

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088  
**UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

**SCUOLA DI SCIENZE**

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio della variazione di velocità delle onde di  
taglio in una colata di terra nella sua fase di  
post-attivazione**

Candidato:

**Giulia Barsotti**

Relatore:

**Prof. Matteo Berti**

Correlatore:

**Gabriela Squarzoni**

Sessione Luglio 2019  
**Anno Accademico 2018-2019**

*Ai miei genitori*

## **Indice**

RIASSUNTO.....	4
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE.....	5
1.1 Scopo del lavoro.....	5
1.2 Fasi del lavoro.....	5
1.3 Area di studio.....	7
CAPITOLO 2: STUDI PRECEDENTI.....	9
2.1 Letteratura.....	9
CAPITOLO 3: LA FRANA DI SILLA .....	18
3.1 Inquadramento geologico.....	18
3.2 Stato del versante prima dell'ultima riattivazione .....	20
3.3 La riattivazione del 12-17 febbraio 2018.....	27
3.4 Caratterizzazione del terreno della frana di Silla.....	31
CAPITOLO 4: MONITORAGGIO E INDAGINI GEOFISICHE IN SITO: METODOLOGIE.....	38
4.1 Introduzione .....	38
4.2 Il sistema di monitoraggio.....	40
4.2.1 Strumentazione installata .....	40
4.2.2 Installazione in sito .....	41
4.3 Indagini geofisiche periodiche.....	44
4.3.1 Metodologie (MASW, H/V).....	44
4.3.2 Misure effettuate.....	47
CAPITOLO 5: RISULTATI.....	50
5.1 Interpretazione delle misure geofisiche periodiche.....	50
5.2 Interpretazione dei dati del sistema di monitoraggio.....	68
CAPITOLO 6: CONCLUSIONI.....	72
BIBLIOGRAFIA.....	74
ALLEGATO 1: CORONA.....	78
ALLEGATO 2: CORONA-BRIGLIA.....	90
ALLEGATO 3: SOPRA BRIGLIA.....	102
ALLEGATO 4: SOTTO BRIGLIA.....	114
ALLEGATO 5: SOPRA STAZIONE.....	128
ALLEGATO 6: FUORI DESTRA IDROGRAFICA.....	140
ALLEGATO 7: FUORI SINISTRA IDROGRAFICA.....	152

## RIASSUNTO

In letteratura c'è intenso dibattito tra chi sostiene che la morfologia '*flow like*' tipica delle colate di terra sia attribuibile a sviluppo di piani di taglio interni al deposito di frana e chi invece crede sia determinata da una vera e propria fluidificazione della massa di suolo (Bertello e al, 2018).

Oggetto di questo studio è un movimento composito scorrimento di terra-colata il cui terreno è stato caratterizzato con analisi granulometrica e definizione dei limiti di Atterberg.

Questo lavoro di tesi mediante lo studio della variazione di velocità delle onde di taglio della colata di terra nella sua fase di post-attivazione si prefigge di capire se questa è soggetta o meno a un processo di consolidazione.

La velocità delle onde di taglio nei fluidi teoricamente è pari a zero (Reynolds, 1997), dunque con un processo di consolidazione si dovrebbe osservare un aumento della velocità di propagazione delle onde di taglio all'interno della frana. Questo è ciò che si osserva nel corpo di frana in esame dove, nell'arco di otto mesi, sono state eseguite indagini geofisiche di onde di superficie (MASW, ReMi, H/V).

Dalle misure è emerso che al di fuori della frana le velocità rimangono costanti nel tempo mentre all'interno mostrano un notevole incremento.

A partire dai valori di velocità delle onde di Rayleigh misurati in campagna, secondo la nota relazione  $V_S = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}}$  è stato ricavato il modulo di rigidità ( $G_0$ ). Noto  $G_0$  tramite la formula proposta da Correia e Santos (2000) è stato derivato l'indice dei vuoti da cui, assumendo suolo saturo, è stato ricavato il contenuto di acqua gravimetrico ( $S = \frac{G_s * W}{e}$ ). Quest'ultimo valore è stato rapportato al limite liquido e plastico e confrontato con il contenuto volumetrico di acqua registrato da un sensore di umidità installato in sito.

Entrambi i valori di umidità sembrano indicare consolidazione del corpo di frana.

# **CAPITOLO 1: INTRODUZIONE**

## **1.1 Scopo del lavoro**

Le colate di terra, quando soggette a rapido movimento, assumono morfologia 'flow like' (Keefer e Johnson, 1984).

Nella comunità scientifica vi è un intenso dibattito se questa sia dovuta allo sviluppo di superfici di taglio interne alla massa mobilizzata o a vera e propria fluidificazione del corpo di frana (Bertello e al, 2018).

Questo lavoro di tesi tramite indagini geofisiche e misure dirette del contenuto d'acqua su una colata di terra situata nel comune di Gaggio Montano e mobilizzata in febbraio 2018, si prefigge l'obiettivo di valutare se quest'ultima nella sua fase di post attivazione sia soggetta a processo di consolidazione, fenomeno naturale in una massa che da fluida diviene semisolida.

## **1.2 Fasi del lavoro**

Questo lavoro di tesi si è articolato in quattro passaggi (figura 1).

Una fase iniziale di ricerca bibliografica, acquisizione di dati in campagna mediante stazione di monitoraggio dotata di geofoni, pluviometro, sensori di umidità e di pressione, e tramite misure geofisiche periodiche eseguite da operatore con sistema di acquisizione digitale multicanale SoilSpy e caratterizzazione del deposito di frana (curva granulometrica e limiti di Atterberg).

I dati geofisici sono stati poi analizzati con il software *Grilla* al fine di estrarre l'andamento della velocità delle onde di Rayleigh all'interno e all'esterno del corpo di frana. In questa fase le misure geofisiche della stazione di monitoraggio si sono dimostrate inutilizzabili.

Dai valori di velocità, tramite relazioni proposte in letteratura, sono stati derivati l'indice di rigidità ( $G_0$ ), l'indice dei vuoti ( $e$ ) e il contenuto gravimetrico di acqua ( $W_g$ ).

Sulla base dei parametri ricavati e dei dati registrati dalla stazione di monitoraggio sono state tratte le conclusioni di questo lavoro di tesi.

