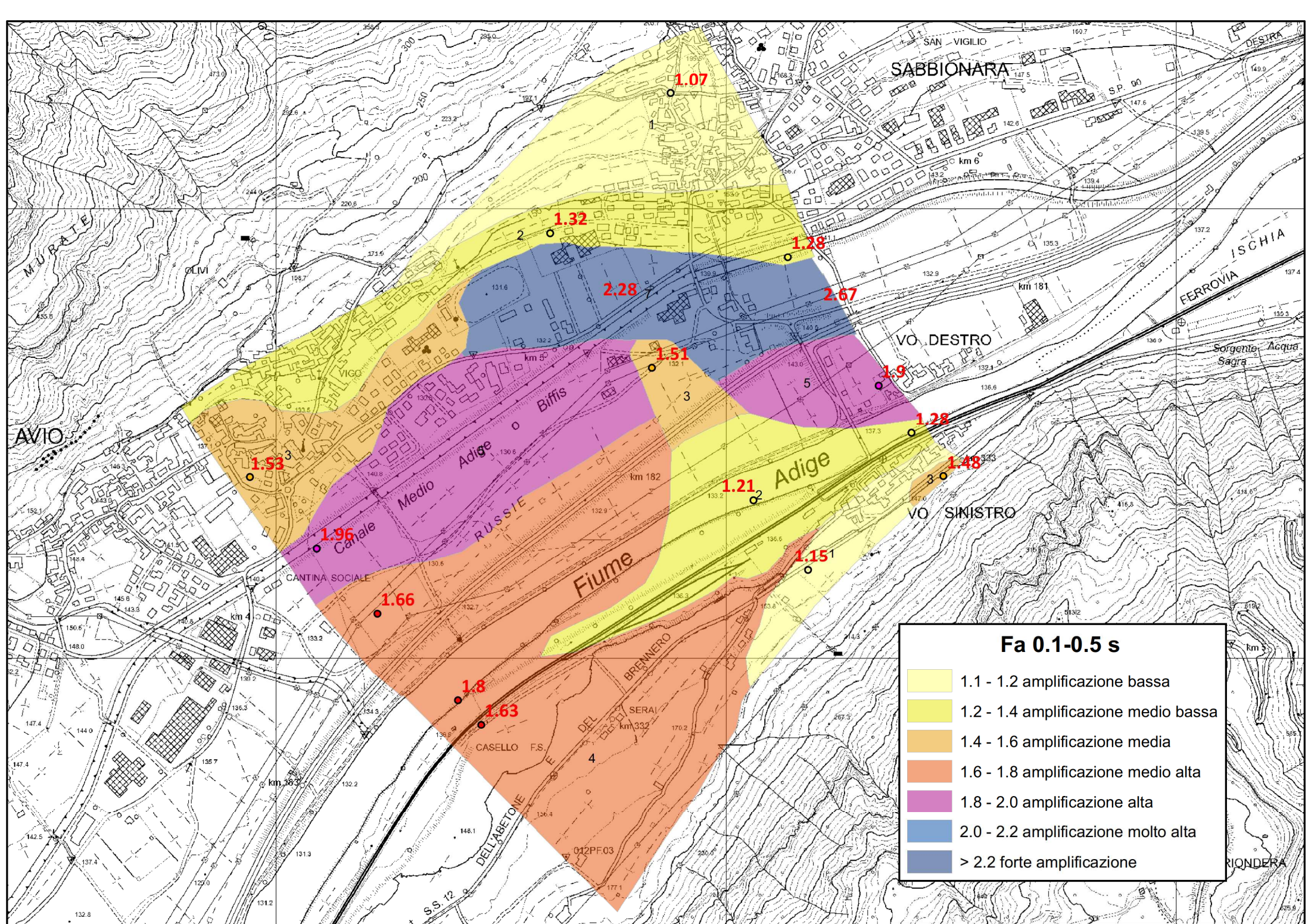


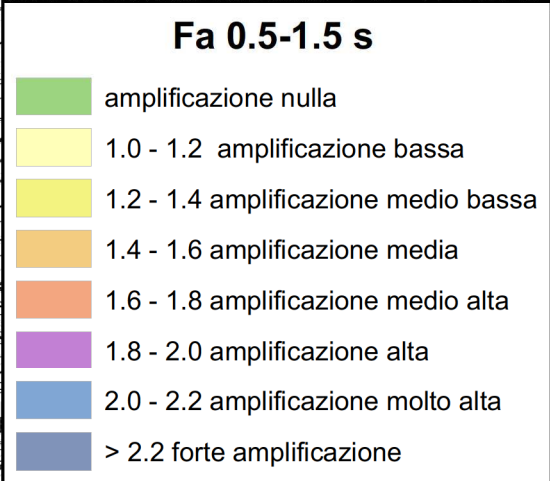
