



# COMUNE DI CAUTANO

( Provincia di Benevento )



C.A.P.82030

\*\*\*\*\*

Tel.0824/880700



## Piano Urbanistico Comunale

Legge Regionale del 22 Dicembre 2004 n.16-art.23



Il Consulente Urbanistico  
*Arch. Vincenzo Carbone*



Il Collaboratore esperto in GIS

*Ing. Giuseppe Coppolaro*  
*Giuseppe Coppolaro*  
Il Geologo

*Dott. Luciano Campanelli*

*Luciano Campanelli*  
L'Agronomo

*Dott. Massimiliano De Feo*

*Massimiliano De Feo*

Il Progettista

*Ing. Michelangelo Vetrone*



CAUTANO PORTA DEL PARCO



### COMPONENTE PROGRAMMATICA

CERTIFICATI PROVE  
SISMICHE

FASCICOLO 4

Il Sindaco

*Ing. Alessandro Gisoldi*



**TABELLA SINOTTICA PROVE SISMICHE**

<b>MASW 1</b>
<b>MASW 2</b>
<b>MASW 3</b>
<b>MASW 4</b>
<b>MASW 5</b>
<b>MASW 6</b>
<b>MASW 7</b>
<b>MASW 8</b>
<b>MASW 9</b>
<b>MASW 10</b>
<b>MASW 11</b>
<b>MASW 12</b>
<b>MASW 13</b>
<b>MASW 14</b>
<b>MASW 15</b>
<b>MASW 16</b>
<b>MASW17</b>
<b>MASW 18</b>
<b>MASW 19</b>
<b>MASW 20</b>
<b>HVSR 1</b>
<b>HVSR 2</b>
<b>HVSR 3</b>
<b>HVSR 4</b>
<b>HVSR 5</b>
<b>HVSR 6</b>
<b>HVSR 7</b>
<b>HVSR 8</b>
<b>HVSR 9</b>
<b>HVSR 10</b>

**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 1***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 09' 22" N  
LONGITUDINE 14° 39' 25" E**



Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

## INDICE

Premessa .....	3
Indagine sismica con tecnica Tomografica.....	3
Indagine sismica con tecnica "MASW" .....	4
Strumentazione utilizzata .....	5
Acquisizione ed elaborazione dei dati.....	7
<i>Tomografia</i> .....	9
<i>MASW</i> .....	11
Conclusioni .....	14

### Allegati

- Allegato 1. Ubicazione indagini sismiche
- Allegato 2. Report fotografico

# Premessa

Obiettivo dell'indagine geofisica è:

- ricostruire una immagine bidimensionale del sottosuolo, mediante la misura dei tempi di percorso delle onde sismiche che si propagano all'interno dello stesso. Lo scopo è quello di determinare l'andamento della distribuzione della velocità di propagazione delle onde sismiche con la profondità al fine di ricostruire la geometria del sottosuolo.
- definire secondo quanto previsto dalla normativa vigente in materia il parametro  $V_{s,eq}$  attraverso la stima delle velocità dei terreni con l'esecuzione di una prova di sismica di tipo MASW mediante la caratterizzazione dinamica del sottosuolo con l'individuazione delle principali unità sismostratigrafiche e delle relative proprietà elastiche.

Dalla normativa vigente a tale parametro  $V_{s,eq}$  vengono attribuiti intervalli di variazione a cui corrispondono differenti categorie di sottosuolo (§ 3.2.2 NTC 2018), ed è calcolato mediante la seguente espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} [m/s]$$

dove:

$V_{s,i}$ : velocità delle onde S dello strato i-esimo

$h_i$ : spessore in metri dello strato i-esimo

N: numero di strati presenti

H: profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiori a 800 m/s.

La determinazione della  $V_{s,eq}$  avviene attraverso specifiche indagini geofisiche che si basano sulla propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo.

In generale, le indagini sismiche si dividono in attive e passive. Le prime consistono nella generazione di onde sismiche che si propagano nel sottosuolo in seguito ad una energizzazione, che avviene tramite massa battente o scoppio, in un punto sorgente. Le onde generate vengono successivamente registrate da geofoni, rilevatori del moto del suolo, disposti lungo una linea sismica. Le indagini sismiche passive, invece, sono caratterizzate dalla registrazione del rumore sismico generato da sorgenti naturali e/o artificiali (rumore antropico).

## Indagine sismica con tecnica Tomografica

Il metodo tomografico sismico consente di ricostruire la distribuzione geometrica degli elementi che costituiscono la sezione di un oggetto partendo dall'analisi del comportamento delle radiazioni che lo attraversano. Ogni radiazione che attraversa l'oggetto da un punto all'altro lungo un determinato percorso viene

modificata in maniera univoca dalle caratteristiche fisiche del mezzo attraversato; le informazioni che derivano dall'interpretazione di tali modifiche, poiché sono distribuite lungo tutto il percorso, se considerate da sole, fornirebbero notizie parziali delle proprietà dell'oggetto lungo quel percorso. L'opportuna combinazione simultanea di tutte le modifiche subite dai raggi lungo i differenti percorsi di misura consente di ridistribuire tali informazioni focalizzandole in figure geometriche ben precise.

L'impostazione del problema tomografico viene risolto mediante la costruzione di un sistema di equazioni lineari, che dai tempi di primo arrivo osservati risale alla variazione di velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo.

Le fasi di calcolo da seguire nel processo di elaborazione dei dati possono essere così sintetizzate:

1. calcolo dei tempi di percorso (*traveltime*);
2. perturbazione del modello di velocità;
3. ripetizione dell'inversione fino alla convergenza richiesta.

Nel caso in cui si abbia a disposizione un modello di velocità iniziale del terreno è possibile utilizzare un metodo iterativo attraverso il quale si calcolano i tempi teorici di percorso delle onde sismiche. I tempi di percorso teorici così calcolati vengono successivamente confrontati con quelli osservati.

I parametri del modello di velocità sono trovati minimizzando una funzione definita come il quadrato della differenza tra i tempi di percorso osservati e quelli calcolati ed assegnando un peso in funzione dell'incertezza associata alla lettura dei tempi di primo arrivo. Il minimo di tale funzione viene raggiunto quando questa differenza è associabile all'errore di lettura.

Le tecniche tomografiche richiedono la definizione del mezzo di propagazione che generalmente viene rappresentato mediante una griglia di celle, ciascuna delle quali è caratterizzata da un valore di velocità. I parametri del modello sono definiti quindi attraverso la posizione dei nodi della griglia e i valori di velocità corrispondenti.

## Indagine sismica con tecnica "MASW"

L'indagine sismica di tipo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) è un'indagine di recente sviluppo (Park et al. 1999<sup>1</sup>) e consente di ricavare il valore della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) in maniera indiretta. I vantaggi di questa tecnica risiedono nella sua velocità di esecuzione e nel fatto che si tratta di una indagine non invasiva (poiché non necessita di perforazioni per l'esecuzione della prova stessa).

A seguito della facile trattazione analitica delle onde P, in passato i ricercatori hanno preferito concentrarsi sulle onde di volume, finendo per considerare le onde superficiali solo come un inutile disturbo. Recenti studi (Miller et al. 1999<sup>2</sup>, Xia et al.,

---

<sup>1</sup> Park C.B., Miller R.D., Xia J. 1999. Multichannel analysis of surfaces waves (MASW), *Geophysics* Vol. 64, pp 800 - 808.

<sup>2</sup> Miller R.D., Xia J., Park C.B., Ivanov J. 1999. Multichannel analysis of surfaces waves to map bedrock, *Leading Edge* 18, pp 1392 - 1396.

1999b<sup>3</sup>) hanno consentito di creare un modello matematico anche per trattare le onde di Rayleigh, cercando di godere del vantaggio della elevata energia associata a questo tipo di propagazione. L'analisi di questo tipo di onde sismiche attraverso la tecnica MASW viene eseguita mediante la trattazione spettrale del sismogramma, cioè a seguito di una trasformata di Fourier, che restituisce lo spettro del segnale nel dominio delle frequenze. L'osservazione dello spettro consente di notare che le onde superficiali si propagano a velocità variabile a seconda della frequenza dell'onda stessa: questo fenomeno è detto *dispersione* ed è caratteristico di questo tipo di onde. Poiché generalmente la velocità di propagazione delle onde sismiche aumenta con la profondità, alle frequenze più basse delle onde di superficie (lunghezze d'onda maggiori) corrispondono velocità maggiori, caratteristiche degli strati più profondi, mentre le frequenze più alte (lunghezze d'onda minori) saranno caratterizzate da una velocità di propagazione più bassa, che dipende dalle caratteristiche degli strati più superficiali.

La teoria sviluppata suggerisce di caratterizzare tale fenomeno mediante una funzione detta *curva di dispersione*, che associa ad ogni frequenza una velocità di propagazione dell'onda.

La curva di dispersione, in realtà, può non essere così facile da estrarre, questo perché dipende molto dalla qualità dei dati e da quanto disturbano gli altri segnali presenti nel sismogramma.

La curva di dispersione sperimentale deve essere confrontata con una curva di dispersione teorica relativa ad un modello di sottosuolo che dipende dai parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson e densità (profilo 1D). La variazione dei parametri che individuano il modello teorico di sottosuolo porterà all'individuazione di diverse curve di dispersione teoriche che verranno confrontate con quella sperimentale. Il miglior modello teorico di sottosuolo che meglio interpreta i dati è quello che produce la curva teorica che mostra la minima differenza con la curva sperimentale (best fit-minimo misfit).

La procedura MASW può sintetizzarsi, quindi, in tre stadi distinti: acquisizione dei dati sperimentali, estrazione della curva di dispersione; inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle  $V_s$  (profilo 1D), che descrive la variazione di  $V_s$  con la profondità.

## Strumentazione utilizzata

L'indagine è stata condotta mediante l'utilizzo del sismografo M.A.E. A 6000S 24 bit a 24 canali (Figura 1). Il sismografo 24 bit per prospezione sismica MAE A6000S si distingue per la piattaforma di acquisizione dati di ultima generazione unita al sistema operativo di uso intuitivo e organizzato in menu navigabili con funzioni differenti in base al tipo di sondaggio sismico selezionato mediante un semplice tocco sul monitor touch screen a colori di grandi dimensioni. Caratteristica principale di questa serie di sismografi è la risoluzione di 24 bit effettivi per ogni singolo canale, tale risultato è possibile grazie all'utilizzo della nuova scheda di acquisizione dati MAE 24

---

<sup>3</sup> Xia J., Miller R.D. and Park C.B. 1999b. Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments; technical program with biographies. SEG, 69th Annual Meeting Houston, Texas, pp 437-440.

bit , che adotta un convertitore digitale A/D 24 bit per ciascuno dei canali di ingresso di cui è dotato il sismografo (tecnologia SST). L'adozione di tale architettura rende ideale l'A6000S per tutte le tipologie di prospezione sismica attiva e passiva nonché per indagini e rilievi strutturali su edifici ed opere infrastrutturali (acquisizione di vibrazioni con accelerometri o sensori sismici a bassa frequenza, indagini topografiche etc.). Grazie alla grande versatilità ed alle numerose procedure automatiche di verifica pre-acquisizione dalla corretta connessione dei geofoni fino all'analisi della rumorosità di fondo del sito investigato, l'acquisizione dati risulta sempre particolarmente agevole ed alla portata di tutti, inoltre è possibile effettuare una prima analisi dei dati acquisiti, anche per singola onda, direttamente in campagna, visualizzando con poche e semplici operazioni i dati relativi alle velocità in ogni singolo punto dell'onda esaminata. Il salvataggio dei dati avviene su hard disk interno a stato solido, per una maggiore sicurezza dei dati, oppure su memoria USB esterna.

Tale strumento, compatto e versatile, è stato progettato e realizzato appositamente per eseguire indagini di prospezione sismica convenzionali (rifrazione, riflessione) e non convenzionali [Re.Mi. (Refraction Microtremor) - M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) - S.A.S.W. (Spectral Analysis of Surface Waves)].



**Figura 1: strumentazione utilizzata**

Tali indagini risultano particolarmente adatte in aree fortemente antropizzate (aree urbane e industriali) con notevole presenza di rumore di fondo (noise). La sorgente sismica è costituita da una mazza battente (peso di 8kg che batte su una piastra in alluminio). Come trigger/starter è stato utilizzato un geofono verticale Geospace a 14Hz, posto in prossimità della piastra posizionata a diverse distanze dal primo geofono.

Relativamente all'acquisizione tomografica sono state condotte diverse battute al fine di dettagliare il più possibile il sottosuolo. Le oscillazioni del suolo sono state rilevate da geofoni verticali (Geospace-4,5Hz) posizionati lungo il profilo di indagine con interdistanza di 2 m.

Per quanto riguarda l'acquisizione con tecnica MASW-Re.Mi. sono stati usati geofoni verticali (Geospace-4,5Hz) posizionati lungo il profilo di indagine con interdistanza di 2 m.

I segnali sismici acquisiti sono stati successivamente elaborati con appositi programmi (Geopsy- ZondST2D) per la determinazione della sismostratigrafia del sottosuolo.

## Acquisizione ed elaborazione dei dati

Le indagini eseguite sono state finalizzate alla caratterizzazione sismostratigrafica del sottosuolo. La geometria e le modalità di acquisizione dei dati sismici sono riportati in Figura 2 e nella Tabella 1.



**Figura 2: schema della geometria di acquisizione delle indagini sismiche.**

Durante la fase di acquisizione dei dati tomografici sono stati eseguiti 5 scoppi con diversi offsets (vedi Tabella 2). Il numero di scoppi influenza la capacità risolutiva della tecnica di inversione, in quanto legato al numero di raggi sismici che attraversano il sottosuolo investigato (maggiore è il numero di scoppi generati maggiore sarà il numero di raggi sismici).

**Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati sismici.**

Indagine	Tomografia	MASW
Numero geofoni	24	
Tipo di geofono	Verticale	
Frequenza propria dei geofoni (Hz)	4,5	
Distanza intergeofonica $\Delta x$ (m)	2,0	
Lunghezza stendimento sismico (m)	54,0	50,0
Frequenza di campionamento (Hz)	1000	
Intervallo di acquisizione (ms)	0.001	
Tipo di starter	Meccanico	
Tipo di energizzazione	Meccanico	
Durata Registrazione (s)	2	

E' stata ottenuta una risoluzione tale da consentire una interpretazione dell'andamento delle velocità delle onde sismiche ben definita. Durante le operazioni di campagna è stato necessario procedere ad un incremento di segnale, cioè energizzare in corrispondenza degli stessi punti di scoppio e sommare le radiazioni al fine di esaltare i primi picchi sulla traccia, aumentando quindi il rapporto segnale-rumore. Per quanto riguarda invece la geometria di acquisizione dei dati con tecnica MASW. sono stati eseguiti due scoppi (Tabella 1 e Tabella 2) al fine di valutare la stabilità della curva di dispersione nella successiva fase di elaborazione dei dati.

**Tabella 2: numero degli scoppi e relativa posizione lungo i profili sismici la cui geometria è riportata in Figura 2.**

<b>Scoppi</b>	
<b>Scoppio S1</b>	$\Delta_1 = -4,0$ (m)
<b>Scoppio S2</b>	$\Delta_2 = -2,0$ (m)
<b>Scoppio S3</b>	$\Delta_3 = 23,0$ (m)
<b>Scoppio S4</b>	$\Delta_4 = 48,0$ (m)
<b>Scoppio S5</b>	$\Delta_5 = 50,0$ (m)

Dopo la fase di acquisizione e scarico su pendrive dei dati è stata effettuata la lettura dei tempi di primo arrivo dell'onda P per un totale di 120 letture.

Successivamente tali dati sono stati utilizzati nel processo di inversione. Nelle Figura 3 vengono le sezioni tomografiche dopo l'elaborazione con il software ZondST2D.

I dati acquisiti con tecnica MASW sono stati elaborati con il software "Geopsy" determinando l'intervallo di frequenze all'interno del quale viene trasmesso il massimo dell'energia generata, in modo da avere una informazione preliminare sui limiti di risoluzione della geometria di acquisizione.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k, piccando con una procedura manuale i massimi all'interno dello spettro.

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi e le curve di dispersione così ottenute sono state utilizzate successivamente per il processo di inversione.

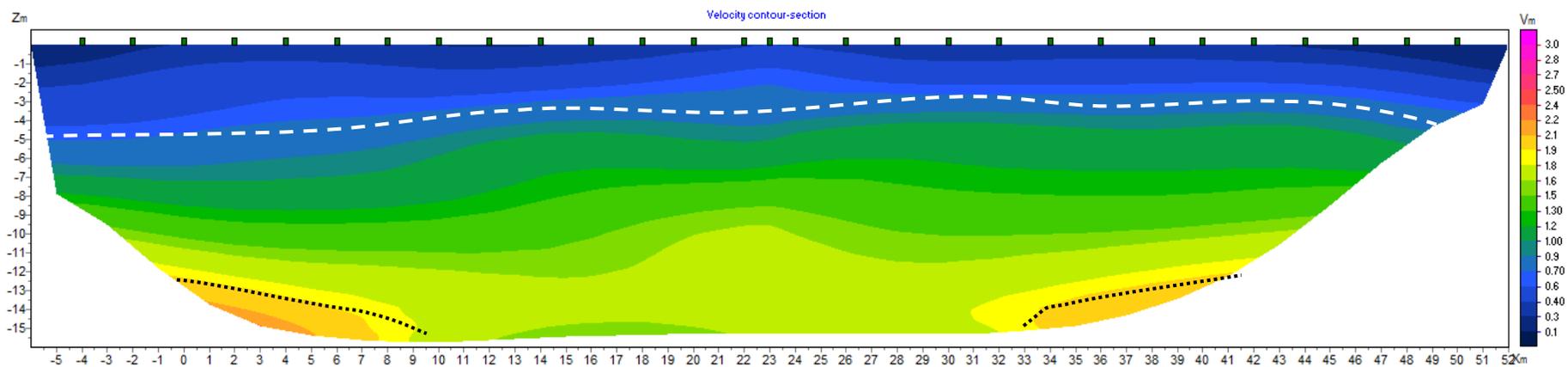
La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software "Dinver", prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell'inversione a ciascun run corrispondono 150 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L'errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna per ciascuna indagine MASW.

## *Tomografia*

La sezione tomografica mostra la presenza di tre strati con geometria articolata descritti di seguito:

- un sismostrato superficiale (delimitato in basso dalla linea bianca in Figura 3) caratterizzato da valori di velocità delle onde P minori di 600 m/s, con andamento sub parallelo alla superficie topografica attuale, che presenta uno spessore medio pari a circa 3 m;
- un secondo sismostrato caratterizzato da valori di velocità comprese tra 600 m/s e 1600 m/s, limitato in basso dalla linea nera (presente solo nelle parti laterali della sezione), che presenta una caratteristica forma a conca con uno spessore massimo, ricostruito, in corrispondenza della parte centrale della sezione pari a circa 11 m;
- Un terzo sismostrato caratterizzato da valori di velocità maggiori di 1600 m/s (fino a 2500 m/s) che rappresenta il semispazio esplorativo con spessore indeterminato, che affiora solo nelle parti laterali della sezione tomografica.



**Figura 3: sezione tomografica. In alto le dromocrone relative gli scoppi realizzati. L'ubicazione e il verso di acquisizione sono riportati in Figura 2 e in allegato. Le velocità delle onde sismiche sono espresse in Km/s.**

# MASW 1

La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 5-80 Hz.

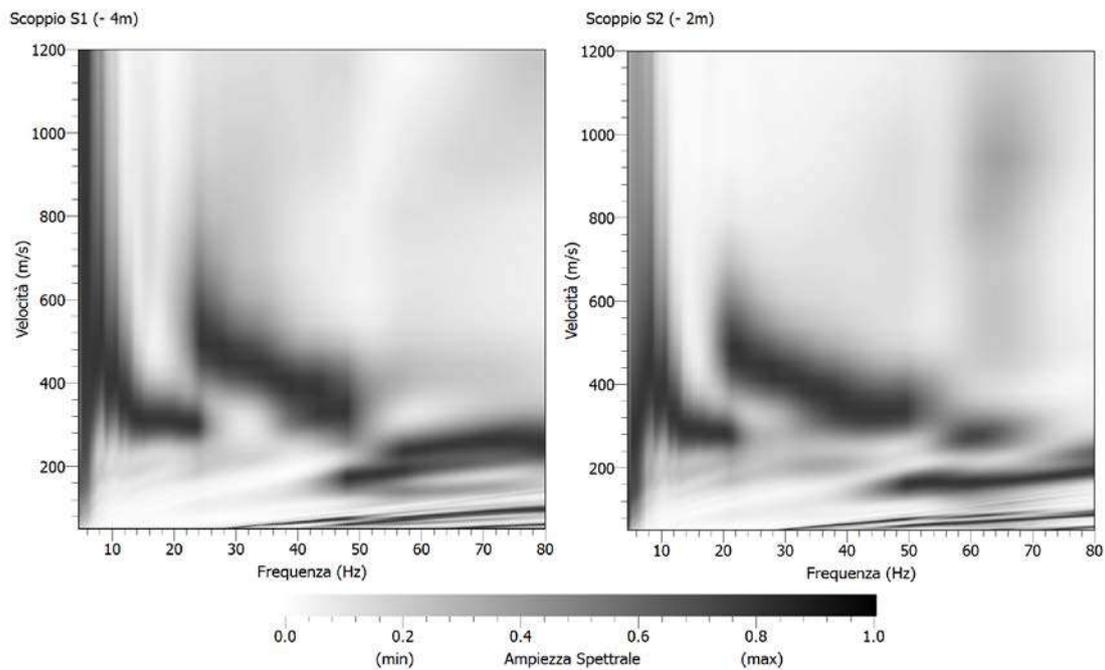


Figura 4: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.

La procedura di picking è stata effettuata sulla curva di dispersione relativa allo scoppio S1, in quanto la relativa curva risulta essere più stabile all'interno del range di frequenza considerato.

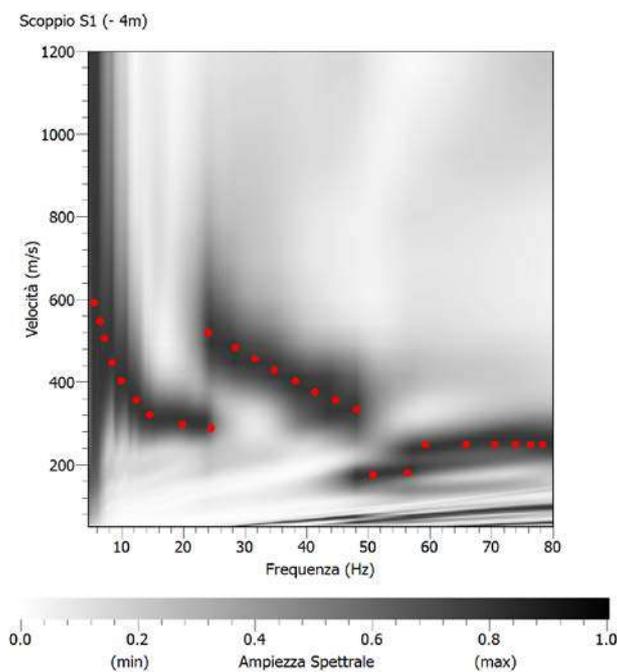


Figura 5. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi ai modi di vibrazione riconosciuti.

Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

Tabella 3

Parametri di inversione	
Numero di run	10
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	50500
Minimo misfit	0,0548

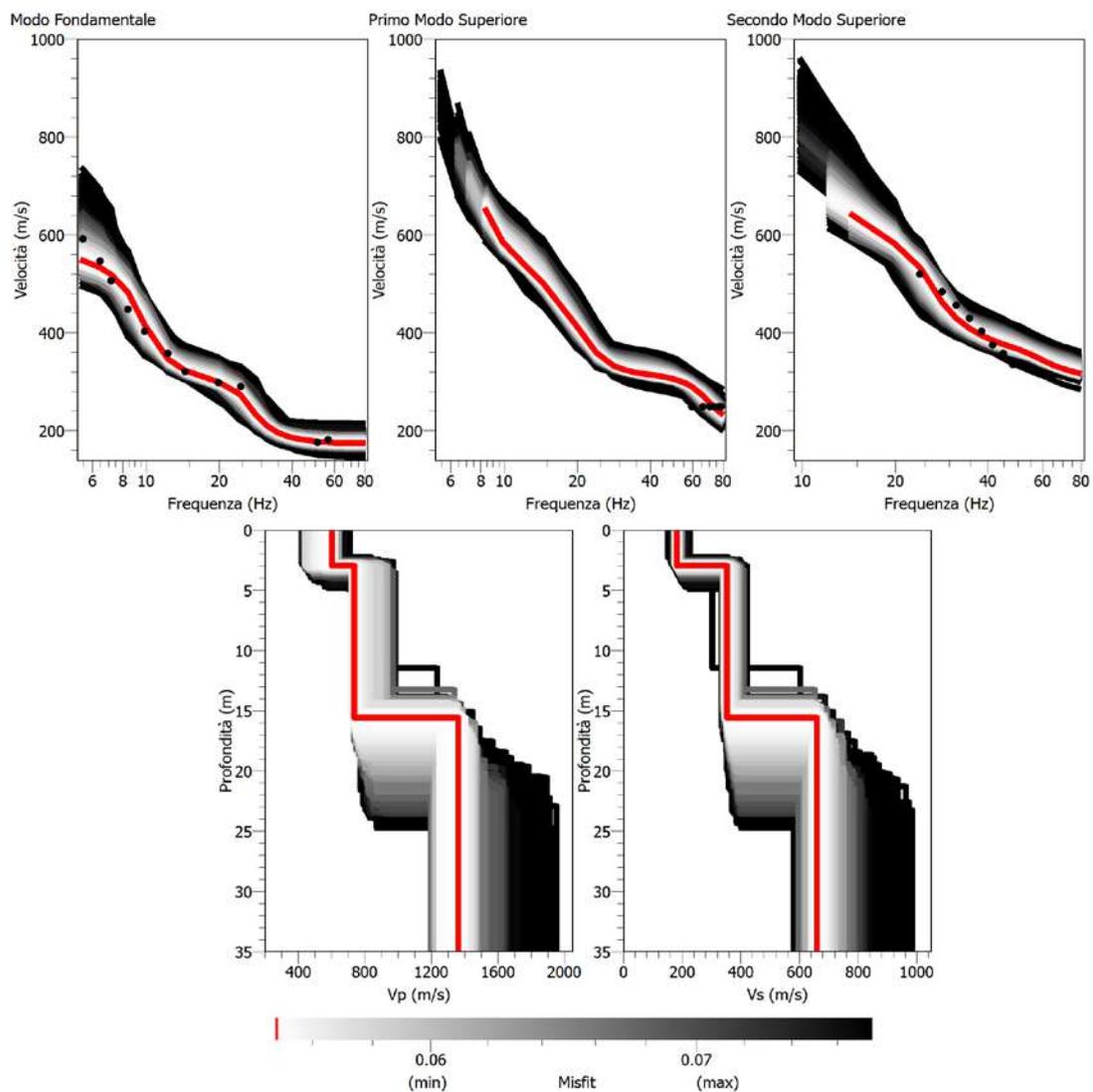


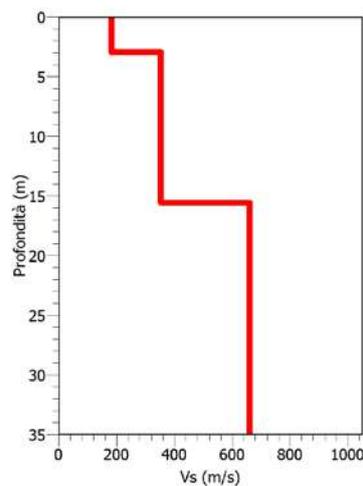
Figura 6: curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d'inversione. In rosso sono riportati le curve e il modello che rappresenta il minimo misfit.

In Figura 6 è riportata la curva di dispersione teorica e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>4</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

**Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.**

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	2,90	605	185	1600	0,45	54760	158632	512627
2	12,60	750	355	1800	0,36	226845	615037	710040
3	14,50	1365	660	2000	0,35	871200	2347778	2564850



**Figura 7: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della Vs,eq.**

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna fino alla profondità di 30 m dal momento che non è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s.

Profondità (m)	$V_{s,eq}=VS30$ (m/s)
0-30	410

$$^4 G = V_s^2 * \rho$$

$$K = \rho * (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho * [(3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\nu = [1/2 (V_p / V_s)^2 - 1] * [(V_p / V_s)^2 - 1]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici".  
Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'indagine tomografica ha permesso di ricostruire con una buona risoluzione la struttura del sottosuolo investigato, riconoscendo la presenza di tre sismostrati.

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 410 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

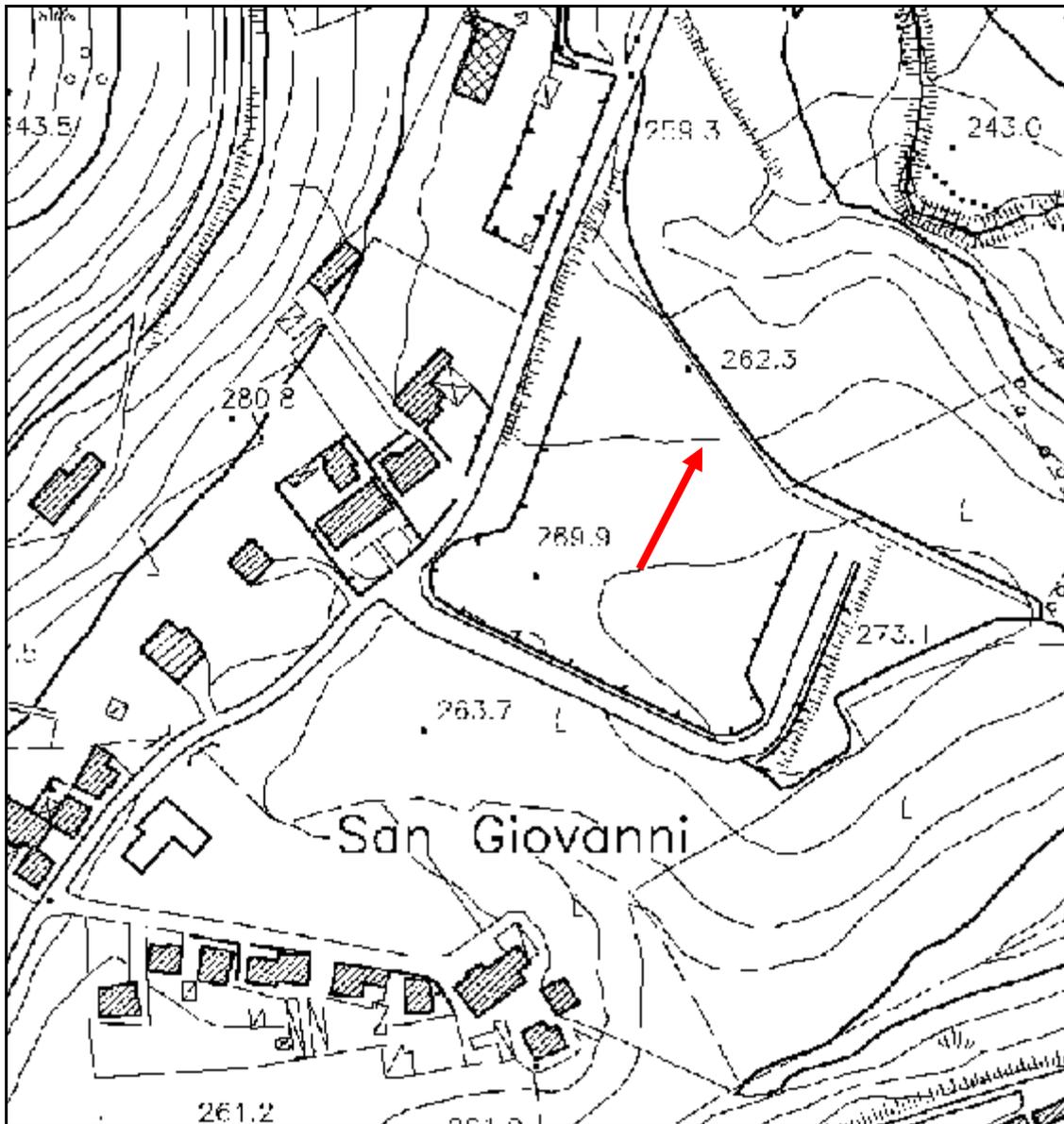
In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

**ALLEGATO 1**  
**UBICAZIONE INDAGINI**  
(scala 1:3000)



 MASW-Remi + Profilo Tomografico. La freccia indica il verso di lettura

**ALLEGATO 2**  
**REPORT FOTOGRAFICO**



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 2***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 09' 19" N  
LONGITUDINE 14° 39' 20" E**



Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

Le indagini eseguite sono state finalizzate alla caratterizzazione sismostratigrafica del sottosuolo. La geometria e le modalità di acquisizione dei dati sismici sono riportati in Figura 2 e nella Tabella 1.

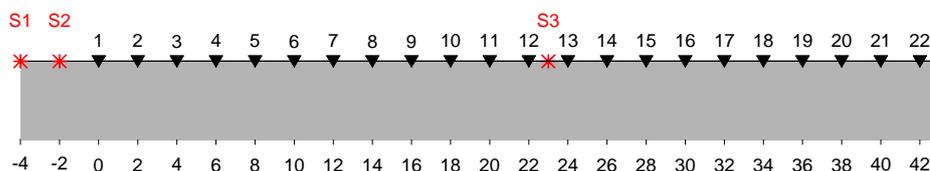


Figura 1: schema della geometria di acquisizione delle indagini sismiche.

Durante la fase di acquisizione dei dati tomografici sono stati eseguiti 5 scoppi con diversi offsets (vedi Tabella 2). Il numero di scoppi influenza la capacità risolutiva della tecnica di inversione, in quanto legato al numero di raggi sismici che attraversano il sottosuolo investigato (maggiore è il numero di scoppi generati maggiore sarà il numero di raggi sismici).

Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati sismici.

Indagine	Tomografia	MASW	Re.Mi
Numero geofoni	24		
Tipo di geofono	Verticale		
Frequenza propria dei geofoni (Hz)	4,5		
Distanza intergeofonica $\Delta x$ (m)	2,0		
Lunghezza stendimento sismico (m)	54,0	50,0	46,0
Frequenza di campionamento (Hz)	1000		100
Intervallo di acquisizione (ms)	0.001		0.01
Tipo di starter	Meccanico		
Tipo di energizzazione	Meccanico		
Durata Registrazione (s)	2		218

E' stata ottenuta una risoluzione tale da consentire una interpretazione dell'andamento delle velocità delle onde sismiche ben definita. Durante le operazioni di campagna è stato necessario procedere ad un incremento di segnale, cioè energizzare in corrispondenza degli stessi punti di scoppio e sommare le radiazioni al fine di esaltare i primi picchi sulla traccia, aumentando quindi il rapporto segnale-rumore. Per quanto riguarda invece la geometria di acquisizione dei dati con tecnica MASW, sono stati eseguiti due scoppi (Tabella 1 e Tabella 2) al fine di valutare la stabilità della curva di dispersione nella successiva fase di elaborazione dei dati.

**Tabella 2: numero degli scoppi e relativa posizione lungo i profili sismici la cui geometria è riportata in Figura 2.**

Scoppi	
Scoppio S1	$\Delta_1 = -4,0$ (m)
Scoppio S2	$\Delta_2 = -2,0$ (m)
Scoppio S3	$\Delta_3 = 23,0$ (m)
Scoppio S4	$\Delta_4 = 48,0$ (m)
Scoppio S5	$\Delta_5 = 50,0$ (m)

Dopo la fase di acquisizione e scarico su pendrive dei dati è stata effettuata la lettura dei tempi di primo arrivo dell'onda P per un totale di 120 letture.

Successivamente tali dati sono stati utilizzati nel processo di inversione. Nelle Figura 3 vengono le sezioni tomografiche dopo l'elaborazione con il software ZondST2D.

I dati acquisiti con tecnica MASW sono stati elaborati con il software "Geopsy" determinando l'intervallo di frequenze all'interno del quale viene trasmesso il massimo dell'energia generata, in modo da avere una informazione preliminare sui limiti di risoluzione della geometria di acquisizione.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k, piccando con una procedura manuale i massimi all'interno dello spettro.

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi e le curve di dispersione così ottenute sono state utilizzate successivamente per il processo di inversione.

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software "Dinver", prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell'inversione a ciascun run corrispondono 150 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L'errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna per ciascuna indagine MASW.

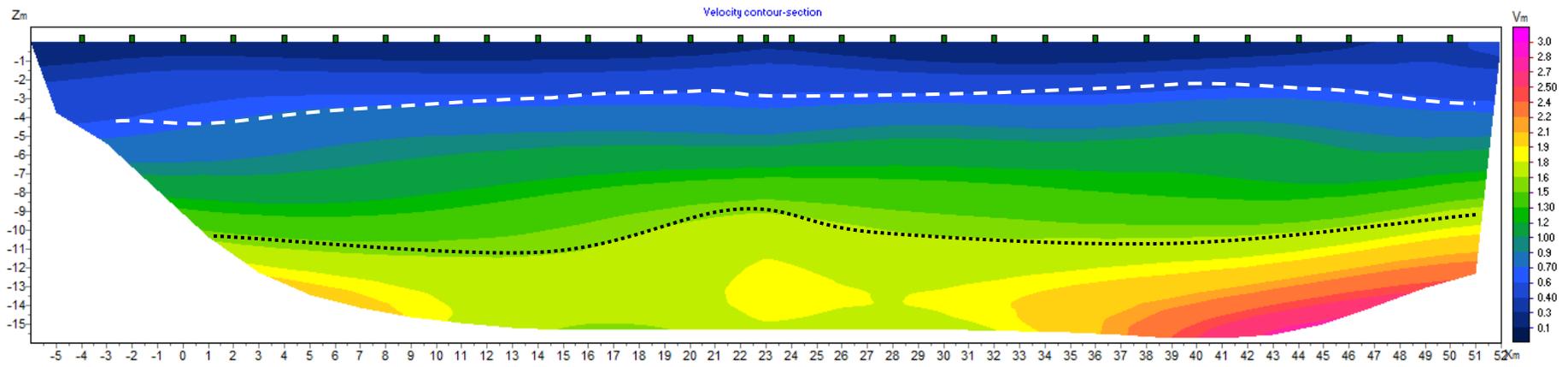
## Tomografia

La sezione tomografica mostra la presenza di tre strati con geometria articolata descritti di seguito:

- un sismostrato superficiale (delimitato in basso dalla linea bianca in Figura 3) caratterizzato da valori di velocità delle onde P minori di 600 m/s, con

andamento sub parallelo alla superficie topografica attuale, che presenta uno spessore medio pari a circa 4 m;

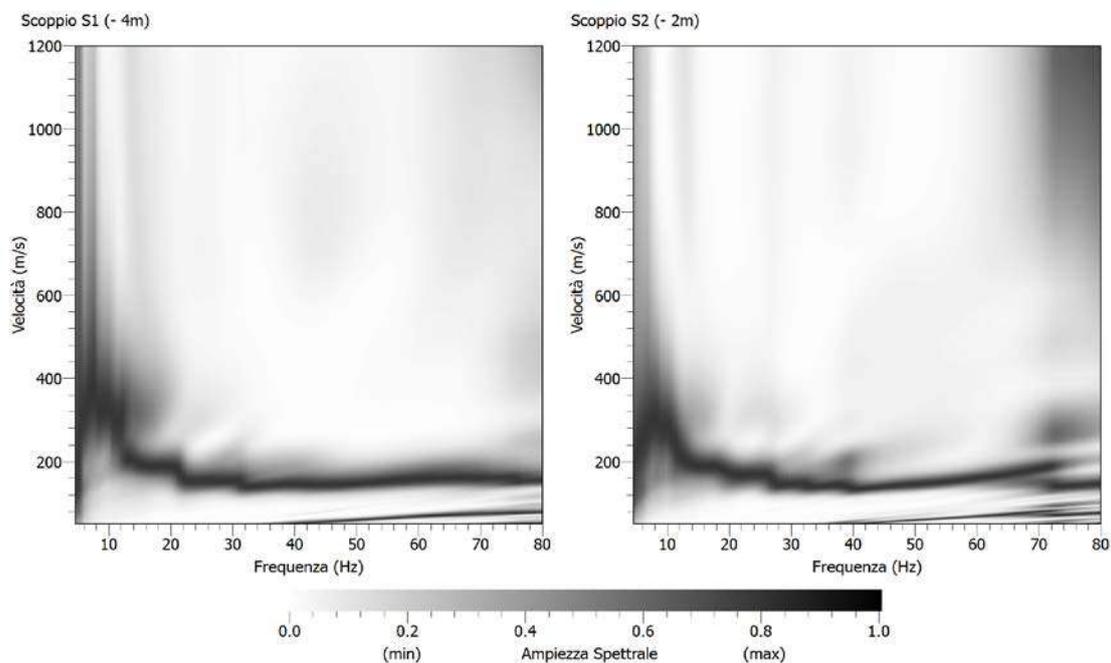
- un secondo sismostrato caratterizzato da valori di velocità comprese tra 600 m/s e 1600 m/s, limitato in basso dalla linea nera (presente solo nelle parti laterali della sezione), che si presenta anch'esso con una superficie piano parallela al piano campagna, con uno spessore medio pari a circa 8 m;
- Un terzo sismostrato caratterizzato da valori di velocità maggiori di 1600 m/s (fino a 2700 m/s) che rappresenta il semispazio esplorativo con spessore indeterminato, che affiora solo nelle parti laterali della sezione tomografica.



**Figura 2: sezione tomografica. In alto le dromocrone relative gli scoppi realizzati. L'ubicazione e il verso di acquisizione sono riportati in Figura 2 e in allegato. Le velocità delle onde sismiche sono espresse in Km/s.**

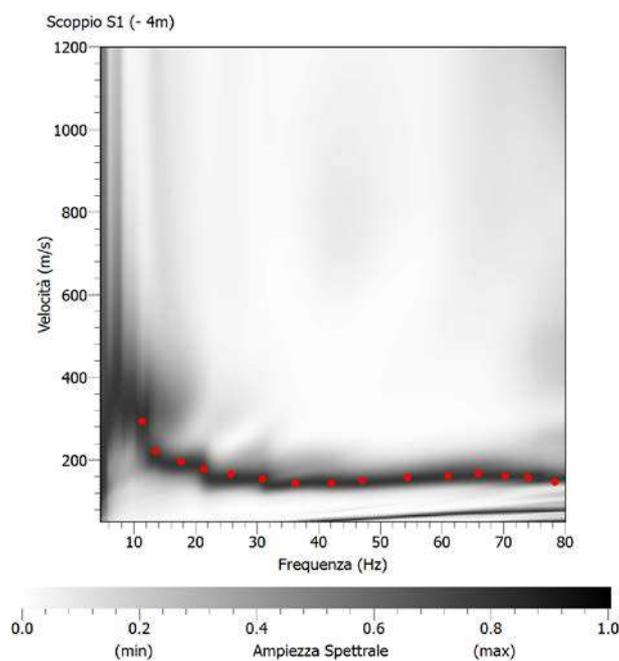
## MASW 2

La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 10-80 Hz.



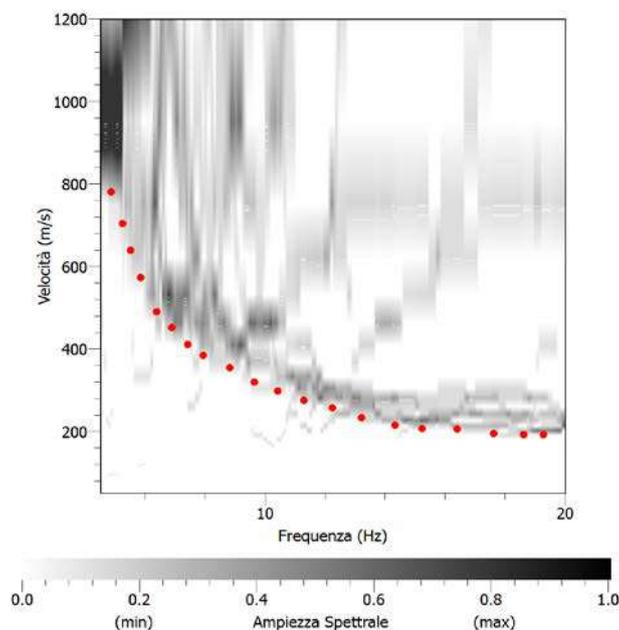
**Figura 3: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

La procedura di picking è stata effettuata sulla curva di dispersione relativa allo scoppio S1, in quanto la relativa curva risulta essere più stabile all'interno del range di frequenza considerato.



**Figura 4. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi ai modi di vibrazione riconosciuti.**

Data l'indeterminazione alle basse frequenze, sono stati utilizzati anche i dati acquisiti con tecnica Re.Mi. (Figura 6) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata nel processo di inversione unitamente ai dati ottenuti con la tecnica MASW.



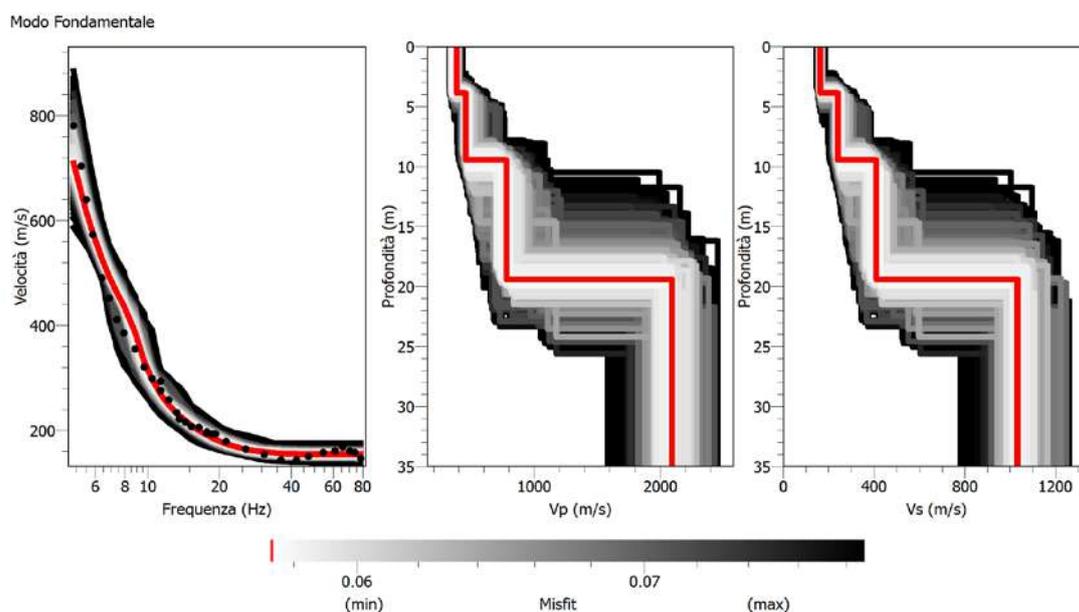
**Figura 5: picking curva dispersione ottenuta con tecnica Re.Mi..**

Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

<b>Parametri di inversione</b>	
<b>Numero di run</b>	<b>4</b>
<b>Iterazione per ciascun run</b>	<b>100</b>
<b>Modelli generati per ciascun run</b>	<b>5050</b>
<b>Modelli totali generati</b>	<b>20200</b>
<b>Minimo misfit</b>	<b>0,0573</b>

In Figura 7 è riportata la curva di dispersione teorica e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 6:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d'inversione. In rosso sono riportati le curve e il modello che rappresenta il minimo misfit.

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

**Tabella 4:** parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	3,80	400	165	1600	0,40	43560	121748	197920
2	5,50	470	250	1900	0,30	118750	309395	261377
3	9,90	785	410	2000	0,31	336200	882485	784183
4	10,80	2100	1035	2200	0,34	2356695	6313954	6559740

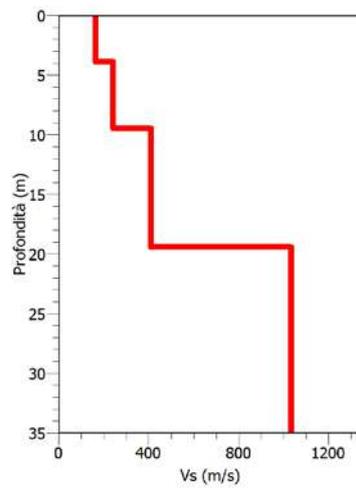
$$^1 G = V_s^2 * \rho$$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho * [(3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\nu = [1/2 * (V_p / V_s)^2 - 1] * [(V_p / V_s)^2 - 1]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992



**Figura 7: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{s,eq}$ .**

Poiché all'interno del modello di velocità ottenuto è presente uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s, ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{s,eq}$  calcolata fino alla profondità di 19,20 m dall'attuale piano campagna.

Profondità (m)	$V_{s,eq}$ (m/s)
0-19,2	201

## Conclusioni

L'indagine tomografica ha permesso di ricostruire con una buona risoluzione la struttura del sottosuolo investigato, riconoscendo la presenza di tre sismostrati.

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 201 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

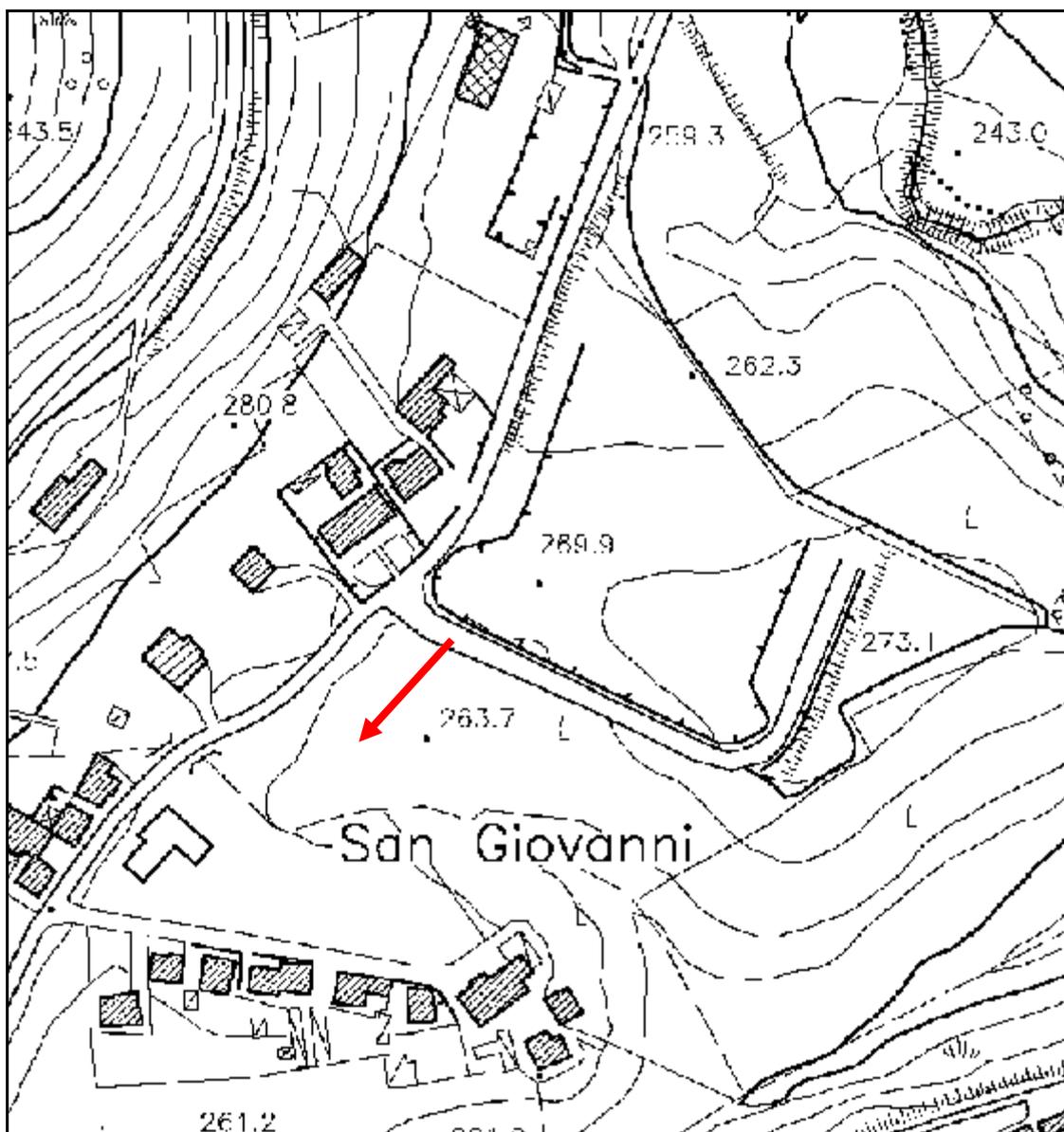
In riferimento alla Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

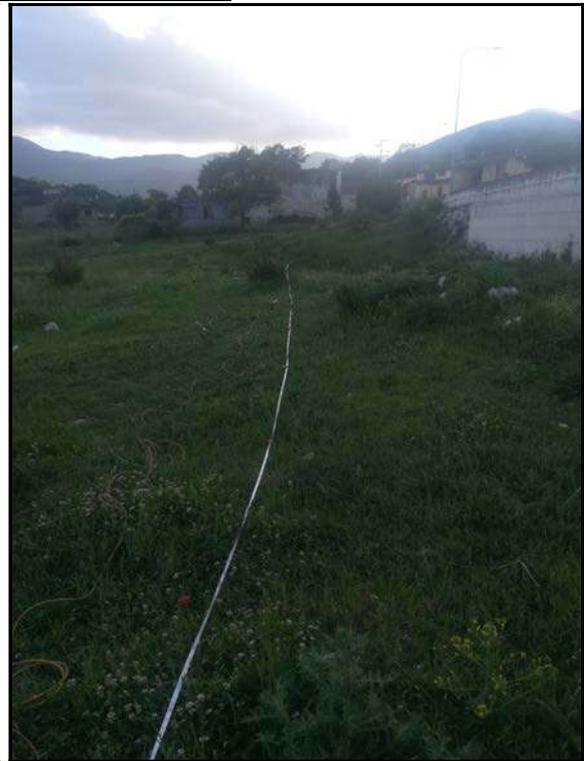
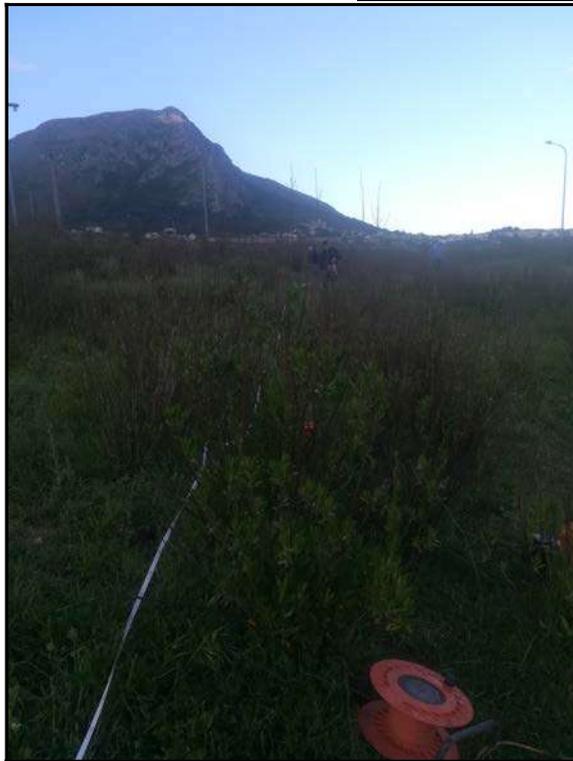
Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

**ALLEGATO 1**  
**UBICAZIONE INDAGINI**  
(scala 1:3000)



 MASW-Remi + Profilo Tomografico. La freccia indica il verso di lettura

**ALLEGATO 2**  
**REPORT FOTOGRAFICO**

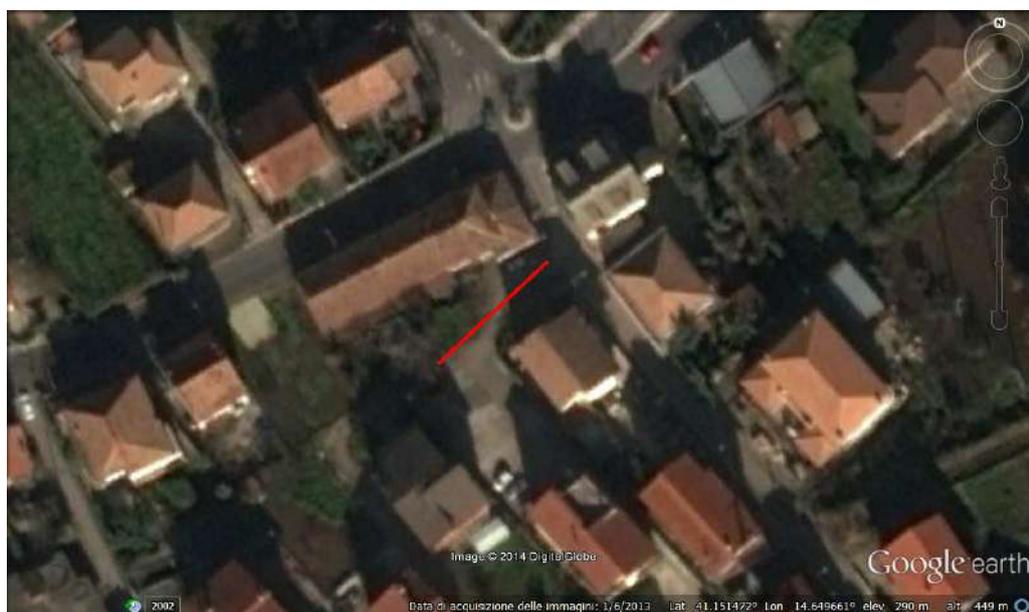


**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 3***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 09' 05" N  
LONGITUDINE 14° 38' 59" E**

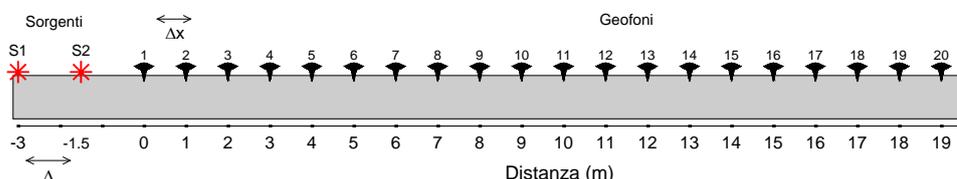


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1:** schema della geometria di acquisizione.

**Tabella 1:** caratteristiche di acquisizione dei dati

Numero geofoni	24
Tipo di geofono	Verticale
Frequenza propria dei geofoni (Hz)	4,5
Distanza intergeofonica $\Delta x$ (m)	1,0
Lunghezza stendimento sismico (m)	26
Frequenza di campionamento (Hz)-MASW	1000
Intervallo di acquisizione (ms)-MASW	0,001
Frequenza di campionamento (Hz)-Re.Mi.	100
Intervallo di acquisizione (ms)-Re.Mi.	0,01
Durata di registrazione-Re.Mi.	3m38s
Tipo di starter	Meccanico
Tipo di energizzazione	Meccanico

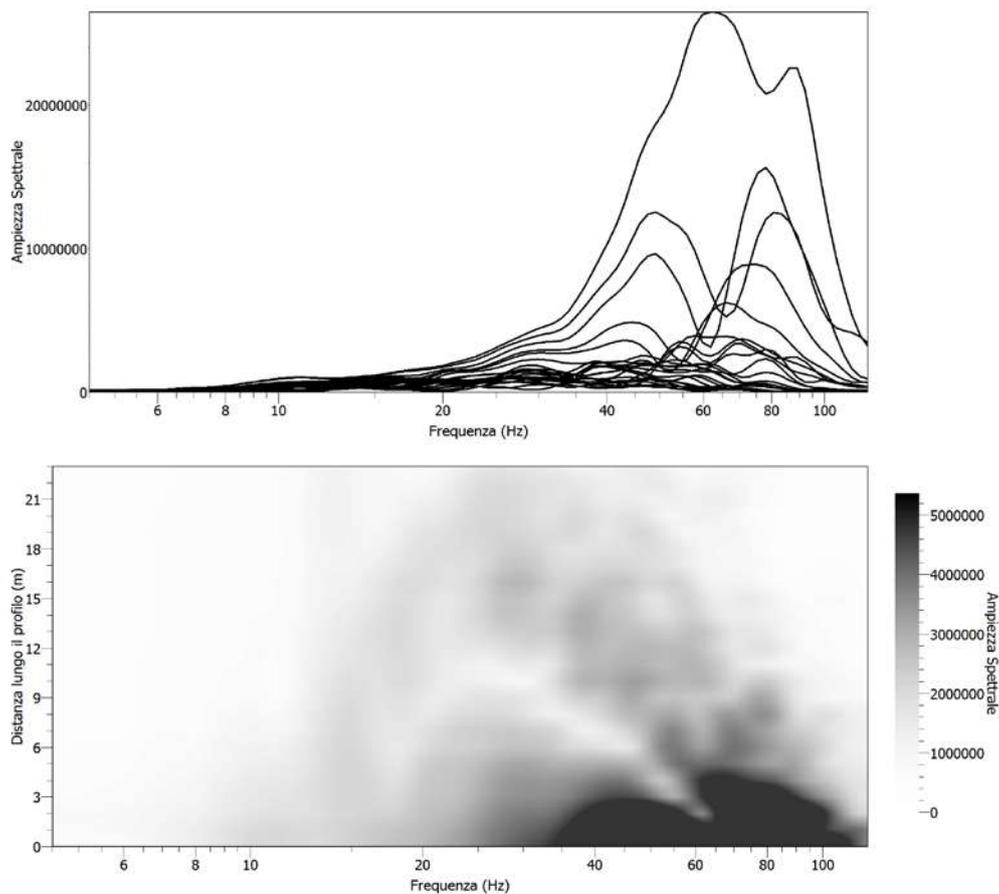
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2:** schema energizzazione.

Numero di energizzazioni	2*
Scoppio S1	$\Delta_1 = -3,0$ (m)
Scoppio S2	$\Delta_2 = -1,5$ (m)

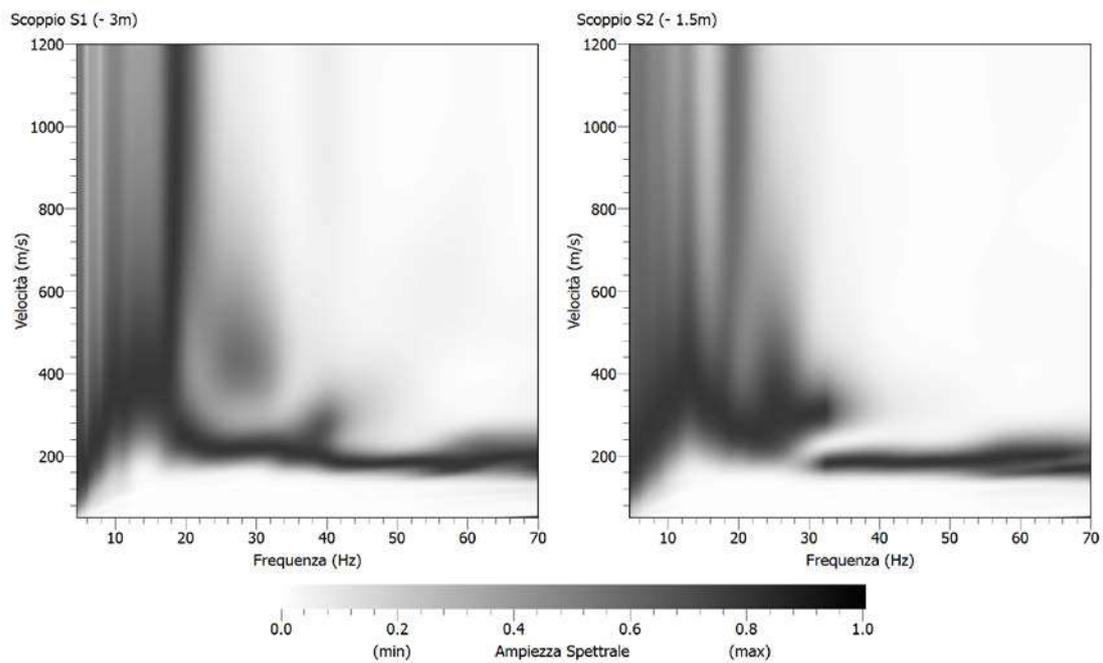
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

Inoltre, utilizzando il software "Geopsy", è stato determinato l'intervallo di frequenze all'interno del quale viene trasmesso il massimo dell'energia generata (Figura 3), in modo da avere una informazione preliminare sui limiti di risoluzione della geometria di acquisizione.

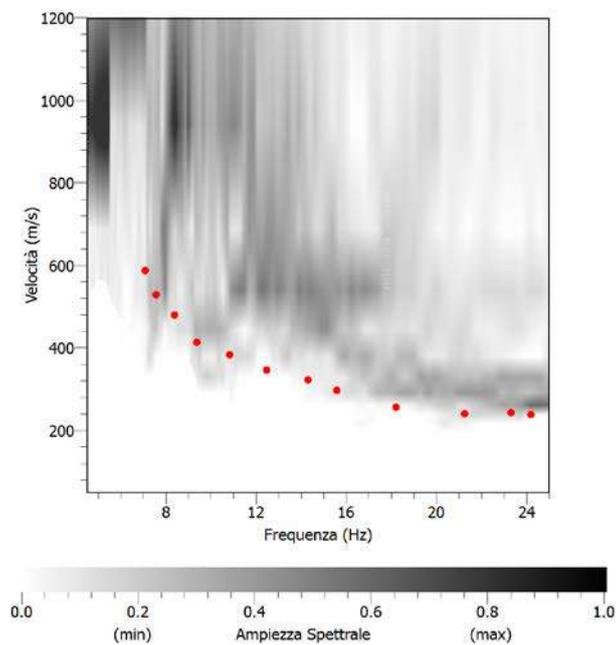


**Figura 2: in alto spettri singoli ottenuti per ogni traccia sismica lungo lo stendimento, in basso spettrogramma in frequenza che mostra come nell'intervallo 10-120 Hz sia contenuto il massimo dell'energia generata.**

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 4), piccando con una procedura manuale i massimi all'interno dello spettro. La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 15-70 Hz. Data l'indeterminazione a frequenze minori e per avere informazioni a maggiori profondità è stata determinata la curva di dispersione sperimentale relativa all'acquisizione Re.Mi. e il relativo picking (Figura 5).

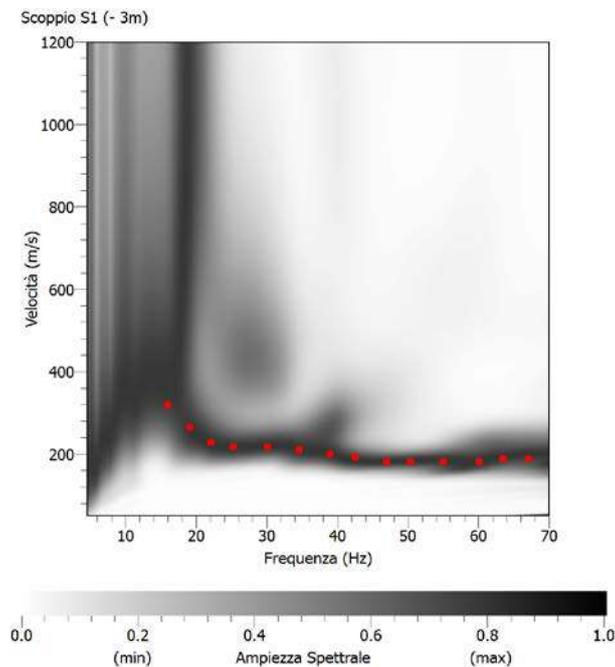


**Figura 3: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**



**Figura 4. Picking (in rosso) della curva di dispersione relativa ai dati acquisiti con tecnica Re.Mi.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 6) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S1 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione, unitamente a quella relativa ai dati Re.Mi.



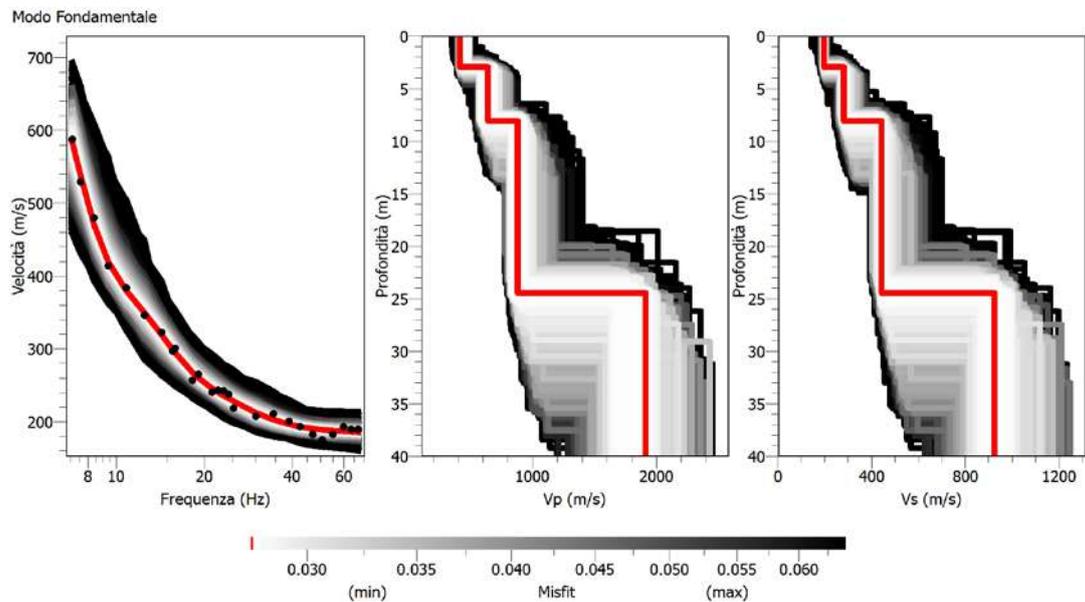
**Figura 5. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

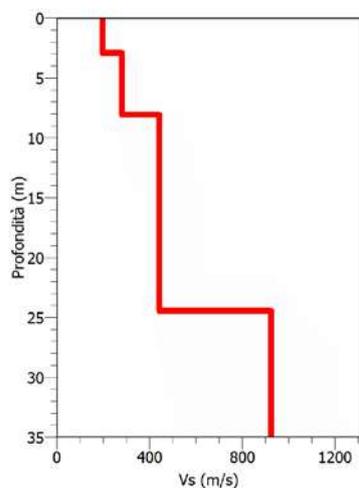
<b>Parametri di inversione</b>	
<b>Numero di run</b>	<b>4</b>
<b>Iterazione per ciascun run</b>	<b>100</b>
<b>Modelli generati per ciascun run</b>	<b>5050</b>
<b>Modelli totali generati</b>	<b>20200</b>
<b>Minimo misfit</b>	<b>0,0278</b>

In Figura 7 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 6:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d'inversione.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.



**Figura 7:** modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

---

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$   
 $K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2)$   
 $E = V_s^2 * \rho [(3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)]$

**Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.**

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	2,90	420	200	1700	0,35	68000	184059	209213
2	5,30	675	290	1800	0,39	151380	419873	618285
3	16,40	875	450	2000	0,32	405000	1069362	991250
4	5,40	1920	930	2200	0,35	1902780	5125064	5573040

Poiché all'interno del modello di velocità ottenuto è presente uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s, ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  calcolata fino alla profondità di 24,60 m dall'attuale piano campagna.

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-24,6	355

---

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici".  
Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e passiva (Re.Mi.) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{S,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 355 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alla Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{S,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

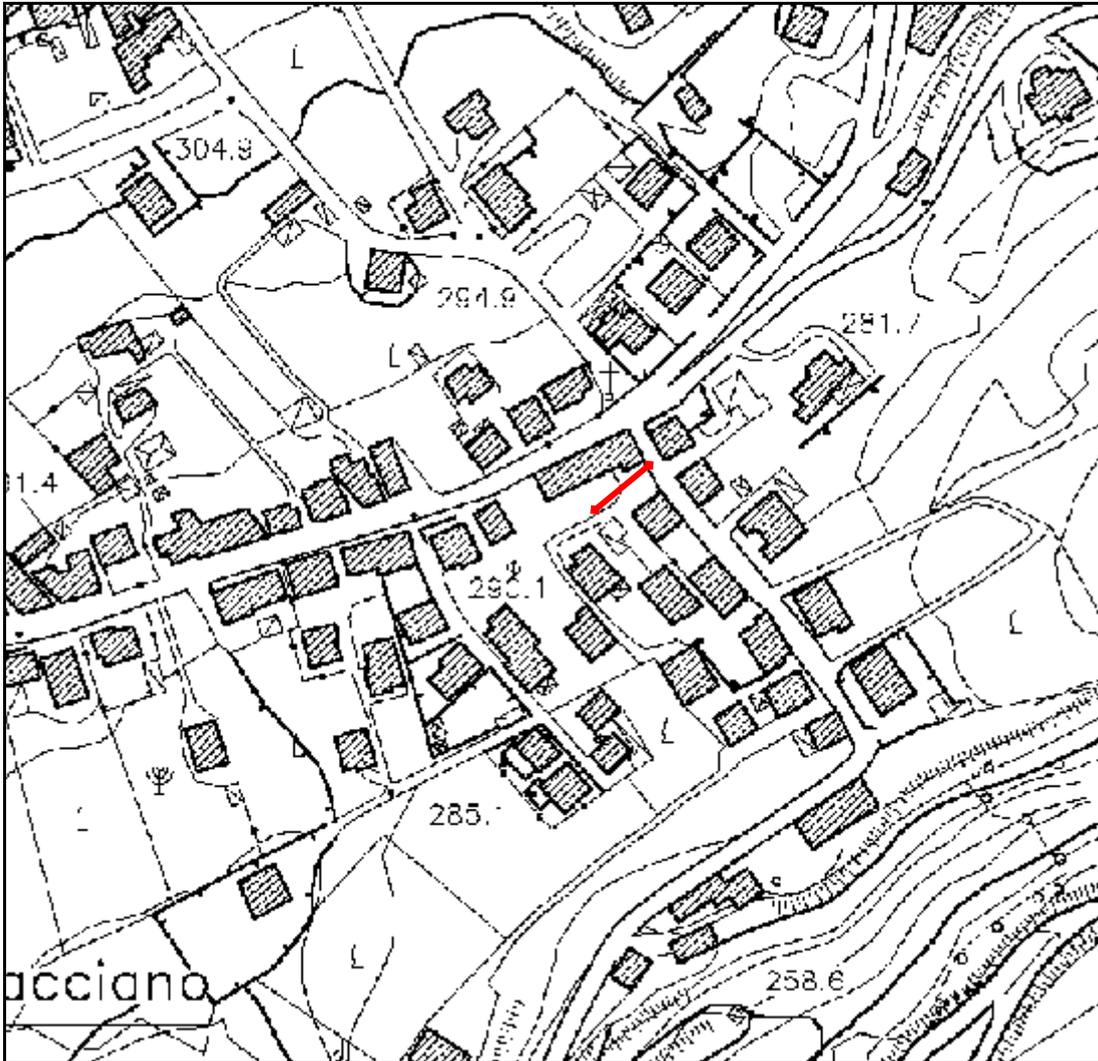
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

---

# ALLEGATO 1

## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA

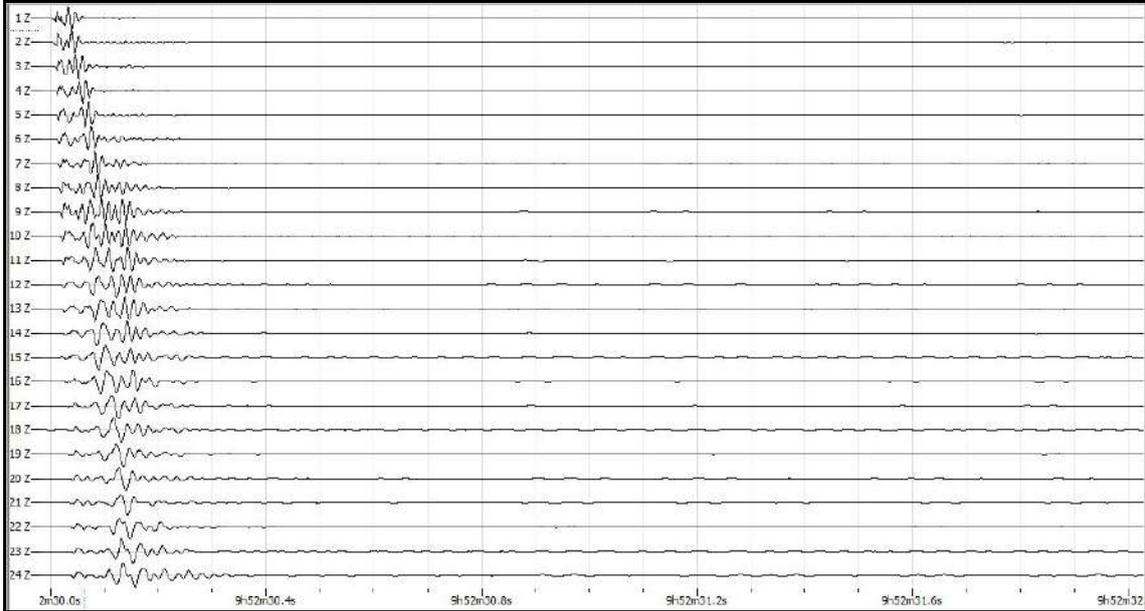


Profilo indagine sismica

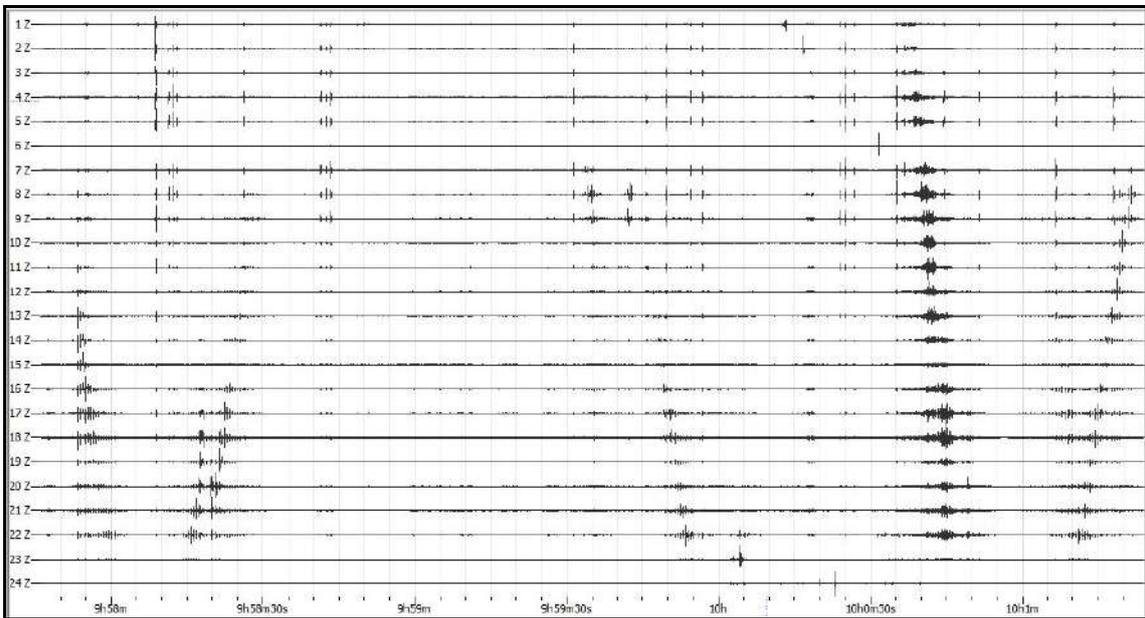
Scala 1:3000

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW



Tracce sismiche indagine Re.Mi.

# ALLEGATO 3

## REPORT FOTOGRAFICO



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 4***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 09' 02,69" N  
LONGITUDINE 14° 38' 43,34" E**

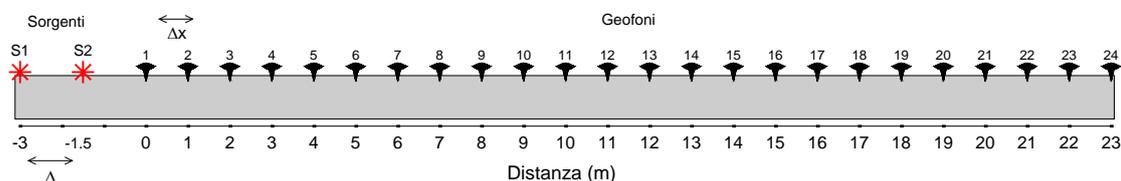


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1: schema della geometria di acquisizione.**

**Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati**

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,0</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>26</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-Re.Mi.</b>	<b>100</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

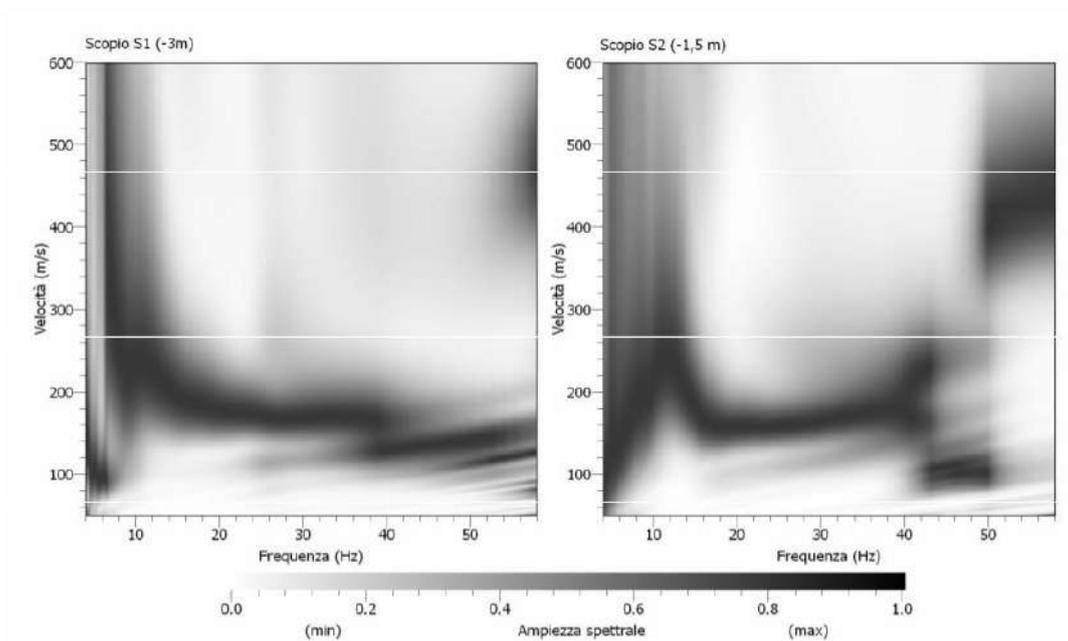
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2: schema energizzazione.**

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

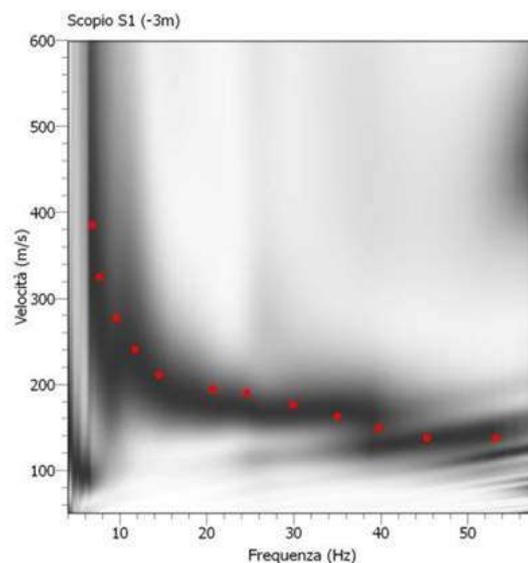
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3), piccando con una procedura manuale i massimi all'interno dello spettro. La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 6-60 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S1 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione.