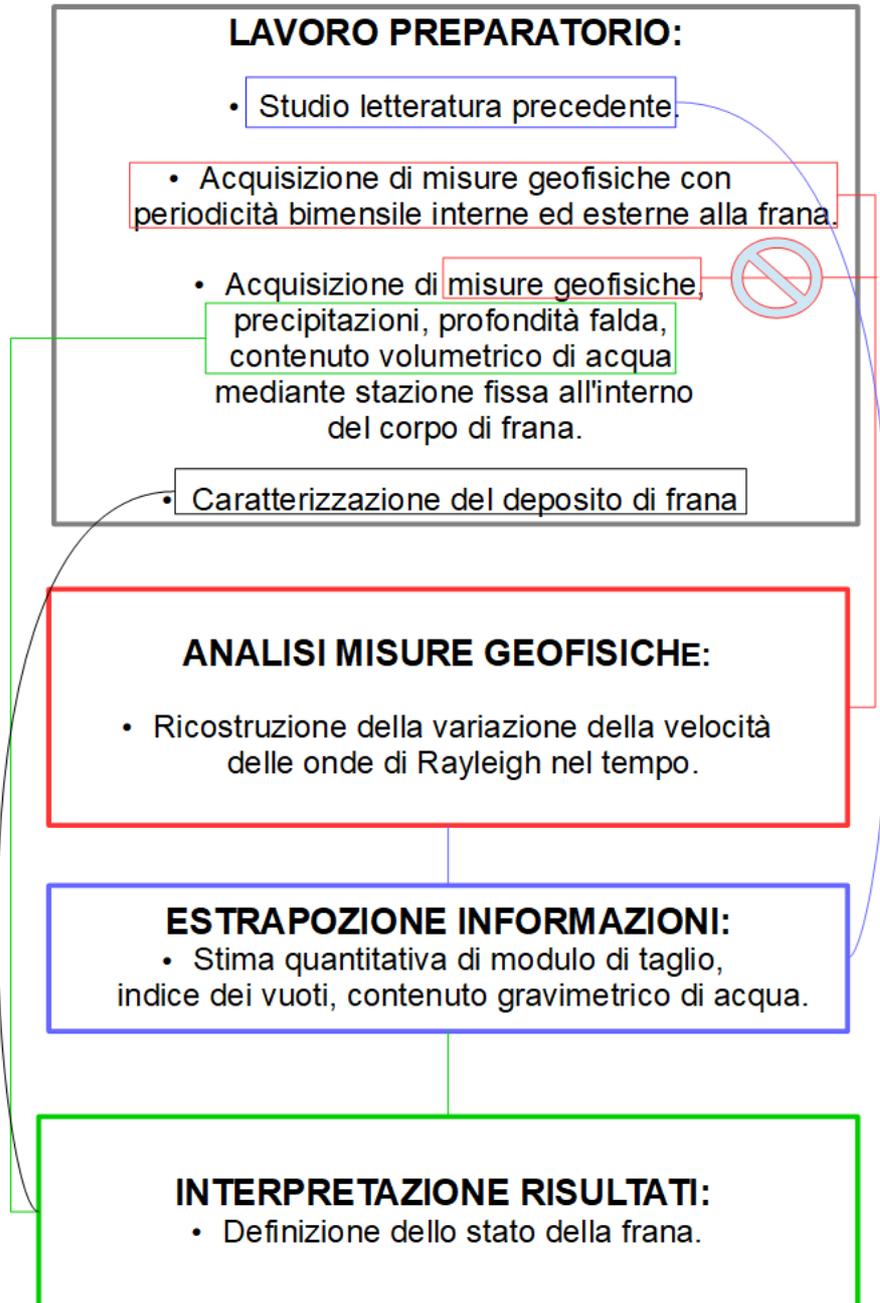


Figura 1: Diagramma di flusso.

### 1.3 Area di studio

La frana oggetto di studio è situata sul versante padano dell'Appennino Settentrionale, in Emilia-Romagna, all'interno del comune di Gaggio Montano (Provincia di Bologna, figura 2).

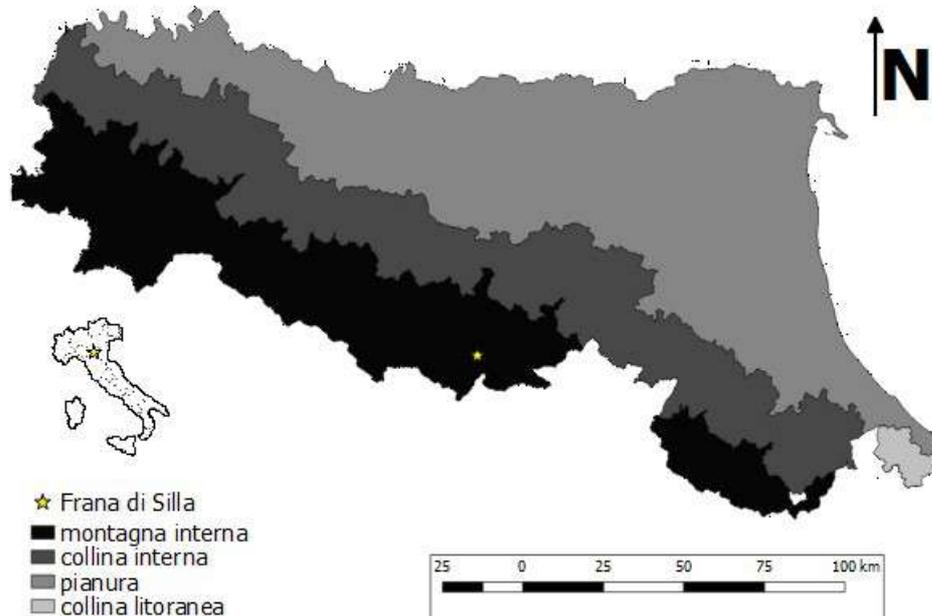


Figura 2: Ubicazione area di studio.

L'area ricade nel bacino idrografico del fiume Marano, ai piedi del versante su cui insiste la frana scorre il fiume Reno (figura 3).



Figura 3: Idrografia dell'area di studio con base ortofoto 2008 (da Geoportale Emilia Romagna).

L'area di studio è caratterizzata da un clima mediterraneo, dove le precipitazioni medie annue sono di 1200-1400 mm/anno (figura 4), la temperatura media annua di 11-12°C (figura 5), la minima invernale da -1 a -0.5°C (figura 6), mentre la massima estiva (figura 7) è 27-28°C (Arpae Emilia Romagna, 2017).

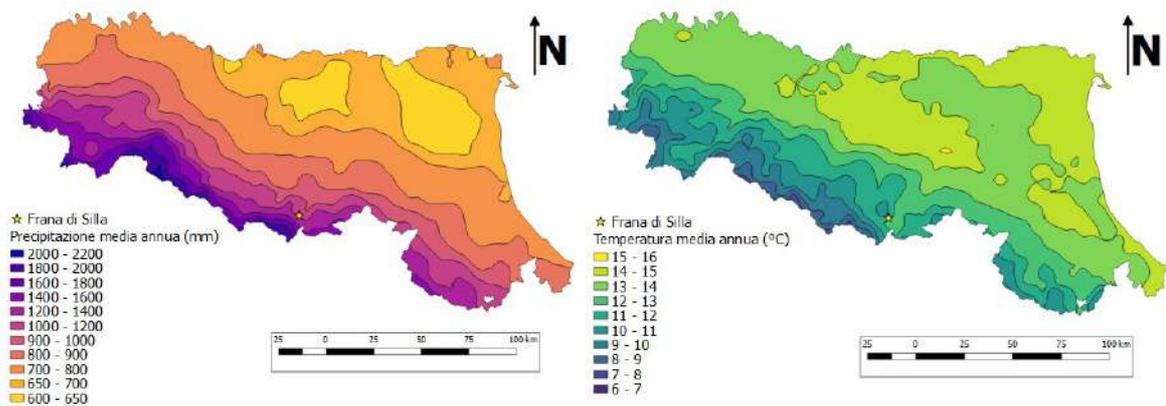


Figura 4: Precipitazioni medie annue (da Figura 5: Temperatura media annua (da Arpae Emilia Romagna).

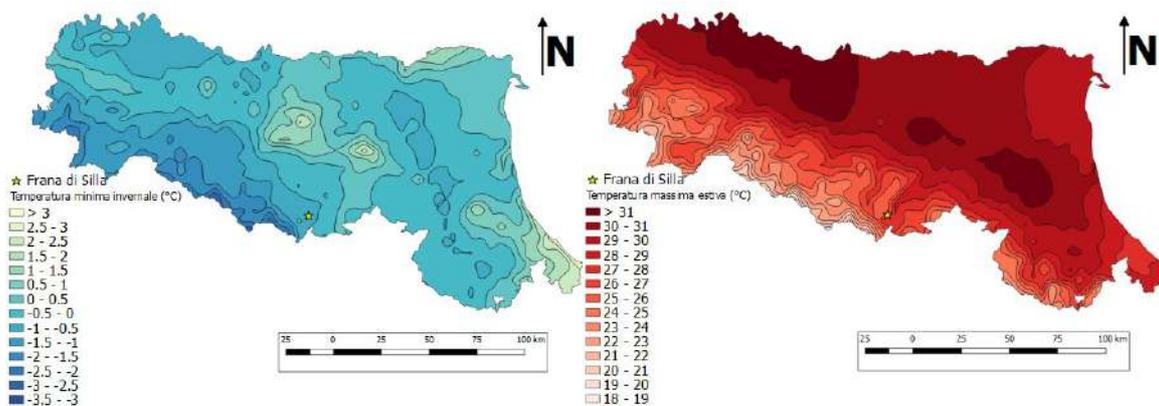


Figura 6: Temperatura minima invernale (da Figura 7: Temperatura massima estiva (da Arpae Emilia Romagna).

Tale clima, assieme alla diffusa presenza di rocce deboli e all'uplift che interessa la catena appenninica, rendono questa zona altamente suscettibile ai fenomeni franosi. A questo riguardo Bertolini e al (2005) stimano che circa un quinto del territorio collinare e montano dell'Emilia-Romagna è interessato da movimenti franosi.

## CAPITOLO 2: STUDI PRECEDENTI

### 2.1 Letteratura

Le colate di terra sono diffuse in tutto il mondo, possono accelerare improvvisamente e talvolta sono caratterizzate da un imprevedibile fluidificazione che può coinvolgere parzialmente o totalmente la massa in frana durante o dopo precipitazioni intense e/o di lunga durata (Bertello e al, 2018; Berti e al, 2018). Molti studiosi si sono dedicati e si dedicano al loro studio al fine di comprenderne il meccanismo.

Varnes (1978) descrive le colate di terra come *“un flusso relativamente meno umido e più lento in un terreno plastico... comune in argille o rocce argillose alterate, su versanti moderatamente inclinati, e con adeguata umidità”* rispetto le colate di detrito.

