

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione tecnica illustrativa

### Regione Toscana

### Comune di Castiglione di Garfagnana



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Regione Toscana Settore Sismica Prevenzione Sismica	Dott.Geol. Alessio Biagioni Piazza Umberto I, 1 55032 Castelnuovo Garfagnana (LU) tel/fax 0583 644268 e.mail: info@studioaima.it  Collaboratori: Dott. Geol. Amerino Pieroni Dott. Geol. Francesca A. Banchieri Dott. Geol. Riccardo Biagioni	Giugno 2021

## INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. SELEZIONE E DELIMITAZIONE DELLE AREE DI INDAGINE.....	5
3. METODOLOGIA PER LA REDAZIONE DELLO STUDIO .....	6
4. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO .....	9
5. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA.....	20
5.1. Inquadramento geologico-strutturale .....	20
5.2. Geomorfologia.....	22
6. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI (indagini realizzate e/o pregresse) .....	25
7. MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	29
7.1. Generalità – Interpretazioni e incertezze .....	29
7.2. Castiglione di Garfagnana capoluogo.....	30
7.3. Cerageto.....	33
7.4. Chiozza.....	34
7.5. Pian di Cerreto.....	35
7.6. Càmpori .....	36
8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI .....	37
9. ELABORATI CARTOGRAFICI .....	40
9.1. Carta delle indagini.....	40
9.2. Carta geologica e geomorfologica .....	42
9.3. Carta geologico-tecnica .....	47
9.4. Carta delle frequenze fondamentali dei terreni .....	50
9.5. Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) .....	54
10. PROCEDURA SEMIQUANTITATIVA PER STABILIRE LA QUALITÀ DELLA CARTA DI MS DI LIVELLO 1 .....	61
11. BIBLIOGRAFIA.....	65



## ALLEGATI FUORI TESTO

### Tavole cartografiche

Carta delle indagini (scala 1:5.000)

Carta geologica e geomorfologica (scala 1:5.000)

Carta geologico-tecnica (scala 1:5.000)

Carta delle frequenze fondamentali dei terreni (scala 1:5.000)

Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) (scala 1:5.000)

Sezioni geologiche e geotecniche (scala 1:2.000):

1. Castiglione Garfagnana capoluogo
2. Cerageto - Chiozza
3. Pian di Cerreto - Càmpori

## ALLEGATI AL TESTO

### Allegato 1

*Procedura semiquantitativa per stabilire la qualità della carta di MS di livello 1: aree considerate – fogli di calcolo*

### Allegato 2

*Indagini geofisiche eseguite nel Comune di Castiglione di Garfagnana nell'ambito del Programma per gli Studi di Microzonazione Sismica di livello 1. **Relazione tecnica Pro.Geo. s.r.l. (Giugno 2021)***

## 1. INTRODUZIONE

Con il termine Microzonazione Sismica si intende l'attività di valutazione su un territorio, a scala comunale, delle modificazioni apportate allo scuotimento del suolo dalle condizioni geologico tecniche e dalle condizioni topografiche locali.

Il progetto di Microzonazione Sismica di primo livello ha come fine principale la raccolta di tutti i dati geologici provenienti da lavori pubblici e privati al fine di definire un modello unitario del sottosuolo per individuare, in via preliminare, con criteri speditivi le zone a più elevato rischio sismico da sottoporre in seguito a studi particolareggiati.

Il Comune di Castiglione di Garfagnana (LU), con il patrocinio della Protezione Civile Nazionale e della Regione Toscana, ha aderito al progetto di Microzonazione Sismica; ad esso, con *Del.G.R.T. n. 971 del 25.11.2013* è stato attribuito il finanziamento per gli studi di Microzonazione Sismica di Livello 1 previsto dall'*O.C.D.P.C. n. 52 del 20 febbraio 2013*, che fa riferimento alla precedente *O.P.C.M. 4007/2012*.

In particolare, secondo quanto previsto dall'art. 7 della suddetta Ordinanza, il Comune di Castiglione di Garfagnana (Cod. Istat 09046010) rientra tra i comuni riportati in Allegato 7, per i quali è prevista la concessione del contributo, prevedendo un cofinanziamento da parte dello stesso Ente Locale in misura non inferiore al 25%; ciò al fine di realizzare tali studi in maniera omogenea e coerente con gli "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica", con gli Standard di rappresentazione ed archiviazione informatica e di eseguire le analisi CLE.

Dal punto di vista degli studi pregressi, il Comune di Castiglione di Garfagnana ad oggi dispone delle indagini eseguite nell'ambito del PROGRAMMA VEL della REGIONE TOSCANA, presso il capoluogo e la frazione di Cerageto, mentre, dal punto di vista di Strumentazione Urbanistica, non è fornito ancora di Regolamento Urbanistico, né di Piano Operativo.

Le indagini geologiche più recenti relative agli Strumenti Urbanistici previsti dalla normativa vigente riguardano gli studi di supporto al Piano Strutturale Intercomunale, approvato con *Del.C.C. n. 53 del 30.07.2019*.

Partendo dai dati noti per le aree fin qui maggiormente studiate e relativi sostanzialmente alla zona del capoluogo di Castiglione Garfagnana, il presente studio di Microzonazione Sismica ha avuto come obiettivi, non solo quello di rendere gli elaborati prodotti omogenei e conformi con le specifiche tecniche e gli standard di informatizzazione, ma anche quello di uniformare ed adeguare agli stessi standard le indagini condotte sulle altre aree prescelte per lo studio, corrispondenti alle frazioni di Cerageto, Càmpori, Chiozza e Pian di Cerreto.

Tali zone sono state scelte in base agli obiettivi ed alle esigenze evidenziate dal Piano Strutturale Intercomunale e preventivamente concordate, mediante riunioni tecniche, con l'Amministrazione comunale, con l'Ufficio del Genio Civile e con il Servizio Sismico Regionale, ciascuna delle parti essendo coinvolta per le proprie competenze, così come meglio descritto al successivo punto 2.

Nell'esecuzione del presente studio di Microzonazione Sismica di livello 1, le principali difficoltà nel perseguire il primo obiettivo di uniformità ed omogeneità nella restituzione delle indagini, sia esistenti, sia di nuova realizzazione e delle relative cartografie, sono derivate, come meglio specificato al successivo punto 3, dalla necessità di uniformare cartografie geologiche prodotte da fonti diverse (Progetto VEL, Autorità di Bacino del Fiume Serchio, Carta Geologica Regionale CARG e Piano Strutturale Intercomunale).

Per quanto riguarda i dati esistenti a disposizione, la banca dati costituita dalle indagini e cartografie prodotte nell'ambito del Progetto VEL (Valutazione degli Effetti Locali) della Regione Toscana e dalle indagini raccolte presso l'Ufficio Tecnico comunale e relative a vari lavori pubblici e privati ha rappresentato un ottimo punto di partenza per lo studio di Microzonazione.

Nell'ambito del presente studio, infine, sono state programmate, con la copertura dei finanziamenti ricevuti, indagini mirate di sismica attiva (n. 3 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P e SH, n. 2 prove sismiche MASW), sismica passiva (n. 26 misure di rumore ambientale a stazione singola - metodo HVSr) e n. 1 prospezione geoelettrica tomografica (ERT), la cui dislocazione sul territorio e le modalità operative sono state definite in accordo e coordinamento con il competente Settore Prevenzione Sismica della Regione Toscana; tali misure sono state eseguite dalla ditta Pro.Geo. s.r.l. di Castelnuovo di Garfagnana <sup>(1)</sup>, la cui relazione tecnica, riportante l'elaborazione delle stesse misure ed allegata al presente testo, costituisce parte integrante dello studio di Microzonazione Sismica.

Sulla base di tali indagini e di tutti i dati esistenti raccolti, gli approfondimenti eseguiti nell'ambito del presente studio, hanno portato ai seguenti risultati:

- realizzazione di una cartografia geologica e geologico-tecnica delle cinque aree di studio;
- ricostruzione del modello di sottosuolo, attraverso la restituzione di sezioni geologiche di dettaglio;
- realizzazione di una mappa delle frequenze fondamentali di amplificazione;
- realizzazione di una cartografia delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) (livello 1).

---

<sup>(1)</sup> PRO.GEO. s.r.l. (Giugno 2021): *Indagini geofisiche eseguite nel Comune di Castiglione di Garfagnana nell'ambito del Programma di studi di Microzonazione Sismica di livello 1. Comune di Castiglione di Garfagnana (LU).*

## 2. SELEZIONE E DELIMITAZIONE DELLE AREE DI INDAGINE

La scelta e la delimitazione delle aree di studio è stata preventivamente concordata mediante riunioni tecniche congiunte con l'Amministrazione comunale, con il personale del Settore Sismica della Regione Toscana e con l'Ufficio del Genio Civile, ciascuna delle parti essendo coinvolta per le proprie competenze; le aree sono state individuate secondo le direttive di cui al par. 1.B.1.2 delle Istruzioni Tecniche del Programma VEL e secondo i criteri definiti al par. 3.4.2 degli Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS).

Gli stessi studi di MS di livello 1, inoltre, come già anticipato, dovranno far parte integrante delle indagini geologico-tecniche di supporto al Piano Strutturale Intercomunale ed al futuro Piano Operativo, in gran parte già svolte ed in corso di procedimento, in ottemperanza a quanto previsto dal *D.P.G.R. n.5/R del 30 gennaio 2020 (Regolamento di attuazione dell'art. 104 della L.R. 10 novembre 2014, n. 65)*, secondo le specifiche contenute in Allegato A (Direttive tecniche per le svolgimento delle indagini geologiche, idrauliche e sismiche), con particolare riferimento al § 2.1, punto B.1, punto B.6 e punto C.3.

L'Amministrazione comunale ha identificato come centri urbani maggiormente significativi le seguenti aree:

- capoluogo di Castiglione di Garfagnana;
- frazione di Cerageto;
- frazione di Chiozza;
- frazione di Càmpori;
- frazione di Pian di Cerreto.

Nella delimitazione delle aree di studio, il perimetro, rispetto al centro urbano/centro storico, è stato allargato ad un intorno geologicamente significativo, in maniera da comprendere i principali elementi geomorfologici (ad esempio frane) e/o elementi tettonici rilevanti (ad esempio faglie), che, in ragione di una possibile evoluzione delle fenomenologie ad essi connesse, potrebbero arrivare ad interferire con la stessa area principalmente urbanizzata.

Le aree così definite includono la maggioranza degli elementi di principale interesse e di maggiore rilevanza strategica presenti sull'intero territorio comunale, come di seguito specificato:

- centri urbani maggiormente significativi;
- maggior numero di abitanti;
- edifici pubblici e strategici;
- principali centri storici;

- principali aree artigianali;
- aree urbane potenzialmente in espansione;
- viabilità di maggiore rilevanza.

La restante parte del territorio collinare e montano, esterna alle zone indicate, è costituita da aree boscate ed aree a vocazione e destinazione agricola o a prato-pascolo, caratterizzate dalla presenza di edifici sparsi.

Le aree di studio così delimitate inglobano le aree di indagine VEL di Castiglione capoluogo e della frazione di Cerageto.

### **3. METODOLOGIA PER LA REDAZIONE DELLO STUDIO**

Per la redazione della nuova carta geologica e geomorfologica sono stati eseguiti naturalmente rilevamenti geologici e geomorfologici di dettaglio, integrati dai lavori editi in bibliografia e dalle carte geologiche esistenti per l'intero territorio comunale e le zone limitrofe, con particolare riferimento alla Carta della franosità del bacino del Fiume Serchio (*P.A.I. – Autorità di Bacino del Fiume Serchio*) ed alla Carta Geologica Regionale (*Progetto CARG*) (Sezioni 250010, 250020, 250050 e 250060).

Limitatamente all'area del capoluogo, si è partiti dalla cartografia elaborata e prodotta dal Dott. Geol. P. Barsanti (Geoprove s.a.s. ) e revisionata/collaudata dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, nell'ambito del Progetto VEL, provvedendo ad una ulteriore revisione, frutto di indagini specifiche di approfondimento e rilievi mirati, in collaborazione con lo stesso Dipartimento di Scienze della Terra di Pisa e con il Dott. L. Piccardi del C.N.R., volta soprattutto alla corretta delimitazione ed ubicazione di alcune strutture tettoniche (faglie attive e capaci; FAC) presenti nell'area nord-orientale del capoluogo, tra la zona del centro storico e la zona di Monte Pigoli – Cigiana.

Tale operazione di revisione cartografica è stata eseguita riscontrando oggettive difficoltà ed alcune criticità legate soprattutto a difformità evidenziate nelle varie carte, riguardanti soprattutto i depositi di copertura detritici e alluvionali ed i corpi di frana, secondo quanto meglio specificato al paragrafo 9.2.

In particolare, per quanto riguarda gli elementi geomorfologici di principale interesse, costituiti in particolare dai corpi di frana quiescenti ed attivi, è stato concordato con il Settore Sismica della Regione Toscana di mantenere validi i limiti derivati dalla cartografia ufficiale dell'Autorità di Bacino del Fiume Serchio, al fine di non alterare il quadro di riferimento della pericolosità geomorfologica già definito dal P.A.I.; tale quadro è stato aggiornato inserendo i dissesti verificatisi successivamente all'ultimo aggiornamento delle cartografie di Piano, a

seguito di eventi alluvionali più recenti o di aggiornamenti derivati da studi di approfondimento di alcuni movimenti franosi in atto sul versante (es. movimento franoso presso il condominio di Via S. Caterina, nella zona di M. Pigoli di Sotto del capoluogo).

La base topografica utilizzata per la redazione degli elaborati cartografici è rappresentata dalla Carta Tecnica della Regione Toscana (CTR) in scala 1:2.000, integrata, nelle zone non coperte da quest'ultima, con la CTR in scala 1:10.000 (Sezioni 250010, 250020, 250050 e 250060).

Il lavoro è stato articolato nelle seguenti fasi:

- raccolta delle indagini pregresse;
- esecuzione delle nuove indagini;
- creazione del *database* contenente tutte le indagini a disposizione;
- realizzazione degli elaborati cartografici (Carta delle indagini, Carta geologica e geomorfologica, Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica, Sezioni geologiche e geotecniche, Carta delle frequenze naturali dei depositi, Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica).

Il presente studio di Microzonazione Sismica è stato effettuato secondo i seguenti testi di riferimento tecnico e in osservanza alle seguenti leggi e disposizioni:

- **ICMS: Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica.** GdL DPC/Regioni. Documento approvato dalla Conferenza dei Presidenti delle Regioni nella seduta del 13 novembre 2008.
- **Istruzioni tecniche per le indagini geologico-tecniche, geofisiche e geotecniche, statiche e dinamiche, finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana** – Programma VEL Regione Toscana – Del.G.R.T. n. 1343 del 18 dicembre 2000 e s.m.e.i.
- **Standard di rappresentazione e archiviazione informatica per la Microzonazione Sismica** – Commissione Tecnica per la microzonazione sismica - Versione 4.1 (Ottobre 2017).
- **Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)** – Commissione Tecnica per la microzonazione sismica - Versione 1.0 (2015).
- **Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 Aprile 2006** – Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone.
- **Del.G.R.T. n. 431 del 19 giugno 2006** – Riclassificazione sismica del territorio regionale: “Attuazione del D.M. 14.9.2005 e O.P.C.M. 3519 del 28 aprile 2006”.
- **Del.G.R.T. n. 841 del 26 novembre 2007** – Individuazione dei Comuni a maggior rischio sismico.
- **Legge n. 77 del 24 Giugno 2009** – Interventi urgenti di Protezione Civile in materia di prevenzione del rischio sismico.
- **L.R. n. 58 del 16 ottobre 2009** – Norme in materia di prevenzione e riduzione del rischio sismico.
- **Del.G.R.T. n. 741 del 6 agosto 2012** – L.R. 58/2009 – OPCM 4007/2012 art. 2, comma 1, lett. A – Studi di microzonazione sismica. Approvazione delle nuove specifiche tecniche regionali per l'elaborazione di indagini e studi di microzonazione sismica.

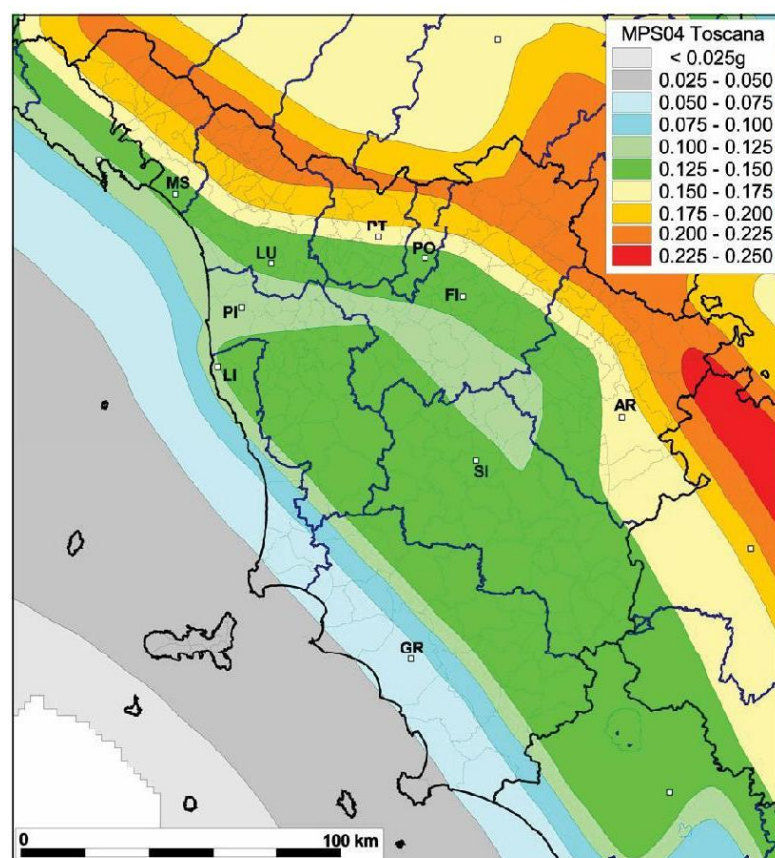
- **Del.G.R.T. n. 878 del 8 ottobre 2012** – Aggiornamento della classificazione sismica regionale in attuazione dell'O.P.C.M. 3519/2006 ed ai sensi del D.M. 14/01/2008 – Revoca della D.G.R.T. 431/2006.
- **Ordinanza del Capo Dipartimento di Protezione Civile n. 52 del 20 Febbraio 2013** – Attuazione dell'articolo 11 del Decreto legge 28 aprile 2009 n. 39, convertito con modificazioni dalla legge 24 giugno 2009, n. 77.
- **Del.G.R.T. n. 971 del 25 novembre 2013** – Redazione delle specifiche tecniche regionali per la Microzonazione Sismica (annualità 2013). Allegato A alle specifiche tecniche regionali.

#### 4. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

La Regione Toscana, con *Del.G.R.T n. 431 del 19 giugno 2006*, ha approvato la riclassificazione sismica del territorio regionale, applicando i criteri nazionali per l'individuazione delle zone sismiche indicati nell'*Ord.P.C.M. n. 3519 del 28 aprile 2006*, di cui la Mappa di Pericolosità Sismica riportata in *Figura 1* ne rappresenta l'Allegato 1.B.

Sulla base della suddetta *Del.G.R.T n. 431/2006* il Comune di Castiglione di Garfagnana è stato confermato tra i comuni sismici di **zona 2**, per i quali la stessa normativa indica i seguenti valori di accelerazione di picco ( $a_g$ ), su terreno a comportamento litoide (espressa come frazione dell'accelerazione di gravità), derivante da studi macrosismici e sismotettonici a carattere nazionale:

ZONA	ACCELERAZIONE CON PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO PARI AL 10% IN 50 ANNI	ACCELERAZIONE ORIZZONTALE MASSIMA CONVENZIONALE DI ANCORAGGIO DELLO SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO ( $a_g/g$ )
<b>2</b>	<b><math>0.15 &lt; a_g/g \leq 0.25</math></b>	<b>0.25</b>

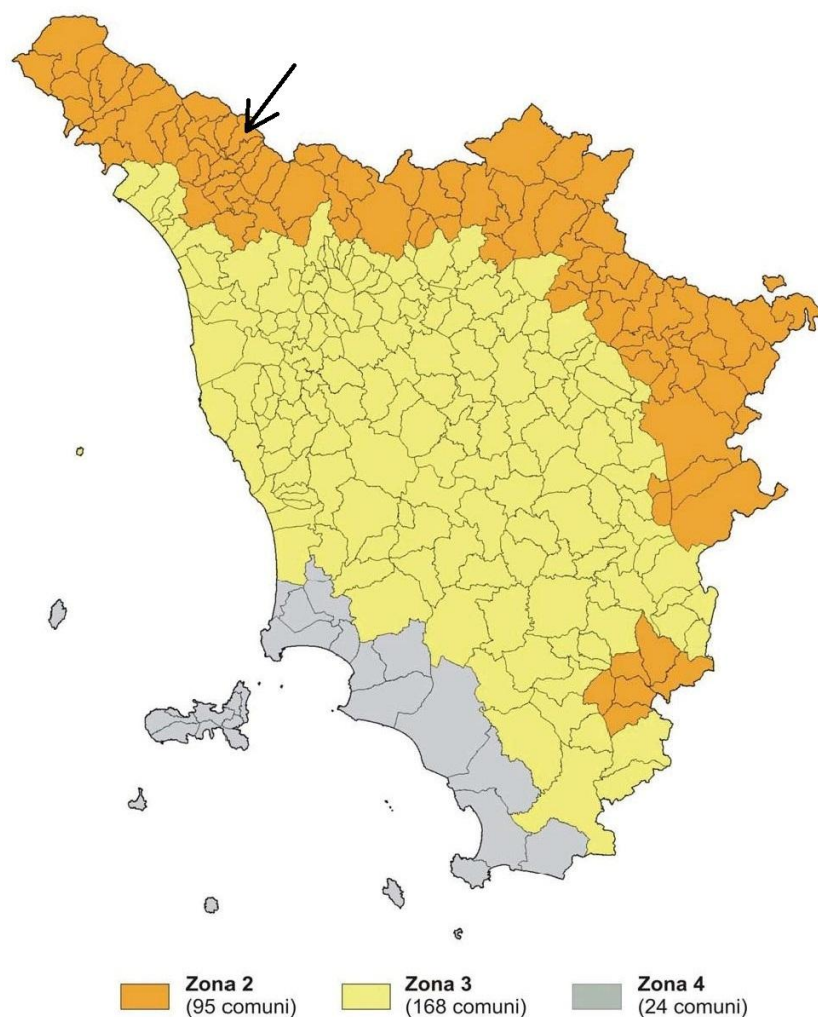


**Fig. 1. Mappa di pericolosità sismica (MPS) della Toscana (mappa mediana al 50° percentile).**  
I valori di accelerazione sono riferiti ad un tempo di ritorno pari a 475 anni (INGV, 2004).



Successivamente all'entrata in vigore del *D.M. 14 gennaio 2008* (Norme tecniche per le costruzioni), nel quale la stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido, viene definita mediante un approccio definibile "sito-dipendente" e non più tramite un criterio "zona-dipendente", la Regione Toscana ha provveduto ad aggiornare l'elenco relativo alla classificazione sismica, con *Del.G.R.T n. 878 del 8 ottobre 2012*, che revoca la precedente *Del.G.R.T n. 431/2006*, confermando comunque il Comune di Castiglione di Garfagnana tra i comuni classificati in **zona 2**.

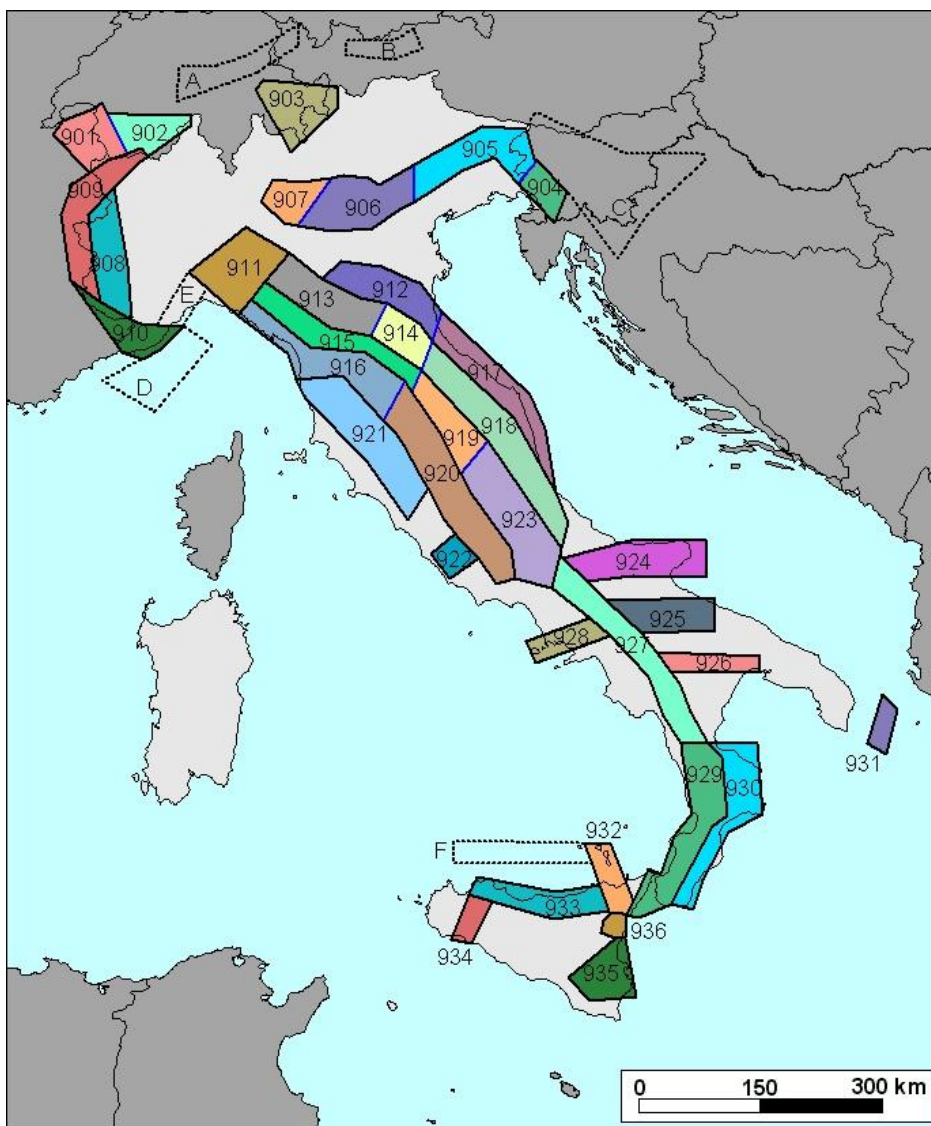
**MAPPA DI AGGIORNAMENTO DELLA CLASSIFICAZIONE SISMICA DELLA  
REGIONE TOSCANA – 2012**



**Fig. 2. Classificazione sismica del territorio regionale**  
(con indicazione del Comune di Castiglione di Garfagnana)

La valutazione della pericolosità sismica per il territorio italiano fa attualmente riferimento alla **Zonazione Sismogenetica ZS9** <sup>(2)</sup>, che sostituisce ed integra la precedente ZS4, valida fino al 2002 (*Scandone et al., 1996*).

La zonazione sismogenetica ZS9, pur basandosi sul *background* informativo e sull'impianto generale di ZS4, ritenuto nelle sue linee generali tuttora valido, è il risultato di modifiche, accorpamenti ed elisioni delle numerose zone di ZS4 e dell'introduzione di nuove zone. L'obiettivo di questa ricerca è stato la realizzazione di un modello più coerente con i nuovi dati e con il quadro sismotettonico oggi disponibile.



**Fig. 3. Zonazione sismogenetica ZS9**

<sup>(2)</sup> ZONAZIONE SISMOGENETICA ZS9 – App.2 al Rapporto Conclusivo – a cura di C. MELETTI e G. VALENSISE (Marzo 2004) – Gruppo di Lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ord.P.C.M. 20.03.03 n. 3274) – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

In ZS9, in particolare, le informazioni sulle sorgenti sismogenetiche si innestano sul quadro di evoluzione cinematica plio-quadernaria su cui si basava ZS4; tuttavia, l'elaborazione di ZS9 si fonda su una base informativa decisamente più ricca ed affidabile rispetto a quella disponibile all'epoca della prima realizzazione di ZS4.

Come si può vedere in *Figura 3*, la zonazione ZS9 è costituita da 36 zone-sorgente (identificate con un numero da **901** a **936**), alle quali vanno aggiunte 6 zone-sorgente (distinte con le lettere da **A** a **F**), che non sono state utilizzate per la valutazione della pericolosità sismica.

Le zone relative all'Appennino settentrionale e centrale sono quelle comprese tra la 911 e la 923; l'area della Garfagnana, al cui interno ricade il Comune di Castiglione di Garfagnana, è compresa nella zona sismogenetica **915**.

In ZS9 tutto l'arco appenninico settentrionale e centrale è stato riorganizzato secondo cinque fasce longitudinali e parallele alla catena. La successiva *Figura 4* mostra il modello proposto in relazione al contenuto informativo del *database* DISS 2.0 <sup>(3)</sup>; in essa, ogni sorgente è rappresentata utilizzando una scala cromatica, che esprime la magnitudo Mw del terremoto atteso per quella sorgente.

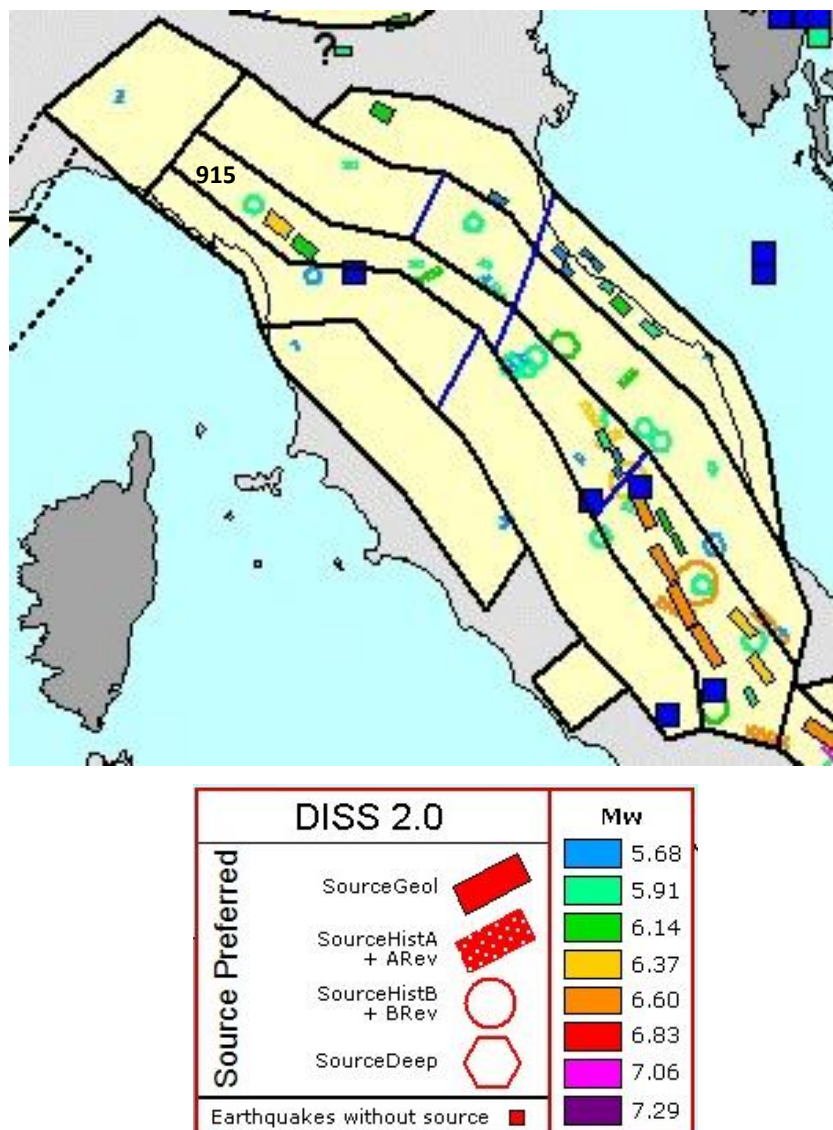
La fascia che dalla Lunigiana arriva al confine Abruzzo-Molise è stata suddivisa in tre zone (da nord verso sud: 915, 919 e 923), all'interno delle quali sono incluse le sorgenti sismogenetiche responsabili dei terremoti di magnitudo più elevata, che hanno caratterizzato l'arco appenninico settentrionale e centrale.

Essa corrisponde al settore più interno della catena appenninica, generalmente interessato da importanti faglie primarie e relative sorgenti sismogenetiche; tali faglie, legate all'estensione appenninica, immergono verso NE nel settore compreso fra la Toscana settentrionale e l'Umbria settentrionale e verso SW nel settore che si estende dall'Umbria centrale fino a tutto l'Abruzzo (*Galdini et al., 2001; Valensise e Pantosti, 2001*).

La suddivisione in tre zone è stata dettata da osservazioni prevalentemente di tipo sismologico. Nella zona più meridionale (923) sono presenti le sorgenti più estese ed i terremoti con magnitudo più elevata; la zona 919 è caratterizzata da un elevato numero di terremoti, molti dei quali di magnitudo maggiore o uguale a 5. La zona 915, invece, pur avendo al suo interno le aree della Garfagnana, della Lunigiana e del Mugello, appare complessivamente caratterizzata da tassi di sismicità leggermente inferiori.

---

<sup>(3)</sup> DISS 2.0 – *Database of Potential Sources for Earthquakes Larger than M5.5 in Italy*. (VALENSISE e PANTOSTI, 2001).



**Fig. 4. Zonazione sismogenetica ZS9 per l'Appennino settentrionale e centrale**  
(con indicazione della zona 915 al cui interno ricade la Garfagnana e confronto con la distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS 2.0)

Per ogni zona sorgente è stato definito il relativo *strato sismogenetico* e, al suo interno, il valore della *profondità efficace*.

Lo strato sismogenetico è stato definito convenzionalmente come l'intervallo di profondità che ha generato il 90% degli eventi che ricadono all'interno di ogni zona; i limiti superiore ed inferiore dello strato sismogenetico sono stati individuati alle profondità che includono un numero di eventi cumulato pari rispettivamente al 5% e al 95% del totale. La profondità efficace è definita come quella profondità alla quale avviene il maggior numero di terremoti che determina la pericolosità della zona.

I dati strumentali utilizzati, consistenti in tutti gli eventi registrati nel catalogo della sismicità (1983-2002) dell'INGV, sono stati selezionati secondo i seguenti criteri:

- per ogni zona sismogenetica sono stati distinti tre gruppi di eventi sismici aventi Magnitudo-durata (Md) rispettivamente superiore a 2.0, 2.5 e 3.0;
- per ogni gruppo sono stati tenuti in considerazione solo gli eventi con profondità inferiore ai 50 km ed errore di localizzazione ipocentrale inferiore a 30 km;
- tutti gli eventi con profondità ipocentrale fissata sono stati considerati come accaduti all'interno dello strato sismogenetico.

Il *dataset* utilizzato per l'elaborazione è così costituito da oltre 13.600 eventi, pari a circa il 28% del totale degli eventi presenti in catalogo.

Per tener conto di tutte le incertezze e del fatto che un valore unico di profondità può non essere rappresentativo dell'intero strato sismogenetico, è stata proposta una suddivisione delle profondità efficaci nelle seguenti quattro classi di profondità:

**1-5 km**

**5-8 km**

**8-12 km**

**12-20 km**

Ogni zona è stata dunque associata ad una classe di profondità in base al valore che assume la profondità efficace corrispondente.

Per la zona di nostro interesse (**915**) sono stati determinati i seguenti valori:

Numero di eventi Md>2.0	Numero di eventi Md>2.5	Numero di eventi Md>3.0	Magnitudo massima (Md)	Classe di profondità (km)	Profondità efficace (km)
614	346	65	4.2	<b>8-12</b>	<b>8</b>

### Sismicità storica

Prima del 1999 tutte le informazioni disponibili sui terremoti italiani ricavate da fonti diverse, molte delle quali (libri, diari, giornali, ecc.) esistenti prima ancora dell'introduzione delle reti sismiche di registrazione, erano riportati in diversi cataloghi, tra loro alternativi (*NT4.1*, Camassi e Stucchi, 1997; *CFTI 1-2*, Boschi et al., 1995–1997).

Il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, la cui versione aggiornata e rilasciata nel 2011 (CPT11) copre la finestra temporale compresa tra l'anno 1000 e il 2006 <sup>(4)</sup>, è stato concepito come catalogo di consenso per unificare e omogeneizzare, attraverso procedure di stima dei parametri uguali per tutti i terremoti, tutte le informazioni disponibili dai diversi cataloghi sopra citati.

---

<sup>(4)</sup> A. ROVIDA, R. CAMASSI, P. GASPERINI E M. STUCCHI (A CURA DI), 2011. – *CPT11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*. INGV, MILANO, BOLOGNA. <http://emidius.mi.ingv.it/CPT11>

L'area della Garfagnana e Lunigiana è caratterizzata da numerosi terremoti storici di magnitudo superiore a 5, con un massimo assegnato al terremoto del 7.9.1920, di intensità massima  $I_{mx} = 10$  e magnitudo momento  $M_w = 6.48$ .

Il sisma del 1920, la cui area epicentrale viene indicata storicamente come quella della Garfagnana, ebbe i suoi principali effetti distruttivi, causando numerose vittime, nel paese limitrofo di Villa Collemantina e a Fivizzano nella vicina Lunigiana.

L'intera zona è molto conosciuta sotto l'aspetto geologico-strutturale ed è caratterizzata da strutture estensionali, che generano depressioni strutturali limitate da faglie dirette ad orientamento NW-SE ed immersione SW e da faglie antitetiche con la stessa direzione ed immersione opposta; queste strutture appenniniche sono "tagliate" da strutture trasversali ad andamento "antiappenninico" (NE-SW).

I terremoti più importanti dell'area sono in perfetto accordo con le strutture individuate; essi infatti sono caratterizzati dall'allungamento delle isosiste parallelamente sia alle strutture longitudinali ("appenniniche"), sia a quelle trasversali ("antiappenniniche").

Nelle successive *Tabelle 1a-1b* è riassunto l'elenco dei principali terremoti d'interesse per l'area di studio, nell'intervallo temporale compreso tra l'anno 1481 e il 2002, estratto dal catalogo CPTI11; in particolare, vengono riportati i terremoti con Magnitudo momento ( $M_w$ ) > 4.0.

Nell'istogramma di *Figura 5*, infine, vengono mostrati gli stessi eventi in sequenza temporale, con evidenziato il sisma principale del 1920; naturalmente la maggior frequenza di terremoti riscontrata nell'ultimo secolo, rispetto al periodo precedente, può essere collegata anche ad una carenza bibliografica ed alla non esistenza di reti sismiche di registrazione.



**Tabella 1a. Elenco dei principali terremoti d'interesse per l'area di studio (1481-1939)**  
(tratto da CPTI11)

Year	Mo	Da	Ho	Mi	Ax	Imx	LatM	LonM	Io	MwM	LatIns	LonIns	MwIns
1481	02	06	21	15	Toscana settentrionale	5-6	43,779	10,453	5-6	4,51			
1481	05	07	14	15	Garfagnana	8	44,274	10,130	8	5,55			
1501	06	05	10		Appennino modenese	9	44,519	10,844	9	5,98			
1584	09	10	20	30	Appennino toско-emiliano	9	43,862	11,992	9	5,80			
1641	06	08			Pontremoli	6	44,377	9,882	6	4,72			
1720	01	10	15		S.ROMANO		44,250	10,333	6	4,72			
1725	10	29	17	40	Appennino toско-emiliano	8	44,207	11,573	8	5,43			
1740	03	06	05	15	GARFAGNANA	7-8	44,124	10,590	7	5,24			
1746	07	23	18	15	Garfagnana	7-8	44,091	10,448	7	5,06			
1767	01	21	07	45	Fivizzano	8	44,132	10,123	7	5,35			
1778	02	18			FIVIZZANO		44,167	10,167	6	4,72			
1779	12	24	17		Pistoiese	6-7	44,061	10,860	5-6	4,64			
1790	07	26	16	45	AULLA		44,167	10,000	6-7	4,93			
1835	04	20	03		Borgotaro	5	44,488	9,767	5	4,30			
1835	04	25	02	45	Borgotaro	5-6	44,454	9,686	5-6	4,63			
1837	04	11	17		Alpi Apuane	10	44,175	10,182	9	5,81			
1846	08	14	12		Toscana settentrionale	10	43,470	10,562	9	5,91			
1869	12	13	02	53	SERRAMAZZONI		44,500	10,750	6-7	4,93			
1878	09	10	13	31	LUNIGIANA	6-7	44,218	10,037	6-7	5,06			
1902	03	05	07	06	Garfagnana	7	44,093	10,463	7	4,96			
1902	08	04	22	37	FIVIZZANO		44,200	10,200	7	5,14			
1902	12	04	16	35	FIVIZZANO		44,200	10,200	5-6	4,51			
1903	07	27	03	46	LUNIGIANA	7-8	44,329	9,953	7-8	5,29			5,10
1904	06	10	11	15	Frignano	7	44,200	10,842	6	4,91			5,44
1904	11	17	05	02	Pistoiese	7	43,964	10,820	7	5,15			
1908	06	02	22	30	FRIGNANO	4-5	44,264	10,823	4-5	4,10			4,97
1913	02	13	16	39	Appennino toско-emiliano	6	44,099	10,829	5	4,35			4,76
1913	11	25	20	55	Val di Taro	5	44,551	10,195	4-5	4,75			5,08
1914	10	27	09	22	Garfagnana	7	43,911	10,598	7	5,76			5,85
1916	07	27	18	38	FOSCIANDORA		44,100	10,500	6	4,72			
1919	09	25	03	15	FOSCIANDORA		44,133	10,533	5-6	4,51			
1920	09	06	14	05	Val di Taro		44,250	10,283	6	4,72			5,62
1920	09	07	05	55	Garfagnana	10	44,185	10,278	10	6,48			6,48
1920	09	07	08	11	Val di Taro		44,250	10,283	6	4,72			5,25
1920	09	07	13	32	Appennino toско-emiliano		44,250	10,283	5	4,30			5,13
1920	09	07	18	42	Garfagnana		44,317	10,283	6	4,72			4,74
1920	12	27	16	19	PIAZZA SERCHIO						44,250	10,283	4,76
1921	05	07	06	15	PONTREMOLI	7	44,377	9,882	6	4,73			
1921	11	29	12	04	BORGO VAL DI TARO	5	44,376	9,987	5	4,26			5,03
1922	08	02	21	13	PIEVEPELAGO		44,200	10,700	6	4,72			4,63
1925	03	15	17	15	FRASSINORO	4-5	44,282	10,286	4-5	4,32			4,90
1926	11	18	22	57	BAGNONE		44,300	10,000	5-6	4,51			
1928	07	20	19	53	ALTA VAL DI TARO	6	44,508	9,587	6	4,57			4,40
1928	08	03	23	09	FIVIZZANO		44,200	10,200	5-6	4,51			
1930	05	24	22	02	FIUMALBO	6	44,136	10,724	5	4,69			5,26
1931	01	25	10	48	FIVIZZANO		44,250	10,100	6	4,72			4,63
1934	06	13	09	06	BORGO VAL DI TARO	6	44,438	9,725	6	4,80			5,26
1937	12	10	18	03	APP. MODENESE	7	44,334	10,834	6	4,93			5,46
1939	10	15	14	05	Garfagnana	7	44,119	10,255	6-7	5,04			5,24

**LEGENDA:**

**Ax** = Area dei maggiori effetti; **Imx** = Intensità massima; **Io** = Intensità epicentrale;

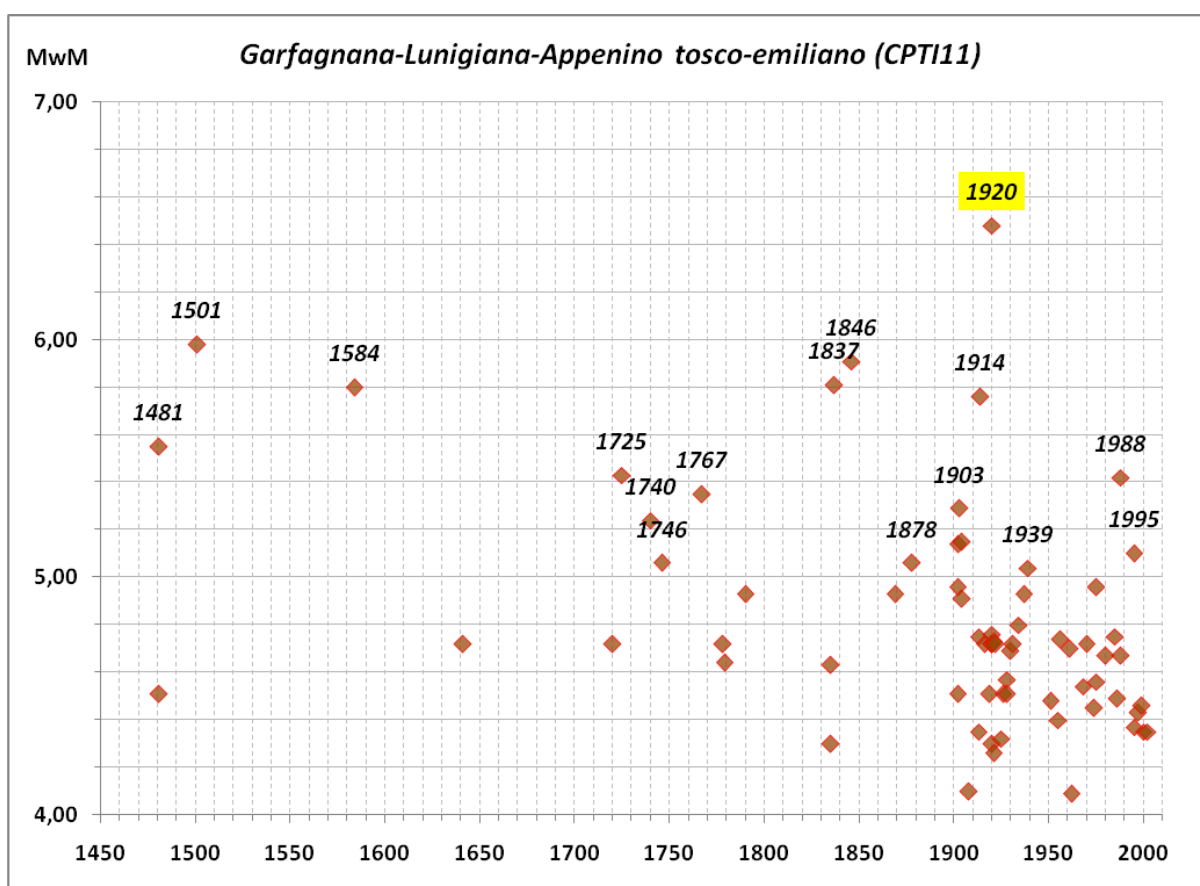
**MwM** = Magnitudo momento (determinazione macrosismica); **MwIns** = Magnitudo momento strumentale

**LatM, LonM** = Latitudine e Longitudine epicentrali (determinazione macrosismica);

**LatIns, LonIns** = Latitudine e Longitudine epicentrali (determinazione strumentale).

**Tabella 1b. Elenco dei principali terremoti d'interesse per l'area di studio (1951-2002)**  
(tratto da CPTI11)

Year	Mo	Da	Ho	Mi	Ax	Imx	LatM	LonM	Io	MwM	Latins	Lonins	MwIns
1951	08	12	21	19	BARGA	5-6	44,023	10,379	5	4,48	44,133	10,200	4,99
1955	12	13	17	04	EQUI TERME	5	44,176	10,077	5	4,40	44,117	10,150	4,71
1956	04	26	03	00	Appennino tosco-emiliano	6	44,204	11,333	6	4,74	44,150	11,317	4,95
1961	08	03	10	26	FIVIZZANO						44,200	10,200	4,70
1962	05	11	01	05	Appennino tosco-emiliano	5-6	44,160	11,234	4-5	4,09	44,200	11,167	4,82
1968	06	07	09	34	ALPI APUANE						44,750	10,320	4,54
1970	05	05	12	49	PAVULLO		44,350	10,850	6	4,72			
1974	01	28	19	57	Pistoiese	5-6	44,032	10,811	5-6	4,45	44,083	10,883	4,15
1975	04	04	09	10	Pistoiese	5-6	44,004	10,941	5-6	4,56	44,130	11,047	4,36
1975	11	16	13	04	BORGO VAL DI TARO	5-6					44,749	9,519	4,96
1980	06	07	18	35	Garfagnana						44,050	10,600	4,67
1985	01	23	10	10	Garfagnana	6	44,139	10,385	6	4,75	44,085	10,449	4,59
1986	10	01	19	53	Val di Taro						44,277	10,125	4,49
1988	02	08	11	24	Garfagnana	6	44,148	10,428	6	4,67	44,098	10,426	4,29
1988	02	08	13	36	Frignano						44,195	10,555	5,42
1995	03	03	16	16	Val di Taro						44,366	10,006	4,37
1995	10	10	06	54	LUNIGIANA	7	44,179	10,056	7	5,10	44,132	10,018	4,85
1997	12	24	17	53	Garfagnana	5-6	44,195	10,383	5	4,43	44,168	10,487	4,36
1999	07	07	17	16	Frignano	5-6	44,308	10,944	5	4,46	44,292	10,852	4,70
2000	10	03	01	12	Appennino tosco-emiliano	5-6	44,300	10,659	5	4,35	44,333	10,656	4,27
2002	06	18	22	23	Frignano						44,395	10,683	4,35



**Fig. 5. Terremoti storici d'interesse per l'area di studio**  
(con Magnitudo momento MwM > 4.0)



### Attività sismica recente (sequenza della Lunigiana-Garfagnana del 2013)

L'evento principale di questa sequenza è rappresentato dal terremoto di Magnitudo 5.2 che si verificò alle 12.33 (ore italiane) del 21.06.2013 (Latitudine 44.1536, Longitudine 10.1335, Profondità 9,98 km <sup>(5)</sup>); la stessa sequenza sismica, protrattasi per quasi tutto il 2013, avrebbe contato in totale più di 2400 eventi (26 dei quali di Magnitudo compresa tra 3.0 e 4.0 e ben 4 con Magnitudo compresa tra 4.0 e 5.0) (Fig. 6).

Dai dati disponibili dell'INGV risulta che l'analisi del meccanismo focale dell'evento ha mostrato un processo di rottura di tipo trascorrente (ossia con movimento laterale di blocchi). Considerando la distribuzione delle scosse che sono seguite a quella principale e la deformazione di superficie evidenziata dal dato SAR, si può ipotizzare che la faglia responsabile del terremoto di Magnitudo 5.2 sia quasi verticale ed abbia una direzione "anti-appenninica" (NE-SW).

Il movimento associato al terremoto del 21 giugno 2013, quindi, sarebbe congruente con quello che il 25 gennaio dello stesso anno colpì l'adiacente Garfagnana, generando un sisma di Magnitudo 4.8. Il meccanismo dei due terremoti, infatti, sarebbe attribuibile a strutture trasversali alle principali faglie attive della regione.

I dati sismologici quindi sembrano confermare l'ipotesi secondo cui l'attuale deformazione dell'Appennino è dominata da faglie estensionali, la cui continuità è interrotta da faglie trascorrenti come quelle responsabili dei terremoti della Lunigiana e Garfagnana del 2013.

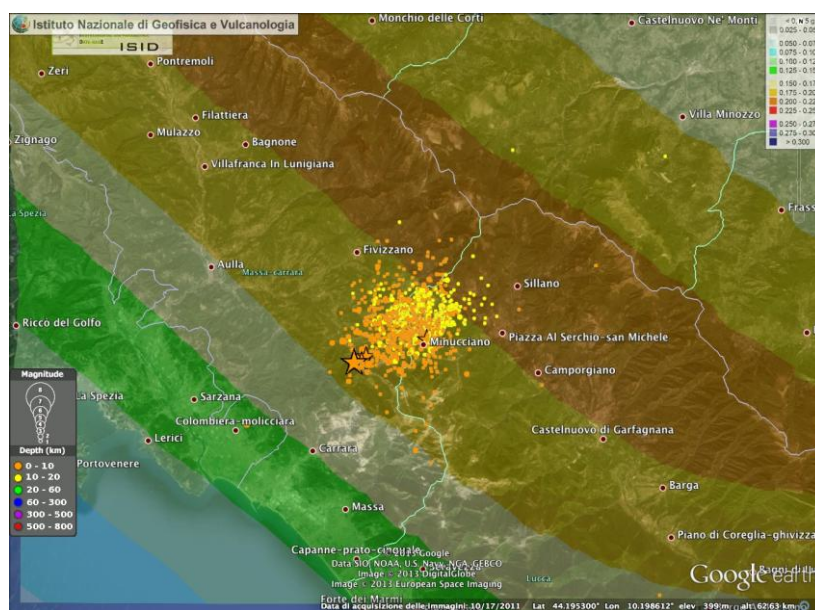


Fig. 6. Sequenza sismica della Lunigiana-Garfagnana del 2013 (INGV)

(5) Profondità ipocentrale corretta, a seguito di approfondimento di analisi, rispetto a quella calcolata dal servizio di monitoraggio subito dopo il terremoto e determinata in 5,1 Km.

<https://ingvterremoti.wordpress.com/category/sequenza-in-lunigiana/>

### **Verifica del modello di pericolosità sismica di riferimento (terremoto della Lunigiana-Garfagnana del 2013)**

Anche per il sisma del 21 giugno 2013, come per tutti i terremoti più forti che si verificano sul territorio nazionale, è stato condotto uno studio dettagliato da parte dell'INGV, al fine di confrontare le registrazioni strumentali con le accelerazioni previste dal modello di pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale (MPS04). Tale modello descrive i valori di scuotimento del suolo attesi per diversi periodi di ritorno e per diverse ordinate spettrali.

Per l'area della Garfagnana e Lunigiana i valori di accelerazione attesi su suolo roccioso, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, variano tra 0.17g e 0.25g (dove g è l'accelerazione di gravità).

Va comunque sottolineato come i valori di accelerazione forniti dalla mappa di pericolosità sismica, essendo questa un modello probabilistico, la cui "bontà" non può essere valutata con le osservazioni di un singolo terremoto, hanno una probabilità del 10% di essere superati in 50 anni.

Il suddetto confronto viene comunque fatto per la ragione che il modello di pericolosità sismica è la base per definire l'azione sismica di riferimento nelle Norme Tecniche delle Costruzioni emanate nel 2008 (NTC08) ed è quindi interessante capire se le registrazioni del terremoto del 21 giugno 2013 sono compatibili con il modello di riferimento per tale normativa.

Sono stati considerati i valori di picco dell'accelerazione (PGA) registrati dalle stazioni della RAN (Rete Accelerometrica Nazionale) e in particolare quelli della stazione più vicina all'epicentro del terremoto di magnitudo 5.2 delle ore 10.33 (UTC) del 21 giugno 2013. Si tratta della stazione di Fivizzano (codice FVZ), distante circa 9 km dall'epicentro; la stazione è posta su un terreno classificato come E, secondo le categorie dell'Eurocodice 8 (EC8).

I valori registrati dalle due componenti orizzontali (NS e EW) di FVZ sono rispettivamente di 0.23g e 0.14g.

L'analisi condotta, i cui passaggi vengono riportati nel dettaglio alla seguente pagina del sito dell'INGV: <https://ingvterremoti.wordpress.com/2013/06/27/terremoto-in-lunigiana-e-pericolosita-sismica/>, ha mostrato come il valore di picco registrato durante la scossa di magnitudo 5.2 rientri ampiamente nell'intervallo delle accelerazioni attese dal modello di pericolosità sismica di riferimento per l'Italia, coincidendo con il valore previsto per un periodo di ritorno di circa 200 anni ( $AFOE^{(6)} = 0.005$ ).

---

<sup>(6)</sup> *AFOE (Annual Frequency of Exceedance): corrisponde all'inverso del periodo di ritorno.*

### **Evento di riferimento per l'area di studio**

La scelta dell'evento di riferimento per l'area della Garfagnana e Lunigiana, ai fini della pianificazione d'emergenza e del dimensionamento del sistema integrato di protezione civile, da utilizzare come input per la realizzazione degli scenari di scuotimento, è avvenuta da parte degli studi del servizio sismico regionale, dopo attenta analisi della sismicità storica e recente dell'area in esame.

Gli studi di riferimento individuano ad oggi, un evento storicamente più grave, che può essere considerato il massimo atteso nell'area, confermandone l'epicentro con le stesse coordinate: si tratta dell'evento del 1920, in Garfagnana, caratterizzato da intensità massima  $I_{mx} = 10$  e magnitudo momento  $M_w = 6.48$  (CPTI11), i cui effetti principali distruttivi si ebbero nel paese limitrofo di Villa Collemandina e a Fivizzano nella vicina Lunigiana.

## **5. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA**

### **5.1. Inquadramento geologico-strutturale**

Il territorio del Comune di Castiglione di Garfagnana è situato lungo il margine nord-orientale della depressione tettonica della Valle del Serchio; quest'ultima rappresenta una struttura distensiva recente, delimitata da sistemi di faglie orientati prevalentemente secondo una direzione NW-SE, che la separano rispettivamente dal massiccio delle Alpi Apuane a sud-ovest e dalla dorsale appenninica a nord-est.

In particolare, la zona d'interesse è caratterizzata dalla presenza della formazione prevalentemente arenacea del "Macigno", che costituisce la porzione sommitale della Successione Toscana non metamorfica ("Falda Toscana"); tale unità risulta ricoperta, in discordanza stratigrafica, da porzioni di sedimenti fluvio-lacustri del Villafranchiano inferiore (Pliocene), corrispondenti ai cicli dei bacini di Barga e Castelnuovo e di depositi alluvionali quaternari (Pleistocene medio/sup. (?) - Olocene) costituiti in prevalenza da ciottoli di arenaria "Macigno", nelle zone tipiche di affioramento del capoluogo di Castiglione e nelle frazioni di Càmpori e Pian di Cerreto.

L'assetto tettonico dell'area è il risultato di una serie di eventi deformativi di età compresa tra il limite Oligocene-Miocene (fase collisionale e fase di collasso gravitativo) e il Pleistocene (fase distensiva di "rifting" dell'Appennino settentrionale) e così riassumibile:

- la prima fase, definita anche "fase tangenziale" (Oligocene sup.-Miocene inf.), è il più importante evento tettonico-metamorfico, in quanto responsabile della strutturazione principale dell'intera catena appenninica. Durante questa fase si ha l'individuazione della

Falda Toscana ed il suo accavallamento sul Dominio Toscano esterno; ad essa è legato il metamorfismo di più alto grado del complesso apuano;

- a questa prima fase segue, a partire dal Miocene medio, una tettonica tardiva che deforma l'edificio strutturale di prima fase ed è legata al sollevamento del complesso metamorfico apuano.

Il limite temporale superiore per le fasi tettoniche tardive, in questo settore dell'Appennino Settentrionale, può essere riferito, sulla base di dati bio-stratigrafici, ai primi sedimenti non coinvolti nella deformazione, rappresentati nell'area in esame dai depositi fluvio-lacustri villafranchiani dei bacini di Barga e di Castelnuovo Garfagnana.

Per quanto riguarda l'interpretazione geodinamica delle fasi tettoniche tardive, essa non è così chiara come per la prima fase di tipo compressivo.

Di sicuro, a partire dal Miocene superiore, si ha un'inversione del regime tettonico sul lato occidentale (interno) della catena appenninica; inversione legata all'apertura del Mar Tirreno.

Tale tettonica di tipo estensionale ha portato allo sviluppo di sistemi di faglie dirette, orientate preferenzialmente secondo una direzione NW-SE. Tali faglie sono responsabili dell'abbassamento di alcuni settori della catena appenninica e della conseguente formazione di importanti depressioni tettoniche, tra le quali il *graben* della Valle del Serchio.

In corrispondenza di queste depressioni strutturali s'impostano dei bacini intramontani (Barga, Castelnuovo Garfagnana), all'interno dei quali si sedimentarono i depositi fluvio-lacustri villafranchiani; successivamente, in seguito ai movimenti di sollevamento più recenti dell'Appennino, iniziati nel Pleistocene medio/sup. (?), all'interno degli stessi bacini vennero depositate ingenti quantità di materiale alluvionale trasportato dai corsi d'acqua che scendevano dalla catena appenninica, formando grossi conoidi di deiezione.

Tali conoidi caratterizzano attualmente tutta l'area che da Villa Collemadina e Castiglione di Garfagnana si estende verso Sud-Est, oltre la soglia di Monte Pèrpoli, fino alla zona di Barga e di Calavorno; in essi spesso sono riconoscibili più ordini di terrazzamenti legati verosimilmente alle principali fasi climatiche interglaciali del Pleistocene, durante le quali, contemporaneamente allo scioglimento dei ghiacciai, si verificava lo smantellamento di parte della catena appenninica ed il conseguente trasporto di grandi quantità di materiale.

Nell'area d'interesse ritroviamo vasti affioramenti di questi depositi, costituiti per la maggior parte da ciottoli a prevalenti elementi di arenaria "Macigno", oltre che sotto forma di ampi terrazzi fluviali (Càmpori e Pian di Cerreto), anche come lembi di copertura dislocati talvolta a quote piuttosto elevate (zona del capoluogo).

## 5.2. Geomorfologia

Per quanto riguarda l'evoluzione recente delle forme del rilievo, nell'aspetto morfologico del territorio di Castiglione di Garfagnana si possono distinguere alcuni settori di principale interesse, caratterizzati da una certa omogeneità di forme e processi morfogenetici osservabili:

- le spianate morfologiche della parte sud-occidentale del capoluogo e delle frazioni di Càmpori e Pian di Cerreto;
- la zona di raccordo con i primi rilievi appenninici a Nord-Est del capoluogo;
- le zone montane del crinale appenninico di Cerageto e Chiozza;
- le zone di scarpata morfologica al bordo di terrazzi alluvionali.

In ciascuno di questi settori è possibile riconoscere forme recenti di evoluzione del rilievo sia naturali (essenzialmente frane di varia tipologia, forme fluviali, processi erosivi), sia antropiche (queste ultime legate essenzialmente alle lavorazioni agricole o a movimenti di terra). Più in dettaglio possiamo descrivere i vari settori come segue:

### ***- Spianate morfologiche del capoluogo e delle frazioni di Càmpori e Pian di Cerreto***

Corrispondono alla zone pianeggianti o sub-pianeggianti caratterizzate in affioramento dalla formazione dei "Depositi alluvionali a prevalenti ciottoli di Macigno" (*cfr. "bn" § 9.2*) e dei sottostanti depositi fluvio-lacustri (*cfr. "PLB" e "AFB" § 9.2*), che occupano gran parte della porzione sud-occidentale del capoluogo e la maggior parte dell'area studiata nelle frazioni di Càmpori e Pian di Cerreto; in particolare, queste ultime due aree costituiscono porzioni di terrazzi di origine fluviale, formati in seguito alla re-incisione da parte degli affluenti di sinistra del Fiume Serchio (Fiume di Corfino, Canale di Canòttola e Torrente di Castiglione) a spese di ampie conoidi alluvionali che degradano dolcemente in direzione Sud, con pendenze medie generalmente inferiori al 5%.

In queste zone le forme del rilievo risultano quelle tipiche di un conoide alluvionale dotato di scarsa acclività e formato in seguito a fasi successive di deposizione e re-incisione; le modalità deposizionali sono evidenziate dalla presenza di scarpate morfologiche di modesta altezza (fino a 2,0÷2,5 m) attualmente rimaneggiate completamente per scopi agricoli, in una serie di terrazzamenti antropici.

In corrispondenza della porzione sud-occidentale del capoluogo, comprendente il centro storico, affiorano in prevalenza le litologie conglomeratico-sabbiose dei depositi fluvio-lacustri villafranchiani (*cfr. conglomerati di Barga "PLB" § 9.2*), la cui presenza fa sì che la morfologia dei versanti sia caratterizzata da pendenze moderate, generalmente non superiori al 15÷25%, con locali diminuzioni al di sotto del 5÷10%, in corrispondenza delle principali spianate morfologiche e dei terrazzamenti antropici.

Per gli stessi motivi, nelle zone di affioramento dei suddetti depositi, i fenomeni franosi sono ridotti in numero ed estensione e solitamente limitati a sporadici corpi di frana quiescenti.

**- Zona di raccordo con i primi rilievi appenninici a Nord-Est del capoluogo**

La zona nord-orientale dell'abitato di Castiglione capoluogo, di raccordo tra la porzione più pianeggiante, dove affiorano prevalentemente i depositi fluvio-lacustri villafranchiani ed i depositi alluvionali quaternari a "ciottoli di Macigno" ed i primi rilievi appenninici costituiti dalla formazione arenacea del Macigno, è caratterizzata da un sistema di faglie dirette attive e capaci (FAC), ad andamento appenninico, la principale delle quali pone a contatto lo stesso substrato arenaceo, che ne costituisce il muro (*footwall*), con i depositi fluvio-lacustri e quaternari al tetto della faglia (*hanging wall*) (*cfr.* § 9.2).

Tale sistema di faglie, che prosegue con continuità verso Nord-Ovest, nella vicina area di Villa Collemantina, ha provocato l'intensa tettonizzazione del substrato arenaceo, favorendo una forte alterazione dello stesso ed il conseguente sviluppo di vaste coltri detritiche di copertura, in tutta questa fascia, che comprende buona parte dell'abitato più recente di Castiglione, nella zona di Monte Pigoli e Cigiana.

La presenza di tali coperture detritiche e di un substrato superficialmente molto fratturato ed alterato, su un versante caratterizzato da pendenze medie variabili da un 25÷30% su gran parte del pendio, a massimi locali del 40÷45%, può favorire l'innescò e lo sviluppo di movimenti franosi, soprattutto in presenza di circolazione idrica all'interno degli stessi depositi e durante i principali eventi meteorici più intensi e prolungati nel tempo.

Diversi, infatti, sono i corpi di frana riconosciuti in questa zona, sia quiescenti che attivi, il principale del quale si colloca presso il condominio di Via S. Caterina, nella zona di M. Pigoli di Sotto.

**- Zone montane del crinale appenninico**

In corrispondenza dei rilievi appenninici sui quali sorgono le frazioni di Cerageto e Chiozza, rispettivamente a Nord e ad Est del capoluogo, costituiti esclusivamente dalla formazione arenacea del "Macigno" (*cfr.* § 9.2), si hanno forme generalmente arrotondate, poco aspre e valli per lo più aperte, che determinano un paesaggio tipicamente appenninico, con pendii moderatamente acclivi e ricoperti da vegetazione.

La franosità e la propensione al dissesto di queste zone variano naturalmente in funzione delle diverse litologie presenti. Laddove affiorano in prevalenza le arenarie del "Macigno" i fenomeni franosi sono meno frequenti, riducendosi in genere a frane di scorrimento di piccola e media estensione.

In corrispondenza delle coltri detritiche più spesse e maggiormente acclivi, viceversa, si ha una franosità più diffusa, con fenomeni di soliflusso e diversi corpi di frana per lo più quiescenti, di scorrimento e/o scorrimento-colata.

***- Zone di scarpata morfologica al bordo di terrazzi alluvionali***

Esse sono rappresentate dalle scarpate dei terrazzi alluvionali di Pian di Cerreto e di Càmpori; in particolare quelle del terrazzo di Pian di Cerreto corrispondono rispettivamente alla scarpata in sinistra idrografica del Fiume di Corfino e alla scarpata in destra del Canale di Canòttola, entrambe dotate di acclività elevata o molto elevata, soprattutto nella zona di ciglio e caratterizzate da altezze superiori ai 50 m, con quella principale sul Fiume di Corfino che raggiunge e supera gli 80 m.

Di questi, almeno 20÷25 m si sviluppano nei depositi alluvionali a “ciottoli di Macigno”, al di sotto dei quali affiora il substrato litoide costituito dalla formazione arenacea del “Macigno” fino al fondovalle.

Su entrambe le scarpate si osserva una situazione di dissesto piuttosto generalizzato, specialmente nella parte più bassa del corso d’acqua, dove sono presenti diversi movimenti franosi, sia quiescenti che attivi.

Per quanto riguarda la geometria dell’area in frana, si ha di solito una zona di corona con andamento verticale o subverticale, un corpo di frana con acclività progressivamente minore ed un accumulo, al piede della scarpata, dove l’acclività risulta ancora minore fino a raccordarsi con la spianata di fondovalle. Le litologie coinvolte sono essenzialmente i conglomerati e ciottoli a elementi di Macigno e/o la porzione superficiale, maggiormente alterata, del substrato litoide arenaceo.

Il meccanismo principale di evoluzione dei fenomeni franosi risulta comunque essere legato al forte “ringiovanimento” del rilievo, che ha portato, in tempi piuttosto brevi, all’incisione di valli profonde, così come si osservano attualmente, con innesco di importanti movimenti franosi per scalzamento al piede.

Per spiegare l’evoluzione recente di queste forme, quindi, si deve pensare ad una serie di fattori concomitanti e predisponenti: fattori tettonici (fasi di sollevamento recente della catena appenninica e conseguente incisione molto accentuata dell’attuale reticolo idrografico), fattori litologici (intrinseca debolezza nei confronti di fenomeni erosivi da parte dei depositi conglomeratico-sabbiosi costituenti le scarpate).

Analoghi dissesti, anche se di dimensioni molto più ridotte, si possono osservare lungo le scarpate morfologiche del terrazzo alluvionale di Càmpori; qui è visibile il contatto tra i depositi alluvionali a “ciottoli di Macigno” e le sottostanti “Argille e sabbie lignitifere” fluvio-lacustri, queste ultime particolarmente “deboli” nei confronti dell’azione erosiva delle acque di scorrimento superficiale.

L’evoluzione delle forme dei versanti, in queste zone di scarpata, riguarda la dinamica attiva di arretramento dei bordi e cigli del terrazzamento.

La tipologia di frana è generalmente quella di scorrimento rotazionale o più spesso complessa, essendo legata alla concomitanza di più tipi di movimenti (crollo, scorrimento, colata).

## **6. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI (INDAGINI REALIZZATE E/O PREGRESSE)**

Per lo studio di Microzonazione Sismica di livello 1 è indispensabile procedere alla raccolta e all’archiviazione organizzata dei dati geotecnici e geofisici pregressi, oltre alla realizzazione di nuove specifiche indagini, così come concordato con la Regione Toscana.

Nel caso specifico, il Comune di Castiglione di Garfagnana ad oggi dispone delle indagini eseguite nell’ambito del PROGRAMMA VEL della REGIONE TOSCANA, presso il capoluogo e la frazione di Cerageto, oltre ad una serie di indagini raccolte presso l’Ufficio Tecnico comunale e relative a vari lavori pubblici e privati.

A tali indagini, costituenti un ottimo punto di partenza per lo studio di Microzonazione Sismica, sulle 5 aree scelte per lo studio di MS sono state aggiunte indagini mirate di sismica attiva (n. 3 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P e SH, n. 2 prove sismiche MASW), sismica passiva (n. 26 misure di microtremore ambientale a stazione singola - metodo HVSR) e n. 1 prospezione geoelettrica tomografica (ERT), la dislocazione delle quali sul territorio e le modalità operative sono state definite in accordo e coordinamento con il competente Settore Prevenzione Sismica della Regione Toscana; tali prospezioni sono state eseguite dalla ditta Pro.Geo. s.r.l. di Castelnuovo di Garfagnana (*cfr.* § 1), la cui relazione tecnica, riportante l’elaborazione delle stesse indagini ed allegata al presente testo, costituisce parte integrante dello studio di Microzonazione Sismica.

Riassumendo le indagini geognostiche e geofisiche utilizzate per il presente studio, possono essere così suddivise:



Progetto VEL Regione Toscana (aree di Castiglione capoluogo e Cerageto)

- n. 4 sondaggi geognostici a carotaggio continuo (di cui n. 1 ha raggiunto il substrato);
- n. 4 prove sismiche in foro di tipo “down-hole”;
- n. 22 prove SPT in foro (di cui 10 nel sondaggio S1, 9 in S2 e 3 in S4);
- prelievo di n. 2 campioni indisturbati per analisi di laboratorio (di cui 1 nel sondaggio S2 e 1 in S4);
- n. 7 prove scissometriche (vane test) (di cui 5 nel sondaggio S1, 1 in S2 e 1 in S4);
- n. 7 prospezioni sismiche a rifrazione con onde P e SH (n. 14 indagini in totale);

Indagini reperite presso Ufficio Tecnico Comunale e da Pro.Geo. s.r.l. (intero territorio)

- n. 3 sondaggi geognostici a carotaggio continuo (senza il raggiungimento del substrato);
- n. 4 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo (con raggiungimento del substrato);
- n. 2 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo (senza il raggiungimento del substrato)
- n. 2 prove SPT in foro;
- prelievo di n. 2 campioni indisturbati per analisi di laboratorio;
- n. 5 inclinometri installati in fori di sondaggio;
- n. 3 piezometri installati in fori di sondaggio;
- n. 62 prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DS);
- n. 7 misure di microtremore ambientale a stazione singola (HVSr);
- n. 1 prospezione sismica a rifrazione con onde P e SH (n. 2 indagini in totale);
- n. 37 prospezioni sismiche a rifrazione con onde P;
- n. 33 prove sismiche MASW;
- n. 1 prospezione geoelettrica tomografica (ERT).

Indagini realizzate da Pro.Geo. s.r.l. nell'ambito del presente studio di Microzonazione Sismica (intera area di studio)

- n. 26 misure di microtremore ambientale a stazione singola (HVSr);
- n. 3 prospezioni sismiche a rifrazione con onde P e SH (n. 6 indagini in totale);
- n. 2 prove sismiche MASW;
- n. 1 prospezione geoelettrica tomografica (ERT).

Complessivamente, per il presente studio, sono state utilizzate n. 256 indagini riportate nella sottostante *Tabella 2*, suddivise per tipologia e raccolte in archivio informatico, secondo le indicazioni di cui allo *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica per la Microzonazione Sismica - Versione 4.1 (Ottobre 2017)*.

<b>Tabella 2: Tipologia di indagine</b>	<b>Sigla</b>	<b>n.</b>
<b><i>Indagini puntuali</i></b>		
Sondaggio a carotaggio continuo (senza raggiungimento del substrato)	S	6
Sondaggio a carotaggio continuo (con raggiungimento del substrato)	SS	1
Sondaggio a distruzione di nucleo (senza raggiungimento del substrato)	SD	2
Sondaggio a distruzione di nucleo (con raggiungimento del substrato)	SDS	4
Prova penetrometrica in foro (SPT)	SPT	24
Prelievo di campioni indisturbati per analisi di laboratorio	SC	4
Prova scissometrica (vane test)	VT	7
Prova sismica in foro di tipo “down-hole”	DH	4
Sondaggio attrezzato con inclinometro	SI	5
Sondaggio attrezzato con piezometro	SP	3
Prova penetrometrica dinamica superpesante	DS	62
Misura di microtremore ambientale a stazione singola	HVSR	33
<b><i>Indagini lineari</i></b>		
Prospezione sismica a rifrazione	SR	59
Prova sismica MASW	MASW	35
Prospezione geoelettrica tomografica	ERT	2
<b><i>Prove di laboratorio</i></b>		
Analisi su campione (granulometria)	SM	2
Colonna risonante	CR	2
Taglio torsionale ciclico	TTC	1
	<b>Totale</b>	<b>256</b>

Riguardo alle suddette indagini, occorre specificare quanto segue:

- i sondaggi geognostici, sia a carotaggio continuo, sia a distruzione di nucleo, sono stati distinti tra quelli che hanno raggiunto il substrato e quelli che viceversa non l'hanno intercettato;
- alcuni degli stessi sondaggi sono stati attrezzati con inclinometri ed altri con piezometri; in questo caso, tali attrezzature di monitoraggio sono state considerate come indagini a sé;
- nel caso di prelievo di campioni per le analisi di laboratorio, il numero si riferisce al totale dei campioni prelevati; in alcuni casi, infatti, in corrispondenza di uno stesso sondaggio sono stati prelevati più campioni;
- analogamente il numero delle prove eseguite in foro (SPT, vane test, down-hole) è riferito al totale delle stesse per ciascuna tipologia;

- la distribuzione relativa alla tipologia di indagini mostra che la maggior quantità di prove esistenti sul territorio è costituita da prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DS), da prospezioni sismiche a rifrazione (SR), da prove MASW e da misure di microtremore ambientale a stazione singola (HVSr);

- in numerosi casi, infine, su uno stesso stendimento sismico è stata eseguita sia la prospezione a rifrazione, sia la prova MASW.

Tutti i dati di base così ottenuti sono stati raccolti, attraverso *shapefile* e relative tabelle, secondo quanto prescritto dagli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Versione 4.1 (Ottobre 2017)*, nel database denominato “**CastiglioneDiGarfagnana\_S401**”, così articolato:

- “**Ind\_pu**” (*shapefile* puntuale), contenente l’ubicazione delle prove puntuali;
- “**Ind\_ln**” (*shapefile* lineare), contenente l’ubicazione delle prove lineari;
- “**Sito\_puntuale**” (tabella), riportante le informazioni relative al sito di indagine;
- “**Sito\_lineare**” (tabella), riportante le informazioni relative al sito di indagine;
- “**Indagini\_puntuali**” (tabella), con le informazioni relative alla tipologia di indagine puntuale;
- “**Indagini\_lineari**” (tabella), con le informazioni relative alla tipologia di indagine lineare;
- “**Parametri\_puntuali**” (tabella) contenente i parametri geologici, geotecnici o geofisici relativi alla prova puntuale;
- “**Parametri\_lineari**” (tabella) contenente i parametri geofisici relativi alle indagini lineari.

L’insieme dei dati raccolti e archiviati come sopra esposto, ha permesso di definire un quadro conoscitivo sufficientemente approfondito delle aree di studio.

## 7. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

### 7.1. Generalità – Interpretazioni e incertezze

Le caratteristiche geologiche e geomorfologiche delle cinque aree investigate all'interno del territorio comunale di Castiglione di Garfagnana, coincidenti con il capoluogo e quattro delle principali frazioni, come evidenziato ai precedenti paragrafi 5.1 e 5.2, sono molteplici e molto variegata da zona a zona; ciò porta ad una discreta complessità e pluralità dei modelli geologici del sottosuolo ricavabili per le stesse aree.

Partendo dai dati geologici di superficie sintetizzati nella carta geologica-geomorfologica e nella carta geologico-tecnica, è stato possibile ricostruire il modello di sottosuolo, per ciascuna area d'indagine, sulla base di tutti i dati geotecnici e geofisici a disposizione.

La qualità del modello, funzione soprattutto della densità e della tipologia delle indagini a disposizione, risulta maggiore laddove queste ultime sono molte e ben distribuite, come nel caso delle aree già oggetto di indagini VEL (Castiglione capoluogo e Cerageto); nelle altre aree il modello presenta alcune lacune e incertezze, superate mediante correlazioni di tipo geologico e interpretazioni stratigrafiche.

Nella ricostruzione del modello, inoltre, risultano fondamentali i sondaggi a carotaggio continuo, che purtroppo sono scarsamente distribuiti, essendo molto più frequenti e più profondi, spesso con il raggiungimento del substrato, nelle sole aree d'indagine VEL.

Le numerose prove penetrometriche invece non hanno consentito, se non in alcuni casi, l'individuazione del bedrock geologico, essendosi sovente interrotte, per rifiuto strumentale, nei primi metri dal p.c., specialmente laddove sono presenti depositi prevalentemente grossolani addensati (depositi alluvionali terrazzati o di conoide) e/o in corrispondenza di spesse coltri detritiche di copertura, derivanti dalla disgregazione del substrato roccioso sottostante.

Le indagini di sismica attiva (rifrazione, MASW e “down-hole”) sono risultate di grande utilità, soprattutto se accompagnate da indagini dirette eseguite nello stesso sito e laddove hanno consentito di individuare il bedrock sismico, ai fini della valutazione di eventuali effetti di amplificazione stratigrafica.

Per quanto riguarda le indagini di sismica passiva (misure di microtremore ambientale a stazione singola - HVSr), effettuate in buon numero specificatamente per questo progetto, oltre a permettere di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito o frequenza del picco fondamentale del sito ( $f_0$ ) e quindi la possibile esistenza di fenomeni di risonanza sismica nell'intervallo di frequenza significativo, hanno consentito di avere una prima indicazione sull'entità del contrasto d'impedenza, sulla base dell'ampiezza del picco (H/V) e

sulla profondità dell'interfaccia stratigrafica legata a tale contrasto (*Albarello D. et al., 2010, 2011*).

In altre parole le stesse misure di sismica passiva hanno permesso di valutare la correttezza del modello di sottosuolo, in particolare per quanto riguarda la profondità stimata del substrato rigido.

L'aiuto che le stesse misure forniscono in tale ricostruzione è assolutamente valido anche nel caso in cui la curva (H/V) non mostri alcun picco significativo, nell'intervallo di frequenza d'interesse e la stessa possa considerarsi sostanzialmente "piatta"; ciò, infatti, può verificarsi in presenza di substrato roccioso affiorante/subaffiorante, come è stato riscontrato per esempio nelle misure HVSR eseguite nelle frazioni di Chiozza e Cerageto.

La medesima cosa può accadere altresì nel caso in cui il substrato sismico sia molto profondo e/o vi sia un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità), ovvero in assenza di rilevanti "salti" di impedenza sismica, come può avvenire in alcuni casi in corrispondenza dei depositi alluvionali terrazzati e fluvio-lacustri più spessi riscontrati presso il capoluogo di Castiglione e la frazione di Càmpori.

Nei paragrafi successivi si riportano in sintesi le descrizioni dei modelli di sottosuolo ricostruiti per le varie aree d'indagine, rappresentati per ciascuna area nelle relative sezioni geologiche e geotecniche.

## **7.2. Castiglione di Garfagnana capoluogo**

In quest'area la ricostruzione del modello di sottosuolo, riportato nelle relative sezioni di dettaglio in scala 1:2.000, deriva dalla sintesi di tutti i dati geognostici e geofisici disponibili, partendo dalle indagini e cartografie prodotte nell'ambito del Progetto VEL (Valutazione degli Effetti Locali) fino ai rilievi inediti e agli studi di approfondimento eseguiti nell'ambito del presente studio, come meglio specificato ai precedenti paragrafi 1 e 3.

Proprio con il fine di studiare in maniera più approfondita questa zona, specialmente in relazione alla presenza del sistema di faglie dirette attive e capaci (FAC), ad andamento appenninico, presenti nella parte nord-orientale dell'abitato di Castiglione, l'area d'indagine relativa al Progetto VEL è stata ampliata verso Nord-Ovest, nella zona dove tali faglie proseguono, con continuità, verso la vicina area di Villa Collemantina.

La nuova area di studio risulta così delimitata a Nord dal corso del Fosso del Rettore e dall'altura di Colle S. Marco, in corrispondenza dei quali affiora la formazione arenacea del Macigno (*cf.* "MAC" § 9.2) e verso Sud dall'ampia spianata morfologica compresa tra il

centro storico di Castiglione e le località Bamborino e Monte Castegni, costituita dai depositi fluvio-lacustri villafranchiani rappresentati dalle “argille e sabbie di Fornaci di Barga” (*AFB*) e dai “conglomerati di Barga” (*PLB*), lo spessore dei quali, in tutta quest’area, varia da pochi metri (3÷10) fino ad oltre 30÷40 m.

Al di sopra dei depositi fluvio-lacustri, nella zona di Lugneta, a Nord del cimitero, troviamo i depositi alluvionali terrazzati a prevalenti “ciottoli di Macigno” (*bn*), con spessori variabili da 3÷5 m a massimi di 25÷30 m (*cfr. Sezioni 1 e 4*).

Tutta quest’area infatti, assieme alle spianate morfologiche delle frazioni di Càmpori e Pian di Cerreto, fa parte di una vasta conoide alluvionale che sfociava all’interno dell’antico lago pliocenico compreso tra l’area di Villa Collemantina e Castelnuovo di Garfagnana e che a seguito dei movimenti di sollevamento più recenti dell’Appennino, iniziati nel Pleistocene medio/sup. (?) e del progressivo abbassamento del livello di base (alveo del Fiume Serchio), è stata reincisa dall’azione dei corsi d’acqua affluenti del Serchio stesso, formando ampi terrazzi fluviali.

Gli stessi depositi alluvionali quaternari a “ciottoli di Macigno” e i depositi fluvio-lacustri, nella porzione nord-orientale dell’area, vengono a contatto con un substrato costituito dalle arenarie del Macigno, attraverso un sistema di faglie dirette ad andamento appenninico, definite nell’ambito del presente studio come “attive e capaci” (*FAC*) (*cfr. § 9.5*), la principale delle quali pone a contatto lo stesso substrato arenaceo, che ne costituisce il muro (*footwall*), con i depositi fluvio-lacustri e quaternari al tetto della faglia (*hanging wall*) (*cfr. Sez. 1, 2 e 3*).

Tale sistema di faglie, che prosegue con continuità verso Nord-Ovest, nella vicina area di Villa Collemantina, ha provocato l’intensa tettonizzazione del substrato arenaceo, favorendo una forte alterazione dello stesso ed il conseguente sviluppo di vaste coltri detritiche di copertura, in tutta questa fascia, che comprende buona parte dell’abitato più recente di Castiglione, nella zona di Monte Pigoli e Cigiana.

La zona di probabile presenza dei piani di faglia sopra descritti è stata oggetto di alcune indagini geofisiche programmate ed eseguite nell’ambito del presente lavoro, rappresentate, in particolare, da n. 1 prospezione geoelettrica (*GE1; L88*) e da n. 5 misure di microtremore ambientale a stazione singola (*HV1-HV5; P84-P88*), queste ultime eseguite lungo lo stendimento geoelettrico, secondo la linea di massima pendenza del versante, così come riportato nella *Carta delle indagini* (*cfr. § 9.1*) e in *Sezione 2* <sup>(7)</sup>.

---

<sup>(7)</sup> Si veda l’allegato al testo: PRO.GEO. s.r.l (Giugno 2021) – *Indagini geofisiche eseguite nel Comune di Castiglione di Garfagnana, nell’ambito del Programma di Studi di Microzonazione Sismica di livello 1.- Relazione tecnica*. REGIONE TOSCANA - COMUNE DI CASTIGLIONE DI GARFAGNANA (LU).

Tali indagini hanno avuto lo scopo di individuare eventuali variazioni laterali tra la parte di monte e quella di valle, collegabili a possibili indizi della presenza di una faglia diretta attiva e capace o un sistema di faglie dirette attive (FAC), collocate proprio in corrispondenza del passaggio tra la scarpata morfologica e la porzione pianeggiante.

I risultati ottenuti sembrano evidenziare nel complesso l'assenza di importanti variazioni laterali, sia superficiali che profonde; in particolare, i valori di *resistività* ottenuti e riportati sulla sezione tomografica, portano a concludere che, qualora il substrato fosse effettivamente costituito da due litologie diverse (arenarie del Macigno a monte e depositi fluvio-lacustri a valle), entrambe presentano valori di resistività molto simili, tali da non permettere la loro distinzione con tecniche basate sui contrasti di questo parametro fisico.

I terreni da moderatamente conduttivi a conduttivi rilevati al di sotto della copertura più resistiva, infatti, possono essere associati sia alla probabile presenza dei *depositi fluvio-lacustri villafranchiani*, presenti sicuramente nella parte più bassa del versante, sia all'esistenza, nella parte più alta dello stesso, di un *substrato litoide arenaceo*, diffusamente fratturato ed alterato, *caratterizzato da probabile circolazione idrica* specialmente nella sua porzione più profonda.

L'elaborazione delle misure di microtremore HV1-HV5, eseguite lungo lo stesso stendimento geoelettrico, sembra confermare l'assenza di importanti variazioni laterali, per quanto riguarda l'eventuale presenza di diversi tipi di substrato, rispetto ad una diversa risposta sismica; dall'analisi degli spettri delle singole componenti e delle rispettive curve H/V, infatti, non si evidenziano marcate differenze tra le varie misure, se non la presenza di picchi a frequenze di 9,50 Hz e 12,95 Hz nelle due misure eseguite più in basso nel versante (HV1 e HV2), questi ultimi, seppur non molto chiari e caratterizzati da ampiezze modeste, compatibili comunque con bassi contrasti di impedenza superficiali, a profondità dell'ordine dei 5÷10 metri.

Il substrato arenaceo presente nella parte nord-orientale dell'abitato, comprendente le località di Monte Pigoli, Cigiana, Colle S. Marco, Le Pianacce e Carpineta, è caratterizzato quasi sempre da una porzione più superficiale maggiormente fratturata ed alterata, che può raggiungere lo spessore di diversi metri (*MAC alt.*) (*Sez. 1, 2 e 3*).

In corrispondenza della porzione sud-occidentale del capoluogo, infine, si rinvencono i principali spessori dei depositi fluvio-lacustri villafranchiani, con i "conglomerati di Barga" (*PLB*) che, posti al di sopra delle "argille e sabbie di Fornaci di Barga" (*AFB*), presso il centro storico di Castiglione possono raggiungere e superare i 50÷60 metri (*Sez. 3 e 4*).

Tali litologie, sia quelle prevalentemente granulari, da poco a mediamente cementate, dei “conglomerati di Barga” (*PLB*), sia quelle prevalentemente coesive, da poco mediamente consistenti, delle “argille e sabbie di Fornaci di Barga” (*AFB*), sono caratterizzate in tutta quest’area da velocità delle onde S (*Vs*) generalmente comprese tra 400 a 700 m/sec, costituendo di fatto un substrato non rigido, seppure spesso responsabile dei principali contrasti d’impedenza con le sovrastanti coperture più sciolte (*cfr.* § 9.5).

### 7.3. Cerageto

Anche per l’area di Cerageto, come per quella del capoluogo, la ricostruzione del modello di sottosuolo, riportato nelle relative sezioni di dettaglio in scala 1:2.000, deriva dalla sintesi di tutti i dati geognostici e geofisici disponibili, partendo dalle indagini e cartografie prodotte nell’ambito del Progetto VEL (Valutazione degli Effetti Locali) fino alle indagini di approfondimento eseguite nell’ambito del presente studio, come meglio specificato ai precedenti paragrafi 1 e 3.

La frazione di Cerageto si colloca a Nord del capoluogo, su una dorsale appenninica, nel complesso orientata secondo una direzione NE-SW, che segna lo spartiacque morfologico tra il bacino del Fosso del Collettone a Nord-Ovest e quello più importante del Torrente di Castiglione a Sud-Est.

La stessa dorsale, incisa da diversi fossi secondari, presenta versanti mediamente acclivi che degradano verso i fondovalle dei torrenti con pendenze medie comprese tra il 40% e il 55%; localmente l’acclività può aumentare in funzione delle condizioni di giacitura della stratificazione caratteristica del substrato, laddove questo risulti affiorante/subaffiorante, fino ad arrivare all’80% ed oltre.

Il substrato litoide, costituito esclusivamente dalla formazione arenacea del Macigno (*MAC*), è caratterizzato generalmente da orizzonti superficiali di maggior fratturazione ed alterazione (*MAC alt.*), lo spessore dei quali in questa zona non supera generalmente i 3÷5 metri (*zona 8 MOPS; cfr.* § 9.5); a tali orizzonti di alterazione spesso si aggiungono vere e proprie coltri detritiche di copertura anch’esse di spessore pari ad almeno 3÷5 metri (*zona 10 MOPS; cfr.* § 9.5).

In accordo con il modello ricavato per il sottosuolo e riportato nelle relative sezioni geologiche e geotecniche di dettaglio, le misure di microtremore a stazione singola (HVSr) eseguite nell’ambito del presente lavoro (HV13, HV14 e HV15; *P96, P97 e P98*), hanno mostrato la sostanziale assenza di picchi significativi nell’intervallo di frequenze d’interesse o comunque la presenza di picchi nelle curve H/V non significativi per frequenza, essendo legati



ad alti contrasti di impedenza molto superficiali; in questo contesto, la curva (H/V) è da considerare pressoché “piatta” e compatibile quindi con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante su gran parte della stessa dorsale, caratterizzato da un elevato grado di rigidità, in termini di velocità sismiche, già a partire da pochi metri di profondità o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità).