**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

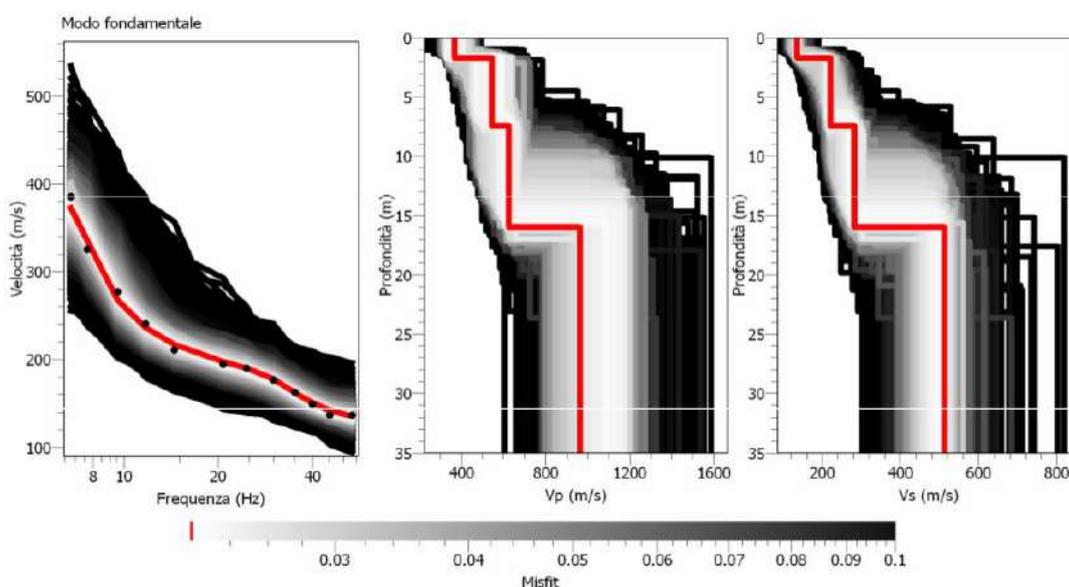
La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software "Dinver", prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell'inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni,

ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L'errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	4
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	20200
Minimo misfit	0,0222

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4: curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d'inversione.**

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.

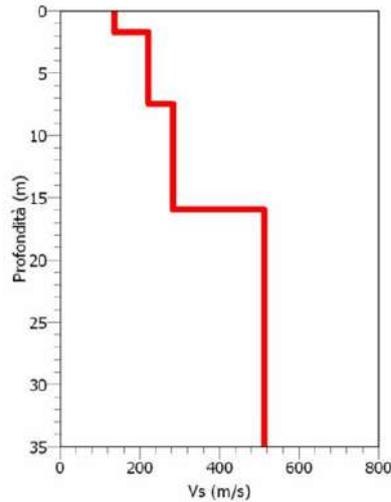


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	1,70	369	137	1500	0,42	28154	79959	166704
2	5,80	545	222	1600	0,40	78854	220876	370101
3	8,50	626	284	1700	0,37	137115	375811	483369
4	14,00	965	514	1900	0,30	501972	1307097	1100031

Poiché all'interno del modello di velocità ottenuto non è presente uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s, ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  calcolata fino alla profondità di 30 m dall'attuale piano campagna.

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-30	313

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{S,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 313 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alla Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{S,eq}$ \* (Tabella 5).

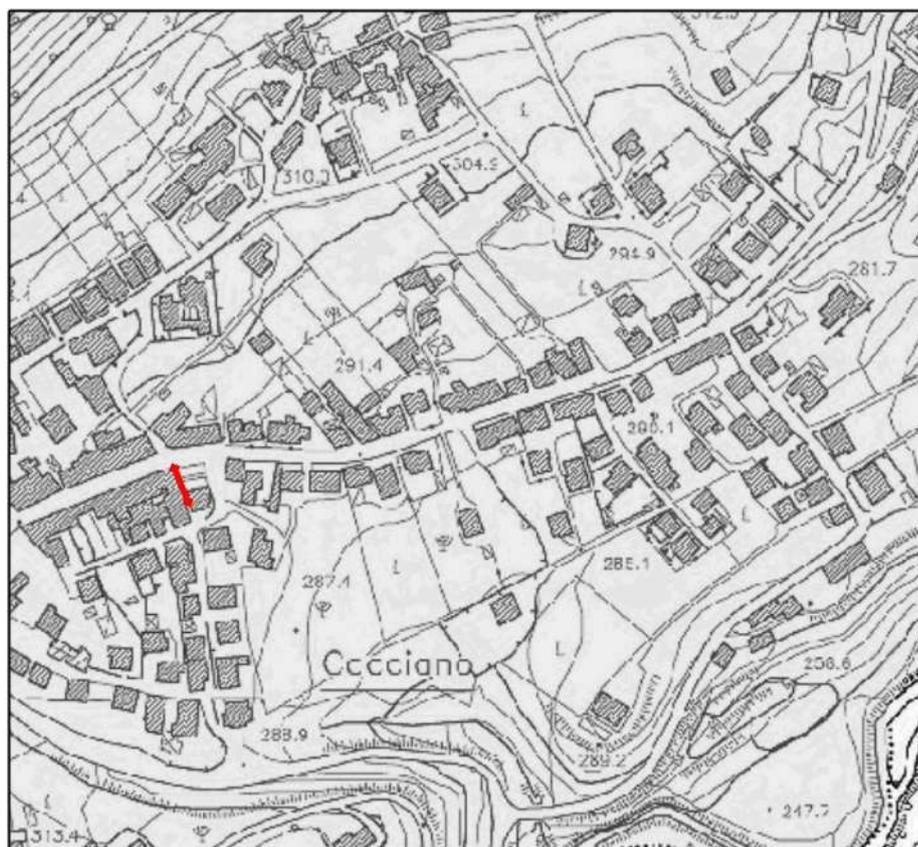
**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA

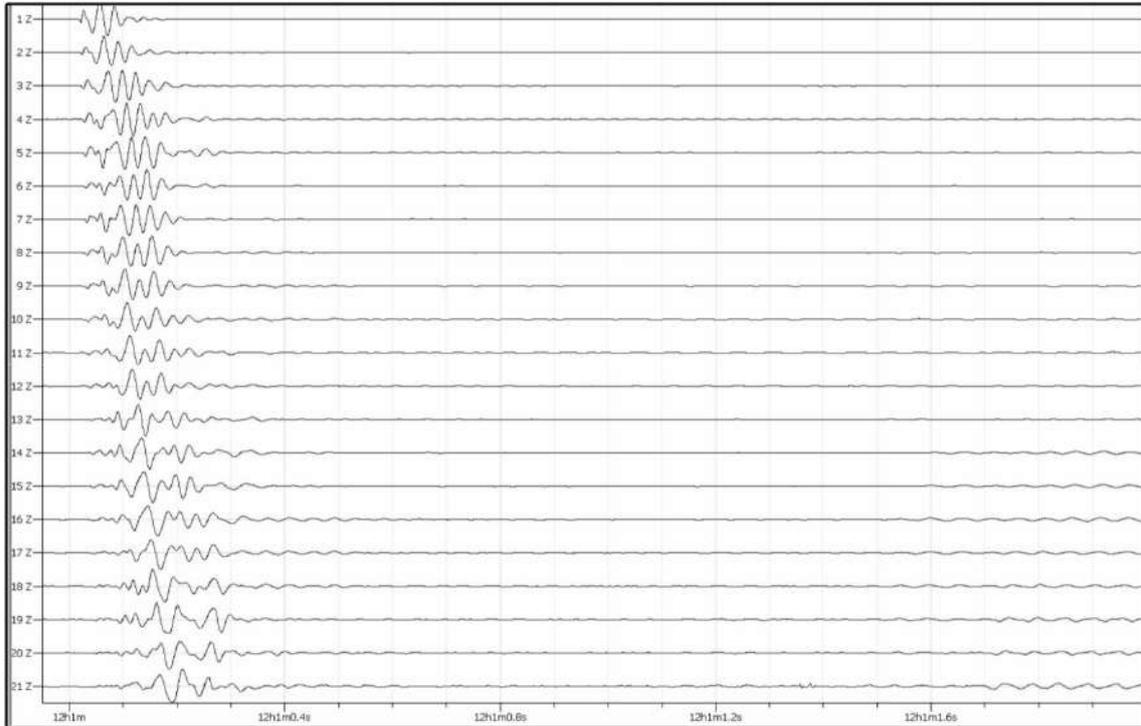


Profilo indagine sismica

Scala 1:5000

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 5***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 09' 04" N  
LONGITUDINE 14° 38' 33" E**



Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:

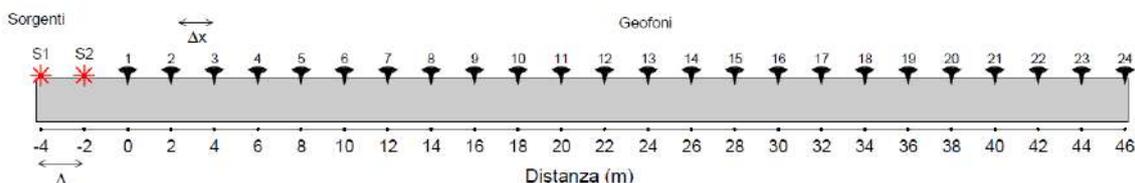


Figura 1: schema della geometria di acquisizione.

Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati

Numero geofoni	24
Tipo di geofono	Verticale
Frequenza propria dei geofoni (Hz)	4,5
Distanza intergeofonica $\Delta x$ (m)	2,0
Lunghezza stendimento sismico (m)	50
Frequenza di campionamento (Hz)-MASW	1000
Intervallo di acquisizione (ms)-MASW	0,001
Frequenza di campionamento (Hz)-Re.Mi.	100
Intervallo di acquisizione (ms) Re.Mi.	0.01
Durata di registrazione Re.Mi.	3m38s
Tipo di starter	Meccanico
Tipo di energizzazione	Meccanico

Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

Tabella 2: schema energizzazione.

Numero di energizzazioni	2*
Scoppio S1	$\Delta_1 = -4,0$ (m)
Scoppio S2	$\Delta_2 = -2,0$ (m)

\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3), piccando con una procedura manuale i massimi all'interno dello spettro. La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 10-70 Hz. Data l'indeterminazione a frequenze minori e per avere informazioni a maggiori profondità è stata determinata la curva di dispersione sperimentale relativa all'acquisizione Re.Mi. e il relativo picking (Figura 5).

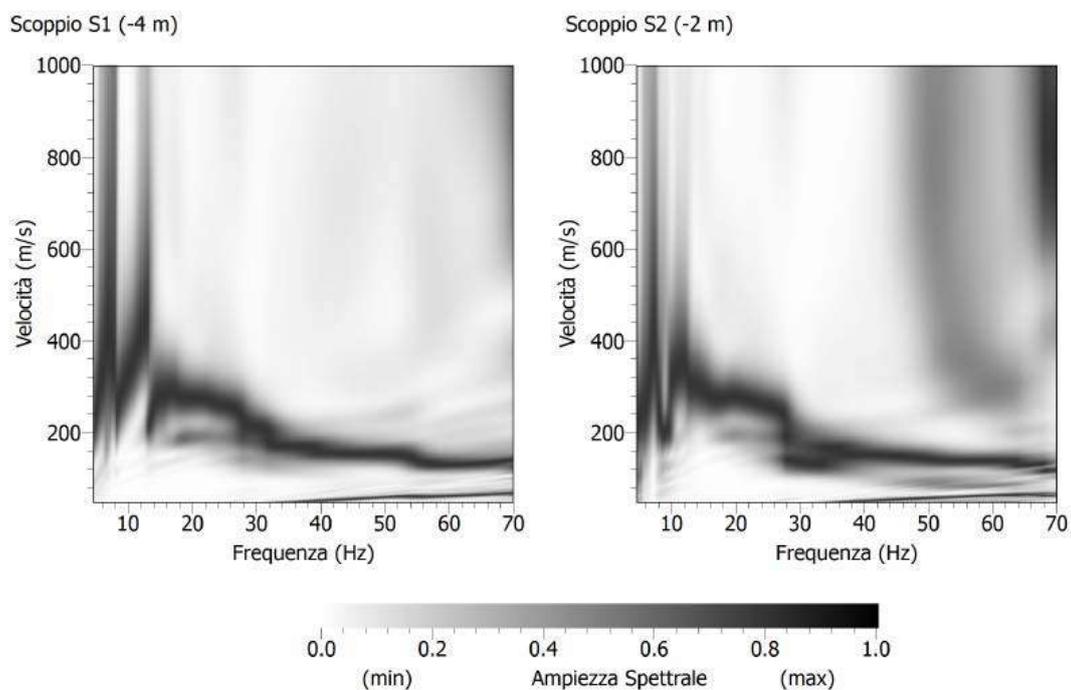


Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.

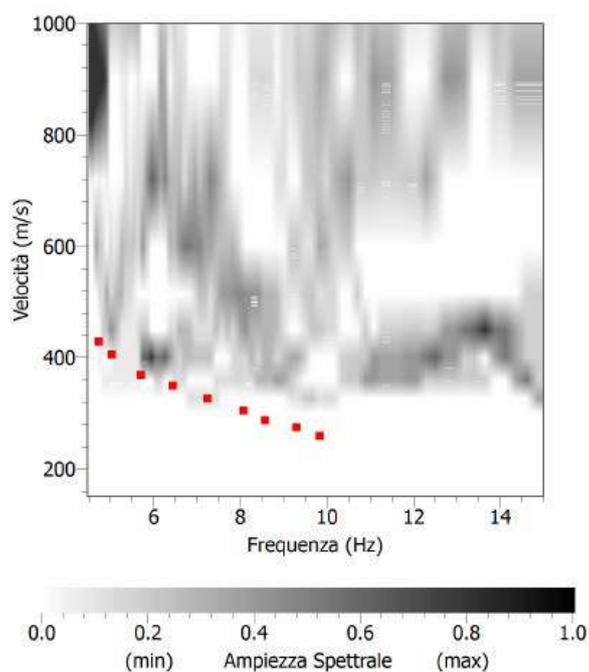
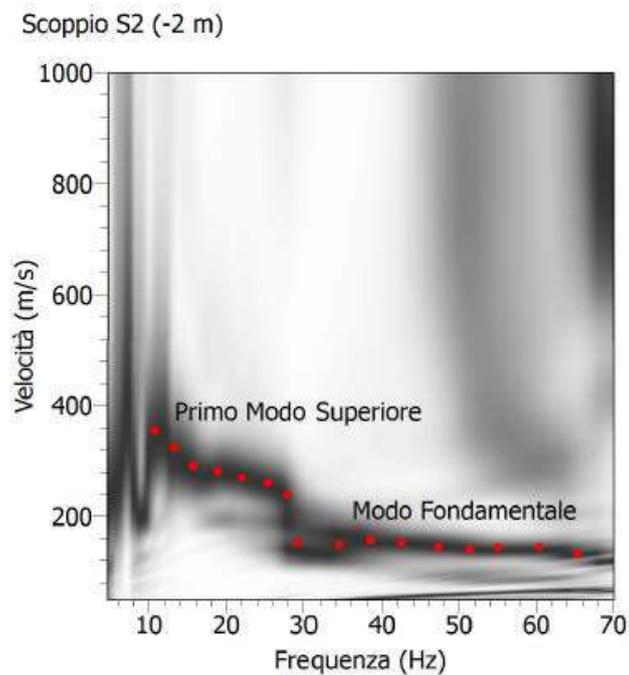


Figura 3: Picking (in rosso) della curva di dispersione relativa ai dati acquisiti con tecnica Re.Mi.

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 5) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S2 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione, unitamente a quella relativa ai dati Re.Mi..



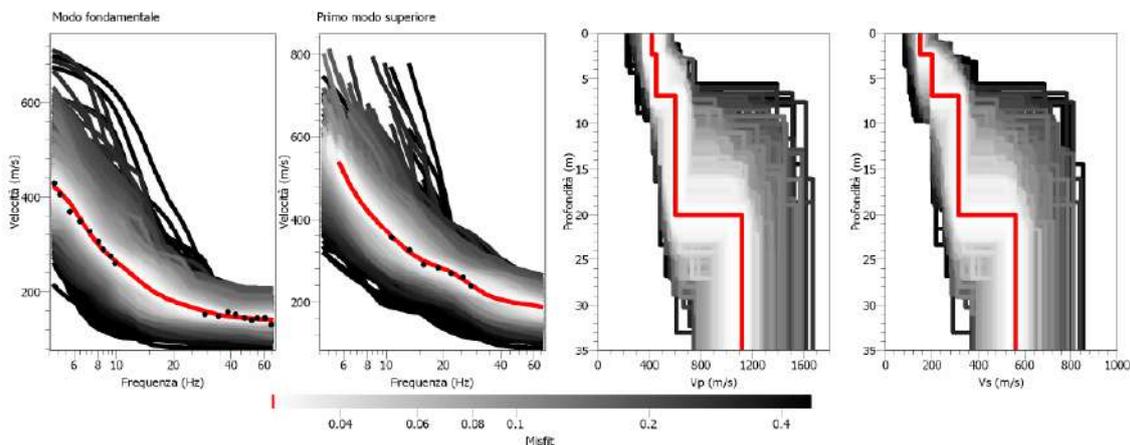
**Figura 4. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S2. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi ai modi di vibrazione riconosciuti.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

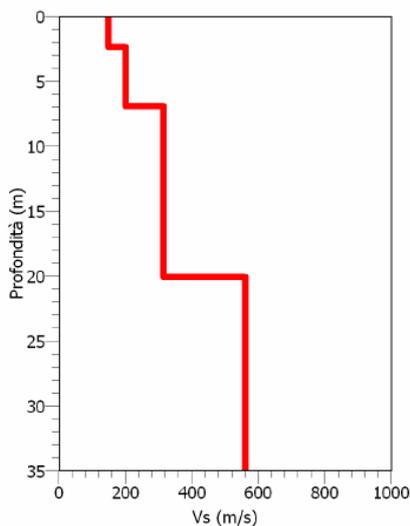
Parametri di inversione	
Numero di run	4
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	20200
Minimo misfit	0,0284

In Figura 6 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 5: curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d'inversione.**

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.



**Figura 6: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .**

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

**Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.**

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ ( $kg/m^3$ )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	2,40	422	150	1700	0,43	38250	109218	251743
2	4,50	456	202	1800	0,38	73447	202410	276355
3	13,20	602	317	1900	0,31	190929	499533	433995
4	9,90	1120	562	2000	0,33	631688	1682488	1666549

Poiché all'interno del modello di velocità ottenuto non è presente uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s, ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  calcolata fino alla profondità di 30 m dall'attuale piano campagna.

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-30	308

---

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici".  
Liguori Editore, 1992

# Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e passiva (Re.Mi.), ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{S,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 308 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alla Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{S,eq}$ \* (Tabella 5).

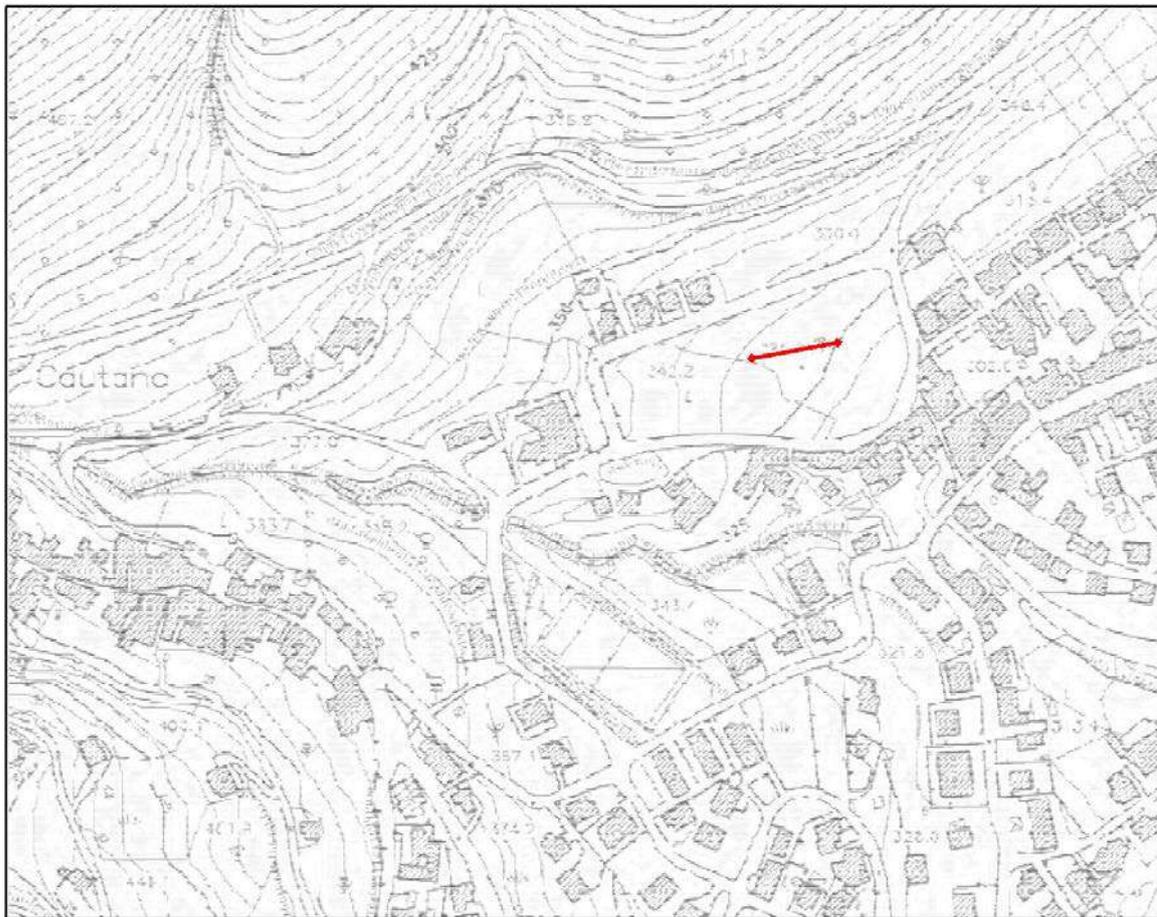
**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA

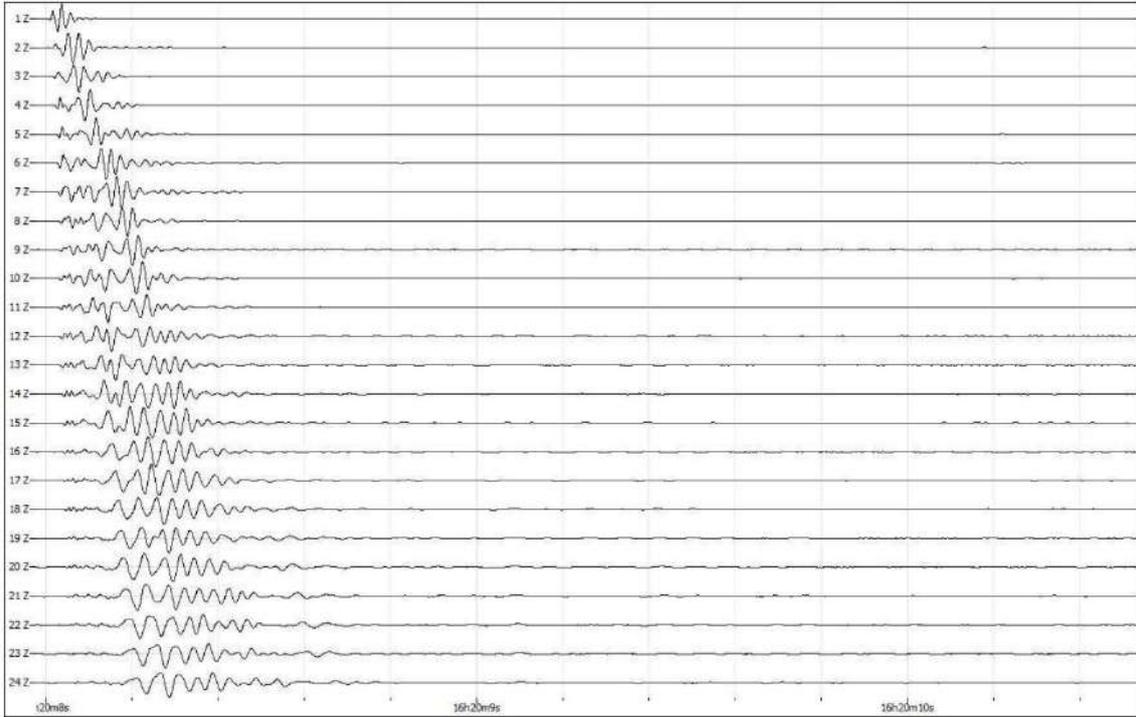


Profilo indagine sismica

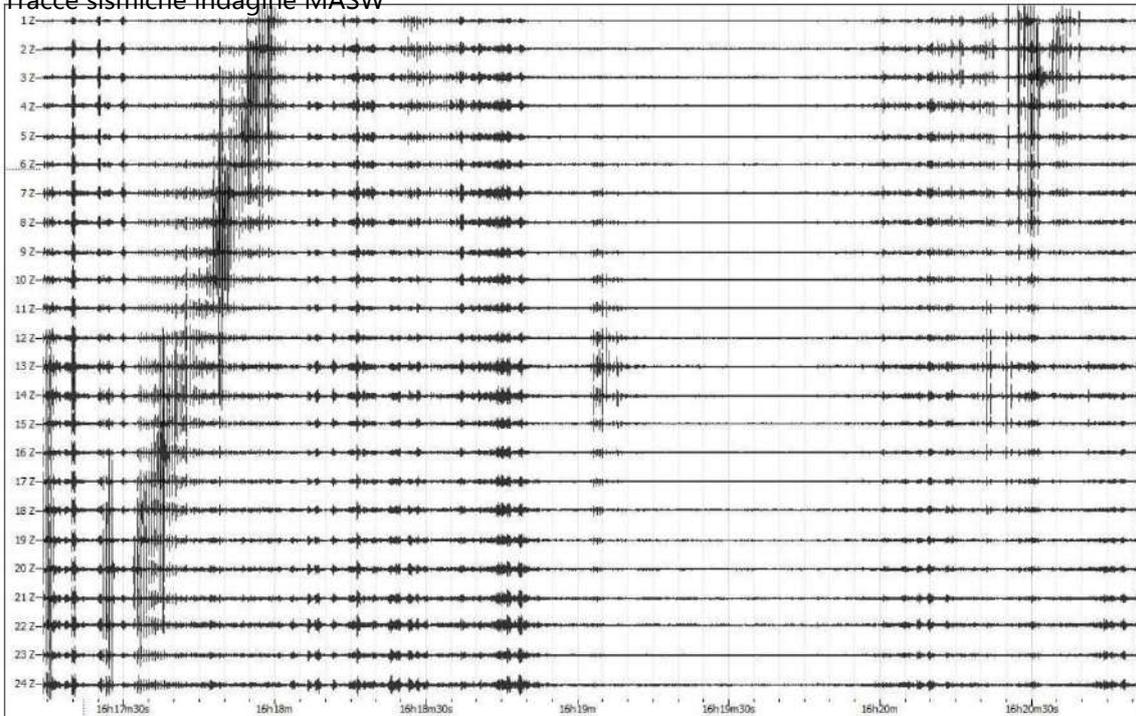
Scala 1:5000

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW



Tracce sismiche indagine Re.Mi.

## ALLEGATO 3

### REPORT FOTOGRAFICO



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 6***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 08' 53,75" N  
LONGITUDINE 14° 38' 31,11" E**



Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

## Acquisizione dati

Per l'acquisizione dei dati è stata utilizzata la seguente attrezzatura:

- Sismografo SARA Electronic mod.: "DoReMi" a 24 canali;
- Geofoni verticali monocomponente elettromagnetici a bobina mobile e massa sospesa con frequenza propria di 4,5Hz, trasduttori in grado di convertire in impulsi elettrici la velocità di spostamento del suolo quando attraversato da onde sismiche;
- Mazza di 8Kg battente su shot plate in polimero dal diametro di 250mm;
- Geofono starter per individuare l'esatto istante ( $t_0$ ) in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione;
- Software di acquisizione "DOREMI" sviluppato dalla società "Sara electronic".

I dati acquisiti sono stati quindi elaborati in fase di post-processing attraverso il software "Geopsy" impiegato per il calcolo della curva di dispersione.

## Dati sperimentali

Lunghezza stendimento (m)	34,5
Numero di ricevitori	24
Distanza intergeofonica (m)	1,5
Distanza Sorgente - 1° ricevitore (m)	-6
Frequenza propria dei geofoni (Hz)	4,5
Passo temporale di acquisizione (ms)	1
Numero di ricevitori usati per l'analisi	24
L'intervallo considerato per l'analisi (ms)	0 - 1500

Tabella 1: Schema della geometria di acquisizione

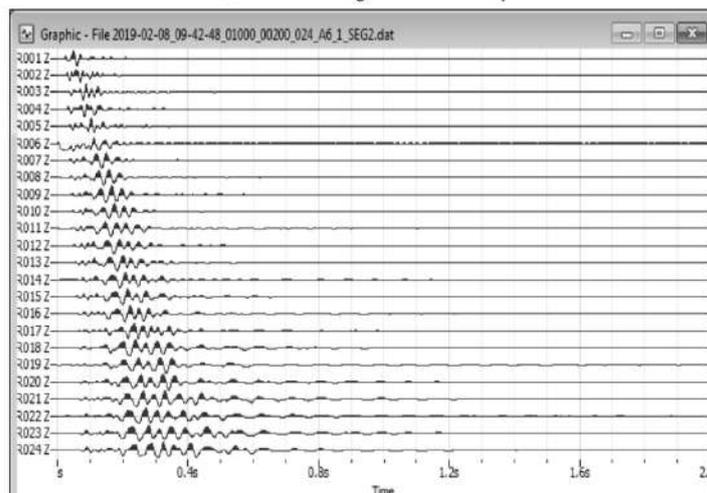


Figura 3: Tracce sperimentali

## Risultati delle analisi

Frequenza iniziale: 5 Hz

Frequenza finale: 50Hz

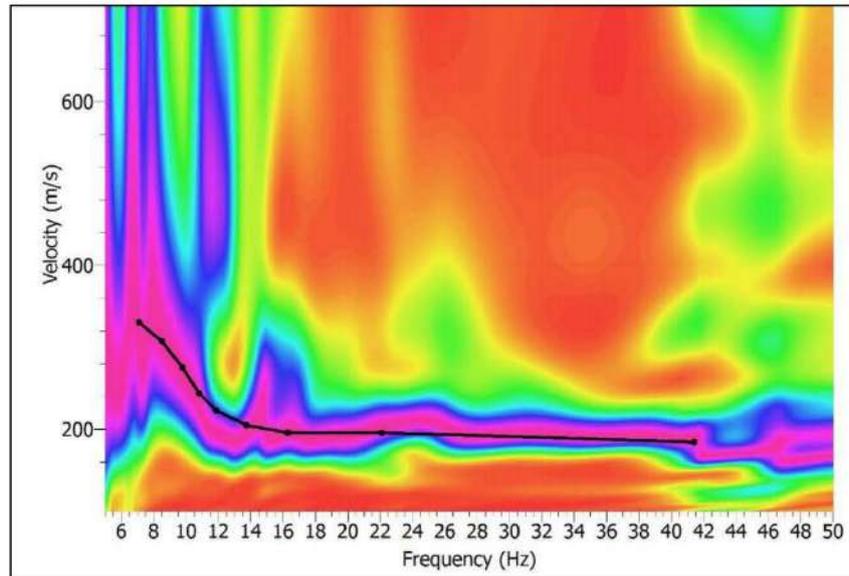


Figura 4: Spettro di frequenza e Curva di dispersione sperimentale

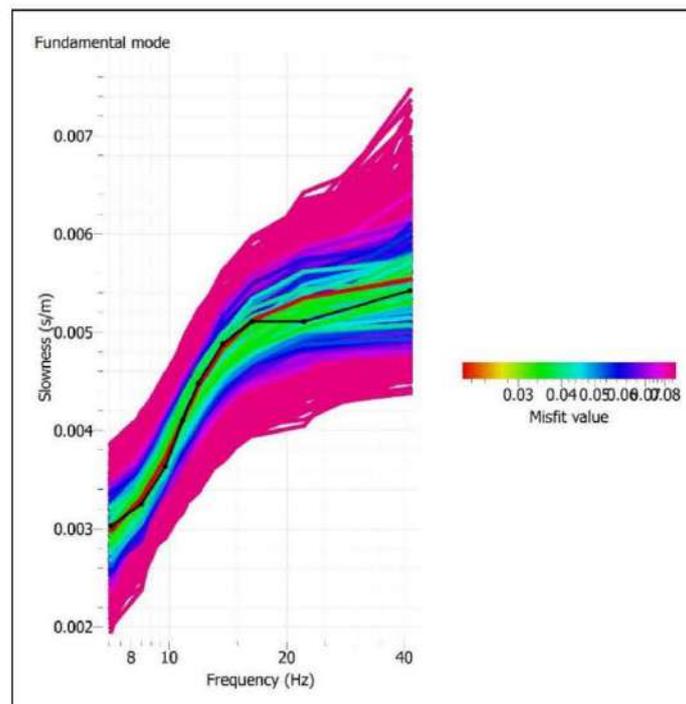


Figura 5: Sovrapposizione della curva di dispersione sperimentale (nero) e calcolate

## Profilo di velocità

Strato	h(m)	z (m)	Vs <sub>fin</sub>
1	1,1	-1,1	177
2	6,8	-7,9	201
3	2,3	-10,2	298
4	16	-26,2	367
5	∞	-∞	485

Tabella 2: Risultati dell'inversione

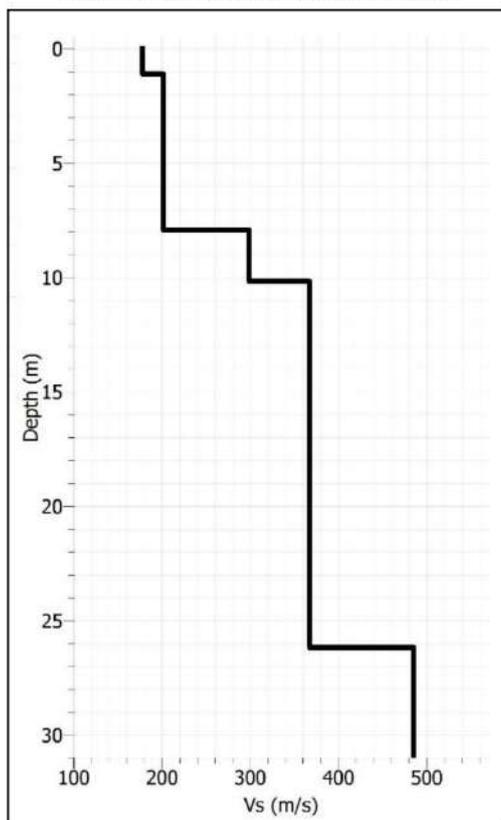


Figura 6: Profilo Vs (con minimo misfit=0,02), utilizzato per il calcolo della Vs<sub>eq</sub>

## Risultati finali

La normativa applicata è il DM 17 gennaio 2018.

Piano di riferimento: piano campagna.

Piano di riferimento z(m)	Vs <sub>eq</sub> (m/s)
0	302

Tabella 3: Valore della Vs<sub>eq</sub>

## Conclusioni

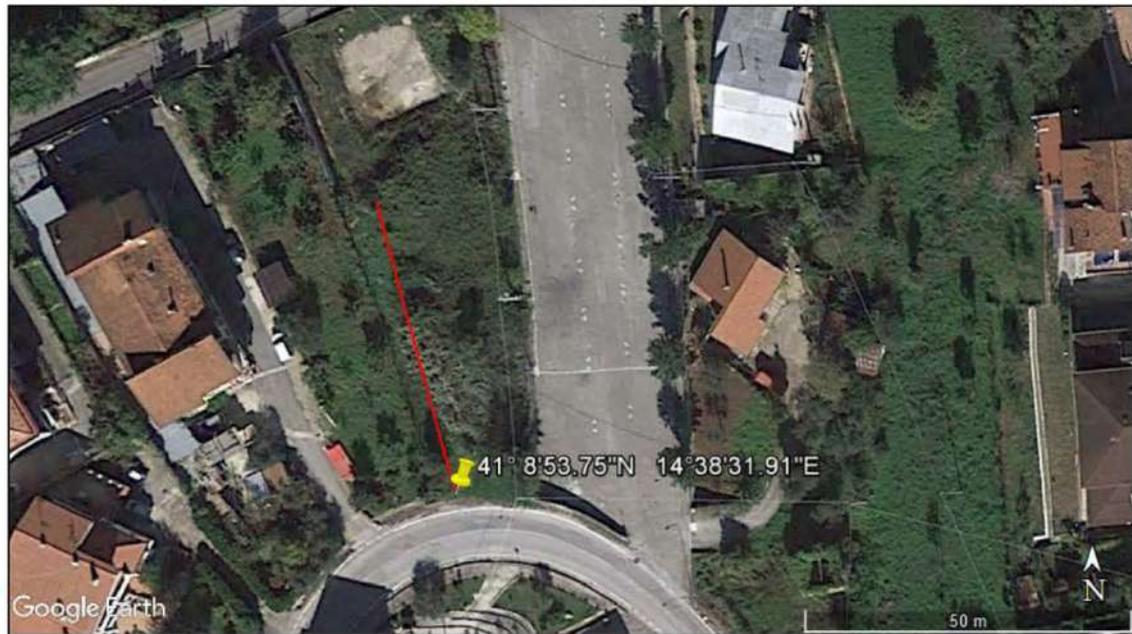
L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS e, di conseguenza, il parametro  $V_{s_{eq}}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 302 m/s (considerando come riferimento il piano campagna).

**Tab. 3.2.II** – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

<b>Categoria</b>	<b>Caratteristiche della superficie topografica</b>
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

*Tabella 4: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)*

## Ubicazione dell'indagine



*Figura 1: Ubicazione stendimento sismico*

Lo stendimento sismico è stato posizionato a partire dal primo geofono ubicato nel punto  $41^{\circ} 8' 53,75'' N$   $14^{\circ} 38' 31,91'' E$ .



*Figura 2: Stendimento sismico*

**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 7***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 08' 49,44" N  
LONGITUDINE 14° 38' 31,66" E**

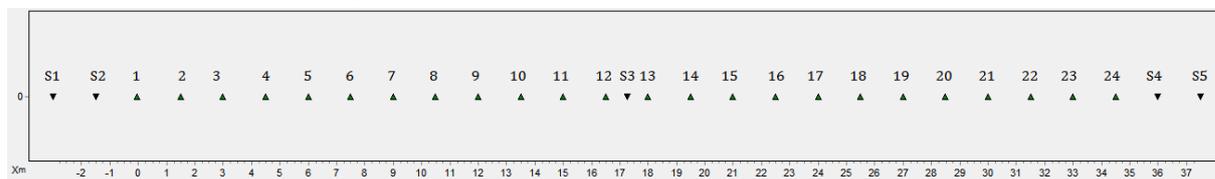


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

Le indagini eseguite sono state finalizzate alla caratterizzazione sismostratigrafica del sottosuolo. La geometria e le modalità di acquisizione dei dati sismici sono riportati in Figura 2 e nella Tabella 1.



**Figura 1:** schema della geometria di acquisizione delle indagini sismiche.

Durante la fase di acquisizione dei dati tomografici sono stati eseguiti 5 scoppi con diversi offsets (vedi Tabella 2). Il numero di scoppi influenza la capacità risolutiva della tecnica di inversione, in quanto legato al numero di raggi sismici che attraversano il sottosuolo investigato (maggiore è il numero di scoppi generati maggiore sarà il numero di raggi sismici).

**Tabella 1:** caratteristiche di acquisizione dei dati sismici.

Indagine	Tomografia	MASW	Re.Mi
<b>Numero geofoni</b>	24		
<b>Tipo di geofono</b>	Verticale		
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	4,5		
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	1,5		
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	40,5	40,5	34,5
<b>Frequenza di campionamento (Hz)</b>	1000		100
<b>Intervallo di acquisizione (ms)</b>	0.001		0.01
<b>Tipo di starter</b>	Meccanico		
<b>Tipo di energizzazione</b>	Meccanico		
<b>Durata Registrazione (s)</b>	2		218

E' stata ottenuta una risoluzione tale da consentire una interpretazione dell'andamento delle velocità delle onde sismiche ben definita. Durante le operazioni di campagna è stato necessario procedere ad un incremento di segnale, cioè energizzare in corrispondenza degli stessi punti di scoppio e sommare le radiazioni al fine di esaltare i primi picchi sulla traccia, aumentando quindi il rapporto segnale-rumore. Per quanto riguarda invece la geometria di acquisizione dei dati con tecnica MASW sono stati eseguiti due scoppi (Tabella 1 e Tabella 2) al fine di valutare la stabilità della curva di dispersione nella successiva fase di elaborazione dei dati.

**Tabella 2: numero degli scoppi e relativa posizione lungo il profilo sismico la cui geometria è riportata in Figura 2.**

Scoppi	
Scoppio S1	$\Delta_1 = -3,0$ (m)
Scoppio S2	$\Delta_2 = -1,5$ (m)
Scoppio S3	$\Delta_3 = 17,25$ (m)
Scoppio S4	$\Delta_4 = 36$ (m)
Scoppio S5	$\Delta_5 = 37,5$ (m)

Dopo la fase di acquisizione e scarico su pendrive dei dati è stata effettuata la lettura dei tempi di primo arrivo dell'onda P per un totale di 120 letture.

Successivamente tali dati sono stati utilizzati nel processo di inversione. Nelle Figura 3 vengono le sezioni tomografiche dopo l'elaborazione con il software ZondST2D.

I dati acquisiti con tecnica MASW sono stati elaborati con il software "Geopsy" determinando l'intervallo di frequenze all'interno del quale viene trasmesso il massimo dell'energia generata, in modo da avere una informazione preliminare sui limiti di risoluzione della geometria di acquisizione.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k, piccando con una procedura manuale i massimi all'interno dello spettro.

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi e le curve di dispersione così ottenute sono state utilizzate successivamente per il processo di inversione.

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software "Dinver", prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell'inversione a ciascun run corrispondono 150 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L'errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2008), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 45 m dall'attuale piano campagna per ciascuna indagine MASW.

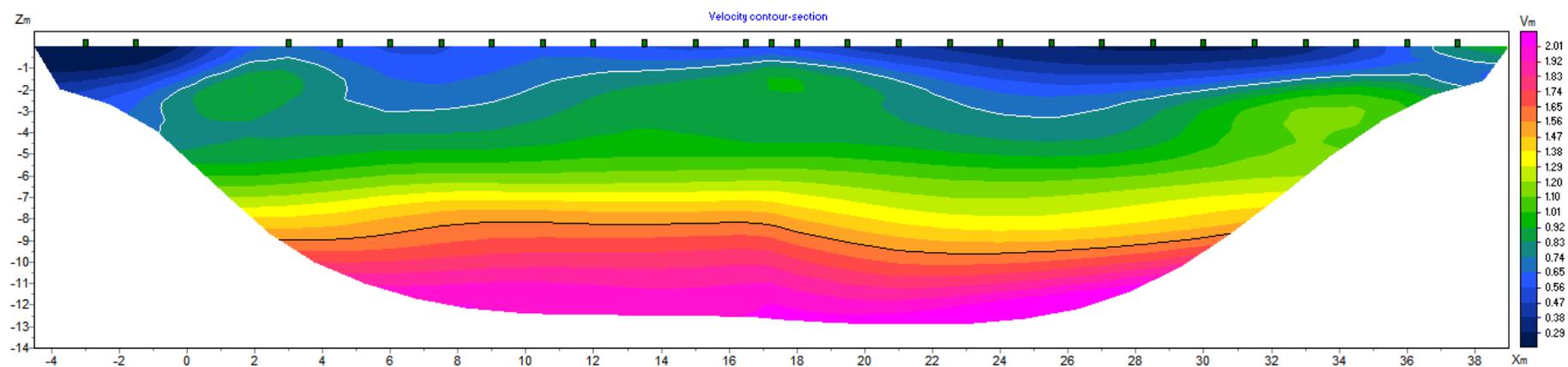
## ***Tomografia***

La sezione tomografica mostra la presenza di tre strati con una geometria descritta di seguito:

- un sismostrato superficiale (delimitato in basso dalla linea bianca in Figura 3) caratterizzato da valori di velocità delle onde P minori di 700 m/s, che

presenta una base ad andamento irregolare con uno spessore medio pari a circa 3 m;

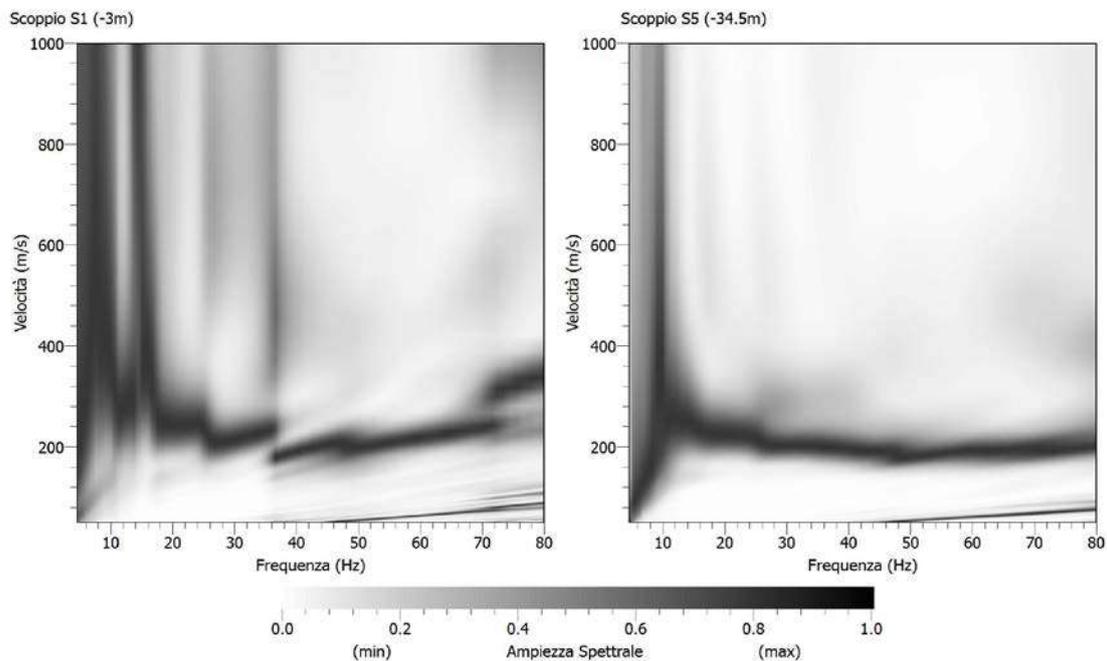
- un secondo sismostrato caratterizzato da valori di velocità compresi tra i 700 m/s e 1600 m/s, che si spinge fino alla profondità di circa 9 m con uno spessore medio pari a circa 6 m;
- un terzo sismostrato caratterizzato da valori di velocità maggiori di 1600 m/s (fino a 2100 m/s) che rappresenta il semispazio esplorativo con spessore indeterminato.
-



**Figura 2: sezione tomografica. La geometria, l'ubicazione ed il verso di acquisizione sono riportati rispettivamente in Figura 2 e in allegato. Le velocità delle onde sismiche sono espresse in Km/s.**

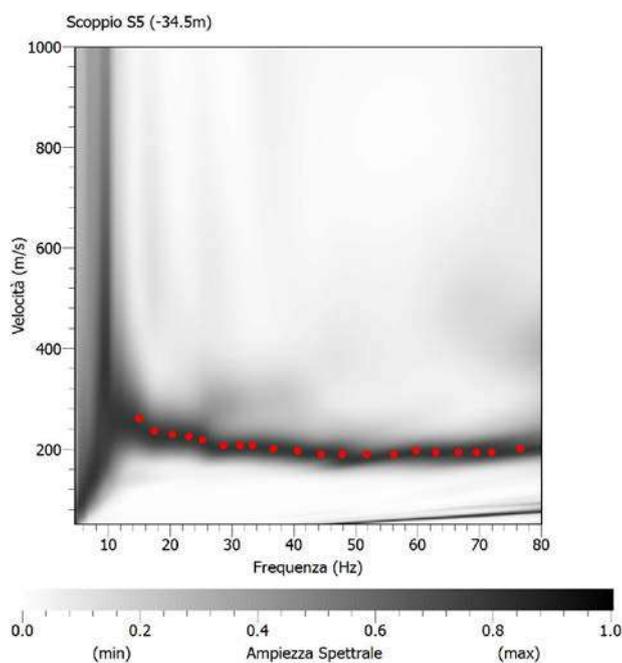
# MASW

La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 15-80 Hz.



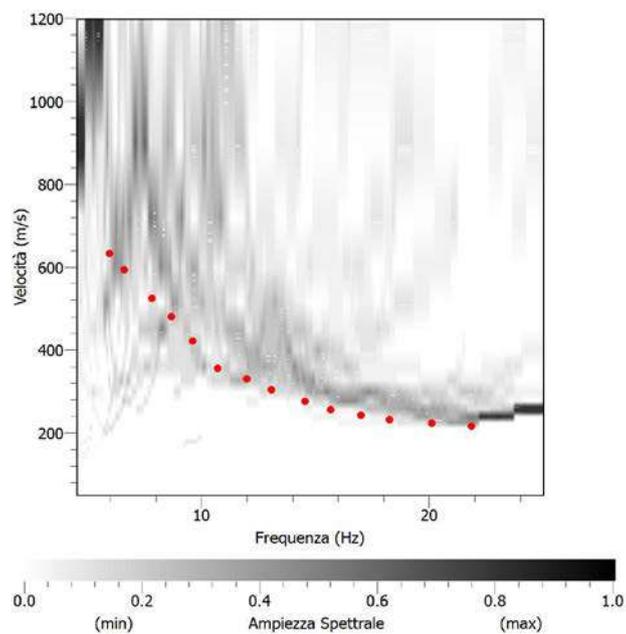
**Figura 3: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

La procedura di picking è stata effettuata sulla curva di dispersione relativa allo scoppio S5, in quanto la relativa curva risulta essere più stabile all'interno del range di frequenza considerato.



**Figura 4. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S5. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

Data l'indeterminazione alle basse frequenze, sono stati utilizzati anche i dati acquisiti con tecnica Re.Mi. (Figura 6) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata nel processo di inversione unitamente ai dati ottenuti con la tecnica MASW.

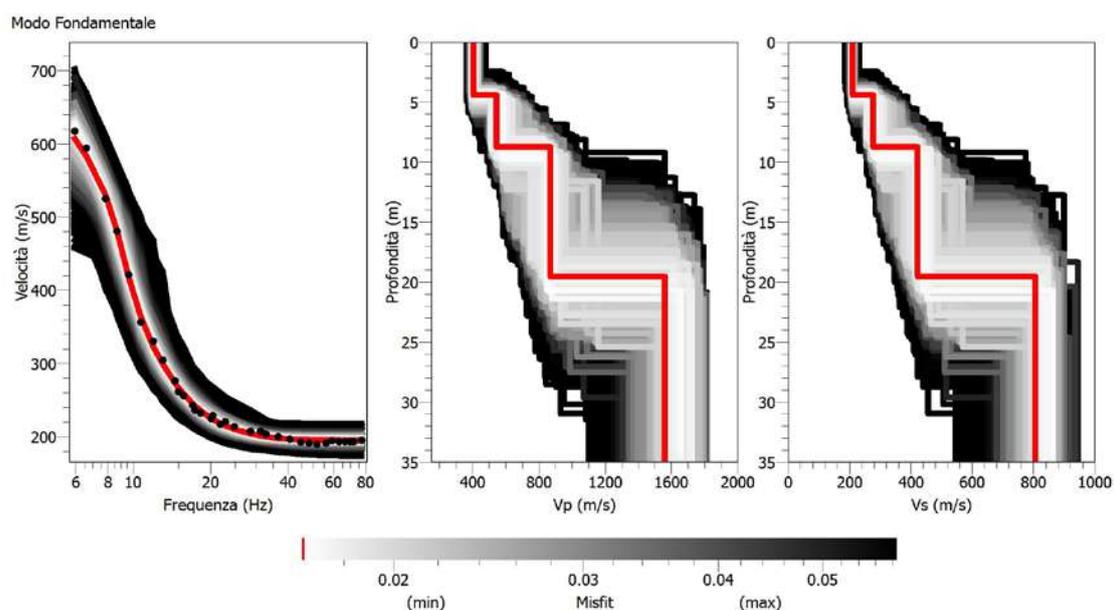


**Figura 5: picking curva dispersione ottenuta con tecnica Re.Mi..**

Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

<b>Parametri di inversione</b>	
<b>Numero di run</b>	<b>9</b>
<b>Iterazione per ciascun run</b>	<b>100</b>
<b>Modelli generati per ciascun run</b>	<b>5050</b>
<b>Modelli totali generati</b>	<b>45450</b>
<b>Minimo misfit</b>	<b>0,0165</b>



**Figura 6:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione. In rosso sono riportati le curve e il modello che rappresenta il minimo misfit.

In Figura 7 è riportata la curva di dispersione teorica e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l’uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

**Tabella 4:** parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità ρ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson ν	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	4,40	405	210	1700	0,32	74970	197341	178883
2	4,40	550	280	2000	0,33	156800	415544	395933
3	10,80	870	425	2100	0,34	379313	1019048	1083740
4	10,40	1560	806	2400	0,32	1559126	4109619	3761805

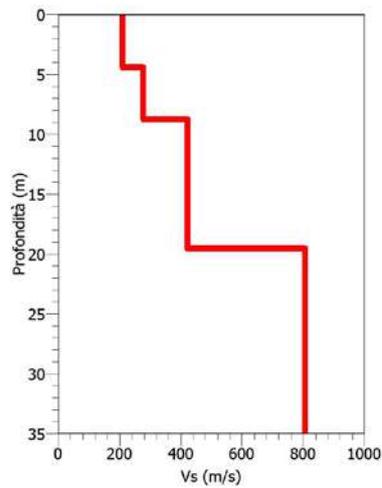
<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho * [(3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\nu = [1/2 * (V_p / V_s)^2 - 1] * [(V_p / V_s)^2 - 1]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. “Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici”. Liguori Editore, 1992



**Figura 7: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{s,eq}$ .**

Poiché all'interno del modello di velocità ottenuto è presente uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s, ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{s,eq}$  calcolata fino alla profondità di 19,6 m dall'attuale piano campagna.

Profondità (m)	$V_{s,eq}$ (m/s)
0-19,6	316

## Conclusioni

L'indagine tomografica ha permesso di ricostruire con una buona risoluzione la struttura del sottosuolo investigato, riconoscendo la presenza di tre sismostrati.

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e passiva (Re.Mi.) ha consentito di determinare il profilo verticale delle  $V_s$  e, di conseguenza, del parametro  $V_{s,eq}$  risultato per il modello con minimo misfit (considerando come riferimento il piano campagna attuale) pari a 316 m/s.

In riferimento alla Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

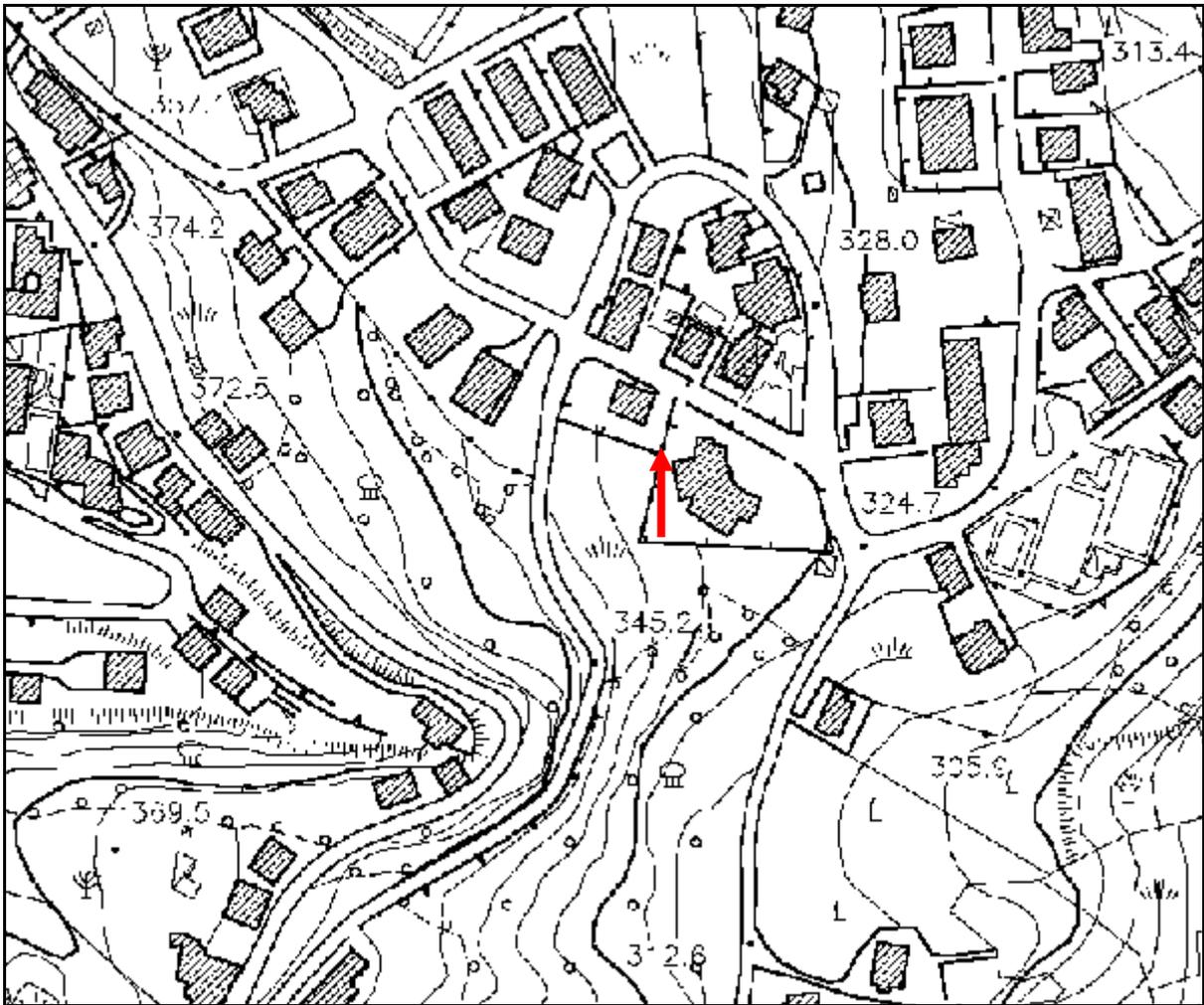
**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

---

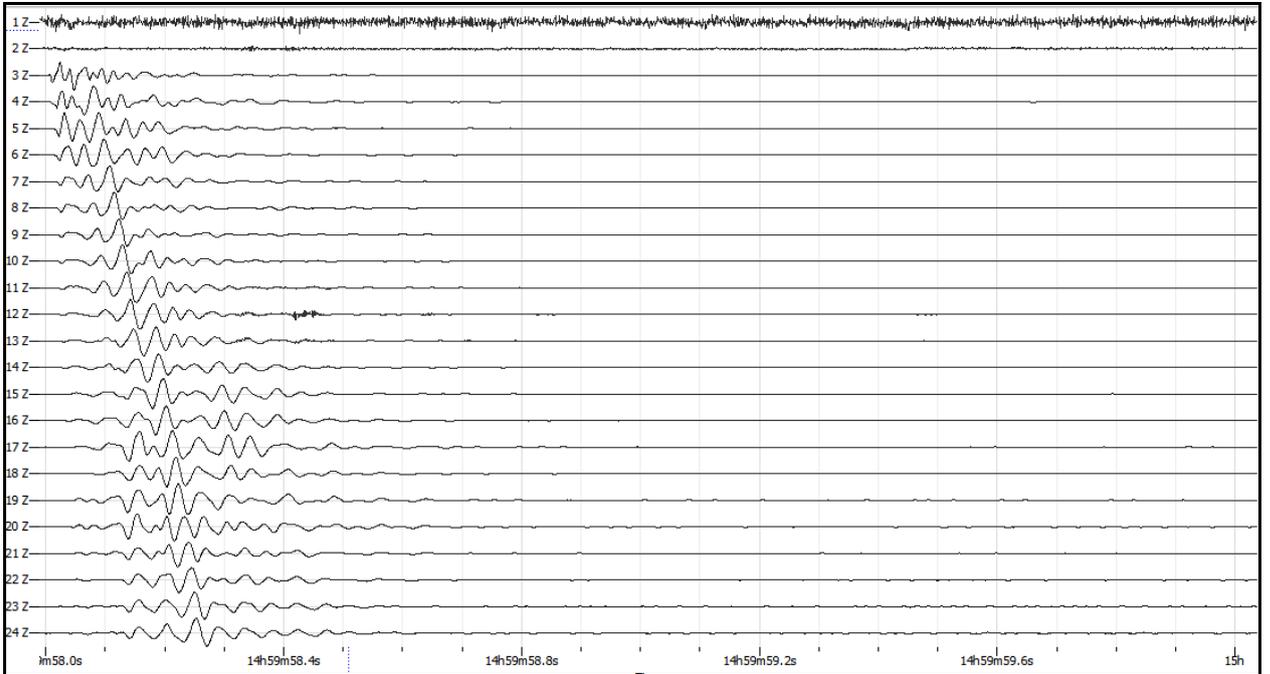
**ALLEGATO 1**  
**UBICAZIONE INDAGINI**  
(scala 1:3000)



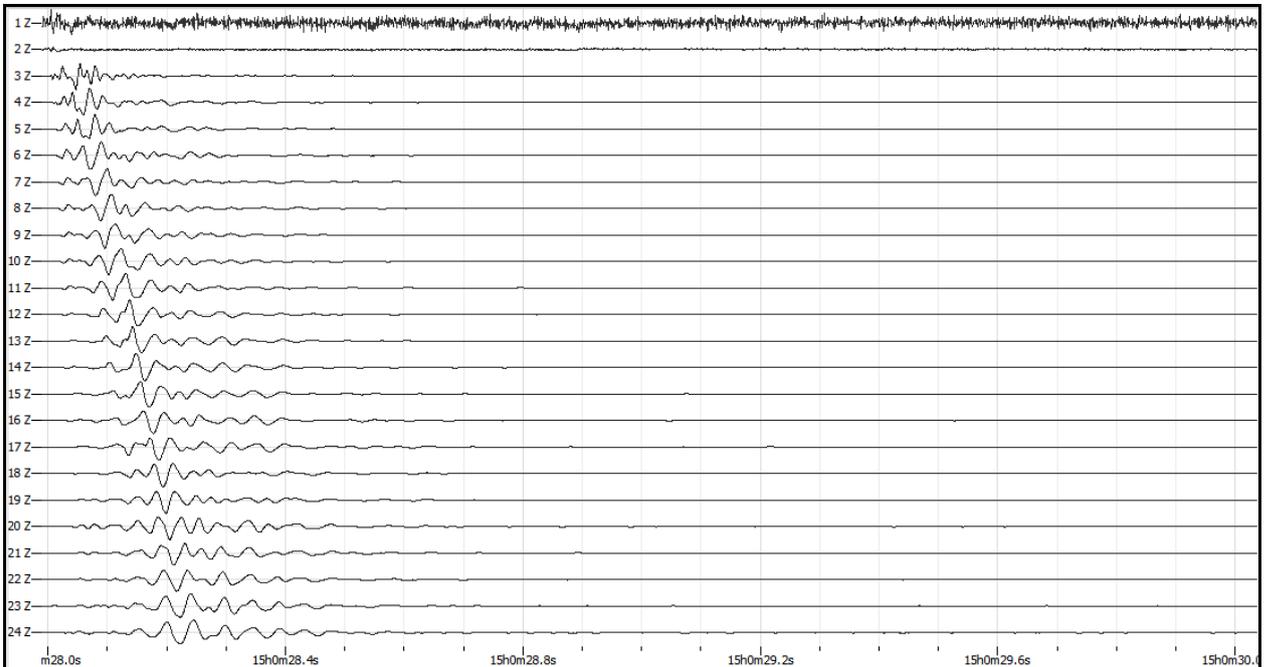
 MASW-Remi + Profilo Tomografico. La freccia indica il verso di lettura

## ALLEGATO 2

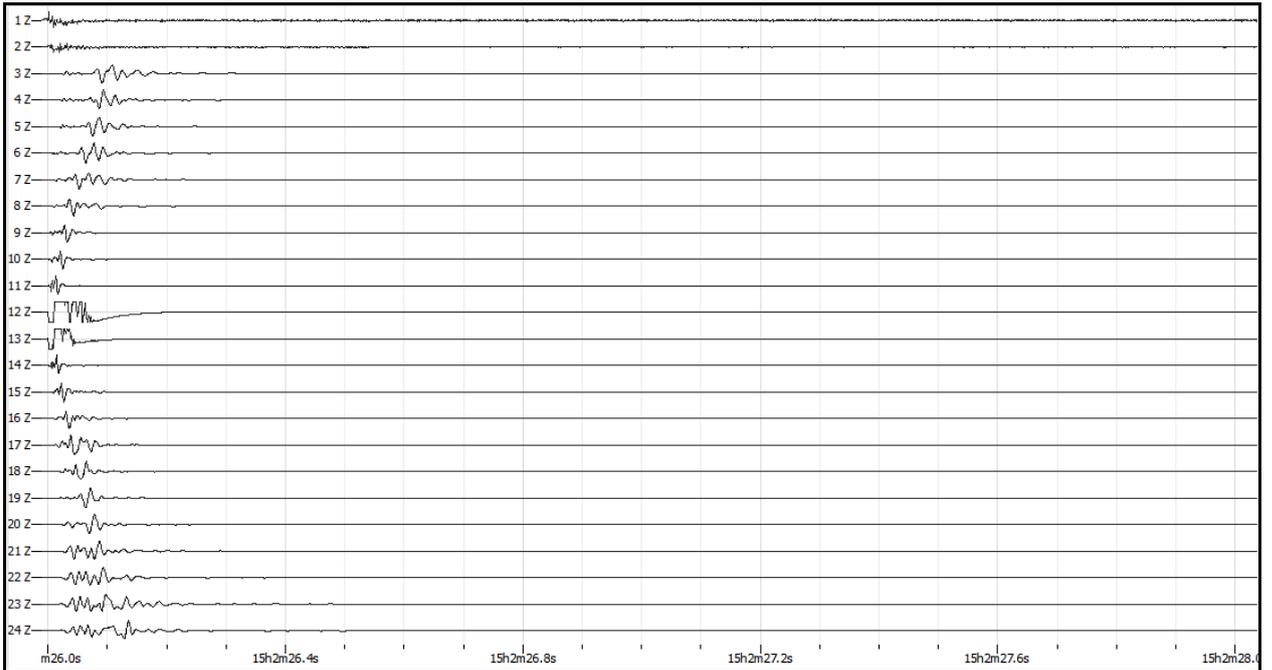
### TRACCE SISMICHE



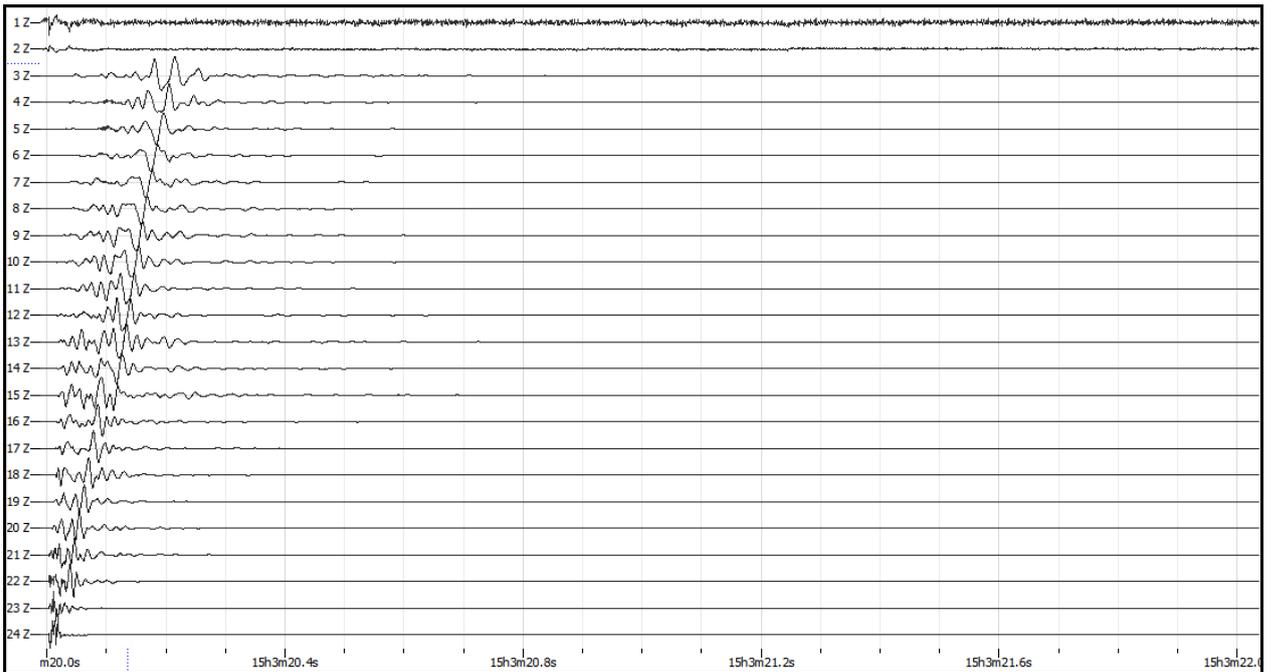
Tracce sismiche S1



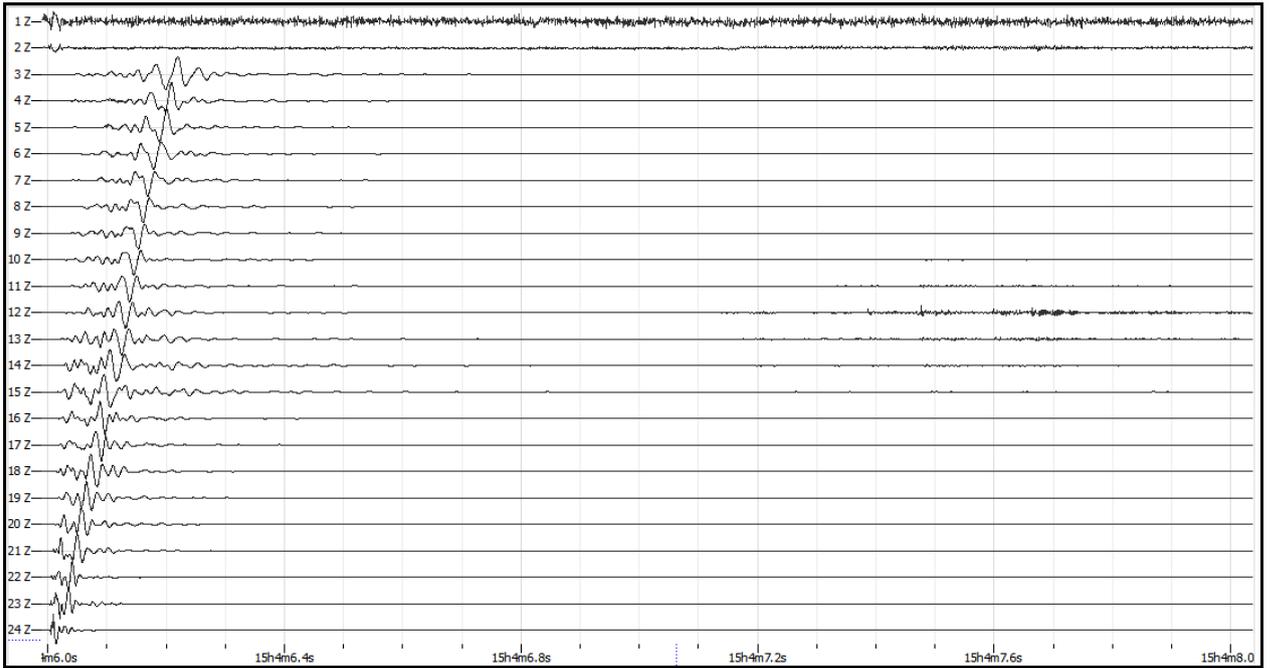
Tracce sismiche S2



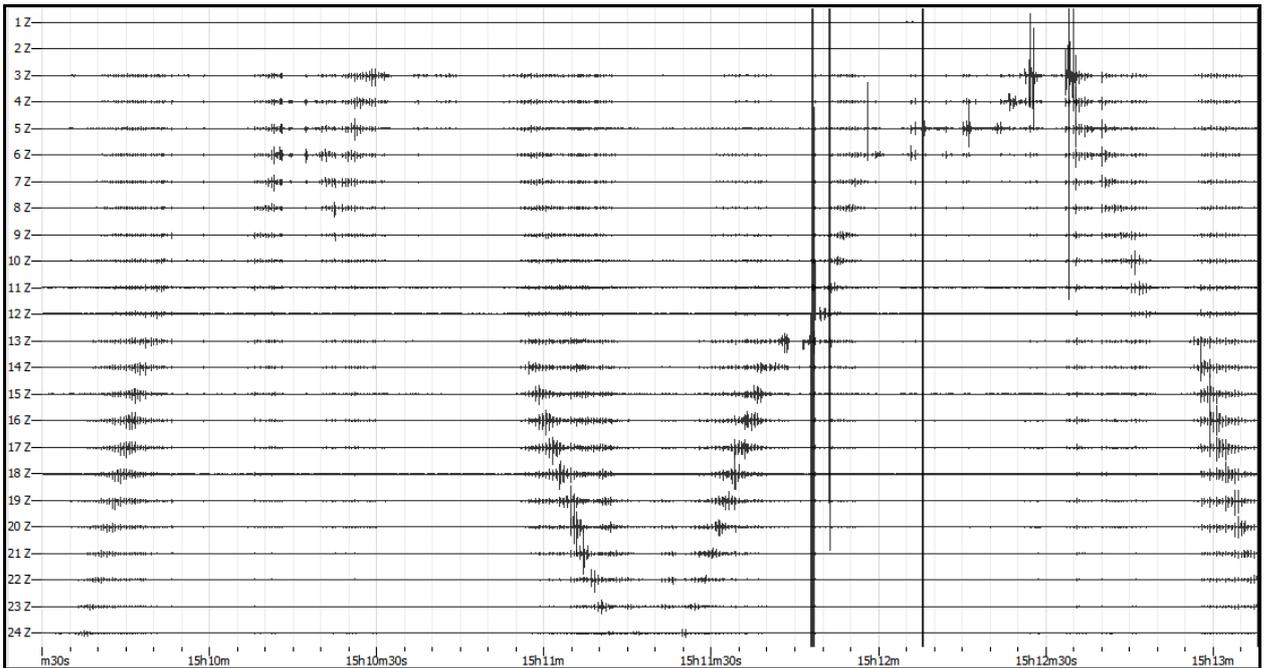
Tracce sismiche S3



Tracce sismiche S4



Tracce sismiche S5 (utilizzata anche per le elaborazioni con tecnica MASW)



Tracce sismiche ReMi.

**ALLEGATO 3**  
**REPORT FOTOGRAFICO**



COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO

INDAGINI SISMICHE PUC

*MASW 8*

COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 08' 36,96" N  
LONGITUDINE 14° 38' 14,27" E

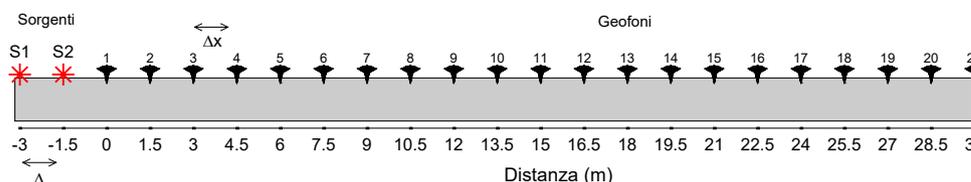


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1:** schema della geometria di acquisizione.

**Tabella 1:** caratteristiche di acquisizione dei dati

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

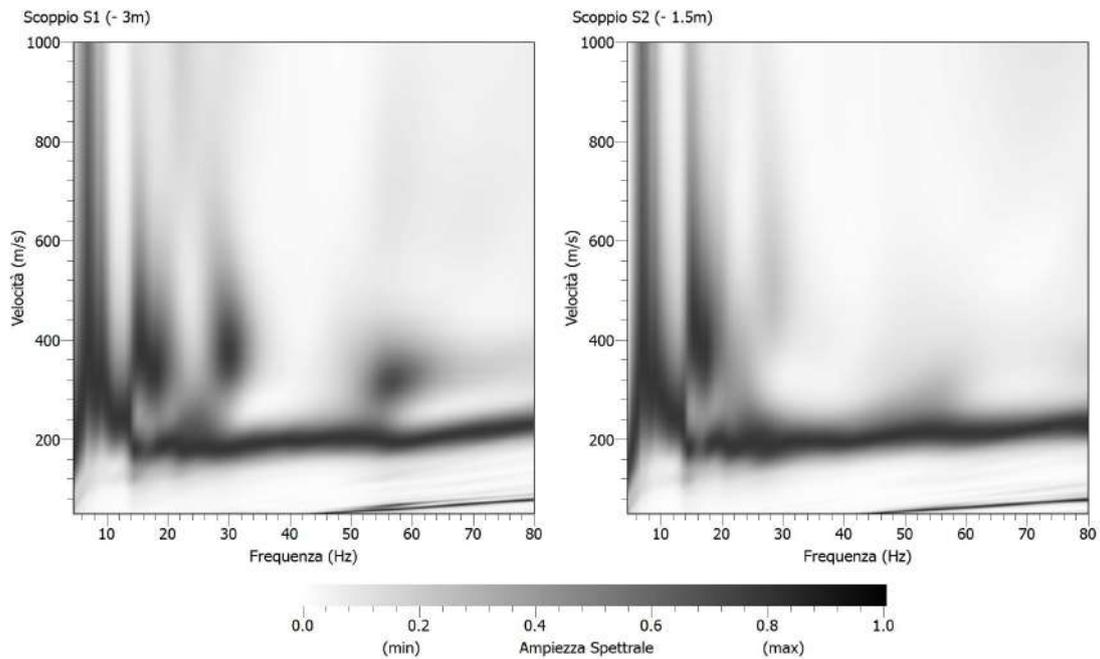
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2:** schema energizzazione.

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

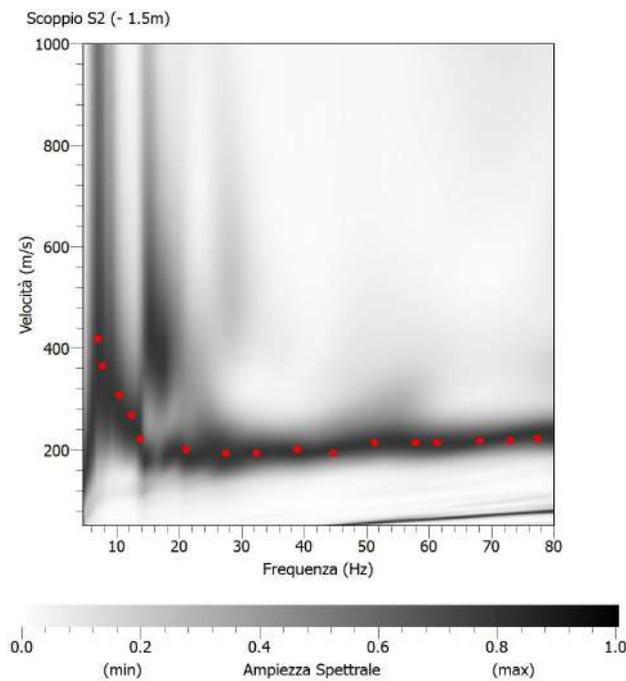
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 10-80 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 5) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S2 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione.



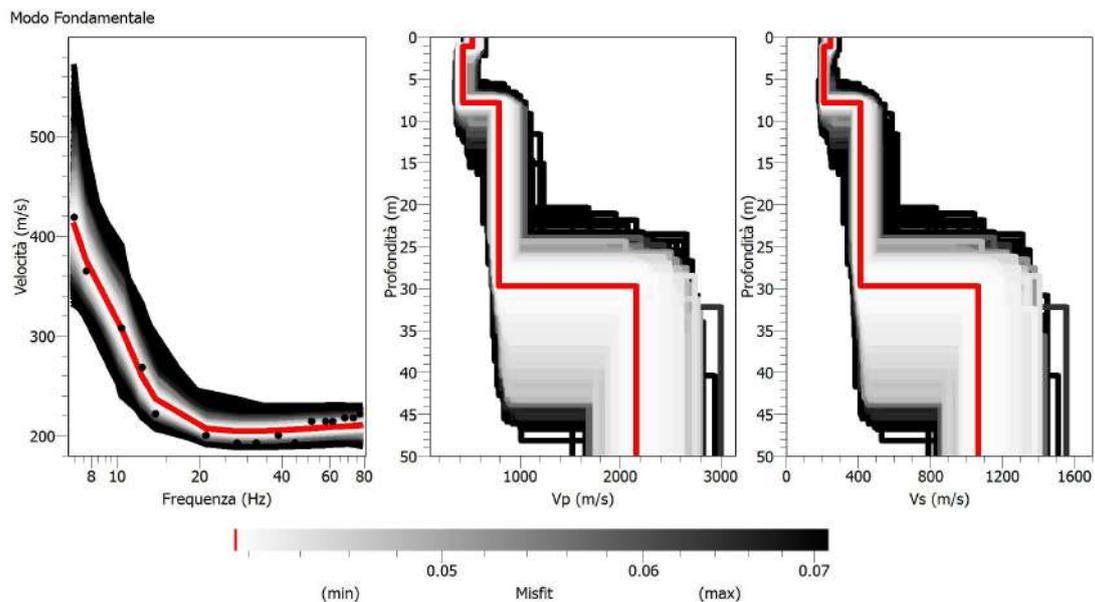
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S2. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	12
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	60600
Minimo misfit	0,0415

In Figura 6 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.

