

| | | |
|--------------|--|---------------------|
| OGGETTO: | INDAGINI GEOFISICHE | |
| TIPOLOGIA: | MASW ACQUISIZIONI IN SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA | DATA |
| | | Gennaio 2024 |
| LOCALITA': | COMUNE DI POMARANCE (PI) | |
| COMMITTENTE: | AMMINISTRAZIONE COMUNALE DI POMARANCE | |

| | |
|----------------------|-----------------------------|
| codice documento: | j24001.01.08_pmr.doc |
| versione /revisione: | 01 |
| stato documento: | definitivo |
| autore: | a.benvenuti |
| revisione: | v.carnicelli |
| approvazione: | v.carnicelli |
| data: | Gennaio 2024 |

SOMMARIO

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | PREMESSA..... | 2 |
| 2 | TIPO D'INDAGINE | 2 |
| 2.1 | STRUMENTAZIONE UTILIZZATA | 3 |
| 2.2 | INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE | 3 |
| 2.3 | INDAGINE HOLISURFACE: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE | 6 |
| 2.4 | INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE | 8 |
| 3 | ANALISI DEI RISULTATI | 9 |
| 3.1 | INDAGINI MASW / HOLISURFACE..... | 9 |
| 3.2 | INDAGINI HVSR: | 12 |

1 PREMESSA

Su incarico dell'Amministrazione Comunale di Pomarance sono state eseguite una serie di indagini geofisiche nel territorio comunale finalizzate alla determinazione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio (Onde Sh), al calcolo del parametro $V_{s,eq}$ e all'individuazione delle frequenze fondamentali di sito.

Le indagini, svolte nel mese di Gennaio 2024, sono state condotte conformemente alla vigente normativa sismica e in particolare: ai contenuti dell'O.P.C.M. n. 3274/2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e s.m.i.; ai contenuti del Regolamento di attuazione dell'articolo 62 della legge regionale 3 gennaio 2005, n.1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche, emanato con Decreto del Presidente della Giunta Regionale 25 ottobre 2011, n. 53/R; ai contenuti della Delibera di Giunta Regionale Toscana n. 741 del 06.08.2012 con cui sono state approvate le nuove specifiche tecniche per gli studi di Microzonazione Sismica; alle specifiche del Programma Regionale VEL dettate nelle "Istruzioni Tecniche Regionali relative alla realizzazione delle indagini geologico-tecniche, geofisiche, geotecniche finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana" VEL della Regione Toscana; agli "Indirizzi e Criteri Generali per la Microzonazione Sismica" approvati dalla Conferenza delle Regioni in data 13 novembre 2008.

L'ubicazione delle indagini è riportata nelle tavole allegate in cui sono state posizionate sulla base CTR - Fonte dei dati Regione Toscana: Carta Topografica 25k Fogli 295a, 295b e 306a; dataset "sezione di Carta Tecnica Regionale scala 1:10.000" Sezioni 295100 Titolo: Micciano – Sezione 295110 Titolo: Pomarance Sud – Sezione 295150 Titolo Castelnuovo Val di Cecina – Sezione 306020 Titolo Lustignano; dataset "sezione di Carta Tecnica Regionale scala 1:2.000": Fogli D_72703, D_72704, D_12H55 e D_13H47.

2 TIPO D'INDAGINE

Sono stati indagati 7 siti nel territorio comunale di Pomarance:

- Sito 01 – Lustignano
- Sito 02 – Larderello
- Sito 03 – Montecerboli 1 (Cimitero Comunale)
- Sito 04 – Montecerboli 2
- Sito 05 – Montecerboli 3
- Sito 06 – Montecerboli 4
- Sito 07 – Libbiano

Per la caratterizzazione di un ogni sito sono state eseguite prospezioni sismiche superficiali mediante la tecnica MASW ("Multichannel Analysis of Surface Waves") in onde di Rayleigh e acquisizioni in sismica passiva a stazione singola HVSR.

Per la caratterizzazione del solo Sito 07 (frazione di Libbiano), a causa di motivi logistici dovuti alla mancanza di spazio sufficiente, non è stato possibile eseguire un'acquisizione MASW "classica". Si sono pertanto effettuate acquisizioni ed analisi MASW sensu lato, secondo la tecnica HoliSurface MFA (Multiple Filter Analysis – Dziewonsky et al., 1969; Pedersen et al., 2003; Luo et al., 2011; Dal Moro et al., 2015a; 2015b) adattata a sfruttare in maniera olistica tanto le componenti verticale e radiale dell'onda di Rayleigh (anche considerando l'RVSR - Radial-to-Vertical Spectral Ratio e l'RPM - Rayleigh-wave

Particle Motion - metodologia HoliSurface) che quella orizzontale trasversale dell' onda di Love.

Le acquisizioni in sismica passiva a stazione singola sono state ubicate in prossimità dei singoli stendimenti e sono state utilizzate per verificare i risultati ottenuti dalle singole indagini MASW.

In particolare le elaborazioni delle acquisizioni in sismica passiva HVSR hanno consentito, unitamente ai risultati ottenuti dalle indagini MASW, di incrementare la profondità di indagine raggiunta attraverso le indagini MASW stesse.

L'approccio seguito per l'inversione dei dati è stato di tipo olistico (analisi congiunte dei dataset acquisiti) in modo tale da meglio vincolare il profilo di V_s risultante del sottosuolo indagato, risolvere la non-univocità delle soluzioni possibili e, non ultimo, validare l'interpretazione dei dati e verificare la coerenza del modello proposto con i dataset sismici acquisiti.

In quest'ottica, nelle schede relative a ciascun sito, è stato proposto un unico modello di sottosuolo che è risultato il più coerente possibile rispetto alle indagini effettuate in loco.

Le indagini in sismica passiva sono quindi state utilizzate per l'individuazione delle frequenze fondamentali di sito e, relativamente a ogni misura, sono state valutate le classi di affidabilità per il controllo sulla qualità dei dati acquisiti.

2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per l'indagine MASW sono costituite da:

un sistema di energizzazione ad impatto verticale costituito da una mazza del peso di 10 kg battente verticalmente su piastra quadrata in Teflon® di dimensioni di 20 x 20 x 5 cm posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde Rayleigh;

un sistema di ricezione costituito da:

- 24 geofoni verticali monocomponente con frequenza propria di 4.5 Hz (MASW s.s.).
- un geofono triassiale H3C (eliosoft), cioè da una terna passiva calibrata con geofoni da 2Hz (frequenza propria) verticali e orizzontali (HoliSurface)

un sistema di acquisizione dati: costituito da un sismografo P.A.S.I. modello GEA24; un notebook PC Windows XP con software di acquisizione P.A.S.I.;

un sistema di trigger: consistente in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati

La strumentazione utilizzata per le misure dei microtremori ambientali, elaborate attraverso la tecnica HVSR, è costituita da un tromografo digitale (Tromino® di *MoHo s.r.l.*) dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e UP-DOWN.

2.2 INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o, detto in maniera equivalente, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo; onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente allineata all'array geofonico) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

La metodologia utilizzata consiste in quattro fasi:

- acquisizione dei dati di campagna energizzando a più riprese e alternativamente ai due estremi dello stendimento geofonico;
- determinazione dello spettro di velocità sperimentale dal campo di moto acquisito nel dominio spazio-tempo lungo lo stendimento;
- calcolo della curva di dispersione attraverso il picking o la modellazione diretta;
- inversione della curva di dispersione per l'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s e il parametro $V_{s,eq}$.

L'elaborazione è stata eseguita tramite il software winMASW® Academy 2019 (Eliosoft).

Operativamente, per ogni sito è stato eseguito uno stendimento a 24 canali disponendo sul terreno 24 geofoni verticali aventi frequenza propria pari a 4.5 Hz e spazati di 2 m l'uno dall'altro. Per il solo sito 01 (Lustignano), a causa di motivi logistici (mancanza di spazio), sono stati utilizzati 20 geofoni anziché 24.

Agli estremi di ciascun stendimento sono state eseguite acquisizioni coniugate che hanno permesso di verificare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) al di sotto di ciascun allineamento e confermare l'applicabilità della metodologia MASW.

Le acquisizioni sono state eseguite secondo le configurazioni spaziali e temporali indicate nelle tabelle delle pagine successive.

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE MASW Sito 01 - Lustignano | |
|--|------------------------------------|
| Orientazione | N313 (SE-NW) |
| Coordinate GB geofono G1 | X= 1646487 Y= 4783064 |
| Coordinate GB geofono G20 | X= 1646459 Y= 4783090 |
| Lunghezza stendimento | 38 m |
| Numero Geofoni | 20 |
| Distanza intergeofonica | 2 m |
| Numero punti di energizzazione per estremo | G1: 2; G20: 3 |
| Off-sets sorgenti (da ciascun estremo) | G1: 1 m , 2 m; G20: 1 m , 2 m, 3 m |
| Durata acquisizione | 0.750 s |
| Intervallo di campionamento | 500 μ s |

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE MASW Sito 02 - Larderello | |
|--|-----------------------|
| Orientazione | N33 (SW-NE) |
| Coordinate GB geofono G1 | X= 1652512 Y= 4788971 |
| Coordinate GB geofono G24 | X= 1652537 Y= 4789010 |
| Lunghezza stendimento | 46 m |
| Numero Geofoni | 24 |
| Distanza intergeofonica | 2 m |
| Numero punti di energizzazione per estremo | 3 |
| Off-sets sorgenti (da ciascun estremo) | 1 m, 3 m, 5 m |
| Durata acquisizione | 1 s |
| Intervallo di campionamento | 500 μ s |

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE MASW Sito 03 – Montecerboli 1 (cimitero) | |
|---|-----------------------|
| Orientazione | N69 (SW-NE) |
| Coordinate GB geofono G1 | X= 1652803 Y= 4790398 |
| Coordinate GB geofono G24 | X= 1652846 Y= 4790414 |
| Lunghezza stendimento | 46 m |
| Numero Geofoni | 24 |
| Distanza intergeofonica | 2 m |
| Numero punti di energizzazione per estremo | 3 |
| Off-sets sorgenti (da ciascun estremo) | 2 m, 3 m, 5 m |
| Durata acquisizione | 1 s |
| Intervallo di campionamento | 500 μ s |

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE MASW Sito 04 – Montecerboli 2 | |
|--|-----------------------|
| Orientazione | N330 (SE-NW) |
| Coordinate GB geofono G1 | X= 1652593 Y= 4790432 |
| Coordinate GB geofono G24 | X= 1652569 Y= 4790472 |
| Lunghezza stendimento | 46 m |
| Numero Geofoni | 24 |
| Distanza intergeofonica | 2 m |
| Numero punti di energizzazione per estremo | 3 |
| Off-sets sorgenti (da ciascun estremo) | 2 m, 3 m, 4 m |

| | |
|--|-----------------------|
| Durata acquisizione | 1 s |
| Intervallo di campionamento | 500 μ s |
| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE MASW Sito 05 - Montecerboli 3 | |
| Orientazione | N324 (SE-NW) |
| Coordinate GB geofono G1 | X= 1652516 Y= 4790463 |
| Coordinate GB geofono G24 | X= 1652543 Y= 4790426 |
| Lunghezza stendimento | 46 m |
| Numero Geofoni | 24 |
| Distanza intergeofonica | 2 m |
| Numero punti di energizzazione per estremo | 3 |
| Off-sets sorgenti (da ciascun estremo) | 2 m, 3 m, 5 m |
| Durata acquisizione | 1 s |
| Intervallo di campionamento | 500 μ s |

| | |
|--|-----------------------|
| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE MASW Sito 06 - Montecerboli 4 | |
| Orientazione | N221 (NE-SW) |
| Coordinate GB geofono G1 | = 1652281 Y= 4790457 |
| Coordinate GB geofono G24 | X= 1652251 Y= 4790422 |
| Lunghezza stendimento | 46 m |
| Numero Geofoni | 24 |
| Distanza intergeofonica | 2 m |
| Numero punti di energizzazione per estremo | 3 |
| Off-sets sorgenti (da ciascun estremo) | 2 m, 3 m, 5 m |
| Durata acquisizione | 1 s |
| Intervallo di campionamento | 500 μ s |

Durante il processo di elaborazione, al fine di minimizzare le possibili soluzioni e cercare la più sensata coerenza tra lo spettro di velocità sperimentale e le curve di dispersione teoriche che possono generare tale spettro, ci si è avvalsi dei dati acquisiti con le acquisizioni in sismica passiva eseguite in prossimità di ciascun stendimento MASW.

2.3 INDAGINE HOLISURFACE: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

La tecnica HoliSurface è stata utilizzata per la ricostruzione del profilo di Vs relativamente al Sito 07 (Libbiano); si tratta di una tecnica di acquisizione multi canale e multi componente di carattere attivo (con sorgente sismica attiva) atta ad analizzare la propagazione delle onde di superficie (Rayleigh e Love) attraverso l'utilizzo di un unico geofono triassiale che semplifica notevolmente le procedure di campagna.

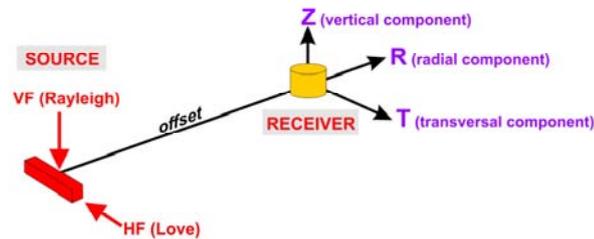
HS significa Holistic analysis of Surface waves, cioè analisi olistica, congiunta, delle onde di superficie.

E' una metodologia brevettata (presentata in diversi articoli, quali Dal Moro et al., 2015, 2016; Dal Moro e Puzilli, 2017; Dal Moro, 2018) in cui vengono considerate, in un approccio congiunto, diverse componenti del moto che, nel loro insieme, descrivono in modo completo la propagazione delle onde di superficie nel mezzo indagato.

L'acquisizione dati HoliSurface avviene attraverso un geofono triassiale triggerabile (di cui sono note le polarità) posto ad una certa distanza dalla sorgente (rif. fig. seguente).

Attraverso una doppia energizzazione utilizzata per produrre sia le onde di Rayleigh (VF,

vertical force) raccolte dalle componenti Z e R, che le onde di Love (HF, horizontal force) raccolte dalla componente T, è possibile ottenere 3 componenti del moto dell'onda sismica.



Con la sola energizzazione verticale (VF) è inoltre possibile definire sia il rapporto spettrale radiale/verticale delle ampiezze in funzione della frequenza (RVSR, che può essere pensato come una sorta di HVSr da sismica attiva), sia la curva del moto delle particelle dell'onda di Rayleigh in funzione della frequenza (curva RPM) che fornisce informazioni quantitative sul movimento effettivo della curva di Rayleigh nel mezzo attraversato.

Il metodo HS si basa sull'analisi delle velocità di gruppo (ovvero il rapporto tra spazio percorso e tempo di arrivo dell'onda, frequenza per frequenza) lungo queste tre componenti del moto sismico: tale approccio rappresenta un miglioramento ed evoluzione dei classici metodi MFA (multiple filter analysis – Dziewonski et al., 1969) e FTAN (frequency-time analysis – Natale et al., 2004) utilizzati in sismologia per analizzare la dispersione delle onde di superficie.

Per calcolare le velocità di gruppo è sufficiente una sola traccia o geofono (diversamente dalla velocità di fase, che necessita di più tracce e geofoni) e gli spettri relativi a tali velocità, quando si ha a che fare con offset limitati, possono risultare notevolmente più chiari di quelli delle velocità di fase.

L'elaborazione HS consiste nel ricercare un modello di sottosuolo compatibile con i tre spettri relativi alle velocità di gruppo Z, R e T, con la curva RPM e con la curva RVSR, analizzati tutti in modo congiunto; è quindi una tecnica estremamente robusta in quanto limita notevolmente i gradi di libertà dell'inversione dei dati sismici e abbatte sensibilmente il problema della non univocità delle soluzioni delle indagini indirette.

Le elaborazioni sono state eseguite tramite il software HoliSurface 2019 (eliosoft).

Le acquisizioni HoliSurface sono state effettuate secondo le seguenti configurazioni spaziali e temporali:

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE MFA / HOLISURFACE Sito 07 - Libbiano | |
|---|------------------------------|
| Coordinate GB Geofono Triassiale | X= 1646673 Y= 4793649 |
| Orientazione congiungente sorgenti - geofono 3D | NW-SE (N139) |
| Distanza sorgente-geofono 3D | 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m |
| Durata acquisizione | 1 s |
| Intervallo di campionamento | 500 μ s |
| Componenti acquisite | Rayleigh verticale e radiale |

Durante il processo di elaborazione, al fine di minimizzare le possibili soluzioni e cercare la più sensata coerenza tra lo spettro di velocità sperimentale e le curve di dispersione teoriche che possono generare tale spettro, ci si è avvalsi dei dati acquisiti con l'acquisizione in sismica passiva HVSr7 eseguita lungo lo stendimento.

2.4 INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il rumore sismico, generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, è presente ovunque sulla superficie terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma un ruolo fondamentale nella produzione dei microtremori è rivestito dalle onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la velocità equivalente delle onde di taglio Vs;
- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri.

Per quanto concerne il fenomeno della "doppia risonanza" (cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico, così come trasmesso in superficie, e quelle dei manufatti ivi edificati) è noto che, dal punto di vista empirico, la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza.

La quantificazione della frequenza caratteristica di sito attraverso misure dirette di microtremore sismico può quindi essere di estremo aiuto nella fase di progettazione.

Le misure dei microtremori ambientali, della durata di 30 minuti ciascuna, sono state acquisite orientando lo strumento secondo il Nord; i dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

I risultati ottenuti dall'esecuzione delle singole indagini tomografiche sono stati elaborati attraverso il software Grilla 8.0 di MoHo s.r.l..

3 ANALISI DEI RISULTATI

3.1 INDAGINI MASW / HOLISURFACE

Relativamente a ogni sito studiato, le prospezioni geofisiche eseguite per mezzo dell'analisi delle indagini MASW s.s. e HoliSurface e delle acquisizioni in sismica passiva a essi relative hanno permesso di ricavare sia il modello medio di distribuzione della velocità delle onde "S" nel sottosuolo di ogni sito indagato sia il parametro $V_{S,eq}$: per ciascun sito il modello di sottosuolo in termini di V_s è stato ottenuto dal fit congiunto delle curve di dispersione ricavate dall'indagine MASW e delle curve H/V della relativa registrazione in sismica passiva. Queste, in buona misura, fanno risalire la stima dell'effetto di sito alle caratteristiche del profilo di velocità delle onde di taglio (V_s).

Nelle schede relative a ogni sito studiato oltre a essere riportata la cartografia con l'ubicazione dell'indagine lineare e di quella puntuale e la documentazione fotografica sono riportati i dati relativi alle onde di superficie acquisite (Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione). Per ogni sito è stato ricostruito un profilo verticale delle V_s e calcolata la relativa $V_{S,eq}$, riferita al piano di campagna.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

in cui

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Nelle tabelle seguenti, per ogni acquisizione MASW, è riportato in modo schematico, il profilo verticale delle Onde S e il relativo valore del parametro $V_{S,eq}$ riferito al piano di campagna.

| Sito 01 – Lustignano – MASW_1 | | |
|--|---------------|-------------|
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | V_s [m/s] |
| 2.50 | 2.50 | 190 |
| 7.50 | 5.00 | 400 |
| 15.50 | 8.00 | 420 |
| 30.50 | 15.00 | 620 |
| 45.50 | 15.00 | 800 |
| inf. | inf. | 900 |
| $V_{S,eq}(0.0-30.0) = 441 \text{ m/s}$ | | |

| Sito 02 – Larderello – MASW_2 | | |
|---|----------------------|-----------------|
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] |
| 2.20 | 2.20 | 140 |
| 11.00 | 8.80 | 300 |
| 15.50 | 4.50 | 600 |
| 25.50 | 10.00 | 500 |
| 40.50 | 15.00 | 800 |
| inf. | inf. | 900 |
| Vs_eq(0.0-25.5)=351m/s | | |

| Sito 03 – Montecerboli 1 – MASW_3 | | |
|---|----------------------|-----------------|
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] |
| 0.50 | 0.50 | 140 |
| 1.50 | 1.00 | 230 |
| 3.50 | 2.00 | 200 |
| 6.50 | 3.00 | 280 |
| 11.50 | 5.00 | 360 |
| 15.50 | 4.00 | 400 |
| 45.50 | 30.00 | 550 |
| inf. | inf. | 820 |
| Vs_eq(0.0-30.0)=380m/s | | |

| Sito 04 – Montecerboli 2 – MASW_4 | | |
|---|----------------------|-----------------|
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] |
| 0.40 | 0.40 | 80 |
| 3.00 | 2.60 | 150 |
| 4.50 | 1.50 | 260 |
| 9.50 | 5.00 | 290 |
| 17.50 | 8.00 | 270 |
| 47.50 | 30.00 | 540 |
| inf. | inf. | 820 |
| Vs_eq(0.0-30.0)=306m/s | | |

| Sito 05 – Montecerboli 3 – MASW_5 | | |
|---|----------------------|-----------------|
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] |
| 0.30 | 0.30 | 90 |
| 2.50 | 2.20 | 160 |
| 4.00 | 1.50 | 230 |
| 9.50 | 5.50 | 300 |
| 16.50 | 7.00 | 270 |
| 46.50 | 30.00 | 540 |
| inf. | inf. | 800 |
| Vs_eq(0.0-30.0)=323m/s | | |

| Sito 06 – Montecerboli 4 – MASW_6 | | |
|---|----------------------|-----------------|
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] |
| 0.40 | 0.40 | 80 |
| 2.50 | 2.10 | 140 |
| 6.50 | 4.00 | 225 |
| 11.00 | 4.50 | 210 |
| 19.00 | 8.00 | 350 |
| 34.00 | 15.00 | 440 |
| inf. | inf. | 580 |
| Vs_eq(0.0-30.0)=280m/s | | |

| Sito 07 – Libbiano – HS_7 | | |
|---|----------------------|-----------------|
| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] |
| 0.60 | 0.60 | 160 |
| 2.00 | 1.40 | 290 |
| 7.00 | 5.00 | 330 |
| 19.00 | 12.00 | 550 |
| 24.00 | 5.00 | 780 |
| 44.00 | 20.00 | 840 |
| inf. | inf. | 1120 |
| Vs_eq(0.0-24.0)=462m/s | | |

3.2 INDAGINI HVSR:

Nella tabella seguente si riportano, per ogni indagine tromografica, la denominazione, le coordinate Gauss Boaga, i parametri di acquisizione e la data di esecuzione:

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINI HVSR | | | | |
|--|------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|
| Denominazione | Coordinate Gauss Boaga | Durata acquisizione | Frequenza di campionamento | Data acquisizione |
| Sito 01 | X= 1646477 Y= 4783070 | 30 min | 128 Hz | 08.10.2024 |
| Sito 02 | X= 1652525 Y= 4788994 | 30 min | 128 Hz | 08.10.2024 |
| Sito 03 | X= 1652794 Y= 4790398 | 30 min | 128 Hz | 08.10.2024 |
| Sito 04 | X= 1652580 Y= 4790451 | 30 min | 128 Hz | 08.10.2024 |
| Sito 05 | X= 1652527 Y= 4790445 | 30 min | 128 Hz | 08.10.2024 |
| Sito 06 | X= 1652266 Y= 4790438 | 30 min | 128 Hz | 08.10.2024 |
| Sito 07 | X= 1646663 Y= 4793657 | 30 min | 128 Hz | 08.10.2024 |

Tabella riassuntiva indagini tromografiche.

I risultati ottenuti dall'esecuzione delle singole indagini tromografiche, elaborate attraverso il software Grilla 8.0 di MoHo srl., sono stati verificati secondo le linee guida Sesame; in particolare, nella tabella sottostante si riporta la legenda relativa ai parametri verificati ai criteri utilizzati.

| | | | | | |
|---|---|-----------|------------|------------|------------|
| L_w | lunghezza della finestra | | | | |
| n_w | numero di finestre usate nell'analisi | | | | |
| $n_c = L_w n_w f_0$ | numero di cicli significativi | | | | |
| f | frequenza attuale | | | | |
| f_0 | frequenza del picco H/V | | | | |
| σ_f | deviazione standard della frequenza del picco H/V | | | | |
| $\varepsilon(f_0)$ | valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | | | | |
| A_0 | ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0 | | | | |
| $A_{H/V}(f)$ | ampiezza della curva H/V alla frequenza f | | | | |
| f^- | frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$ | | | | |
| f^+ | frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$ | | | | |
| $\sigma_A(f)$ | deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa | | | | |
| $\sigma_{\log H/V}(f)$ | deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$ | | | | |
| $\theta(f_0)$ | valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ | | | | |
| Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$ | | | | | |
| Intervallo di freq. [Hz] | < 0.2 | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0 | 1.0 – 2.0 | > 2.0 |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | 0.25 f_0 | 0.2 f_0 | 0.15 f_0 | 0.10 f_0 | 0.05 f_0 |
| $\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |

Legenda Criteri Sesame, 2005

Nella tabella sottostante sono riportati, per ogni singola indagine tromografica, i valori della frequenza di picco e i valori di picco negli intervalli di frequenza inferiore a 1 Hz, compreso tra 1 Hz e 10 Hz e maggiore di 10 Hz.

| Denominazione | Intervallo F < 1 Hz | | Intervallo 1 Hz < F < 10 Hz | | Intervallo F > 10 Hz | |
|----------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | frequenza di picco | valore di picco | frequenza di picco | valore di picco | frequenza di picco | valore di picco |
| Sito 01 | - | - | 2.5 ÷ 3.5 (max 2.6) | 2.5 | 19.28 | 3.14 |
| Sito 02 | - | - | 4.5 ÷ 6.5 (max 5.84) | circa 3 | - | - |
| Sito 03 | - | - | 2.5 ÷ 4.5 (max 2.69) | 2.48 | - | - |
| Sito 04 | - | - | 2.78 | 3.44 | 12.2 | 2.3 |
| Sito 05 | - | - | 2.5 | 2.89 | 13.75 | 2.5 |
| Sito 06 | - | - | - | - | - | - |
| Sito 07 | - | - | 3 ÷ 5 (max 3.72) | 2.36 | - | - |

Tabella delle frequenze di risonanza evidenziate nelle misure effettuate.

Nella tabella seguente è riportata la classificazione della qualità delle misure tromografiche eseguite così come definita da *Albarello Castellaro* "Tecniche sismiche passive: indagine a stazione singola" Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2 – 2011.

| Denominazione misura | Durata misura (> 15-20 min) | Stazionarietà del segnale | Isotropia del segnale (< 30% max) | Assenza di disturbi significativi | Plausibilità fisica | Robustezza statistica (SESAME) | Presenza di picchi significativi | Classe di qualità |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| Sito 01 | si | si | si | si | si | si | si | A1 |
| Sito 02 | si | si | si | si | si | si | si | A1 |
| Sito 03 | si | si | si | si | si | si | si | A1 |
| Sito 04 | si | si | si | si | si | si | si | A1 |
| Sito 05 | si | si | si | si | si | si | si | A1 |
| Sito 06 | si | si | si | si | si | si | no | A2 |
| Sito 07 | si | si | no | si | si | si | si | B |

Classificazione della qualità delle misure di microtremore ambientale ai fini della microzonazione sismica. Verifica dei criteri di qualità.

Per ogni sito indagato, le schede dell'indagine HVSR relativa si trovano successive a quelle dell'indagine MASW congiunta.

All'interno di ogni scheda, è riportato il grafico della curva sperimentale H/V con lisciamento al 10%, la serie temporale H/V, lo spettro indicante la direzionalità del rumore, gli spettri delle tre componenti del moto in velocità con lisciamento al 10% e all'1% e la tabella con i risultati delle verifiche eseguite secondo le linee guida Sesame.