Successivamente Keefer e Johnson (1983) utilizzano il termine colata di terra per riferirsi a flussi di terra lenti e a lente frane composite scivolamento-colata in terreni fini.

Cruden e Varnes (1996), riassumono dicendo:

*“Il termine comprende da lente colate di terra a lente frane composite (scorrimento di terra-colate di terra) a lenti scorrimenti di terra. Quando i margini laterali o la superficie di rottura è ben visibile, striata e lucidata, la frana può essere classificata come scorrimento di terra; quando la massa è fortemente deformata al suo interno è probabilmente una colata di terra.”*

Nella classificazione di Cruden e Varnes (1996, figura 8) le colate di terra si posizionano all'intersezione tra tipo di movimento flusso e tipo di materiale suolo ingegneristico prevalentemente fine, ovvero limoso-argilloso.

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
			Predominantly coarse	Predominantly fine
FALLS		Rock fall	Debris fall	Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide	Earth slide
	TRANSLATIONAL			
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow	Earth flow (soil creep)

Figura 8: Tabella riassuntiva delle tipologie di frana secondo Cruden e Varnes, 1996.

Le colate di terra sono caratterizzate dalla presenza di tre **unità morfologiche** (Picarelli e al, 2005; figura 9):

- zona sorgente, che mostra di solito forma a catino e scarpate molto acclivi (nelle colate recenti), dove possono essere presenti scorrimenti rotazionali o traslativi, fratture di trazione, colate di terra di ordine minore che contribuiscono ad

- alimentare il corpo di colata centrale,
- canale di flusso, in genere colmo di materiale,
- area di accumulo con forma lobata, che può presentare morfologia “a gradini” dovuta alla sovrapposizione di depositi successivi, e in caso di colate attive, fratture e creste di pressione.

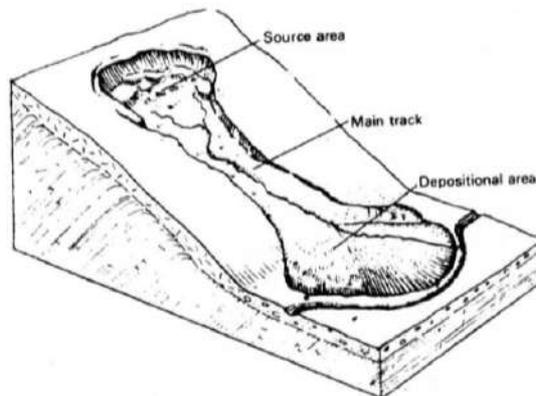


Figura 9: Schema della colata di terra (Cruden e Varnes, 1996).

La **velocità delle colate di terra** è estremamente variabile. Durante l'evento parossistico le colate presentano uno dei seguenti patterns principali (Hutchinson e al, 1974):

- velocità costante per diversi giorni, interrotta da brevi periodi di accelerazione o decelerazione (figura 10a, 10b);
- la colata avanza per diverse ore a relativamente bassa velocità e poi improvvisamente accelera di pochi millimetri o centimetri a relativamente alta velocità (figura 10c);
- la colata avanza di diversi metri al minuto, in questo caso viene chiamata *surge* (figura 10d).

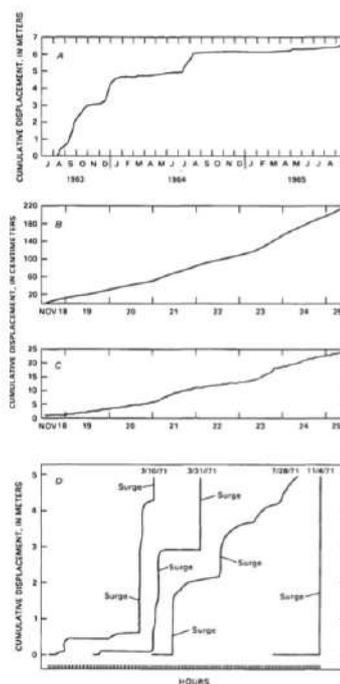


Figura 10: Pattern di velocità riscontrati per colate di terra (Hutchinson e al, 1974).

L'evoluzione morfologica di una singola colata è caratterizzata da quattro stadi (Guida e Iaccarino, 1991):

- A) Mobilizzazione rapida (decine di metri/ora) o moderata (decine di metri/mese), e flusso della massa di suolo,
- B) La frana fluisce con superfici di taglio ben definite e visibili, la velocità può divenire lenta (m/anno),
- C) La superficie è piuttosto rotonda e regolare, la massa è rigida, gli elementi geomorfologici tendono a sparire. Il tasso di spostamento è lento o estremamente lento (mm/anno),
- D) Il corpo di frana non è facilmente riconoscibile sul pendio, il movimento è estremamente lento fino al completo arresto.

Keefer e Johnson (1983) individuano come **elemento mobilizzante** l'aumento delle pressioni interstiziali dovuto a infiltrazione delle acque, a seguito di precipitazioni intense, o a sovraccarico proveniente da monte.

In entrambi i casi accade che l'aumento delle pressioni interstiziali diminuisce gli sforzi efficaci secondo la formula:

$$\tau = c' + \sigma_{eff} \tan \phi' = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'$$

*Formula 1: Criterio di rottura di Mohr-Coulomb in sforzi efficaci.  $\tau$ =sforzo di taglio resistente;  $\sigma_{eff}$ =sforzo normale efficace;  $\sigma_n$ =sforzo normale totale,  $u$ =pressioni interstiziali;  $\phi'$ =angolo di attrito interno efficace;  $c'$ =coesione efficace.*

determinando una resistenza al taglio inferiore alla forza agente. Ciò può condurre alla mobilizzazione della frana.

Secondo la terza legge di Newton, fintanto che la forza motrice supera la forza resistente, il flusso di terra accelera.

Gli autori riconoscono due tipi principali di colate:

1. Colate lente, legate esclusivamente a infiltrazione di acqua, in cui il movimento lento e persistente viene giustificato con la presenza di asperità sulla superficie di scorrimento, che forzano il materiale adiacente alle superfici di taglio a deformarsi e tagliarsi. In pratica nel deposito di frana si verifica un piccolo aumento della pressione dei pori che conduce alla sua mobilizzazione, tuttavia la forza di taglio resistente è di poco inferiore a quella agente e sono sufficienti le asperità della superficie di scorrimento a frenarne il movimento,
2. Colate rapide, generate da importante aumento della pressione dei pori che determina una forza resistente estremamente inferiore alla forza motrice, producendo un importante accelerazione del corpo di frana che è ben poco influenzato dalle asperità sulla superficie di scorrimento.

Tramite swell test gli autori dimostrano che la variazione del contenuto in acqua che accompagna l'attivazione delle colate, mobilizzate per infiltrazione, è connessa principalmente ad un **aumento del grado di saturazione** e in maniera molto ridotta a rimodellamento o altri disturbi interni al suolo.

**Keefer e Johnson (1983) concludono affermando che, sebbene nella massa avvengono alcune deformazioni, la maggior parte del movimento avviene al contorno.**

Picarelli e al (2005) descrivono le colate di terra, al momento dell'innesco, con pattern di deformazione simile ad un liquido viscoso, dove lo strain all'interno è maggiore di quello localizzato sulla superficie di scorrimento (figura 11).

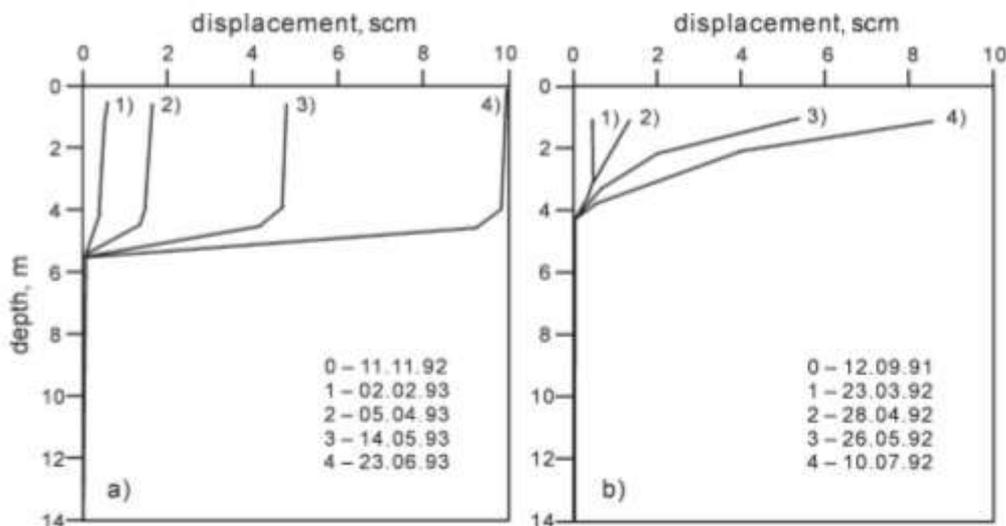


Figura 11: Profilo inclinometrico in due colate di fango (da Picarelli e al. 1995): a) deformazione in frana con movimento lento, b) deformazione in frana con movimento rapido.