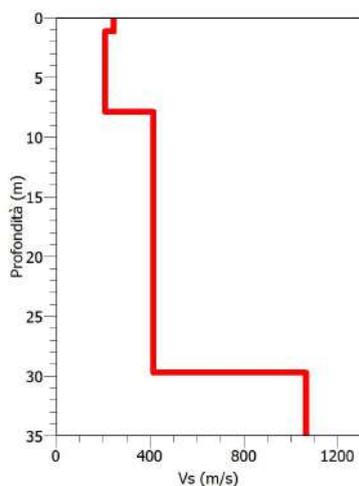


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	1.10	525	245	1800	0.36	108045	294054	352065
2	6.75	432	208	1700	0.35	73549	198450	219196
3	22.00	790	415	2000	0.31	344450	902068	788933
4	0.15	2160	1065	2000	0.34	2268450	6076758	6306600

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 29,85 m dal momento che è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (strato numero 4 in Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-29,85	332

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 332 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

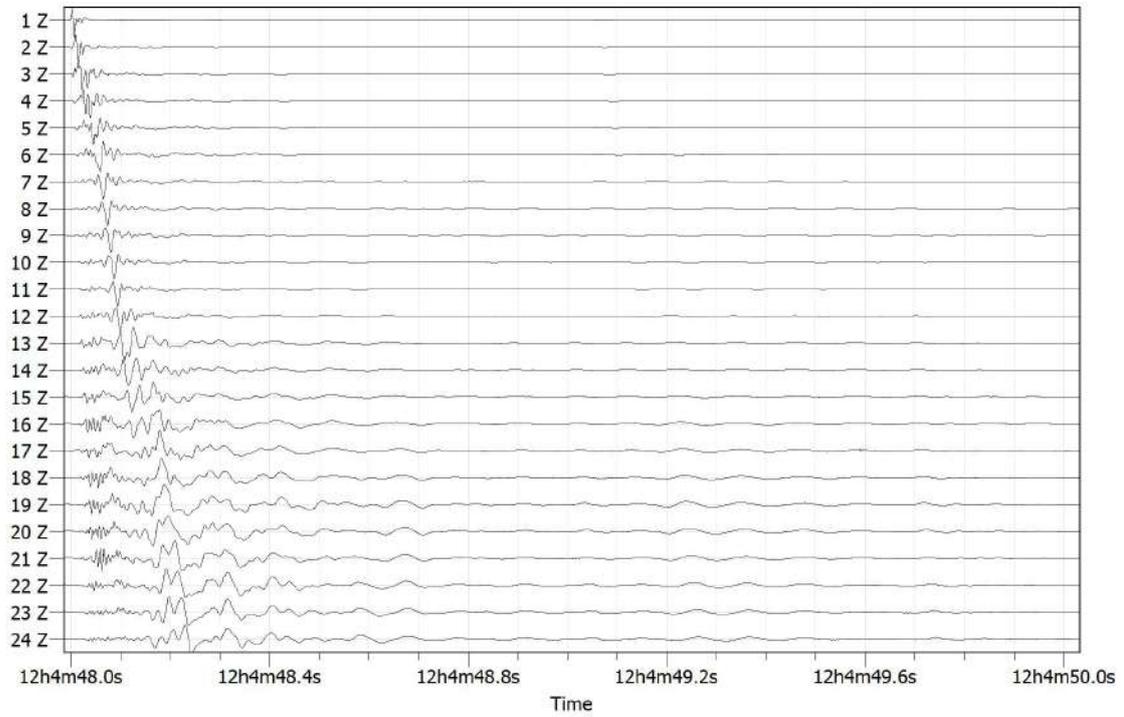
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



 Profilo indagine sismica

## ALLEGATO 2

### TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

## ALLEGATO 3

### REPORT FOTOGRAFICO



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

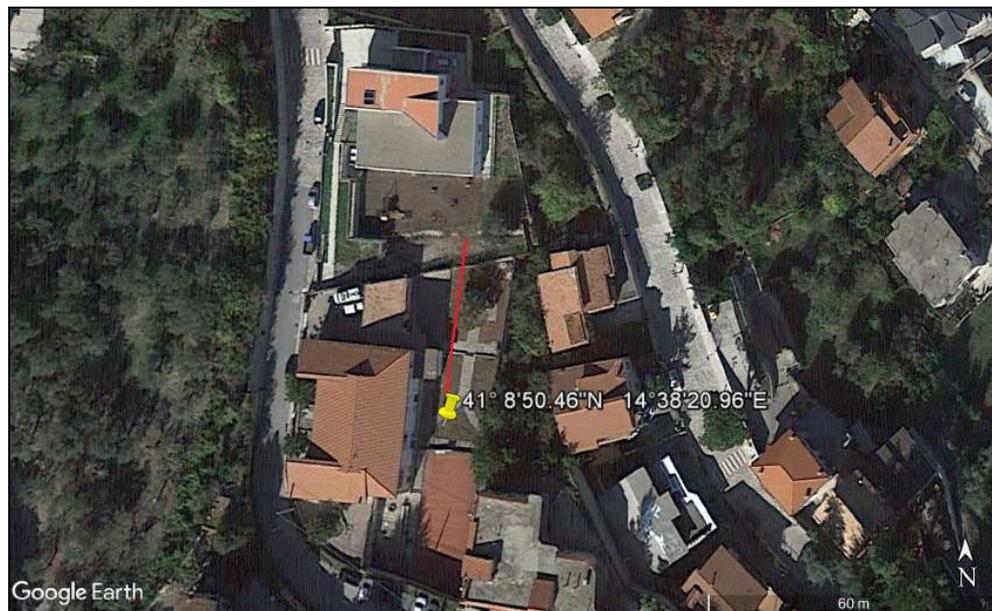
**INDAGINI SISMICHE PUC**

**MASW 9**

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84**

**LATITUDINE 41° 08' 50,46" N**

**LONGITUDINE 14° 38' 20,96" E**



Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione dati

Per l'acquisizione dei dati è stata utilizzata la seguente attrezzatura:

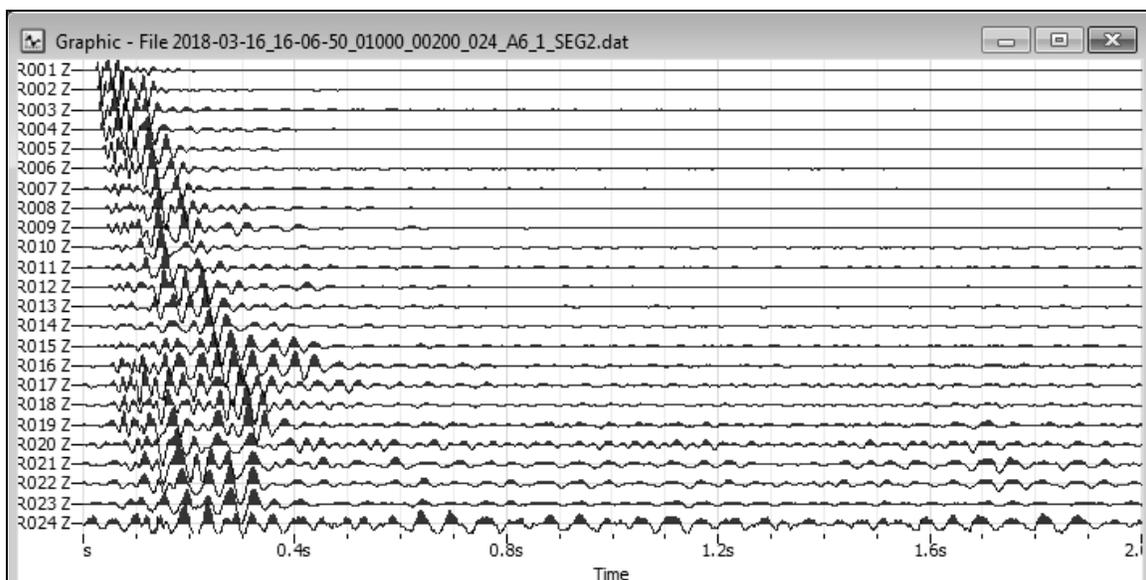
- Sismografo SARA Electronic mod.: "DoReMi" a 24 canali;
- Geofoni verticali monocomponente elettromagnetici a bobina mobile e massa sospesa con frequenza propria di 4,5Hz, trasduttori in grado di convertire in impulsi elettrici la velocità di spostamento del suolo quando attraversato da onde sismiche;
- Mazza di 8Kg battente su shot plate in polimero dal diametro di 250mm;
- Geofono starter per individuare l'esatto istante ( $t_0$ ) in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione;
- Software di acquisizione "DOREMI" sviluppato dalla società "Sara electronic".

I dati acquisiti sono stati quindi elaborati in fase di post-processing attraverso il software "Geopsy" impiegato per il calcolo della curva di dispersione.

## Dati sperimentali

<b>Lunghezza stendimento (m)</b>	<b>34,5</b>
<b>Numero di ricevitori</b>	<b>24</b>
<b>Distanza intergeofonica (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Distanza Sorgente - 1° ricevitore (m)</b>	<b>-6</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Passo temporale di acquisizione (ms)</b>	<b>1</b>
<b>Numero di ricevitori usati per l'analisi</b>	<b>24</b>
<b>L'intervallo considerato per l'analisi (ms)</b>	<b>0 - 1500</b>

*Tabella 1: Schema della geometria di acquisizione*

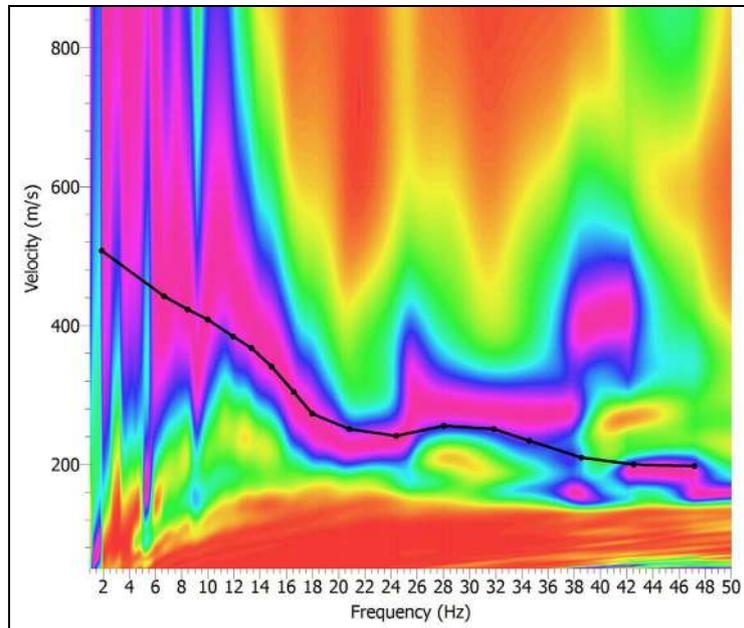


*Figura 3: Tracce sperimentali*

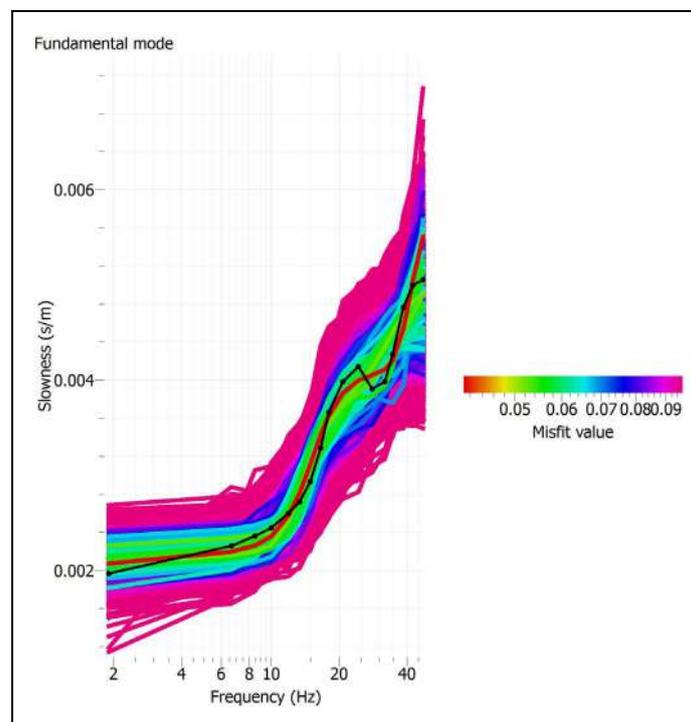
## Risultati delle analisi

Frequenza finale: 50Hz

Frequenza iniziale: 1 Hz



*Figura 4: Spettro di frequenza e Curva di dispersione sperimentale*

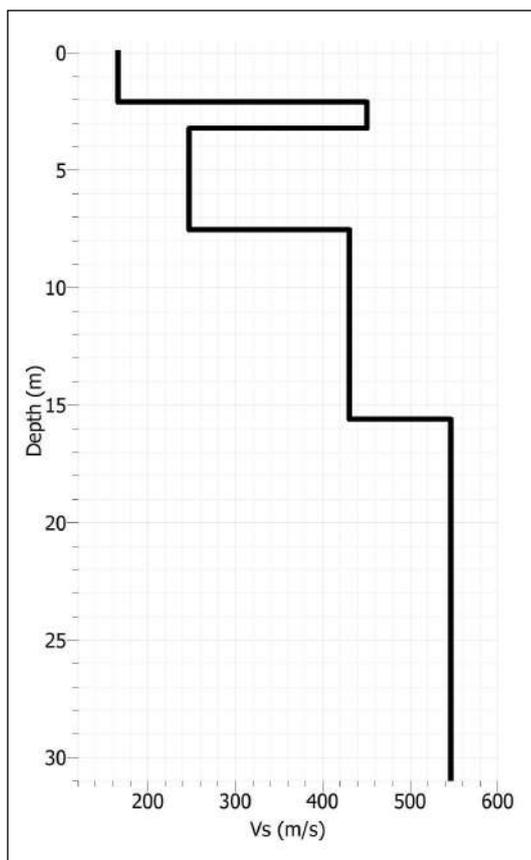


*Figura 5: Sovrapposizione della curva di dispersione sperimentale (nero) e calcolate*

## Profilo di velocità

Strato	h(m)	z (m)	$V_{s_{fin}}$
1	2,1	-2,1	<b>165</b>
2	1,1	-3,2	<b>451</b>
3	4,3	-7,5	<b>247</b>
4	8,1	-15,6	<b>429</b>
5	∞	-∞	<b>546</b>

*Tabella 2: Risultati dell'inversione*



*Figura 6: Profilo  $V_s$  (con minimo misfit=0,04), utilizzato per il calcolo della  $V_{s,eq}$*

### Risultati finali

Poiché all'interno del modello di velocità ottenuto non è presente uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s, ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{s,eq}$  calcolata fino alla profondità di 30 m dall'attuale piano campagna.

Profondità z(m)	$V_{s,eq}$ (m/s)
0-30	385

*Tabella 3: Valore della  $V_{s,eq}$*

## CONCLUSIONI

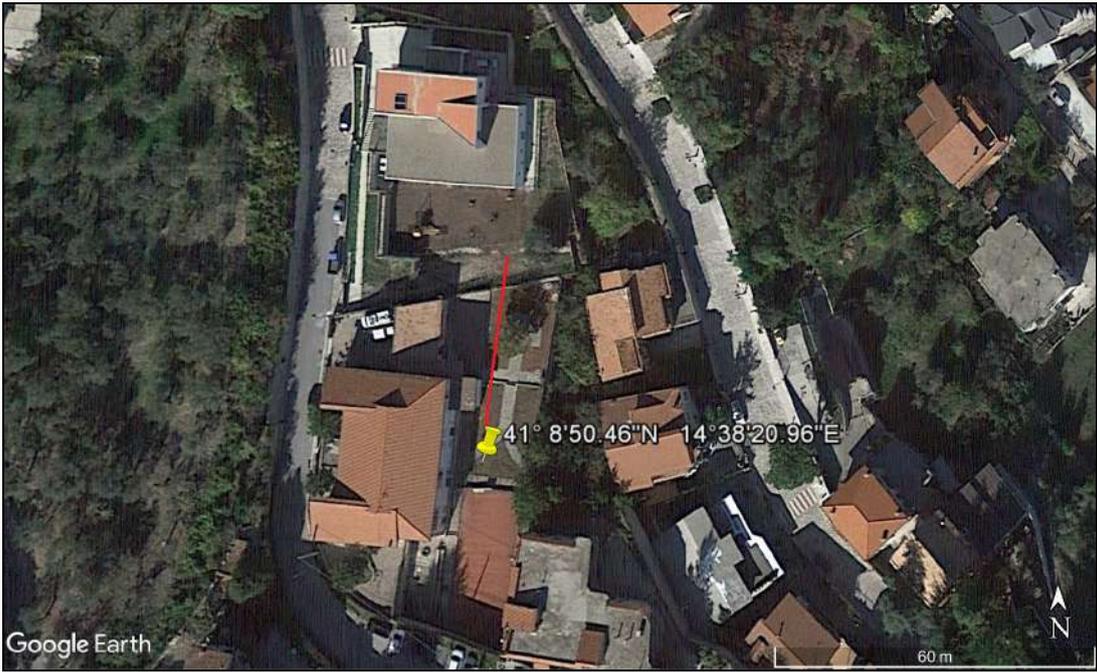
L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS e, di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 385 m/s (considerando come riferimento il piano campagna).

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Ubicazione dell'indagine



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 10***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 08' 52,96" N  
LONGITUDINE 14° 38' 18,39" E**



Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

Località:

**Comune di Cautano**

Committente **amm in istr. comunale**

**Marygeo sas**

Proprietario:

**Amm. Comunale**

**N. Accettazione**

Data di elaborazione:

**Luglio 2020**

Data di acquisizione:

**Giugno 2020**

**046/20**

## **PROSPEZIONE SISMICA - MASW - LINEA SISMICA MASW 10**

### **MASW1**

#### **MODALITA' DI ACQUISIZIONE**

Acquisitore tipo: <b>ECO 24 CH "AMBROGEO"</b>	Punti di camp. per canale <b>13616</b>	Ritardo (ms) <b>0,00</b>
Canali impiegati <b>24</b>	Punti di camp. Totali <b>326787</b>	Energizzatore <b>MECCANICO</b>
Intervallo acquisizione (ms) <b>0,128</b>	Amplificazione <b>DIFFER. PER CANALE</b>	Starter <b>MECCANICO</b>
Tempo di campionamento (ms) <b>1000</b>	Filtro PB in acq. (Hz) <b>NESSUNO</b>	Sommatorie <b>NESSUNA</b>

#### **CARATTERISTICHE DELLO STENDIMENTO**

N° Geofoni

**24**

Punti di energizzazione

**2**

Distanza intergeof. (m)

**2,50**

Lungh.stendim. (m)

**60,00**

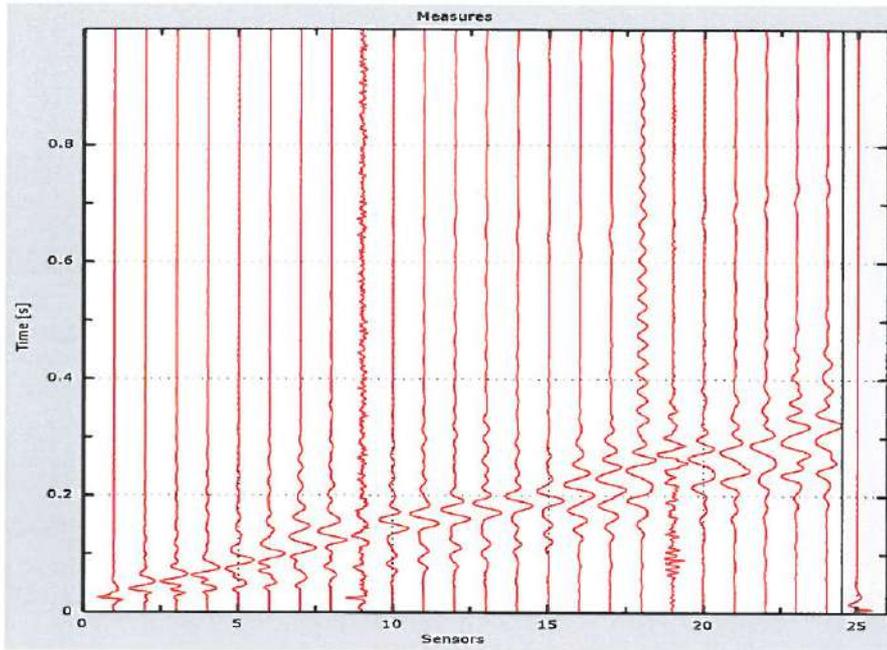
Lungh. linea sismica (m)

**60,00**



MASW1

**TRACCE SISMICHE RILEVATE**



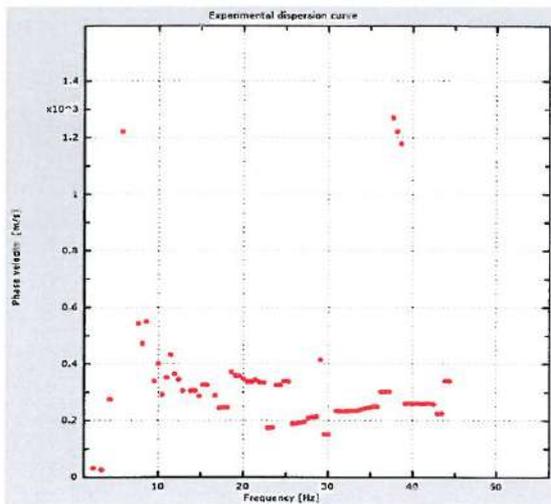
Intervallo di analisi    2000    ms  
N. geofoni utilizzati    24

**CURVA DI DISPERSIONE SPERIMENTALE**

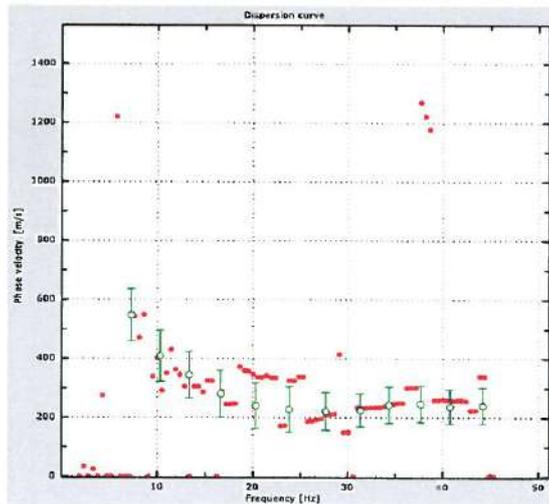
Intervallo di frequenza considerato

Frequenza iniziale  
**2 Hz**

Frequenza finale  
**45 Hz**



DISPERSIONE

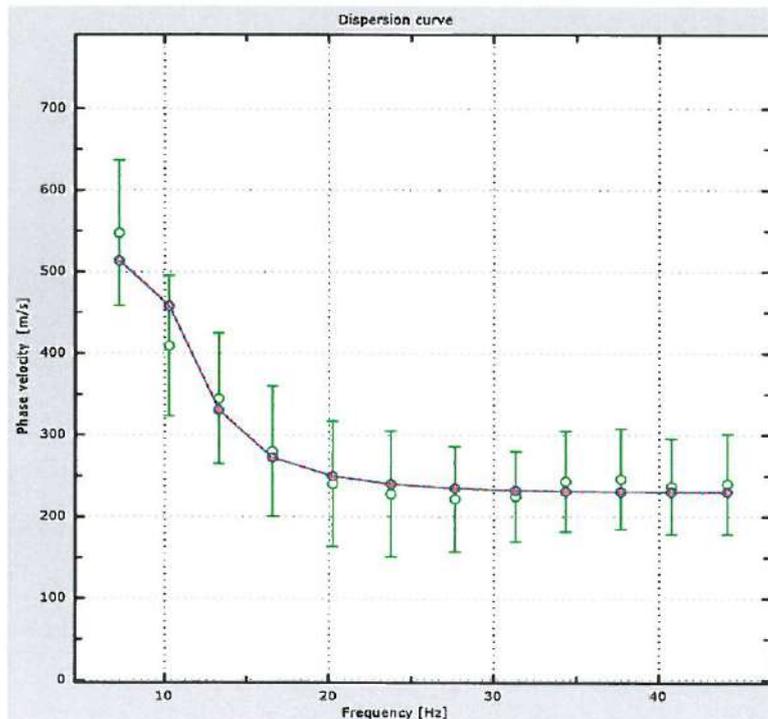


PICKING

**VALORI DELLA CURVA DI DISTRIBUZIONE CONSIDERATI**

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]	Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
7.27956	547.284	458.225	636.343				
10.2936	409.09	323.102	495.077				
13.3076	344.599	264.753	424.445				
16.5837	280.108	200.263	359.954				
20.253	240.185	163.411	316.96				
23.7912	227.901	151.127	304.676				
27.657	221.759	157.269	286.25				
31.3263	224.83	169.553	280.108				
34.3403	243.256	181.837	304.676				
37.682	246.327	184.908	307.747				
40.7615	237.114	178.766	295.463				
44.1687	240.185	178.766	301.605				

**CONFRONTO TRA LE CURVE TEORICA E SPERIMENTALE**

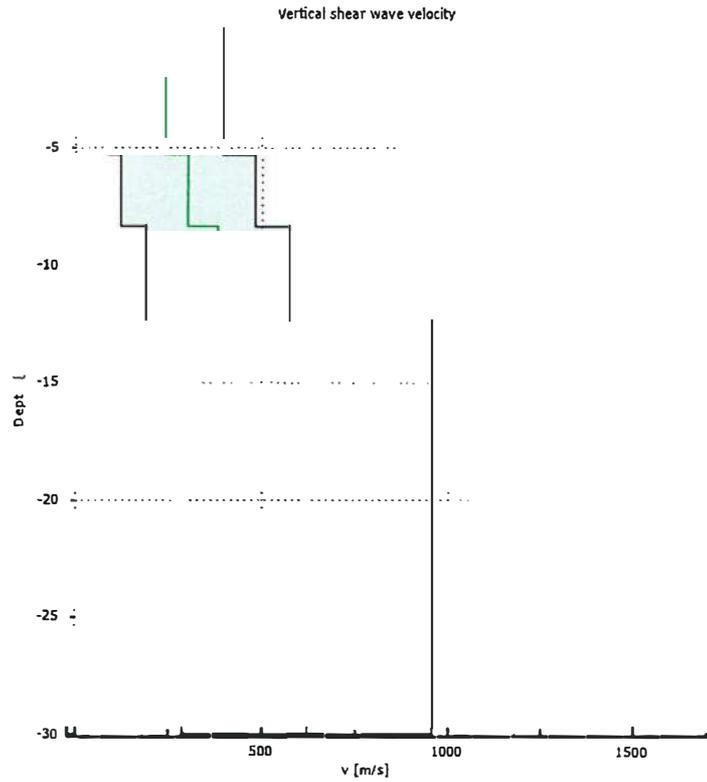


PROCEDURA UTILIZZATA:  Automatica  Semiautomatica  Manuale



MASW1

PROFILO SISMOSTRATIGRAFICO DELLE Vs



Valori riferiti al Piano Campagna

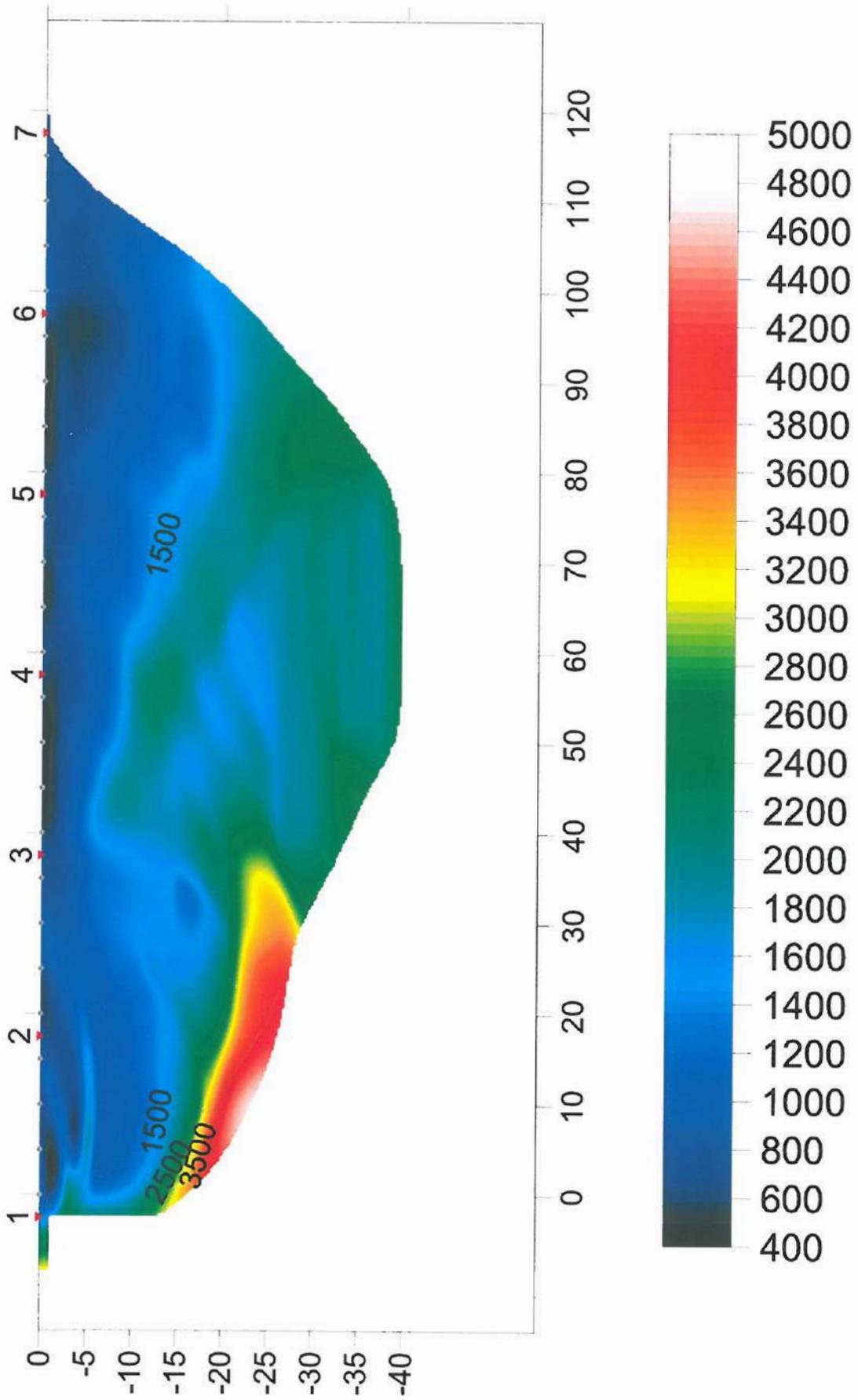
$$V_{Seq} = 424 \text{ m/s} \pm 30 \text{ m/s}$$

SOTTOSUOLO TIPO: **B**

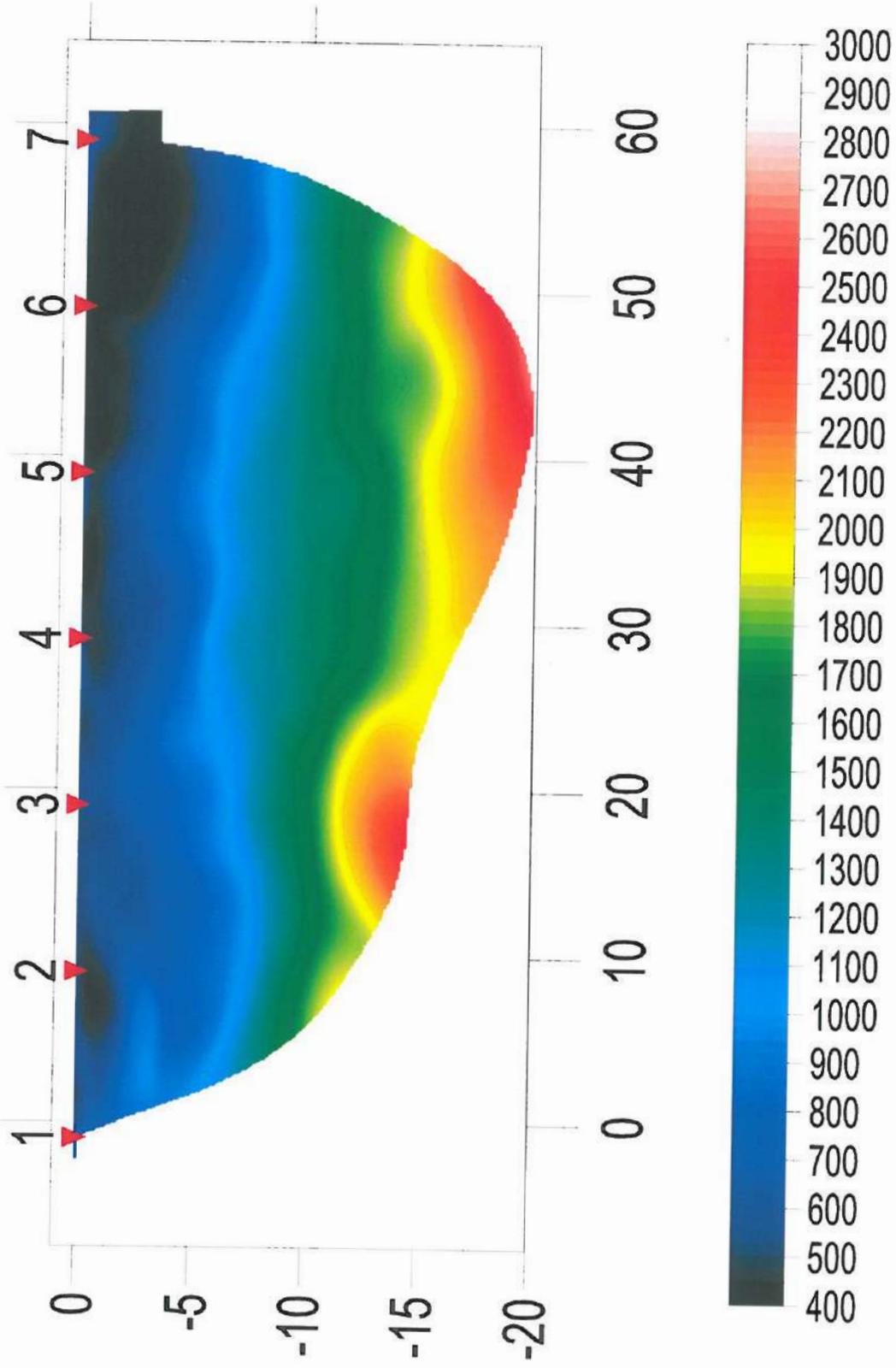
Lo Sperimentatore

---

TOMOGRAFIA SISMICA – STENDIMENTO 120 MT



TOMOGRAFIA SISMICA - STENDIMENTO 60 MT

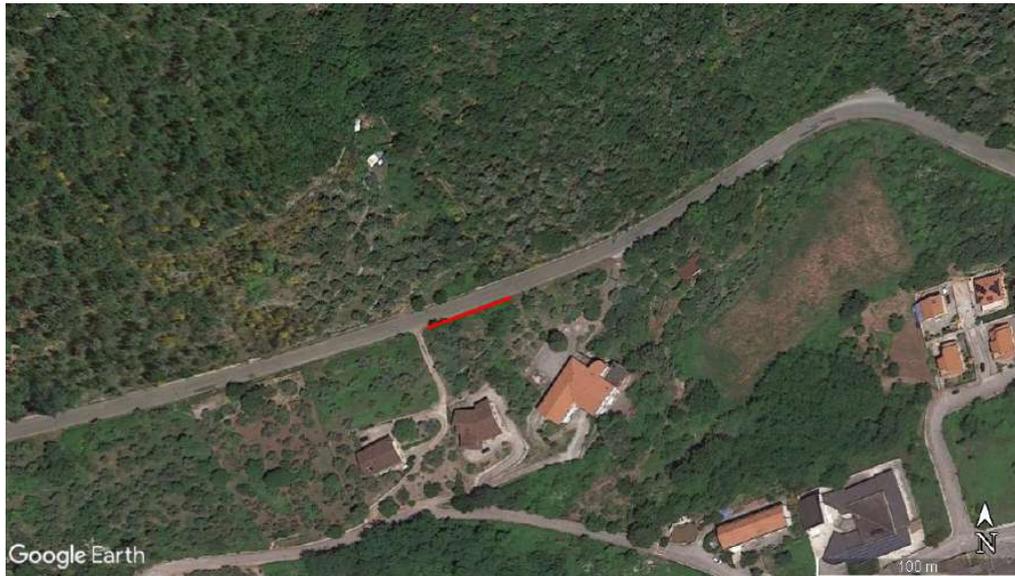


COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO

INDAGINI SISMICHE PUC

*MASW 11*

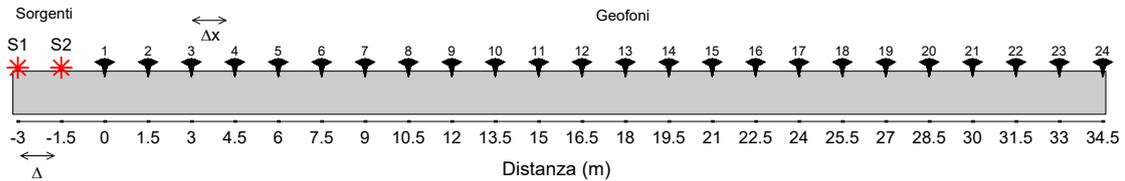
COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 09' 04,98" N  
LONGITUDINE 14° 38' 17,42" E



Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1: schema della geometria di acquisizione.**

**Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati**

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

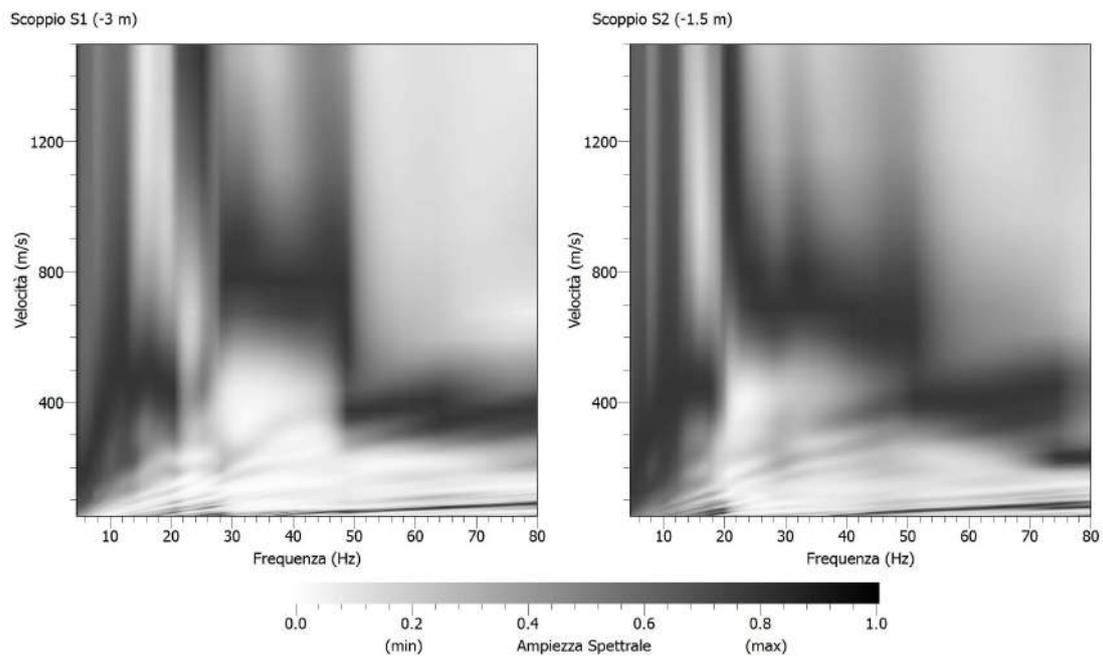
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2: schema energizzazione.**

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

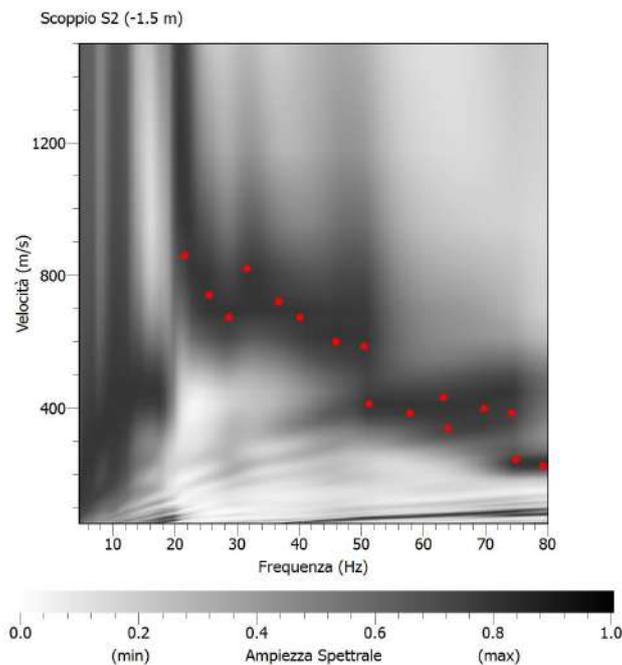
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 20-80 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S2 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e le curve di dispersione così ottenute sono state utilizzate successivamente per il processo di inversione.



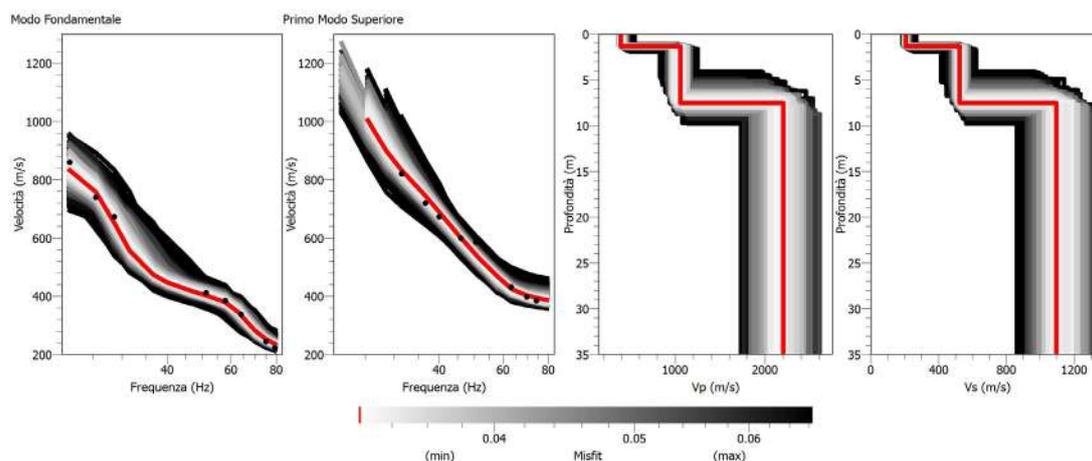
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S2. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi ai modi di vibrazione riconosciuti.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	7
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	35350
Minimo misfit	0,0325

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall’attuale piano campagna.

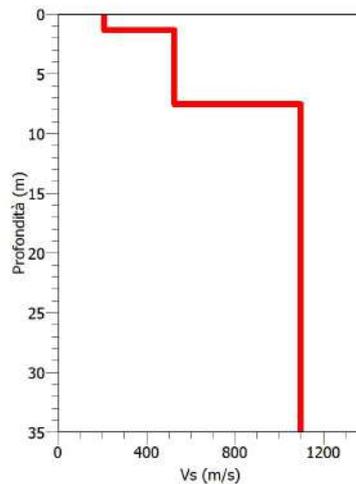


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	1.32	400	210	1700	0.31	74970	196384	172040
2	6.20	1060	525	2000	0.34	551250	1474572	1512200
3	22.48	2200	1100	2200	0.33	2662000	7098667	7098667

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 7,52 m dal momento che è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (strato numero 3 in Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-7,52	416

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 416 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

# ALLEGATO 1

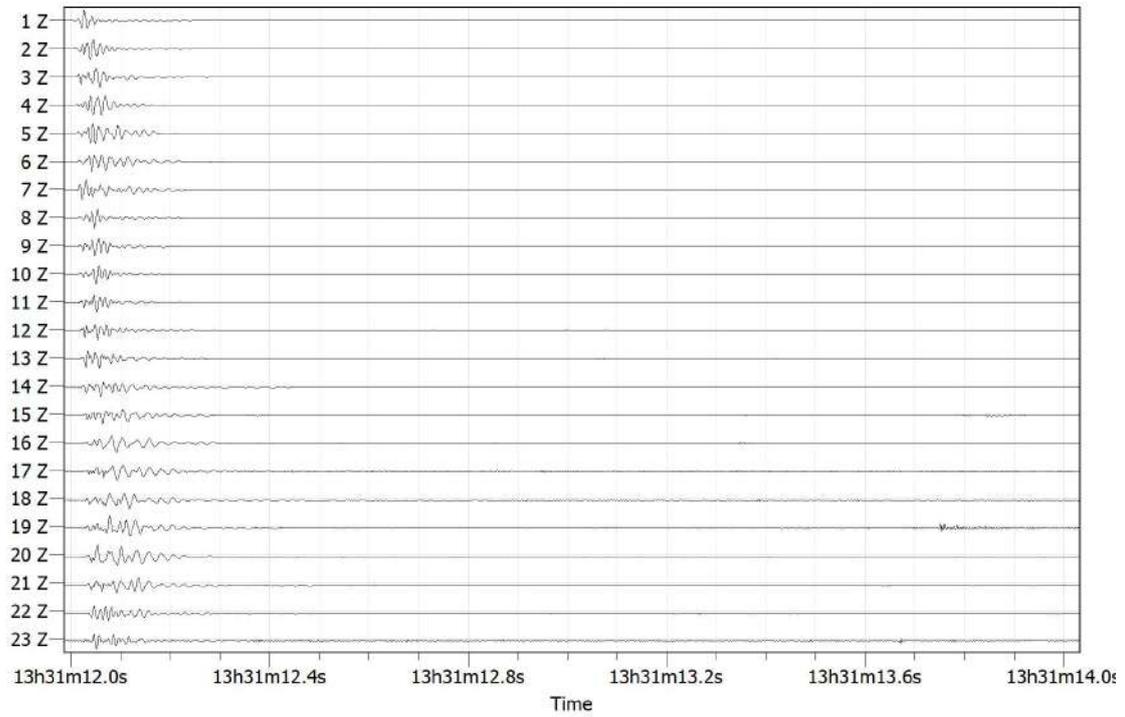
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



 Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

## ALLEGATO 3

### REPORT FOTOGRAFICO



COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO

INDAGINI SISMICHE PUC

*MASW 12*

COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84

LATITUDINE 41° 08' 40,68" N

LONGITUDINE 14° 37' 52,88" E

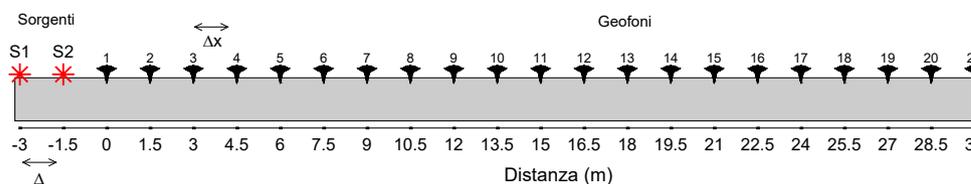


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1:** schema della geometria di acquisizione.

**Tabella 1:** caratteristiche di acquisizione dei dati

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

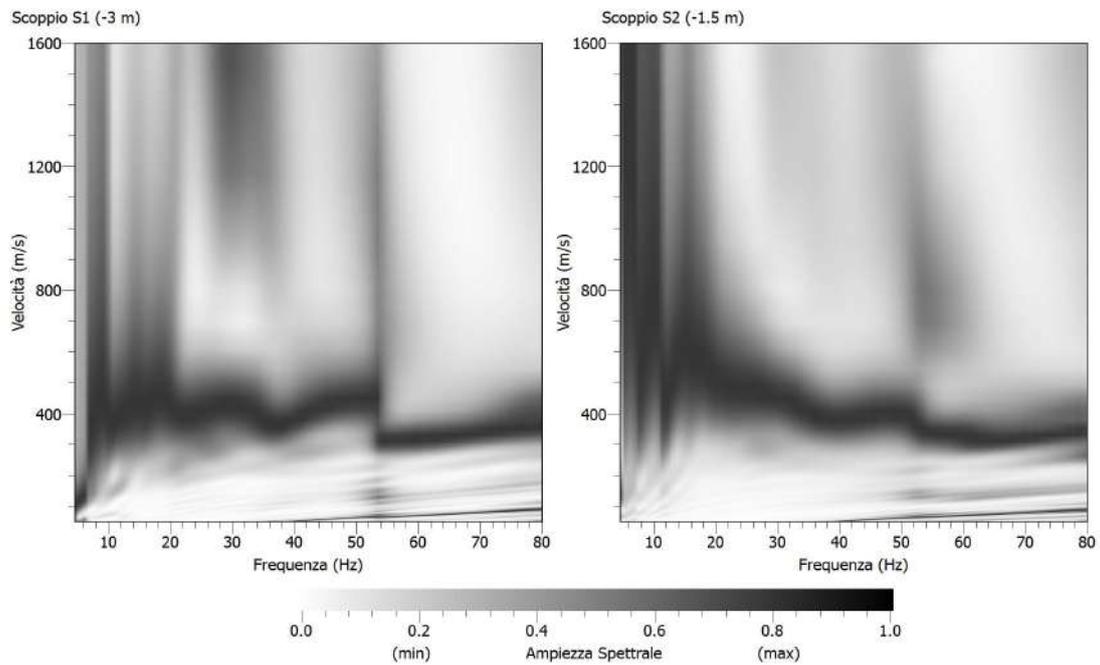
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2:** schema energizzazione.

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

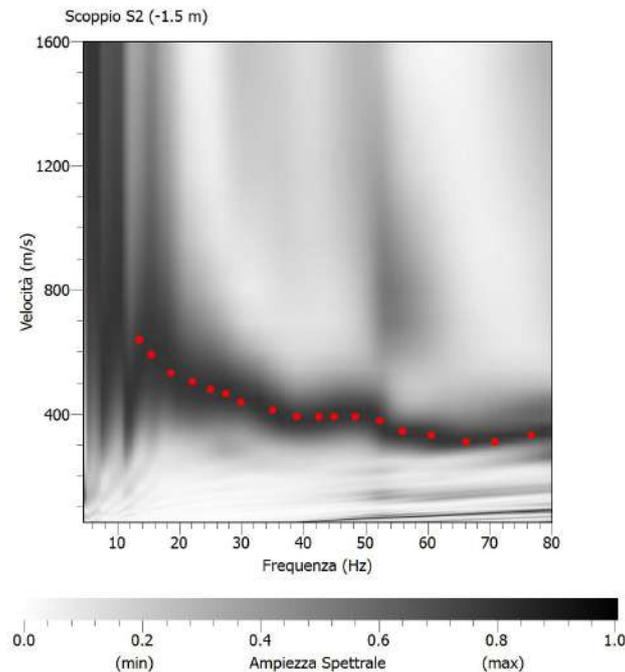
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 10-80 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S2 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione.



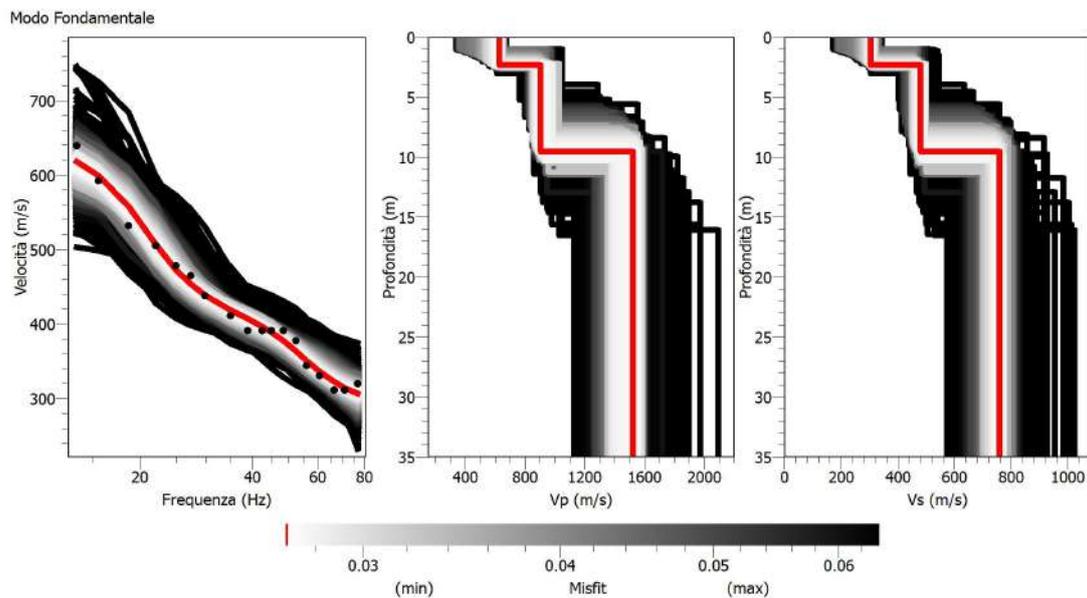
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S2. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	5
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	25250
Minimo misfit	0,0269

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.

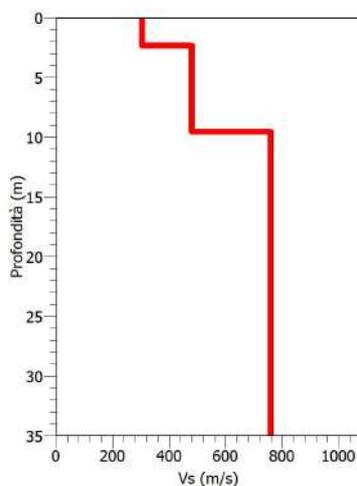


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	2.35	630	305	1700	0.35	158143	426015	463873
2	7.20	905	480	2000	0.30	460800	1202033	1023650
3	20.45	1525	760	2200	0.33	1270720	3392276	3422082

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 30 m dal momento che non è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-30	605

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 605 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

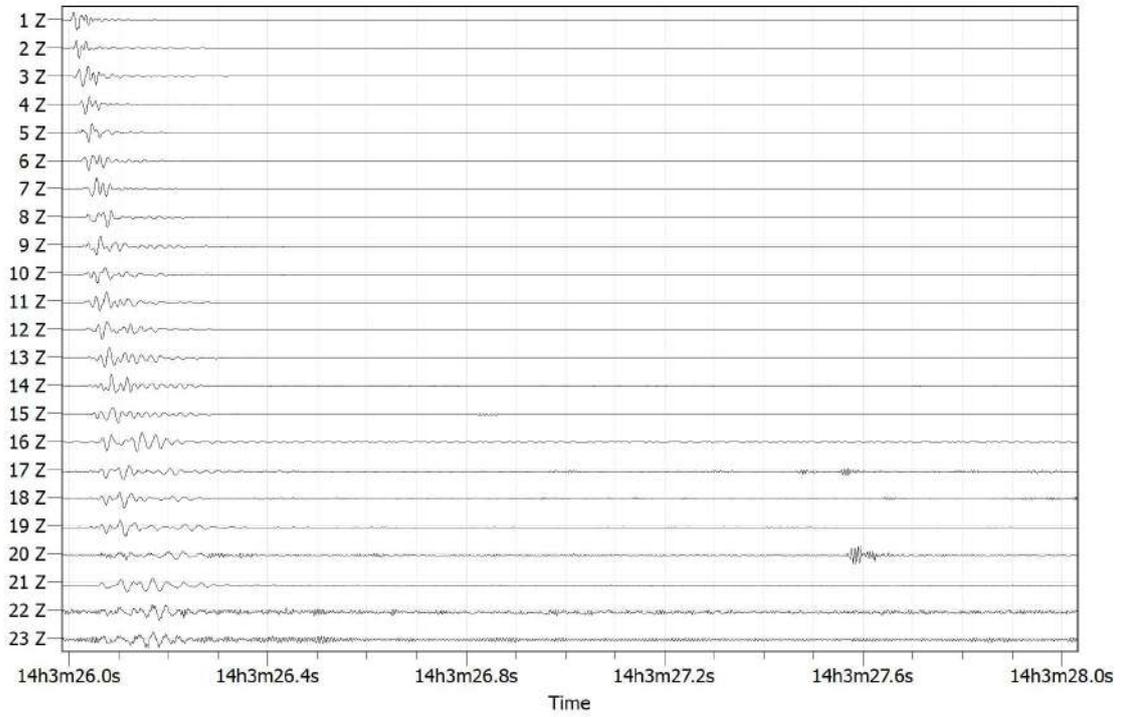
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



 Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

## ALLEGATO 3

### REPORT FOTOGRAFICO



COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO

INDAGINI SISMICHE PUC

*MASW 13*

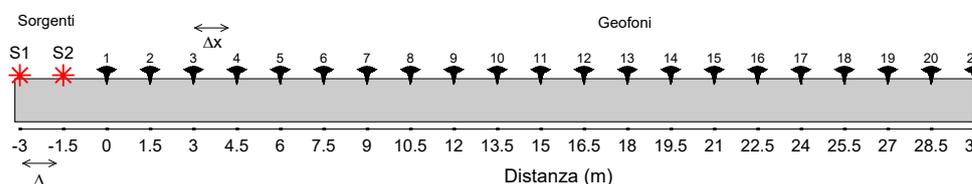
COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 08' 03,44" N  
LONGITUDINE 14° 36' 39,442" E



Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1:** schema della geometria di acquisizione.

**Tabella 1:** caratteristiche di acquisizione dei dati

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

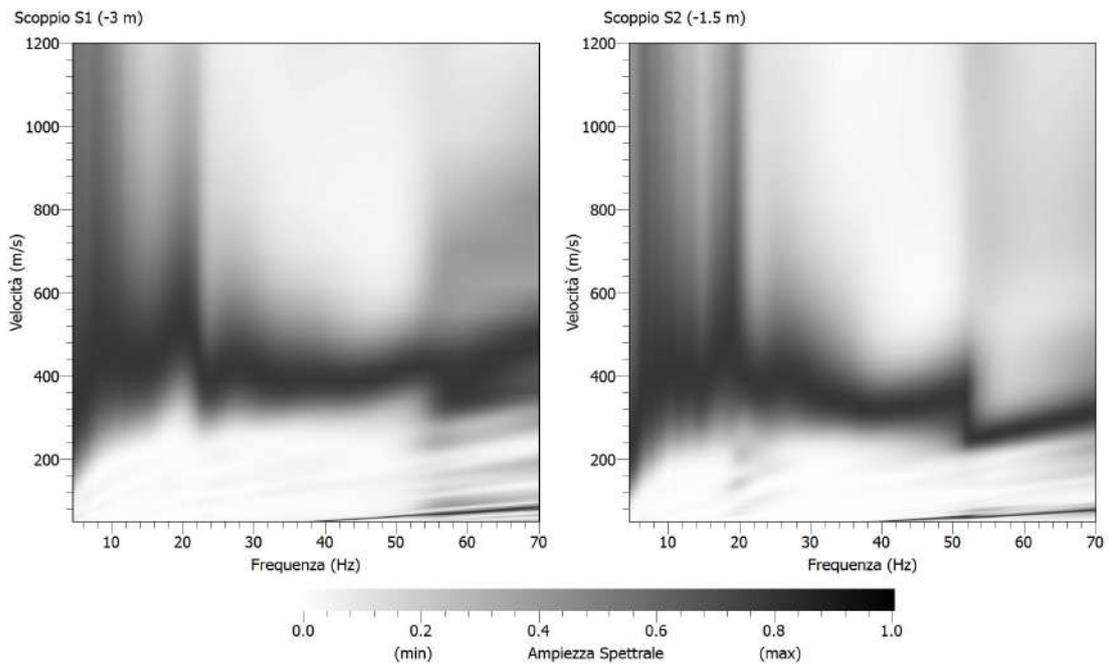
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2:** schema energizzazione.

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

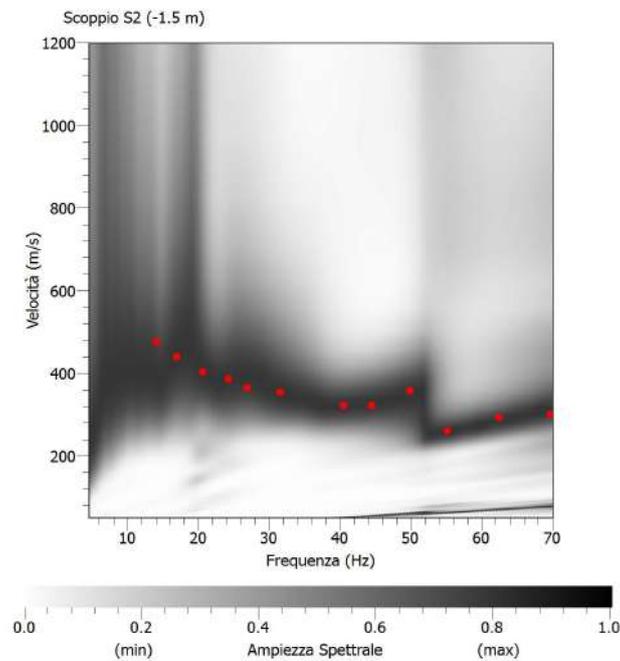
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 10-70 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S2 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e le curve di dispersione così ottenute sono state utilizzate successivamente per il processo di inversione.



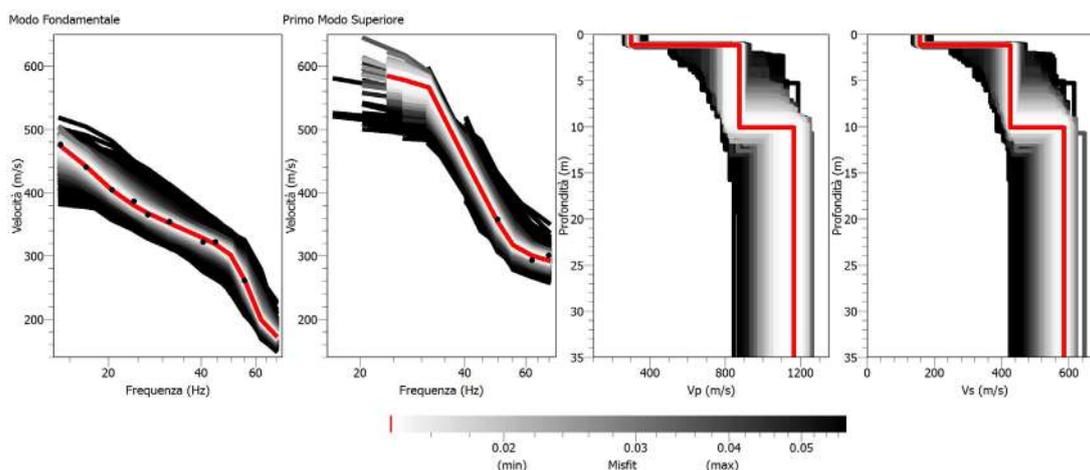
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S2. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi ai modi di vibrazione riconosciuti.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	3
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	15150
Minimo misfit	0,0141

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall’attuale piano campagna.

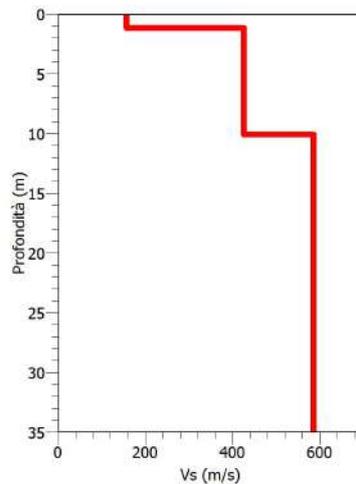


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	1.20	305	160	1700	0.31	43520	114036	100116
2	8.90	875	430	1900	0.34	351310	942075	986274
3	19.90	1165	590	2100	0.33	731010	1940866	1875493

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 30 m dal momento che non è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-30	484

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 484 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

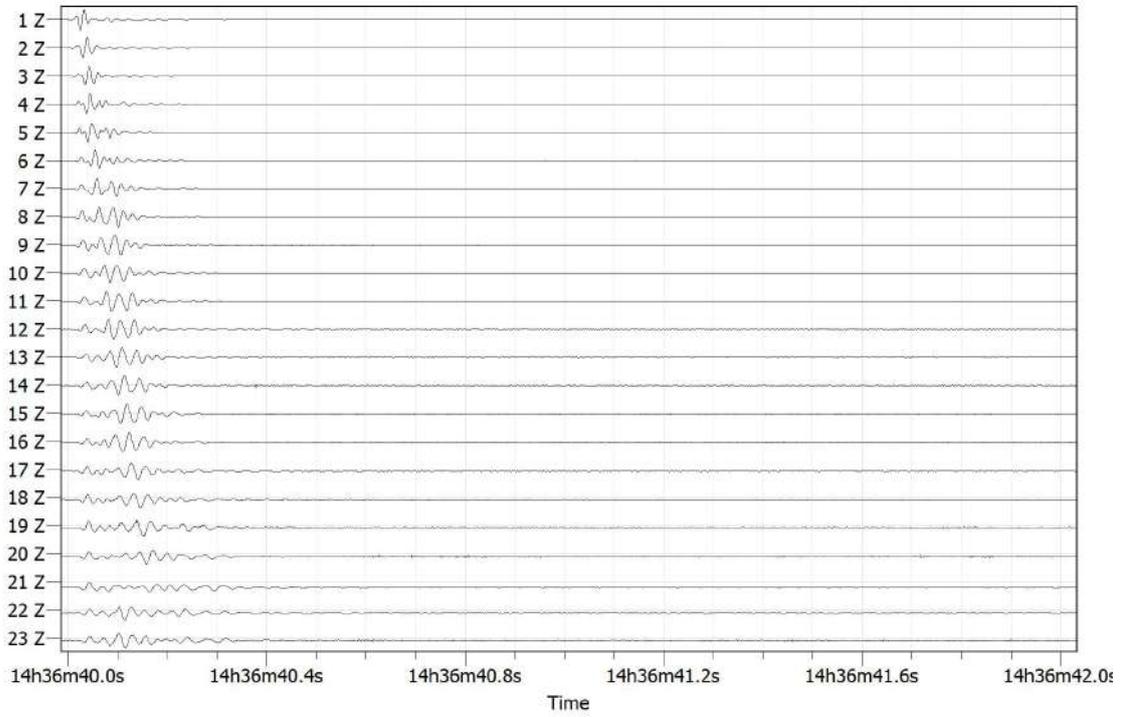
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



 Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

## ALLEGATO 3

### REPORT FOTOGRAFICO



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 14***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84  
LATITUDINE 41° 08' 41" N  
LONGITUDINE 14° 35' 01" E**



Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:

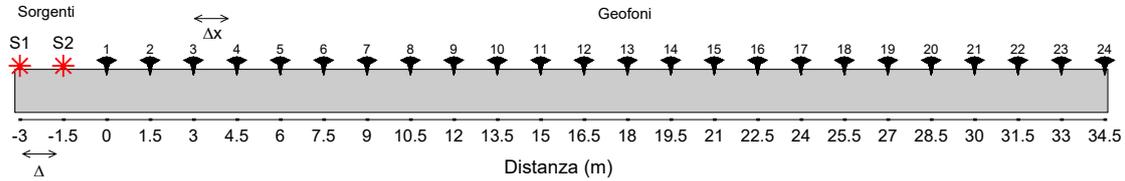


Figura 1: schema della geometria di acquisizione.

Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati

Numero geofoni	24
Tipo di geofono	Verticale
Frequenza propria dei geofoni (Hz)	4,5
Distanza intergeofonica $\Delta x$ (m)	1,5
Lunghezza stendimento sismico (m)	37,5
Frequenza di campionamento (Hz)	1000
Intervallo di acquisizione (ms)	0,001
Tipo di starter	Meccanico
Tipo di energizzazione	Meccanico

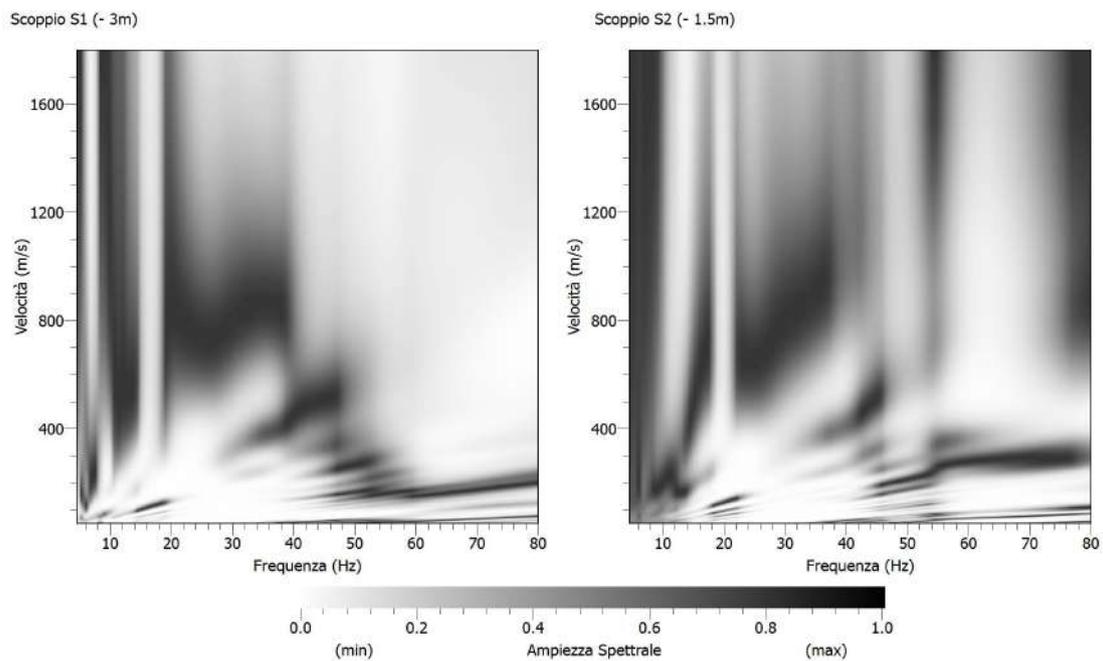
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

Tabella 2: schema energizzazione.

Numero di energizzazioni	2*
Scoppio S1	$\Delta_1 = -3,0$ (m)
Scoppio S2	$\Delta_2 = -1,5$ (m)

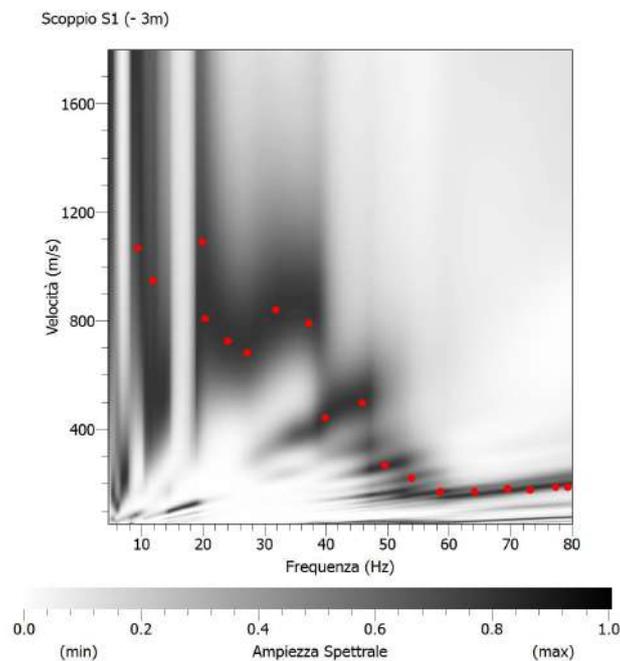
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3), piccando con una procedura manuale i massimi all'interno dello spettro. La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 8-80 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S1 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione.



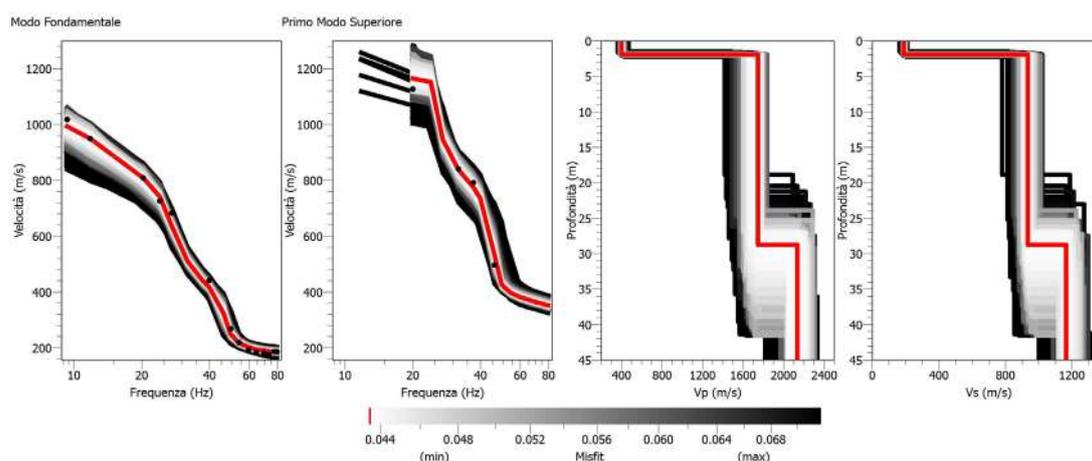
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi ai mod1 di vibrazione riconosciuti.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	8
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	40400
Minimo misfit	0,0435

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4: curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.**

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall’attuale piano campagna.

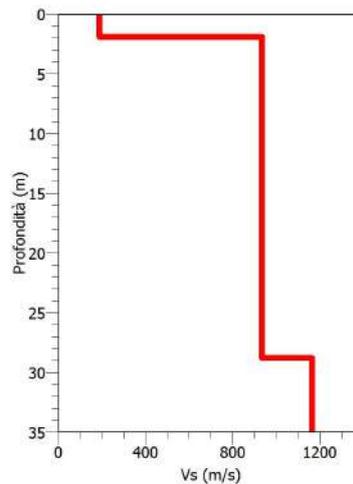


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della Vs,eq.

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	2,00	405	192	1700	0,36	62669	169839	195284
2	26,60	1750	936	2000	0,30	1752192	4554470	3788744
3	1,40	2135	1165	2200	0,29	2985895	7691665	6046902

**Poiché all'interno del modello di velocità ottenuto è presente uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s, ai sensi del DM 17 gennaio 2018, e poiché lo strato più superficiale presenta uno spessore inferiore a 3 m, è possibile assegnare il sito ad una categoria A**

$$^1 G = V_s^2 * \rho$$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici".  
Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale delle Vs e, di conseguenza, del parametro  $V_{s,eq}$  risultato per il modello con minimo misfit (considerando come riferimento il piano campagna attuale) maggiore di 800 m/s.

In riferimento alla Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

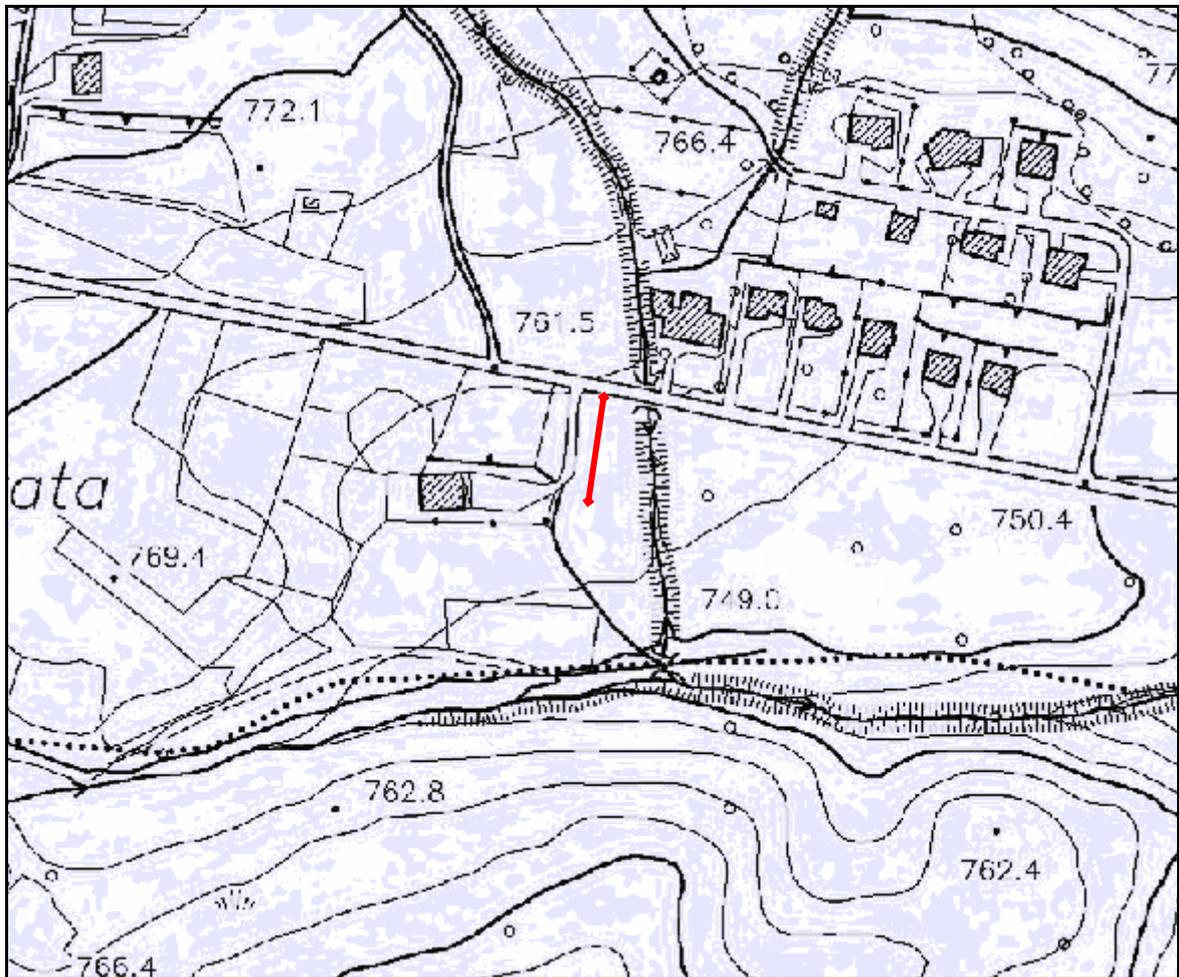
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

---

# ALLEGATO 1

## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA

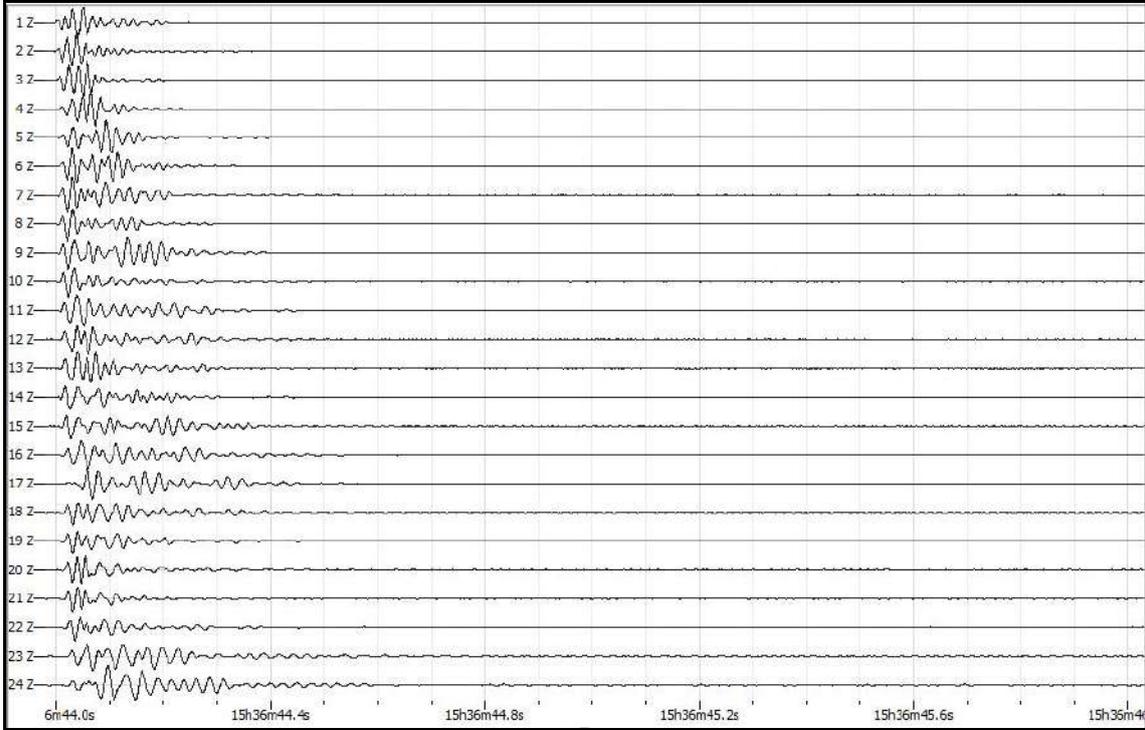


Profilo indagine sismica

Scala 1:3000

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

# ALLEGATO 3

## REPORT FOTOGRAFICO



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 15***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84**

**LATITUDINE 41° 08' 29,43" N**

**LONGITUDINE 14° 36' 48,29" E**

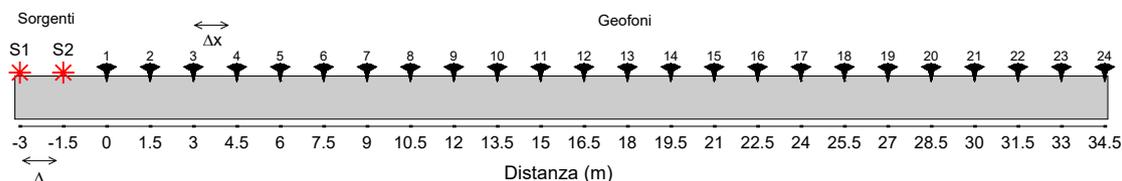


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1: schema della geometria di acquisizione.**

**Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati**

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

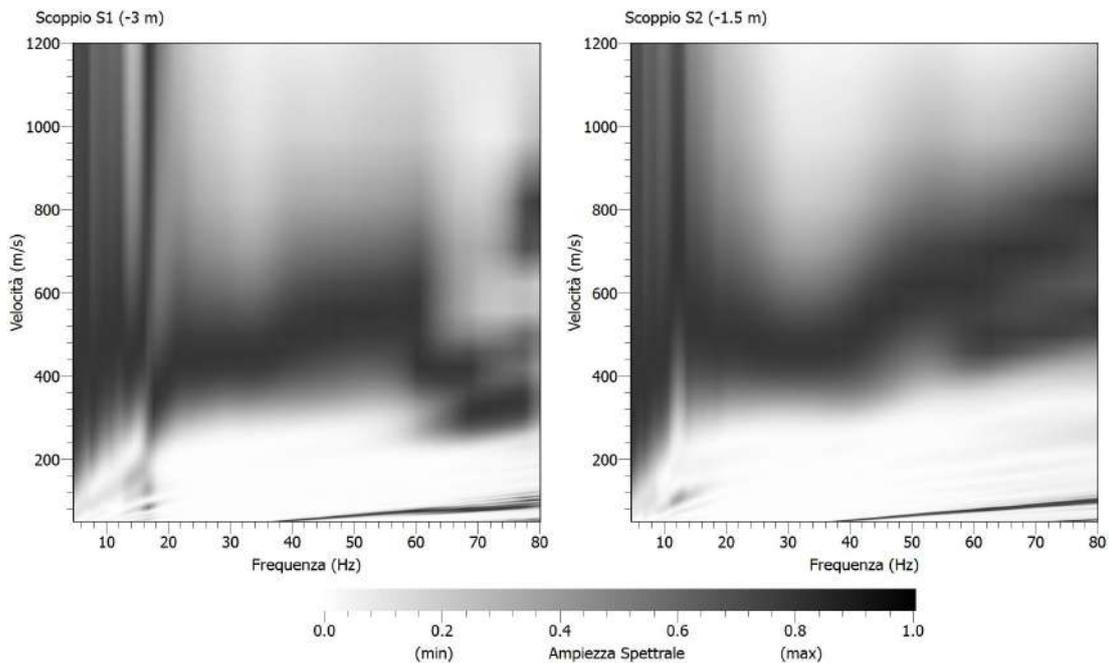
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2: schema energizzazione.**

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

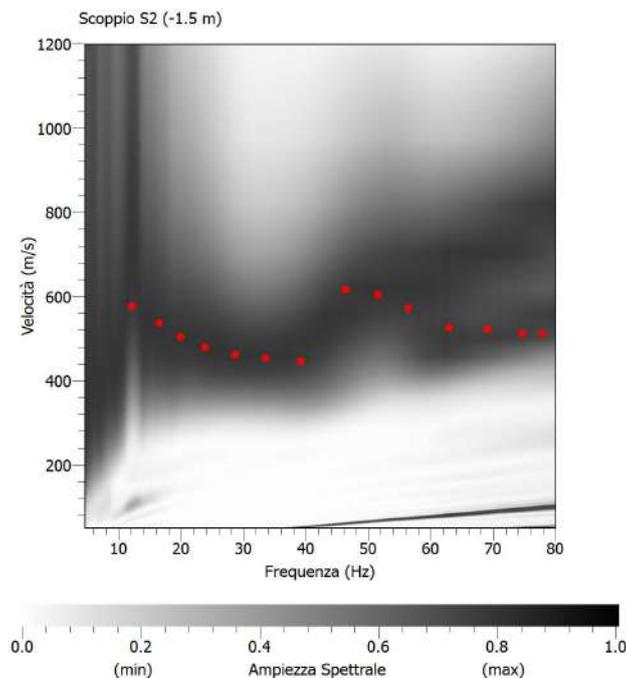
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 15-80 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S2 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e le curve di dispersione così ottenute sono state utilizzate successivamente per il processo di inversione.



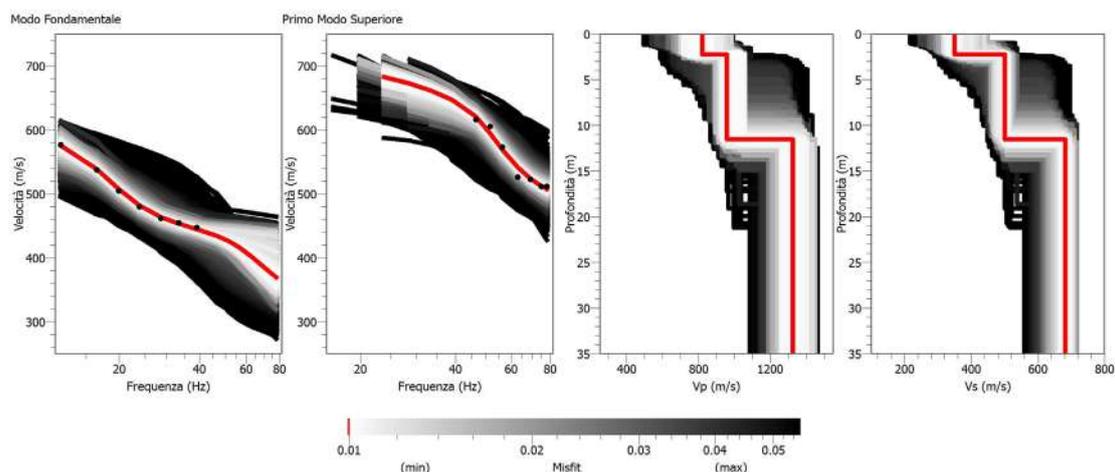
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S2. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi ai modi di vibrazione riconosciuti.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	4
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	20200
Minimo misfit	0,0010

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4: curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.**

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall’attuale piano campagna.