Anche nel primo caso (substrato affiorante/subaffiorante), tuttavia, sulla base delle condizioni geomorfologiche dell'area (zona di dorsale/cresta), non è possibile escludere fenomeni di risonanza e/o amplificazione sismica locale nel sito d'interesse.

#### **7.4. Chiozza**

La frazione di Chiozza è ubicata ad Est del capoluogo, in un contesto del tutto assimilabile, da un punto di vista geologico-geomorfologico, a quello sopra descritto per la zona di Cerageto; in particolare il centro abitato di Chiozza si colloca su una dorsale delle principali dorsali appenniniche orientate secondo una direzione NE-SW, che fa da spartiacque morfologico tra il bacino del Torrente di Castiglione a Nord-Ovest e quello del Torrente Sillico a Sud-Est.

La stessa dorsale, incisa da diversi fossi secondari, presenta versanti mediamente acclivi che degradano verso i fondovalle dei torrenti con pendenze medie che possono variare, in funzione delle condizioni geomorfologiche locali e di giacitura del substrato litoide, dal 25÷35%, nella porzione superiore, più blanda, della dorsale, in corrispondenza del centro abitato, a massimi di oltre il 60÷70% nella parte più bassa dei versanti, verso il fondovalle.

Anche in questo caso, come nella zona di Cerageto, il substrato litoide è costituito esclusivamente dalla formazione arenacea del Macigno (*MAC*) ed è caratterizzato generalmente da orizzonti superficiali di maggior fratturazione ed alterazione (*MAC alt.*), lo spessore dei quali in questa zona non supera generalmente i 5÷6 metri (*zona 8 MOPS; cfr. § 9.5*); a tali orizzonti di alterazione spesso si aggiungono vere e proprie coltri detritiche di copertura di spessore non superiore ai 3÷5 metri (*zona 10 MOPS; cfr. § 9.5*).

Analogamente a quanto riscontrato per la zona di Cerageto, in accordo con il modello ricavato per il sottosuolo e riportato nelle relative sezioni geologiche e geotecniche di dettaglio, le misure di microtremore a stazione singola (HVSr) eseguite nell'ambito del presente lavoro (HV22-HV26; *P105-P109*), hanno mostrato la sostanziale assenza di picchi significativi nell'intervallo di frequenze d'interesse o comunque la presenza di picchi nelle curve H/V non significativi per frequenza, essendo legati ad alti contrasti di impedenza molto

superficiali; in questo contesto, la curva (H/V) è da considerare pressoché “piatta” e compatibile quindi con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante su gran parte della stessa dorsale, caratterizzato da un elevato grado di rigidità, in termini di velocità sismiche, già a partire da pochi metri di profondità o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità).

Anche nel primo caso (substrato affiorante/subaffiorante), tuttavia, sulla base delle condizioni geomorfologiche dell'area (zona di dorsale/cresta), non è possibile escludere fenomeni di risonanza e/o amplificazione sismica locale nel sito d'interesse.

### **7.5. Pian di Cerreto**

Come già detto, la zona di Pian di Cerreto, posta a Sud-Ovest del capoluogo, costituisce una porzione di terrazzo di origine fluviale, formatosi in seguito alla reincisione da parte degli affluenti di sinistra del Fiume Serchio (Fiume di Corfino ad Ovest e Canale di Canòttola ad Est) a spese di una più vasta conoide alluvionale, che degrada dolcemente in direzione Sud, con pendenze medie generalmente inferiori al 5%.

In tutta l'area pianeggiante che comprende l'abitato di Fabbica e il centro storico di Pian di Cerreto sono presenti i depositi alluvionali terrazzati quaternari “a prevalenti ciottoli di Macigno” (*bn*), che poggiano, con spessori massimi di 20÷25 m, direttamente sul substrato litoide costituito dalla formazione arenacea del Macigno (*MAC*); quest'ultima affiora in corrispondenza di entrambe le scarpate del terrazzo e dei fondovalle dei corsi d'acqua ed è caratterizzata come al solito da una porzione superficiale maggiormente fratturata ed alterata (*MAC alt.*).

In queste condizioni geologiche ci si aspetta amplificazioni della risposta sismica locale di una certa rilevanza, determinate sostanzialmente da un alto contrasto di impedenza sismico atteso tra terreni di copertura e substrato rigido.

Le misure di microtremore ambientale HV19, HV20 e HV21 (*P102*, *P103* e *P104*), eseguite in quest'area, infatti, hanno messo in evidenza “picchi” (H/V) ben marcati, a frequenze comprese tra 5,0 e 8,9 Hz, confermando l'esistenza di elevati contrasti d'impedenza a profondità variabili da 10 a 20 metri circa.

## 7.6. Càmpori

La frazione di Càmpori, a Sud-Ovest di Castiglione capoluogo, sorge su un'ampia spianata morfologica situata nella parte apicale della più vasta conoide alluvionale di Pieve Fosciana.

Le scarpate principali di questo terrazzo di origine fluviale sono rappresentate da quella in sinistra idrografica del Torrente di Castiglione ad Ovest e da quella sul Fosso di Càmpori a Nord, mentre ad Est il terrazzo è delimitato dall'incisione di un canale minore (*cfr. Sez. 1-2*).

In questo caso i depositi alluvionali terrazzati "a prevalenti ciottoli di Macigno", caratterizzati da spessori variabili da pochi metri (3÷5) a massimi di 20÷25 m, poggiano sui depositi fluvio-lacustri costituiti dalle "argille e sabbie di Fornaci di Barga" (*AFB*); queste ultime sono caratterizzate in tutta quest'area da velocità delle onde S (*V<sub>s</sub>*) generalmente comprese tra 400 a 700 m/sec, costituendo di fatto un substrato non rigido, seppure spesso responsabile dei principali contrasti d'impedenza con le sovrastanti coperture più sciolte (*zona 2 MOPS; cfr. § 9.5*).

Tra le misure di microtremore ambientale eseguite in quest'area, infatti, le HV16 e HV17 (*P99 e P100*), hanno messo in evidenza la presenza di "picchi" (*H/V*), più o meno chiari, a frequenze di 6,0 Hz e 12,6 Hz, confermando l'esistenza di possibili contrasti d'impedenza a profondità variabili da 5 a 15 metri circa.

La misura HV18 (*P101*), eseguita in corrispondenza delle prospezioni sismiche a rifrazione e MASW (*L89-L91*), oltre ad un picco a frequenza (*F*) = 24,35 Hz, non significativo in quanto legato ad un contrasto di impedenza molto superficiale, ha mostrato viceversa una curva (*H/V*) pressoché "piatta" e compatibile quindi con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità).

## 8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Lo studio di Microzonazione Sismica per il Comune di Castiglione di Garfagnana è stato effettuato secondo le metodologie riportate al precedente capitolo 3, in osservanza dei testi di riferimento tecnico e delle leggi e disposizioni vigenti, elencate specificatamente allo stesso punto.

In particolare il lavoro è stato articolato nelle seguenti fasi:

- raccolta delle indagini pregresse;
- esecuzione delle nuove indagini;
- creazione del *database* contenente tutte le indagini a disposizione;
- realizzazione, secondo gli Standard di rappresentazione, dei seguenti elaborati cartografici: Carta delle indagini, Carta geologica e geomorfologica, Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica, Sezioni geologiche e geotecniche, Carta delle frequenze naturali dei terreni, Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica.

La prima fase del lavoro è consistita nella raccolta dei dati relativi a tutte le indagini esistenti, partendo, come meglio specificato al precedente capitolo 6, da quelli relativi al Progetto VEL della Regione Toscana.

A questi sono stati aggiunti, per tutte le aree studiate, i dati esistenti relativi a vari lavori pubblici e privati e reperiti presso l'Ufficio Tecnico comunale e/o dall'archivio messo a disposizione dalla ditta Pro.Geo. s.r.l. di Castelnuovo di Garfagnana.

Le indagini di nuova esecuzione realizzate nell'ambito del presente studio, infine, sono consistite in n. 3 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P e SH, n. 2 prove sismiche MASW, n. 26 misure di microtremore ambientale a stazione singola (HVSr) e n. 1 prospezione geoelettrica tomografica (ERT), la dislocazione delle quali sul territorio e le modalità operative sono state definite in accordo e coordinamento con il competente Settore Prevenzione Sismica della Regione Toscana;

Tutti i dati di base così ottenuti, riguardanti un totale di n. 256 indagini, sono stati raccolti, attraverso *shapefile* e relative tabelle, secondo quanto prescritto dagli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Versione 4.1 (Ottobre 2017)*, nel *database* denominato "*CastiglioneDiGarfagnana\_S401*".

Tutte le prove, sia puntuali che lineari, sono state riportate su base topografica dando origine alla *Carta delle indagini*.

La *Carta geologica e geomorfologica* deriva dall'aggiornamento, a seguito di nuovi rilevamenti geologici e geomorfologici di dettaglio, delle carte geologiche esistenti per

l'intero territorio comunale e le zone limitrofe, con particolare riferimento alla Carta della franosità del bacino del Fiume Serchio (*P.A.I. – Autorità di Bacino del Fiume Serchio*) ed alla Carta Geologica Regionale (*Progetto CARG*) (Sezioni 250010, 250020, 250050 e 250060).

Limitatamente all'area del capoluogo, si è partiti dalla cartografia elaborata e prodotta dal Dott. Geol. P. Barsanti (Geoprove s.a.s. ) e revisionata/collaudata dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, nell'ambito del Progetto VEL, provvedendo ad una ulteriore revisione, frutto di indagini specifiche di approfondimento e rilievi mirati, in collaborazione con lo stesso Dipartimento di Scienze della Terra di Pisa e con il Dott. L. Piccardi del C.N.R., volta soprattutto alla corretta delimitazione ed ubicazione di alcune strutture tettoniche (faglie attive e capaci; FAC) presenti nell'area nord-orientale del capoluogo, tra la zona del centro storico e la zona di Monte Pigoli – Cigiana.

Tale operazione di revisione cartografica è stata eseguita riscontrando oggettive difficoltà ed alcune criticità legate soprattutto a difformità evidenziate nelle varie carte, riguardanti soprattutto i depositi di copertura detritici e alluvionali ed i corpi di frana, secondo quanto meglio specificato al paragrafo 9.2.

In particolare, per quanto riguarda gli elementi geomorfologici di principale interesse, costituiti in particolare dai corpi di frana quiescenti ed attivi, è stato concordato con il Settore Sismica della Regione Toscana di mantenere validi i limiti derivati dalla cartografia ufficiale dell'Autorità di Bacino del Fiume Serchio, al fine di non alterare il quadro di riferimento della pericolosità geomorfologica già definito dal P.A.I.; tale quadro è stato aggiornato inserendo i dissesti verificatisi successivamente all'ultimo aggiornamento delle cartografie di Piano, a seguito di eventi alluvionali più recenti o di aggiornamenti derivati da studi di approfondimento di alcuni movimenti franosi in atto sul versante (es. movimento franoso presso il condominio di Via S. Caterina, nella zona di M. Pigoli di Sotto del capoluogo).

Partendo dai dati geologici di superficie sintetizzati non solo nella carta geologica-geomorfologica, ma anche nella **carta geologico-tecnica** e sulla base di tutti i dati geotecnici e geofisici a disposizione, è stato possibile ricostruire il modello di sottosuolo per ciascuna area d'indagine; tali modelli sono descritti nel dettaglio al precedente capitolo 7 e rappresentati per ciascuna area nelle relative **sezioni geologiche e geotecniche**.

Le indagini di sismica passiva (misure di microtremore ambientale a stazione singola - HVSR), effettuate in buon numero specificatamente per questo progetto, hanno permesso di valutare la frequenza di vibrazione naturale del sito o frequenza del picco fondamentale del sito ( $f_0$ ) e quindi la possibile esistenza di fenomeni di risonanza sismica nell'intervallo di frequenza significativo; tutte le misure sono state riportate nella **Carta delle frequenze**

**naturali dei terreni**, classificandole in base alla frequenza fondamentale ( $f_0$ ) ed all'ampiezza del picco massimo ( $H/V$ ).

Le stesse misure hanno consentito di avere una prima indicazione sull'entità del contrasto d'impedenza, sulla base dell'ampiezza del picco ( $H/V$ ) e sulla profondità dell'interfaccia stratigrafica legata a tale contrasto (*Albarello D. et al., 2010, 2011*), così come meglio specificato al capitolo 7.

Tutti gli elementi di conoscenza del territorio, basati sugli elementi geologici e geomorfologici e sui dati geognostici e geofisici sintetizzati nelle carte di base sopra elencate, hanno permesso la realizzazione della **Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)**; tale carta ha l'obiettivo di suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee dal punto di vista del comportamento sismico e costituisce il documento fondamentale dello studio di Microzonazione Sismica (MS) di **livello 1**.

Nel caso specifico, all'interno delle cinque aree investigate sono state distinte le seguenti zone, secondo quanto descritto nel dettaglio al successivo paragrafo 9.5:

- n. 10 zone stabili suscettibili di amplificazioni locali;
- zone di attenzione per instabilità di versante ( $ZA_{FR}$ );
- zone di rispetto per faglie attive e capaci ( $ZR_{FAC}$ );
- zone di suscettibilità per faglie attive e capaci ( $ZS_{FAC}$ );
- zone di attenzione per sovrapposizione di instabilità differenti ( $ZA_{ID}$ ).

A questo proposito occorre precisare che, per quanto riguarda le faglie attive e capaci (FAC) presenti nell'area nord-orientale del capoluogo, per esse vengono definite, già in questa fase di studio di MS di livello 1, le zone di rispetto (ZR) e di suscettibilità (ZS) e non una zona di attenzione (ZA), dal momento che, come detto in precedenza, su tali strutture sono stati eseguiti studi di approfondimento già in questa fase, che hanno portato alla definizione del modello con una discreta approssimazione.

La base topografica utilizzata per la redazione degli elaborati cartografici è rappresentata dalla Carta Tecnica della Regione Toscana (CTR) in scala 1:2.000, integrata, nelle zone non coperte da quest'ultima, con la CTR in scala 1:10.000 (Sezioni 250010, 250020, 250050 e 250060).

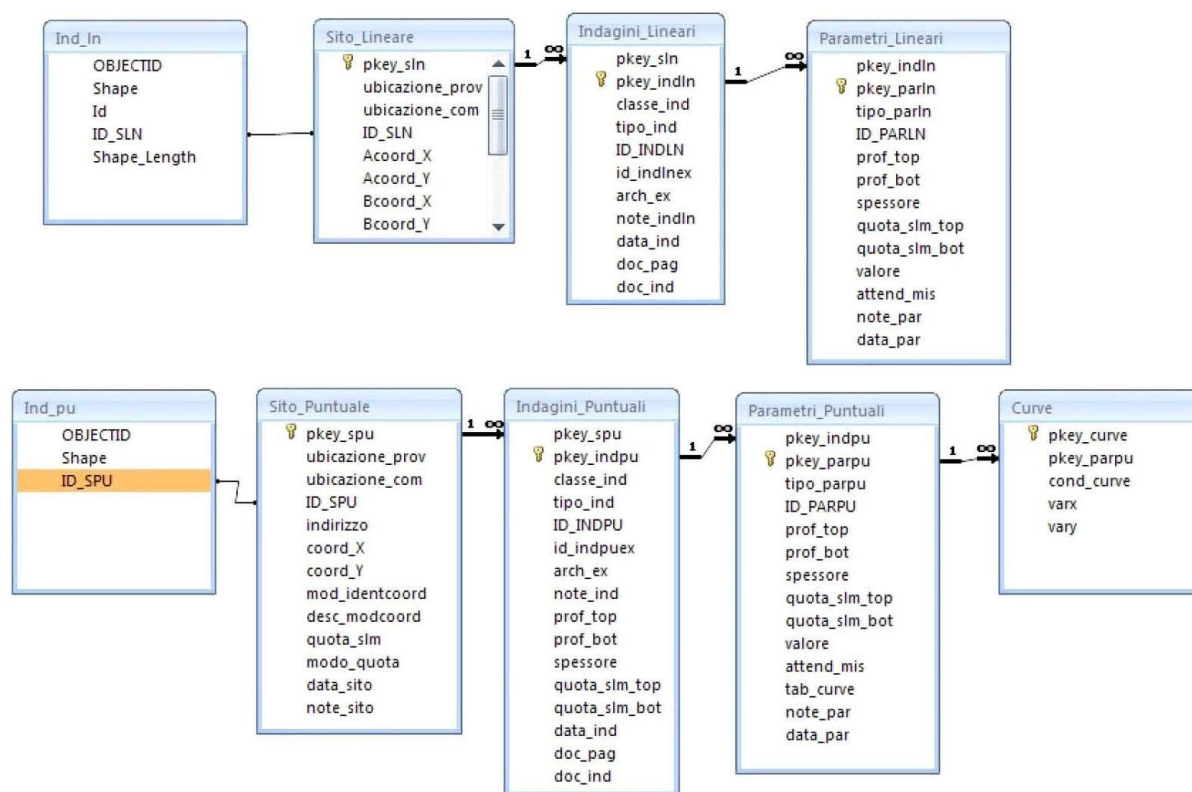
In tutti i casi le varie carte sono state riprodotte su tavole in scala 1:5.000, mentre le sezioni geologiche e geotecniche sono state restituite in scala 1:2.000, al fine di ottenere una migliore leggibilità delle stesse.

## 9. ELABORATI CARTOGRAFICI

### 9.1. Carta delle indagini

Tutti i dati geotecnici e geofisici riguardanti un totale di n. 256 indagini, sia puntuali che lineari, realizzate nell'ambito del presente studio e/o pregresse, sono stati raccolti secondo quanto descritto più specificatamente al precedente capitolo 6 e riportati nella carta delle indagini; questa è stata realizzata mediante il software *Arcgis 10.2.2*, riportando su base topografica tutte le indagini presenti nel database “*CdI\_Tabelle\_046010.mdb*”, quest'ultimo collocato nella sottocartella “*Indagini*” del progetto “*CastiglioneDiGarfagnana\_S401*”.

I simbolismi indicati nella carta rappresentano la vestitura *MS\_CLE\_40.style* degli shapefile “*Ind\_pu*” e “*Ind\_ln*”, a loro volta collegati alle tabelle progettate per l'archiviazione dei dati alfanumerici relativi ai siti, alle indagini ed ai parametri delle indagini, mediante le relazioni riportate nello schema di *Figura 7*.



**Fig. 7. Schema di collegamento (join) tra tabelle e shapefile**

Per quanto riguarda la restituzione dei dati sulla carta, occorre tener presente che nel caso di più indagini puntuali effettuate nello stesso posto, la procedura di archiviazione definita dagli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica*, ai quali ci si è attenuti, crea

delle etichette (*labels*), una per ogni tipologia di indagine, disposte in maniera concentrica rispetto ad un punto centrale, che indica l'effettiva ubicazione dell'indagine stessa.

Nel caso delle indagini lineari, viceversa, l'assenza di un *tool* utile a visualizzare due indagini diverse eseguite su uno stesso stendimento lineare, come il caso verificatosi di frequente di una prospezione sismica a rifrazione ed una prova sismica MASW, ha reso necessario la creazione di due siti lineari (uno per la sismica a rifrazione ed uno per la MASW), aventi le medesime coordinate dei punti estremi A e B; sempre in questo caso, inoltre, è stato necessario graficamente "specchiare" tra loro i due caratteri "SR" e "MW", al fine di garantire una buona leggibilità di entrambe le prove.

Da osservare, infine, che sia per le prospezioni sismiche a rifrazione (SR), sia per quelle a riflessione (SL), negli standard di archiviazione non è possibile distinguere se esse siano eseguite in onde P, in onde S o utilizzando entrambe le tecniche; ciò può essere verificato esclusivamente al momento della visualizzazione dell'allegato all'indagine stessa.

Analizzando la distribuzione areale delle indagini, si evidenzia una maggior densità ed una qualità più alta delle stesse per le aree di Castiglione di Garfagnana capoluogo e Cerageto; ciò è dovuto essenzialmente al numero elevato ed alla tipologia di indagini eseguite in quelle zone, soprattutto nell'ambito del Progetto VEL (sondaggi a carotaggio continuo con prove in foro e di laboratorio, prove simiche "down-hole", prospezioni sismiche a rifrazione e a riflessione con onde P e SH) (*cfr.* § 6).

Per il resto, la buona diffusione delle indagini è dovuta ad ulteriori sondaggi a carotaggio continuo realizzati nell'ambito di interventi pubblici eseguiti nell'area di Via S. Caterina nel capoluogo ed alle numerose prove penetrometriche dinamiche, prospezioni sismiche a rifrazione e prove MASW reperite presso l'Ufficio Tecnico Comunale e/o fornite dalla ditta Pro.Geo. s.r.l.

Da sottolineare, infine, che nel corso del presente studio di Microzonazione Sismica sono state eseguite diverse indagini di sismica attiva (n. 3 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P e SH e n. 2 prove sismiche MASW), sismica passiva (n. 26 misure di microtremore ambientale a stazione singola – HVSR) e n. 1 prospezione geoelettrica tomografica (ERT), a cura della ditta Pro.Geo. s.r.l. di Castelnuovo di Garfagnana.



## 9.2. Carta geologica e geomorfologica

Come già anticipato, per la redazione della carta geologica e geomorfologica sono stati eseguiti naturalmente rilevamenti geologici e geomorfologici di dettaglio, integrati dai lavori editi in bibliografia e dalle carte geologiche esistenti per l'intero territorio comunale e le zone limitrofe, con particolare riferimento alla Carta della franosità del bacino del Fiume Serchio (*P.A.I. – Autorità di Bacino del Fiume Serchio*) ed alla Carta Geologica Regionale (*Progetto CARG*) (Sezioni 250010, 250020, 250050 e 250060).

Limitatamente all'area del capoluogo, si è partiti dalla cartografia elaborata e prodotta dal Dott. Geol. P. Barsanti (Geoprove s.a.s. ) e revisionata/collaudata dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, nell'ambito del Progetto VEL, provvedendo ad una ulteriore revisione, frutto di indagini specifiche di approfondimento e rilievi mirati, in collaborazione con lo stesso Dipartimento di Scienze della Terra di Pisa e con il Dott. L. Piccardi del C.N.R., volta soprattutto alla corretta delimitazione ed ubicazione di alcune strutture tettoniche (faglie attive e capaci; FAC) presenti nell'area nord-orientale del capoluogo, tra la zona del centro storico e la zona di Monte Pigoli – Cigiana.

Tale operazione di revisione cartografica è stata eseguita riscontrando oggettive difficoltà ed alcune criticità legate soprattutto a difformità evidenziate nelle varie carte, riguardanti soprattutto i depositi di copertura detritici e alluvionali ed i corpi di frana.

Per questo, per quanto riguarda gli elementi geomorfologici di principale interesse, costituiti in particolare dai corpi di frana quiescenti ed attivi, è stato concordato con il Settore Sismica della Regione Toscana di mantenere validi i limiti derivati dalla cartografia ufficiale dell'Autorità di Bacino del Fiume Serchio, al fine di non alterare il quadro di riferimento della pericolosità geomorfologica già definito dal P.A.I.; tale quadro è stato aggiornato inserendo i dissesti verificatisi successivamente all'ultimo aggiornamento delle cartografie di Piano, a seguito di eventi alluvionali più recenti o di aggiornamenti derivati da studi di approfondimento di alcuni movimenti franosi in atto sul versante (es. movimento franoso presso il condominio di Via S. Caterina, nella zona di M. Pigoli di Sotto del capoluogo).

Come già evidenziato al paragrafo 5.1, il territorio del Comune di Castiglione di Garfagnana è caratterizzato geologicamente dalla presenza della formazione prevalentemente arenacea del "Macigno", che costituisce la porzione sommitale della Successione Toscana non metamorfica ("Falda Toscana"); tale unità risulta ricoperta, in discordanza stratigrafica, da porzioni di sedimenti fluvio-lacustri del Villafranchiano inferiore (Pliocene), corrispondenti ai cicli dei bacini di Barga e Castelnuovo e di depositi alluvionali quaternari (Pleistocene

medio/sup. (?) - Olocene) costituiti in prevalenza da ciottoli di arenaria “Macigno”, nelle zone tipiche di affioramento del capoluogo di Castiglione e nelle frazioni di Càmpori e Pian di Cerreto.

\*\*\*

Più in dettaglio, nella descrizione delle varie formazioni, sono state mantenute le definizioni e le sigle utilizzate dalla Carta Geologica Regionale (CARG), lasciando, per confronto (in legenda tra parentesi), le sigle delle stesse formazioni utilizzate nella Carta della franosità del bacino del Fiume Serchio (*P.A.I.*).

In particolare, con riferimento alla legenda della Nuova Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (Foglio n. 250 “Castelnuovo di Garfagnana”), si possono distinguere le seguenti formazioni descritte dall’alto geometrico:

#### DEPOSITI DI COPERTURA RECENTI (QUATERNARIO)

- **Depositi detritici (a = dt)**: accumuli di frammenti litici eterometrici, frequentemente monogenici, con matrice sabbiosa o sabbioso-limosa in quantità variabile; possono essere organizzati in falde o in conii detritici. *Età: Olocene.*

- **Depositi alluvionali recenti e attuali (b = all)**: ghiaie eterometriche, sabbie e limi di composizione generalmente poligenica. *Età: Olocene.*

- **Depositi colluviali e/o alluvionali di paleovalli (b8 = pall)**: depositi costituiti in prevalenza da sabbie e limi, sciolti o poco addensati. *Età: ?Pleistocene medio/sup. – Olocene.*

- **Depositi eluviali su superfici relitte (b6 = sr)**: sedimenti eolici, eluviali, colluviali e detritici, prevalentemente argilloso-limoso-sabbiosi, profondamente pedogenizzati.

*Età: ?Pleistocene medio/sup. – Olocene.*

- **Depositi alluvionali terrazzati a prevalenti ciottoli di Macigno (bn = ct/mg – at p.p.)**: ciottoli embricati eterometrici a prevalenti elementi di arenaria in matrice sabbiosa e, in misura minore, limoso-argillosa, distinti generalmente in più ordini di terrazzamenti; i ciottoli, riferibili alla formazione arenacea del Macigno della Successione Toscana, appaiono di colore grigio al taglio fresco ed alterati superficialmente in giallo ocra - marrone.

*Età: ?Pleistocene medio/sup. – Olocene.*

## DEPOSITI FLUVIO-LACUSTRI

- **Conglomerati di Barga (PLB = cg)**: alternanze irregolari di ghiaie, conglomerati polimittici localmente cementati e conglomerati ricchi di matrice sabbiosa con livelli subordinati di sabbie ed argille sabbiose. I clasti, costituiti principalmente da calcari, si presentano poco classati, di forma variabile e di dimensioni da decimetriche a centimetriche.

*Età: Villafranchiano superiore.*

- **Argille, sabbie e conglomerati di Fornaci di Barga (AFB = arg)**: argille grigie, argille sabbiose e limose, con livelli sporadici di sabbie ocracee e di ghiaie poligeniche a clasti arrotondati in matrice argilloso-sabbiosa; le argille sono caratterizzate dalla presenza di frequenti resti vegetali e livelli di lignite.

*Età: ?Rusciniano sup. - Villafranchiano inferiore.*

## SUCCESSIONE TOSCANA NON METAMORFICA ("FALDA TOSCANA")

- **Macigno (MAC = mg)**: arenarie torbiditiche quarzoso-feldspatiche grigie, spesso alterate in giallo ocre - marrone, da medio-fini a grossolane, in strati da spessi a molto spessi, talvolta amalgamati, a cui si intercalano strati sottili di arenarie fini, siltiti, argilliti e argilliti siltose; nella parte superiore a luoghi prevale una litofacies pelitico-arenacea con strati da sottili a spessi. A vari livelli, la formazione è inoltre caratterizzata dalla presenza di rare torbiditi calcaree a base calcarenitica, talvolta ricca di bioclasti. Nella porzione superiore, sono presenti rari olistostromi costituiti da brecce matrice-sostenute con clasti calcarei e brecce calcaree.

*Età: Oligocene superiore - Miocene inferiore.*

\*\*\*

Per quanto riguarda l'aspetto geomorfologico, secondo quanto concordato con il Settore Sismica della Regione Toscana, ci si è basati sulla carta della franosità del bacino del Fiume Serchio (*P.A.I. – Autorità di Bacino del Fiume Serchio*), aggiornando la stessa sulla base di rilievi di dettaglio e inserendo i dissesti verificatisi successivamente all'ultimo aggiornamento delle cartografie di Piano, a seguito di eventi alluvionali più recenti o di aggiornamenti derivati da studi di approfondimento di alcuni movimenti franosi in atto sul versante.

La classificazione adottata per le forme, i depositi ed i processi morfogenetici principali trae spunto da quella proposta dal Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia del C.N.R. (1993); essa mette in evidenza il grado di evoluzione di ogni processo, distinguendo tre classi di attività, secondo i seguenti criteri:

- ATTIVO: il processo è in atto, ovvero ricorrente con frequenza stagionale; le forme che da esso derivano sono in evoluzione e pertanto si deve tener conto di una loro possibile estensione areale.

- QUIESCENTE: il fenomeno si trova in fase di quiescenza, ovvero al momento non appare in evoluzione; in alcuni casi vi è stato un rimodellamento da parte degli agenti esogeni, con sviluppo di copertura vegetale, ecc., tuttavia esistono indizi ed evidenze di campagna che fanno supporre una possibile riattivazione del fenomeno stesso, con frequenza pluriennale, in seguito all'azione di agenti esterni e/o in condizioni morfologiche e climatiche particolari.

- INATTIVO: il processo si è esaurito; le forme non sono più in evoluzione né sono riattivabili, nelle condizioni morfoclimatiche attuali, sotto l'azione dello stesso processo morfogenetico principale.

Nella carta geologica-geomorfologica sono state distinte le seguenti forme, i processi ed i depositi di principale interesse:

#### FORME, PROCESSI E DEPOSITI GRAVITATIVI DI VERSANTE

- **Corpi di frana attivi (a1a = fa):** accumuli generalmente eterogenei ed eterometrici di materiali litici in matrice limoso-argillosa e assetto scompaginato; sono riconoscibili indizi di evoluzione in atto o molto recente. *Età: Olocene.*

La distinzione delle aree in frana attiva è stata fatta sulla base degli indizi di movimento evidenziati in campagna, oltre che sui dati inclinometrici disponibili per il movimento franoso presso il condominio di Via S. Caterina, nella zona di M. Pigoli di Sotto del capoluogo.

Tra i fenomeni attivi cartografati sono state inserite anche tutte le aree interessate da deformazioni superficiali lente o da soliflusso generalizzato, con particolare riguardo alle aree che interessano i nuclei abitati, la viabilità e le infrastrutture in genere.

- **Corpi di frana quiescenti (a1q = fq):** accumuli generalmente eterogenei ed eterometrici di materiali litici in matrice limoso-argillosa e assetto scompaginato; non sono riconoscibili indizi di evoluzione. *Età: Pleistocene medio/sup. (?) – Olocene.*

Tra i corpi di frana quiescenti rientrano tutti quelli che al momento non mostrano indizi di instabilità, per i quali, tuttavia, esistono evidenze di campagna che fanno supporre una possibile riattivazione del movimento stesso, in seguito all'azione di agenti esterni e/o in condizioni morfologiche e climatiche particolari.

- **Depositi alluvionali** (attivi e inattivi); in questo caso i depositi alluvionali recenti ed attuali, disposti in corrispondenza dell'alveo e delle pianure alluvionali degli attuali corsi d'acqua, sono considerati attivi, nel senso che sono naturalmente soggetti a fenomeni di erosione, di trasporto e/o di accumulo fluviale.

Le spianate morfologiche antiche, che formano gli ampi terrazzi alluvionali, costituiti in prevalenza dai depositi ciottolosi pleistocenici, come quelli di Pian di Cerreto e Càmpori, sono considerate viceversa forme inattive.

- **Conoidi alluvionali o di deiezione** (inattive); si tratta di depositi, relativamente recenti, di origine alluvionale, caratterizzati dalla tipica forma a “ventaglio”, presenti in corrispondenza dello sbocco di incisioni laterali minori sulle valli principali. In particolare l'unica conoide minore è stata censita nell'area di Càmpori; essa viene considerata attualmente inattiva, ovvero in fase di reincisione e/o di smantellamento.

- **Orli di terrazzi alluvionali** (quiescenti); sono stati differenziati fra quelli la cui scarpata sottostante possiede un'altezza compresa tra 10 e 20 metri e quelli con scarpata maggiore di 20 metri di altezza. Vengono considerati forme quiescenti, nel senso che in corrispondenza di tali orli e scarpate alluvionali possono riattivarsi fenomeni di instabilità.

Per quanto riguarda gli elementi tettonico-strutturali, infine, sulla carta geologica-geomorfologica sono state riportate le faglie individuate nelle aree di studio, tutte dirette, distinguendone il tratto certo da quello presunto.

In particolare, le **faglie dirette** individuate nell'area nord-orientale del capoluogo, tra la zona del centro storico e la zona di Monte Pigoli – Cigiana, viste alcune evidenze morfologiche e la presenza di indizi di probabile attività recente, sono state oggetto di indagini di approfondimento e rilievi mirati, in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra di Pisa e con il Dott. L. Piccardi del C.N.R., al fine di una loro corretta delimitazione ed ubicazione; tali studi hanno portato alla loro definizione come “**faglie attive e capaci - FAC**”, nell'accezione riportata anche nella successiva carta geologico-tecnica (*cfr. § 9.3*), ovvero tra le faglie che possono creare deformazioni in superficie, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali, secondo quanto prescritto dagli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Versione 4.1 (Ottobre 2017)*.

Le stesse faglie, che proseguono con continuità verso Nord-Ovest, nella vicina area di Villa Collemantina, sono state distinte in un tratto principale e in alcune strutture secondarie associate ad esso ed aventi la stessa direzione.

Nelle restanti zone studiate, l'unica faglia diretta individuata si trova nell'area di Càmpori ed è stata considerata come “*potenzialmente attiva e capace*”.

### 9.3. Carta geologico-tecnica

Allo scopo di giungere ad una suddivisione dei terreni che possiedono comportamento meccanico omogeneo, i litotipi presenti nella zona studiata sono stati raggruppati in “**unità litologico-tecniche**” omogenee, sulla base dei seguenti parametri: litologia, grado di alterazione, presenza e frequenza di stratificazione e/o di altre discontinuità, grado di addensamento e/o di cementazione. Tali unità sono state distinte nella carta geologico-tecnica per la Microzonazione Sismica, assieme alle aree suscettibili di instabilità ed a tutti gli elementi lineari e puntuali ritenuti utili per gli stessi studi di MS.

Tale carta quindi deriva dalla sintesi e dalla omogeneizzazione dei dati derivanti dalla carta geologica e geomorfologica, con riferimento ai litotipi affioranti e da quanto raccolto da tutte le indagini geognostiche e geofisiche esistenti nelle aree di studio.

A tal proposito, alle varie indagini puntuali dotate di apposito campo, è stata assegnata una stratigrafia con le varie unità litotecniche, scegliendo fra le sigle proposte negli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Versione 4.1 (Ottobre 2017)*.

In definitiva la carta geologico-tecnica fornisce un'indicazione delle unità litotecniche affioranti, distinte tra **terreni di copertura** e **substrato geologico** rigido o non rigido (alterato/molto alterato).

In essa, inoltre, sono state riportate le zone di **instabilità di versante** e le **forme di superficie** (conoidi alluvionali, orli di terrazzi); sono stati evidenziati, infine, tutti gli **elementi geologici e tettonico-strutturali** ritenuti di particolare interesse (giacitura degli strati, faglie e sondaggi che hanno raggiunto o meno il substrato).

Per ogni area investigata, inoltre, sono state realizzate almeno due sezioni geologico-tecniche significative (cinque per l'area del capoluogo), finalizzate ad una esauriente comprensione della natura geologico-litologica e delle morfologie del substrato; su ogni sezione sono state riportate le sigle delle indagini geognostiche e geofisiche più significative, intercettate dalla sezione stessa, nonché le indicazioni delle “zone stabili suscettibili di amplificazioni locali”, così come numerate e definite nella carta delle MOPS (*cfr.* § 9.5).

Nella carta geologico-tecnica risultano pertanto suddivisi ed evidenziati i seguenti elementi:

## TERRENI DI COPERTURA

(con spessore > 3 metri)

**GM** – *Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo.*

In particolare, con riferimento alle sezioni geologico-tecniche ed agli schemi litostratigrafici riportati nella carta delle MOPS, tali terreni sono stati suddivisi in:

- **GM1**: depositi alluvionali attuali, recenti e terrazzati e depositi di conoide (ghiaie e ciottoli in matrice sabbioso-limosa), da poco addensati a ben addensati, caratterizzati da Vs medie = 200÷550 m/sec (*bn, b, c*);

- **GM2**: depositi detritici di versante e depositi eluvio-colluviali di copertura (*a, b<sub>6</sub>, b<sub>8</sub>*), da sciolti a moderatamente addensati (Vs medie = 200÷400 m/sec).

Per quanto riguarda i terreni di copertura sopra descritti, sono stati distinti i seguenti ambienti genetico-deposizionali:

<b>Ambiente di versante</b>	<b>fd</b> – <i>falda detritica</i> <b>cz</b> – <i>conoide di deiezione</i> <b>ec</b> – <i>eluvio-colluviale</i>
<b>Ambiente fluviale</b>	<b>tf</b> – <i>terrazzo fluviale</i> <b>pi</b> – <i>piana inondabile</i>

## SUBSTRATO GEOLOGICO

(compresi eventuali terreni di copertura superficiali e/o coltri di alterazione con spessori < 3 metri e non cartografabili)

**GR** – *Granulare costituito da conglomerati da molto alterati e disgregati a mediamente cementati.*

Costituiscono questa unità i Conglomerati di Barga (*PLB*), caratterizzati da velocità delle onde S (Vs) medie comprese tra 250 e 700 m/sec, costituendo di fatto un substrato non rigido, seppure spesso responsabile dei principali contrasti d'impedenza con le sovrastanti coperture più sciolte (*cfr. § 9.5*).

**COS** – *Coesivo costituito in prevalenza da argille e sabbie stratificate da poco consistenti a mediamente consistenti.*

Appartengono a questa unità le Argille, sabbie e conglomerati di Fornaci di Barga (*AFB*), caratterizzate da velocità Vs medie = 400÷700 m/sec, costituendo di fatto un substrato non rigido, seppure spesso responsabile dei principali contrasti d'impedenza con le sovrastanti coperture più sciolte (*cfr. § 9.5*).

***SFALS*** – *Stratificato con alternanza di litotipi diversi, diffusamente fratturato ed alterato.*

Costituito da bancate litoidi arenacee alternate a livelli più sottili di siltiti (formazione del Macigno), caratterizzate, su tutte le aree di affioramento, nella porzione più superficiale, da una forte alterazione e/o fratturazione molto diffusa (*cfr. MAC alt.*, § 9.5), con conseguente scadimento delle proprie caratteristiche di resistenza e di rigidità; in termini di velocità sismiche, esso è caratterizzato da Vs medie < 800 m/sec ed è stato distinto con propria simbologia, anteponendo il suffisso SF, secondo le istruzioni tecniche, alla sigla del corrispondente substrato sismico di riferimento (*ALS*).

Quest'ultimo, costituito dalle arenarie e siltiti del Macigno (*MAC*) più integre e compatte, non affiora mai nelle aree di studio, ma è stato rinvenuto e distinto a profondità maggiori come riportato nelle sezioni geologico-tecniche e negli schemi litostratigrafici della carta delle MOPS (*cfr. zona 8; § 9.5*).

Nella carta geologico-tecnica, inoltre, sono state evidenziate le seguenti forme:

INSTABILITÀ DI VERSANTE

- *frane di scorrimento* (attive e quiescenti);
- *frane complesse* (attive e quiescenti).

FORME DI SUPERFICIE

- *orli di terrazzo fluviale* (con scarpata sottostante di altezza compresa tra 10 e 20 m);
- *orli di terrazzo fluviale* (con scarpata sottostante di altezza maggiore di 20 m).

Sono stati riportati, infine, i seguenti elementi geologici e tettonico-strutturali:

- *giacitura degli strati*;
- *sondaggi* (distinti tra quelli che hanno raggiunto il substrato e quelli che viceversa non lo hanno raggiunto);
- *faglie dirette attive e capaci (FAC)* (distinte fra tratto certo e tratto presunto);
- *faglie dirette potenzialmente attive e capaci* (tratto certo).

Come già anticipato nella descrizione della carta geologica (*cfr. § 9.2*), le ***faglie dirette*** individuate nell'area nord-orientale del capoluogo, a seguito di studi di approfondimento e rilievi mirati sono state definite come "*faglie attive e capaci - FAC*", ovvero tra le faglie che possono creare deformazioni in superficie, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali, secondo quanto prescritto dagli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Versione 4.1 (Ottobre 2017)*.



#### 9.4. Carta delle frequenze fondamentali dei terreni

Le misure speditive di microtremore ambientale, mediante tecnica di acquisizione a stazione singola e la tecnica di analisi HVSR (altrimenti conosciuta anche come “metodo di Nakamura”) permettono in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito o frequenza del picco fondamentale del sito ( $f_0$ ) e quindi la possibile esistenza di fenomeni di risonanza sismica nell’intervallo di frequenza significativo.

La stessa tecnica, inoltre, consente di avere una prima indicazione sull’entità del contrasto d’impedenza, sulla base dell’ampiezza del picco (H/V) e sulla profondità dell’interfaccia stratigrafica legata a tale contrasto (*Albarello D. et al., 2010*).

Come descritto nel dettaglio nella relazione tecnica della ditta Pro.Geo. s.r.l. (*cfr. § 1*) allegata al presente testo, la procedura per l’indagine con tecnica HVSR può essere suddivisa nelle fasi di seguito riassunte:

- esecuzione della *registrazione* di microtremore ambientale lungo tre direzioni ortogonali tra loro (x,y,z) con una singola stazione; tale registrazione deve essere effettuata, secondo le indicazioni del progetto SESAME (2004), per una durata non inferiore a 20 minuti;
- operazione detta di “*windowing*”, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali, la cui durata prefissata (*long period*), secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME, deve essere almeno pari a 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre “long”, che sono sincronizzate fra le tracce;
- *filtraggio* delle finestre in base a criteri che permettono di individuare l’eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione;
- estrazione dello *spettro di Fourier* per ciascuna delle finestre rimanenti, ritenute valide ed operazione di “*tapering*” e *lisciamento* di ciascun spettro, secondo una delle varie tecniche note in letteratura;
- determinazione, per ciascuna finestra, della componente in frequenza (V) relativa allo spettro nella direzione verticale (z) e della componente in frequenza (H), quest’ultima calcolata attraverso una semplice media aritmetica o una somma euclidea delle due componenti relative agli spettri nelle direzioni orizzontali (x,y); la coppia di componenti orizzontali (x,y) e la componente verticale (z) naturalmente devono essere relative a finestre temporali sincrone. Questo permette di ottenere il ricercato *rapporto spettrale (H/V)* per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l’operazione di *windowing*;

- calcolo del rapporto spettrale (H/V) medio, la cui frequenza di picco (frequenza in cui è localizzato il massimo valore assunto dal rapporto medio stesso) rappresenta la deducibile stima della frequenza naturale di vibrazione del sito.

Al fine di fornire una prima informazione di massima sugli spessori delle coperture, ovvero sulla profondità dei “contrastisti di impedenza sismica” responsabili dei picchi osservati ed una stima, in prima approssimazione, dell’entità di tali contrasti, si fa riferimento agli abachi forniti da vari autori, in particolare *Albarelo D. et al. (2010)*.

La frequenza di risonanza delle coperture dipende dal loro spessore H e dalla velocità media delle onde S ( $V_s$ ) negli stessi sedimenti; conoscendo quindi la frequenza ( $f_0$ ) e la velocità media  $V_s$  di tali sedimenti, si può ricavare in prima approssimazione il loro spessore attraverso la seguente formula:

$$H = V_s / 4 \cdot f_0$$

Ne deriva che in base alla frequenza di picco è possibile stimare la profondità del “contrasto d’impedenza” collegato al picco stesso.

Per “basso contrasto” d’impedenza si intende quando  $2 < H/V < 3$ ;

per “alto contrasto” si intende quando l’ampiezza di  $H/V > 3$ .

Per la realizzazione della carta delle frequenze fondamentali, sono state utilizzate n. 33 misure di microtremore ambientale a stazione singola (HVSr) così suddivise:

- n. 26 misure HVSr, eseguite dalla ditta Pro.Geo. s.r.l. di Castelnuovo di Garfagnana, nell’ambito del presente studio di Microzonazione Sismica (*cfr. §§ 1-6*);

- n. 7 misure HVSr reperite presso l’Ufficio Tecnico Comunale e/o da archivio della Pro.Geo. s.r.l.

In particolare, nel caso delle 26 misure HVSr effettuate dalla Pro.Geo. s.r.l., l’analisi è stata eseguita in genere su una finestra di frequenze significativa dal punto di vista geologico di 0,5 – 20÷30 Hz (dal momento che picchi con frequenze maggiori di 20÷30 Hz risultano non significativi); in alcuni casi tale finestra è stata allargata (es. 0,5 – 40 Hz, 0,5 – 50 Hz) per rendere bene evidente ed analizzabile il picco, qualora questo fosse a frequenze prossime a 20 Hz (es. Pian\_di\_Cerreto\_HV19) o per confermare l’esistenza di picchi a frequenze superiori ai 25 Hz, legati a contrasti d’impedenza sismica molto superficiali (es. Cerageto\_HV14 e Cerageto\_HV15).

Per maggiori dettagli riguardo ai dati ed alle modalità di acquisizione e di elaborazione delle stesse misure si rimanda alla relazione tecnica della Pro.Geo. s.r.l. che, allegata al presente testo, costituisce parte integrante dello studio di Microzonazione Sismica.

Per la classificazione delle misure e della curva H/V si fa riferimento ai criteri *SESAME* (2004) e ad *Albarello D. et al. (2010, 2011)*; in particolare, viene classificata di tipo “A” una curva affidabile ed interpretabile, utilizzabile anche da sola.

La curva si classifica di tipo “B”, viceversa, quando una delle condizioni della classe “A” non è soddisfatta; in questo caso si può utilizzare ugualmente, se comunque risulta coerente con altre misure vicine.

Per entrambi le classi sopra descritte, inoltre, è possibile definire due sottoclassi:

- tipo 1: la curva presenta almeno un picco “chiaro” secondo i criteri *SESAME*: possibile risonanza;

- tipo 2: la curva non presenta picchi “chiari” nell’intervallo di frequenze di interesse: assenza di risonanza.

In tale classificazione non è stata attribuita la sottoclasse (1 o 2) nei casi in cui il picco non risultava chiaro secondo i criteri *SESAME*, ma non era possibile escludere comunque fenomeni di risonanza.

Nella successiva *tabella 9.4.1* sono riassunti i dati relativi ai picchi evidenziati dalle elaborazioni delle 26 misure di microtremore (HVSr), così come catalogate nel *database* denominato “*CastiglioneDiGarfagnana\_S401*” e riportate in maniera più dettagliata nelle schede allegate alla relazione tecnica della Pro.Geo. s.r.l.

In particolare, per ciascuna elaborazione HVSr, viene indicata la frequenza di picco fondamentale ( $F_0$ ) con la rispettiva ampiezza del picco ( $A_0$ ), oltre alla classificazione di qualità della curva secondo il metodo di *Albarello D. et al. (2010, 2011)*.

In alcuni casi, quando sono presenti picchi secondari, viene riportata la frequenza del picco secondario ( $F_1$ ) e la sua ampiezza ( $A_1$ ).

Nella stessa tabella, infine, vengono segnalati i casi in cui si è ritenuto che i picchi riscontrati non fossero significativi, sia per frequenza che per ampiezza e la curva (H/V) fosse di fatto da considerare “piatta”.

**Tabella 9.4.1. Misure HVSR: Frequenza ed Ampiezza dei picchi**

N°	Sito	F <sub>0</sub> (Hz)	A <sub>0</sub>	F <sub>1</sub> (Hz)	A <sub>1</sub>	Classe
P84	Castiglione_HV1	9,5	2,51			B/
P85	Castiglione_HV2	12,95	2,37			B/
P86	Castiglione_HV3	2,75	2,05			B/
P87	Castiglione_HV4	2,75	2,4			B/
P88	Castiglione_HV5	3,80	2,43			B/
P89	Castiglione_HV6	26 (*)	13 (*)			A1
P90	Castiglione_HV7	4,85	3,67	7,10	3,61	B1
P91	Castiglione_HV8	5,6	3,59			B1
P92	Castiglione_HV9	19,1 (*)	3,1 (*)			A1
P93	Castiglione_HV10	7,85	5,37			A1
P94	Castiglione_HV11	10,25	3,83			A1
P95	Castiglione_HV12	5,6	2,79			B1
P96	Cerageto_HV13	1,1 (**)	1,53 (**)			A2
P97	Cerageto_HV14	31,25 (*)	3,81 (*)	26,6 (*)	3,71 (*)	A1
P98	Cerageto_HV15	29 (*)	3,09 (*)			A1
P99	Campori_HV16	6,05	3,6			A1
P100	Campori_HV17	1,4	2,68	12,65	2,56	B/
P101	Campori_HV18	24,35 (*)	3,51 (*)			B/
P102	Pian_di_Cerreto_HV19	19,4	4,42	5,15	3,01	A1
P103	Pian_di_Cerreto_HV20	8,9	5,57			A1
P104	Pian_di_Cerreto_HV21	5,9	6,46			A1
P105	Chiozza_HV22	14,8 (°)	2,4 (°)	17,9 (°)	2,33 (°)	B/
P106	Chiozza_HV23	21,65 (°)	3,84 (°)			B/
P107	Chiozza_HV24	1,4 (**)	1,76 (**)			A2
P108	Chiozza_HV25	23,9 (*)	4,36 (*)	17,15 (*)	3,68 (*)	A1
P109	Chiozza_HV26	1,4 (**)	1,73 (**)			A2

(\*) Picco non significativo per frequenza, legato a contrasto superficiale; curva da considerare pressoché “piatta”.

(\*\*) Assenza di picchi significativi; curva da considerare “piatta”.

(°) Picco poco chiaro legato ad andamento anomalo delle componenti; curva da considerare pressoché “piatta”.

Allo stesso modo, nella successiva *tabella 9.4.2* sono riportati i dati relativi ai picchi evidenziati dalle elaborazioni delle 7 misure di microtremore (HVSR) reperite da indagini pregresse, presso l’Ufficio Tecnico Comunale e/o da archivio della Pro.Geo. s.r.l..

**Tabella 9.4.2. Misure HVSR: Frequenza ed Ampiezza dei picchi**

N°	Sito	F <sub>0</sub> (Hz)	A <sub>0</sub>	F <sub>1</sub> (Hz)	A <sub>1</sub>	Classe
P49	Centro_Storico_HV1	5,6	3,45			A1
P50	Centro_Storico_HV2	14,6	3,29			A1
P51	Centro_Storico_HV3	17,6	3,10			B/
P72	LaSughera_HV1	13,1	3,22			A1
P79	Via_G.Marconi_HV1	5,45	2,20			B/
P80	Via_G.Marconi_HV2	17,0	2,38			B/
P81	Via_G.Marconi_HV3	15,95	3,36			B/

\*\*\*

Nella carta delle frequenze fondamentali dei terreni tutti i punti del territorio indagati con metodo HVSR sono stati suddivisi secondo classi di frequenza fondamentale ( $f_0$ ), allo scopo di distinguere qualitativamente aree caratterizzate da assenza di fenomeni di risonanza significativi da aree interessate da possibili fenomeni di risonanza, in presenza di spessori di coperture omogenei; a tale scopo sono state distinte, con colori diversi, le classi di frequenza qui di seguito riportate, con indicazione dei corrispondenti intervalli di spessore atteso per le coperture (Albarello D. et al. 2010, 2011):

<i>Classi di frequenza (<math>f_0</math>)</i>	<i>Spessore coperture (<math>h</math>)</i>
$f_0 \leq 1$ Hz	$h > 100$ m
$1 < f_0 \leq 2$ Hz	$h = 50\text{--}100$ m
$2 < f_0 \leq 8$ Hz	$h = 10\text{--}50$ m
$f_0 > 8$ Hz	$h < 10$ m

Allo scopo di dare una prima informazione, dal punto di vista puramente qualitativo, sull'entità del contrasto d'impedenza responsabile del picco di frequenza fondamentale, sono state distinte le seguenti classi di ampiezza di picco ( $A$ ), attraverso cerchi di raggio crescente proporzionale all'ampiezza stessa:

- $A \leq 2$
- $2 < A \leq 3$ ;
- $3 < A \leq 4$ ;
- $A > 4$ .

La carta così elaborata ha il duplice scopo di fornire un adeguato strumento per la predisposizione della carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) di livello 1 e di offrire un'indicazione delle profondità di investigazione per gli eventuali livelli superiori di MS.

## 9.5. Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)

La Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) di **livello 1** rappresenta la sintesi di tutti i dati di natura geologica, geofisica e geotecnica raccolti e successivamente elaborati per ciascuna area d'indagine, costituendo il documento fondamentale di questo livello di approfondimento ed un livello propedeutico per i successivi studi di MS.

In essa il territorio viene suddiviso in microzone qualitativamente omogenee dal punto di vista del comportamento sismico, all'interno delle quali, in base all'analisi ed alla valutazione

integrata di tutti gli elementi esistenti di tipo geologico e geomorfologico e delle indagini geofisiche, geotecniche e geognostiche, è possibile prevedere il verificarsi di effetti locali o di sito quali:

- amplificazione stratigrafica, topografica e per morfologie sepolte;
- instabilità di versante;
- instabilità dovuta alla presenza di terreni suscettibili a liquefazione;
- instabilità per presenza di terreni soggetti a cedimenti diffusi e differenziali;
- instabilità a causa della presenza di faglie attive e/o capaci.

Nel nostro caso, occorre considerare che le caratteristiche geologiche e geomorfologiche delle cinque aree investigate all'interno del territorio comunale di Castiglione di Garfagnana, coincidenti con il capoluogo e quattro delle principali frazioni, come evidenziato ai precedenti paragrafi 5.1 e 5.2, sono molteplici e molto variegata da zona a zona; ciò porta ad una discreta complessità e pluralità dei modelli geologici del sottosuolo ricostruibili per le stesse aree.

La qualità di tali modelli è funzione soprattutto della densità e della tipologia delle indagini a disposizione e risulta maggiore laddove queste ultime sono molte e ben distribuite, come nel caso delle aree già oggetto di indagini VEL (Castiglione capoluogo e Cerageto); nelle altre aree il modello presenta alcune lacune e incertezze, superate mediante correlazioni di tipo geologico e interpretazioni stratigrafiche.

Nel caso specifico, l'analisi di sintesi di tutti i dati a disposizione, volta al riconoscimento di situazioni tra loro assimilabili per caratteristiche geologico-tecniche e sismostratigrafiche e all'accorpamento di aree omogenee, all'interno delle cinque aree investigate, ha portato alla distinzione delle seguenti zone:

- n. 10 **zone stabili suscettibili di amplificazioni locali**;
- zone di attenzione per **instabilità di versante** ( $Z_{A_{FR}}$ );
- zone di rispetto per **faglie attive e capaci** ( $Z_{R_{FAC}}$ );
- zone di suscettibilità per **faglie attive e capaci** ( $Z_{S_{FAC}}$ );
- zone di attenzione per **sovrapposizione di instabilità differenti** ( $Z_{A_{ID}}$ ).

A questo proposito occorre precisare che, per quanto riguarda le faglie attive e capaci (FAC) presenti nell'area nord-orientale del capoluogo, per esse vengono definite, già in questa fase di studio di MS di livello 1, le **zone di rispetto** (ZR) e di **suscettibilità** (ZS) e non una zona di attenzione (ZA), dal momento che, come detto in precedenza, su tali strutture sono stati eseguiti studi di approfondimento già in questa fase, che hanno portato alla definizione del modello con una discreta approssimazione.

Nella stessa Carta MOPS, infine, fra le forme di superficie di principale interesse sono stati indicati gli orli di terrazzi fluviali, distinti fra quelli la cui scarpata sottostante possiede un'altezza compresa tra 10 e 20 metri e quelli con scarpata maggiore di 20 metri di altezza.

Le n. 10 zone stabili suscettibili di amplificazioni locali sono state descritte e sintetizzate attraverso colonnine stratigrafiche riportate di seguito ed in legenda della carta MOPS; in esse i **terreni di copertura** e i vari tipi di **substrato geologico**, rigido o non rigido (alterato/molto alterato), vengono identificati come descritti nella carta geologico-tecnica (*cfr.* § 9.3) e nella stessa legenda della carta MOPS.

A fianco di ciascuna colonnina stratigrafica, rappresentativa di una specifica microzona, vengono riportati gli intervalli di spessore determinati per i terreni di copertura e/o per i substrati molto fratturati ed alterati (caratterizzati da velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s < 800$  m/s). Sia per le litologie di copertura, sia per quelle di substrato, inoltre, sono indicate le sigle rappresentative delle corrispondenti formazioni geologiche, così come descritte nella carta geologica (*cfr.* § 9.2).

Le correlazioni laterali tra le varie zone, infine, vengono evidenziate in almeno due sezioni geologico-tecniche significative, per ciascuna area investigata (cinque sezioni per l'area del capoluogo), di importanza basilare per una corretta realizzazione della stessa carta delle MOPS e per un'eventuale modellazione numerica nei futuri livelli di Microzonazione Sismica.

Nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) risultano pertanto distinte le seguenti zone:

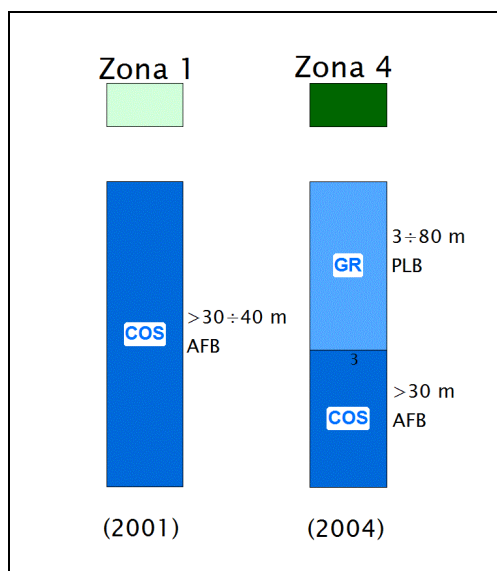
#### **A) ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI**

Con i numeri progressivi da **1** a **10**, sono state distinte le 10 zone nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico a causa sia delle caratteristiche litostratigrafiche, sia delle condizioni geomorfologiche locali.

Esse possono essere suddivise sostanzialmente in due gruppi: nel primo sono comprese le zone dalla **1** alla **7**, caratterizzate dalla presenza di un substrato non rigido, costituito dai depositi fluvio-lacustri villafranchiani, per i quali sono state rilevate velocità delle onde S ( $V_s$ ) generalmente comprese tra 400 a 700 m/sec, sia nell'area di Castiglione capoluogo, dove sono presenti nella parte sud-occidentale dell'abitato, al tetto (*hanging wall*) della principale faglia attiva e capace ivi cartografata (*cfr.* § 7.2), sia presso la frazione di Càmpori.

Il secondo gruppo comprende le zone **8, 9 e 10**, caratterizzate da terreni di copertura, coltri di alterazione del substrato, substrato molto fratturato, con spessori maggiori di 3 metri, al di sopra di un substrato rigido di riferimento, rappresentato in tutti i casi dalla formazione arenacea del Macigno, con velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s > 800$  m/s.

Tali zone caratterizzano per intero le aree delle frazioni di Cerageto, Chiozza e Pian di Cerreto, oltre che la porzione nord-orientale del capoluogo, dove sono presenti al muro (*footwall*) della principale faglia attiva e capace ivi cartografata (*cfr.* § 7.2).



Tra le microzone del primo gruppo (1-7), nella **1** e nella **4** il substrato non rigido, costituito dai depositi fluvio-lacustri villafranchiani, risulta affiorante/subaffiorante, ovvero ricoperto da terreni di copertura con spessori inferiori ai 3 metri.

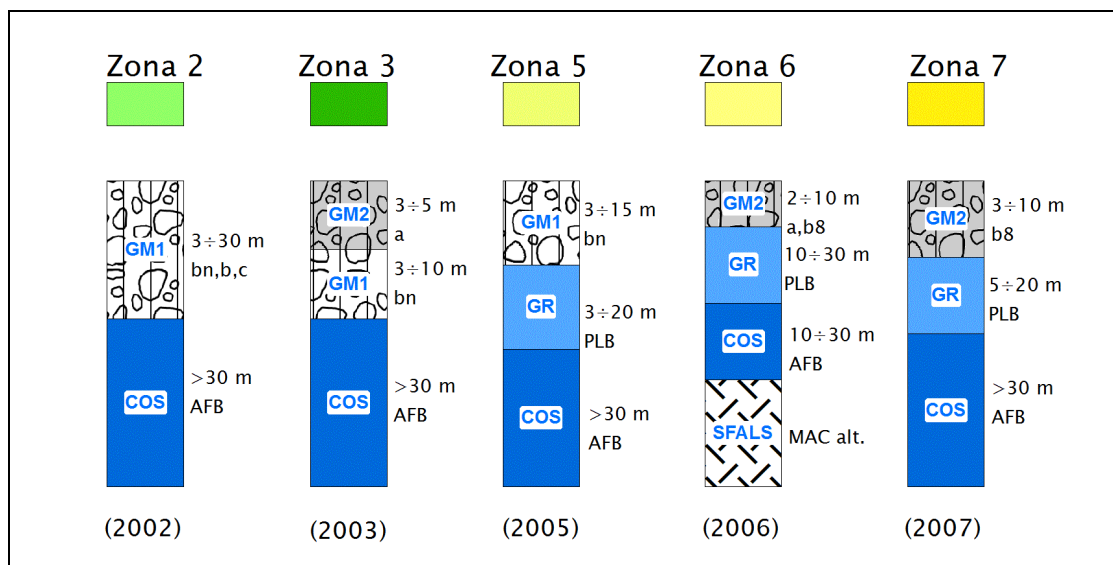
I principali spessori dei depositi fluvio-lacustri villafranchiani si rinvencono nella parte sud-occidentale del capoluogo, con i “conglomerati di Barga” (*PLB*) che, posti al di sopra delle “argille e sabbie di Fornaci di Barga” (*AFB*), presso il centro storico di Castiglione, possono raggiungere e superare i 50÷60 metri (*Sez. 3 e 4*).

In questo caso le amplificazioni attese del moto sismico, oltre che alle condizioni topografiche locali, sono dovute sostanzialmente a contrasti di impedenza sismica esistenti all’interno dello stesso substrato, generalmente tra porzione più superficiale maggiormente alterata e meno consistente e la parte più profonda più consistente.

Nelle restanti zone **2, 3, 5, 6 e 7** gli stessi depositi fluvio-lacustri risultano viceversa ricoperti da terreni di copertura più recenti, costituiti nella maggior parte dei casi dai depositi alluvionali terrazzati a prevalenti “ciottoli di Macigno” (*bn*) e/o dai depositi detritici (*a*).

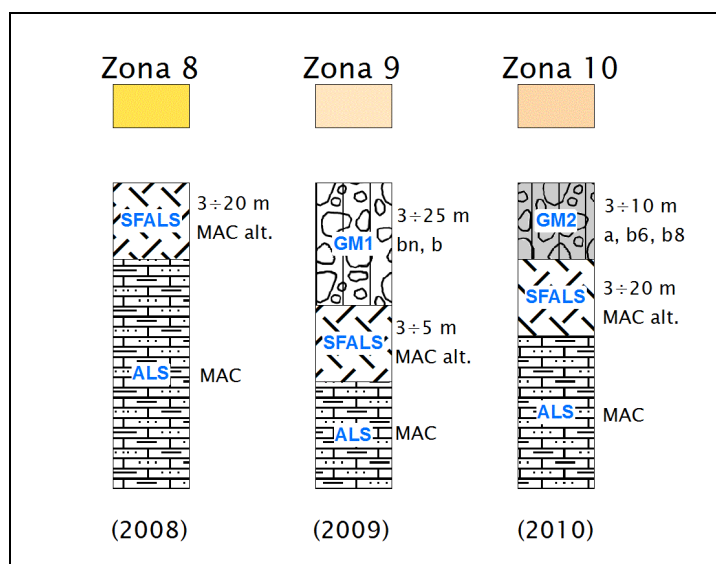
In particolare i depositi alluvionali a “ciottoli di Macigno” (*bn*) possono raggiungere spessori dell’ordine dei 25÷30 metri in corrispondenza dei principali terrazzi alluvionali come nella zona di Càmpori (*zona 2*).





Il substrato costituito dai depositi fluvio-lacustri villafranchiani, pur assumendo le caratteristiche di substrato non rigido ( $V_s < 800$  m/sec), è solitamente responsabile dei principali contrasti d'impedenza sismica con le sovrastanti coperture; ulteriori contrasti d'impedenza, inoltre, possono essere presenti all'interno degli stessi terreni di copertura, per esempio tra una porzione superficiale, più fine e meno addensata e una parte più profonda, prevalentemente grossolana e maggiormente addensata.

Le microzone del secondo gruppo (**8, 9 e 10**) caratterizzano per intero le aree delle frazioni di Cerageto, Chiozza e Pian di Cerreto, oltre che la porzione nord-orientale del capoluogo, dove il substrato è costituito dalla formazione arenacea del Macigno (*MAC*).



Il substrato rigido, costituito dalle arenarie e siltiti del Macigno (*MAC*) più integre e compatte ( $V_s > 800$  m/sec), non affiora mai nelle aree di studio, ma è stato rinvenuto e distinto a profondità maggiori, come riportato nelle sezioni geologico-tecniche e negli schemi litostratigrafici; su tutte le aree di interesse, infatti, è molto rappresentata, la zona **8**, con il substrato litoide arenaceo generalmente ricoperto da orizzonti superficiali di maggior fratturazione ed alterazione, il cui spessore può raggiungere anche i 15÷20 metri (*MAC alt.*), ai quali spesso si aggiungono vere e proprie coltri di copertura (depositi detritici, depositi eluviali e colluviali) di spessore pari ad almeno 5÷10 metri (zona **10**).

Nell'area di Pian di Cerreto, viceversa, lo stesso substrato litoide è ricoperto dai depositi alluvionali terrazzati quaternari “a prevalenti ciottoli di Macigno” (*bn*), che raggiungono spessori massimi di 20÷25 m (zona **9**).

In queste condizioni geologiche ci si aspetta amplificazione della risposta sismica locale di una certa rilevanza, determinate sostanzialmente da un alto contrasto di impedenza sismico atteso tra terreni di copertura e substrato rigido.

#### **B) ZONE DI ATTENZIONE PER INSTABILITÀ**

Corrispondono alle zone, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio, non essendo naturalmente esclusi, per le stesse zone, anche fenomeni locali di amplificazione del moto.

Tali zone, nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) risultano suddivise per le seguenti tipologie:

- instabilità di versante;
- instabilità per presenza di faglie attive e capaci;
- sovrapposizione di instabilità differenti.

#### **ZONE DI ATTENZIONE PER INSTABILITÀ DI VERSANTE ( $Z_{A_{FR}}$ )**

Queste sono state suddivise nelle seguenti categorie:

**$Z_{A_{FR}_A}$**  – *Corpi di frana attivi*, distinti per le seguenti tipologie: frane di scorrimento (codice **3012**) e frane complesse (**3014**).

**$Z_{A_{FR}_Q}$**  – *Corpi di frana quiescenti*, anch'essi a loro volta distinti in: frane di scorrimento (codice **3022**) e frane complesse (**3024**).

Oltre che dallo specifico codice, ciascuna zona di attenzione per instabilità di versante è identificata in carta delle MOPS attraverso un'apposita retinatura sovrapposta al colore della specifica zona stabile e/o stabile suscettibile di amplificazioni locali sulla quale insiste.

## ZONE DI SUSCETTIBILITÀ ( $ZS_{FAC}$ ) E ZONE DI RISPETTO ( $ZR_{FAC}$ ) PER FAGLIE ATTIVE E CAPACI

Le faglie dirette individuate nell'area nord-orientale del capoluogo, tra la zona del centro storico e la zona di Monte Pigoli – Cigiana, viste alcune evidenze morfologiche e la presenza di indizi di probabile attività recente, sono state oggetto di indagini di approfondimento e rilievi mirati, in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra di Pisa e con il Dott. L. Piccardi del C.N.R., al fine di una loro corretta delimitazione ed ubicazione; tali studi hanno portato alla loro definizione come “*faglie attive e capaci - FAC*”, nell’accezione riportata anche nella carta geologico-tecnica (*cfr. § 9.3*), ovvero tra le faglie che possono creare deformazioni in superficie, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali, secondo quanto prescritto dagli *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Versione 4.1 (Ottobre 2017)*.

Per tali faglie, in accordo e coordinamento con il personale del competente Settore Prevenzione Sismica della Regione Toscana, vengono definite, già in questa fase di studio di MS di livello 1, le *zone di rispetto* (ZR) e di *suscettibilità* (ZS) e non una zona di attenzione (ZA), dal momento che gli studi di approfondimento condotti su tali strutture, già in questa fase, hanno portato alla definizione del modello con una buona approssimazione.

In particolare per tutti i tratti incerti (presunti) delle faglie, sia principali che secondari, viene definita una zona di suscettibilità ( $ZS_{FAC}$ , codice **3061**), di larghezza pari a 160 metri, a cavallo del piano di rottura principale, secondo le “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci (FAC)”; tale fascia è stata delimitata in maniera asimmetrica rispetto alla traccia del piano di faglia principale, secondo il rapporto di 1:4, ovvero con una larghezza di 32 metri al muro (*FootWall*) della faglia stessa e di 128 metri al tetto (*Hanging Wall*).

Per tutti i tratti certi delle strutture secondarie, viceversa, la larghezza della zona di suscettibilità ( $ZS_{FAC}$ ) viene determinata in 30 metri, a cavallo del piano di rottura principale, delimitata, in maniera asimmetrica, secondo lo stesso rapporto di 1:4, ovvero con una larghezza di 6 m al FW e di 24 m all’HW.

Le due fasce di larghezza diversa, in corrispondenza delle zone di sovrapposizione e/o delle proprie terminazioni, sono state raccordate graficamente, ottenendo un’unica zona di suscettibilità, caratterizzata da “restringimenti” in corrispondenza dei tratti certi delle strutture secondarie, secondo quanto riportato nella Carta delle MOPS.

Per i tratti certi della faglia principale, infine, viene definita una zona di rispetto ( $ZR_{FAC}$ , codice **3062**), di larghezza pari a 30 metri, a cavallo del piano di rottura principale, con la stessa asimmetria del rapporto di 1:4, ovvero con una larghezza di 6 m al FW e di 24 m all'HW.

Tale zona di rispetto ( $ZR_{FAC}$ ) è in parte contenuta nella zona di suscettibilità ( $ZS_{FAC}$ ), ma fra le due non vi è sovrapposizione.

#### ZONE DI ATTENZIONE PER SOVRAPPOSIZIONE DI INSTABILITÀ DIFFERENTI ( $ZA_{ID}$ )

Con il codice **3070** sono state distinte le zone di attenzione caratterizzate dalla sovrapposizione di diversi tipi di instabilità, nel nostro caso l'instabilità di versante e l'instabilità per faglie attive e capaci, nell'area del capoluogo.

### 10. PROCEDURA SEMIQUANTITATIVA PER STABILIRE LA QUALITÀ DELLA CARTA DI MS DI LIVELLO 1

In applicazione della procedura semiquantitativa elaborata dal gruppo di lavoro di Microzonazione Sismica (*Albarello D. et al., 2011*), si è proceduto alla valutazione della qualità della cartografia di livello 1 prodotta.

Tale procedura consiste nelle seguenti quattro fasi:

1) su ciascuna delle aree investigate viene costruito un reticolo di celle quadrate, di lato pari a 250 m, orientate N-S ed E-O;

2) tenendo conto di tale reticolo, per ogni area si compila la matrice riportata in **Tabella 1** (*allegato A delle specifiche tecniche regionali per l'elaborazione di indagini e studi di MS*). La tabella, di seguito riportata, prevede n. 6 **parametri** di riferimento (carta geologico-tecnica, sondaggi a distruzione, sondaggi a carotaggio continuo, indagini geofisiche, prove geotecniche in situ e di laboratorio e misure delle frequenze di sito) ai quali viene assegnato un **peso**; ogni parametro prevede 3 **indicatori** (ciascuno di peso 0.33) ai quali viene attribuito un **punteggio**.

**Tabella 1** – Quadro riassuntivo dei parametri e dei relativi indicatori con l'attribuzione dei pesi e dei punteggi

Parametro (peso parametro)	Peso Indicatore	Indicatore	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0.33)	Media (0.66)	Alta (1)
Carta geologico-tecnica (1)	0.33	Anno rilevamento	No data	< 2000		> 2000
	0.33	Progetto	No data	Altro	Allegato piano urbanistico	Ad hoc
	0.33	Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione (0.50)	0.33	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo (1)	0.33	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche (0.50)	0.33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (0.25)	0.33	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito (0.75)	0.33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Classe di affidabilità misure (Albarelli <i>et alii</i> )*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

\* D. Albarello, C. Cesi, V. Eulitli, F. Guerrini, E. Lunedei, E. Paolucci, D. Pileggi, L.M. Puzilli - Il contributo della sismica passiva nella microzonazione di due macroaree abruzzesi. In stampa su Boll. Geofis. Teor. Appl.

Nel caso dei sondaggi e delle indagini geognostiche e geofisiche, il punteggio viene assegnato sostanzialmente sulla base dei seguenti indicatori: numero di prove, percentuale di celle occupate dalle stesse, numero di sondaggi, prove o indagini che raggiungono il substrato rigido, classe di affidabilità delle misura di frequenza (Albarelli D. *et al.*, 2010-2011).

Per quanto riguarda la carta geologico-tecnica il punteggio viene attribuito in funzione dell'anno di rilevamento, del tipo di progetto e della scala del rilevamento.

3) sulla base della matrice soprastante, si definisce un **fattore di qualità** (FQ), dato da una percentuale derivata dalla seguente sommatoria:

$$FQ = \left[ \frac{100}{\sum_{i=1}^I P_i} \right] \sum_{i=1}^I P_i \left( \sum_{j=1}^{J_i} \frac{S_{ij}}{J_i} \right) = \left[ \frac{100}{4} \right] \sum_{i=1}^I P_i \left( \sum_{j=1}^{J_i} \frac{S_{ij}}{J_i} \right)$$

dove:

**I** = Numero dei parametri;

**J<sub>i</sub>** = Numero di Indicatori relativi al parametro i-mo

**P<sub>i</sub>** = Peso del Parametro i-mo;

**S<sub>ij</sub>** = Punteggio relativo all'Indicatore j-mo del Parametro i-mo.

Una volta compilata correttamente la matrice, tale computo viene facilmente eseguito per mezzo di un foglio di calcolo messo a punto dalla Regione Toscana – Settore Sismica, copia del quale, per ciascuna delle aree di indagine, viene riportato in allegato alla presente relazione (*Allegato 1*).

4) in base alla percentuale (FQ) così ottenuta, ad ogni area indagata viene assegnata una **classe di qualità**, secondo quanto sotto riportato; tale classificazione fornisce anche un'indicazione su eventuali miglioramenti da apportare per aumentare la qualità stessa della carta.

CLASSE	VALORI	INDICAZIONI
<b>A</b>	<b>≥ 75%</b>	Carta di livello 1 di ottima qualità
<b>B</b>	<b>50%-74%</b>	Sarebbero auspicabili migliorare almeno uno dei parametri
<b>C</b>	<b>25%-49%</b>	Sarebbero auspicabili ulteriori indagini che mancano o che sono valutate di scarsa qualità
<b>D</b>	<b>≤ 25%</b>	Carta di livello 1 di scarsa qualità: non risponde ai requisiti minimi richiesti da ICMS08 e Linee Guida Regione Toscana

Nel nostro caso la valutazione è stata condotta su cinque aree, coincidenti con Castiglione capoluogo e quattro delle principali frazioni (Cerageto, Chiozza, Càmpori e Pian di Cerreto), allargando il perimetro di indagine ad un intorno geologicamente significativo, secondo i criteri esposti al precedente punto 2.

Di seguito vengono esposti i risultati ottenuti per le varie aree esaminate. Per ciascuna di esse, in allegato alla presente relazione, viene riportato il perimetro con la densità delle indagini sul reticolo di celle quadrate con lato di 250 m ed il relativo foglio di calcolo (*Allegato 1*).

<b>Centro urbano</b>	<b>Valore FQ (%)</b>	<b>Classe di qualità</b>
1 - Castiglione capoluogo	69,2	B
2 - Cerageto	59,0	B
3 - Chiozza	44,6	C
4 - Càmpori	41,1	C
5 - Pian di Cerreto	45,2	C

Analizzando i risultati, si può vedere come le due aree di Castiglione capoluogo e di Cerageto sono le uniche ad avere una classe di qualità B, con valori del fattore di qualità prossimi al 70% per il capoluogo e al 60% per la frazione di Cerageto; ciò è dovuto essenzialmente ad una maggiore distribuzione areale delle indagini e a una loro qualità più elevata, funzione anche delle indagini eseguite in quelle zone nell'ambito del Progetto VEL (sondaggi a carotaggio continuo con prove in foro e di laboratorio, prove simiche "down-hole", prospezioni sismiche a rifrazione con onde P e SH).

In questi casi, specialmente per la zona del capoluogo, quindi, basterebbe un piccolo incremento del numero delle di prove o di indagini che raggiungano il substrato rigido per ottenere una carta di qualità A.

Per le altre aree comprendenti le frazioni di Chiozza, Càmpori e Pian di Cerreto, rientranti in classe di qualità C, la percentuale ottenuta è dovuta sia all'estensione troppo limitata delle stesse aree, con conseguenti carenze nell'applicabilità della procedura, sia alla scarsa presenza e qualità delle indagini.

Anche per queste due aree, tuttavia, visti i valori prossimi al limite della classe superiore, sarebbe sufficiente incrementare le indagini, mirate soprattutto all'individuazione del substrato rigido, per passare quanto meno ad una classe B.

## 11. BIBLIOGRAFIA

ALBARELLO D. ET AL. (2010) – *The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzonation: an example from the area damaged by the 26<sup>th</sup> April 2009 L'Aquila (Italy) earthquake*. Boll. Geofis. Teor. Appl. 52 (3).

ALBARELLO D. & CASTELLARO S. (2011) – *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII, n. 2-2011.

ALBARELLO D. ET AL. (2011) – *Procedura semiquantitativa per stabilire la qualità di una carta di MS di livello I*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII, n. 2-2011.

AL YUNCHA Z. ET AL. (2004) – *The use of ambient seismic noise measurements for the estimation of surface soil effects: the Motril city case (Southern Spain)*. Pure appl. Geophys. 161 (2004).

AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME SERCHIO (2012) - *Carta della franosità del bacino del Fiume Serchio*. Scala 1:10.000. Sezioni della Carta Tecnica della Regione Toscana N. 250010, 250020, 250050 e 250060 (aggiornamento Luglio 2012).

AZZAROLI A. (1955) – *L'Appennino tosco-emiliano dal Passo di Pradarena al Passo delle Forbici e i nuclei mesozoici di Corfino e di Soraggio*. Boll. Soc. Geol. It., 74 (2). Carta geologica in scala 1:50.000.

CASTENETTO S. (2011) – *“Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”: un riferimento per la caratterizzazione sismica del territorio*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII, n. 2-2011.

MANNORI G. E MUCCI A. (2017)– *Indagini geologiche di supporto alla redazione del Piano Strutturale Intercomunale – Unione dei Comuni della Garfagnana (Comune di Castiglione di Garfagnana)*.

MARTINI G. ET AL. (2011) – *La carta geologico tecnica per gli studi di MS*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII, n. 2-2011.

NARDI R. ET AL. (1989-1992) - *Carta geologica della Garfagnana e della Media Valle del Serchio (Lucca)*. Scala 1:10.000. Sezioni della Carta Tecnica della Regione Toscana N. 250010, 250020, 250050 e 250060.

PROGETTO C.A.R.G. - *Carta geologica regionale*. Scala 1:10.000. Sezioni della Carta Tecnica della Regione Toscana N. 250010, 250020, 250050 e 250060.

PROGETTO ITHACA (ITALY HAZARD FROM CAPABLE FAULTS) – *ISPRA – Portale del Servizio Geologico d'Italia*.

SESAME PROJECT (2004) – *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements processing and interpretation*. WP12, deliverable no. D23. 12.