Tale deformazione viene attribuita allo **sviluppo di sforzi di taglio plastico su superfici di scorrimento minori e principali che coinvolgono l'intera massa di suolo, dove la resistenza al taglio è prossima a valori residui.**

Gli autori ritengono che non è sufficiente la sola infiltrazione delle acque a determinare un aumento della pressione dei pori che conduce alla riduzione di sforzi efficaci e al conseguente movimento rapido, ma giustificano il meccanismo di attivazione con quattro possibili cause:

- Carico statico, ovvero accumulo di detrito proveniente da monte sul corpo di frana,
- Carico quasi-statico, passaggio di detrito sul corpo di frana,
- Deformazione compressiva. Ad esempio la riattivazione di un vecchio corpo di frana causa sovrappressioni interstiziali per redistribuzione di stato di stress interno o restringimento laterale associato alla presenza di una gola lungo il pendio,
- Effetti di carico sismico.

In passato i metodi di previsione empirici riguardavano il monitoraggio degli spostamenti e dei fattori idrologici del corpo di frana. Dagli anni 2000 gli studiosi hanno iniziato ad applicare la geofisica allo studio di frane, tecnica per molto tempo ritenuta non idonea in quanto non esiste una connessione diretta tra i parametri fisici (output della geofisica) e le proprietà geologiche e meccaniche dei materiali, inoltre la qualità e l'affidabilità dei risultati erano considerate scarse.

**La velocità delle onde di taglio (di seguito  $V_s$ ), è molto sensibile alla decompattazione e all'intensa fratturazione di terreni fini e saturi, quindi si presta bene allo studio delle colate in terra.**

All'interno della frana, il valore di  $V_s$  risulta molto inferiore rispetto a quello del materiale indisturbato. Inoltre i dati mostrano una maggiore diminuzione di  $V_s$  con l'incremento del tasso di spostamento ad indicare che la deformazione gravitativa influenza fortemente  $V_s$  in materiale fine (Jongmans e al, 2009; figura 12).

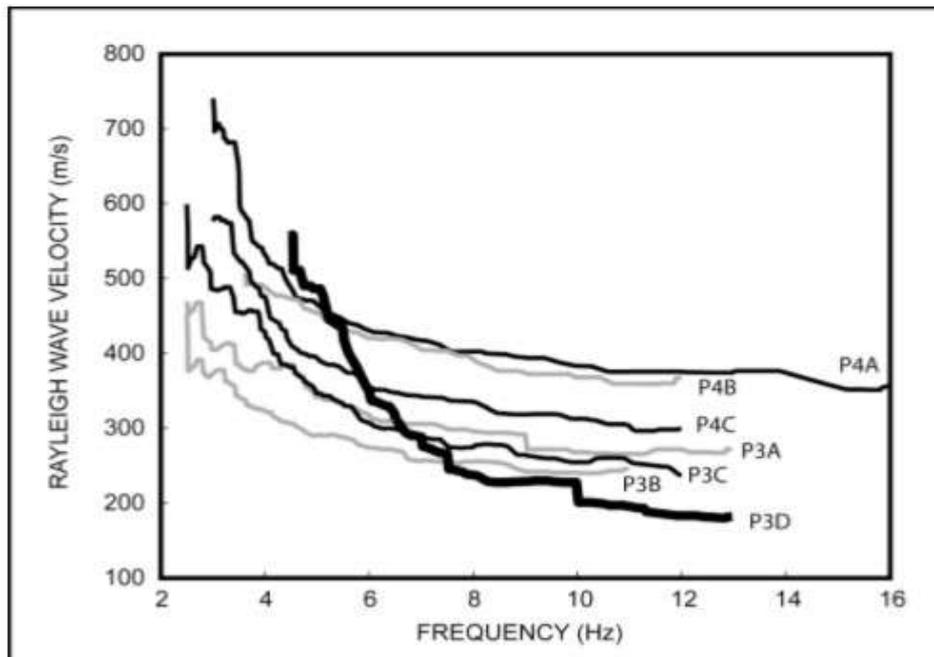


Figura 12: P4A e P4B sono curve di dispersione derivate da segnali registrati da geofoni esterni al corpo di frana, le altre curve provengono da misure interne al deposito. Sul versante sono disposte da monte a valle secondo l'ordine P4C, P3A, P3B, P3C, P3D. La velocità delle onde diminuisce regolarmente dal top (P4C) alla base (P3D) della frana, ad eccezione di P3C (Jongmans e al, 2009).

Renalier e al (2010) asseriscono che l'**intensa fratturazione del materiale** a diversa scala, conseguente a scorrimenti differenziali lungo superfici di scorrimento a varia profondità, determina un **aumento dell'indice dei vuoti, con conseguente incremento del contenuto in acqua del materiale, provocando la diminuzione delle  $V_s$** .

Il monitoraggio della velocità delle onde di taglio, è stato indispensabile per cercare di risolvere il vero fondamentale dogma delle colate di terra: nella comunità scientifica vi è grande dibattito riguardo la loro **reologia**. Non è possibile misurare direttamente in campagna le proprietà reologiche del materiale, ma le  $V_s$  sono un ideale marcatore indiretto.

Alcuni studiosi, come Keefer e Johnson (1987), Picarelli e al (2005), ritengono che il materiale si comporti secondo un **modello elastoplastico**, dove la rottura è governata dal criterio di attrito, ovvero la fluidificazione del suolo avviene tramite l'aumento delle pressioni dei pori che determina l'annullamento degli sforzi efficaci.

Altri suppongono che il materiale segua un **modello viscoplastico**, in questo caso il suolo può fluire se sottoposto ad uno stress di taglio superiore a un certo valore critico  $\tau_c$ ; quest'ultimo è ritenuto proprietà intrinseca del materiale a un dato contenuto in acqua.

Nessuno dei due modelli preclude l'altro, sebbene è importante considerare che i suoli ricchi in argilla hanno una certa coesione non drenata, e che dunque il modello elastoplastico può giustificare l'apparente fluidificazione della massa in frana, ovvero la morfologia 'flow like', con la presenza di superfici di taglio interne al corpo (Bertello e al, 2018).

Maisant e al (2015) hanno constatato che con aumento della frazione fine in una sospensione grossolana, si verifica una variazione di reologia da regime elastoplastico a viscoso.

Maisant e al (2012a, 2012b, 2015) interpretano la significativa attenuazione delle Vs come risultante del **decadimento delle proprietà meccaniche del materiale**, che assume **comportamento viscoso**.

Il materiale fine si comporta come un fluido non newtoniano, che fluisce se la soglia di stress critico  $\tau_c$  viene superata. Maisant e al (2012b) tramite indagini di laboratorio (test reometrico) dimostrano che materiale con contenuto in acqua superiore al limite liquido, se sottoposto a stress inferiore alla tensione di snervamento, mostra un aumento di viscosità con il tempo, e il tasso di deformazione tende progressivamente a zero. Mentre se lo stress è leggermente oltre il critico, un tasso di deformazione costante viene raggiunto, ad indicare che il materiale fluisce.

La repentina transizione solido-fluido per variazioni minime dello stress critico si definisce biforcazione di viscosità.

Inoltre, per alcuni tipi di argilla, con l'aumento del contenuto d'acqua è stato osservato un comportamento trisotropico del materiale, ovvero il materiale se messo in moto diventa meno viscoso. Superata la tensione di snervamento la velocità di deformazione diminuisce per breve tempo, per poi aumentare rapidamente e raggiungere un tasso di deformazione costante (figura 13).