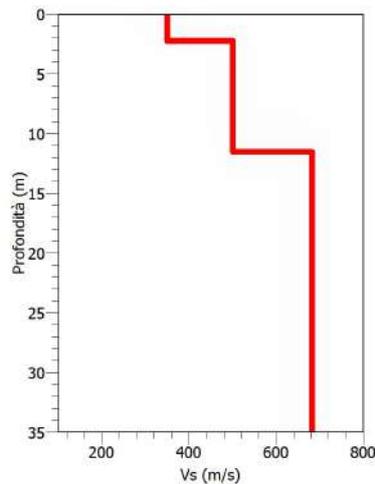


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	2.25	825	350	1700	0.39	208250	579042	879396
2	9.30	960	505	2000	0.31	510050	1335010	1163133
3	18.45	1325	685	2100	0.32	985373	2596695	2372983

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 30 m dal momento che non è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-30	579

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 579 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

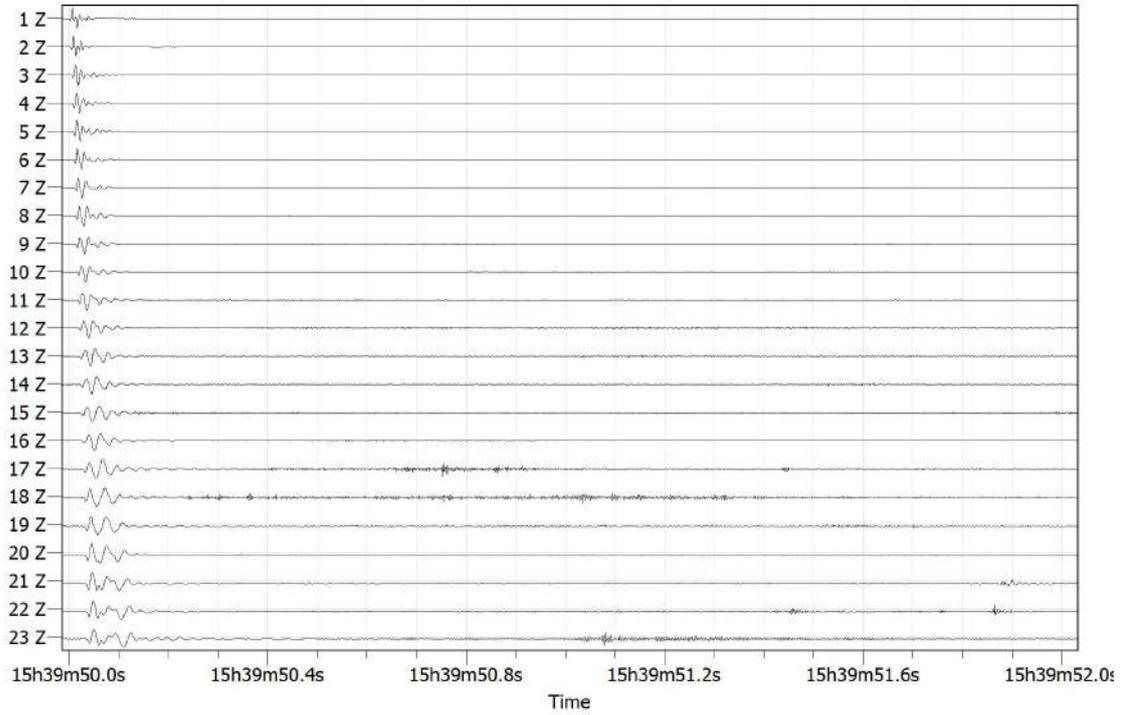
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



 Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

## ALLEGATO 3

### REPORT FOTOGRAFICO



COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO

INDAGINI SISMICHE PUC

*MASW 16*

COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84

LATITUDINE 41° 09' 01,71" N

LONGITUDINE 14° 36' 27,77" E

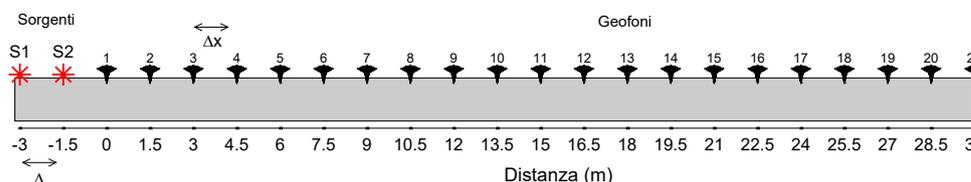


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1: schema della geometria di acquisizione.**

**Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati**

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

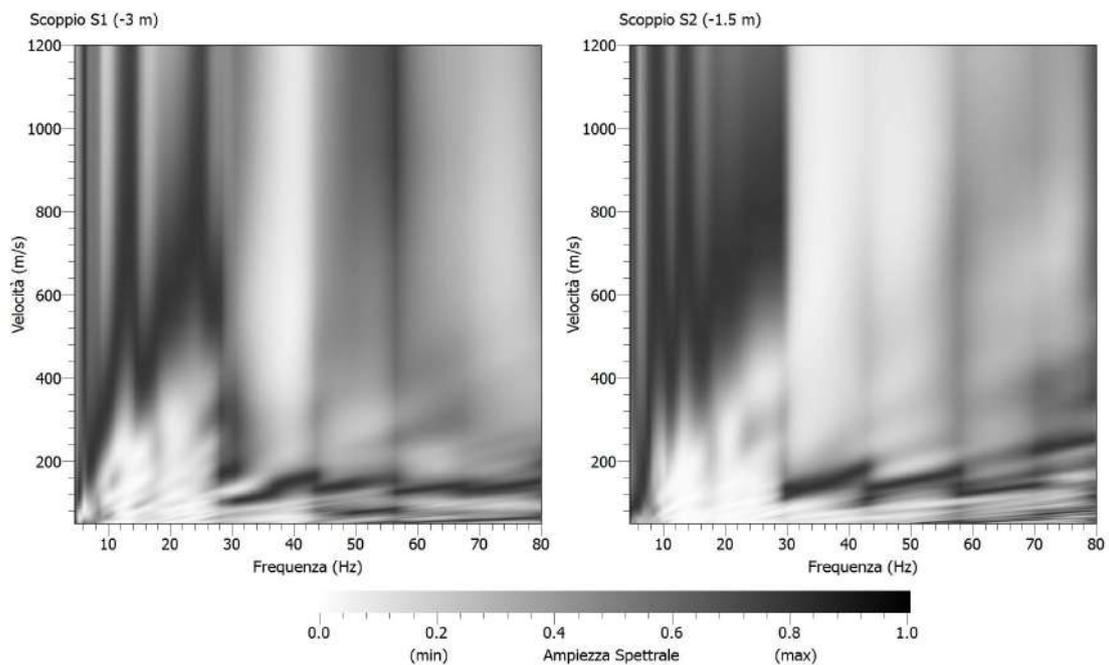
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2: schema energizzazione.**

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

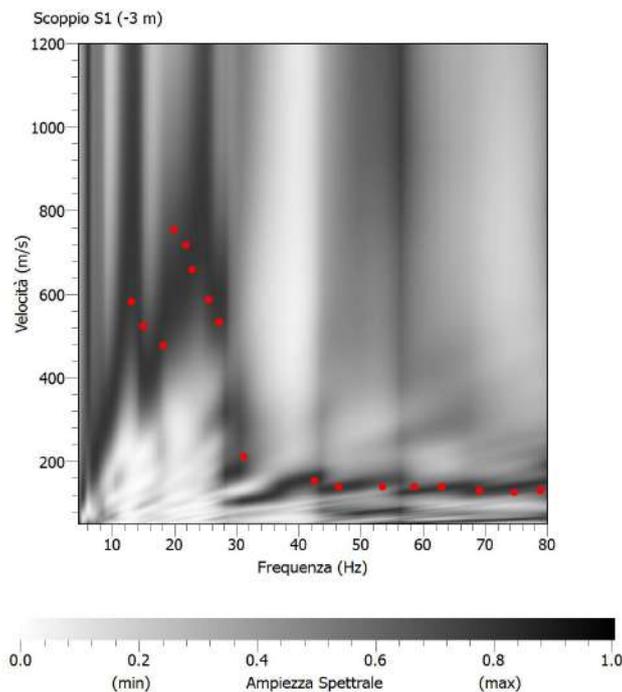
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 10-80 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S1 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e le curve di dispersione così ottenute sono state utilizzate successivamente per il processo di inversione.



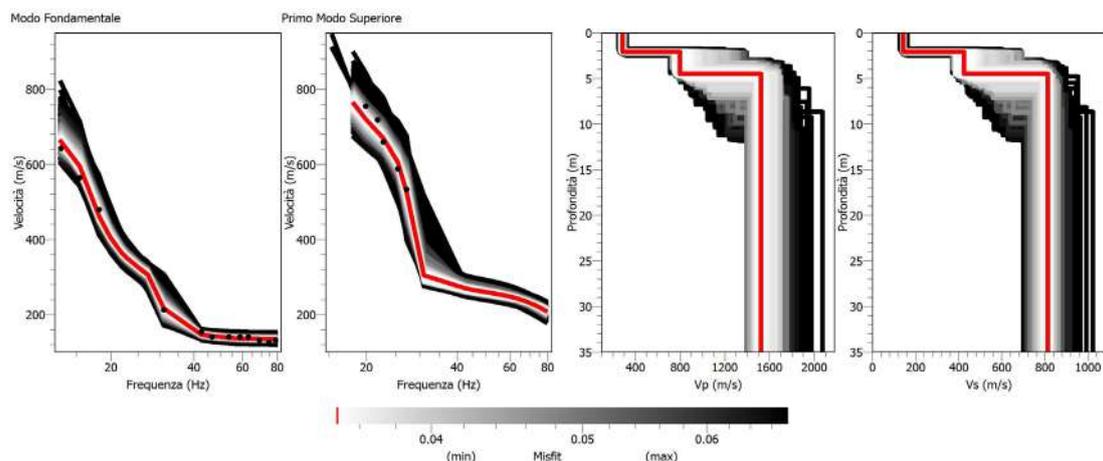
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi ai modi di vibrazione riconosciuti.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	5
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	25250
Minimo misfit	0,0349

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall’attuale piano campagna.

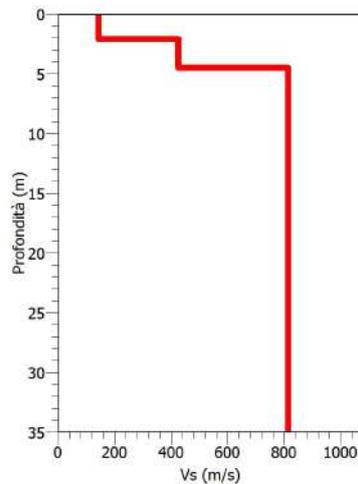


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	2.00	290	145	1600	0.33	33640	89707	89707
2	2.50	810	430	2000	0.30	369800	964290	819133
3	25.50	1525	815	2200	0.30	1461295	3799662	3167982

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 4,5 m dal momento che è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (strato numero 3 in Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-4,5	230

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

# Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della Vs e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$  risultato per il modello con minimo misfit pari a 230 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

---

\*

# ALLEGATO 1

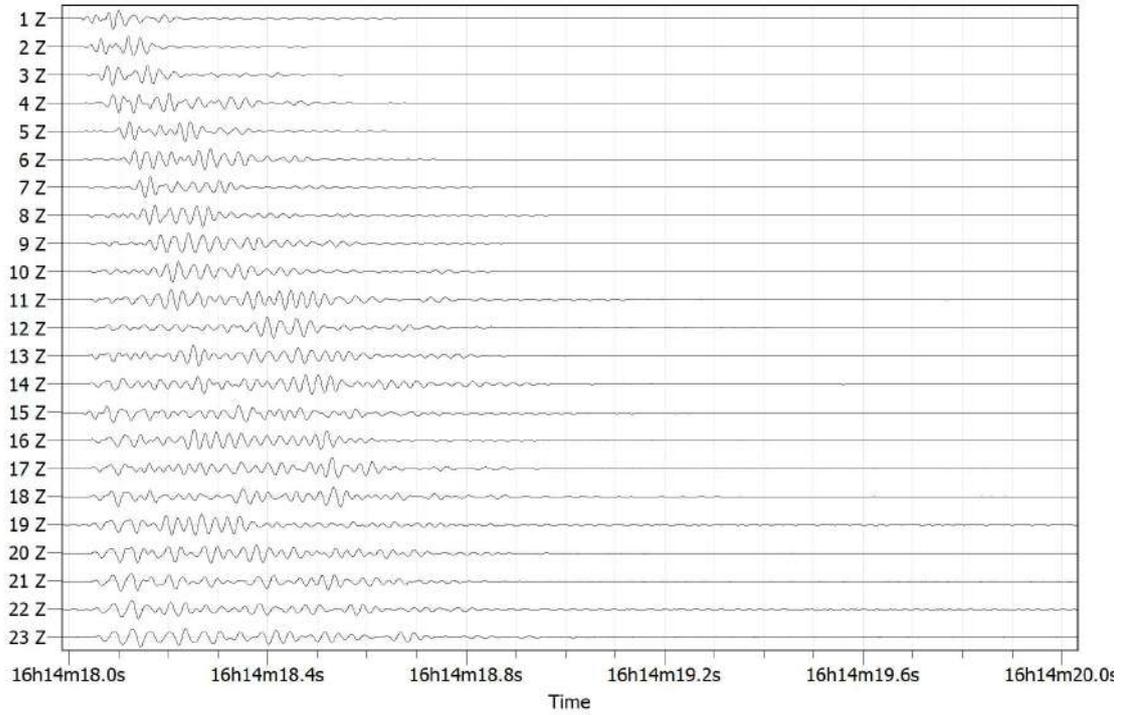
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



 Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

## ALLEGATO 3

### REPORT FOTOGRAFICO



COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO

INDAGINI SISMICHE PUC

*MASW 17*

COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84

LATITUDINE 41° 09' 22,87" N

LONGITUDINE 14° 38' 04,95" E



Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:

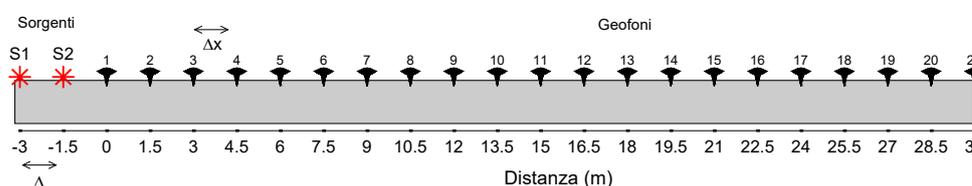


Figura 1: schema della geometria di acquisizione.

Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati

Numero geofoni	24
Tipo di geofono	Verticale
Frequenza propria dei geofoni (Hz)	4,5
Distanza intergeofonica $\Delta x$ (m)	1,5
Lunghezza stendimento sismico (m)	37,5
Frequenza di campionamento (Hz)-MASW	1000
Intervallo di acquisizione (ms)-MASW	0,001
Frequenza di campionamento (Hz)-Re.Mi.	100
Intervallo di acquisizione (ms)-Re.Mi.	0,01
Durata di registrazione-Re.Mi.	3m38s
Tipo di starter	Meccanico
Tipo di energizzazione	Meccanico

Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

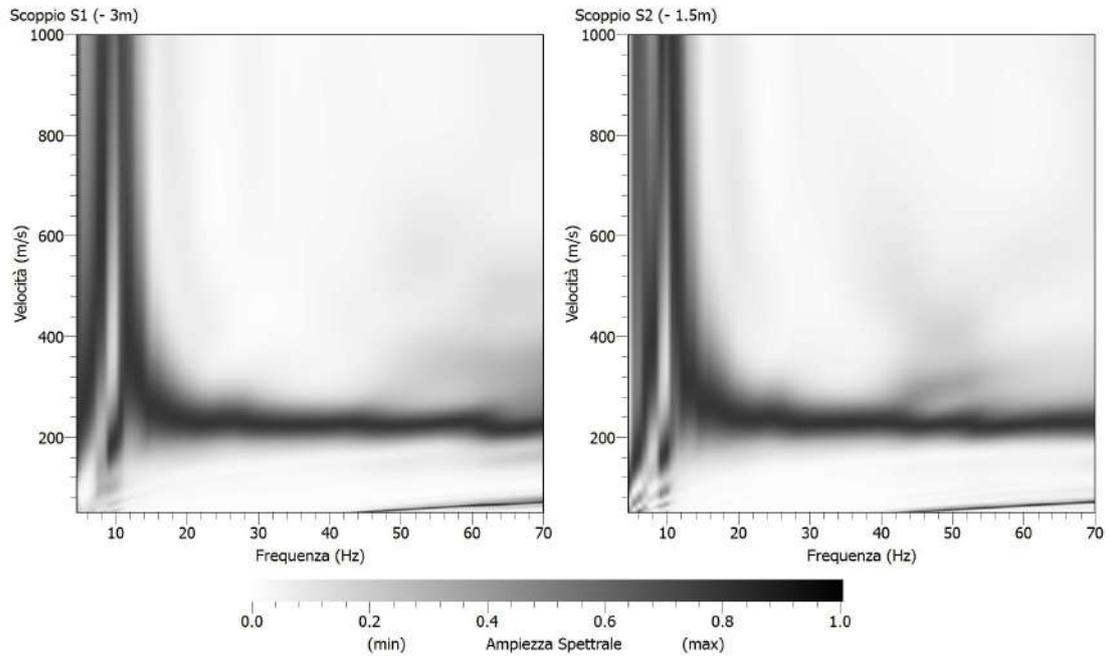
Tabella 2: schema energizzazione.

Numero di energizzazioni	2*
Scoppio S1	$\Delta_1 = -3,0$ (m)
Scoppio S2	$\Delta_2 = -1,5$ (m)

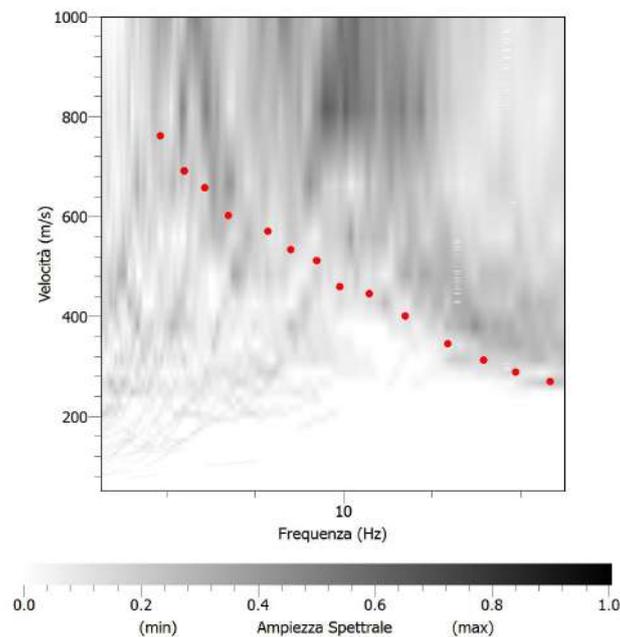
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 10-70 Hz. Data l'indeterminazione a frequenze

minori e per avere informazioni a maggiori profondità è stata determinata la curva di dispersione sperimentale relativa all'acquisizione Re.Mi. e su questa, attraverso una procedura manuale, è stato operato il relativo picking (punti in rosso in Figura 4).



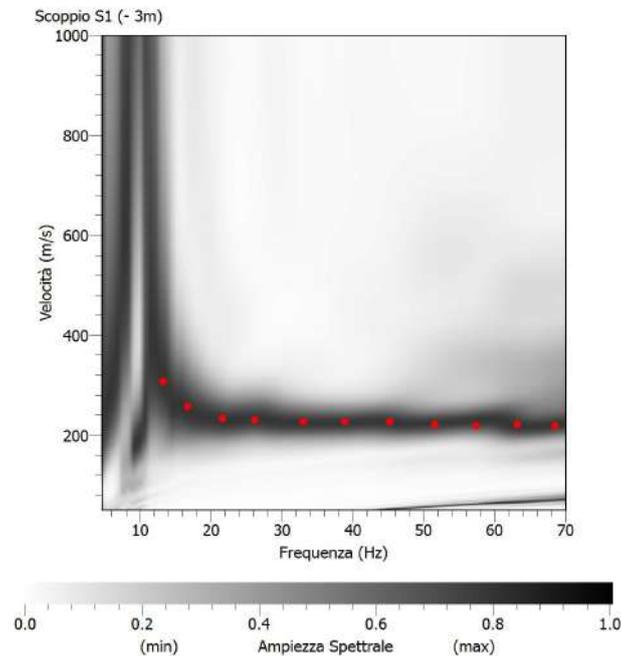
**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**



**Figura 3. Picking (in rosso) della curva di dispersione relativa ai dati acquisiti con tecnica Re.Mi.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 5) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S1 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente

per il processo di inversione, unitamente a quella relativa ai dati acquisiti con tecnica Re.Mi.



**Figura 4. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

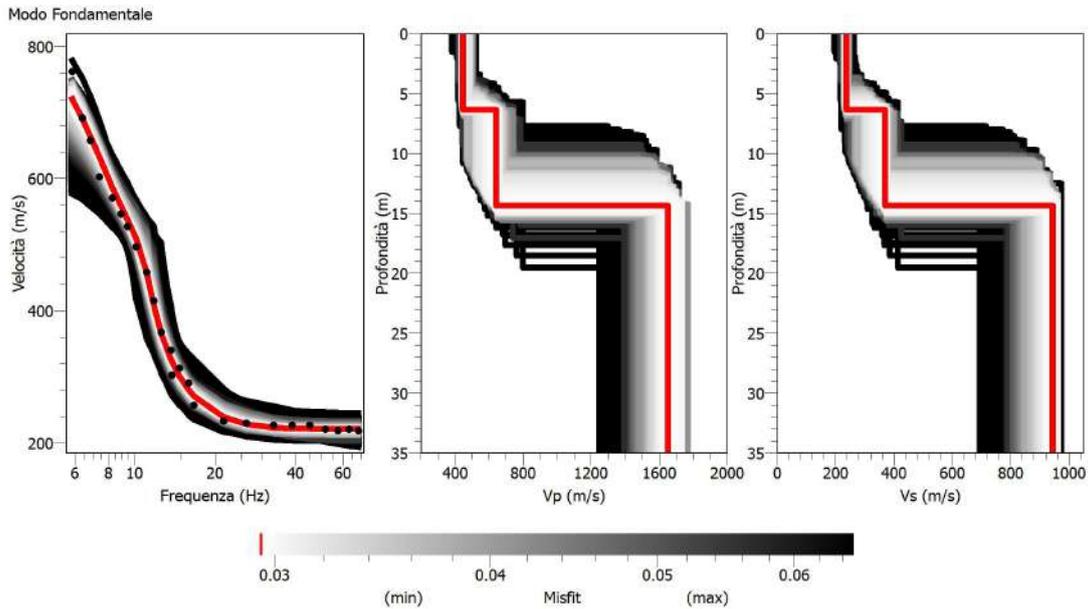
La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

<b>Parametri di inversione</b>	
<b>Numero di run</b>	<b>13</b>
<b>Iterazione per ciascun run</b>	<b>100</b>
<b>Modelli generati per ciascun run</b>	<b>5050</b>
<b>Modelli totali generati</b>	<b>65650</b>
<b>Minimo misfit</b>	<b>0,0295</b>

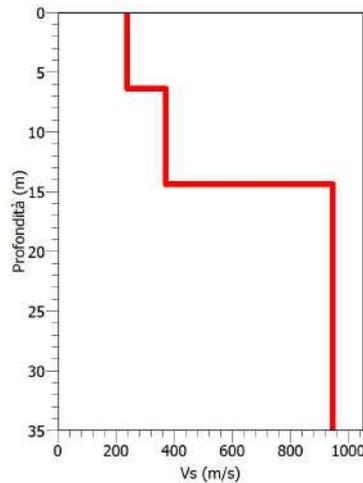
In Figura 6 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che

presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 5: curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d'inversione.**

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.



**Figura 6: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .**

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$   
 $K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$

**Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.**

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	6.60	450	240	1600	0.30	92160	239845	201120
2	7.80	640	370	2200	0.25	301180	752343	499547
3	1.90	1650	945	2400	0.26	2143260	5383587	3676320

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{s,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 14,4 m dal momento che è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (strato numero 3 in Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{s,eq}$ (m/s)
0-14,4	296

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici".  
Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e passiva (Re.Mi.) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{S,eq}$  risultato per il modello con minimo misfit pari a 296 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{S,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

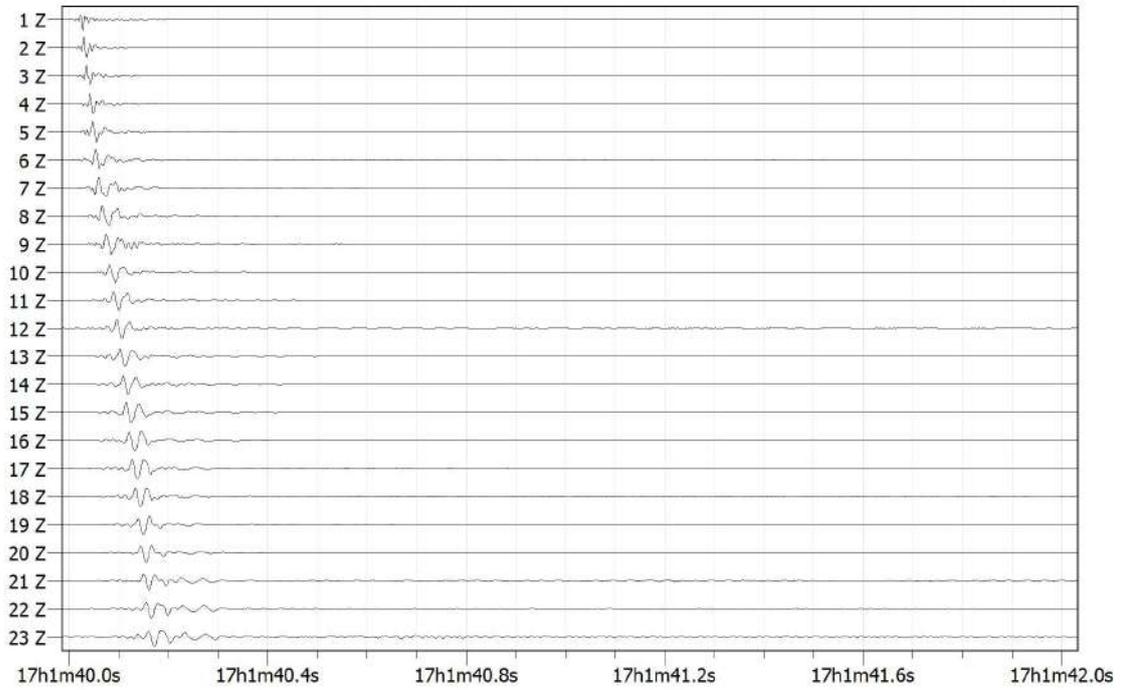
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



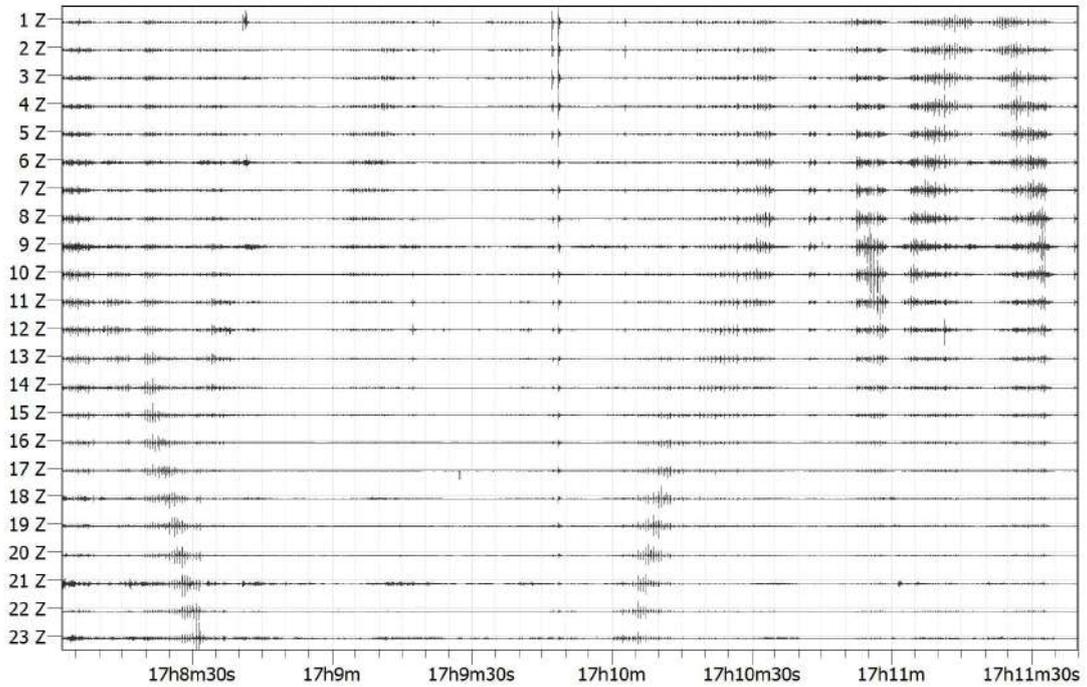
 Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



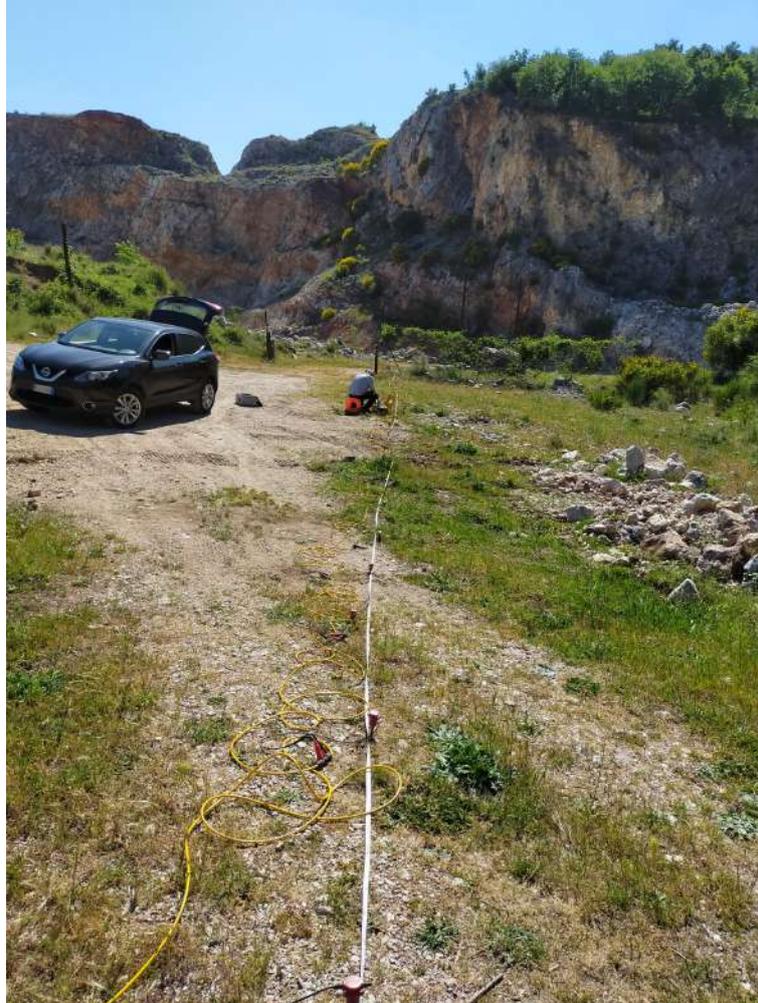
Tracce sismiche indagine MASW



Tracce sismiche indagine ReMi

# ALLEGATO 3

## REPORT FOTOGRAFICO



COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO

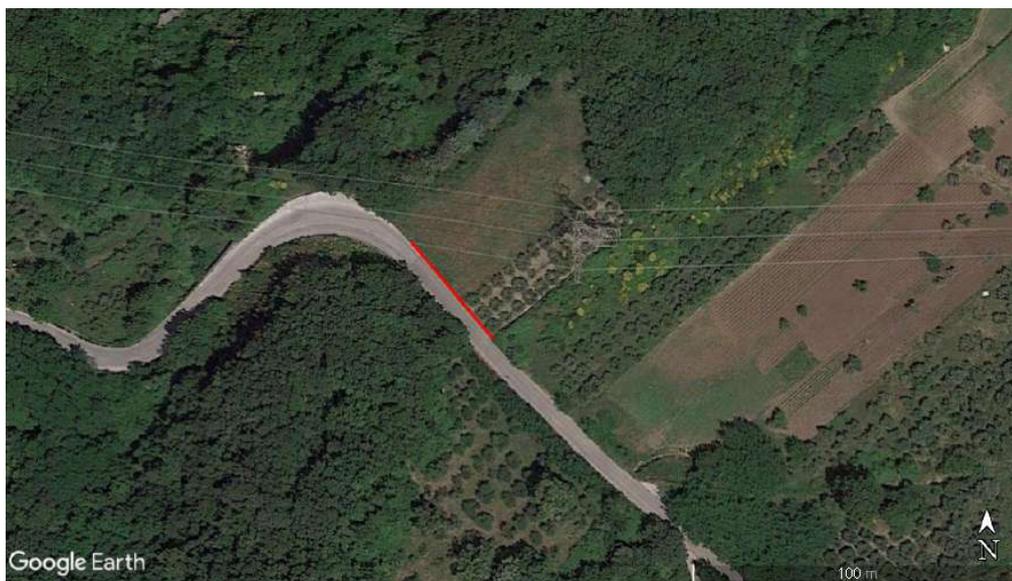
INDAGINI SISMICHE PUC

*MASW 18*

COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84

LATITUDINE 41° 08' 17,33" N

LONGITUDINE 14° 38' 22,46" E

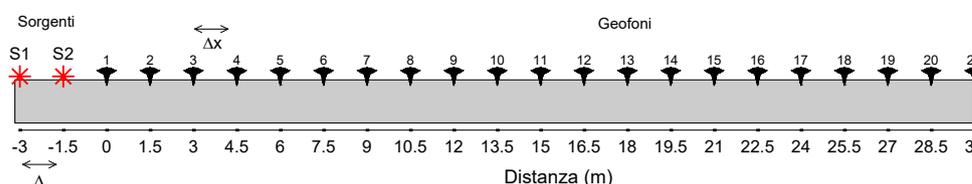


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1: schema della geometria di acquisizione.**

**Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati**

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-Re.Mi.</b>	<b>100</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-Re.Mi.</b>	<b>0,01</b>
<b>Durata di registrazione-Re.Mi.</b>	<b>3m38s</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

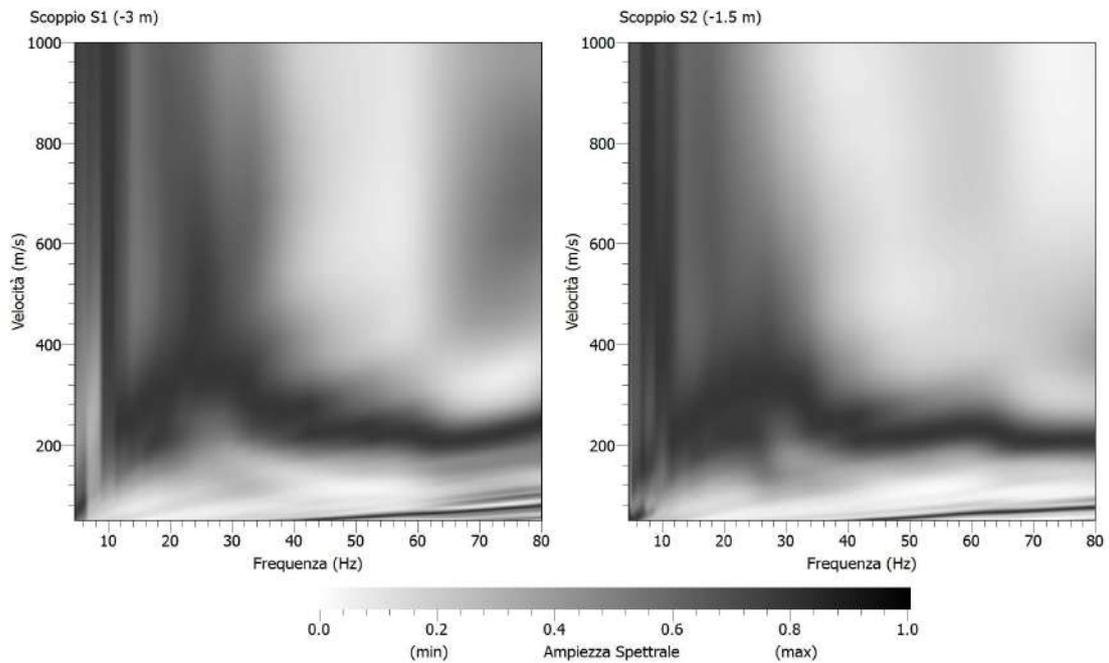
**Tabella 2: schema energizzazione.**

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

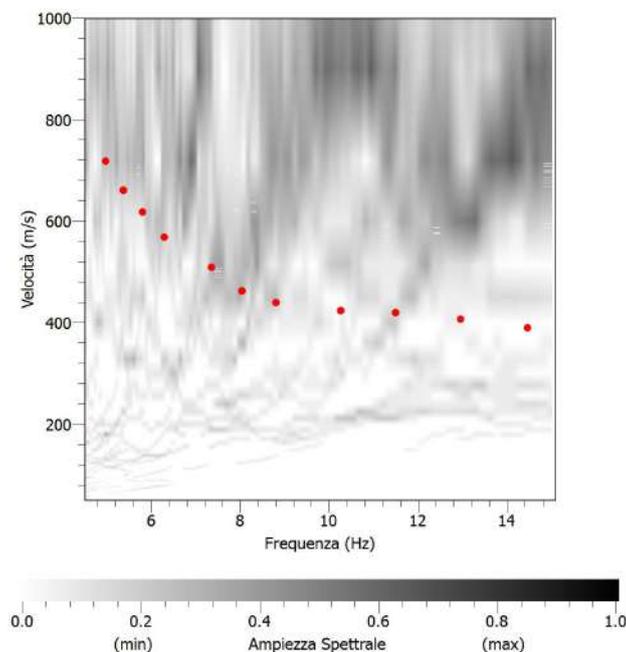
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la

migliore definizione nell'intervallo 15-80 Hz. Data l'indeterminazione a frequenze minori e per avere informazioni a maggiori profondità è stata determinata la curva di dispersione sperimentale relativa all'acquisizione Re.Mi. e su questa, attraverso una procedura manuale, è stato operato il relativo picking (punti in rosso in Figura 4).



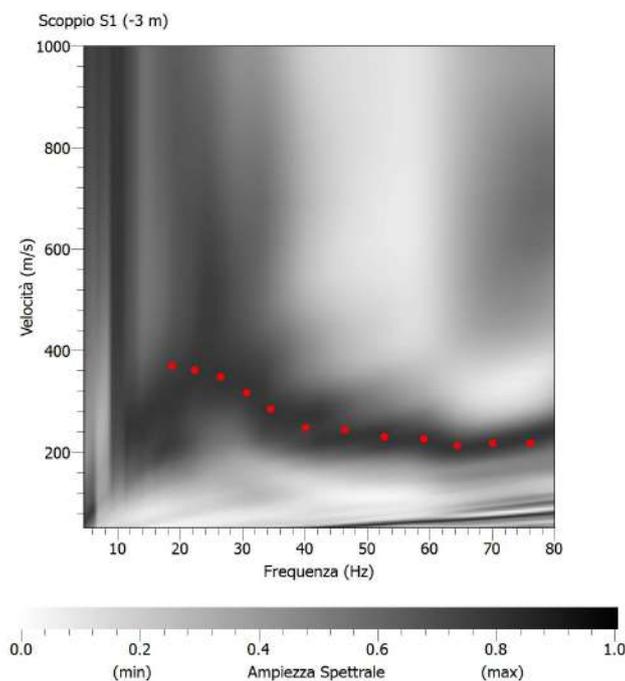
**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**



**Figura 3. Picking (in rosso) della curva di dispersione relativa ai dati acquisiti con tecnica Re.Mi.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 5) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S1 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza

considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione, unitamente a quella relativa ai dati acquisiti con tecnica Re.Mi.



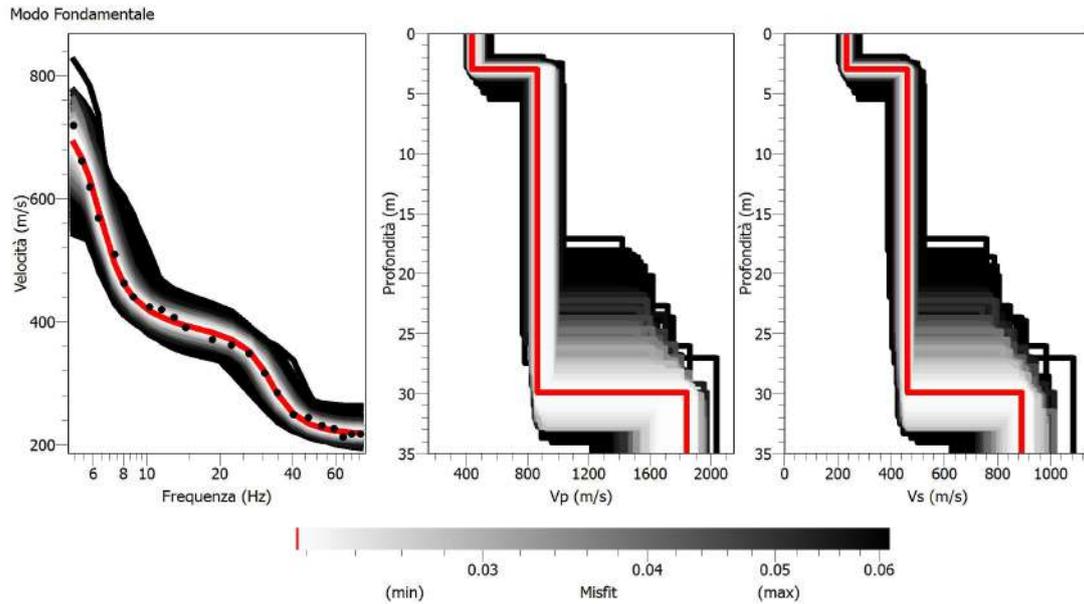
**Figura 4. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggianti su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

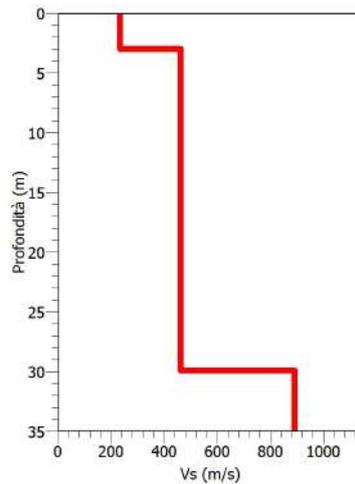
<b>Parametri di inversione</b>	
<b>Numero di run</b>	<b>5</b>
<b>Iterazione per ciascun run</b>	<b>100</b>
<b>Modelli generati per ciascun run</b>	<b>5050</b>
<b>Modelli totali generati</b>	<b>25250</b>
<b>Minimo misfit</b>	<b>0,0217</b>

In Figura 6 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 5:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d'inversione.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.



**Figura 6:** modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

**Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.**

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	3.00	440	234	1700	0.30	93085	242546	205006
2	27.00	870	462	2000	0.30	426888	1113002	944616
3	0.00	1790	890	2200	0.34	1742620	4655584	4725527

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{s,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 30 m dal momento che è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (strato numero 3 in Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{s,eq}$ (m/s)
0-30	421

$$^1 G = V_s^2 * \rho$$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici".  
Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e passiva (Re.Mi.) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{S,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 421 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{S,eq}^*$  (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

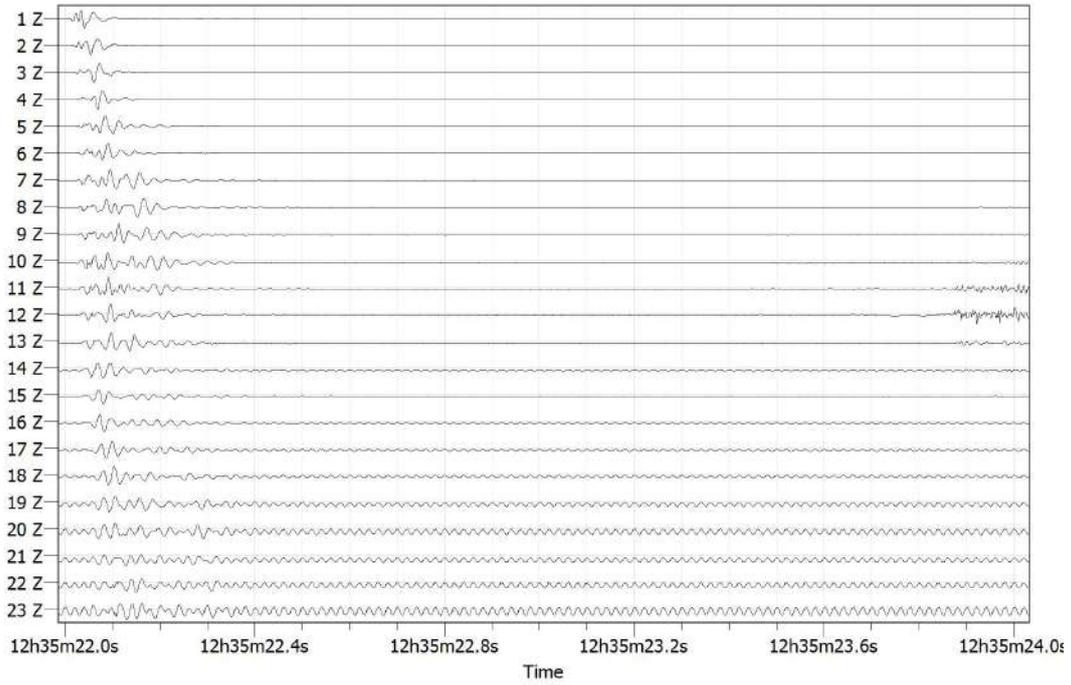
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



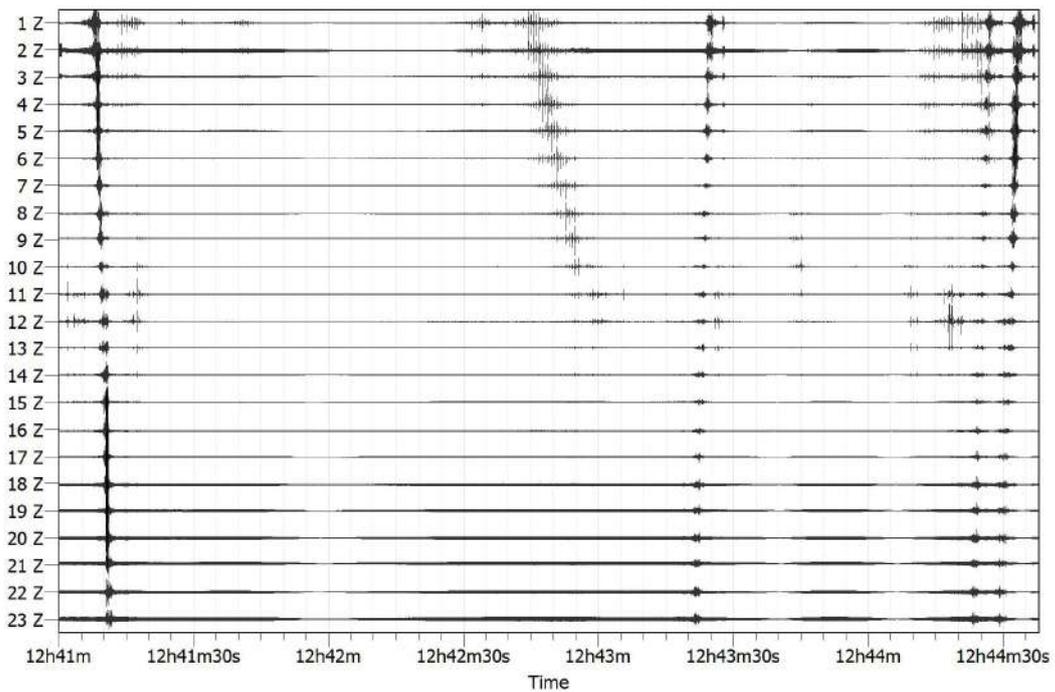
 Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW



Tracce sismiche indagine Re

# ALLEGATO 3

## REPORT FOTOGRAFICO



**COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO**

**INDAGINI SISMICHE PUC**

***MASW 19***

**COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84**

**LATITUDINE 41° 08' 23,79" N**

**LONGITUDINE 14° 39' 00,66" E**

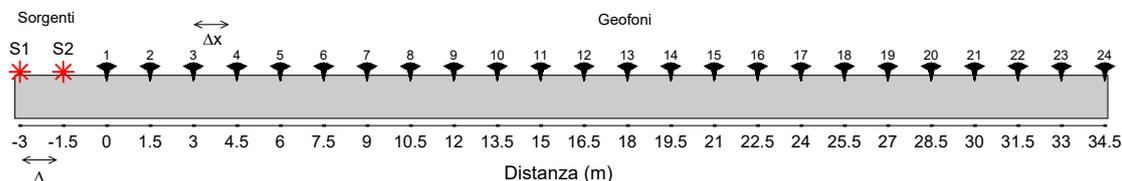


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1: schema della geometria di acquisizione.**

**Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati**

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

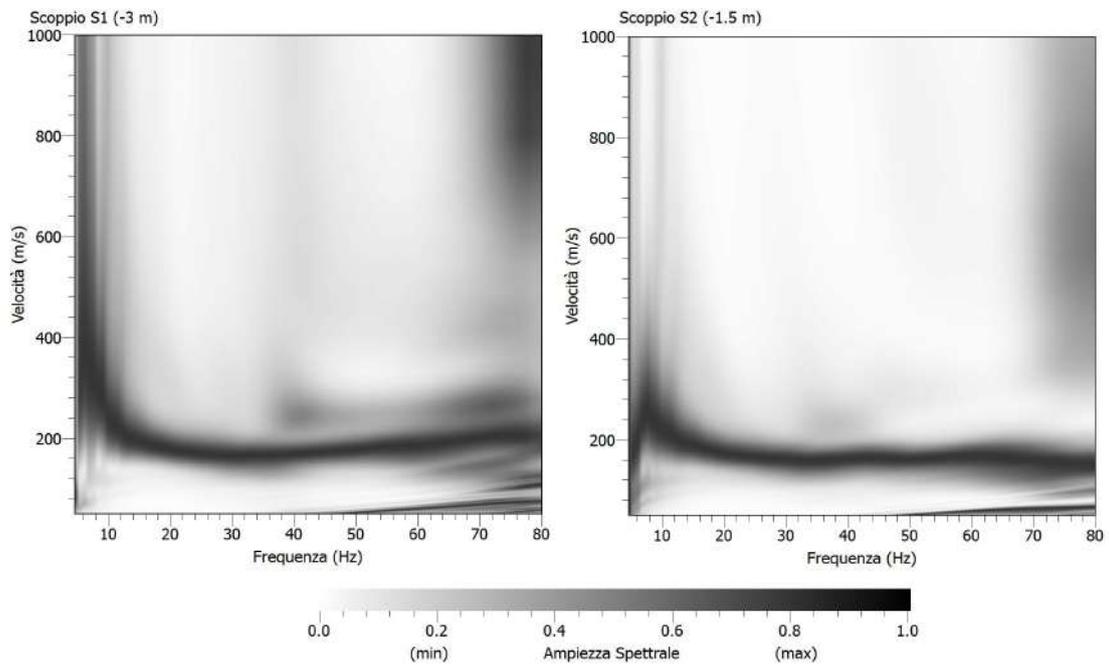
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2: schema energizzazione.**

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

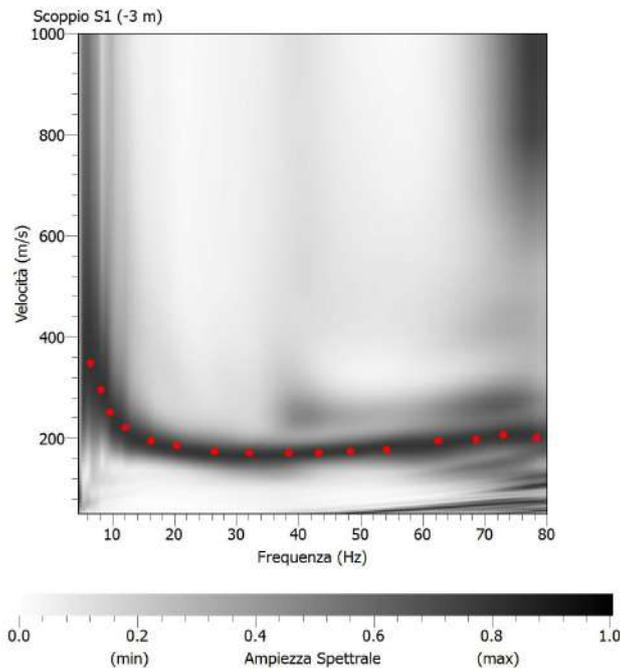
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 4,5-80 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S1 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione.



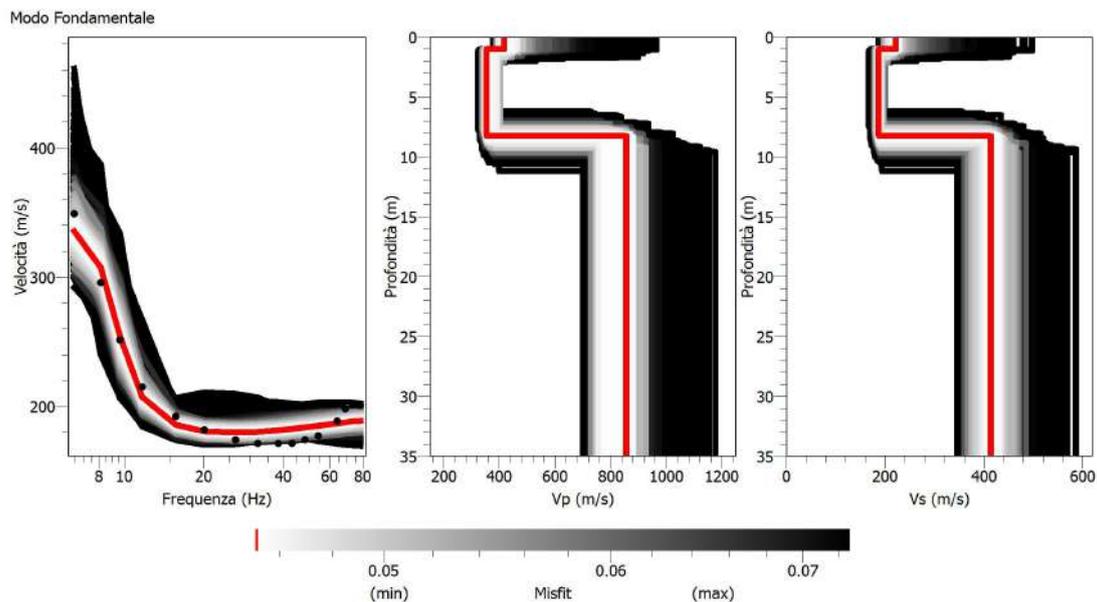
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggiati su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	8
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	4040
Minimo misfit	0,0452

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4: curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.**

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.

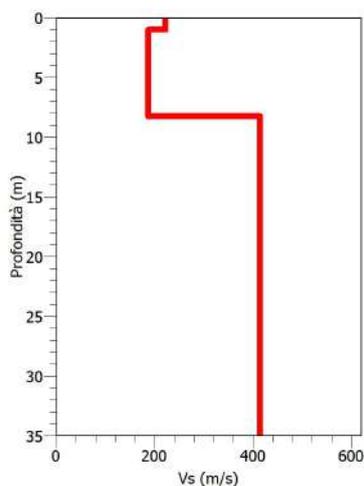


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	1.00	420	225	1600	0.30	81000	210397	174240
2	7.25	350	185	1500	0.31	51338	134108	115300
3	21.75	855	415	1900	0.35	327228	880829	952644

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 30 m dal momento che non è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-30	312

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 312 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$ \* (Tabella 5).

**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

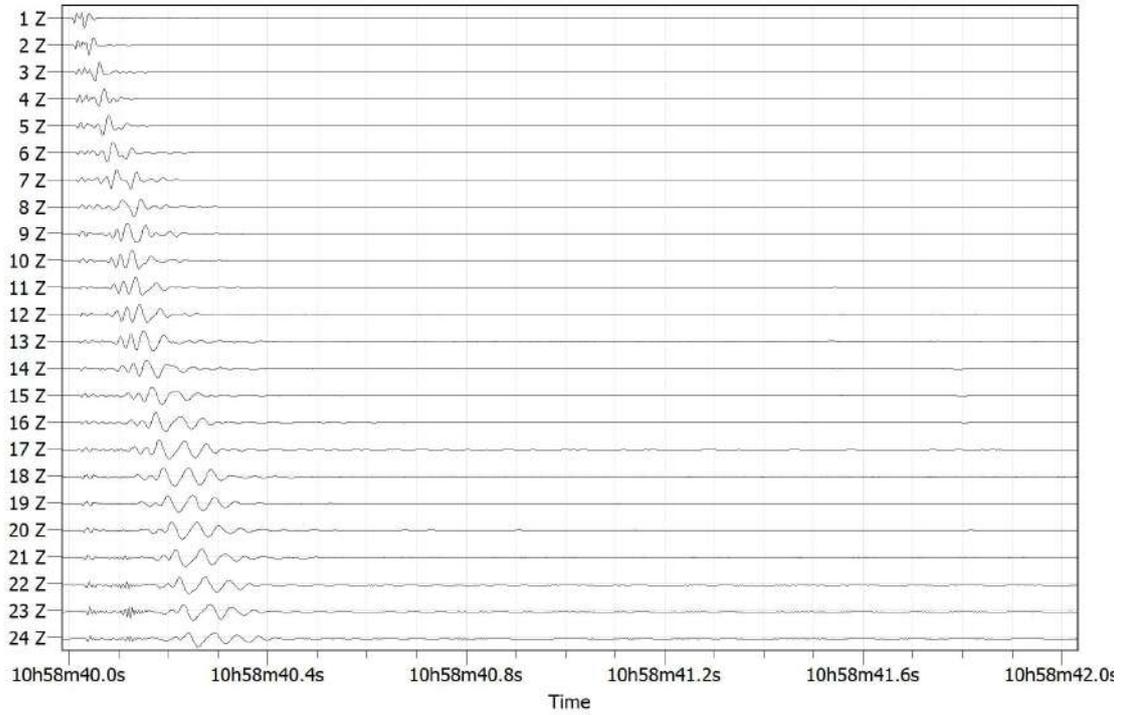
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

## ALLEGATO 3

### REPORT FOTOGRAFICO



COMUNE DI CAUTANO  
PROVINCIA DI BENEVENTO

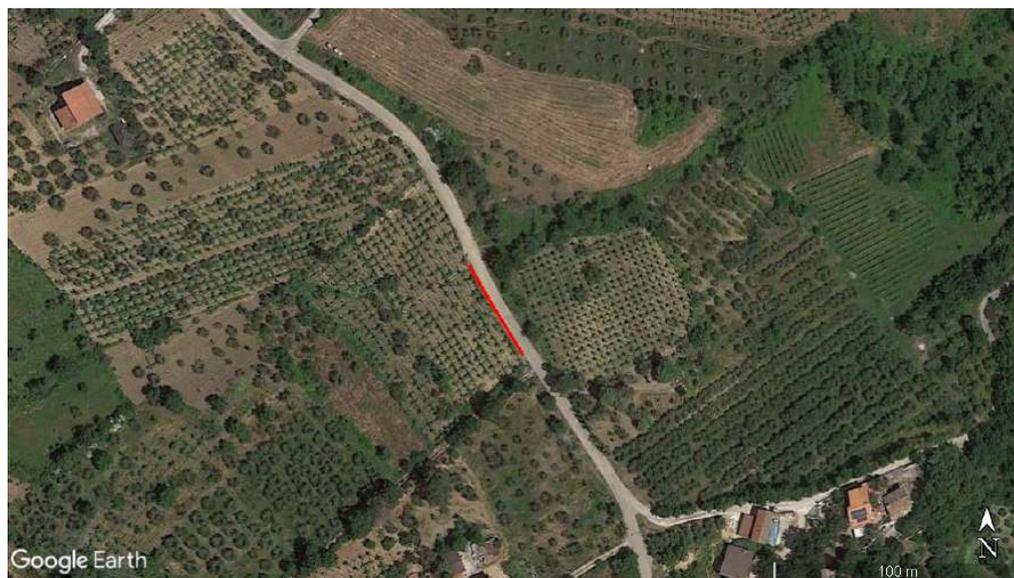
INDAGINI SISMICHE PUC

*MASW 20*

COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84

LATITUDINE 41° 08' 42,38" N

LONGITUDINE 14° 39' 32,83" E

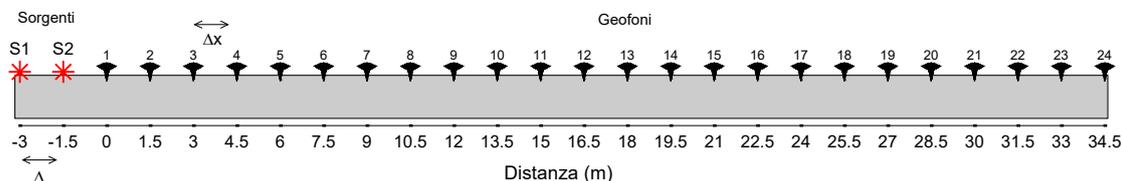


Il responsabile dell'indagine

Dott. Geol. Campanelli Luciano

# Acquisizione ed elaborazione dei dati

La geometria (Figura 2) e la modalità di acquisizione dei dati (Tabella 1) sono riportate di seguito:



**Figura 1: schema della geometria di acquisizione.**

**Tabella 1: caratteristiche di acquisizione dei dati**

<b>Numero geofoni</b>	<b>24</b>
<b>Tipo di geofono</b>	<b>Verticale</b>
<b>Frequenza propria dei geofoni (Hz)</b>	<b>4,5</b>
<b>Distanza intergeofonica <math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>1,5</b>
<b>Lunghezza stendimento sismico (m)</b>	<b>37,5</b>
<b>Frequenza di campionamento (Hz)-MASW</b>	<b>1000</b>
<b>Intervallo di acquisizione (ms)-MASW</b>	<b>0,001</b>
<b>Tipo di starter</b>	<b>Meccanico</b>
<b>Tipo di energizzazione</b>	<b>Meccanico</b>

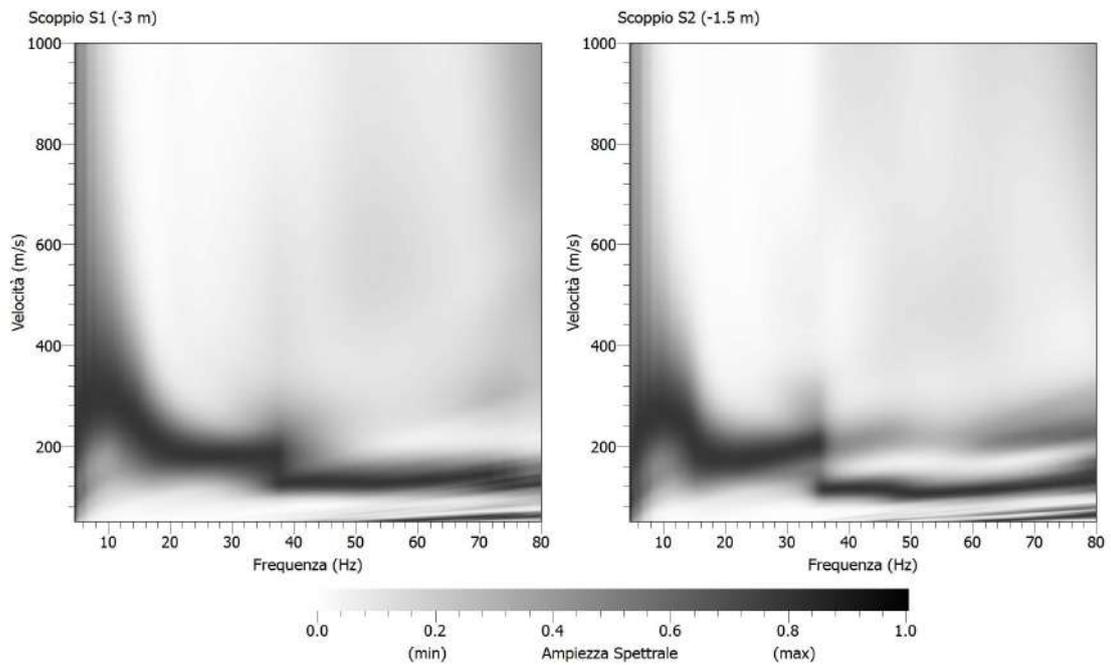
Durante la fase di acquisizione sono stati eseguiti due shots (vedi Tabella 2) per valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di variazioni laterali, fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

**Tabella 2: schema energizzazione.**

<b>Numero di energizzazioni</b>	<b>2*</b>
<b>Scoppio S1</b>	<b><math>\Delta_1 = -3,0</math> (m)</b>
<b>Scoppio S2</b>	<b><math>\Delta_2 = -1,5</math> (m)</b>

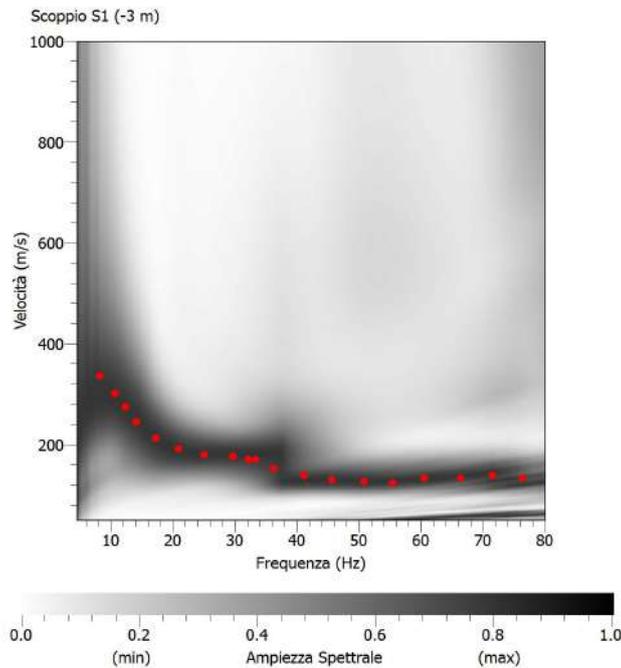
\*la posizione dei punti sorgente è riportata in Figura 2.

L'analisi è stata condotta nel dominio delle frequenze attraverso la determinazione dello spettro f-k (Figura 3). La curva di dispersione presenta la migliore definizione nell'intervallo 4,5-80 Hz.



**Figura 2: curve di dispersione ottenute per i due scoppi realizzati.**

Attraverso una procedura manuale sono stati piccati i massimi (punti in rosso in Figura 4) all'interno dello spettro relativo allo scoppio S1 (in quanto la relativa curva di dispersione risulta essere meglio definita all'interno del range di frequenza considerato) e la curva di dispersione così ottenuta è stata utilizzata successivamente per il processo di inversione.



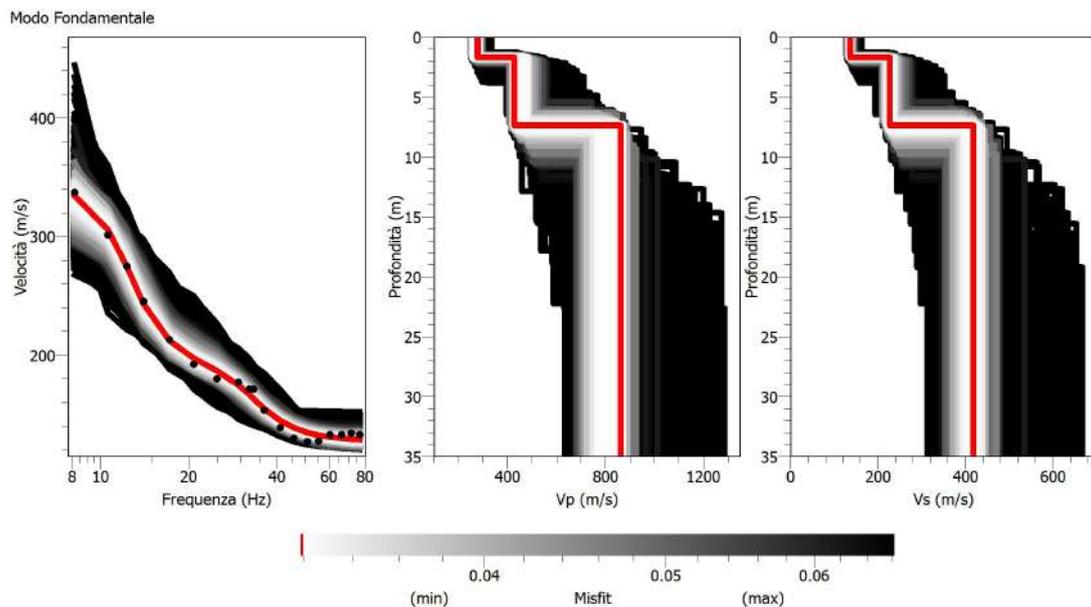
**Figura 3. Picking della curva di dispersione relativa allo scoppio S1. I punti in rosso rappresentano i massimi relativi al modo di vibrazione riconosciuto.**

La procedura di inversione, effettuata utilizzando il software “Dinver”, prevede che il modello teorico sia costituito da una sequenza di  $n$  strati, poggiati su un semispazio, ognuno dei quali caratterizzato da un intervallo dei parametri  $V_p$ ,  $V_s$ , Poisson, densità e spessore. Nell’inversione a ciascun run corrispondono 100 iterazioni, ognuna delle quali costituita da 50 modelli generati in modo random. Per ogni modello viene calcolato il minimo misfit associato alla curva di dispersione teorica confrontata con quella sperimentale. L’errore accettabile deve essere inferiore al 10%, a cui corrisponde un misfit minore di 1. Nella Tabella 3 si riportano i parametri utilizzati nella procedura di inversione.

**Tabella 3**

Parametri di inversione	
Numero di run	8
Iterazione per ciascun run	100
Modelli generati per ciascun run	5050
Modelli totali generati	4040
Minimo misfit	0,0452

In Figura 5 sono riportate le curve di dispersione teoriche e i corrispondenti modelli di velocità delle onde P ed S. In rosso sono indicati la curva e il modello che presentano il minor misfit, unitamente agli intervalli minimo e massimo di variabilità dei parametri dei modelli.



**Figura 4:** curve di dispersione e modelli di velocità ottenuti dalla procedura d’inversione.

Inoltre, per ottemperare a quanto previsto dalla vigente normativa sismica (NTC 2018), si riporta il profilo di velocità delle onde S (con minimo misfit) fino alla profondità di 35 m dall'attuale piano campagna.

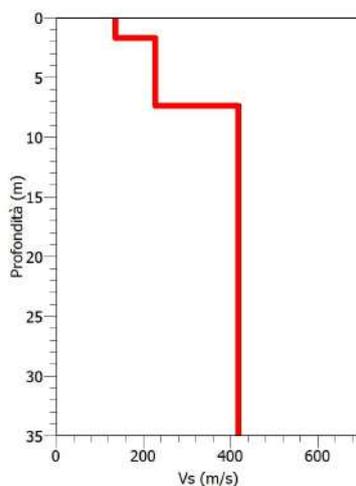


Figura 5: modello di velocità delle onde S (con minimo misfit) utilizzato per il calcolo della  $V_{S,eq}$ .

A partire dalle velocità delle onde di volume, è possibile dedurre, attraverso l'uso di semplici relazioni<sup>1</sup>, i parametri dinamici del sottosuolo riportati in Tabella 4.

Tabella 4: parametri dinamici del sottosuolo calcolati fino a 30 m dal p.c.

Strato	Spessore (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densità $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson $\nu$	Modulo di taglio G (kPa)	Modulo di Young E (kPa)	Modulo di incompressibilità K (kPa)
1	1.70	280	140	1500	0.33	29400	78400	78400
2	5.70	440	230	1700	0.31	89930	235978	209213
3	22.60	850	415	1900	0.34	327228	879267	936447

Ai sensi del DM 17 gennaio 2018, si riporta il valore della  $V_{S,eq}$  riferito all'attuale piano campagna e fino alla profondità di 30 m dal momento che non è stata riconosciuta all'interno del profilo di velocità la presenza di uno strato con velocità delle onde S maggiore di 800 m/s (Tabella 4).

Profondità (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0-30	328

<sup>1</sup>  $G = V_s^2 * \rho$

$$K = \rho * (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

$$E = V_s^2 * \rho \left[ \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right]$$

$$\nu = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] * \left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]^{-1}$$

Carrara E., Rapolla A., Roberti N. "Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore, 1992

## Conclusioni

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della  $V_s$  e di conseguenza, il parametro  $V_{s,eq}$ , risultato per il modello con minimo misfit pari a 328 m/s (considerando come riferimento il piano campagna attuale).

In riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni si riportano le categorie di sottosuolo di riferimento distinte in funzione del parametro  $V_{s,eq}$  \* (Tabella 5).