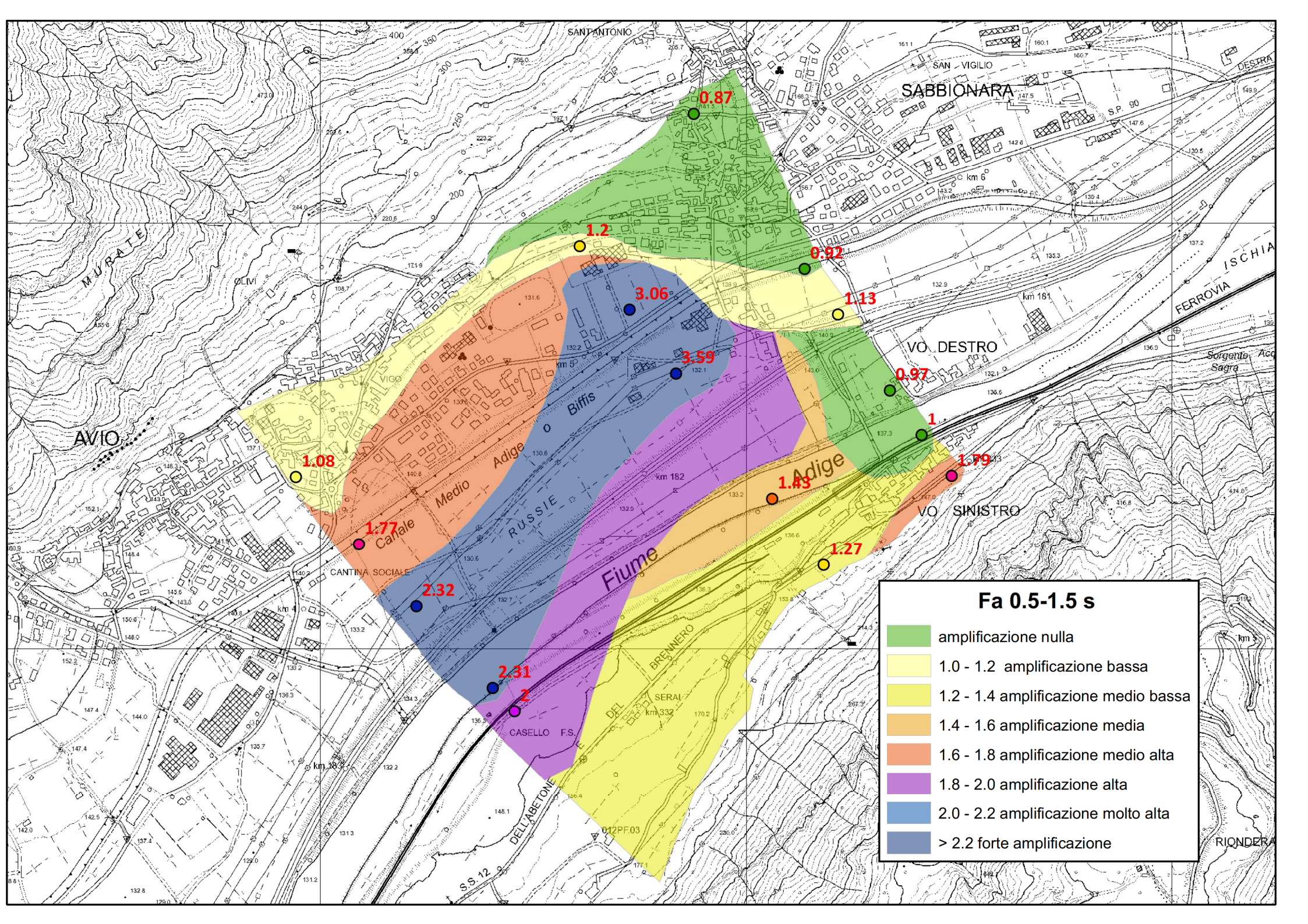
fig. 14: valori di Fa nell'intervallo 0.1-2.5 s