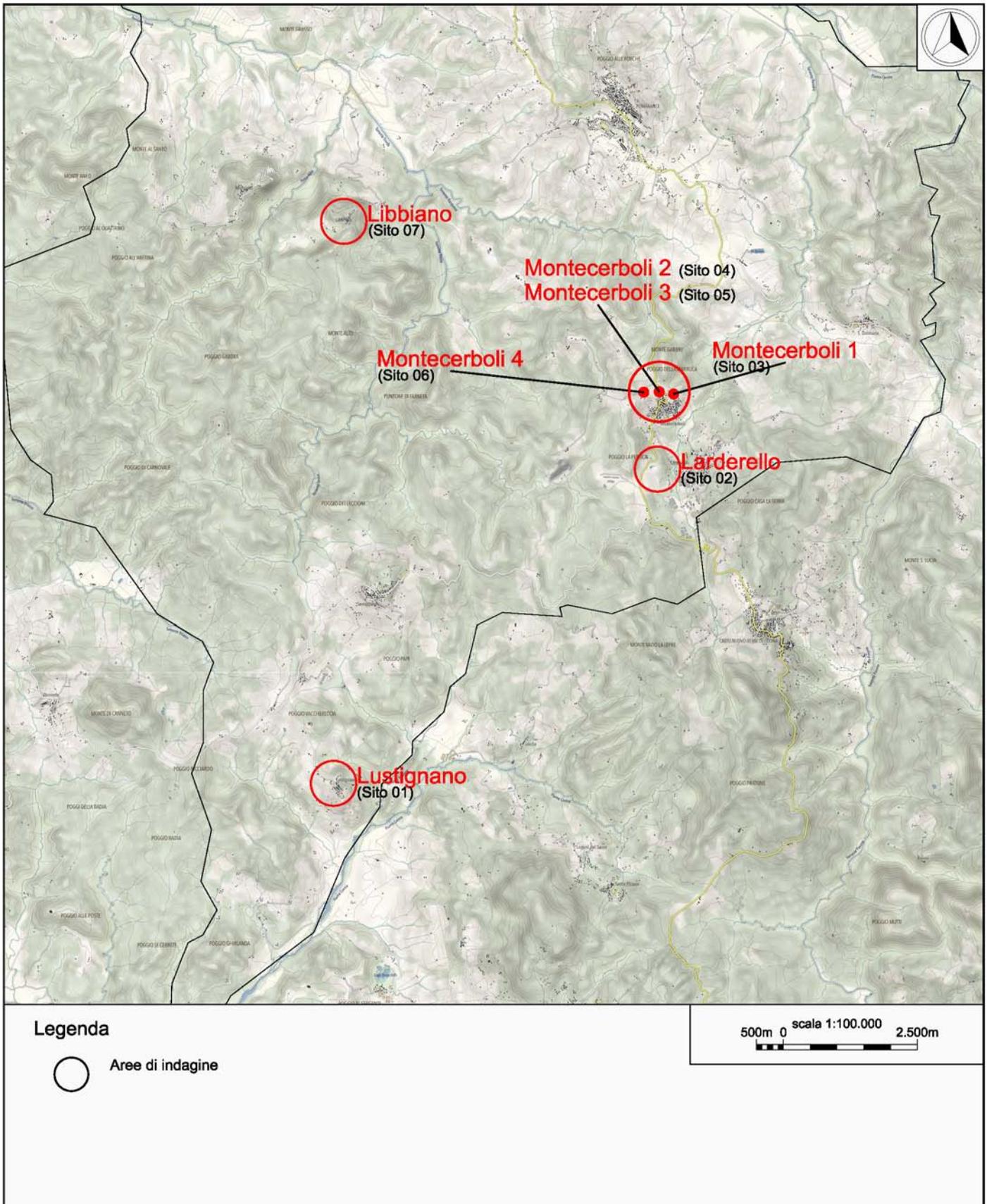
È inoltre riportato il confronto fra curva sperimentale H/V e curva teorica relative al modello di sottosuolo proposto (e, conseguentemente, il profilo delle V_s calcolato sulla relativa verticale).

Pisa, Gennaio 2024

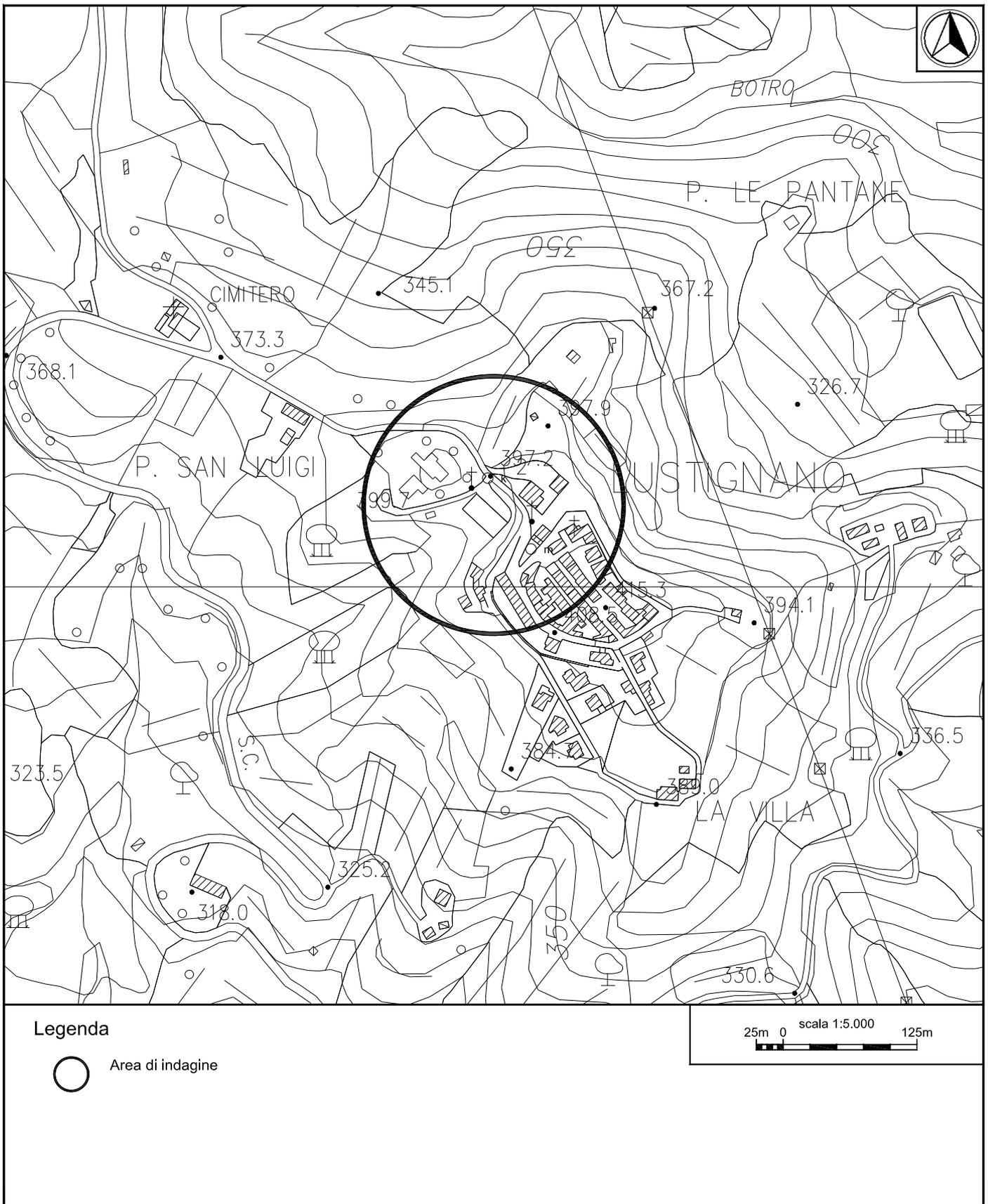
P3 s.n.c.
P3 s.n.c.
 Piazza Martiri della Libertà, 22/23
 56127 PISA
 C.F./P. IVA 01923910507
Atto Benvenuti

Nelle pagine seguenti, come indicato in tabella, per ogni sito indagato sono riportate la cartografia con l'ubicazione delle indagini eseguite, le elaborazioni specifiche e la documentazione fotografica.

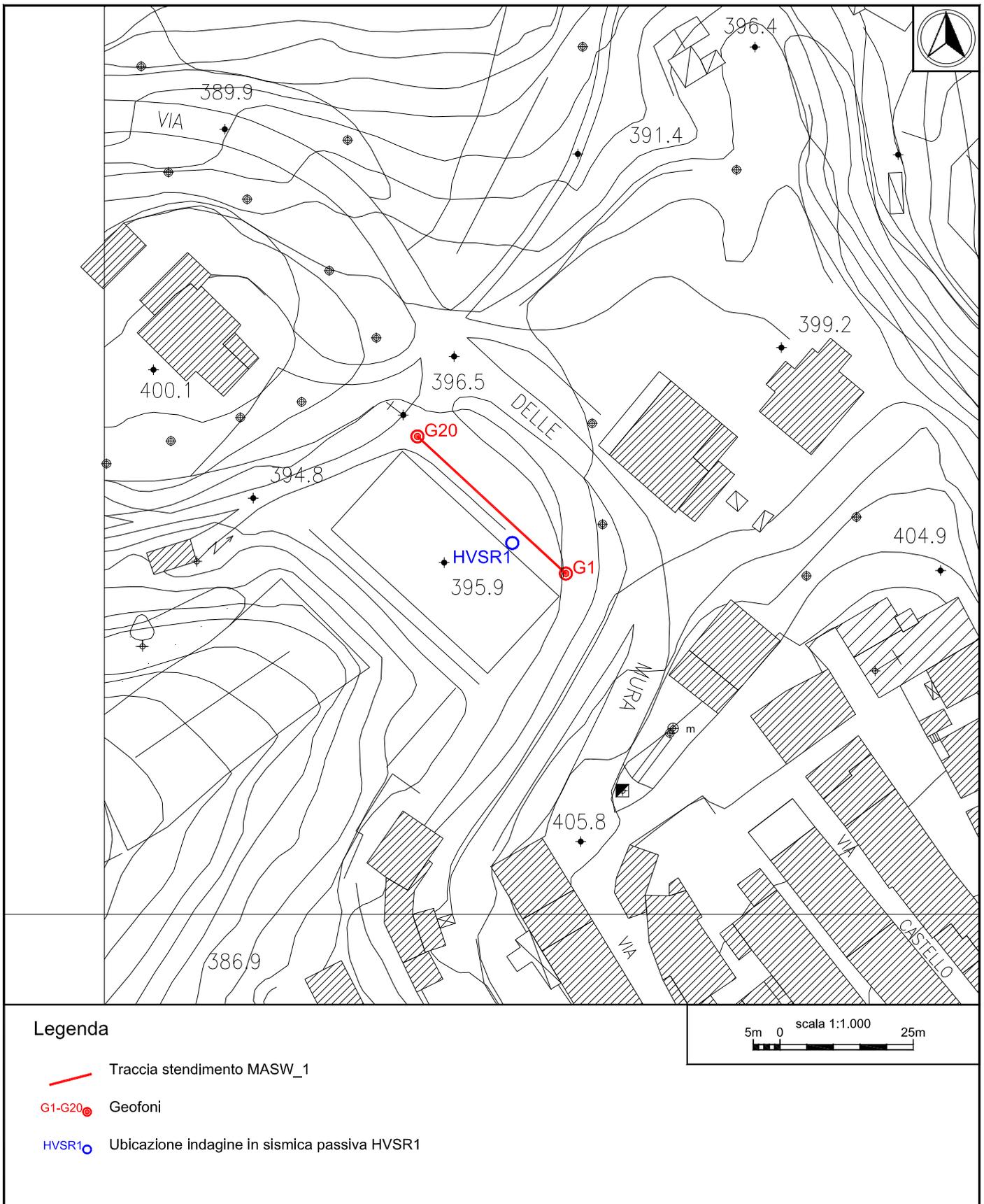
| <i>Indice schede per sito</i> | |
|-------------------------------|--------|
| Denominazione | Pagina |
| Sito 01 – Lustignano | 16 |
| Sito 02 – Larderello | 25 |
| Sito 03 – Montecerboli 1 | 34 |
| Sito 04 – Montecerboli 2 | 43 |
| Sito 05 – Montecerboli 3 | 52 |
| Sito 06 – Montecerboli 4 | 61 |
| Sito 07 – Libbiano | 70 |



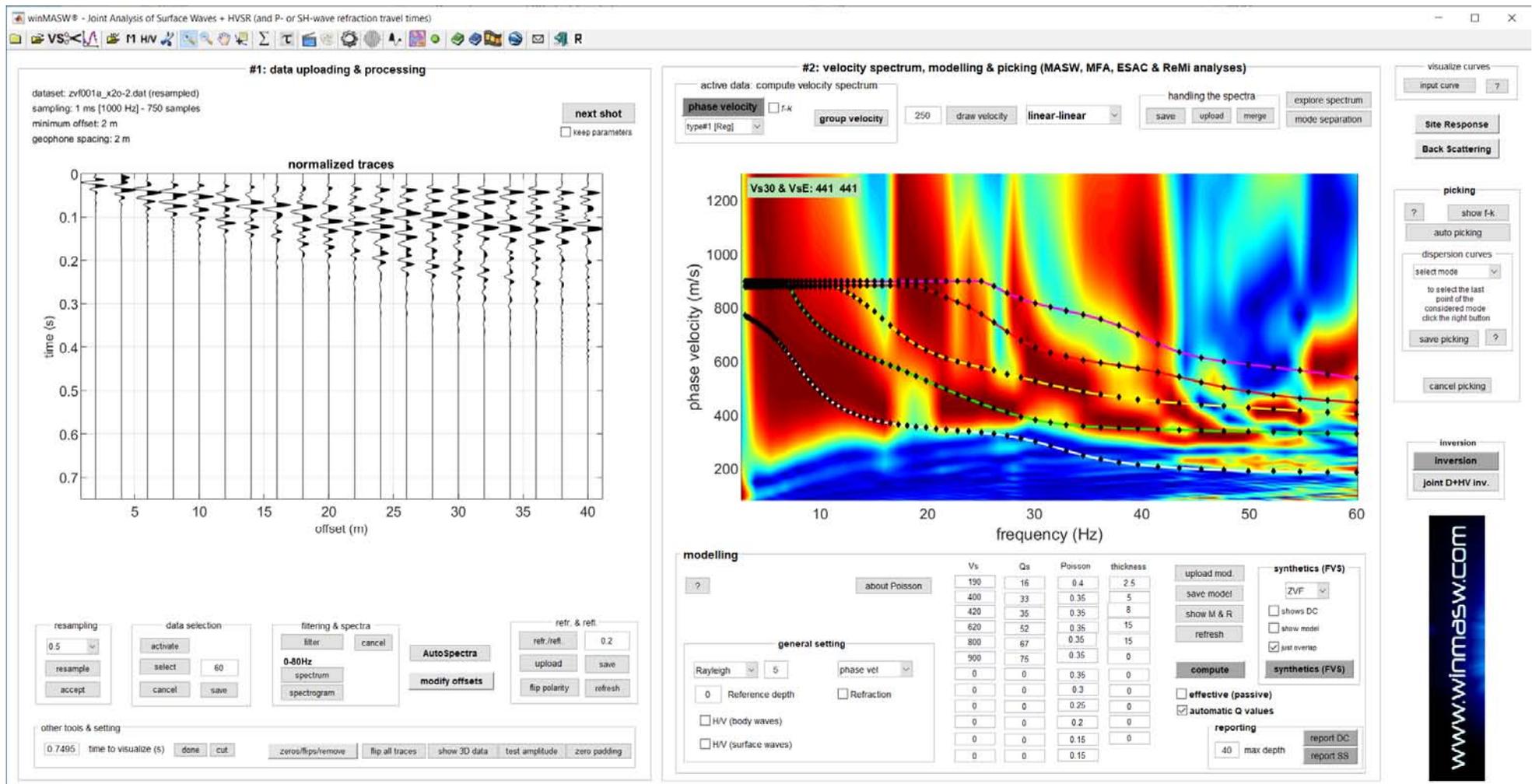
Ubicazione indagini – Schema generale.



Sito 01 - Lustignano. Ubicazione indagine MASW_1 e acquisizione in sismica passiva HVSR1 - Inquadramento generale.

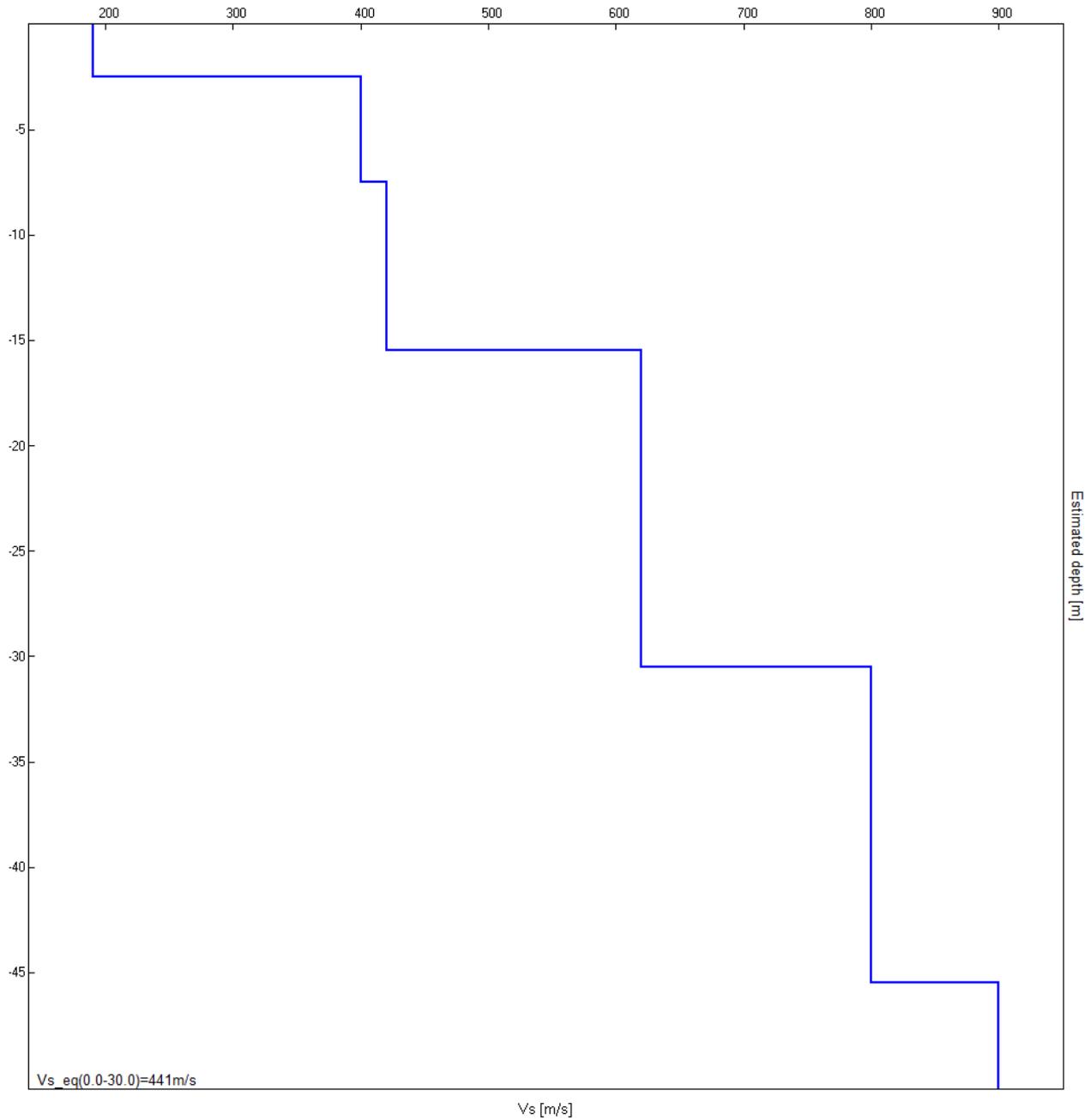


Sito 01 - Lustignano. Ubicazione indagine MASW_1 e acquisizione in sismica passiva HVSr1 – Inquadramento di dettaglio.



Sito 01 - Lustignano. Indagine MASW_1. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.





Sito 01 - Lustignano. Indagine MASW_1 - Profilo verticale delle Vs.

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 2.50 | 2.50 | 190 |
| 7.50 | 5.00 | 400 |
| 15.50 | 8.00 | 420 |
| 30.50 | 15.00 | 620 |
| 45.50 | 15.00 | 800 |
| inf. | inf. | 900 |

Vs_eq(0.0-30.0)=441m/s

J24001_01_08_POMARANCE_TR, LUSTIGNANO HVSR1

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 08/01/24 09:56:24 Fine registrazione: 08/01/24 10:26:23

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00".

Analizzato 96% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

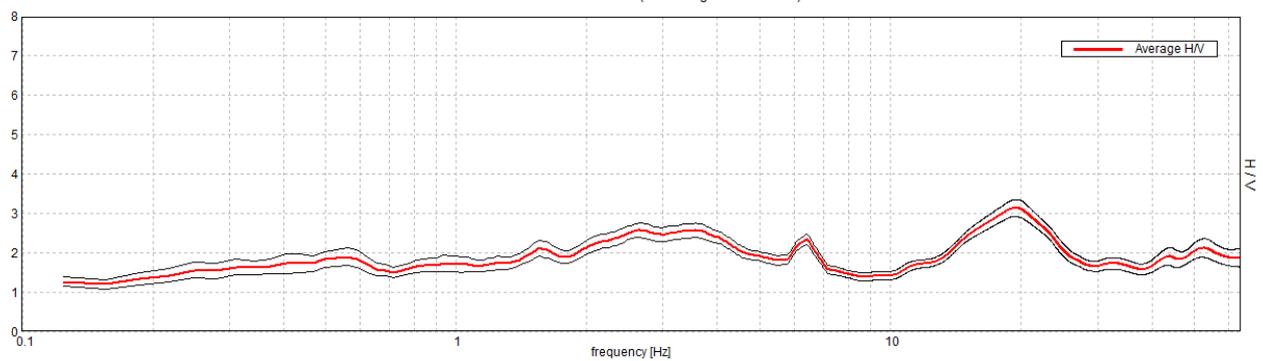
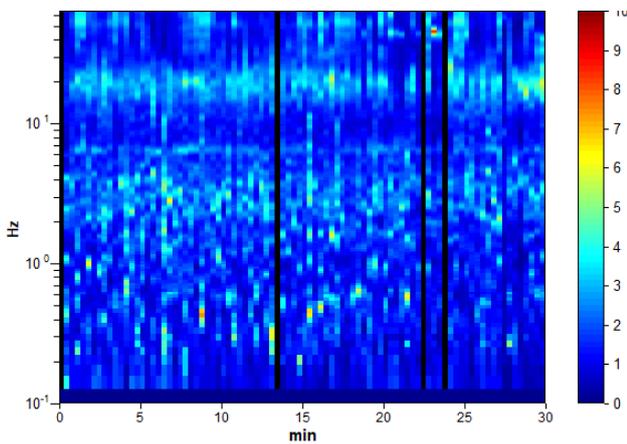
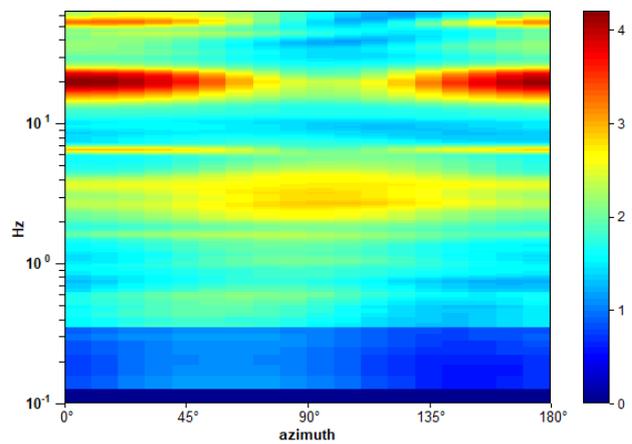
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

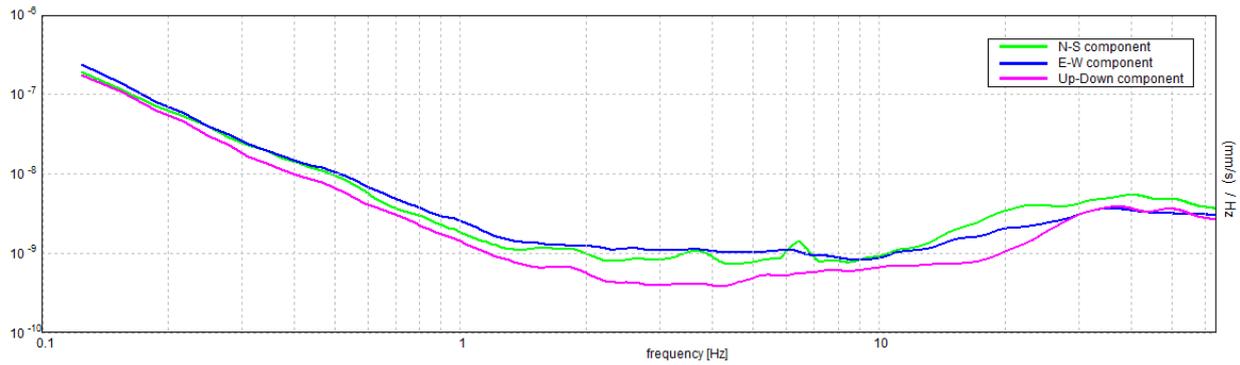
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

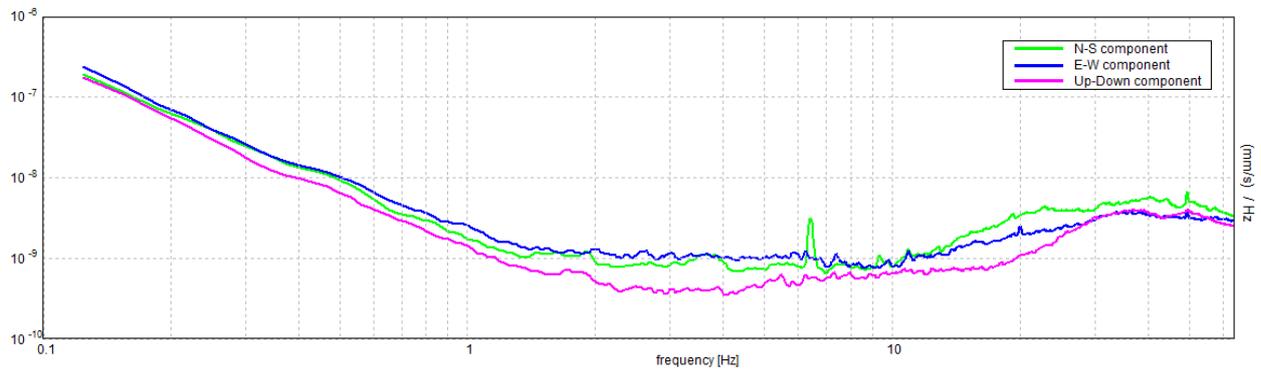
Max. H/V at 19.28 ± 4.82 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

**SERIE TEMPORALE H/V****DIREZIONALITA' H/V**

SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI (CON LISCIAMENTO ALL'1%)



Picco H/V a 19.28 ± 4.82 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

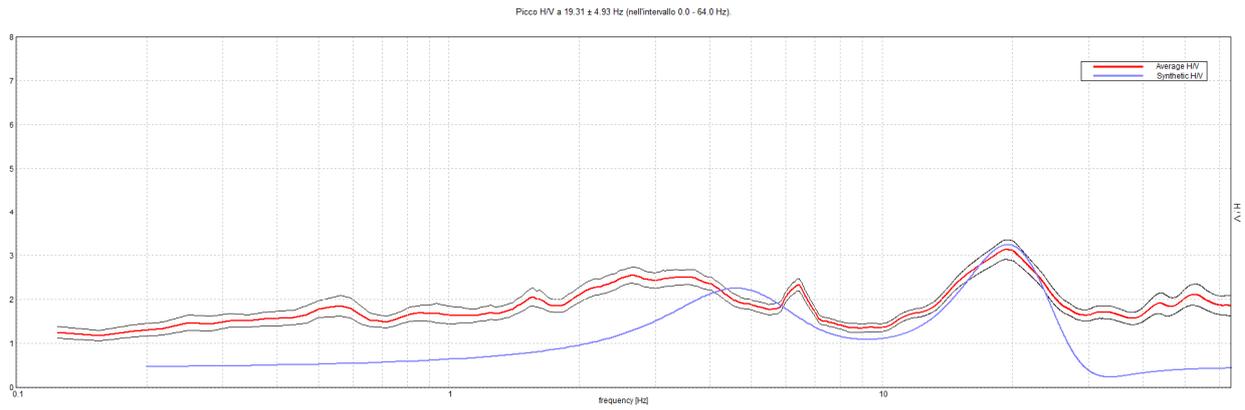
| | | | |
|--|-------------------------|-----------|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $19.28 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $33163.8 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 926 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

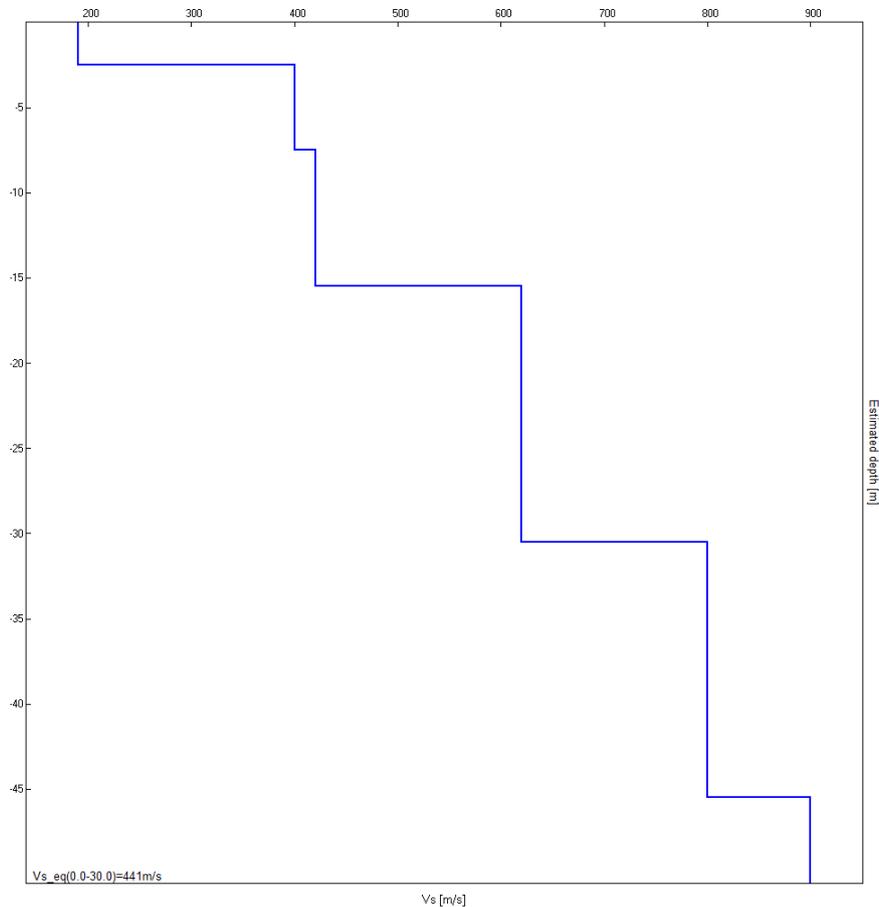
| | | | |
|--|---------------------|-----------|-----------|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 10.75 Hz | OK | |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | | | NO |
| $A_0 > 2$ | $3.14 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.24975 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $4.81552 < 0.96406$ | | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.2128 < 1.58$ | OK | |