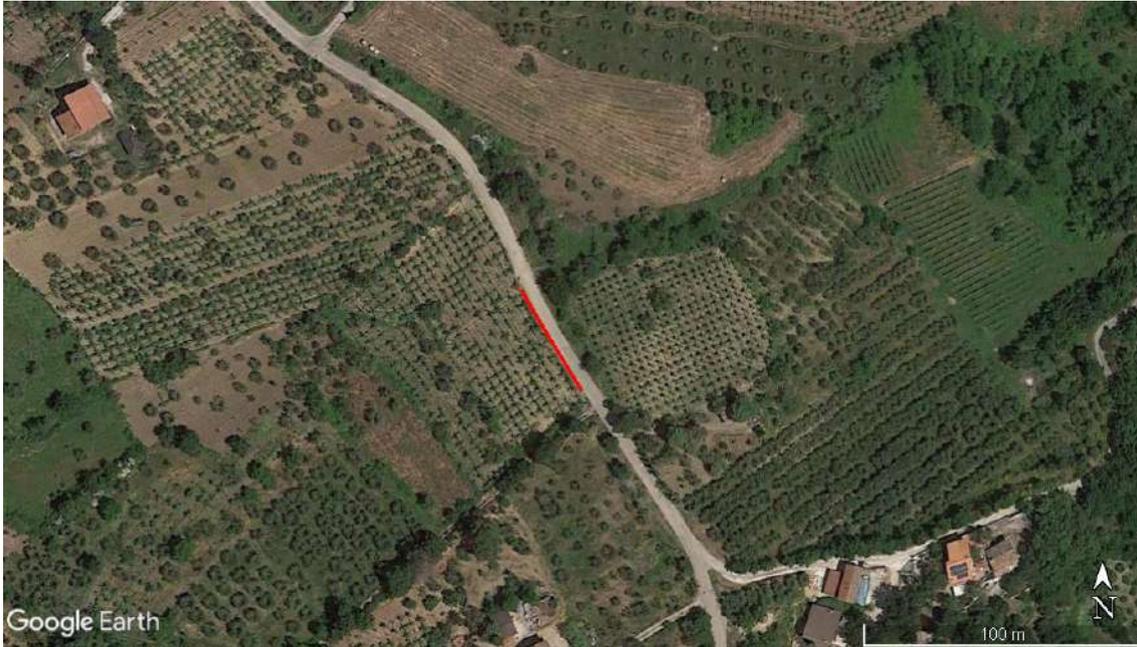
**Tabella 5: Categorie di sottosuolo (Tabella 3.2.II NTC 2018)**

A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Il responsabile dell'indagine  
Dott. Geol. Campanelli Luciano

# ALLEGATO 1

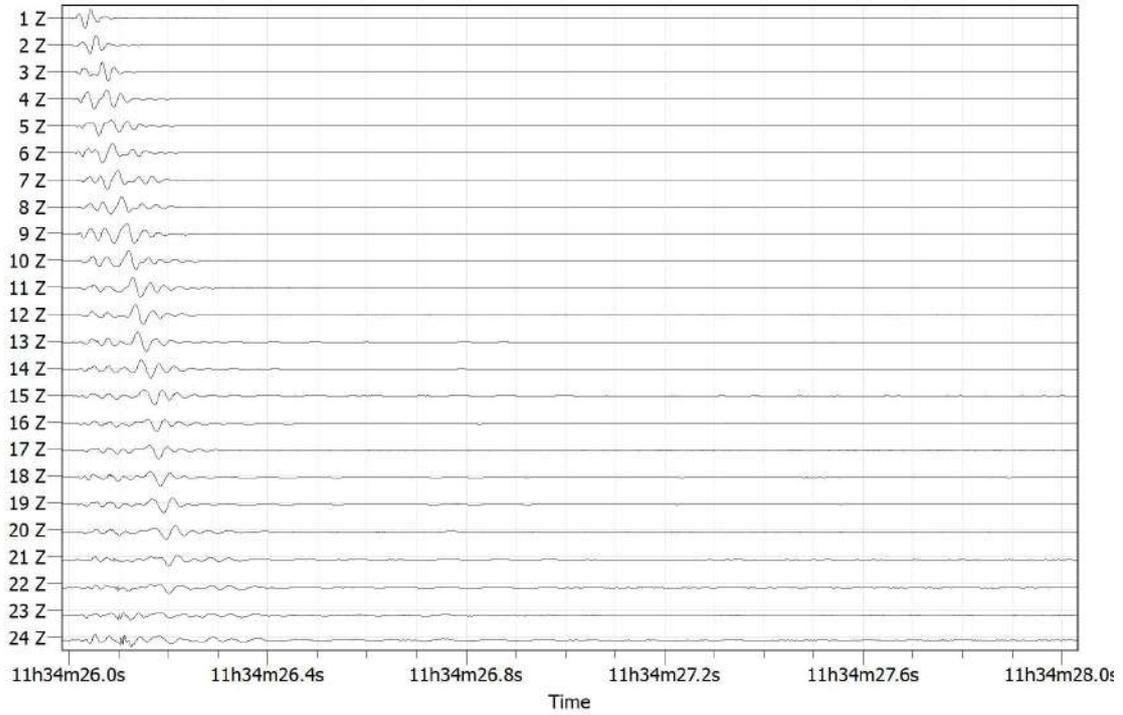
## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA



 Profilo indagine sismica

# ALLEGATO 2

## TRACCE SISMICHE



Tracce sismiche indagine MASW

# ALLEGATO 3

## REPORT FOTOGRAFICO





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: info@soilprojectsas.it  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 1**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

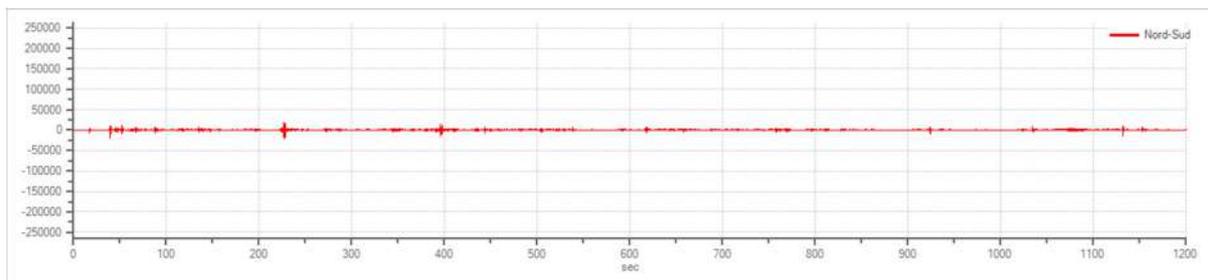
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

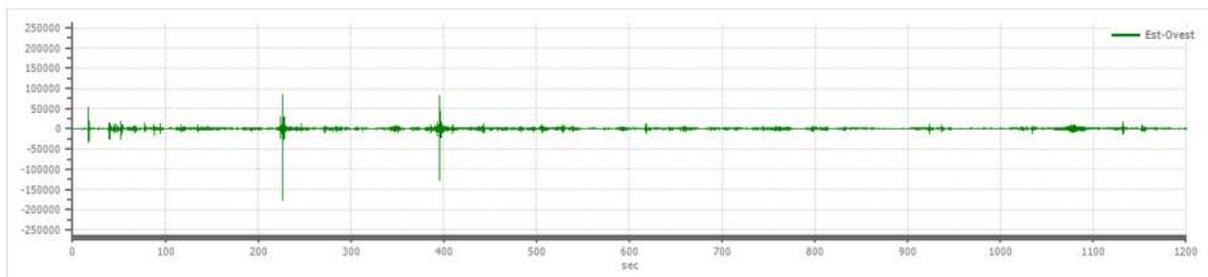
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

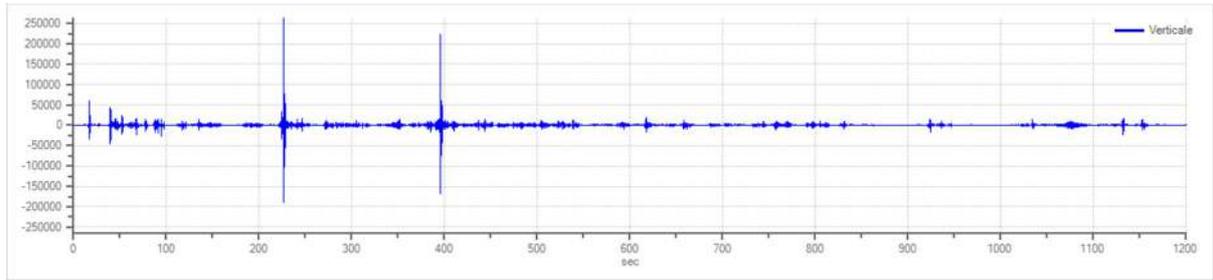
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

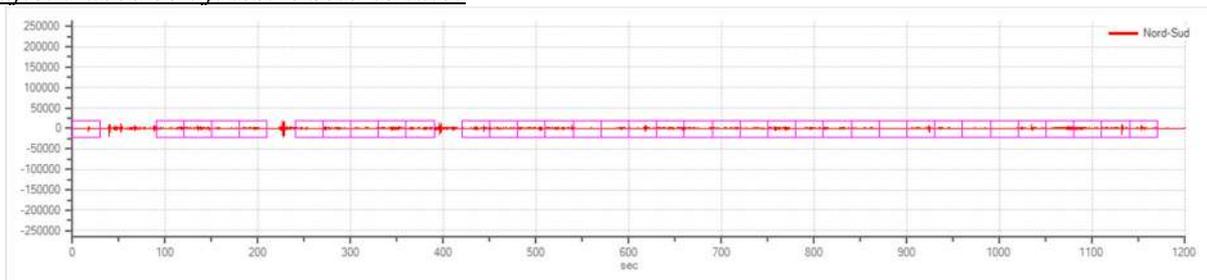
Numero totale finestre selezionate: 35  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 35  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

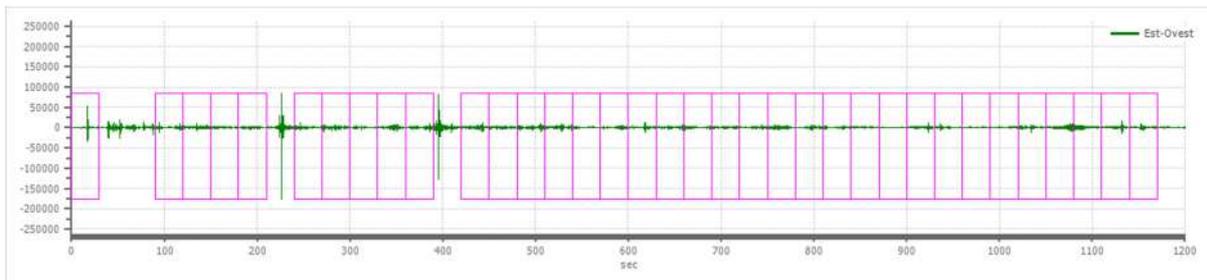
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	90	120	Inclusa
3	120	150	Inclusa
4	150	180	Inclusa
5	180	210	Inclusa
6	240	270	Inclusa
7	270	300	Inclusa
8	300	330	Inclusa
9	330	360	Inclusa
10	360	390	Inclusa
11	420	450	Inclusa
12	450	480	Inclusa
13	480	510	Inclusa
14	510	540	Inclusa
15	540	570	Inclusa
16	570	600	Inclusa
17	600	630	Inclusa
18	630	660	Inclusa
19	660	690	Inclusa
20	690	720	Inclusa
21	720	750	Inclusa
22	750	780	Inclusa
23	780	810	Inclusa
24	810	840	Inclusa
25	840	870	Inclusa
26	870	900	Inclusa

27	900	930	Inclusa
28	930	960	Inclusa
29	960	990	Inclusa
30	990	1020	Inclusa
31	1020	1050	Inclusa
32	1050	1080	Inclusa
33	1080	1110	Inclusa
34	1110	1140	Inclusa
35	1140	1170	Inclusa

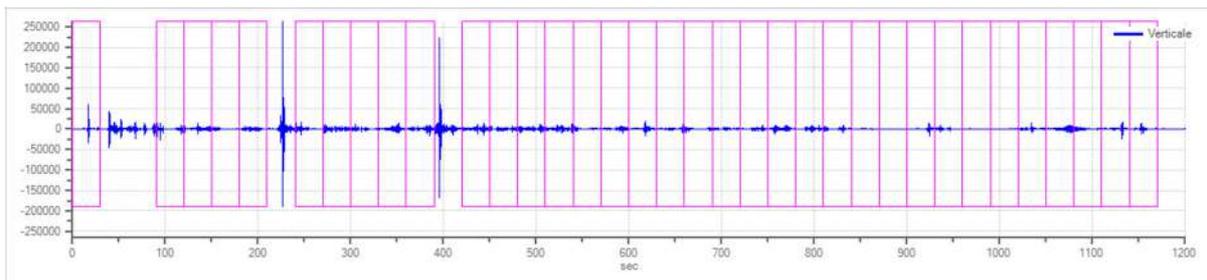
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

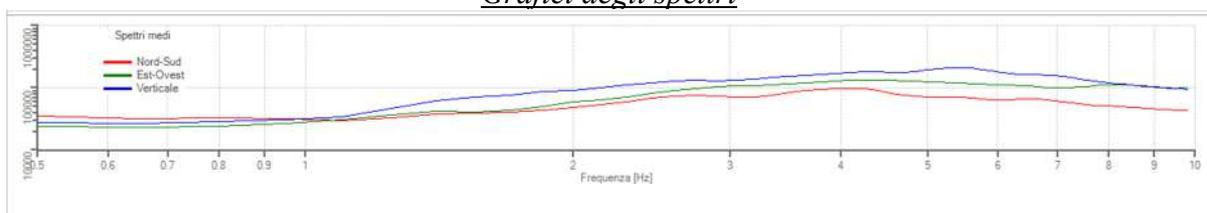


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

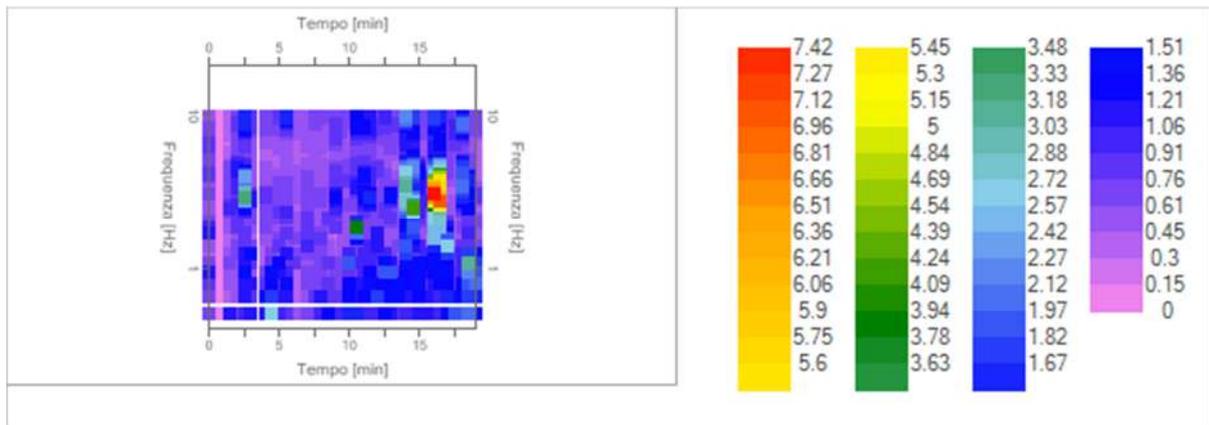


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

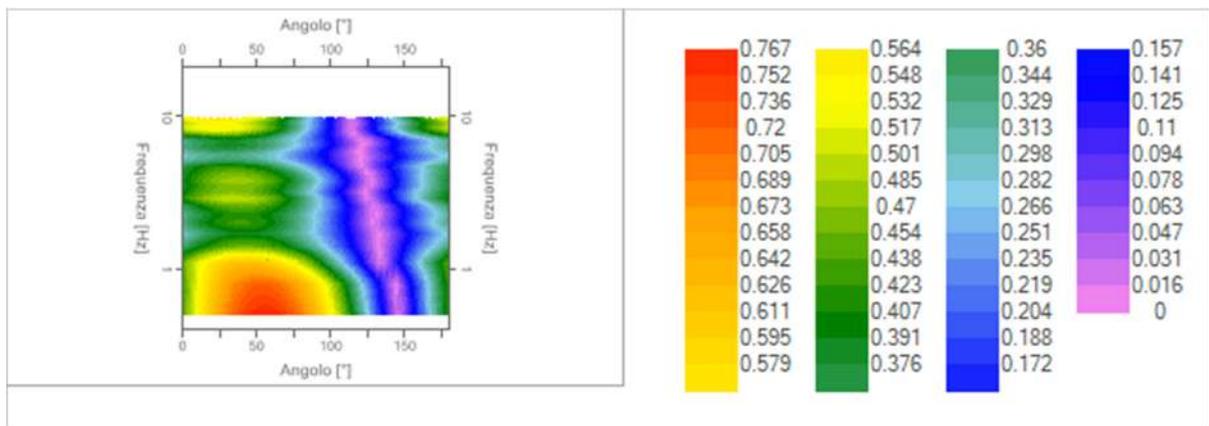
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

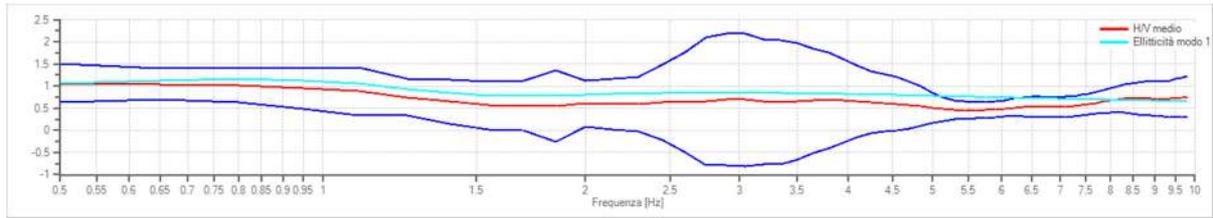
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 0.50 Hz  $\pm$  0.40 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

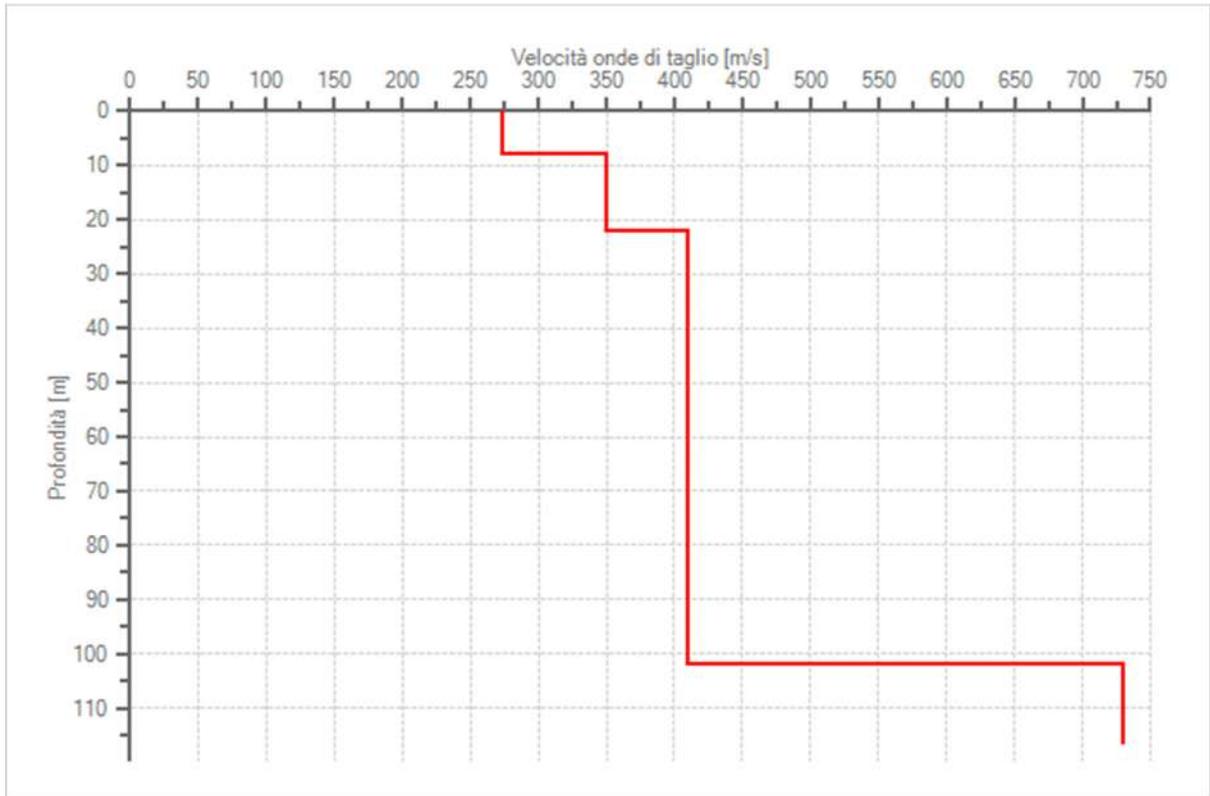
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati: 4  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 0.80 Hz  
 Valore di disadattamento: -1.00  
 Valore Vseq: 338.18 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	8	18	0.3	274
2	8	14	18	0.3	350
3	22	80	19	0.3	410
4	102	15	20	0.3	730



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 2**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

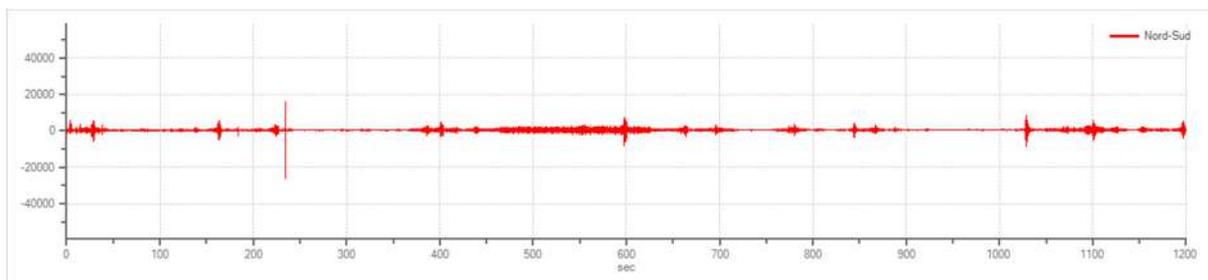
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

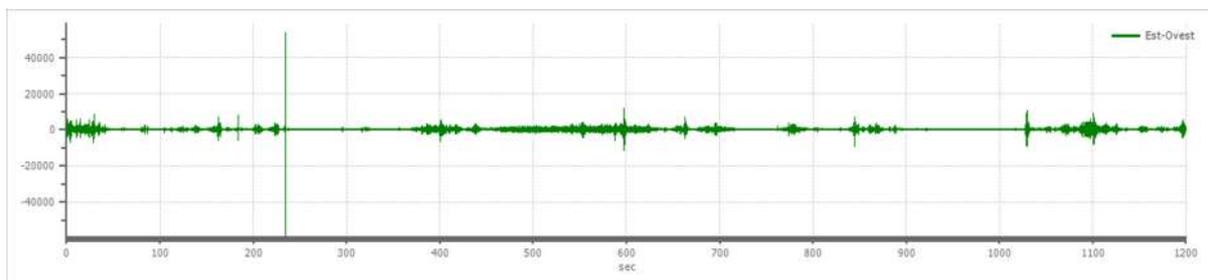
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

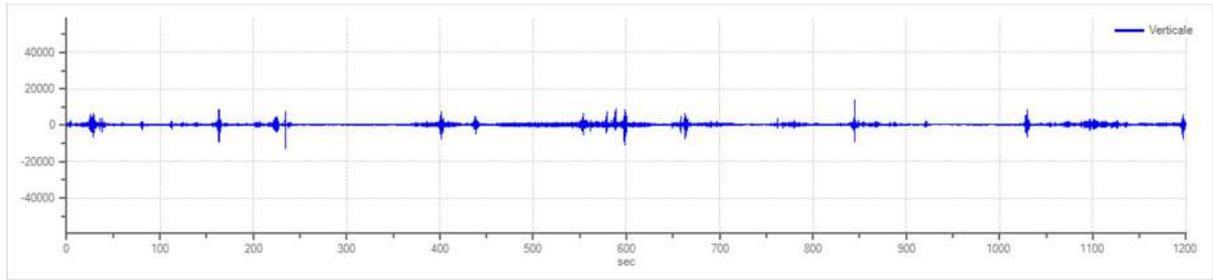
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

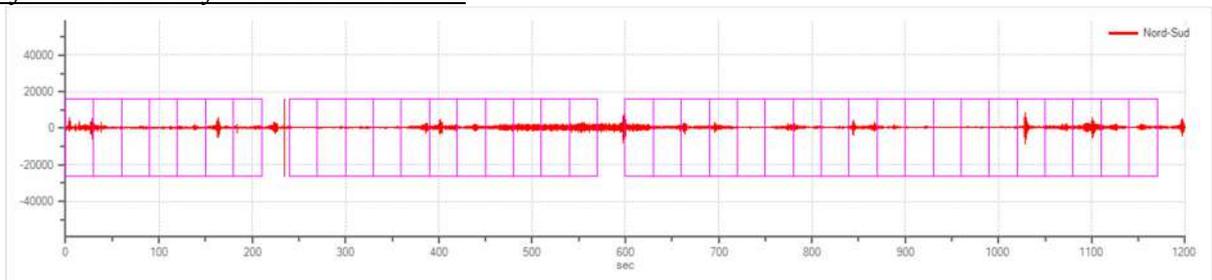
Numero totale finestre selezionate: 37  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 37  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

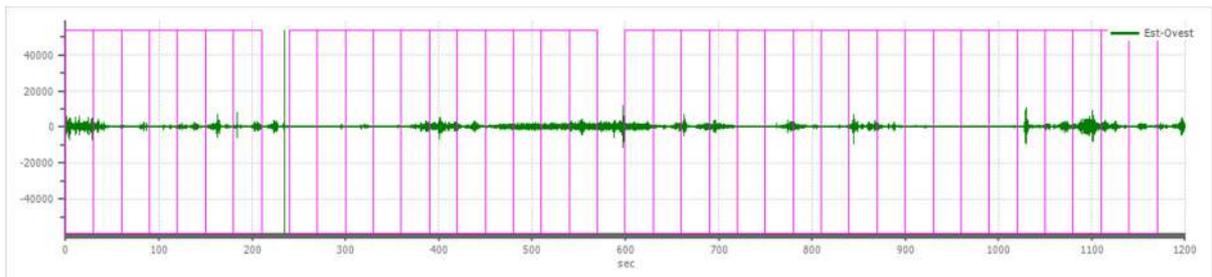
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	60	90	Inclusa
4	90	120	Inclusa
5	120	150	Inclusa
6	150	180	Inclusa
7	180	210	Inclusa
8	240	270	Inclusa
9	270	300	Inclusa
10	300	330	Inclusa
11	330	360	Inclusa
12	360	390	Inclusa
13	390	420	Inclusa
14	420	450	Inclusa
15	450	480	Inclusa
16	480	510	Inclusa
17	510	540	Inclusa
18	540	570	Inclusa
19	600	630	Inclusa
20	630	660	Inclusa
21	660	690	Inclusa
22	690	720	Inclusa
23	720	750	Inclusa
24	750	780	Inclusa
25	780	810	Inclusa
26	810	840	Inclusa

27	840	870	Inclusa
28	870	900	Inclusa
29	900	930	Inclusa
30	930	960	Inclusa
31	960	990	Inclusa
32	990	1020	Inclusa
33	1020	1050	Inclusa
34	1050	1080	Inclusa
35	1080	1110	Inclusa
36	1110	1140	Inclusa
37	1140	1170	Inclusa

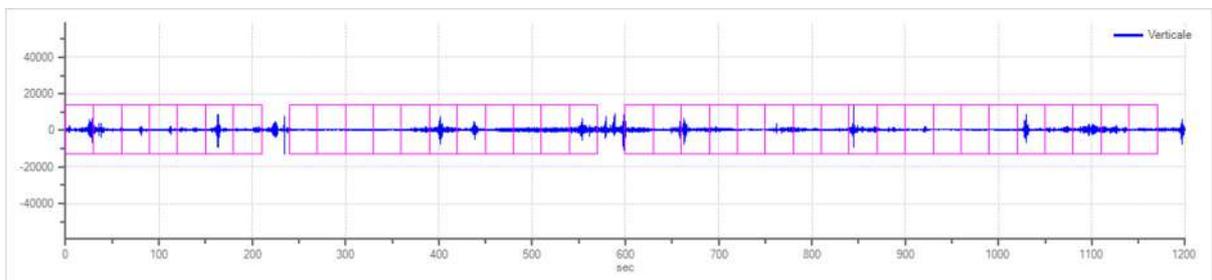
Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

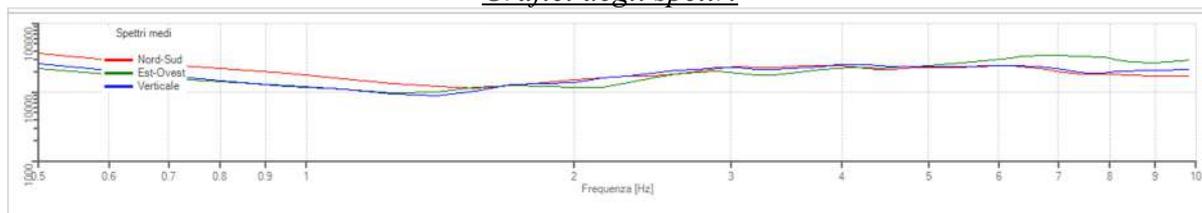


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

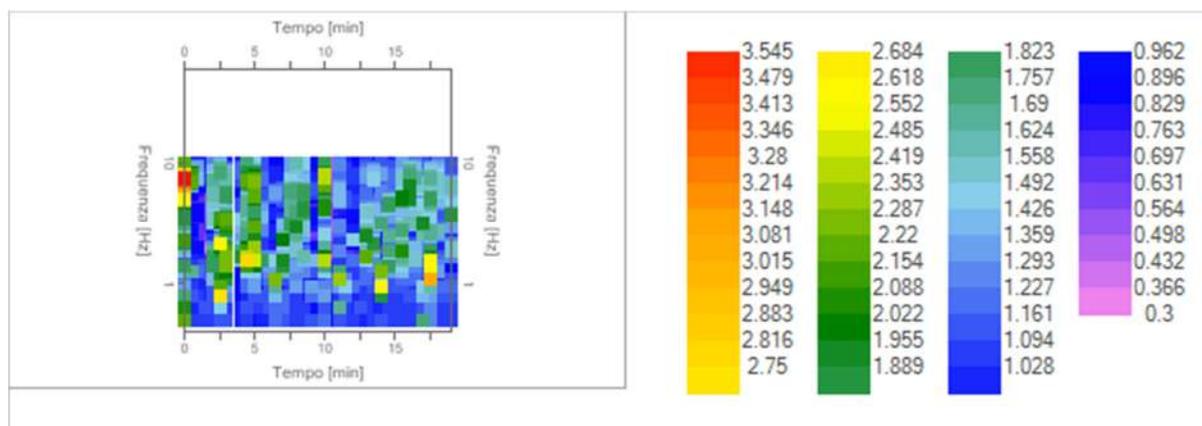


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

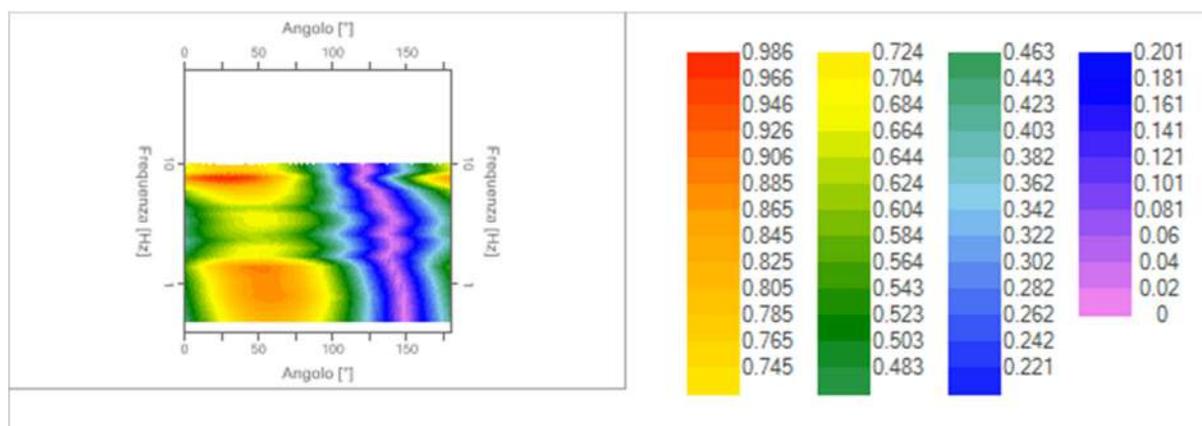
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

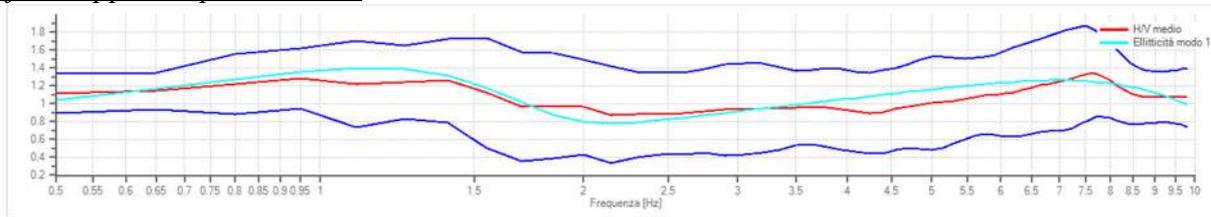
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima:	10.00 Hz
Frequenza minima:	0.50 Hz
Passo frequenze:	0.15 Hz
Tipo lisciamo::	Konno & Ohmachi
Percentuale di lisciamo:	10.00 %
Tipo di somma direzionale:	Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 7.55 Hz  $\pm$  0.39 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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  $f_0 > 0.5H$ :

Ok

$\sigma_A(f) < 3$  per  $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$  se  $f_0 < 0.5H$ :

Non superato

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$

Ok

$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$

Ok

$A_0 > 2$

Ok

$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$

Ok

$\sigma_f < \varepsilon(f)$

Non superato

$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Ok

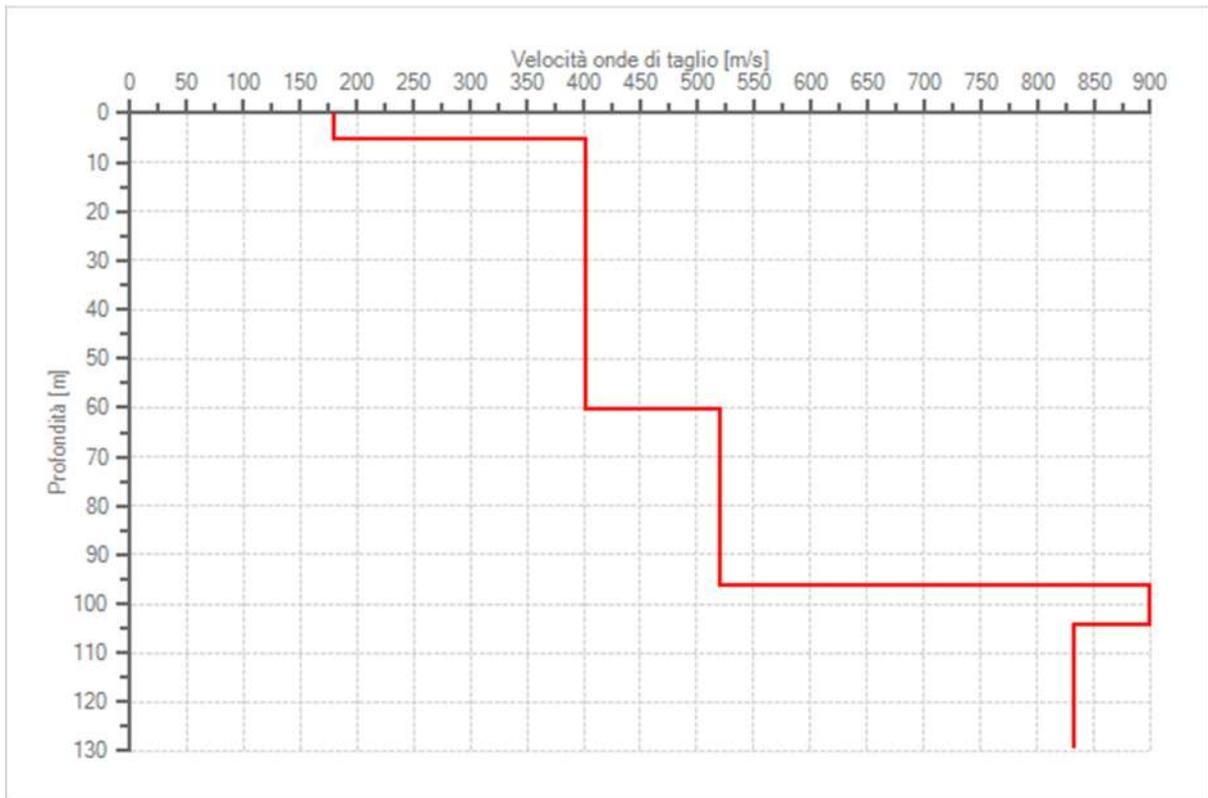
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati: 5  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 1.10 Hz  
 Valore di disadattamento: 0.07  
 Valore Vseq: 327.32 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5.5	18	0.3	180
2	5.5	55	18	0.3	401
3	60.5	36	19	0.3	520
4	96.5	8	20	0.3	900
5	104.5	25	21	0.3	833



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)

cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351

email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)

P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 3**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

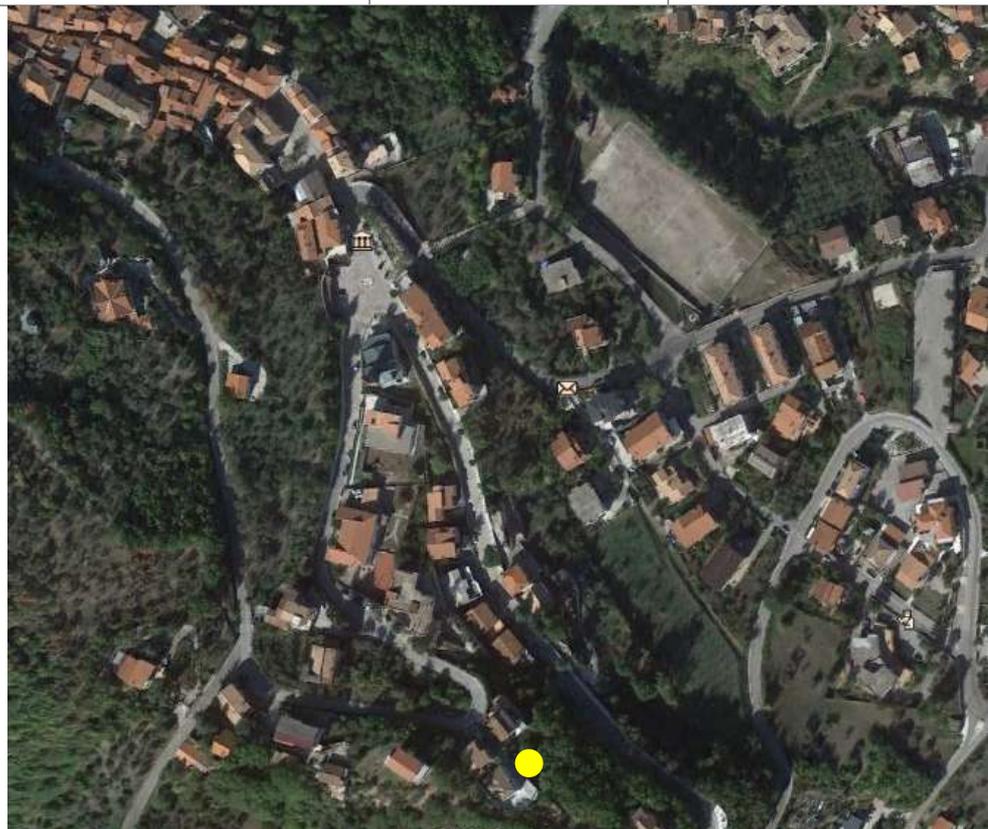
**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

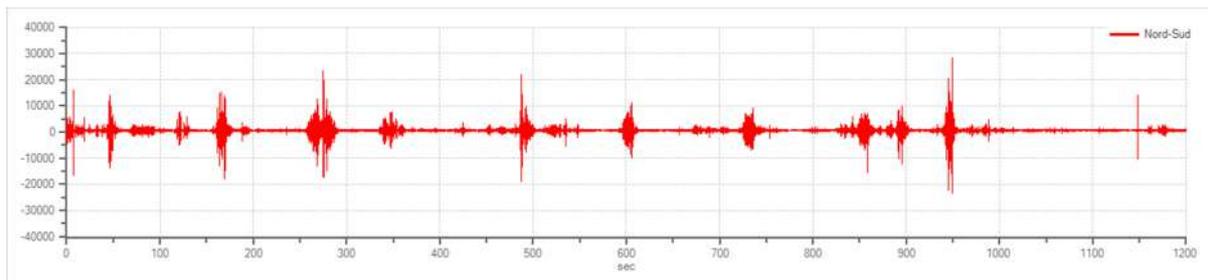
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

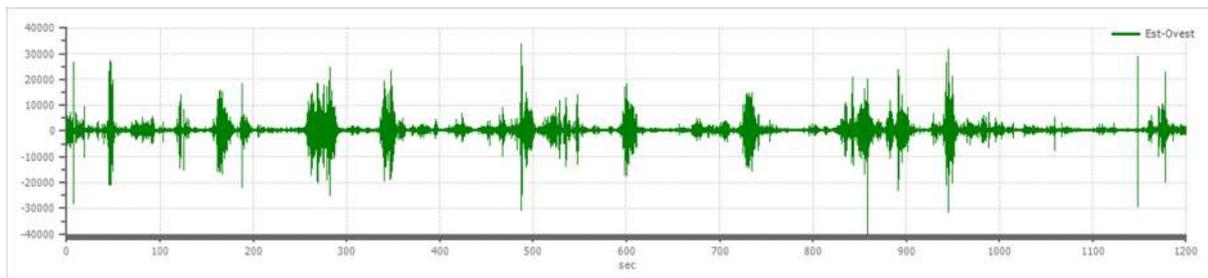
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

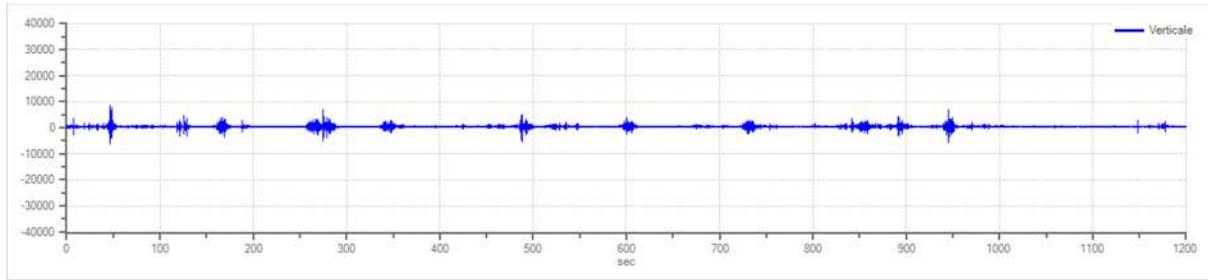
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

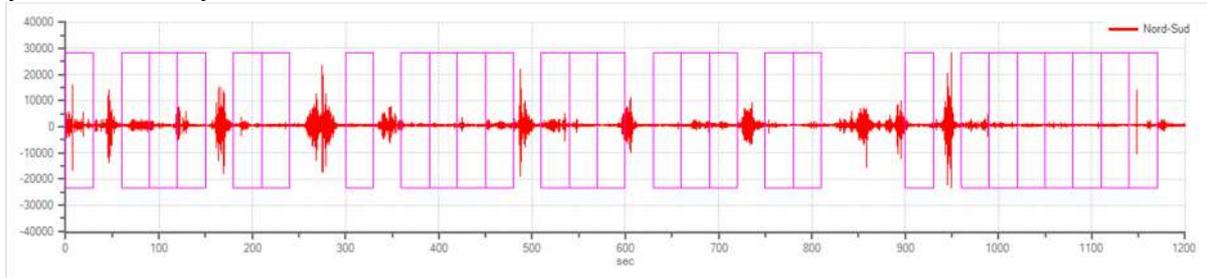
### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre selezionate: 27  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 27  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

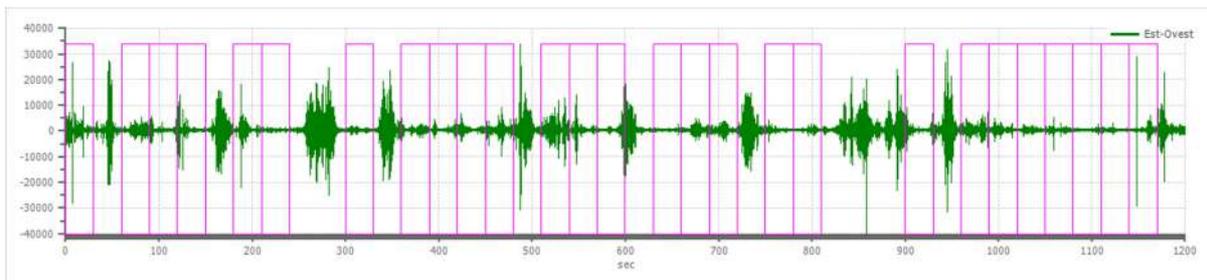
### Tabella finestre:

Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	60	90	Inclusa
3	90	120	Inclusa
4	120	150	Inclusa
5	180	210	Inclusa
6	210	240	Inclusa
7	300	330	Inclusa
8	360	390	Inclusa
9	390	420	Inclusa
10	420	450	Inclusa
11	450	480	Inclusa
12	510	540	Inclusa
13	540	570	Inclusa
14	570	600	Inclusa
15	630	660	Inclusa
16	660	690	Inclusa
17	690	720	Inclusa
18	750	780	Inclusa
19	780	810	Inclusa
20	900	930	Inclusa
21	960	990	Inclusa
22	990	1020	Inclusa
23	1020	1050	Inclusa
24	1050	1080	Inclusa
25	1080	1110	Inclusa
26	1110	1140	Inclusa

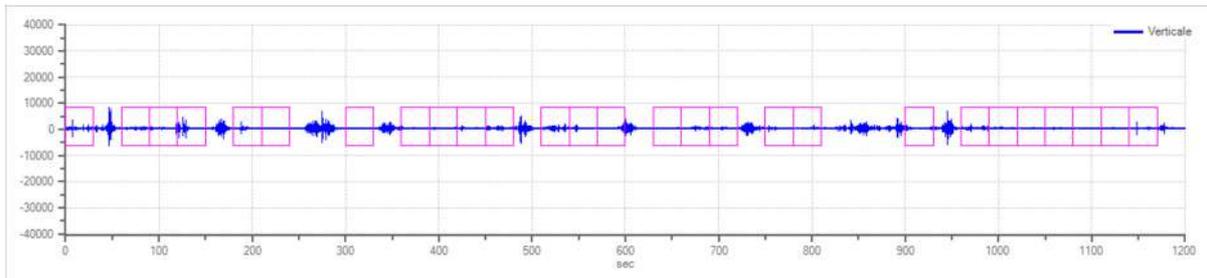
Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

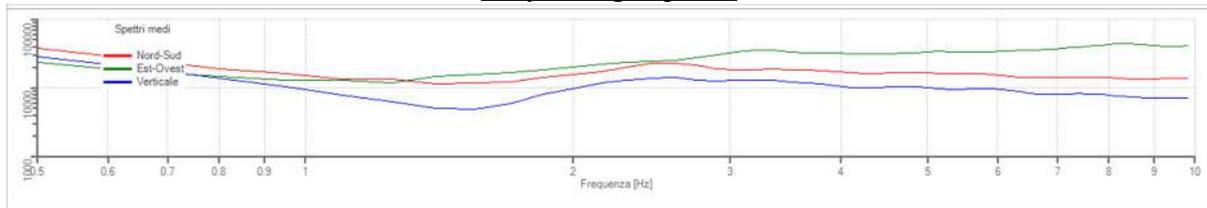


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

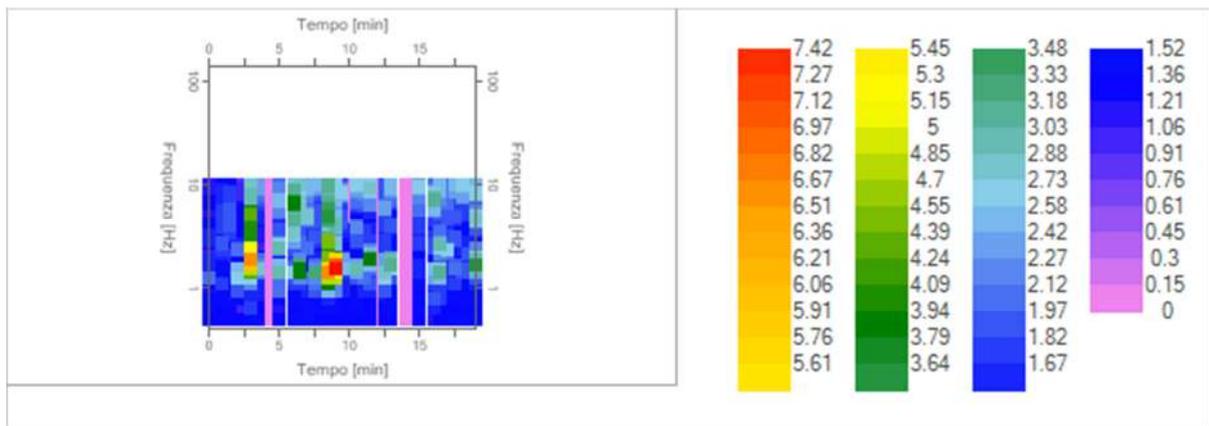


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

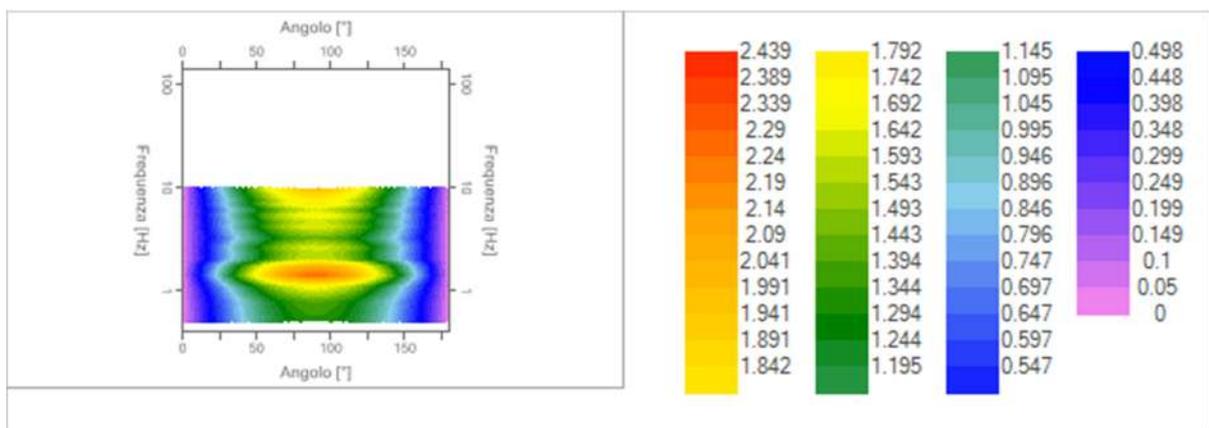
Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

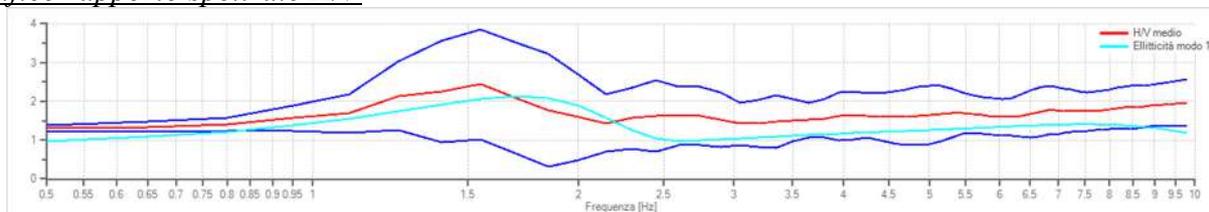
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Nessuna (Direzione NS)

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 1.55 Hz  $\pm$  0.58 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



## Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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

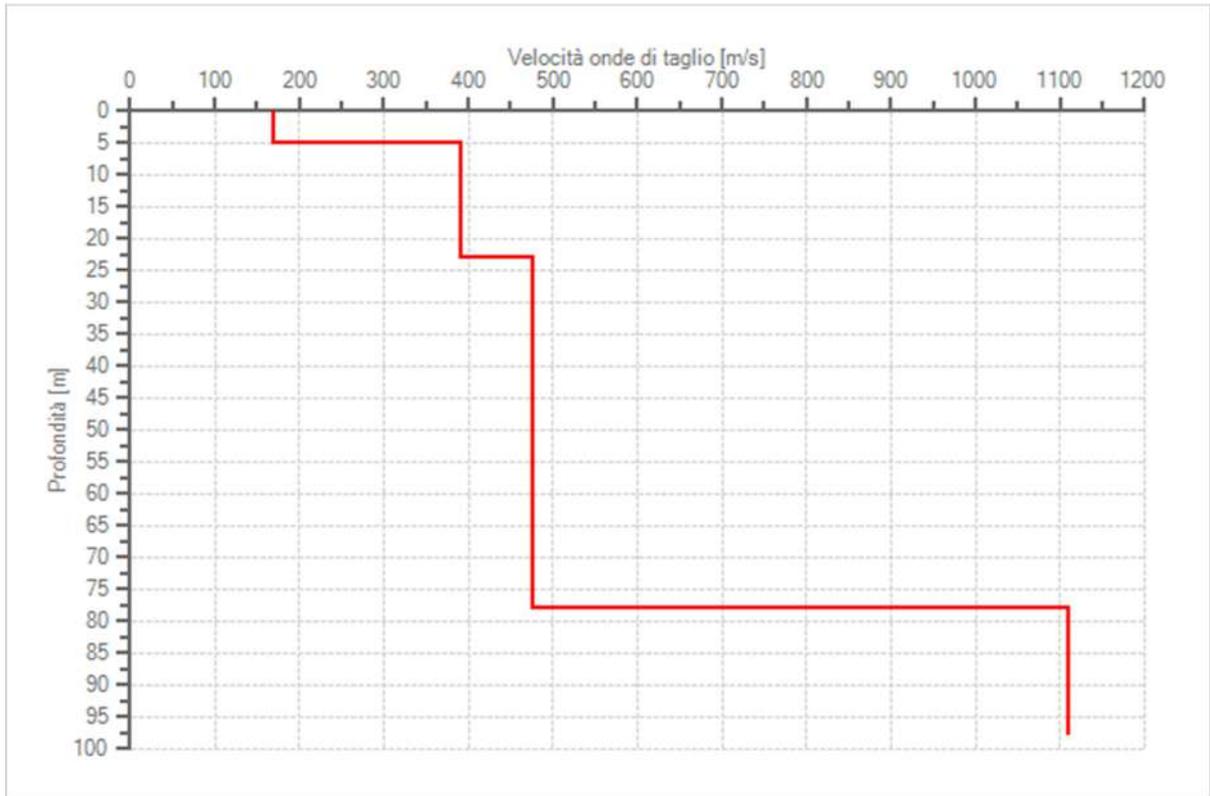
### Modello stratigrafico

#### Dati riepilogativi:

Numero strati:	4
Frequenza del picco dell'ellitticità:	1.70 Hz
Valore di disadattamento:	0.27
Valore Vseq:	332.22 m/s

#### Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5	17	0.3	170
2	5	18	18	0.3	390
3	23	55	21	0.3	475
4	78	20	22	0.3	1110



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: info@soilprojectsas.it  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 4**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

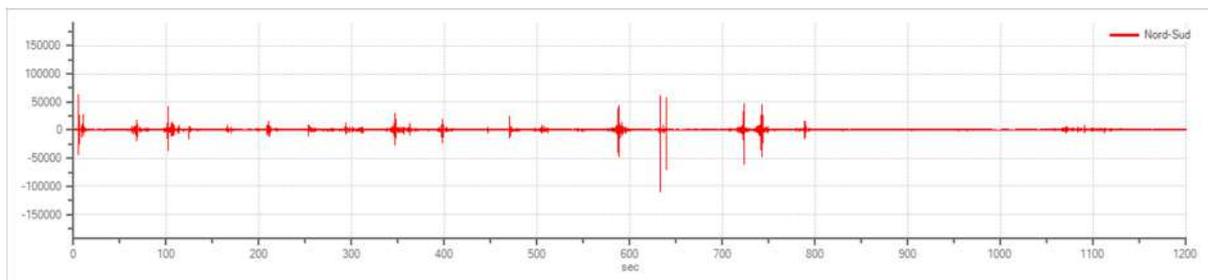
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

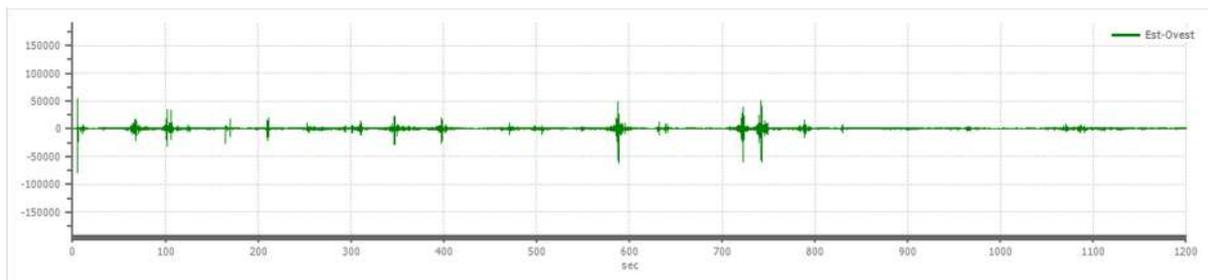
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

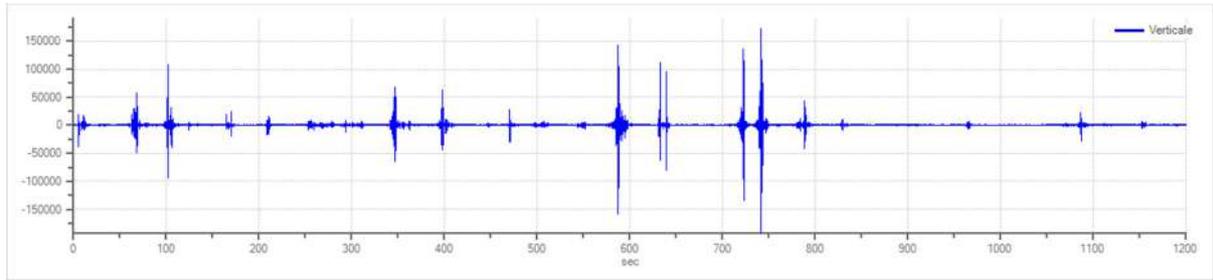
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

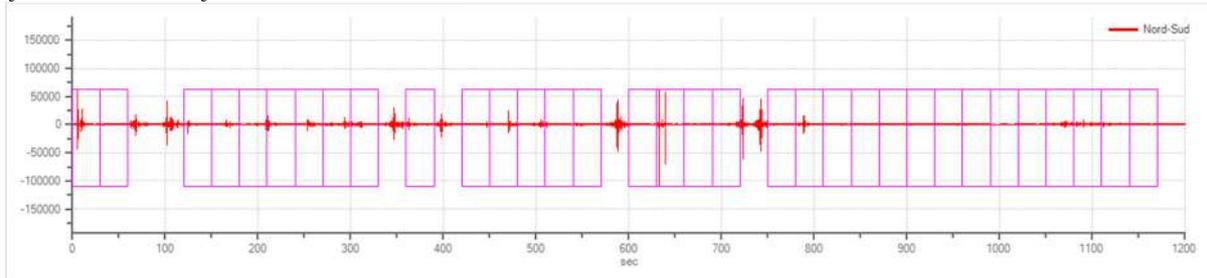
Numero totale finestre selezionate: 33  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 33  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

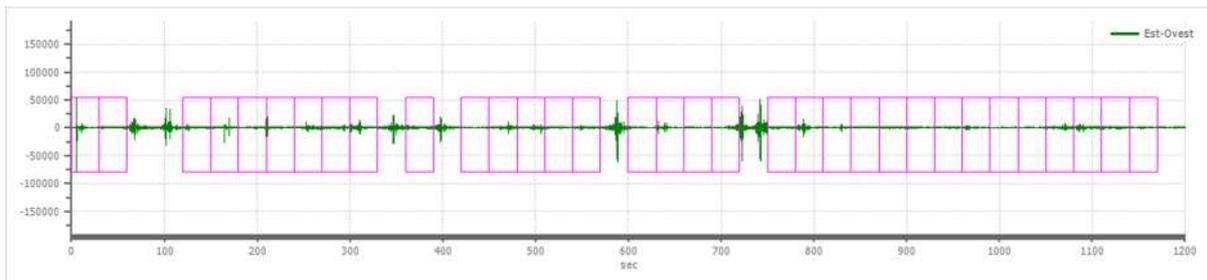
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	120	150	Inclusa
4	150	180	Inclusa
5	180	210	Inclusa
6	210	240	Inclusa
7	240	270	Inclusa
8	270	300	Inclusa
9	300	330	Inclusa
10	360	390	Inclusa
11	420	450	Inclusa
12	450	480	Inclusa
13	480	510	Inclusa
14	510	540	Inclusa
15	540	570	Inclusa
16	600	630	Inclusa
17	630	660	Inclusa
18	660	690	Inclusa
19	690	720	Inclusa
20	750	780	Inclusa
21	780	810	Inclusa
22	810	840	Inclusa
23	840	870	Inclusa
24	870	900	Inclusa
25	900	930	Inclusa
26	930	960	Inclusa

27	960	990	Inclusa
28	990	1020	Inclusa
29	1020	1050	Inclusa
30	1050	1080	Inclusa
31	1080	1110	Inclusa
32	1110	1140	Inclusa
33	1140	1170	Inclusa

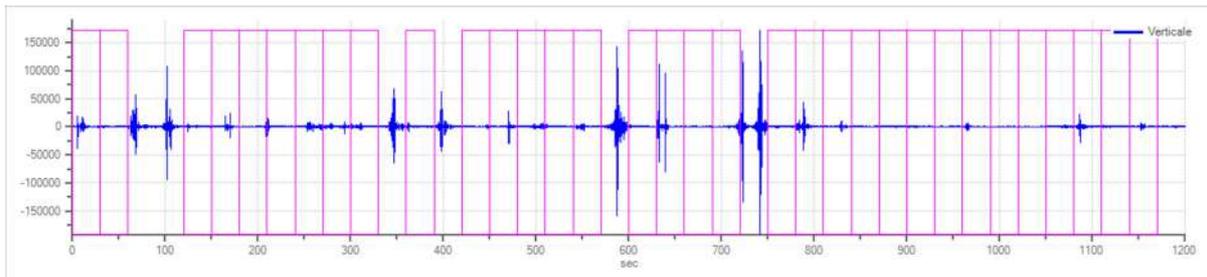
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

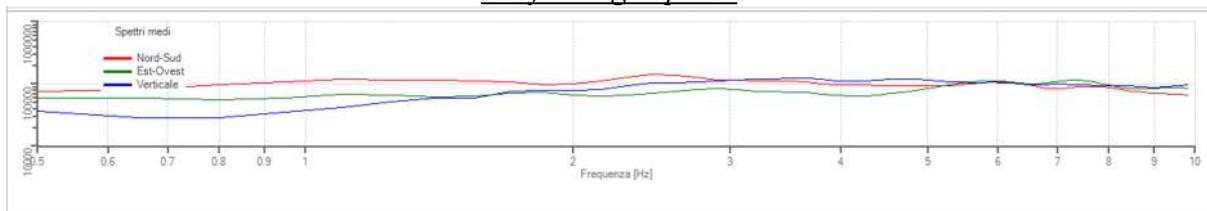


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

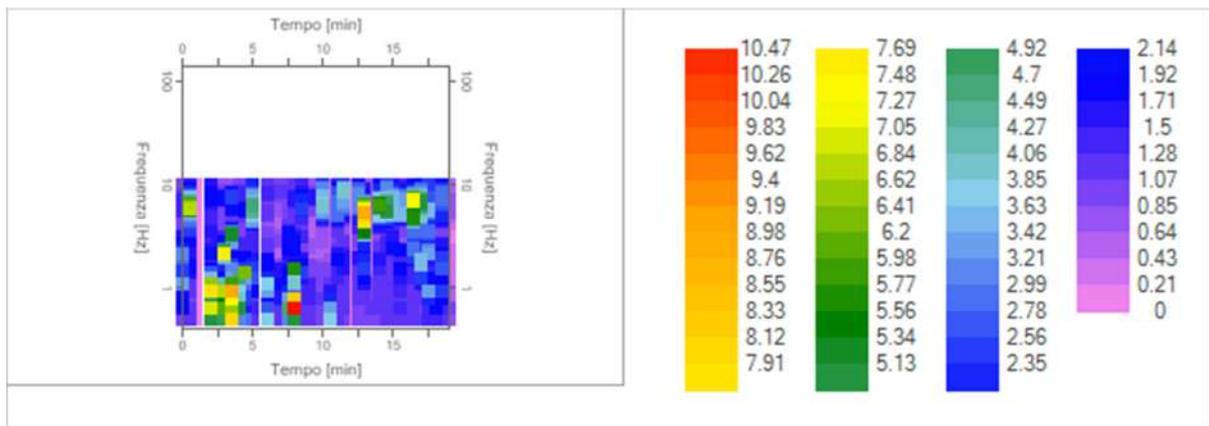


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

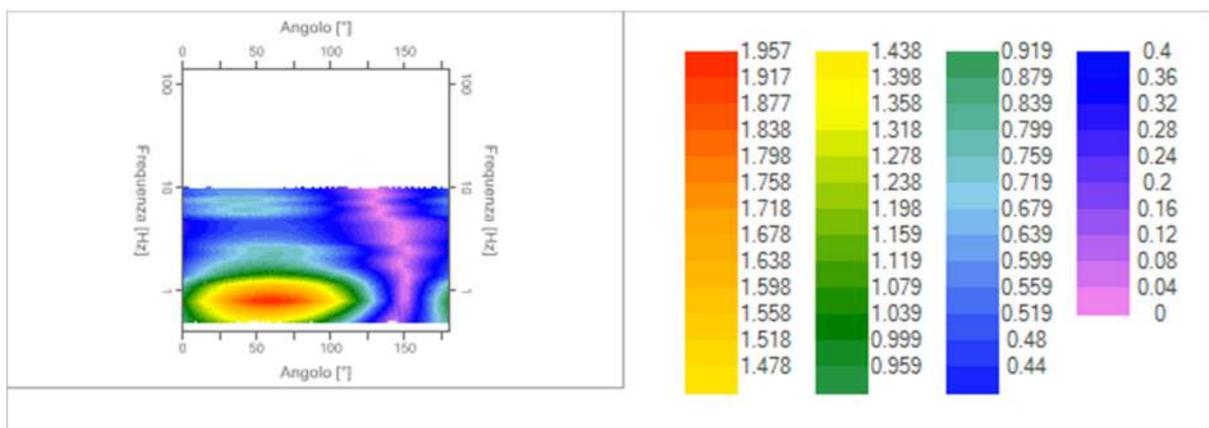
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

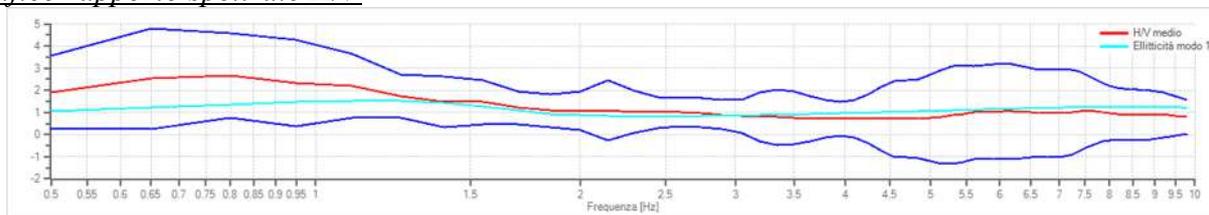
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 0.80 Hz  $\pm$  0.72 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



## Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

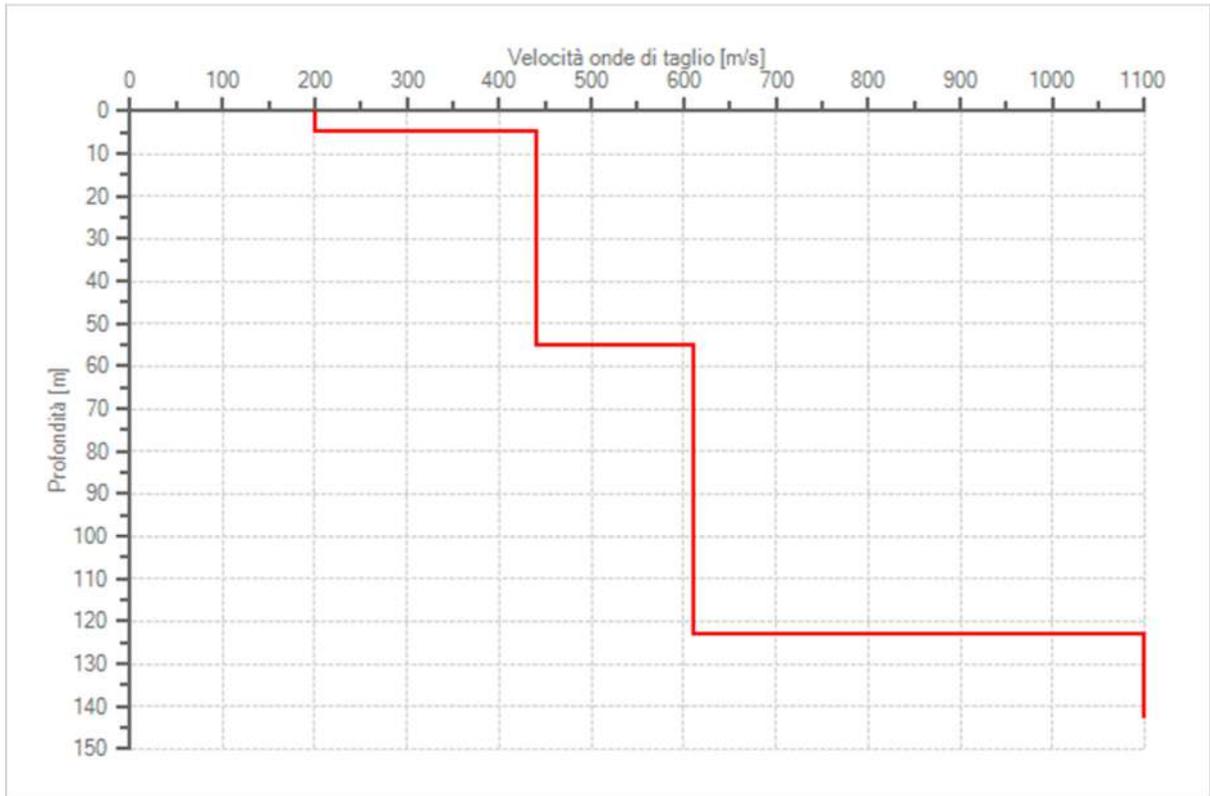
### Modello stratigrafico

#### Dati riepilogativi:

Numero strati:	4
Frequenza del picco dell'ellitticità:	1.10 Hz
Valore di disadattamento:	0.66
Valore Vseq:	366.67 m/s

#### Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5	18	0.3	200
2	5	50	18	0.3	440
3	55	68	19	0.3	610
4	123	20	18	0.3	1100



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: info@soilprojectsas.it  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 5**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

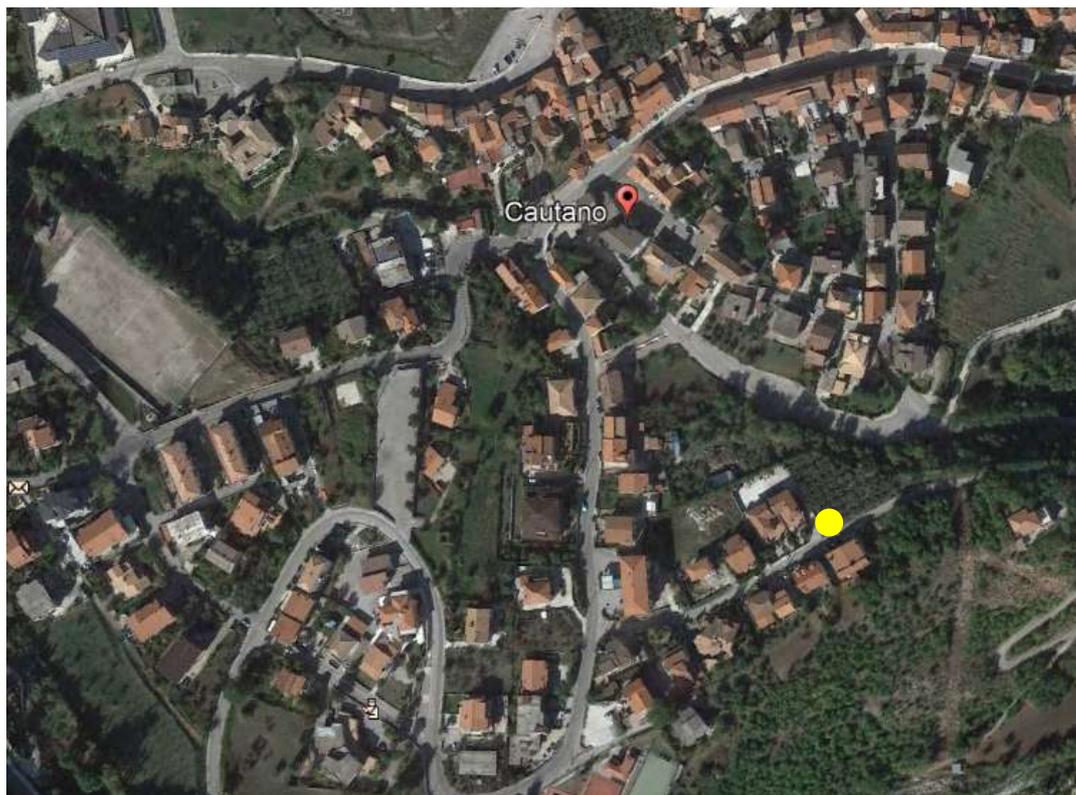
**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

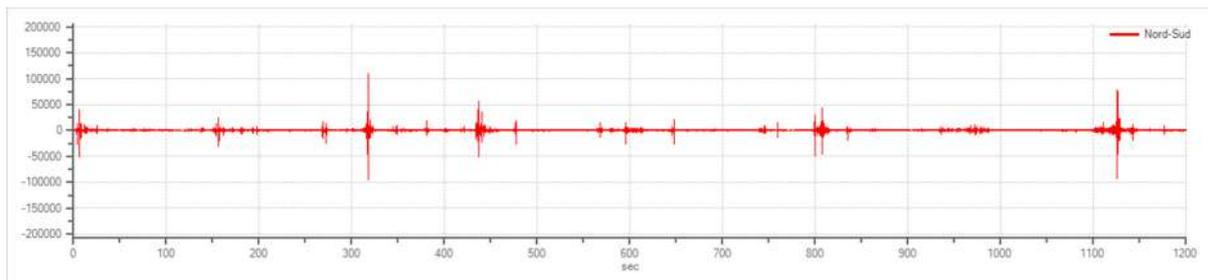
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

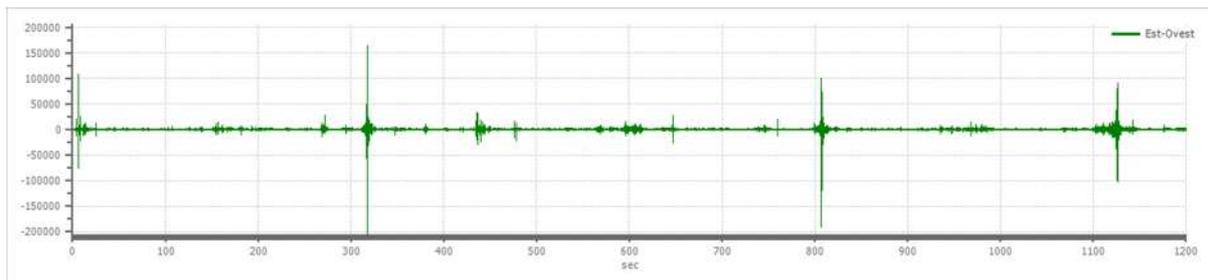
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

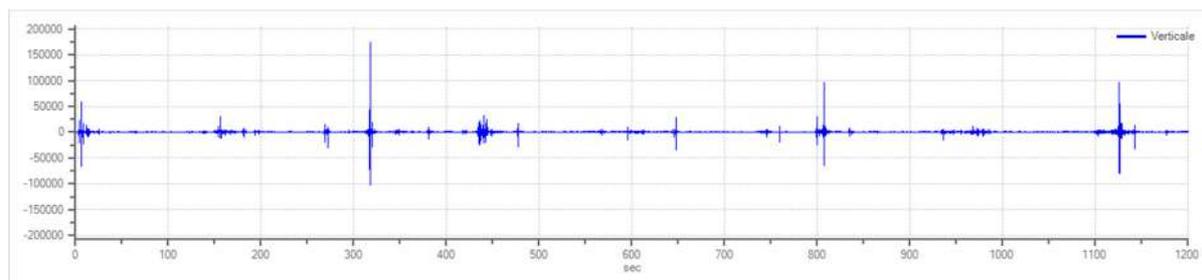
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

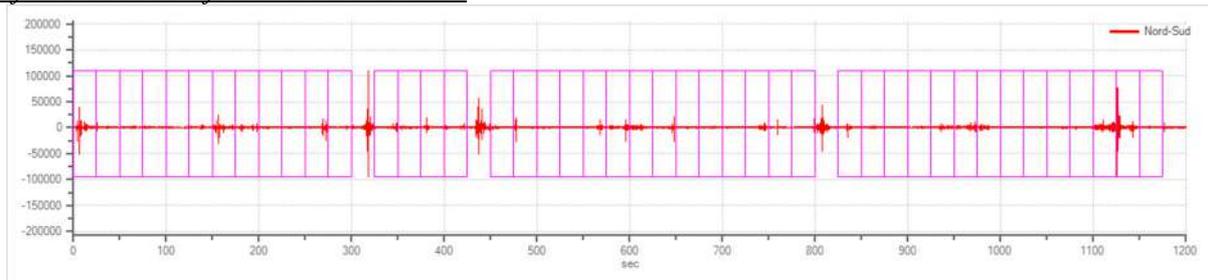
Numero totale finestre selezionate: 44  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 44  
 Dimensione temporale finestre: 25.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

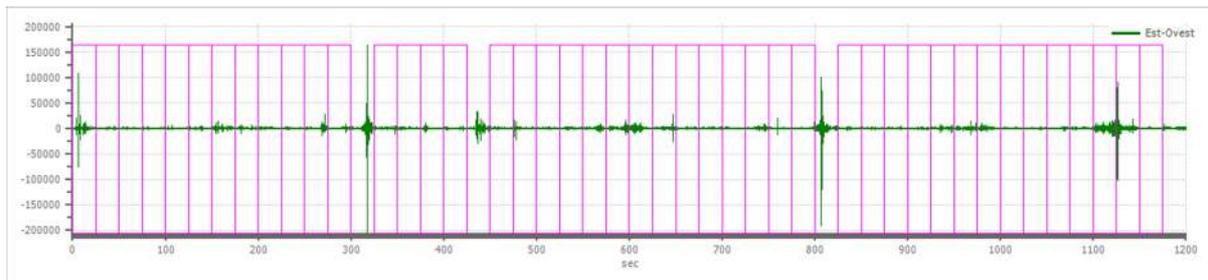
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	25	Inclusa
2	25	50	Inclusa
3	50	75	Inclusa
4	75	100	Inclusa
5	100	125	Inclusa
6	125	150	Inclusa
7	150	175	Inclusa
8	175	200	Inclusa
9	200	225	Inclusa
10	225	250	Inclusa
11	250	275	Inclusa
12	275	300	Inclusa
13	325	350	Inclusa
14	350	375	Inclusa
15	375	400	Inclusa
16	400	425	Inclusa
17	450	475	Inclusa
18	475	500	Inclusa
19	500	525	Inclusa
20	525	550	Inclusa
21	550	575	Inclusa
22	575	600	Inclusa
23	600	625	Inclusa
24	625	650	Inclusa
25	650	675	Inclusa
26	675	700	Inclusa

27	700	725	Inclusa
28	725	750	Inclusa
29	750	775	Inclusa
30	775	800	Inclusa
31	825	850	Inclusa
32	850	875	Inclusa
33	875	900	Inclusa
34	900	925	Inclusa
35	925	950	Inclusa
36	950	975	Inclusa
37	975	1000	Inclusa
38	1000	1025	Inclusa
39	1025	1050	Inclusa
40	1050	1075	Inclusa
41	1075	1100	Inclusa
42	1100	1125	Inclusa
43	1125	1150	Inclusa
44	1150	1175	Inclusa

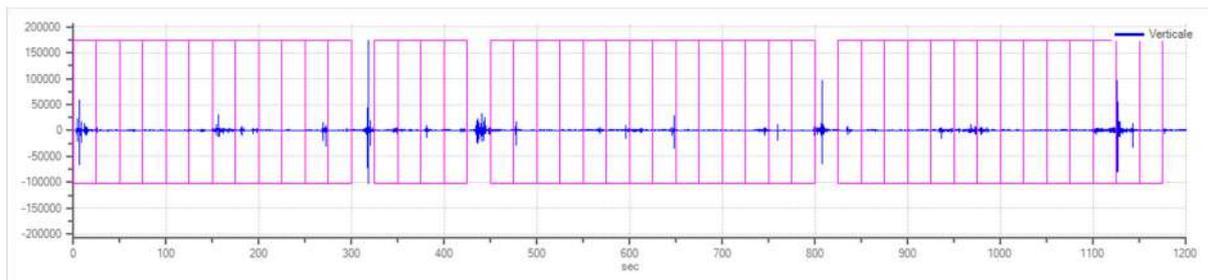
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

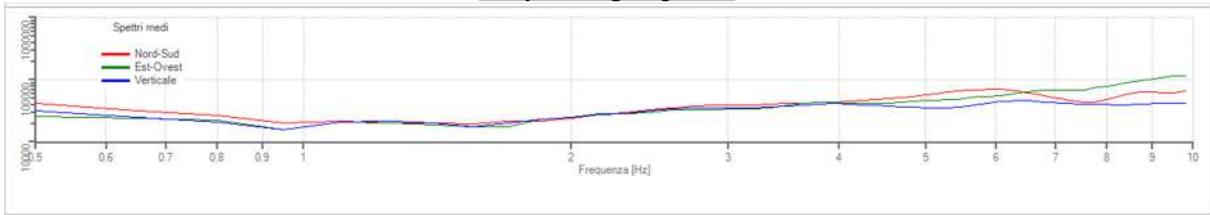


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

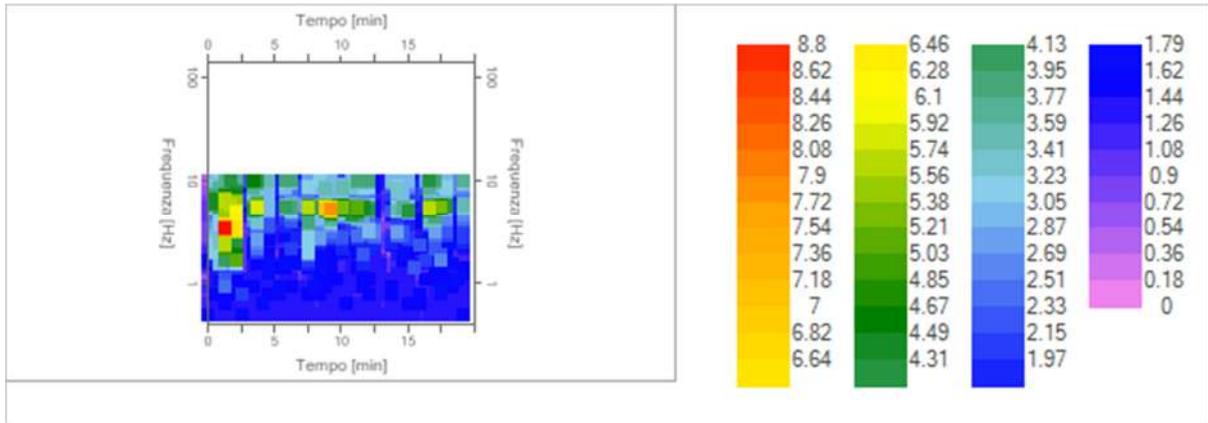


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

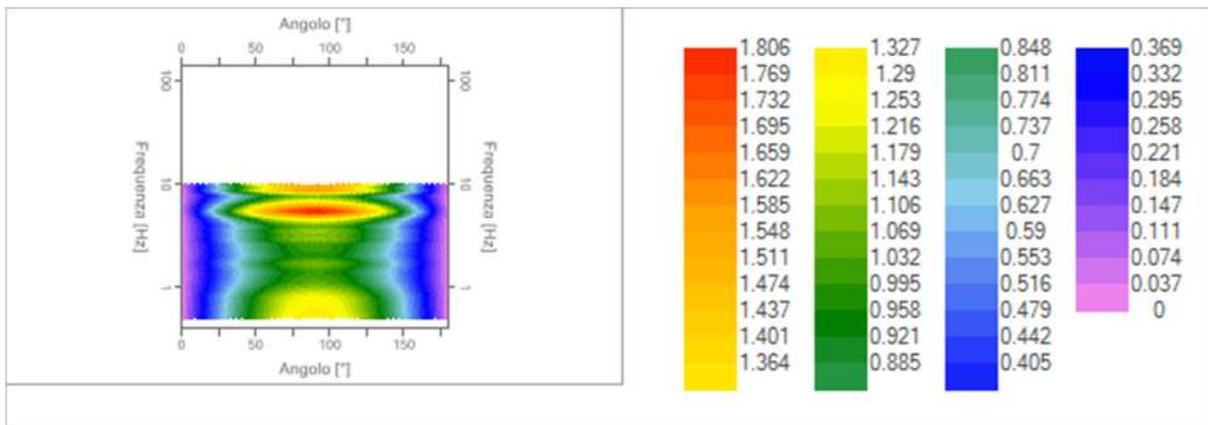
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

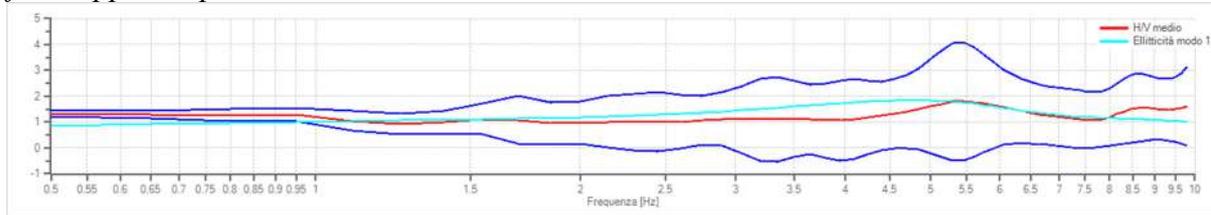
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamo: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamo: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Nessuna (Direzione NS)

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5.45 Hz  $\pm$  1.27 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

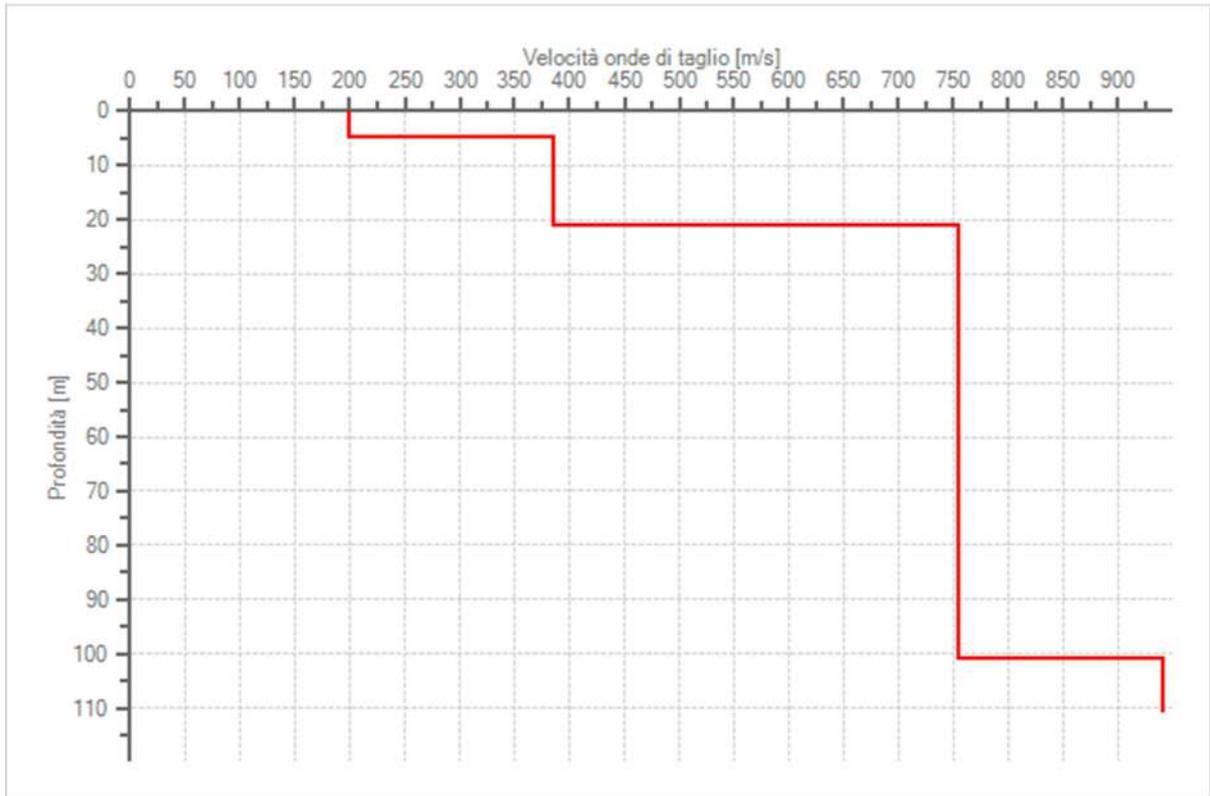
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati: 4  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 4.85 Hz  
 Valore di disadattamento: 0.20  
 Valore Vseq: 382.27 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5	18	0.3	200
2	5	16	19	0.3	385
3	21	80	20	0.3	755
4	101	10	22	0.3	940



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)

cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351

email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)

P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 6**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

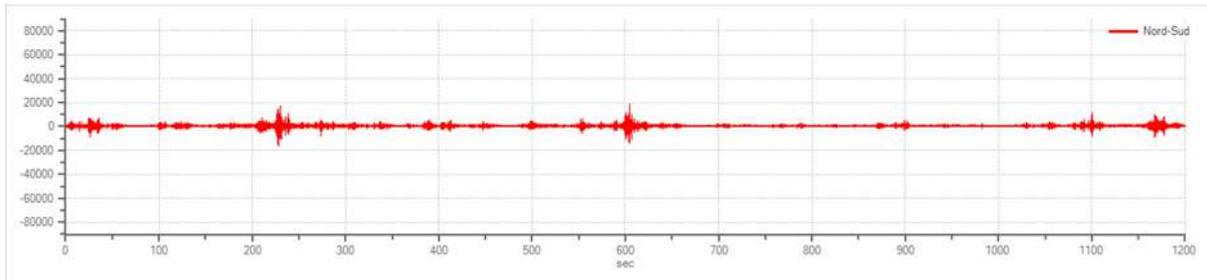
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

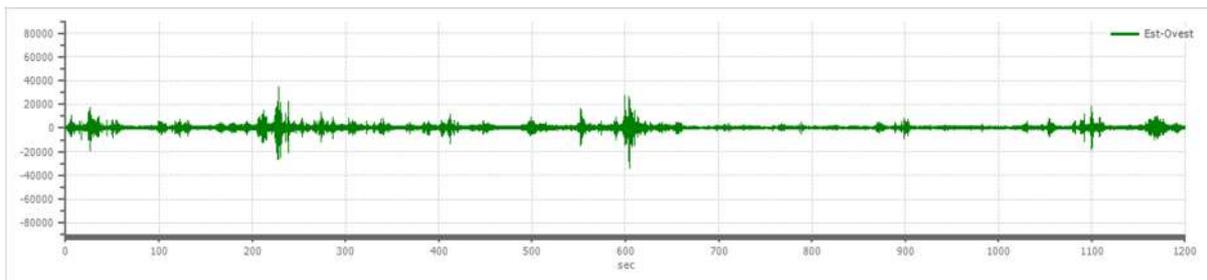
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

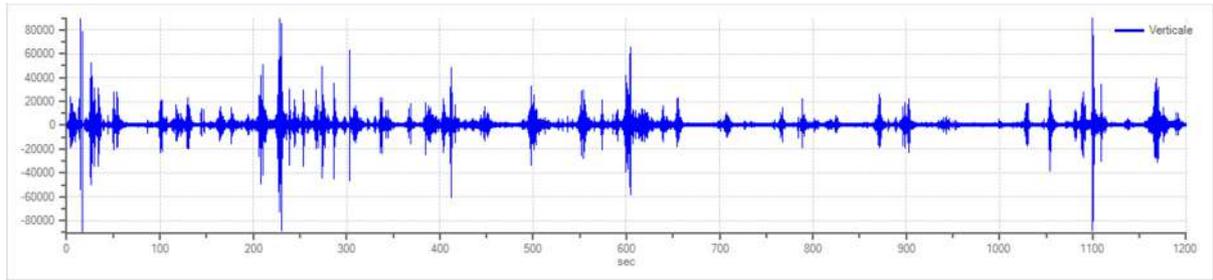
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

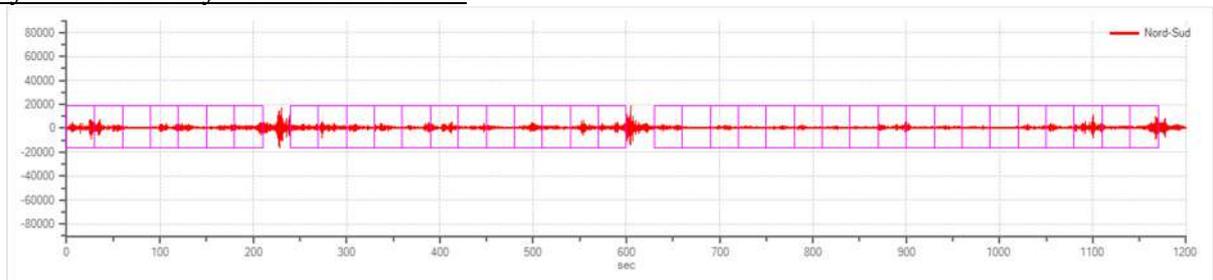
Numero totale finestre selezionate: 37  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 34  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