### **Siti Web consultati**

<http://diss.rm.ingv.it/diss/KML-HTMLoptions.html> (mappa sismogenetica aggiornata)  
<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI> (catalogo parametrico dei terremoti)  
<https://ingvterremoti.wordpress.com/2013/06/27/terremoto-in-lunigiana-e-pericolosita-sismica/> (sequenza sismica della Lunigiana, anno 2013)  
<http://sgi.isprambiente.it/geoportal/catalog/content/project/ithaca.page> (Progetto ITHACA)  
[www.regionetoscana.it](http://www.regionetoscana.it)

Castelnuovo di Garfagnana, Luglio 2021

Il Geologo incaricato  
Dott. ALESSIO BIAGIONI



REGIONE TOSCANA  
COMUNE DI CASTIGLIONE DI GARFAGNANA  
PROVINCIA DI LUCCA



## **MICROZONAZIONE SISMICA**

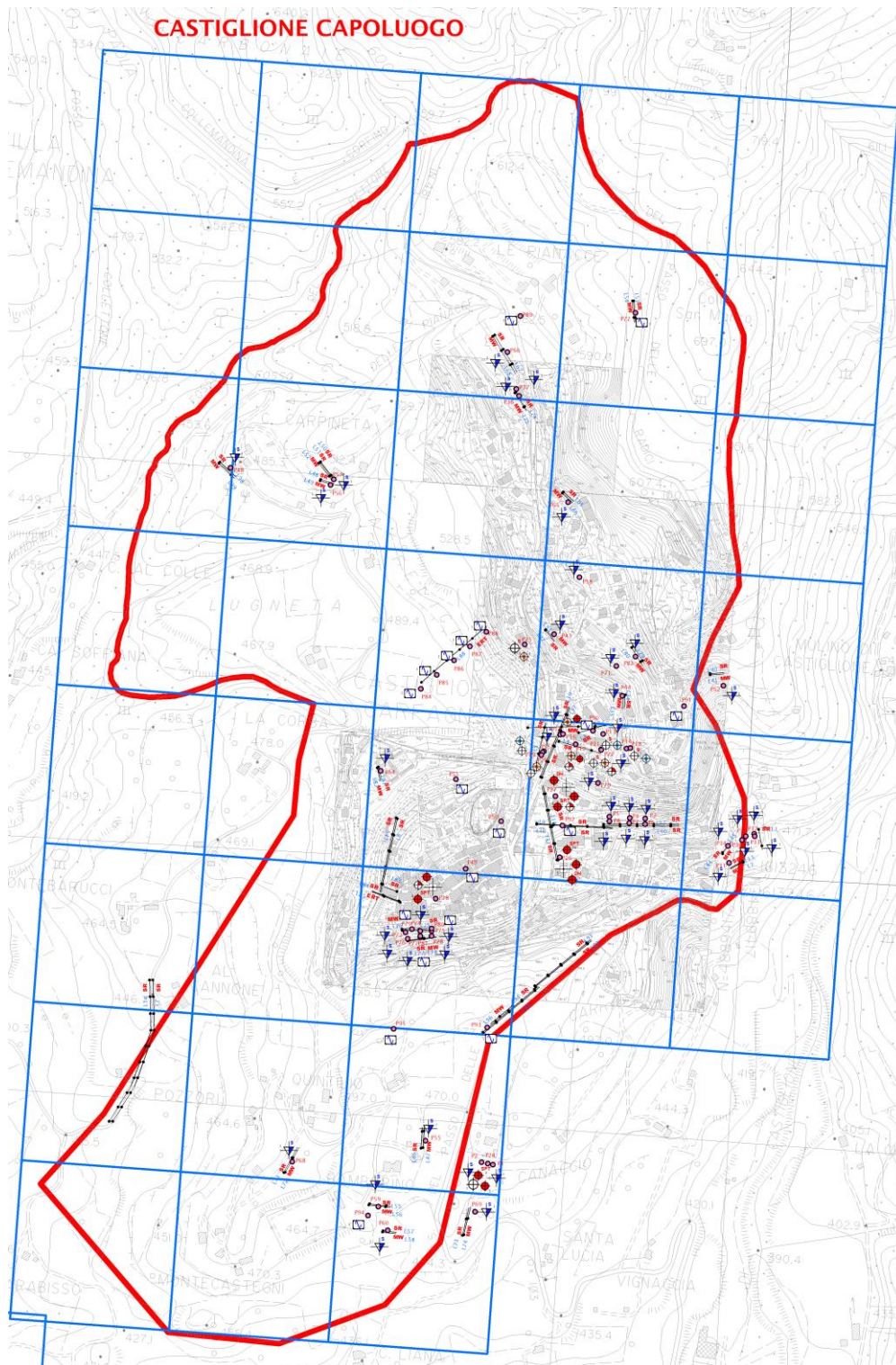
Attuazione dell'art. 11 della Legge 24 giugno 2009, n. 77

### **Allegato 1**

## **PROCEDURA SEMIQUANTITATIVA PER STABILIRE LA QUALITÀ DELLA CARTA DI MS DI LIVELLO 1**

**Aree considerate – Fogli di calcolo**

1: CASTIGLIONE DI GARFAGNANA Capoluogo  
(reticolato di celle quadrate con lato di 250 m su carta delle indagini)



**FOGLIO DI CALCOLO PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DELLA CARTA DEL LIVELLO DI MICROZONAZIONE SISMICA SULLA BASE DELLE INDAGINI PREGRESSE E/O NUOVE**

a	Parametro	4		
b	Carta Geologico tecnica	1	Anno Rilevamento	Progetto
	<i>Punteggi indicatori</i>	1	1	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
c	Sondaggi a distruzione	0,5	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,66	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
d	Sondaggi a carotaggio continuo	1	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
e	Indagini geofisiche	0,5	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	1	0,66	0,33
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
f	Prove geotecniche	0,25	Numero prove	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	1	0,66	0,33
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
g	Misure Frequenze	0,75	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	1	0,33	0,33
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33

Inserire il valore *solo* nelle celle colorate in viola

**CASTIGLIONE CAPOLUOGO**

Tabella 1 – Quadro riassuntivo dei parametri e dei relativi indicatori con l'attribuzione dei pesi e dei punteggi

Parametro (peso parametro)	Peso Indicatore	Indicatore	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0,33)	Media (0,66)	Alta (1)
Carta geologico-tecnica (1)	0,33	Anno rilevamento	No data	< 2000	Allegato piano urbanistico	> 2000
	0,33	Progetto	No data	Altro	Ad hoc	Ad hoc
	0,33	Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione (0,50)	0,33	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo (1)	0,33	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche (0,50)	0,33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (0,25)	0,33	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito (0,75)	0,33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Classe di affidabilità misure (Albarelli et alii)*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

\* D. Albarello, C. Cesi, V. Eulili, F. Guccini, E. Lunedi, E. Paolucci, D. Pileggi, L.M. Puzzilli - Il contributo della sismica passiva nella microzonazione di due macroaree abruzzesi. In stampa su Boll Geofis Teor Appl.

a	25	punteggi parziali
b	0,99	24,8
c	0,33	8,2
d	0,55	13,7
e	0,33	8,2
f	0,16	4,1
g	0,41	10,3
Tot	69,2	69,2 classe B

CLASSE	VALORI	INDICAZIONI
A	≥ 75%	Carta di livello 1 di ottima qualità
B	50%-74%	Sarebbero auspicabili migliorare almeno uno dei parametri
C	25%-49%	Sarebbero auspicabili ulteriori indagini che mancano o che sono valutate di scarsa qualità
D	≤ 25%	Carta di livello 1 di scarsa qualità: non risponde ai requisiti minimi richiesti da ICMS08 e Linee Guida Regione Toscana

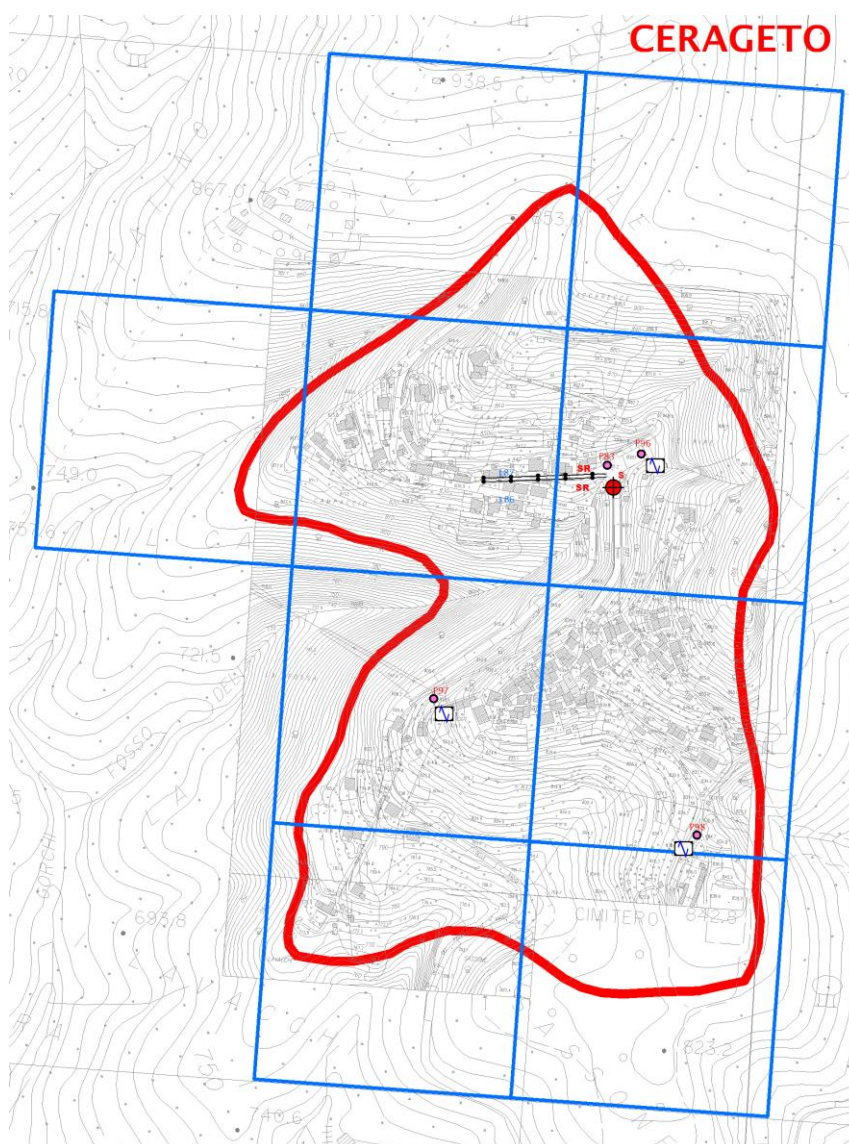
**REGIONE  
TOSCANA**





## 2: CERAGETO

(reticolato di celle quadrate con lato di 250 m su carta delle indagini)



**FOGLIO DI CALCOLO PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DELLA CARTA DEL LIVELLO DI MICROZONAZIONE SISMICA SULLA BASE DELLE INDAGINI PREGRESSE E/O NUOVE**

a	Parametro	4		
b	Carta Geologico tecnica	1	Anno Rilevamento	Progetto
	<i>Punteggi indicatori</i>	1	1	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
c	Sondaggi a distruzione	0,5	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0	0	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
d	Sondaggi a carotaggio continuo	1	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
e	Indagini geofisiche	0,5	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
f	Prove geotecniche	0,25	Numero prove	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
g	Misure Frequenze	0,75	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33

Inserire il valore *solo* nelle celle colorate in viola

**CERAGETO**

Tabella 1 – Quadro riassuntivo dei parametri e dei relativi indicatori con l'attribuzione dei pesi e dei punteggi

Parametro (peso parametro)	Peso Indicatore	Indicatore	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0,33)	Media (0,66)	Alta (1)
Carta geologico-tecnica (1)	0,33	Anno rilevamento	No data	< 2000	Allegato piano urbanistico	> 2000
	0,33	Progetto	No data	Altro	Ad hoc	Ad hoc
	0,33	Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione (0,50)	0,33	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo (1)	0,33	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche (0,50)	0,33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (0,25)	0,33	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito (0,75)	0,33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Classe di affidabilità misure (Albarelli et alii)*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

\* D. Albarello, C. Cesi, V. Eulili, F. Guerrini, E. Lunedi, E. Paolucci, D. Pileggi, L.M. Puzzilli - Il contributo della sismica passiva nella microzonazione di due macroaree abruzzesi. In stampa su Boll Geofis Teor Appl.

a	25	punteggi parziali
b	0,99	24,8
c	0,00	0,0
d	0,55	13,7
e	0,27	6,8
f	0,14	3,4
g	0,41	10,3
Tot	59,0	59,0

classe B

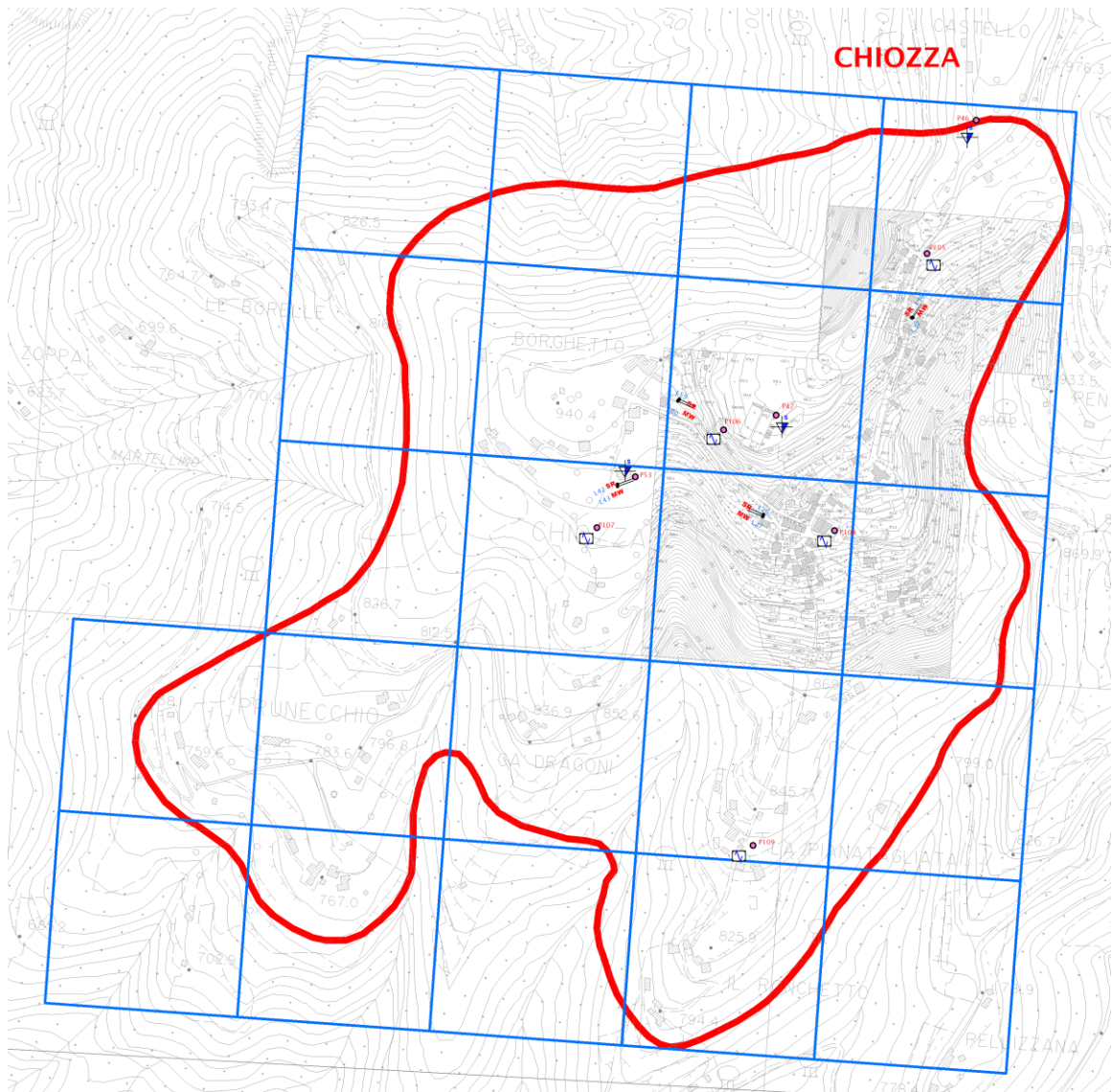
CLASSE	VALORI	INDICAZIONI
A	≥ 75%	Carta di livello 1 di ottima qualità
B	50%-74%	Sarebbero auspicabili migliorare almeno uno dei parametri
C	25%-49%	Sarebbero auspicabili ulteriori indagini che mancano o che sono valutate di scarsa qualità
D	≤ 25%	Carta di livello 1 di scarsa qualità: non risponde ai requisiti minimi richiesti da ICMS08 e Linee Guida Regione Toscana

**REGIONE  
TOSCANA**



### 3: CHIOZZA

(reticolato di celle quadrate con lato di 250 m su carta delle indagini)



**FOGLIO DI CALCOLO PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DELLA CARTA DEL LIVELLO DI MICROZONAZIONE SISMICA SULLA BASE DELLE INDAGINI PREGRESSE E/O NUOVE**

a	Parametro	4		
b	Carta Geologico tecnica	1	Anno Rilevamento	Progetto
	<i>Punteggi indicatori</i>	1	1	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
c	Sondaggi a distruzione	0,5	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0	0	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
d	Sondaggi a carotaggio continuo	1	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0	0	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
e	Indagini geofisiche	0,5	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,66	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
f	Prove geotecniche	0,25	Numero prove	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
g	Misure Frequenze	0,75	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,33	0,66
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33

Inserire il valore *solo* nelle celle colorate in viola

**CHIOZZA**

Tabella 1 – Quadro riassuntivo dei parametri e dei relativi indicatori con l'attribuzione dei pesi e dei punteggi

Parametro (peso parametro)	Peso Indicatore	Indicatore	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0.33)	Media (0.66)	Alta (1)
Carta geologico-tecnica (1)	0.33	Anno rilevamento	No data	< 2000	Allegato piano urbanistico	> 2000
	0.33	Progetto	No data	Altro	Ad hoc	Ad hoc
	0.33	Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione (0.50)	0.33	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo (1)	0.33	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche (0.50)	0.33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (0.25)	0.33	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito (0.75)	0.33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Classe di affidabilità misure (Albarelli et alii)*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

\* D. Albarello, C. Cesi, V. Eubili, F. Guccini, E. Lunedi, E. Paolucci, D. Pileggi, L.M. Puzzilli - Il contributo della sismica passiva nella microzonazione di due macroaree abruzzesi. In stampa su Boll. Geofis. Teor. Appl.

a	25	punteggi parziali
b	0,99	24,8
c	0,00	0,0
d	0,00	0,0
e	0,33	8,2
f	0,14	3,4
g	0,33	8,2
Tot	44,6	44,6

classe C

CLASSE	VALORI	INDICAZIONI
A	≥ 75%	Carta di livello 1 di ottima qualità
B	50%-74%	Sarebbero auspicabili migliorare almeno uno dei parametri
C	25%-49%	Sarebbero auspicabili ulteriori indagini che mancano o che sono valutate di scarsa qualità
D	≤ 25%	Carta di livello 1 di scarsa qualità: non risponde ai requisiti minimi richiesti da ICMS08 e Linee Guida Regione Toscana

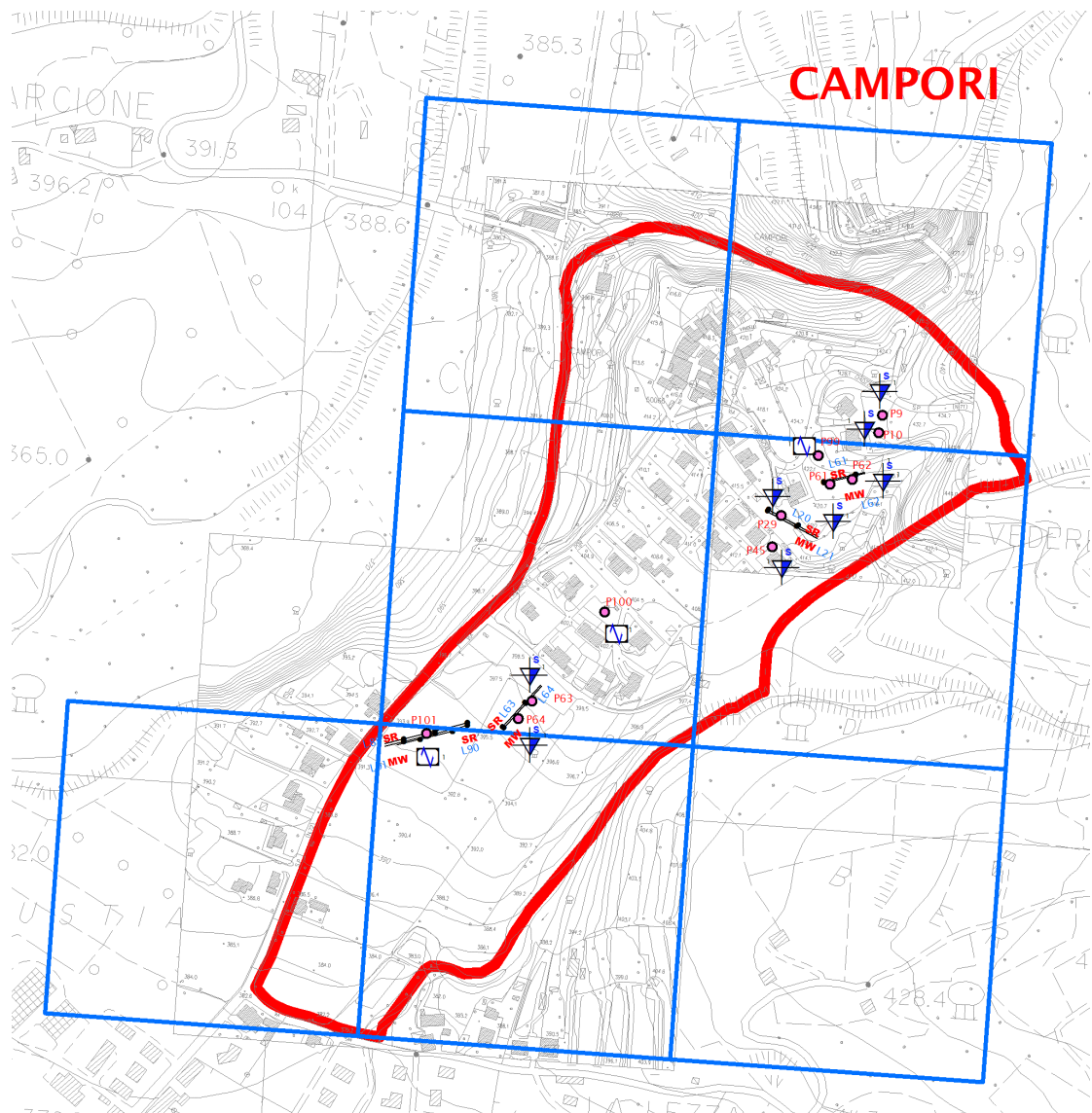
**REGIONE  
TOSCANA**





#### 4: CAMPORI

(reticolato di celle quadrate con lato di 250 m su carta delle indagini)



**FOGLIO DI CALCOLO PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DELLA CARTA DEL LIVELLO DI MICROZONAZIONE SISMICA SULLA BASE DELLE INDAGINI PREGRESSE E/O NUOVE**

a	Parametro	4		
b	Carta Geologico tecnica	1	Anno Rilevamento	Progetto
	<i>Punteggi indicatori</i>	1	1	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
c	Sondaggi a distruzione	0,5	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0	0	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
d	Sondaggi a carotaggio continuo	1	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0	0	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
e	Indagini geofisiche	0,5	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,66	0,66	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
f	Prove geotecniche	0,25	Numero prove	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,66	0,66	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
g	Misure Frequenze	0,75	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,66	0,33
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33

Inserire il valore *solo* nelle celle colorate in viola

**CAMPORI**

Tabella 1 – Quadro riassuntivo dei parametri e dei relativi indicatori con l'attribuzione dei pesi e dei punteggi

Parametro (peso parametro)	Peso Indicatore	Indicatore	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0,33)	Media (0,66)	Alta (1)
Carta geologico-tecnica (1)	0,33	Anno rilevamento	No data	< 2000	Allegato piano urbanistico	> 2000
	0,33	Progetto	No data	Altro	Ad hoc	Ad hoc
	0,33	Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione (0,50)	0,33	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo (1)	0,33	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche (0,50)	0,33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (0,25)	0,33	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito (0,75)	0,33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0,33	Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0,33	Classe di affidabilità misure (Albarelli et alii)*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

\* D. Albarello, C. Cesi, V. Eulilli, F. Guccini, E. Lunedi, E. Paolucci, D. Pileggi, L.M. Puzzilli - Il contributo della sismica passiva nella microzonazione di due macroaree abruzzesi. In stampa su Boll Geofis Teor Appl.

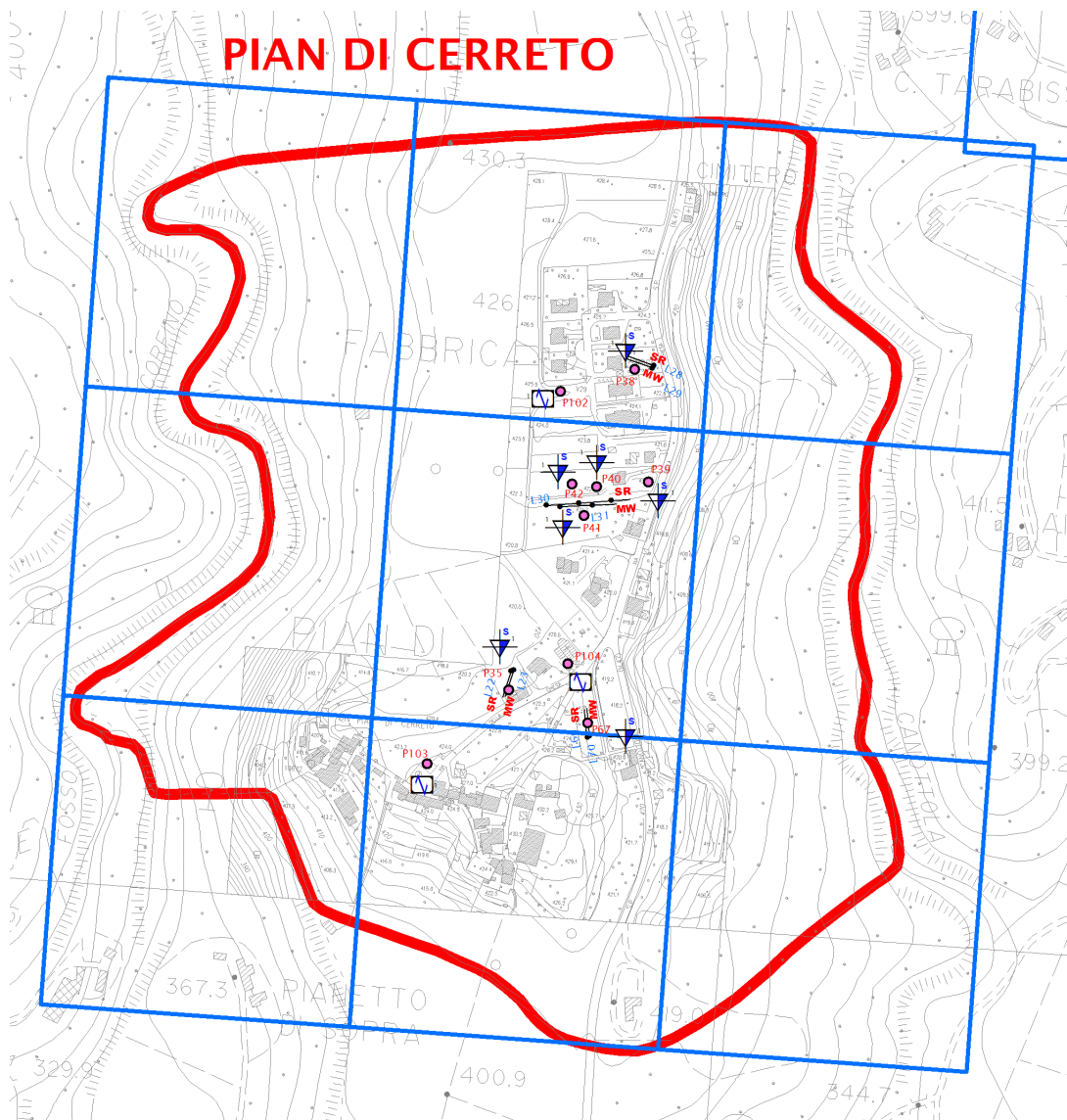
a	25	punteggi parziali
b	0,99	24,8
c	0,00	0,0
d	0,00	0,0
e	0,22	5,4
f	0,11	2,7
g	0,33	8,2
Tot	41,1	41,1 classe C

CLASSE	VALORI	INDICAZIONI
A	≥ 75%	Carta di livello 1 di ottima qualità
B	50%-74%	Sarebbero auspicabili migliorare almeno uno dei parametri
C	25%-49%	Sarebbero auspicabili ulteriori indagini che mancano o che sono valutate di scarsa qualità
D	≤ 25%	Carta di livello 1 di scarsa qualità: non risponde ai requisiti minimi richiesti da ICMS08 e Linee Guida Regione Toscana

**REGIONE  
TOSCANA**



(reticolato di celle quadrate con lato di 250 m su carta delle indagini)



**FOGLIO DI CALCOLO PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DELLA CARTA DEL LIVELLO DI MICROZONAZIONE SISMICA SULLA BASE DELLE INDAGINI PREGRESSE E/O NUOVE**

a	Parametro	4		
b	Carta Geologico tecnica	1	Anno Rilevamento	Progetto
	<i>Punteggi indicatori</i>	1	1	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
c	Sondaggi a distruzione	0,5	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0	0	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
d	Sondaggi a carotaggio continuo	1	Numero sondaggi	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0	0	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
e	Indagini geofisiche	0,5	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,66	0,66	0,66
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
f	Prove geotecniche	0,25	Numero prove	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,66	0,33	0
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33
g	Misure Frequenze	0,75	Numero misure	% celle occupate
	<i>Punteggi indicatori</i>	0,33	0,33	1
	<i>Pesi indicatori</i>	0,33	0,33	0,33

Inserire il valore *solo* nelle celle colorate in viola

**PIAN DI CERRETO**

Tabella 1 – Quadro riassuntivo dei parametri e dei relativi indicatori con l'attribuzione dei pesi e dei punteggi

Parametro (peso parametro)	Peso Indicatore	Indicatore	Valutazione indicatore (punteggio)			
			Nulla (0)	Bassa (0.33)	Media (0.66)	Alta (1)
Carta geologico-tecnica (1)	0.33	Anno rilevamento	No data	< 2000	Allegato piano urbanistico	> 2000
	0.33	Progetto	No data	Altro	Allegato piano urbanistico	Ad hoc
	0.33	Scala rilevamento	No data	50.000-26.000	25.000-11.000	10.000-2.000
Sondaggi a distruzione (0.50)	0.33	Numero di sondaggi a distruzione	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Sondaggi a carotaggio continuo (1)	0.33	Numero di sondaggi a carotaggio	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido	No data	1-5	6-10	>10
Indagini geofisiche (0.50)	0.33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da indagini	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (0.25)	0.33	Numero di prove	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da prove	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Percentuale prove che arrivano al substrato rigido	No data	1-33%	34-66%	>66%
Misure delle frequenze del sito (0.75)	0.33	Numero di misure	No data	1-5	6-10	>10
	0.33	Percentuale di celle occupate da misure	No data	1-33%	34-66%	>66%
	0.33	Classe di affidabilità misure (Albarelli et alii)*	No data	Classe A < 33%	Classe A 34-66%	Classe A >66%

\* D. Albarello, C. Cesi, V. Eubili, F. Guccini, E. Lunedi, E. Paolucci, D. Pileggi, L.M. Puzzilli - Il contributo della sismica passiva nella microzonazione di due macroaree abruzzesi. In stampa su Boll. Geofis. Teor. Appl.

a	25	punteggi parziali
b	0,99	24,8
c	0,00	0,0
d	0,00	0,0
e	0,33	8,2
f	0,08	2,0
g	0,41	10,3
Tot	45,2	45,2

classe C

CLASSE	VALORI	INDICAZIONI
A	≥ 75%	Carta di livello 1 di ottima qualità
B	50%-74%	Sarebbero auspicabili migliorare almeno uno dei parametri
C	25%-49%	Sarebbero auspicabili ulteriori indagini che mancano o che sono valutate di scarsa qualità
D	≤ 25%	Carta di livello 1 di scarsa qualità: non risponde ai requisiti minimi richiesti da ICMS08 e Linee Guida Regione Toscana

**REGIONE  
TOSCANA**





REGIONE TOSCANA  
COMUNE DI CASTIGLIONE DI GARFAGNANA  
PROVINCIA DI LUCCA



## **MICROZONAZIONE SISMICA**

Attuazione dell'art. 11 della Legge 24 giugno 2009, n. 77

### **Allegato 2**

#### **INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE NEL COMUNE DI CASTIGLIONE DI GARFAGNANA NELL'AMBITO DEL PROGRAMMA PER GLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 1**

**Relazione tecnica Pro.Geo. s.r.l. (Giugno 2021)**



REGIONE TOSCANA  
COMUNE DI CASTIGLIONE DI GARFAGNANA  
PROVINCIA DI LUCCA



**INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE NEL COMUNE DI  
CASTIGLIONE DI GARFAGNANA NELL'AMBITO DEL  
PROGRAMMA PER GLI STUDI DI MICROZONAZIONE  
SISMICA DI LIVELLO 1**

- Ord.CDPC. n.52/2013; Del.GRT n. 971 del 25/11/2013 -

**- RELAZIONE TECNICA -**

Committente:  
AMMINISTRAZIONE COMUNALE  
DI CASTIGLIONE DI GARFAGNANA (LU)

PRO.GEO. s.r.l.  
Dott. Geol. AMERINO PIERONI

**PRO.GEO. s.r.l.**  
Via Valmaira, 14  
55032 CASTELNUOVO GARFAGNANA (LU)  
Part. IVA: 01998560468

Collaboratori:  
Dott. Geol. Alessio Biagioni  
Dott. Geol. Francesca Alberta Banchieri  
Dott. Geol. Riccardo Biagioni

Rif. PG39\_2017

GIUGNO 2021

## INDICE

1. PREMESSA .....	4
2. PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE CON ONDE P E ONDE SH .....	5
2.1. La metodologia di indagine .....	5
2.2. Sistema di acquisizione .....	6
2.3. Elaborazione dei dati – Metodo reciproco generalizzato ( <i>GRM – Palmer, 1980</i> ) .....	10
2.4. Schema di acquisizione .....	11
2.5. Risultati delle prospezioni sismiche .....	12
3. ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI (MASW) .....	16
3.1. Le onde di superficie per lo studio del sottosuolo .....	16
3.2. Indagine MASW – proprietà delle onde di superficie .....	18
3.3. Descrizione generale della procedura MASW .....	19
3.4. Caratteristiche delle onde di Love e vantaggi derivati dalla loro analisi .....	20
3.5. Acquisizione delle onde di Rayleigh (componente ZVF) e delle onde di Love (componente THF) - Strumentazione .....	21
3.6. Analisi MASW in onde di Love (sorgente THF) .....	23
3.7. Tecnica e schema di acquisizione .....	24
3.8. Risultati delle prove sismiche MASW .....	25
4. TOMOGRAFIA DI RESISTIVITÀ ELETTRICA (ERT) .....	28
4.1. Generalità .....	28
4.2. La metodologia di indagine .....	29
4.3. Strumentazione utilizzata .....	30
4.4. Modalità di acquisizione dei dati di sezioni geoelettriche 2D .....	31
4.5. Elaborazione e restituzione dei dati .....	32
4.6. Schema di acquisizione e scopo dell'indagine .....	33
4.7. Risultati della tomografia elettrica .....	33
5. MISURE DI MICROTREMORE A STAZIONE SINGOLA (HVSr) .....	36
5.1. Generalità .....	36
5.2. Cenni sulla metodologia della tecnica HVSr .....	36
5.3. Strumentazione .....	38
5.4. Elaborazione delle misure e restituzione dei dati .....	39
5.5. Risultati delle misure HVSr .....	40



## **Elenco degli elaborati allegati**

- all. 1.1: Planimetrie di ubicazione delle indagini (Castiglione capoluogo):
  - a) Indagini sismiche P/SH, MASW, HVSR e geoelettriche totali (scala 1:5.000);
  - b) Indagini sismiche P/SH (ST6a-b), MASW (M1) e HV10 (scala 1:1.000);
  - c) Indagine geoelettrica (GE-1) e HVSR (HV1-HV5) (scala 1:1.000).
- all. 1.2: Planimetria di ubicazione delle indagini HVSR (Ceraeto) (scala 1:5.000)
- all. 1.3: Planimetrie di ubicazione delle indagini (Campori):
  - a) Indagini sismiche P/SH, MASW e HVSR totali (scala 1:5.000);
  - b) Indagini sismiche P/SH (ST7), MASW (M2) e HV18 (scala 1:1.000).
- all. 1.4: Planimetria di ubicazione delle indagini HVSR (Pian di Cerreto) (scala 1:5.000)
- all. 1.5: Planimetria di ubicazione delle indagini HVSR (Chiozza) (scala 1:5.000)
- all. 2.1: Prospezione sismica a rifrazione con onde P (ST6a – Castiglione capoluogo):
  - a) Tabelle risultati;
  - b) Sismogrammi;
  - c) Grafico delle dromocrone e Profilo sismico GRM;
  - d) Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni.
- all. 2.2: Prospezione sismica a rifrazione con onde SH (ST6a – Castiglione capoluogo):
  - a) Tabelle risultati;
  - b) Sismogrammi;
  - c) Grafico delle dromocrone e Profilo sismico GRM;
  - d) Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni.
- all. 2.3: Prospezione sismica a rifrazione con onde P (ST6b – Castiglione capoluogo):
  - a) Tabelle risultati;
  - b) Sismogrammi;
  - c) Grafico delle dromocrone e Profilo sismico GRM;
  - d) Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni.
- all. 2.4: Prospezione sismica a rifrazione con onde SH (ST6b – Castiglione capoluogo):
  - a) Tabelle risultati;
  - b) Sismogrammi;
  - c) Grafico delle dromocrone e Profilo sismico GRM;
  - d) Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni.
- all. 2.5: Prospezione sismica a rifrazione con onde P/SH (ST6 – Castiglione capoluogo):  
Sezioni sismiche di correlazione ST6a-ST6b.



- all. 2.6: Prospezione sismica a rifrazione con onde P (ST7 – Campori):
- a) Tabelle risultati;
  - b) Sismogrammi;
  - c) Grafico delle dromocrone e Profilo sismico GRM;
  - d) Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni.
- all. 2.7: Prospezione sismica a rifrazione con onde SH (ST7 – Campori):
- a) Tabelle risultati;
  - b) Sismogrammi;
  - c) Grafico delle dromocrone e Profilo sismico GRM;
  - d) Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni.
- all. 3.1: Prova sismica MASW (M1 – Castiglione capoluogo):  
Sismogramma – spettro di velocità – modello di velocità ricavato.
- all. 3.2: Prova sismica MASW (M2 – Campori):  
Sismogramma – spettro di velocità – modello di velocità ricavato.
- all. 4: Prospezione geoelettrica tomografica GE1:  
Pseudosezioni di resistività apparenti misurate/calcolate – modello di resistività reali del terreno – interpretazione del modello di resistività.
- all. 5: Schede di elaborazione delle misure di microtremore ambientale (metodo HVSR).
- all. 6: Documentazione fotografica.

## 1. PREMESSA

La presente relazione tecnica riguarda le indagini geofisiche eseguite per conto dell'AMMINISTRAZIONE COMUNALE DI CASTIGLIONE DI GARFAGNANA (LU), sul territorio comunale, nell'ambito del programma di Studi di Microzonazione Sismica di livello 1 (*Ord.C.D.P.C. n. 52/2013; Del.G.R.T. n. 971 del 25/11/2013*); tali indagini sono state svolte nel capoluogo e nelle frazioni di Cerageto, Campori, Pian di Cerreto e Chiozza, secondo il seguente programma:

- esecuzione di n. 3 **prospezioni sismiche a rifrazione** con onde P e SH (24 canali):

<i>stesa:</i>	<i>data:</i>	<i>località:</i>	<i>lunghezza:</i>	<i>interasse:</i>	<i>onde:</i>	
ST6a	21.04.2017	Castiglione	115,0 m	5,0 m	P/SH	(all. 1.1a-b)
ST6b	21.04.2017	Castiglione	115,0 m	5,0 m	P/SH	(all. 1.1a-b)
ST7	20.09.2018	Campori	69,0 m	3,0 m	P/SH	(all. 1.3a-b)

Le tre stese sono state così denominate, al fine di dare continuità con le omologhe indagini geofisiche già realizzate nel Comune di Castiglione di Garfagnana nell'ambito del Programma VEL; le stesse indagini sono state elaborate con tecnica **GRM** (*Generalized Reciprocal Method - Palmer, 1980*);

- esecuzione di n. 2 **prove sismiche MASW** <sup>(1)</sup> (24 canali), con acquisizione sia della componente verticale (sorgente ZVF) delle onde di Rayleigh, sia delle onde di Love (sorgente THF) (*cfr. § 3.1*), allo scopo di poter analizzare entrambi i tipi di onda:

<i>stesa:</i>	<i>data:</i>	<i>località:</i>	<i>lunghezza:</i>	<i>interasse:</i>	<i>componenti:</i>	
M1	02.05.2017	Castiglione	46,0 m	2,0 m	ZVF/THF	(all. 1.1a-b)
M2	20.09.2018	Campori	46,0 m	2,0 m	ZVF/THF	(all. 1.3a-b)

In entrambi i casi, tenuto conto della qualità migliore delle registrazioni eseguite in onde di Love, si è scelto di restituire i risultati delle prove MASW solamente per queste ultime (*cfr. § 3.8*);

- periodo 08.09.2017 – 27.02.2019: esecuzione di n. 26 **misure di microtremore ambientale a stazione singola** (metodo **HVSR**) <sup>(2)</sup>, contraddistinte con le sigle da HV1 a HV26 (*all. 1*);

- esecuzione di n. 1 **prospezione geoelettrica tomografica (ERT)** <sup>(3)</sup>, mediante dispositivo multielettrodo (*array*) di tipo *polo-dipolo* (48 elettrodi):

<i>stesa:</i>	<i>data:</i>	<i>località:</i>	<i>lunghezza:</i>	<i>interasse:</i>	
GE1	08.09.2017	Castiglione	141,0 m	3,0 m	(all. 1.1c)

---

<sup>(1)</sup> Multichannel Analysis of Surface Waves = Analisi Multicanale delle Onde Superficiali.

<sup>(2)</sup> Horizontal to Vertical Spectral Ratio = Rapporto Spettrale tra componenti Orizzontale e Verticali (H/V).

<sup>(3)</sup> Electrical Resistivity Tomography = Tomografia di Resistività Elettrica.

## **2. PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE CON ONDE P E ONDE SH**

### **2.1. La metodologia di indagine**

Nella prospezione sismica a rifrazione si sfrutta la diversa velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P o “di compressione e dilatazione”) e delle onde trasversali (onde SH o “di taglio”) per determinare lo spessore e l’andamento dei diversi strati del terreno.

La prospezione consiste nel generare nel terreno un’onda sismica di compressione o di taglio, utilizzando una sorgente di energia (colpo di mazza o di maglio, cannoncino sismico, ecc.) e nel misurare il tempo impiegato da questa a compiere il percorso nel sottosuolo, dal punto di energizzazione fino agli apparecchi di ricezione (*geofoni*), seguendo le leggi di rifrazione (Legge di Snell), cioè considerando le rifrazioni che l’onda stessa subisce in corrispondenza delle superfici di separazione tra due strati sovrapposti aventi densità (ovvero moduli di elasticità) crescenti con la profondità.

L’apparecchiatura necessaria per le prospezioni è costituita da una serie di ricevitori (*geofoni*) che vengono spazati lungo un determinato allineamento (*base sismica*) e da un cronografo che registra l’istante di inizio della perturbazione elastica ed i tempi di primo arrivo delle onde a ciascun geofono.

Così, osservando i primi arrivi su punti posti a distanze diverse dalla sorgente energizzante, è possibile costruire una curva tempo-distanza (*dromocrona*) rappresentante la variazione del minimo percorso in funzione del tempo.

Utilizzando metodi analitici si ricavano quindi le velocità delle onde elastiche longitudinali ( $V_p$ ) o trasversali ( $V_s$ ), risalendo allo spessore dei terreni attraversati.

La velocità di propagazione delle onde elastiche nel sottosuolo dipende da diversi fattori; in uno stesso tipo di roccia, ad esempio, la velocità può diminuire od aumentare con la profondità in funzione del grado di alterazione e/o fratturazione.

Sensibili variazioni, inoltre, si possono avere nei terreni incoerenti saturi; la velocità delle onde P, infatti, è fortemente influenzata dalla presenza della falda e dal grado di saturazione.

Questo comporta che litotipi differenti possono avere uguali velocità delle onde P, per cui non necessariamente l’interpretazione sismostratigrafica corrisponderà con la reale situazione geologico-stratigrafica.

Per il metodo sismico a rifrazione, inoltre, valgono le seguenti considerazioni:

- un livello a velocità intermedia, interposto fra uno strato superiore caratterizzato da velocità minore ed uno inferiore caratterizzato da velocità assai più elevata, può risultare non rilevabile, poiché mascherato dagli “arrivi” dello strato sottostante (effetto dello strato nascosto e/o “zona oscura”);

- un determinato orizzonte può non essere individuato se la velocità di trasmissione delle onde P al suo interno risulterà inferiore a quella dei livelli sovrastanti (effetto della inversione della velocità);

- un livello di spessore limitato rispetto al passo dei geofoni può non essere rilevabile;

- aumentando la spaziatura dei geofoni (e quindi la lunghezza della linea sismica), aumenta la profondità di investigazione, ma può ridursi la precisione nella determinazione della profondità e dello spessore dei vari orizzonti.

Il dato sismico può raggiungere una maggiore precisione ed una significatività più elevata se si dispone di sondaggi di taratura.

## **2.2. Sistema di acquisizione**

L'acquisizione dei dati in campagna è stata eseguita utilizzando la seguente strumentazione:

- sismografo;
- sorgente energizzante;
- trigger;
- apparecchiatura di ricezione (24 geofoni).

### ***Sismografo***

Lo strumento utilizzato per la presente indagine è un sismografo GEOMETRICS GEODE a 24 canali, le cui caratteristiche tecniche sono di seguito riportate:

Registrazione:	Configurabile da 3 a 24 canali
Risoluzione:	24 bit
Larghezza di banda di ingresso:	1,75 Hz – 20.000 Hz
Intervalli di campionamento:	Selezionabili da 0,02 msec a 16 msec
Range dinamico di sistema:	144 dB (110 dB misurato a 2 msec)
Distorsione:	0,0005%
Accuratezza del trigger:	1/32 del passo di campionamento
Alimentazione:	Batterie esterne a 12 volt
Unità centrale di controllo:	Collegamento con PC notebook



**Fig. 1.** Sismografo GEOMETRICS GEODE

### ***Sorgente energizzante***

Per le prospezioni sismiche in questione sono state utilizzate le seguenti sorgenti energizzanti:

<b><i>TIPO DI ONDA</i></b>	<b><i>SORGENTE DI ENERGIZZAZIONE</i></b>
onde P longitudinali (di compressione e dilatazione)	cannoncino sismico
onde SH trasversali (onde di taglio)	traversina in legno solidale al terreno e maglio di battuta da 30 o 15 kg



**Fig. 2:** Cannoncino industriale (calibro 8) per la generazione delle onde longitudinali P



Per la generazione delle onde P (longitudinali) è stato utilizzato un cannoncino sismico (calibro 8 industriale), la testa del quale viene inserita in un preforo verticale, curando che la testa del cannoncino stesso sia ben solidale con il terreno (*fig. 2*); il contrasto al rinculo è garantito da una piastra saldata allo stelo ed ancorata al suolo.

Per la generazione delle onde SH (trasversali) è stata utilizzata una traversina in legno solidale al terreno; l'accoppiamento della traversina con il terreno deve essere curato con particolare attenzione, caricando la traversina stessa con il peso di un automezzo (*fig. 3-4*).

La traversina viene colpita con un maglio battente del peso di 15 o 30 kg, fissato a pendolo, alternativamente su entrambi i lati (battute destra e sinistra) (*fig. 3-4*); in questo modo verranno generate prevalentemente onde di taglio polarizzate su un piano orizzontale (onde SH), che si propagheranno perpendicolarmente alla traversina in direzione dello stendimento di geofoni e saranno visibili dagli stessi geofoni aventi l'asse posto orizzontalmente e parallelamente alla traversina.

Assieme alle onde trasversali (SH) saranno comunque generate e parzialmente registrate dai geofoni anche altri tipi di onde, in particolare onde compressive (P). Per meglio evidenziare i primi arrivi delle onde SH, attenuando contemporaneamente quelli delle onde P generate, è possibile utilizzare il metodo *cross-over*, utilizzando la funzione di inversione di polarità consentita dal sismografo Geometrics GEODE, ovvero facendo la differenza tra battuta destra e sinistra con polarità invertita; in questo modo si riduce sensibilmente la componente compressiva presente nel segnale, mentre viene esaltato il primo arrivo delle onde SH.

Un'altra tecnica di acquisizione e successiva analisi dei dati registrati consiste, viceversa, nell'acquisire due tracce separate relative alle battute destra e sinistra, senza invertirne la polarità e successivamente sovrapporre in un unico sismogramma le forme d'onda relative alle due battute trasversali; in questo caso il primo arrivo che avrà direzione esattamente opposta nelle due registrazioni sarà quello legato alle onde di taglio (SH).

### ***Trigger***

Il trigger utilizzato consiste in un circuito elettrico che viene chiuso mediante un apparecchio starter (geofono starter) nell'istante in cui il sistema energizzante genera la perturbazione sismica, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso della durata di qualche secondo, che viene inviato al sensore collegato al sistema di acquisizione dati.



**Fig. 3:** Sistema di energizzazione per onde trasversali SH (con maglio da 30 kg)



**Fig. 4:** Sistema di energizzazione per onde trasversali SH (con maglio da 15 kg)

### ***Apparecchiatura di ricezione***

Per la ricezione delle onde P sono stati utilizzati 24 geofoni verticali, mentre per le onde SH sono stati utilizzati 24 geofoni orizzontali, entrambi i tipi con frequenza propria di 4,5 Hz.

Le quote dei geofoni sono state rilevate mediante apposita livellazione.

### **2.3. Elaborazione dei dati – Metodo reciproco generalizzato (GRM – Palmer, 1980)**

Il metodo reciproco generalizzato (*Generalized Reciprocal Method – GRM – Palmer, 1980*) consente di ricostruire la morfologia sepolta di più rifrattori sovrapposti, caratterizzati da andamento irregolare, inclinazioni degli strati anche superiori a 20° e velocità sismiche variabili lateralmente.

Tale metodo si basa sui tempi di primo arrivo da energizzazioni coniugate, effettuate cioè da parti opposte del profilo sismico.

Gli aspetti di base dell'elaborazione sono:

- il calcolo della funzione analisi-velocità, dalla quale si ottiene la velocità del rifrattore;
- il calcolo della funzione tempo-profondità, che è una misura della profondità del rifrattore, espressa in unità di tempo.

L'analisi sismica si basa sulla determinazione del tempo di tragitto delle onde sismiche tra due geofoni separati da una distanza variabile XY, che entra nel calcolo delle velocità di propagazione delle onde nel rifrattore e della sezione tempo-profondità.

Il problema consiste nel calcolare con precisione la distanza XY ottimale per la quale i segmenti dei raggi che viaggiano verso l'alto e arrivano a ciascun geofono, emergano quasi dallo stesso punto del rifrattore. Ciò permette di valutare tutte le eventuali variazioni laterali di velocità del rifrattore, e quindi di ricostruire anche morfologie complesse.

Riassumendo, il metodo GRM si basa su due passaggi fondamentali:

1. Definizione delle funzioni analisi-velocità e tempo-profondità.
2. Stima del valore ottimale della distanza XY.

L'elaborazione dei dati si sviluppa attraverso le seguenti fasi:

1. determinazione dei primi arrivi ("picking") attraverso il software **WinSism V.14** della *W-GeoSoft*, operata prima in automatico e successivamente con aggiustamenti manuali, con particolare attenzione alle fasi d'onda ed alla loro evoluzione; tale programma permette di convertire i dati registrati dal Geode, dal formato seg2 (.dat) al formato SU (*seismic unix*) ed operare direttamente su tali *dataset* per la definizione dei tempi di primo arrivo ed il successivo tracciamento delle dromocrone (*travel-time curves*);



2. inserimento dei dati ed interpretazione (“processing”), utilizzando sempre il programma di calcolo **WinSism V.14**, attraverso i seguenti passaggi:

- determinazione delle velocità sulle dromocrone e delle profondità dei vari rifrattori, al di sotto dei punti di energizzazione (*shot*), con il metodo dei “tempi intercetti”;
- calcolo dello spessore degli orizzonti sotto tutti i geofoni, mediante interpolazione, dapprima con il metodo ABC (*delay time method*) e successivamente, attraverso la definizione delle funzioni analisi-velocità e tempo-profondità e la scelta del valore ottimale per XY, con il metodo GRM, del quale il metodo ABC rappresenta un caso particolare con  $XY = 0$  <sup>(4)</sup>.

3. “output” dei tabulati:

- dati di scoppio (ascissa e quota dei geofoni, ascissa e quota dei punti di energizzazione, tempi di primo arrivo, tempi “intercetti”);
- velocità e profondità calcolate per ciascun strato individuato.

4. “output” dei seguenti grafici, mediante software **ZWCAD**:

- sismogrammi registrati, dromocrone sismiche misurate, profilo sismico GRM mostrante la profondità dei rifrattori e le variazioni laterali delle velocità sismiche.

## 2.4. Schema di acquisizione

### Prospezioni sismiche ST6a-ST6b (Castiglione capoluogo)

Per ciascuna prospezione è stato scelto un interasse tra i geofoni pari a 5,0 m, per una lunghezza complessiva di 115,0 metri (*all. 1.1b*).

I due stendimenti sono stati eseguiti in successione tra loro, facendo coincidere i geofoni G1 e G2 della stesa ST6a, rispettivamente con i geofoni G23 e G24 della stesa ST6b (*all. 1.1b-all. 2.5*).

In entrambi i casi sono state effettuate 9 registrazioni in onde P ed onde SH, con 9 punti di energizzazione posizionati, con riferimento al tiro estremo (shot 2), assunto come punto zero, secondo il seguente schema (*all. 2.1-2.4*):

- due tiri esterni (shot 1 e shot 9), ubicati rispettivamente alla distanza di – 27,5 m dallo shot 2 (– 30,0 m dal geofono G1) e + 27,5 m dallo shot 8 (+ 30,0 m dal geofono G24);
- due tiri estremi (shot 2 e shot 8) ubicati rispettivamente alla distanza di – 2,5 m dal geofono G1 e + 2,5 m dal geofono G24;
- cinque tiri intermedi, ubicati, ogni 20 metri, rispettivamente fra le seguenti coppie di geofoni: G4/G5, G8/G9, G12/G13, G16/G17 e G20/G21.

---

<sup>(4)</sup> Tale semplificazione comporta significative limitazioni del metodo ABC (*delay time*) rispetto al GRM; la morfologia dei rifrattori può avere andamento irregolare, ma i tratti singoli non possono avere inclinazioni degli strati superiori a 20°. Non si possono altresì riconoscere variazioni laterali di velocità sismiche.

### Prospezione sismica ST7 (Campori)

Per la prospezione sismica ST7 è stato scelto un interasse tra i geofoni pari a 3,0 m, per una lunghezza complessiva di 69,0 metri (*all. 1.3b*).

Anche in questo caso sono state effettuate 9 registrazioni in onde P ed onde SH, con 9 punti di energizzazione posizionati, con riferimento al tiro estremo (shot 2), assunto come punto zero, secondo il seguente schema (*all. 2.6, 2.7*):

- due tiri esterni (shot 1 e shot 9), ubicati rispettivamente alla distanza di – 13,5 m dallo shot 2 (– 15,0 m dal geofono G1) e + 13,5 m dallo shot 8 (+ 15,0 m dal geofono G24);
- due tiri estremi (shot 2 e shot 8) ubicati rispettivamente alla distanza di – 1,5 m dal geofono G1 e + 1,5 m dal geofono G24;
- cinque tiri intermedi, ubicati, ogni 12 metri, rispettivamente fra le seguenti coppie di geofoni: G4/G5, G8/G9, G12/G13, G16/G17 e G20/G21.

In tutti i casi, la qualità delle registrazioni ottenute, sia per le onde P che per le onde SH, è stata generalmente buona e tale da consentire la sicura individuazione dei primi arrivi sui sismogrammi (*all. 2.1b-2.7b*).

## **2.5. Risultati delle prospezioni sismiche**

### Prospezione sismica ST6a (Castiglione capoluogo)

Negli *allegati 2.1c-d* vengono riportati i **profili sismici** GRM mostranti le profondità dei rifrattori e le variazioni laterali delle velocità sismiche relative alle **onde P**; dalla loro analisi si può evidenziare la seguente distinzione tra due strati:

- **strato 1**: dalla superficie fino a profondità variabili da **6,5÷7,5** m dal p.c. nella porzione di stesa compresa tra i geofoni G1 e G10, a massimi di circa **8,0÷9,0** m dal p.c. riscontrati nella restante parte della stesa, andando verso l'estremo G24, è presente un orizzonte caratterizzato da velocità (Vp) mediamente comprese tra 490 e 600 m/sec, correlabili con lo strato più superficiale di *depositi alluvionali e colluviali di paleovalli sciolti/poco addensati*;

- **strato 2**: caratterizzato da velocità (Vp) variabili da circa 1.600÷1.700 m/sec, ai lati della stesa, a massimi di circa 2.200 m/sec, riscontrati sulla maggior parte della stesa, compresa tra i geofoni G5 e G19; tale orizzonte, correlabile con la presenza di *depositi fluvio-lacustri da poco a mediamente consistenti*, appartenenti alla formazione dei *conglomerati di Barga (PLB)*, si rinviene, per spessore indefinito, a profondità superiori a **6,5÷7,5** m dal p.c. tra i geofoni G1 e G10 ed a **8,0÷9,0** m dal p.c. nella restante porzione di stesa.

Dal confronto con le velocità delle onde SH riscontrate nel medesimo orizzonte, si può supporre che questo sia interessato da probabile presenza di falda acquifera (terreni saturi).

Per quanto riguarda i profili GRM relativi alle profondità dei rifrattori ed alle velocità delle *onde SH* (all. 2.2c-d), da essi possiamo ricavare la seguente distinzione:

- **strato 1:** dalla superficie fino a profondità variabili da minimi di **6,0÷7,5** m dal p.c. riscontrati tra i geofoni G1 e G10, a massimi di circa **9,0÷10,5** m dal p.c. nella restante porzione di stesa, andando verso l'estremo G24, è presente un orizzonte caratterizzato da velocità ( $V_{sh}$ ) comprese tra 170 e 250 m/sec, correlabili con i *depositi alluvionali e colluviali di paleovalli sciolti/poco addensati*;

- **strato 2:** caratterizzato da velocità ( $V_{sh}$ ) mediamente comprese tra 470 e 600 m/sec, correlabili con la presenza dei *depositi fluvio-lacustri da poco a mediamente consistenti*, appartenenti alla formazione dei *conglomerati di Barga (PLB)*; tale orizzonte si riscontra, per spessore indefinito, a profondità superiori a **6,0÷7,5** m dal p.c. tra i geofoni G1 e G10 ed a **9,0÷10,5** m dal p.c. nella restante porzione di stesa, in buon accordo con quanto ricavato dalla prova sismica MASW M1 (cfr. § 3.8).

Nel complesso, la prospezione sismica a rifrazione ST6a non ha individuato rifrattori oltre i 15÷20 m di profondità, corrispondente all'incirca alla massima profondità indagata.

Nell'ambito di questo spessore la stessa prospezione non ha individuato un substrato sismico di riferimento caratterizzato da  $V_s > 800$  m/sec.

#### Prospezione sismica ST6b (Castiglione capoluogo)

Negli *allegati 2.3c-d* vengono riportati i **profili sismici** GRM mostranti le profondità dei rifrattori e le variazioni laterali delle velocità sismiche relative alle *onde P*; dalla loro analisi si può evidenziare la seguente distinzione tra due strati:

- **strato 1:** dalla superficie fino a profondità variabili da circa **6,0** m a **8,2** m dal p.c. sull'intera lunghezza della stesa, è presente un orizzonte caratterizzato da velocità ( $V_p$ ) mediamente comprese tra 530 e 670 m/sec, correlabili con lo strato più superficiale di *depositi alluvionali e colluviali di paleovalli sciolti/poco addensati*;

- **strato 2:** caratterizzato da velocità ( $V_p$ ) mediamente comprese tra circa 1.700 e 2.000 m/sec, correlabili con la presenza di *depositi fluvio-lacustri da poco a mediamente consistenti*, appartenenti alla formazione dei *conglomerati di Barga (PLB)*; tale orizzonte si rinviene, per spessore indefinito, a profondità superiori a **6,0÷8,2** m dal p.c. sull'intera lunghezza della stesa.

Dal confronto con le velocità delle onde SH riscontrate nel medesimo orizzonte, anche in questo caso, si può supporre che questo sia interessato da probabile presenza di falda acquifera (terreni saturi).

Per quanto riguarda i profili GRM relativi alle profondità dei rifrattori ed alle velocità delle **onde SH** (all. 2.4c-d), da essi possiamo ricavare la seguente distinzione:

- **strato 1:** dalla superficie fino a profondità variabili da circa **8,5 m** a **10,0 m** dal p.c. sull'intera lunghezza della stesa, è presente un orizzonte caratterizzato da velocità (Vsh) mediamente comprese tra 180 e 250 m/sec, correlabili con i *depositi alluvionali e colluviali di paleovalli sciolti/poco addensati*;

- **strato 2:** caratterizzato da velocità (Vsh) comprese tra 460 e 725 m/sec e correlabile con i *depositi fluvio-lacustri da poco a mediamente consistenti*, appartenenti alla formazione dei *conglomerati di Barga (PLB)*; tale orizzonte si riscontra, per spessore indefinito, a profondità superiori a **8,5÷10,0 m** dal p.c. sull'intera lunghezza della stesa, in buon accordo con quanto ricavato dalla prova sismica MASW M1 (cfr. § 3.8).

Nel complesso, anche la prospezione sismica a rifrazione ST6b non ha individuato rifrattori oltre i 15÷20 m di profondità, corrispondente all'incirca alla massima profondità indagata.

Nell'ambito di questo spessore la stessa prospezione non ha individuato un substrato sismico di riferimento caratterizzato da  $V_s > 800$  m/sec.

In allegato 2.5 vengono mostrati i profili sismici di correlazione tra i due stendimenti ST6a e ST6b, relativi sia alle onde P che alle onde SH.

#### Prospezione sismica ST7 (Campori)

Negli allegati 2.6c-d vengono riportati i **profili sismici** GRM mostranti le profondità dei rifrattori e le variazioni laterali delle velocità sismiche relative alle **onde P**; dalla loro analisi si può evidenziare la seguente distinzione tra due strati:

- **strato 1:** dalla superficie fino a profondità variabili da **4,0 m** a **6,0 m** circa dal p.c. sull'intera lunghezza della stesa, è presente un orizzonte caratterizzato da velocità (Vp) variabili da 400 a 550 m/sec, correlabili con lo strato più superficiale di *depositi alluvionali terrazzati (bn)*, prevalentemente *sabbioso-ghiaiosi, sciolti/poco addensati*;

- **strato 2:** caratterizzato da velocità (Vp) mediamente comprese tra circa 1.600 e 2.100 m/sec, correlabili con la presenza di *depositi fluvio-lacustri da poco a mediamente consistenti*, appartenenti alla formazione delle *argille e sabbie di Fornaci di Barga (AFB)*; tale orizzonte si rinviene, per spessore indefinito, a profondità superiori a **4,0÷6,0 m** dal p.c. sull'intera lunghezza della stesa.

Per quanto riguarda i profili GRM relativi alle profondità dei rifrattori ed alle velocità delle *onde SH* (all. 2.7c-d), da essi possiamo ricavare la seguente distinzione:

- **strato 1:** dalla superficie fino a profondità variabili da **4,5** m a **6,0** m circa dal p.c. sull'intera lunghezza della stesa, è presente un orizzonte caratterizzato da velocità (Vsh) mediamente comprese tra 200 e 270 m/sec, correlabili con i *depositi alluvionali terrazzati (bn)*, prevalentemente *sabbioso-ghiaiosi, sciolti/poco addensati*;

- **strato 2:** caratterizzato da velocità (Vsh) dell'ordine dei 600÷620 m/sec, correlabili con la presenza dei *depositi fluvio-lacustri da poco a mediamente consistenti*, appartenenti alla formazione delle *argille e sabbie di Fornaci di Barga (AFB)*; tale orizzonte si riscontra, per spessore indefinito, a profondità superiori a **4,5÷6,0** m dal p.c. sull'intera lunghezza della stesa, in buon accordo con quanto ricavato dalla prova sismica MASW M2 (*cfr. § 3.8*).

Nel complesso, la prospezione sismica a rifrazione ST7 non ha individuato rifrattori oltre i 10÷15 m di profondità, corrispondente all'incirca alla massima profondità indagata.

Nell'ambito di questo spessore la stessa prospezione non ha individuato un substrato sismico di riferimento caratterizzato da  $V_s > 800$  m/sec.

### 3. ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI (MASW)

#### 3.1. Le onde di superficie per lo studio del sottosuolo

Le onde di superficie che interessano chi si occupa di studi su terra ferma sono due: le onde di Rayleigh e quelle di Love, dai nomi di coloro i quali, per primi, ne hanno previsto e descritto il carattere.

Tra le varie caratteristiche delle onde superficiali, per brevità e snellezza, in questa sede basterà ricordare che:

- la loro ampiezza decrementa in modo esponenziale con la profondità e la loro propagazione interessa quindi un limitato spessore di terreno rispetto alle onde di corpo (longitudinali P e trasversali S);

- rispetto alle stesse onde di corpo la loro ampiezza è notevolmente maggiore e per questo motivo dominano tipicamente qualsiasi *dataset sismico* e spesso vengono indicate con l'espressione *ground roll*;

- le onde di Rayleigh si muovono su un piano radiale secondo un moto detto *retrogrado* ed hanno pertanto sia una componente verticale, sia una componente radiale, quest'ultima parallela alla direzione di propagazione dell'onda stessa;

- le onde di Love, viceversa, si muovono solamente su un piano orizzontale, con un'oscillazione la cui direzione è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda.

Da quanto sopra detto, ne consegue che le onde di Love possono essere acquisite utilizzando solamente geofoni orizzontali disposti perpendicolarmente allo stendimento sismico, mentre le onde di Rayleigh possono essere acquisite sia con geofoni verticali (in questo modo si registra chiaramente la componente verticale), sia con geofoni orizzontali disposti parallelamente allo stendimento sismico (in maniera tale da registrare la componente radiale delle stesse).

Per quanto riguarda la generazione delle onde di superficie, va da sé che il tipo di sorgente dovrà essere differente, se per acquisire le onde di Love sarà necessaria una sorgente di taglio (ad esempio una traversina di legno colpita da una mazzata), nel caso delle onde di Rayleigh potrà essere utilizzata sia una forza verticale (la classica mazzata verticale), sia una sorgente esplosiva (es. cannoncino sismico).

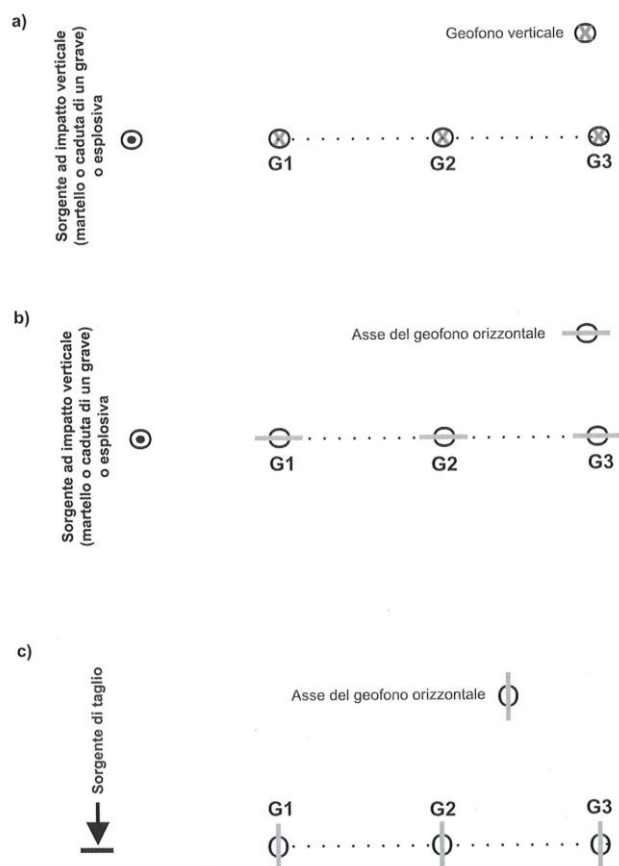
In Figura 5 è riportato uno schema che illustra il modo di gestire i geofoni e le sorgenti a seconda del tipo di componente delle onde superficiali che si vuole acquisire (*fonte: Dal Moro G., 2012* <sup>(5)</sup>); la successiva Tabella 3.1, infine, sintetizza quanto sopra descritto introducendo un acronimo, secondo la convenzione adottata da Herrmann (2003) <sup>(6)</sup>, molto utile sia

---

<sup>(5)</sup> Dal Moro G. (2012) – *Onde di superficie in geofisica applicata – acquisizione ed analisi secondo le tecniche MASW e HVSR*. Dario Flaccovio editore.

<sup>(6)</sup> Herrmann R.B. (2003) – *Computer programs in seismology*. Open file (<http://www.eas.slu.edu/People/RBHerrmann/CPS330.html>).

nell'identificazione delle componenti di un sismogramma sintetico, sia per la denominazione dei file di acquisizione di campagna (*dataset*).



**Fig. 5. Acquisizione dei dati per analisi MASW (visione dall'alto):** a) geofoni verticali e sorgente verticale o esplosiva (componenti ZVF e ZEX – onde di Rayleigh); b) geofoni orizzontali in assetto radiale e sorgente verticale o esplosiva (componenti RVF e REX – onde di Rayleigh); c) geofoni orizzontali in assetto trasversale e sorgente di taglio (componente THF – onde di Love). Si veda anche la Tabella 3.1.

Acronimo	Sorgente	Geofono	Utilità
ZVF	Forza Verticale (Vertical Force): mazzata o caduta di grave	Verticale (Z) (Fig. 1a)	Acquisizione componente verticale onde di Rayleigh
ZEX	Sorgente esplosiva (EXplosive)	Verticale (Z) (Fig. 1a)	Acquisizione componente verticale onde di Rayleigh
RVF	Forza Verticale (Vertical Force): mazzata o caduta di grave	Orizzontale in assetto Radiale (R) (Fig. 1b) asse parallelo allo stendimento	Acquisizione componente radiale onde di Rayleigh
REX	Sorgente esplosiva (EXplosive)	Orizzontale in assetto Radiale (R) (Fig. 1b) asse parallelo allo stendimento	Acquisizione componente radiale onde di Rayleigh
THF	Sorgente Trasversale (o di taglio) (Horizontal Force)	Orizzontale in assetto Trasversale (T) (Fig. 1c) asse perpendicolare allo stendimento	Acquisizione onde di Love

**Tabella 3.1. Cinque possibili acquisizioni utili per analisi MASW:** la prima lettera dell'acronimo indica il tipo e l'assetto del geofono, la seconda e la terza il tipo di sorgente (Herrmann, 2003)



### 3.2. Indagine MASW – proprietà delle onde di superficie

L'acronimo MASW sta per *Multichannel Analysis of Surface Waves* (Analisi Multicanale delle Onde Superficiali); occorre quindi tenere presente che sia le onde di Rayleigh, sia le onde di Love sono onde di superficie ed è quindi importante non identificare l'indagine MASW con l'analisi delle sole onde di Rayleigh, ma sapere che la stessa MASW può essere eseguita utilizzando anche le onde di Love (*si veda: Dal Moro G., 2012; § 3.1*).

Nella procedura MASW, quindi, si analizza la propagazione delle onde di superficie; più specificatamente si analizza la dispersione delle onde di superficie, ovvero il fatto che frequenze diverse (e quindi lunghezze d'onda diverse) viaggiano a velocità diverse.

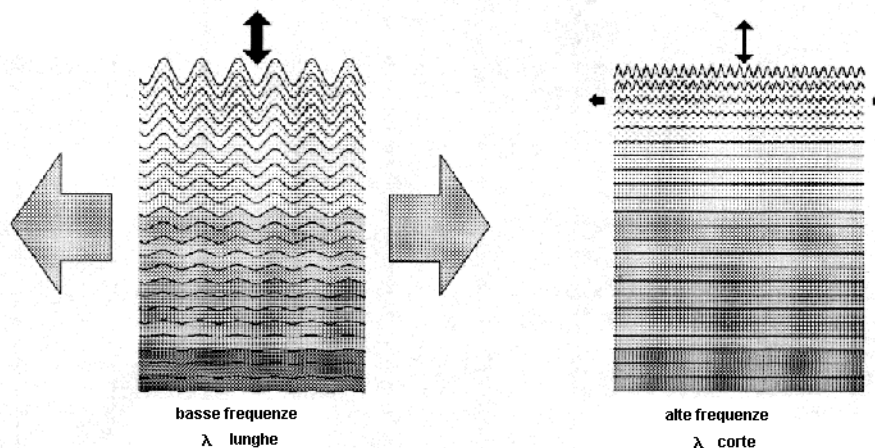
Il principio di base è piuttosto semplice: ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga.

Questa proprietà si chiama dispersione.

In particolare le lunghezze d'onda più ampie (cioè le frequenze più basse) sono influenzate dalla parte più profonda del sottosuolo, in altri termini “sentono” gli strati più profondi; le piccole lunghezze d'onda (frequenze più alte), viceversa, dipendono dalle caratteristiche della parte più superficiale del terreno.

In altre parole, potremmo dire che le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale.

L'illustrazione di Fig. 6 mostra le proprietà di dispersione delle onde di superficie.



*Fig. 6. Proprietà di dispersione delle onde superficiali*



Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità.

Dal momento che generalmente la velocità delle onde sismiche aumenta con la profondità (salvo i casi di inversione di velocità), ciò si riflette nel fatto che le frequenze più basse viaggino solitamente ad una velocità maggiore rispetto alle frequenze più alte.

La velocità delle onde S ( $V_s$ ) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

### **3.3. Descrizione generale della procedura MASW**

Sebbene le onde di superficie siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), attraverso l'analisi delle proprietà dispersive delle onde superficiali, specialmente nella procedura MASW classica/standard più utilizzata (acquisizione della componente verticale delle onde di Rayleigh; ZVF, *cfr.* § 3.1) è ormai una delle pratiche più comuni in geofisica applicata.

L'intero processo di analisi della dispersione delle onde di superficie (di qualsiasi tipo, *cfr.* § 3.1) si sviluppa essenzialmente attraverso tre passi successivi (*si veda: Dal Moro G., 2012*):

1. acquisizione dei dati di campagna (registrazione dei *dataset*);
2. determinazione degli *spettri di velocità* dai quali vengono estratte le *curve di dispersione* delle onde superficiali (ovvero i grafici della velocità di fase rispetto alla frequenza);
3. inversione delle curve di dispersione per ottenere il profilo verticale delle  $V_s$  (profilo 1D che descrive la variazione di  $V_s$  con la profondità).

Nel successivo *paragrafo 3.6* verranno illustrati nel dettaglio i passaggi sopra descritti relativamente al caso di analisi delle onde di Love (sorgente THF).

I dati (segnali sismici), come noto, sono acquisiti nel dominio del tempo (*offset-tempo*,  $x-t$ ); tuttavia, per diverse operazioni, tra cui l'analisi della dispersione, sono molto più gestibili e comprensibili se portati e rappresentati nel dominio *frequenza-velocità* ( $f-v$ ).

In tale dominio, infatti, è possibile determinare con precisione la velocità di ciascuna componente ed attraverso la determinazione dello spettro di velocità, è chiaramente più immediato e naturale comprendere le proprietà dispersive del segnale registrato.

La frequenza ( $f$ ) e la velocità di fase ( $v$ ) sono le due variabili, il cui legame costituisce la curva di dispersione.

Il processo di inversione è quello che consente di passare dalla curva di dispersione al profilo verticale delle velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ); quest'operazione in realtà nasconde due rilevanti problemi che vanno a determinare la qualità e la correttezza del profilo delle  $V_s$  ottenuto:

- nell'approccio classico, il dato che si va ad invertire non è un dato oggettivo (quale è ad esempio lo spettro di velocità), bensì un dato interpretato (la curva di dispersione); un errore interpretativo (ad esempio un'interpretazione non corretta dei modi di propagazione delle onde) porta necessariamente ad un errore nel profilo delle  $V_s$  ricostruito;
- qualsiasi metodo di indagine non distruttivo contiene in sé una certa ambiguità; la non univocità o equivalenza dei modelli.

Tutto ciò impone che il processo di inversione sia trattato in maniera non superficiale e sommaria.

Una buona tecnica per ridurre la possibilità di errori di interpretazione, per esempio, è quella di procedere ad un'analisi congiunta delle onde di Rayleigh e delle onde di Love, magari utilizzando i soli geofoni orizzontali per acquisire sia la componente radiale delle onde di Rayleigh (RVF), sia la componente THF (onde di Love) (*si veda: Dal Moro G., 2012, cfr. § 3.1*).

### **3.4. Caratteristiche delle onde di Love e vantaggi derivati dalla loro analisi**

Le onde di Love sono un diverso tipo di onde di superficie per il quale valgono comunque regole generali analoghe a quanto considerato per le onde di Rayleigh; l'unica grossa differenza sta nel fatto che tali onde si generano solo in caso di gradiente di velocità "positivo", ovvero se tra lo strato  $n$  e lo strato  $n+1$  (più profondo) vi è un aumento di velocità.

Le onde di Love, inoltre, dipendono unicamente dalla velocità  $V_s$ , mentre le onde di Rayleigh, seppure in minima parte, dipendono anche dalla velocità  $V_p$ .

È chiaro che avere l'opportunità di acquisire ed elaborare entrambi i *dataset* (onde di Love e di Rayleigh), attraverso un'analisi di tipo congiunto, consente un doppio controllo sulla bontà delle interpretazioni date e del modello identificato (*cfr. § 3.6*).

Non si dimentichi comunque che non vi possono essere regole semplici per cui un tipo di onda è migliore o peggiore dell'altra; nella realtà, infatti, è sempre possibile trovarsi di fronte a siti che mostrino pessimi spettri per le onde di Rayleigh rispetto a quelli derivati dalle onde di Love, come è possibile l'esatto contrario.

Le ragioni per cui è utile l'analisi anche delle onde di Love, rispetto ad una semplice elaborazione MASW con sole onde di Rayleigh, possono essere riassunte con le seguenti motivazioni.

Analizzando e confrontando vari spettri di velocità relativi ad entrambi i tipi di onde superficiali e la distribuzione dell'energia nei diversi modi alle diverse frequenze, si può notare come le onde di Love si caratterizzano quasi sempre da spettri molto meglio definiti e di più facile interpretazione, con margini di ambiguità molto ridotti, rispetto a quelli ottenibili con le onde di Rayleigh; ciò dipende essenzialmente dal fatto che il campo d'onda relativo alle prime è meno soggetto a fenomeni di *scattering*.

Nelle onde di Love il modo dominante è quasi sempre il modo fondamentale, spesso molto chiaro e semplice da interpretare, mentre i modi superiori sono meno presenti, se non addirittura assenti.

Gli spettri relativi alle onde di Rayleigh, viceversa, in molti casi sono dominati dalla presenza di uno o più modi superiori, dove si concentra il massimo dell'energia, senza mostrare un modo fondamentale ben definito.

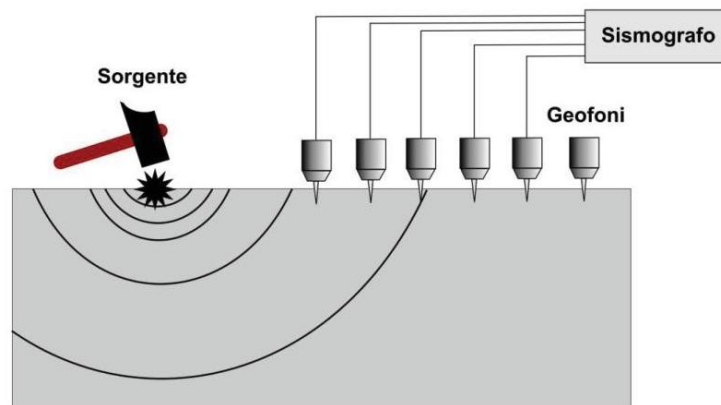
Uno dei rischi maggiori, avendo a disposizione solamente il *dataset* della componente relativa alle onde di Rayleigh, nel caso di scarsa chiarezza o assenza del modo fondamentale nello spettro di velocità, è quello di confondere un qualsiasi modo superiore per il fondamentale; altri errori di interpretazione possono essere generati quando, per esempio, nello spettro più modi si uniscono a formare quello che può essere erroneamente considerato un unico modo.

Per i suddetti motivi, l'acquisizione, con poco sforzo aggiuntivo, di entrambe le componenti e la loro analisi in forma congiunta è di gran lunga preferibile all'approccio classico, con analisi della sola componente delle onde di Rayleigh.

### **3.5. Acquisizione delle onde di Rayleigh (componente ZVF) e delle onde di Love (componente THF) - Strumentazione**

Le onde di Rayleigh sono facilmente generate da una sorgente ad impatto verticale (classica mazzata o caduta di un grave) o da un cannoncino sismico e vengono registrate, nella loro componente verticale (ZVF), tramite comuni geofoni verticali a bassa frequenza (4,5 Hz), disposti secondo un classico stendimento sismico lineare (*Fig. 7*).

Le onde di Love vengono generate per mezzo di una sorgente di taglio (THF), rappresentata da una traversina di legno, resa ben solidale al terreno, caricata (ad esempio dal peso di un mezzo o da due persone) e colpita con una mazza; tali onde vengono acquisite utilizzando geofoni orizzontali a bassa frequenza (4,5 Hz) disposti con asse perpendicolare alla direzione dello stendimento sismico (*Fig. 8*).



**Fig. 7. Stendimento sismico:** generazione di onde di Rayleigh tramite sorgente ad impatto verticale e registrazione della componente verticale ZVF per mezzo di geofoni verticali.



**Fig. 8. Sistema di generazione di onde di Love (THF) tramite sorgente di taglio (traversina) ed acquisizione delle stesse per mezzo di geofoni orizzontali disposti con asse perpendicolare allo stendimento.**

La distanza tra la sorgente e ciascun geofono è detta *offset*; ogni traccia registrata ha quindi un suo offset. La distanza tra la sorgente ed il geofono più vicino è detta offset minimo (*minimum offset*).

Nei casi in oggetto, l'acquisizione dei dati in campagna è stata eseguita utilizzando la seguente strumentazione:

- sismografo GEOMETRICS GEODE a 24 canali, le cui caratteristiche tecniche sono riportate al paragrafo 2.2;
- sorgenti energizzanti: mazza di massa pari a 6 kg su piastra metallica di battuta (ZVF, componente verticale onde di Rayleigh); traversina in legno solidale al terreno, con maglio di battuta da 15 kg (*fig. 4, § 2.2*) o mazza di massa pari a 6 kg (THF, onde di Love);
- trigger;
- apparecchiatura di ricezione: 24 geofoni verticali (per ZVF) e 24 geofoni orizzontali (per THF), con frequenza propria di 4,5 Hz.

### **3.6. Analisi MASW in onde di Love (sorgente THF)**

Analogamente all'approccio classico/standard più utilizzato (acquisizione ed analisi della componente verticale delle onde di Rayleigh; ZVF, *cfr. § 3.1*), anche per l'analisi, in maniera singola, delle onde superficiali di Love (THF), l'inversione della curva di dispersione viene generalmente realizzata attraverso una modellazione diretta, il cui scopo è quello di ricostruire un modello di andamento di velocità Vs con la profondità (profilo 1D di Vs) il più possibile rispondente allo spettro di velocità osservato.

Naturalmente, se l'accordo tra il modello identificato in fase di modellazione diretta e lo spettro è già ottimale, non servirà fare alcuna inversione e ci fermeremo al modello identificato; questo è un modo di procedere utilissimo, per esempio, nel caso di situazioni geologiche particolari o complesse (cioè dati sismici di ardua interpretazione).

È possibile altresì utilizzare il modello testato, le cui curve di dispersione calcolate risultano, nella nostra interpretazione, in ragionevole accordo con lo spettro di velocità osservato, come punto di partenza per l'inversione vera e propria.

Se si adotta tale approccio, infatti, tale modello è preso come modello di riferimento ed attraverso la ricerca di successive soluzioni in un intervallo di Vs e spessori attorno al modello iniziale, si procede ad una ottimizzazione del modello stesso.

Sulla base del modello ottenuto, è possibile quindi procedere al *picking* della curva di dispersione (cioè alla selezione dei punti che, nella nostra interpretazione, appartengono ad un certo modo di propagazione dell'onda superficiale); fare il *picking* di una curva di dispersione significa dare un senso allo spettro di velocità estraendo quindi informazioni sulle proprietà dispersive del mezzo.

Per procedere con il *picking* della curva di dispersione è necessario:



- identificare correttamente i modi di propagazione delle onde superficiali (modo fondamentale ed eventuali modi superiori);
- selezionare i punti che riteniamo appartenere correttamente ad una curva di dispersione associata ad un determinato modo di propagazione; tale operazione può essere più semplice se partiamo da un modello già definito, attraverso la procedura della modellazione diretta.

L'identificazione e il *picking* della curva di dispersione sono chiaramente operazioni d'importanza cruciale per il risultato finale.

L'utente deve avere già sviluppato una buona esperienza per poter effettuare con sicurezza tali operazioni; un'erronea interpretazione del profilo della curva e/o un'attribuzione sbagliata del modo possono portare a risultati approssimativi o addirittura assolutamente inconsistenti.

Una volta eseguito il *picking*, il passo successivo per ottenere il profilo verticale della  $V_s$  è quello dell'inversione della curva di dispersione precedentemente "piccata", anche se l'approccio consigliato è comunque quello della modellazione diretta (*si veda: Dal Moro G., 2012, cfr. § 3.1*).

L'intero processo di elaborazione (determinazione dello spettro di velocità, modellazione diretta, *picking* della curva di dispersione ed inversione) viene eseguito attraverso il software **WinMASW Pro** della *Eliosoft* (cfr. § 3.8); in particolare l'inversione viene effettuata grazie all'utilizzo di una solida tecnica di ottimizzazione (algoritmi genetici), che richiede un notevole impegno delle risorse di calcolo del computer.

### **3.7. Tecnica e schema di acquisizione**

L'acquisizione dei dati sismici, sia per la componente ZVF delle onde di Rayleigh, sia per la componente THF (onde di Love), è stata eseguita mediante le configurazioni riportate al precedente paragrafo 3.5, utilizzando la tecnica definita di *stacking* (sommatoria) verticale, ovvero sommando più acquisizioni pertinenti allo stesso stendimento sismico; in pratica si tratta di eseguire, su ciascun punto di energizzazione, un numero  $n$  di battute che saranno sommate in un unico *dataset* di acquisizione.

In questa maniera si ottengono diversi *dataset* acquisiti con diversi *offset* (distanza sorgente-geofoni; cfr. § 3.5) e diversi *stacking* (numero di battute); ciò permetterà, nella successiva fase di elaborazione dei dati, di poter scegliere il dataset più adatto per la migliore restituzione degli spettri di velocità.

Le 2 prove sismiche MASW sono state eseguite secondo le geometrie e le modalità di seguito specificate.

### **MASW M1** (*Castiglione capoluogo - all. 1.1b*)

24 canali; interasse tra i geofoni pari a 2,0 m; lunghezza complessiva di 46,0 m.

Sono state effettuate 8 registrazioni della componente ZVF e 8 registrazioni della componente THF, con stacking variabili (da 1 a 7 numero di battute), in 4 punti di energizzazione posizionati secondo il seguente schema:

- due tiri esterni, ubicati rispettivamente alla distanza di – 4,0 m e – 10,0 m dal geofono G1;
- due tiri esterni, ubicati rispettivamente alla distanza di + 6,0 m e + 10,0 m dal geofono G24.
- *offset* minimo = 4,0 m.

### **MASW M2** (*Campori - all. 1.3b*)

24 canali; interasse tra i geofoni pari a 2,0 m; lunghezza complessiva di 46,0 m.

Sono state effettuate 8 registrazioni della componente ZVF e 8 registrazioni della componente THF, con stacking variabili (da 1 a 5 numero di battute), in 3 punti di energizzazione posizionati secondo il seguente schema:

- un tiro esterno ubicato alla distanza di – 10,0 m dal geofono G1;
- due tiri esterni, ubicati rispettivamente alla distanza di + 4,0 m e + 10,0 m dal geofono G24.
- *offset* minimo = 4,0 m.

In entrambi i casi, tenuto conto della qualità migliore delle registrazioni eseguite in onde di Love, si è scelto di restituire i risultati delle prove MASW solamente per queste ultime (*cfr.* § 3.8).

## **3.8. Risultati delle prove sismiche MASW**

Negli *allegati 3.1 e 3.2* sono riportati i risultati delle due prove MASW elaborate, per le sole onde di Love, attraverso il programma **WinMASW Pro** della *Eliosoft*.

In particolare in *figura 1* viene riportato il sismogramma acquisito durante la prova di campagna (*dataset*), con indicazione della distanza intergeofonica, dell'*offset* minimo e dell'intervallo di campionamento (*sampling*) utilizzati; in *figura 2* viene mostrato lo spettro di velocità e le curve di dispersione (relative al “picking”, al “modello migliore” e al “modello medio”).

Per quanto riguarda il modello di sottosuolo ricavato, in *figura 3* sono riportati, in colonna stratigrafica, per ogni orizzonte definito, i valori di velocità delle onde trasversali (*V<sub>s</sub>*) e lo spessore dell'orizzonte stesso, mentre le successive *figure 4 e 5* mostrano i profili verticali

(andamento con la profondità) delle velocità  $V_s$ , della densità stimata dei terreni e del modulo di taglio stimato.

Si potrà notare come in *figura 4* siano due i modelli presentati come soluzione: il modello “migliore” (in termini di minor *misfit*, cioè discrepanza tra curva osservata e calcolata) e un modello medio calcolato secondo un’operazione statistica nota come MPPD (Marginal Posterior Probability Density; *Dal Moro G. et al., 2006* <sup>(7)</sup>); quest’ultimo è quello preso in considerazione come risultato finale (ad ogni modo i due modelli solitamente non differiscono in modo significativo).

Nella tabella riassuntiva di fondo pagina, infine, vengono riportati, per ogni singolo orizzonte sismico definito, i valori relativi a:

- quote di testa e di base;
- spessore;
- velocità  $V_s$  ricavata;
- velocità  $V_{sx}$  calcolata alle diverse profondità ( $x$ );
- Densità stimata dei materiali;
- Modulo di taglio stimato.

Riguardo ai valori stimati per la Densità ed il Modulo di taglio, occorre tener presente che la dispersione delle onde di superficie dipende essenzialmente dalla  $V_s$  e dagli spessori degli strati (cioè dalla geometria); per tale motivo, dall’analisi delle onde di superficie non si possono avere solide informazioni sui valori di densità dei materiali e delle velocità  $V_p$  (e i conseguenti moduli elastici); i valori di densità forniti devono essere pertanto considerati solamente come stime largamente approssimative.

Tra i moduli elastici dei terreni, infine, l’unico che possiamo considerare come una buona stima del valore reale è il modulo di taglio (che non dipende dalla  $V_p$ ).

Il valore del parametro  $V_{sx}$ , calcolato alle diverse profondità ( $x$ ), è ricavato utilizzando la stratigrafia di  $V_s$  e la seguente formula:

$$V_{sx} = \frac{x}{\sum_{i=1, N} h_i / V_i}$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano rispettivamente lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (m/s) dello strato  $i$ -esimo, per un totale di  $N$  strati presenti.

---

<sup>(7)</sup> Dal Moro G. et al. (2006) – *Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion via Genetic Algorithms and Posterior Probability Density Evaluation*.



Il valore di  $V_{sx}$  calcolato per  $x = H$  (profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/sec) corrisponde alla velocità equivalente ( $V_{seq}$ ) così come definita dal *D.M. 17 gennaio 2018*. Per terreni con profondità del substrato ( $H$ ) superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio è definita dal parametro  $V_{s30}$ , ottenuto ponendo  $H = 30$  m nella precedente espressione.

Di seguito vengono riassunti i risultati dei modelli ottenuti dall'elaborazione di ciascuna prova MASW.

**MASW M1** (*Castiglione capoluogo; all. 3.1*)

spessore orizzonte	velocità onde S	profondità progressiva dal piano di campagna
1,0 m	→ $V_s = 122$ m/sec	1,0 m
2,0 m	→ $V_s = 197$ m/sec	3,0 m
5,1 m	→ $V_s = 212$ m/sec	8,1 m
7,8 m	→ $V_s = 565$ m/sec	15,9 m
7,2 m	→ $V_s = 582$ m/sec	23,1 m
10,9 m	→ $V_s = 593$ m/sec	34,0 m
Profondità substrato > 30 m		$V_{s30} = 374$ m/sec

Nel caso in esame non è stato individuato un substrato sismico di riferimento, caratterizzato da velocità ( $V_s$ ) > **800** m/s, nei primi 30 metri di profondità ed il valore di  $V_{s30}$  è pari a **374** m/sec; il modello di sottosuolo ricostruito, in accordo con quanto ricavato dalle prospezioni sismiche a rifrazione ST6a-b (*cfr. § 2.5*), è caratterizzato dal passaggio da orizzonti di copertura (*depositi alluvionali e colluviali di paleovalli sciolti/poco addensati*), di spessore complessivo pari a circa 8,1 m, ad un substrato costituito da *depositi fluvio-lacustri da poco a mediamente consistenti*, appartenenti alla formazione dei *conglomerati di Barga (PLB)* e caratterizzati da valori di velocità  $V_s$  mediamente compresi tra 550 e 600 m/sec.

**MASW M2** (*Campori; all. 3.2*)

spessore orizzonte	velocità onde S	profondità progressiva dal piano di campagna
0,8 m	→ $V_s = 181$ m/sec	0,8 m
2,0 m	→ $V_s = 223$ m/sec	2,8 m
2,5 m	→ $V_s = 320$ m/sec	5,3 m
8,0 m	→ $V_s = 450$ m/sec	13,3 m
9,2 m	→ $V_s = 500$ m/sec	22,5 m
11,5 m	→ $V_s = 600$ m/sec	34,0 m
Profondità substrato > 30 m		$V_{s30} = 429$ m/sec

Anche in questo caso non è stato individuato un substrato sismico di riferimento, caratterizzato da velocità ( $V_s$ ) > **800** m/s, nei primi 30 metri di profondità ed il valore di  $V_{s30}$  è pari a **429** m/sec; in accordo con quanto ricavato dalla prospezione sismica a rifrazione ST7 (cfr. § 2.5), il modello di sottosuolo ricostruito è caratterizzato dal passaggio da orizzonti di copertura (*depositi alluvionali terrazzati, prevalentemente sabbioso-ghiaiosi, sciolti/poco addensati*), di spessore complessivo pari a circa 5,3 m, ad un substrato costituito da *depositi fluvio-lacustri da poco a mediamente consistenti*, appartenenti alla formazione delle *argille e sabbie di Fornaci di Barga (AFB)*, attraverso un aumento graduale della velocità  $V_s$ .

I modelli di sottosuolo derivati dalle prove MASW M1 e M2, inoltre, sono stati confrontati con quanto ricavato dalle misure di microtremore ambientale a stazione singola (HV10 e HV18) eseguite nei pressi di ciascun stendimento (*all. 1.1b-1.3b*), risultando pienamente compatibili con le stesse (cfr. § 5.5).

## **4. TOMOGRAFIA DI RESISTIVITÀ ELETTRICA (ERT)**

### **4.1. Generalità**

I metodi di prospezione geoelettrica permettono di indagare il sottosuolo utilizzando il parametro fisico resistività elettrica ( $r$ ), caratteristico delle formazioni che costituiscono il sottosuolo; la resistività è un parametro indipendente dalle caratteristiche geometriche della formazione litologica cui si riferisce ed è definito come la resistenza elettrica per unità di volume.

Ogni corpo roccioso presenta un ampio campo di variabilità dei propri valori di resistività; essi dipendono dal grado di omogeneità, dal livello di alterazione e, per rocce litoidi, dal grado di fratturazione.

Nel caso di terreni sciolti, quali i depositi alluvionali recenti, la resistività dipende dalla loro granulometria, dai fluidi in essi contenuti e dal quantitativo in sali disciolti. A questa regola fanno eccezioni le argille che, se compatte, hanno sempre valori di resistività estremamente bassi; questo è dovuto principalmente alle caratteristiche del reticolo cristallino dei minerali che le compongono ed al loro grado di saturazione.

L'indagine geofisica di tipo geoelettrico viene eseguita immettendo nel suolo una corrente elettrica di intensità nota e misurando la resistenza offerta dal suolo al passaggio della corrente. La conducibilità elettrica è funzione della natura litologica, chimica e idrochimica del terreno. Variazioni laterali nella conducibilità possono inoltre essere attribuite alla presenza di materiali sepolti.

## 4.2. La metodologia di indagine

Il sistema dei profili elettrici superficiali con dispositivo (*array*) multielettrodo rappresenta una metodologia innovativa delle misure geoelettriche classiche.

La **tomografia di resistività elettrica (ERT)** consiste nella caratterizzazione geoelettrica e dimensionale, con elevato dettaglio, delle strutture presenti lungo sezioni bidimensionali; il sistema permette di ricostruire la distribuzione spaziale in due dimensioni della resistività reale nel sottosuolo con una risoluzione che dipende dalla distanza tra gli elettrodi e dal tipo di *array*.

L'innovazione rispetto ai profili di resistività classica è rappresentata dalla possibilità di effettuare un gran numero di misure in tempi brevi e dalla successiva elaborazione con programmi di inversione bidimensionale. Tale tecnica consente inoltre di operare anche in presenza di terreni morfologicamente irregolari, previo rilievo delle quote relative tra gli elettrodi; tale informazione sarà poi presa in considerazione in fase di elaborazione dei dati.

Il valore di resistività che si misura, è una **resistività apparente**, perché le linee di corrente, che consentono di valutare tale parametro, hanno attraversato più formazioni rocciose: misuriamo cioè un valore anomalo rispetto al valore che si misurerebbe in un sottosuolo omogeneo ed isotropo. Questo dato non è semplicemente il valore medio delle resistività degli "elettrostrati" incontrati, ma è definito da una funzione più complessa in quanto dipende sia dalle resistività dei vari litotipi attraversati, sia dai loro spessori.

Tutti gli elettrodi sono collegati, mediante un apposito cavo multiconduttore a bassa impedenza, allo strumento di acquisizione. La corrente viene applicata ad una coppia di elettrodi (*elettrodi di corrente*), misurando poi la differenza di potenziale tra tutte le altre coppie di elettrodi disponibili nella configurazione scelta (*elettrodi di misura*). Si passa poi ad una seconda coppia di trasmissione e così via, fino a raggiungere il numero massimo di misure indipendenti sui poli e dipoli disponibili.

Alla fase di **acquisizione** delle misure di resistività apparente segue quella di interpretazione delle stesse, che in gergo tecnico si chiama **inversione**; tecnica che prevede il simultaneo ricorso ad algoritmi di modellazione numerica agli elementi finiti (o alle differenze finite) e a metodologie di ottimizzazione ai minimi quadrati. La procedura iterativa di risoluzione consente di arrivare ad una stima della distribuzione delle **resistività reali**, che si traduce in un'immagine grafica da essere interpretata.

### 4.3. Strumentazione utilizzata

- *n. 1 georesistivimetro digitale multicanale* per la registrazione dei dati (EEG AL48D).
- *n. 2 cavi elettrici*, ciascuno con 24 attacchi per elettrodi ed equidistanza massima fra elettrodi pari a 10 metri.
- *n. 48 picchetti (elettrodi)*.
- *n. 1 cavo elettrico + n. 1 picchetto* per il posizionamento del polo di corrente perpendicolarmente allo stendimento di elettrodi (dipoli) nella tecnica polo-dipolo.
- *Batteria* di alimentazione elettrica da collegare all'acquisitore.
- *Software* dedicati per l'elaborazione e la restituzione dei dati.



**Fig. 9.** Georesistivimetro utilizzato per l'acquisizione dei dati (EEG AL48D)

#### ***Caratteristiche tecniche dello strumento:***

- Elettrodi	2-48
- MN simultanei	infiniti
- Risoluzione	12 bit
- Dinamica	equivalente a 22 bit
- Rumore reale	< 0.1 mV
- Precisione reale dV e corrente	dV 0.1 mV 0.1 mA
- Generatore di corrente	interno
- Potenza	350W
- Massima tensione	700V
- Massima corrente energia interna	2A
- Massima corrente energia esterna	5A
- Misura IP	
- Azzeramento analogico automatico potenziali spontanei	
- Immissione di cicli di corrente controllata	
- Controllo statistico della qualità	
- Tempo di acquisizione sezione completa standard	10 minuti c.a.
- Tempo di acquisizione sezione completa veloce	3 minuti c.a.

#### 4.4. Modalità di acquisizione dei dati di sezioni geoelettriche 2D

L'acquisizione dei dati, molto complessa, viene gestita completamente da una apposita strumentazione (*georesistivimetro multicanale*) in grado di acquisire 48 canali simultaneamente e di comandare automaticamente l'inversione della corrente, ovvero di avere la possibilità che ciascuna coppia di elettrodi collegati, a seconda del momento, possa funzionare sia per l'immissione di corrente nel terreno, sia come elettrodi di misura.

Prima di eseguire la misura è necessario conoscere gli scopi e gli obiettivi da raggiungere attraverso l'indagine, così da impostare in maniera adeguata la particolare scelta del tipo di dispositivo (*array*) da utilizzare, in funzione ovviamente anche del contesto lavorativo, come lo spazio a disposizione e la logistica.

Le misure avvengono investendo il terreno con correnti indotte fino a 2,5 Ampère e potenze massime di 250 W.

Le sezioni geoelettriche forniscono quindi una sezione verticale del terreno mediante una molteplicità di valori di resistività apparente riportabili su una maglia regolare; esse vengono normalmente utilizzate per studiare la permeabilità dei terreni e ricostruire i modelli di corpi acquiferi, rilevare lo spessore dei depositi di argilla o di ghiaia, mappare la presenza di inquinanti conduttivi, identificare cavità, cunicoli, anomalie laterali, nonché ogni genere di anomalia elettrica del terreno sia verticale che orizzontale.

La configurazione elettrodica maggiormente utilizzata in fase di acquisizione è quella ***polo-dipolo***; in questa tipologia il polo di corrente B viene posto ad una distanza pari ad almeno la lunghezza dello stendimento degli elettrodi di misura, perpendicolarmente allo stendimento stesso, mentre il polo A viene posizionato automaticamente dallo strumento in corrispondenza di ciascuno degli elettrodi equispaziati (dipoli) lungo lo stendimento.