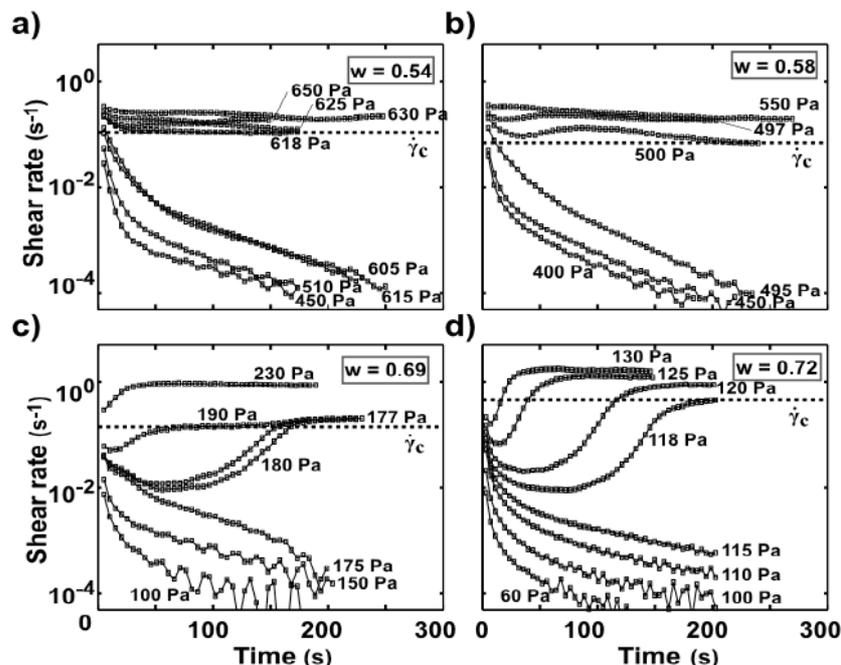


Figura 13: Test reometrici eseguiti su diversi campioni (da Maisant e al, 2012b).

Un contenuto d'acqua superiore al limite liquido non è sufficiente per permettere la fluidificazione del materiale, ma è necessario uno stress esterno superiore alla tensione di snervamento.

Mainsant e al (2012b) hanno osservato che il passaggio da dominio plastico a dominio liquido è marcato da una brusca variazione di attenuazione di velocità, ovvero fintanto che si è sotto il limite liquido  $V_s$  diminuisce rapidamente con l'aumento del contenuto in acqua, mentre al di sopra il tasso di decadimento è fortemente ridotto (figura 14).

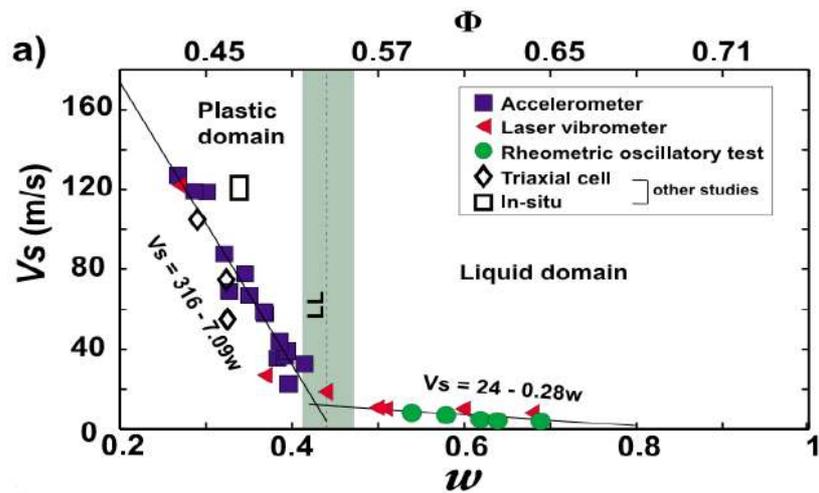


Figura 14: Trend di attenuazione della velocità delle onde di taglio con la variazione del contenuto in acqua (Mainsant e al, 2012b).

Mainsant e al (2012a) hanno osservato decadimento di valori di  $V_s$  precedenti alla fluidificazione della frana (figura 15).

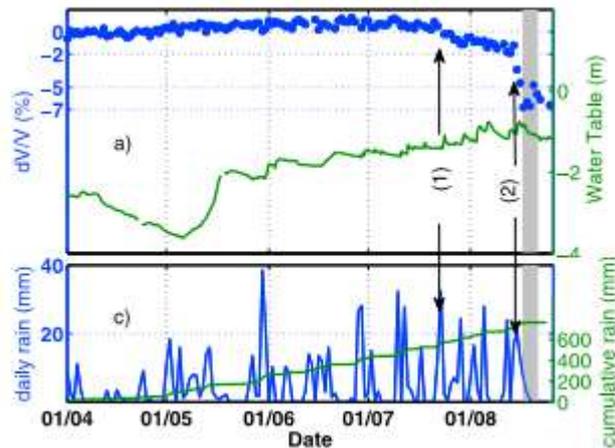


Figura 15: Diminuzione dei valori di  $V_s$  precedenti all'attivazione della frana (Mainsant, 2012a).

Il monitoraggio di  $V_s$  può essere quindi molto importante a fine di allerta, ad esempio tramite l'installazione di stazioni fisse, già testate in campo da Renalier e al (2010).

Bertello e al (2018) hanno monitorato la variazione della velocità delle onde di Rayleigh in una colata di terra subito dopo la rapida mobilitazione, e per alcuni mesi seguenti, riscontrando valori estremamente inferiori nel corpo di frana rispetto la massa indisturbata (figura 16, 17). Inoltre hanno osservato un aumento graduale delle velocità col progredire della decelerazione della frana.

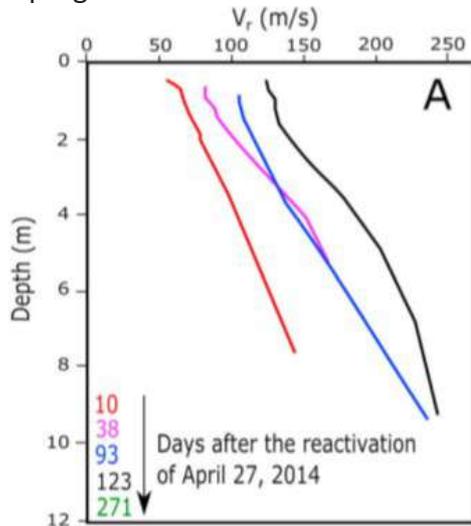


Figura 16: Variazione di velocità delle onde di Rayleigh all'interno del corpo di frana (Bertello e al, 2018).

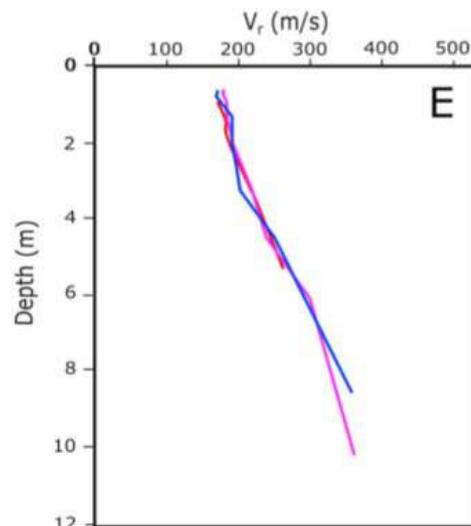


Figura 17: Variazione di velocità delle onde di Rayleigh all'esterno del corpo di frana (Bertello e al, 2018).

Gli autori suppongono che le colate di terra, quando soggette a rapido movimento, si comportano come un fluido per poi tornare allo stato plastico con la riconsolidazione del materiale che avviene secondo un trend non lineare tipico del processo di consolidazione. Dai valori di velocità hanno estratto una stima quantitativa della variazione degli indici dei vuoti (figura 18).

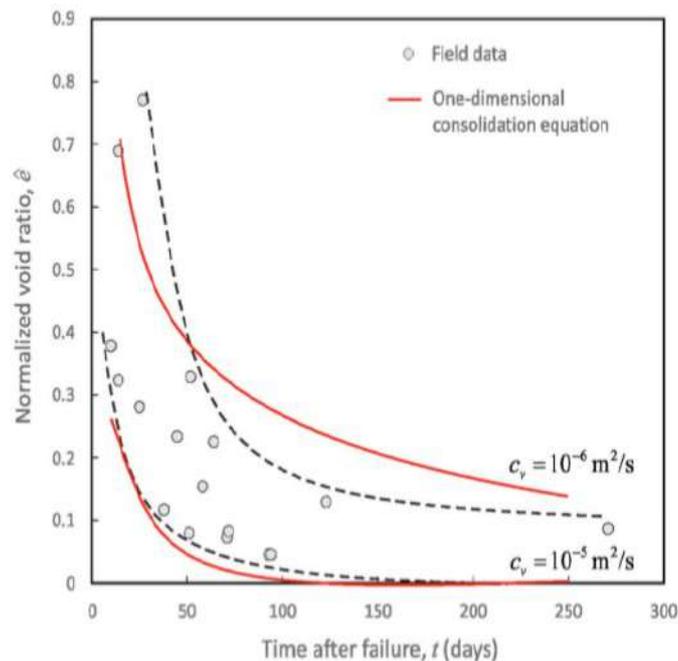


Figura 18: Variazione dell'indice dei vuoti del terreno secondo il tipico trend di consolidazione monodimensionale (Bertello e al, 2018).