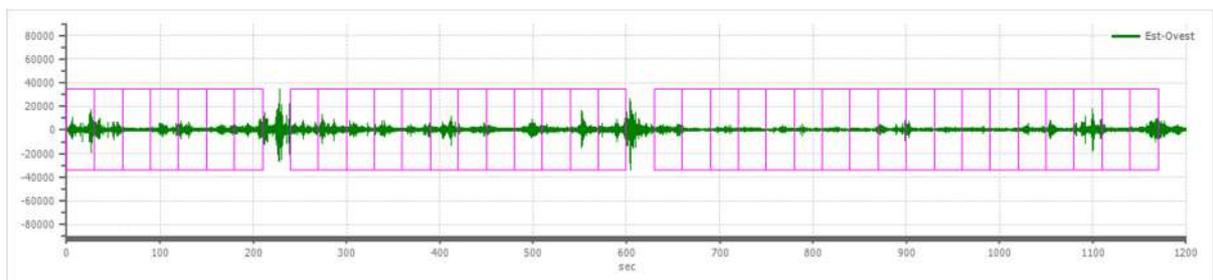
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	60	90	Inclusa
4	90	120	Inclusa
5	120	150	Inclusa
6	150	180	Inclusa
7	180	210	Inclusa
8	240	270	Inclusa
9	270	300	Inclusa
10	300	330	Inclusa
11	330	360	Inclusa
12	360	390	Inclusa
13	390	420	Inclusa
14	420	450	Inclusa
15	450	480	Inclusa
16	480	510	Inclusa
17	510	540	Inclusa
18	540	570	Inclusa
19	570	600	Inclusa
20	630	660	Esclusa
21	660	690	Inclusa
22	690	720	Inclusa
23	720	750	Inclusa
24	750	780	Inclusa
25	780	810	Inclusa
26	810	840	Inclusa

27	840	870	Inclusa
28	870	900	Inclusa
29	900	930	Inclusa
30	930	960	Inclusa
31	960	990	Esclusa
32	990	1020	Esclusa
33	1020	1050	Inclusa
34	1050	1080	Inclusa
35	1080	1110	Inclusa
36	1110	1140	Inclusa
37	1140	1170	Inclusa

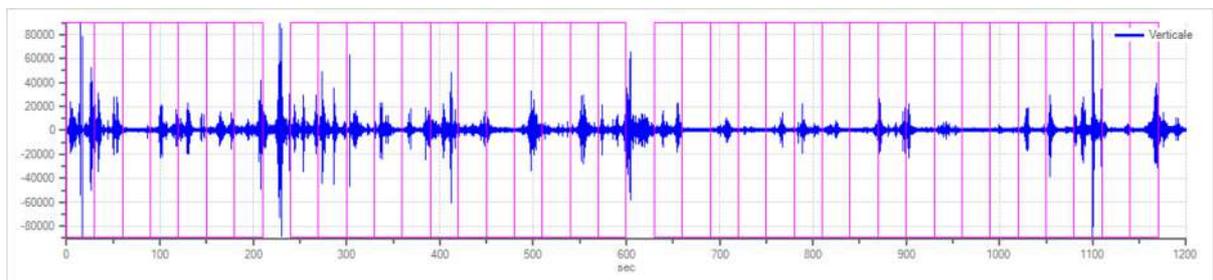
Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

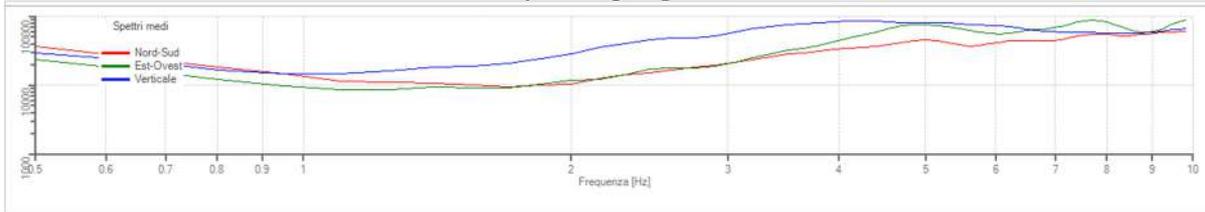


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

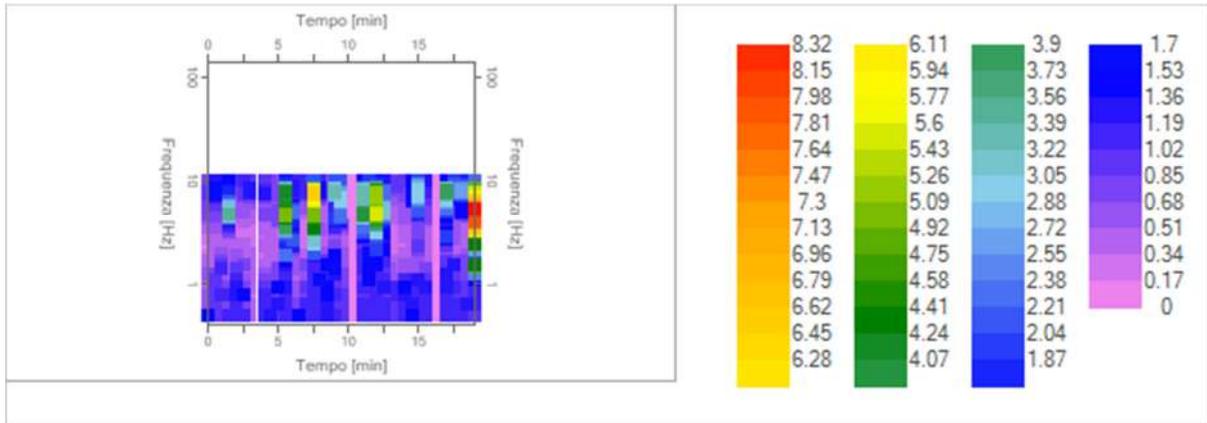


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

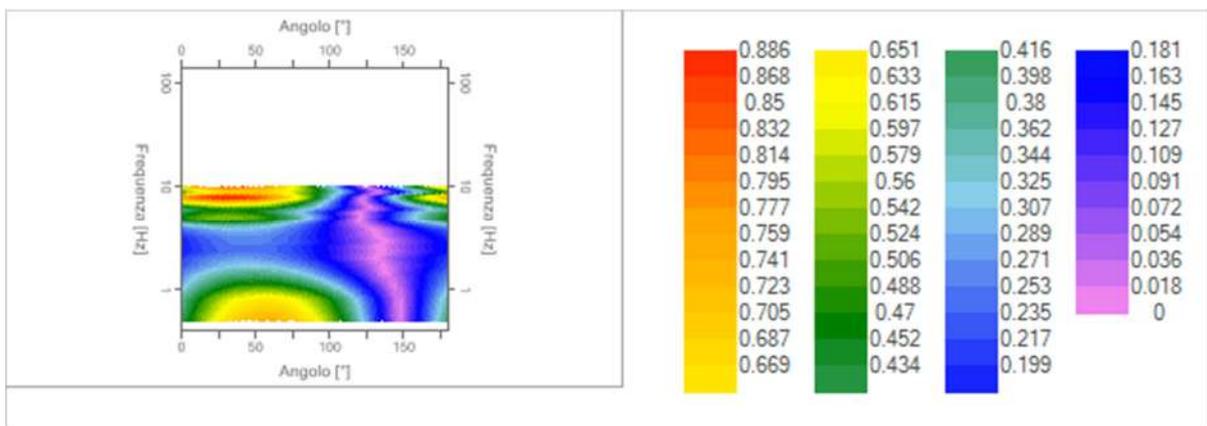
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

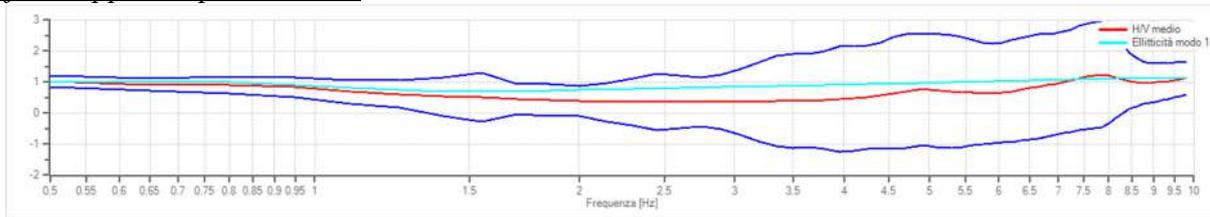
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 7.85 Hz  $\pm$  1.37 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

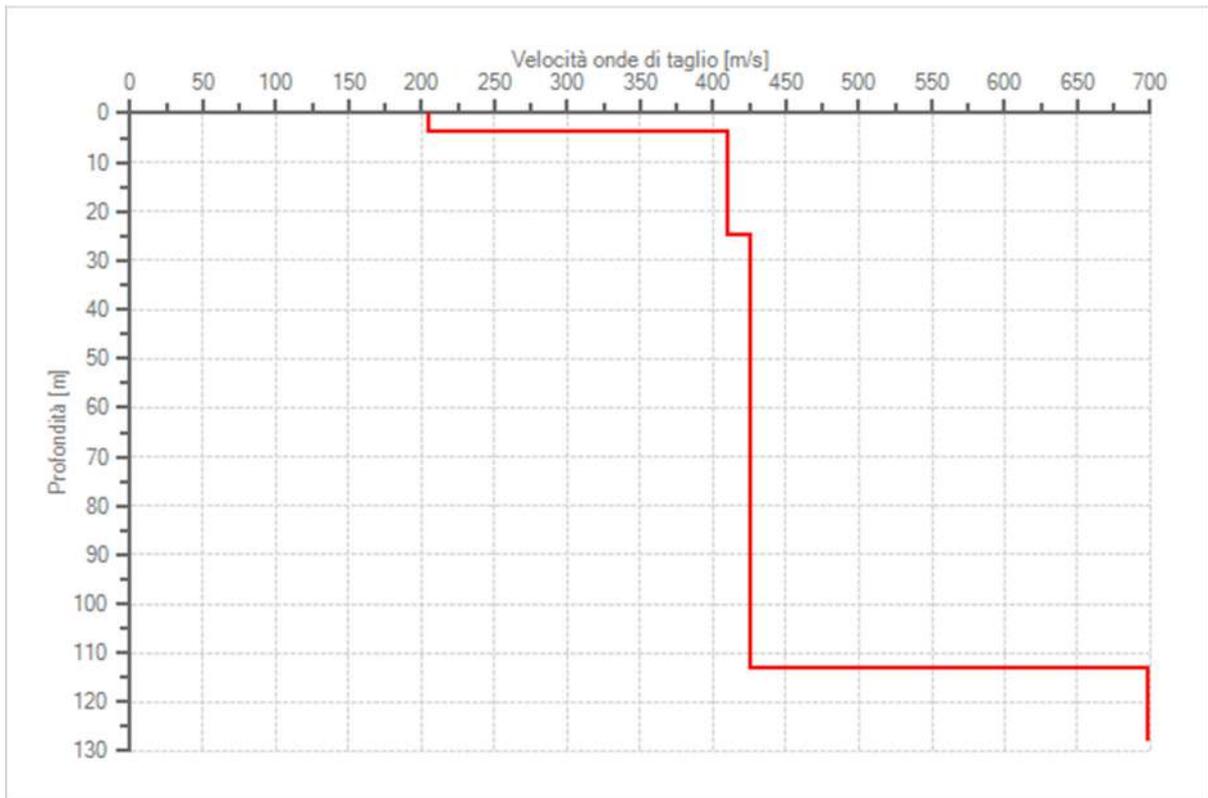
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati:	4
Frequenza del picco dell'ellitticità:	9.80 Hz
Valore di disadattamento:	-1.00
Valore Vseq:	363.65 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	4	18	0.3	205
2	4	21	19	0.3	410
3	25	88	19	0.3	425
4	113	15	21	0.3	698



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)

cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351

email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)

P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 7**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

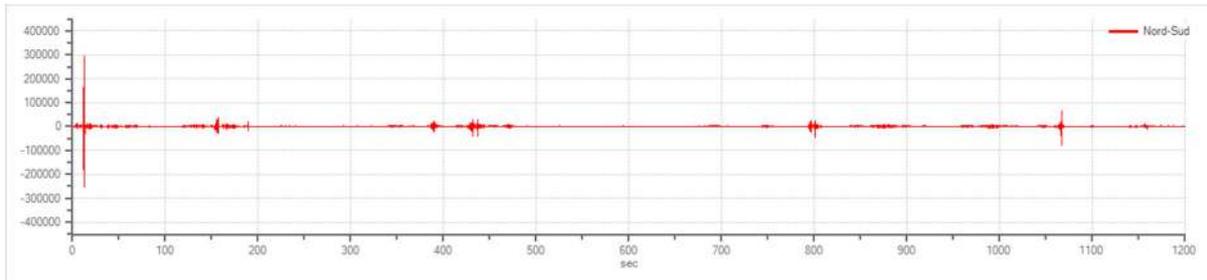
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

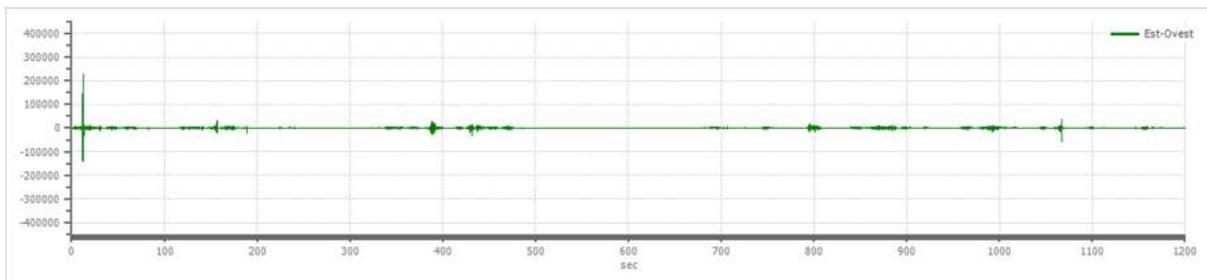
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

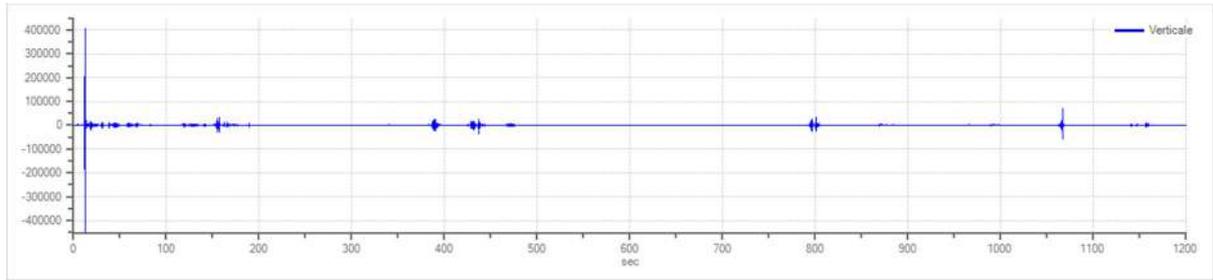
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

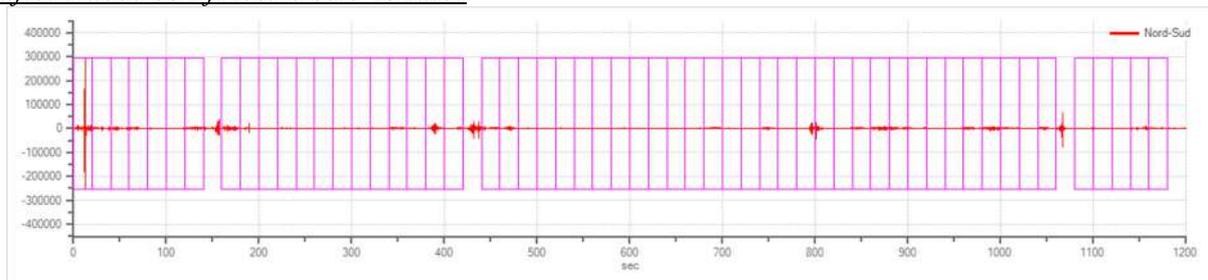
Numero totale finestre selezionate: 56  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 56  
 Dimensione temporale finestre: 20.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

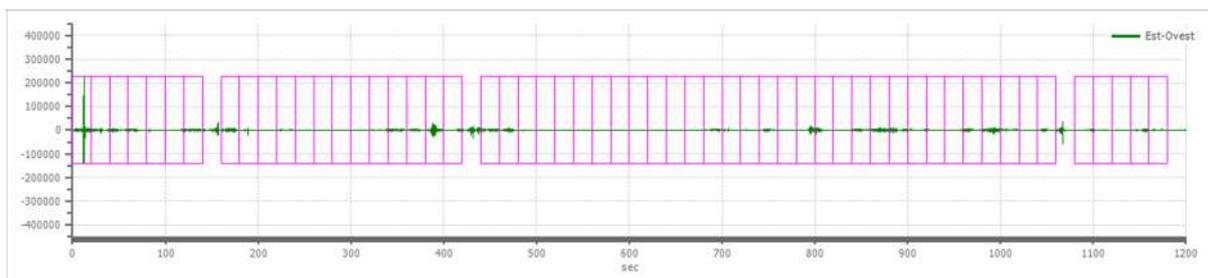
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	20	Inclusa
2	20	40	Inclusa
3	40	60	Inclusa
4	60	80	Inclusa
5	80	100	Inclusa
6	100	120	Inclusa
7	120	140	Inclusa
8	160	180	Inclusa
9	180	200	Inclusa
10	200	220	Inclusa
11	220	240	Inclusa
12	240	260	Inclusa
13	260	280	Inclusa
14	280	300	Inclusa
15	300	320	Inclusa
16	320	340	Inclusa
17	340	360	Inclusa
18	360	380	Inclusa
19	380	400	Inclusa
20	400	420	Inclusa
21	440	460	Inclusa
22	460	480	Inclusa
23	480	500	Inclusa
24	500	520	Inclusa
25	520	540	Inclusa
26	540	560	Inclusa

27	560	580	Inclusa
28	580	600	Inclusa
29	600	620	Inclusa
30	620	640	Inclusa
31	640	660	Inclusa
32	660	680	Inclusa
33	680	700	Inclusa
34	700	720	Inclusa
35	720	740	Inclusa
36	740	760	Inclusa
37	760	780	Inclusa
38	780	800	Inclusa
39	800	820	Inclusa
40	820	840	Inclusa
41	840	860	Inclusa
42	860	880	Inclusa
43	880	900	Inclusa
44	900	920	Inclusa
45	920	940	Inclusa
46	940	960	Inclusa
47	960	980	Inclusa
48	980	1000	Inclusa
49	1000	1020	Inclusa
50	1020	1040	Inclusa
51	1040	1060	Inclusa
52	1080	1100	Inclusa
53	1100	1120	Inclusa
54	1120	1140	Inclusa
55	1140	1160	Inclusa
56	1160	1180	Inclusa

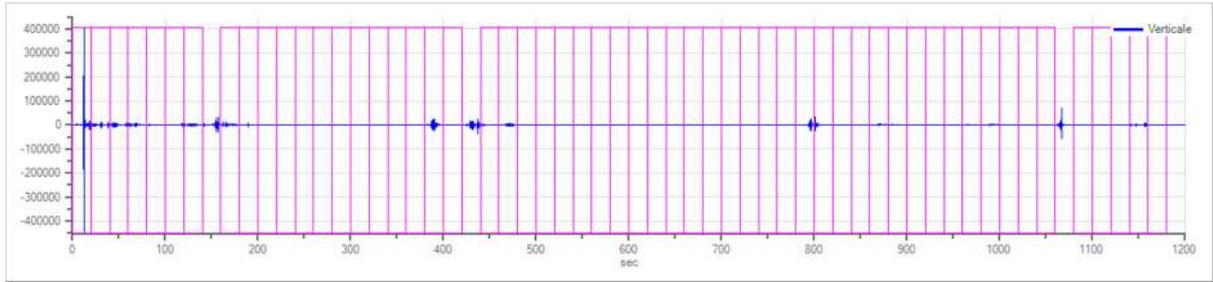
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

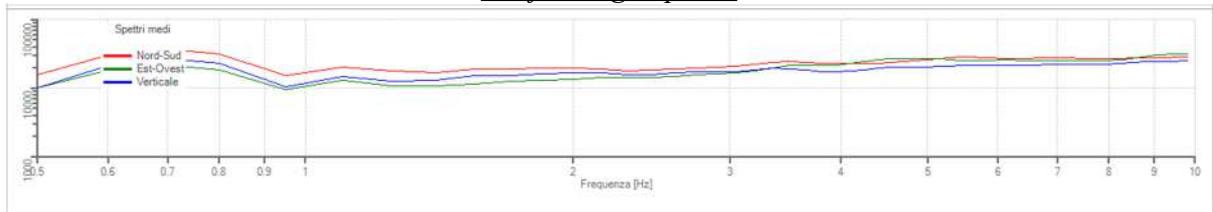


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

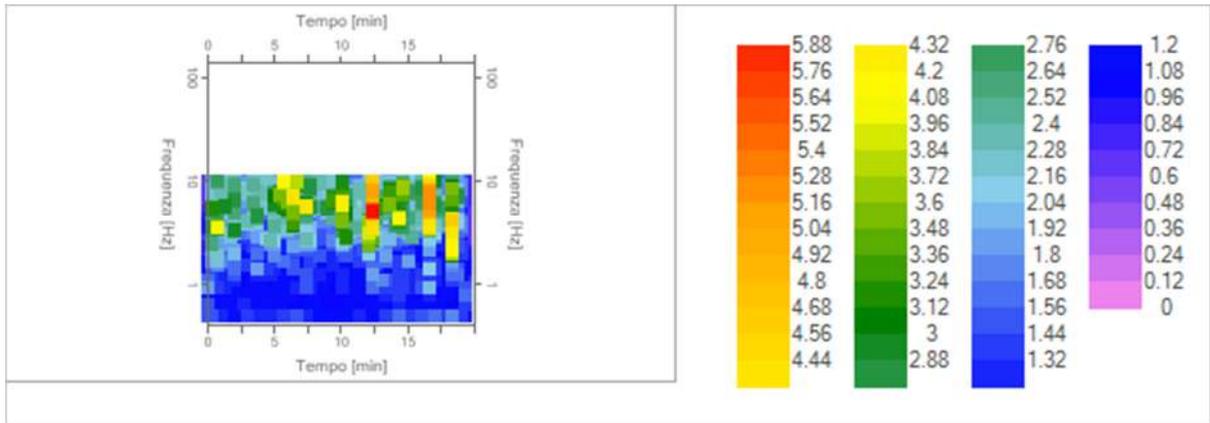


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

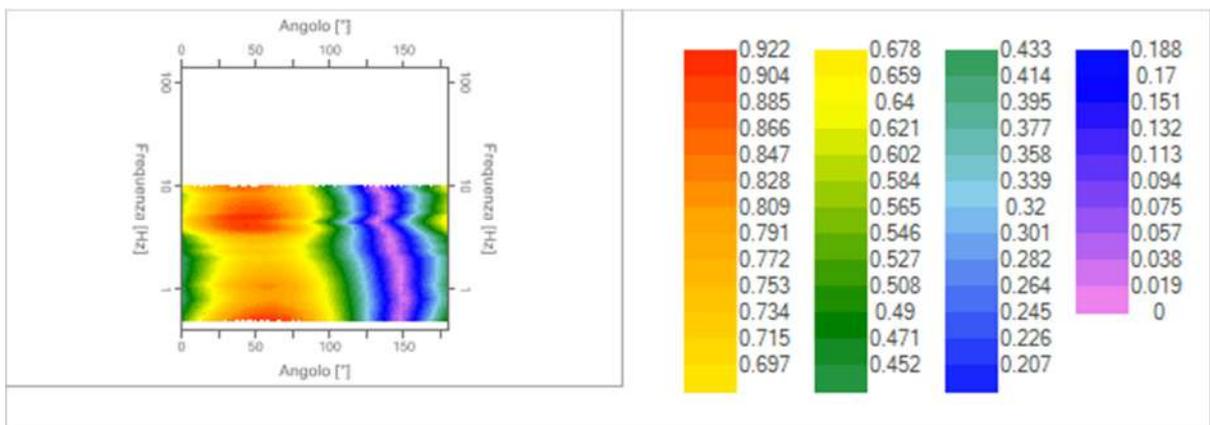
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

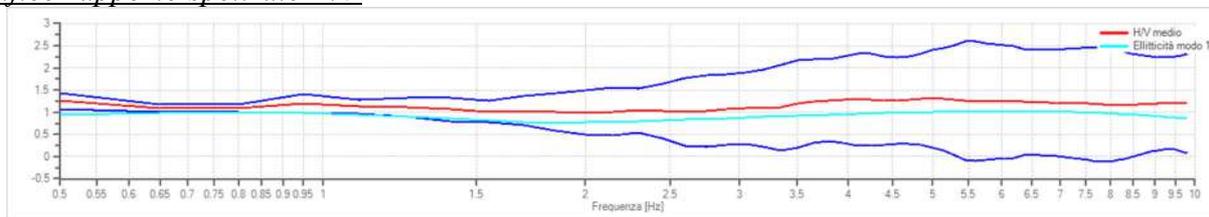
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamiento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5.00 Hz  $\pm$  0.84 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

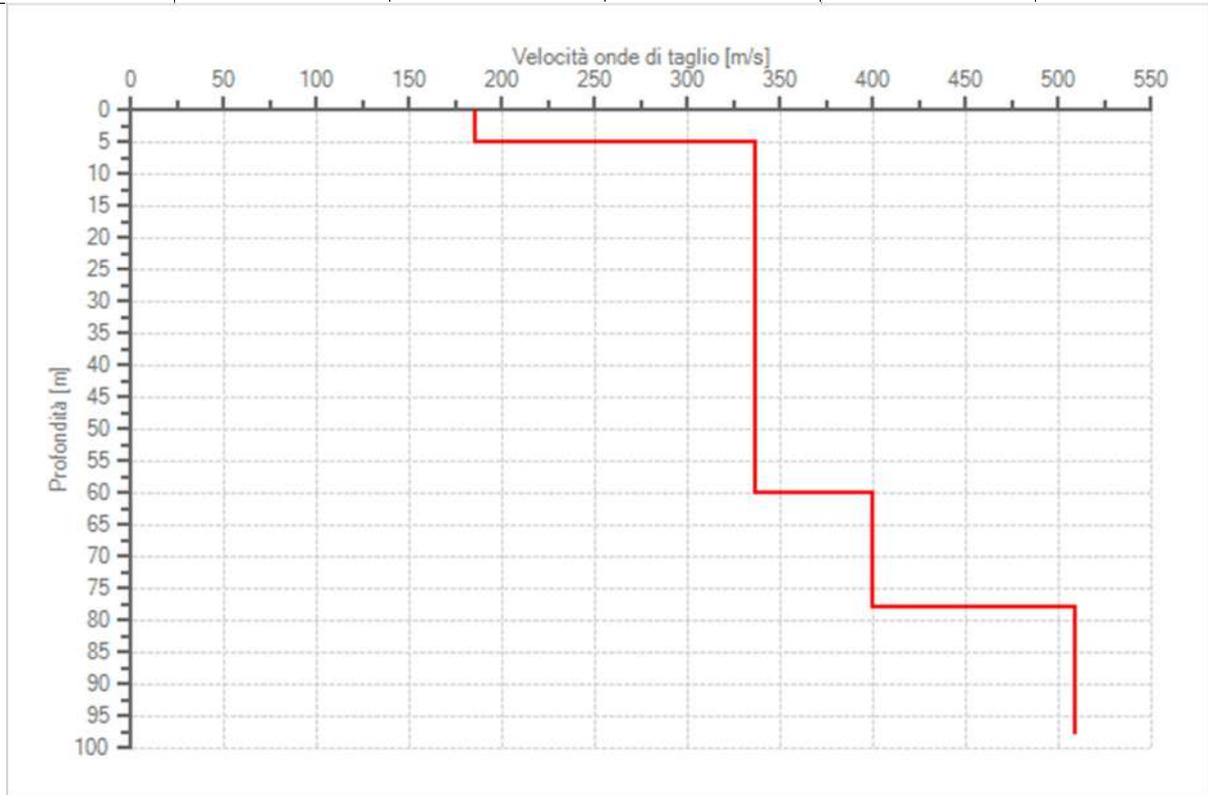
## Modello stratigrafico

### Dati riepilogativi:

Numero strati: 4  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 6.05 Hz  
 Valore di disadattamento: 0.05  
 Valore Vseq: 295.77 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5	18	0.3	185
2	5	55	18	0.3	336
3	60	18	19	0.3	400
4	78	20	21	0.3	509



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 8**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

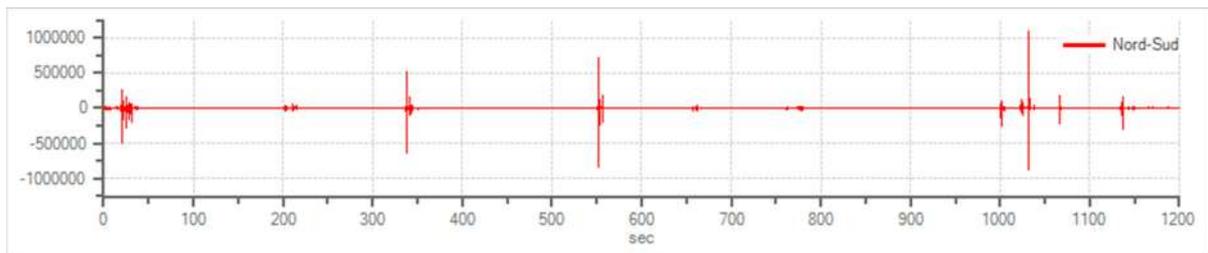
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

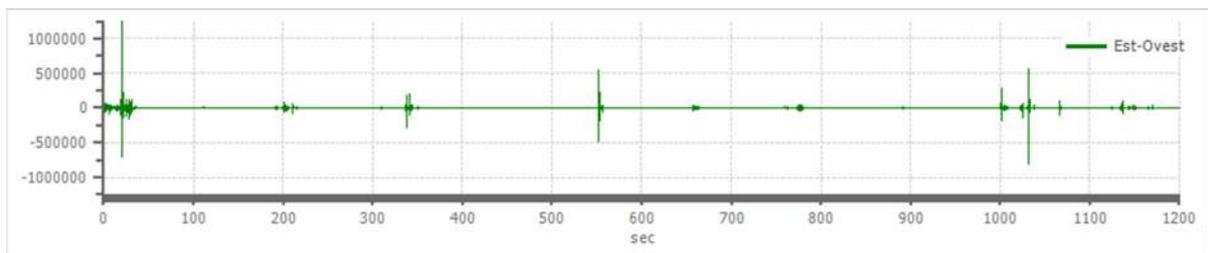
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

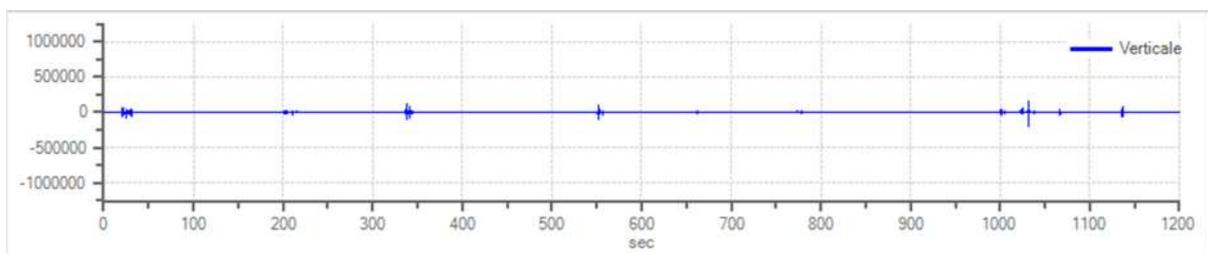
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

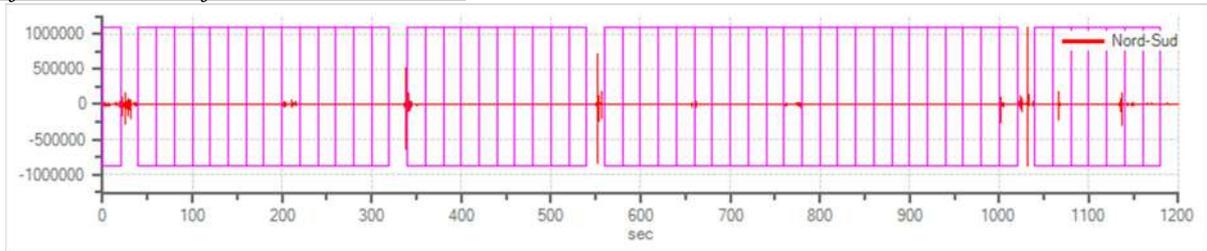
Numero totale finestre selezionate: 55  
Numero finestre incluse nel calcolo: 54  
Dimensione temporale finestre: 20.000 s  
Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

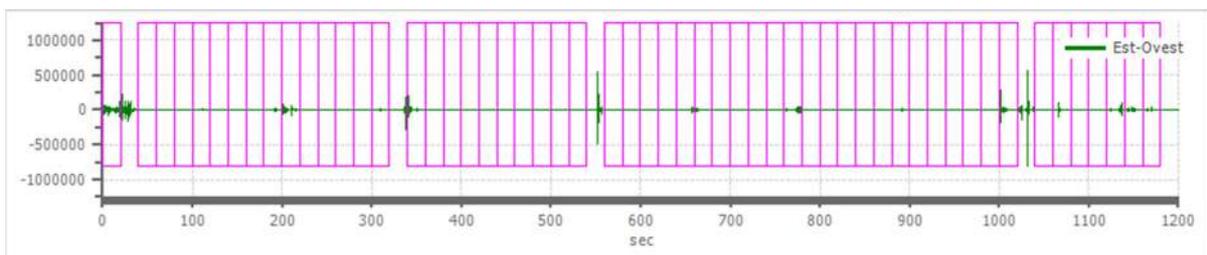
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	20	Esclusa
2	40	60	Inclusa
3	60	80	Inclusa
4	80	100	Inclusa
5	100	120	Inclusa
6	120	140	Inclusa
7	140	160	Inclusa
8	160	180	Inclusa
9	180	200	Inclusa
10	200	220	Inclusa
11	220	240	Inclusa
12	240	260	Inclusa
13	260	280	Inclusa
14	280	300	Inclusa
15	300	320	Inclusa
16	340	360	Inclusa
17	360	380	Inclusa
18	380	400	Inclusa
19	400	420	Inclusa
20	420	440	Inclusa
21	440	460	Inclusa
22	460	480	Inclusa
23	480	500	Inclusa
24	500	520	Inclusa
25	520	540	Inclusa
26	560	580	Inclusa
27	580	600	Inclusa
28	600	620	Inclusa
29	620	640	Inclusa
30	640	660	Inclusa
31	660	680	Inclusa
32	680	700	Inclusa
33	700	720	Inclusa
34	720	740	Inclusa
35	740	760	Inclusa

36	760	780	Inclusa
37	780	800	Inclusa
38	800	820	Inclusa
39	820	840	Inclusa
40	840	860	Inclusa
41	860	880	Inclusa
42	880	900	Inclusa
43	900	920	Inclusa
44	920	940	Inclusa
45	940	960	Inclusa
46	960	980	Inclusa
47	980	1000	Inclusa
48	1000	1020	Inclusa
49	1040	1060	Inclusa
50	1060	1080	Inclusa
51	1080	1100	Inclusa
52	1100	1120	Inclusa
53	1120	1140	Inclusa
54	1140	1160	Inclusa
55	1160	1180	Inclusa

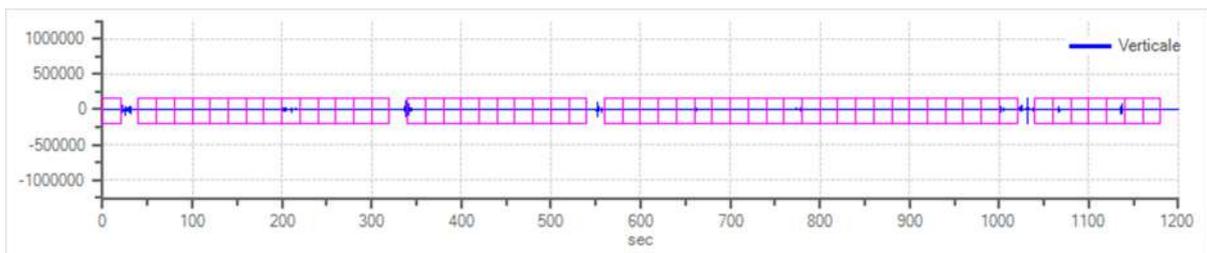
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

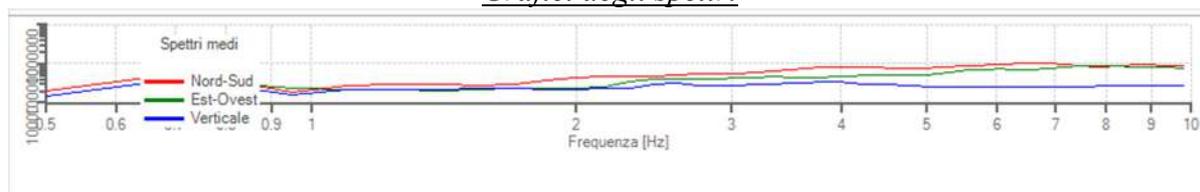


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

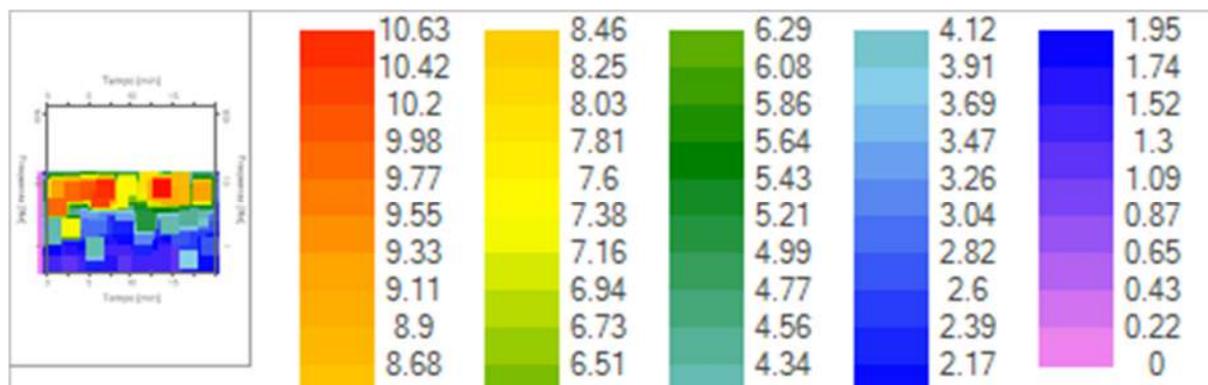


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

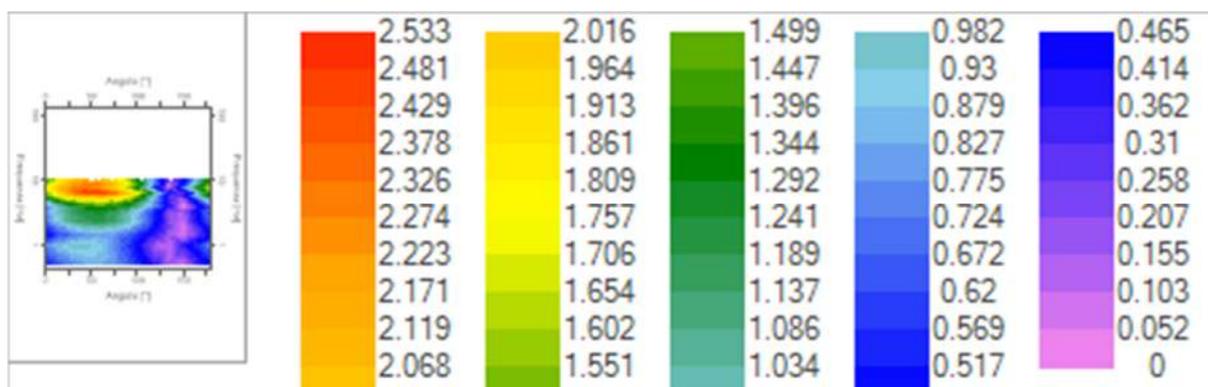
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

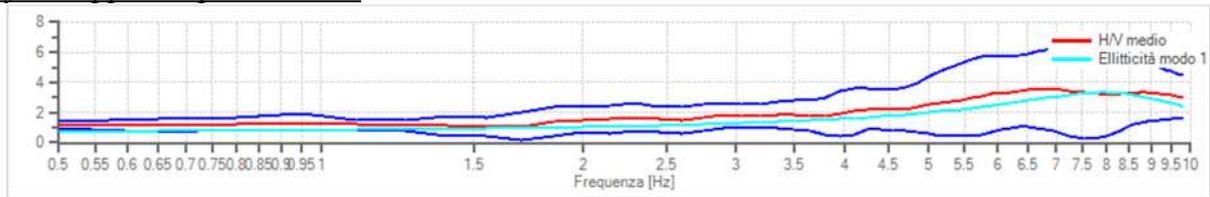
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 6.80 Hz  $\pm$  0.75 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

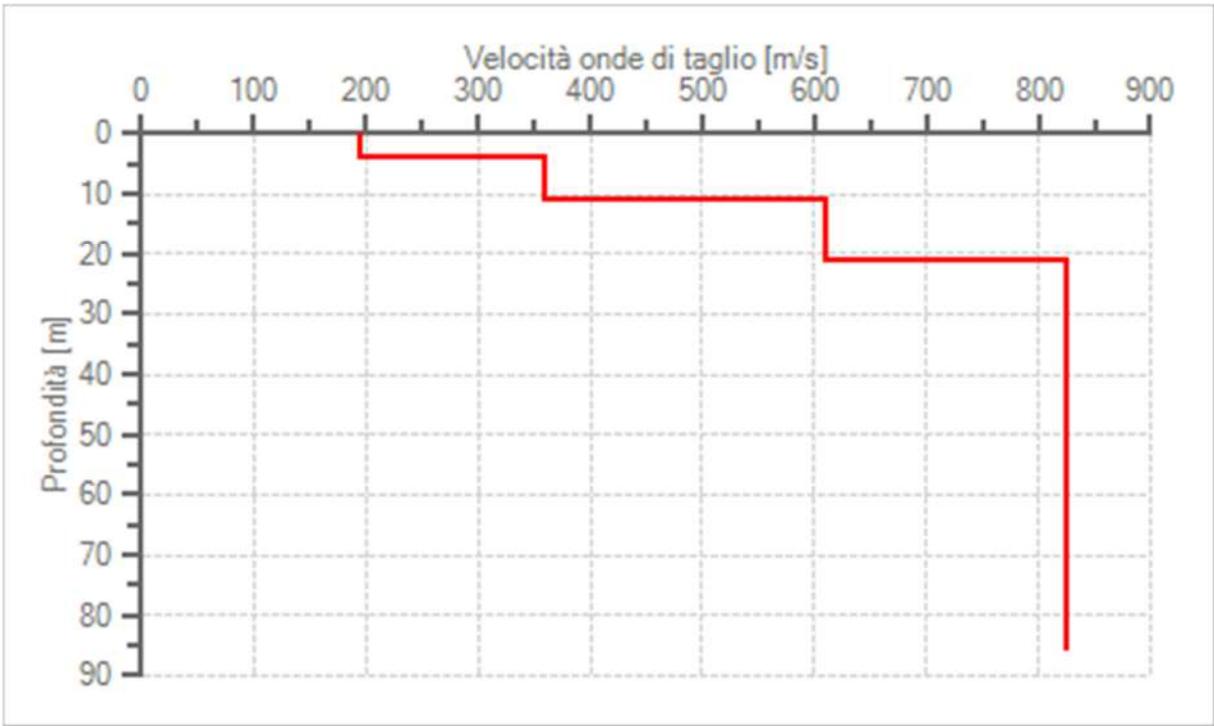
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati:	4
Frequenza del picco dell'ellitticità:	8.00 Hz
Valore di disadattamento:	-1.00
Valore Vseq:	372.67 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	4	18	0.3	195
2	4	7	19	0.3	360
3	11	10	20	0.3	610
4	21	65	22	0.3	825



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)

cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351

email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)

P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 9**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

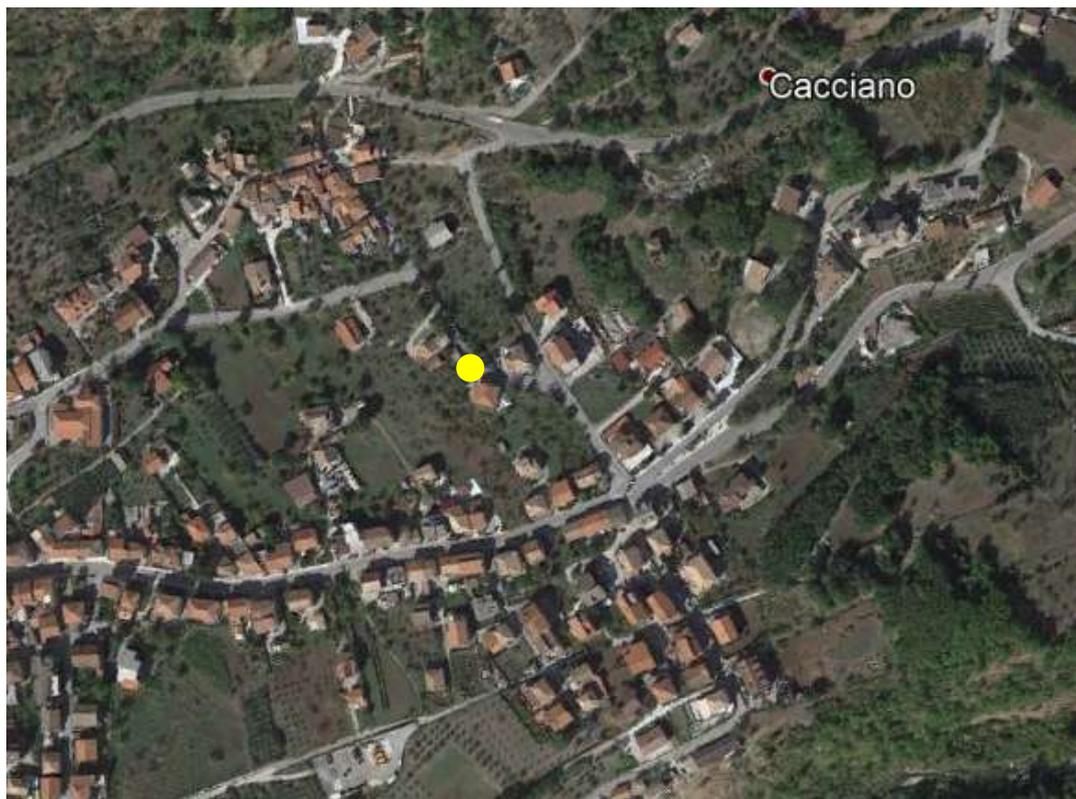
**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

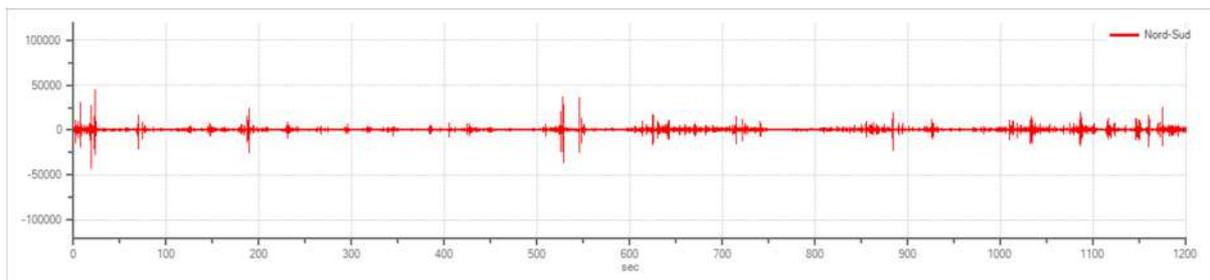
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

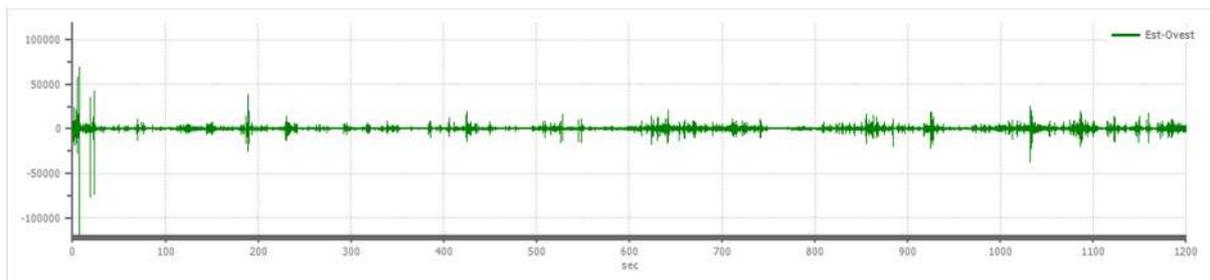
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

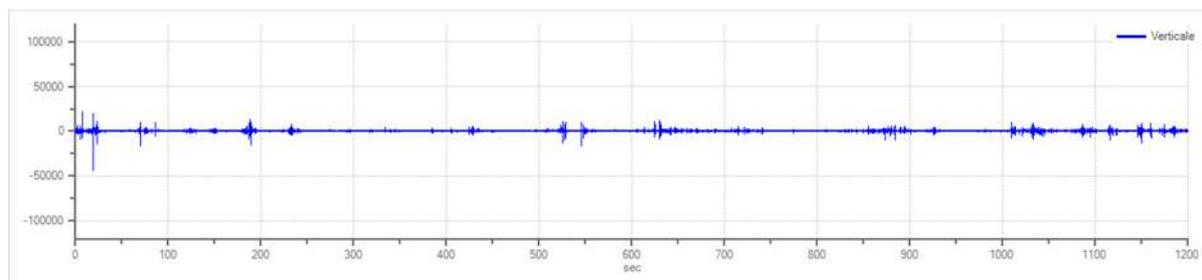
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

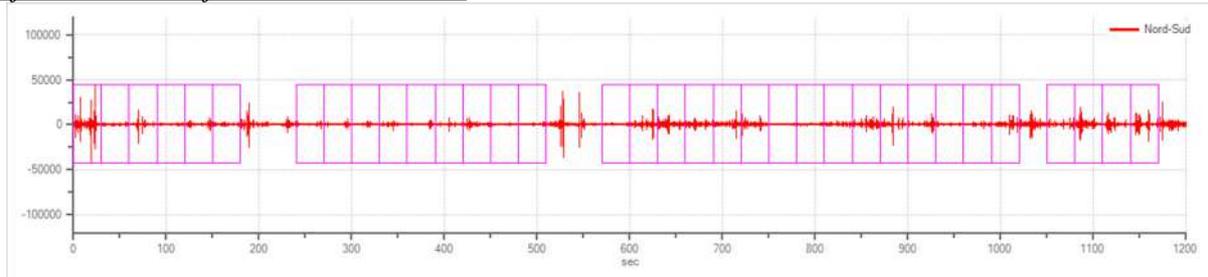
Numero totale finestre selezionate: 34  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 34  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

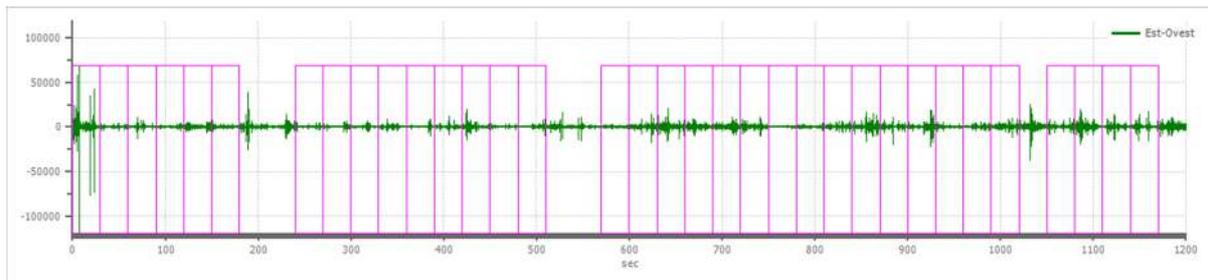
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	60	90	Inclusa
4	90	120	Inclusa
5	120	150	Inclusa
6	150	180	Inclusa
7	240	270	Inclusa
8	270	300	Inclusa
9	300	330	Inclusa
10	330	360	Inclusa
11	360	390	Inclusa
12	390	420	Inclusa
13	420	450	Inclusa
14	450	480	Inclusa
15	480	510	Inclusa
16	570	600	Inclusa
17	600	630	Inclusa
18	630	660	Inclusa
19	660	690	Inclusa
20	690	720	Inclusa
21	720	750	Inclusa
22	750	780	Inclusa
23	780	810	Inclusa
24	810	840	Inclusa
25	840	870	Inclusa
26	870	900	Inclusa

27	900	930	Inclusa
28	930	960	Inclusa
29	960	990	Inclusa
30	990	1020	Inclusa
31	1050	1080	Inclusa
32	1080	1110	Inclusa
33	1110	1140	Inclusa
34	1140	1170	Inclusa

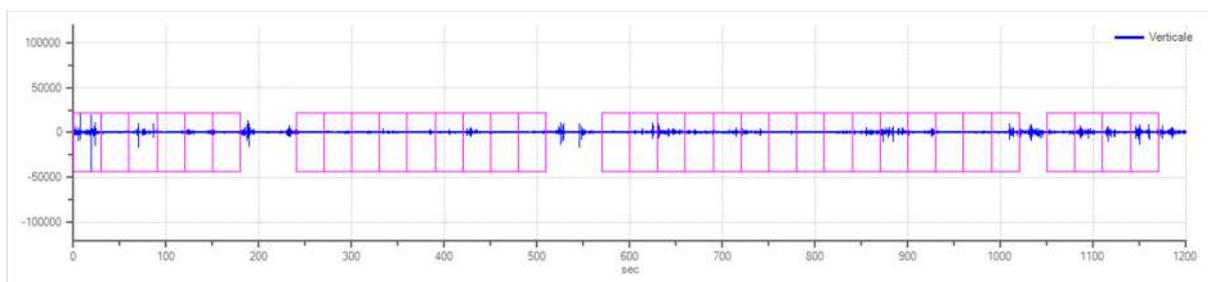
Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

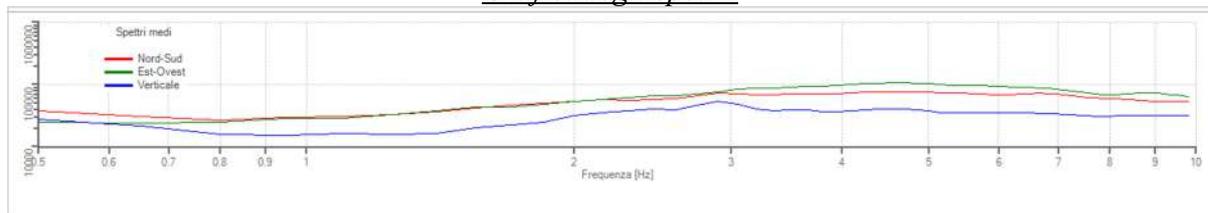


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

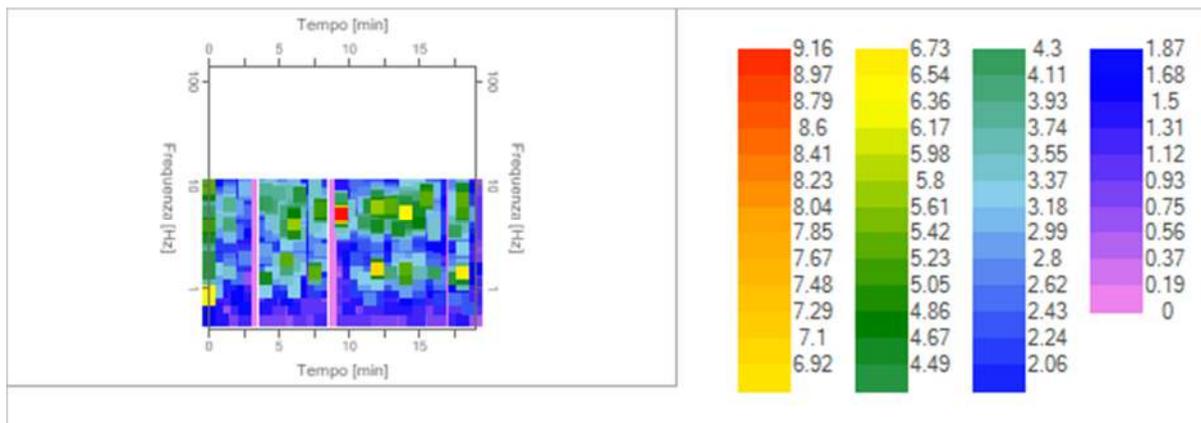


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

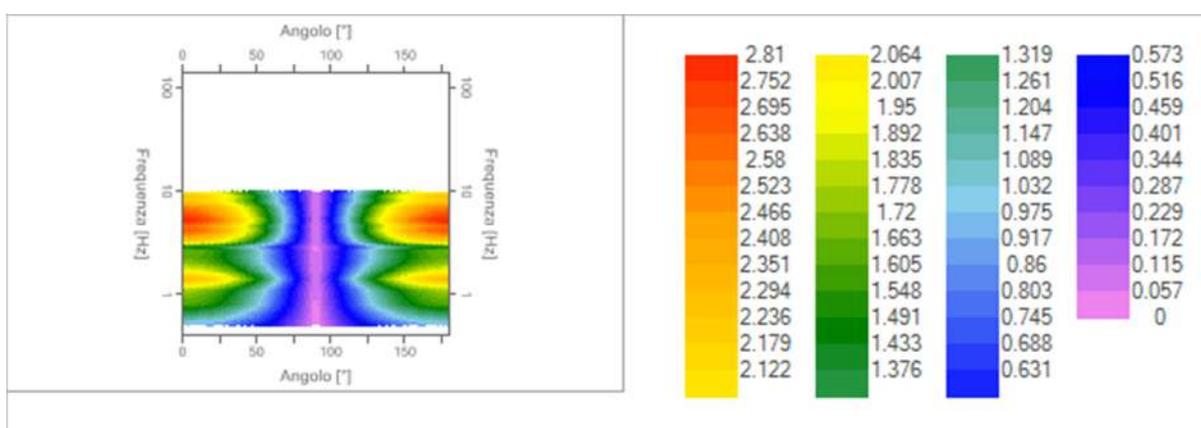
Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

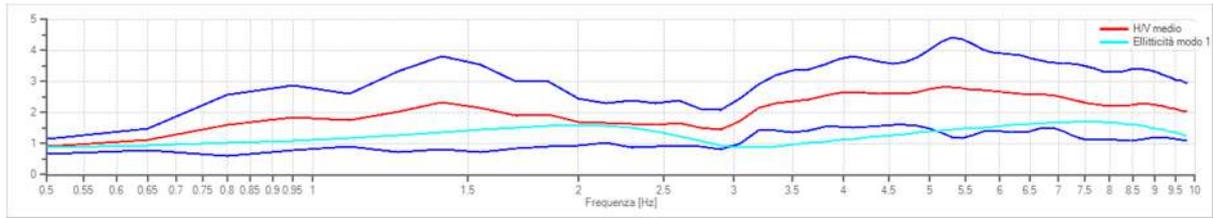
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Nessuna (Direzione EO)

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5.30 Hz  $\pm$  0.57 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

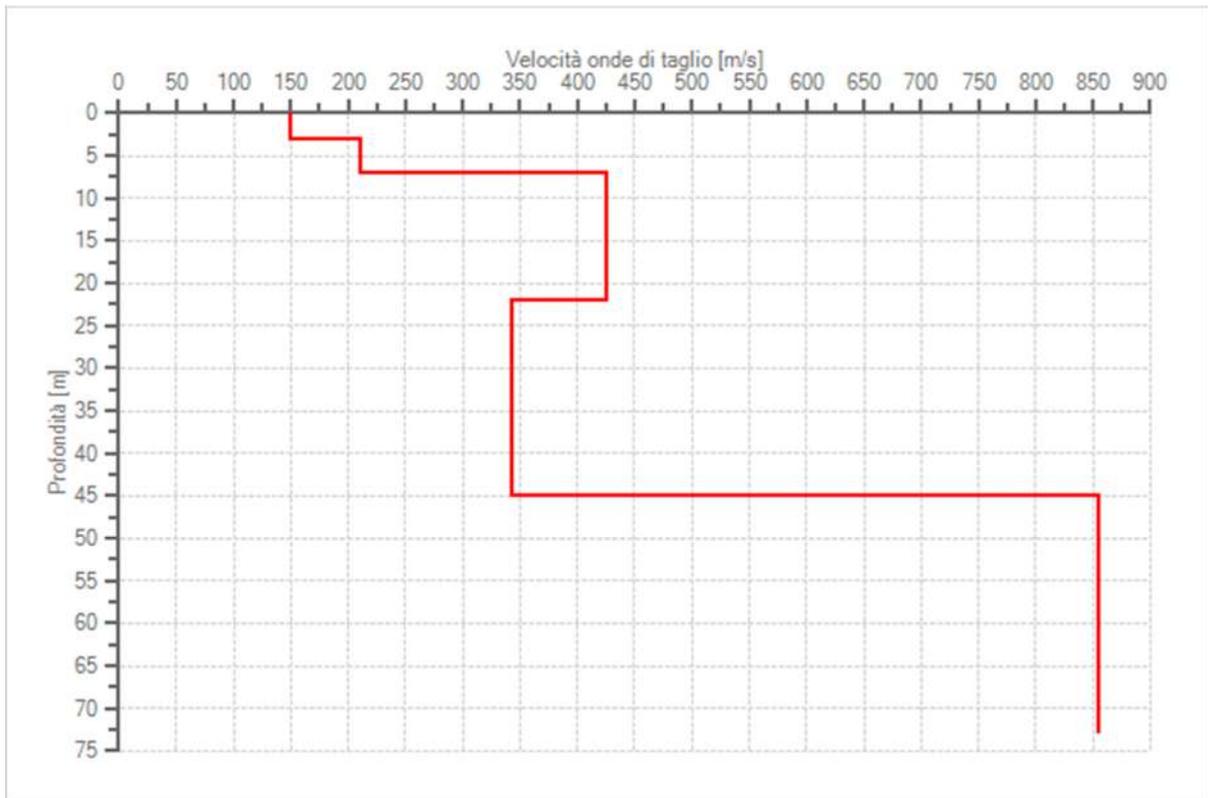
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati: 5  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 7.55 Hz  
 Valore di disadattamento: 0.12  
 Valore Vseq: 306.96 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	3	18	0.3	150
2	3	4	18	0.3	210
3	7	15	19	0.3	425
4	22	23	20	0.3	342
5	45	28	21	0.3	855



Profilo delle velocità delle onde di taglio.

*Davidelli*  
Soil Project  
S.p.A.  
Consorzio Autorizzato ai sensi del DPR 360/2001 art. 2  
Circolazione n. 7255 del 12/09/2013



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 10**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

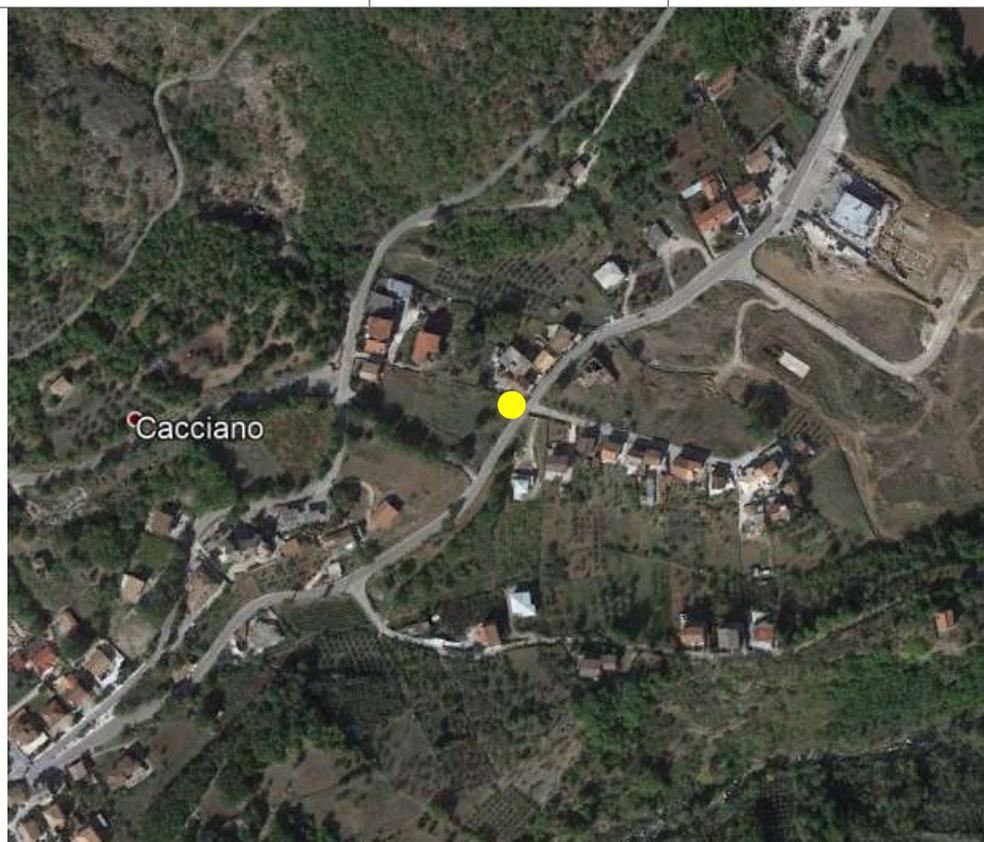
**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## Dati generali

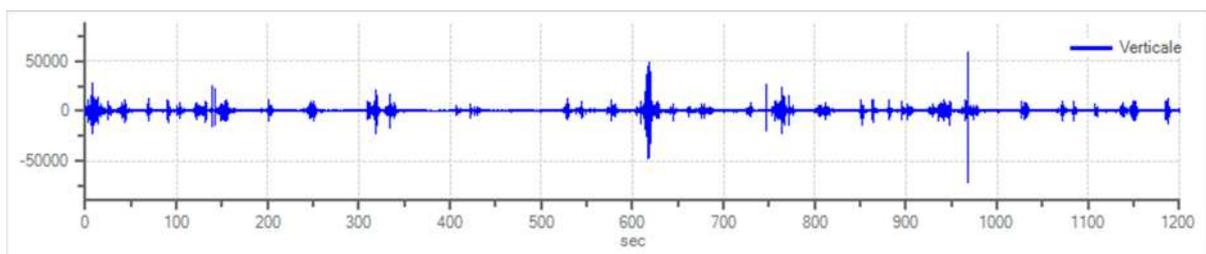
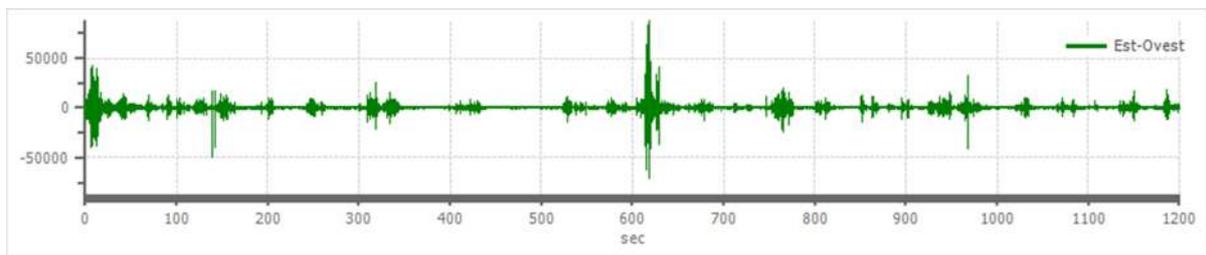
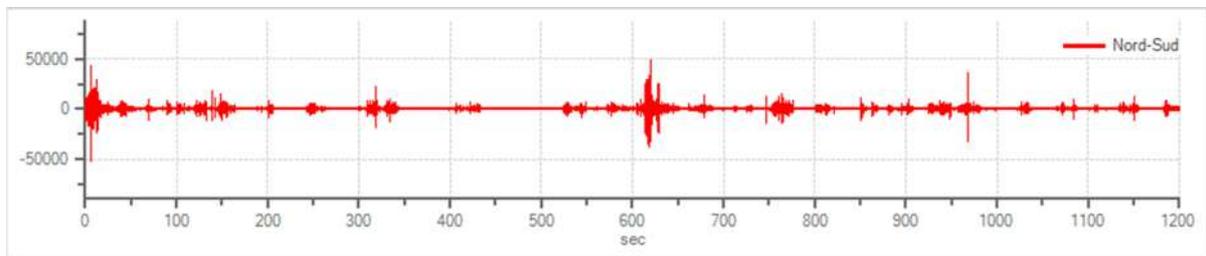
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Grafici tracce:



## Traccia in direzione Verticale

### Finestre selezionate

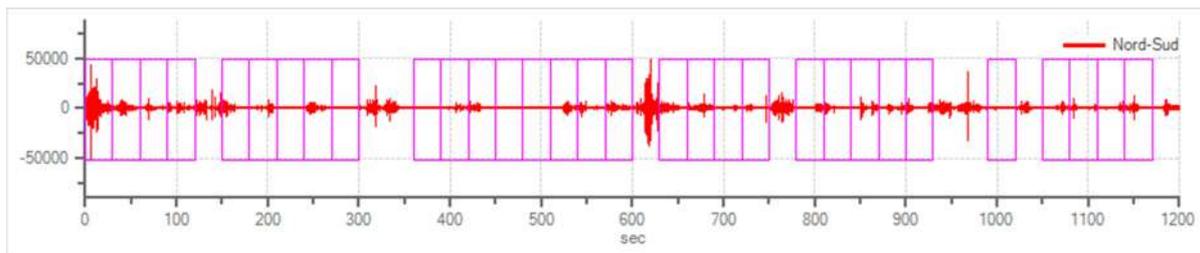
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre selezionate: 31  
Numero finestre incluse nel calcolo: 27  
Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
Tipo di lisciamento: Konno & Ohmachi  
Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
Coefficiente di banda: 40.00

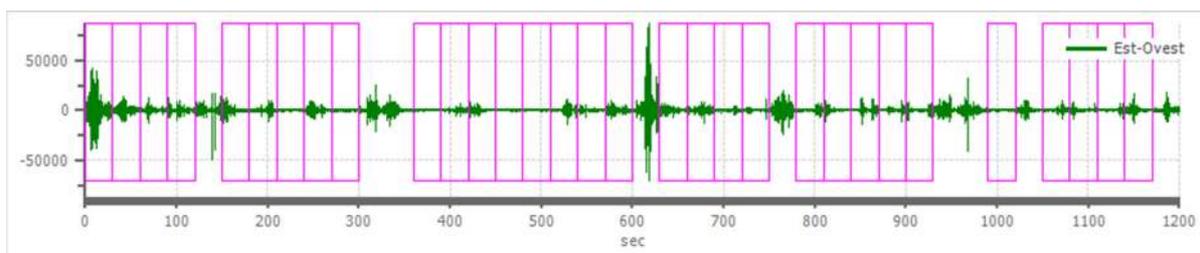
#### Tabella finestre:

Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	60	90	Inclusa
4	90	120	Inclusa
5	150	180	Inclusa
6	180	210	Inclusa
7	210	240	Inclusa
8	240	270	Inclusa
9	270	300	Inclusa
10	360	390	Inclusa
11	390	420	Esclusa
12	420	450	Esclusa
13	450	480	Esclusa
14	480	510	Esclusa
15	510	540	Inclusa
16	540	570	Inclusa
17	570	600	Inclusa
18	630	660	Inclusa
19	660	690	Inclusa
20	690	720	Inclusa
21	720	750	Inclusa
22	780	810	Inclusa
23	810	840	Inclusa
24	840	870	Inclusa
25	870	900	Inclusa
26	900	930	Inclusa
27	990	1020	Inclusa
28	1050	1080	Inclusa
29	1080	1110	Inclusa
30	1110	1140	Inclusa
31	1140	1170	Inclusa

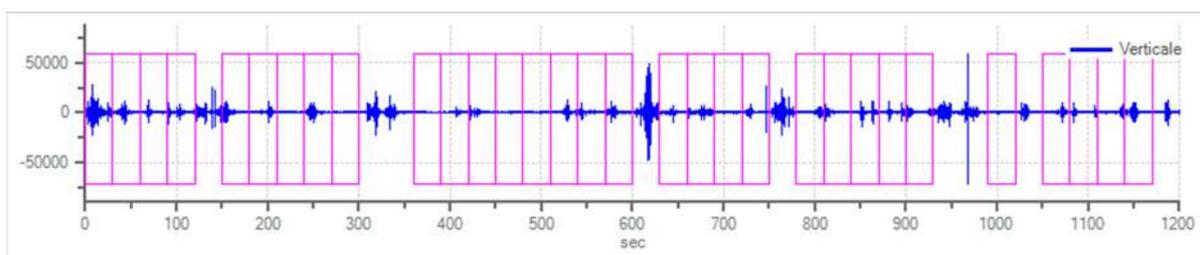
#### Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

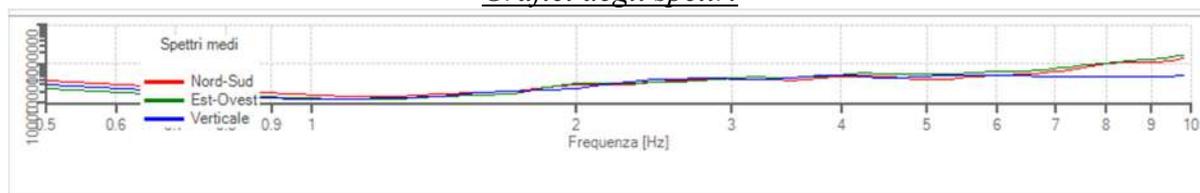


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

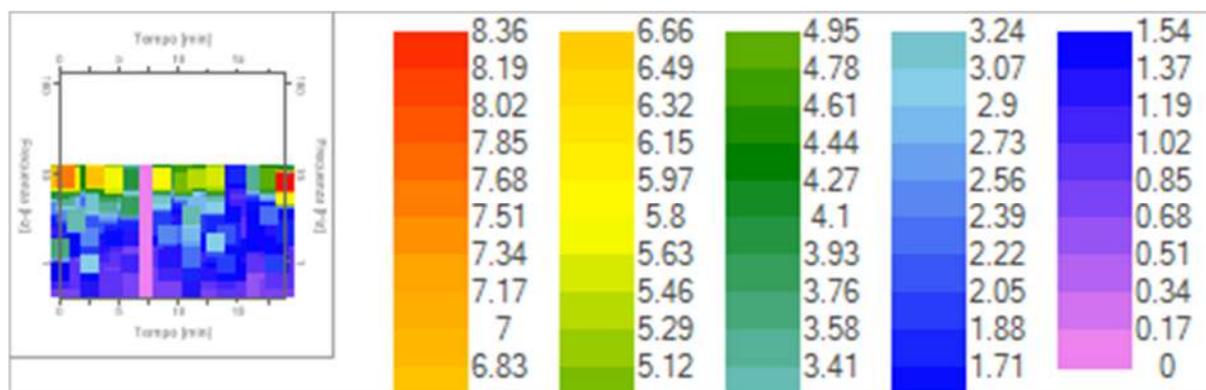


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

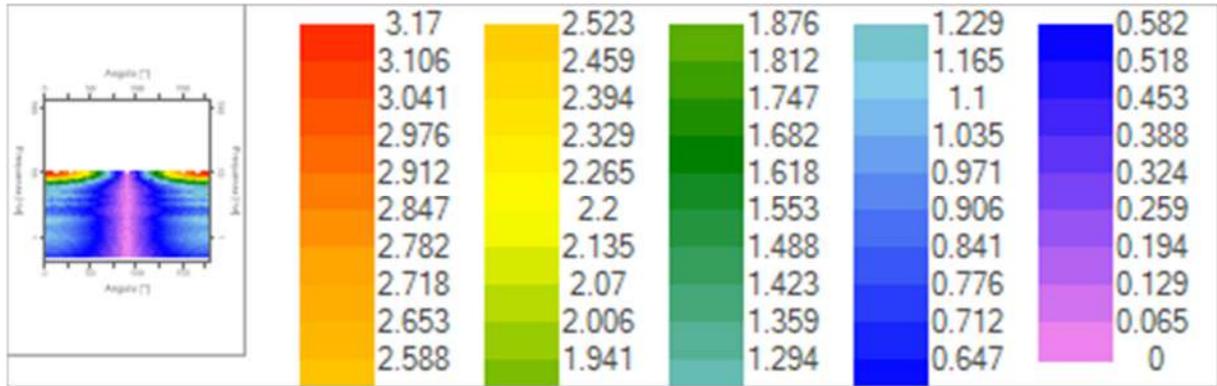
### Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

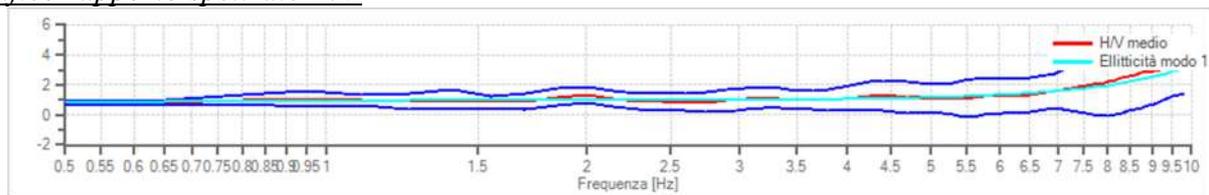
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Nessuna (Direzione EO)

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 9.80 Hz  $\pm$  0.54 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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

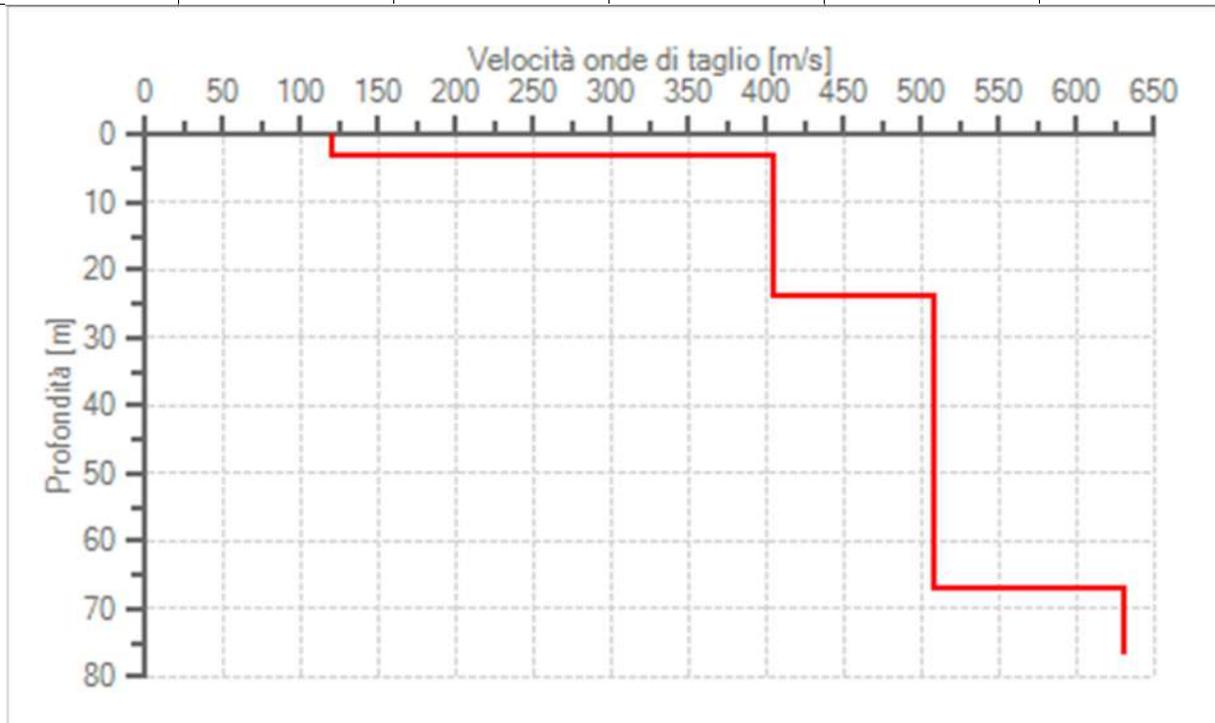
## Modello stratigrafico

### Dati riepilogativi:

Numero strati: 4  
Frequenza del picco dell'ellitticità: 9.80 Hz  
Valore di disadattamento: 0.10  
Valore Vseq: 338.27 m/s

### Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	3	18	0.3	120
2	3	21	19	0.3	405
3	24	43	20	0.3	507
4	67	10	20	0.3	630



Profilo delle velocità delle onde di taglio.





## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: info@soilprojectsas.it  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 1**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

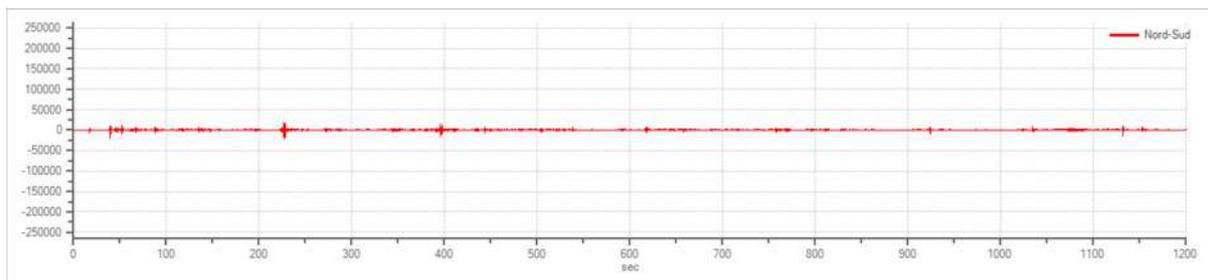
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

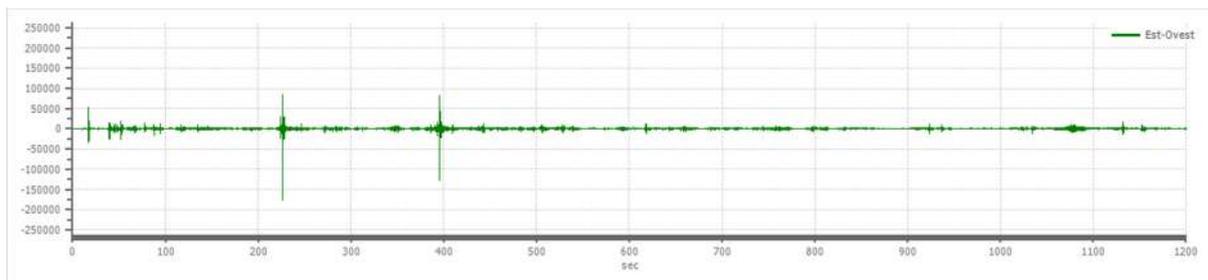
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

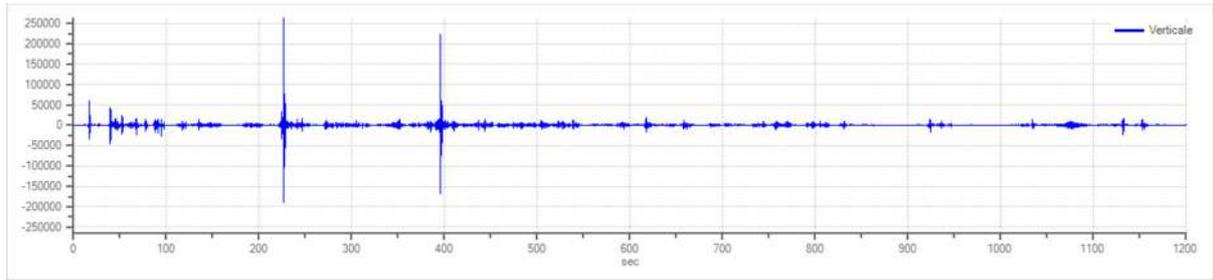
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

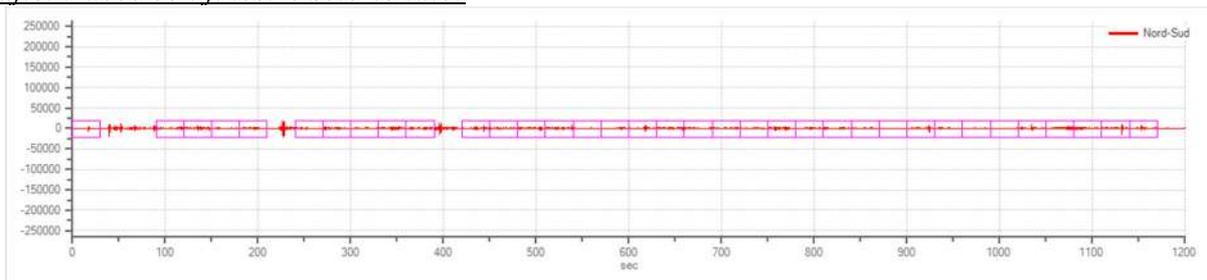
Numero totale finestre selezionate: 35  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 35  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

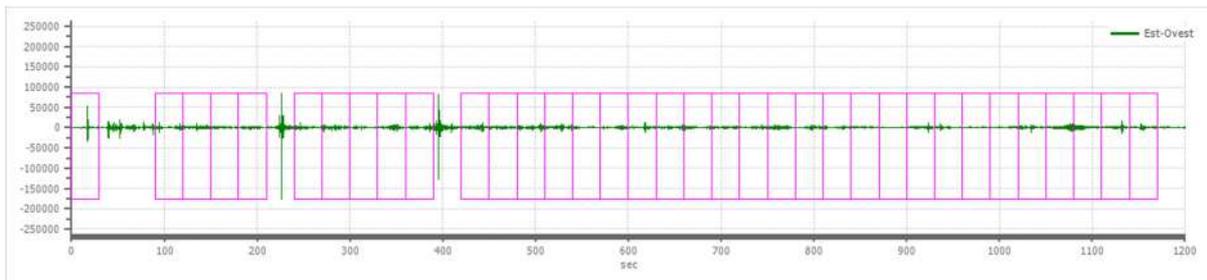
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	90	120	Inclusa
3	120	150	Inclusa
4	150	180	Inclusa
5	180	210	Inclusa
6	240	270	Inclusa
7	270	300	Inclusa
8	300	330	Inclusa
9	330	360	Inclusa
10	360	390	Inclusa
11	420	450	Inclusa
12	450	480	Inclusa
13	480	510	Inclusa
14	510	540	Inclusa
15	540	570	Inclusa
16	570	600	Inclusa
17	600	630	Inclusa
18	630	660	Inclusa
19	660	690	Inclusa
20	690	720	Inclusa
21	720	750	Inclusa
22	750	780	Inclusa
23	780	810	Inclusa
24	810	840	Inclusa
25	840	870	Inclusa
26	870	900	Inclusa

27	900	930	Inclusa
28	930	960	Inclusa
29	960	990	Inclusa
30	990	1020	Inclusa
31	1020	1050	Inclusa
32	1050	1080	Inclusa
33	1080	1110	Inclusa
34	1110	1140	Inclusa
35	1140	1170	Inclusa

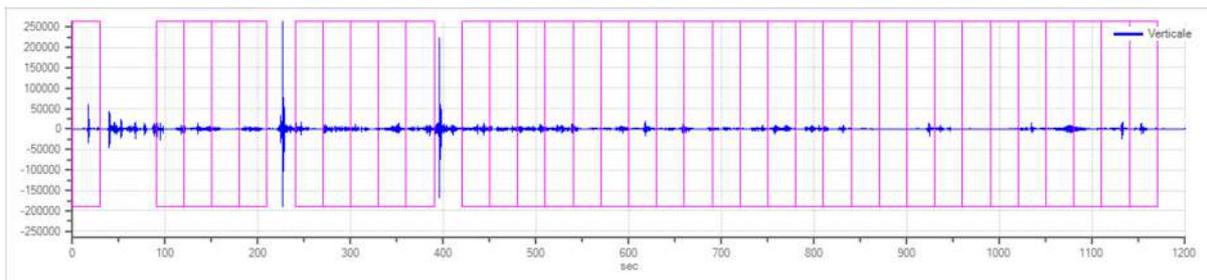
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

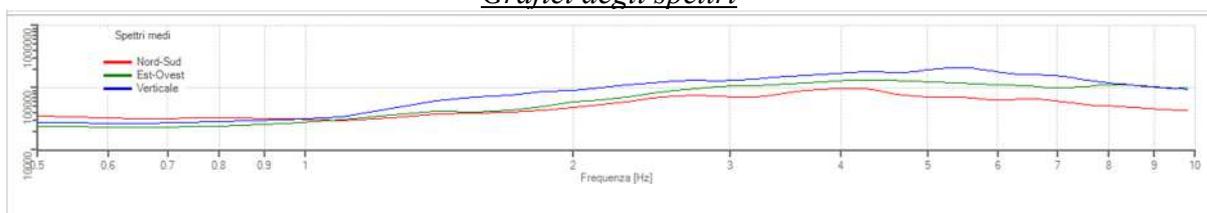


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

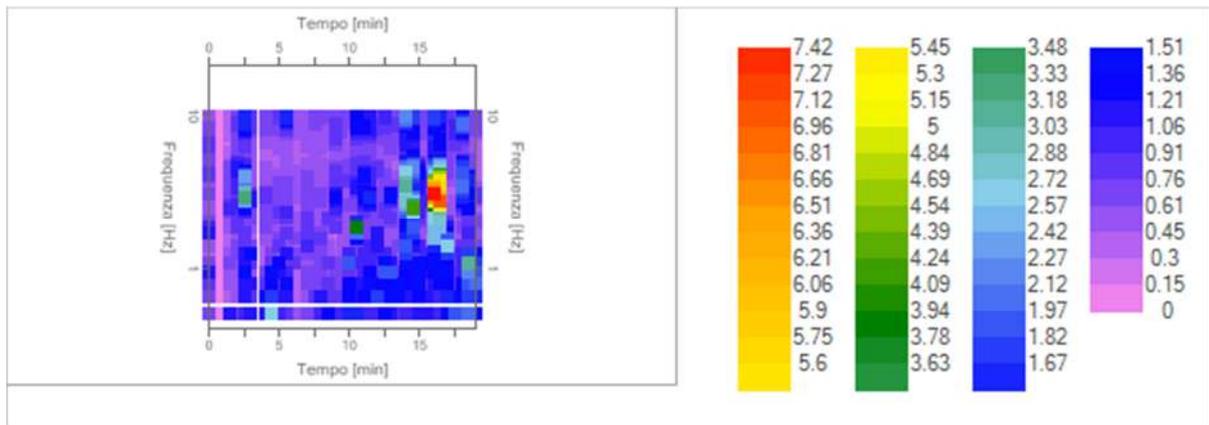


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

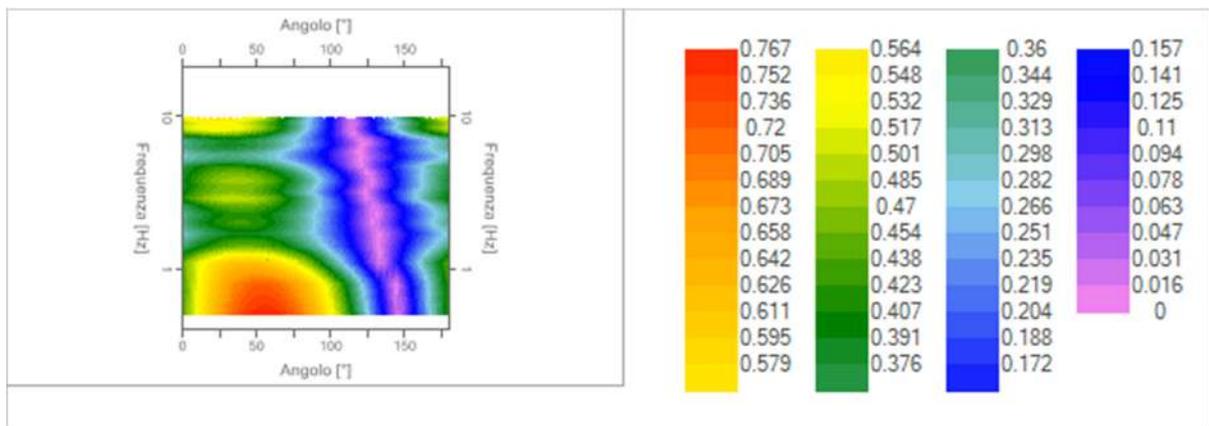
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

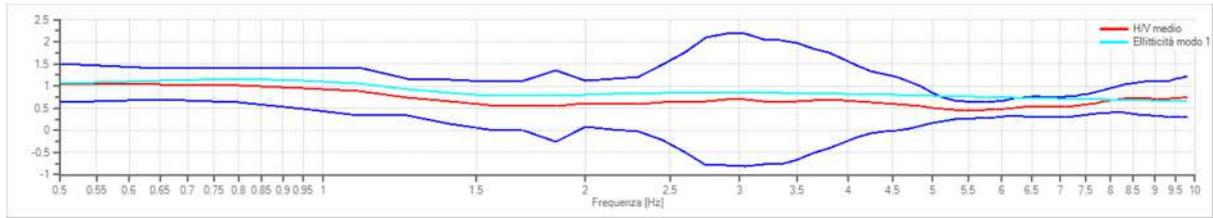
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 0.50 Hz  $\pm$  0.40 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

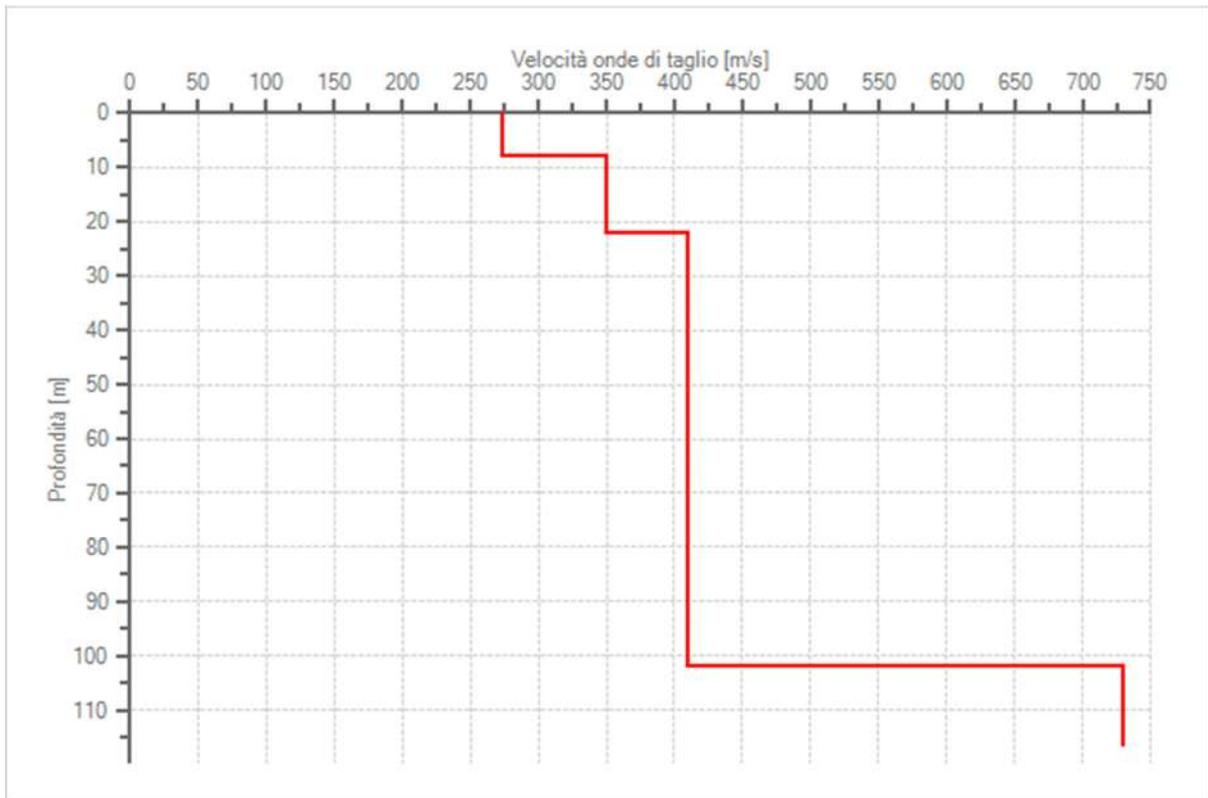
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati: 4  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 0.80 Hz  
 Valore di disadattamento: -1.00  
 Valore Vseq: 338.18 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	8	18	0.3	274
2	8	14	18	0.3	350
3	22	80	19	0.3	410
4	102	15	20	0.3	730



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.5
Mappa stazionarietà	.6
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.6
Grafico H/V	.7
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.7
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)

cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351

email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)

P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 2**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo  $V_{s30}$  attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamiento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo  $V_{s30}$ .

## Dati generali

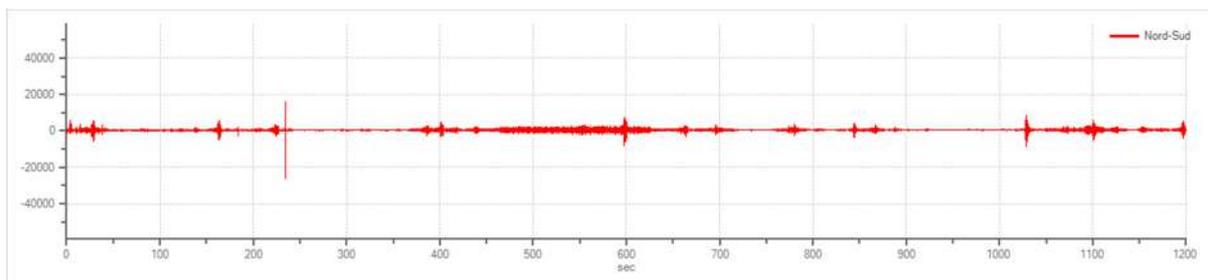
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

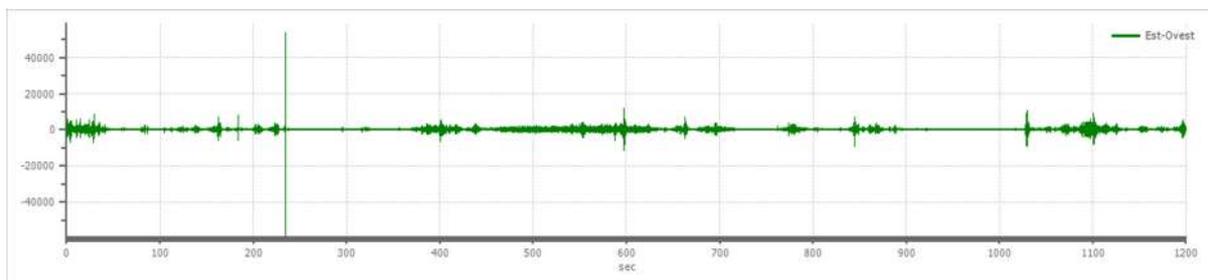
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

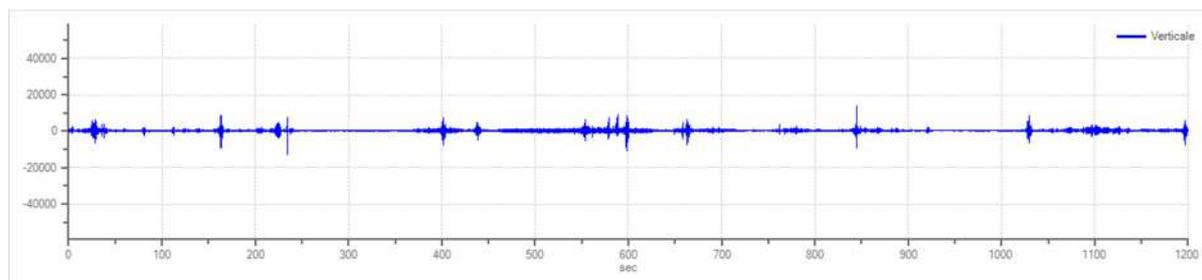
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

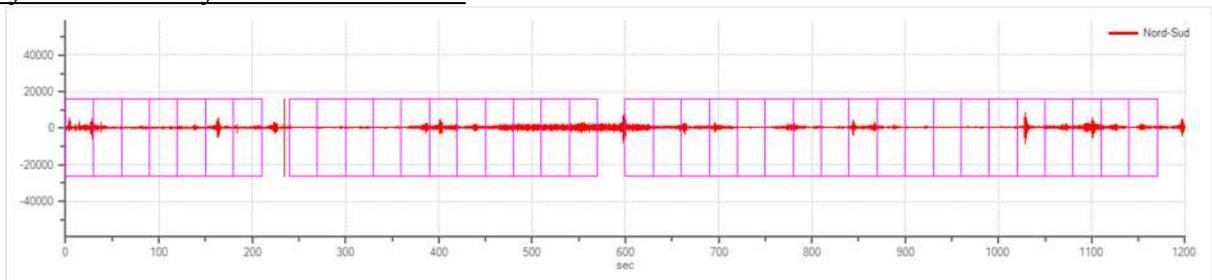
Numero totale finestre selezionate: 37  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 37  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

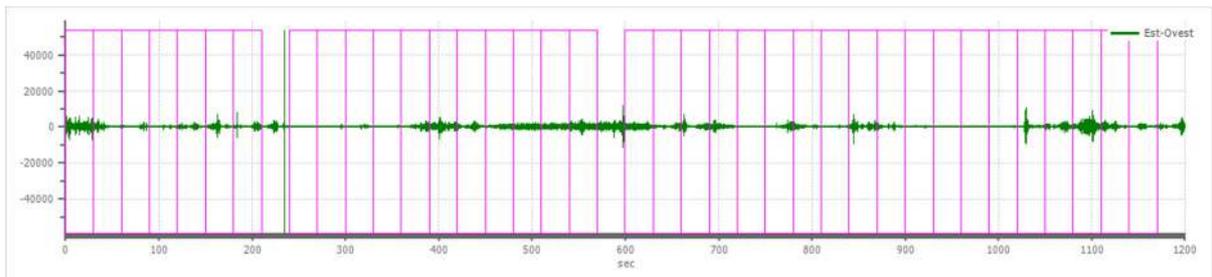
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	60	90	Inclusa
4	90	120	Inclusa
5	120	150	Inclusa
6	150	180	Inclusa
7	180	210	Inclusa
8	240	270	Inclusa
9	270	300	Inclusa
10	300	330	Inclusa
11	330	360	Inclusa
12	360	390	Inclusa
13	390	420	Inclusa
14	420	450	Inclusa
15	450	480	Inclusa
16	480	510	Inclusa
17	510	540	Inclusa
18	540	570	Inclusa
19	600	630	Inclusa
20	630	660	Inclusa
21	660	690	Inclusa
22	690	720	Inclusa
23	720	750	Inclusa
24	750	780	Inclusa
25	780	810	Inclusa
26	810	840	Inclusa

27	840	870	Inclusa
28	870	900	Inclusa
29	900	930	Inclusa
30	930	960	Inclusa
31	960	990	Inclusa
32	990	1020	Inclusa
33	1020	1050	Inclusa
34	1050	1080	Inclusa
35	1080	1110	Inclusa
36	1110	1140	Inclusa
37	1140	1170	Inclusa

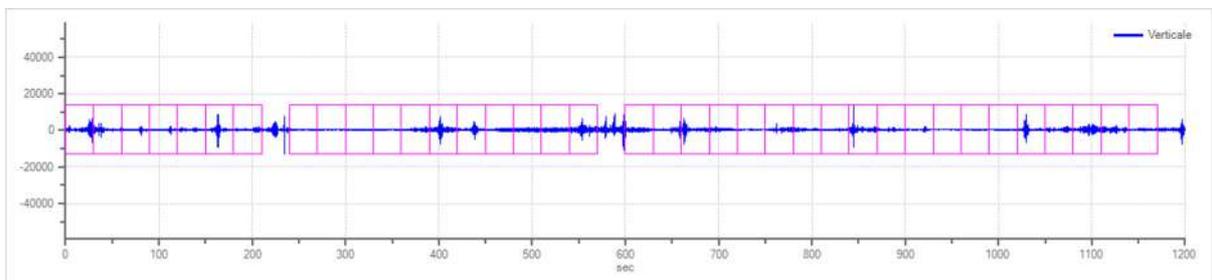
Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

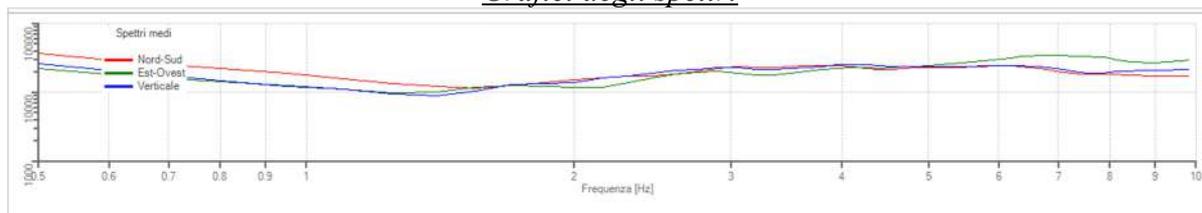


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

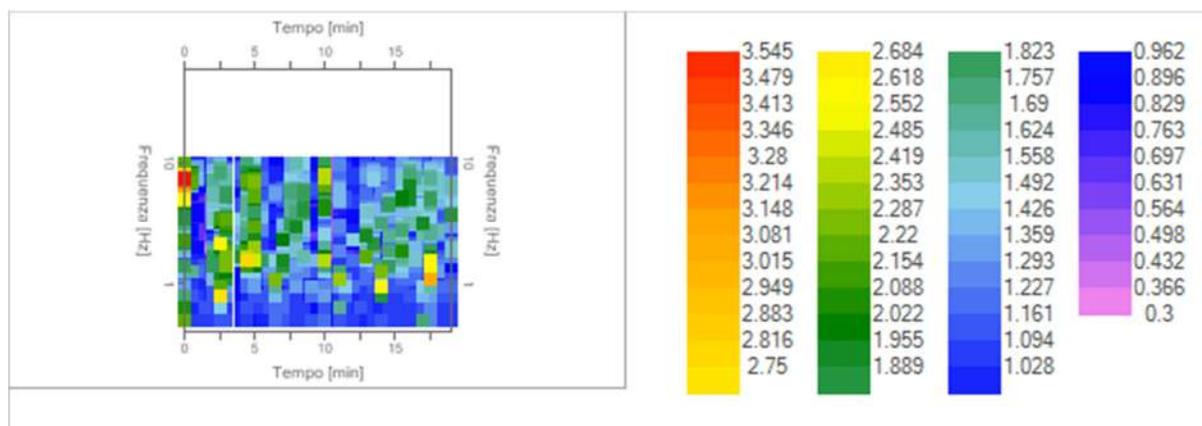


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

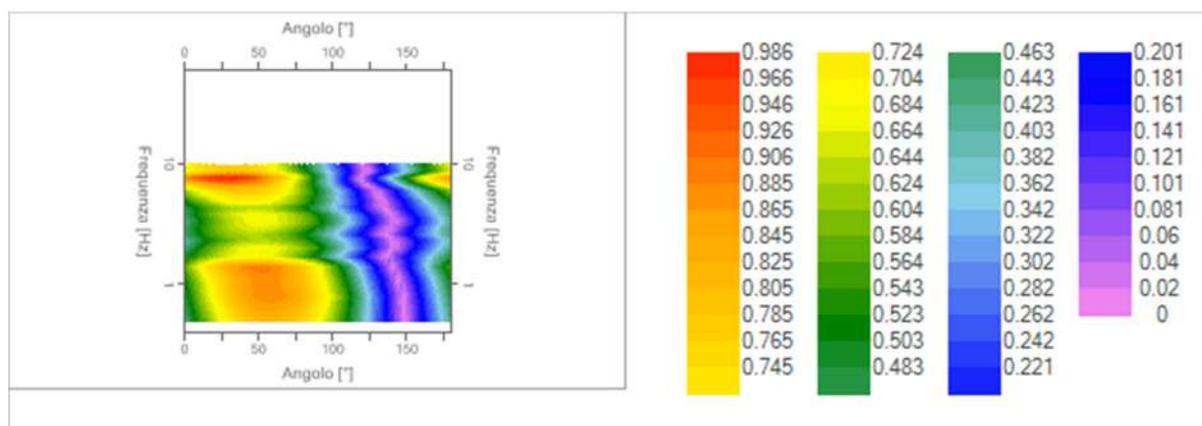
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

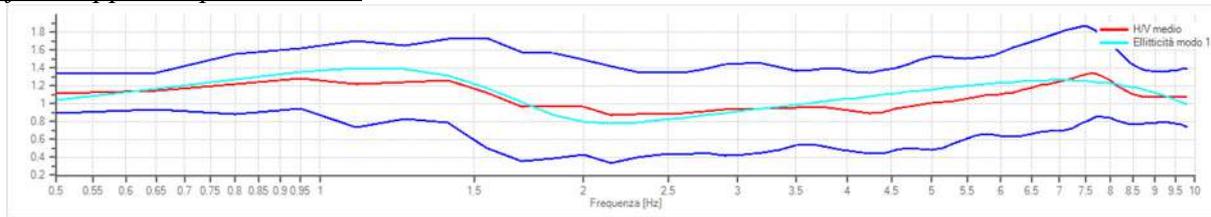
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima:	10.00 Hz
Frequenza minima:	0.50 Hz
Passo frequenze:	0.15 Hz
Tipo lisciamo::	Konno & Ohmachi
Percentuale di lisciamo:	10.00 %
Tipo di somma direzionale:	Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 7.55 Hz  $\pm$ 0.39 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

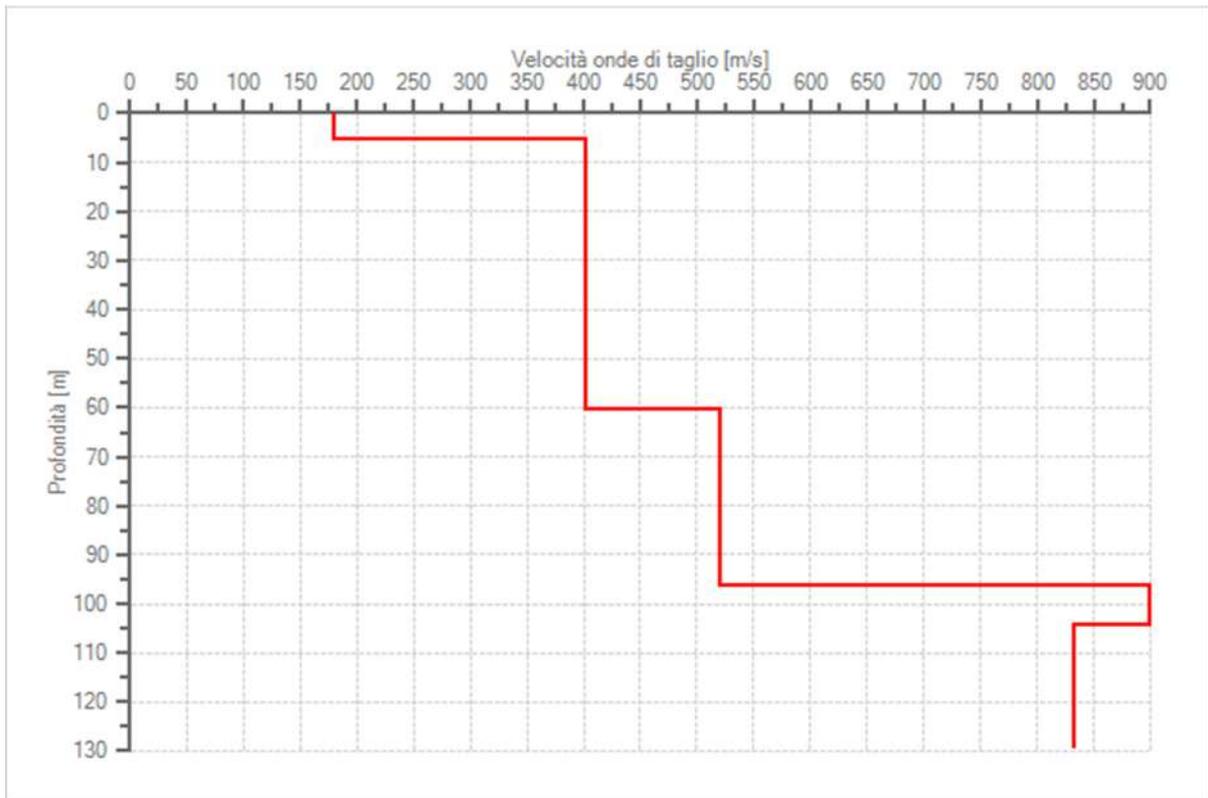
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati: 5  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 1.10 Hz  
 Valore di disadattamento: 0.07  
 Valore Vseq: 327.32 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5.5	18	0.3	180
2	5.5	55	18	0.3	401
3	60.5	36	19	0.3	520
4	96.5	8	20	0.3	900
5	104.5	25	21	0.3	833



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.5
Mappa stazionarietà	.6
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.6
Grafico H/V	.7
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.7
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 3**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo  $V_{s30}$  attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamiento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo  $V_{s30}$ .

## Dati generali

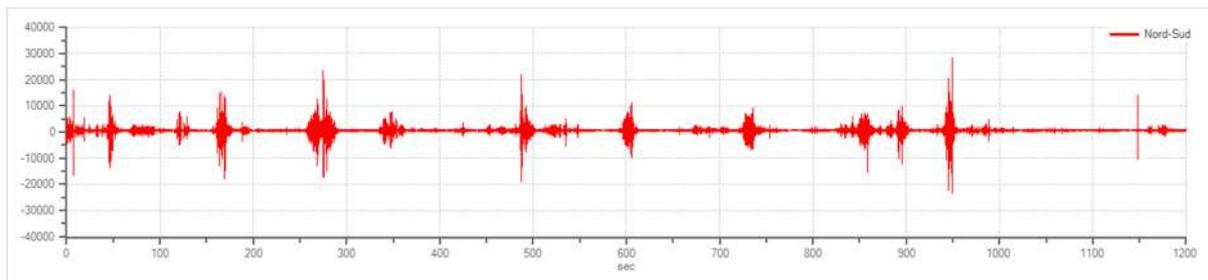
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

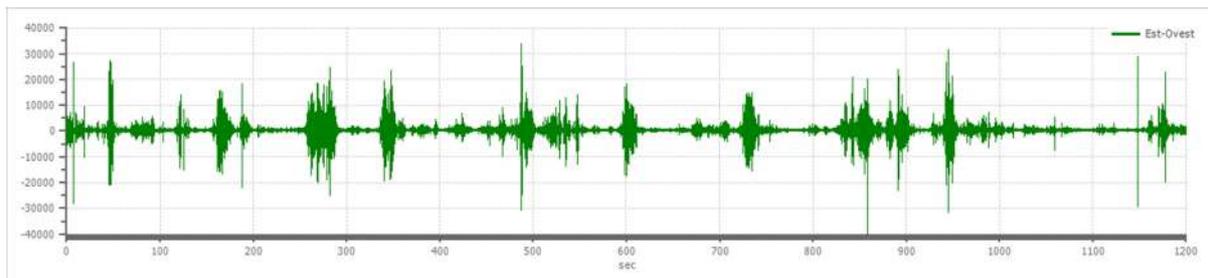
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

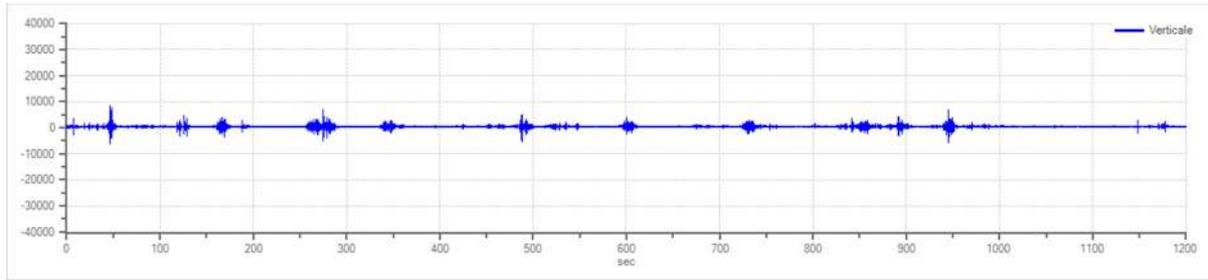
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

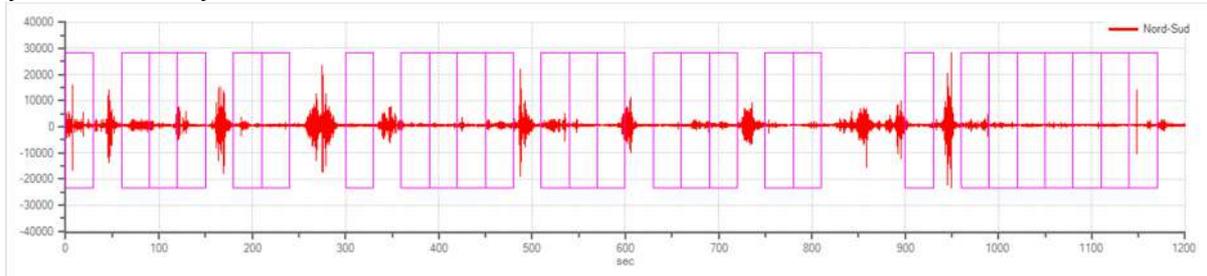
### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre selezionate: 27  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 27  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

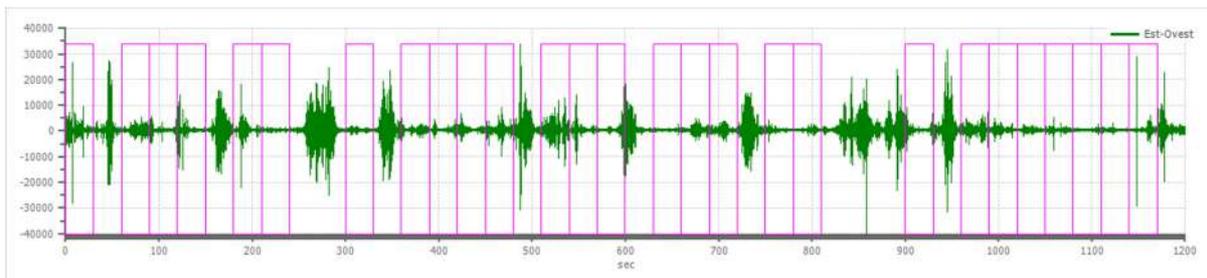
### Tabella finestre:

Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	60	90	Inclusa
3	90	120	Inclusa
4	120	150	Inclusa
5	180	210	Inclusa
6	210	240	Inclusa
7	300	330	Inclusa
8	360	390	Inclusa
9	390	420	Inclusa
10	420	450	Inclusa
11	450	480	Inclusa
12	510	540	Inclusa
13	540	570	Inclusa
14	570	600	Inclusa
15	630	660	Inclusa
16	660	690	Inclusa
17	690	720	Inclusa
18	750	780	Inclusa
19	780	810	Inclusa
20	900	930	Inclusa
21	960	990	Inclusa
22	990	1020	Inclusa
23	1020	1050	Inclusa
24	1050	1080	Inclusa
25	1080	1110	Inclusa
26	1110	1140	Inclusa

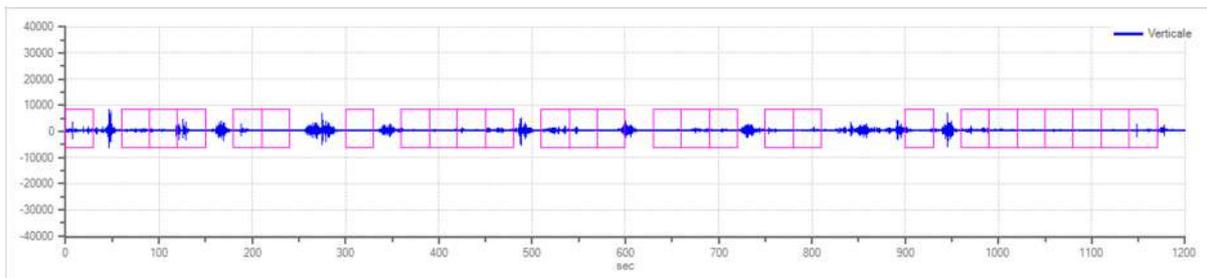
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

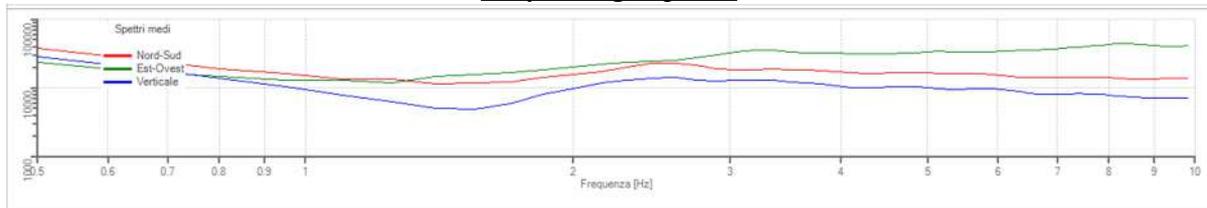


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

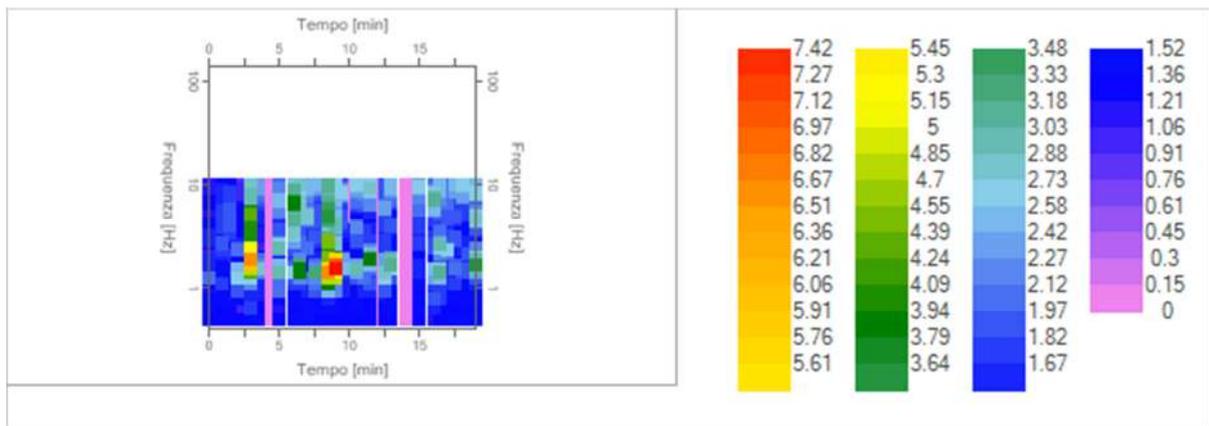


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

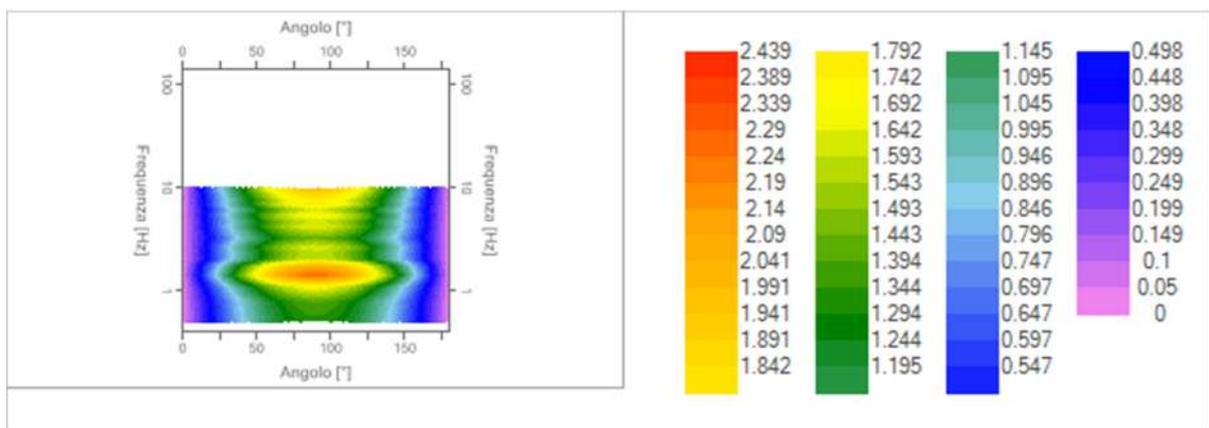
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

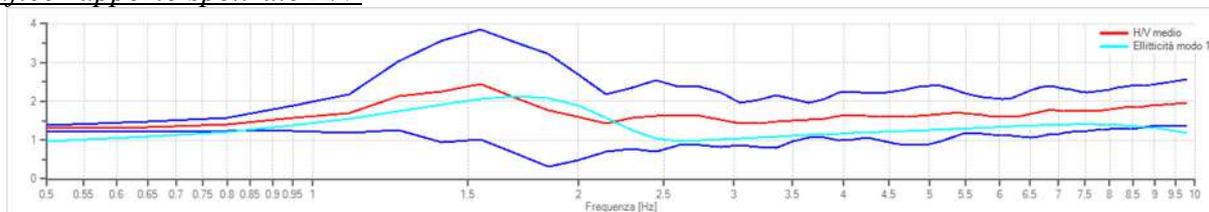
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Nessuna (Direzione NS)

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 1.55 Hz  $\pm$  0.58 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



## Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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

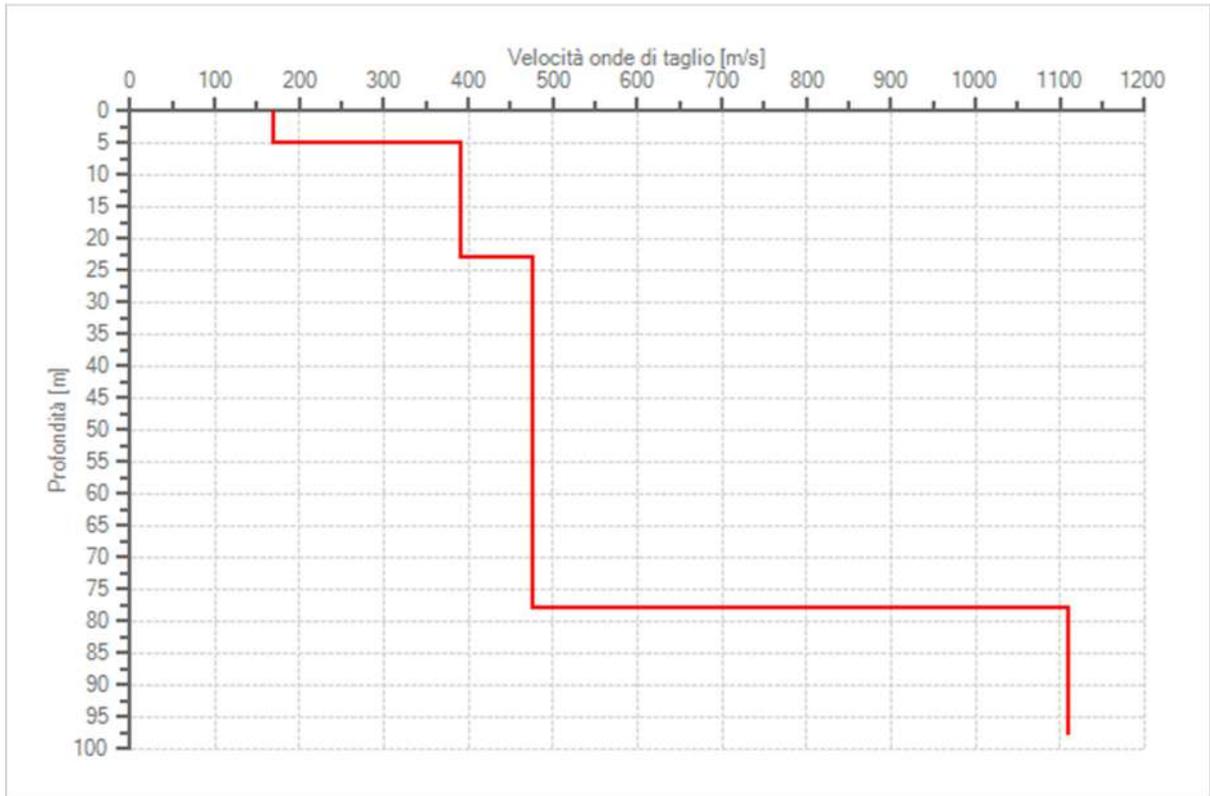
### Modello stratigrafico

#### Dati riepilogativi:

Numero strati:	4
Frequenza del picco dell'ellitticità:	1.70 Hz
Valore di disadattamento:	0.27
Valore Vseq:	332.22 m/s

#### Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5	17	0.3	170
2	5	18	18	0.3	390
3	23	55	21	0.3	475
4	78	20	22	0.3	1110



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.5
Mappa stazionarietà	.5
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.6
Grafico H/V	.6
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.7
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: info@soilprojectsas.it  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 4**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

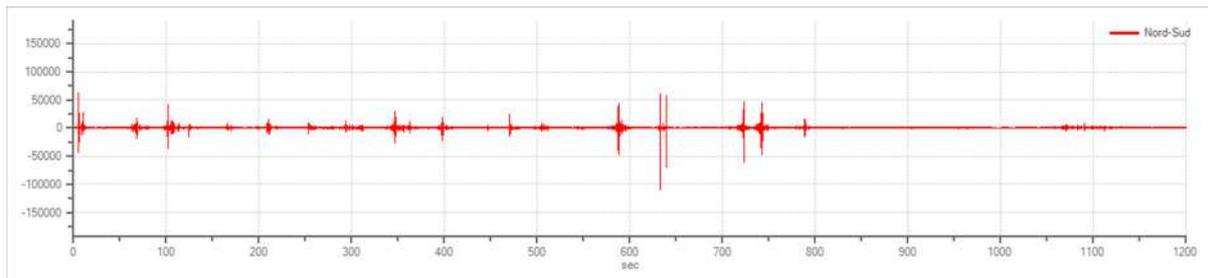
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

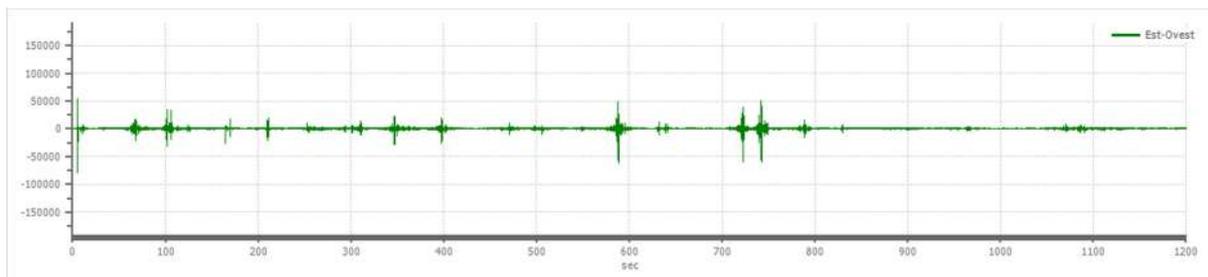
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

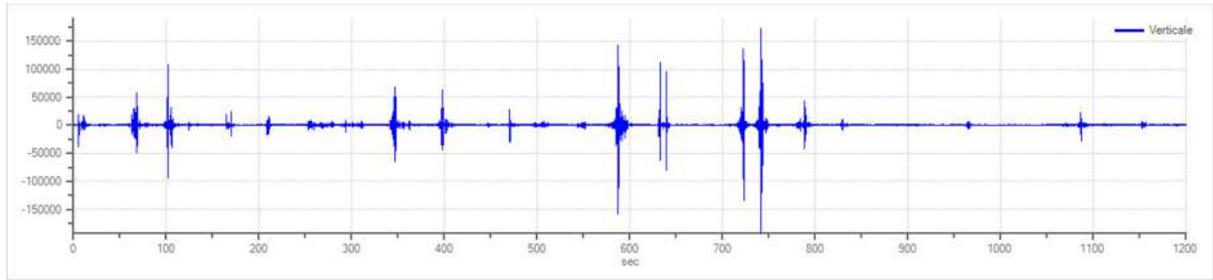
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

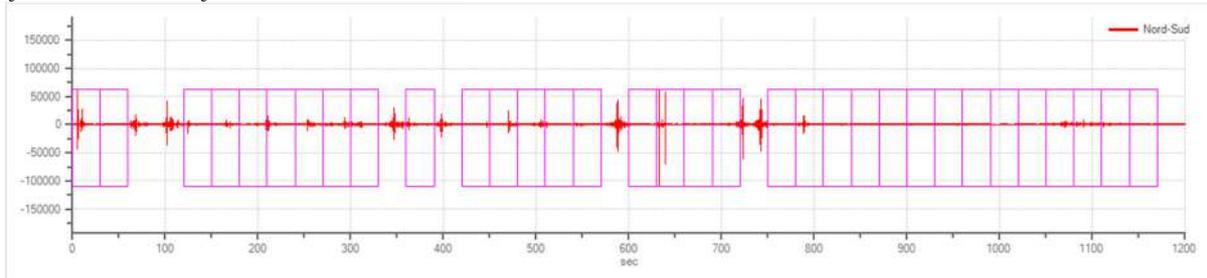
Numero totale finestre selezionate: 33  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 33  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

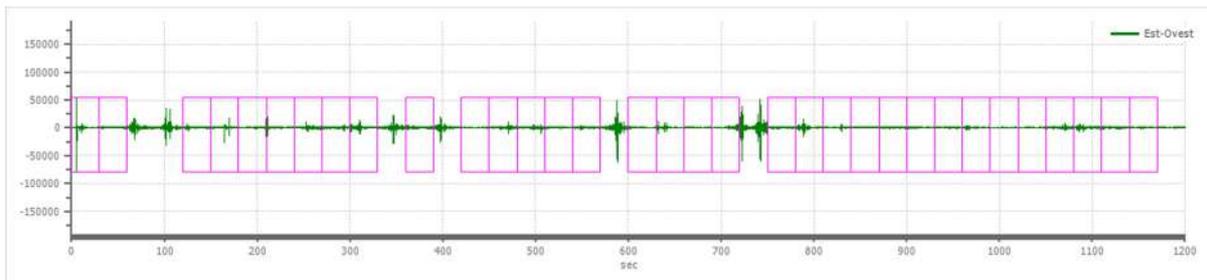
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	120	150	Inclusa
4	150	180	Inclusa
5	180	210	Inclusa
6	210	240	Inclusa
7	240	270	Inclusa
8	270	300	Inclusa
9	300	330	Inclusa
10	360	390	Inclusa
11	420	450	Inclusa
12	450	480	Inclusa
13	480	510	Inclusa
14	510	540	Inclusa
15	540	570	Inclusa
16	600	630	Inclusa
17	630	660	Inclusa
18	660	690	Inclusa
19	690	720	Inclusa
20	750	780	Inclusa
21	780	810	Inclusa
22	810	840	Inclusa
23	840	870	Inclusa
24	870	900	Inclusa
25	900	930	Inclusa
26	930	960	Inclusa

27	960	990	Inclusa
28	990	1020	Inclusa
29	1020	1050	Inclusa
30	1050	1080	Inclusa
31	1080	1110	Inclusa
32	1110	1140	Inclusa
33	1140	1170	Inclusa

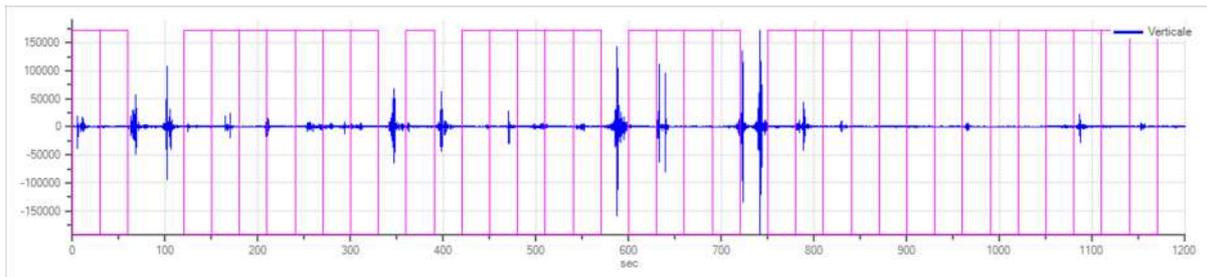
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

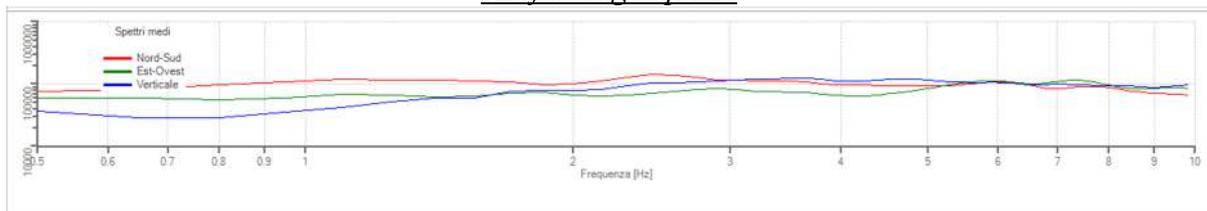


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

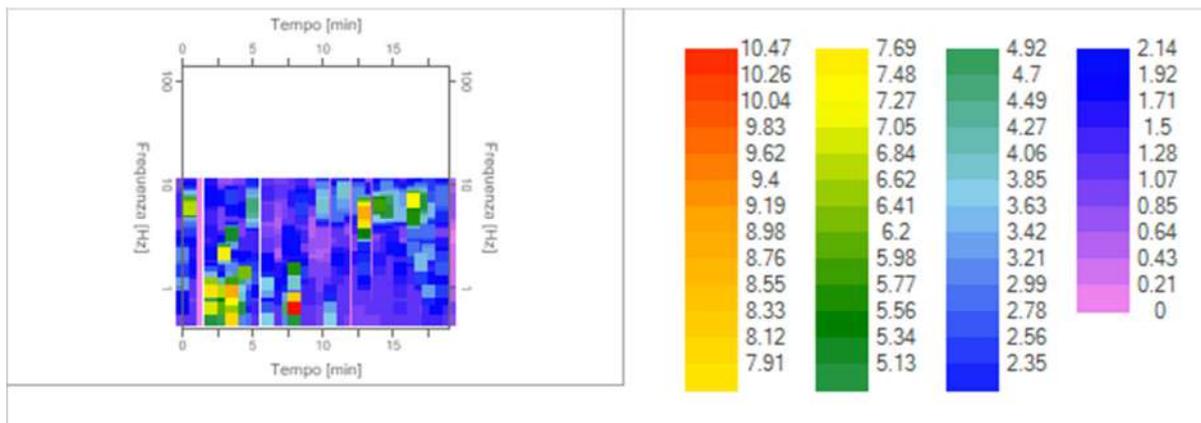


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

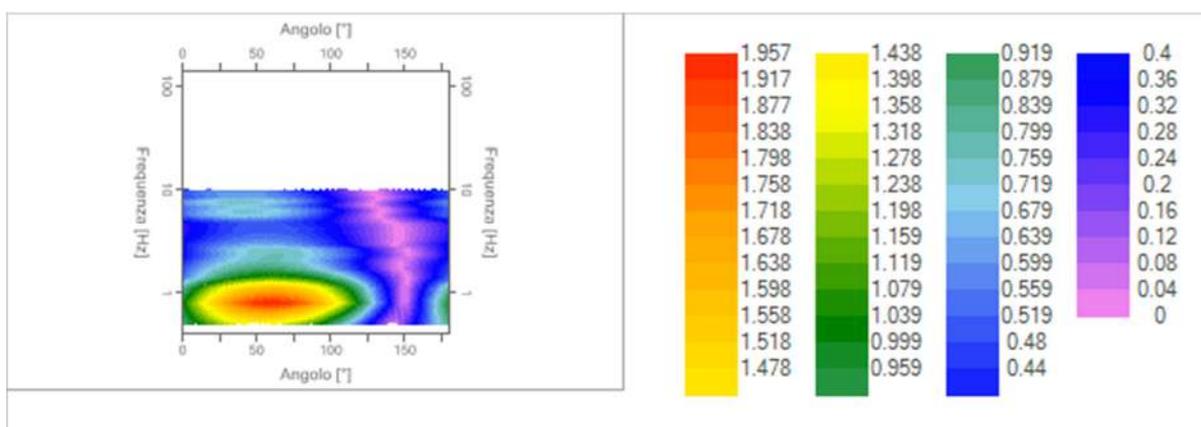
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

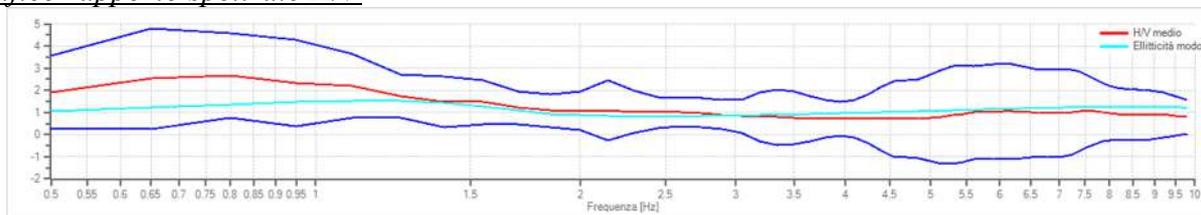
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 0.80 Hz  $\pm$  0.72 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



## Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

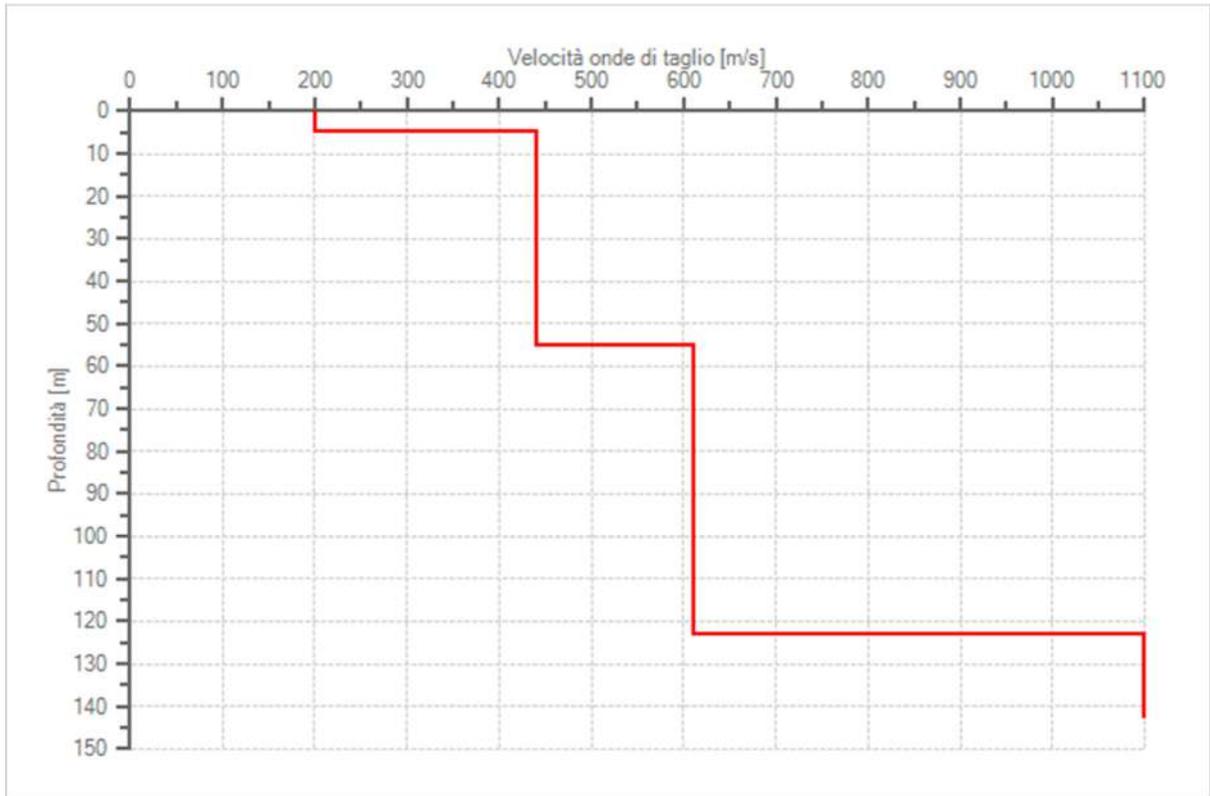
### Modello stratigrafico

#### Dati riepilogativi:

Numero strati:	4
Frequenza del picco dell'ellitticità:	1.10 Hz
Valore di disadattamento:	0.66
Valore Vseq:	366.67 m/s

#### Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5	18	0.3	200
2	5	50	18	0.3	440
3	55	68	19	0.3	610
4	123	20	18	0.3	1100



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.5
Mappa stazionarietà	.6
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.6
Grafico H/V	.7
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.7
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: info@soilprojectsas.it  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 5**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

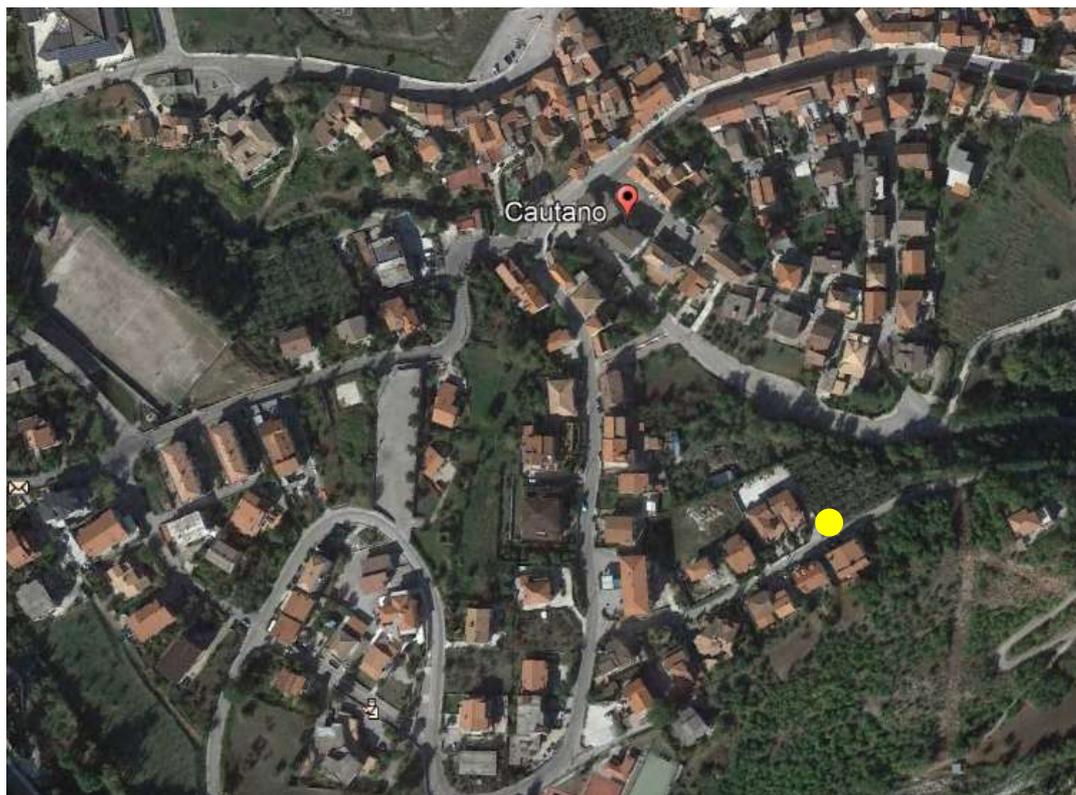
**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

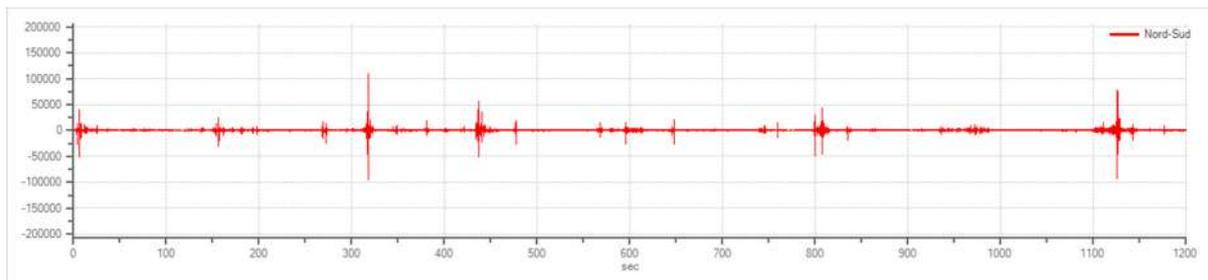
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

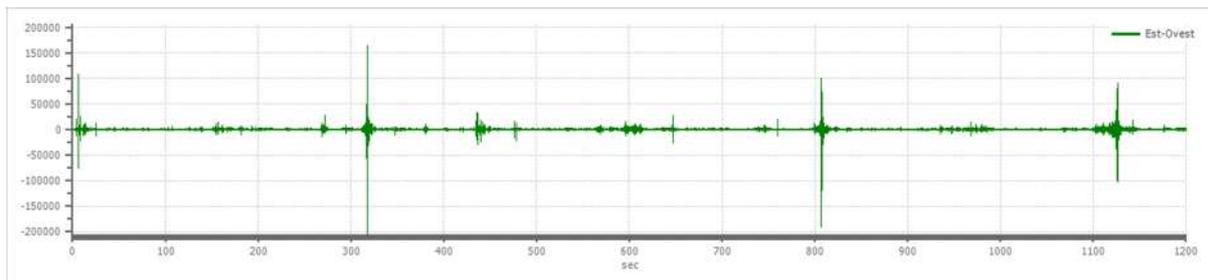
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

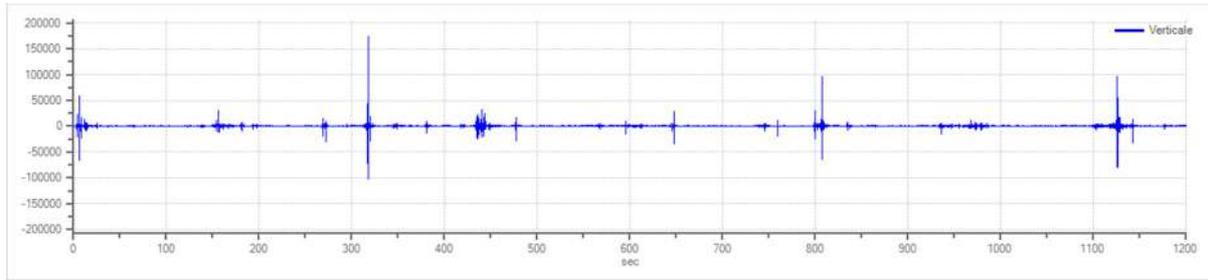
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

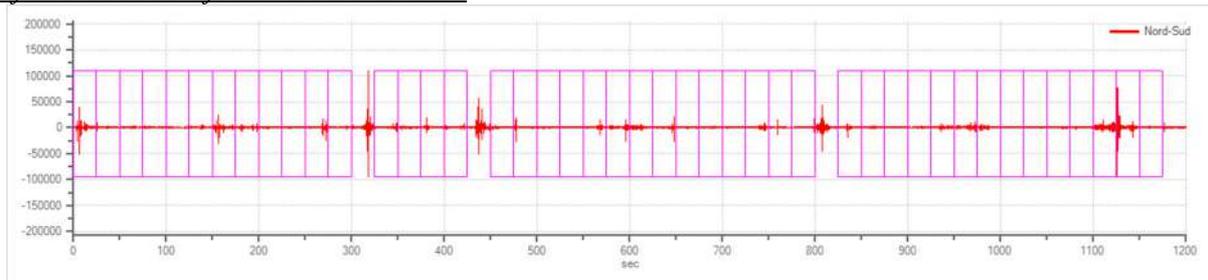
Numero totale finestre selezionate: 44  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 44  
 Dimensione temporale finestre: 25.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

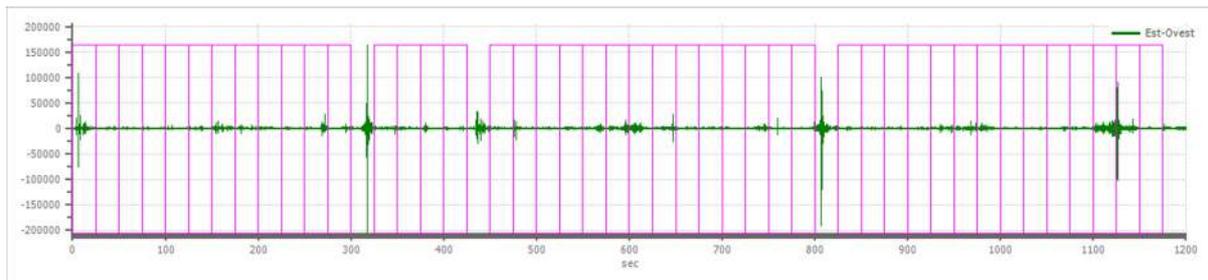
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	25	Inclusa
2	25	50	Inclusa
3	50	75	Inclusa
4	75	100	Inclusa
5	100	125	Inclusa
6	125	150	Inclusa
7	150	175	Inclusa
8	175	200	Inclusa
9	200	225	Inclusa
10	225	250	Inclusa
11	250	275	Inclusa
12	275	300	Inclusa
13	325	350	Inclusa
14	350	375	Inclusa
15	375	400	Inclusa
16	400	425	Inclusa
17	450	475	Inclusa
18	475	500	Inclusa
19	500	525	Inclusa
20	525	550	Inclusa
21	550	575	Inclusa
22	575	600	Inclusa
23	600	625	Inclusa
24	625	650	Inclusa
25	650	675	Inclusa
26	675	700	Inclusa

27	700	725	Inclusa
28	725	750	Inclusa
29	750	775	Inclusa
30	775	800	Inclusa
31	825	850	Inclusa
32	850	875	Inclusa
33	875	900	Inclusa
34	900	925	Inclusa
35	925	950	Inclusa
36	950	975	Inclusa
37	975	1000	Inclusa
38	1000	1025	Inclusa
39	1025	1050	Inclusa
40	1050	1075	Inclusa
41	1075	1100	Inclusa
42	1100	1125	Inclusa
43	1125	1150	Inclusa
44	1150	1175	Inclusa

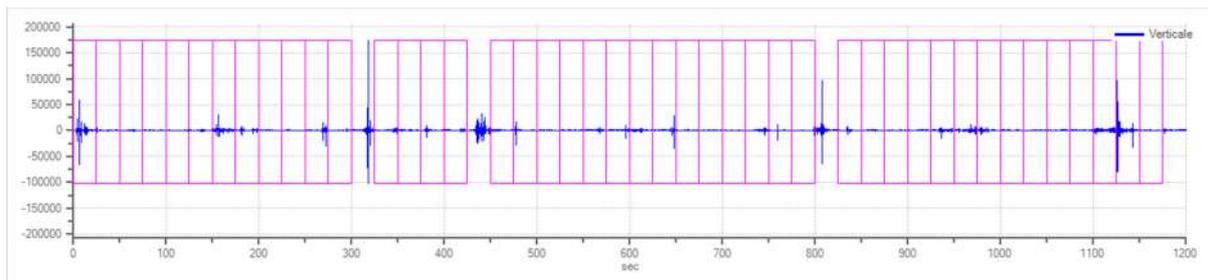
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

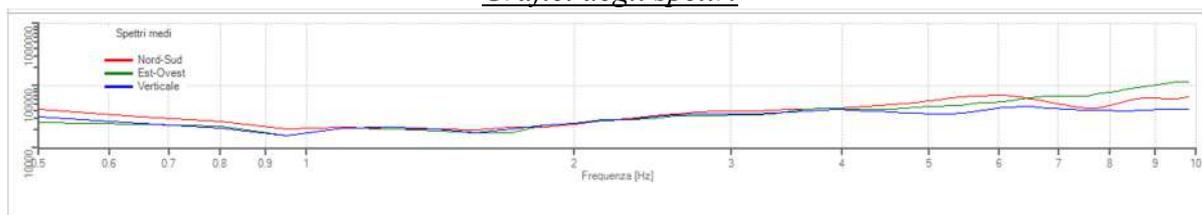


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

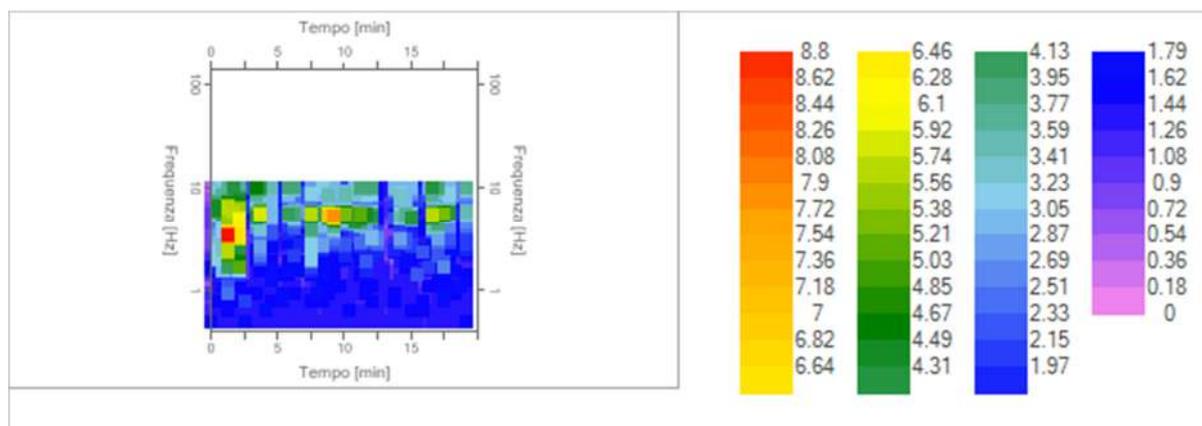


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

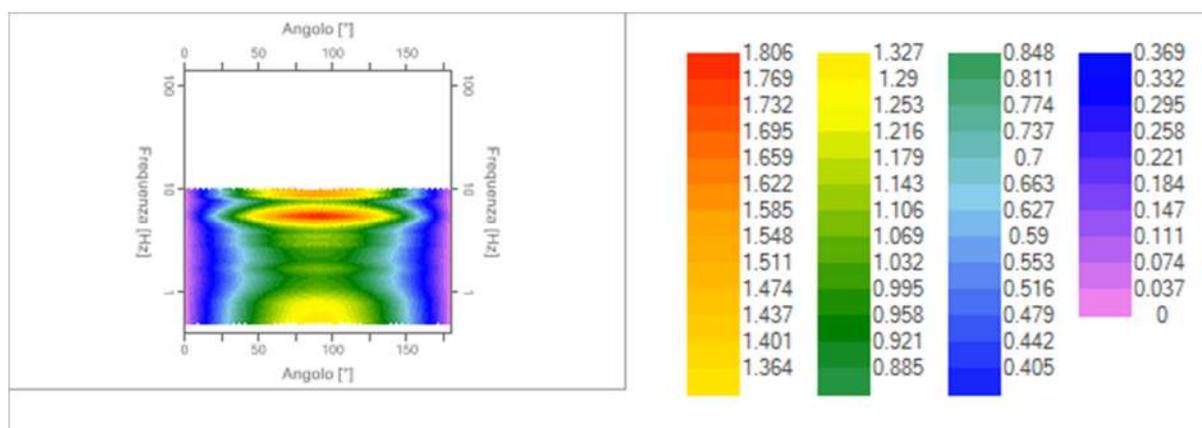
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

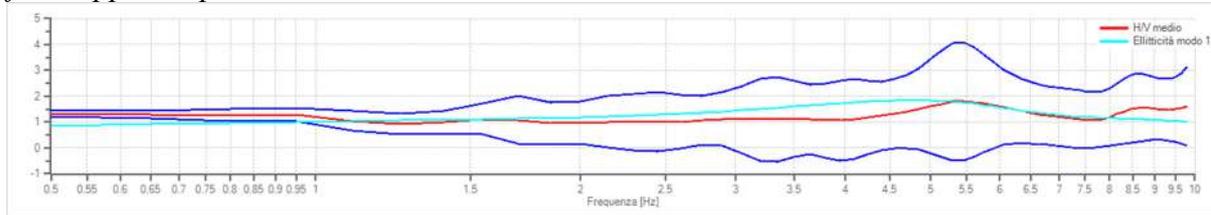
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamo: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamo: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Nessuna (Direzione NS)

**Risultati:**

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5.45 Hz ±1.27 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche SESAME:

**Verifica**

$f_0 > 10/l_w$

$n_c(f_0) > 200$

$\sigma_A(f) < 2$  per  $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$  se  $f_0 > 0.5H$ :

$\sigma_A(f) < 3$  per  $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$  se  $f_0 < 0.5H$ :

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$

$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$

$A_0 > 2$

$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$

$\sigma_f < \varepsilon(f)$

$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

**Esito**

Ok

Ok

Ok

Ok

Ok

Ok

Non superato

Non superato

Ok

**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati: 4

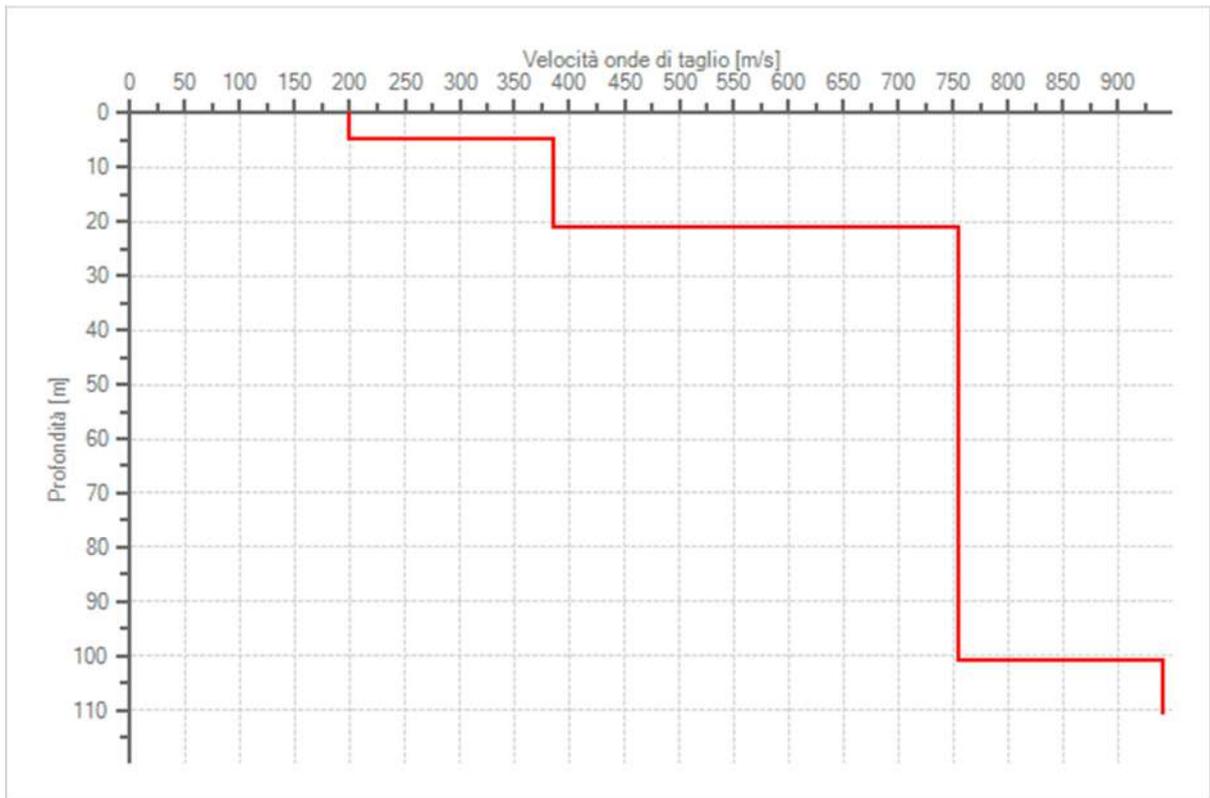
Frequenza del picco dell'ellitticità: 4.85 Hz

Valore di disadattamento: 0.20

Valore Vseq: 382.27 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5	18	0.3	200
2	5	16	19	0.3	385
3	21	80	20	0.3	755
4	101	10	22	0.3	940



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.6
Mappa stazionarietà	.6
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.7
Grafico H/V	.7
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.8
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)

cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351

email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)

P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 6**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

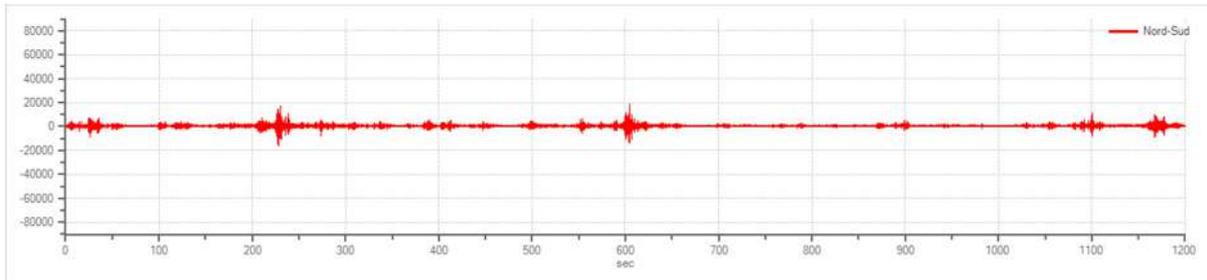
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

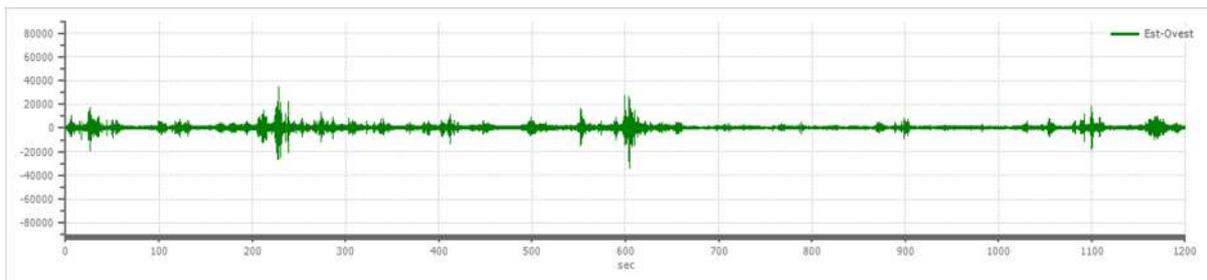
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

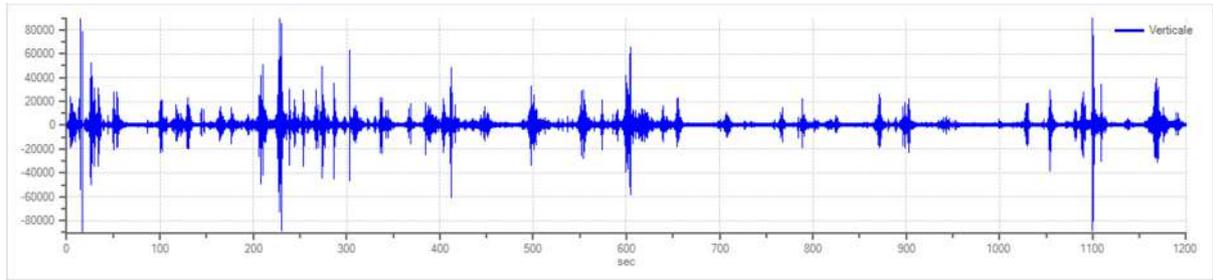
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