Tale configurazione è preferibile rispetto a quella ***dipolo-dipolo*** (senza il posizionamento del polo esterno allo stendimento) per una serie di vantaggi che essa offre, tra i quali:

- il segnale è più forte rispetto a quello misurato nell'equivalente stesa dipolo-dipolo;
- è un sistema asimmetrico più sensibile alle variazioni laterali;
- consente di sfruttare appieno la velocità dello strumento;
- consente di avere sempre un elettrodo a bassa resistenza comune a tutte le misure.

Lo stendimento deve essere rettilineo e può essere costituito da un massimo di 48 elettrodi equispaziati tra loro; la distanza tra gli elettrodi è regolata dal dettaglio con il quale si vuole indagare il sottosuolo e dalla profondità che si vuole raggiungere.

Per ogni metro di interdistanza si garantisce l'esplorazione di circa 8 metri di profondità; per esempio, con un intervallo tra gli elettrodi di 5 metri (stendimento a 48 dipoli di lunghezza pari a 235 m), si può indagare fino a 40 metri circa di profondità.

In realtà la massima profondità indagata può raggiungere il doppio di quanto sopra riportato, ma è bene considerare i limiti suggeriti.

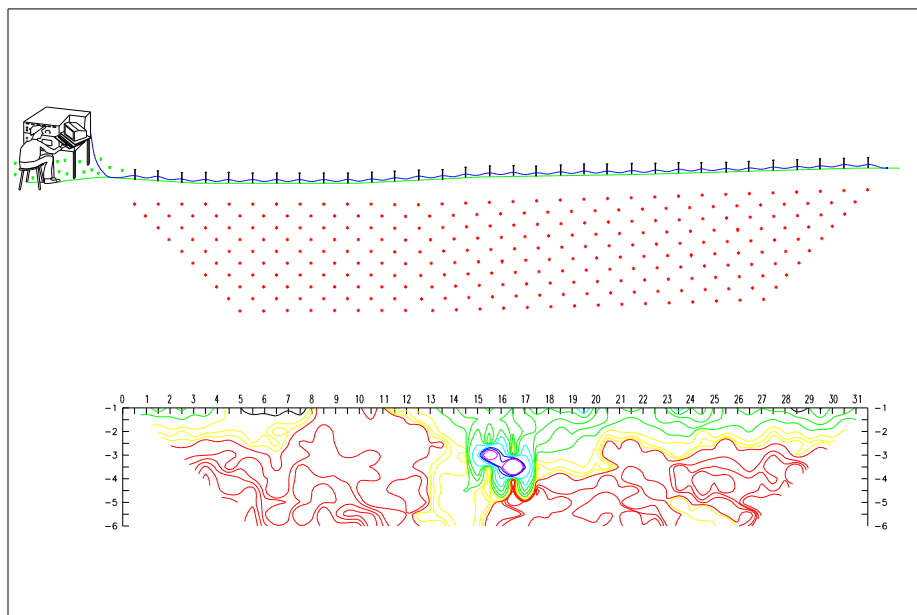
Se l'obiettivo da indagare è superficiale, è necessario mantenere un'interdistanza tra elettrodi corta, se l'obiettivo è più profondo occorre mantenere una spaziatura maggiore, a scapito di un minor grado di dettaglio ottenibile negli strati superficiali.

#### 4.5. Elaborazione e restituzione dei dati

Alla fase di acquisizione delle misure di *resistività apparente* segue quella di interpretazione, in gergo tecnico si parla del processo di inversione, tecnica che prevede il ricorso ad algoritmi di modellazione numerica agli elementi finiti (o differenze finite) e a metodologie di ottimizzazione ai minimi quadrati.

I dati di resistività apparente vengono elaborati con apposito programma in grado di ricostruire il valori reali di resistività per inversione numerica 2D (**Res2Dinv**); le sezioni geoelettriche vengono normalmente restituite mediante modelli tomografici del sottosuolo.

Ciascuno degli asterischi riportati in *Figura 10* corrisponde ad una diversa coppia di misure di resistività del sottosuolo, ottenuta da una diversa coppia di dipoli di misura e da diverse posizioni del polo di corrente.



**Figura 10**

#### **4.6. Schema di acquisizione e scopo dell'indagine**

Per l'indagine geoelettrica in questione è stato effettuato uno stendimento (GE1), ubicato nella parte nord-occidentale dell'abitato di Castiglione capoluogo, così come riportato in planimetria allegata (*all. 1.1*); in questa zona si evidenzia la presenza di terreni di copertura costituiti da *depositi detritici* di versante e/o *depositi alluvionali antichi terrazzati* “a prevalenti elementi di arenaria Macigno”, al di sopra di un substrato costituito da probabili arenarie del “*Macigno*” (MAC) nella porzione a monte e dalle “*argille e sabbie fluvio-lacustri*” villafranchiane (AFB) nella parte di valle.

In particolare lo stendimento geoelettrico, eseguito secondo la linea di massima pendenza del versante, ha avuto lo scopo di individuare eventuali variazioni laterali tra la parte di monte e quella di valle, collegabili a possibili indizi della presenza di una faglia diretta attiva e capace o un sistema di faglie dirette attive (FAC), collocate proprio in corrispondenza del passaggio tra la scarpata morfologica e la porzione pianeggiante (si veda zona indicata nella sezione di *allegato 4*).

La lunghezza dello stendimento è stata di 141 metri, per un interasse tra gli elettrodi, pari a 3,0 m; tale geometria, considerate le pendenze medie, piuttosto accentuate, del versante (in particolare tra E25 e E48), corrisponde ad uno sviluppo lineare in pianta di circa 136,3 m (per un interasse medio tra gli elettrodi pari a circa 2,90 m).

Un tale stendimento ha consentito di indagare i terreni fino a circa 25÷30 metri di profondità.

#### **4.7. Risultati della tomografia elettrica**

La qualità della prospezione è eccellente, sia in fase di acquisizione (con valori di misura molto buoni su tutti i poli), sia in fase di restituzione del modello tomografico (con errori di inversione minimi).

Le misure di resistività valide ottenute, infatti, sono state in numero molto elevato (749), tale da consentire una buona elaborazione dei dati stessi.

L'errore finale di inversione è stato molto basso, pari al 4,0%, tale da poter garantire una buona inversione e conseguentemente una qualità dei modelli di resistività dei terreni ottenuti molto buona.

In *allegato 4* sono riportati i risultati della prospezione geoelettrica effettuata.

L'elaborato contiene la rappresentazione bidimensionale della resistività elettrica del sottosuolo secondo sezioni verticali 2D, in particolare:



- la prima coppia di sezioni in alto riporta le resistività apparenti misurate e calcolate dal modello di resistività reali posto in terza riga, relative ai dipoli antistanti il polo di corrente (dipoli diretti);

- la seconda coppia di sezioni, in seconda riga, rappresenta le resistività apparenti misurate e calcolate dal modello di resistività reali, relative ai dipoli retrostanti il polo di corrente (dipoli inversi).

Di queste, le sezioni a destra illustrano i valori di tutte le resistività apparenti effettivamente misurate, quindi i dati sperimentali (in corrispondenza di ciascuna di queste misure è anche riportata in grafico una piccola croce bianca); le sezioni a sinistra sono ottenute dal modello matematico applicato al modello di resistività.

La differenza tra le sezioni poste a sinistra (calcolate) e quelle di destra (misurate) corrisponde graficamente all'errore RMS finale del processo di iterazione.

Il modello delle resistività reali è il risultato dell'inversione numerica dei dati sperimentali ed è riportato in terza riga.

Questa sezione costituisce il risultato finale della procedura di inversione che, a partire dalle resistività apparenti misurate (dirette e inverse) produce un'unica sezione di resistività reali.

L'ultima sezione in basso riporta l'interpretazione stratigrafica della sezione di resistività reali.

Nel caso specifico, per tale interpretazione stratigrafica, ci si è basati su quanto ricavato anche da prospezioni sismiche e da sondaggi geognostici eseguiti nella zona.

Nel dettaglio, con riferimento al **modello tomografico 2D** ricavato per le resistività reali dei terreni ed alla relativa **sezione interpretativa** di tale modello, la successione stratigrafica dei terreni può essere riassunta secondo lo schema seguente (*all. 4*):

- **strato 1**: orizzonti *resistivi*, associati a terreni di copertura costituiti da *depositi detritici di versante e/o depositi alluvionali antichi terrazzati*; essi interessano uno spessore superficiale di pochi metri (**2,0÷5,0 m**);

- **strato 2**: orizzonti *caratterizzati da moderata conduttività*, associati probabilmente a *sabbie con argille fluvio-lacustri*, nella parte più bassa del versante e/o ad un *substrato arenaceo fratturato ed alterato, con possibile circolazione idrica*, nella porzione più elevata del pendio; essi costituiscono uno strato intermedio riscontrabile fino a profondità variabili da **15÷17 m** nella porzione di stesa collocata più in basso nel versante, fino a massimi di circa **22÷23 m** in corrispondenza della scarpata di monte;



- *strato 3*: orizzonti *conduttivi*, associati probabilmente a *sabbie con argille fluvio-lacustri*, nella parte più bassa del versante e/o ad un *substrato arenaceo fratturato ed alterato, con possibile circolazione idrica*, nella porzione più elevata del pendio; riscontrabili al di sotto del livello 2 fino alla profondità massima indagata di circa **25÷30** m.

Nel complesso, i risultati sembrano evidenziare l'assenza di variazioni laterali, sia superficiali che profonde.

Come si può vedere dal modello tomografico restituito (*all. 4*), la “forbice” tra valori minimi e massimi di **resistività** è molto contenuta; per questo, anche la porzione caratterizzata da valori di resistività compresi tra 90 e 110 ohm\*m, messa in evidenza tra le progressive 80 e 100 m e tra 7÷8 m e 15÷17 m circa di profondità, in realtà ha valori di resistività molto vicini a quelli riscontrati nell'intorno.

Ciò porta a concludere che, qualora si evidenziasse, attraverso indagini di tipo diverso, un'effettiva variazione laterale tra i due tipi di substrato, entrambi presentano valori di resistività molto simili, tali da non permettere la loro distinzione con tecniche basate sui contrasti di questo parametro fisico.

Nell'interpretazione del modello di resistività, quindi, i terreni da moderatamente conduttivi a conduttivi degli strati 2 e 3, possono essere associati sia alla probabile presenza dei *depositi fluvio-lacustri villafranchiani*, presenti sicuramente nella parte più bassa del versante, sia all'esistenza, nella parte più alta dello stesso, di un *substrato litoide arenaceo*, diffusamente fratturato ed alterato, *caratterizzato da probabile circolazione idrica* specialmente nella sua porzione più profonda.

Sulla stessa sezione sono stati riportati approssimativamente i limiti della zona indicata in carta per la possibile presenza dei piani di faglia e la posizione delle misure di microtremore HV1-HV5 eseguite lungo lo stesso stendimento geoelettrico (*all. 1.Ic*).

L'elaborazione di queste ultime misure sembra confermare l'assenza di importanti variazioni laterali, per quanto riguarda l'eventuale presenza di diversi tipi di substrato, rispetto ad una diversa risposta sismica; dall'analisi degli spettri delle singole componenti e delle rispettive curve H/V, infatti, non si evidenziano marcate differenze tra le varie misure, se non la presenza di picchi a frequenze superiori (9,50 Hz e 12,95 Hz) nelle due misure eseguite più in basso nel versante (HV1 e HV2), questi ultimi non molto chiari e caratterizzati comunque da ampiezze modeste (*cfr. § 5.5*).

## 5. MISURE DI MICROTREMORE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

### 5.1. Generalità

Le tecniche di sismica passiva basate sulla registrazione e l'analisi dei microtremori, ciò che è anche detto “rumore sismico ambientale” (*ambient vibrations*), mutuando il termine “rumore” dalla sismologia, nella quale costituisce un elemento di disturbo rispetto al segnale, prendono in considerazione le vibrazioni del terreno indotte da sorgenti non controllate; una sorta di “sottofondo sismico” determinato da una serie di fenomeni naturali (onde oceaniche, perturbazioni atmosferiche, cicloni oceanici, tremori vulcanici, condizioni meteorologiche locali, ecc.), oltre che da fattori antropici (traffico veicolare, attività industriali, rumore urbano in genere, ecc.).

Tali fenomeni occupano un vasto dominio di frequenze: da frequenze generalmente inferiori a 0,5 Hz per sorgenti di origine naturale e di grandi dimensioni spaziali a frequenze comprese tra 1 e 100 Hz nel caso delle condizioni meteorologiche locali, tremori vulcanici e per le attività essenzialmente antropiche.

Le vibrazioni ambientali, definite anche con i termini di “rumore sismico” (*seismic noise*), “microtremore” (*microtremor*) o “microsismi” (*microseisms*), sono rappresentate quindi da piccoli spostamenti del terreno, dell'ordine di  $10^{-2} \div 10^{-7}$  mm, in un intervallo di frequenze generalmente molto al di sotto della soglia di percezione umana, che è possibile osservare sperimentalmente in qualsiasi punto della terra.

Quando vengono misurate, le vibrazioni ambientali mostrano un andamento molto irregolare, avendo una natura essenzialmente stocastica; ciò implica che lo studio di questo tipo di fenomeno richieda un approccio sostanzialmente diverso da quello tipico della sismica, ovvero non legato ad una visione deterministica del fenomeno, ma spostando l'attenzione dallo studio delle singole fasi sismiche a quello delle proprietà medie del segnale, ovvero attraverso metodi di tipo statistico/probabilistico.

### 5.2. Cenni sulla metodologia della tecnica HVSR

Le misure speditive di microtremore ambientale, mediante tecnica di acquisizione passiva a stazione singola ed analisi HVSR, furono applicate per la prima volta in Giappone da *Nogoshi e Igarashi (1970)* e rese popolari alla fine degli anni '80 da *Nakamura (1989)*; per questo la tecnica è conosciuta anche come “metodo di Nakamura”.

Essa permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito o frequenza del picco fondamentale del sito ( $f_0$ ) e quindi la possibile esistenza di fenomeni di risonanza sismica nell'intervallo di frequenza significativo.

Un picco dovuto ad un effetto di sito (picco “stratigrafico”), infatti, corrisponde ad un valore massimo nelle componenti orizzontali contestualmente ad un minimo nella componente verticale (rapporto H/V massimo). Nell’ipotesi che il rumore sismico sia costituito prevalentemente da onde di Rayleigh, tale condizione si verifica in corrispondenza della frequenza fondamentale di risonanza dei depositi di copertura che caratterizzano il sito.

La stessa tecnica, inoltre, consente di avere una prima indicazione sull’entità del contrasto d’impedenza, sulla base dell’ampiezza del picco (H/V) e sulla profondità dell’interfaccia stratigrafica legata a tale contrasto (*Albarello D. et al., 2010*).

Le ipotesi alla base della tecnica sono: la concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz), l’assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze e la distribuzione spaziale uniforme delle sorgenti di microtremore intorno alla stazione di registrazione.

Se queste sono soddisfatte, la procedura per l’indagine con tecnica HVSR può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate:

- esecuzione della *registrazione* di microtremore ambientale lungo tre direzioni ortogonali tra loro (x,y,z) con una singola stazione; tale registrazione deve essere effettuata, secondo le indicazioni del progetto SESAME (2004), per una durata non inferiore a 20 minuti;
- operazione detta di “*windowing*”, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali, la cui durata prefissata (*long period*), secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME, deve essere almeno pari a 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre “long”, che sono sincronizzate fra le tracce;
- *filtraggio* delle finestre in base a criteri che permettono di individuare l’eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione;
- estrazione dello *spettro di Fourier* per ciascuna delle finestre rimanenti, ritenute valide ed operazione di “*tapering*” e *lisciamento* di ciascun spettro, secondo una delle varie tecniche note in letteratura;
- determinazione, per ciascuna finestra, della componente in frequenza (V) relativa allo spettro nella direzione verticale (z) e della componente in frequenza (H), quest’ultima calcolata attraverso una semplice media aritmetica o una somma euclidea delle due componenti relative agli spettri nelle direzioni orizzontali (x,y); la coppia di componenti orizzontali (x,y) e la componente verticale (z) naturalmente devono essere relative a finestre temporali sincrone. Questo permette di ottenere il ricercato *rapporto spettrale (H/V)* per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l’operazione di *windowing*;

- calcolo del rapporto spettrale (H/V) medio, la cui frequenza di picco (frequenza in cui è localizzato il massimo valore assunto dal rapporto medio stesso) rappresenta la deducibile stima della frequenza naturale di vibrazione del sito.

### 5.3. Strumentazione

L'acquisizione dei dati in campagna è stata eseguita utilizzando la seguente strumentazione:

- Acquisitore a 24 bit SolGeo "Dymas-24" ad alta risoluzione ed ampio spettro in frequenza (DC÷4000 Hz), per registrazioni in continuo o a soglia, sino a 20.000 campioni al secondo;

- Sismometro triassiale SolGeo "Veloget3D" di classe I, con range selezionabile (1-80 Hz o 1-315 Hz), conforme alle normative di riferimento (DIN e UNI); sensori da 4,5 Hz, linearizzati elettronicamente a 1 Hz, con dinamica superiore a 130 dB.

Esso è alloggiato in contenitore metallico dotato di piastra di appoggio, piedini regolabili e bolla di controllo, per il corretto fissaggio al terreno.

- Computer portatile collegato all'acquisitore "Dymas-24".

- Batteria di alimentazione elettrica collegata all'acquisitore "Dymas-24".

- Software dedicati per l'acquisizione dei dati ed il calcolo della curva H/V (Metodo "Nakamura").



**Fig. 11.** Sistema di acquisizione "Dymas-24" collegato a PC portatile e sismometro "Veloget3D" per misure di rumore ambientale a stazione singola (metodo HVSR)

#### 5.4. Elaborazione delle misure e restituzione dei dati

L'elaborazione dei dati acquisiti per il calcolo delle curve H/V (Metodo "Nakamura") è stata eseguita con il software *EasyHVS*R della *Geostru*.

Nel caso specifico, l'analisi è stata eseguita in genere su una finestra di frequenze significativa dal punto di vista geologico di 0,5 – 20÷30 Hz (dal momento che picchi con frequenze maggiori di 20÷30 Hz risultano non significativi); in alcuni casi tale finestra è stata allargata (es. 0,5 – 40 Hz, 0,5 – 50 Hz) per rendere bene evidente ed analizzabile il picco, qualora questo fosse a frequenze prossime a 20 Hz (es. Pian\_di\_Cerreto\_HV19) o per confermare l'esistenza di picchi a frequenze superiori ai 25 Hz, legati a contrasti d'impedenza sismica molto superficiali (es. Cerageto\_HV14 e Cerageto\_HV15).

La scala delle ampiezze (H/V) è stata "normalizzata", in maniera da fare risaltare l'ampiezza dell'eventuale picco fondamentale.

L'elaborazione è stata fatta attraverso:

- media geometrica:  $H/V = \sqrt{(H_{NS}^2 + H_{EW}^2)} / V$ ;
- "padding", "tapering" del 5%;
- lisciamento dello spettro di ampiezza: triangolare proporzionale del 10%.

(Albarelo D. et al., 2010; Al Yuncha Z. et al., 2004).

Al fine di fornire una prima informazione di massima sugli spessori delle coperture, ovvero sulla profondità dei "contrast di impedenza" responsabili dei picchi osservati ed una stima, in prima approssimazione, dell'entità di tali contrasti, si fa riferimento agli abachi forniti da vari autori, in particolare Albarelo D. et al. (2010).

La frequenza di risonanza delle coperture dipende dal loro spessore H e dalla velocità media delle onde S (Vs) negli stessi sedimenti; conoscendo quindi la frequenza ( $f_0$ ) e la velocità media Vs di tali sedimenti, si può ricavare in prima approssimazione il loro spessore attraverso la seguente formula:

$$H = V_s / 4 \cdot f_0$$

Ne deriva che in base alla frequenza di picco è possibile stimare la profondità del "contrasto d'impedenza" collegato al picco stesso.

Per "basso contrasto" d'impedenza si intende quando  $2 < H/V < 3$ ;

per "alto contrasto" si intende quando l'ampiezza di  $H/V > 3$ .

Per la classificazione delle misure e della curva H/V, infine, si fa riferimento ai criteri *SESAME (2004)* e ad *Albarello D. et al. (2010, 2011)*.

Per la classificazione di qualità della curva secondo il metodo di *Albarello D. et al. (2010, 2011)* viene classificata di tipo “A” una curva affidabile ed interpretabile, utilizzabile anche da sola.

La curva si classifica di tipo “B”, viceversa, quando una delle condizioni della classe “A” non è soddisfatta; in questo caso si può utilizzare ugualmente, se comunque risulta coerente con altre misure vicine.

Per entrambi le classi sopra descritte, inoltre, è possibile definire due sottoclassi:

- tipo 1: la curva presenta almeno un picco “chiaro” secondo i criteri *SESAME*: possibile risonanza;

- tipo 2: la curva non presenta picchi “chiari” nell’intervallo di frequenze di interesse: assenza di risonanza.

In tale classificazione generalmente si sceglie di non attribuire la sottoclasse (1 o 2) nei casi in cui il picco non risultasse chiaro secondo i criteri *SESAME*, ma non fosse possibile escludere comunque fenomeni di risonanza.

Nelle schede di *allegato 5* sono riportati i risultati di ciascuna misura di microtremore a stazione singola elaborata con la tecnica HVSr.

In particolare ciascuna scheda contiene le seguenti informazioni ed elaborati:

- dati generali relativi alla misura eseguita;
- ubicazione con sistema GPS e documentazione fotografica della prova;
- dati riepilogativi della registrazione e del tipo di elaborazione eseguita;
- grafici degli spettri medi delle tre componenti (NS, EW e Verticale);
- mappe di stazionarietà e direzionalità degli spettri;
- grafico del rapporto spettrale H/V e relativa frequenza di picco fondamentale ( $f_0$ );
- riepilogo dei criteri *SESAME (2004)* e classificazione della curva secondo *Albarello D. et al. (2010, 2011)*.

## **5.5. Risultati delle misure HVSr**

Tutte le misure sono state acquisite con un tempo di registrazione sufficientemente lungo: 40 minuti (2400 sec), nel caso della misura HV18, 30 minuti (1800 sec), per tutte le altre; questo per avere a disposizione un numero sufficiente di finestre temporali su cui elaborare il dato, utile specialmente in quei casi dove sono presenti maggiori disturbi e/o numerosi transienti (vicinanza di strade, ecc.).



In tutti i casi lo strumento è stato piazzato perfettamente in bolla, con l'asse orizzontale Y disposto secondo il Nord geografico, all'interno di una piccola buca o in corrispondenza di una piccola piazzola ricavata nel terreno; il cavo di uscita è stato parzialmente interrato, per eliminare il più possibile il disturbo dovuto all'eventuale presenza di vento.

Complessivamente sono state acquisite n. 26 misure HVSR, 5 delle quali (HV1-HV5) collocate in corrispondenza del sito di esecuzione dell'indagine geoelettrica (GE1) e 2 (HV10 e HV18) presso i due siti di esecuzione delle prospezioni sismiche e rifrazione e MASW, così come riportato nelle planimetrie allegate (*all. 1.1-1.3*), anche ai fini di potere effettuare un confronto con i risultati degli altri tipi di indagine.

Di seguito vengono riassunti i principali risultati di ciascuna elaborazione HVSR, riportati nel dettaglio nelle schede dell'*allegato 5*; in particolare, per ciascuna misura, vengono indicate la frequenza (F) e l'ampiezza (A) del picco fondamentale e, in alcuni casi anche la frequenza e l'ampiezza dei picchi secondari, oltre alla classificazione di qualità della curva secondo il metodo di *Albarello D. et al. (2010, 2011)*.

Viene fornita, infine, una prima indicazione sugli spessori delle coperture, ovvero sulla profondità dei “contrast di impedenza” responsabili dei picchi osservati ed una stima, in prima approssimazione, dell'entità di tali contrasti, secondo gli abachi forniti da vari autori, in particolare *Albarello D. et al. (2010)*.

### **Castiglione\_HV1**

Eseguita presso E1 dello stendimento geoelettrico GE1 (*all. 1.1c*).

Finestra = 0,5 – 20 Hz

Picco poco chiaro a frequenza (F) = 9,50 Hz, di ampiezza (A) = 2,51, compatibile con un basso contrasto di impedenza correlabile con possibile interfaccia presente a profondità dell'ordine dei 5÷10 metri. Classificazione curva: B/.

### **Castiglione\_HV2**

Eseguita presso E12-E13 dello stendimento geoelettrico GE1 (*all. 1.1c*).

Finestra = 0,5 – 30 Hz.

Picco poco chiaro a frequenza (F) = 12,95 Hz, di ampiezza (A) = 2,37, compatibile con un basso contrasto di impedenza nei primi 4÷8 m di profondità. Classificazione curva: B/.

### **Castiglione\_HV3**

Eseguita presso E24-E25 dello stendimento geoelettrico GE1 (*all. 1.1c*).

Finestra = 0,5 – 20 Hz.

Picco poco significativo a frequenza (F) = 2,75 Hz (ampiezza A = 2,05), compatibile con un contrasto di impedenza molto basso a profondità  $\geq 30$  metri.

Per il resto curva (H/V) pressoché “piatta”, compatibile con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: B/.

#### **Castiglione\_HV4**

Eseguita presso E36 dello stendimento geoelettrico GE1 (*all. 1.1c*).

Finestra = 0,5 – 20 Hz.

Analoga a HV3; picco poco significativo a frequenza (F) = 2,75 Hz (ampiezza A = 2,40), compatibile con un basso contrasto di impedenza a profondità  $\geq 30$  metri.

Per il resto curva (H/V) pressoché “piatta”, compatibile con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: B/.

#### **Castiglione\_HV5**

Eseguita presso E48 dello stendimento geoelettrico GE1 (*all. 1.1c*).

Finestra = 0,5 – 20 Hz.

Picco poco chiaro a frequenza (F) = 3,80 (ampiezza A = 2,43), compatibile con un basso contrasto di impedenza a profondità  $\geq 20\div 25$  metri.

Per il resto curva (H/V) pressoché “piatta”, compatibile con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: B/.

#### **Castiglione\_HV6**

Finestra = 0,5 – 50 Hz.

Picco ben marcato a frequenza (F) = 26,0 (ampiezza A = 13), compatibile con un alto contrasto di impedenza molto superficiale (profondità  $\leq 1\div 2$  metri).

Per il resto curva (H/V) pressoché “piatta”, compatibile con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: A1.

#### **Castiglione\_HV7**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 30 Hz.

Picco principale a frequenza (F) = 4,85 Hz, di ampiezza (A) = 3,67; secondo picco di ampiezza paragonabile (A = 3,61) alla frequenza (F) = 7,10 Hz, entrambi compatibili con un alto contrasto di impedenza sismica correlabile con possibile interfaccia presente a profondità dell'ordine dei 15÷20 metri; in realtà, infatti, entrambi i picchi possono far parte di un picco unico che occupa un ampio intervallo di frequenze “centrato” sui 5,0 Hz.

Classificazione curva: B1.



### **Castiglione\_HV8**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 30 Hz.

Picco poco chiaro a frequenza (F) = 5,60 Hz, di ampiezza (A) = 3,59, compatibile con un alto contrasto di impedenza a profondità dell'ordine dei 13÷18 m di profondità.

Classificazione curva: B1.

### **Castiglione\_HV9**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 30 Hz.

Picco poco chiaro a frequenza (F) = 19,10 Hz, di ampiezza (A) = 3,17, compatibile con un medio-basso contrasto di impedenza superficiale (profondità  $\leq 2\div3$  metri). Curva “inficiata” dalla presenza di evidenti artefatti. Classificazione curva: A1.

### **Castiglione\_HV10**

Eseguita presso lo stendimento sismico a rifrazione ST6b e MASW M1 (*all. 1.1b*).

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco ben marcato a frequenza (F) = 7,85 Hz, di ampiezza (A) = 5,37, compatibile con un alto contrasto di impedenza sismica correlabile con possibile interfaccia presente a profondità dell'ordine dei 5÷8 metri. Classificazione curva: A1.

### **Castiglione\_HV11**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco a frequenza (F) = 10,25 Hz, di ampiezza (A) = 3,83, compatibile con un alto contrasto di impedenza sismica correlabile con possibile interfaccia presente a profondità dell'ordine dei 4÷5 metri. Classificazione curva: A1.

### **Castiglione\_HV12**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco poco chiaro a frequenza (F) = 5,60 Hz, di ampiezza (A) = 2,79, compatibile con un basso/medio contrasto di impedenza a profondità dell'ordine dei 15÷20 m di profondità.

Classificazione curva: B1.

### **Cerageto\_HV13**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco a frequenza (F) = 1,1 (ampiezza A = 1,53), picco non significativo.

Curva (H/V) da considerare pressoché “piatta”, compatibile con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: A2.

### **Cerageto\_HV14**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 50 Hz.

N. 2 picchi, di ampiezze tra loro paragonabili, a frequenza (F) = 31,25 Hz (ampiezza A = 3,81) e frequenza (F) = 26,60 Hz (ampiezza A = 3,71), entrambi non significativi per frequenza, essendo legati ad alti contrasti di impedenza molto superficiali; nella restante parte, la curva (H/V) è da considerare pressoché “piatta” e compatibile quindi con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità).

Classificazione curva: A1 (relativamente ai picchi analizzati, non significativi per frequenza).

### **Cerageto\_HV15**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 50 Hz.

Picco a frequenza (F) = 29,0 Hz, di ampiezza (A) = 3,09, non significativo per frequenza, essendo legato ad un contrasto di impedenza molto superficiale; nella restante parte, la curva (H/V) è da considerare pressoché “piatta” e compatibile quindi con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità).

Classificazione curva: A1 (relativamente al picco analizzato, non significativo per frequenza).

### **Campori\_HV16**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco a frequenza (F) = 6,05 Hz, di ampiezza (A) = 3,60, compatibile con un medio/alto contrasto di impedenza sismica correlabile con possibile interfaccia presente a profondità dell'ordine di almeno 15 metri. Classificazione curva: A1.

### **Campori\_HV17**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Curva brutta; picco principale a frequenza (F) = 1,4 Hz (ampiezza A = 2,68), compatibile con medio/basso contrasto d'impedenza molto profondo (> 50 m) e picco secondario a frequenza (F) = 12,65 Hz (ampiezza A = 2,56), legato ad un possibile basso contrasto d'impedenza presente a profondità dell'ordine dei 5 metri.

Classificazione curva: B/.

### **Campori\_HV18**

Eseguita presso lo stendimento sismico a rifrazione ST7 e MASW M2 (*all. 1.3b*).

Finestra di elaborazione = 0,5 – 50 Hz.

Picco a frequenza (F) = 24,35 Hz, di ampiezza (A) = 3,51, non significativo per frequenza, essendo legato ad un contrasto di impedenza superficiale; nella restante parte, la curva (H/V) è da considerare pressoché “piatta” e compatibile quindi con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: B/.

### **Pian\_di\_Cerreto\_HV19**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 40 Hz.

Picco principale a frequenza (F) = 19,40 Hz, di ampiezza (A) = 4,42, compatibile con un alto contrasto di impedenza superficiale (profondità  $\leq 2\div3$  metri); picco secondario a frequenza (F) = 5,15 Hz, di ampiezza (A) = 3,01, compatibile con un medio/alto contrasto di impedenza sismica correlabile con possibile interfaccia presente a profondità dell'ordine di almeno 20 metri. Classificazione curva: A1.

### **Pian\_di\_Cerreto\_HV20**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco ben marcato a frequenza (F) = 8,90 Hz, di ampiezza (A) = 5,57, compatibile con un alto contrasto di impedenza sismica correlabile con possibile interfaccia presente a profondità dell'ordine dei 10÷15 metri. Classificazione curva: A1.

### **Pian\_di\_Cerreto\_HV21**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco ben marcato a frequenza (F) = 5,90 Hz, di ampiezza (A) = 6,46, compatibile con un alto contrasto di impedenza sismica correlabile con possibile interfaccia presente a profondità dell'ordine dei 20 metri. Classificazione curva: A1.

### **Chiozza\_HV22**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Curva (H/V) brutta; presenza di picchi poco chiari legati ad andamento anomalo delle singole componenti spettrali.

Curva da considerare pressoché “piatta” e compatibile quindi con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: B/.

### **Chiozza\_HV23**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 30 Hz.

Presenza di picco poco chiaro alla frequenza (F) = 21,65 Hz, di ampiezza (A) = 3,84, legato ad andamento anomalo delle singole componenti spettrali e comunque non significativo per frequenza, essendo legato ad un contrasto di impedenza superficiale.

Curva da considerare pressoché “piatta” e compatibile quindi con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: B/.

### **Chiozza\_HV24**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco a frequenza (F) = 1,4 (ampiezza A = 1,76), picco non significativo.

Curva (H/V) da considerare pressoché “piatta”, compatibile con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: A2.

### **Chiozza\_HV25**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 40 Hz.

N. 2 picchi rispettivamente a frequenza (F) = 23,9 Hz (ampiezza A = 4,36) e frequenza (F) = 17,15 Hz (ampiezza A = 3,68), entrambi non significativi per frequenza, essendo legati ad alti contrasti di impedenza superficiali, altresì considerabili come un picco unico “centrato” sui 20 Hz di frequenza; nella restante parte, la curva (H/V) è da considerare pressoché “piatta” e compatibile quindi con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità).

Classificazione curva: A1 (relativamente ai picchi analizzati, non significativi per frequenza).

### **Chiozza\_HV26**

Finestra di elaborazione = 0,5 – 20 Hz.

Picco a frequenza (F) = 1,4 (ampiezza A = 1,73), picco non significativo.

Curva (H/V) da considerare pressoché “piatta”, compatibile con la presenza di un substrato sismico affiorante/subaffiorante o comunque con un miglioramento graduale delle caratteristiche meccaniche dei terreni (aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità). Classificazione curva: A2.

I dati relativi ai picchi evidenziati dalle elaborazione delle misure di rumore (HVSR) sono riportati nel successiva Tabella 5.1 riassuntiva.

In particolare, per ciascuna elaborazione HVSR, viene indicata la frequenza di picco fondamentale ( $F_0$ ) con la rispettiva ampiezza del picco ( $A_0$ ).

In alcuni casi, quando sono presenti picchi secondari, viene riportata la frequenza del picco secondario ( $F_1$ ) e la sua ampiezza ( $A_1$ ).

**Tabella 5.1. Misure HVSR: Frequenza ed Ampiezza dei picchi**

N°	Sito	$F_0$ (Hz)	$A_0$	$F_1$ (Hz)	$A_1$	Classe
1	Castiglione_HV1	9,5	2,51			B/
2	Castiglione_HV2	12,95	2,37			B/
3	Castiglione_HV3	2,75	2,05			B/
4	Castiglione_HV4	2,75	2,4			B/
5	Castiglione_HV5	3,80	2,43			B/
6	Castiglione_HV6	26 (*)	13 (*)			A1
7	Castiglione_HV7	4,85	3,67	7,10	3,61	B1
8	Castiglione_HV8	5,6	3,59			B1
9	Castiglione_HV9	19,1 (*)	3,1 (*)			A1
10	Castiglione_HV10	7,85	5,37			A1
11	Castiglione_HV11	10,25	3,83			A1
12	Castiglione_HV12	5,6	2,79			B1
13	Cerageto_HV13	1,1 (**)	1,53 (**)			A2
14	Cerageto_HV14	31,25 (*)	3,81 (*)	26,6 (*)	3,71 (*)	A1
15	Cerageto_HV15	29 (*)	3,09 (*)			A1
16	Campori_HV16	6,05	3,6			A1
17	Campori_HV17	1,4	2,68	12,65	2,56	B/
18	Campori_HV18	24,35 (*)	3,51 (*)			B/
19	Pian_di_Cerreto_HV19	19,4	4,42	5,15	3,01	A1
20	Pian_di_Cerreto_HV20	8,9	5,57			A1
21	Pian_di_Cerreto_HV21	5,9	6,46			A1
22	Chiozza_HV22	14,8 (°)	2,4 (°)	17,9 (°)	2,33 (°)	B/
23	Chiozza_HV23	21,65 (°)	3,84 (°)			B/
24	Chiozza_HV24	1,4 (**)	1,76 (**)			A2
25	Chiozza_HV25	23,9 (*)	4,36 (*)	17,15 (*)	3,68 (*)	A1
26	Chiozza_HV26	1,4 (**)	1,73 (**)			A2

(\*) Picco non significativo per frequenza, legato a contrasto superficiale; curva da considerare pressoché “piatta”.

(\*\*) Assenza di picchi significativi; curva da considerare “piatta”.

(°) Picco poco chiaro legato ad andamento anomalo delle componenti; curva da considerare pressoché “piatta”.

Castelnuovo di Garfagnana, Giugno 2021

PRO.GEO. s.r.l.

Dott. Geol. AMERINO PIERONI

**PRO.GEO. s.r.l.**

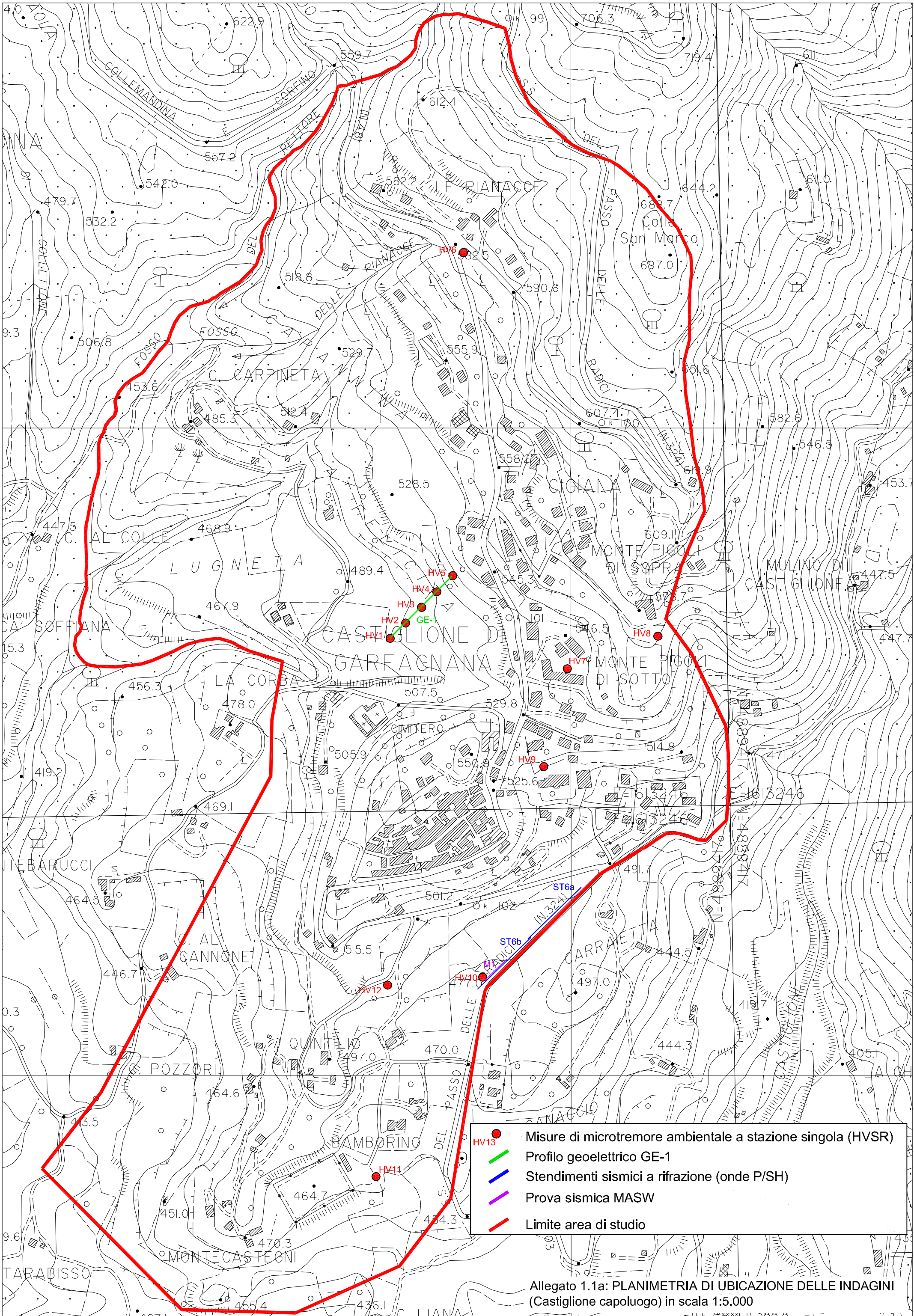
Via Valmaira, 14

55032 CASTELNUOVO GARFAGNANA (LU)

Part. IVA: 01998560468

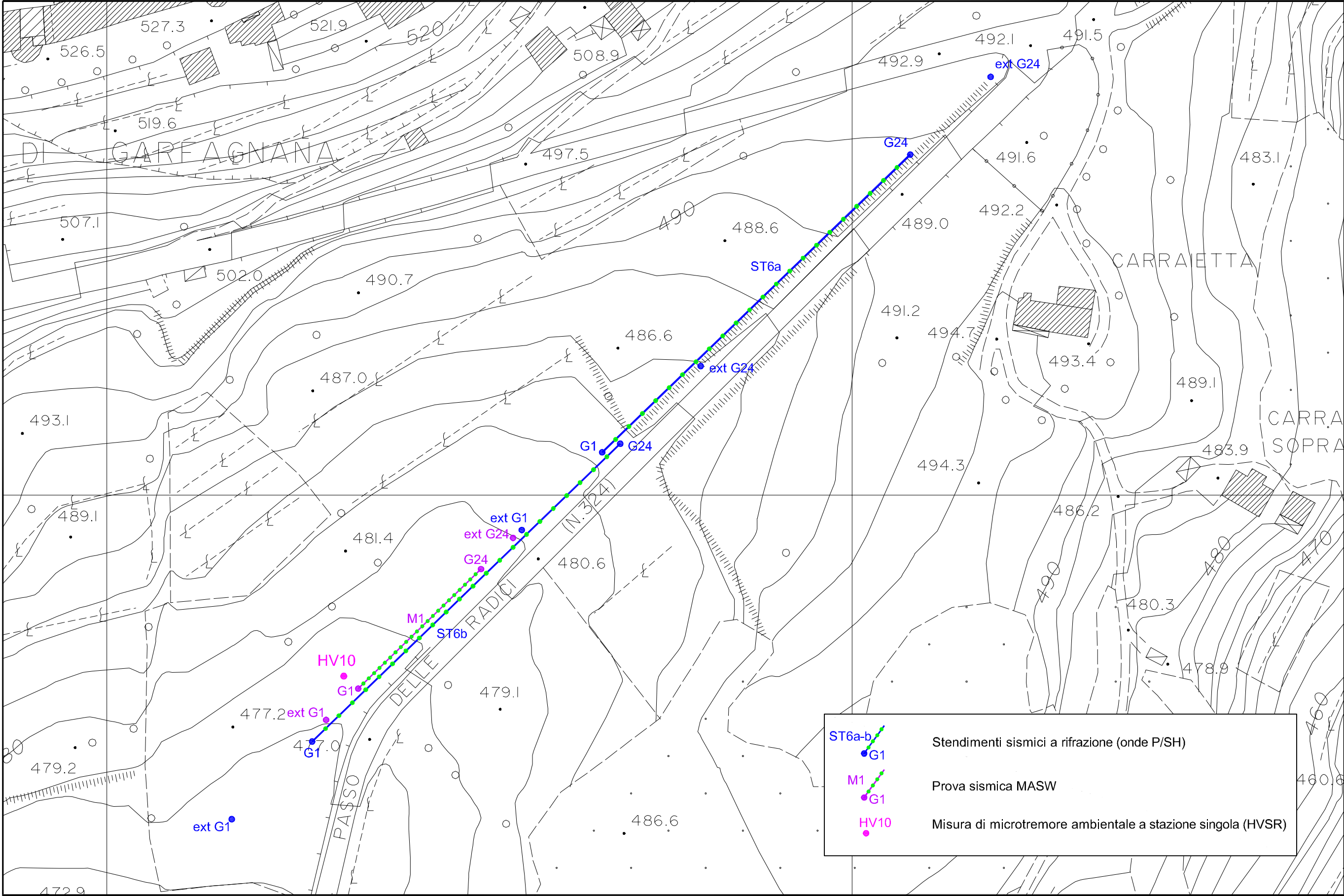
*Amerino*



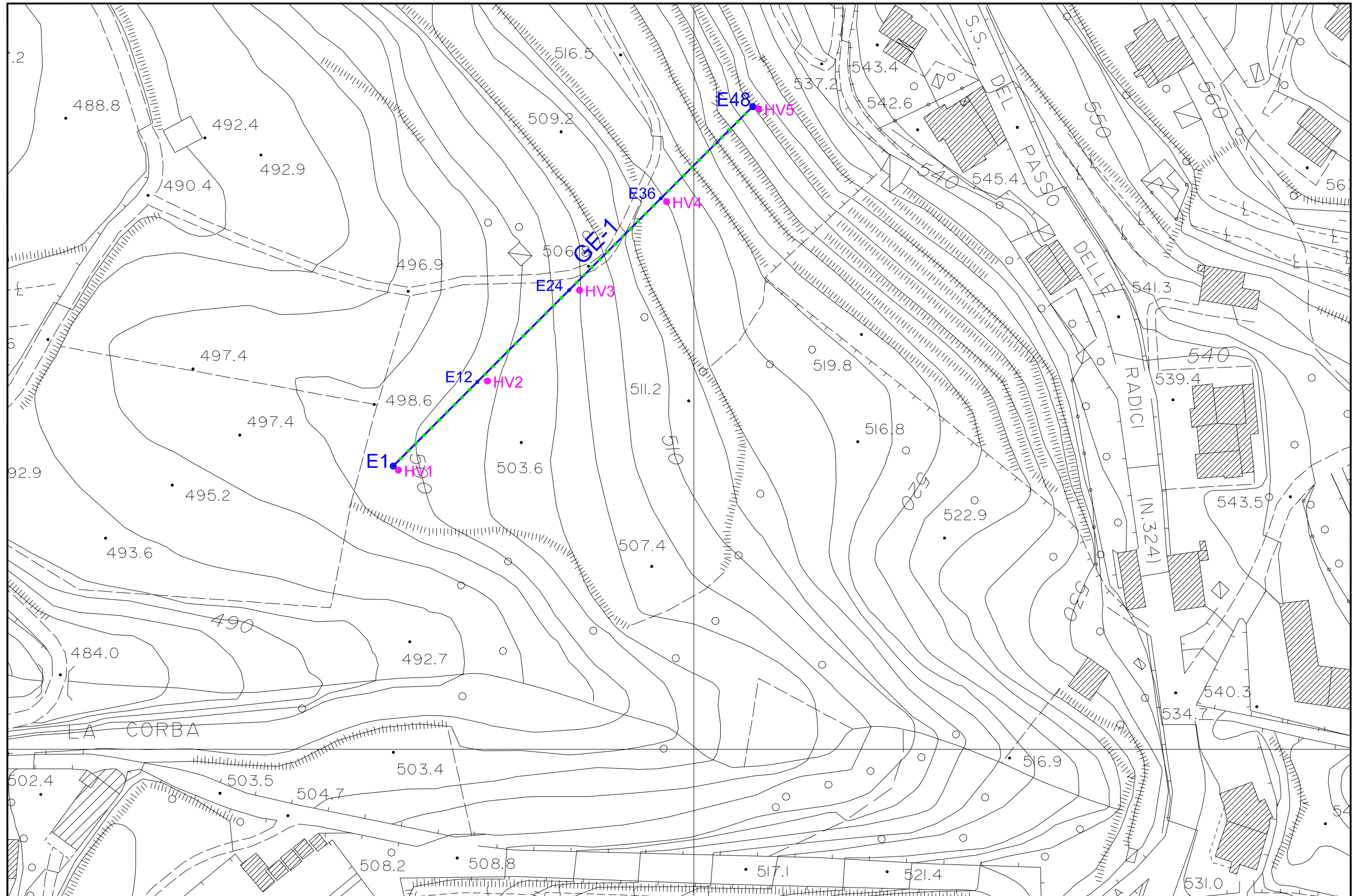


Allegato 1.1a: PLANIMETRIA DI UBICAZIONE DELLE INDAGINI  
(Castiglione capoluogo) in scala 1:5.000

Allegato 1.1b: PLANIMETRIA DI UBICAZIONE DELLE INDAGINI (Castiglione capoluogo) in scala 1:1000





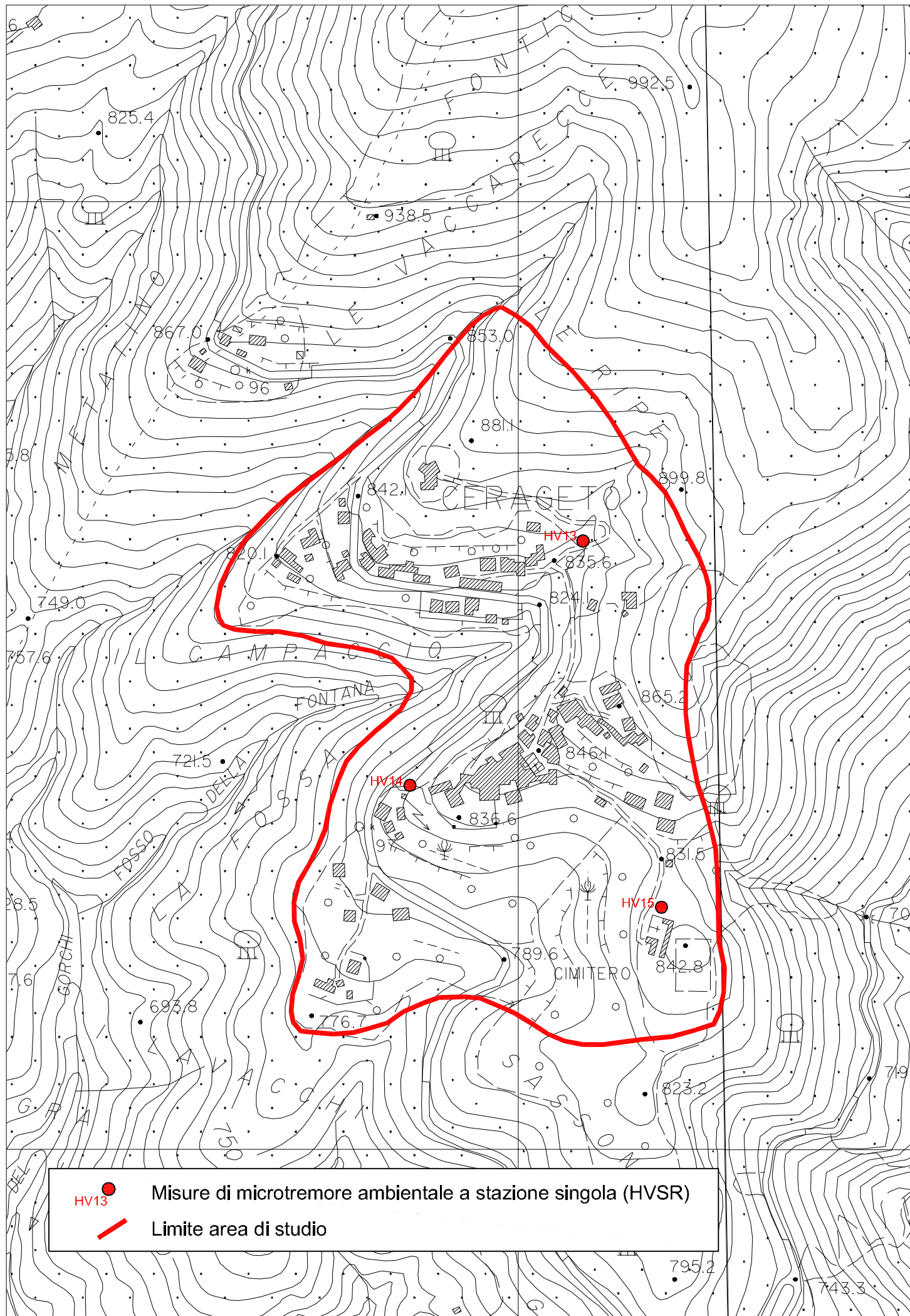


Profilo geoelettrico

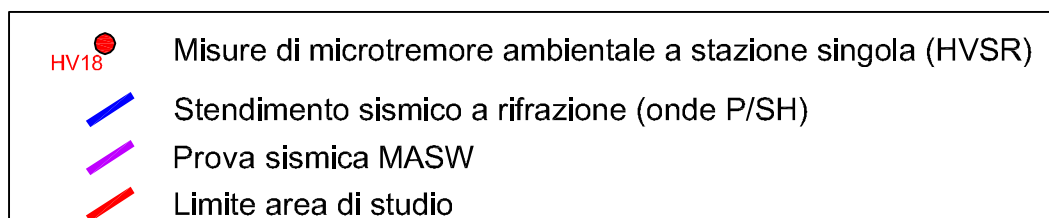
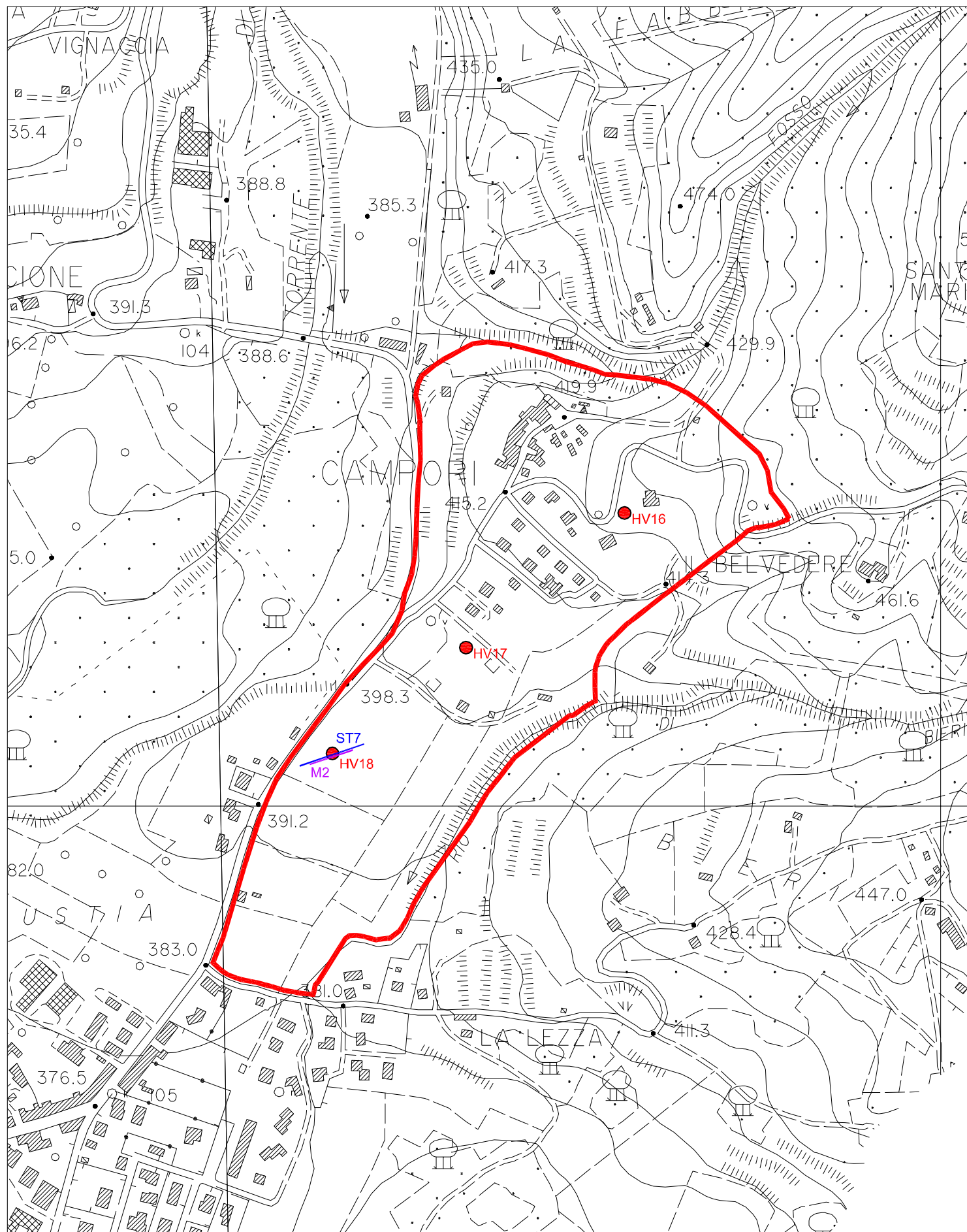


Misura di microtremore a stazione singola (HVSR)



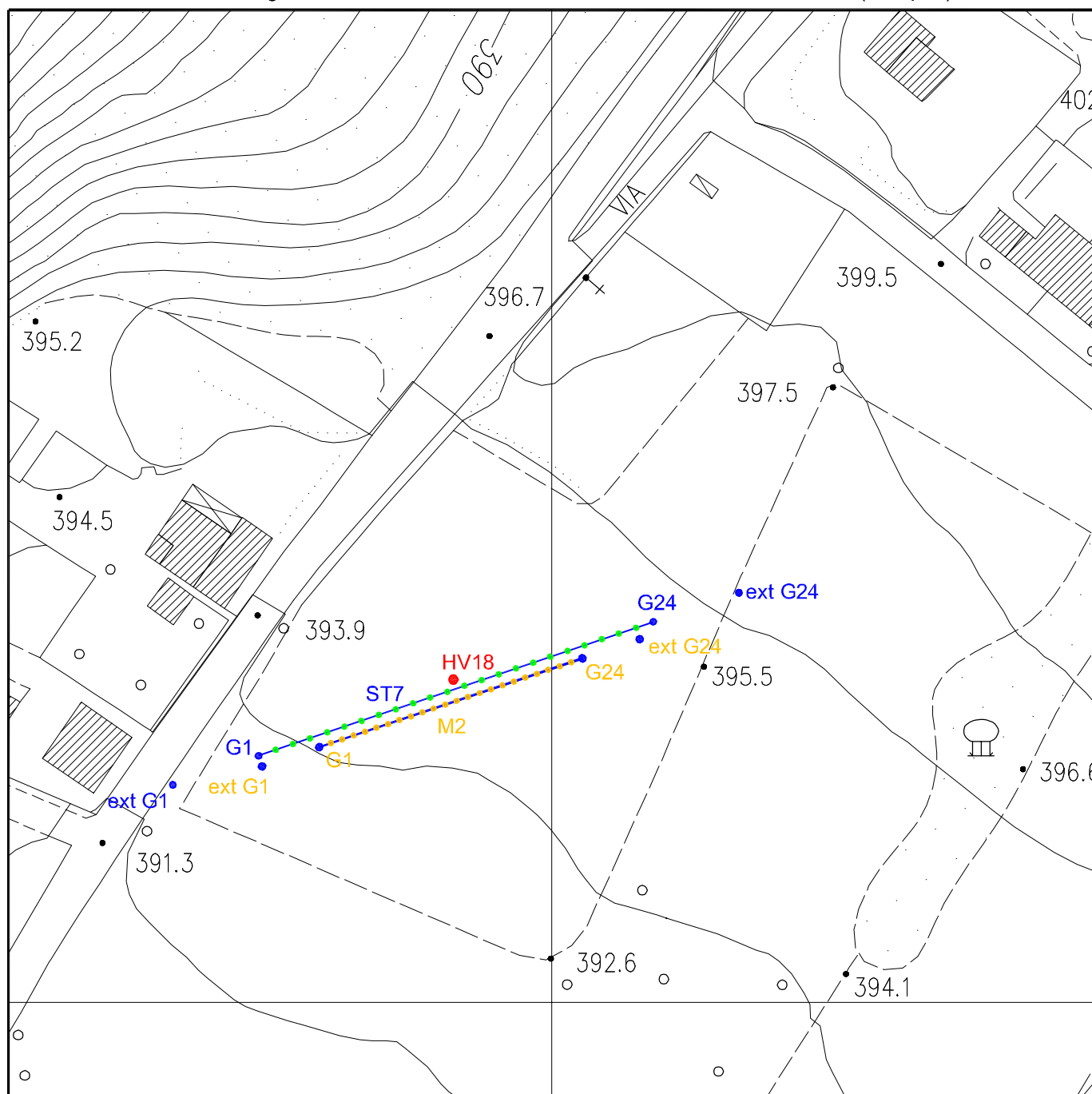


Allegato 1.2: PLANIMETRIA DI UBICAZIONE DELLE INDAGINI (Cerageto) in scala 1:5.000



Allegato 1.3a: PLANIMETRIA DI UBICAZIONE DELLE INDAGINI (Campori) in scala 1:5.000

Allegato 1.3b: PLANIMETRIA DI UBICAZIONE DELLE INDAGINI (Campori) in scala 1:1000



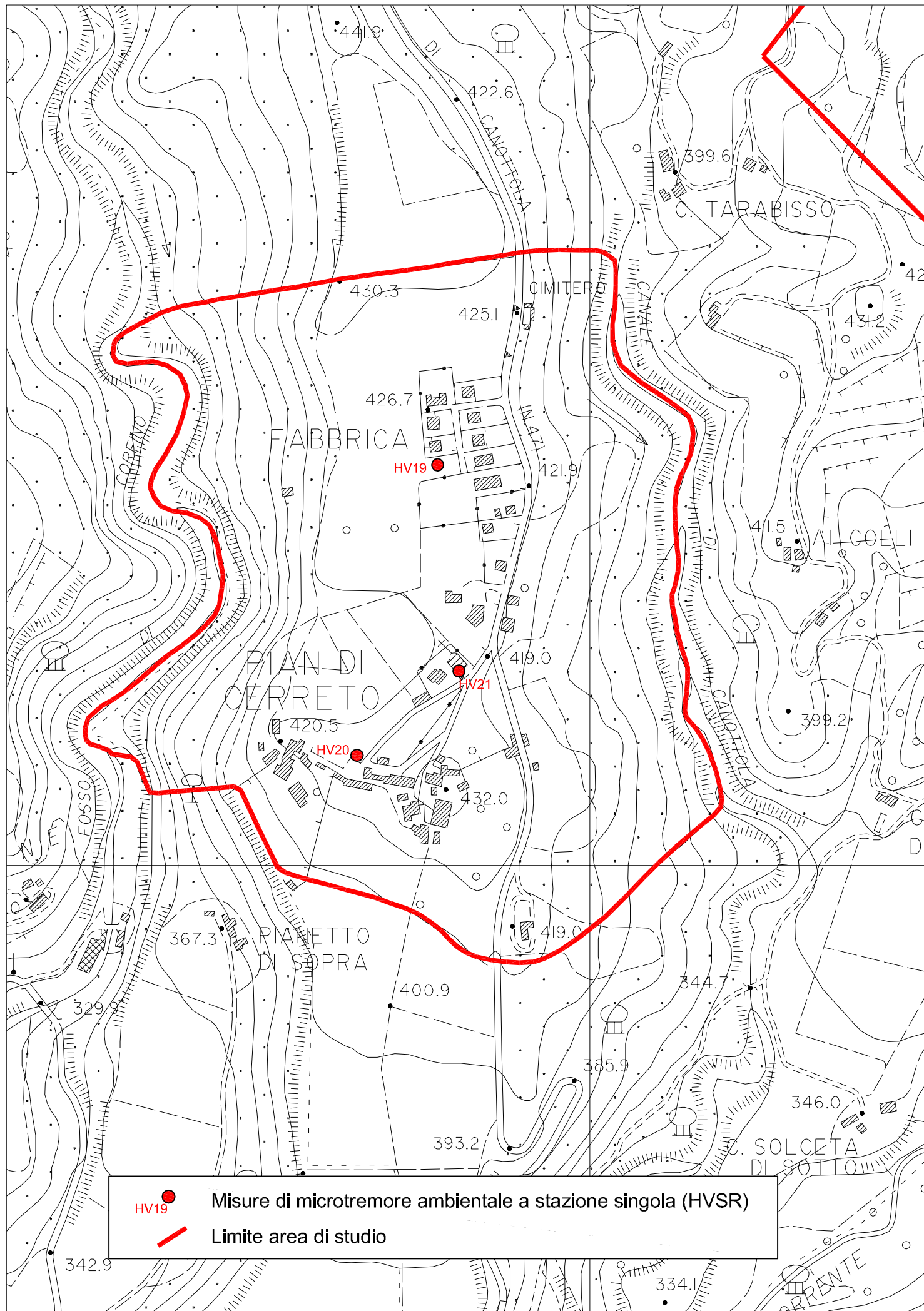
Stendimento sismico a rifrazione (onde P/SH)



Prova sismica MASW

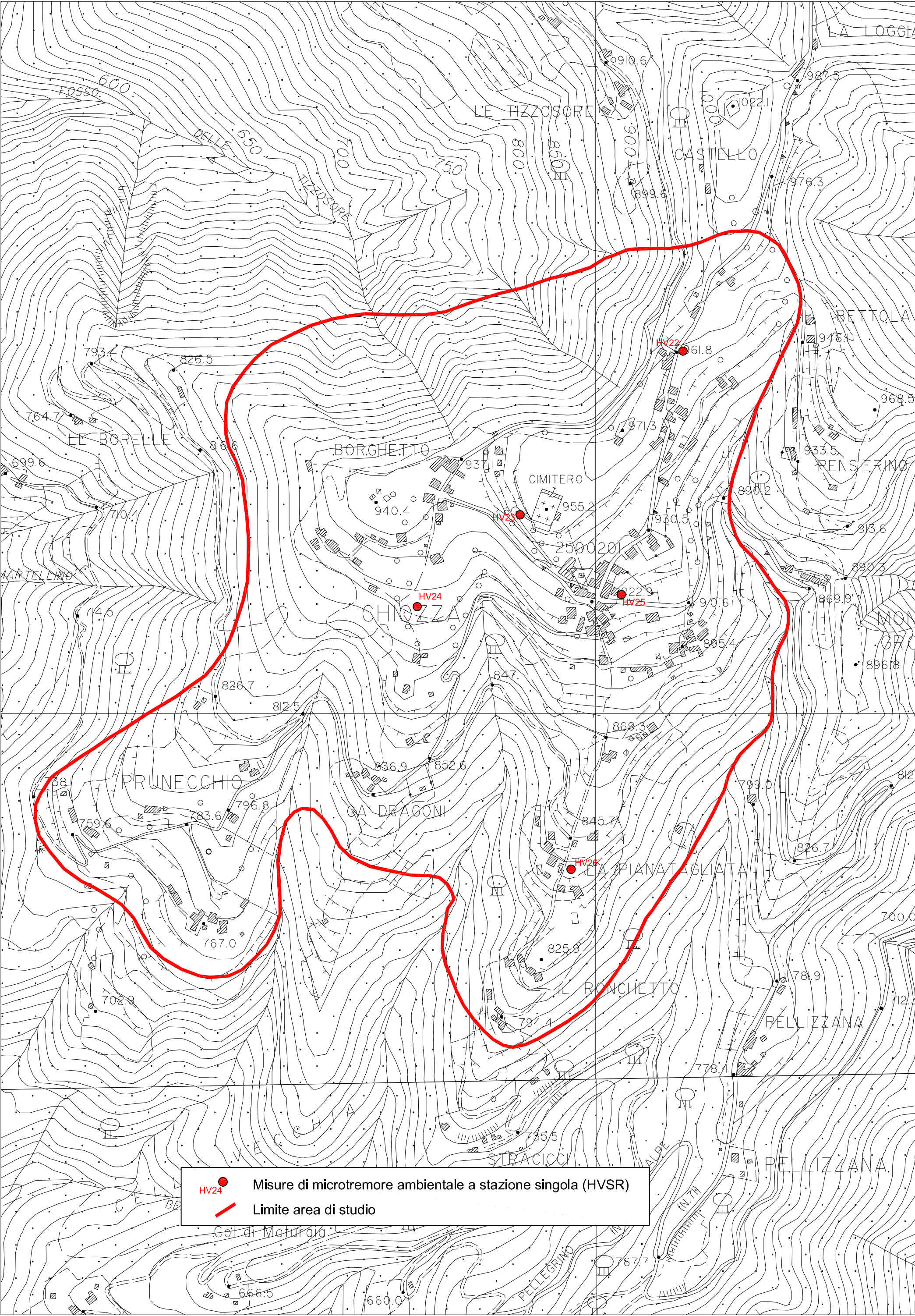


Misura di microtremore ambientale a stazione singola (HVSr)



Allegato 1.4: PLANIMETRIA DI UBICAZIONE DELLE INDAGINI (Pian di Cerreto) in scala 1:5.000





Allegato 1.5: PLANIMETRIA DI UBICAZIONE DELLE INDAGINI (Chiozza) in scala 1:5.000

## Allegato 2.1a: PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P - ST6a

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

Data di esecuzione: 21.04.2017

Linea sismica: ST6a-P

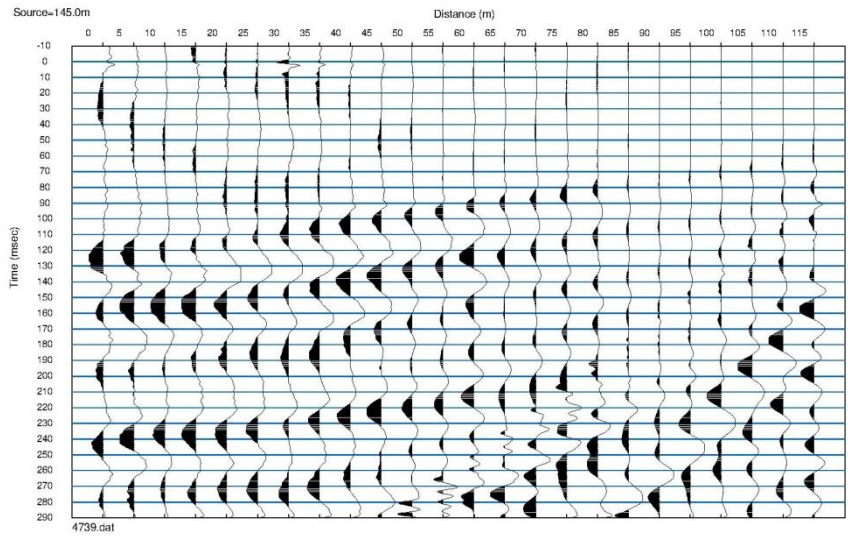
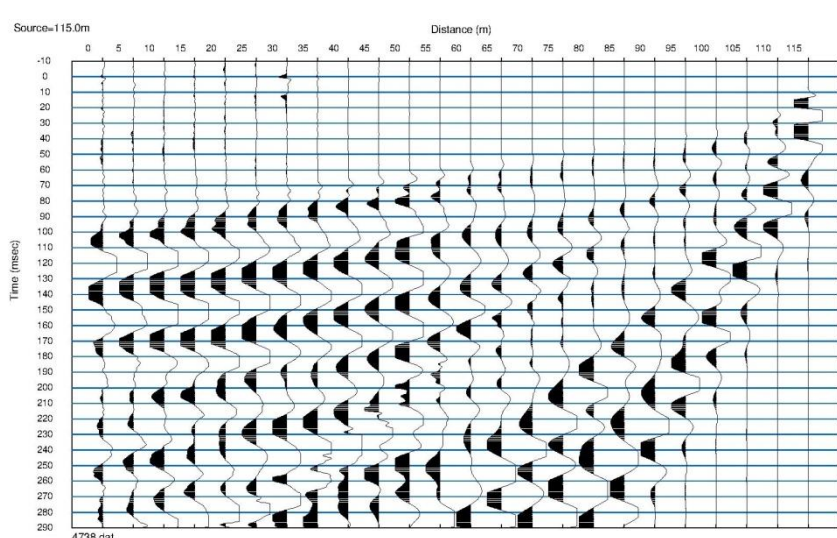
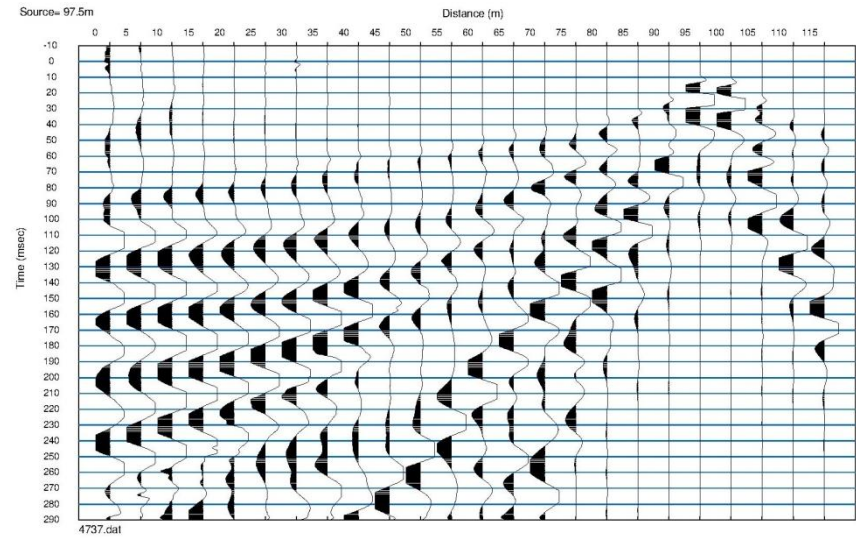
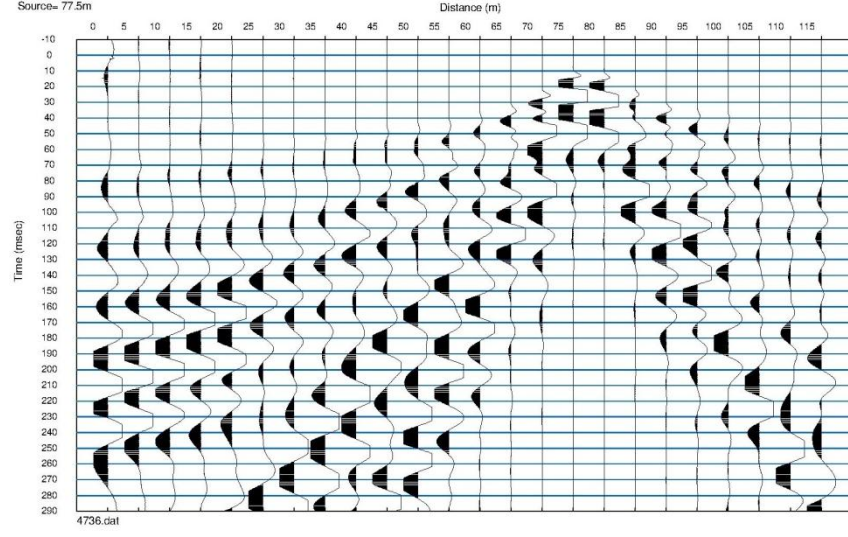
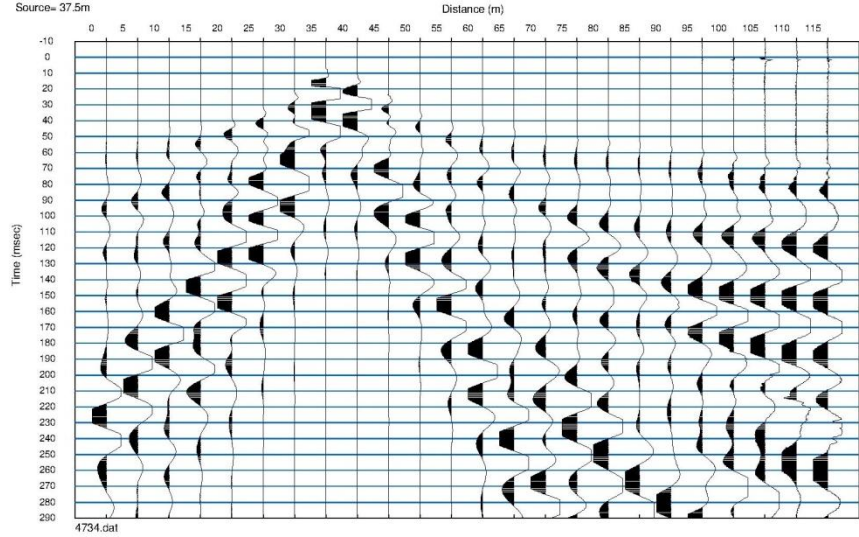
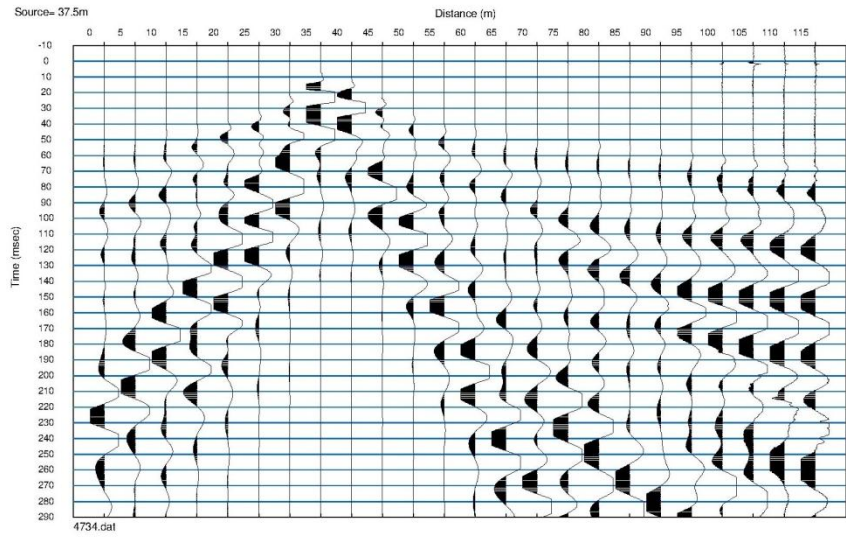
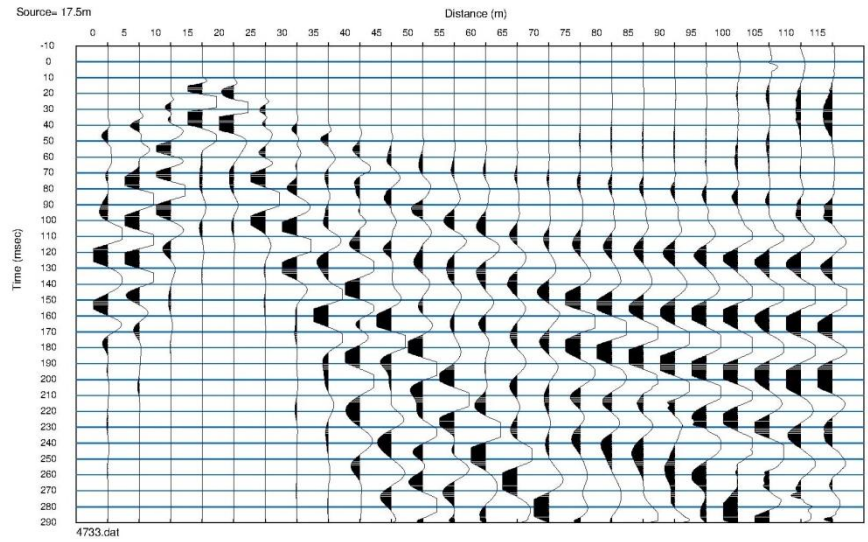
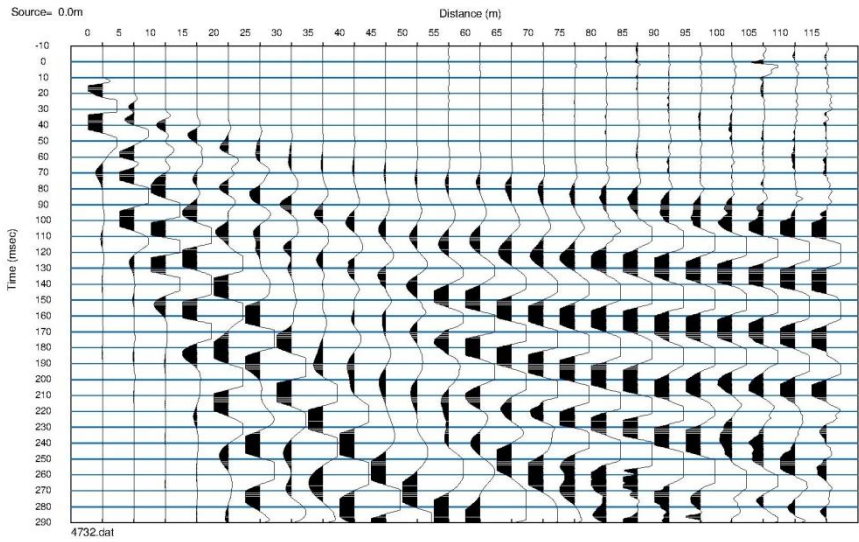
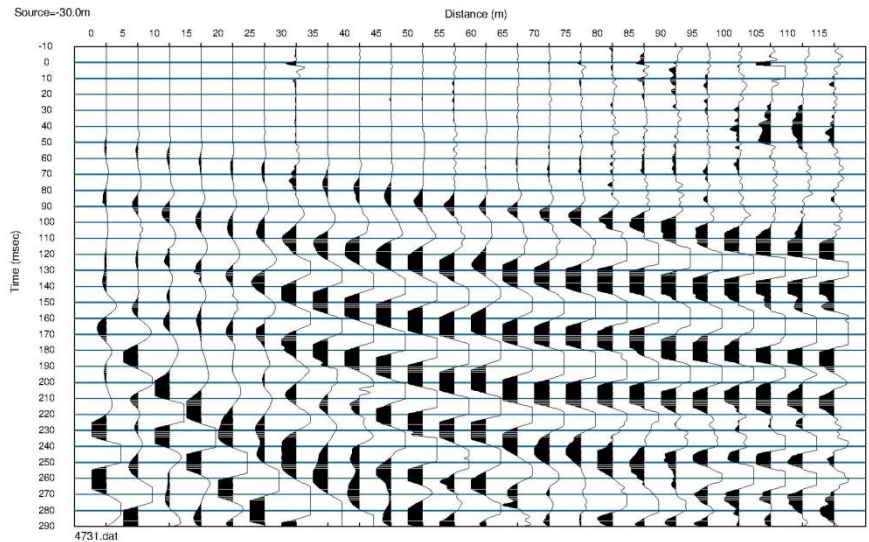
**Tabella 1:** Geometria dello stendimento con tempi di primo arrivo e tempi intercetti

Geo.	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6	Shot 7	Shot 8	Shot 9	Distance	Elevation	Inter- cept
1	32,34	8,64	36,40	45,83	55,47	61,68	67,19	84,01	95,19	2,5	482,9	17,7
2	37,74	18,87	26,21	43,13	52,97	59,74	65,16	81,37	93,15	7,5	483,5	21,1
3	43,13	27,39	16,03	40,43	50,47	57,79	63,13	78,81	91,08	12,5	484,1	24,4
4	48,59	33,90	5,84	37,75	47,97	55,84	61,09	76,26	89,02	17,5	484,7	27,8
5	50,79	36,41	6,32	34,77	45,47	53,90	59,06	73,72	86,98	22,5	485,2	28,0
6	53,25	38,93	19,34	25,15	42,97	51,95	57,04	71,18	84,91	27,5	485,5	28,4
7	55,70	41,45	31,84	15,02	40,47	50,00	55,00	68,62	82,87	32,5	485,8	28,8
8	58,15	43,97	38,22	4,88	37,97	48,04	52,97	66,08	80,80	37,5	486,1	29,2
9	60,61	46,49	40,66	4,88	34,97	46,11	50,93	63,52	78,75	42,5	486,3	29,6
10	63,06	49,00	43,09	21,14	28,85	44,11	48,90	60,97	76,69	47,5	486,6	30,0
11	65,51	51,52	45,54	31,12	20,54	41,49	46,88	58,43	74,63	52,5	486,8	30,3
12	67,97	54,04	47,97	37,56	5,73	38,86	44,84	55,88	72,58	57,5	487,1	30,8
13	70,41	56,56	50,40	39,91	6,03	36,22	42,81	53,33	70,52	62,5	487,4	31,1
14	72,87	59,06	52,84	42,27	18,56	27,48	40,77	50,77	68,47	67,5	487,8	31,5
15	75,31	61,59	55,29	44,63	31,11	17,68	38,75	48,22	66,41	72,5	488,2	31,9
16	77,76	64,11	57,72	47,00	34,36	7,86	36,72	45,68	64,36	77,5	488,6	32,3
17	80,22	66,62	60,15	49,36	36,93	7,82	32,93	43,13	62,31	82,5	488,9	32,7
18	82,68	69,13	62,59	51,72	39,50	17,17	26,73	40,58	60,25	87,5	489,3	33,1
19	85,12	71,66	65,02	54,08	42,06	26,51	15,02	38,02	58,18	92,5	489,7	33,5
20	87,58	74,16	67,47	56,43	44,63	32,33	4,48	35,16	55,63	97,5	490,1	33,4
21	90,02	76,69	69,90	58,79	47,20	34,77	4,48	30,43	50,75	102,5	490,4	31,0
22	92,48	79,19	72,33	61,15	49,77	37,20	16,84	24,50	45,86	107,5	490,6	28,5
23	94,93	81,72	74,76	63,52	52,34	39,65	24,21	14,35	40,97	112,5	490,7	26,1
24	97,38	84,23	77,20	65,88	54,90	42,09	31,59	6,53	36,09	117,5	490,9	23,7
Distance	-27,5	0,0	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0	120,0	147,5			
Elevation	480,9	482,6	485,1	486,2	487,2	488,8	490,3	491,0	491,0			

**Tabella 2:** Risultati elaborazione GRM

Geo.	Quota s.l.m. (m)	Velocità V1 (m/s)	Velocità V2 (m/s)	Velocità Substrato (m/s)	Spessore strato 1 (m)	Spessore strato 2 (m)	Quota Substrato s.l.m. (m)
1	482,9	592					
2	483,5	558		1342	6,4		477,1
3	484,1	524		1335	6,9		477,2
4	484,7	491		1700	6,7		478,0
5	485,2	491		2280	7,0		478,2
6	485,5	494		2217	7,1		478,4
7	485,8	498		2219	7,3		478,5
8	486,1	502		2214	7,5		478,6
9	486,3	502		2217	7,6		478,7
10	486,6	508		2217	7,8		478,8
11	486,8	514		2217	8,0		478,8
12	487,1	521		2219	8,2		478,9
13	487,4	521		2219	8,3		479,1
14	487,8	523		2219	8,4		479,4
15	488,2	525		2222	8,6		479,6
16	488,6	528		2219	8,7		479,9
17	488,9	528		2214	8,9		480,0
18	489,3	524		2214	8,9		480,4
19	489,7	520		2100	8,8		480,9
20	490,1	516		1622	8,7		481,4
21	490,4	516		1363	8,6		481,8
22	490,6	571		1361	8,9		481,7
23	490,7	626		1363	9,2		481,5
24	490,9	682					





## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P-ST6a

Località: Castiglione Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

Sismogrammi ST6a-p

All. 2.1b

Aprile 2017



- Shot 1 = esterno G1    Shot 2 = G1    Shot 3 = G4/G5  
 Shot 4 = G8/G9    Shot 5 = G12/G13    Shot 6 = G16/G17  
 Shot 7 = G20/G21    Shot 8 = G24    Shot 9 = esterno G24

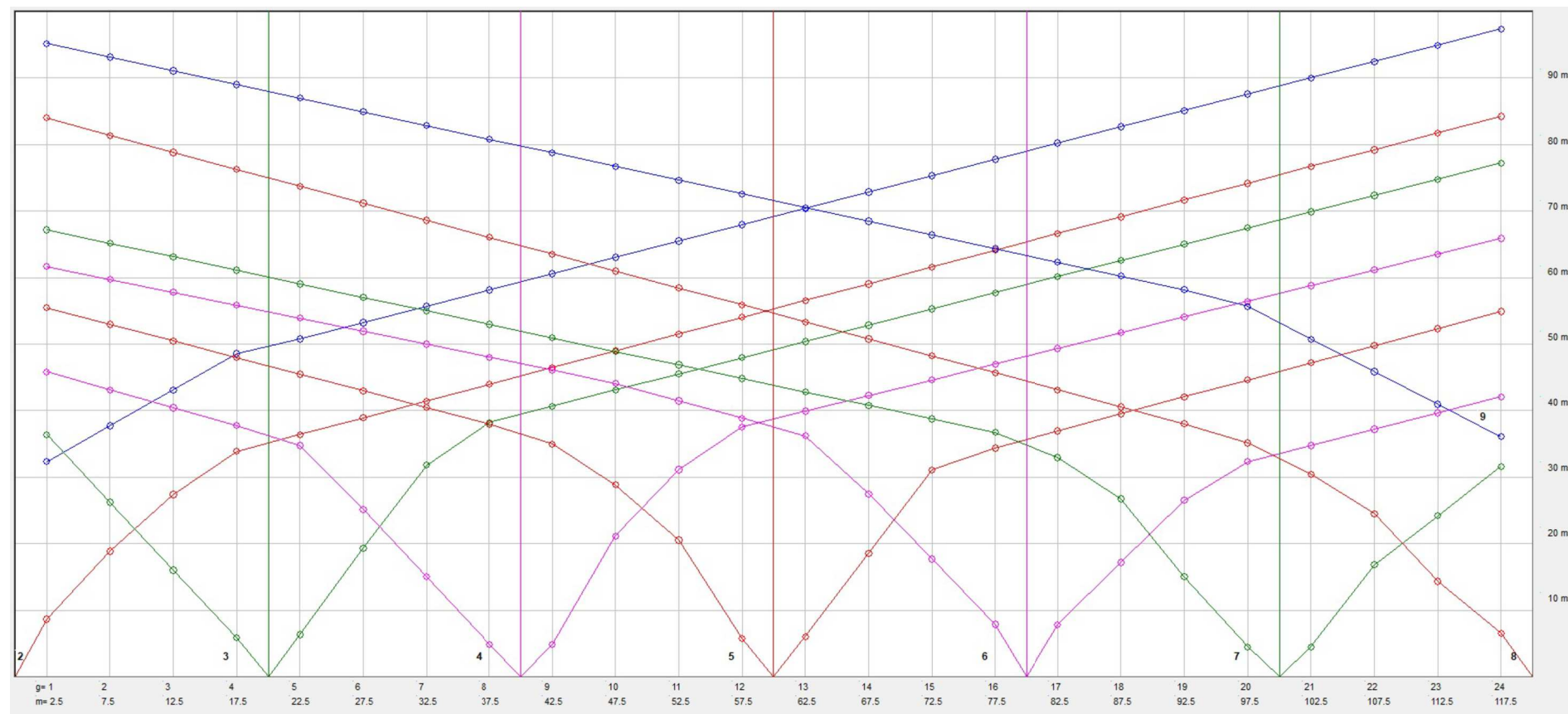


Grafico delle domocrone misurate in scala 1:500

- Tempi dei primi arrivi ai geofoni  
 Profilo topografico  
 Geofoni  
 Profondità del limite di strato  
 200 m/s Velocità sismica dello strato in metri al secondo



Profilo sismico GRM in scala 1:500

## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

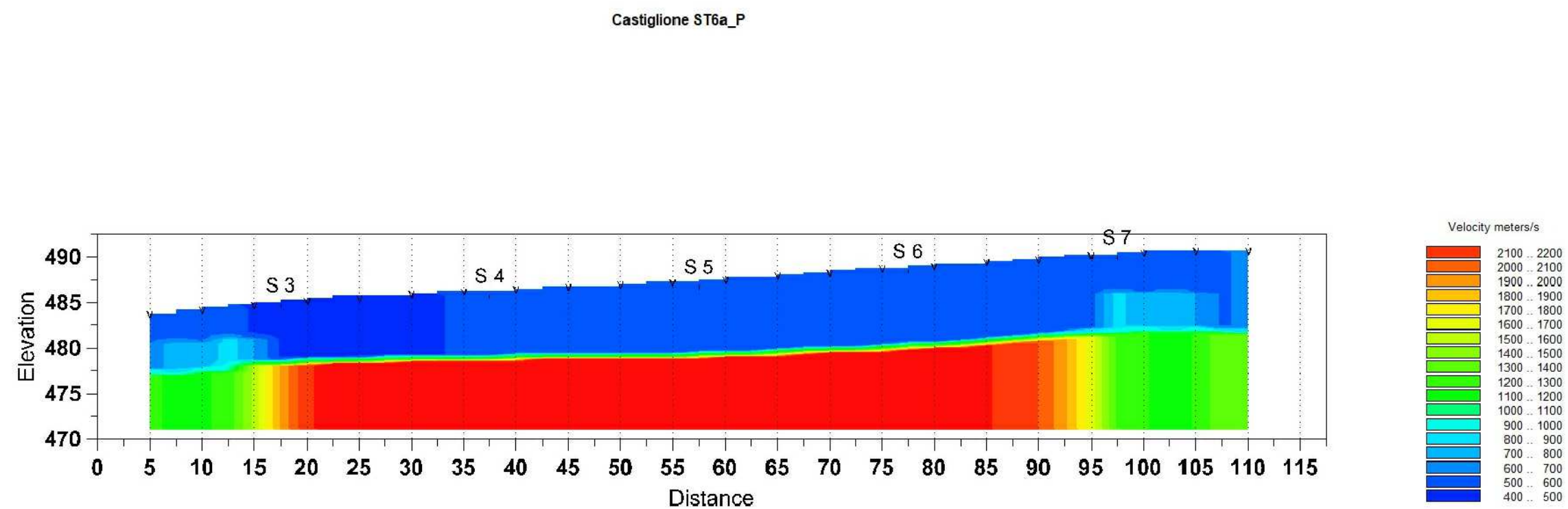
Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