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 2.50 | 2.50 | 190 |
| 7.50 | 5.00 | 400 |
| 15.50 | 8.00 | 420 |
| 30.50 | 15.00 | 620 |
| 45.50 | 15.00 | 800 |
| inf. | inf. | 900 |

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=441m/s$

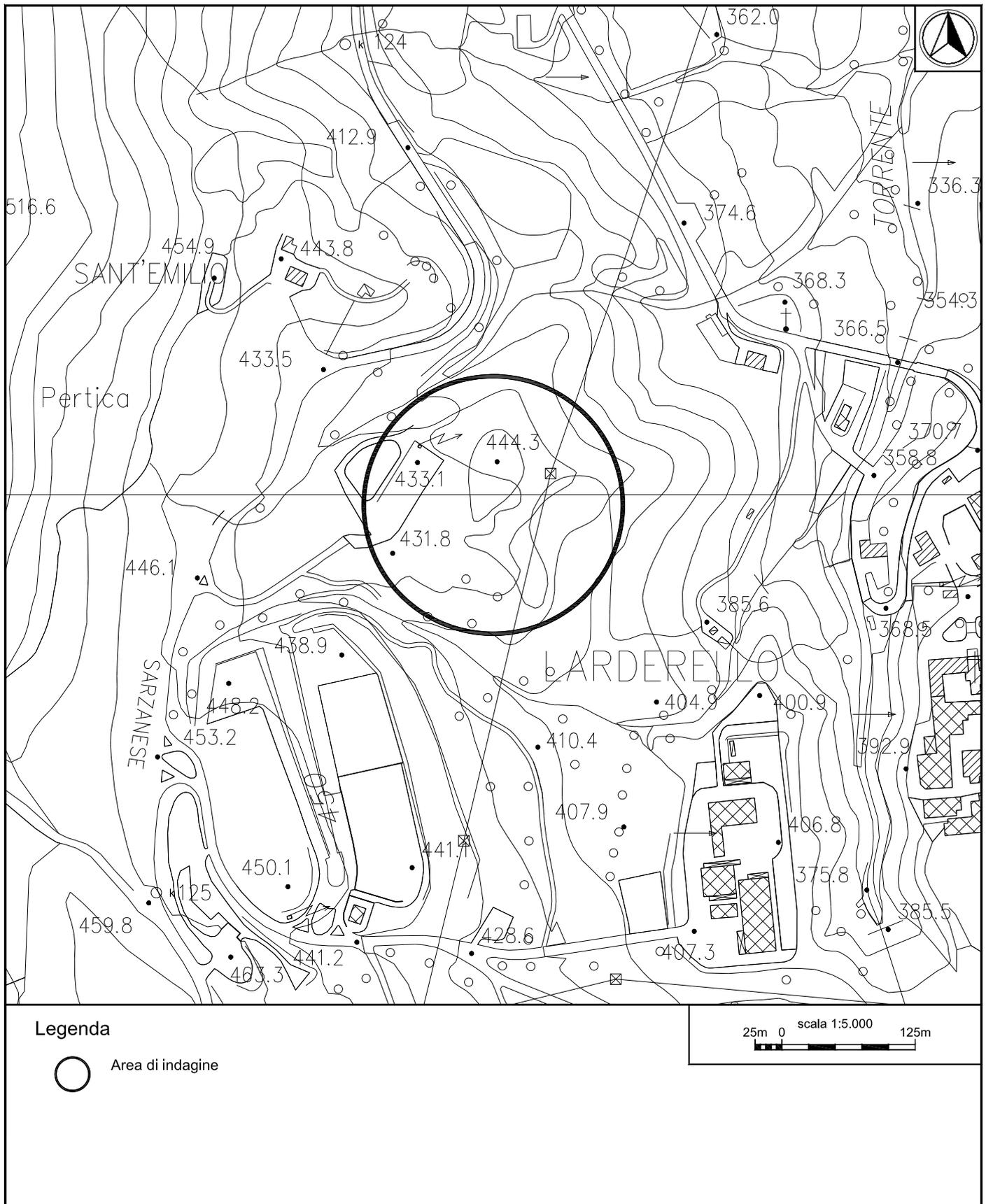




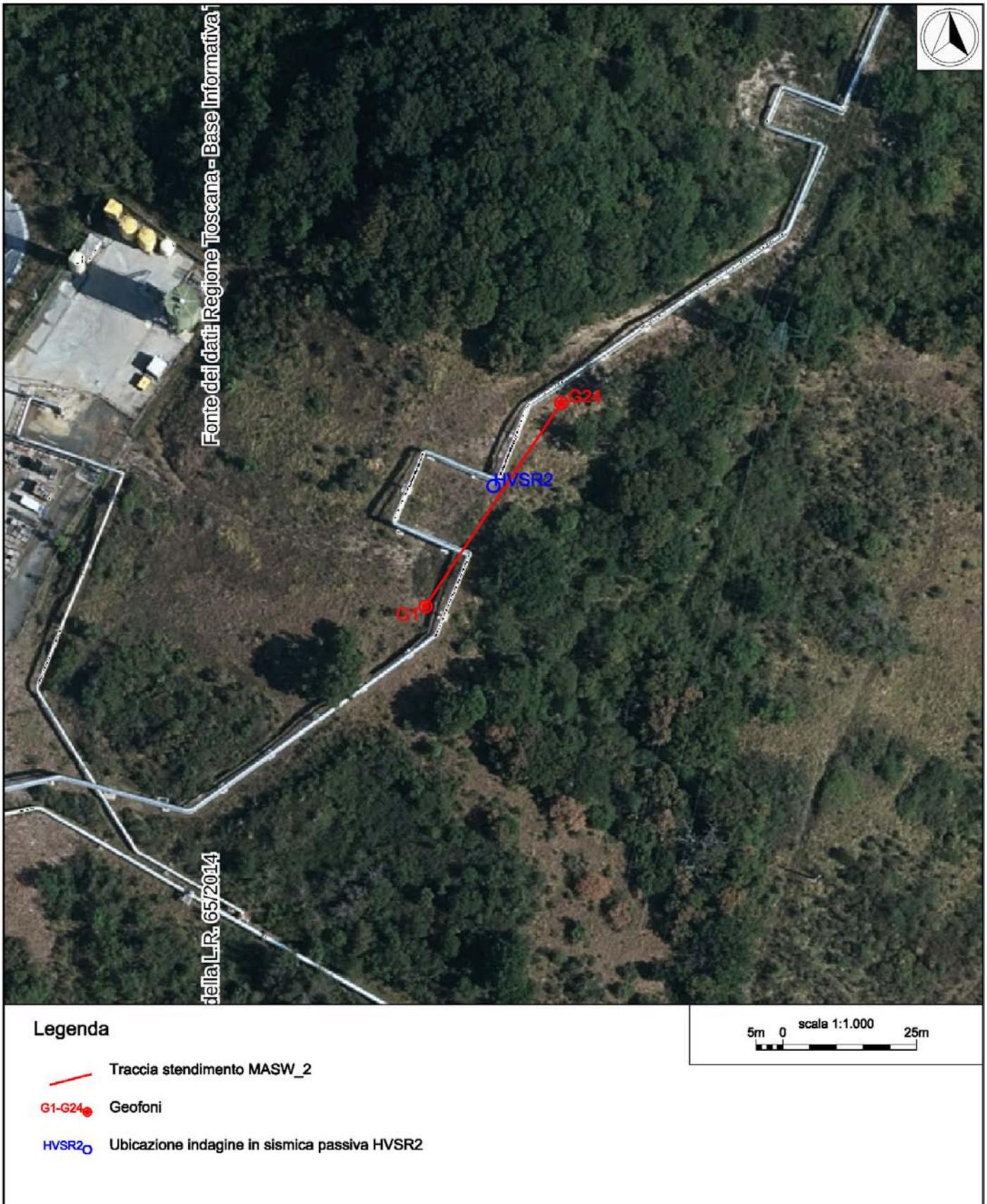
Sito 01 - Lustignano. Indagine MASW_1 – Documentazione fotografica.



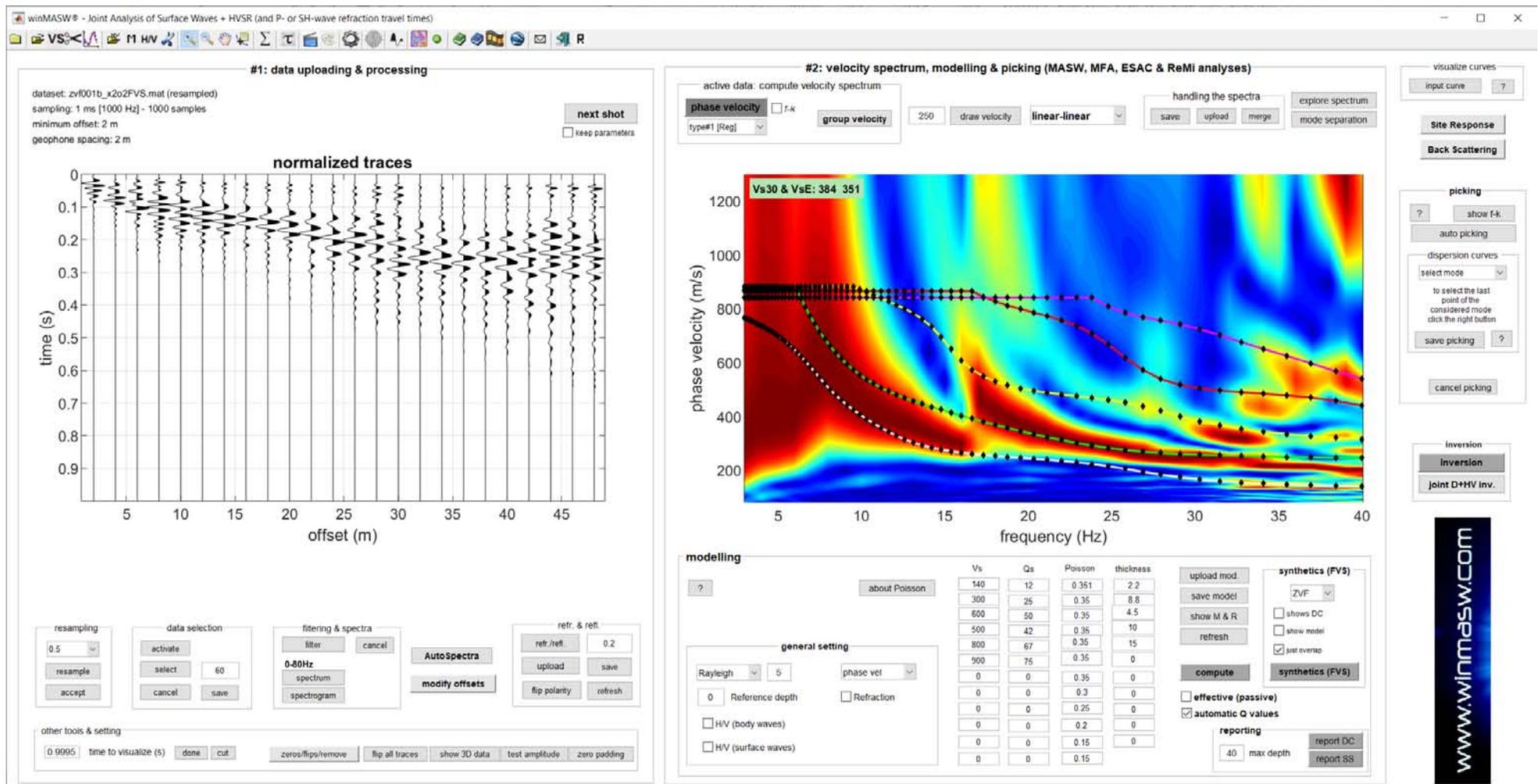
Sito 01 - Lustignano. Indagine in sismica passiva HVSR1 – Documentazione fotografica.



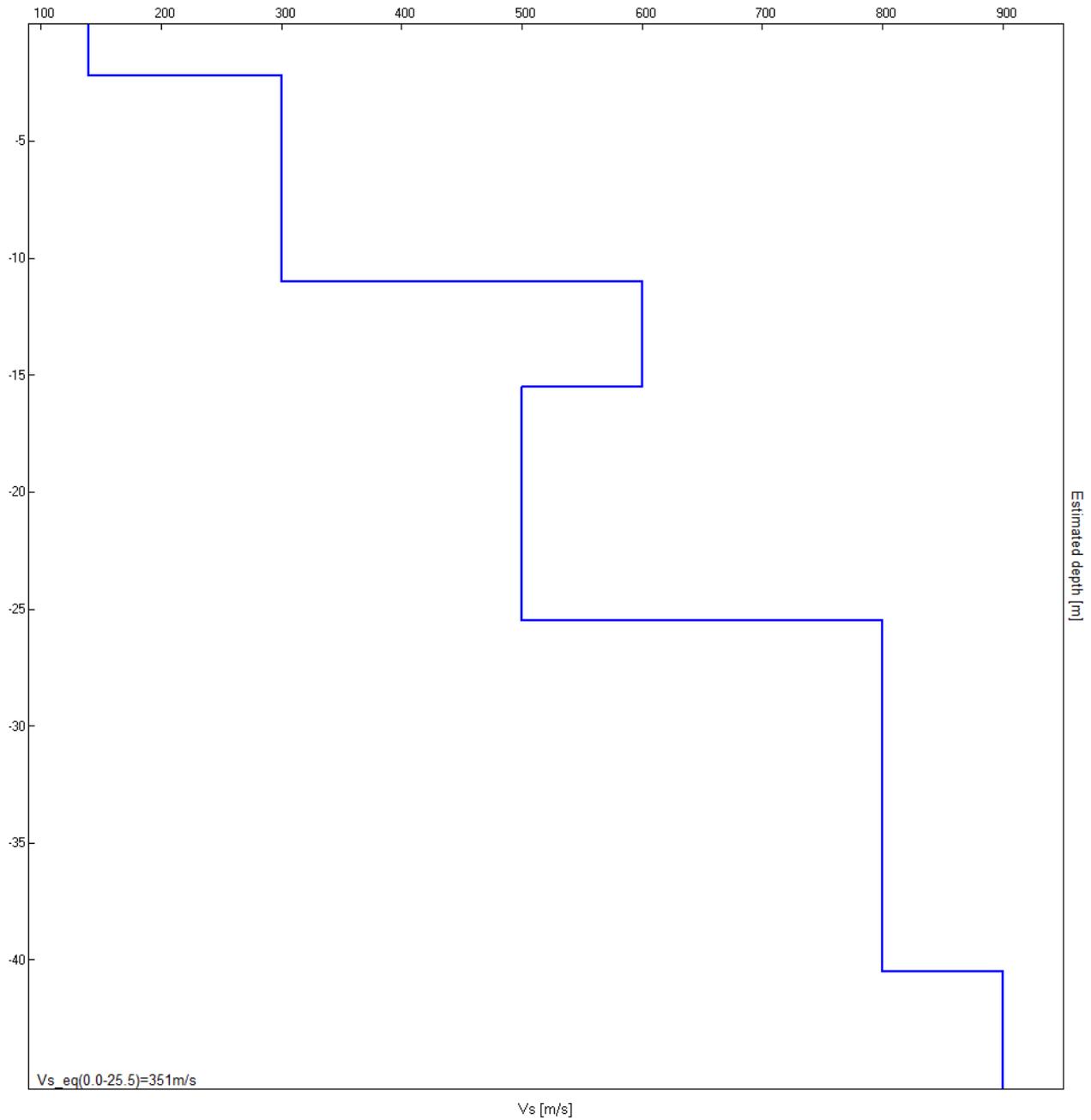
Sito 02 - Larderello. Ubicazione indagine MASW_2 e acquisizione in sismica passiva HVSR2 - Inquadramento generale.



Sito 02 L- arderello. Ubicazione indagine MASW_2 e acquisizione in sismica passiva HVS2R2 – Inquadramento di dettaglio.



Sito 02 - Larderello. Indagine MASW_2. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.



Sito 02 - Larderello. Indagine MASW_2 - Profilo verticale delle Vs.

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 2.20 | 2.20 | 140 |
| 11.00 | 8.80 | 300 |
| 15.50 | 4.50 | 600 |
| 25.50 | 10.00 | 500 |
| 40.50 | 15.00 | 800 |
| inf. | inf. | 900 |

Vs_eq(0.0-25.5)=351m/s

J24001_01_08_POMARANCE_TR, LARDERELLO HVSR2

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 08/01/24 12:00:23 Fine registrazione: 08/01/24 12:30:22

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

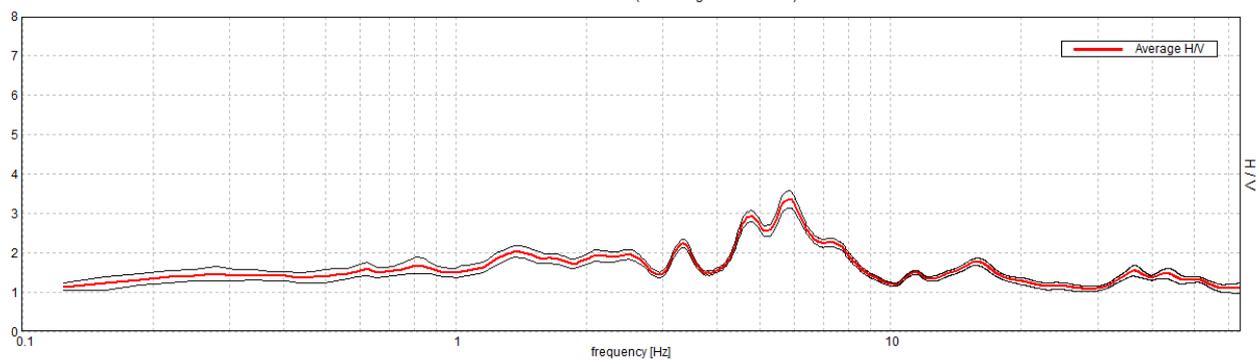
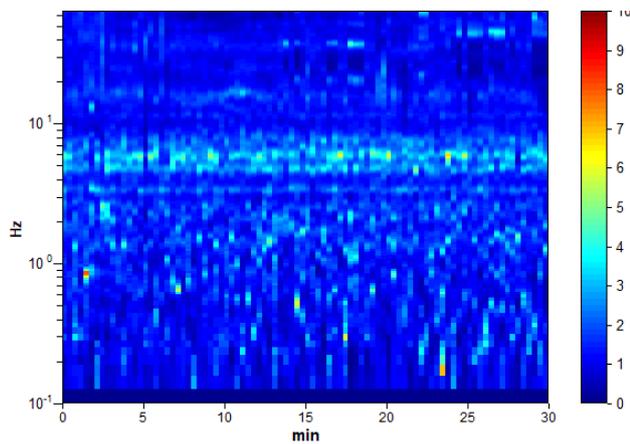
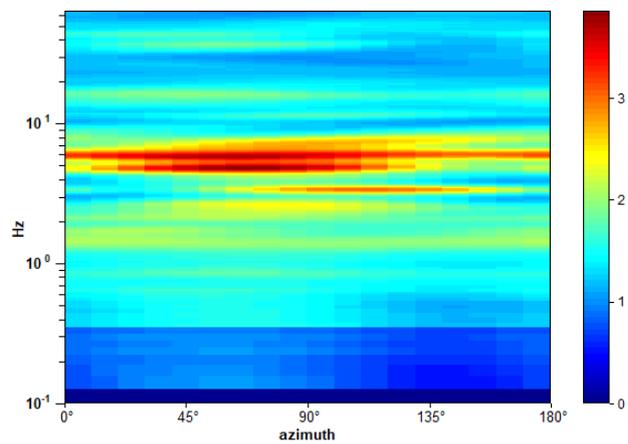
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

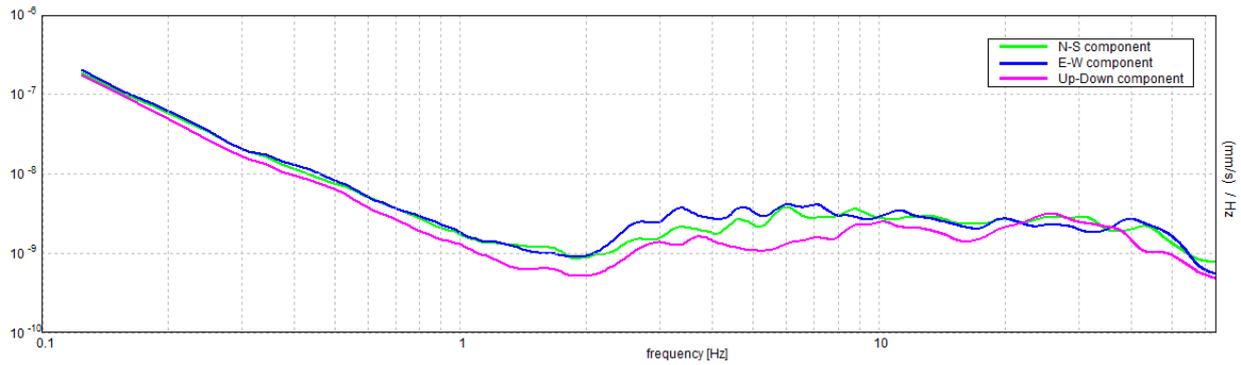
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

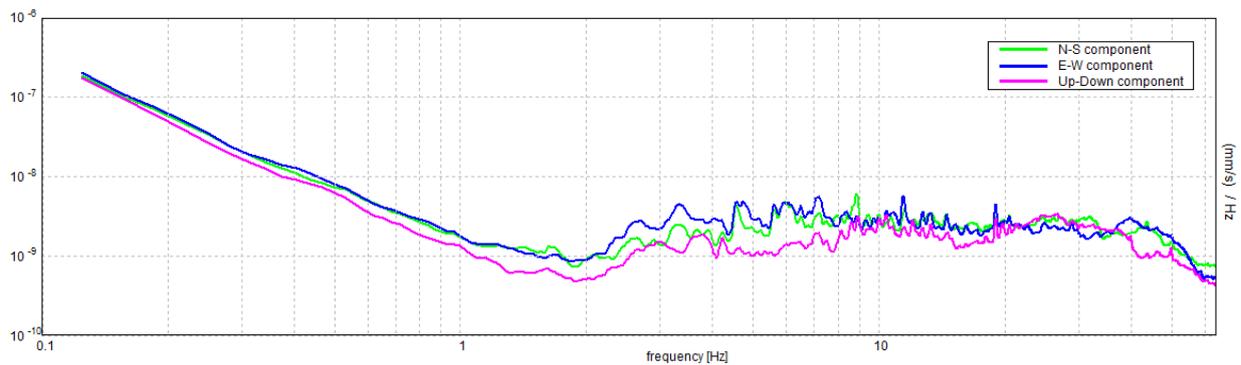
Max. H/V at 5.84 ± 0.53 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

**SERIE TEMPORALE H/V****DIREZIONALITA' H/V**

SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI (CON LISCIAMENTO ALL'1%)



Picco H/V a 5.84 ± 0.53 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

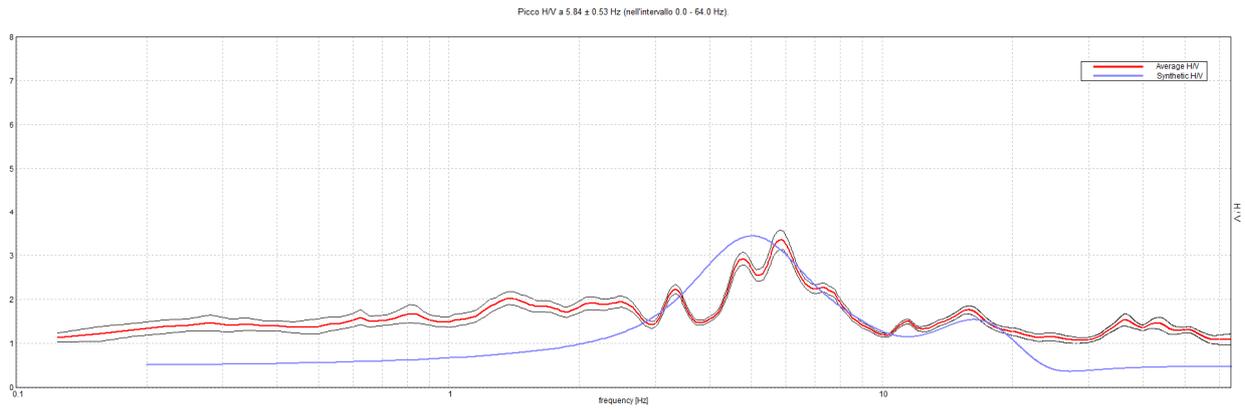
| | | | |
|--|-------------------------|-----------|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $5.84 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $10518.8 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 282 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

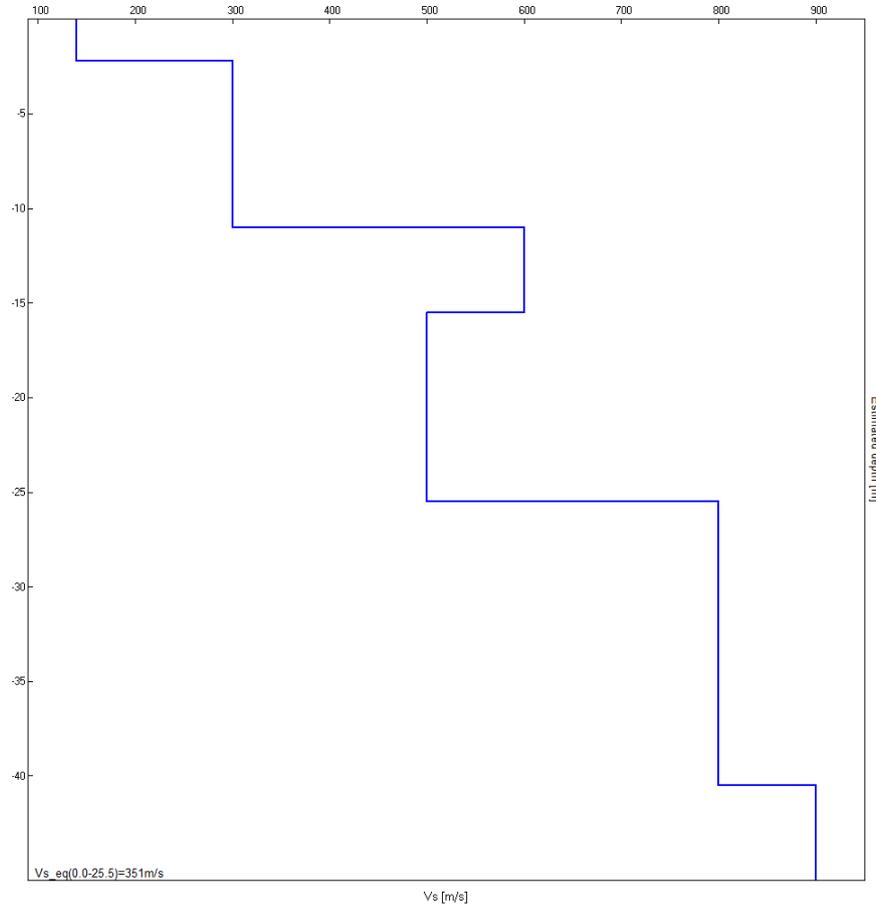
| | | | |
|--|---------------------|-----------|-----------|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 4.156 Hz | OK | |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 8.438 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | $3.35 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.09137 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.53393 < 0.29219$ | | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.2153 < 1.58$ | OK | |

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 2.20 | 2.20 | 140 |
| 11.00 | 8.80 | 300 |
| 15.50 | 4.50 | 600 |
| 25.50 | 10.00 | 500 |
| 40.50 | 15.00 | 800 |
| inf. | inf. | 900 |