Il modulo di taglio di un suolo ( $G_0$ ) dipende dal volume dei vuoti, dalla deformazione di taglio, dallo stress effettivo. Se la colata di terra si muove come un corpo rigido e il materiale non fluidifica, la rigidità di taglio dovrebbe rimanere relativamente alta, mentre in un fluido tende a zero (Berti e al, 2018).

Berti e al (2018) hanno monitorato l'evoluzione della velocità delle onde di Rayleigh in colate di terra e frane in roccia per lunghi periodi. Nelle colate di terra hanno rilevato un aumento della rigidità di taglio con il passare del tempo dall'evento parossistico, mentre nelle colate di roccia questa rimane essenzialmente costante, a denotare che le prime tendono a ristabilire la porosità e il contenuto di umidità che possedevano prima della mobilitazione.

## CAPITOLO 3: LA FRANA DI SILLA

### 3.1 Inquadramento geologico

L'Appennino Settentrionale è una catena orogenetica di età alpina che si è generata dalla chiusura del bacino oceanico ligure-piemontese individuatesi nel Giurassico tra il blocco adriatico e quello iberico (Elter, 1994; figura 19).

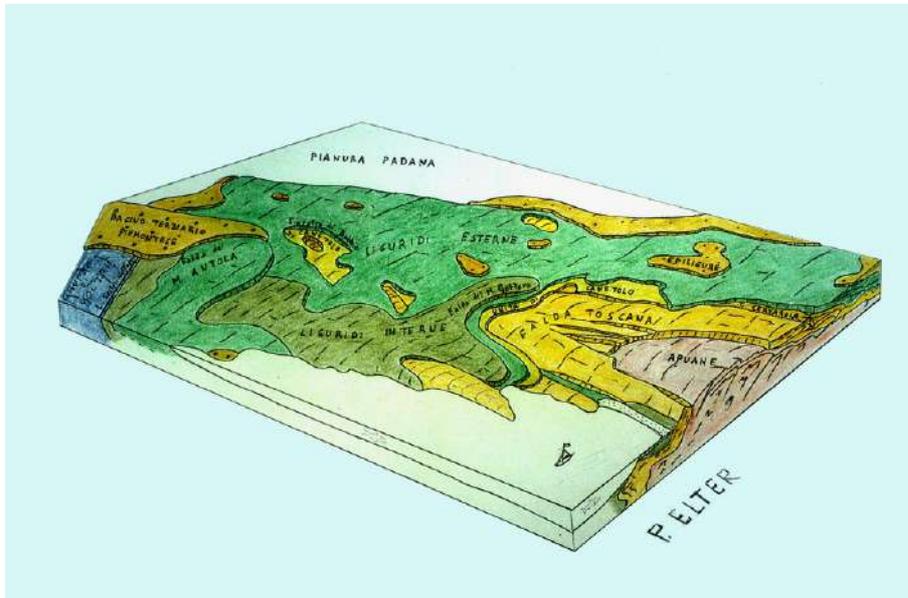


Figura 19: Block-diagram dell'Appennino Settentrionale (Elter, 1994).

La fase di chiusura legata a subduzione intraoceanica si è sviluppata dal Cretaceo Superiore fino a Eocene Medio, a cui è seguita la fase di collisione continentale dall'Eocene Medio al Miocene Superiore che ha portato alla principale strutturazione della catena appenninica (Marroni e al, 2010).

Nell'area di studio affiorano i complessi di base delle Unità Liguri (o formazioni pre-Flysch), ampiamente esposti lungo l'Appennino Settentrionale, da Pavia a Bologna (figura 20).

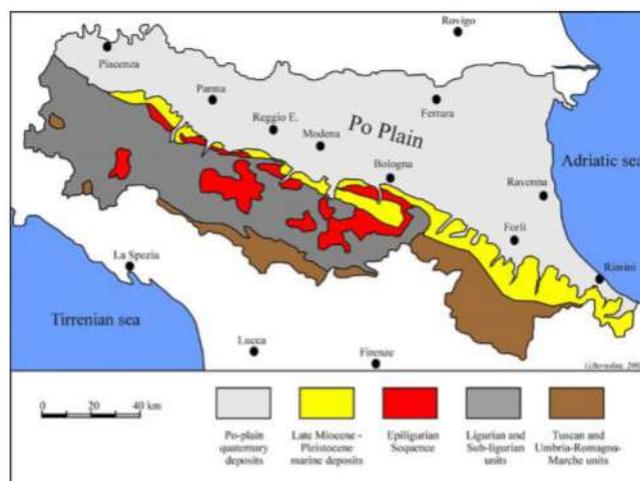


Figura 20: Geologia dell'Emilia Romagna (Bertolini e al, 2005).

Le Formazioni pre-Flysch sono mélanges tettonici, conosciuti con il nome di “Argille Scagliose”.

In particolare la frana oggetto di studio interessa la Formazione delle *Argille a Palombini* (figura 21).

Queste ultime sono depositi di ambiente pelagico sedimentati nel periodo Beriasiano-Turoniano durante la fase di apertura del bacino oceanico ligure piemontese e durante i primi stadi della subduzione intraoceanica. Le *Argille a Palombini* possono includere grandi blocchi di breccie ofiolitiche del Giurassico Superiore, a testimoniare che si sono sedimentate in concomitanza all'espansione di un fondo oceanico (Marroni e al, 2010).

Il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia Romagna le descrive come *“Argilliti siltose grigio scure e grigio-azzurrognole intercalate a calcilutiti silicizzate grigio chiare e grigio-verdi in strati da medi a spessi, talora a base arenitica media, pervasivamente fratturate. Locali intercalazioni di calcari marnosi grigi e verdi in strati spessi ed alternanze torbiditiche costituite da siltiti ed arenarie fini in strati molto sottili e sottili di colore grigio scuro e calcareniti medio-grossolane in strati da medi a spessi”*.

In particolare nell'area di studio si presentano come una matrice caotica di scisti argillosi con inclusi clasti di calcare di dimensioni anche decimetriche.