### SEZIONE SISMICA ST6a-p

All. 2.1c

Aprile 2017



Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni in scala 1:500

**PROSPEZIONE SISMICA  
A RIFRAZIONE CON ONDE P**

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

**SEZIONE SISMICA ST6a-p**

All. 2.1d

Aprile 2017

## Allegato 2.2a: PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH - ST6a

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

Data di esecuzione: 21.04.2017

Linea sismica: ST6a-SH

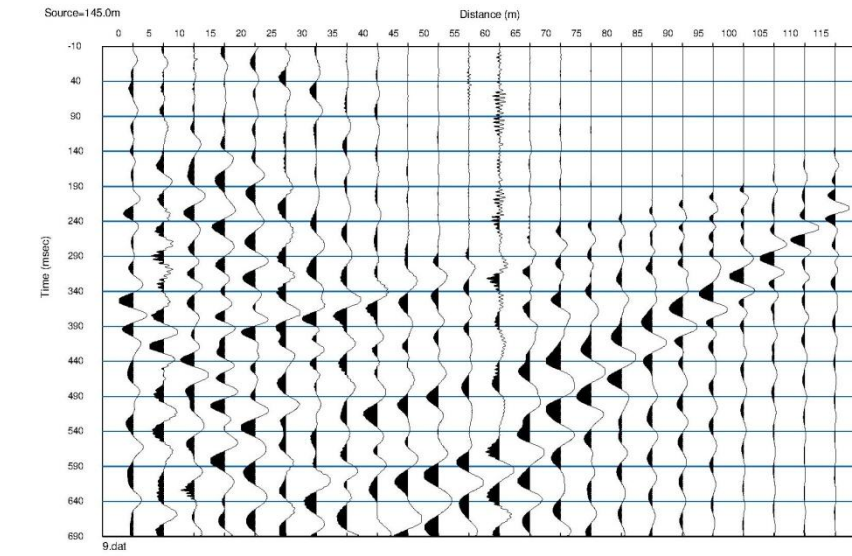
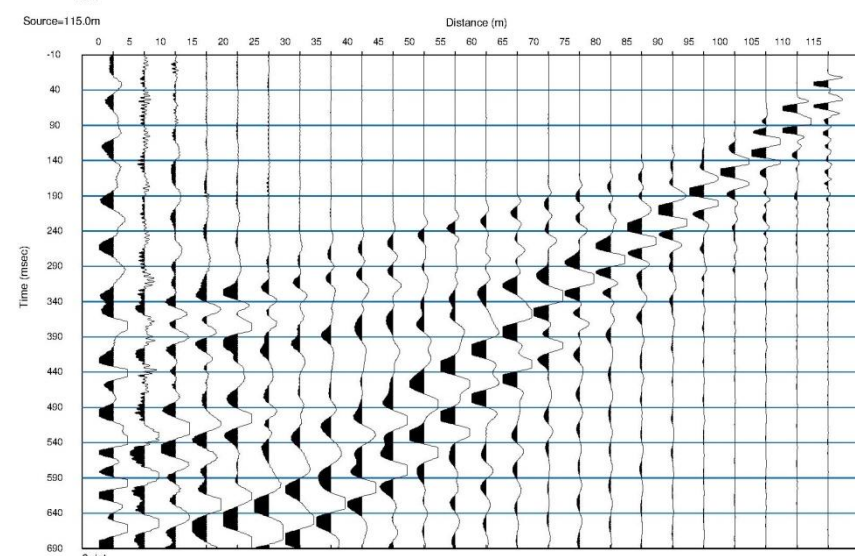
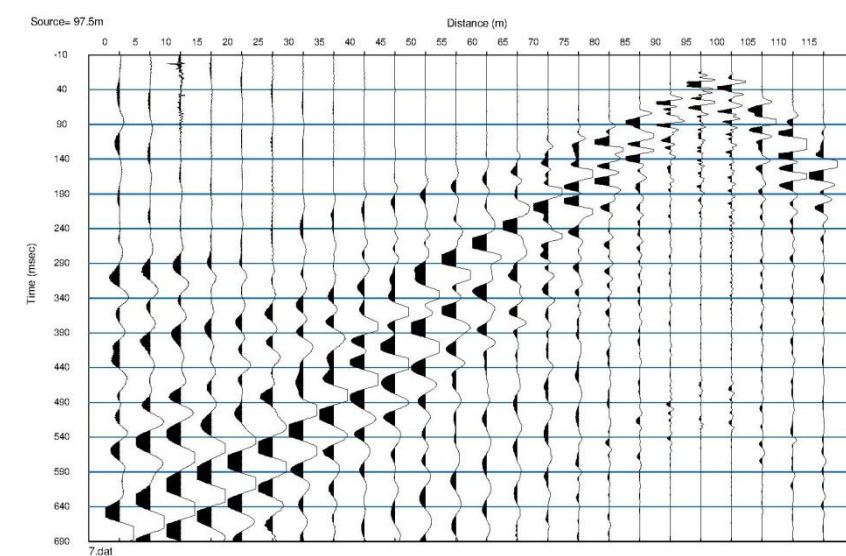
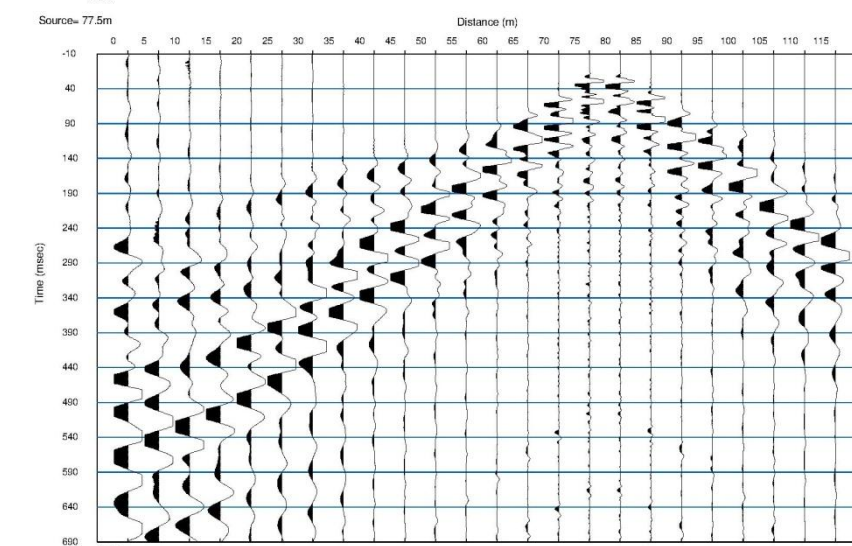
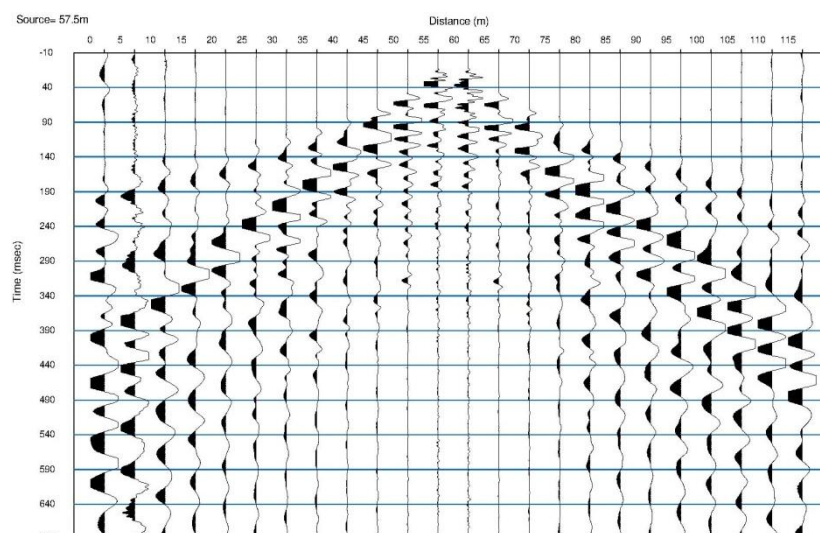
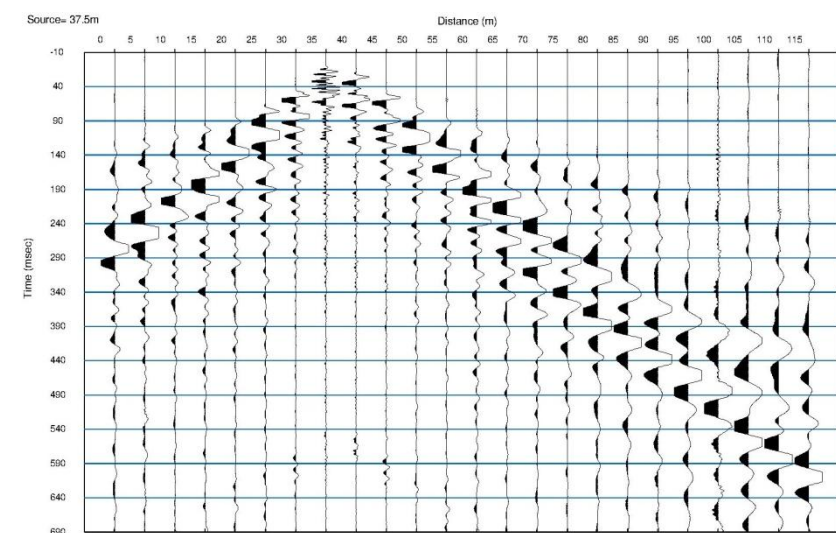
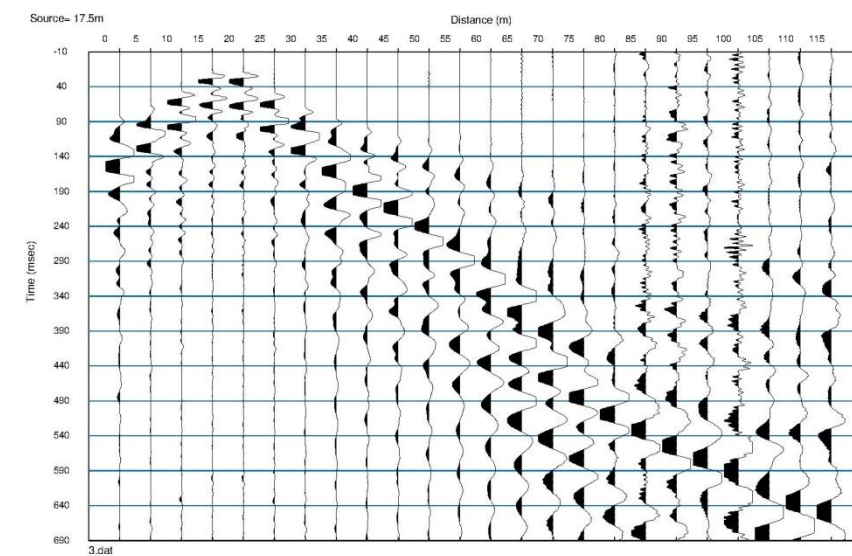
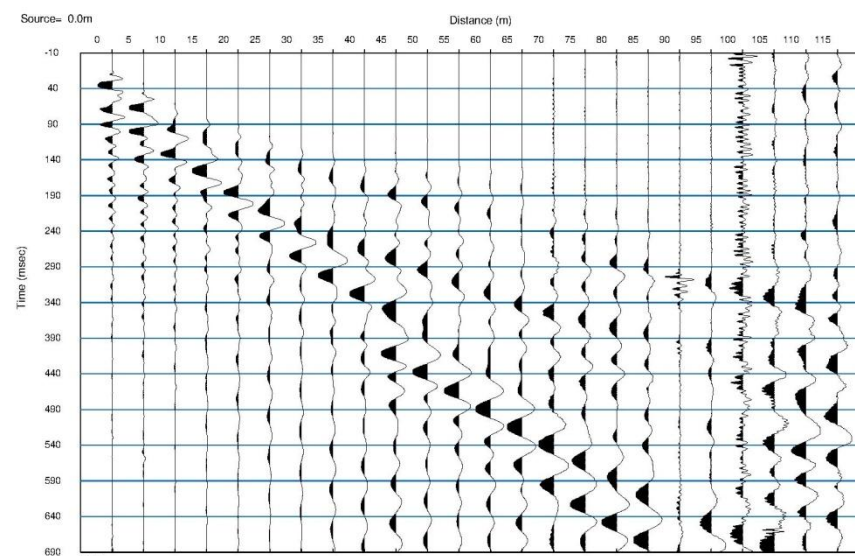
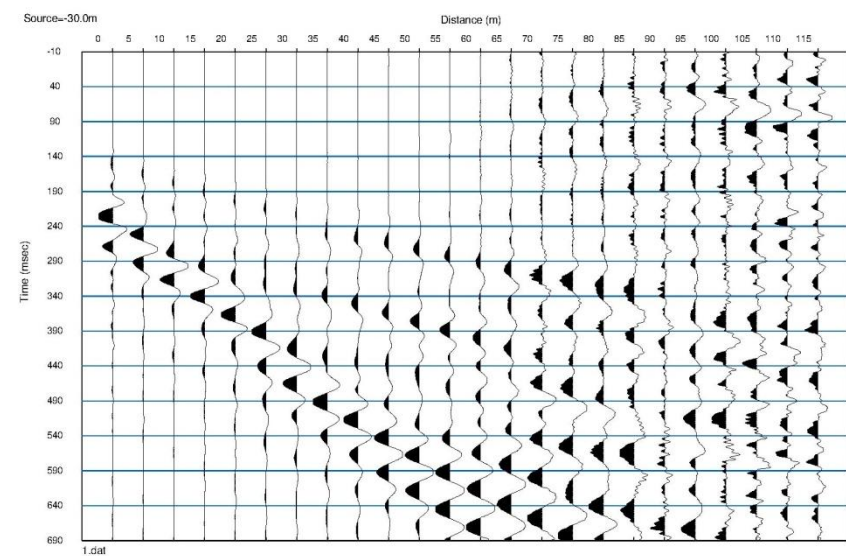
**Tabella 1:** Geometria dello stendimento con tempi di primo arrivo e tempi intercetti

Geo.	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6	Shot 7	Shot 8	Shot 9	Distance	Elevation	Inter- cept
1	114,89	14,26	81,11	132,64	175,26	209,51	256,56	284,05	346,87	2,5	482,9	51,7
2	127,21	42,93	59,88	119,54	164,48	199,39	245,90	274,78	338,24	7,5	483,5	55,4
3	139,54	62,23	38,65	106,45	153,69	189,27	235,24	265,51	329,61	12,5	484,1	59,1
4	151,87	79,19	9,56	93,35	142,91	179,15	224,58	256,24	320,98	17,5	484,7	62,8
5	164,20	96,15	11,07	80,25	132,12	169,03	213,91	246,97	312,35	22,5	485,2	66,5
6	170,59	110,05	38,89	66,11	121,34	158,91	203,25	237,70	303,72	27,5	485,5	64,3
7	179,92	122,74	64,67	37,31	110,55	148,79	192,59	228,43	295,09	32,5	485,8	65,0
8	189,25	131,81	80,67	8,51	98,72	138,67	181,92	219,16	286,46	37,5	486,1	65,7
9	198,58	140,87	93,87	9,56	80,75	128,56	171,26	209,89	277,83	42,5	486,3	66,4
10	207,92	149,94	107,93	40,82	62,78	118,44	160,60	200,62	269,20	47,5	486,6	67,1
11	217,25	159,00	118,66	62,73	44,82	108,32	149,93	191,35	260,57	52,5	486,8	67,8
12	226,58	168,07	129,40	84,65	10,00	94,29	139,27	182,08	251,94	57,5	487,1	68,5
13	235,91	177,13	140,13	96,51	13,96	78,59	128,61	172,81	243,31	62,5	487,4	69,2
14	245,25	186,20	150,86	108,32	38,04	62,89	117,94	163,54	234,68	67,5	487,8	69,9
15	254,58	195,26	161,60	120,13	62,11	39,95	106,44	154,27	226,05	72,5	488,2	70,6
16	263,91	204,33	172,33	131,93	84,15	14,07	92,13	145,00	217,42	77,5	488,6	71,3
17	273,24	213,39	183,06	143,74	96,95	14,44	72,21	135,73	208,79	82,5	488,9	72,0
18	282,57	222,46	193,80	155,55	109,75	35,30	52,28	126,46	200,16	87,5	489,3	72,7
19	291,91	231,52	204,53	167,35	122,56	56,90	32,36	117,18	191,53	92,5	489,7	73,4
20	301,24	240,59	215,26	179,16	135,36	78,51	12,44	101,79	182,90	97,5	490,1	74,1
21	310,57	249,66	225,99	190,97	148,16	96,67	9,28	83,33	174,27	102,5	490,4	74,8
22	319,90	258,72	236,73	202,78	160,97	110,66	31,96	62,44	160,37	107,5	490,6	70,2
23	329,23	267,79	247,46	214,58	173,77	121,51	54,63	37,56	142,56	112,5	490,7	61,7
24	338,57	276,85	258,19	226,39	186,57	132,36	77,31	10,44	124,76	117,5	490,9	53,3
Distance	-27,5	0,0	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0	120,0	147,5			
Elevation	480,9	482,6	485,1	486,2	487,2	488,8	490,3	491,0	491,0			

**Tabella 2:** Risultati elaborazione GRM

Geo.	Quota s.l.m. (m)	Velocità V1 (m/s)	Velocità V2 (m/s)	Velocità Substrato (m/s)	Spessore strato 1 (m)	Spessore strato 2 (m)	Quota Substrato s.l.m. (m)
1	482,9	249					
2	483,5	236		477	7,5		476,0
3	484,1	224		477	7,4		476,7
4	484,7	212		477	7,4		477,3
5	485,2	212		555	7,2		478,0
6	485,5	199		606	6,9		478,6
7	485,8	186		556	6,4		479,4
8	486,1	174		556	6,0		480,1
9	486,3	174		556	6,0		480,3
10	486,6	194		556	6,9		479,7
11	486,8	214		556	7,8		479,0
12	487,1	235		556	8,8		478,3
13	487,4	235		556	8,9		478,5
14	487,8	233		556	8,9		478,9
15	488,2	232		556	9,0		479,2
16	488,6	231		556	9,0		479,6
17	488,9	231		556	9,1		479,8
18	489,3	237		556	9,5		479,8
19	489,7	244		556	9,9		479,8
20	490,1	251		556	10,4		479,7
21	490,4	251		485	10,5		479,9
22	490,6	240		397	10,2		480,4
23	490,7	229		368	9,0		481,7
24	490,9	219					





## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH-ST6a

Località: Castiglione Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

Sismogrammi ST6a-sh

**All. 2.2b**

Aprile 2017



- Shot 1 = esterno G1
- Shot 2 = G1
- Shot 3 = G4/G5
- Shot 4 = G8/G9
- Shot 5 = G12/G13
- Shot 6 = G16/G17
- Shot 7 = G20/G21
- Shot 8 = G24
- Shot 9 = esterno G24

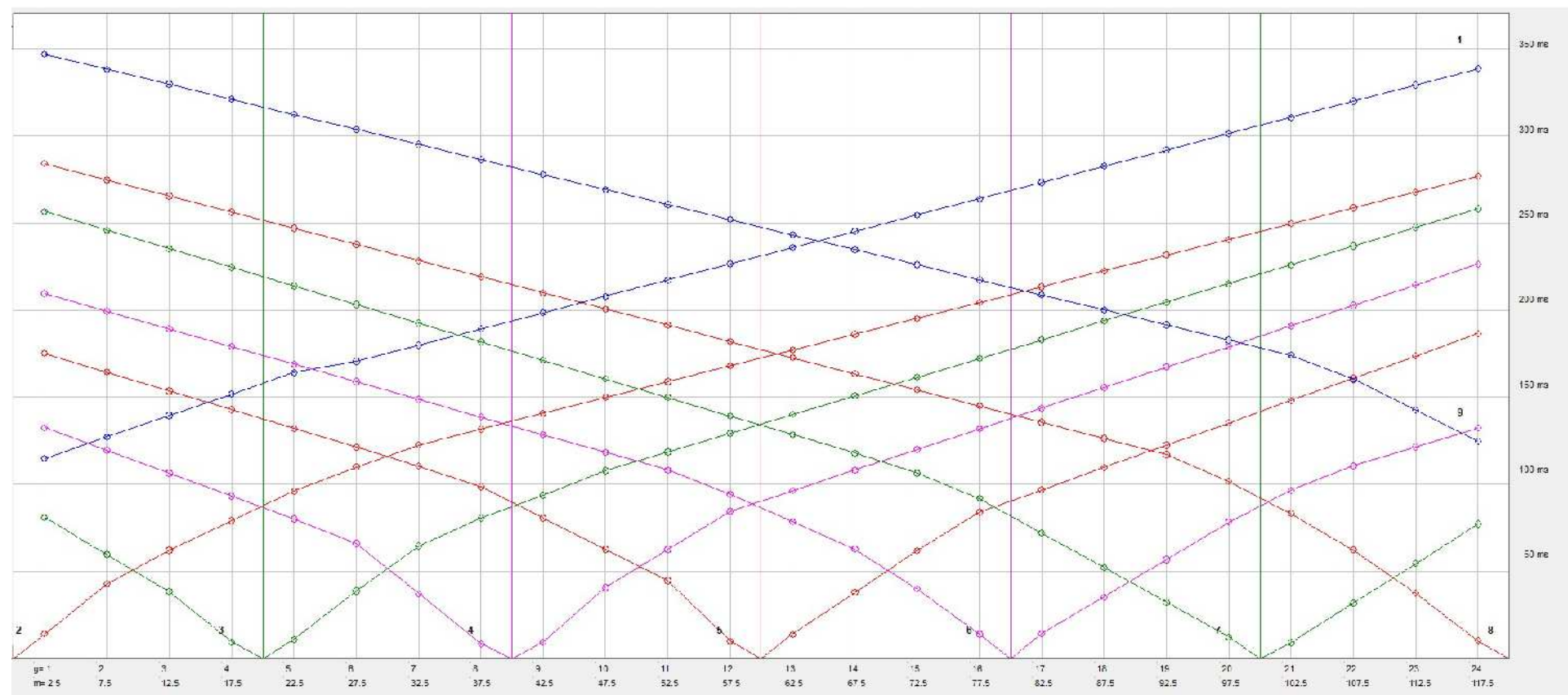
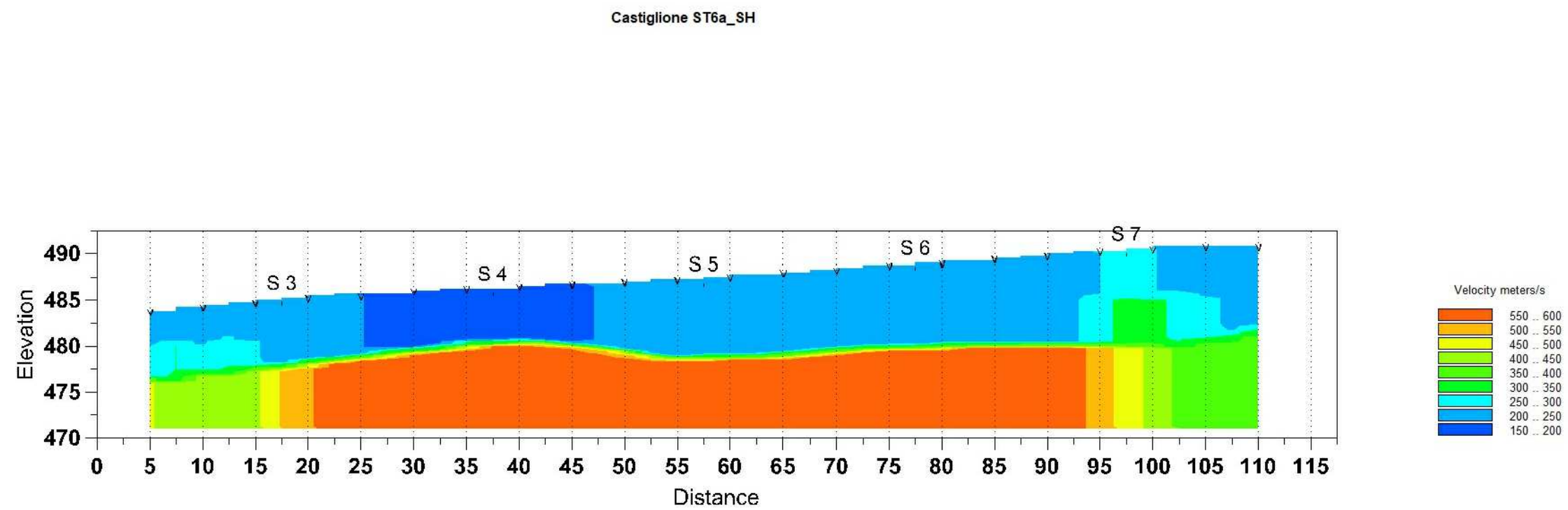


Grafico delle domocrone misurate in scala 1:500



Profilo sismico GRM in scala 1:500

<div> <div>PROSPEZIONE SISMICA</div> <div>A RIFRAZIONE CON ONDE SH</div> </div>	
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo	
Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana	
Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1	
<div>SEZIONE SISMICA ST6a-sh</div>	
<div> <div>All. 2.2c</div> <div> <div>Aprile 2017</div> </div> </div>	



Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni in scala 1:500

**PROSPEZIONE SISMICA  
A RIFRAZIONE CON ONDE SH**

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

**SEZIONE SISMICA ST6a-sh**

All. 2.2d

Aprile 2017

**Allegato 2.3a: PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P - ST6b**

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Data di esecuzione: 21.04.2017  
Linea sismica: ST6b-P

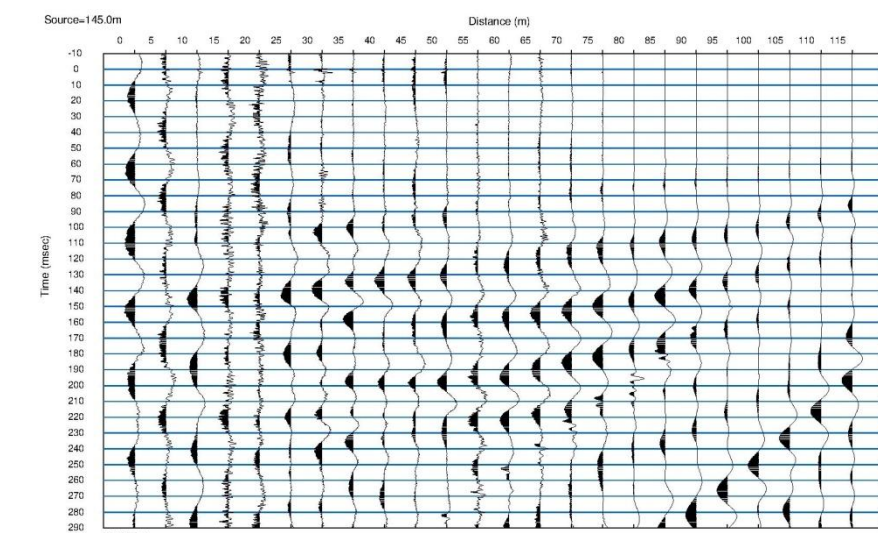
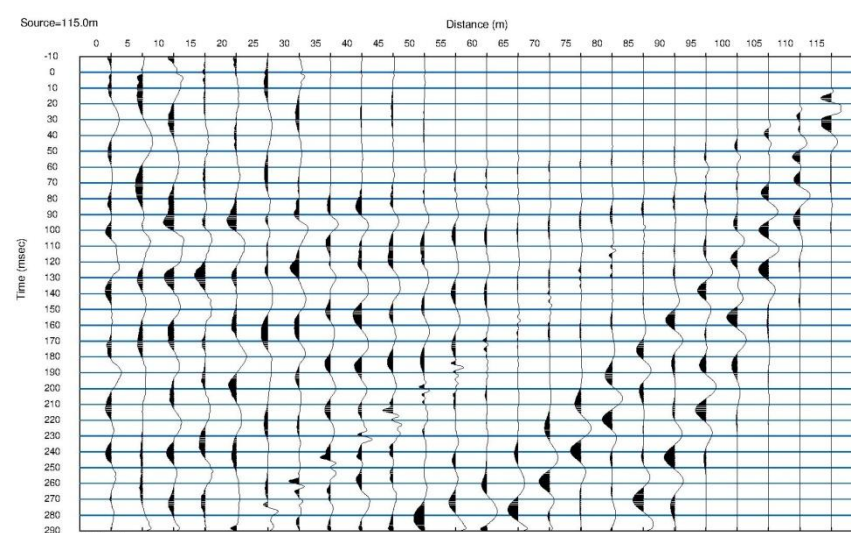
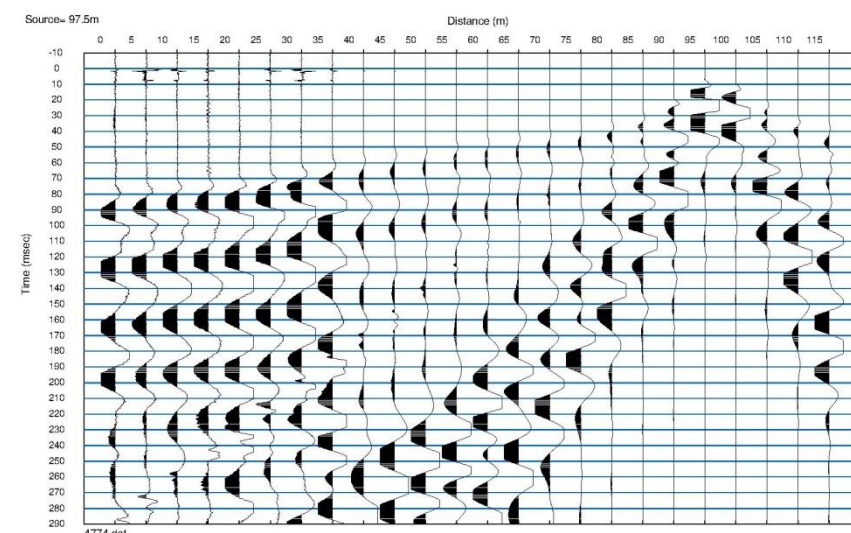
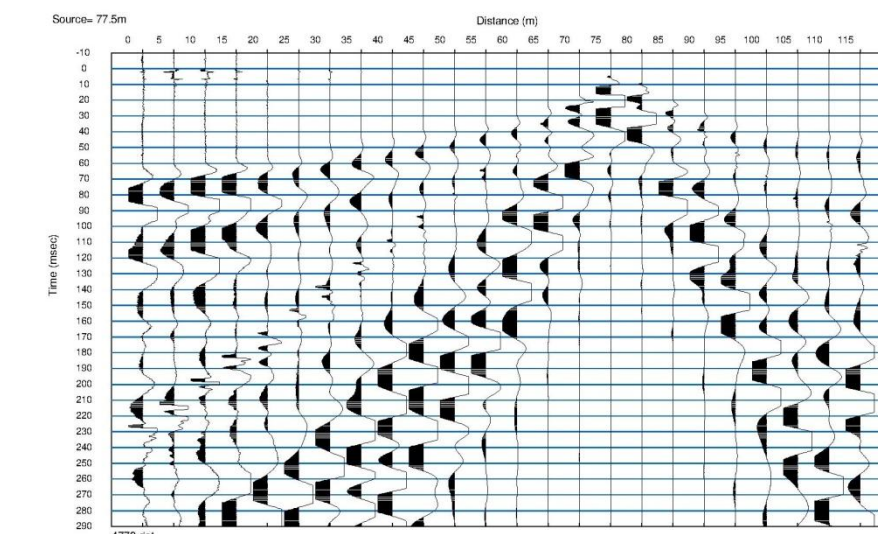
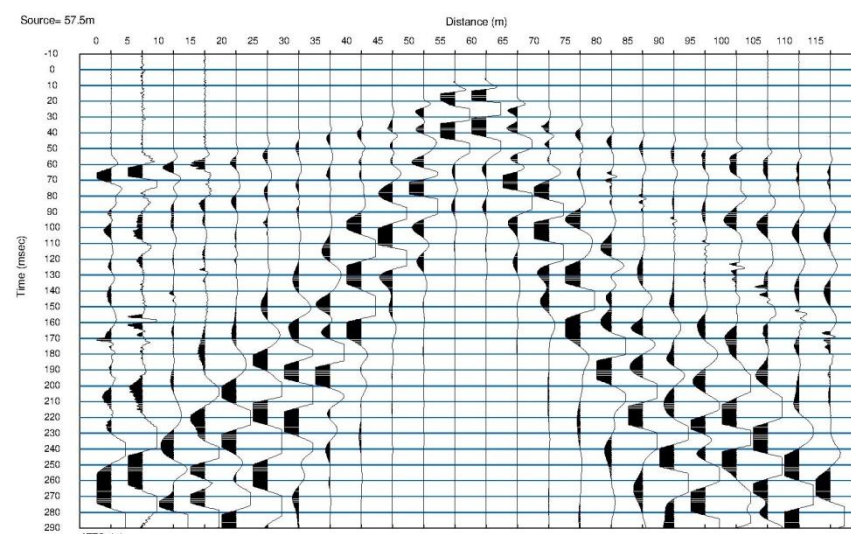
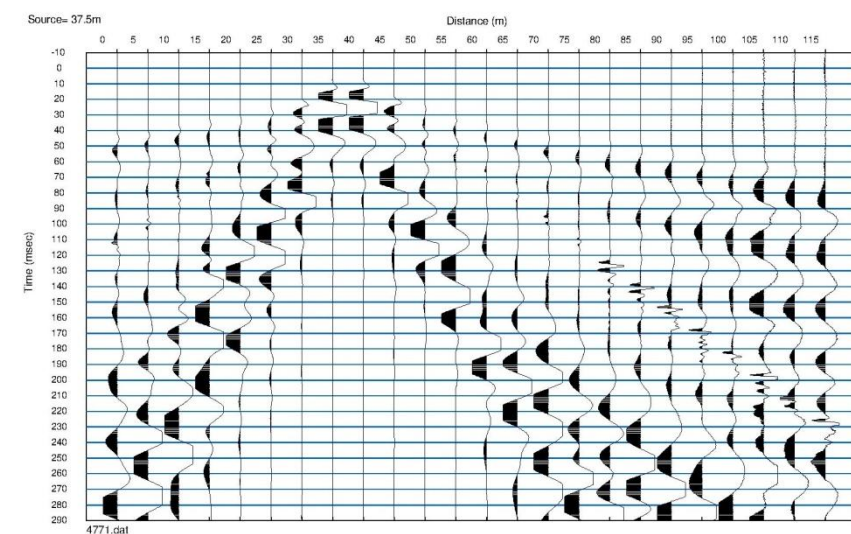
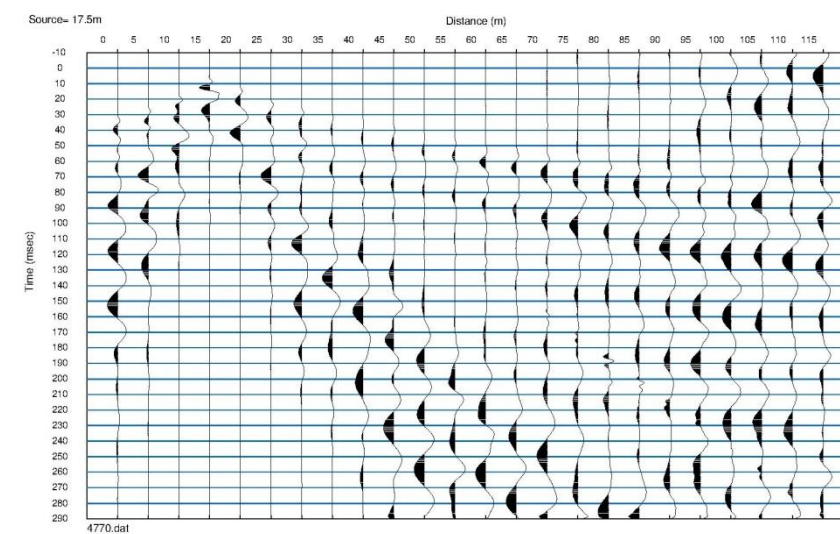
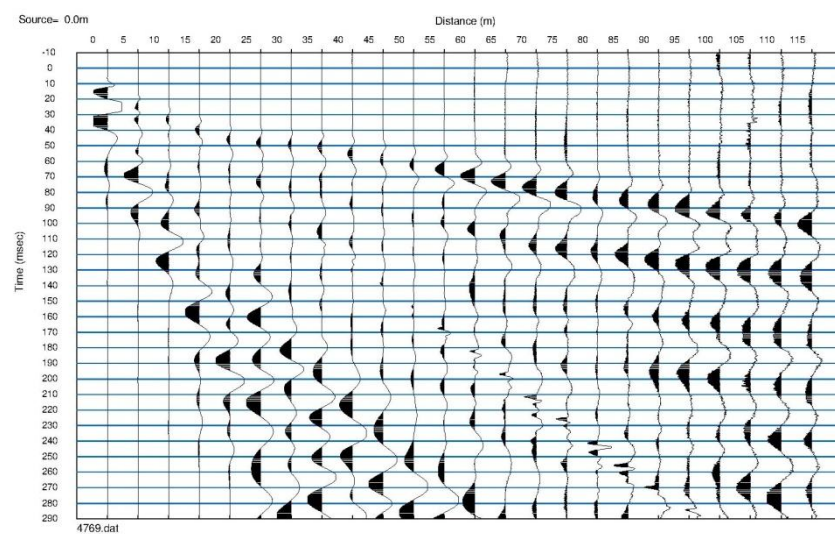
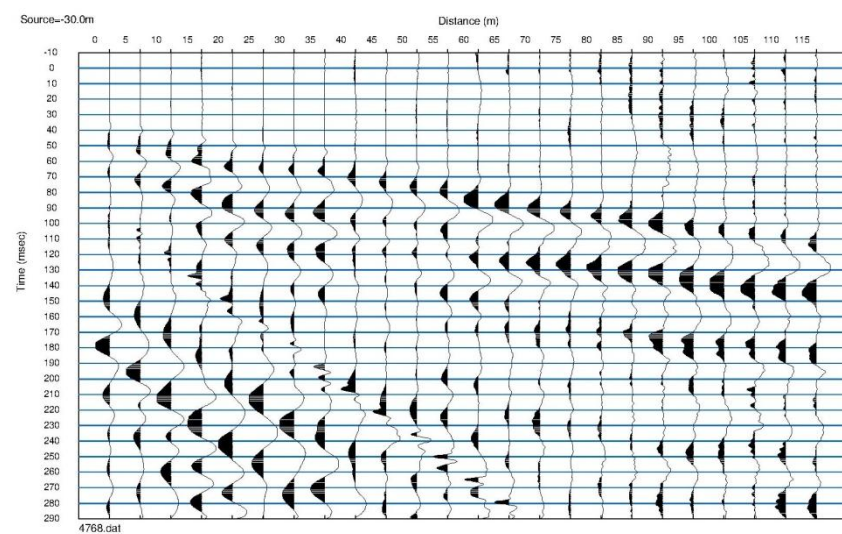
**Tabella 1:** Geometria dello stendimento con tempi di primo arrivo e tempi intercetti

Geo.	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6	Shot 7	Shot 8	Shot 9	Distance	Elevation	Inter- cept
1	30,51	7,28	31,94	41,23	54,21	62,84	73,86	80,83	94,01	2,5	476,5	19,2
2	33,71	14,07	22,21	37,58	51,49	60,34	71,42	78,43	91,53	7,5	476,5	19,9
3	36,91	20,87	12,48	33,92	48,77	57,84	68,98	76,03	89,05	12,5	476,5	20,7
4	40,12	27,66	3,70	30,27	46,04	55,34	66,54	73,62	86,57	17,5	477,3	21,4
5	43,32	33,68	4,49	26,61	43,32	52,84	64,10	71,22	84,09	22,5	478,1	22,1
6	45,33	36,23	16,21	22,04	40,60	50,34	61,67	68,82	81,61	27,5	478,6	21,6
7	47,80	38,79	23,45	13,55	37,87	47,84	59,23	66,42	79,13	32,5	478,8	21,6
8	51,12	41,34	28,60	5,05	35,15	45,34	56,79	64,01	76,66	37,5	479,0	22,5
9	53,74	43,89	31,60	4,09	29,59	42,84	54,35	61,61	74,18	42,5	479,2	22,6
10	56,37	46,44	34,59	12,40	24,11	40,34	51,91	59,21	71,70	47,5	479,4	22,8
11	58,99	48,99	37,58	18,77	16,47	37,84	49,48	56,81	69,22	52,5	479,6	22,9
12	61,61	51,54	40,58	25,14	4,49	35,34	47,04	54,41	66,74	57,5	479,8	23,0
13	64,24	54,10	43,57	31,51	4,49	30,43	44,60	52,00	64,26	62,5	480,1	23,2
14	66,86	56,65	46,56	36,60	14,20	24,58	42,16	49,60	61,78	67,5	480,3	23,3
15	69,48	59,20	49,55	39,46	23,14	14,80	39,72	47,20	59,30	72,5	480,5	23,5
16	72,11	61,75	52,55	42,32	29,18	5,01	35,83	44,80	56,82	77,5	480,7	23,6
17	74,73	64,30	55,54	45,18	33,35	4,97	31,88	42,39	54,34	82,5	481,0	23,8
18	77,35	66,85	58,53	48,05	36,09	16,28	25,29	39,99	51,86	87,5	481,3	23,9
19	79,98	69,41	61,53	50,91	38,83	26,74	15,02	37,59	49,38	92,5	481,6	24,1
20	82,60	71,96	64,01	53,77	41,57	30,95	5,28	35,19	46,90	97,5	481,9	24,2
21	85,22	74,51	67,25	56,63	44,30	34,08	5,93	32,79	44,42	102,5	482,3	24,3
22	87,85	77,06	70,49	59,49	47,04	37,21	18,06	27,40	41,94	107,5	482,8	24,5
23	90,47	79,61	73,74	62,35	49,78	40,34	27,34	18,31	39,46	112,5	483,3	24,6
24	93,09	82,16	76,98	65,22	52,52	43,46	36,62	4,88	36,98	117,5	483,8	24,8
Distance	-27,5	0,0	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0	120,0	147,5			
Elevation	475,5	476,4	477,7	479,1	480,0	480,8	482,1	484,1	486,1			

**Tabella 2:** Risultati elaborazione GRM

Geo.	Quota s.l.m. (m)	Velocità V1 (m/s)	Velocità V2 (m/s)	Velocità Substrato (m/s)	Spessore strato 1 (m)	Spessore strato 2 (m)	Quota Substrato s.l.m. (m)
1	476,5	753					
2	476,5	678		1760	7,3		469,2
3	476,5	604		1759	6,6		469,9
4	477,3	530		1759	5,9		471,4
5	478,1	530		1966	5,9		472,2
6	478,6	549		2118	6,2		472,4
7	478,8	569		1862	6,6		472,2
8	479,0	589		1836	6,8		472,2
9	479,2	589		1958	7,0		472,2
10	479,4	616		1958	7,3		472,1
11	479,6	644		1960	7,8		471,8
12	479,8	672		1958	8,2		471,6
13	480,1	672		1958	8,2		471,9
14	480,3	666		1960	8,2		472,1
15	480,5	661		1958	8,2		472,3
16	480,7	656		1958	8,2		472,5
17	481,0	656		1960	8,2		472,8
18	481,3	622		1958	7,8		473,5
19	481,6	589		1958	7,4		474,2
20	481,9	556		1960	7,0		474,9
21	482,3	556		1958	7,0		475,3
22	482,8	550		1958	7,0		475,8
23	483,3	544		1960	7,0		476,3
24	483,8	539					





## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P-ST6b

Località: Castiglione Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

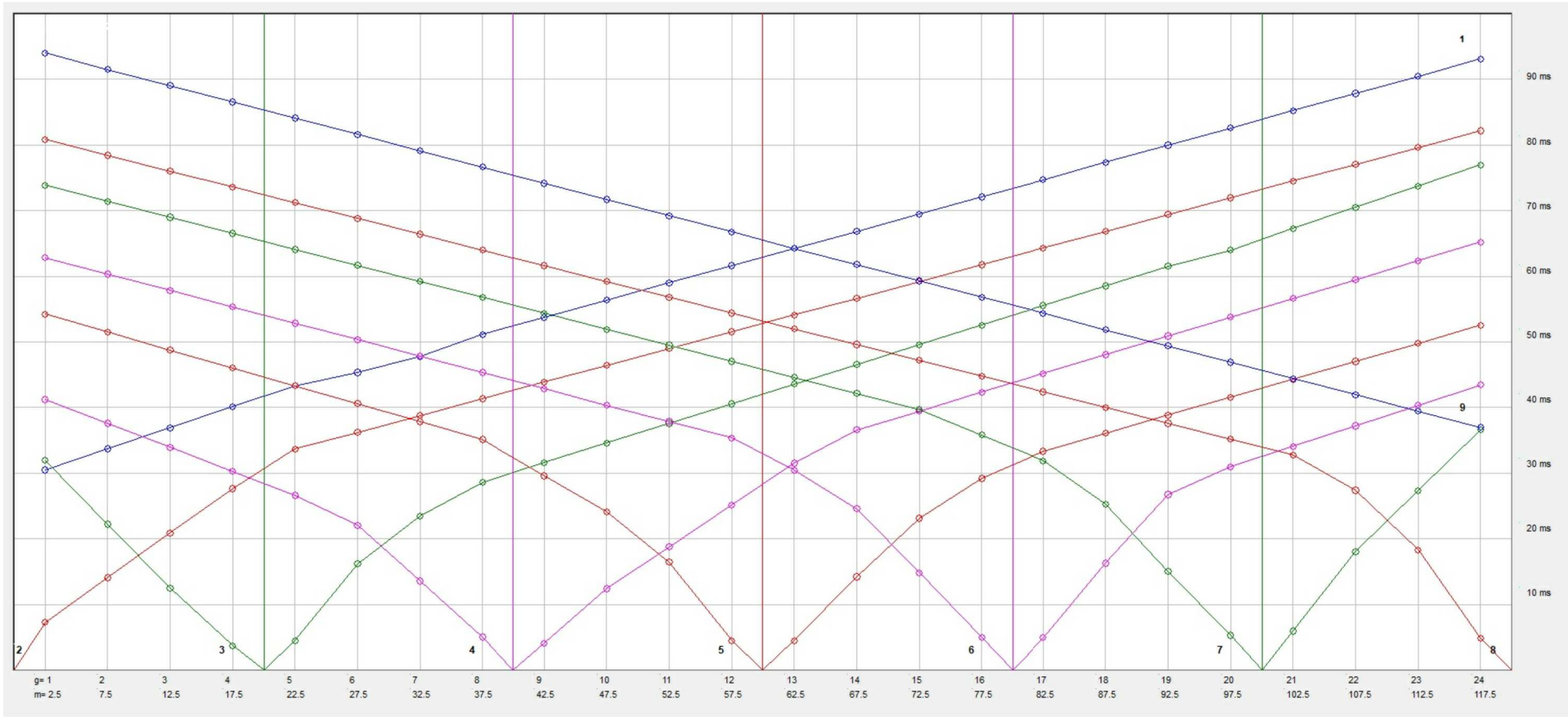
Sismogrammi ST6b-p

AII. 2.3b

Aprile 2017



- Shot 1 = esterno G1
- Shot 2 = G1
- Shot 3 = G4/G5
- Shot 4 = G8/G9
- Shot 5 = G12/G13
- Shot 6 = G16/G17
- Shot 7 = G20/G21
- Shot 8 = G24
- Shot 9 = esterno G24



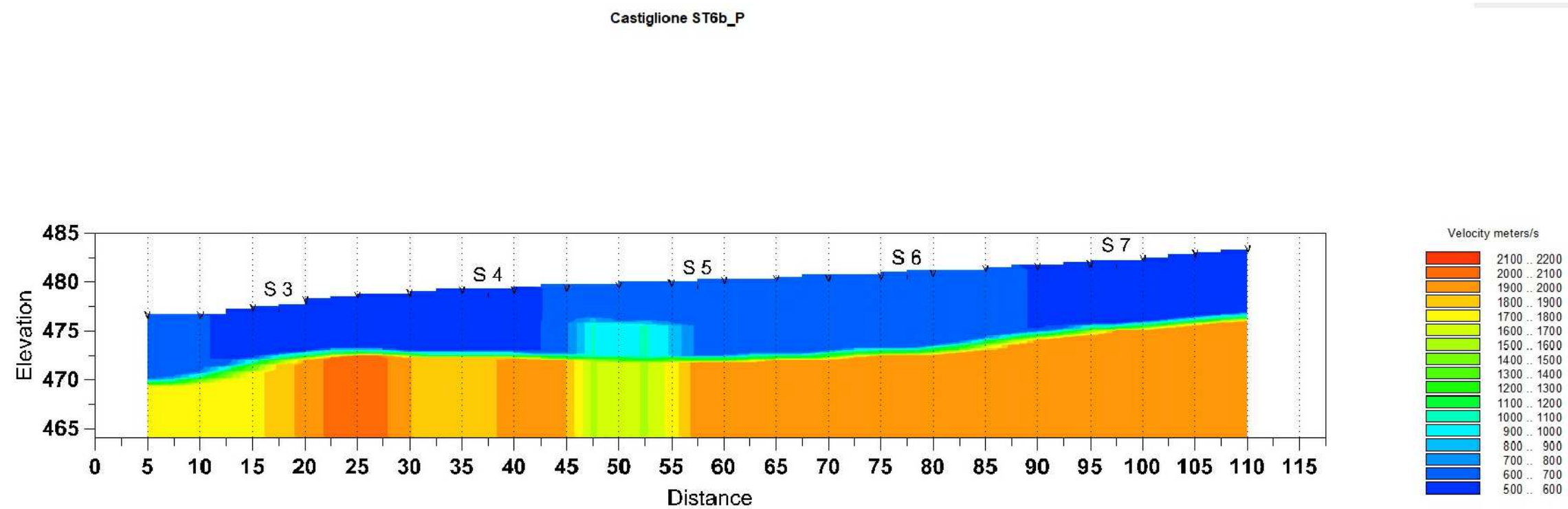
- Tempi dei primi arrivi ai geofoni
- Profilo topografico
- Geofoni
- Profondità del limite di strato
- 200 m/s Velocità sismica dello strato in metri al secondo

Grafico delle domocrone misurate in scala 1:500



Profilo sismico GRM in scala 1:500

PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P	
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo	
Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana	
Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1	
SEZIONE SISMICA ST6b-p	
All. 2.3c	Aprile 2017



Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni in scala 1:500

**PROSPEZIONE SISMICA  
A RIFRAZIONE CON ONDE P**

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

**SEZIONE SISMICA ST6b-p**

All. 2.3d

Aprile 2017

## Allegato 2.4a: PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH - ST6b

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

Data di esecuzione: 21.04.2017

Linea sismica: ST6b-SH

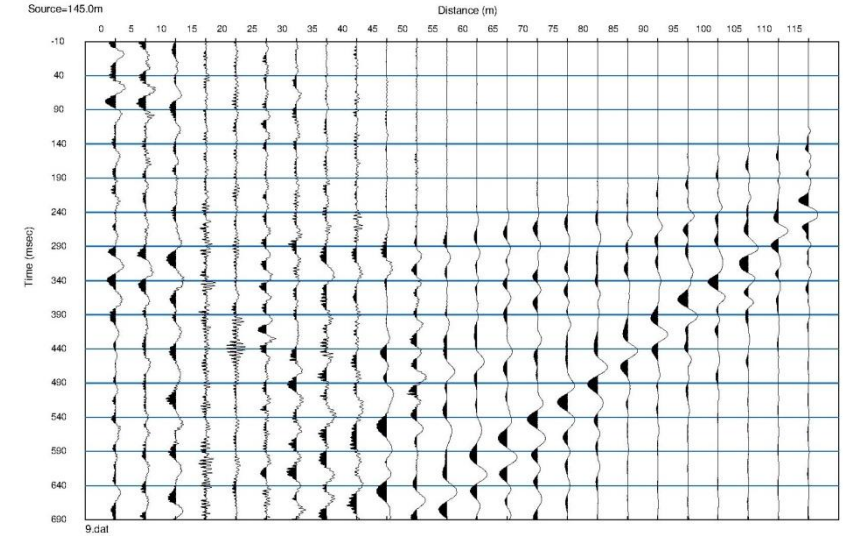
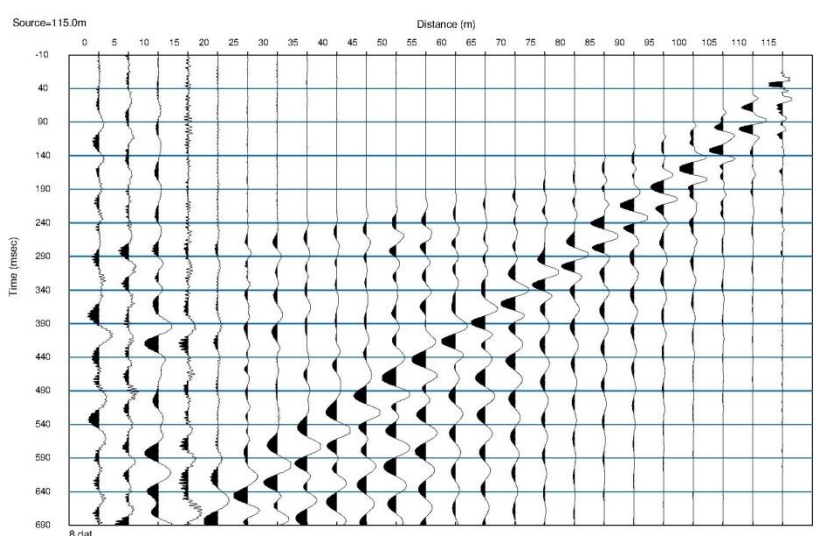
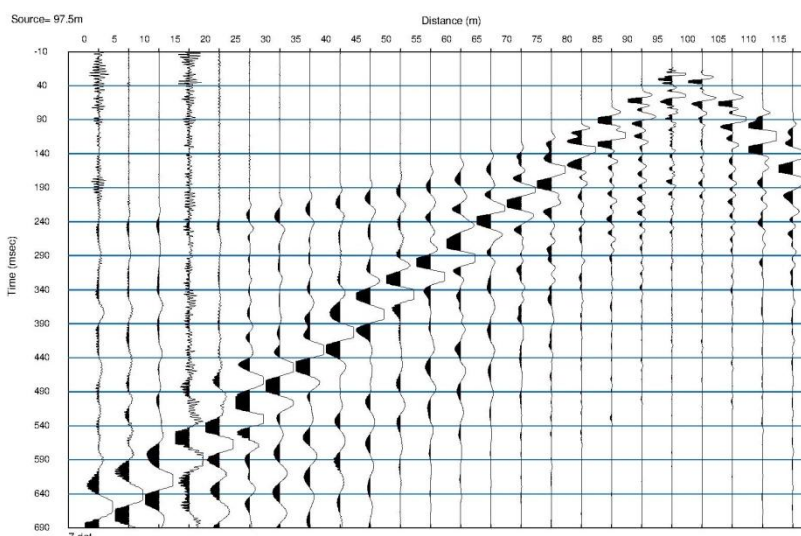
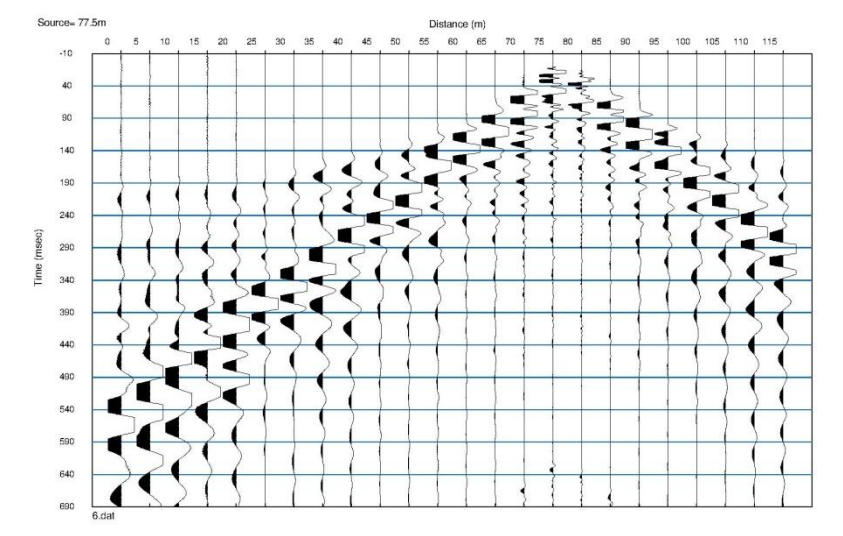
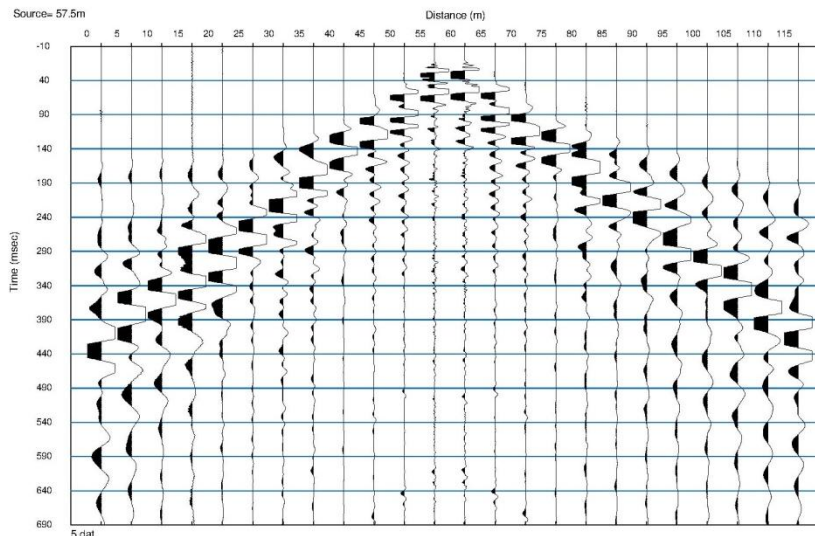
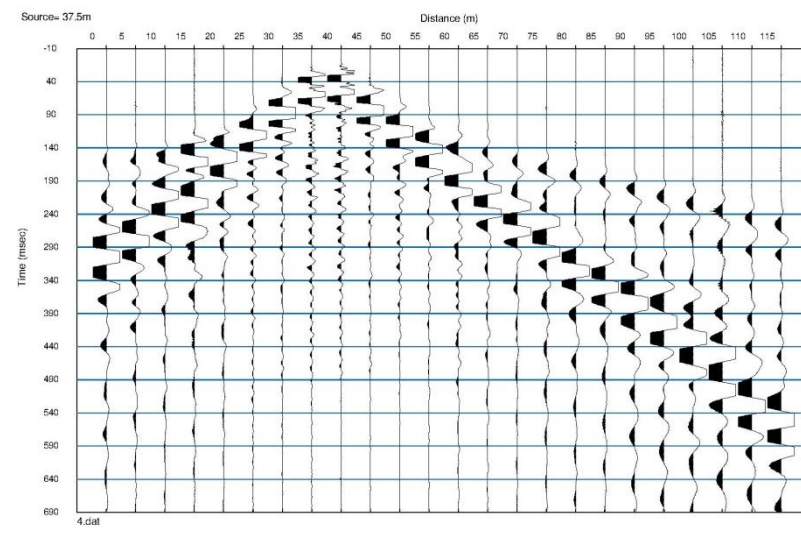
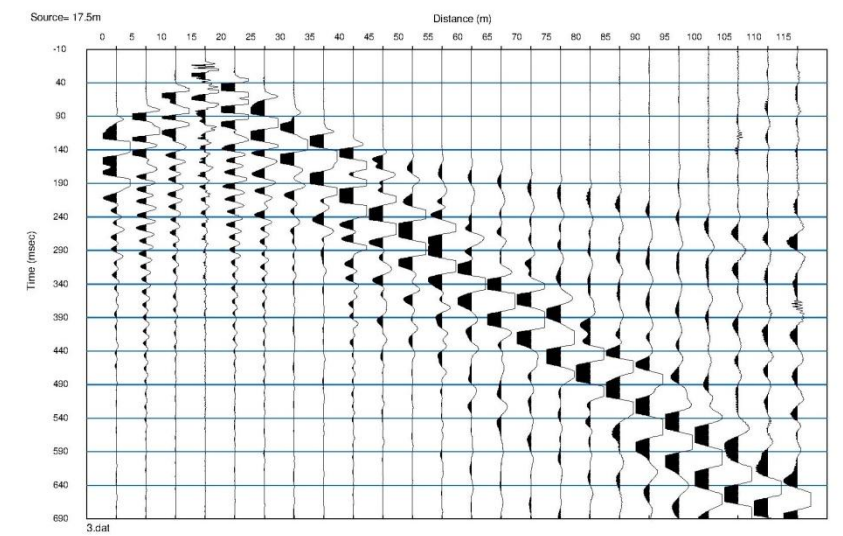
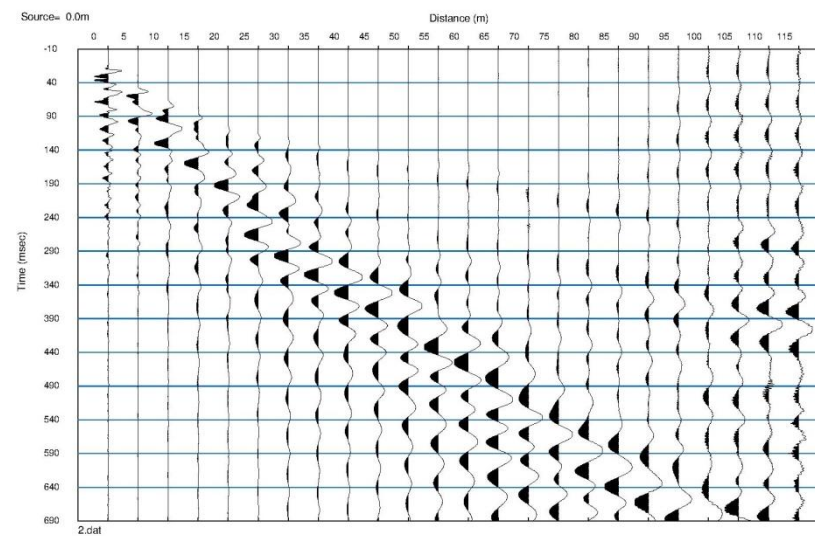
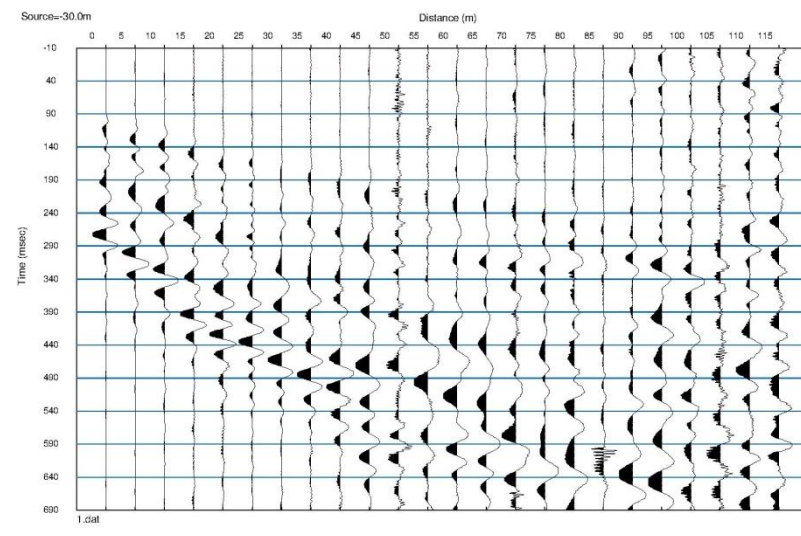
**Tabella 1:** Geometria dello stendimento con tempi di primo arrivo e tempi intercetti

Geo.	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6	Shot 7	Shot 8	Shot 9	Distance	Elevation	Inter- cept
1	92,35	9,75	85,92	143,96	162,38	187,11	243,04	266,59	303,98	2,5	476,5	73,8
2	103,07	39,78	60,15	134,66	156,47	181,44	236,58	260,24	297,15	7,5	476,5	77,7
3	113,79	64,43	34,37	125,36	150,55	175,78	230,12	253,88	290,31	12,5	476,5	81,5
4	124,52	83,33	8,59	116,06	144,64	170,12	223,67	247,53	283,48	17,5	477,3	85,5
5	136,11	101,87	10,41	100,52	138,72	164,45	217,21	241,18	276,64	22,5	478,1	90,2
6	143,05	109,59	39,76	76,52	132,80	158,79	208,07	233,94	269,81	27,5	478,6	90,3
7	149,99	117,32	69,10	46,89	126,89	153,12	199,50	227,48	262,97	32,5	478,8	90,4
8	156,94	125,04	98,45	17,26	115,90	146,44	189,64	221,03	256,14	37,5	479,0	90,5
9	163,88	132,76	117,63	13,99	96,58	137,64	179,77	214,57	249,30	42,5	479,2	90,6
10	170,82	140,49	125,69	37,97	71,78	128,09	169,91	208,11	242,47	47,5	479,4	90,7
11	177,76	148,21	133,75	61,95	45,41	118,55	160,05	201,65	235,63	52,5	479,6	90,8
12	184,70	155,93	141,81	91,48	11,93	104,67	150,18	194,36	228,80	57,5	479,8	91,0
13	191,64	163,66	149,87	109,91	9,99	83,27	140,31	184,00	221,96	62,5	480,1	91,1
14	198,58	171,38	157,93	118,95	33,98	59,14	130,50	173,64	215,13	67,5	480,3	91,2
15	205,53	179,11	165,99	129,58	60,71	35,00	120,70	163,28	208,29	72,5	480,5	91,3
16	212,47	186,83	174,05	140,22	87,45	10,87	107,77	152,92	201,46	77,5	480,7	91,4
17	219,41	194,55	182,11	150,85	108,50	13,21	88,96	142,56	194,62	82,5	481,0	91,5
18	226,35	202,28	190,17	161,49	120,32	40,36	66,74	132,20	187,79	87,5	481,3	91,6
19	233,29	210,00	198,23	172,12	132,14	67,51	42,15	117,95	180,22	92,5	481,6	91,0
20	240,23	217,72	206,29	182,76	143,96	94,20	11,04	103,04	167,95	97,5	481,9	85,6
21	247,17	225,45	214,36	193,39	155,78	108,49	11,93	88,12	153,17	102,5	482,3	77,8
22	254,12	233,17	222,42	204,03	167,60	122,78	42,37	66,14	138,38	107,5	482,8	70,0
23	261,06	240,89	230,48	214,66	179,42	137,07	64,66	45,85	123,59	112,5	483,3	62,1
24	268,00	248,62	238,54	225,30	191,24	151,36	86,95	13,70	108,81	117,5	483,8	54,3
Distance	-27,5	0,0	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0	120,0	147,5			
Elevation	475,5	476,4	477,9	479,1	480,0	480,8	482,1	484,1	486,1			

**Tabella 2:** Risultati elaborazione GRM

Geo.	Quota s.l.m. (m)	Velocità V1 (m/s)	Velocità V2 (m/s)	Velocità Substrato (m/s)	Spessore strato 1 (m)	Spessore strato 2 (m)	Quota Substrato s.l.m. (m)
1	476,5	219					
2	476,5	210		569	8,7		467,8
3	476,5	202		569	8,8		467,7
4	477,3	194		555	8,8		468,5
5	478,1	194		621	8,9		469,2
6	478,6	189		725	8,8		469,8
7	478,8	184		725	8,5		470,3
8	479,0	179		725	8,3		470,7
9	479,2	179		725	8,3		470,9
10	479,4	183		725	8,5		470,9
11	479,6	188		725	8,8		470,8
12	479,8	193		725	9,0		470,8
13	480,1	193		725	9,0		471,1
14	480,3	199		725	9,4		470,9
15	480,5	205		725	9,7		470,8
16	480,7	212		725	10,1		470,6
17	481,0	212		725	10,1		470,9
18	481,3	211		707	10,0		471,3
19	481,6	210		593	9,9		471,7
20	481,9	209		488	9,7		472,2
21	482,3	209		460	9,1		473,2
22	482,8	226		460	9,0		473,8
23	483,3	243		460	8,8		474,5
24	483,8	261					





## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH-ST6b

Località: Castiglione Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

Sismogrammi ST6b-sh

**All. 2.4b**

Aprile 2017



- Shot 1 = esterno G1   Shot 2 = G1   Shot 3 = G4/G5  
 Shot 4 = G8/G9   Shot 5 = G12/G13   Shot 6 = G16/G17  
 Shot 7 = G20/G21   Shot 8 = G24   Shot 9 = esterno G24

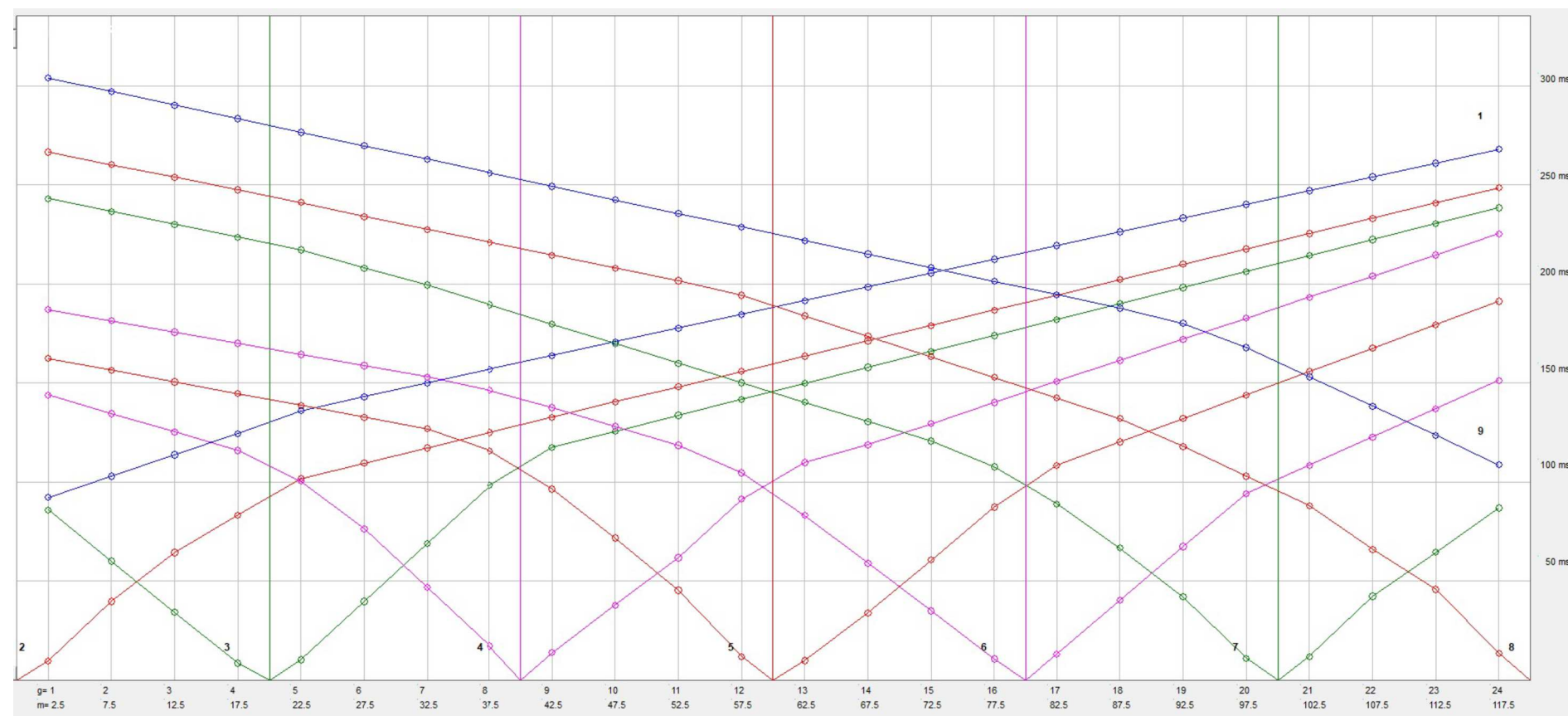


Grafico delle domocroni misurate in scala 1:500

- Tempi dei primi arrivi ai geofoni  
 Profilo topografico  
 Geofoni  
 Profondità del limite di strato  
 200 m/s Velocità sismica dello strato in metri al secondo

## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

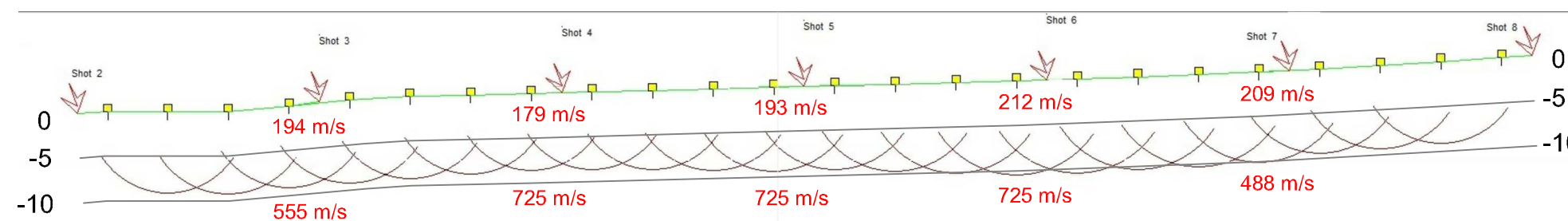
Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

### SEZIONE SISMICA ST6b-sh

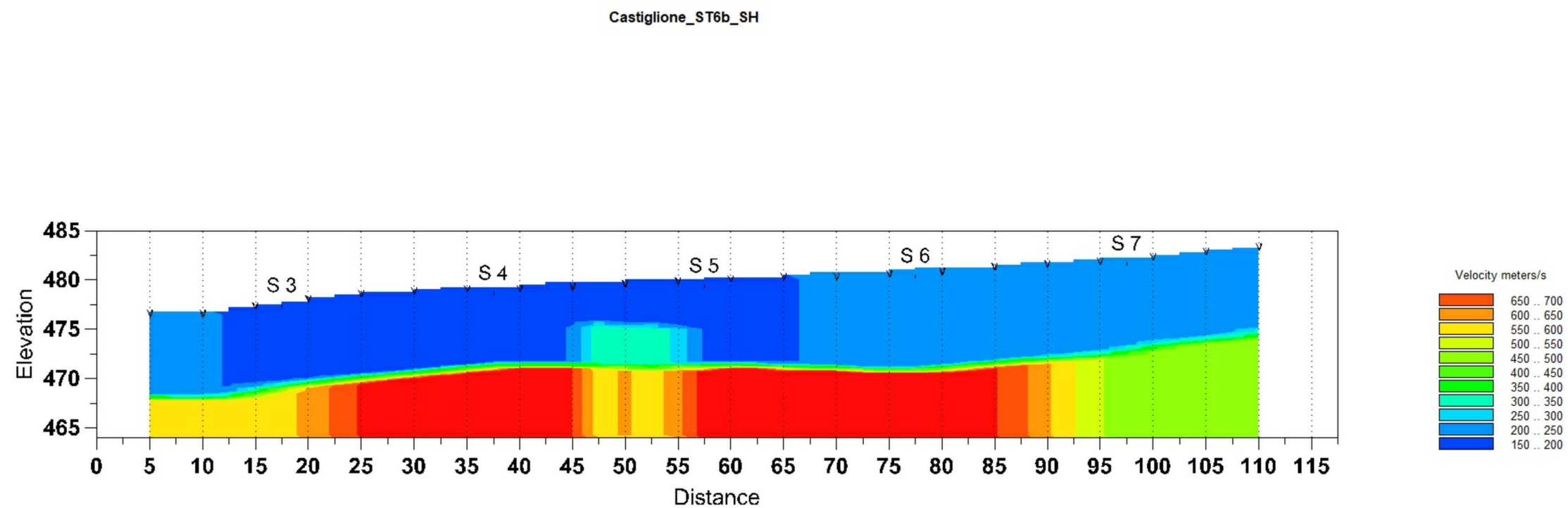
All. 2.4c

Aprile 2017



Profilo sismico GRM in scala 1:500





Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni in scala 1:500

## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

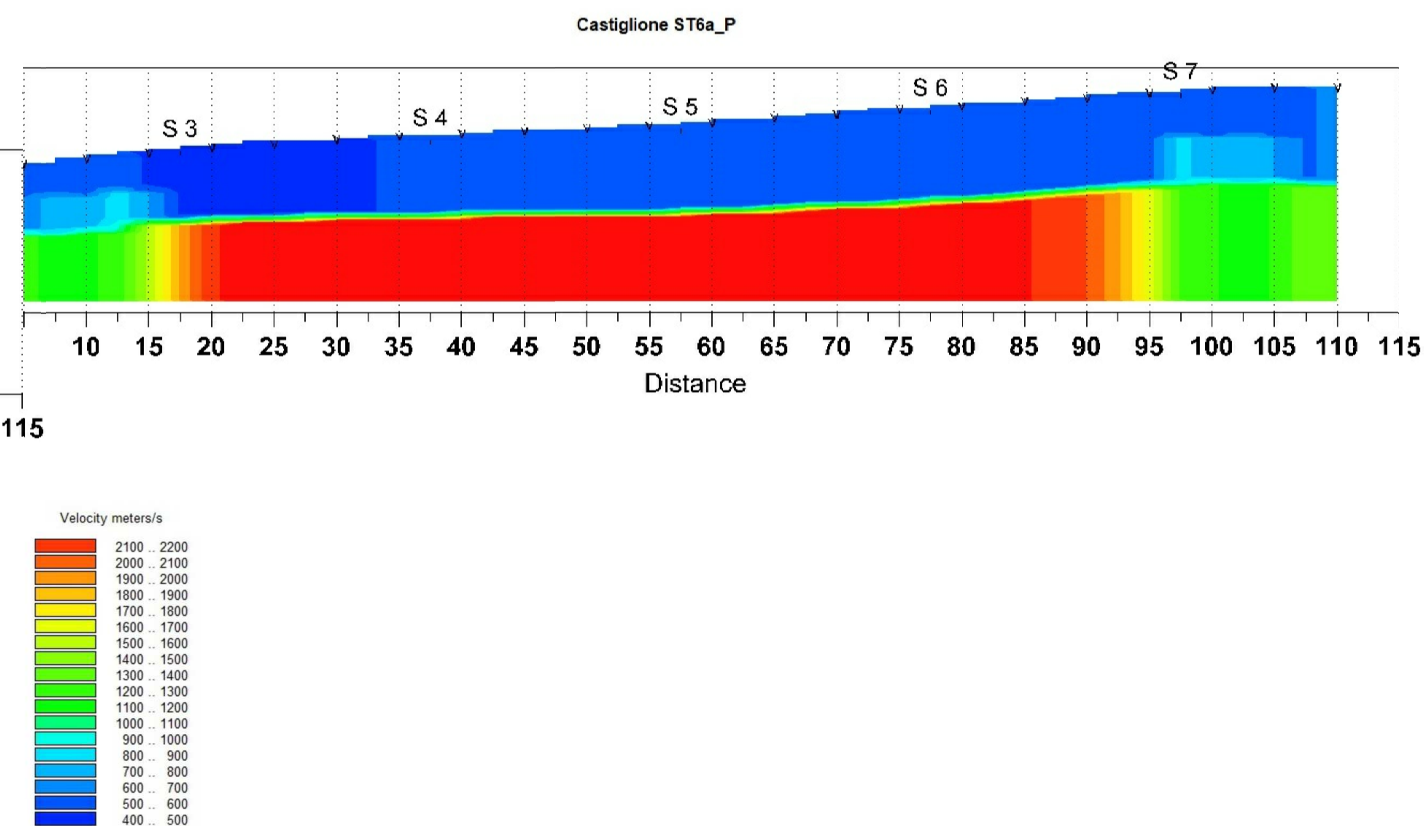
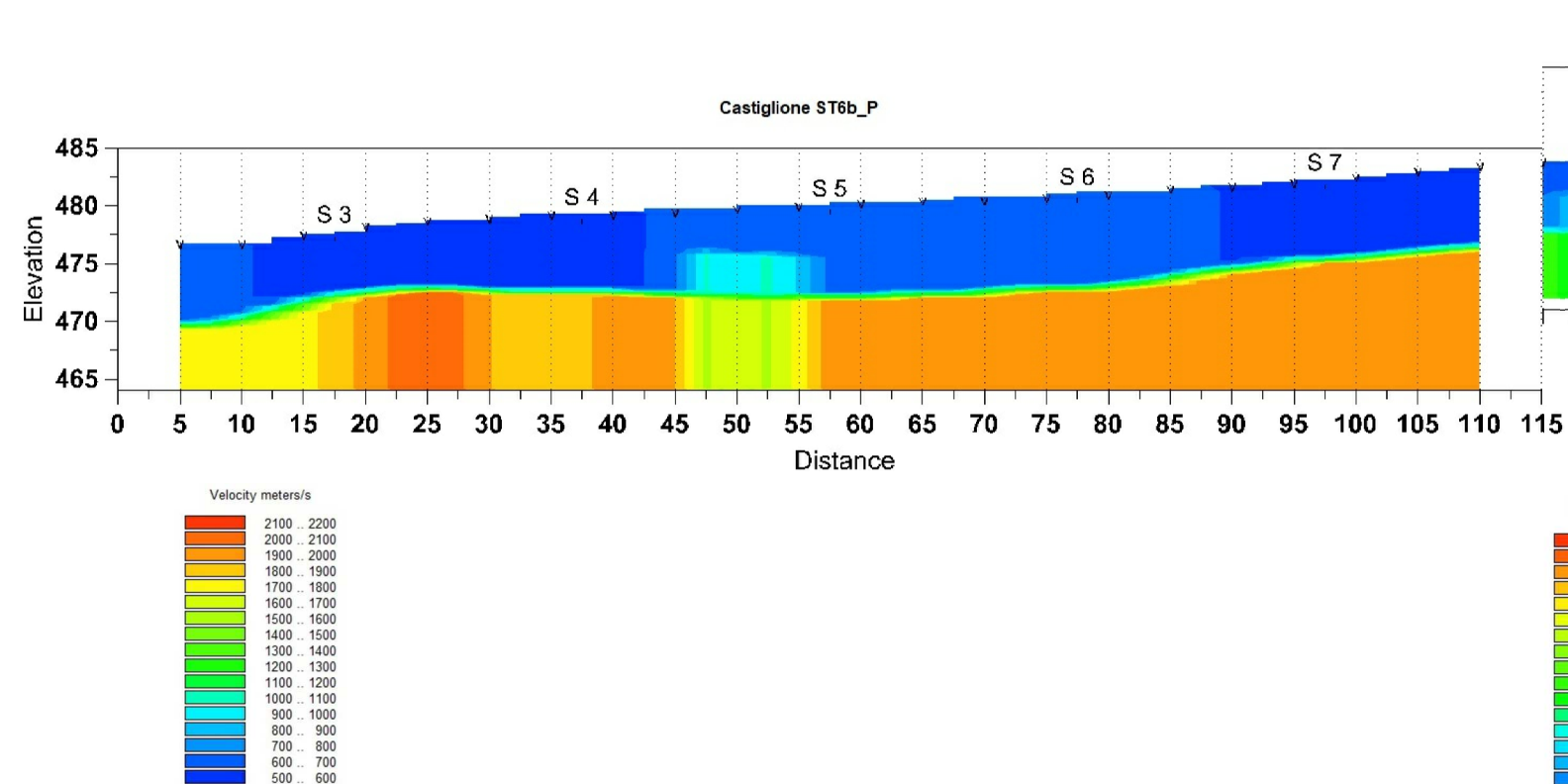
Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

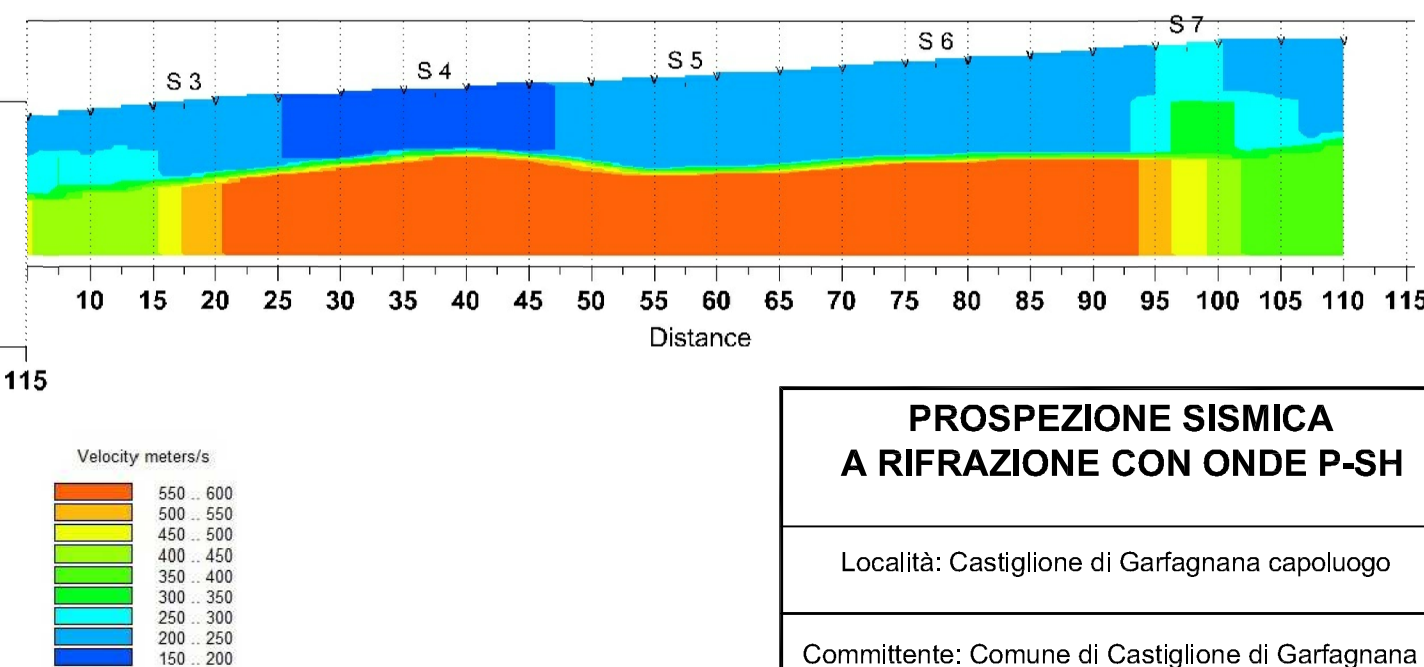
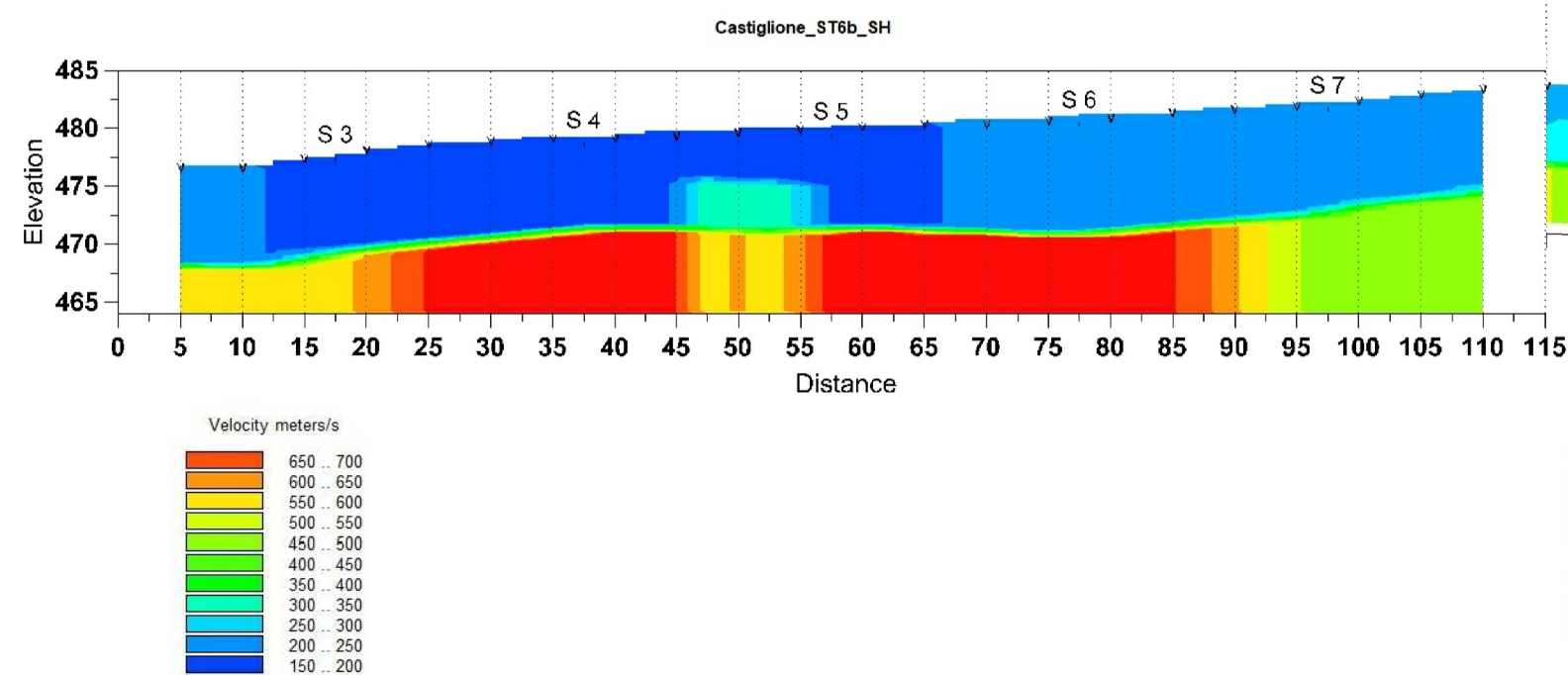
**SEZIONE SISMICA ST6b-sh**

All. 2.4d

Aprile 2017



Profilo sismico di correlazione (onde P) in scala 1:600



Profilo sismico di correlazione (onde SH) in scala 1:600

## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P-SH

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

**SEZIONI SISMICHE DI CORRELAZIONE  
ST6a-ST6b**

**AII. 2.5**

Aprile 2017

## Allegato 2.6a: PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P - ST7

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)