Vs_eq(0.0-25.5)=351m/s

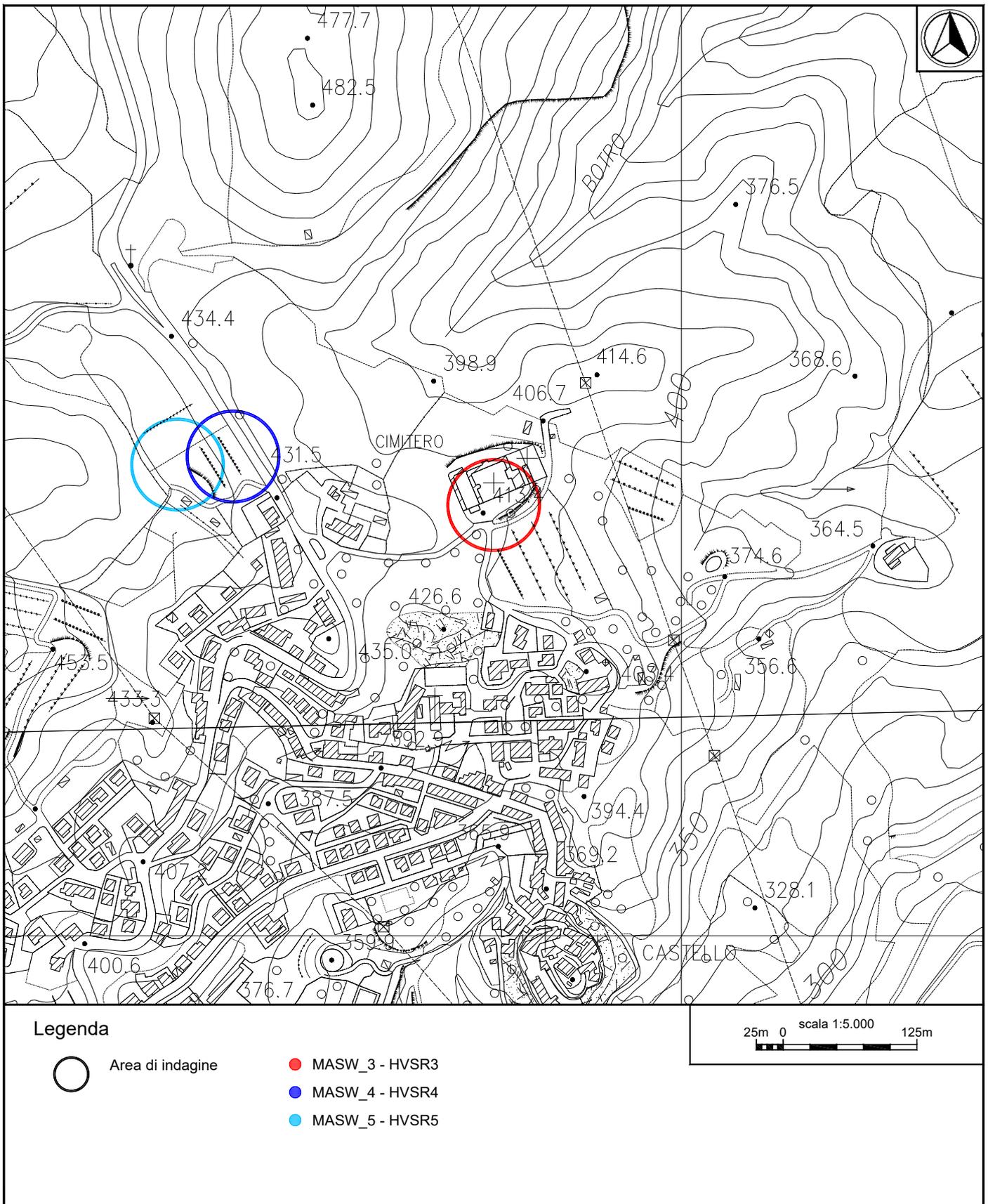




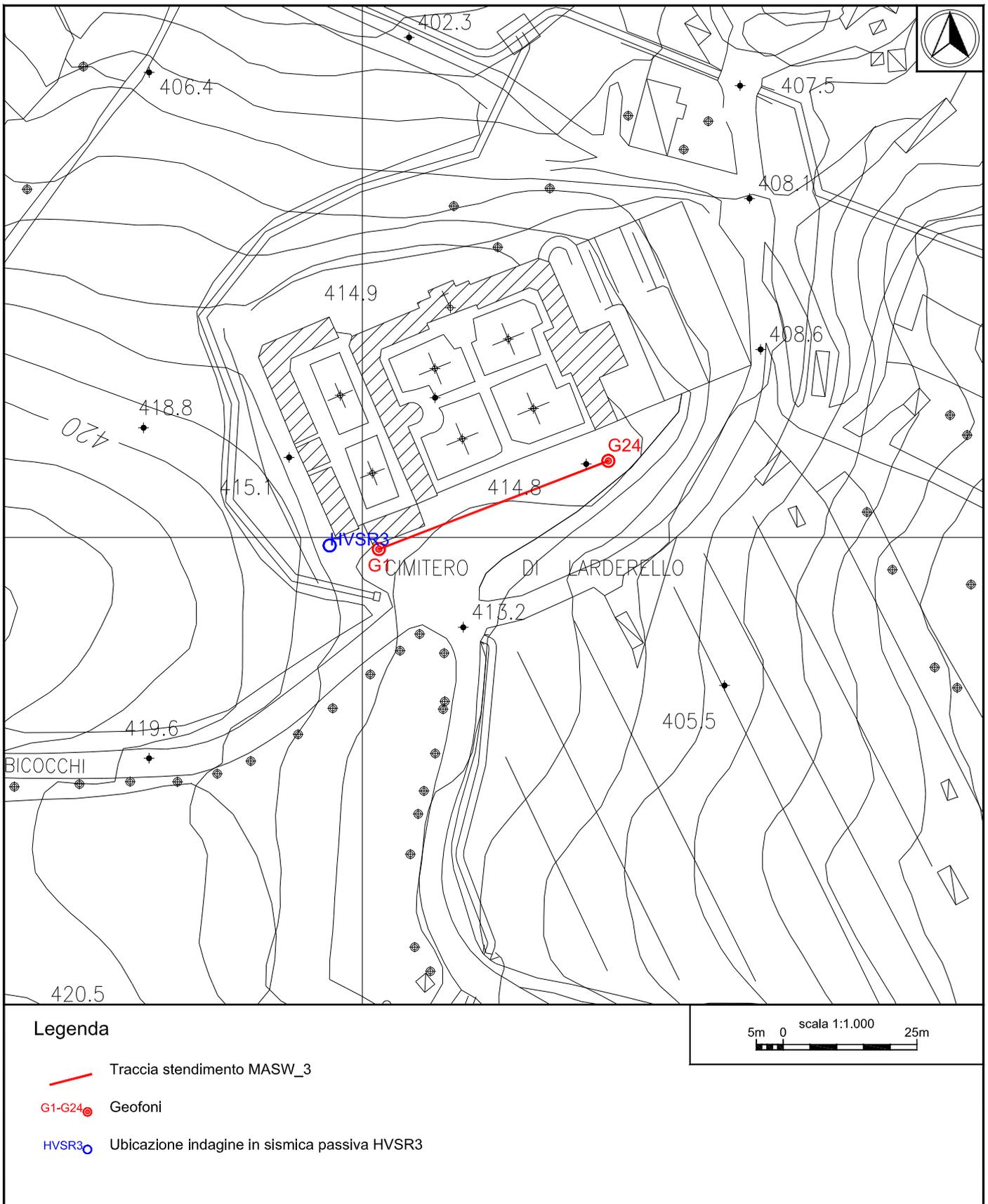
Sito 02 - Larderello. Indagine MASW_2 – Documentazione fotografica.



Sito 02 - Larderello. Indagine in sismica passiva HVSr2 – Documentazione fotografica.



Sito 03 – Montecerboli 1. Ubicazione indagine MASW_3 e acquisizione in sismica passiva HVSR3 - Inquadramento generale.

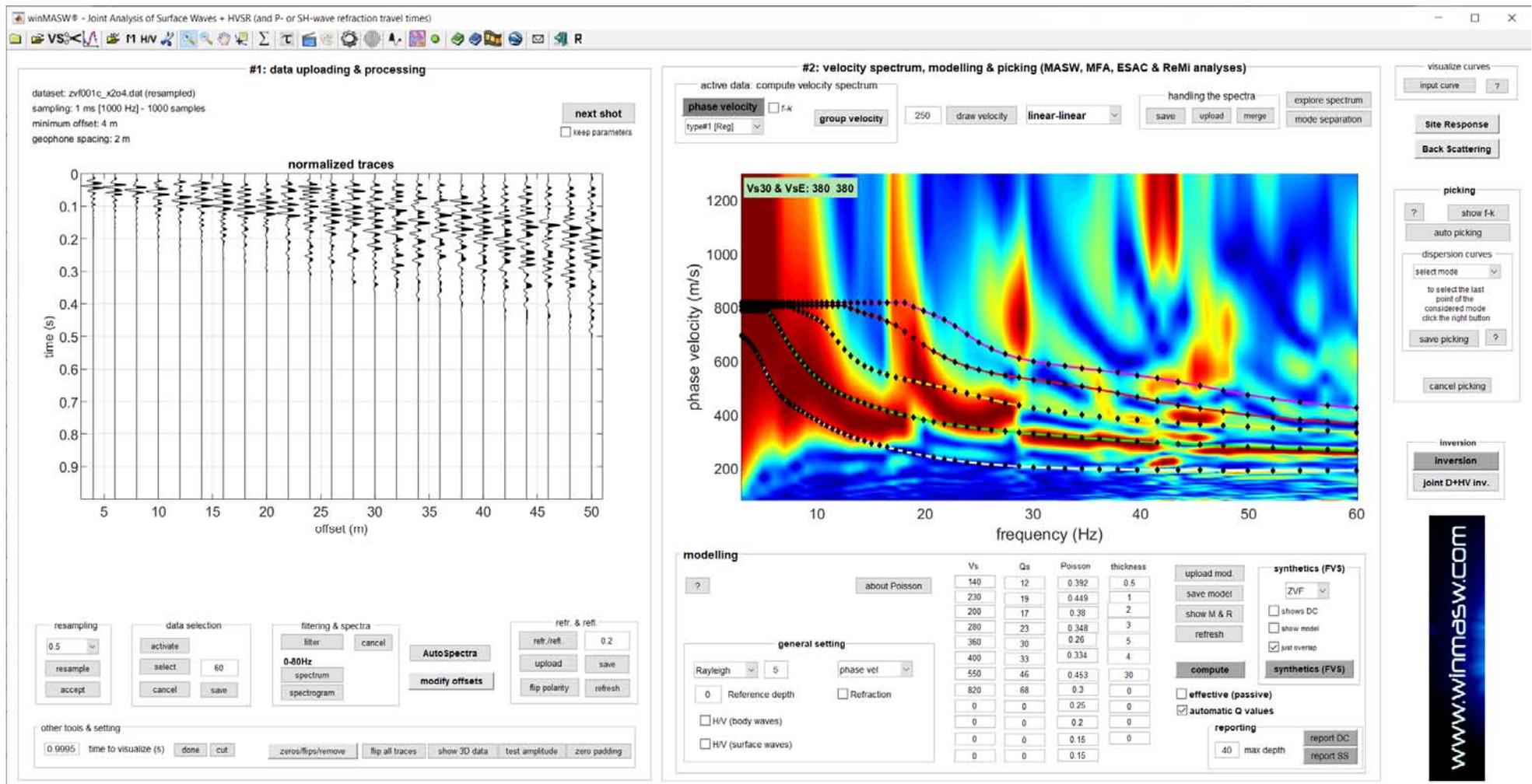


Legenda

-  Traccia stendimento MASW_3
-  Geofoni
-  Ubicazione indagine in sismica passiva HVSr3

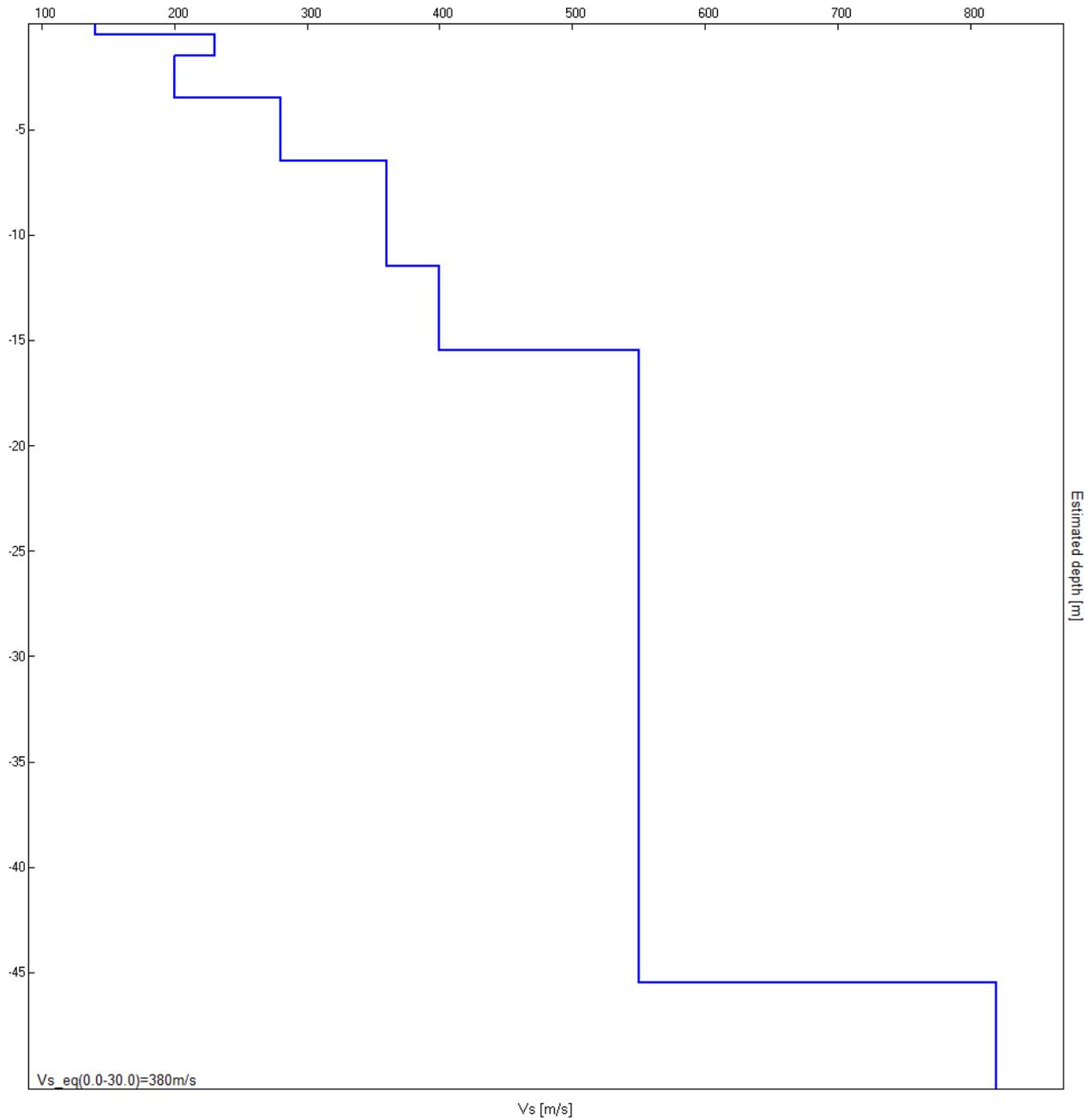
5m 0 scala 1:1.000 25m

Sito 03 – Montecerboli 1. Ubicazione indagine MASW_3 e acquisizione in sismica passiva HVSr3 – Inquadramento di dettaglio.



Sito O3 – Montecerboli 1. Indagine MASW_3. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.





Sito 03 – Montecerboli 1. Indagine MASW_3 - Profilo verticale delle Vs.

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.50 | 0.50 | 140 |
| 1.50 | 1.00 | 230 |
| 3.50 | 2.00 | 200 |
| 6.50 | 3.00 | 280 |
| 11.50 | 5.00 | 360 |
| 15.50 | 4.00 | 400 |
| 45.50 | 30.00 | 550 |
| inf. | inf. | 820 |

Vs_eq(0.0-30.0)=380m/s

J J24001_01_08_POMARANCE_TR, MOTECERBOLI_1 (CIMIT.) HVSR3

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 08/01/24 13:17:34 Fine registrazione: 08/01/24 13:47:33

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00".

Analizzato 99% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

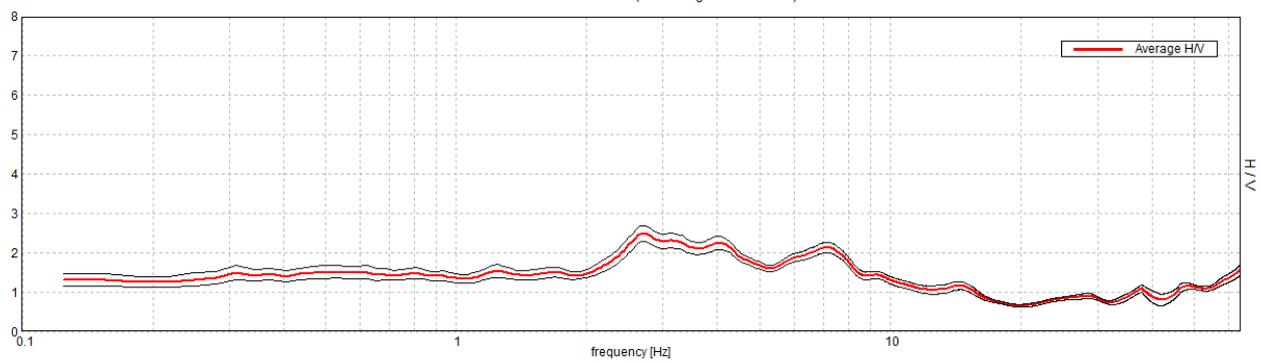
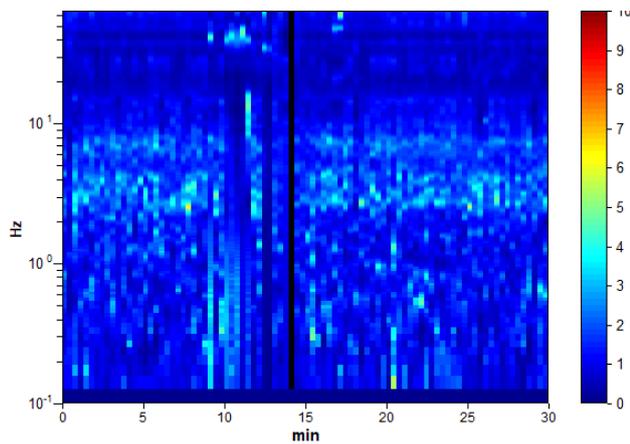
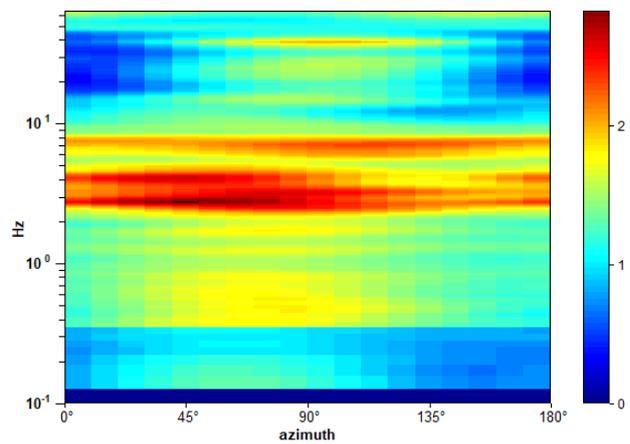
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

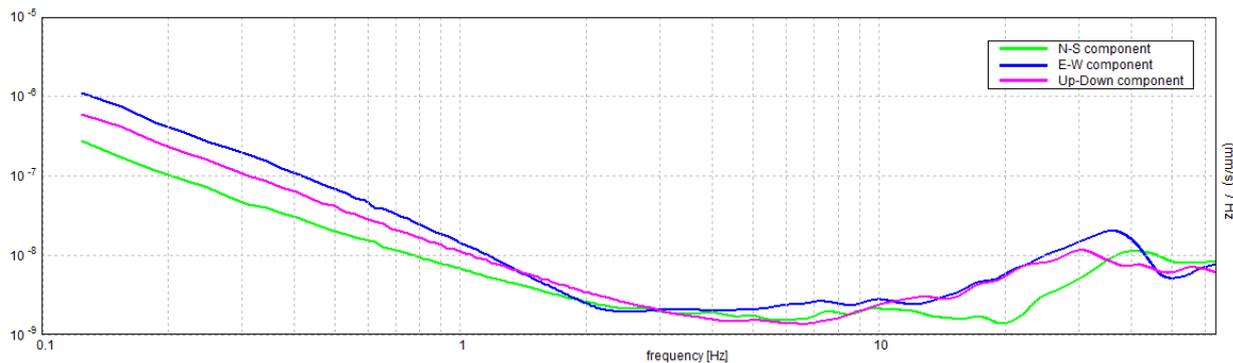
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

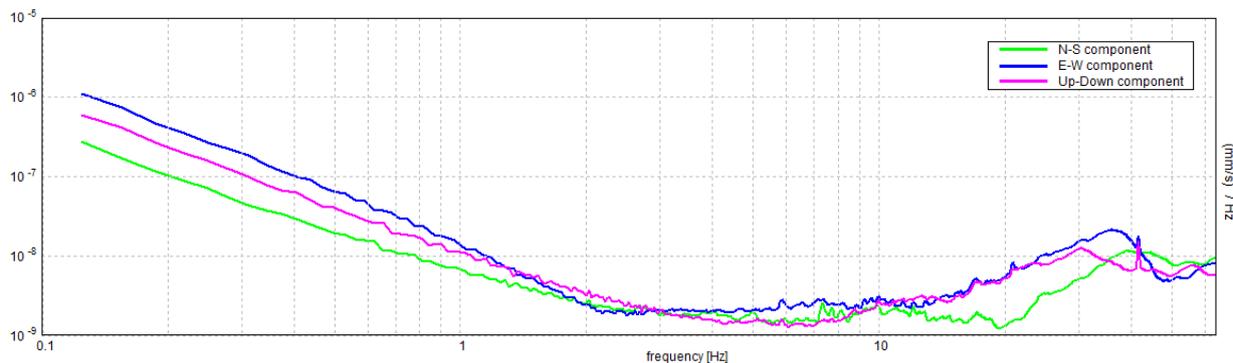
Max. H/V at 2.69 ± 0.37 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

**SERIE TEMPORALE H/V****DIREZIONALITA' H/V**

SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI (CON LISCIAMENTO ALL'1%)



Picco H/V a 2.69 ± 0.37 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

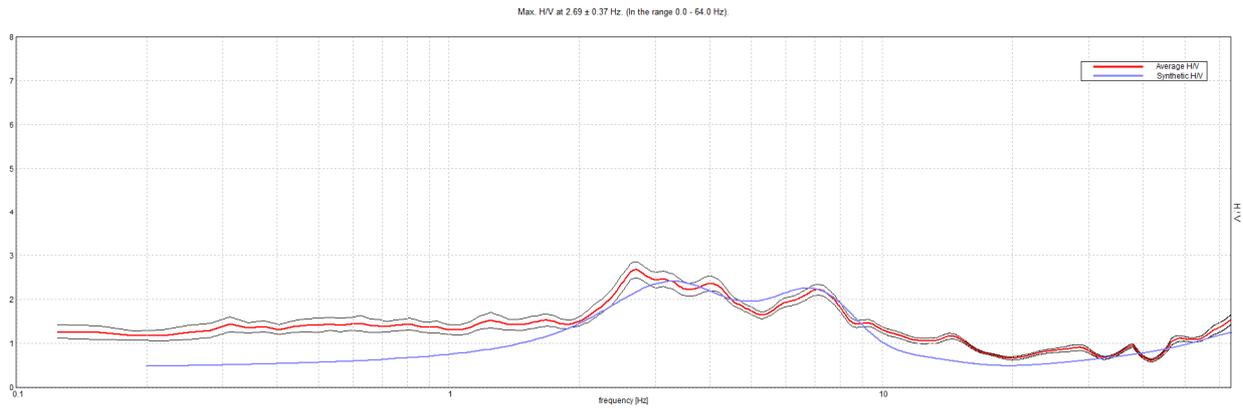
| | | | |
|--|-------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | 2.69 > 0.50 | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | 4783.8 > 200 | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 130 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

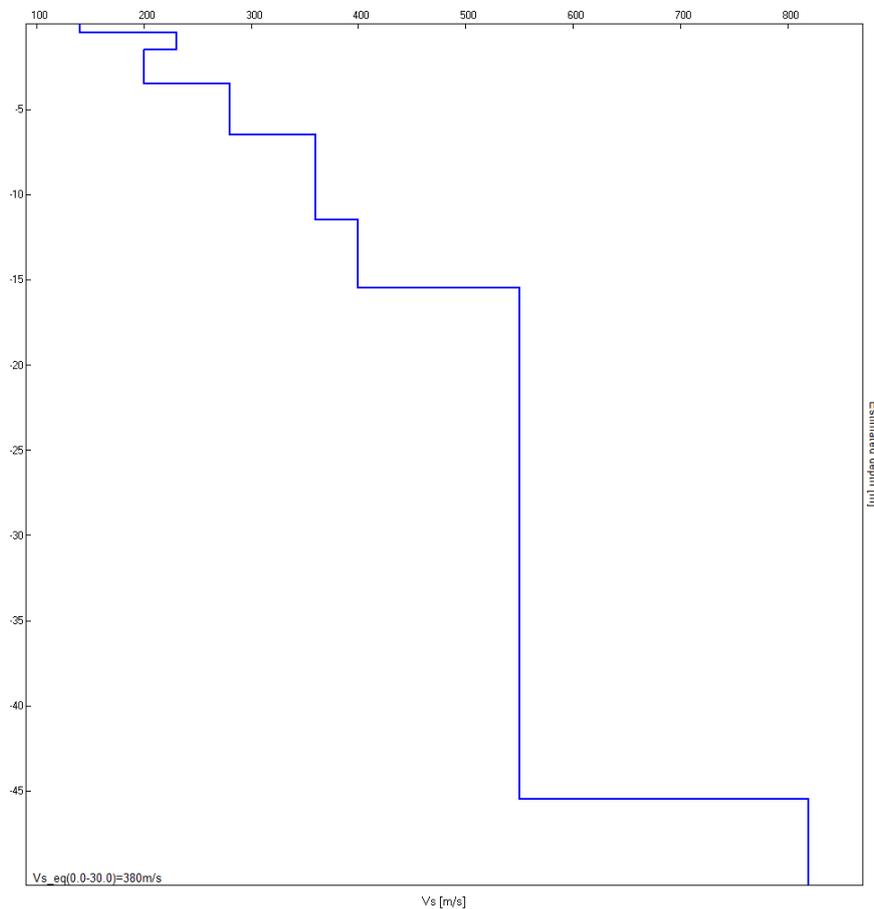
| | | | |
|--|---------------------|----|-----------|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | | | NO |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 10.375 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | 2.48 > 2 | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.13766 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.36995 < 0.13438$ | | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.205 < 1.58$ | OK | |

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.50 | 0.50 | 140 |
| 1.50 | 1.00 | 230 |
| 3.50 | 2.00 | 200 |
| 6.50 | 3.00 | 280 |
| 11.50 | 5.00 | 360 |
| 15.50 | 4.00 | 400 |
| 45.50 | 30.00 | 550 |
| inf. | inf. | 820 |