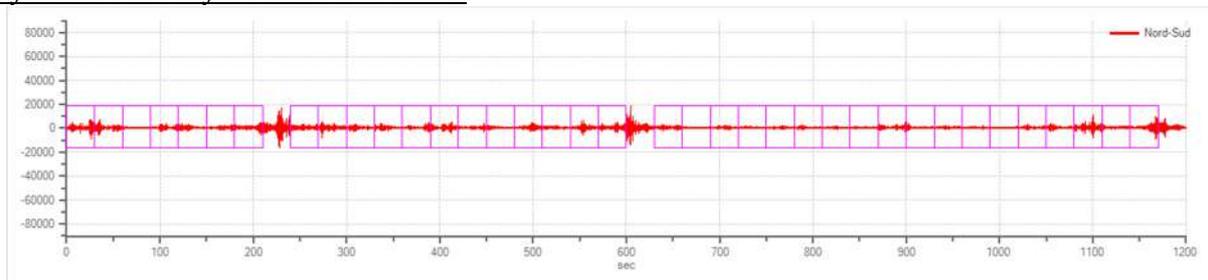
Numero totale finestre selezionate: 37  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 34  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

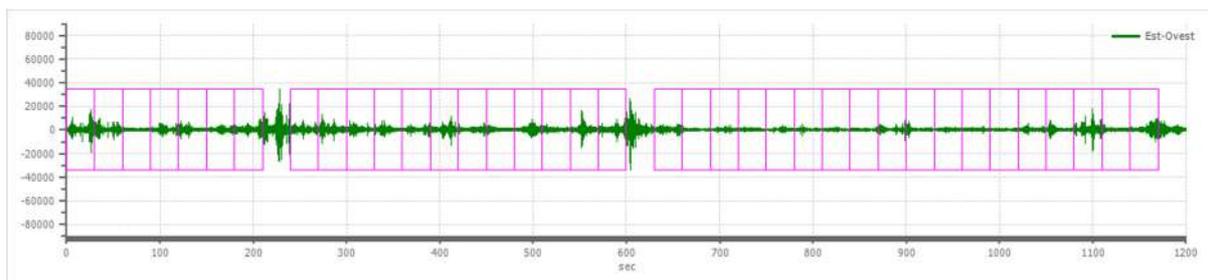
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	60	90	Inclusa
4	90	120	Inclusa
5	120	150	Inclusa
6	150	180	Inclusa
7	180	210	Inclusa
8	240	270	Inclusa
9	270	300	Inclusa
10	300	330	Inclusa
11	330	360	Inclusa
12	360	390	Inclusa
13	390	420	Inclusa
14	420	450	Inclusa
15	450	480	Inclusa
16	480	510	Inclusa
17	510	540	Inclusa
18	540	570	Inclusa
19	570	600	Inclusa
20	630	660	Esclusa
21	660	690	Inclusa
22	690	720	Inclusa
23	720	750	Inclusa
24	750	780	Inclusa
25	780	810	Inclusa
26	810	840	Inclusa

27	840	870	Inclusa
28	870	900	Inclusa
29	900	930	Inclusa
30	930	960	Inclusa
31	960	990	Esclusa
32	990	1020	Esclusa
33	1020	1050	Inclusa
34	1050	1080	Inclusa
35	1080	1110	Inclusa
36	1110	1140	Inclusa
37	1140	1170	Inclusa

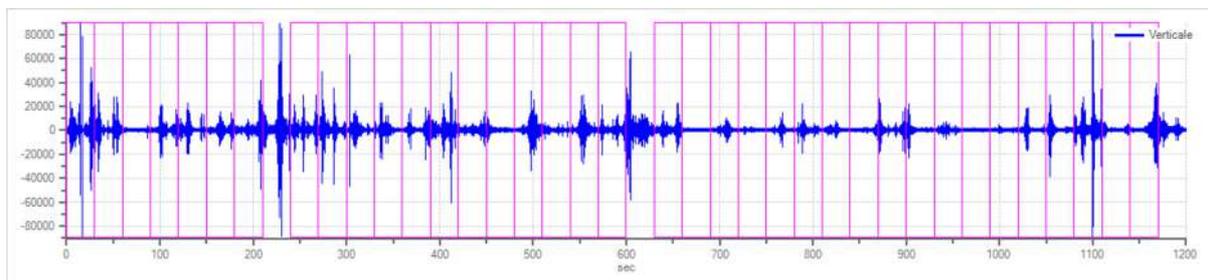
Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

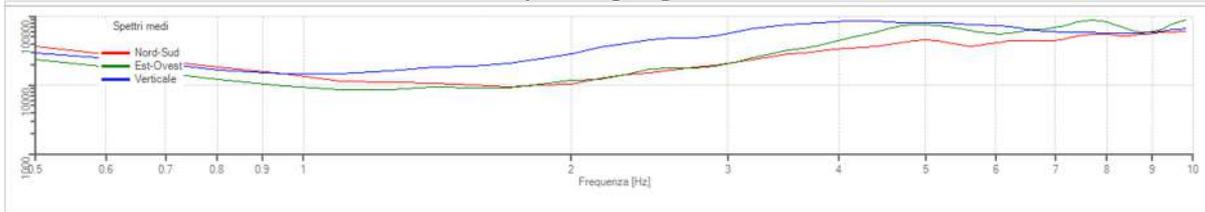


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

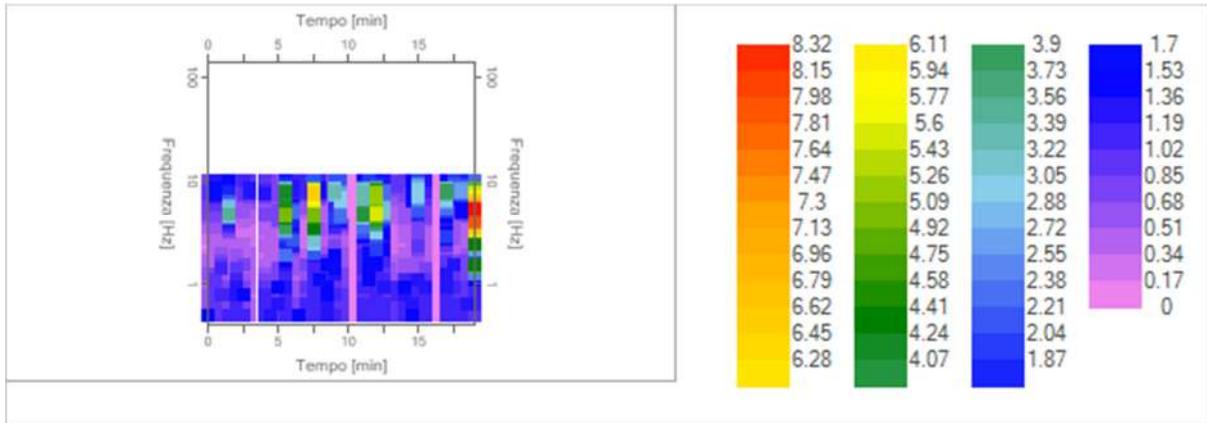


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

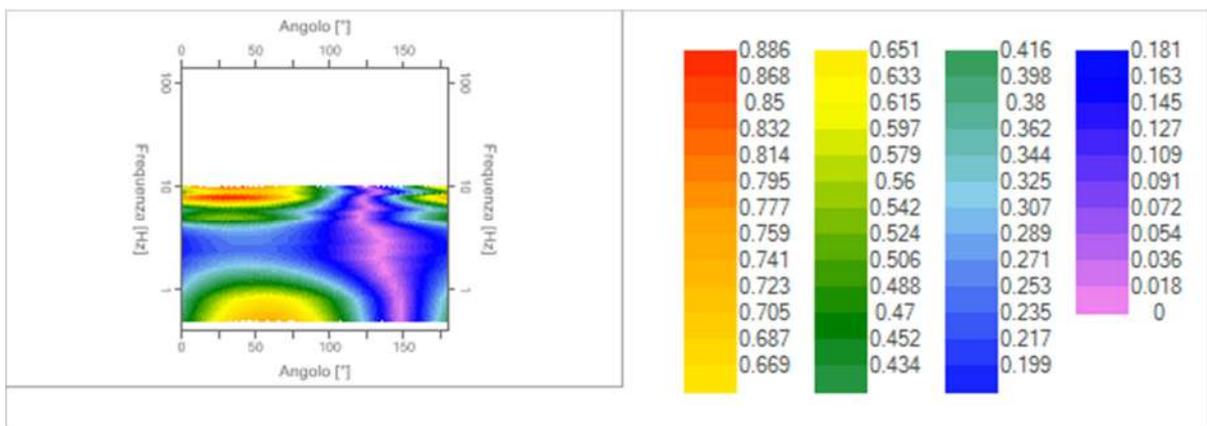
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

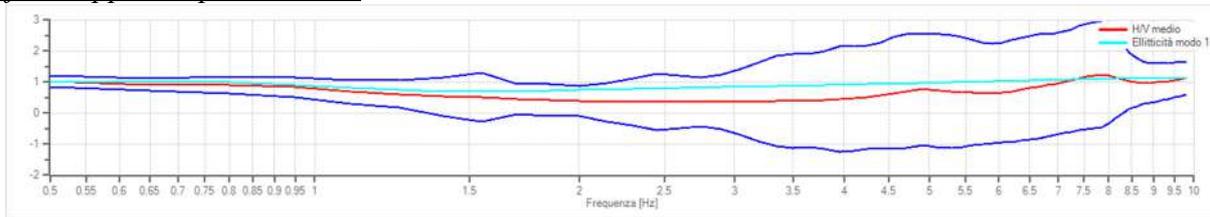
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 7.85 Hz  $\pm$  1.37 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

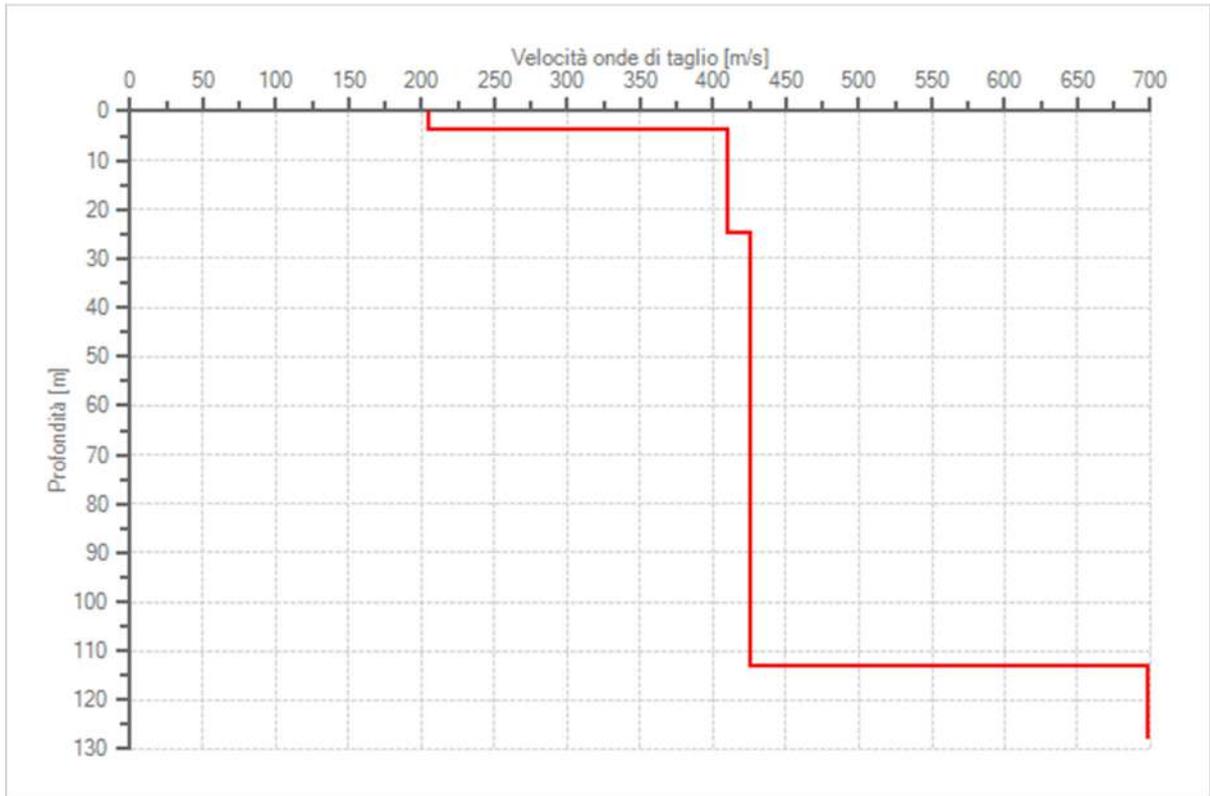
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati:	4
Frequenza del picco dell'ellitticità:	9.80 Hz
Valore di disadattamento:	-1.00
Valore Vseq:	363.65 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	4	18	0.3	205
2	4	21	19	0.3	410
3	25	88	19	0.3	425
4	113	15	21	0.3	698



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.5
Mappa stazionarietà	.6
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.6
Grafico H/V	.7
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.7
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 7**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

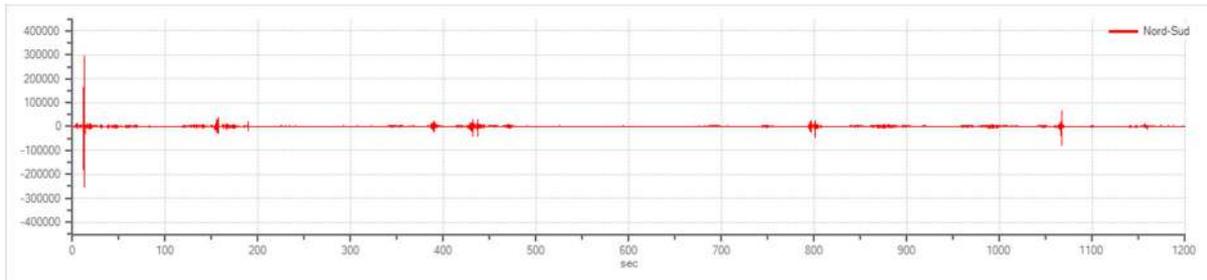
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

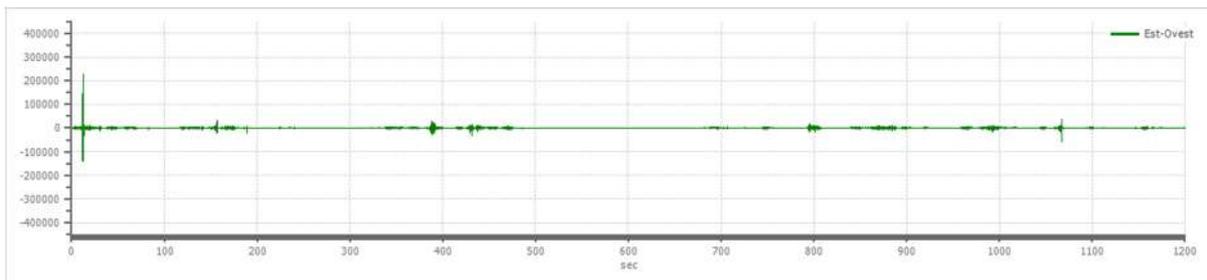
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

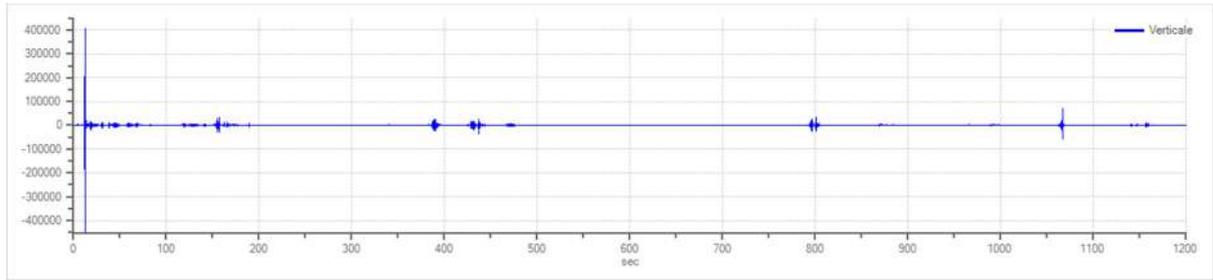
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

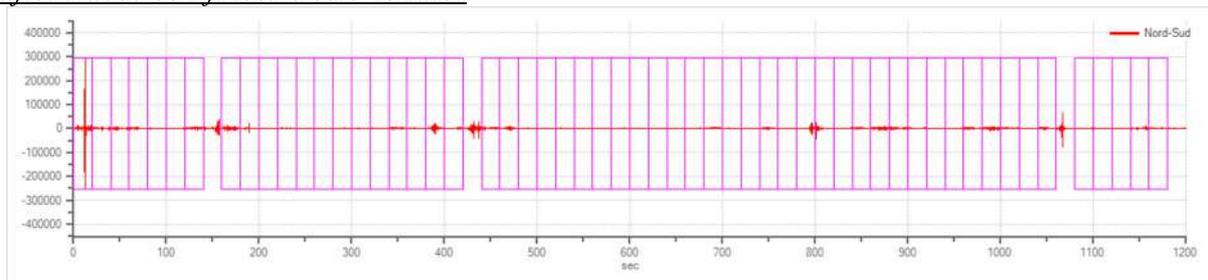
Numero totale finestre selezionate: 56  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 56  
 Dimensione temporale finestre: 20.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

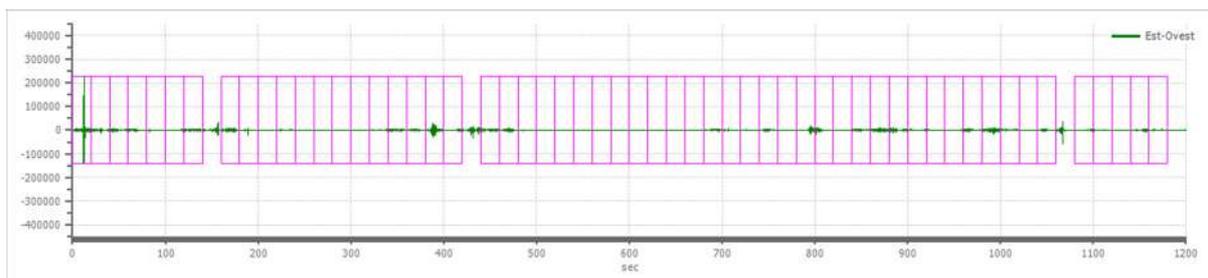
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	20	Inclusa
2	20	40	Inclusa
3	40	60	Inclusa
4	60	80	Inclusa
5	80	100	Inclusa
6	100	120	Inclusa
7	120	140	Inclusa
8	160	180	Inclusa
9	180	200	Inclusa
10	200	220	Inclusa
11	220	240	Inclusa
12	240	260	Inclusa
13	260	280	Inclusa
14	280	300	Inclusa
15	300	320	Inclusa
16	320	340	Inclusa
17	340	360	Inclusa
18	360	380	Inclusa
19	380	400	Inclusa
20	400	420	Inclusa
21	440	460	Inclusa
22	460	480	Inclusa
23	480	500	Inclusa
24	500	520	Inclusa
25	520	540	Inclusa
26	540	560	Inclusa

27	560	580	Inclusa
28	580	600	Inclusa
29	600	620	Inclusa
30	620	640	Inclusa
31	640	660	Inclusa
32	660	680	Inclusa
33	680	700	Inclusa
34	700	720	Inclusa
35	720	740	Inclusa
36	740	760	Inclusa
37	760	780	Inclusa
38	780	800	Inclusa
39	800	820	Inclusa
40	820	840	Inclusa
41	840	860	Inclusa
42	860	880	Inclusa
43	880	900	Inclusa
44	900	920	Inclusa
45	920	940	Inclusa
46	940	960	Inclusa
47	960	980	Inclusa
48	980	1000	Inclusa
49	1000	1020	Inclusa
50	1020	1040	Inclusa
51	1040	1060	Inclusa
52	1080	1100	Inclusa
53	1100	1120	Inclusa
54	1120	1140	Inclusa
55	1140	1160	Inclusa
56	1160	1180	Inclusa

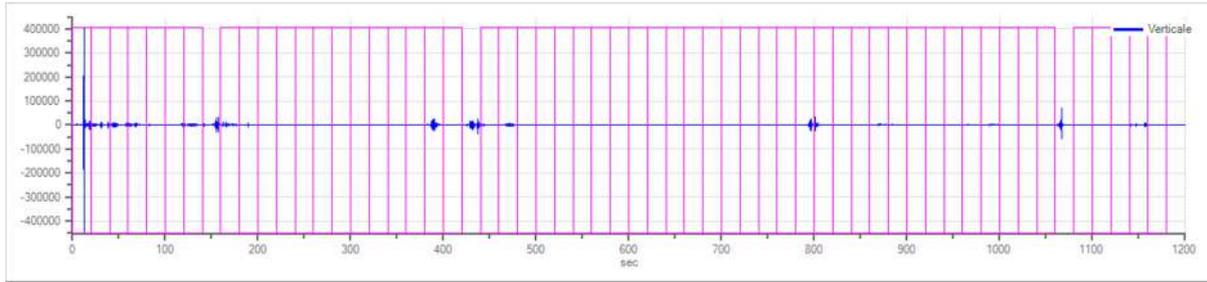
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

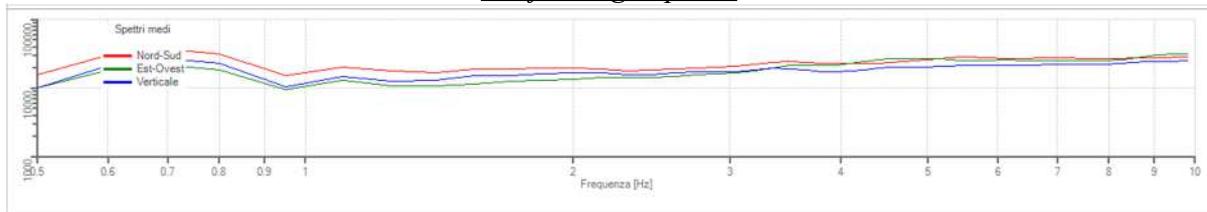


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

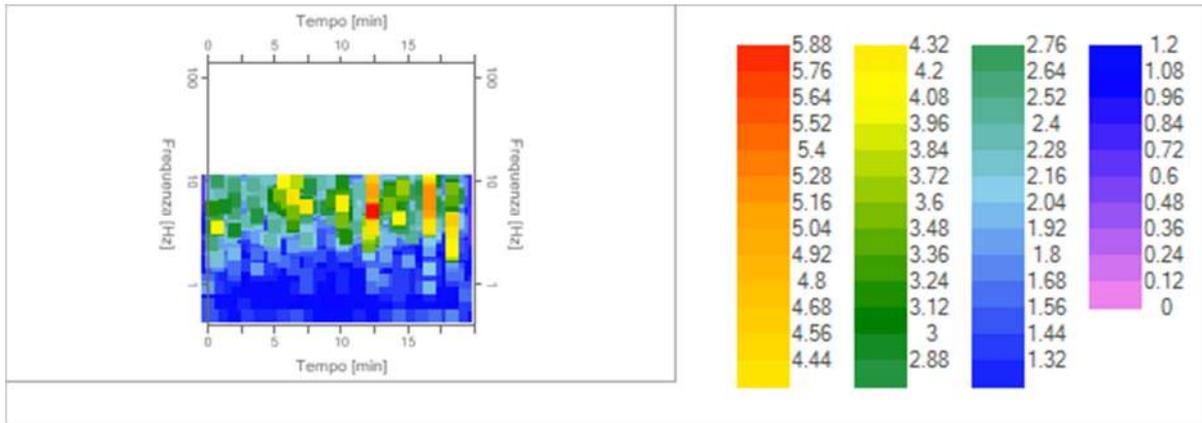


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

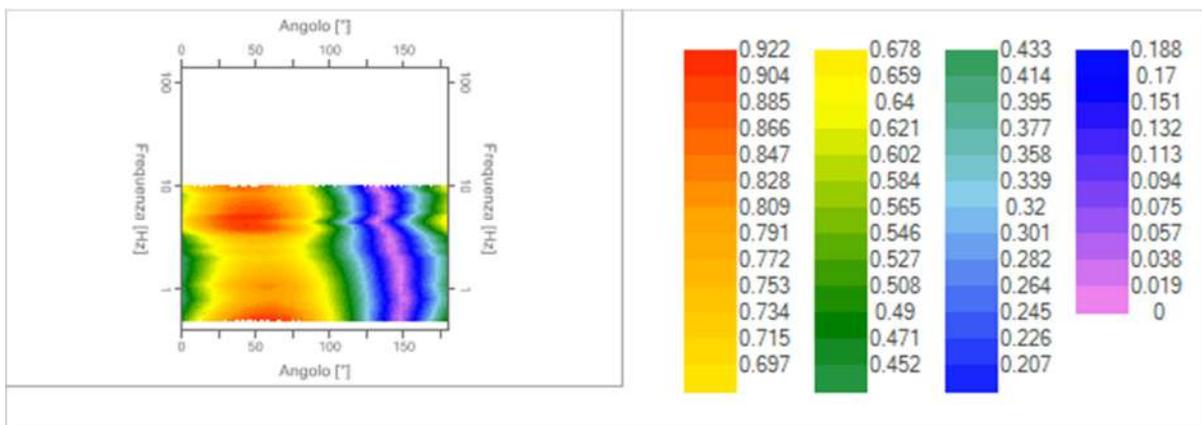
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

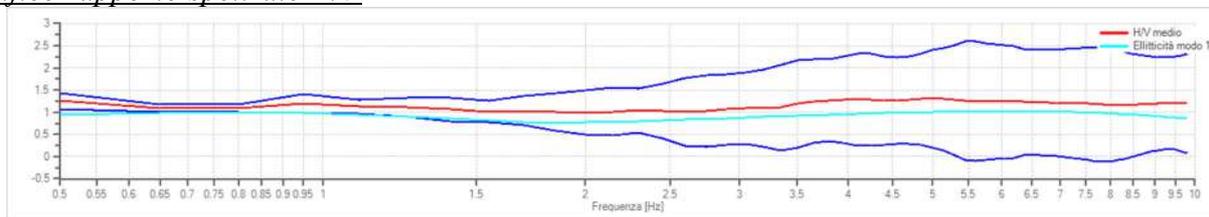
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamiento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5.00 Hz  $\pm$  0.84 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

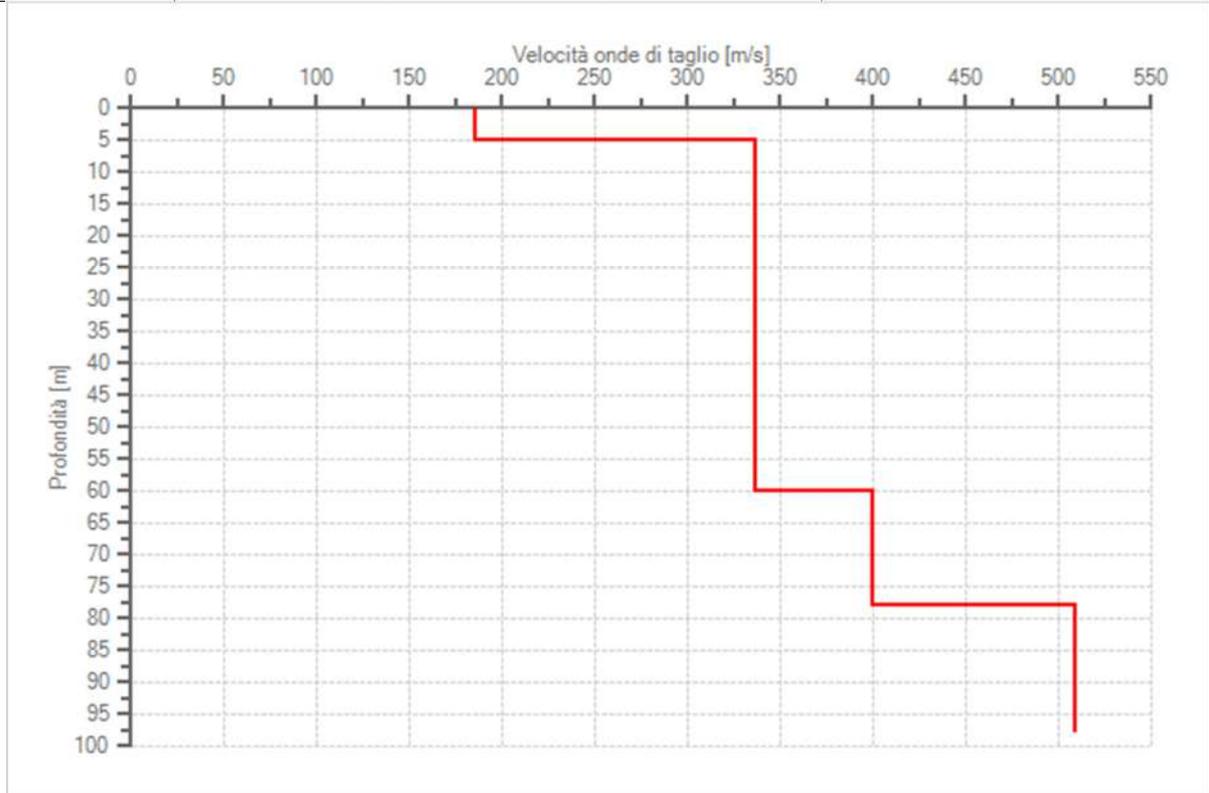
## Modello stratigrafico

### Dati riepilogativi:

Numero strati: 4  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 6.05 Hz  
 Valore di disadattamento: 0.05  
 Valore Vseq: 295.77 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	5	18	0.3	185
2	5	55	18	0.3	336
3	60	18	19	0.3	400
4	78	20	21	0.3	509



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.6
Mappa stazionarietà	.6
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.7
Grafico H/V	.7
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.8
Grafico Profilo velocità	.8
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 8**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

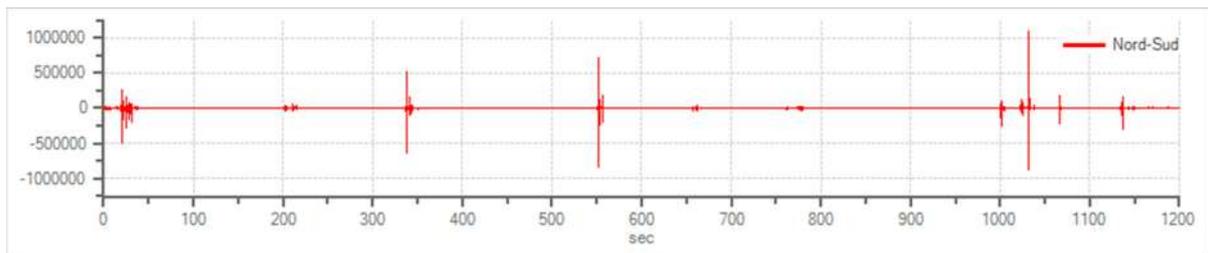
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

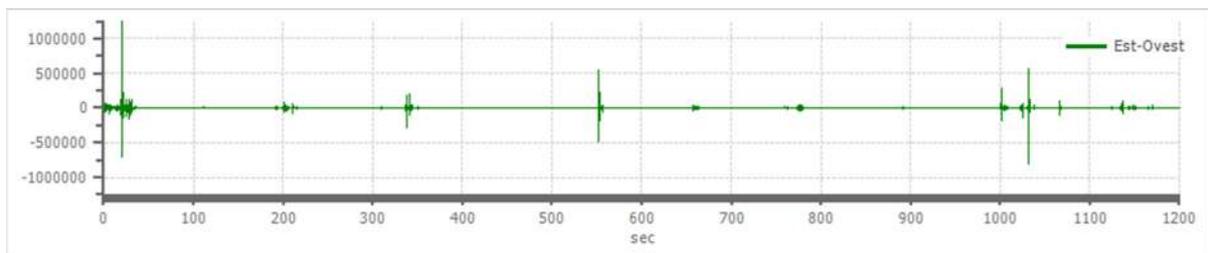
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

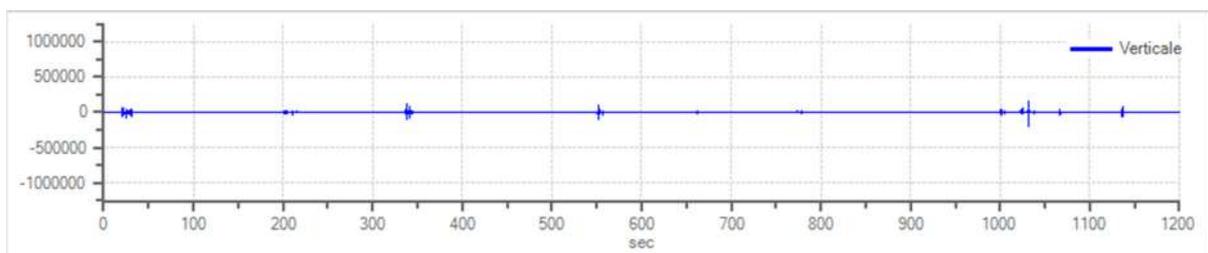
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

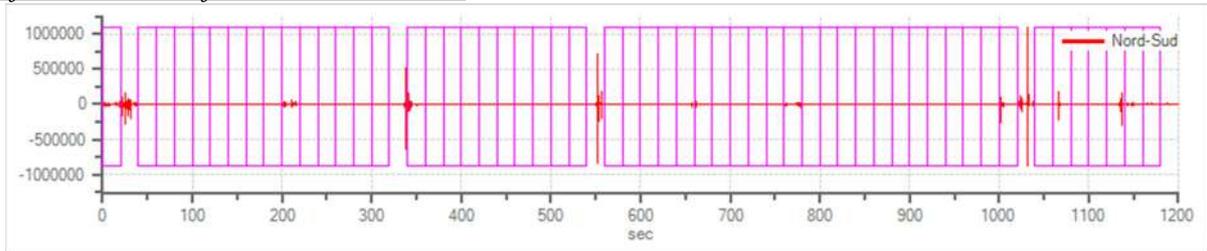
Numero totale finestre selezionate: 55  
Numero finestre incluse nel calcolo: 54  
Dimensione temporale finestre: 20.000 s  
Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

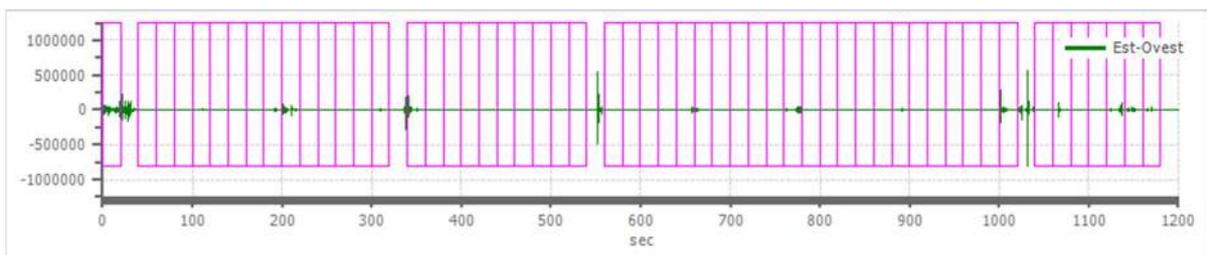
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	20	Esclusa
2	40	60	Inclusa
3	60	80	Inclusa
4	80	100	Inclusa
5	100	120	Inclusa
6	120	140	Inclusa
7	140	160	Inclusa
8	160	180	Inclusa
9	180	200	Inclusa
10	200	220	Inclusa
11	220	240	Inclusa
12	240	260	Inclusa
13	260	280	Inclusa
14	280	300	Inclusa
15	300	320	Inclusa
16	340	360	Inclusa
17	360	380	Inclusa
18	380	400	Inclusa
19	400	420	Inclusa
20	420	440	Inclusa
21	440	460	Inclusa
22	460	480	Inclusa
23	480	500	Inclusa
24	500	520	Inclusa
25	520	540	Inclusa
26	560	580	Inclusa
27	580	600	Inclusa
28	600	620	Inclusa
29	620	640	Inclusa
30	640	660	Inclusa
31	660	680	Inclusa
32	680	700	Inclusa
33	700	720	Inclusa
34	720	740	Inclusa
35	740	760	Inclusa

36	760	780	Inclusa
37	780	800	Inclusa
38	800	820	Inclusa
39	820	840	Inclusa
40	840	860	Inclusa
41	860	880	Inclusa
42	880	900	Inclusa
43	900	920	Inclusa
44	920	940	Inclusa
45	940	960	Inclusa
46	960	980	Inclusa
47	980	1000	Inclusa
48	1000	1020	Inclusa
49	1040	1060	Inclusa
50	1060	1080	Inclusa
51	1080	1100	Inclusa
52	1100	1120	Inclusa
53	1120	1140	Inclusa
54	1140	1160	Inclusa
55	1160	1180	Inclusa

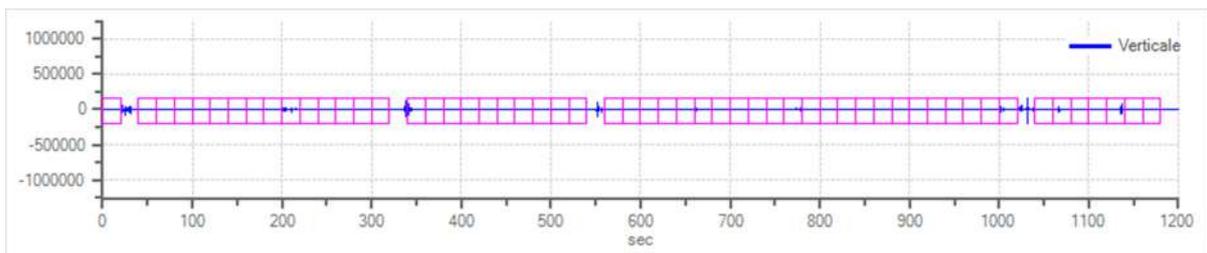
*Grafici tracce con finestre selezionate:*



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

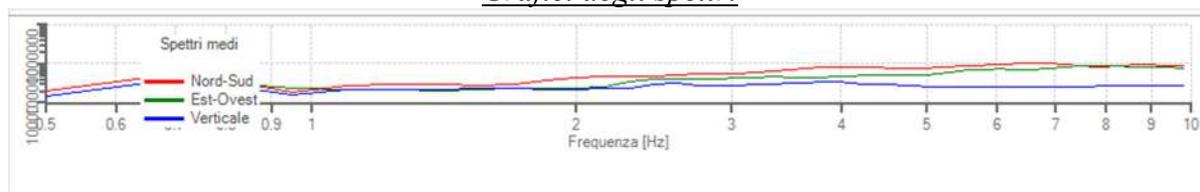


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

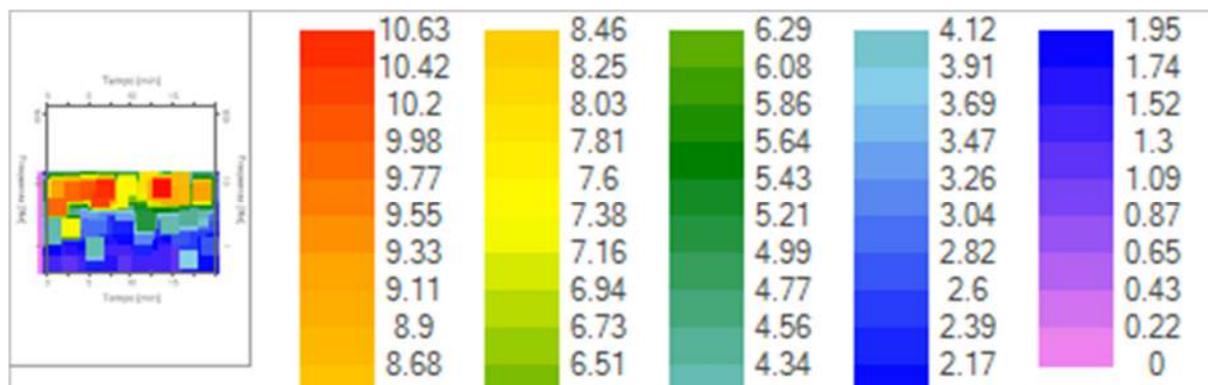


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

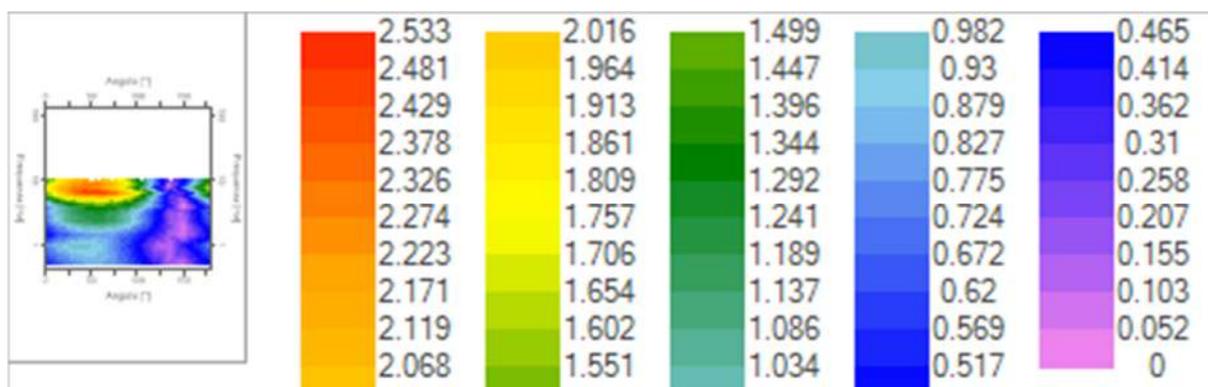
## Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

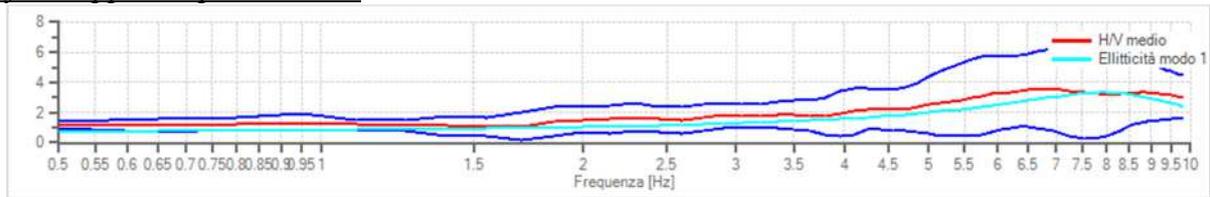
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamiento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 6.80 Hz  $\pm$  0.75 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

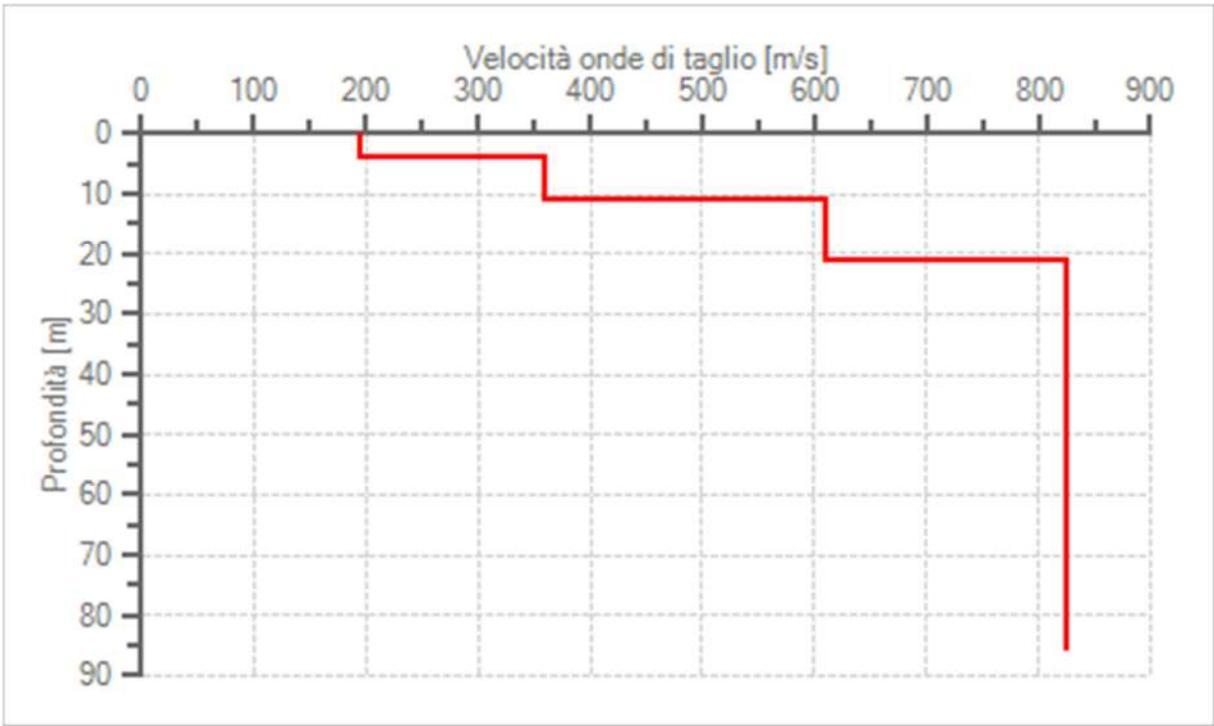
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati:	4
Frequenza del picco dell'ellitticità:	8.00 Hz
Valore di disadattamento:	-1.00
Valore Vseq:	372.67 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	4	18	0.3	195
2	4	7	19	0.3	360
3	11	10	20	0.3	610
4	21	65	22	0.3	825



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.6
Mappa stazionarietà	.6
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.6
Grafico H/V	.7
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.8
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 9**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

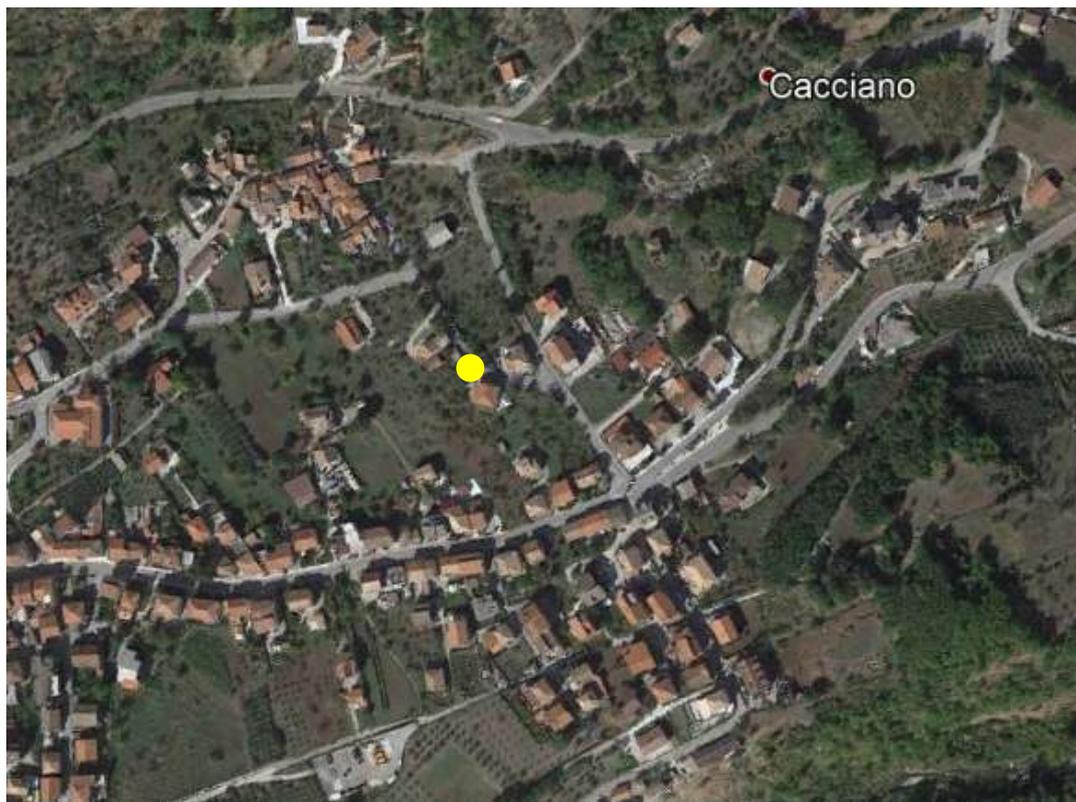
**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

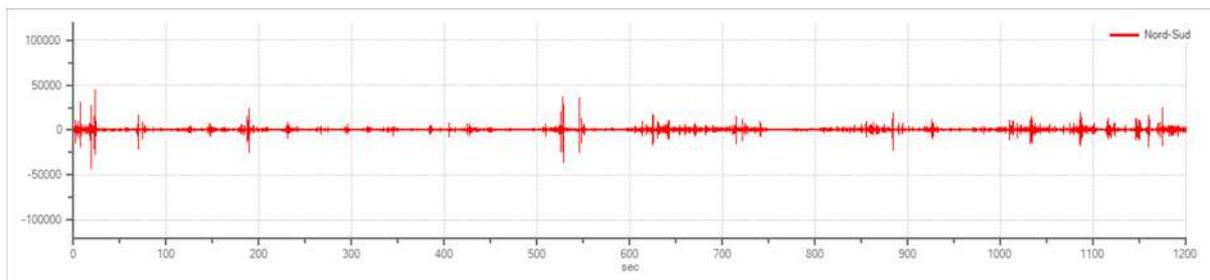
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

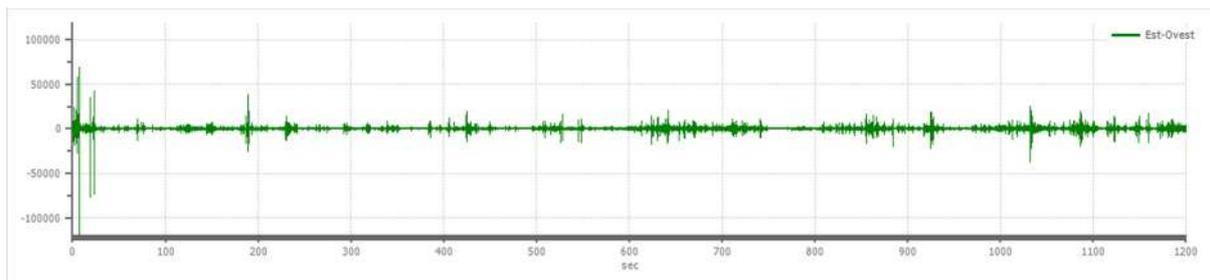
### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

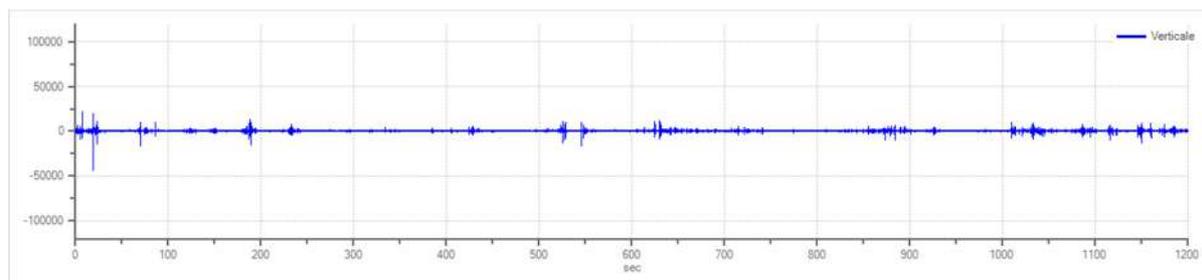
### Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

## Finestre selezionate

### Dati riepilogativi:

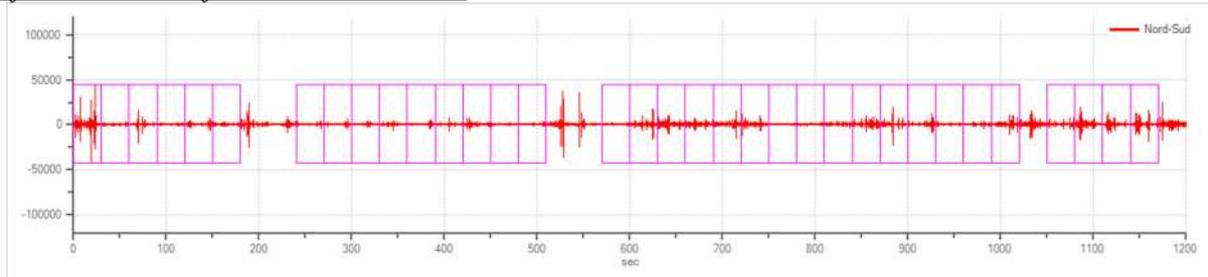
Numero totale finestre selezionate: 34  
 Numero finestre incluse nel calcolo: 34  
 Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
 Tipo di lisciamiento: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Coefficiente di banda: 40.00

### Tabella finestre:

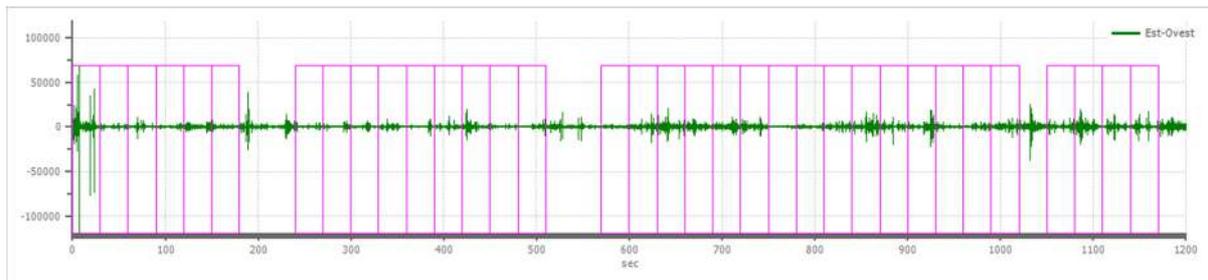
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	60	90	Inclusa
4	90	120	Inclusa
5	120	150	Inclusa
6	150	180	Inclusa
7	240	270	Inclusa
8	270	300	Inclusa
9	300	330	Inclusa
10	330	360	Inclusa
11	360	390	Inclusa
12	390	420	Inclusa
13	420	450	Inclusa
14	450	480	Inclusa
15	480	510	Inclusa
16	570	600	Inclusa
17	600	630	Inclusa
18	630	660	Inclusa
19	660	690	Inclusa
20	690	720	Inclusa
21	720	750	Inclusa
22	750	780	Inclusa
23	780	810	Inclusa
24	810	840	Inclusa
25	840	870	Inclusa
26	870	900	Inclusa

27	900	930	Inclusa
28	930	960	Inclusa
29	960	990	Inclusa
30	990	1020	Inclusa
31	1050	1080	Inclusa
32	1080	1110	Inclusa
33	1110	1140	Inclusa
34	1140	1170	Inclusa

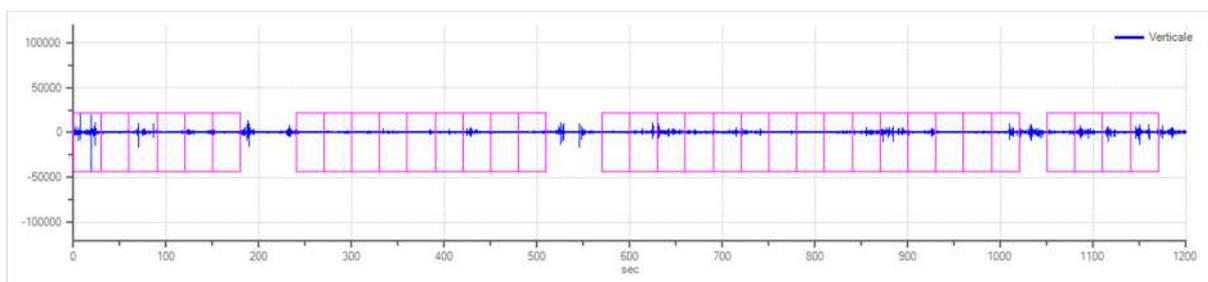
Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

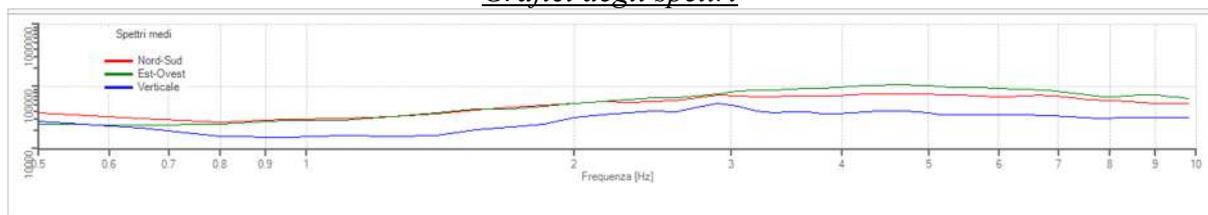


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

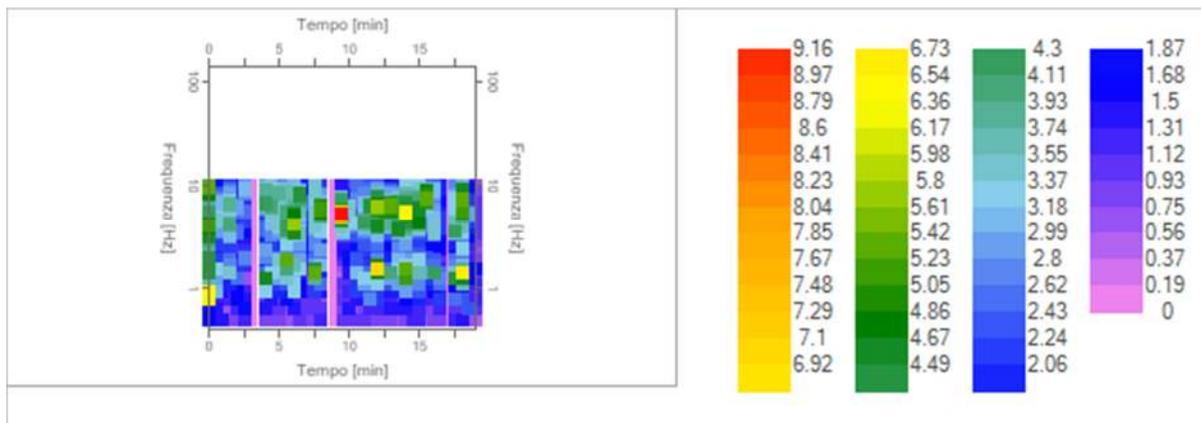


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

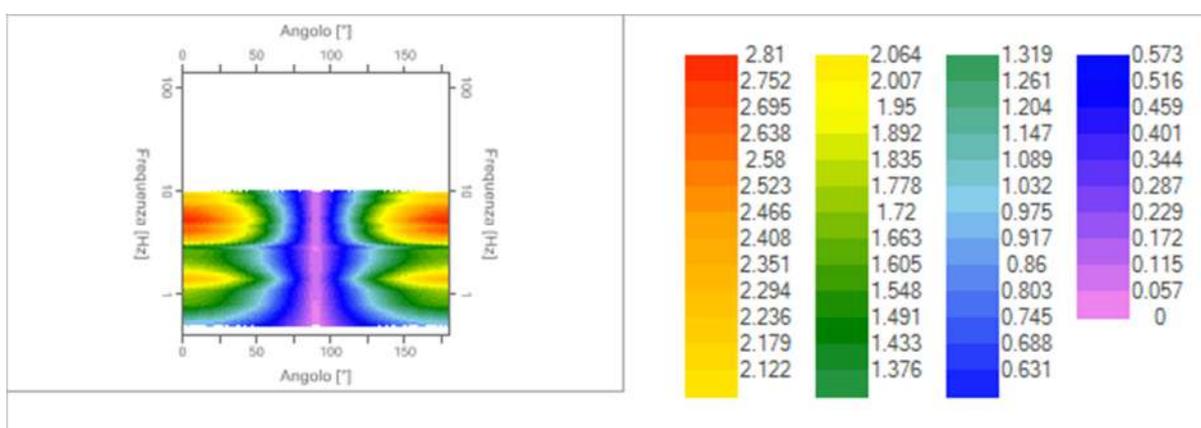
Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

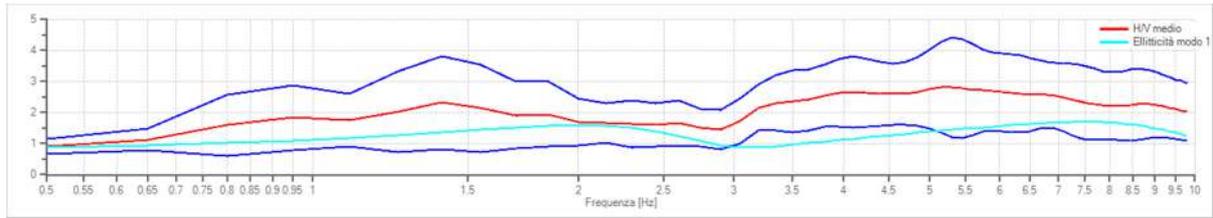
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Nessuna (Direzione EO)

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 5.30 Hz  $\pm$  0.57 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Non superato
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Non superato
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

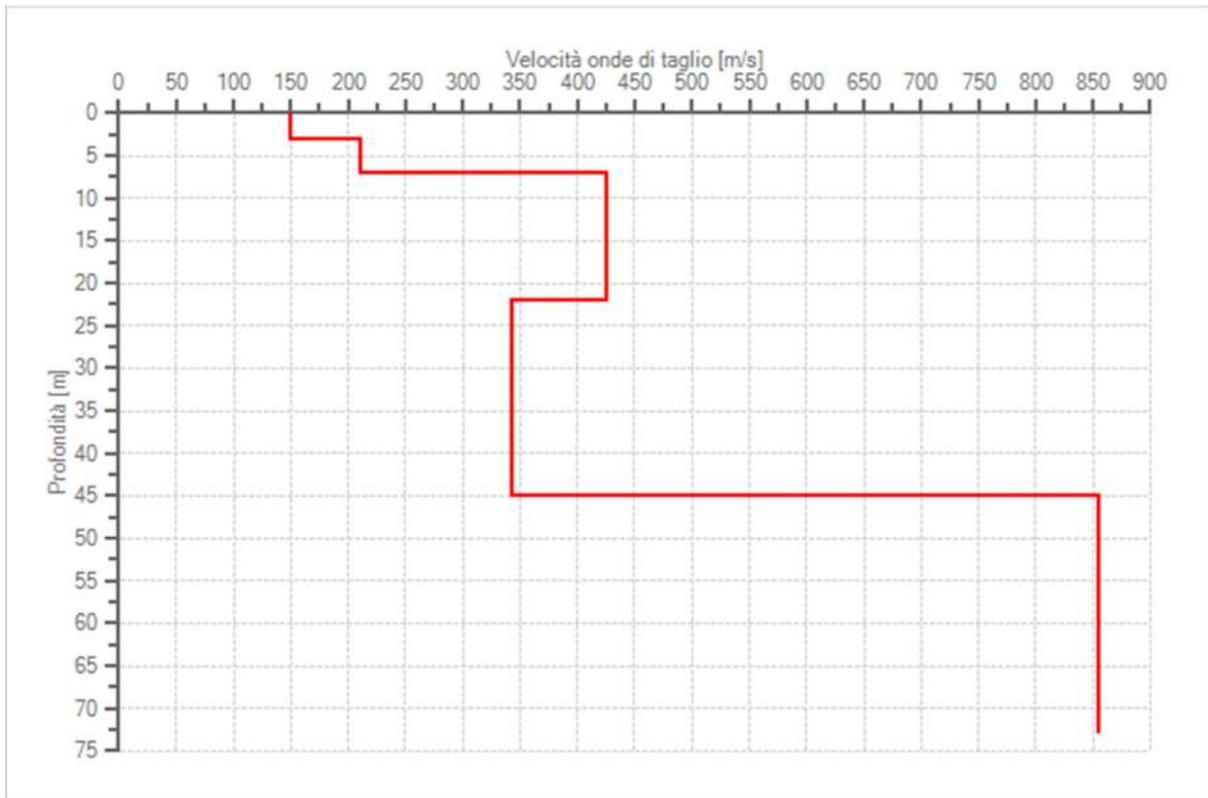
**Modello stratigrafico**

Dati riepilogativi:

Numero strati: 5  
 Frequenza del picco dell'ellitticità: 7.55 Hz  
 Valore di disadattamento: 0.12  
 Valore Vseq: 306.96 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	3	18	0.3	150
2	3	4	18	0.3	210
3	7	15	19	0.3	425
4	22	23	20	0.3	342
5	45	28	21	0.3	855



Profilo delle velocità delle onde di taglio.

*Davidelli*  
Soil Project  
S.p.A.  
Consorzio Autorizzato ai sensi del DPR 360/2001 art. 2  
Circolazione n. 7255 del 12/09/2013

## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.5
Mappa stazionarietà	.6
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.6
Grafico H/V	.7
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.7
Indice	.9



## **SOIL PROJECT s.a.s.**

Viale Europa snc - Loc. Cubante, 82018 CALVI (BN)  
cell: 346 8554913 - 340 6867752 - 347 1324351  
email: [info@soilprojectsas.it](mailto:info@soilprojectsas.it)  
P.I.:01515280624

**INDAGINE SISMICA**  
**TIPO:**

**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**  
**HVSR**

**OGGETTO:**

"Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"

**PROVA:**

**HVSR – 10**

**LOCALITA':**

Comune di Cautano (Bn)

**COMMITTENTE:**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**DITTA:**

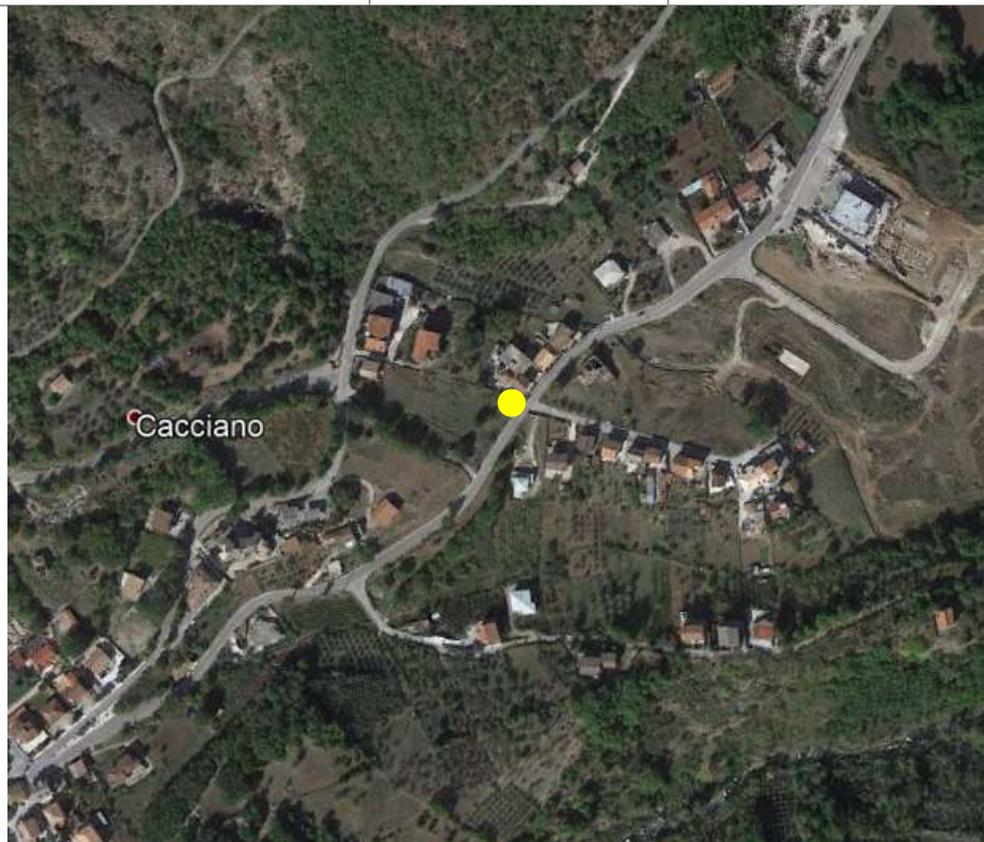
**DATA:**

Giugno 2018

**DIRETTORE LAVORI**  
**D'INDAGINE**

RTP Quarantiello –  
Boscaino - Lucariello

**MAPPA**  
**UBICAZIONE**  
**INDAGINE:**



*Il Tecnico Progettista:*

*Il Direttore dei Lavori d'Indagine:*

-----

-----

## **Cenni sulla teoria della tecnica HVSR**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore 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, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il 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.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

## Dati generali

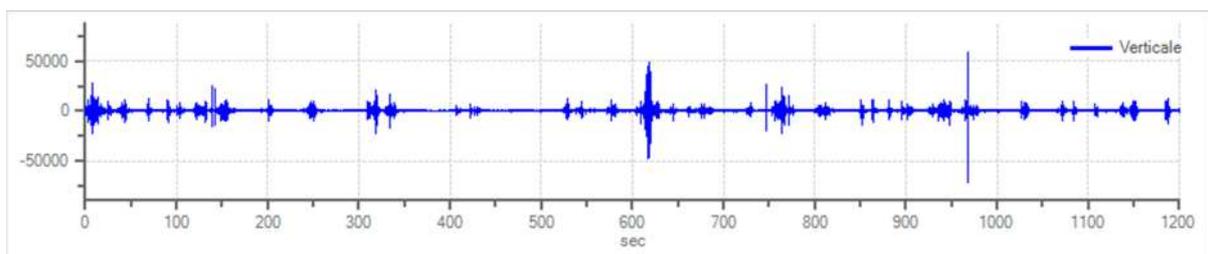
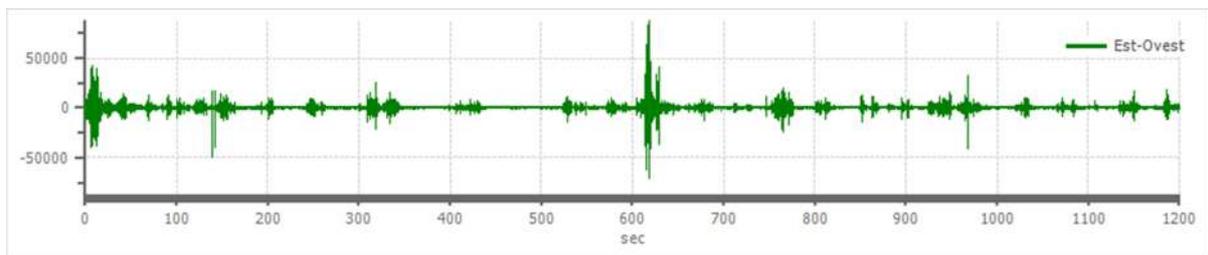
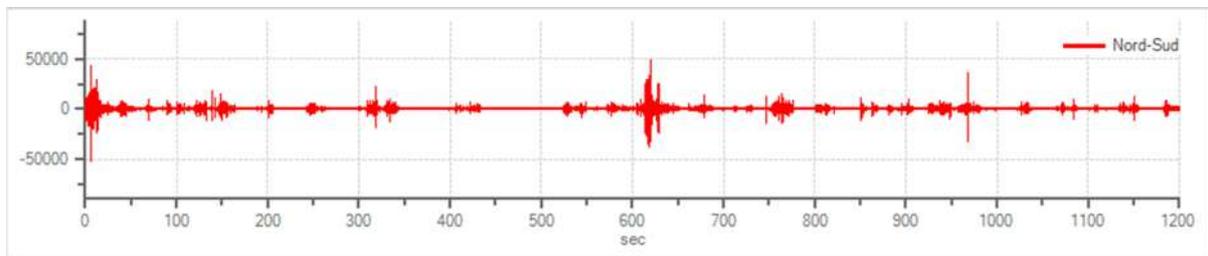
Nome progetto: "Studio di Microzonazione sismica di terzo livello OPCM 4007/2012"  
Committente: RTP – Quarantiello – Boscaino - Lucariello  
Cantiere: Comune di Cautano (Bn)  
Operatore: Soil Project sas  
Responsabile: Geol. Daniele Pipicelli

## Tracce in input

### Dati riepilogativi:

Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 1200 s  
Frequenza di campionamento: 172.00 Hz  
Numero campioni: 206400  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

### Grafici tracce:



## Traccia in direzione Verticale

### Finestre selezionate

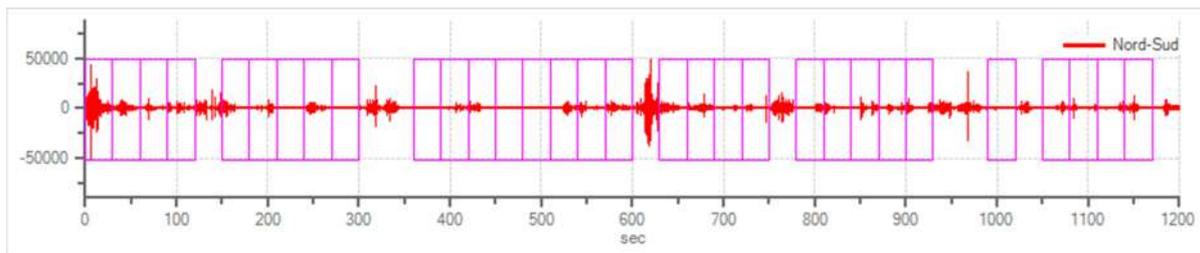
#### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre selezionate: 31  
Numero finestre incluse nel calcolo: 27  
Dimensione temporale finestre: 30.000 s  
Tipo di lisciamento: Konno & Ohmachi  
Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
Coefficiente di banda: 40.00

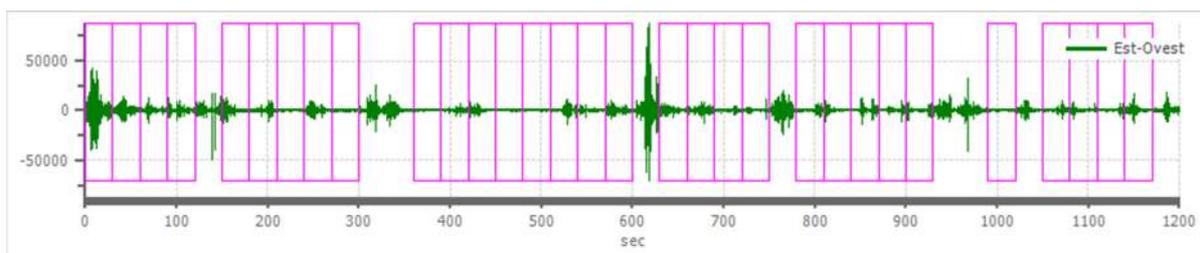
#### Tabella finestre:

Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	0	30	Inclusa
2	30	60	Inclusa
3	60	90	Inclusa
4	90	120	Inclusa
5	150	180	Inclusa
6	180	210	Inclusa
7	210	240	Inclusa
8	240	270	Inclusa
9	270	300	Inclusa
10	360	390	Inclusa
11	390	420	Esclusa
12	420	450	Esclusa
13	450	480	Esclusa
14	480	510	Esclusa
15	510	540	Inclusa
16	540	570	Inclusa
17	570	600	Inclusa
18	630	660	Inclusa
19	660	690	Inclusa
20	690	720	Inclusa
21	720	750	Inclusa
22	780	810	Inclusa
23	810	840	Inclusa
24	840	870	Inclusa
25	870	900	Inclusa
26	900	930	Inclusa
27	990	1020	Inclusa
28	1050	1080	Inclusa
29	1080	1110	Inclusa
30	1110	1140	Inclusa
31	1140	1170	Inclusa

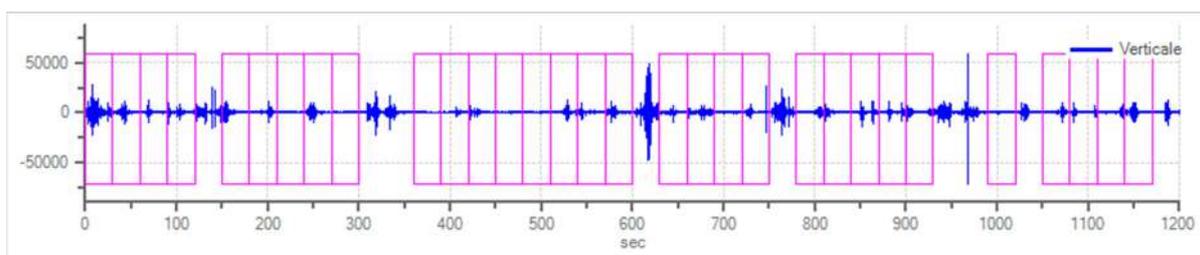
#### Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

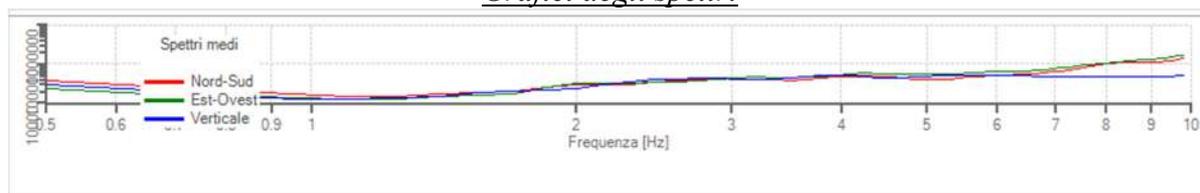


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

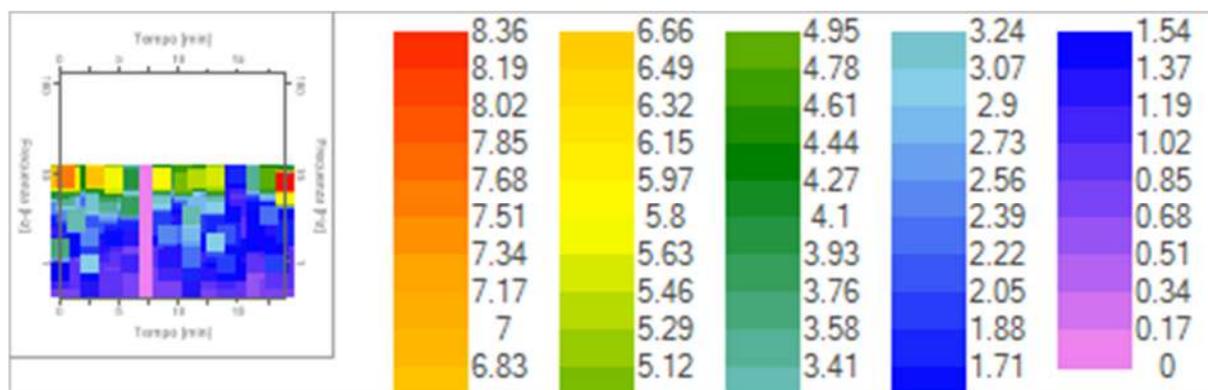


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

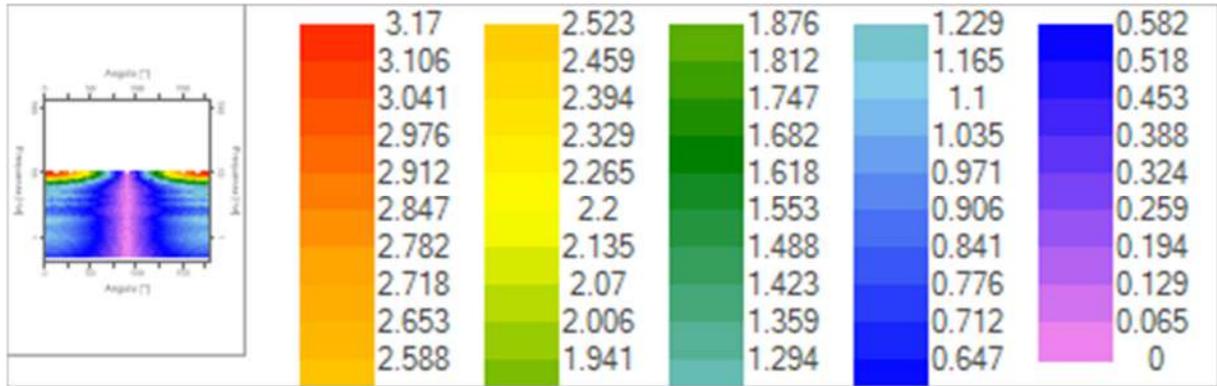
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

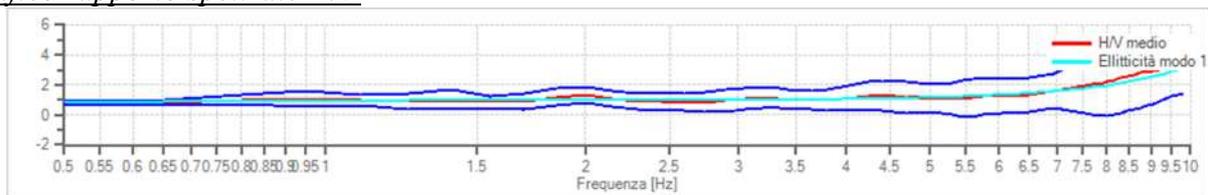
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 10.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamiento:: Konno & Ohmachi  
 Percentuale di lisciamiento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Nessuna (Direzione EO)

### Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 9.80 Hz ±0.54 Hz

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche 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 $f_0 > 0.5H$ :	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$ :	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

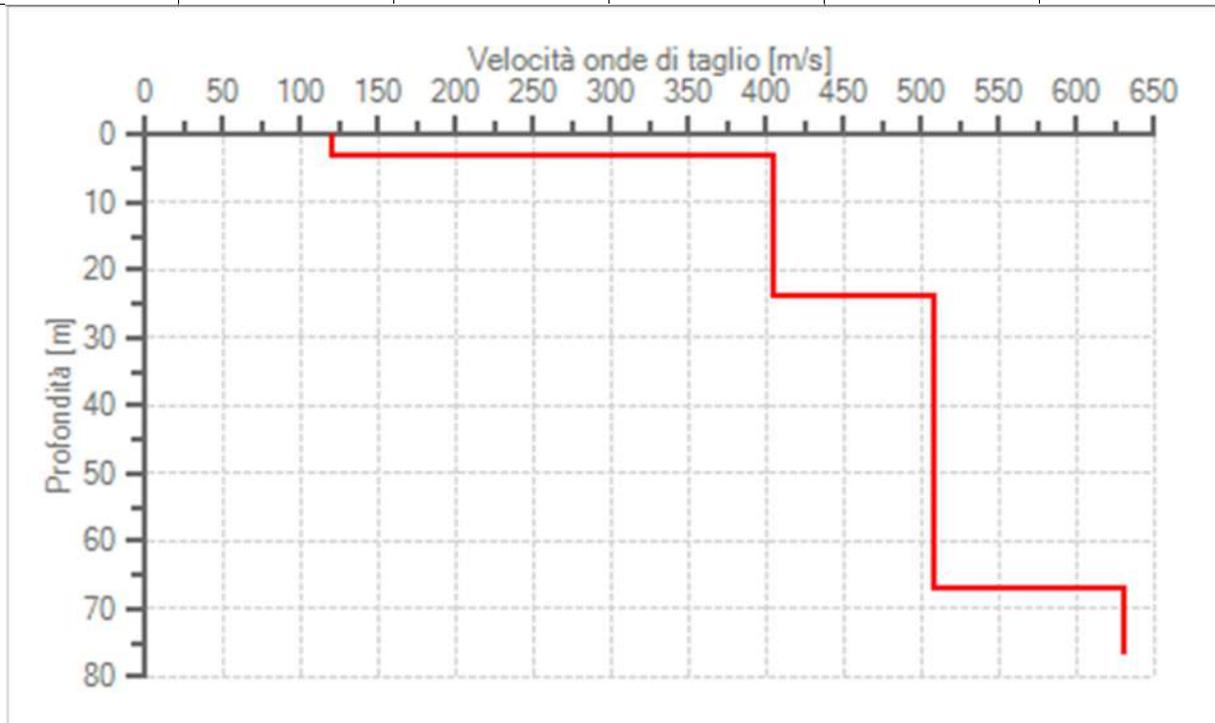
## Modello stratigrafico

### Dati riepilogativi:

Numero strati: 4  
Frequenza del picco dell'ellitticità: 9.80 Hz  
Valore di disadattamento: 0.10  
Valore Vseq: 338.27 m/s

### Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	3	18	0.3	120
2	3	21	19	0.3	405
3	24	43	20	0.3	507
4	67	10	20	0.3	630



Profilo delle velocità delle onde di taglio.



## Indice

Cenni tecnica HVSR	.2
Dati generali	.3
Tracce in input	.3
Grafici tracce	.3
Finestre selezionate	.4
Tabella finestre	.4
Grafici tracce con finestre selezionate	.5
Grafici degli spettri	.5
Mappa stazionarietà	.5
Mappa direzionalità	.6
Rapporto spettrale H/V	.6
Grafico H/V	.6
Verifiche SESAME	.7
Modello stratigrafico	.7
Grafico Profilo velocità	.7
Indice	.9