Località: Campori

Data di esecuzione: 20.09.2018

Linea sismica: ST7-P

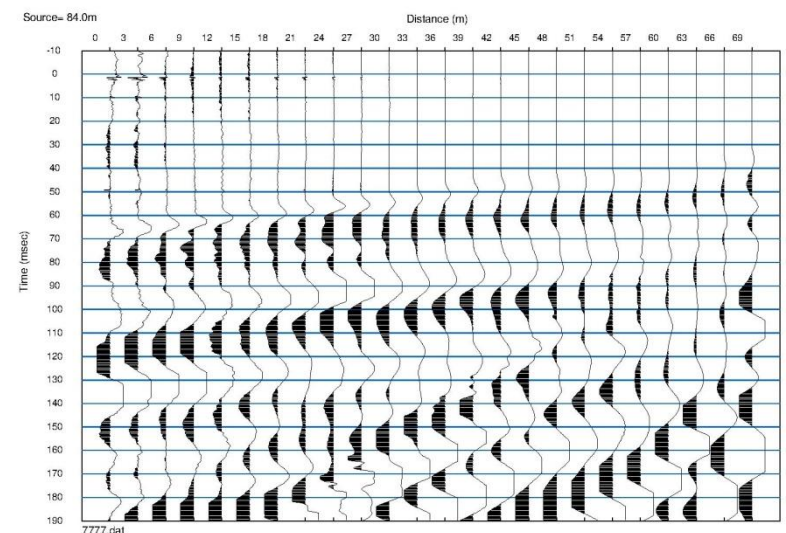
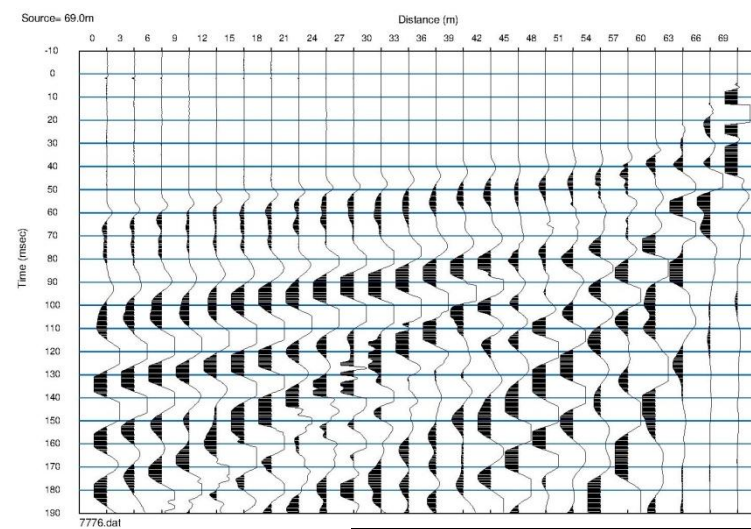
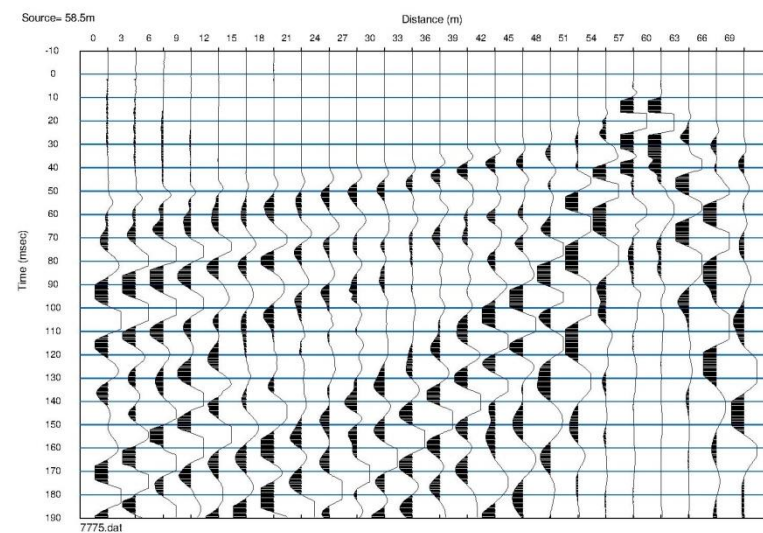
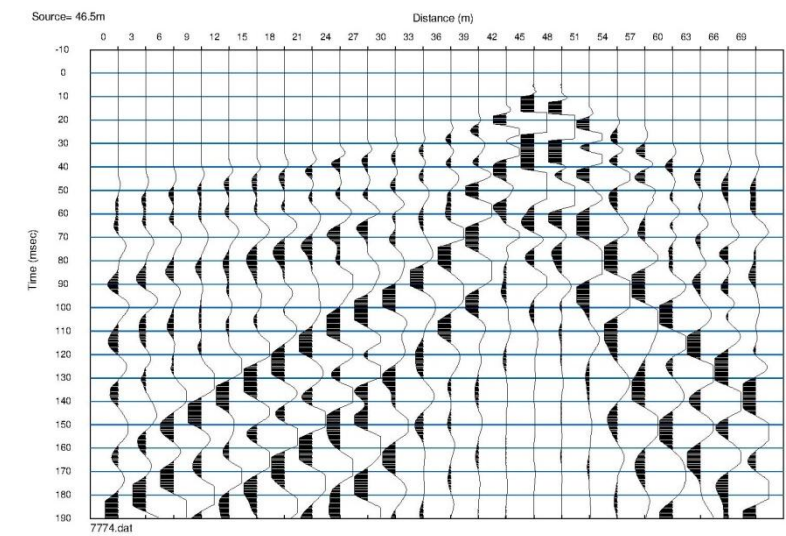
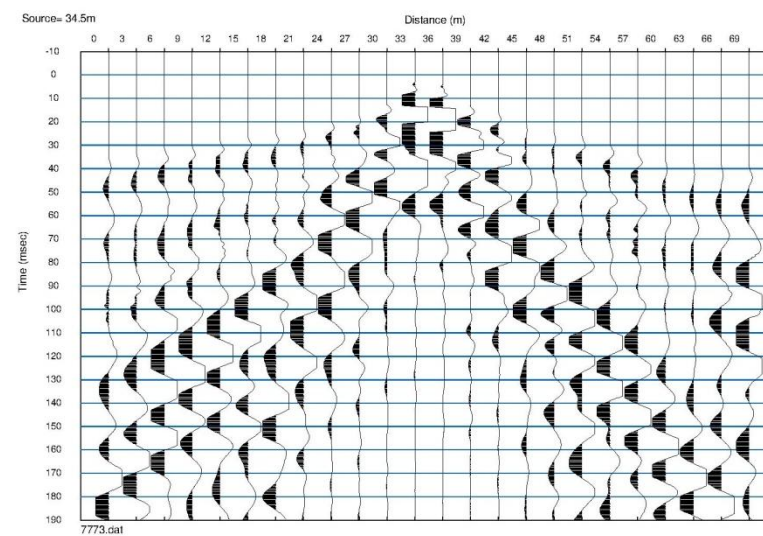
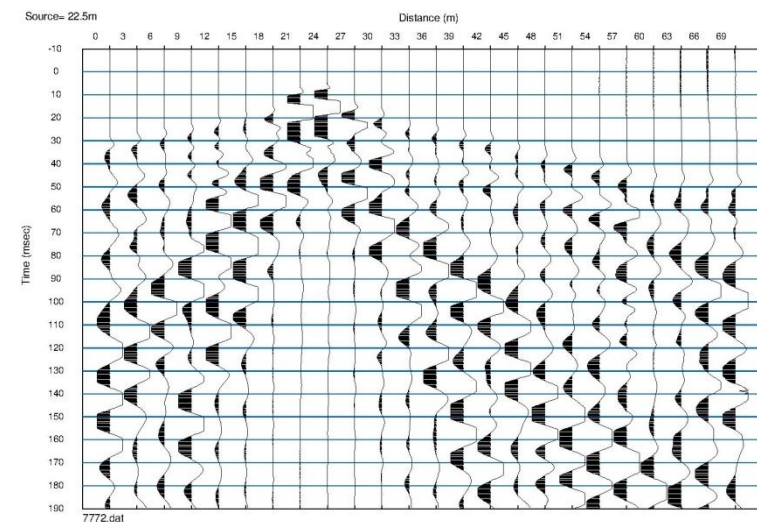
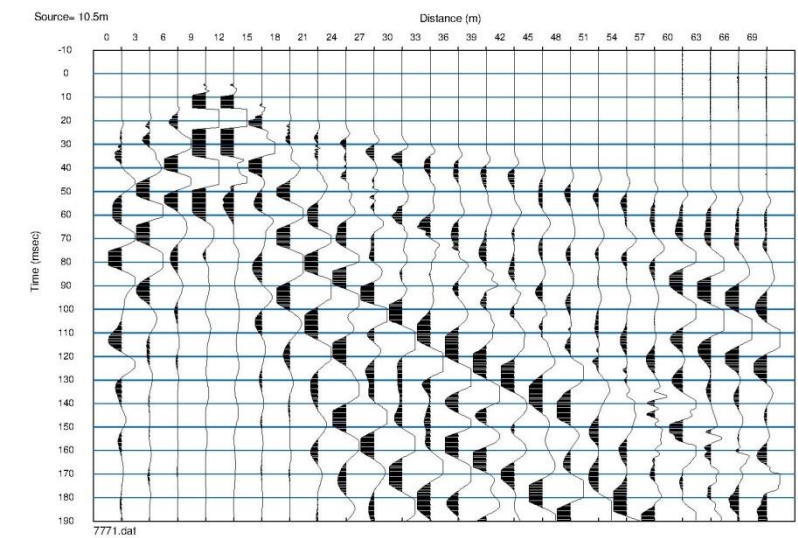
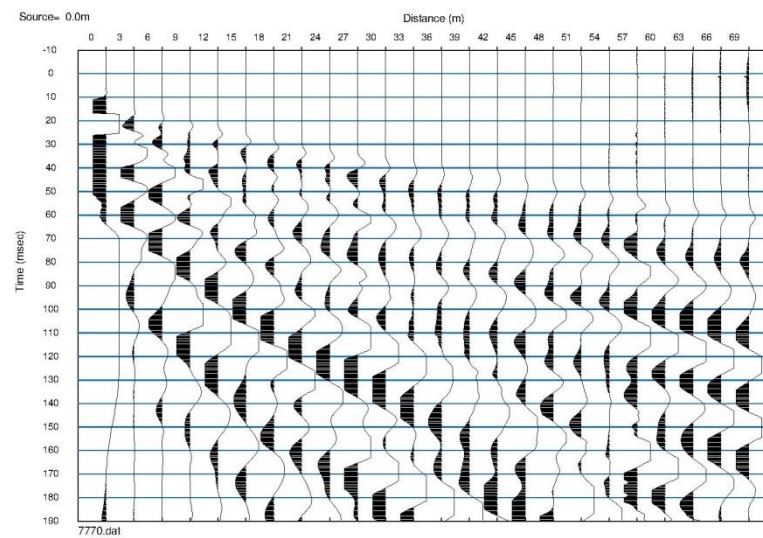
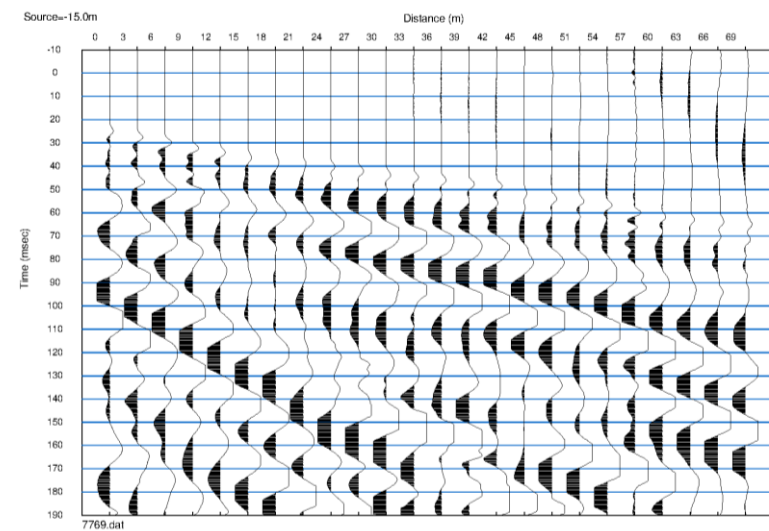
**Tabella 1:** Geometria dello stendimento con tempi di primo arrivo e tempi intercetti

Geo.	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6	Shot 7	Shot 8	Shot 9	Distance	Elevation	Inter- cept
1	21,56	2,09	19,81	28,79	34,82	42,77	51,76	57,80	63,70	1,5	393,9	17,2
2	23,23	12,69	15,72	26,40	32,97	41,13	50,17	56,35	62,35	4,5	394,0	17,5
3	24,90	16,95	10,63	24,01	31,13	39,50	48,58	54,90	60,99	7,5	394,0	17,8
4	26,57	19,59	3,24	21,62	29,28	37,86	46,99	53,45	59,64	10,5	394,1	18,2
5	28,24	21,79	3,08	19,24	27,44	36,22	45,39	52,00	58,29	13,5	394,1	18,5
6	29,91	24,13	12,04	16,69	25,59	34,59	43,80	50,55	56,94	16,5	394,2	18,8
7	31,58	25,90	16,69	10,37	23,75	32,95	42,21	49,11	55,58	19,5	394,3	19,1
8	33,25	27,66	19,66	3,34	21,90	31,32	40,62	47,66	54,23	22,5	394,3	19,4
9	34,92	29,43	21,59	3,34	20,05	29,68	39,03	46,21	52,88	25,5	394,4	19,7
10	36,59	31,20	23,53	11,77	16,95	28,04	37,44	44,76	51,53	28,5	394,5	20,1
11	38,26	32,96	25,46	16,16	11,77	26,41	35,85	43,31	50,17	31,5	394,5	20,4
12	39,93	34,73	27,40	19,11	3,34	24,77	34,26	41,86	48,82	34,5	394,6	20,7
13	41,60	36,49	29,33	21,90	2,82	20,81	32,67	40,41	47,47	37,5	394,7	21,0
14	43,27	38,26	31,26	23,93	11,60	16,69	31,08	38,97	46,11	40,5	394,8	21,3
15	44,94	40,02	33,20	25,95	17,19	10,37	29,48	37,52	44,76	43,5	394,9	21,6
16	46,61	41,79	35,13	27,98	21,49	3,52	27,89	36,07	43,41	46,5	395,0	22,0
17	48,28	43,55	37,07	30,00	23,65	4,05	24,24	34,62	42,06	49,5	395,0	22,3
18	49,95	45,32	39,00	32,03	25,80	11,77	19,59	33,17	40,70	52,5	395,1	22,6
19	51,62	47,08	40,94	34,06	27,95	18,18	13,44	31,72	39,35	55,5	395,2	22,9
20	53,29	48,85	42,87	36,08	30,10	21,73	4,05	30,27	38,00	58,5	395,2	23,2
21	54,96	50,61	44,81	38,11	32,25	25,01	4,49	27,57	37,11	61,5	395,3	24,0
22	56,63	52,38	46,74	40,13	34,41	27,31	12,99	21,96	35,18	64,5	395,4	23,8
23	58,30	54,14	48,67	42,16	36,56	29,61	20,08	13,53	33,24	67,5	395,4	23,5
24	59,97	55,91	50,61	44,19	38,71	31,91	27,18	2,82	31,30	70,5	395,5	23,2
Distance	-13,5	0,0	12,0	24,0	36,0	48,0	60,0	72,0	85,5			
Elevation	393,7	393,9	394,1	394,4	394,7	395,0	395,3	395,6	396,0			

**Tabella 2:** Risultati elaborazione GRM

Geo.	Quota s.l.m. (m)	Velocità V1 (m/s)	Velocità V2 (m/s)	Velocità Substrato (m/s)	Spessore strato 1 (m)	Spessore strato 2 (m)	Quota Substrato s.l.m. (m)
1	393,9	403					
2	394,0	451		1983	4,0		390,0
3	394,0	499		1983	4,6		389,4
4	394,1	548		1986	5,1		389,0
5	394,1	548		1986	5,2		388,9
6	394,2	515		1983	5,0		389,2
7	394,3	482		1983	4,7		389,6
8	394,3	450		1986	4,5		389,8
9	394,4	450		1986	4,5		389,9
10	394,5	447		1983	4,6		389,9
11	394,5	444		1983	4,6		389,9
12	394,6	441		1986	4,6		390,0
13	394,7	441		1983	4,7		390,0
14	394,8	446		1983	4,8		390,0
15	394,9	451		1986	5,0		389,9
16	395,0	456		1986	5,1		389,9
17	395,0	456		1983	5,2		389,8
18	395,1	475		1983	5,5		389,6
19	395,2	494		1986	5,8		389,4
20	395,2	513		2150	6,2		389,0
21	395,3	513		1948	6,2		389,1
22	395,4	463		1664	5,7		389,7
23	395,4	413		1662	5,0		390,4
24	395,5	363					





## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P-ST7

Località: Campori

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

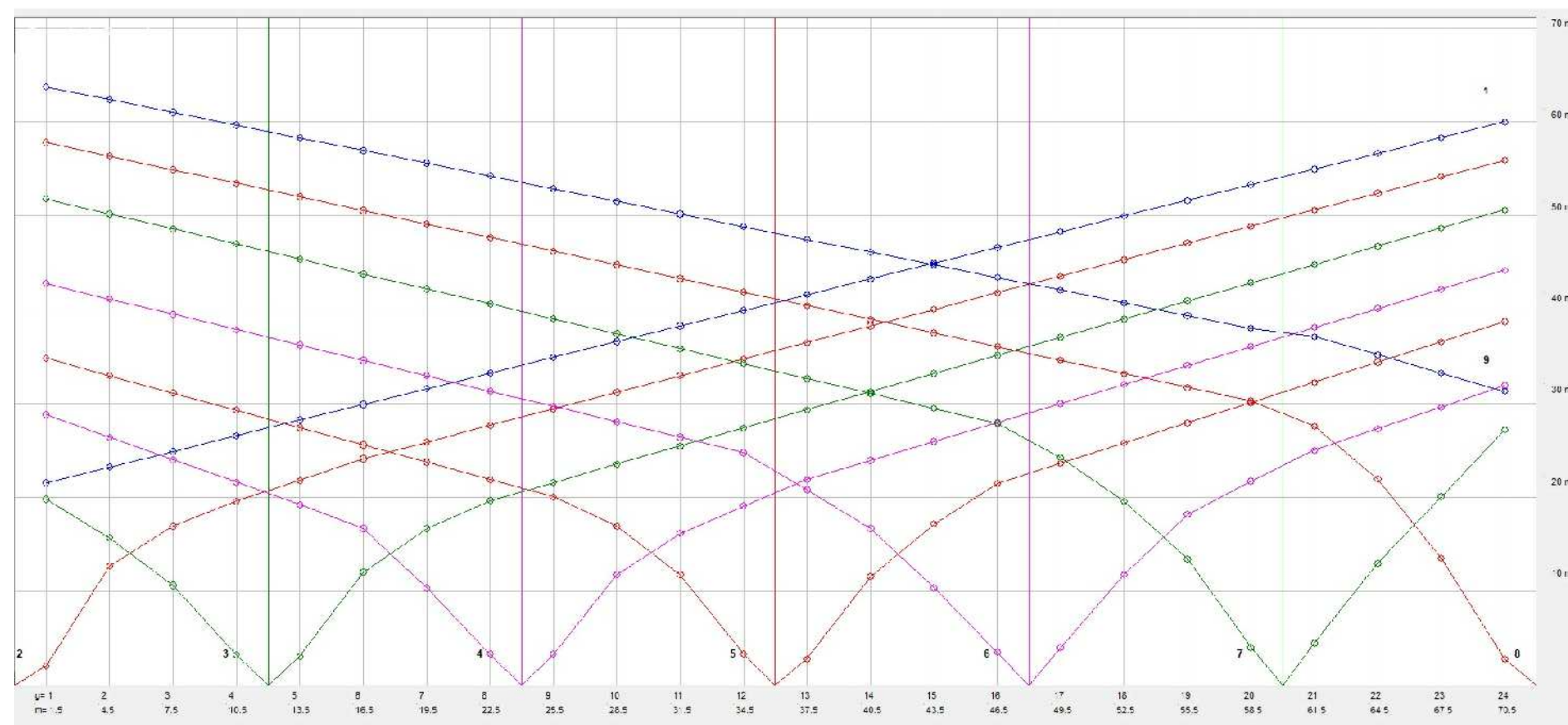
Sismogrammi ST7-p

**All. 2.6b**

Settembre 2018

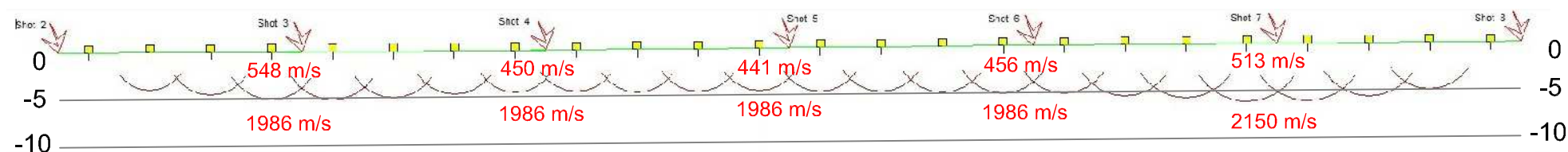


- Shot 1 = esterno G1   Shot 2 = G1   Shot 3 = G4/G5  
 Shot 4 = G8/G9   Shot 5 = G12/G13   Shot 6 = G16/G17  
 Shot 7 = G20/G21   Shot 8 = G24   Shot 9 = esterno G24



- Tempi dei primi arrivi ai geofoni  
 Profilo topografico  
 Geofoni  
 Profondità del limite di strato  
 200 m/s Velocità sismica dello strato in metri al secondo

Grafico delle domocrone misurate in scala 1:300



Profilo sismico GRM in scala 1:300

## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE P

Località: Campori

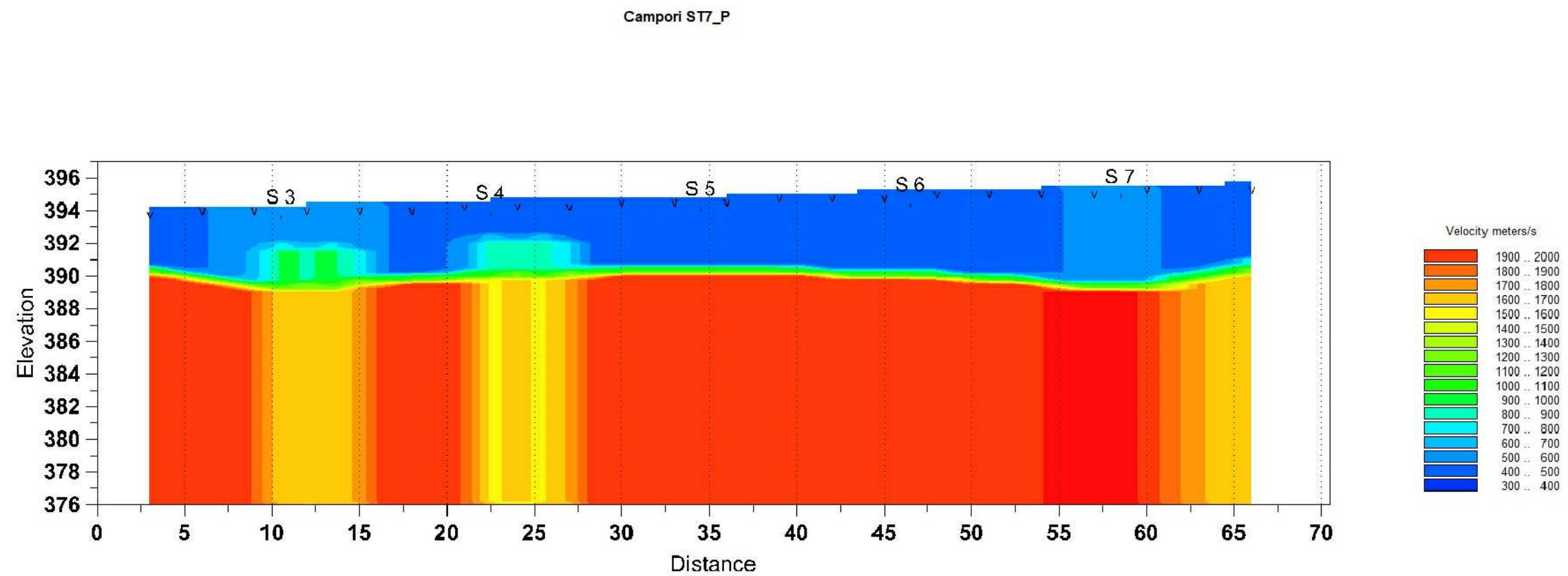
Committente: Comune di Cstiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

### SEZIONE SISMICA ST7-p

All. 2.6c

Settembre 2018



Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni in scala 1:300

**PROSPEZIONE SISMICA  
A RIFRAZIONE CON ONDE P**

Località: Campori

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

**SEZIONE SISMICA ST7-p**

All. 2.6d

Aprile 2017



**Allegato 2.7a: PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH - ST7**

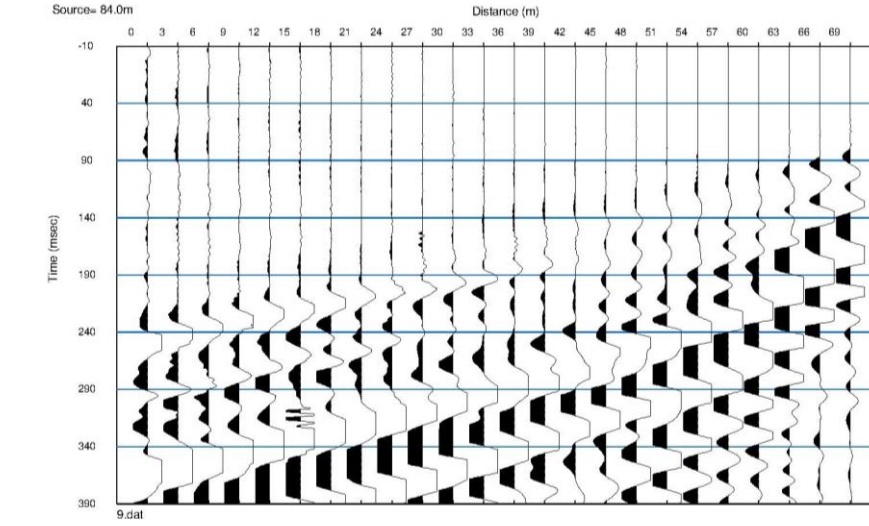
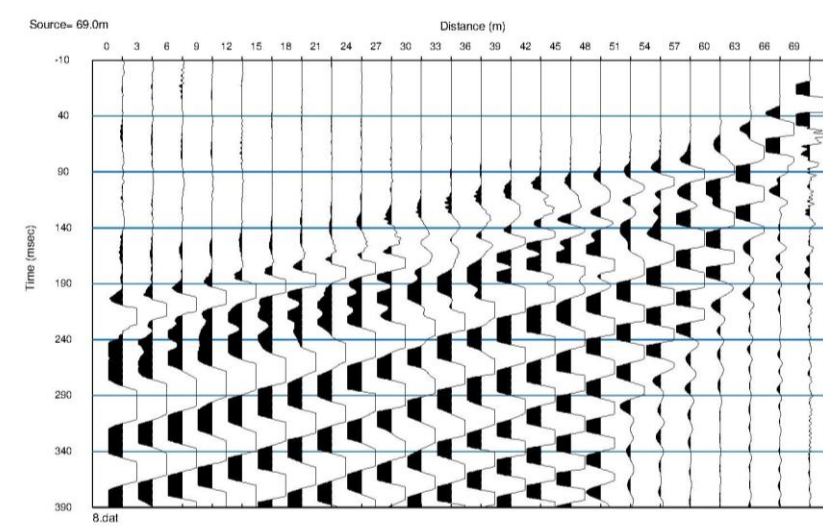
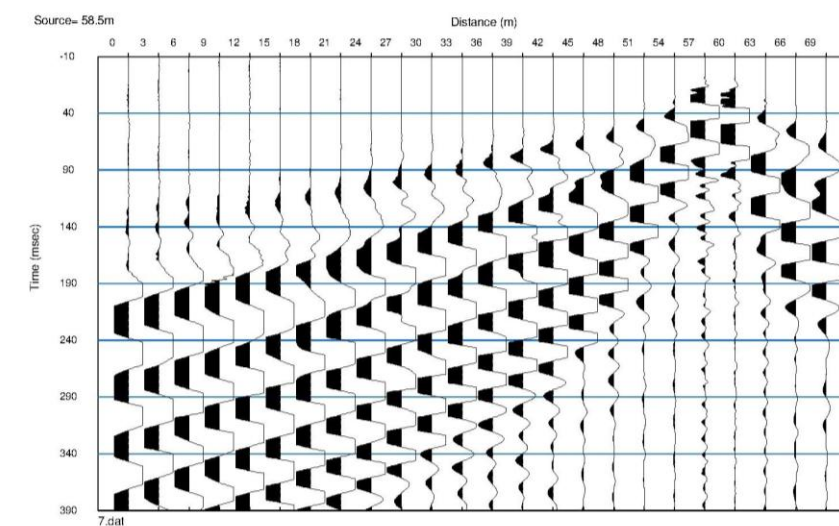
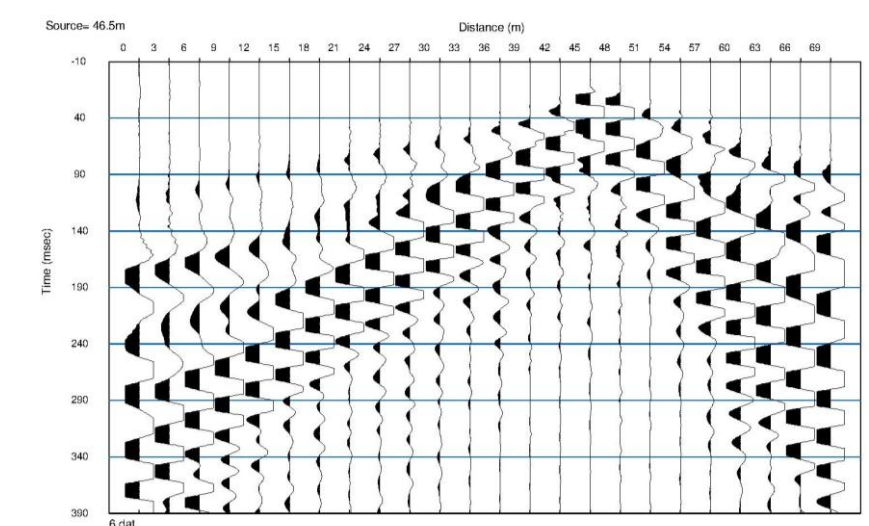
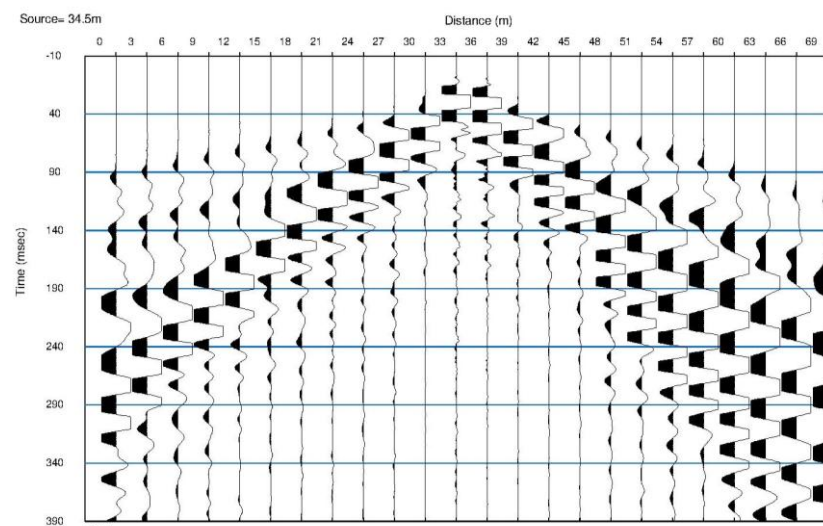
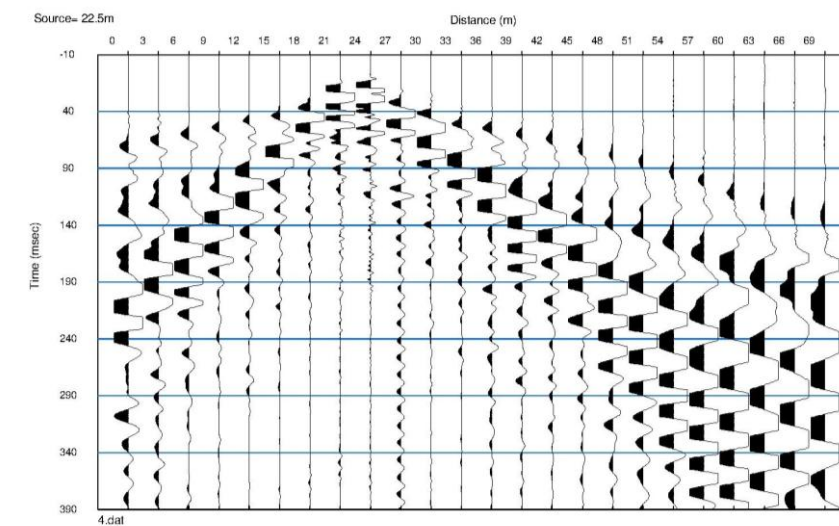
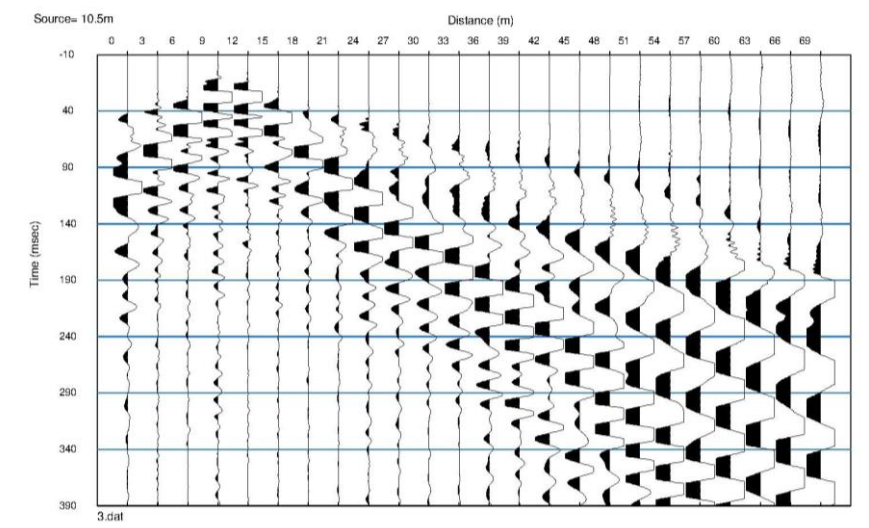
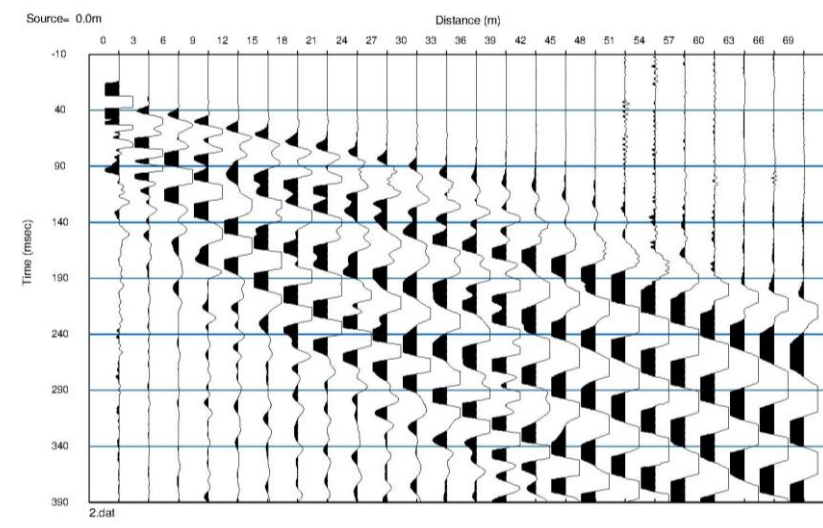
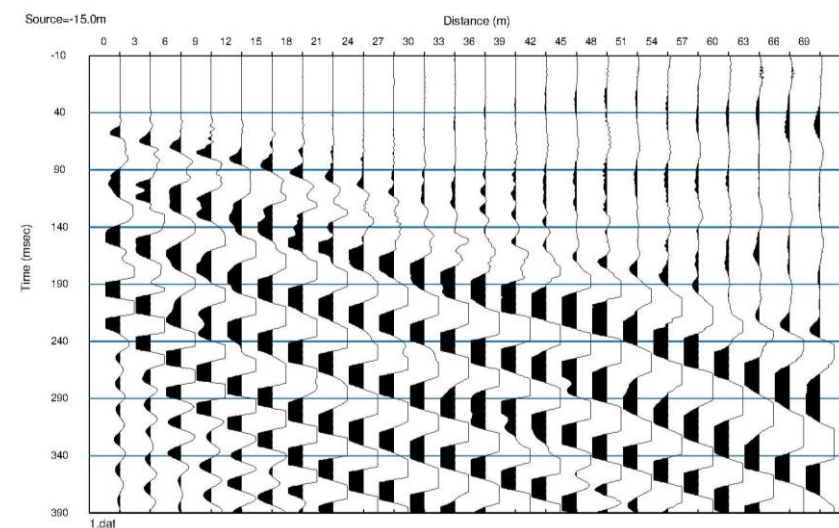
Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)  
Località: Campori  
Data di esecuzione: 20.09.2018  
Linea sismica: ST7-SH

**Tabella 1:** Geometria dello stendimento con tempi di primo arrivo e tempi intercetti

Geo.	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6	Shot 7	Shot 8	Shot 9	Distance	Elevation	Inter- cept
1	51,88	10,78	42,19	65,91	84,34	103,97	135,39	161,58	188,64	1,5	393,9	35,0
2	56,90	22,17	30,79	60,15	79,24	99,06	130,25	156,28	184,04	4,5	394,0	35,4
3	61,91	33,56	19,40	54,39	74,14	94,15	125,12	150,99	179,44	7,5	394,0	35,8
4	66,93	43,67	4,49	48,63	69,04	89,24	119,98	145,69	174,84	10,5	394,1	36,2
5	71,95	49,10	4,49	42,87	63,94	84,33	114,85	140,39	170,24	13,5	394,1	36,6
6	76,96	54,53	23,57	36,93	58,84	79,42	109,71	135,09	165,64	16,5	394,2	37,0
7	81,98	59,96	37,91	25,13	53,74	74,51	104,58	129,79	161,04	19,5	394,3	37,5
8	87,00	65,39	44,63	9,62	48,64	69,60	99,44	124,49	156,44	22,5	394,3	37,9
9	92,01	70,82	50,28	9,23	43,54	64,69	94,31	119,19	151,84	25,5	394,4	38,3
10	97,03	76,25	55,93	22,61	37,53	59,78	89,17	113,90	147,24	28,5	394,5	38,7
11	102,05	81,68	61,57	34,00	25,64	54,87	84,04	108,60	142,64	31,5	394,5	39,1
12	107,06	87,11	67,22	44,78	13,75	49,96	78,90	103,30	138,04	34,5	394,6	39,5
13	112,08	92,55	72,86	51,90	14,36	45,26	73,77	98,00	133,44	37,5	394,7	40,0
14	117,10	97,98	78,51	57,96	26,37	37,79	68,63	92,70	128,84	40,5	394,8	40,4
15	122,11	103,41	84,15	64,02	37,48	25,95	63,50	87,40	124,24	43,5	394,9	40,8
16	127,13	108,84	89,80	70,09	49,29	15,42	58,36	82,11	119,64	46,5	395,0	41,2
17	132,15	114,27	95,44	76,15	56,13	15,34	53,23	76,81	115,04	49,5	395,0	41,6
18	137,16	119,70	101,09	82,21	62,98	28,19	45,31	71,51	110,44	52,5	395,1	42,1
19	142,18	125,13	106,73	88,27	69,82	41,62	31,88	66,21	105,84	55,5	395,2	42,5
20	147,20	130,56	112,38	94,34	76,66	50,44	14,55	60,91	101,24	58,5	395,2	42,9
21	152,21	135,99	118,02	100,40	83,51	59,14	14,63	55,84	96,63	61,5	395,3	43,3
22	157,23	141,42	123,67	106,46	90,35	66,77	29,43	44,26	91,52	64,5	395,4	43,2
23	162,25	146,86	129,32	112,53	97,19	72,72	44,23	27,14	83,84	67,5	395,4	40,5
24	167,27	152,29	134,96	118,59	104,04	80,48	59,02	9,36	76,17	70,5	395,5	37,9
Distance	-13,5	0,0	12,0	24,0	36,0	48,0	60,0	72,0	85,5			
Elevation	393,7	393,9	394,1	394,4	394,7	395,0	395,3	395,6	396,0			

**Tabella 2:** Risultati elaborazione GRM

Geo.	Quota s.l.m. (m)	Velocità V1 (m/s)	Velocità V2 (m/s)	Velocità Substrato (m/s)	Spessore strato 1 (m)	Spessore strato 2 (m)	Quota Substrato s.l.m. (m)
1	393,9	272					
2	394,0	261		624	5,0		389,0
3	394,0	251		624	4,8		389,2
4	394,1	241		623	4,7		389,4
5	394,1	241		624	4,7		389,4
6	394,2	234		624	4,6		389,6
7	394,3	227		623	4,5		389,8
8	394,3	220		624	4,4		389,9
9	394,4	220		624	4,5		389,9
10	394,5	231		623	4,8		389,7
11	394,5	242		624	5,1		389,4
12	394,6	253		624	5,4		389,2
13	394,7	253		623	5,5		389,2
14	394,8	258		624	5,7		389,1
15	394,9	263		624	5,9		389,0
16	395,0	269		623	6,1		388,9
17	395,0	269		624	6,1		388,9
18	395,1	256		624	5,9		389,2
19	395,2	244		623	5,6		389,6
20	395,2	232		623	5,3		389,9
21	395,3	232		607	5,3		390,0
22	395,4	218		525	5,0		390,4
23	395,4	205		472	4,6		390,8
24	395,5	192					



## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH-ST7

Località: Castiglione Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Gafagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

Sismogrammi ST7-sh

All. 2.7b

Aprile 2017



- Shot 1 = esterno G1   Shot 2 = G1   Shot 3 = G4/G5  
 Shot 4 = G8/G9   Shot 5 = G12/G13   Shot 6 = G16/G17  
 Shot 7 = G20/G21   Shot 8 = G24   Shot 9 = esterno G24

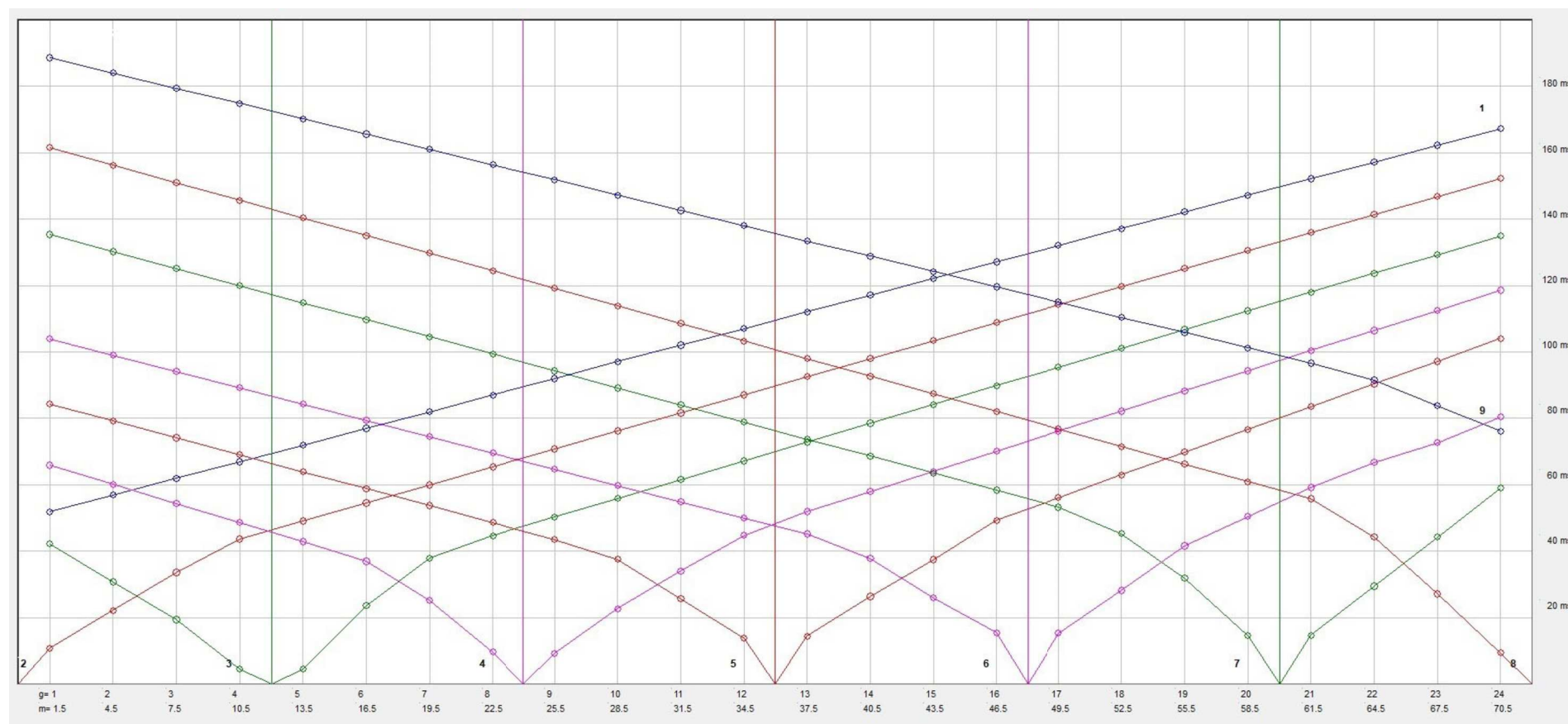


Grafico delle domocrone misurate in scala 1:300



Profilo sismico GRM in scala 1:300

## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH

Località: Campori

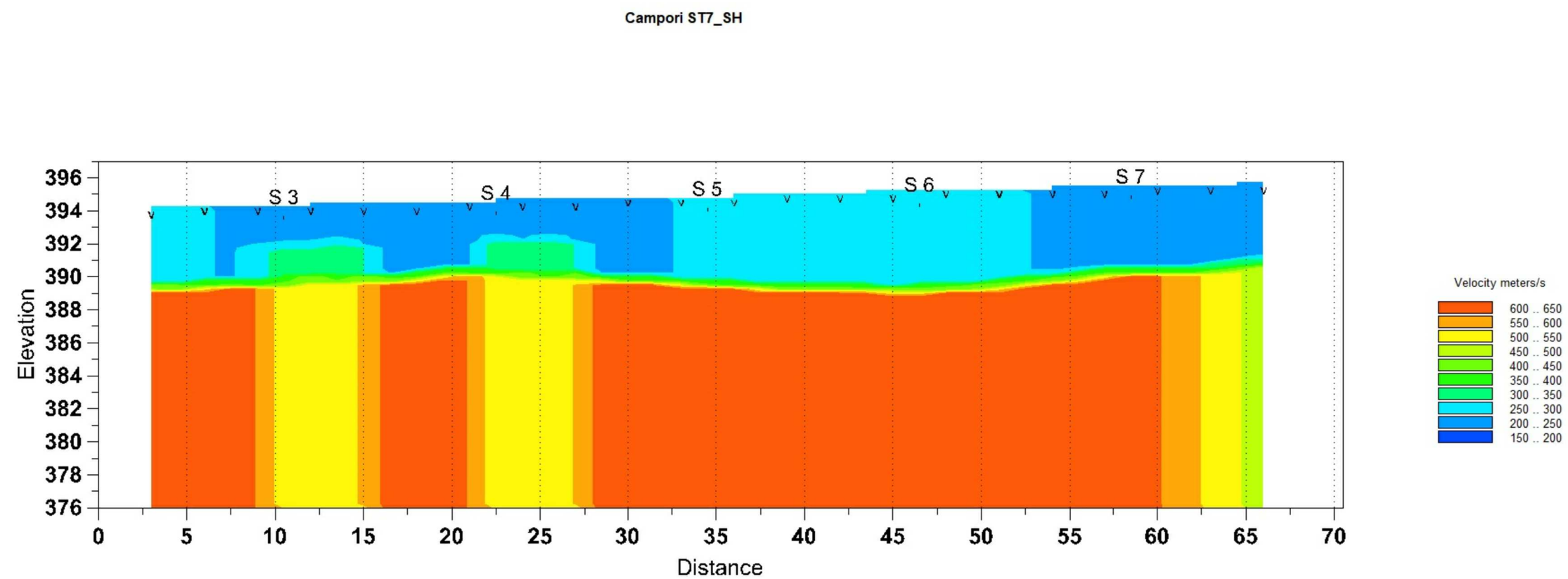
Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

SEZIONE SISMICA ST7-sh

All. 2.7c

Settembre 2018



Profilo sismico GRM - Velocità sismiche dei terreni in scala 1:300

## PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE CON ONDE SH

Località: Campori

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

**SEZIONE SISMICA ST7-sh**

All. 2.7d

Settembre 2018

dataset: 4838.dat  
sampling: 0.5 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2 m

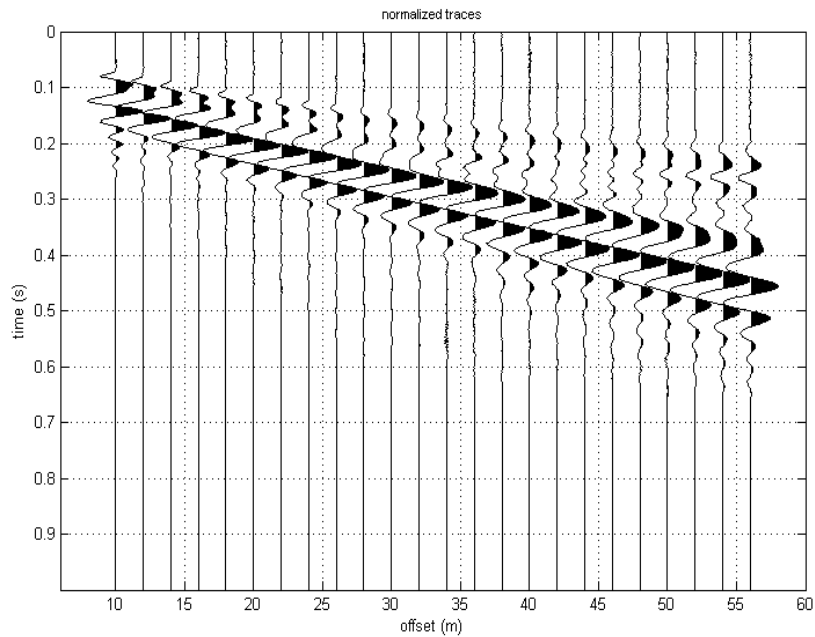


Figura 1 - Dataset - sismogramma registrato

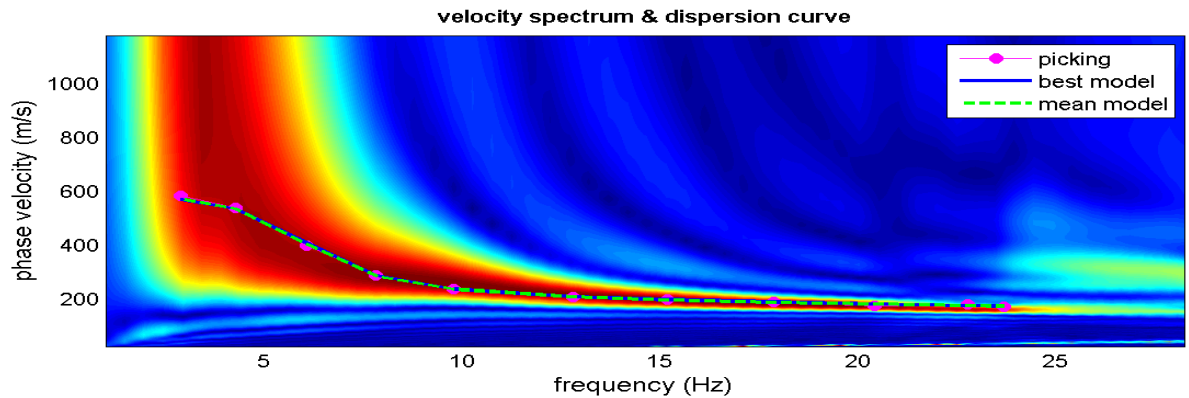


Figura 2 - Spettro di velocità e curve di dispersione

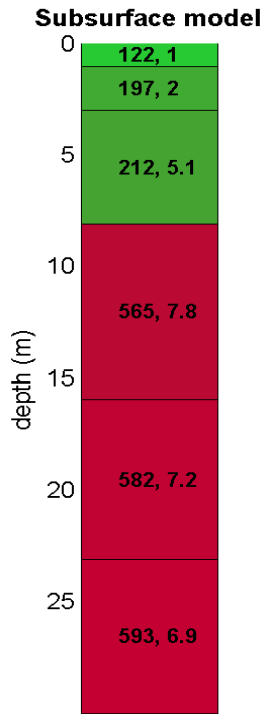
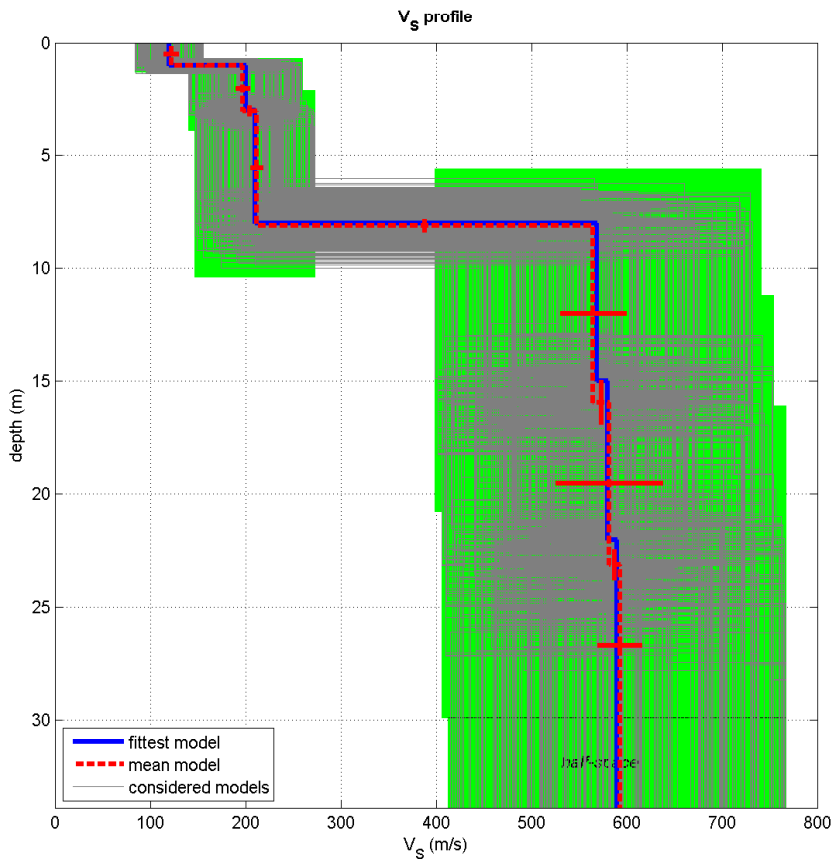


Figura 3 - Modello di sottosuolo ricavato  
Vs (m/sec) - Spessore (m)



dataset: 4838.dat

Figura 4 - Profilo verticale delle velocità Vs

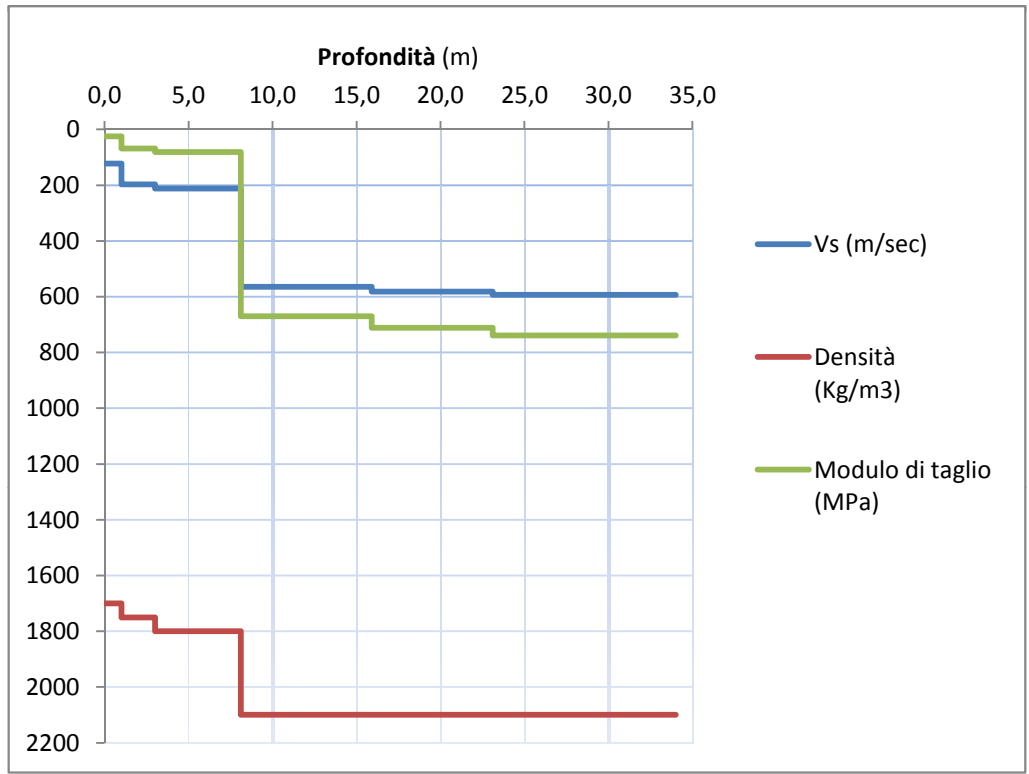


Figura 5 - Modello di sottosuolo ricavato  
(Profilo di Velocità Vs, Densità e Modulo di taglio)

Da Prof. (m)	A Prof. (m)	Spessore (m)	Vs (m/sec)	Vs <sub>x</sub> (m/sec)	Densità (gr/cm <sup>3</sup> )	Modulo di taglio (MPa)
0,0	1,0	1,0	122	122	1,70	25
1,0	3,0	2,0	197	163	1,75	68
3,0	8,1	5,1	212	191	1,80	81
8,1	15,9	7,8	565	283	2,10	670
15,9	23,1	7,2	582	337	2,10	711
23,1	34,0	10,9	593	391	2,10	738

Prof. sub. >30 m Vs,eq 30 374 m/sec

## PROVA SISMICA MASW M1

Onde di Love (acquisizione THF)

Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo

Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)

Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1

All. 3.1

Maggio 2017

Pro.Geo. s.r.l.

dataset: 7786.dat  
sampling: 0.5 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2 m

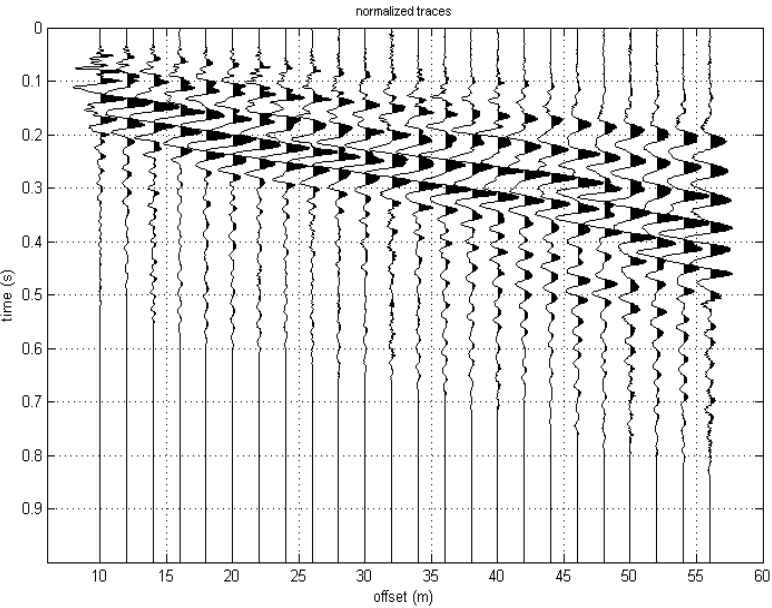


Figura 1 - Dataset - sismogramma registrato

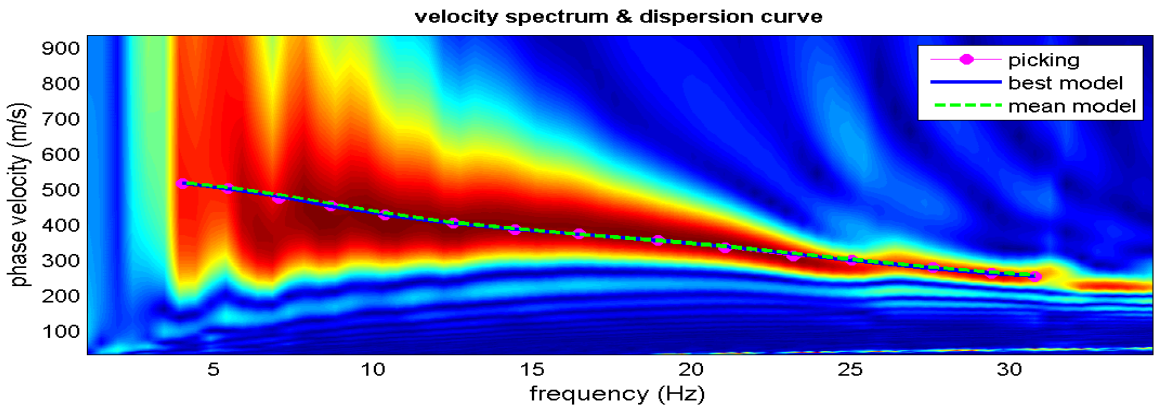


Figura 2 - Spettro di velocità e curve di dispersione

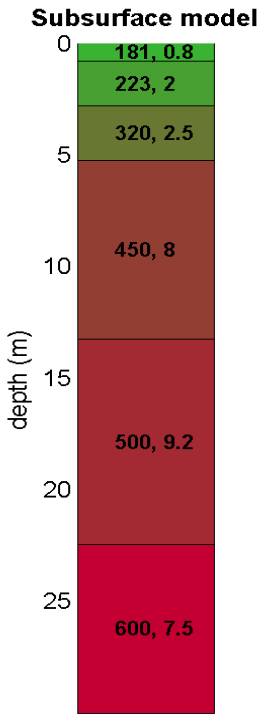
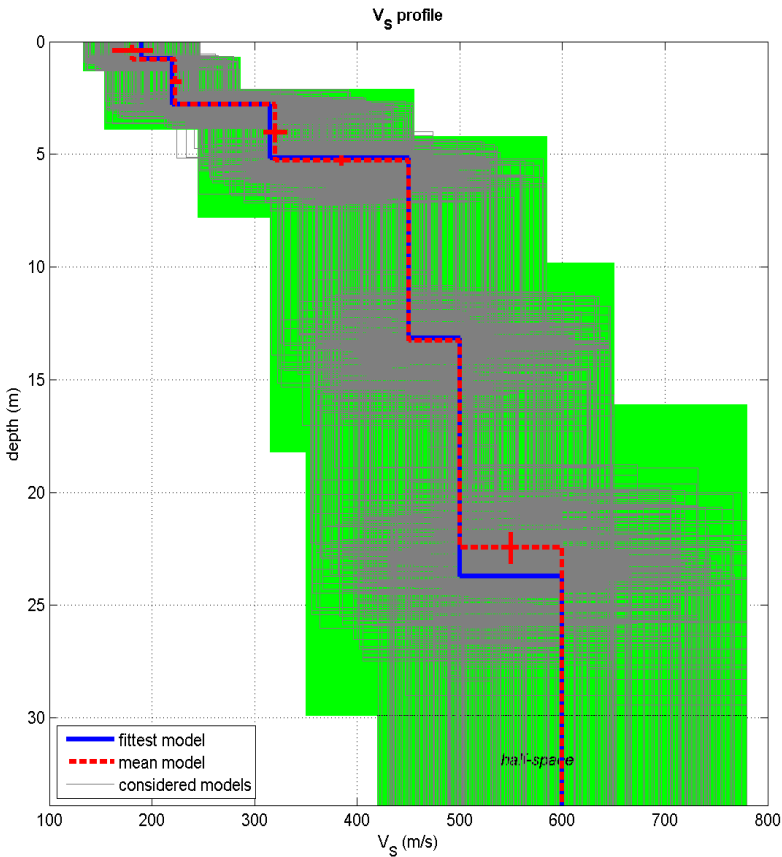


Figura 3 - Modello di sottosuolo ricavato  
Vs (m/sec) - Spessore (m)



dataset: 7786.dat  
Figura 4 - Profilo verticale delle velocità Vs

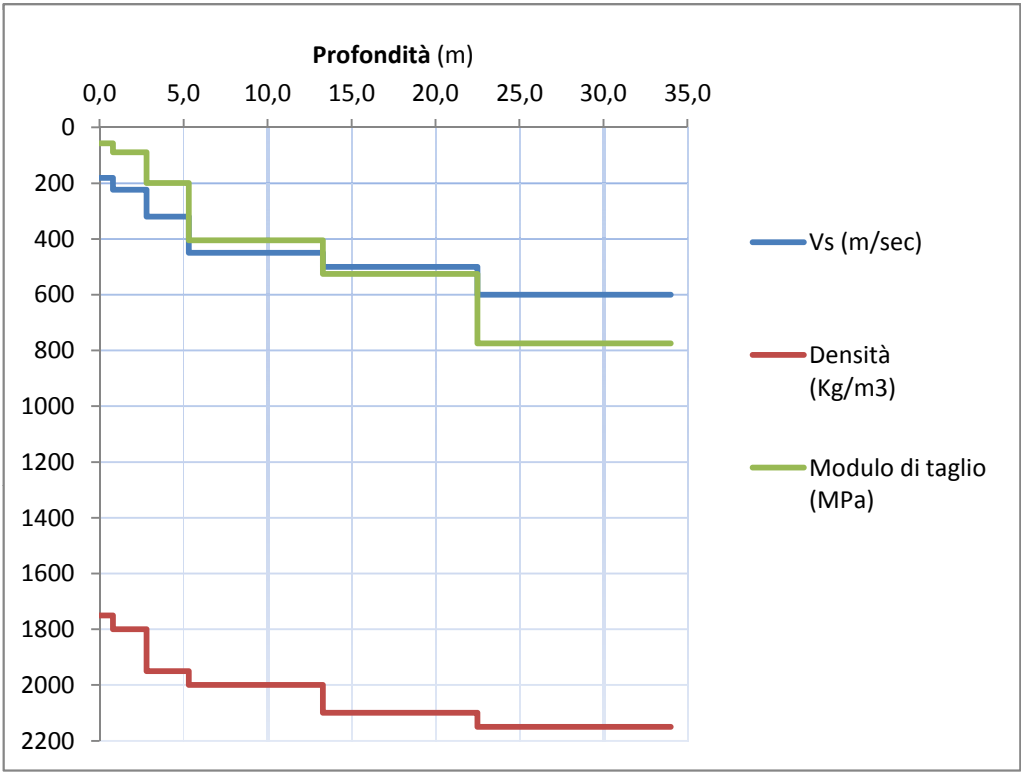


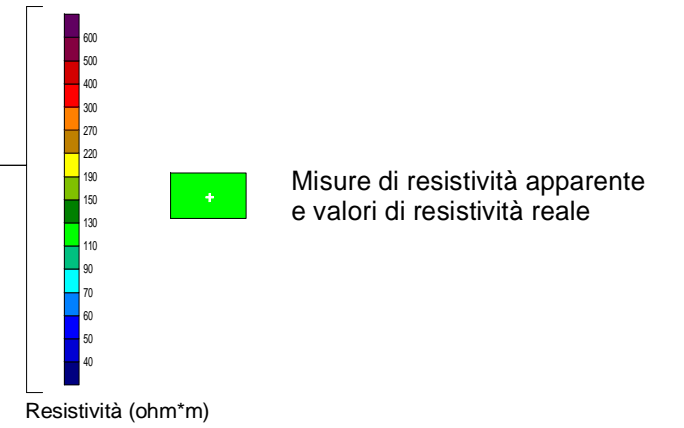
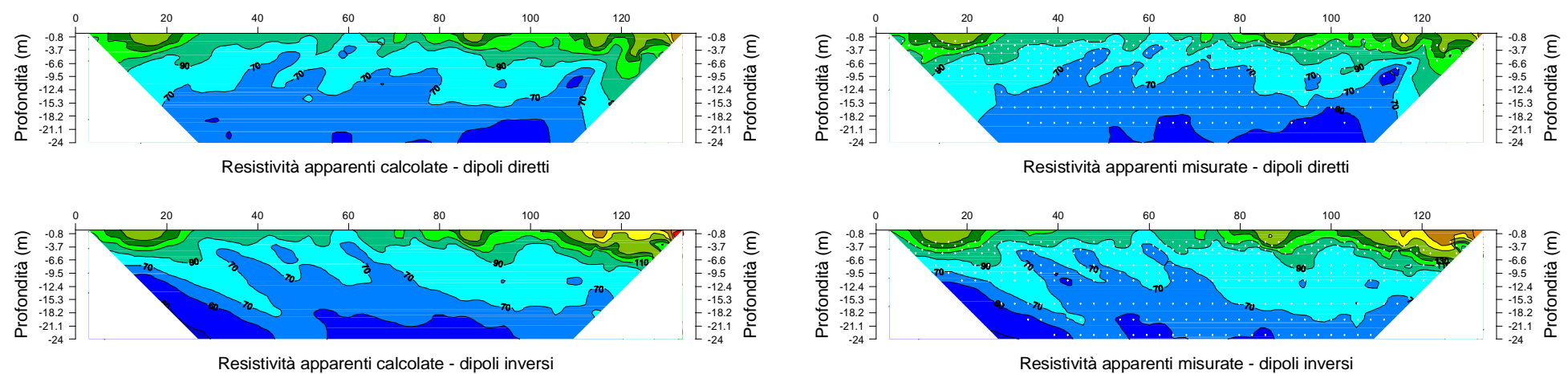
Figura 5 - Modello di sottosuolo ricavato  
(Profilo di Velocità Vs, Densità e Modulo di taglio)

Da Prof. (m)	A Prof. (m)	Spessore (m)	Vs (m/sec)	Vs <sub>x</sub> (m/sec)	Densità (gr/cm <sup>3</sup> )	Modulo di taglio (MPa)
0,0	0,8	0,8	181	181	1,75	57
0,8	2,8	2,0	223	209	1,80	90
2,8	5,3	2,5	320	250	1,95	200
5,3	13,3	8,0	450	341	2,00	405
13,3	22,5	9,2	500	392	2,10	525
22,5	34,0	11,5	600	444	2,15	774

Prof. sub. >30 m Vs,eq30 429 m/sec

PROVA SISMICA MASW M2		
Onde di Love (acquisizione THF)		
Località: Campori		
Committente: Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)		
Cantiere: Microzonazione Sismica livello 1		
AII. 3.2	Settembre 2018	Pro.Geo. s.r.l.





Strumento: EEG AL48b  
 Elettrodi: 48  
 Energizzazione: 200W  
 Elaborazione 2D: Res2dInv  
 Valori di resistività validi = 749  
 Errore di inversione (res.) = 4%

### LEGENDA

- 1 Terreni resistivi associati a terreni di copertura costituiti da depositi detritici di versante e/o depositi alluvionali antichi terrazzati
- 2 Terreni moderatamente conduttivi associati probabilmente a sabbie con argille fluvio-lacustri o ad un substrato arenaceo fratturato ed alterato, con possibile circolazione idrica
- 3 Terreni conduttivi, associati probabilmente ad argille con sabbie fluvio-lacustri o ad un substrato arenaceo fratturato ed alterato, con possibile circolazione idrica

Zona indicata in carta e in sezione geologica per la possibile presenza di piani di faglia

Misura di microtremore a stazione singola

## INDAGINE GEOELETTRICA

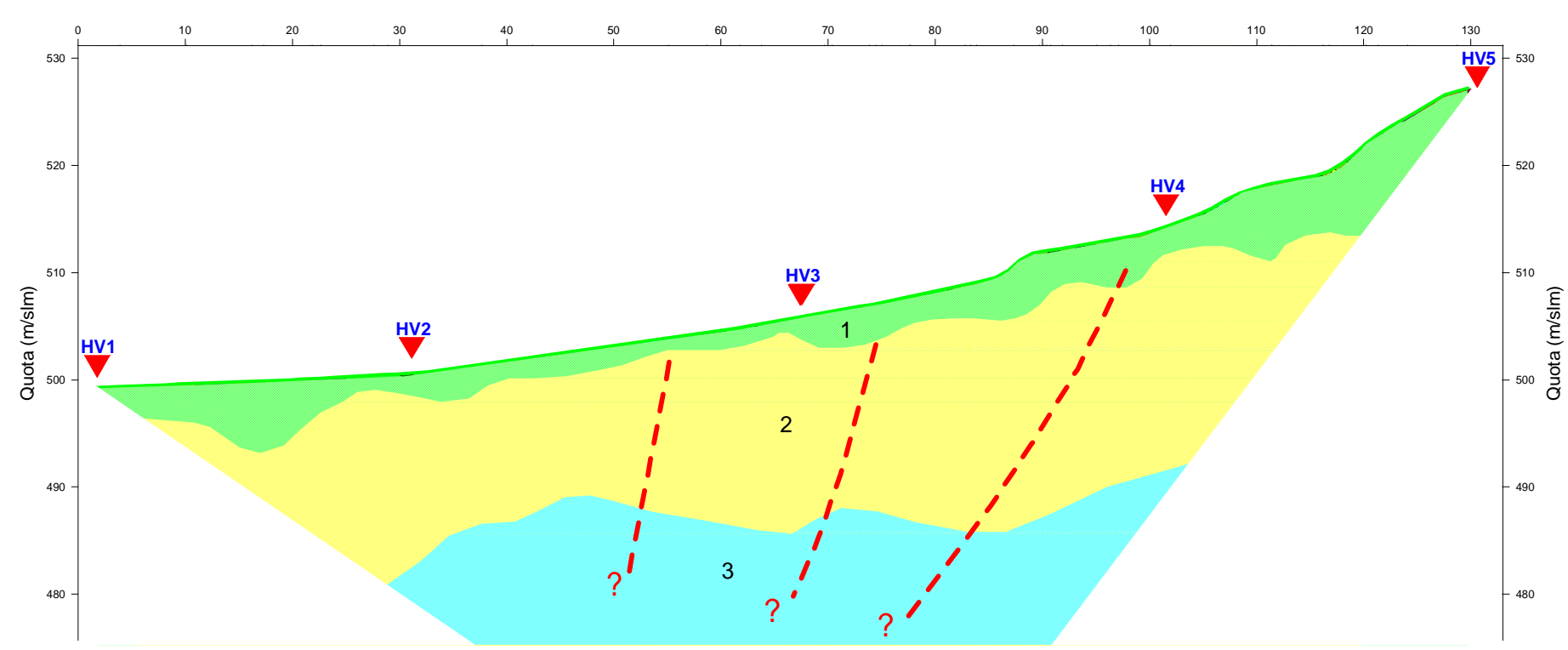
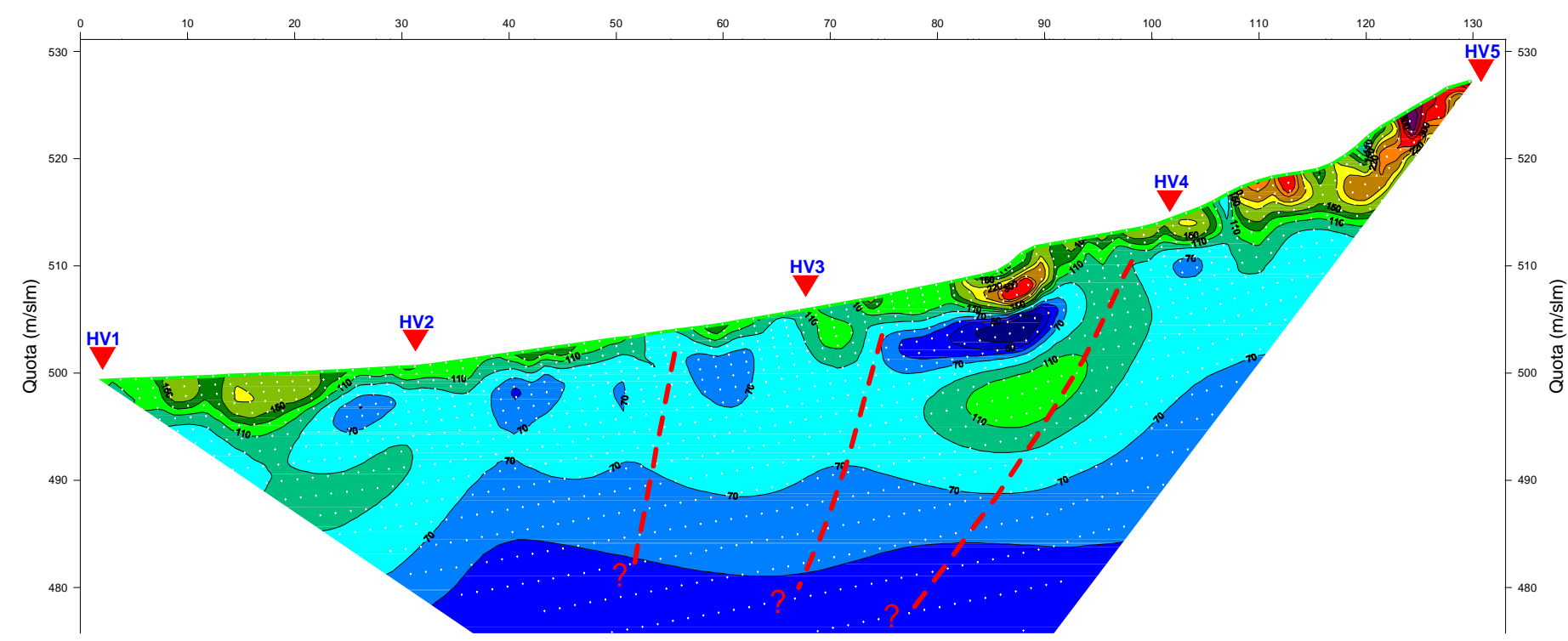
**Castiglione di Garfagnana capoluogo**

**Comune di Castiglione di Garfagnana (LU)**

**Microzonazione Sismica - livello 1**

**SEZIONI GEOELETTRICHE 2D**  
**SEZIONE GE-1**

All. 4	Settembre 2017	Pro. Geo. s.r.l.
--------	----------------	------------------



---

REGIONE TOSCANA  
COMUNE DI CASTIGLIONE DI GARFAGNANA  
PROVINCIA DI LUCCA

-----  
INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE IN CASTIGLIONE DI GARFAGNANA  
CAPOLUOGO E NELLE FRAZIONI DI CERAGETO,  
CAMPORI, PIAN DI CERRETO E CHIOZZA  
NELL'AMBITO DEL PROGRAMMA PER GLI STUDI DI  
MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 1  
-----

**Allegato 5**

**Schede di elaborazione delle misure di microtremore ambientale (metodo HVSR)**

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV1

### Dati generali

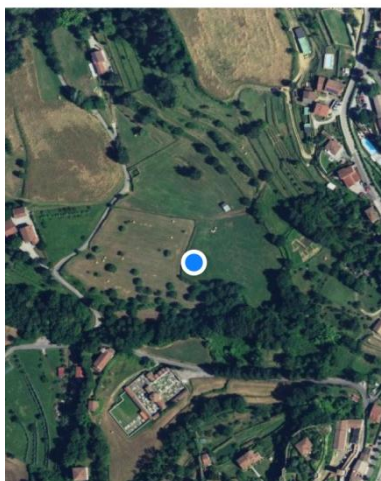
Nome progetto: Castiglione\_HV1  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 08/09/2017  
Inizio registrazione: 09:58:04  
Latitudine: 44.151467  
Longitudine: 10.409186  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Longitude Latitude Altitude

10.409186

44.151467

463.76 m



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

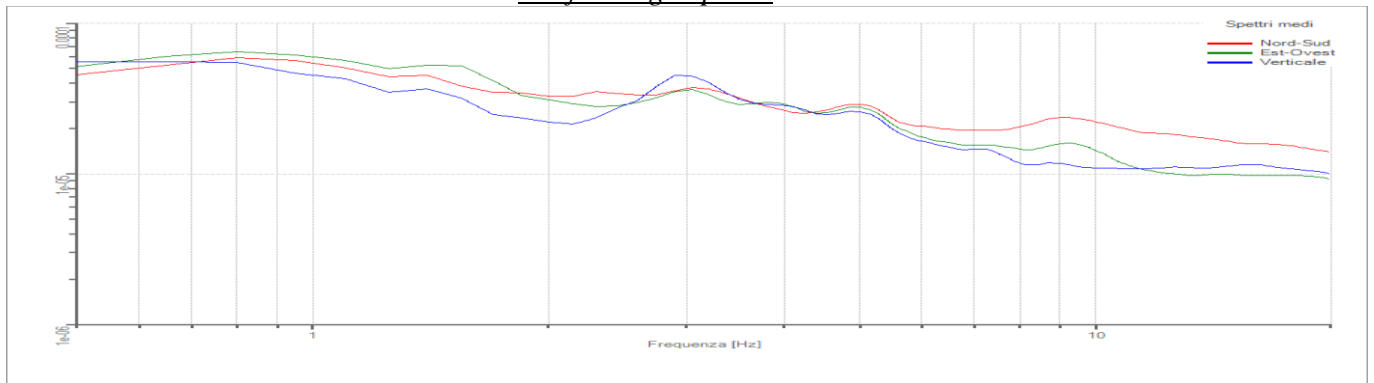
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

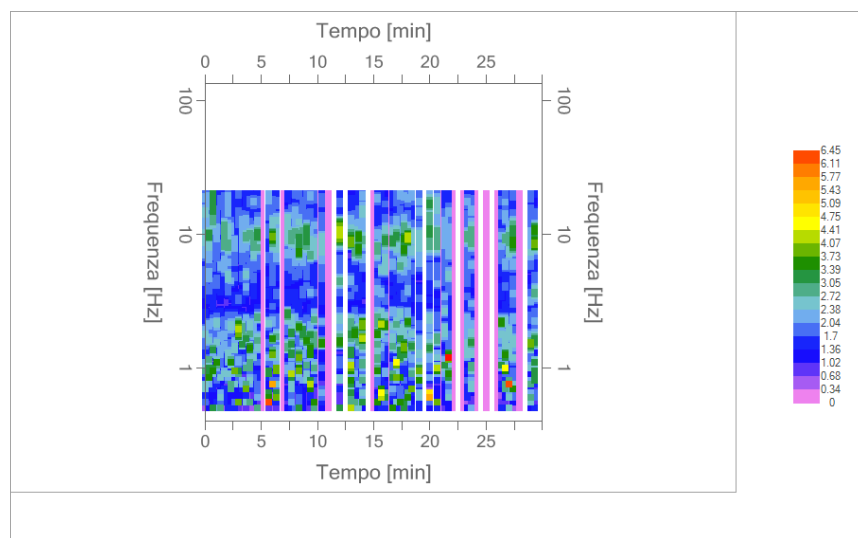
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 55  
% finestre incluse nel calcolo: 61,11% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

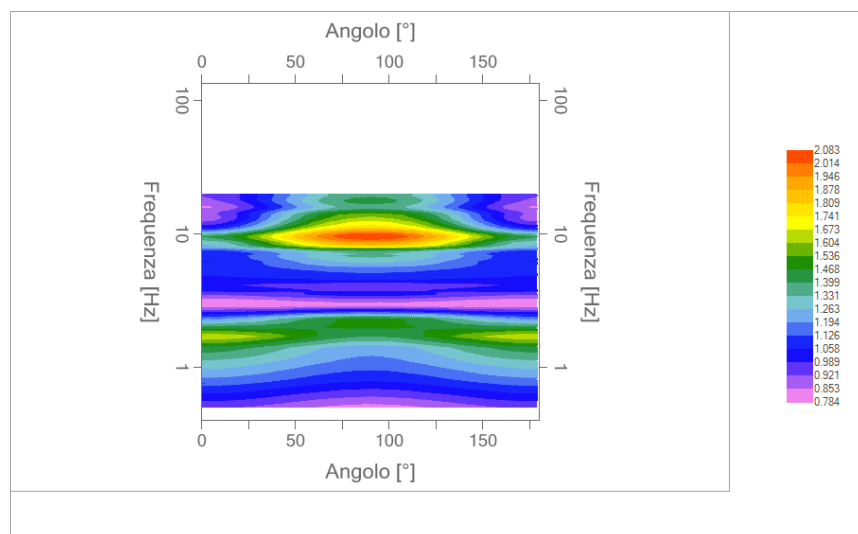
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

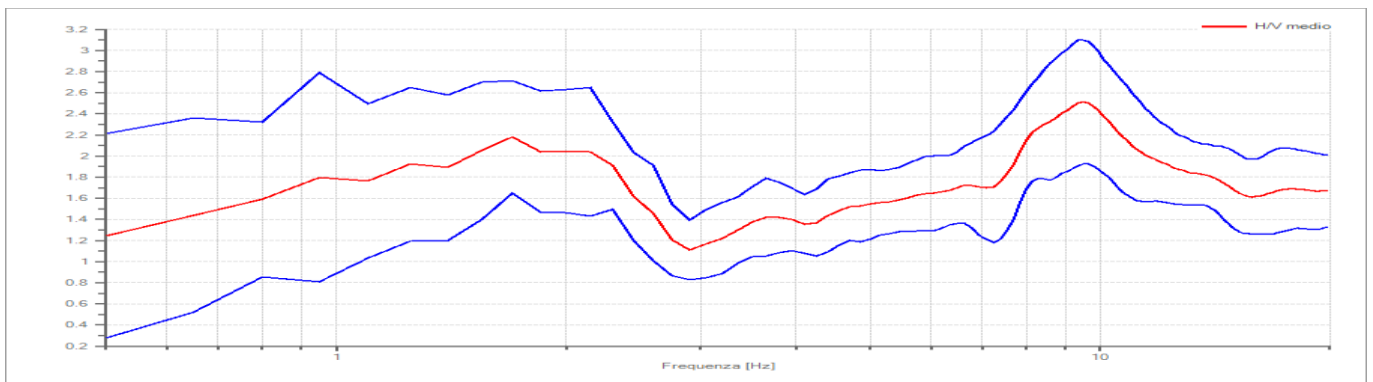
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 9,50 Hz  $\pm 0,23$  Hz      Ampiezza = 2,51

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0,5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0,5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

Classe	B
Tipo	/



## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV2

### Dati generali

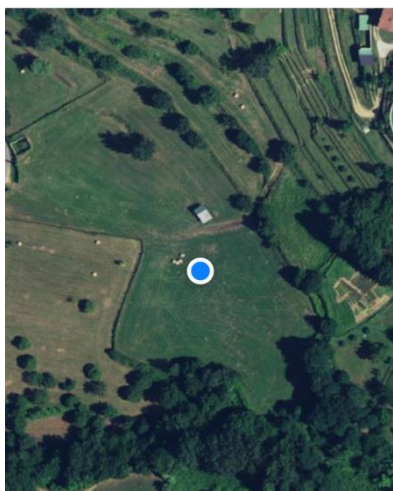
Nome progetto: Castiglione\_HV2  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 08/09/2017  
Inizio registrazione: 10:52:30  
Latitudine: 44.151701  
Longitudine: 10.409559  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Longitude Latitude Altitude

10.409559

44.151701

493.34 m



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

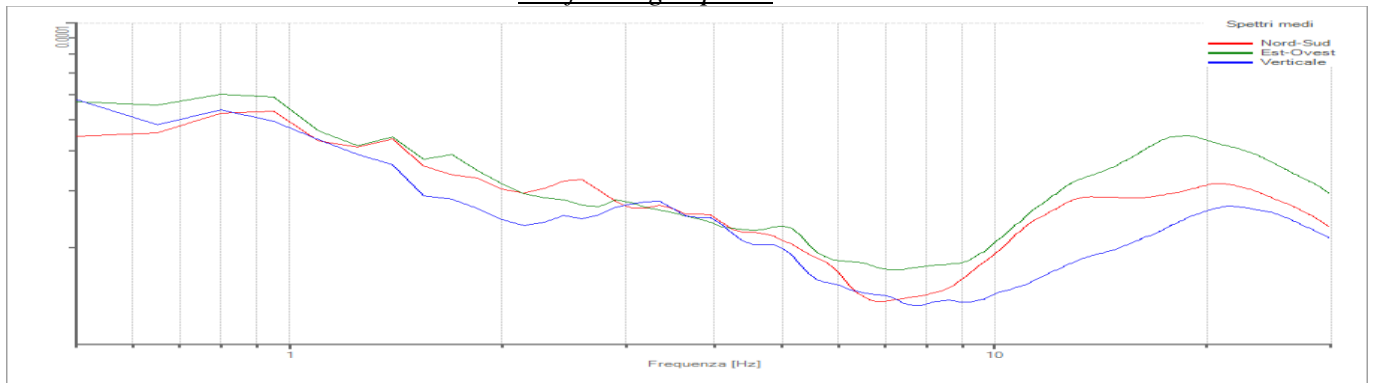
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

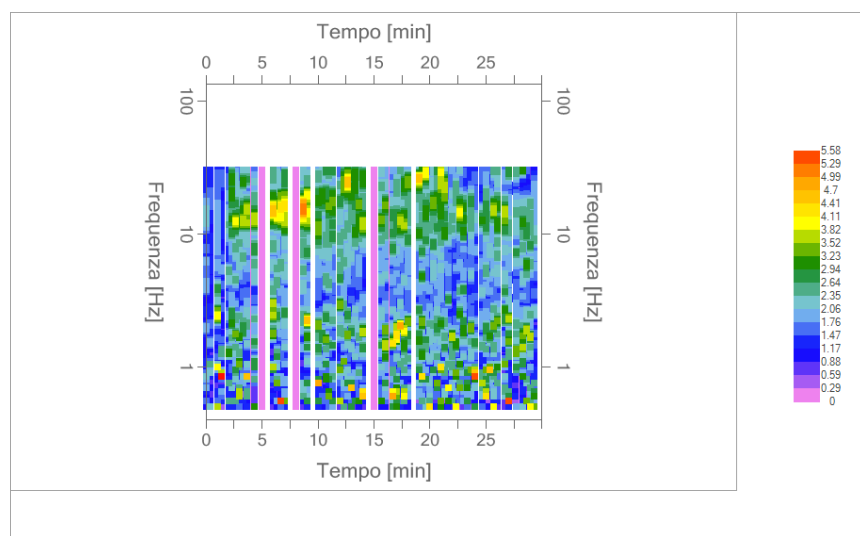
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 64  
% finestre incluse nel calcolo: 71,11% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

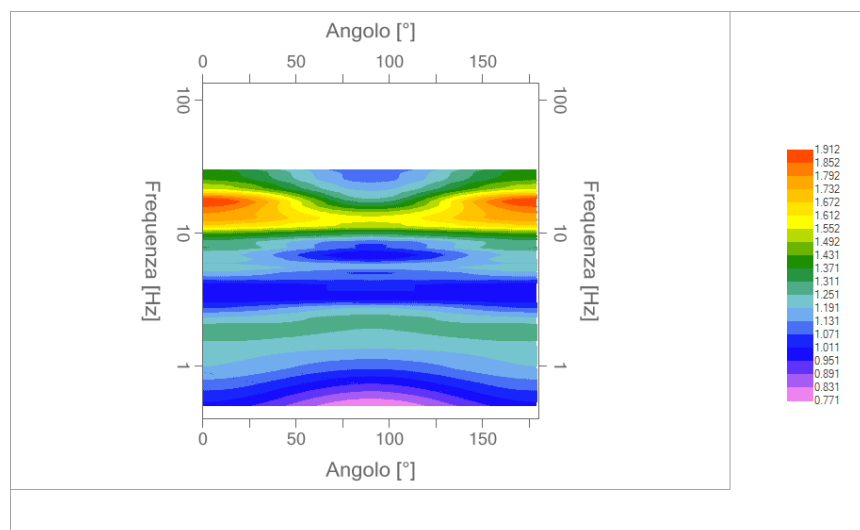
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