Vs_eq(0.0-30.0)=380m/s

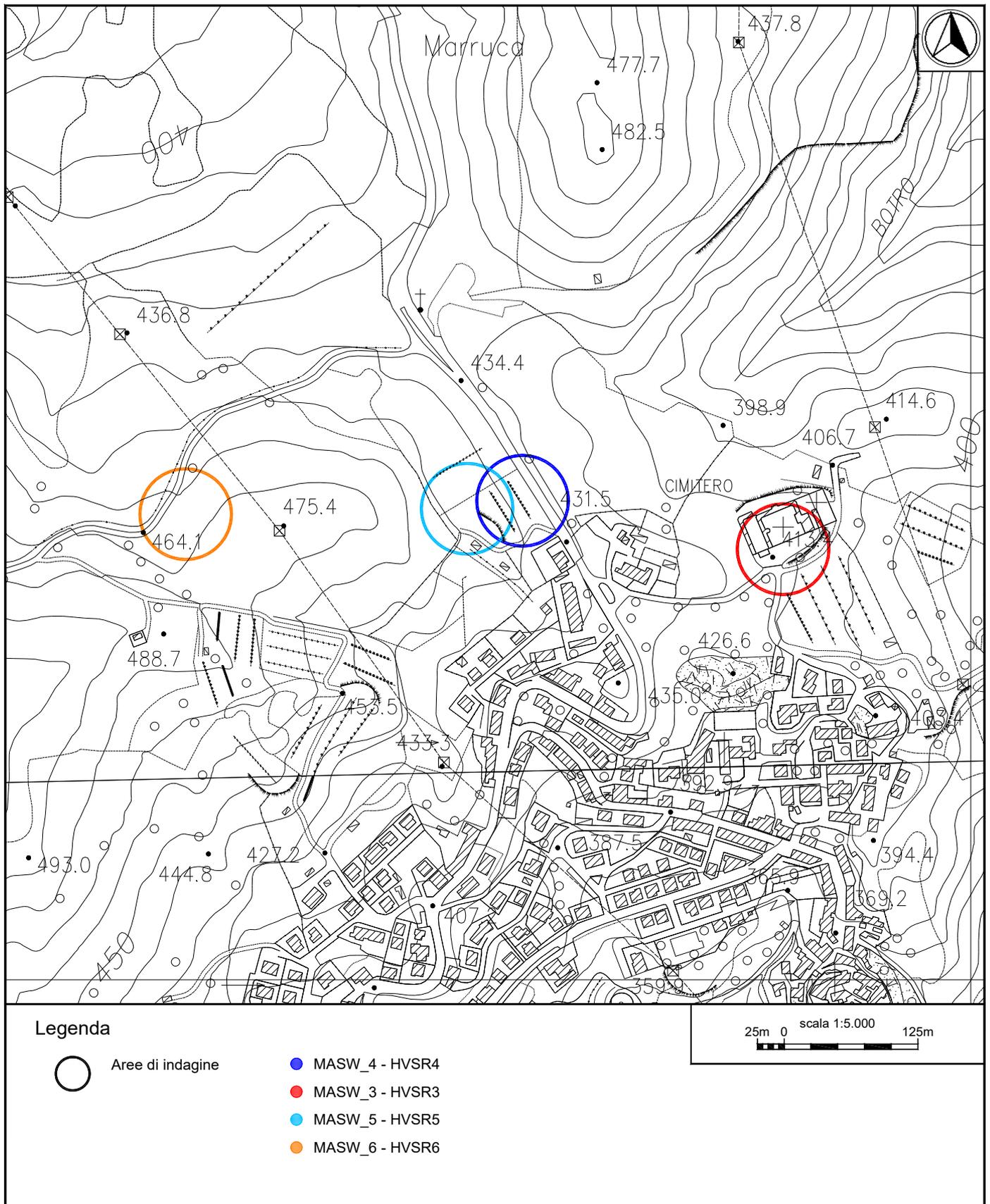




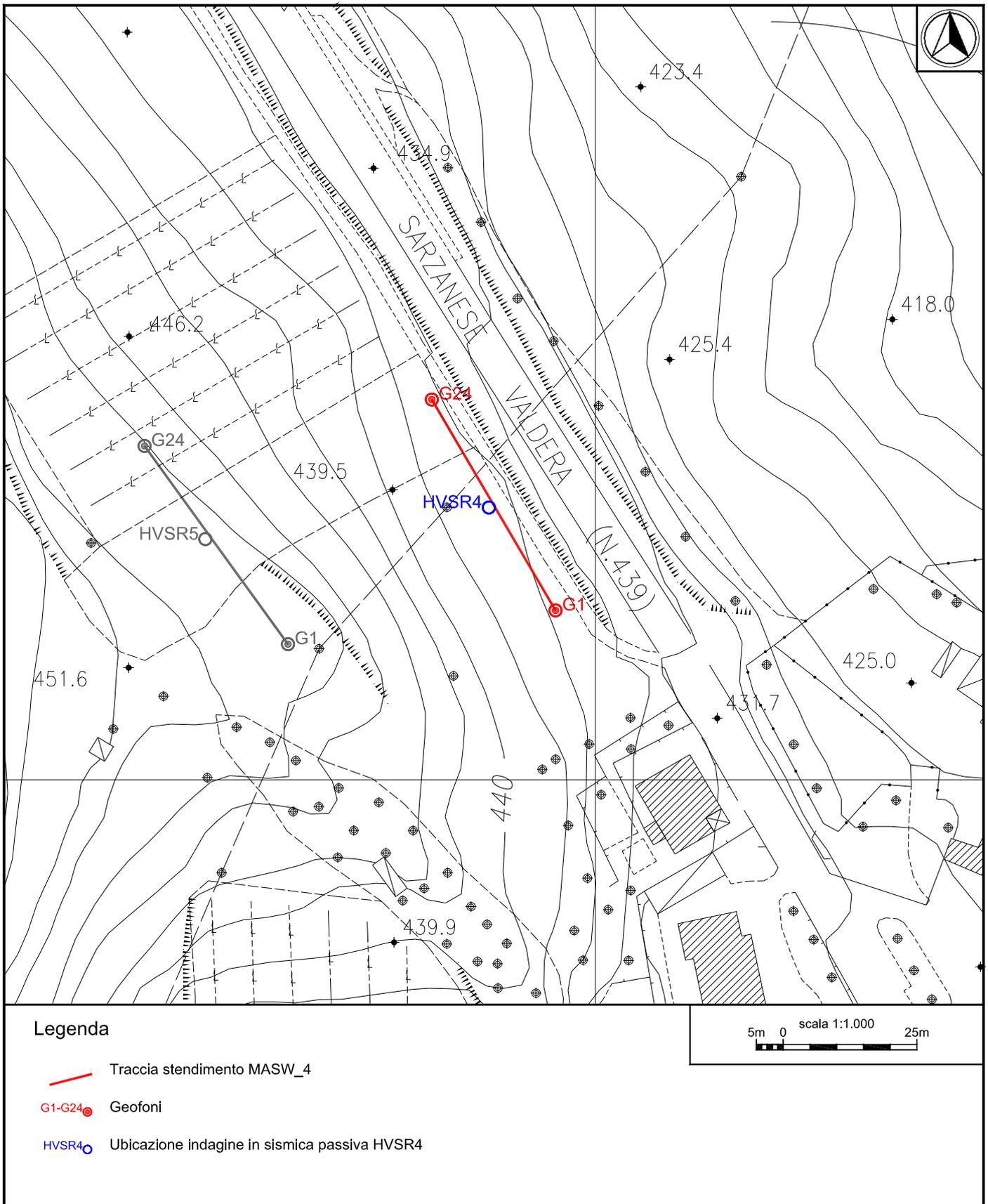
Sito 03 – Montecerboli 1. Indagine MASW_3 – Documentazione fotografica.



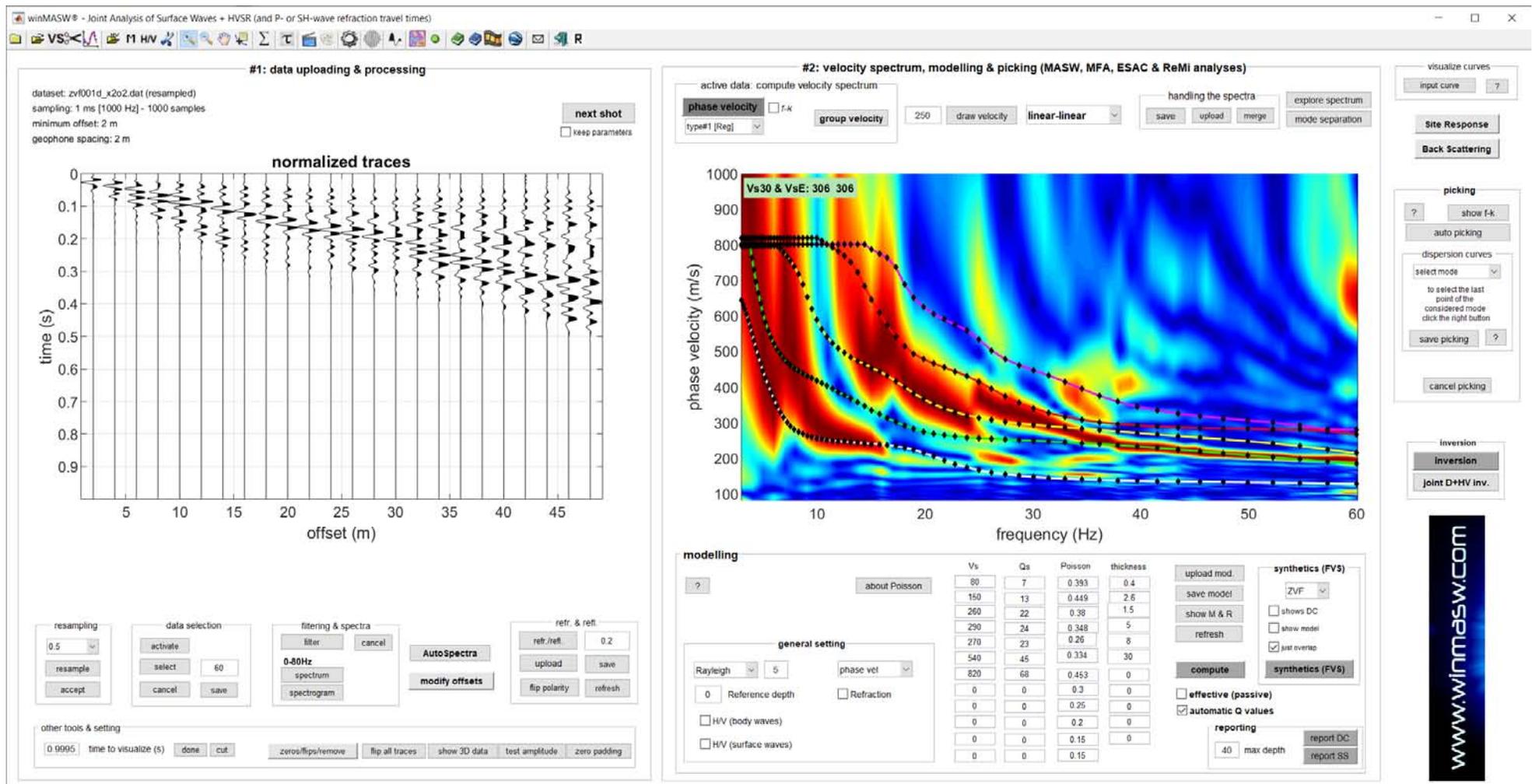
Sito 03 – Montecerboli 1. Indagine in sismica passiva HVSR3 – Documentazione fotografica.



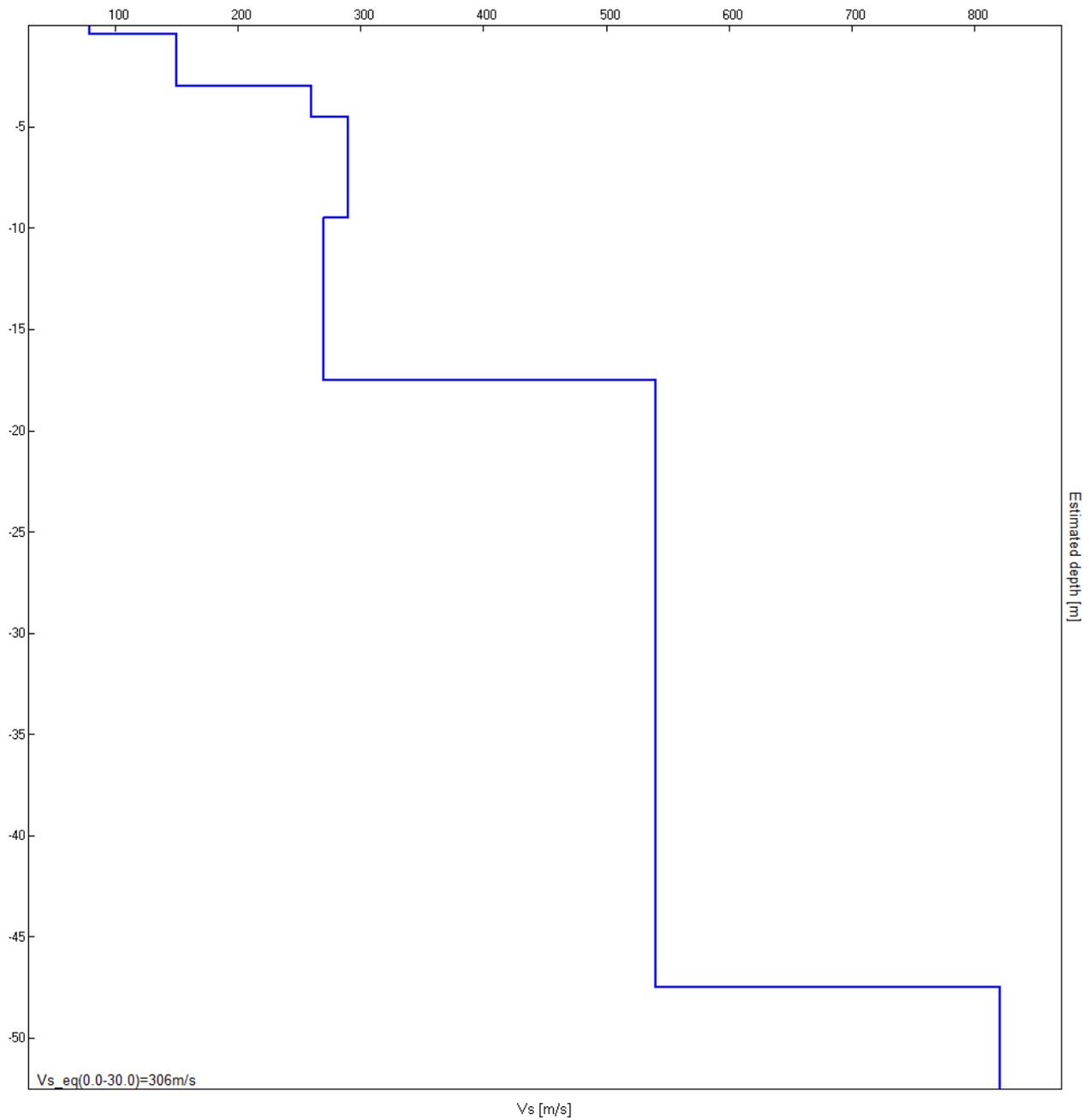
Sito 04 – Montecerboli 2. Ubicazione indagine MASW_4 e acquisizione in sismica passiva HVSR4 - Inquadramento generale.



Sito 04 – Montecerboli 2. Ubicazione indagine MASW_4 e acquisizione in sismica passiva HVSr4 – Inquadramento di dettaglio.



Sito O4 – Montecerboli 2. Indagine MASW_4. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.



Sito 04 – Montecerboli 2. Indagine MASW_4 - Profilo verticale delle Vs.

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.40 | 0.40 | 80 |
| 3.00 | 2.60 | 150 |
| 4.50 | 1.50 | 260 |
| 9.50 | 5.00 | 290 |
| 17.50 | 8.00 | 270 |
| 47.50 | 30.00 | 540 |
| inf. | inf. | 820 |

Vs_eq(0.0-30.0)=306m/s

J24001_01_08_POMARANCE_TR, MONTECERBOLI_2 HVSR4

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 08/01/24 13:59:20 Fine registrazione: 08/01/24 14:29:19

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

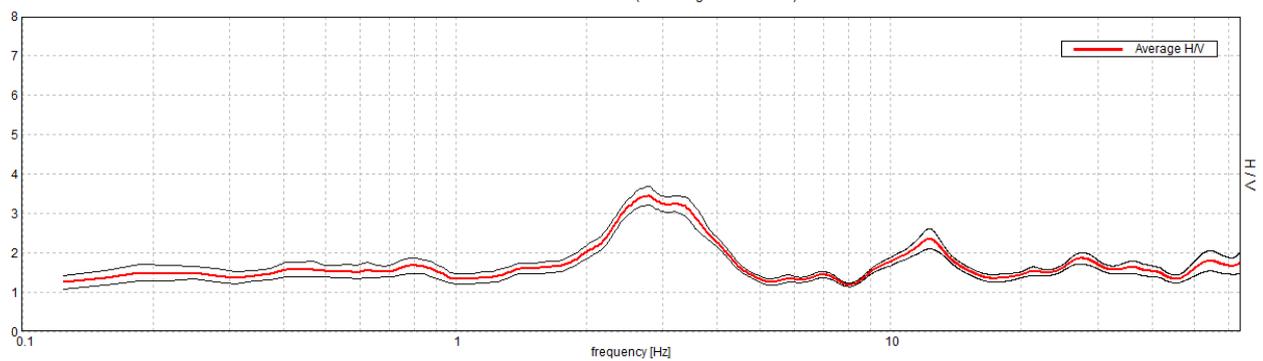
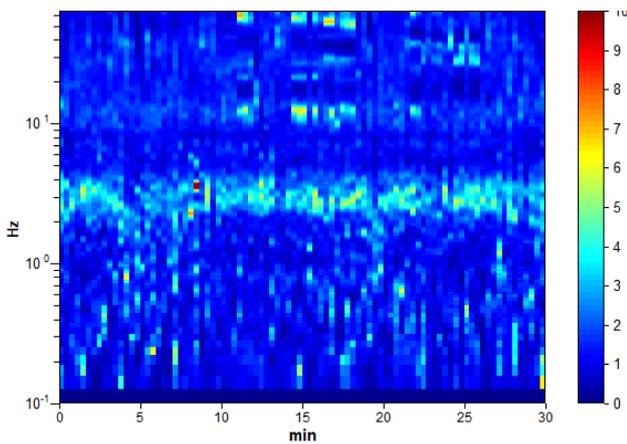
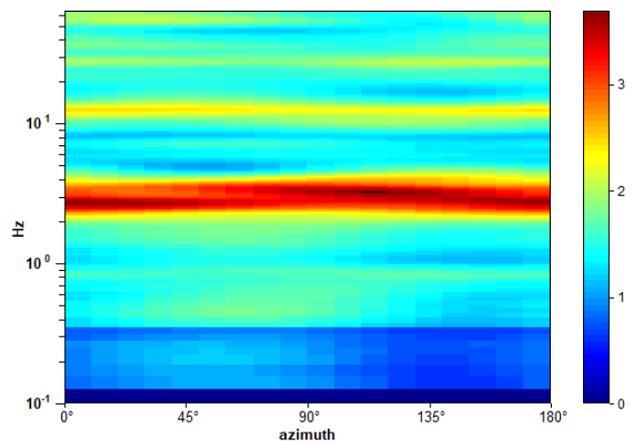
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

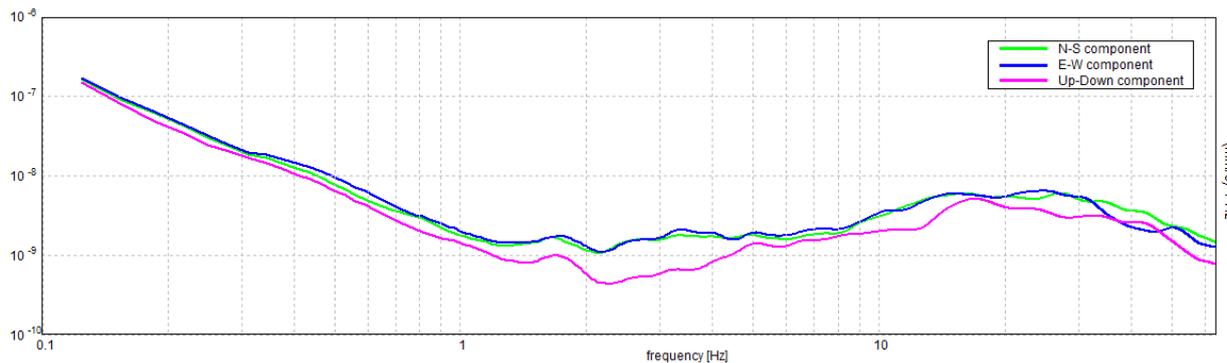
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

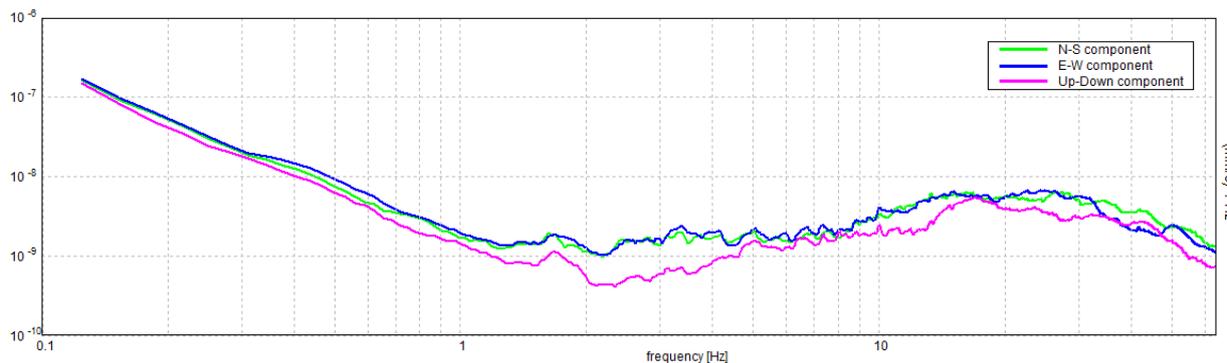
Max. H/V at 2.78 ± 0.39 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

**SERIE TEMPORALE H/V****DIREZIONALITA' H/V**

SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI (CON LISCIAMENTO ALL'1%)



Picco H/V a 2.78 ± 0.39 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

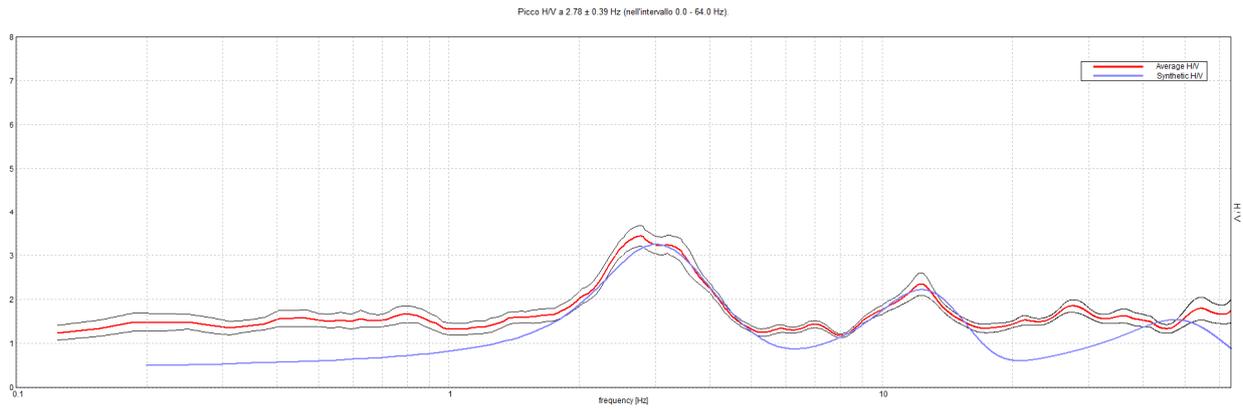
| | | | |
|--|-------------------------|-----------|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $2.78 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $5006.3 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 134 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

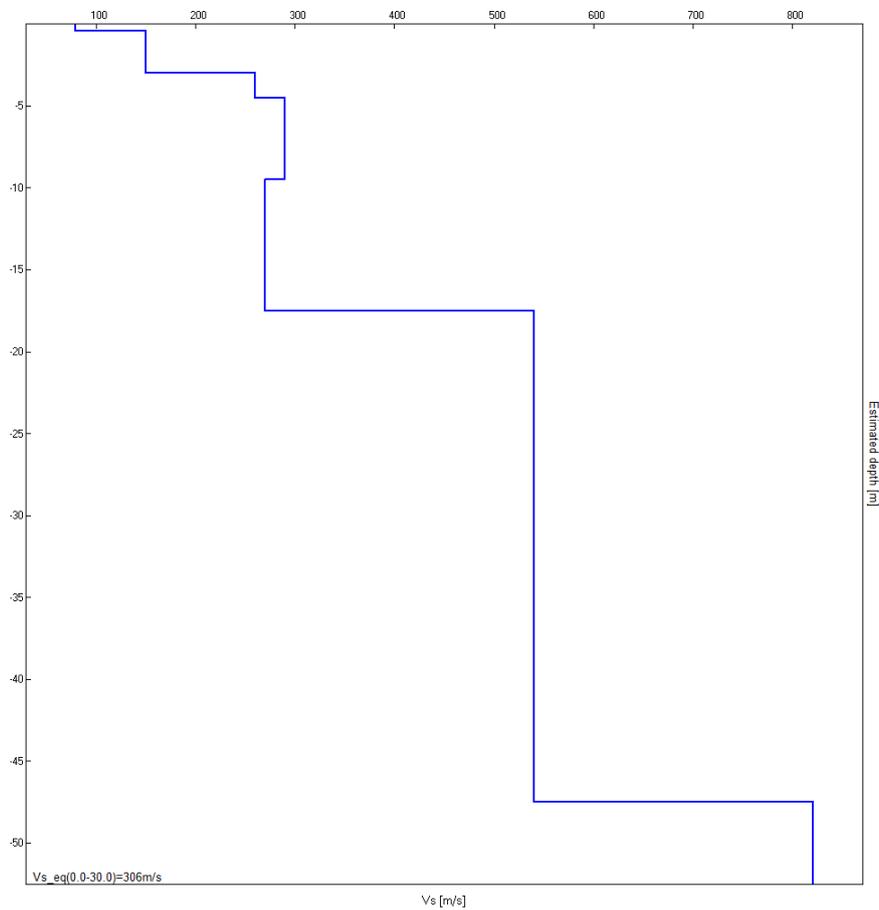
| | | | |
|--|---------------------|-----------|-----------|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 1.781 Hz | OK | |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 4.438 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | $3.44 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.14007 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.38958 < 0.13906$ | | NO |

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.40 | 0.40 | 80 |
| 3.00 | 2.60 | 150 |
| 4.50 | 1.50 | 260 |
| 9.50 | 5.00 | 290 |
| 17.50 | 8.00 | 270 |
| 47.50 | 30.00 | 540 |
| inf. | inf. | 820 |

Vs_eq(0.0-30.0)=306m/s

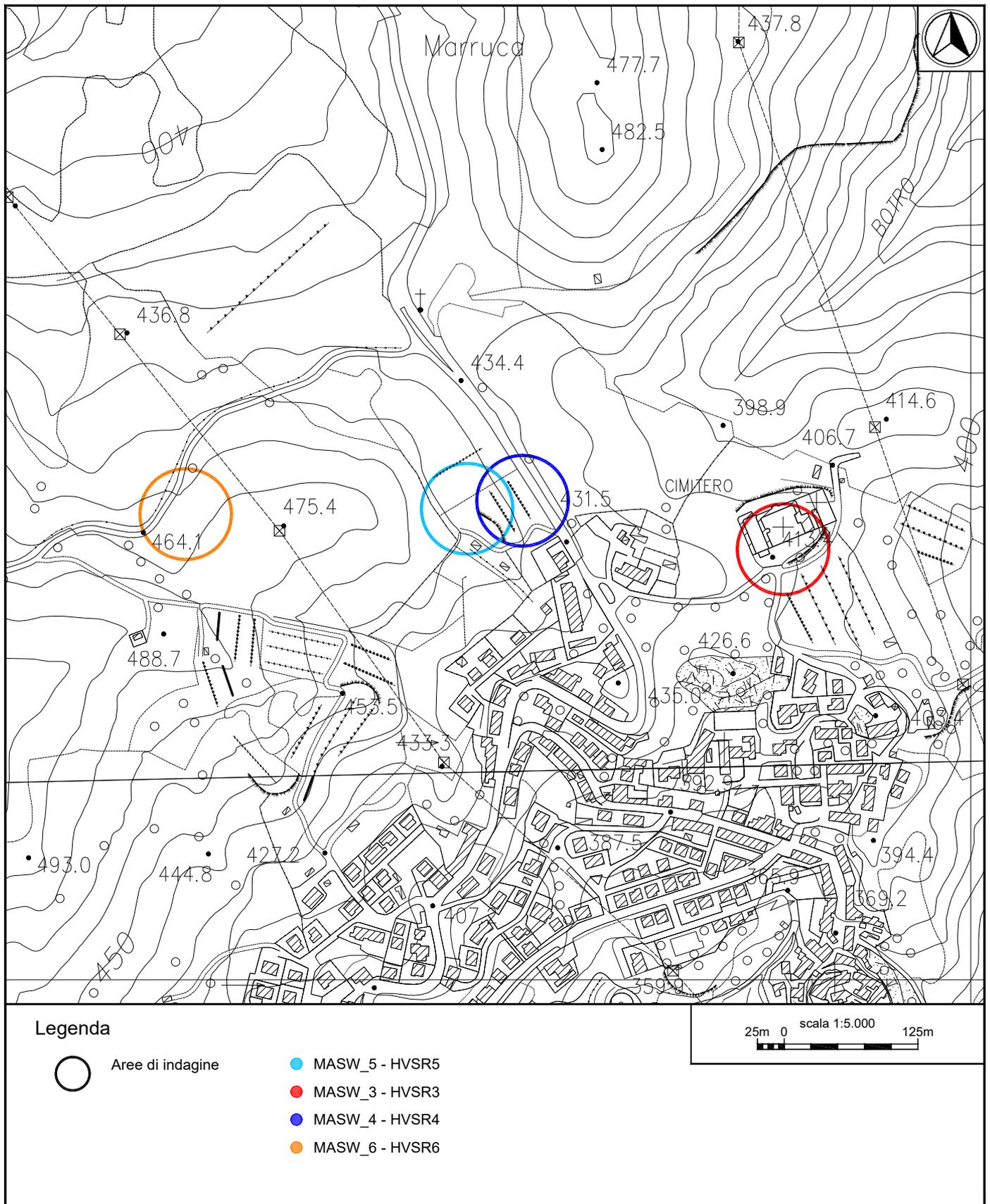




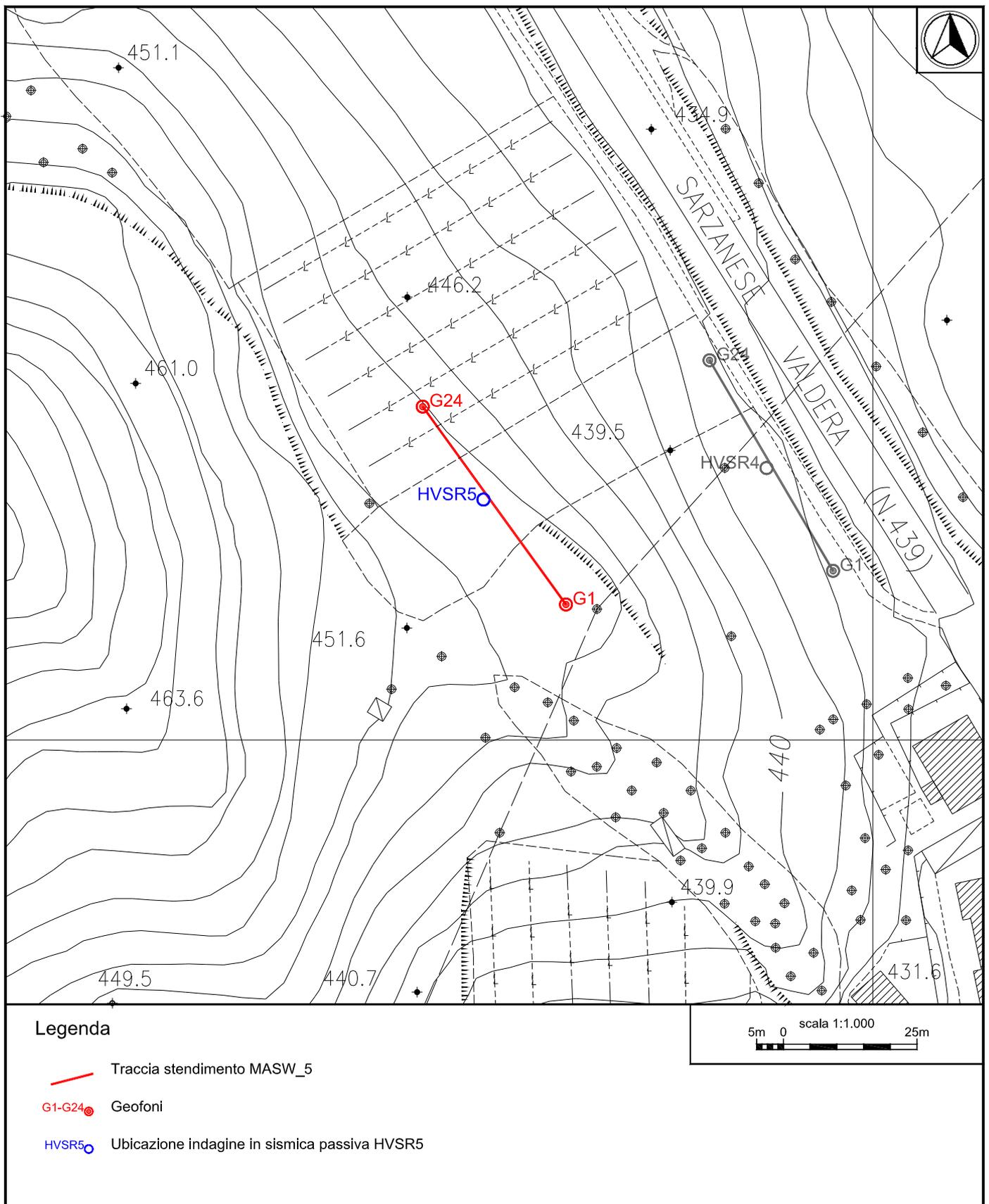
Sito 04 – Montecerboli 2. Indagine MASW_4 – Documentazione fotografica.