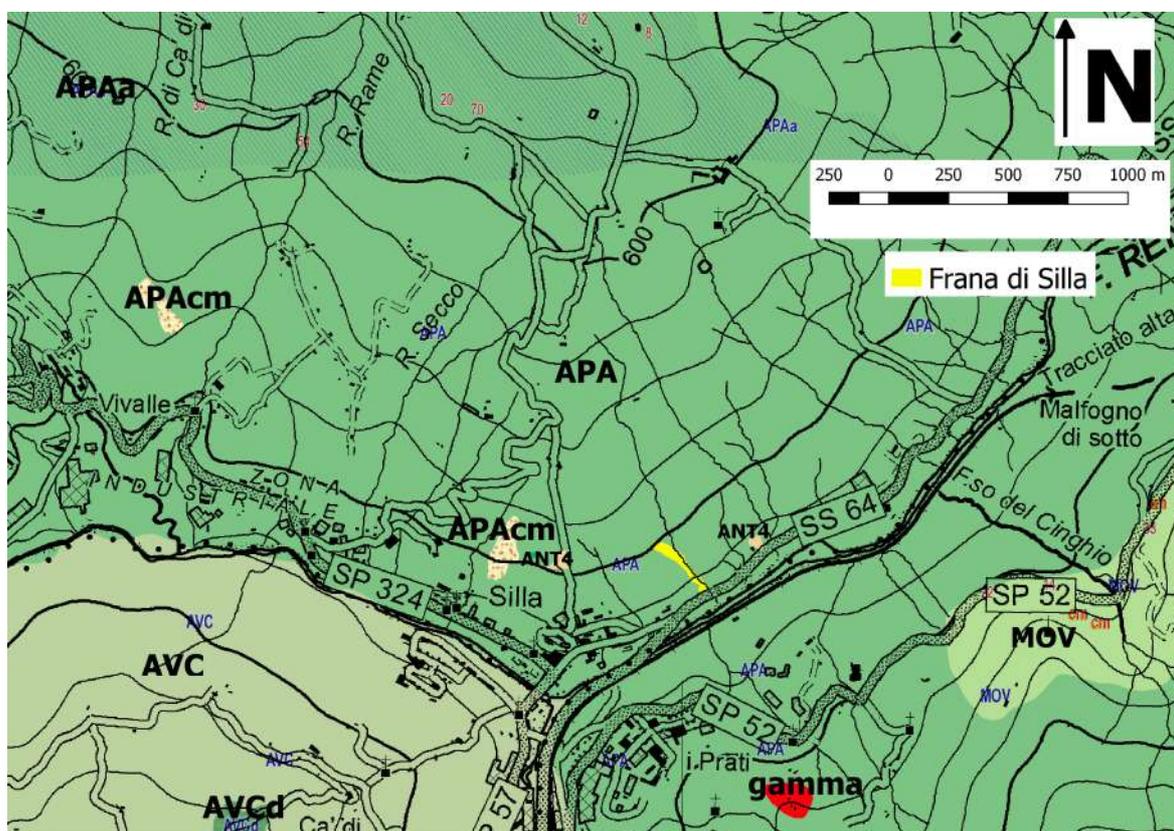


Figura 21: AN4 - Marne di Antognola - membro di Anconella. APA - Argille a palombini. APAa - Argille a palombini - litozona argillitica. APAcM - Argille a palombini - litofacies calcareo-marnosa. AVC - Argilliti variegata con calcari. AVCd - Argilliti variegata con calcari - litofacies calcareo marnosa. gamma – Gabbri. MOV - Formazione di Monte Venere (Carta Geologica 1:10000, Geoportale Emilia Romagna).

### 3.2 Stato del versante prima dell'ultima riattivazione

Le Unità Liguri mostrano la più alta predisposizione all'instabilità della regione Emilia-Romagna, con un *Landslide Density Index* tra 20% e 40% (Bertolini e al, 2005).

La quasi totalità delle frane che oggi avvengono sul territorio emiliano coinvolge depositi di frana preesistenti, originatesi in seguito all'ultimo massimo glaciale e successivamente accresciute durante i periodi più piovosi dell'Olocene (Bertolini e al, 2005).

La frana di Silla ha riattivato parzialmente un corpo di frana preesistente di cui non si ha documentazione storica.

L'antica frana ricopre un'area di circa 5 ettari, con un perimetro di 1.5 chilometri, e si estende per una lunghezza di 650 metri, dalle quote di 315 a 415 metri sul livello del mare (figura 22).

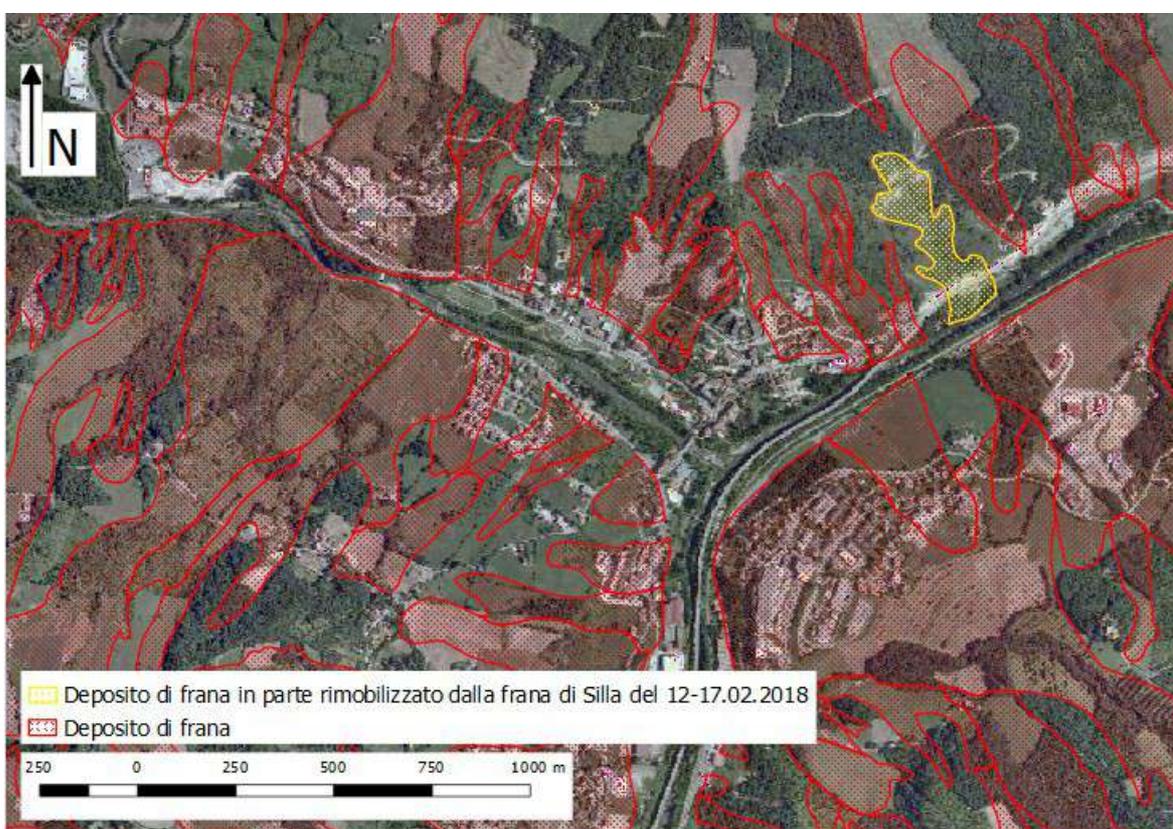


Figura 22: Poligoni estratti da Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna - Carta Inventario delle frane a scala 1:10000 della Regione Emilia-Romagna.

Il versante su cui insiste la frana ha pendenza relativamente debole ( $5^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ) che si accentua nella parte alta raggiungendo valori anche di oltre  $25^{\circ}$  (figura 23).

In figura 24 e 25 rispettivamente esposizione e hillshade della frana preesistente.

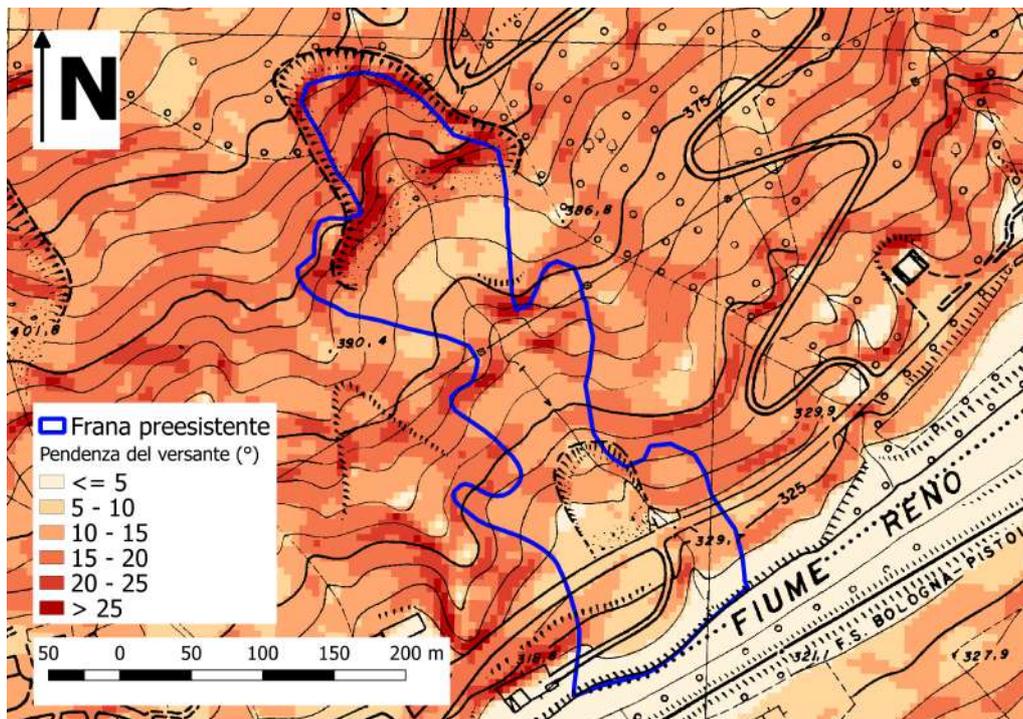


Figura 23: Prodotto ricavato da DEM estratto dall'interpolazione di punti quotati e curve di livello in scala 1:5000 dal Database Topografico della regione Emilia-Romagna (<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it/catalogo/dati-cartografici/altimetria>).