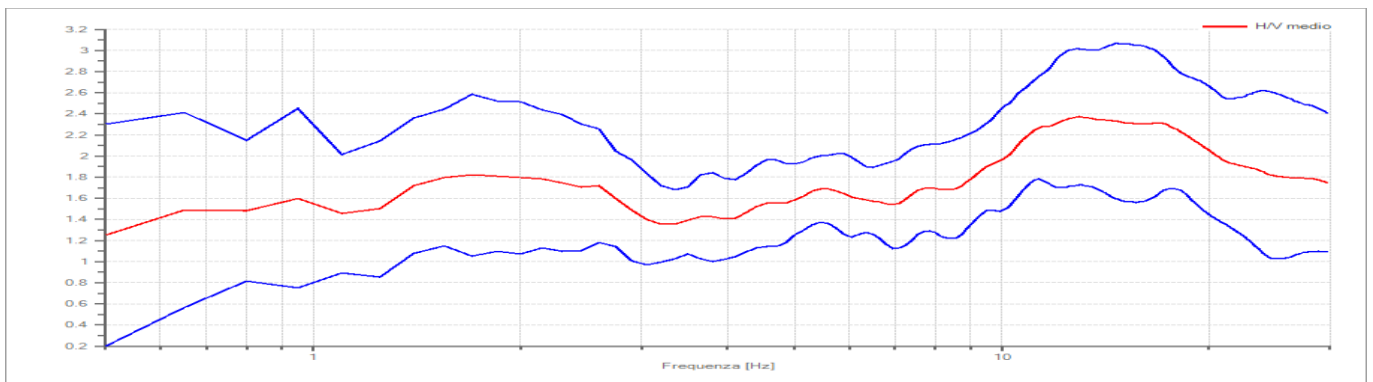
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 30,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 12,95 Hz  $\pm 0,27$  Hz      Ampiezza = 2,37

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0,5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0,5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

Classe	B
Tipo	/

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV3

### Dati generali

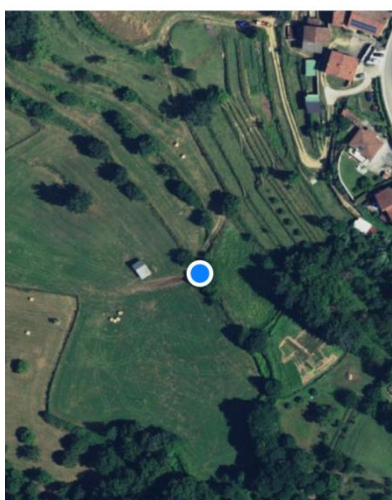
Nome progetto: Castiglione\_HV3  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 08/09/2017  
Inizio registrazione: 15:27:48  
Latitudine: 44.151934  
Longitudine: 10.409912  
Condizioni meteo: Cielo sereno/parzialmente nuvoloso – vento molto leggero  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Longitude Latitude Altitude

10.409912

44.151934

504.82 m



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

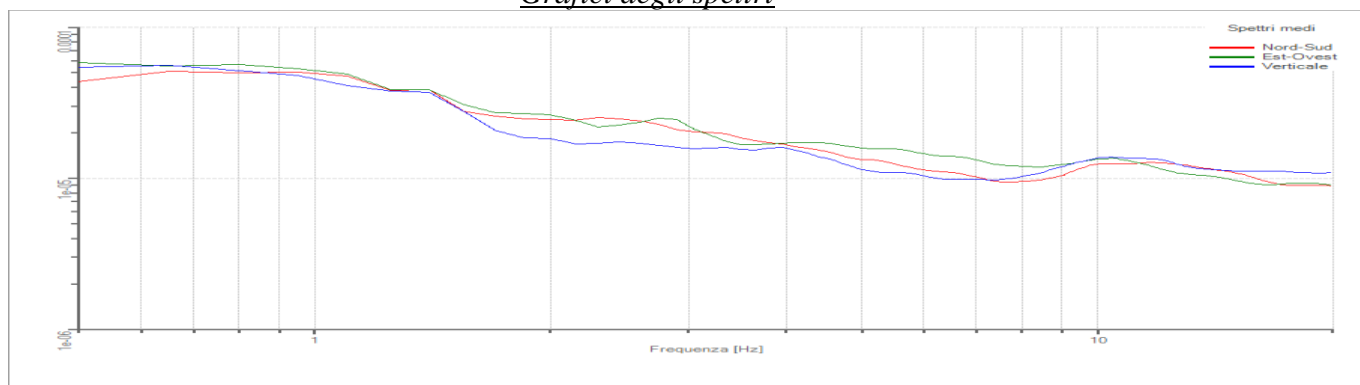
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

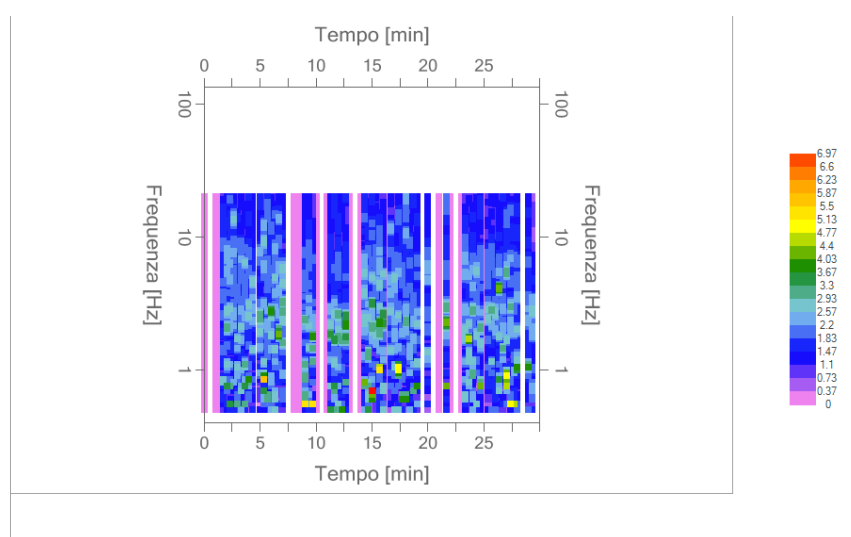
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 59  
% finestre incluse nel calcolo: 65,55% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

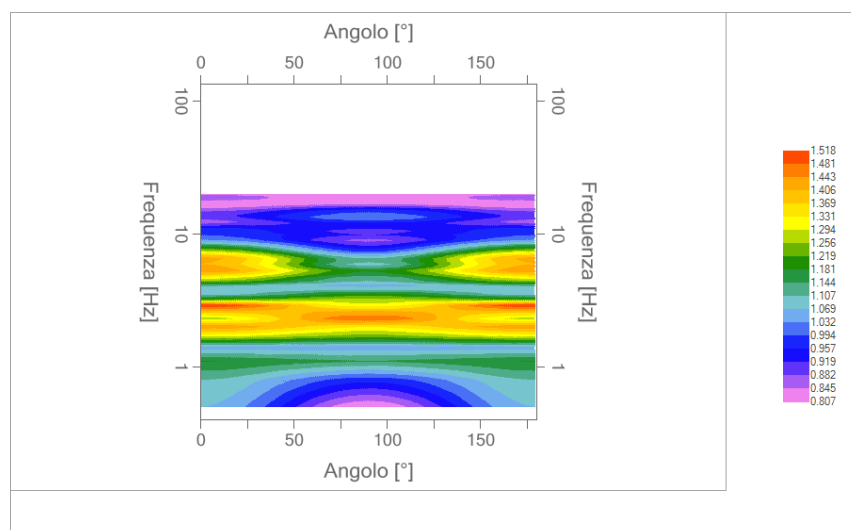
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri



## Rapporto spettrale H/V

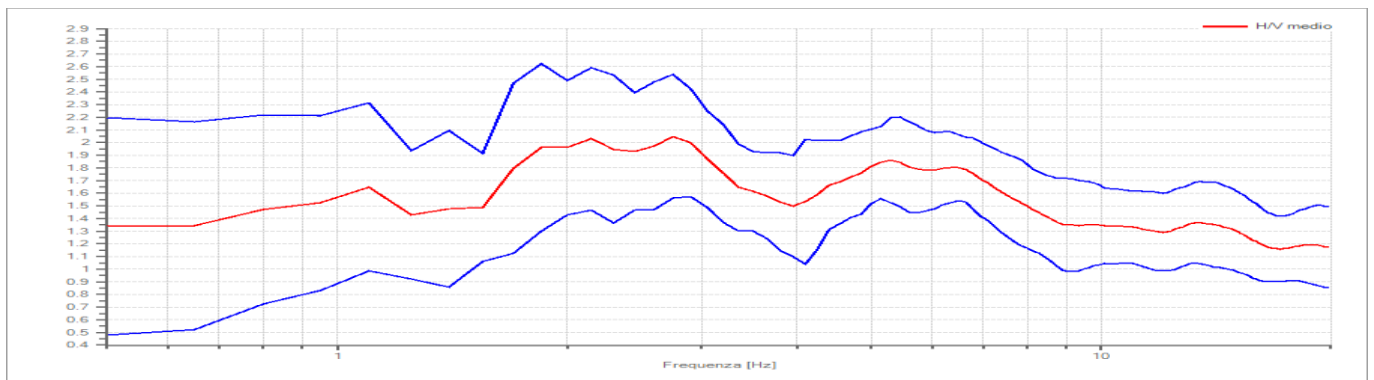
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
 Frequenza minima: 0,50 Hz  
 Passo frequenze: 0,15 Hz  
 Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
 Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
 Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 2,75 Hz  $\pm 0.24$  Hz      Ampiezza = 2,05

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

Classe	B
Tipo	/

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV4

### Dati generali

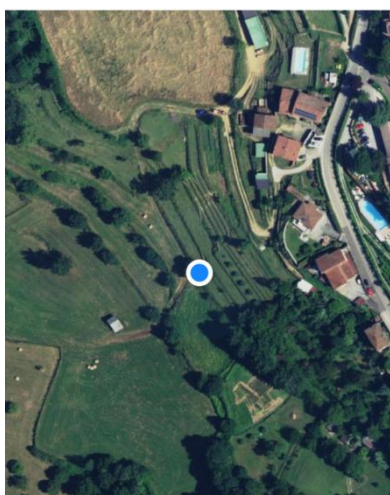
Nome progetto: Castiglione\_HV4  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 08/09/2017  
Inizio registrazione: 12:06:09  
Latitudine: 44.152196  
Longitudine: 10.410145  
Condizioni meteo: Cielo sereno/parzialmente nuvoloso – vento molto leggero  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Longitude Latitude Altitude

10.410145

44.152196

510.44 m



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

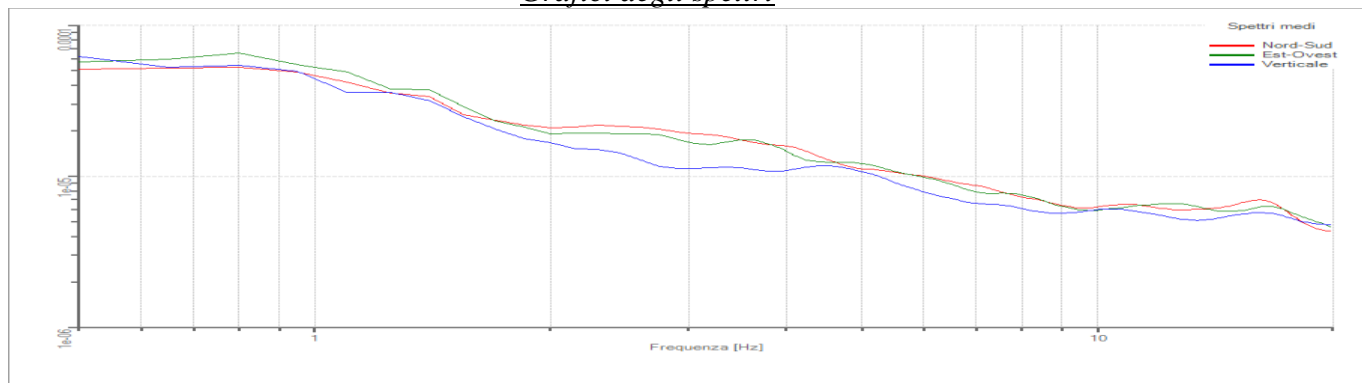
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

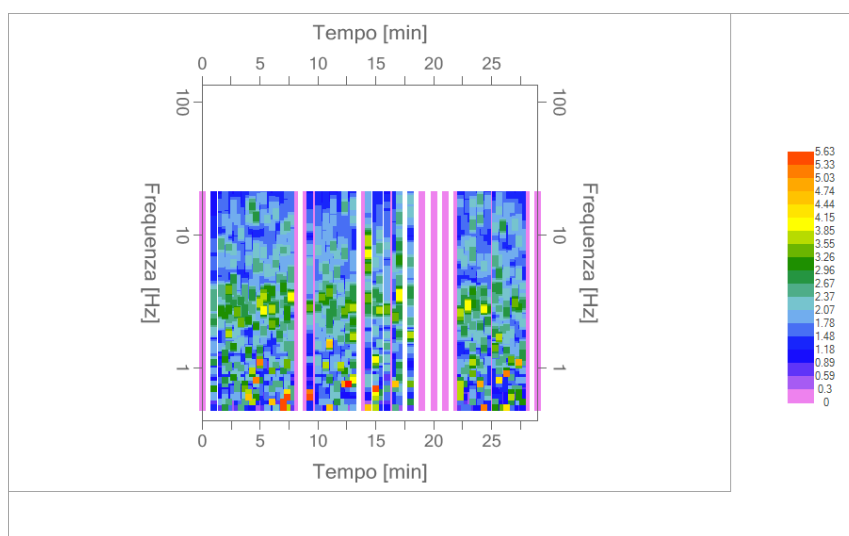
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 55  
% finestre incluse nel calcolo: 61,11% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

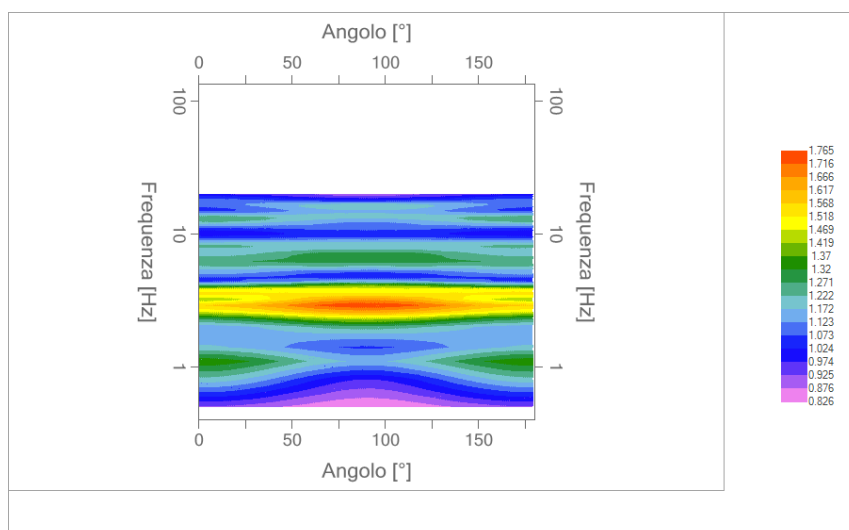
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

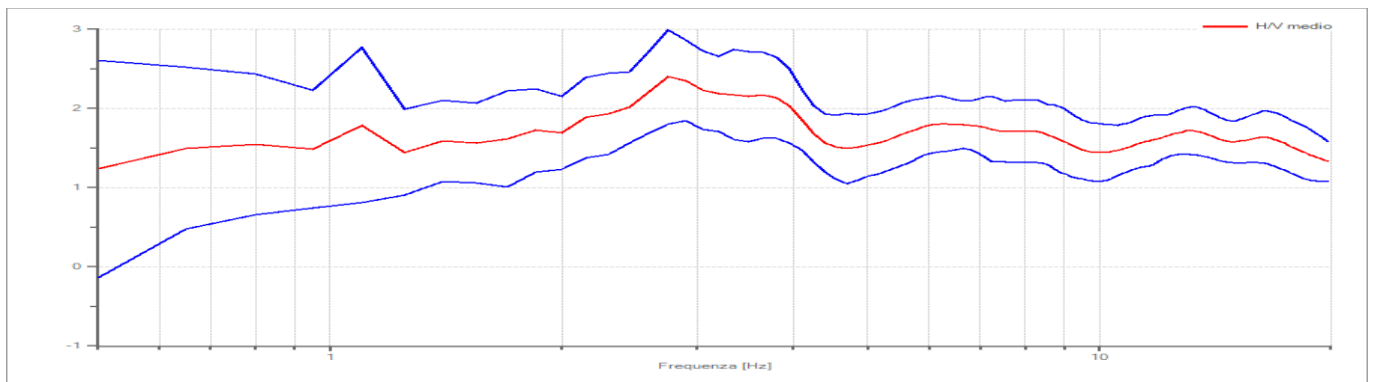
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamiento:: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 2,75 Hz  $\pm 0,25$  Hz      Ampiezza = 2,40

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteria SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

Classe	B
Tipo	/

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV5

### Dati generali

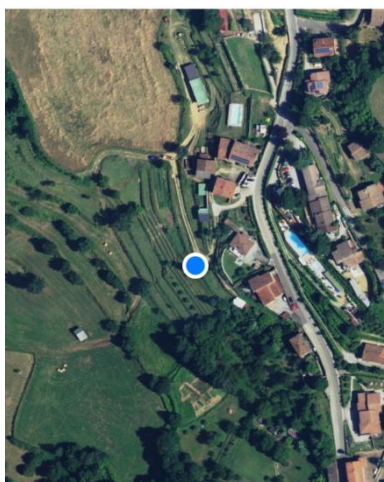
Nome progetto: Castiglione\_HV5  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 08/09/2017  
Inizio registrazione: 16:15:00  
Latitudine: 44.152350  
Longitudine: 10.410502  
Condizioni meteo: Cielo sereno/parzialmente nuvoloso – vento molto leggero  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piazzola ricavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Longitude Latitude Altitude

10°24'37.81"

44°09'08.46"

522.78 m



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

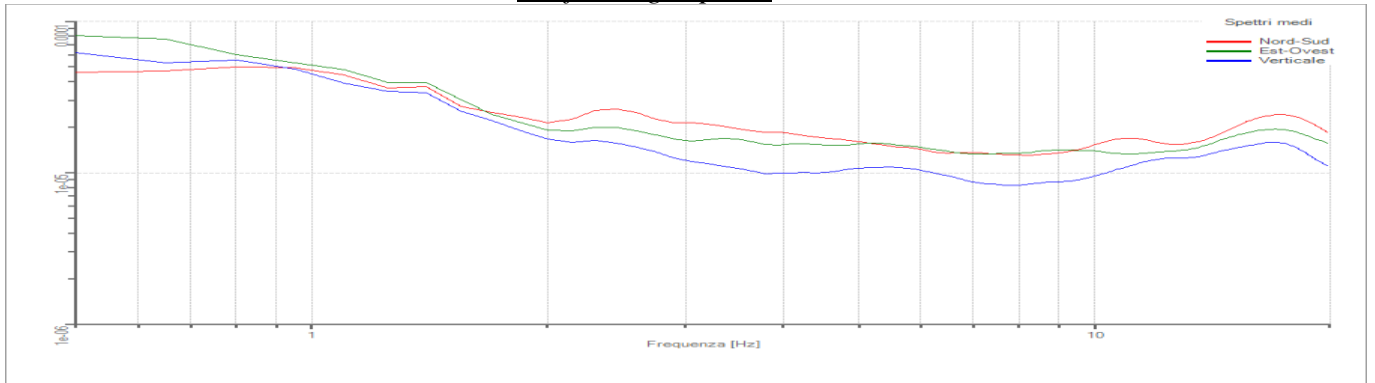
### Finestre selezionate

#### Dati riepilogativi:

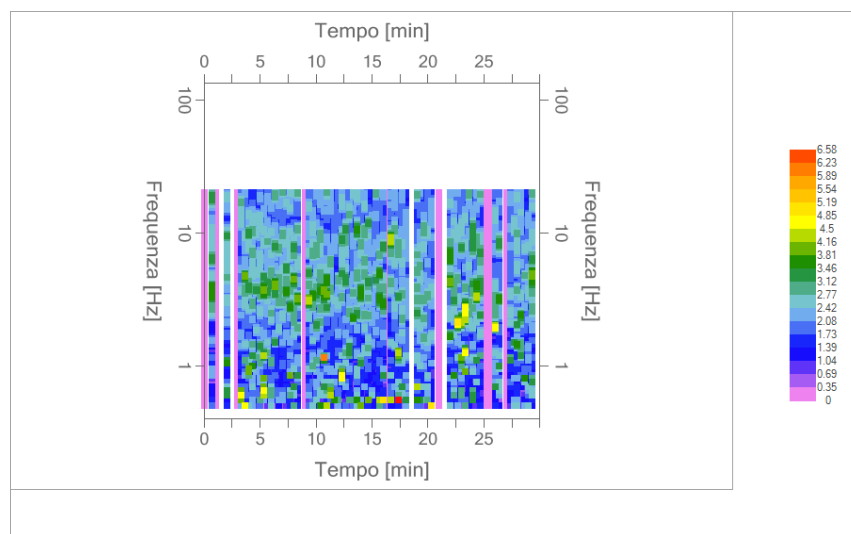
Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 70  
% finestre incluse nel calcolo: 77,77% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Padding: Eseguito



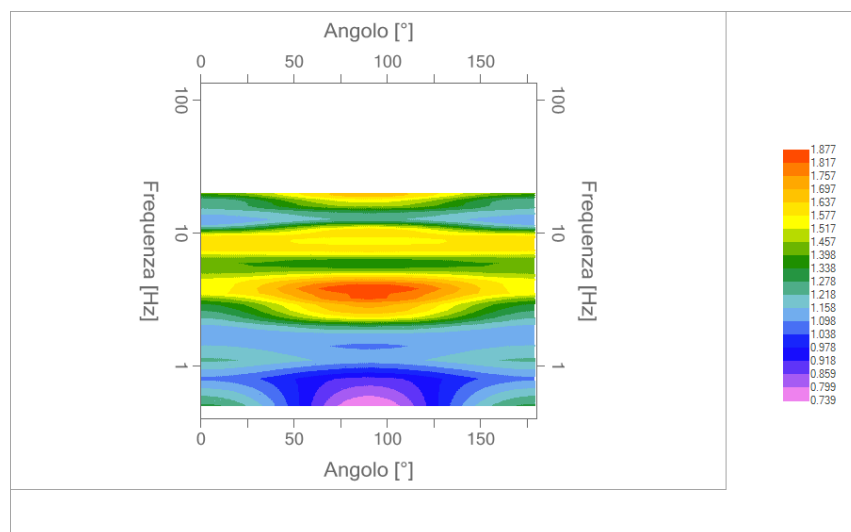
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

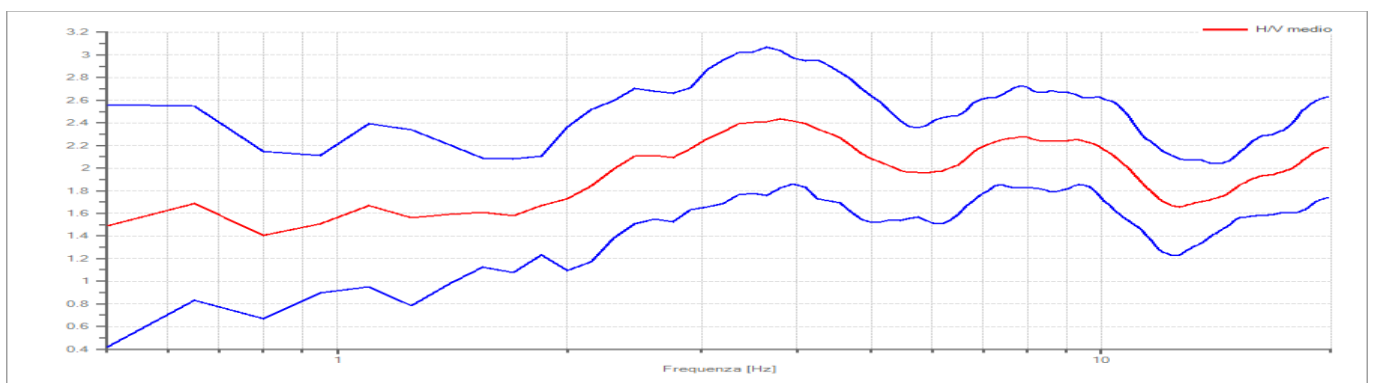
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 3,80 Hz  $\pm 0,25$  Hz      Ampiezza = 2,43

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

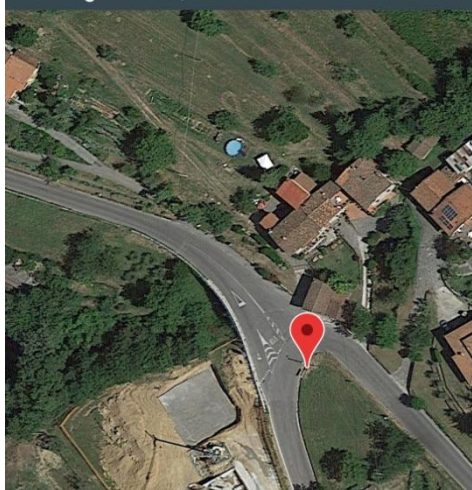
Classe	B
Tipo	/

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV6

### Dati generali

Nome progetto: Castiglione\_HV6  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 08:20:48  
Latitudine: 44.156784  
Longitudine: 10.410713  
Condizioni meteo: Sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Lat: 44.156784 Long: 10.410713  
Ss.324 Bv.Corfino, 55033 Castiglione di  
Garfagnana LU, Italia



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

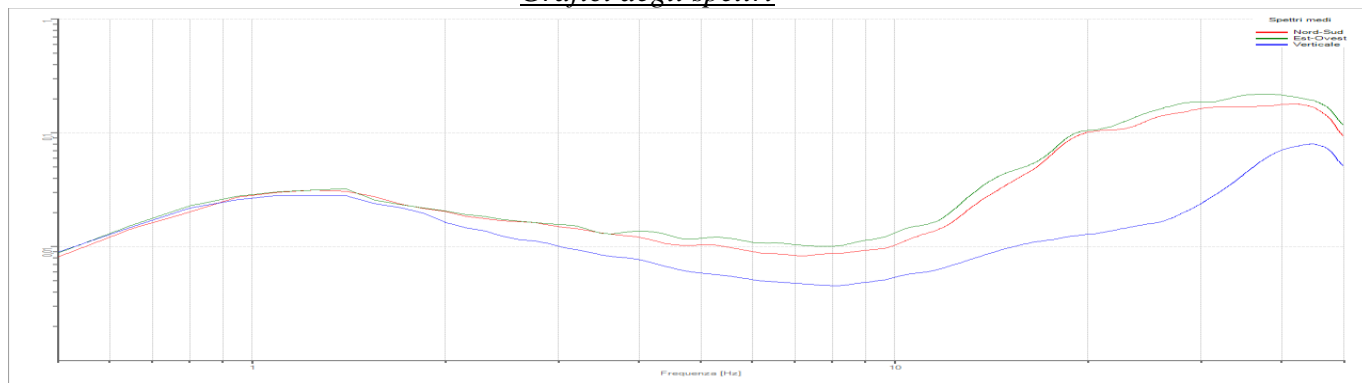
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

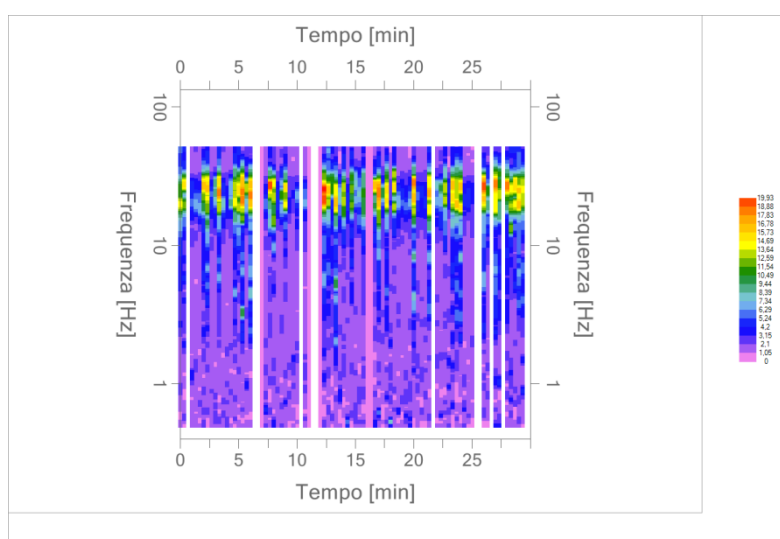
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 73  
% finestre incluse nel calcolo: 81,11% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

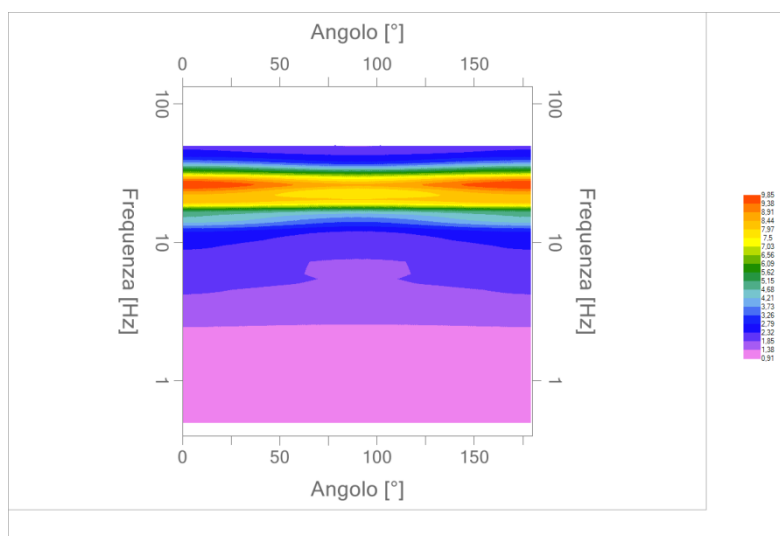
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

**Rapporto spettrale H/V**

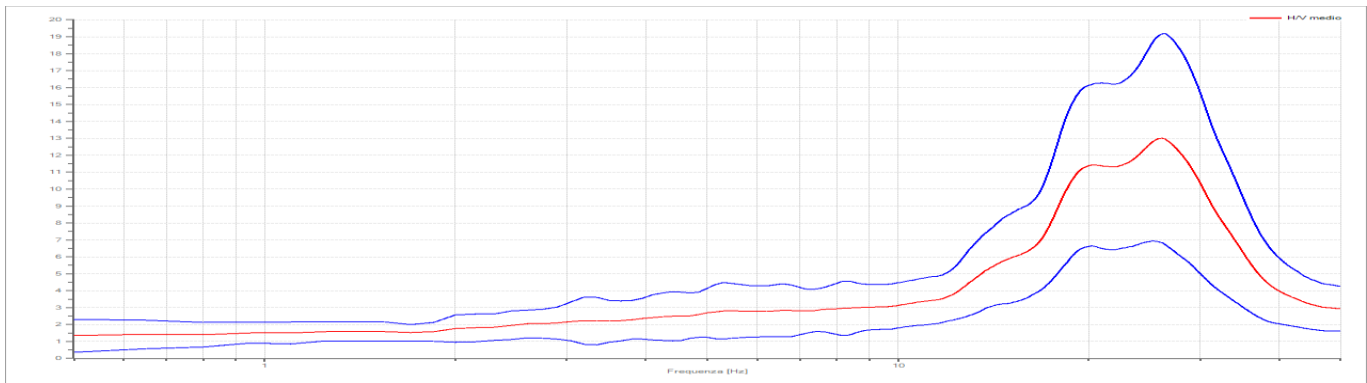
Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 50,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento:: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 26,00 Hz  $\pm$ 0,47 Hz      Ampiezza: 13,00  
(picco legato a contrasto superficiale; curva da considerare pressoché “piatta”)

Grafico rapporto spettrale H/V



**Criteri SESAME:**

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

**Classificazione della curva H/V**

<b>Classe</b>	<b>A</b>
<b>Tipo</b>	<b>1</b>



## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV7

### Dati generali

Nome progetto: Castiglione\_HV7  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 10:01:11  
Latitudine: 44.150972  
Longitudine: 10.41258  
Condizioni meteo: Sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato in corrispondenza di piccola piazzola ricavata nel terreno  
Note: Vari transienti ed artefatti

Lat: 44.150972 Long: 10.41258  
Via Santa Caterina, 38C, 55033  
Castiglione di Garfagnana LU, Italia



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

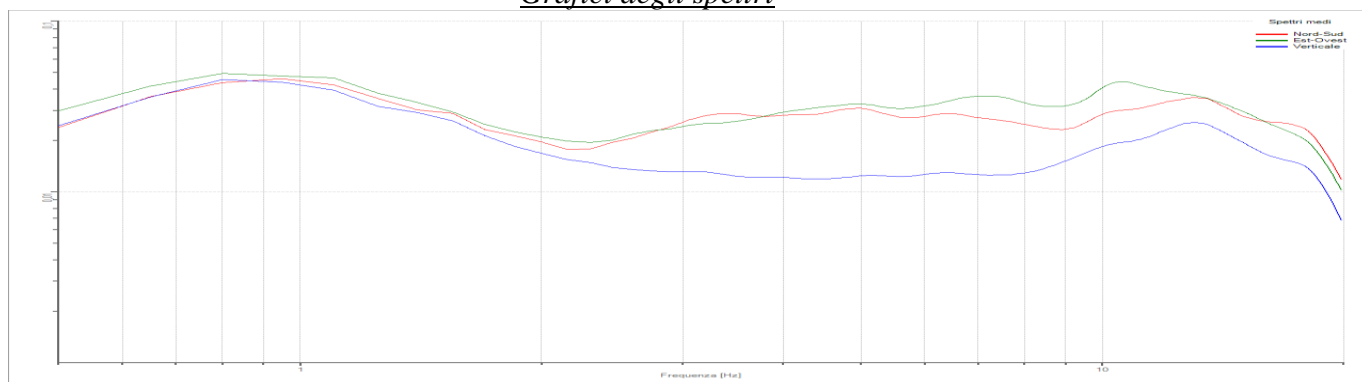
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

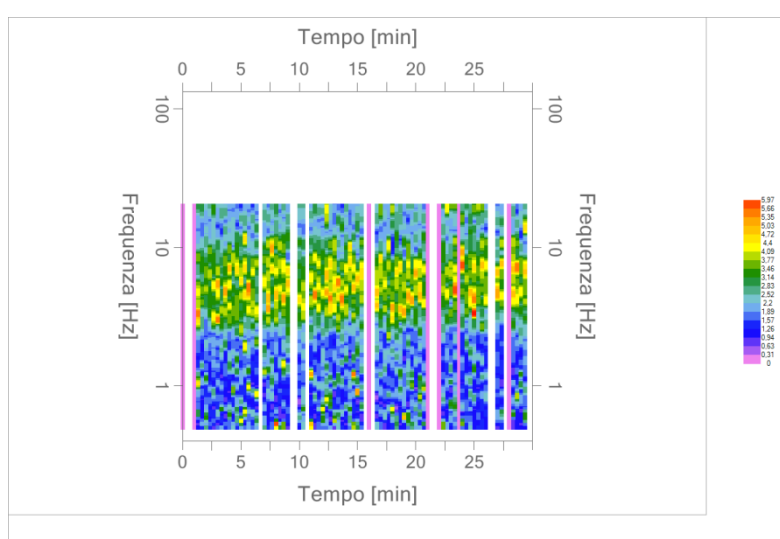
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 71  
% finestre incluse nel calcolo: 78,88% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

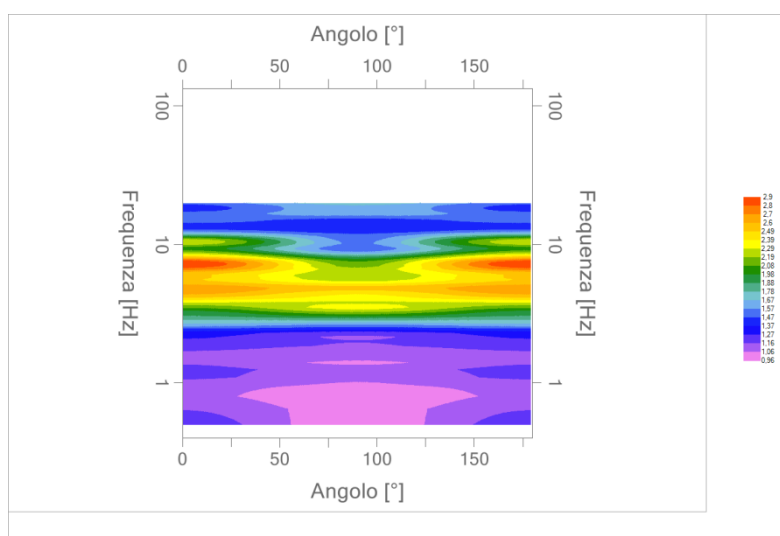
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

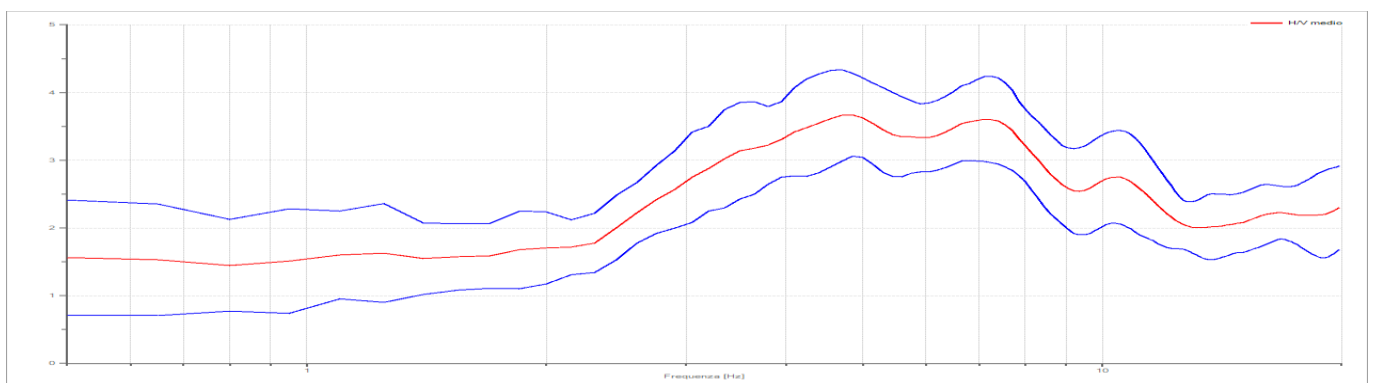
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 30,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del primo picco del rapporto H/V: 4,85 Hz  $\pm 0,17$  Hz Ampiezza: 3,67  
Frequenza del secondo picco del rapporto H/V: 7,10 Hz  $\pm 0,18$  Hz Ampiezza: 3,61

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

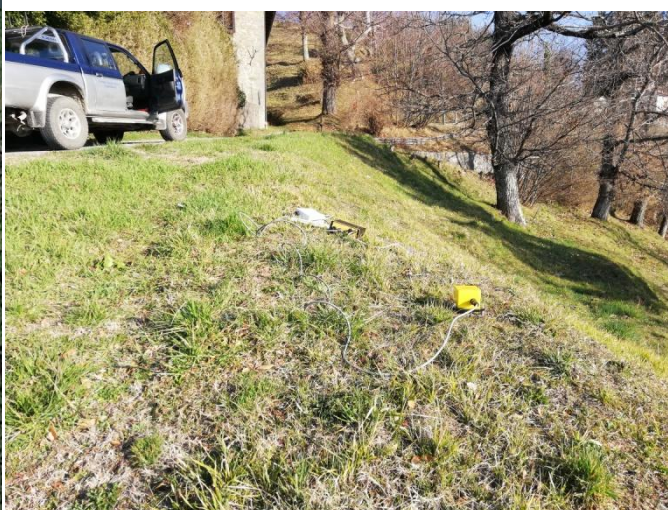
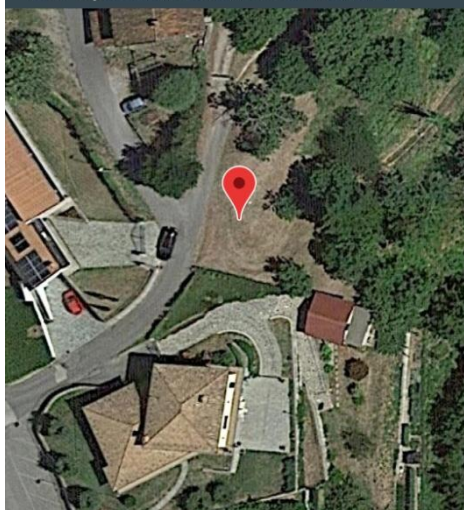
Classe	B
Tipo	1

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV8

### Dati generali

Nome progetto: Castiglione\_HV8  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 09:07:26  
Latitudine: 44.151402  
Longitudine: 10.41434  
Condizioni meteo: Sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale;  
Note: Vari transienti ed artefatti

Lat: 44.151402 Long: 10.41434  
Non è possibile ottenere un indirizzo



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

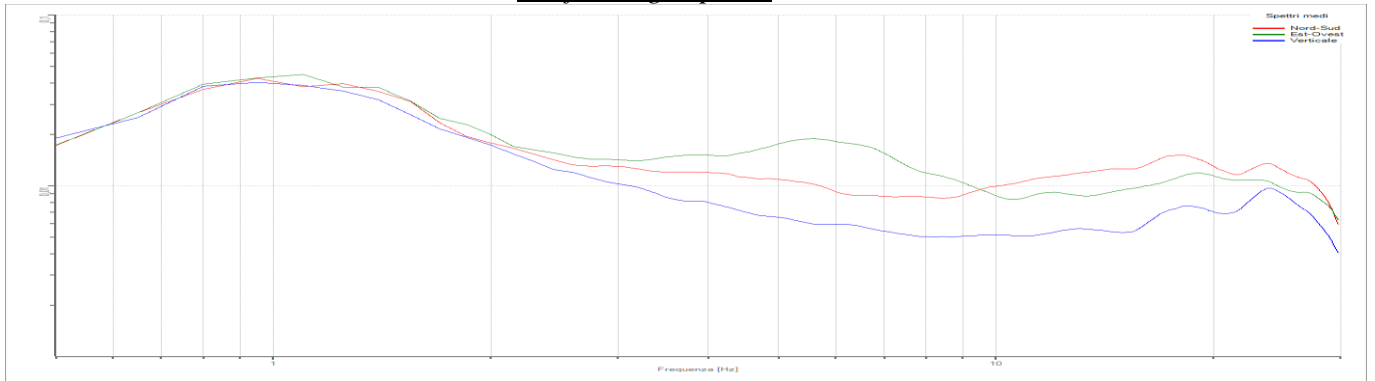
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

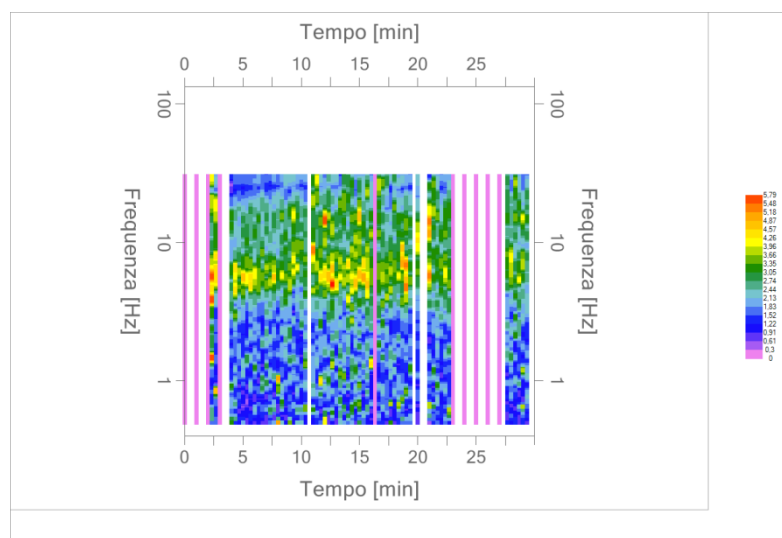
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 60  
% finestre incluse nel calcolo: 66,66% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

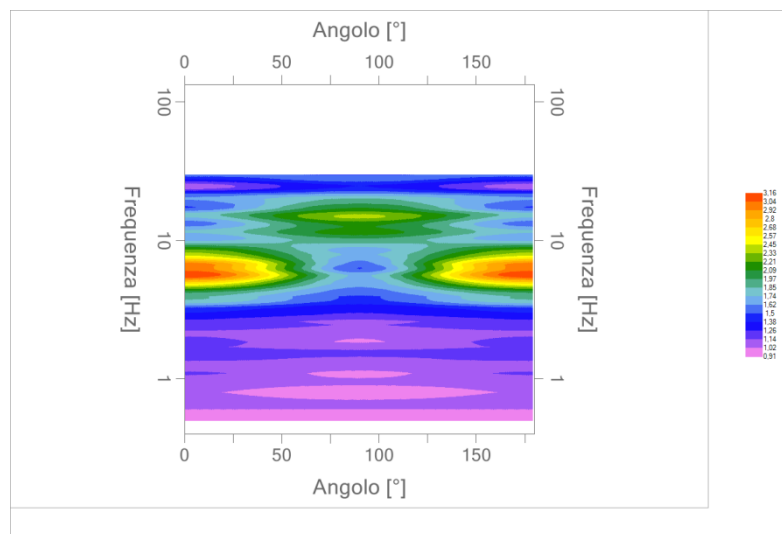
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri



# Rapporto spettrale H/V

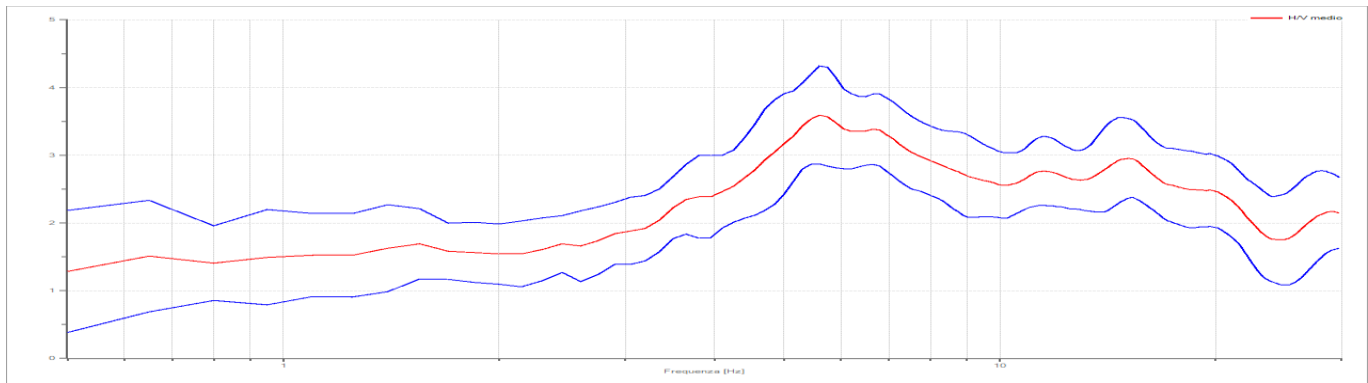
## Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 30,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

## Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5,60 Hz  $\pm 0,20$  Hz      Ampiezza: 3,59

## Grafico rapporto spettrale H/V



## Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

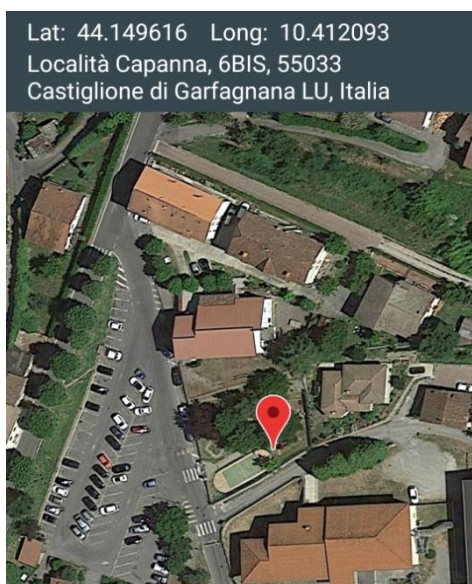
## Classificazione della curva H/V

Classe	B
Tipo	1

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV9

### Dati generali

Nome progetto: Castiglione\_HV9  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 10:50:18  
Latitudine: 44.149616  
Longitudine: 10.412093  
Condizioni meteo: Sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

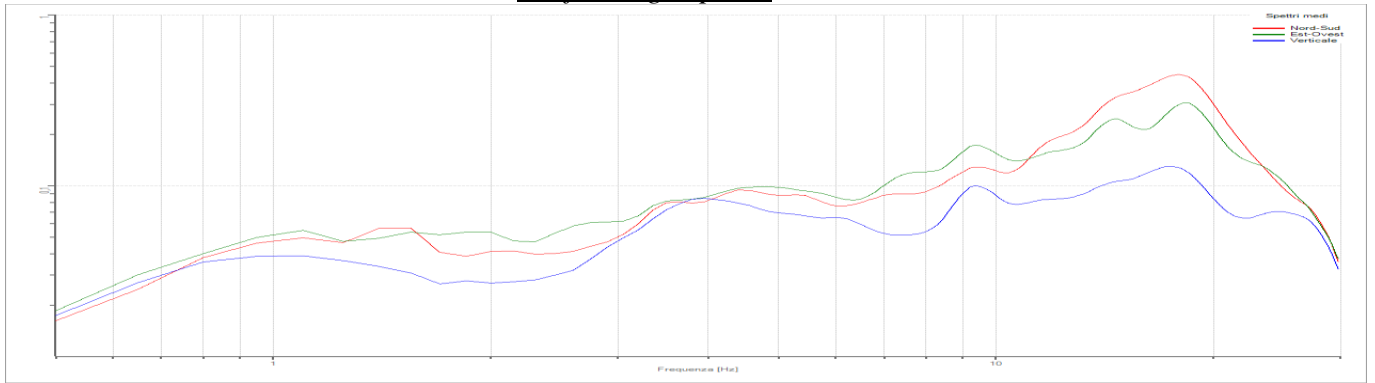
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

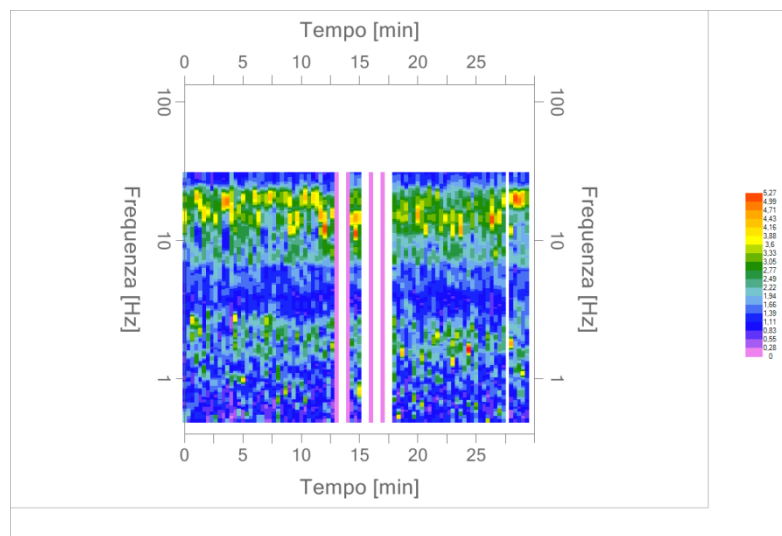
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 76  
% finestre incluse nel calcolo: 84,44% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

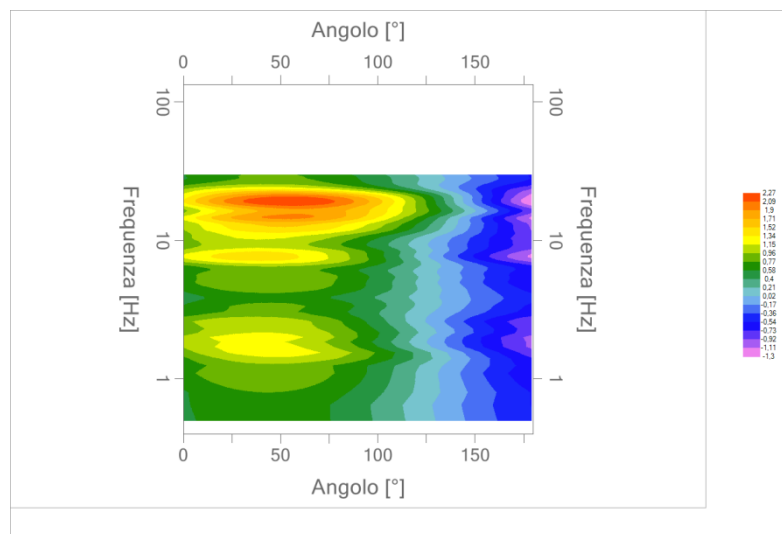
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

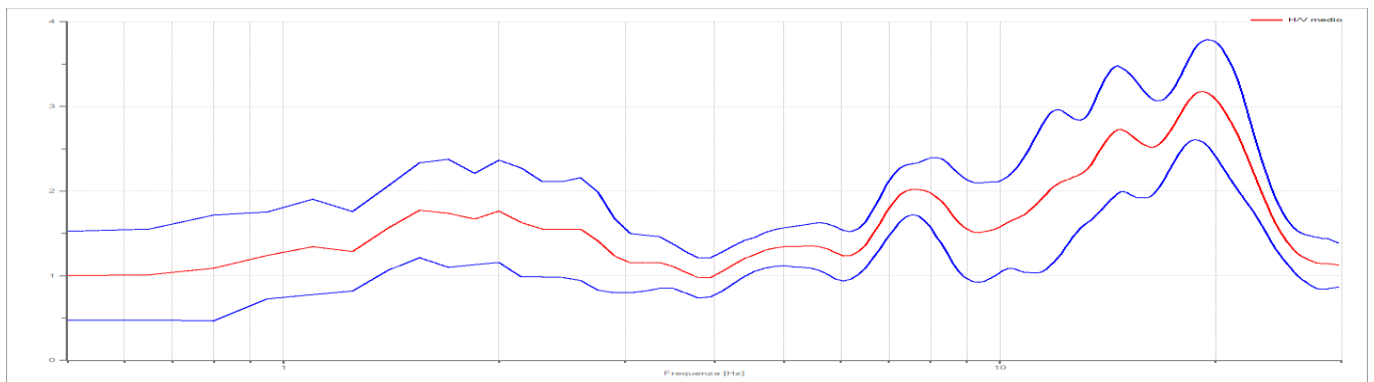
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 30,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media aritmetica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 19,10 Hz  $\pm 0,18$  Hz      Ampiezza: 3,17  
(picco legato a contrasto superficiale; curva “inficiata” dalla presenza di evidenti artefatti)

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

Classe	A
Tipo	1

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV10

### Dati generali

Nome progetto: Castiglione\_HV10  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 11:35:17  
Latitudine: 44.146702  
Longitudine: 10.410843  
Condizioni meteo: Sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

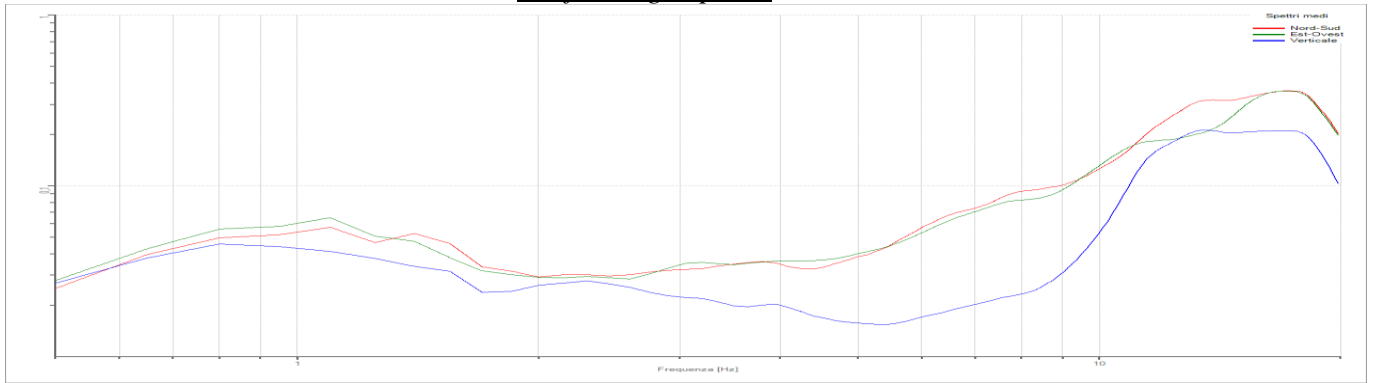
### Finestre selezionate

#### Dati riepilogativi:

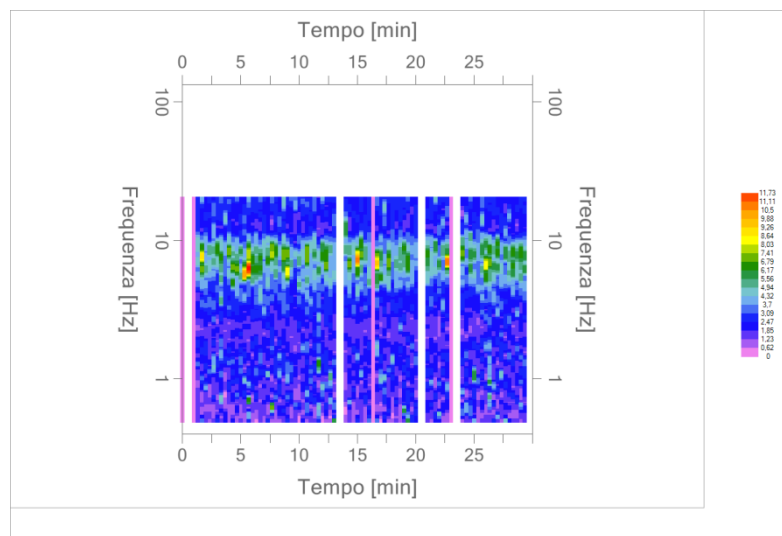
Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 77  
% finestre incluse nel calcolo: 85,55% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito



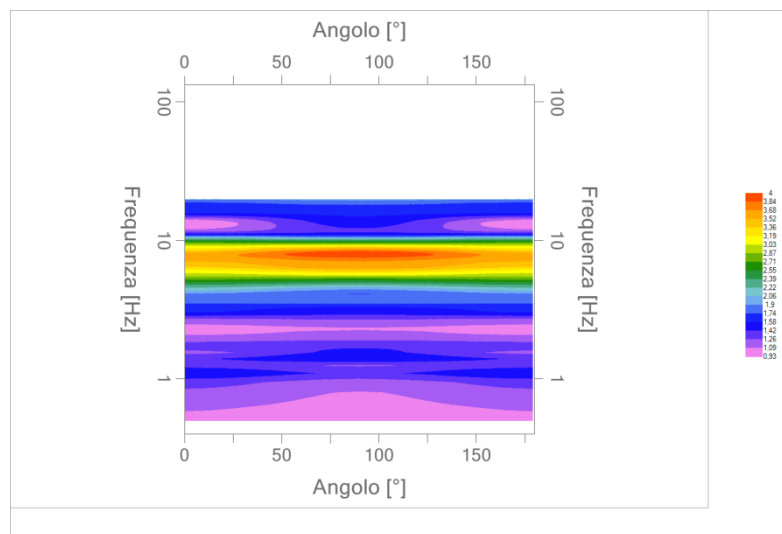
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri

**Rapporto spettrale H/V**

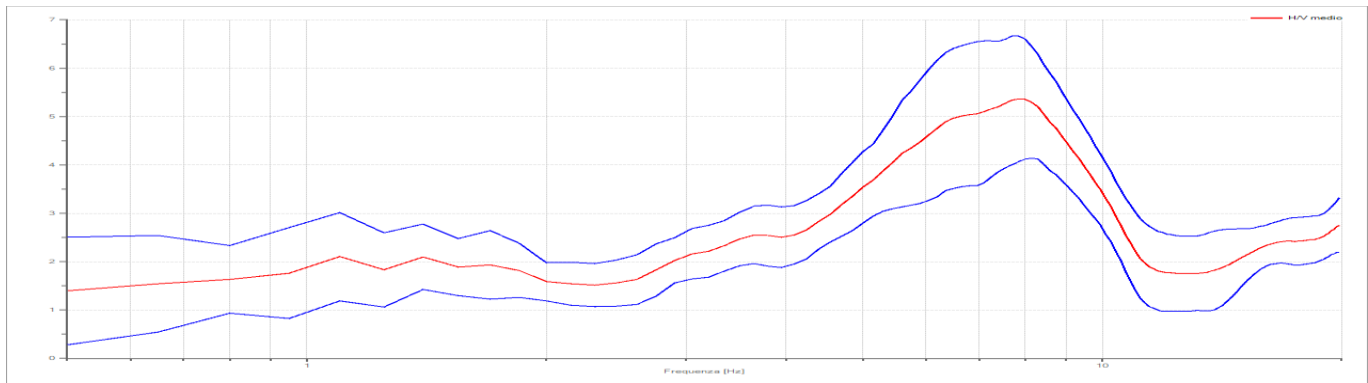
Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 7,85 Hz  $\pm$ 0,24 Hz      Ampiezza: 5,37

Grafico rapporto spettrale H/V



**Criteri SESAME:**

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

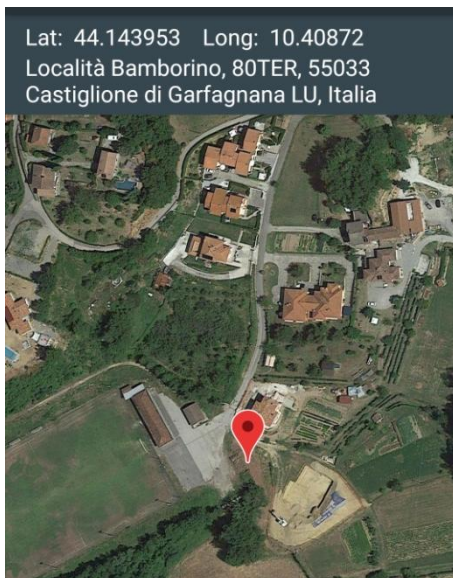
**Classificazione della curva H/V**

<b>Classe</b>	<b>A</b>
<b>Tipo</b>	<b>1</b>

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV11

### Dati generali

Nome progetto: Castiglione\_HV11  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 15:18:36  
Latitudine: 44.143953  
Longitudine: 10.408720  
Condizioni meteo: Sereno – vento leggero  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

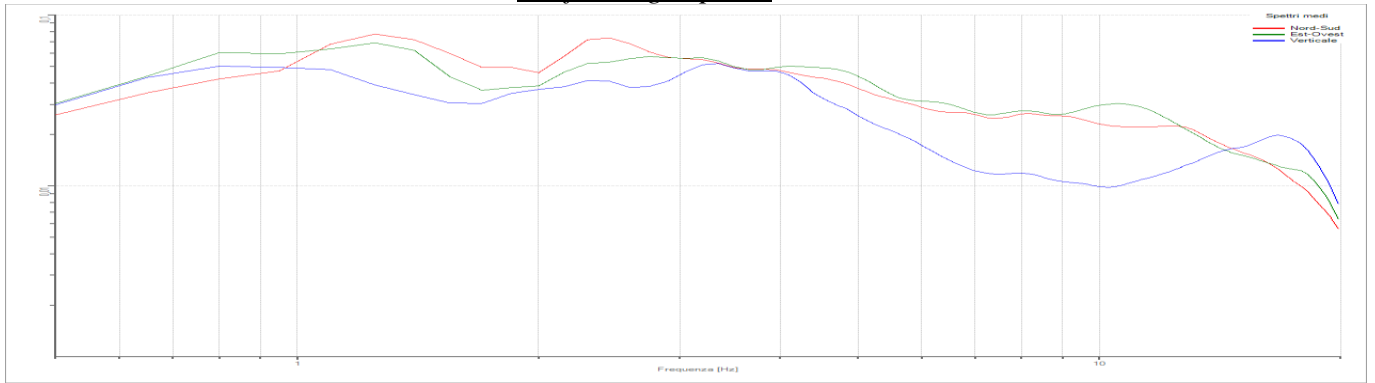
Numero tracce:	3
Durata registrazione:	1800 s
Frequenza di campionamento:	200,00 Hz
Numero campioni:	360000
Direzioni tracce:	Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

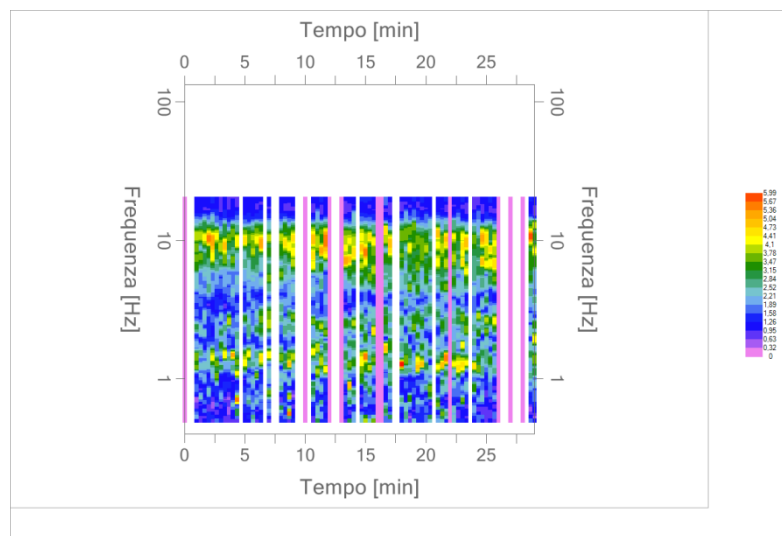
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre:	90
Numero finestre incluse nel calcolo:	57
% finestre incluse nel calcolo:	63,33% (selezione manuale)
Dimensione temporale finestre:	20,000 s
Tipo di lisciamento:	Triangolare proporzionale
Percentuale di lisciamento:	10,00 %
Padding:	Eseguito

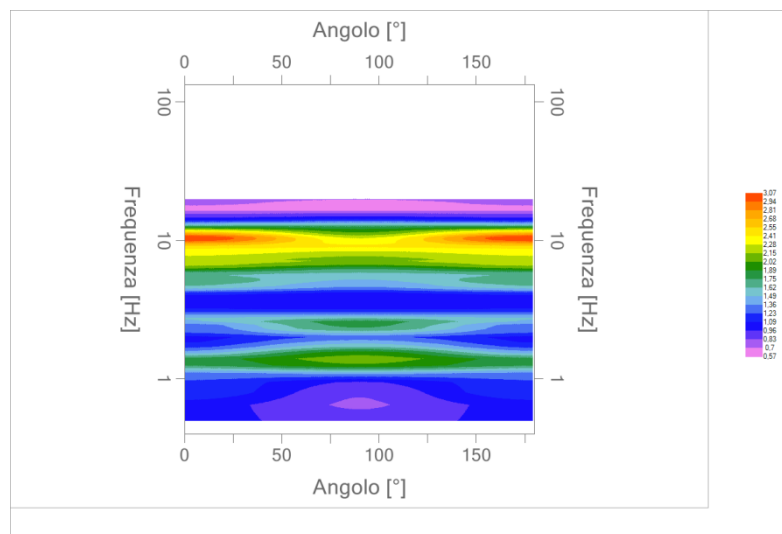
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

### Rapporto spettrale H/V

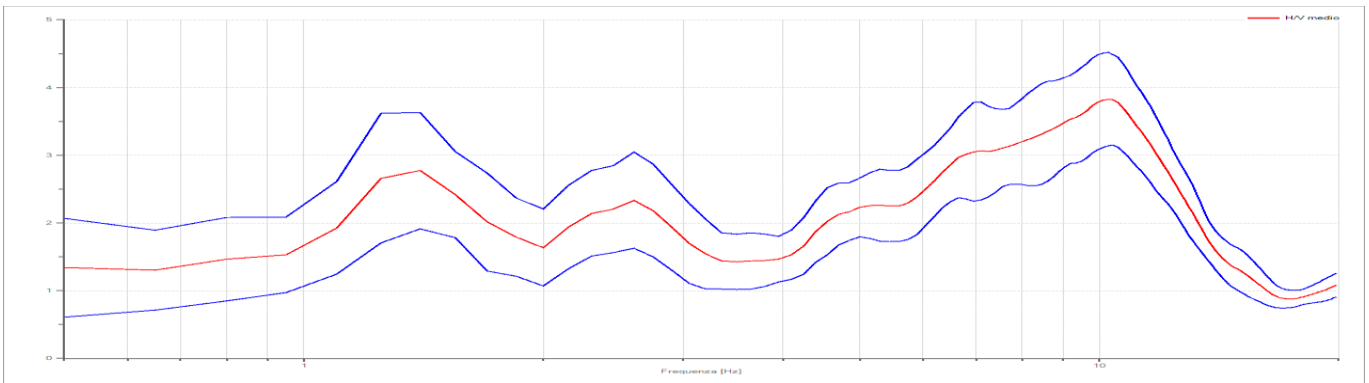
Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 10,25 Hz  $\pm 0,18$  Hz      Ampiezza: 3,83

Grafico rapporto spettrale H/V



**Criteri SESAME:**

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

**Classificazione della curva H/V**

<b>Classe</b>	<b>A</b>
<b>Tipo</b>	<b>1</b>



## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV12

### Dati generali

Nome progetto: Castiglione\_HV12  
Località: Castiglione di Garfagnana capoluogo  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 12:32:52  
Latitudine: 44.146614  
Longitudine: 10.409005  
Condizioni meteo: Sereno – vento leggero  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

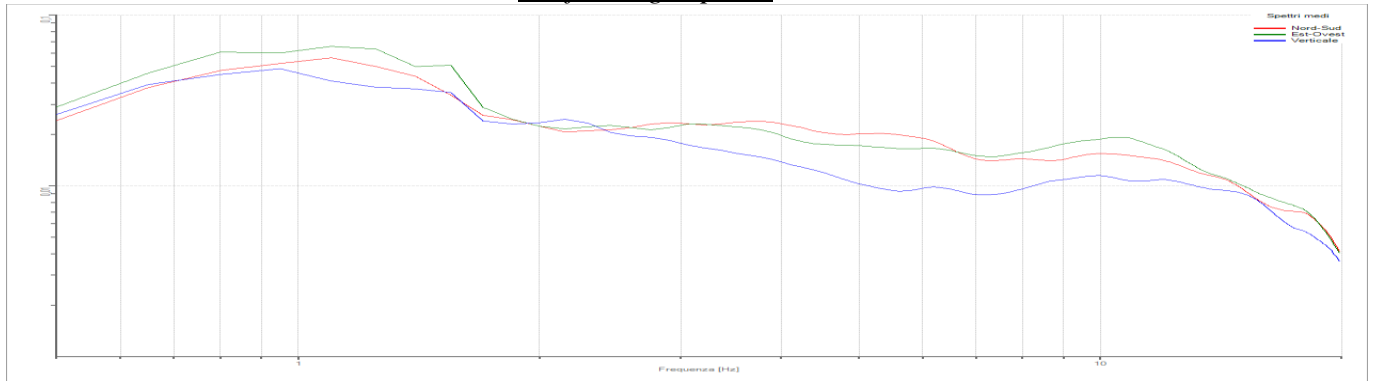
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

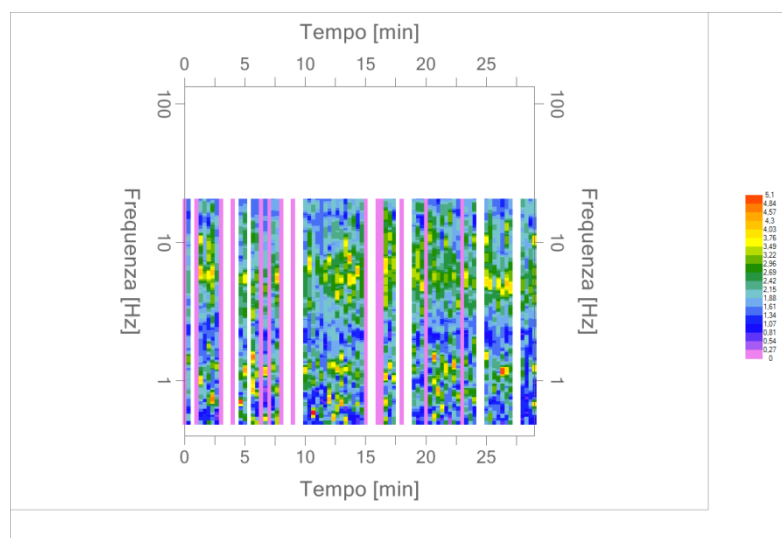
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 58  
% finestre incluse nel calcolo: 64,44% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

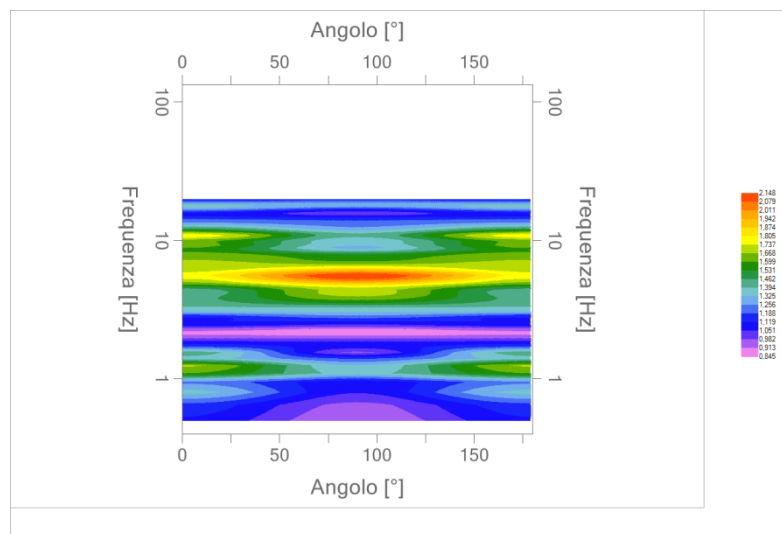
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

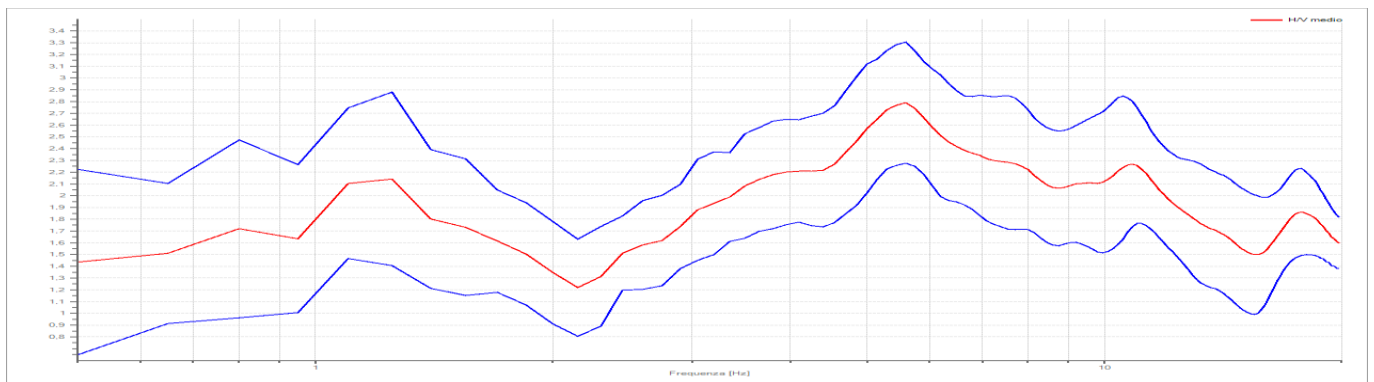
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5,60 Hz  $\pm 0,18$  Hz      Ampiezza: 2,79

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0,5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0,5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

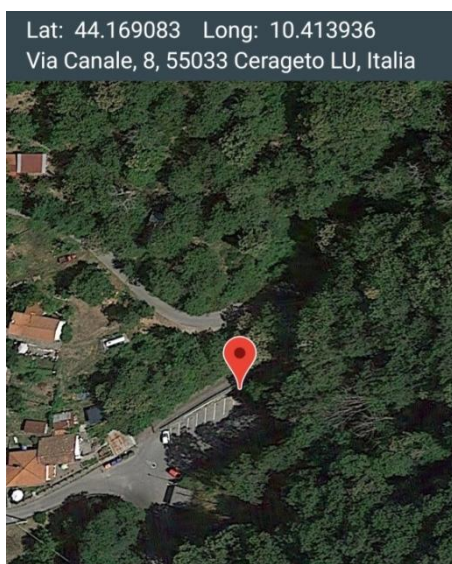
### Classificazione della curva H/V

Classe	B
Tipo	1

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV13

### Dati generali

Nome progetto: Cerageto\_HV13  
Località: Cerageto  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 11/01/2019  
Inizio registrazione: 11:25:04  
Latitudine: 44.169083  
Longitudine: 10.413936  
Condizioni meteo: Sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato in corrispondenza di piccola piazzola ricavata nel terreno  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

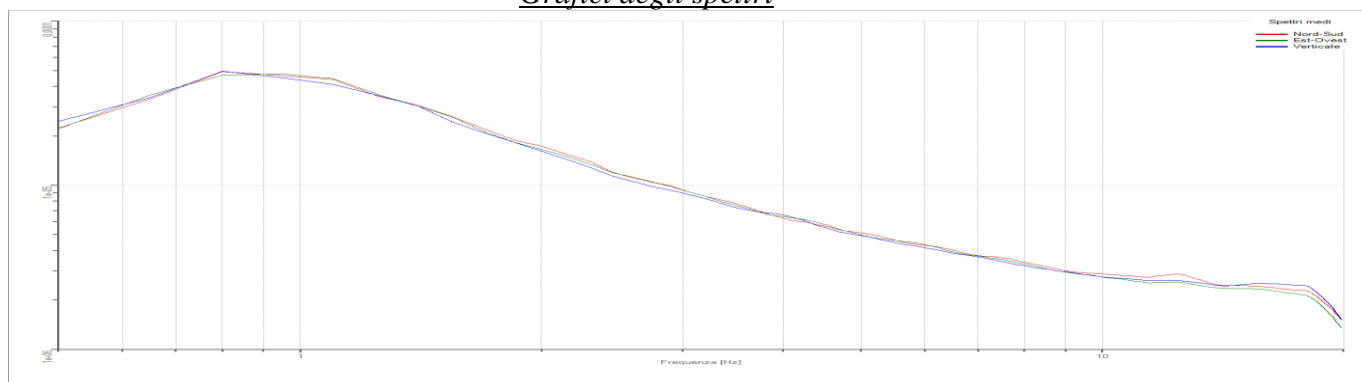
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

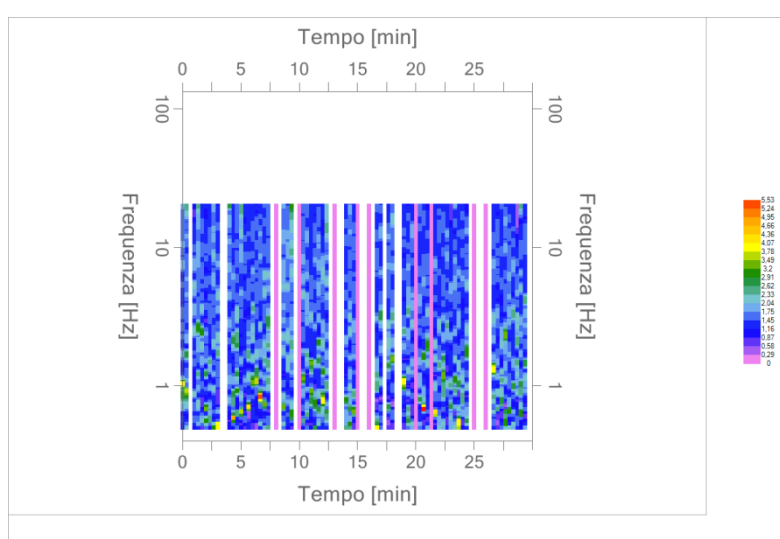
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 63  
% finestre incluse nel calcolo: 70,00% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

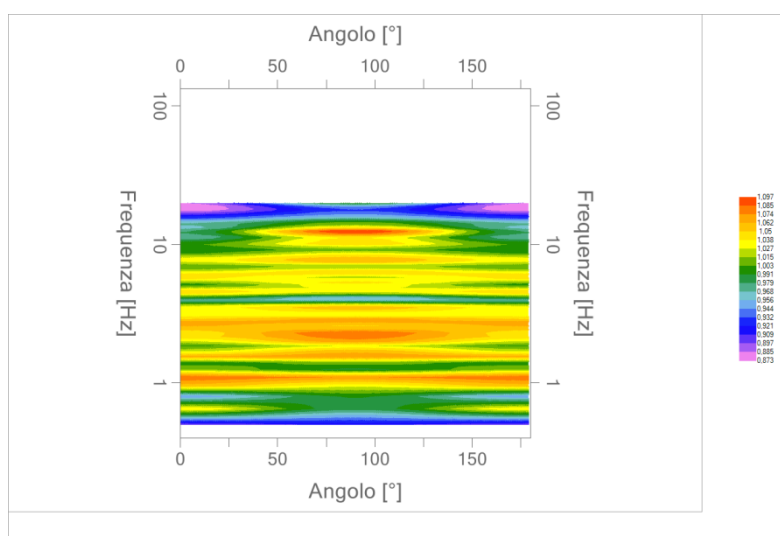
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri



## Rapporto spettrale H/V

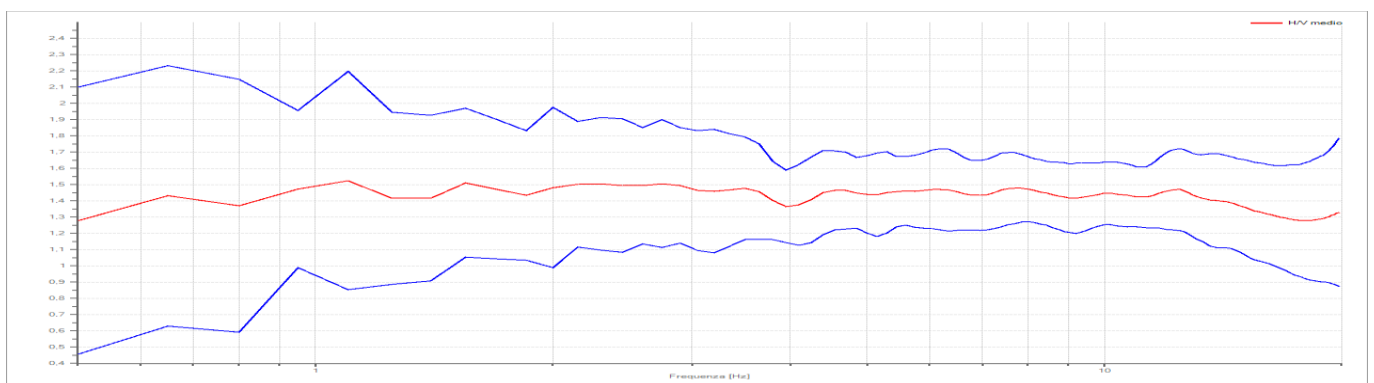
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 1,10 Hz  $\pm 0,44$  Hz      Ampiezza: 1,53  
(assenza di picchi significativi; curva da considerare “piatta”)

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Non superato
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

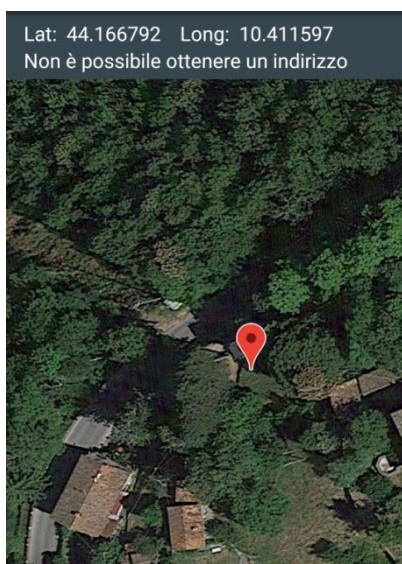
### Classificazione della curva H/V

Classe	A
Tipo	2

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV14

### Dati generali

Nome progetto: Cerageto\_HV14  
Località: Cerageto  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 10:30:59  
Latitudine: 44.166792  
Longitudine: 10.411597  
Condizioni meteo: Sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

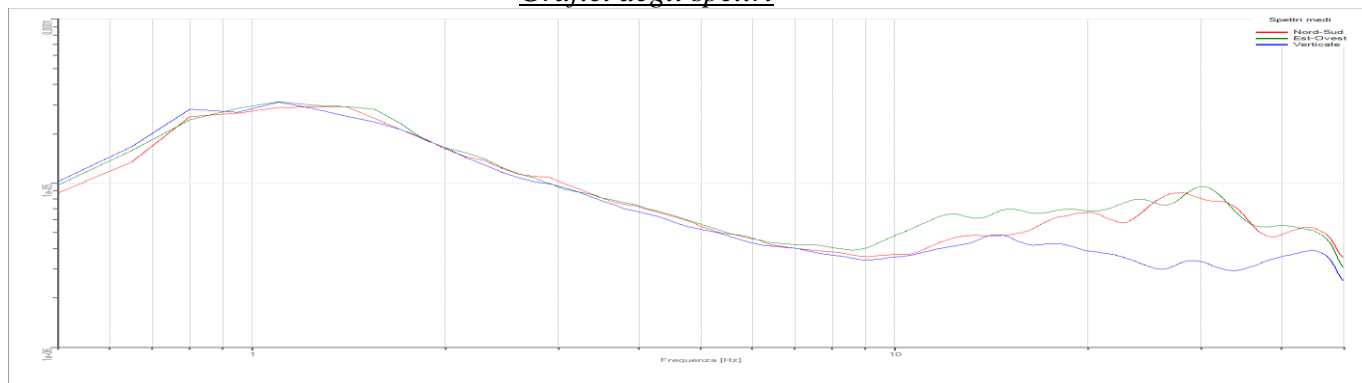
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

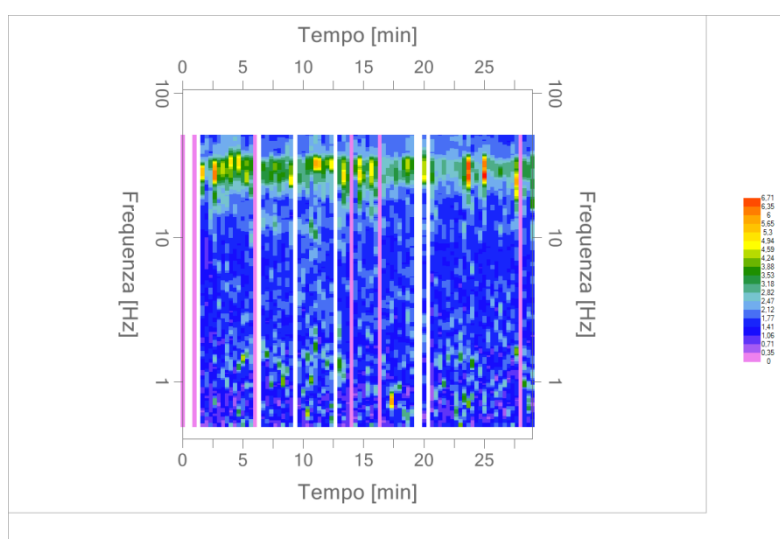
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 73  
% finestre incluse nel calcolo: 81,11% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di liscio: Triangolare proporzionale  
Percentuale di liscio: 10,00 %  
Padding: Eseguito

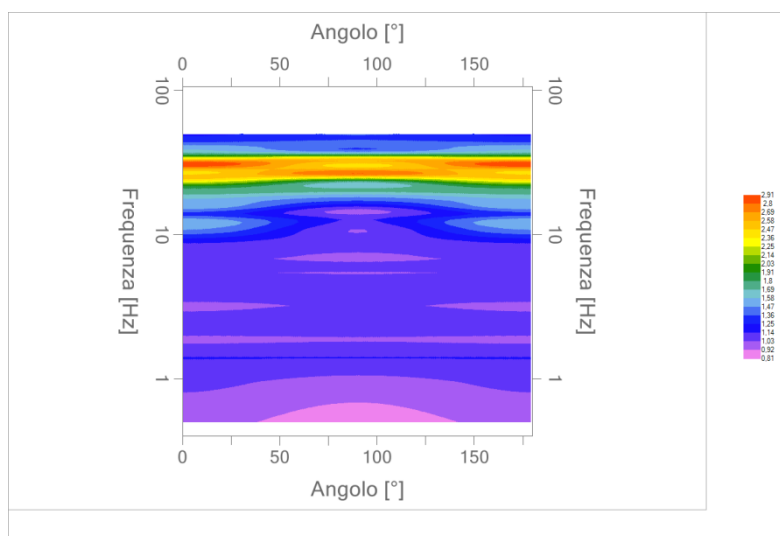
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

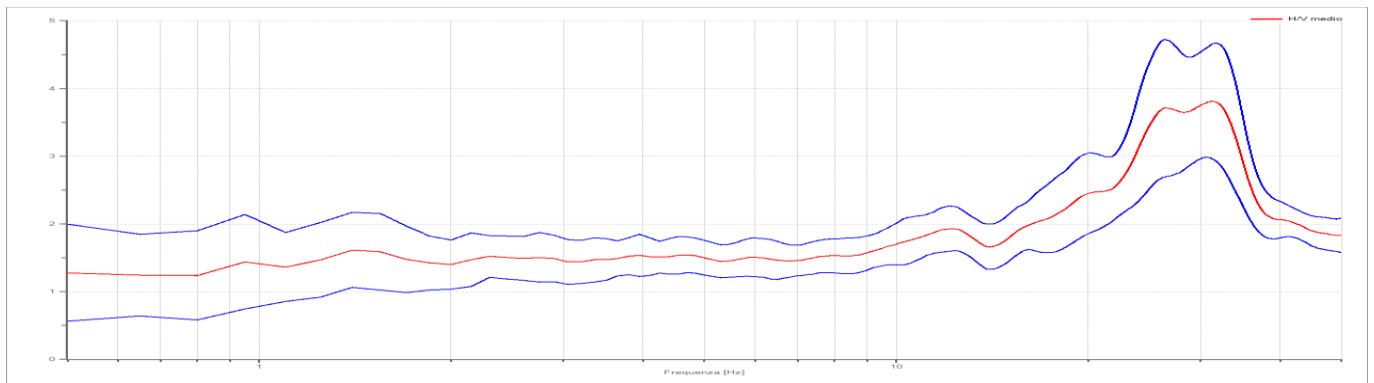
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 50,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamo: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamo: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del primo picco del rapporto H/V: 31,25 Hz  $\pm 0,22$  Hz Ampiezza: 3,81  
Frequenza del secondo picco del rapporto H/V: 26,60 Hz  $\pm 0,25$  Hz Ampiezza: 3,71  
(picchi legati a contrasti molto superficiali; curva da considerare pressoché “piatta”)

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

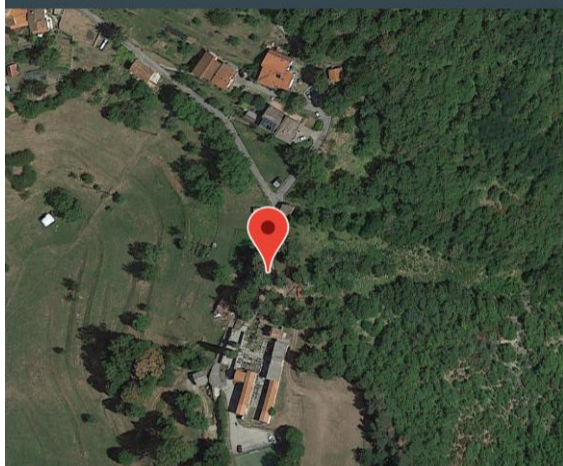
Classe	A
Tipo	1

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV15

### Dati generali

Nome progetto: Cerageto\_HV15  
Località: Cerageto  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 27/02/2019  
Inizio registrazione: 12:09:58  
Latitudine: 44.165726  
Longitudine: 10.414878  
Condizioni meteo: Sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Lat: 44.165726 Long: 10.414878  
Località Carraia Cerageto, 16, 55033  
Cerageto LU, Italia