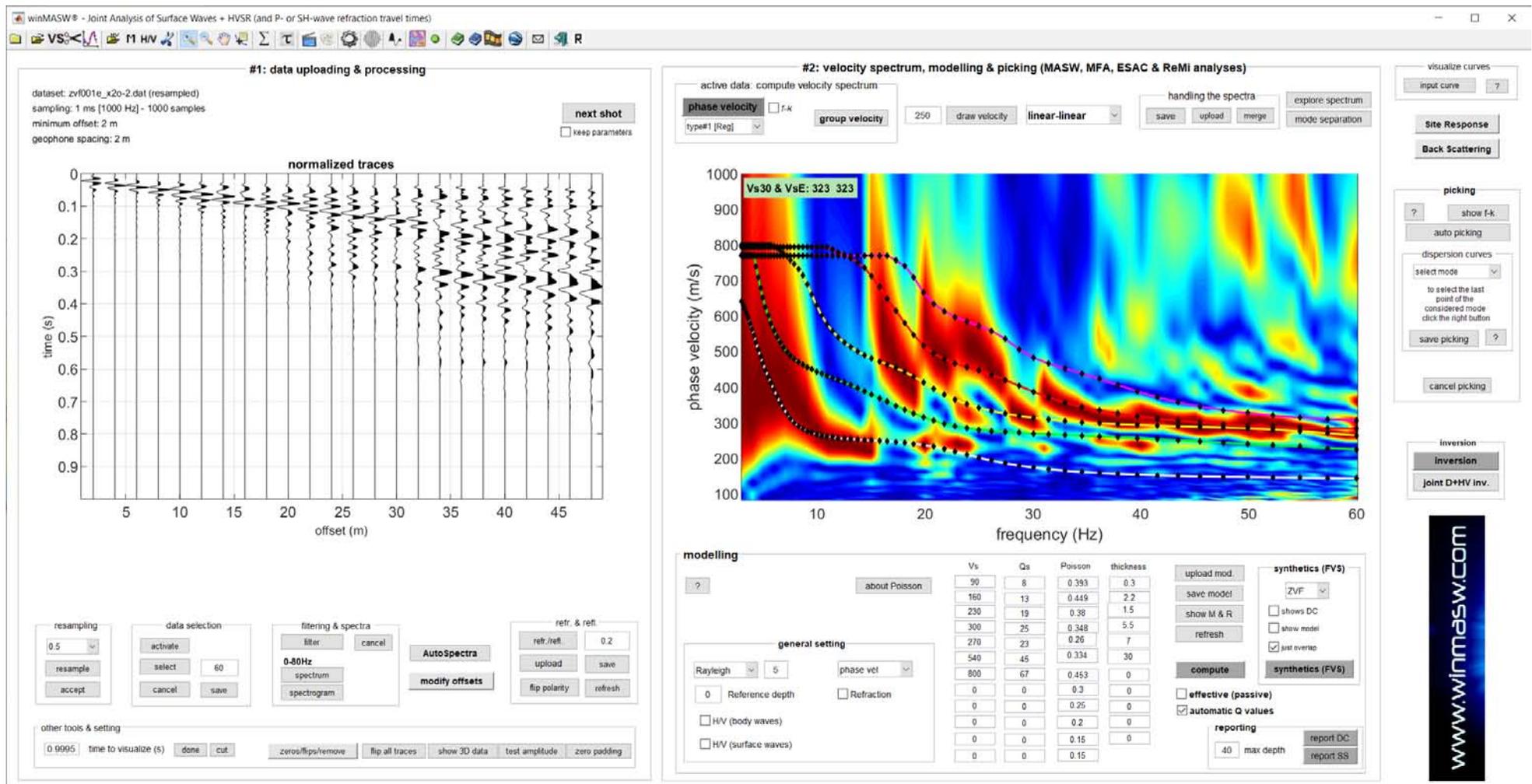
Sito 04 – Montecerboli 2. Indagine in sismica passiva HVSR4 – Documentazione fotografica.



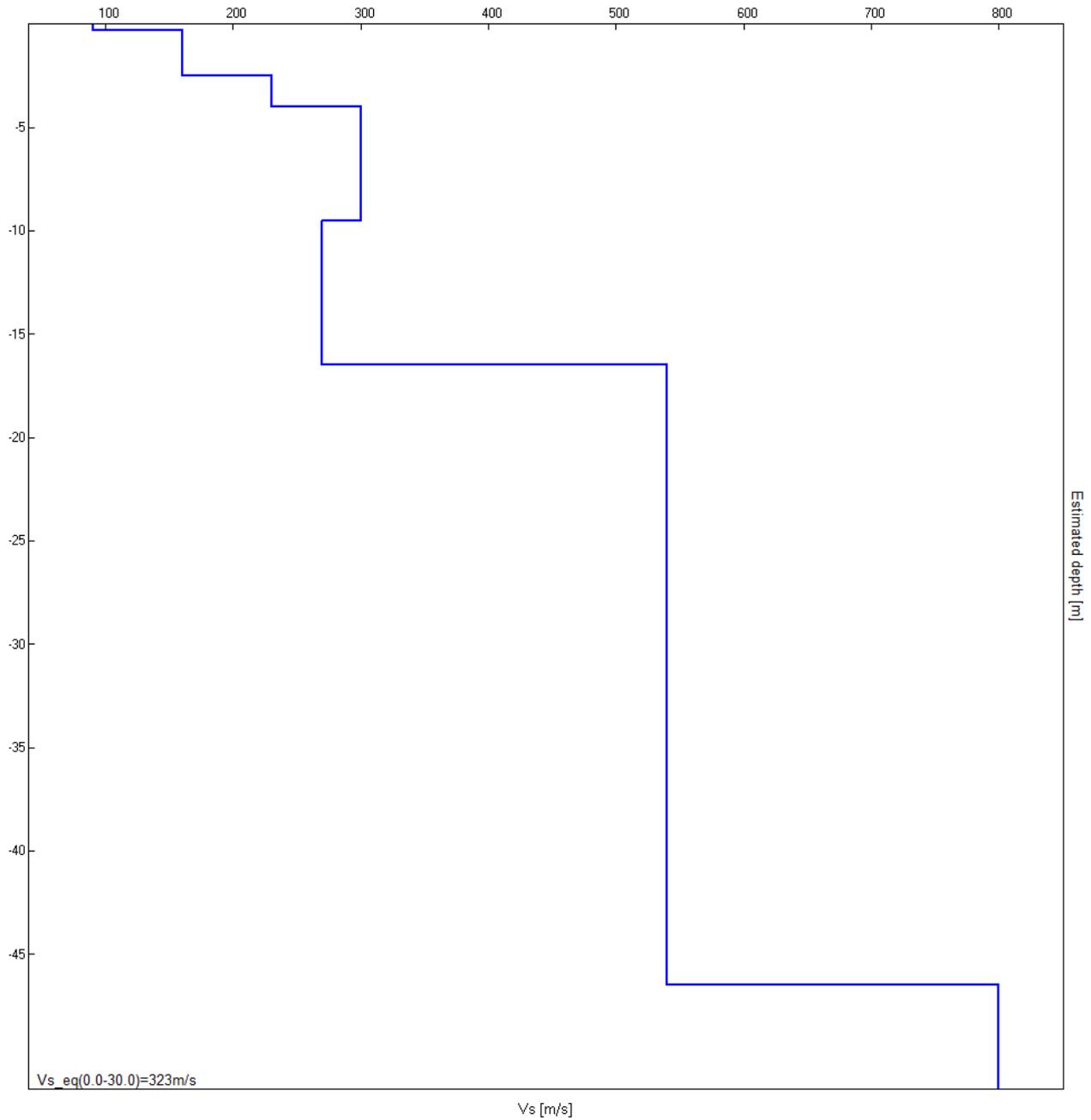
Sito 05 – Montecerboli 3. Ubicazione indagine MASW_5 e acquisizione in sismica passiva HVSR5 - Inquadramento generale.



Sito 05 – Montecerboli 3. Ubicazione indagine MASW_5 e acquisizione in sismica passiva HVSRS5 – Inquadramento di dettaglio.



Sito 05 – Montecerboli 3. Indagine MASW_5. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.



Sito 05 – Montecerboli 3. Indagine MASW_5

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.30 | 0.30 | 90 |
| 2.50 | 2.20 | 160 |
| 4.00 | 1.50 | 230 |
| 9.50 | 5.50 | 300 |
| 16.50 | 7.00 | 270 |
| 46.50 | 30.00 | 540 |
| inf. | inf. | 800 |

Vs_eq(0.0-30.0)=323m/s

J24001_01_08_POMARANCE_TR, MONTECERBOLI_3 HVSR5

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 08/01/24 14:48:09 Fine registrazione: 08/01/24 15:18:08

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

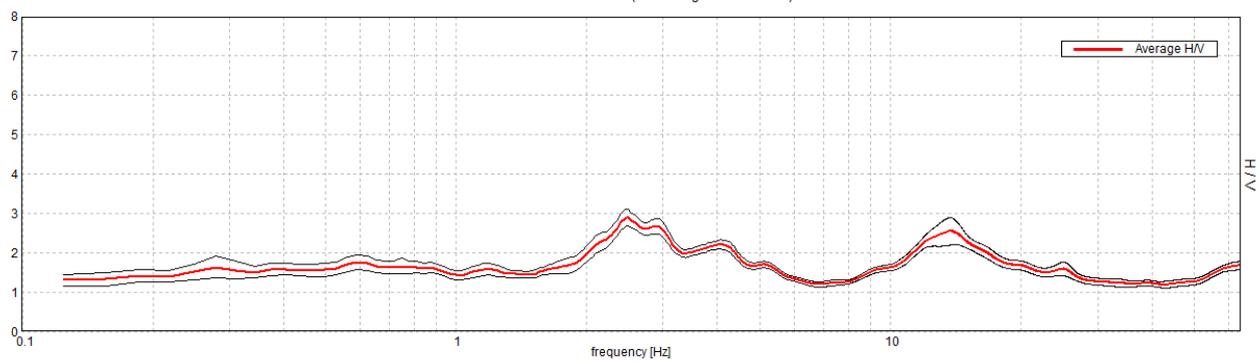
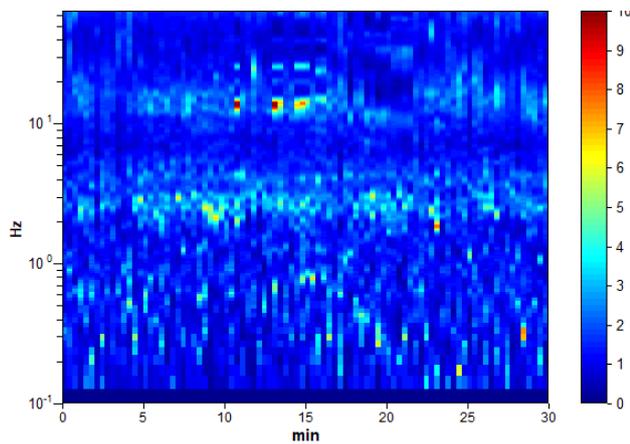
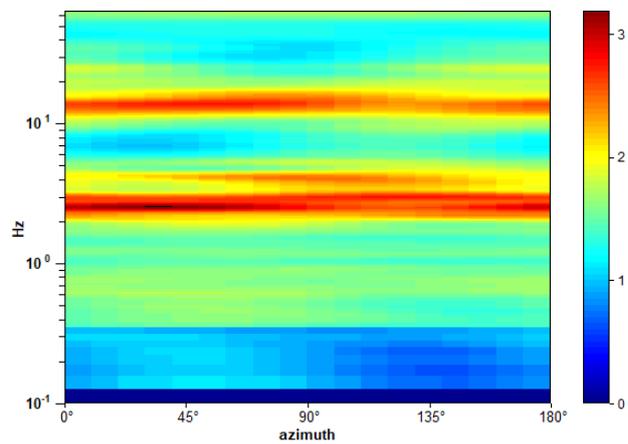
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

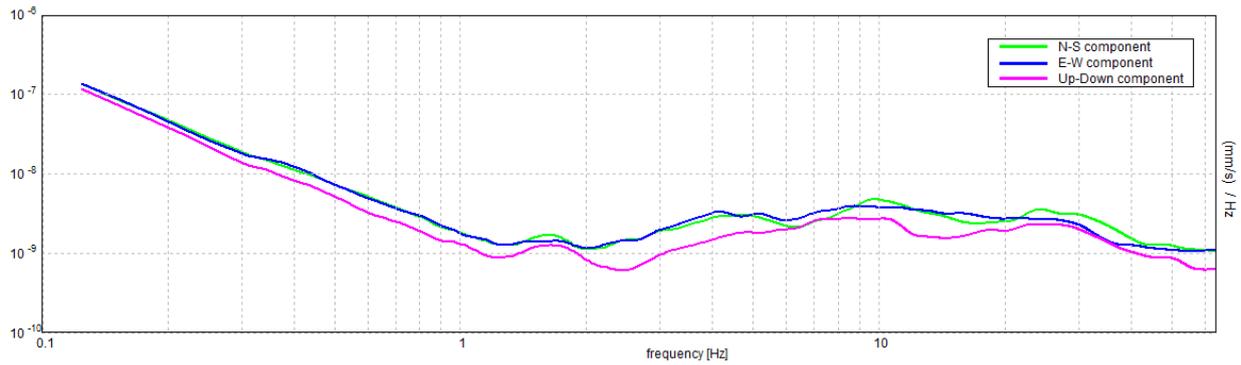
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

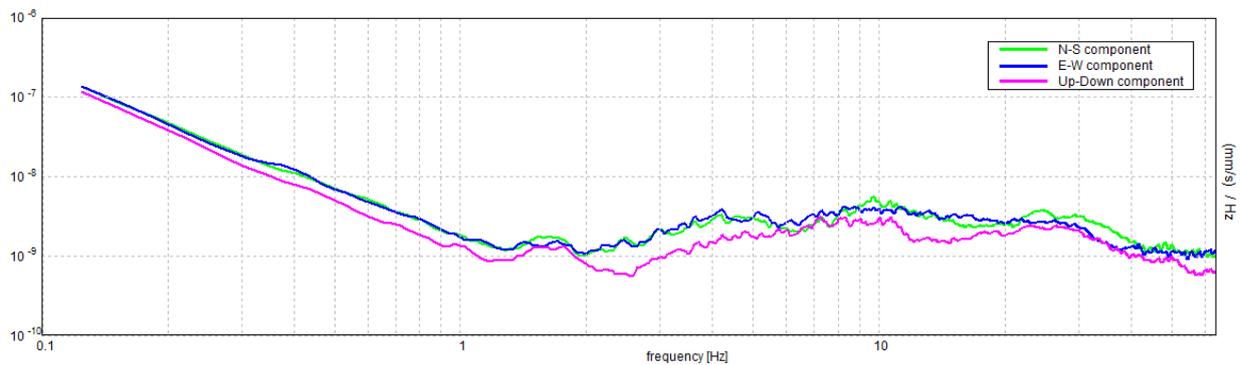
Max. H/V at 2.5 ± 6.49 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

**SERIE TEMPORALE H/V****DIREZIONALITA' H/V**

SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI (CON LISCIAMENTO ALL'1%)



Picco H/V a 2.5 ± 6.49 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

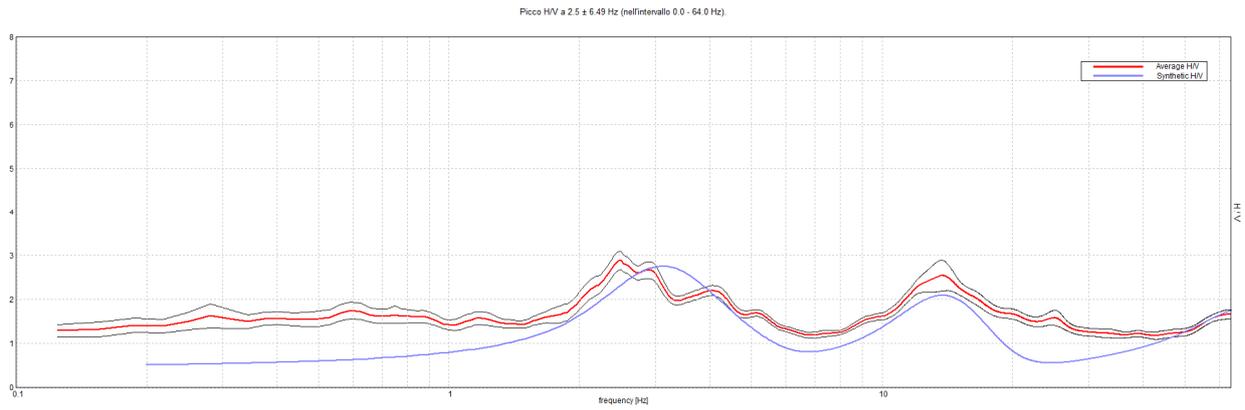
| | | | |
|--|-------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $2.50 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $4500.0 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 121 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

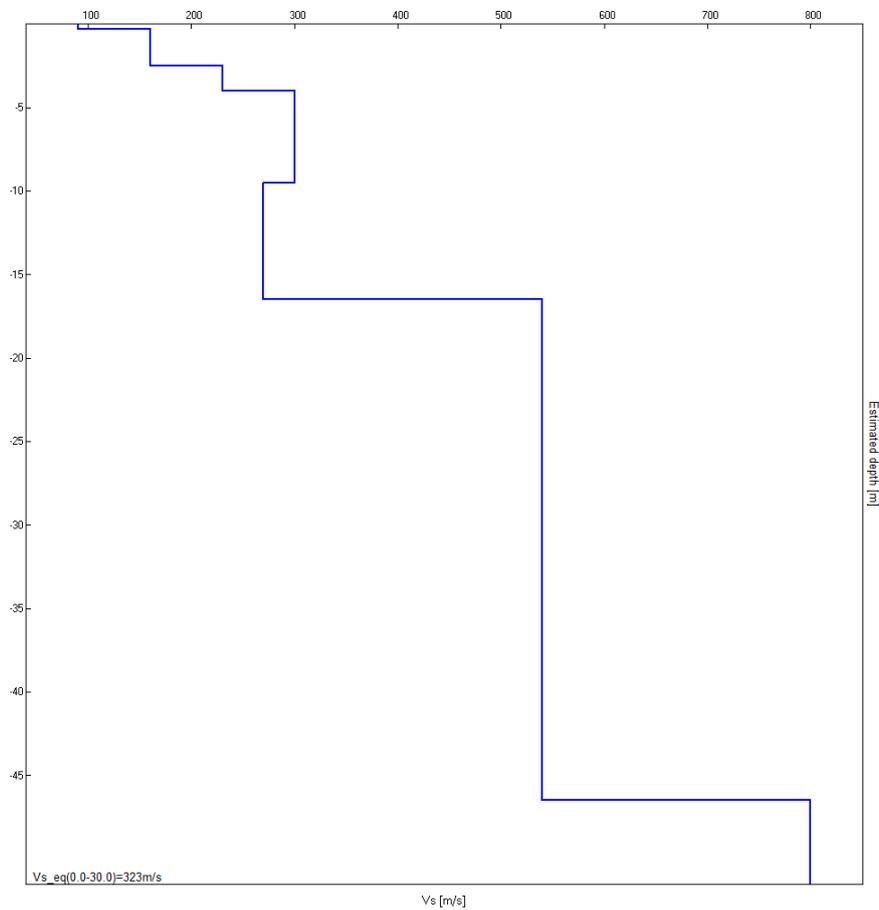
| | | | |
|--|--------------------|----|----|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 1.5 Hz | OK | |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 5.656 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | $2.89 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 2.59443 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $6.48606 < 0.125$ | | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.2097 < 1.58$ | OK | |

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.30 | 0.30 | 90 |
| 2.50 | 2.20 | 160 |
| 4.00 | 1.50 | 230 |
| 9.50 | 5.50 | 300 |
| 16.50 | 7.00 | 270 |
| 46.50 | 30.00 | 540 |
| inf. | inf. | 800 |

$V_{s_eq}(0.0-30.0)=323\text{m/s}$

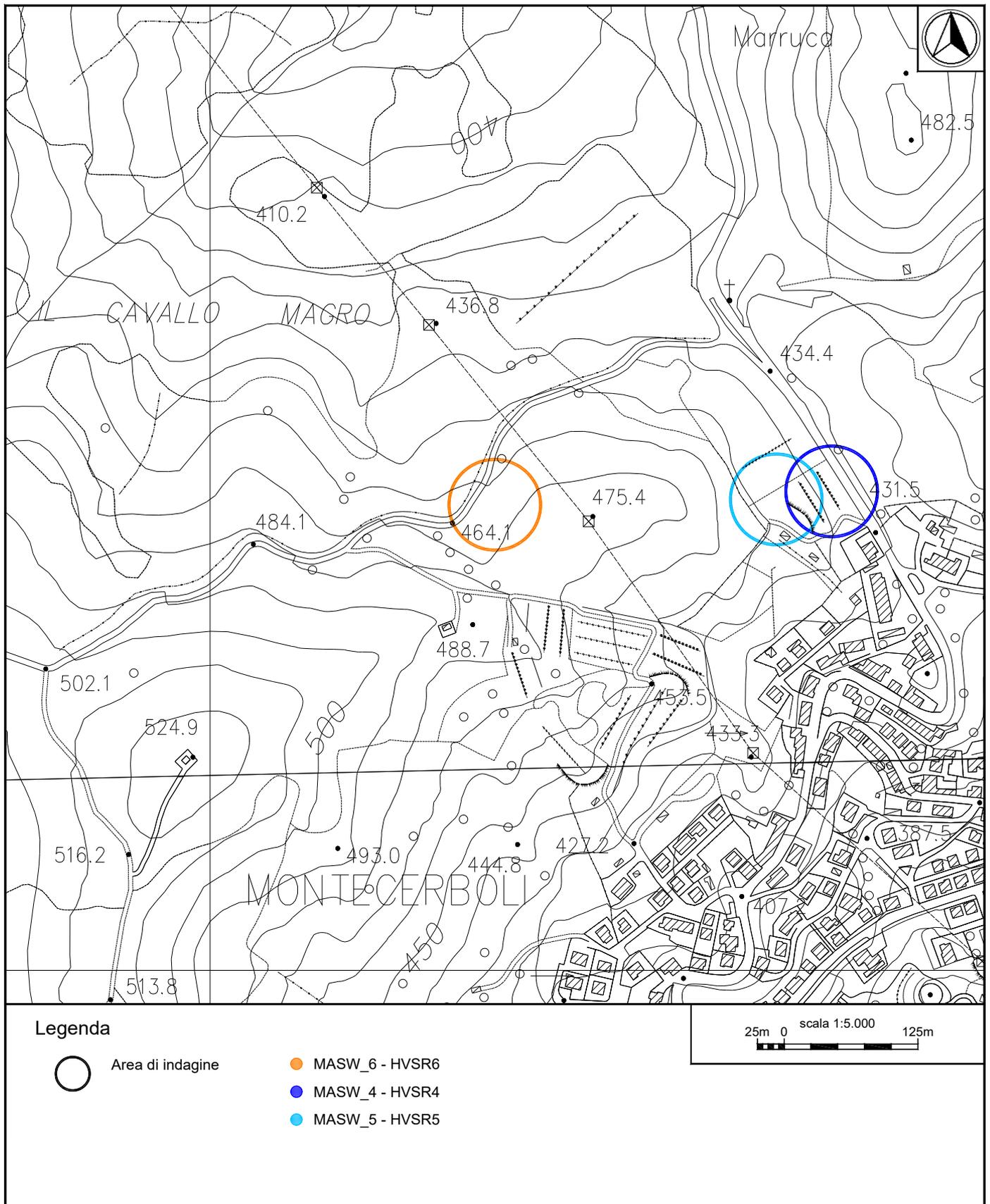




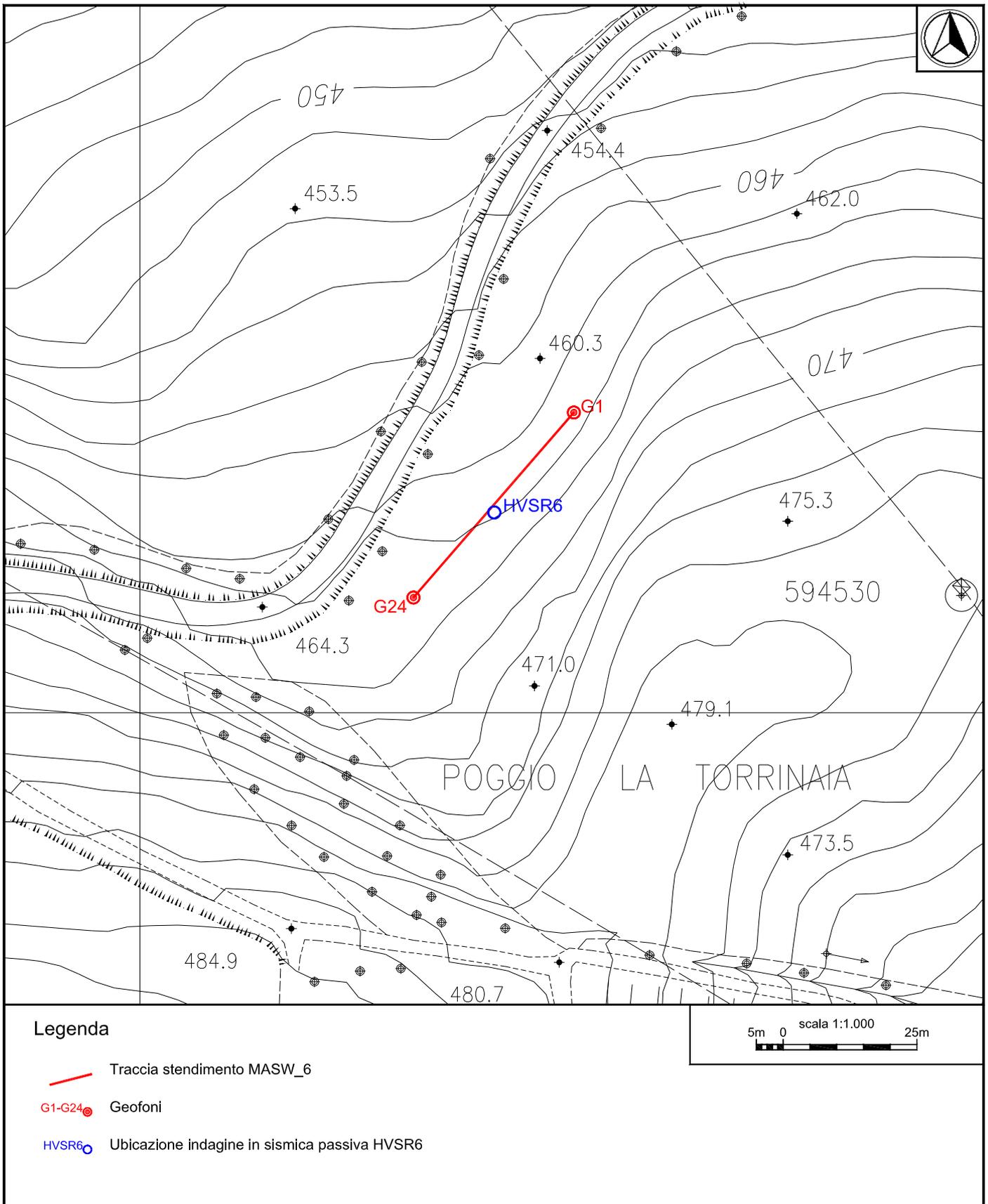
Sito 05 – Montecerboli 3. Indagine MASW_5 – Documentazione fotografica.