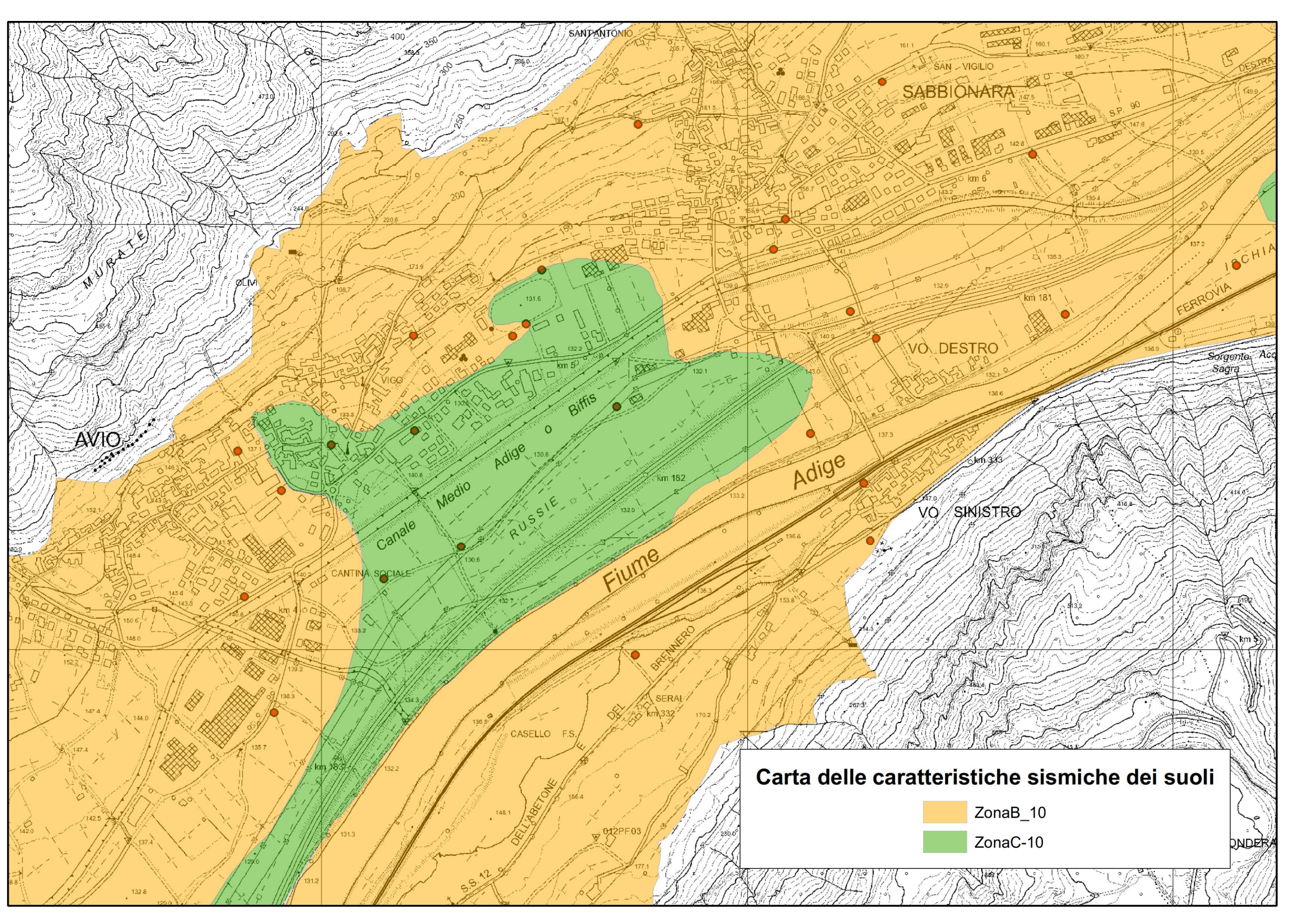
Trento,07/08/015

I.S. per L'ANALISI DELLA PERICOLOSITA' SISMICA

dott. Andrea Franceschini







**Carta delle caratteristiche sismiche dei suoli**

ZonaB\_10

ZonaC-10