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

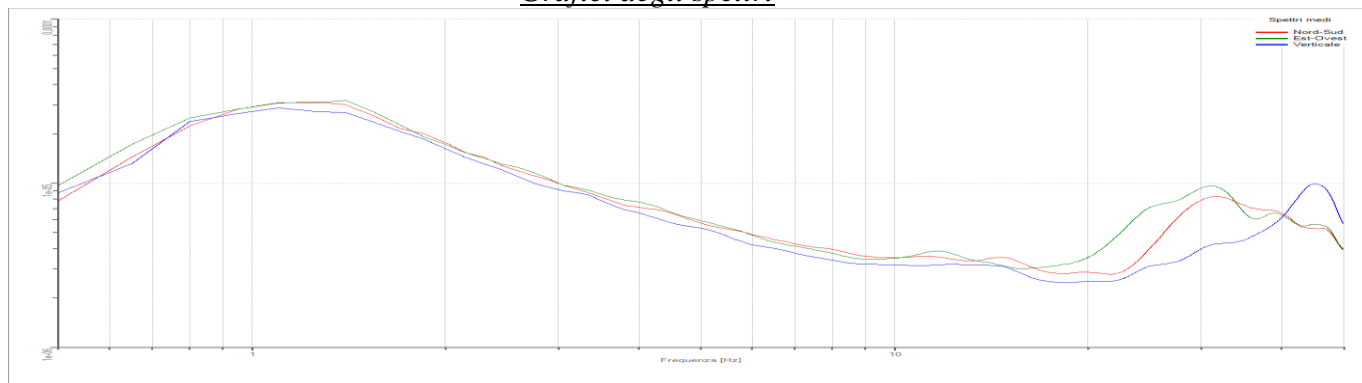
### Finestre selezionate

#### Dati riepilogativi:

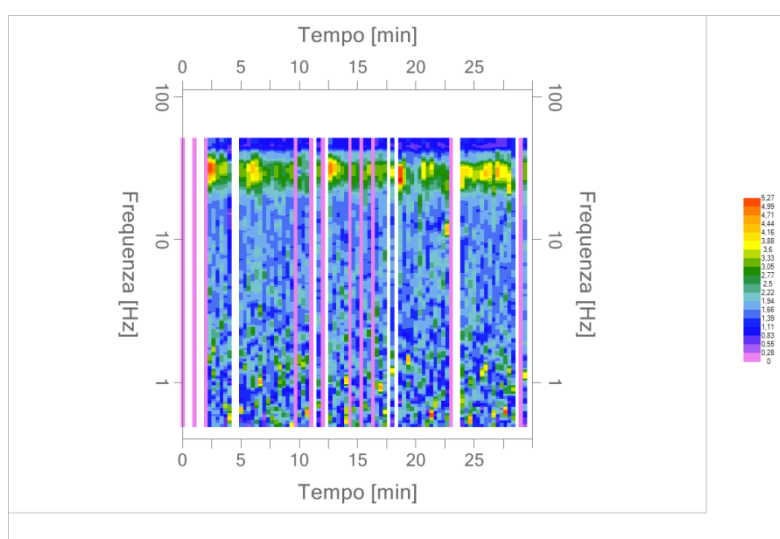
Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 68  
% finestre incluse nel calcolo: 75,55% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito



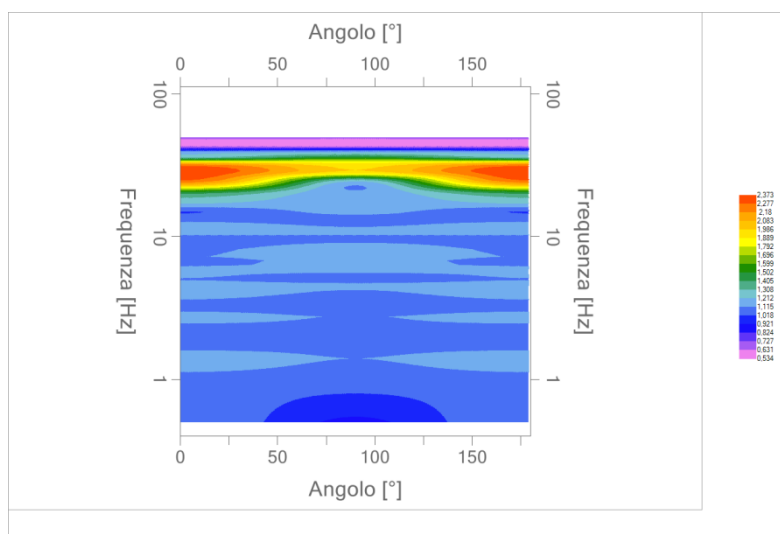
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri

### Rapporto spettrale H/V

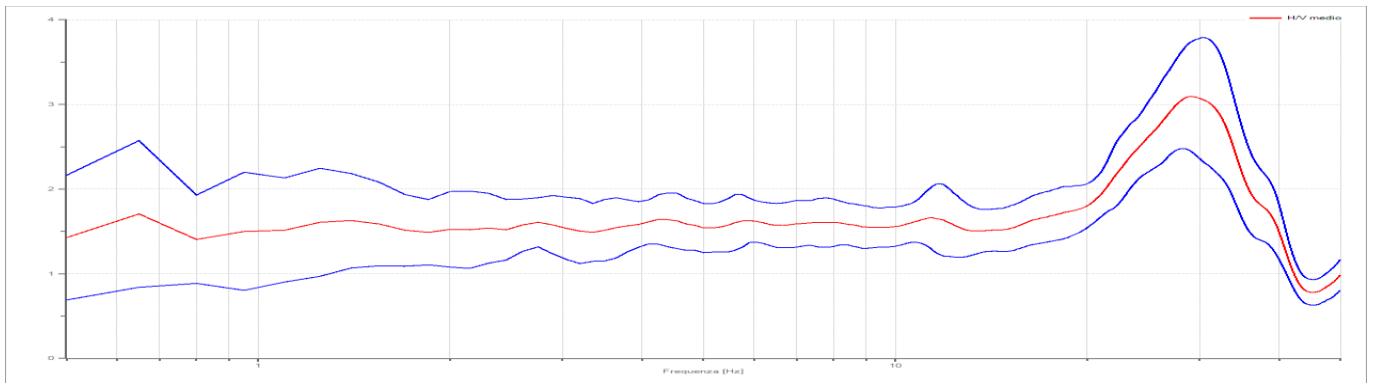
Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 50,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 29,0 Hz  $\pm 0,21$  Hz      Ampiezza: 3,09  
(picco legato a contrasto molto superficiale; curva da considerare pressoché “piatta”)

Grafico rapporto spettrale H/V



**Criteri SESAME:**

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

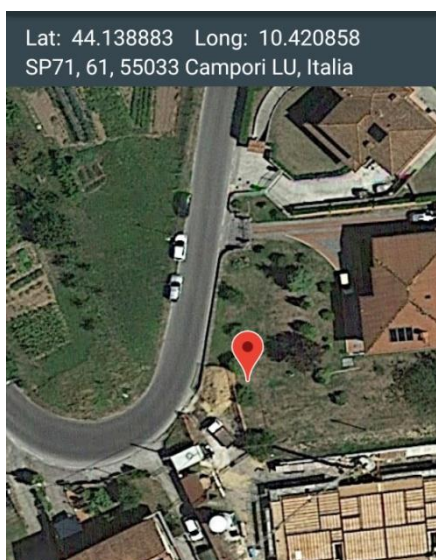
**Classificazione della curva H/V**

<b>Classe</b>	<b>A</b>
<b>Tipo</b>	<b>1</b>

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV16

### Dati generali

Nome progetto: Campori\_HV16  
Località: Campori  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 09/01/2019  
Inizio registrazione: 14:57:44  
Latitudine: 44.138883  
Longitudine: 10.420858  
Condizioni meteo: Coperto – vento moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

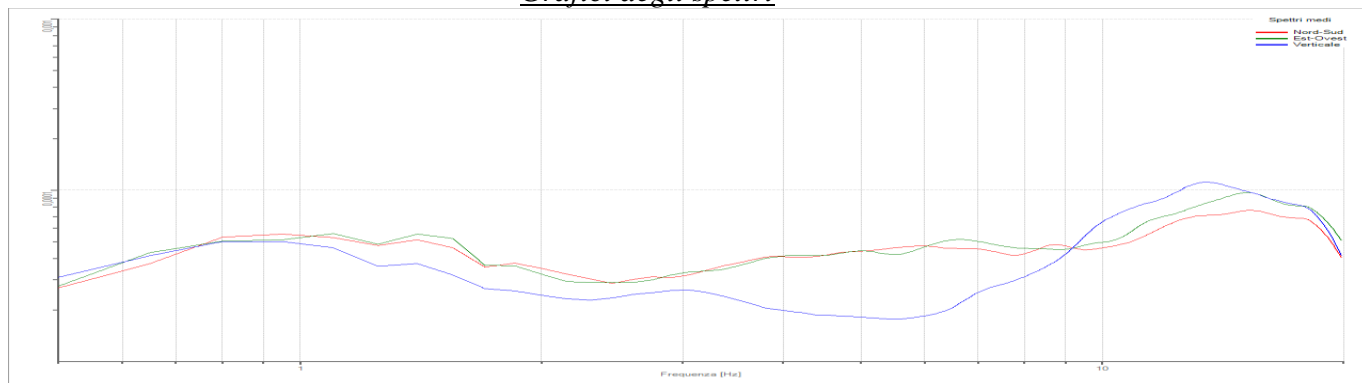
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

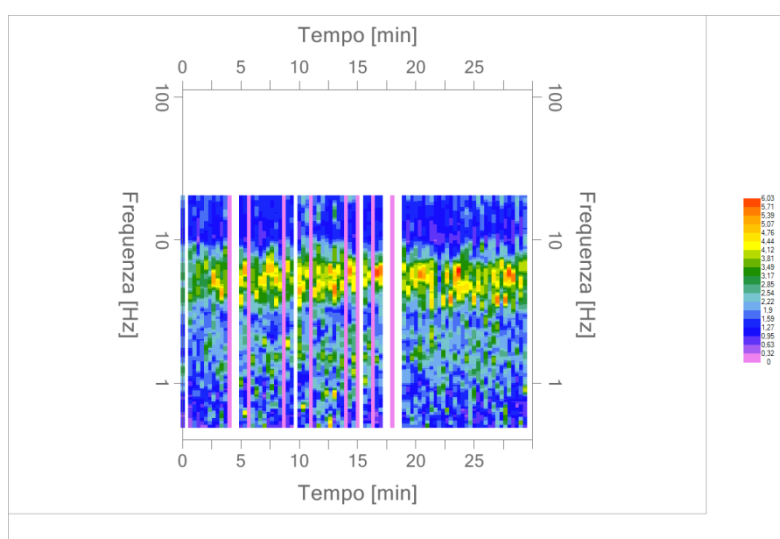
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 75  
% finestre incluse nel calcolo: 83,33% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

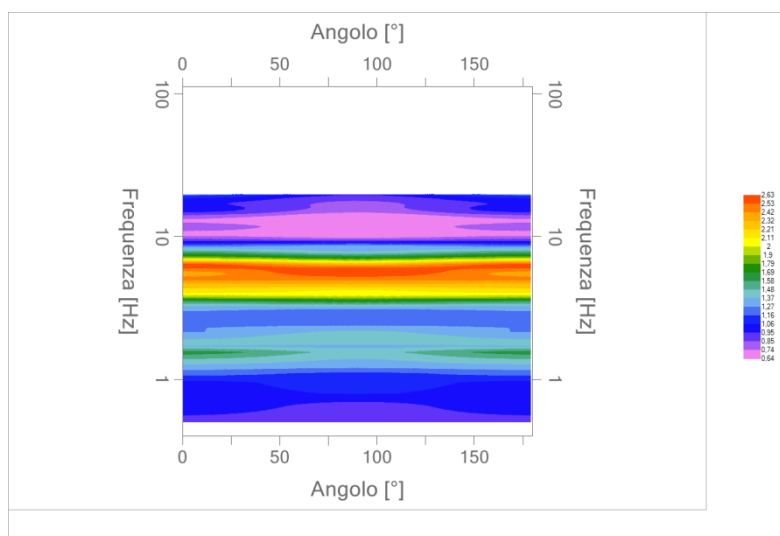
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri

**Rapporto spettrale H/V**

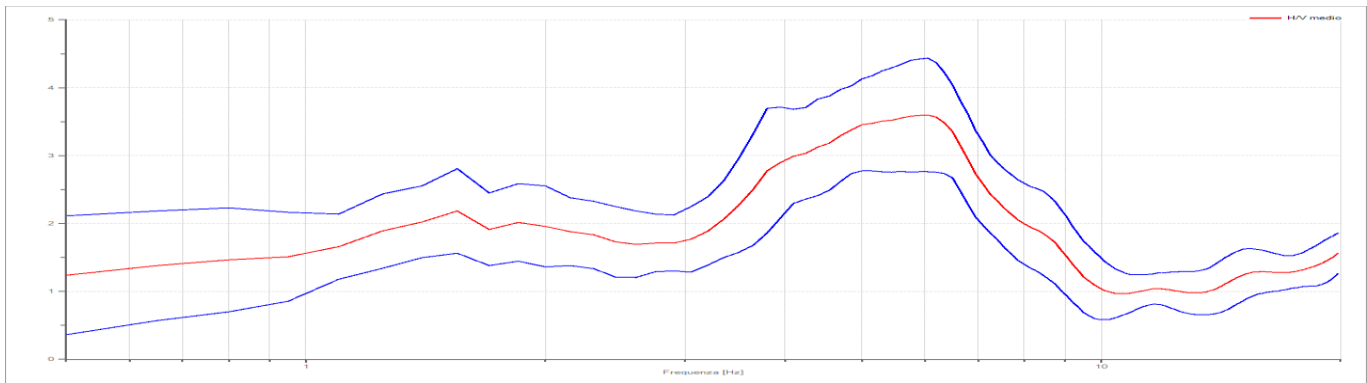
Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 6,05 Hz  $\pm$ 0,23 Hz      Ampiezza: 3,60

Grafico rapporto spettrale H/V



**Criteri SESAME:**

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

**Classificazione della curva H/V**

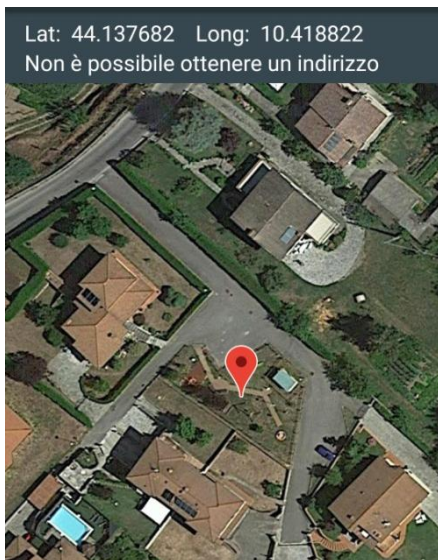
Classe	A
Tipo	1



## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV17

### Dati generali

Nome progetto: Campori\_HV17  
Località: Campori  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 09/01/2019  
Inizio registrazione: 15:48:05  
Latitudine: 44.137682  
Longitudine: 10.418822  
Condizioni meteo: Sereno – vento moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

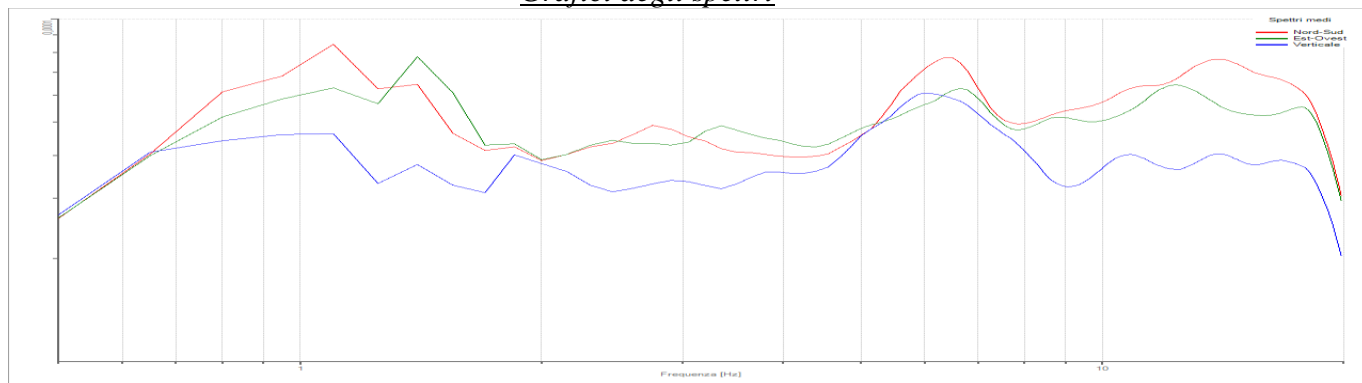
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

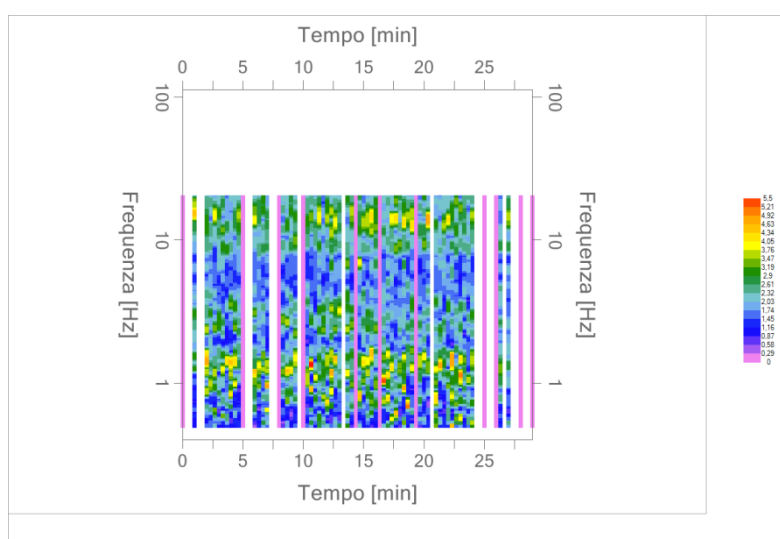
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 59  
% finestre incluse nel calcolo: 65,55% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

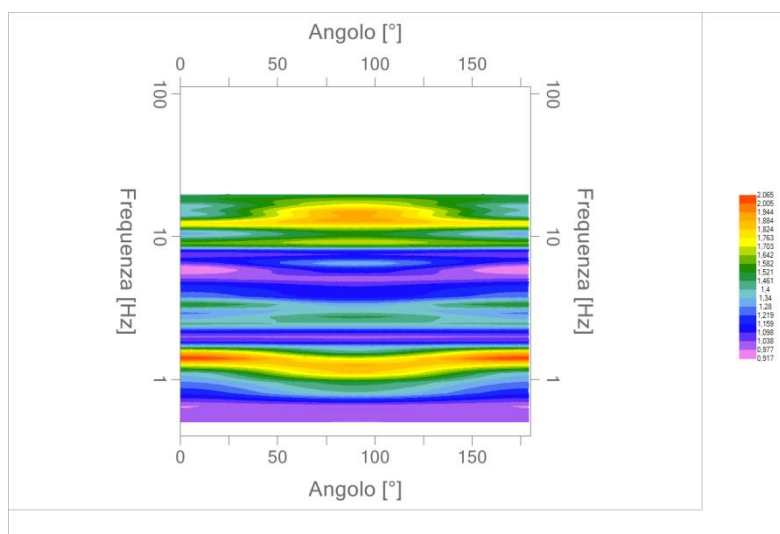
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

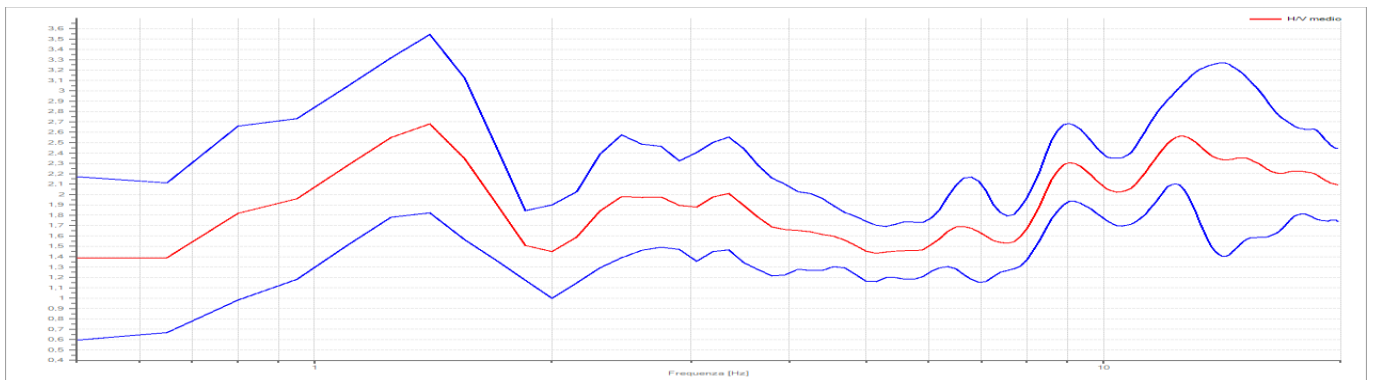
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del primo picco del rapporto H/V: 1,40 Hz  $\pm 0,32$  Hz Ampiezza: 2,68  
Frequenza del secondo picco del rapporto H/V: 12,65 Hz  $\pm 0,22$  Hz Ampiezza: 2,56

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

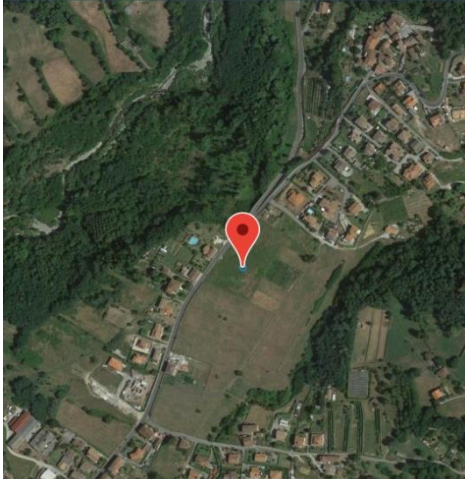
Classe	B
Tipo	/

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV18

### Dati generali

Nome progetto: Campori\_HV18  
Località: Campori  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 20/09/2018  
Inizio registrazione: 13:23:32  
Latitudine: 44.136734  
Longitudine: 10.417190  
Condizioni meteo: Sereno – vento leggero  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Lat: 44.136734 Long: 10.41719  
Ss.324 Bv.Chiozza, 55036 Pieve  
Fosciana LU, Italia



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 2400 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 480000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

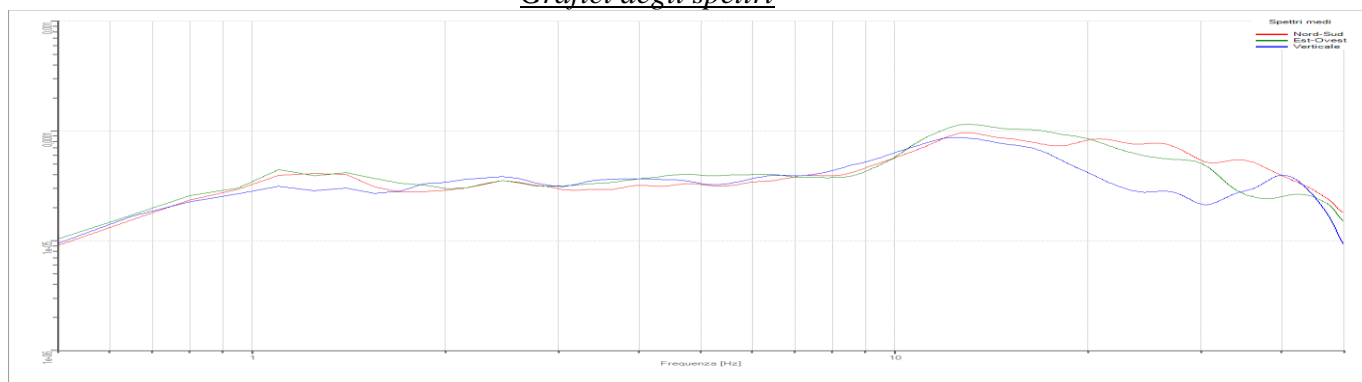
### Finestre selezionate

#### Dati riepilogativi:

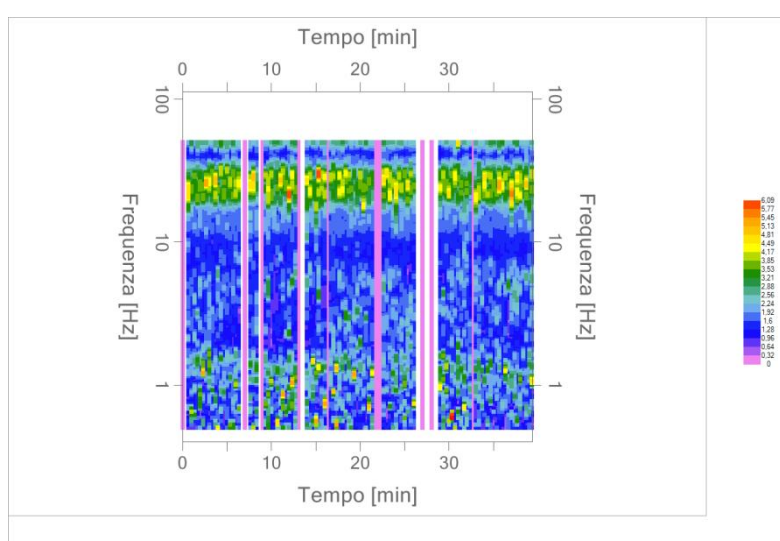
Numero totale finestre selezionate: 120  
Numero finestre incluse nel calcolo: 100  
% finestre incluse nel calcolo: 83,33% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Padding: Eseguito



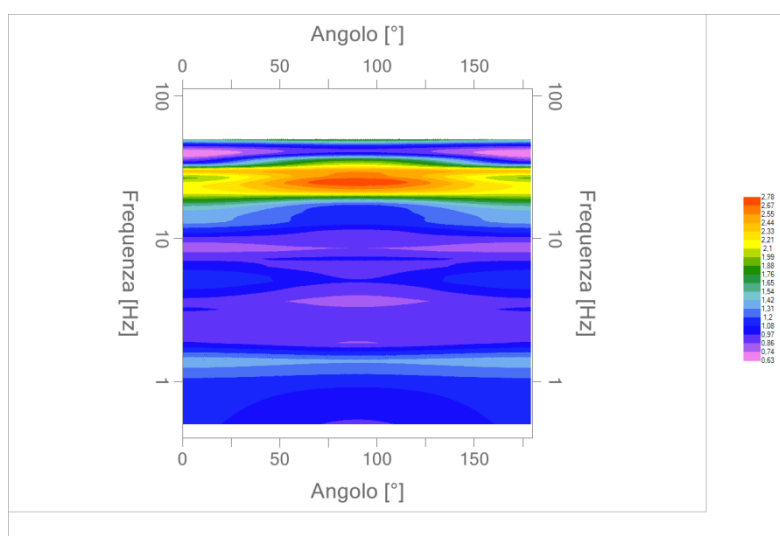
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri



**Rapporto spettrale H/V**

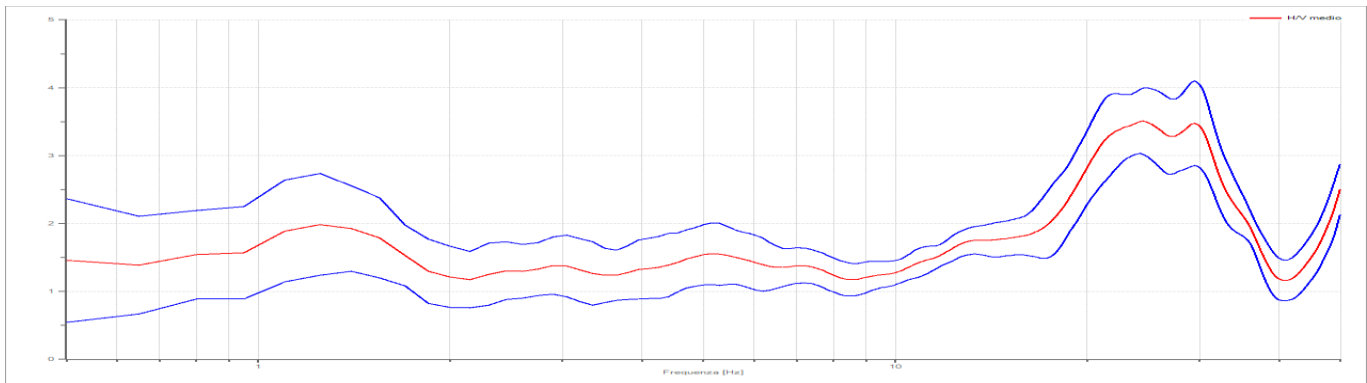
Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 50,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 24,35 Hz  $\pm$ 0,14 Hz      Ampiezza: 3,51  
(picco legato a contrasto superficiale; curva da considerare pressoché “piatta”)

Grafico rapporto spettrale H/V



**Criteri SESAME:**

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

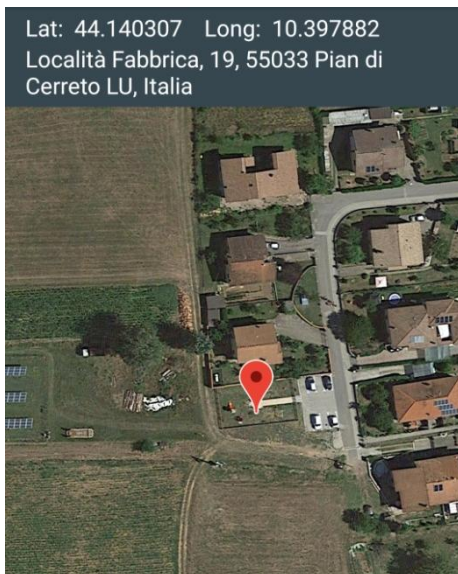
**Classificazione della curva H/V**

Classe	B
Tipo	/

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV19

### Dati generali

Nome progetto: Pian\_di\_Cerreto\_HV19  
Località: Pian di Cerreto  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 11/01/2019  
Inizio registrazione: 16:14:51  
Latitudine: 44.140307  
Longitudine: 10.397882  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento a tratti moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

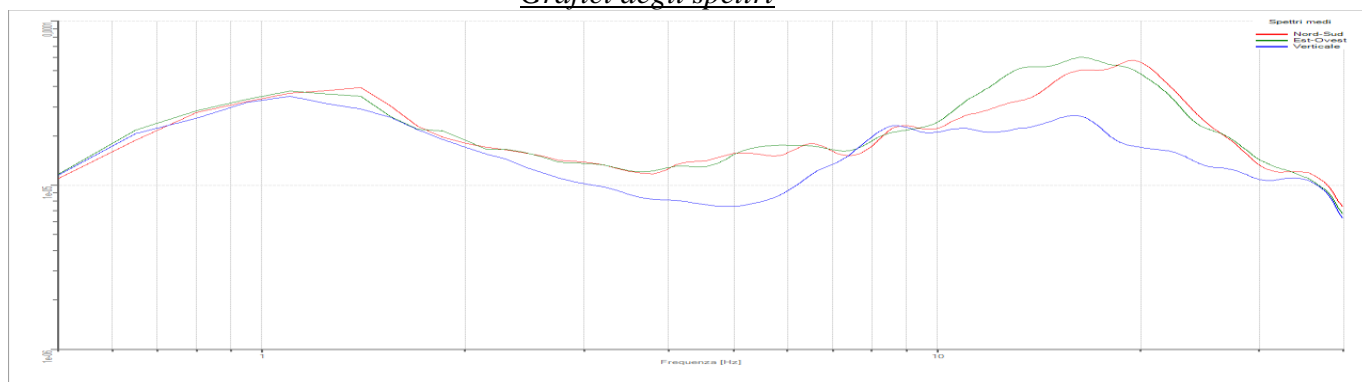
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

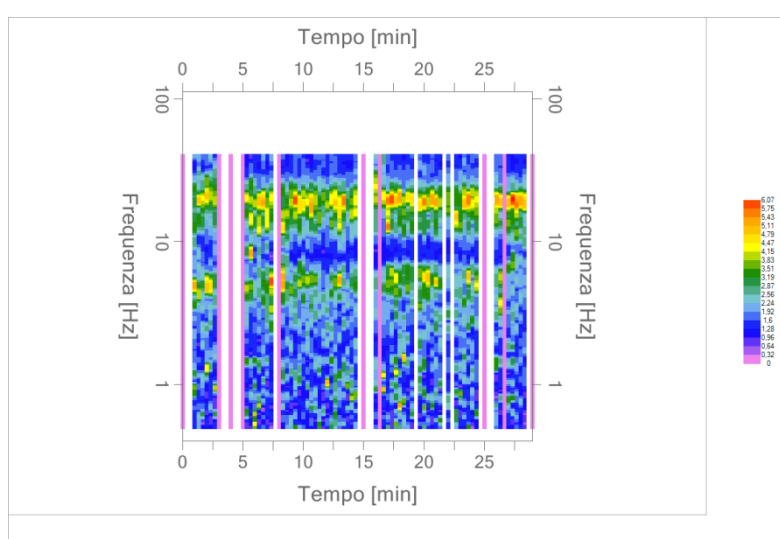
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 62  
% finestre incluse nel calcolo: 68,88% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

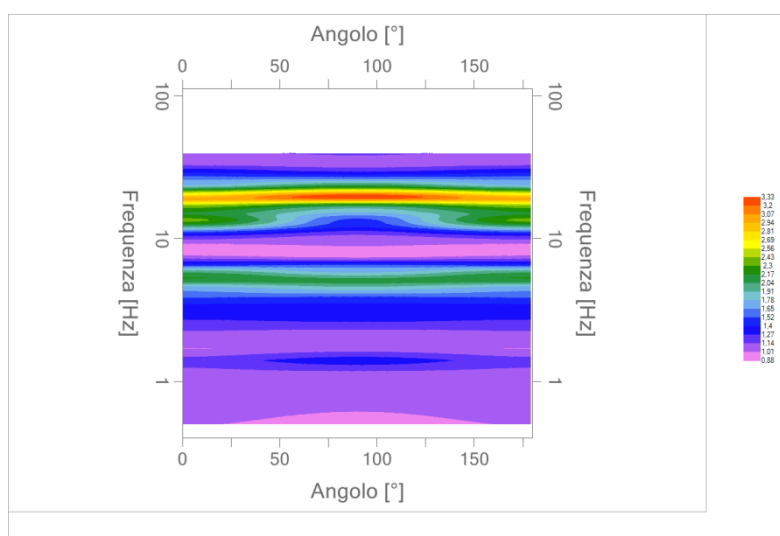
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

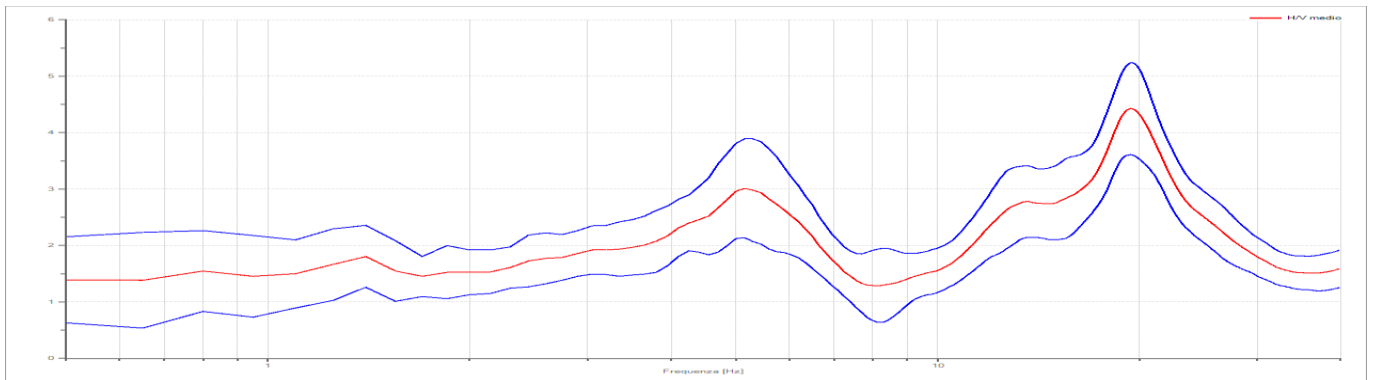
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 40,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del primo picco del rapporto H/V: 19,4 Hz  $\pm 0,18$  Hz Ampiezza: 4,42  
Frequenza del secondo picco del rapporto H/V: 5,15 Hz  $\pm 0,22$  Hz Ampiezza: 3,01

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

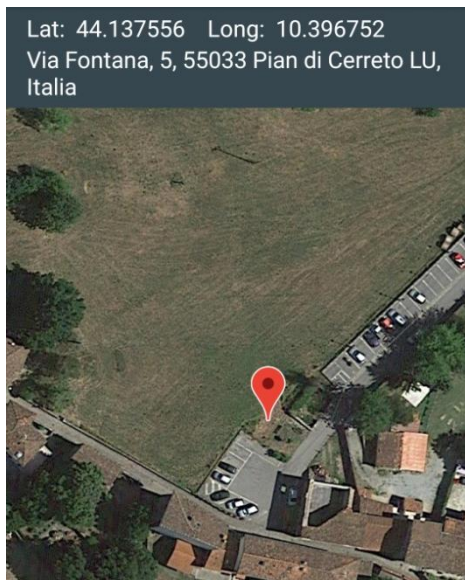
### Classificazione della curva H/V

Classe	A
Tipo	1

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV20

### Dati generali

Nome progetto: Pian\_di\_Cerreto\_HV20  
Località: Pian di Cerreto  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 11/01/2019  
Inizio registrazione: 15:28:13  
Latitudine: 44.137556  
Longitudine: 10.396752  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

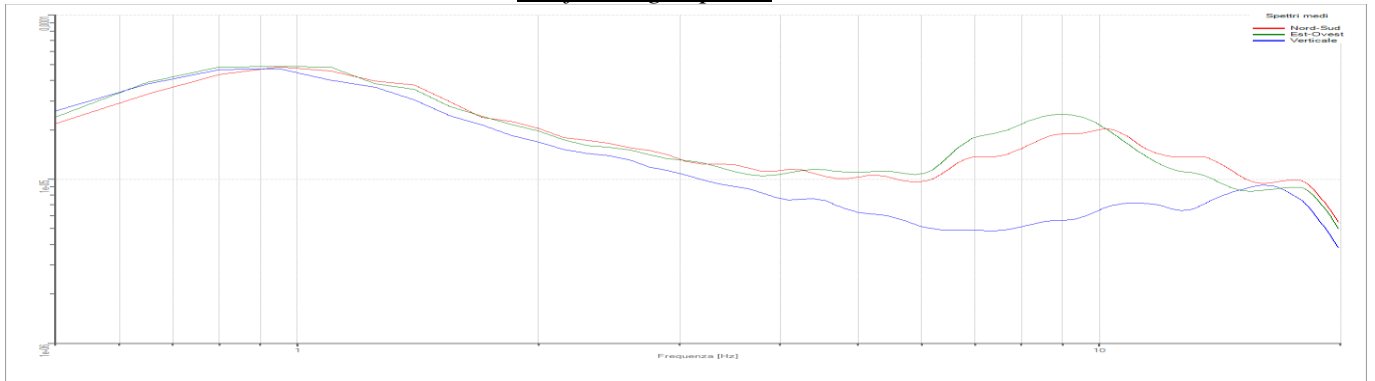
### Finestre selezionate

#### Dati riepilogativi:

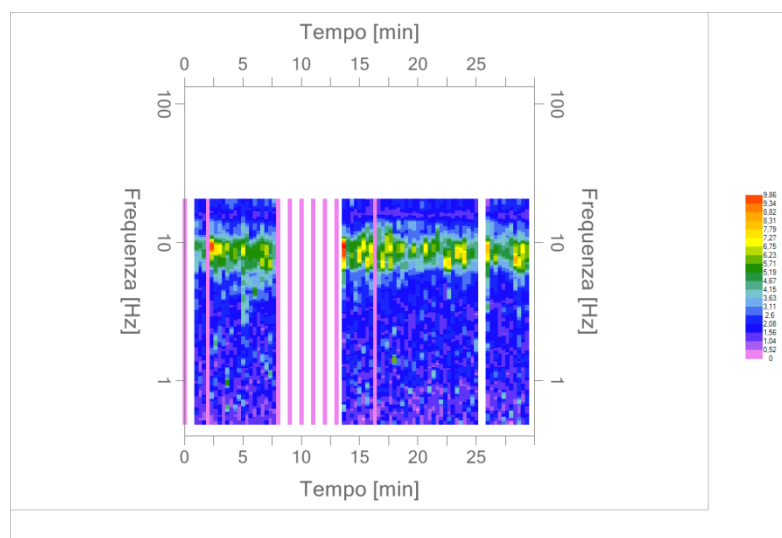
Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 65  
% finestre incluse nel calcolo: 72,22% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito



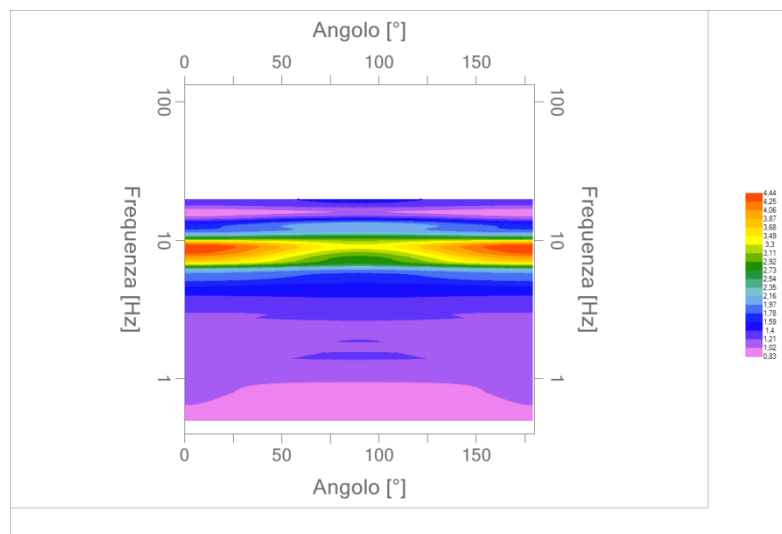
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

**Rapporto spettrale H/V**

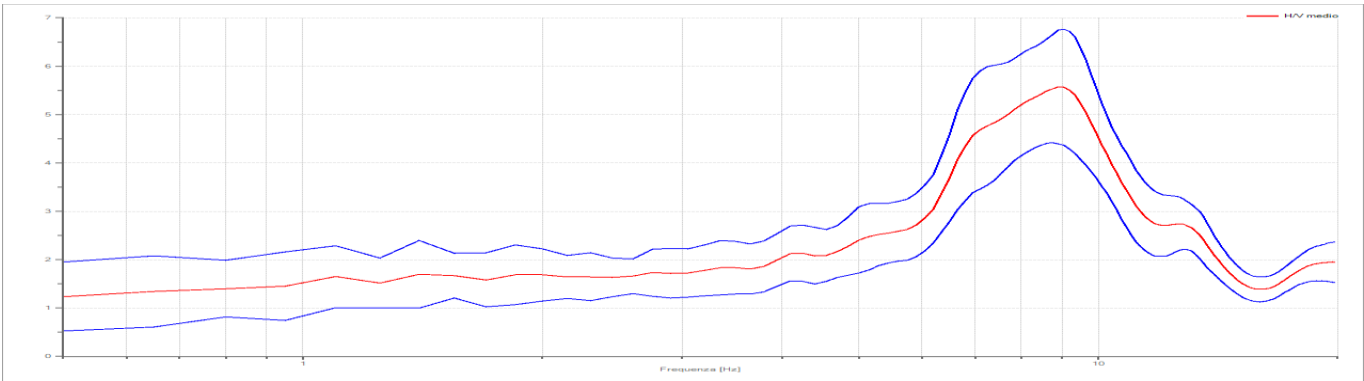
Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 8,90 Hz  $\pm$ 0,21 Hz      Ampiezza: 5,57

Grafico rapporto spettrale H/V



**Criteri SESAME:**

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

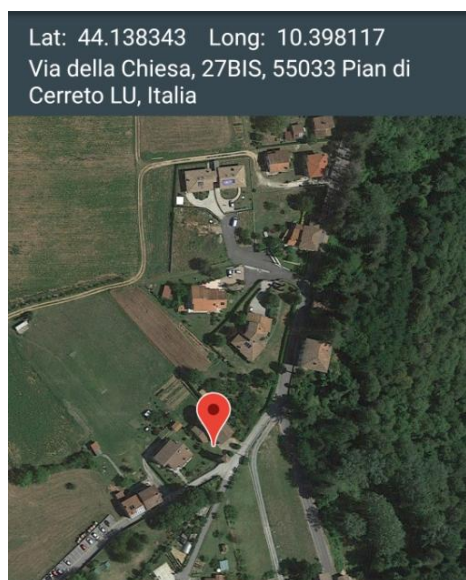
**Classificazione della curva H/V**

<b>Classe</b>	<b>A</b>
<b>Tipo</b>	<b>1</b>

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV21

### Dati generali

Nome progetto: Pian\_di\_Cerreto\_HV21  
Località: Pian di Cerreto  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 11/01/2019  
Inizio registrazione: 14:42:59  
Latitudine: 44.138343  
Longitudine: 10.398117  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento assente  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

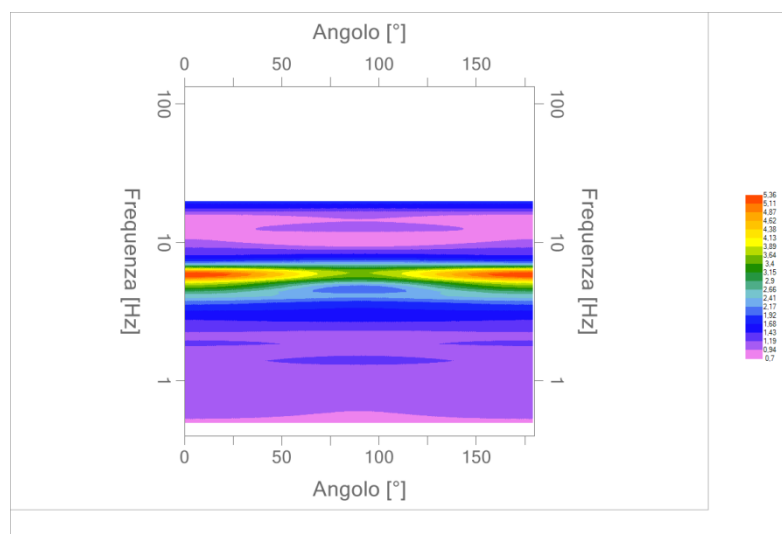
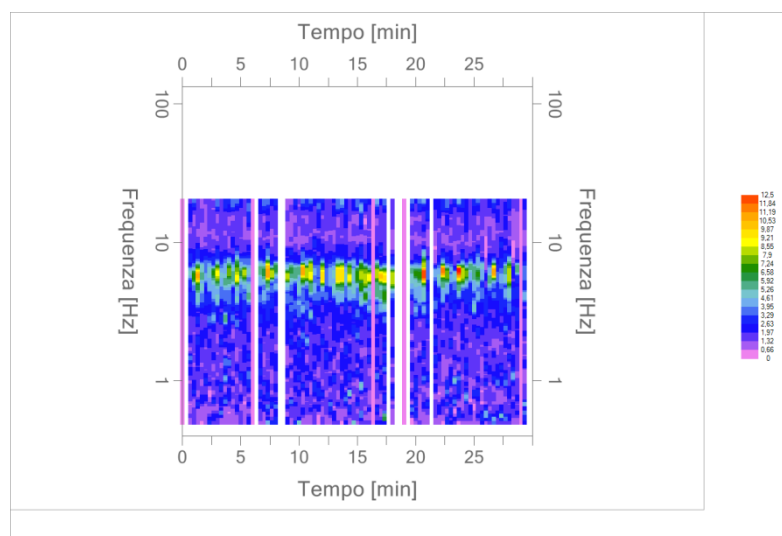
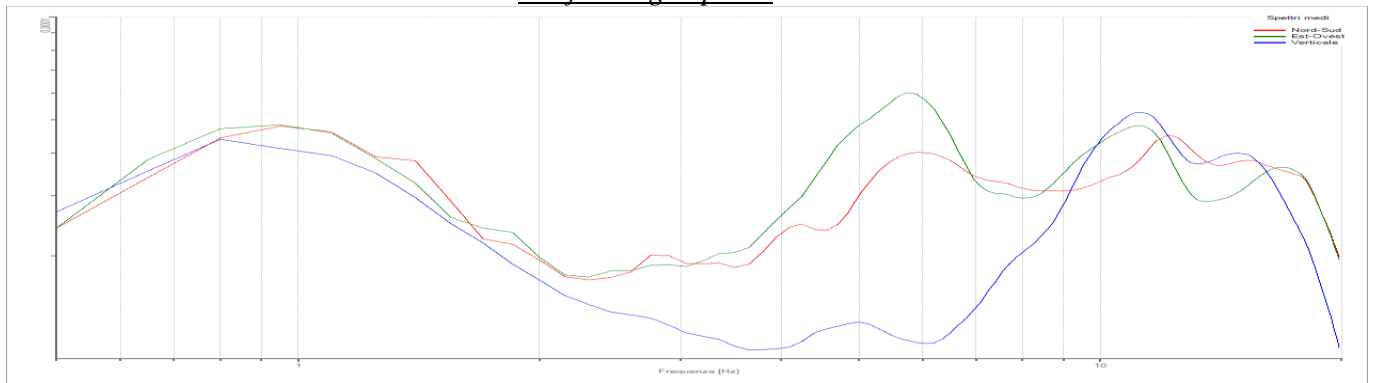
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 75  
% finestre incluse nel calcolo: 83,33% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

## Grafici degli spettri



## Rapporto spettrale H/V

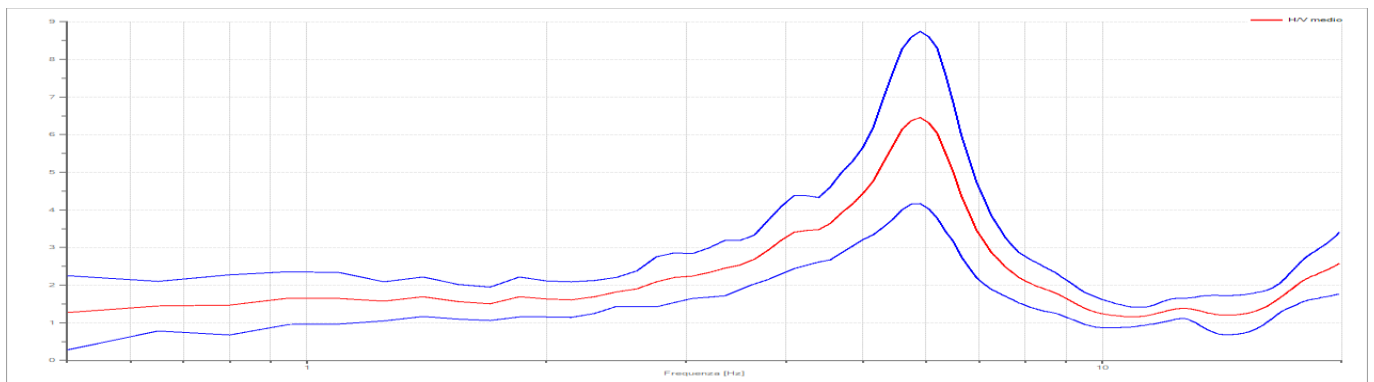
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5,90 Hz  $\pm 0,35$  Hz      Ampiezza: 6,46

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

Classe	A
Tipo	1

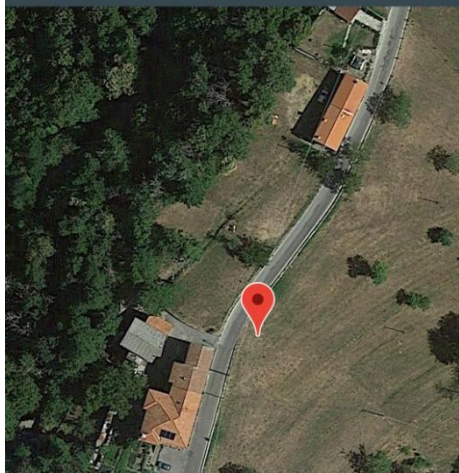


## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV22

### Dati generali

Nome progetto: Chiozza\_HV22  
Località: Chiozza  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 09/01/2019  
Inizio registrazione: 09:34:45  
Latitudine: 44.158907  
Longitudine: 10.439488  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Lat: 44.158907 Long: 10.439488  
SP71, 150, 55033 Castiglione di  
Garfagnana LU, Italia



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

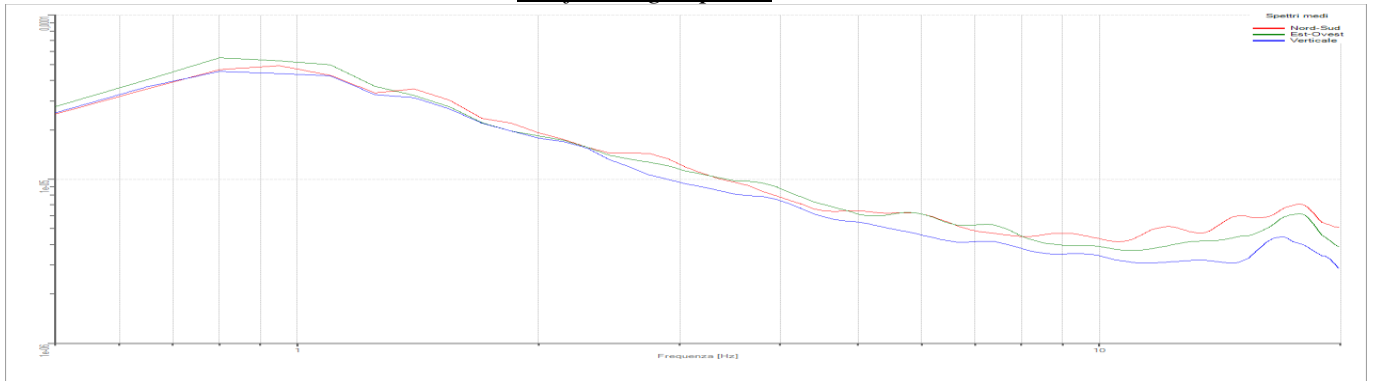
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

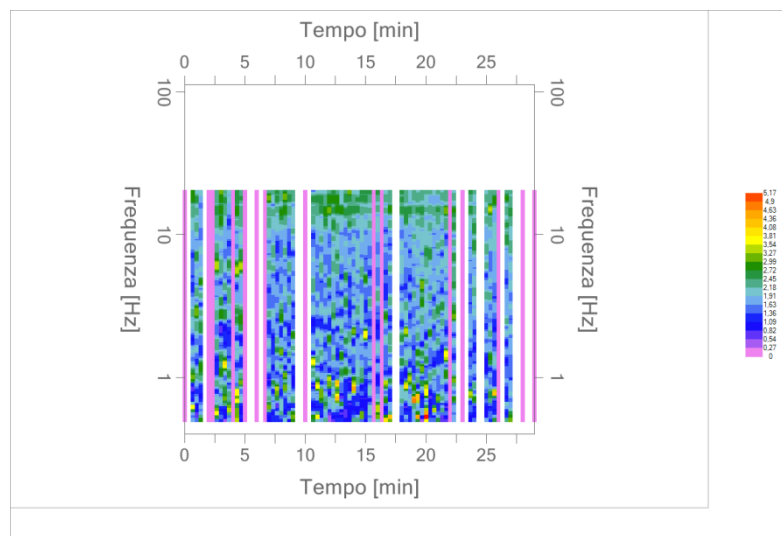
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 58  
% finestre incluse nel calcolo: 64,44% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

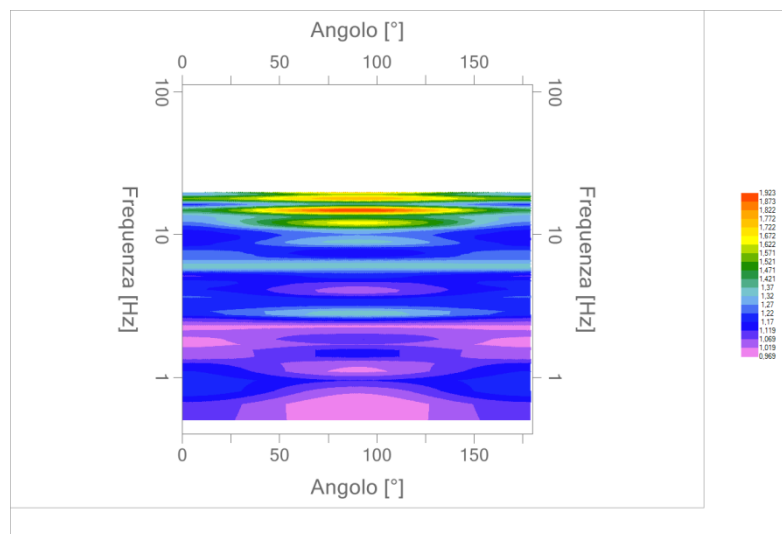
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

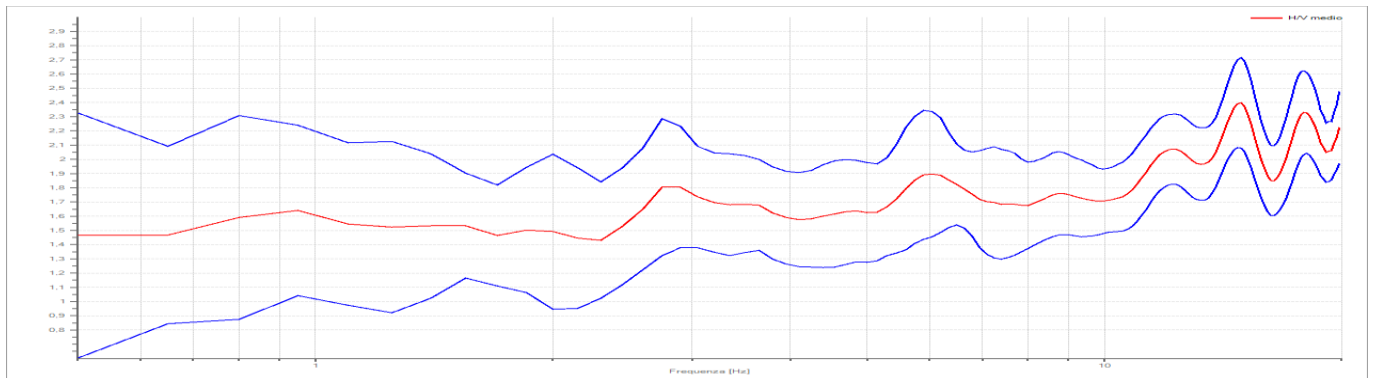
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento:: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del primo picco del rapporto H/V: 14,90 Hz  $\pm 0,13$  Hz Ampiezza: 2,40  
Frequenza del secondo picco del rapporto H/V: 17,90 Hz  $\pm 0,18$  Hz Ampiezza: 2,33  
(picchi poco chiari legati ad andamento anomalo delle componenti; curva da considerare pressoché “piatta”)

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

Classe	B
Tipo	/

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV23

### Dati generali

Nome progetto: Chiozza\_HV23  
Località: Chiozza  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 09/01/2019  
Inizio registrazione: 10:15:36  
Latitudine: 44.156722  
Longitudine: 10.436361  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

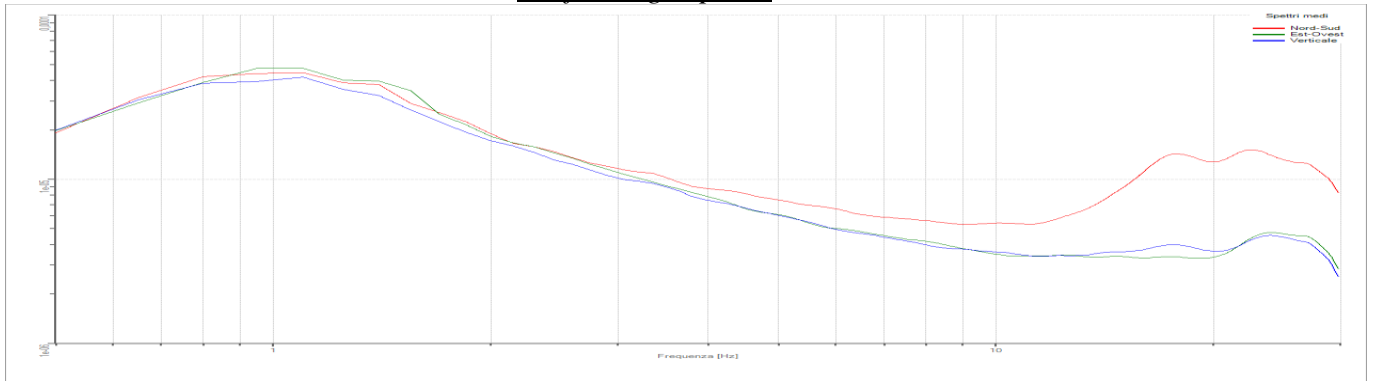
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

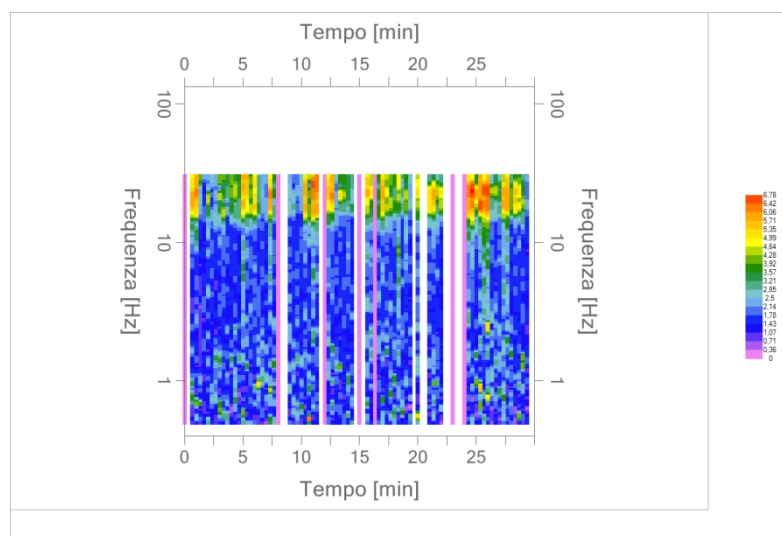
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 69  
% finestre incluse nel calcolo: 76,66% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

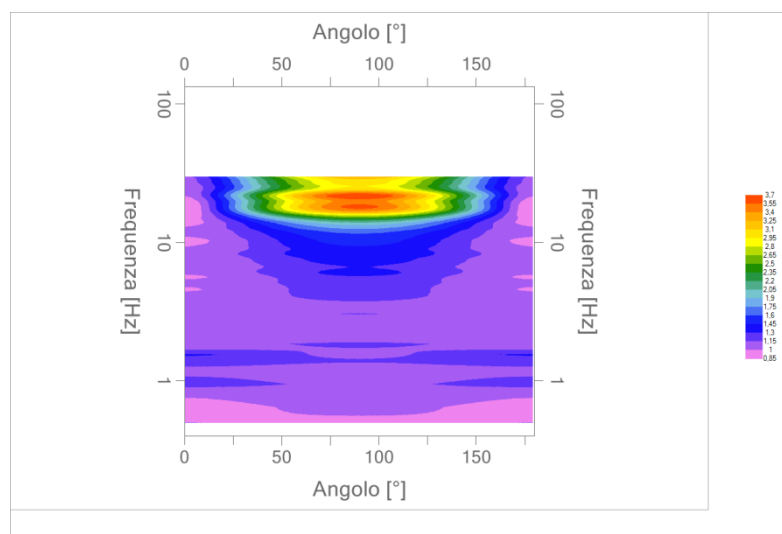
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri



## Rapporto spettrale H/V

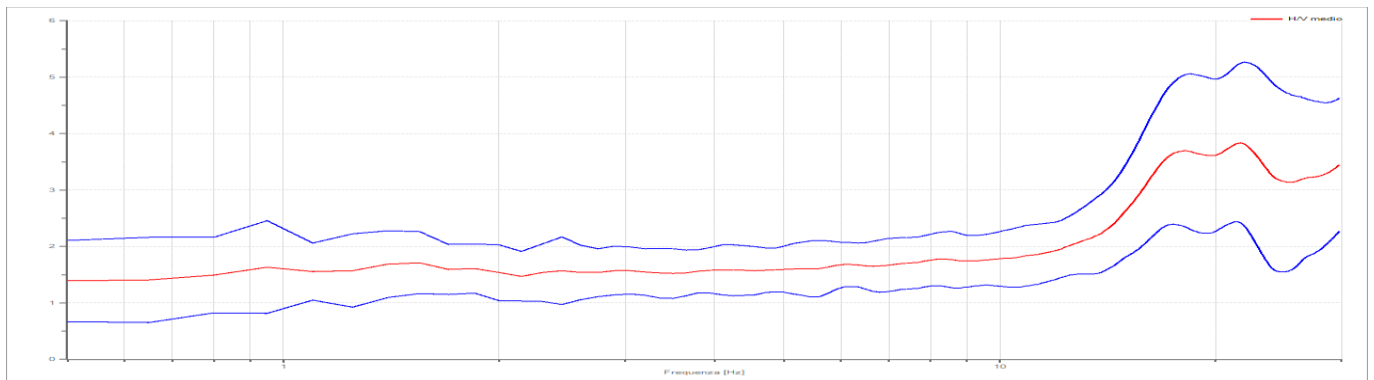
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 30,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 21,65 Hz  $\pm 0,36$  Hz      Ampiezza: 3,84  
(picco poco chiaro legato ad andamento anomalo delle componenti; curva da considerare pressoché “piatta”)

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

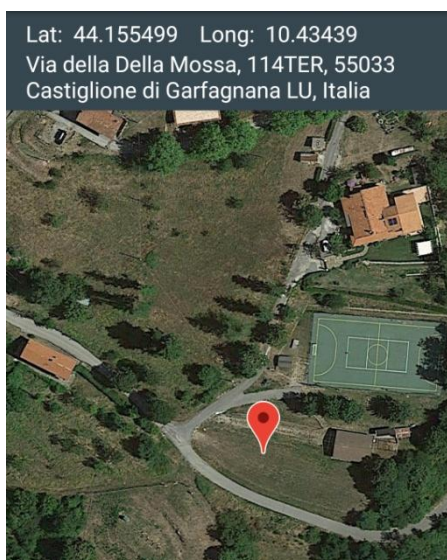
### Classificazione della curva H/V

Classe	B
Tipo	1

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV24

### Dati generali

Nome progetto: Chiozza\_HV24  
Località: Chiozza  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 09/01/2019  
Inizio registrazione: 11:43:08  
Latitudine: 44.155499  
Longitudine: 10.434390  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

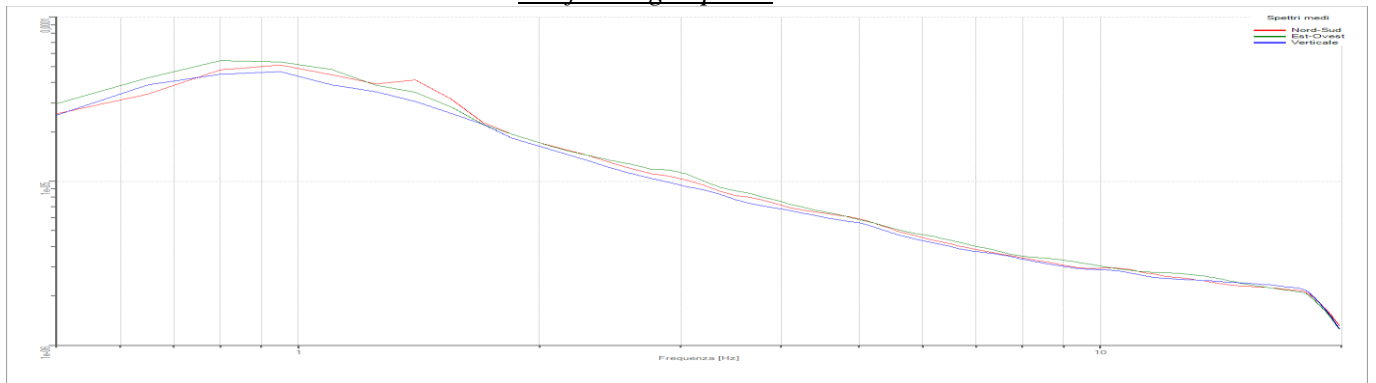
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

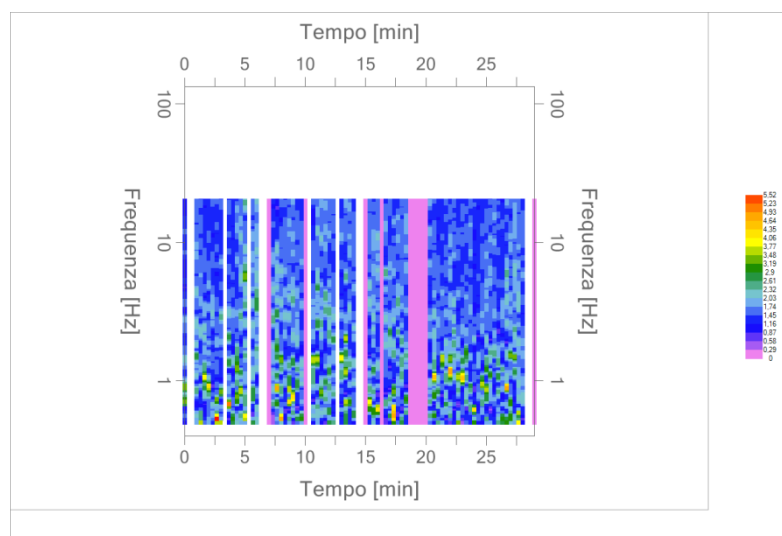
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 71  
% finestre incluse nel calcolo: 78,88% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamiento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamiento: 10,00 %  
Padding: Eseguito

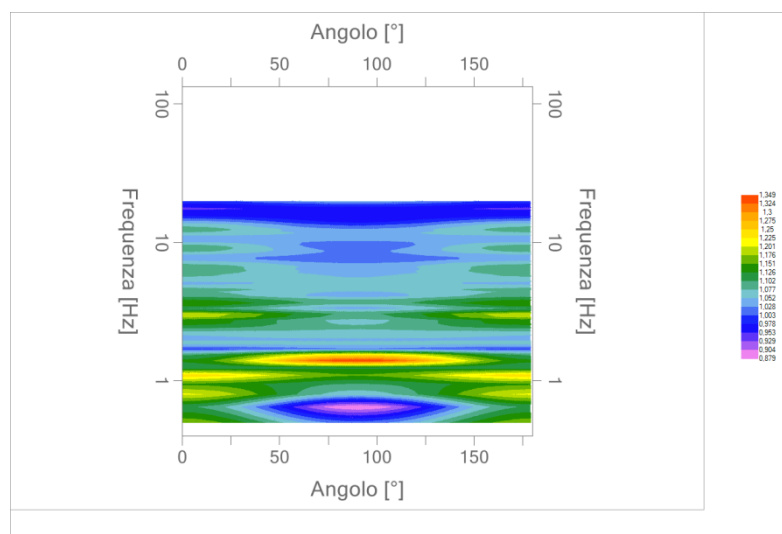
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

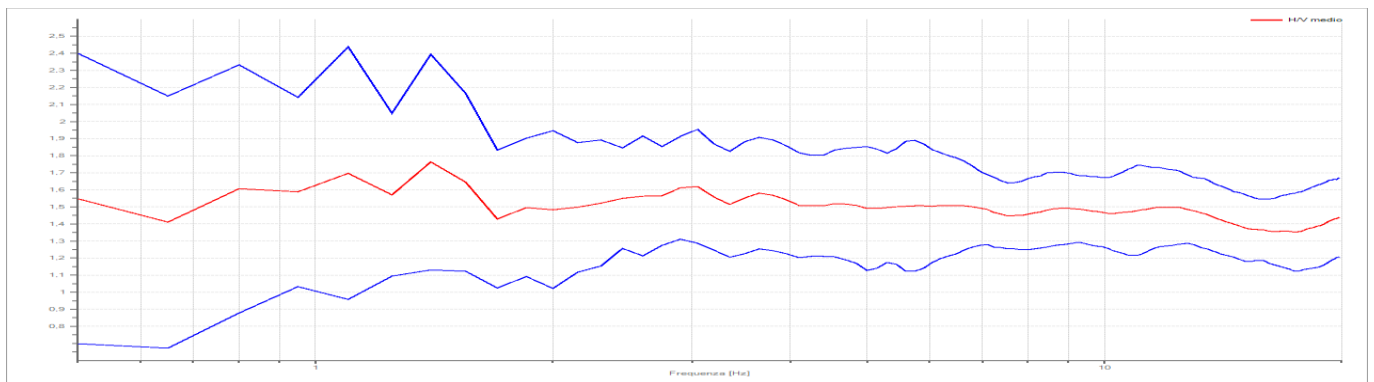
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 1,40 Hz  $\pm 0,36$  Hz      Ampiezza: 1,76  
(assenza di picchi significativi; curva da considerare “piatta”)

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0,5\text{Hz}$	
$\sigma_A(f) < 3$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0,5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Non superato
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

Classe	A
Tipo	2

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV25

### Dati generali

Nome progetto: Chiozza\_HV25  
Località: Chiozza  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 09/01/2019  
Inizio registrazione: 12:25:44  
Latitudine: 44.155613  
Longitudine: 10.438248  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

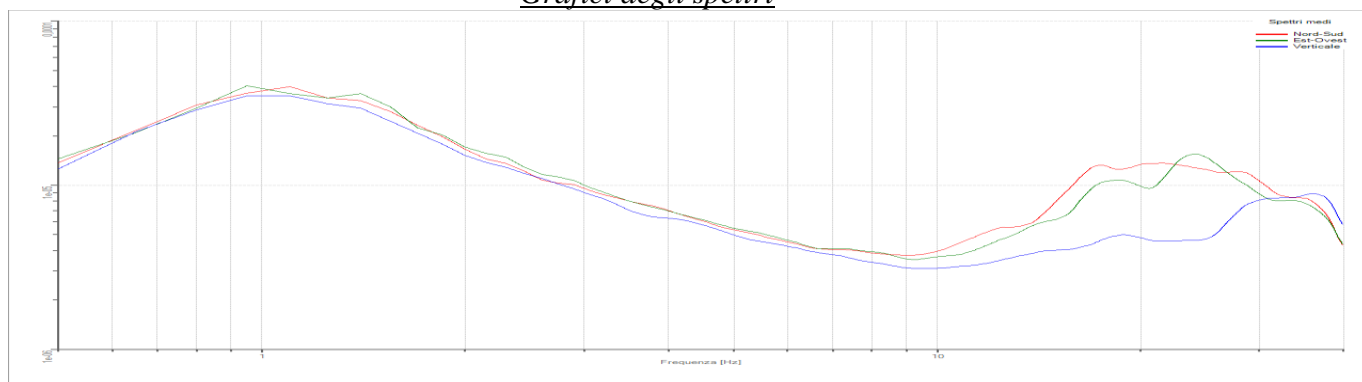
### Finestre selezionate

#### Dati riepilogativi:

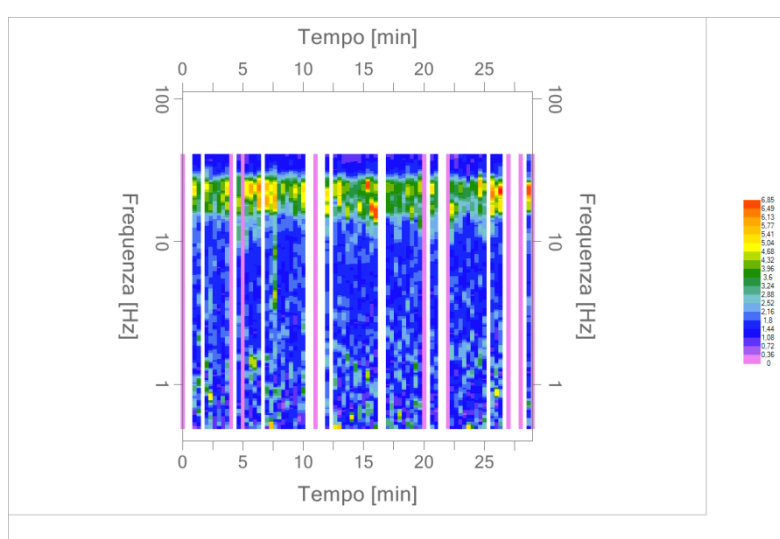
Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 59  
% finestre incluse nel calcolo: 65,55% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Padding: Eseguito



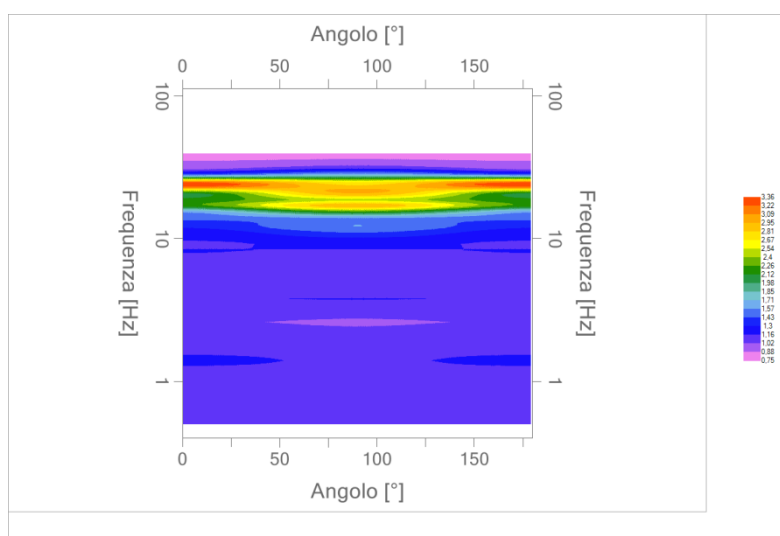
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mapa della stazionarietà degli spettri



Mapa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

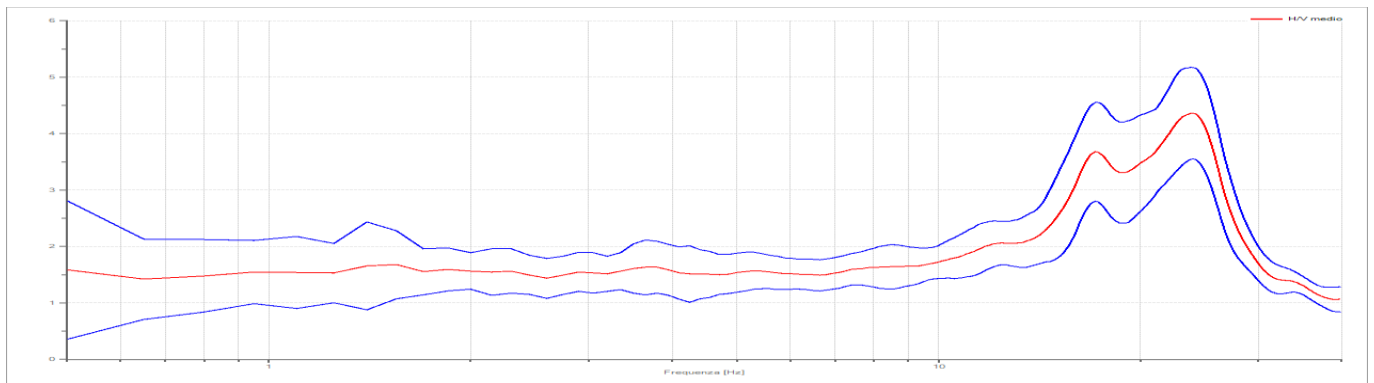
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 40,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

### Risultati:

Frequenza del primo picco del rapporto H/V: 23,90 Hz  $\pm 0,19$  Hz Ampiezza: 4,36  
Frequenza del secondo picco del rapporto H/V: 17,15 Hz  $\pm 0,22$  Hz Ampiezza: 3,68  
(picchi legati a contrasti superficiali; curva da considerare pressoché “piatta”)

### Grafico rapporto spettrale H/V



### Criteri SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

### Classificazione della curva H/V

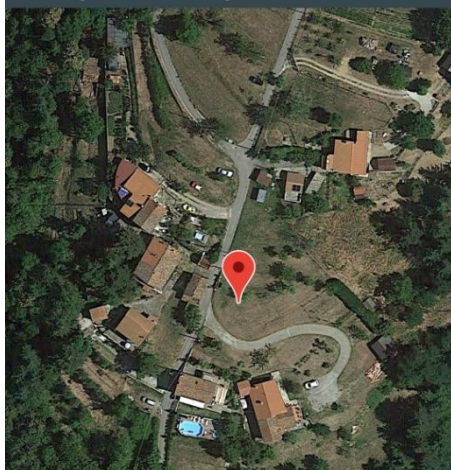
Classe	A
Tipo	1

## Scheda di elaborazione della misura di microtremore ambientale - HV26

### Dati generali

Nome progetto: Chiozza\_HV26  
Località: Chiozza  
Comune: Castiglione di Garfagnana  
Provincia: Lucca  
Data: 09/01/2019  
Inizio registrazione: 10:59:02  
Latitudine: 44.151895  
Longitudine: 10.437206  
Condizioni meteo: Cielo sereno – vento moderato  
Tipo di superficie: Terreno naturale; strumento posizionato all'interno di piccola buca scavata nel terreno e cavo di uscita parzialmente interrato  
Note: Vari transienti ed artefatti

Lat: 44.151895 Long: 10.437206  
Località Pianatagliata, 84, 55033  
Castiglione di Garfagnana LU, Italia



### Tracce in input

#### Dati riepilogativi:

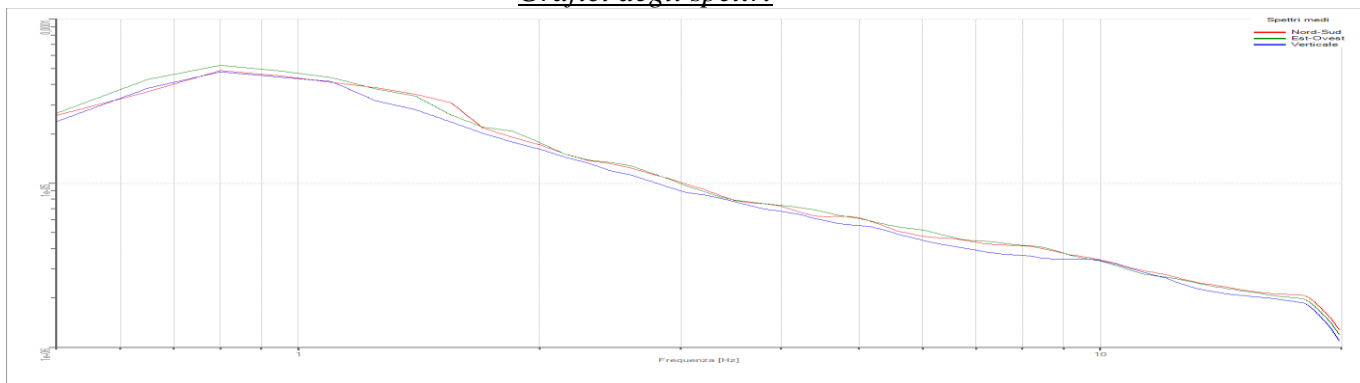
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1800 s  
Frequenza di campionamento: 200,00 Hz  
Numero campioni: 360000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Finestre selezionate

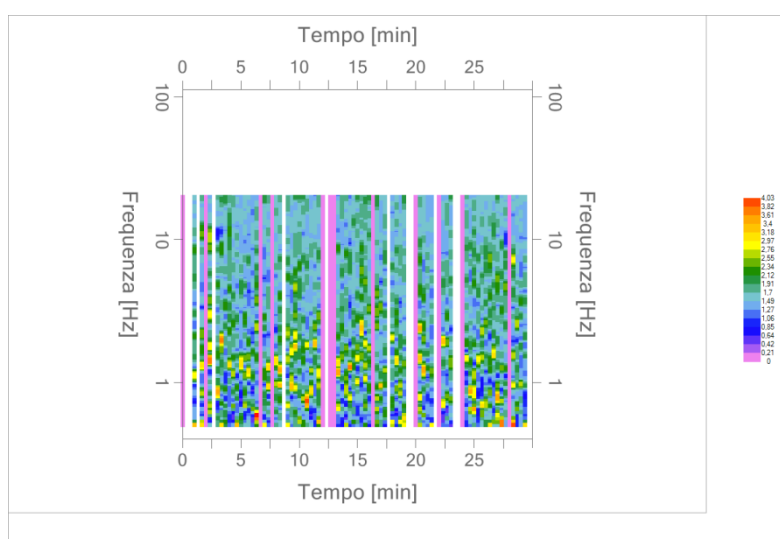
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre: 90  
Numero finestre incluse nel calcolo: 69  
% finestre incluse nel calcolo: 76,66% (selezione manuale)  
Dimensione temporale finestre: 20,000 s  
Tipo di liscio: Triangolare proporzionale  
Percentuale di liscio: 10,00 %  
Padding: Eseguito

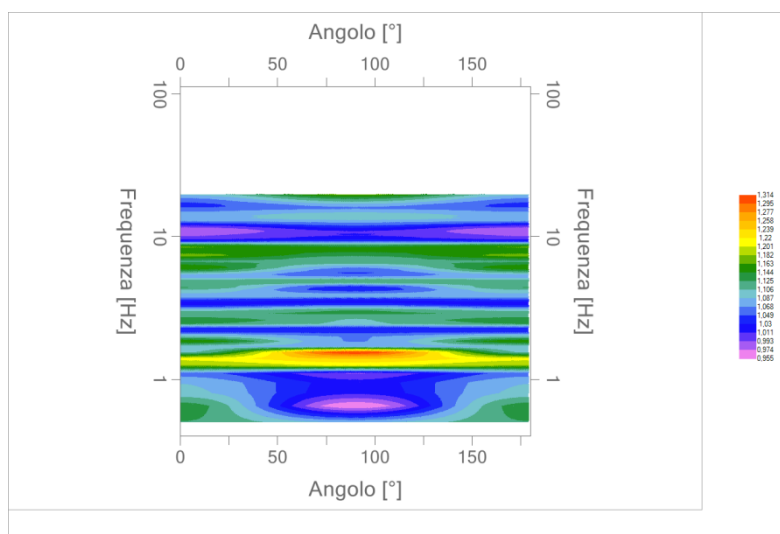
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

**Rapporto spettrale H/V**

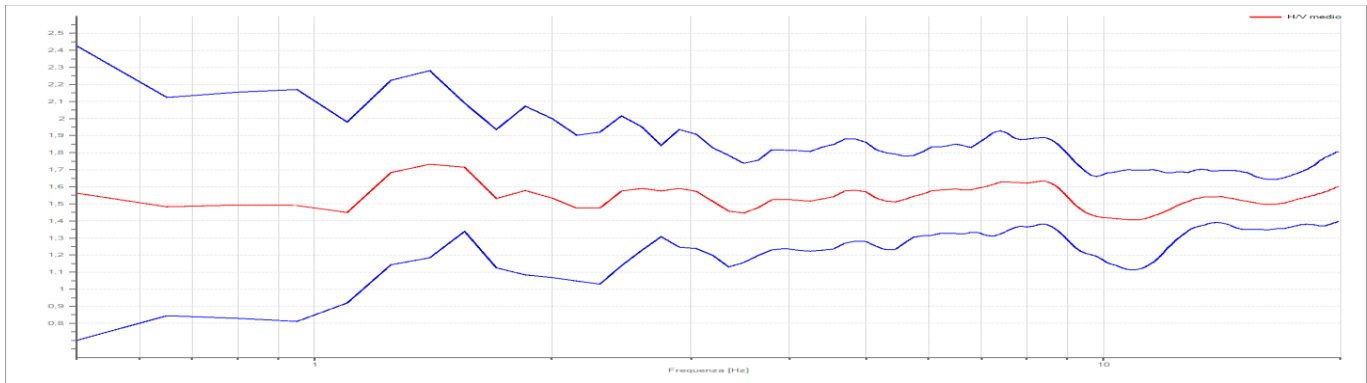
Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20,00 Hz  
Frequenza minima: 0,50 Hz  
Passo frequenze: 0,15 Hz  
Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10,00 %  
Tipo di somma direzionale: Media geometrica  
Tapering: 5%

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 1,40 Hz  $\pm 0,32$  Hz      Ampiezza: 1,73  
(assenza di picchi significativi; curva da considerare “piatta”)

Grafico rapporto spettrale H/V



**Criteri SESAME:**

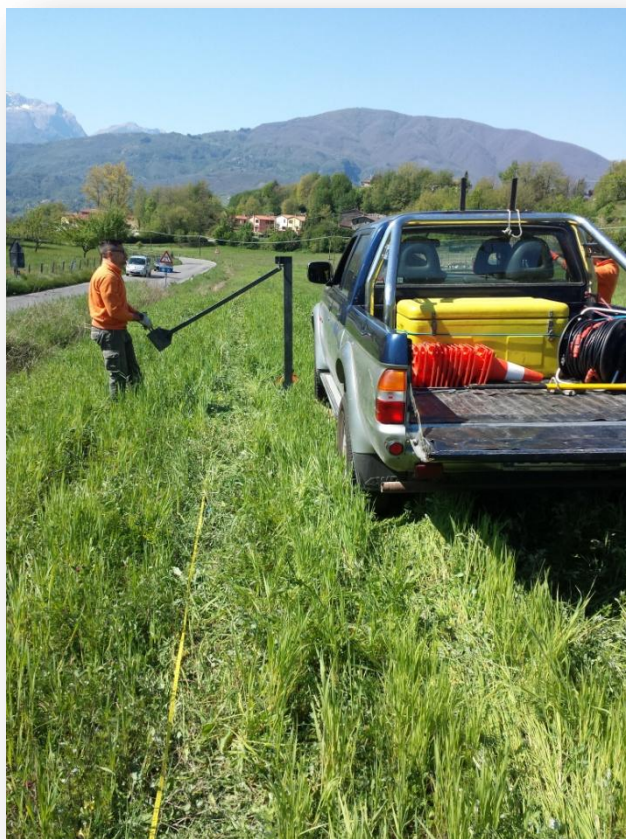
Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Non superato
$A_0 > 2$	Non superato
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

**Classificazione della curva H/V**

<b>Classe</b>	<b>A</b>
<b>Tipo</b>	<b>2</b>



## Allegato 6: Documentazione fotografica



**Foto 1** – Stendimento sismico a rifrazione onde P - SH (ST6a – Castiglione capoluogo)



**Foto 2** – Stendimento sismico a rifrazione onde P - SH (ST6a – Castiglione capoluogo)





**Foto 3** – Stendimento sismico a rifrazione onde P - SH (ST6b – Castiglione capoluogo)



**Foto 4** – Stendimento sismico a rifrazione onde P - SH (ST6b – Castiglione capoluogo)





**Foto 5** – Stendimento sismico a rifrazione onde P - SH (ST7 – Campori)



**Foto 6** – Stendimento sismico a rifrazione onde P - SH (ST7 – Campori)





**Foto 7** – Prova sismica MASW (M1 – Castiglione capoluogo)



**Foto 8** – Prova sismica MASW (M2 - Campori)





**Foto 9** – Prospezione geoelettrica GE1 (Castiglione capoluogo)



**Foto 10** – Prospezione geoelettrica GE1 (Castiglione capoluogo)