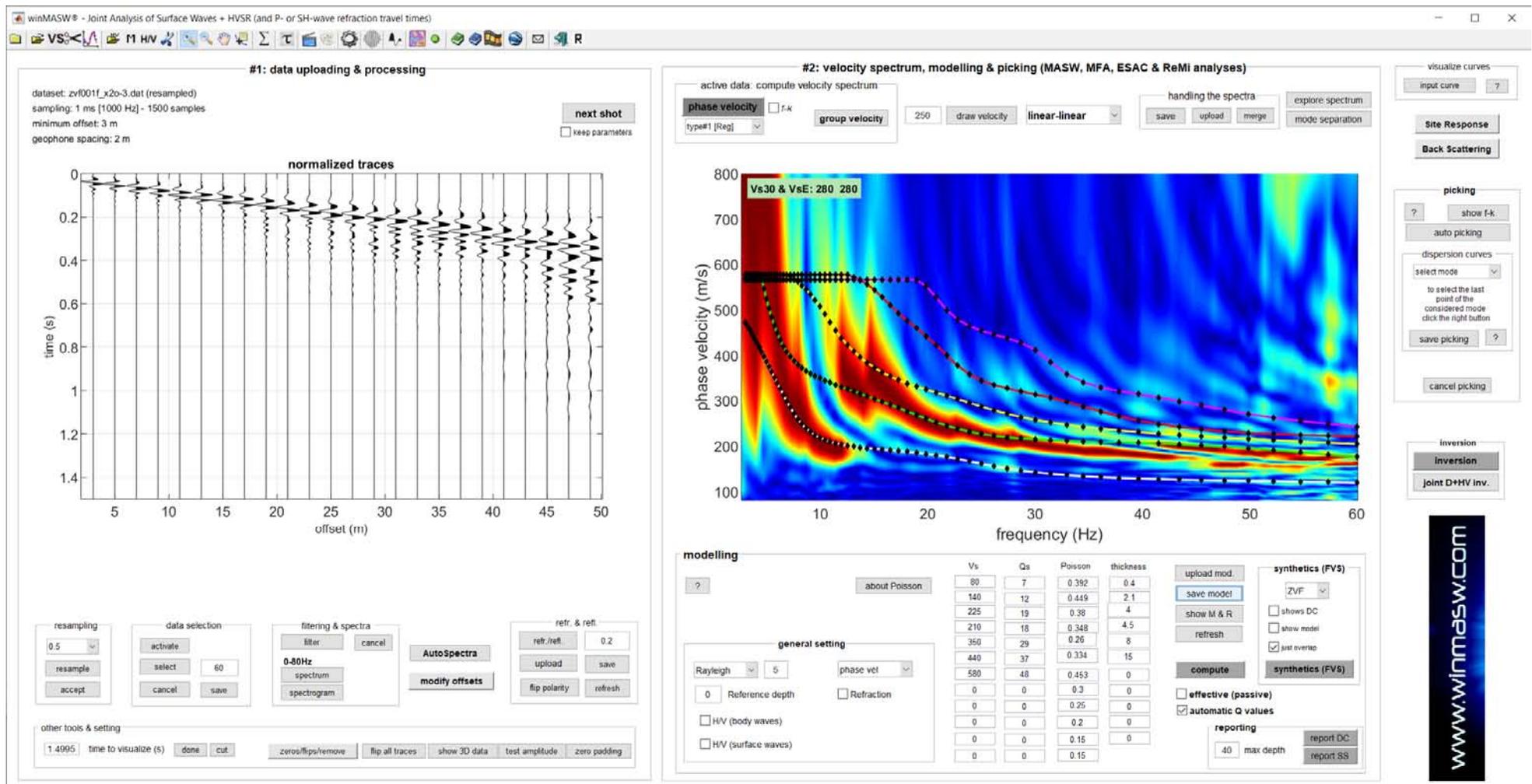
Sito 05 – Montecerboli 3. Indagine in sismica passiva HVSR5 – Documentazione fotografica.



Sito 06 – Montecerboli 4. Ubicazione indagine MASW_6 e acquisizione in sismica passiva HVSR6 - Inquadramento generale.

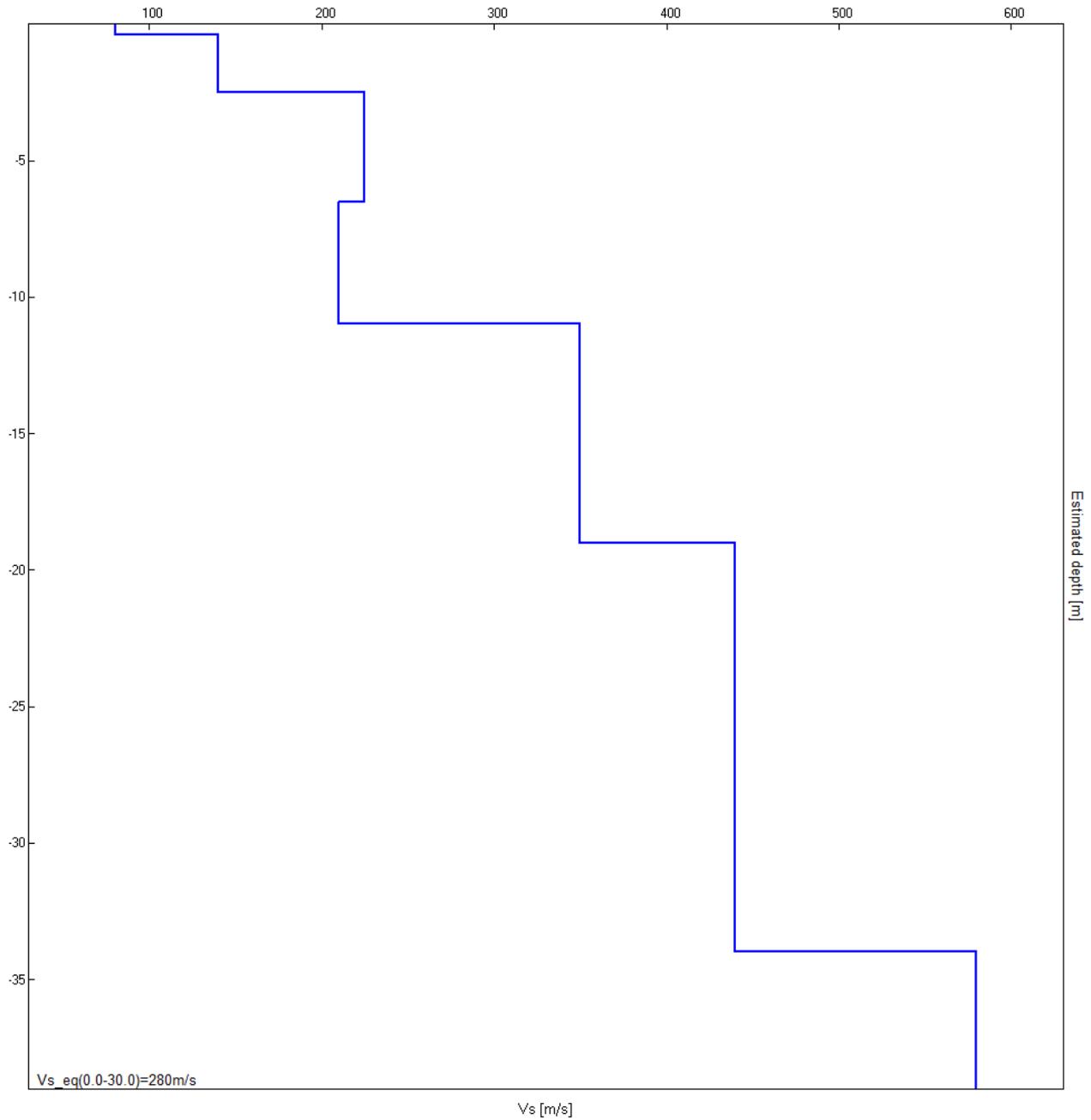


Sito 06 – Montecerboli 4. Ubicazione indagine MASW_6 e acquisizione in sismica passiva HVSr6– Inquadramento di dettaglio.



Sito 06 – Montecerboli 4. Indagine MASW_6. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.





Sito 06 – Montecerboli 4. Indagine MASW_6 - Profilo verticale delle Vs.

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.40 | 0.40 | 80 |
| 2.50 | 2.10 | 140 |
| 6.50 | 4.00 | 225 |
| 11.00 | 4.50 | 210 |
| 19.00 | 8.00 | 350 |
| 34.00 | 15.00 | 440 |
| inf. | inf. | 580 |

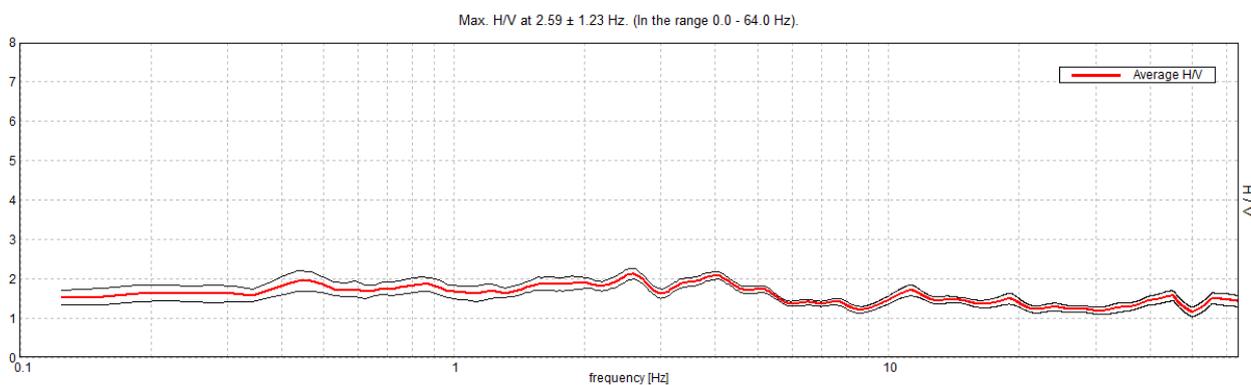
Vs_eq(0.0-30.0)=280m/s

J24001_01_08_POMARANCE_TR, MONTECERBOLI_4 HVSR6

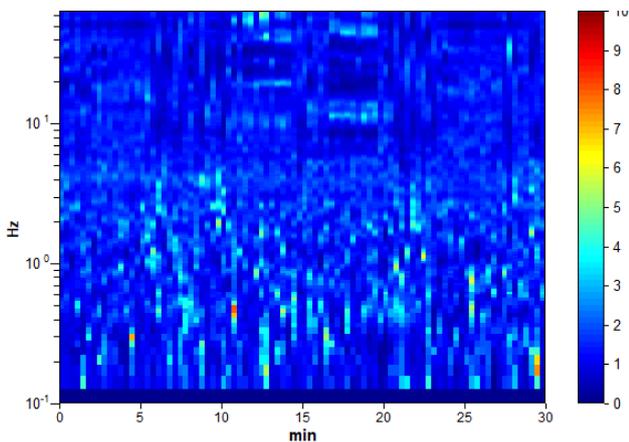
Strumento: TEP-0085/01-10
Formato dati: 16 byte
Fondo scala [mV]: 51
Inizio registrazione: 08/01/24 16:22:59 Fine registrazione: 08/01/24 16:52:58
Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN
Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.
Freq. campionamento: 128 Hz
Lunghezza finestre: 20 s
Tipo di lisciamento: Triangular window
Lisciamento: 10%

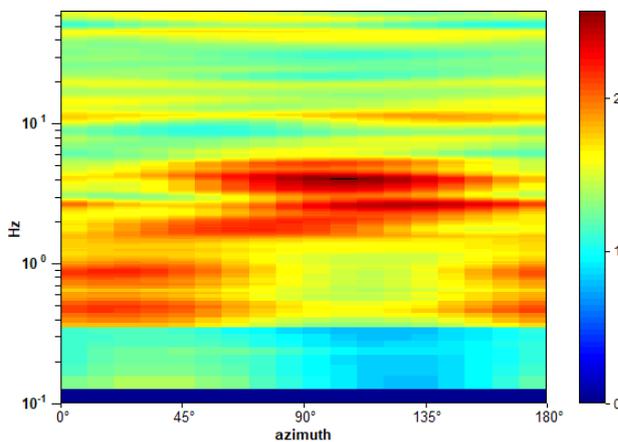
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



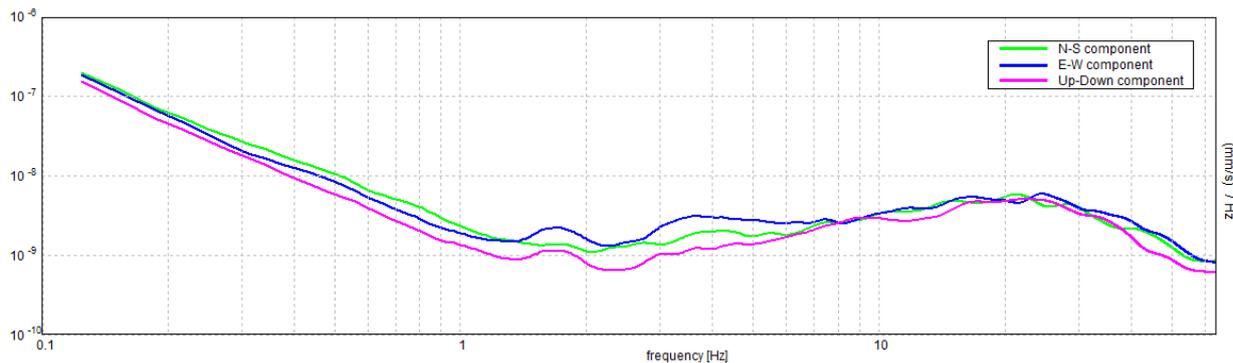
SERIE TEMPORALE H/V



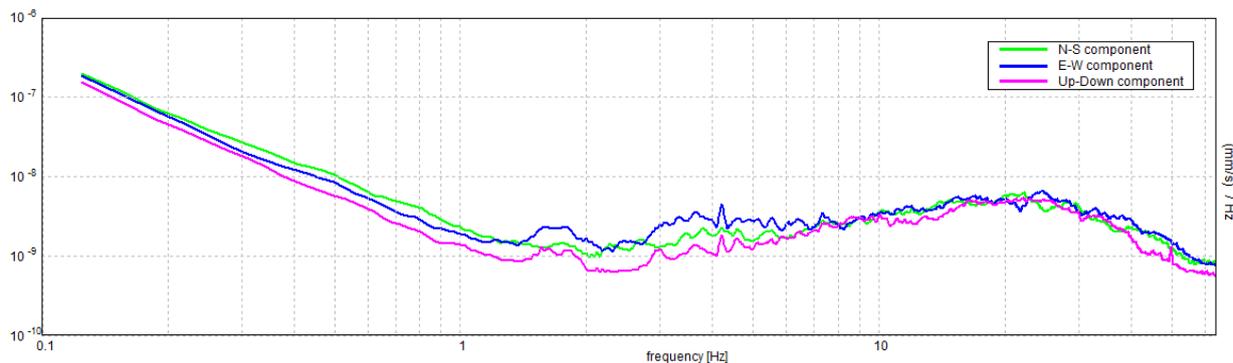
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI (CON LISCIAMENTO ALL'1%)



Picco H/V a 2.59 ± 1.23 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

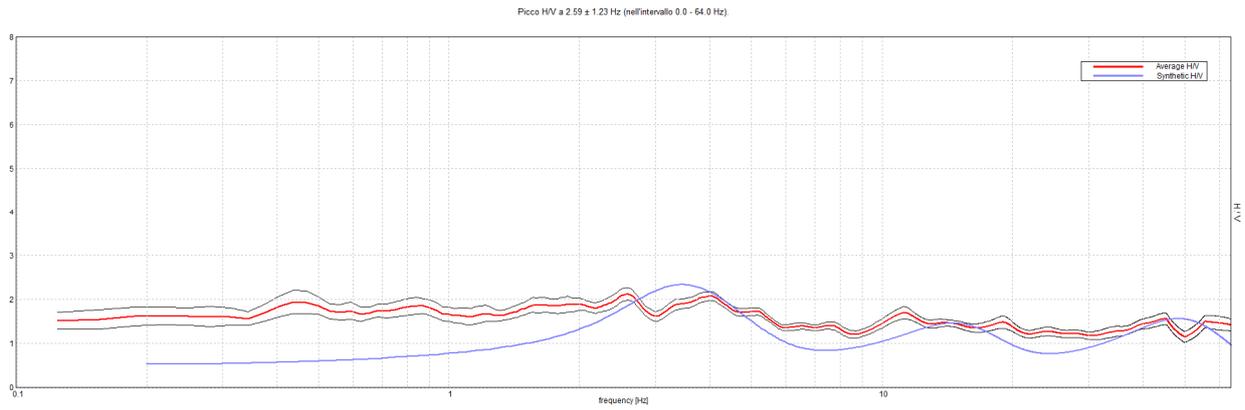
| | | | |
|--|-------------------------|-----------|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $2.59 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $4668.8 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 126 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

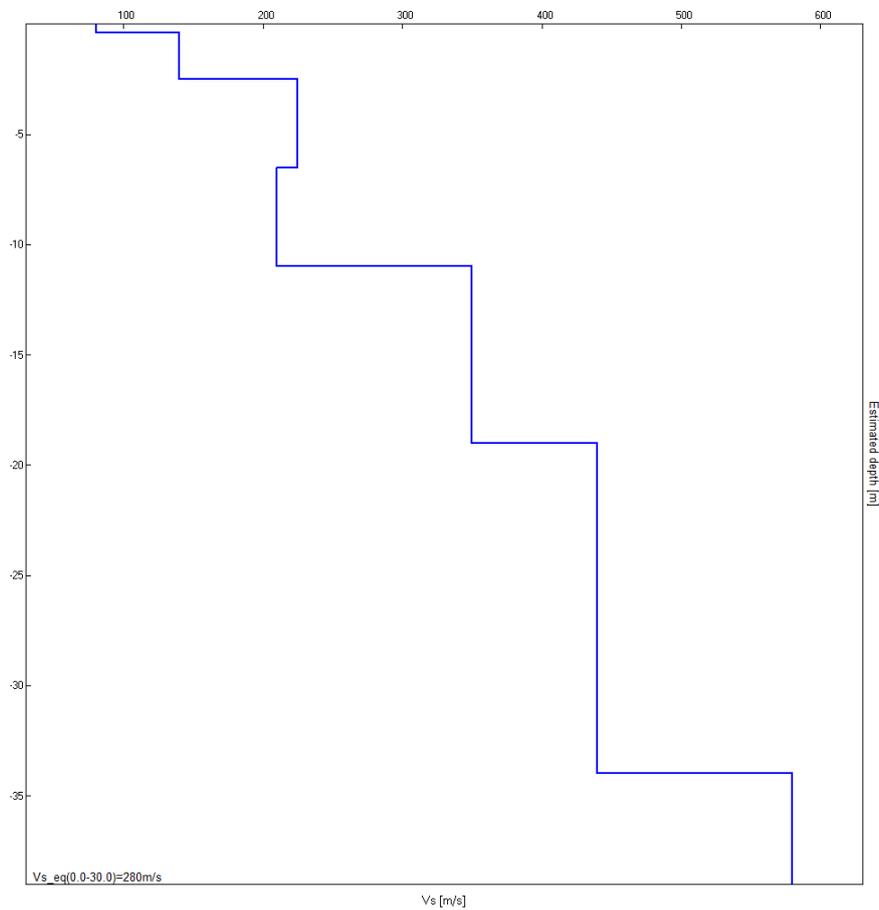
| | | | |
|--|---------------------|-----------|-----------|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | | | NO |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | | | NO |
| $A_0 > 2$ | $2.13 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.47584 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $1.23421 < 0.12969$ | | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.1399 < 1.58$ | OK | |

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.40 | 0.40 | 80 |
| 2.50 | 2.10 | 140 |
| 6.50 | 4.00 | 225 |
| 11.00 | 4.50 | 210 |
| 19.00 | 8.00 | 350 |
| 34.00 | 15.00 | 440 |
| inf. | inf. | 580 |

Vs_eq(0.0-30.0)=280m/s

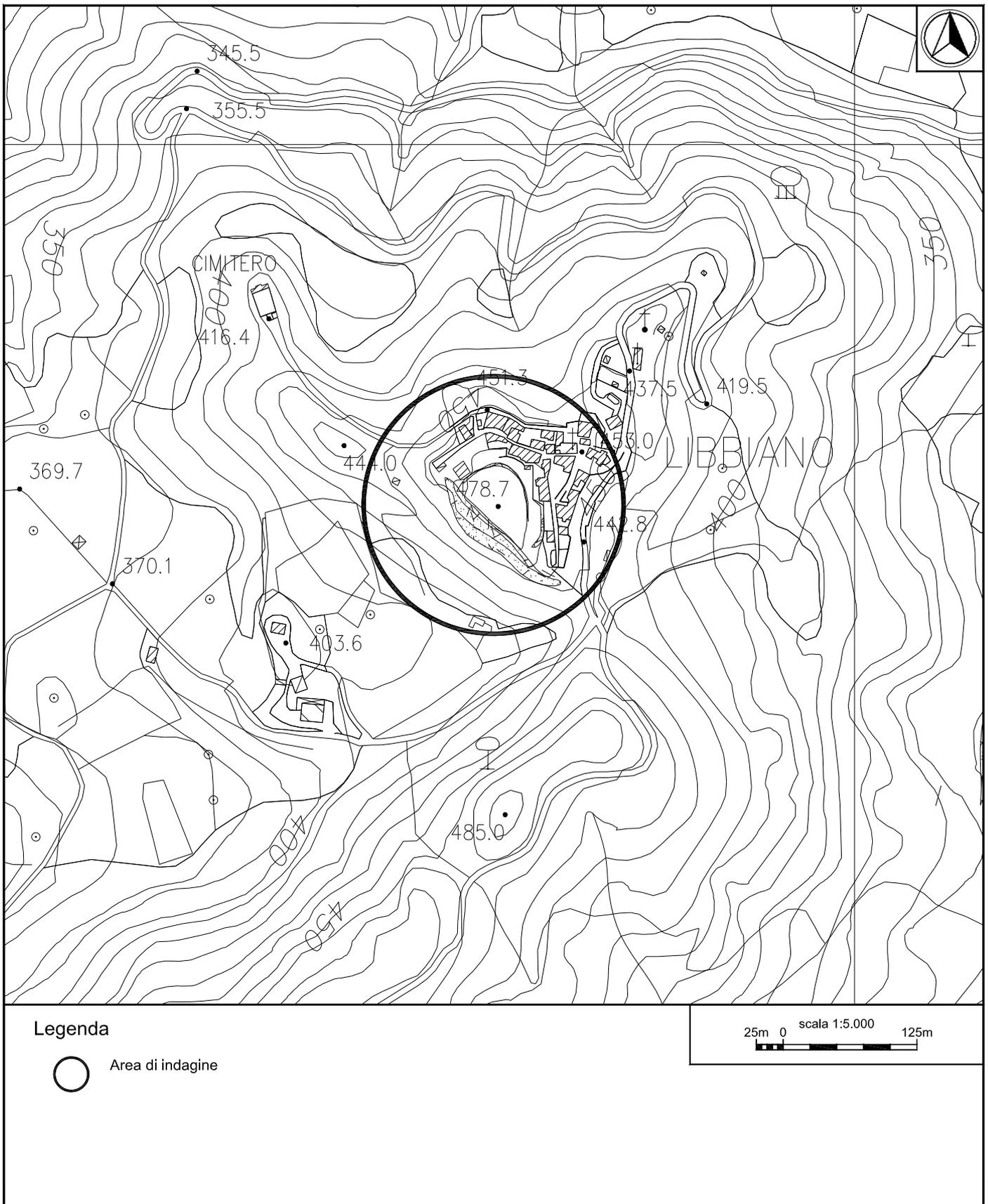




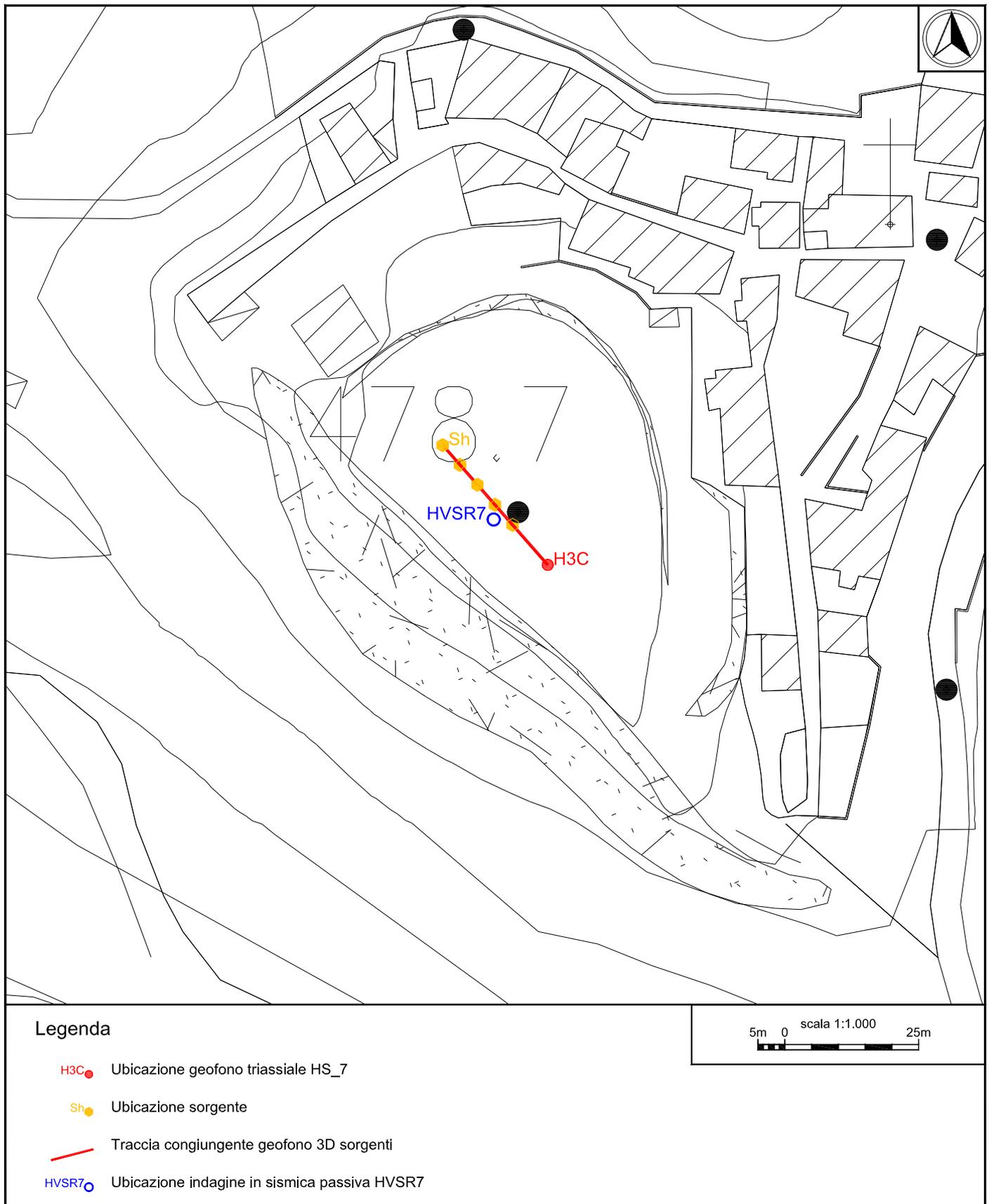
Sito 06 – Montecerboli 4. Indagine MASW_6 – Documentazione fotografica.



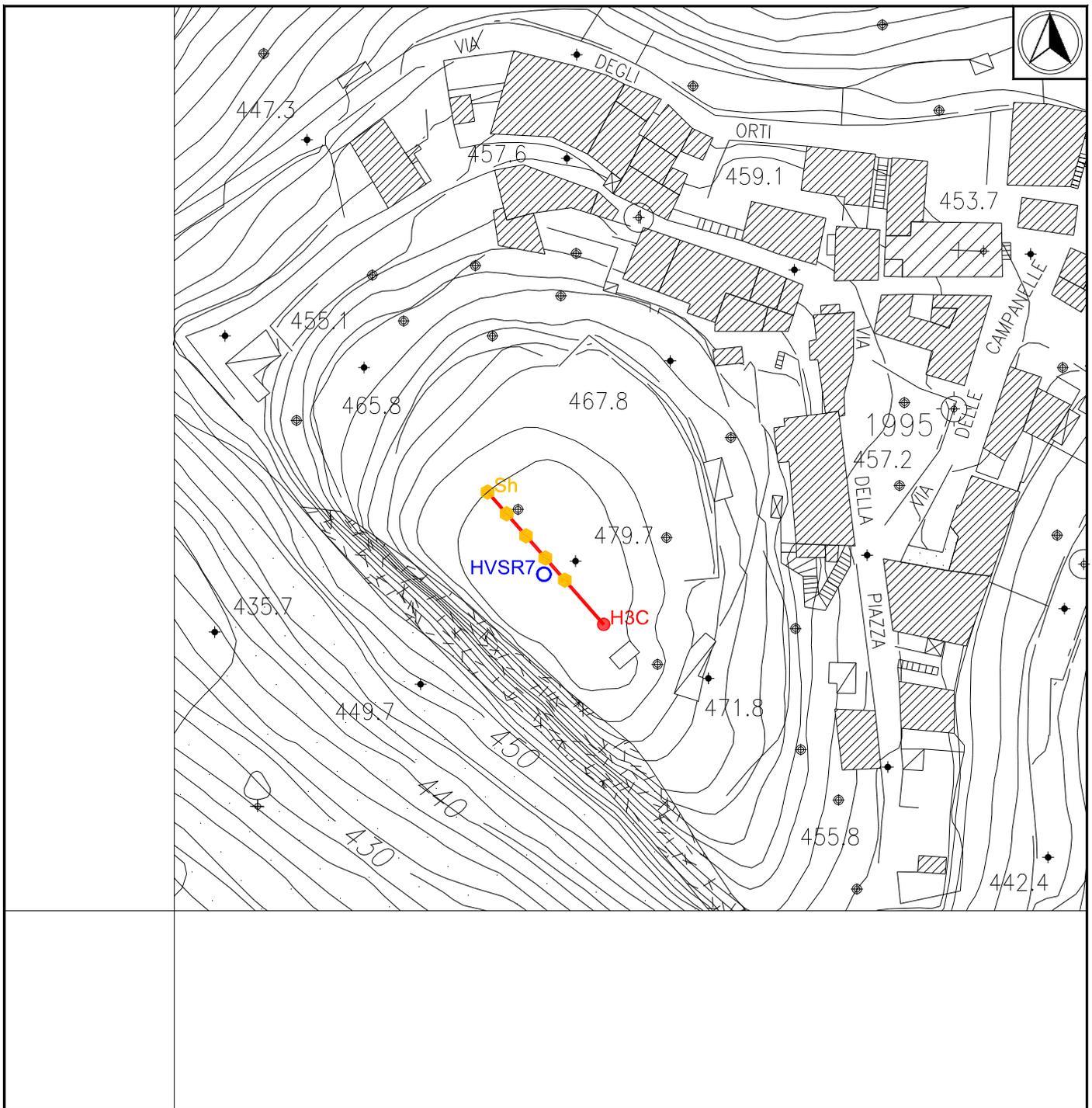
Sito 06 – Montecerboli 4. Indagine in sismica passiva HVSR6 – Documentazione fotografica.



Sito 07 – Libbiano. Ubicazione indagine HS_7 e acquisizione in sismica passiva HVSr7 - Inquadramento generale.

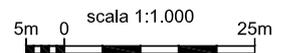


**Sito 07 – Libbiano. Ubicazione indagine HS_7 e acquisizione in sismica passiva HVSr7–
Inquadramento di dettaglio su base CTR 10.000.**

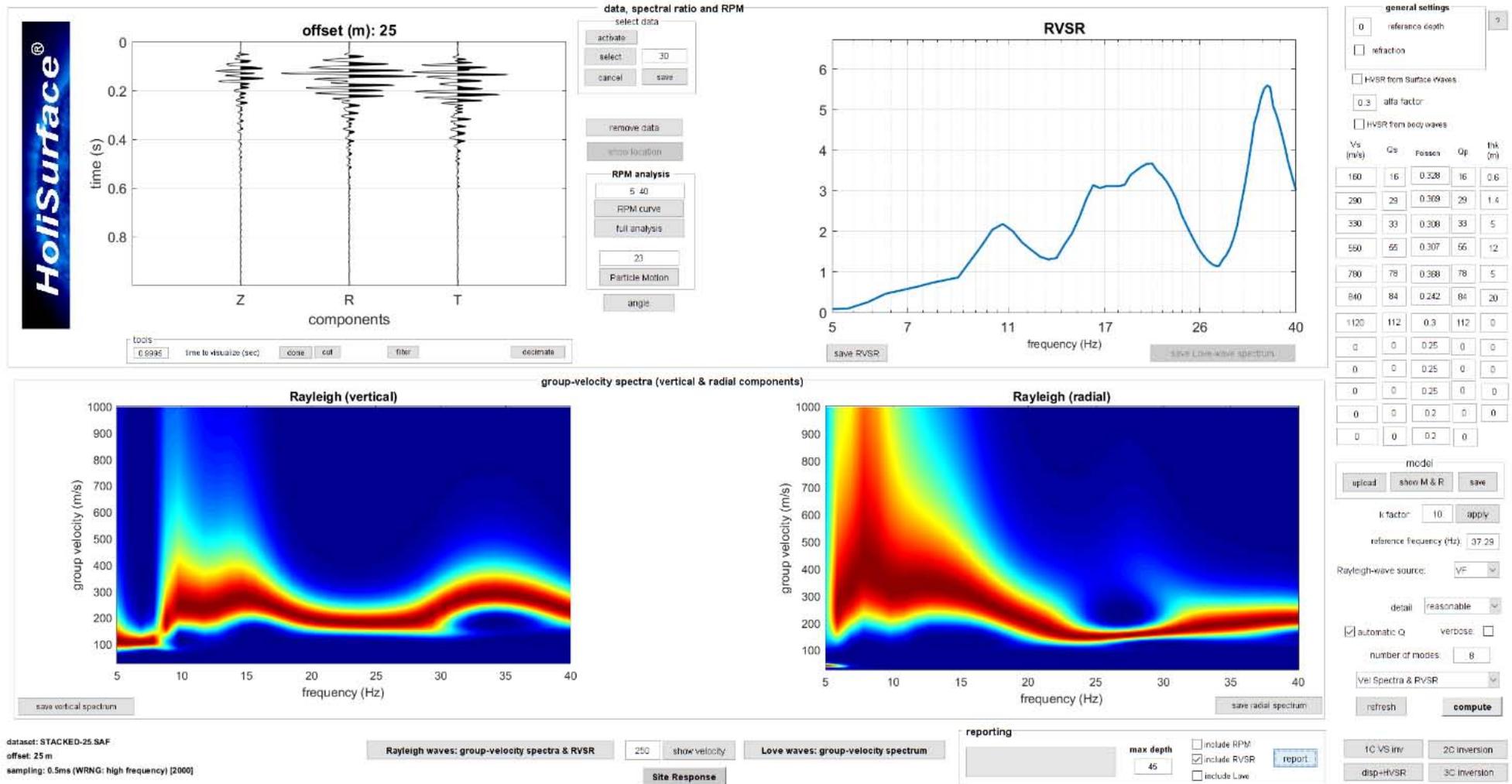


Legenda

- H3C Ubicazione geofono triassiale HS_7
- Sh Ubicazione sorgente
- Traccia congiungente geofono 3D sorgenti
- HVSr7 Ubicazione indagine in sismica passiva HVSr7



**Sito 07 – Libbiano. Ubicazione indagine HS_7 e acquisizione in sismica passiva HVSr7–
Inquadramento di dettaglio su base CTR 2.000.**

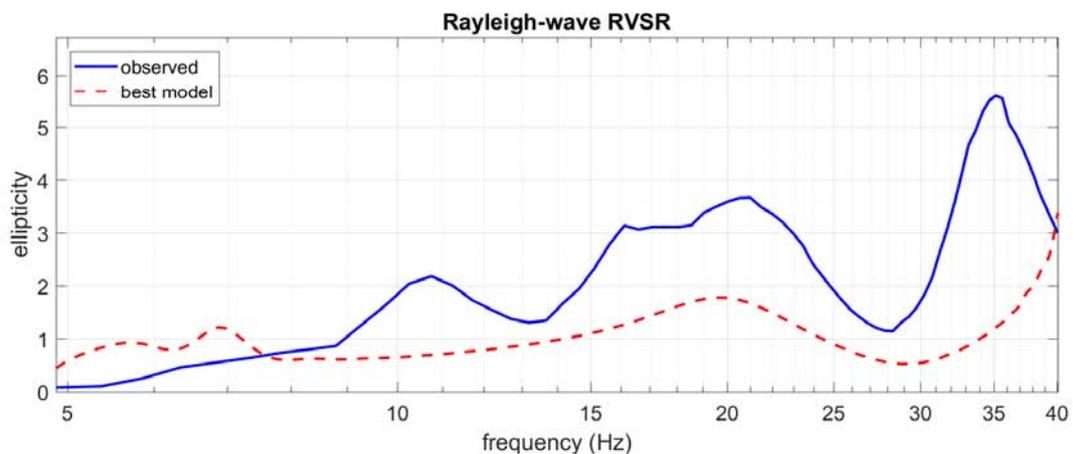
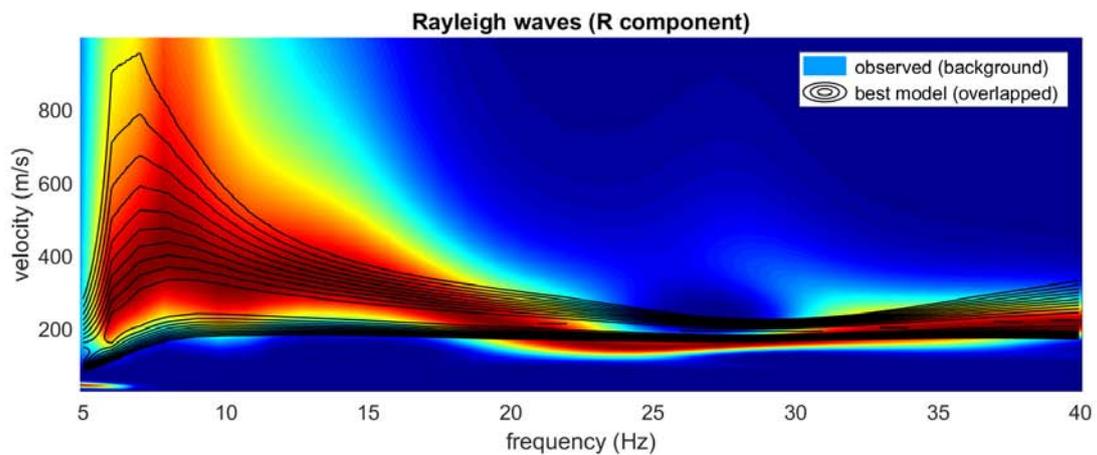
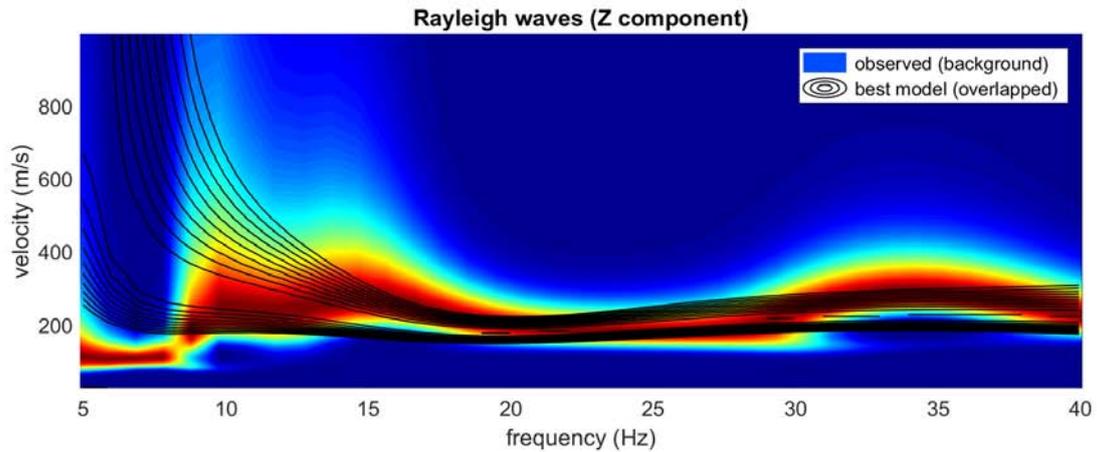


Sito 07 – Libbiano. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.

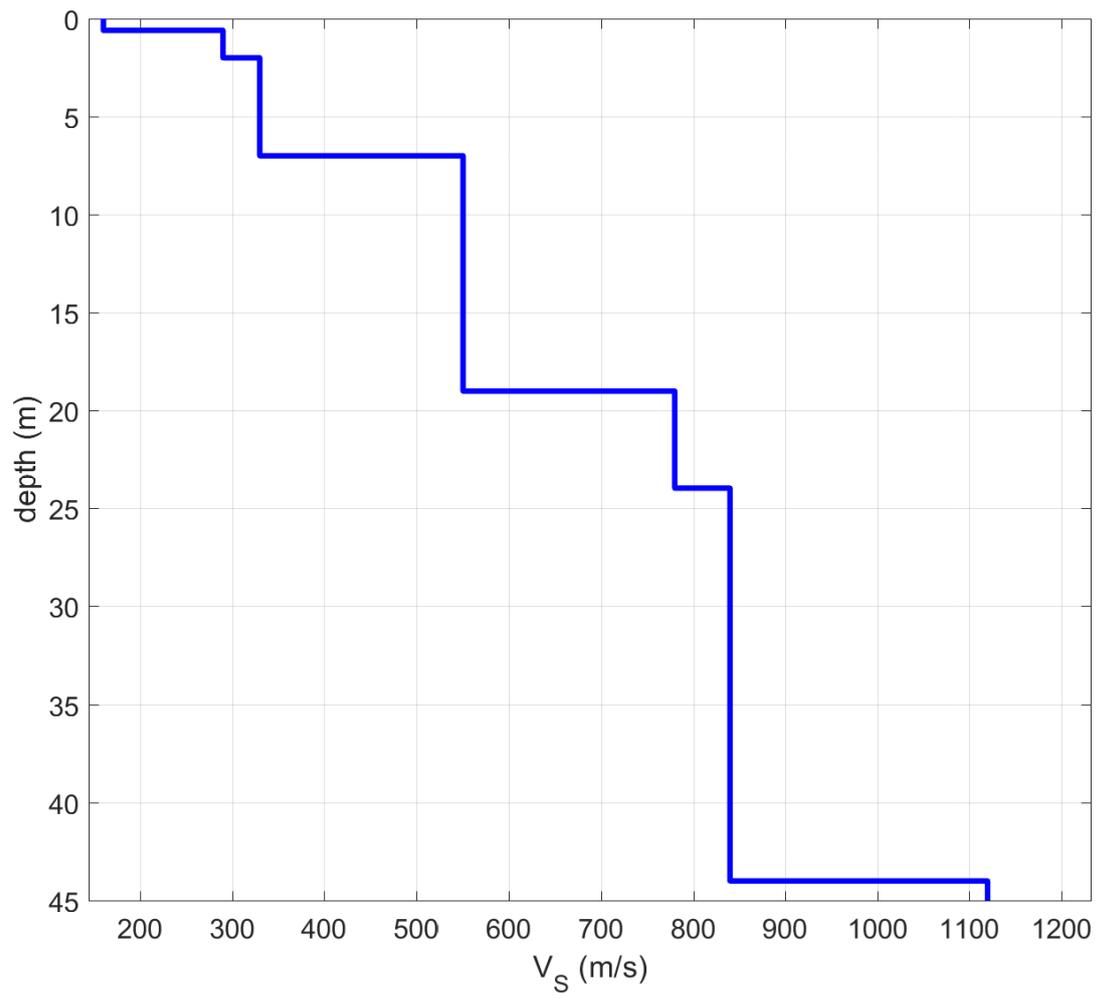
-) In alto a sinistra sono riportati i dati relativi alle onde di superficie acquisite (Z=Verticale; R=Radiale)

-) I diagrammi colorati rappresentano gli spettri delle velocità di gruppo ricavati dei dati di campagna: In basso a sinistra: componente verticale dell'onda di Rayleigh. In basso a destra: componente radiale dell'onda di Rayleigh.

-) In alto a destra: curva RVSr (Radial-to-Vertical Spectral Ratio).



Sito 07 – Libbiano. Nei diagrammi colorati sono indicati gli spettri delle velocità di gruppo dei dati di campagna su cui sono sovrapposti, con contour lines nere, lo spettro del modello di sottosuolo calcolato: -) In alto: componente verticale dell'onda di Rayleigh -) Al centro: componente radiale dell'onda di Rayleigh -) In basso: curva RVSr (Radial to Vertical Spectral Ratio): in blu continua, curva relativa al dataset acquisito; in rosso tratteggiata, curva relativa al modello di sottosuolo calcolato



Sito 07 – Libbiano. Indagine HoliSurface. Profilo verticale delle Vs.

| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.60 | 0.60 | 160 |
| 2.00 | 1.40 | 290 |
| 7.00 | 5.00 | 330 |
| 19.00 | 12.00 | 550 |
| 24.00 | 5.00 | 780 |
| 44.00 | 20.00 | 840 |
| inf. | inf. | 1120 |

$V_{s_eq}(0.0-24.0)=462\text{m/s}$

J24001_01_19_POMARANCE_TR, LIBBIANO HVSR7_NEW

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 19/01/24 12:39:42 Fine registrazione: 19/01/24 13:09:42

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h30'00".

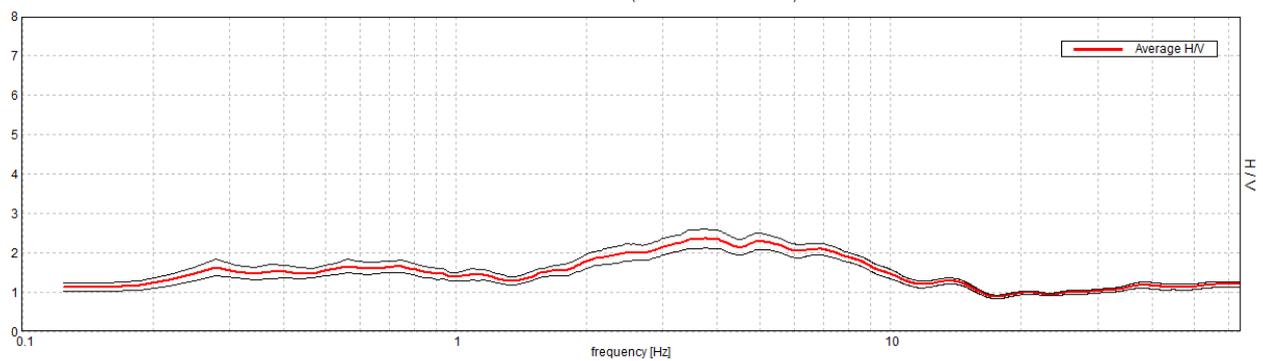
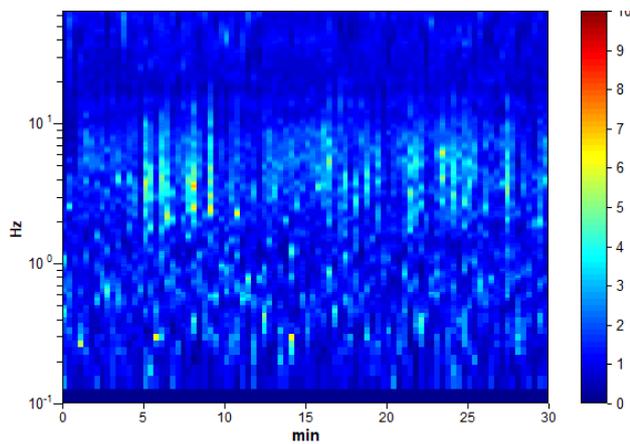
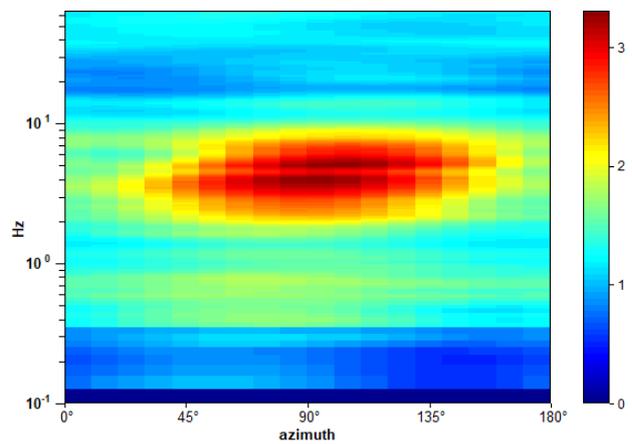
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

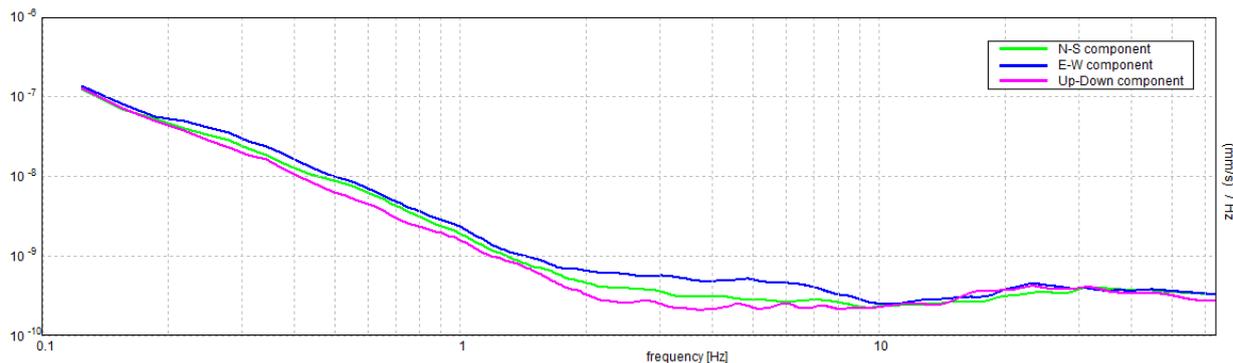
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

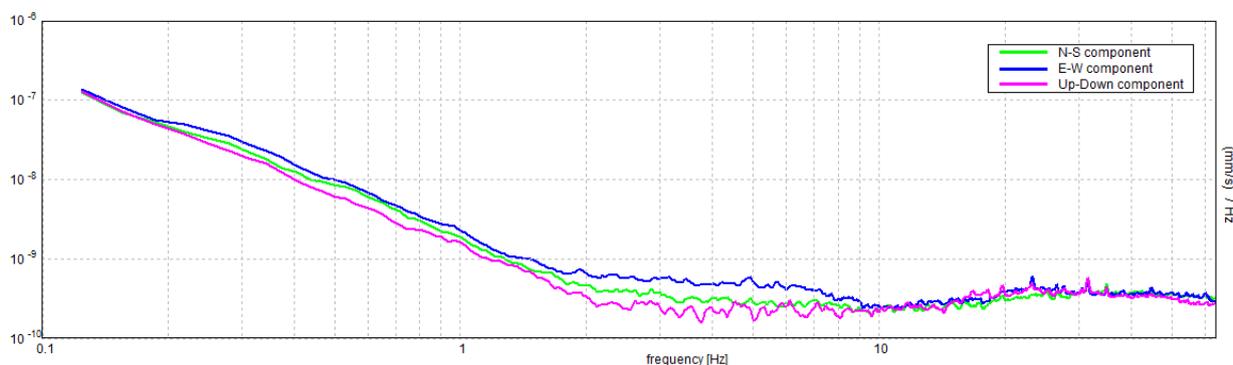
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALEPicco H/V a 3.72 ± 1.21 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**SERIE TEMPORALE H/V****DIREZIONALITA' H/V**

SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI (CON LISCIAMENTO ALL'1%)



Picco H/V a 3.72 ± 1.21 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

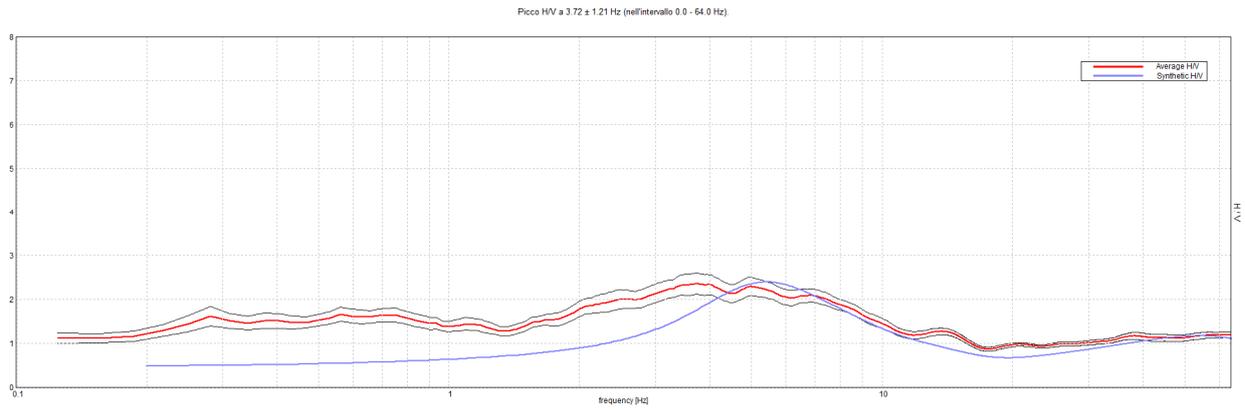
| | | | |
|--|-------------------------|-----------|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $3.72 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $6693.8 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Superato 0 volte su 180 | OK | |

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

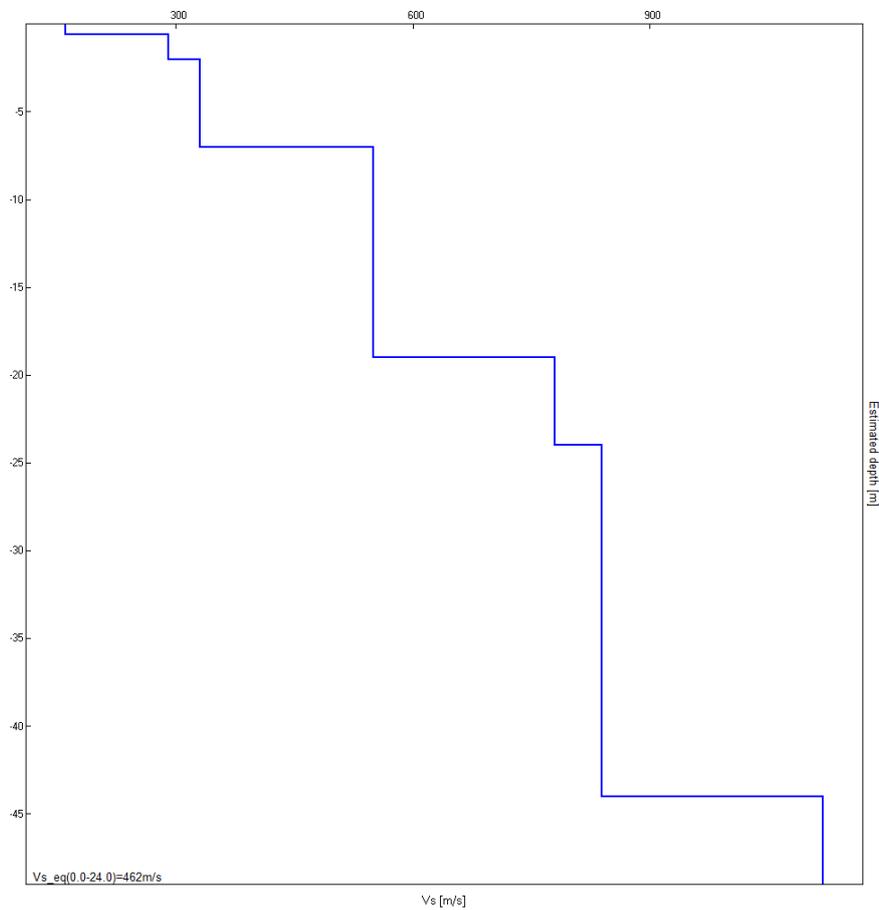
| | | | |
|--|---------------------|-----------|-----------|
| Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | | | NO |
| Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | | | NO |
| $A_0 > 2$ | $2.36 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.32644 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $1.21396 < 0.18594$ | | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.2443 < 1.58$ | OK | |

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



| Profondità alla base dello strato [m] | Spessore [m] | Vs [m/s] |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| 0.60 | 0.60 | 160 |
| 2.00 | 1.40 | 290 |
| 7.00 | 5.00 | 330 |
| 19.00 | 12.00 | 550 |
| 24.00 | 5.00 | 780 |
| 44.00 | 20.00 | 840 |
| inf. | inf. | 1120 |

Vs_eq(0.0-24.0)=462m/s





Sito 07 – Libbiano. Indagine HS_7 – Documentazione fotografica.



Sito 07 – Libbiano. Indagine in sismica passiva HVSr7 – Documentazione fotografica.