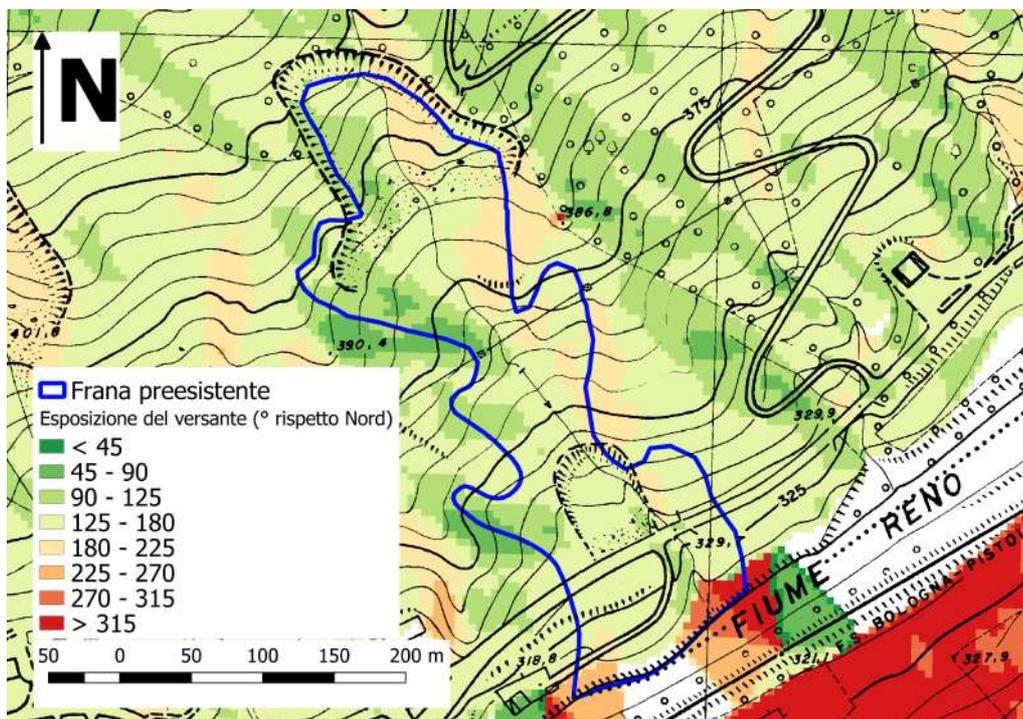


Figura 24: Prodotto ricavato da DEM estratto dall'interpolazione di punti quotati e curve di livello in scala 1:5000 dal Database Topografico della regione Emilia-Romagna (<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it/catalogo/dati-cartografici/altimetria>).

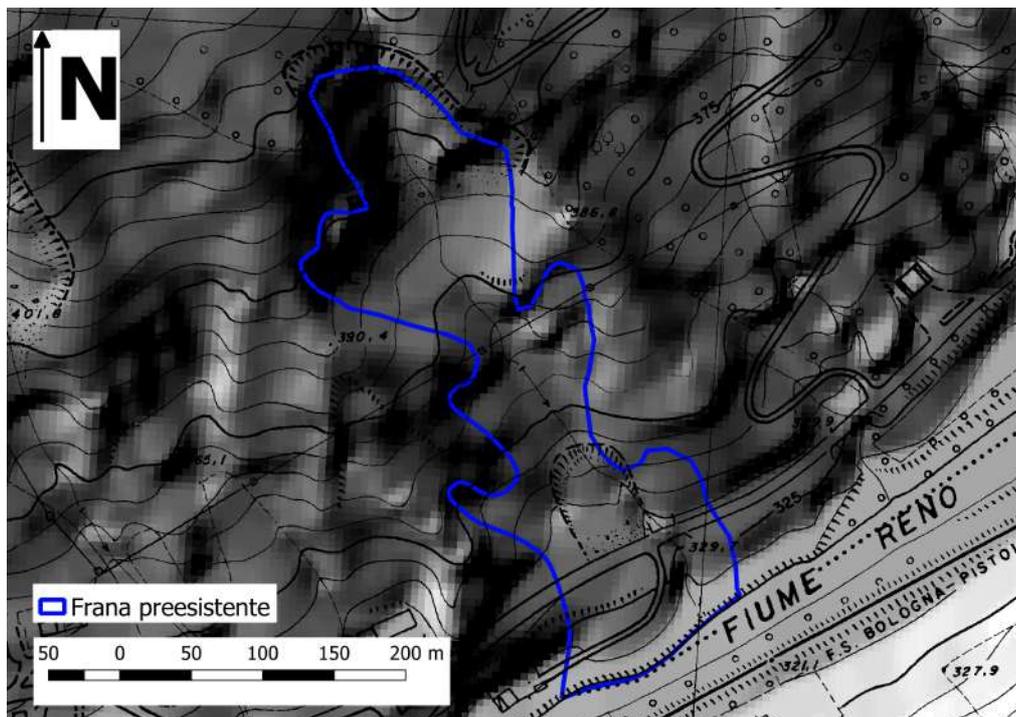


Figura 25: Prodotto ricavato da DEM estratto dall'interpolazione di punti quotati e curve di livello in scala 1:5000 dal Database Topografico della regione Emilia-Romagna (<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/it/catalogo/dati-cartografici/altimetria>).

Il pendio è in prevalenza coperto da vegetazione arbustiva e arborea in evoluzione, ma nella parte alta, dove le pendenze sono maggiori, fenomeni di erosione in rapida evoluzione sono visibili. Sul versante è presente un canale munito di briglia (figura 26).

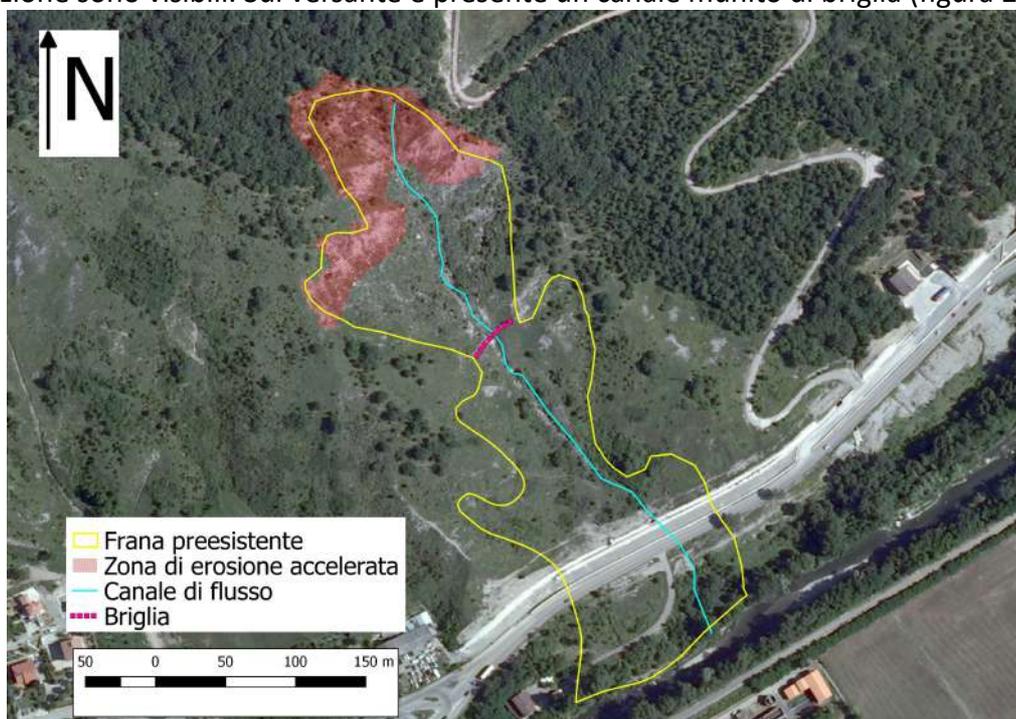


Figura 26: Il poligono di frana preesistente è stato estratto da Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna - Carta Inventario delle frane a scala 1:10000 della Regione Emilia-Romagna.

Sul piede del corpo di frana corre la strada statale ex SS64 Porrettana.

Osservando le ortofoto disponibili sul portale della regione Emilia Romagna si può apprezzare la formazione di fratture e la presenza di due masse di terra in movimento nel periodo 2008-2017. La massa in movimento sulla destra idrografica del piccolo canale si colloca in prossimità della zona di alimentazione della frana di Silla (paragrafo 3.3).

Tramite ArcGis Web Application del Geoportale dell'Emilia-Romagna si è tentato di mappare lo spostamento di alcuni elementi sui due versanti, in maniera tale da apprezzare lo spostamento delle due masse nel periodo 2008-2017 (figura 27).

Gli elementi mappati sono aree delimitate prive di vegetazione che mantengono forma e dimensione inalterata nel periodo di analisi (figura 28, 29, 30, 31).

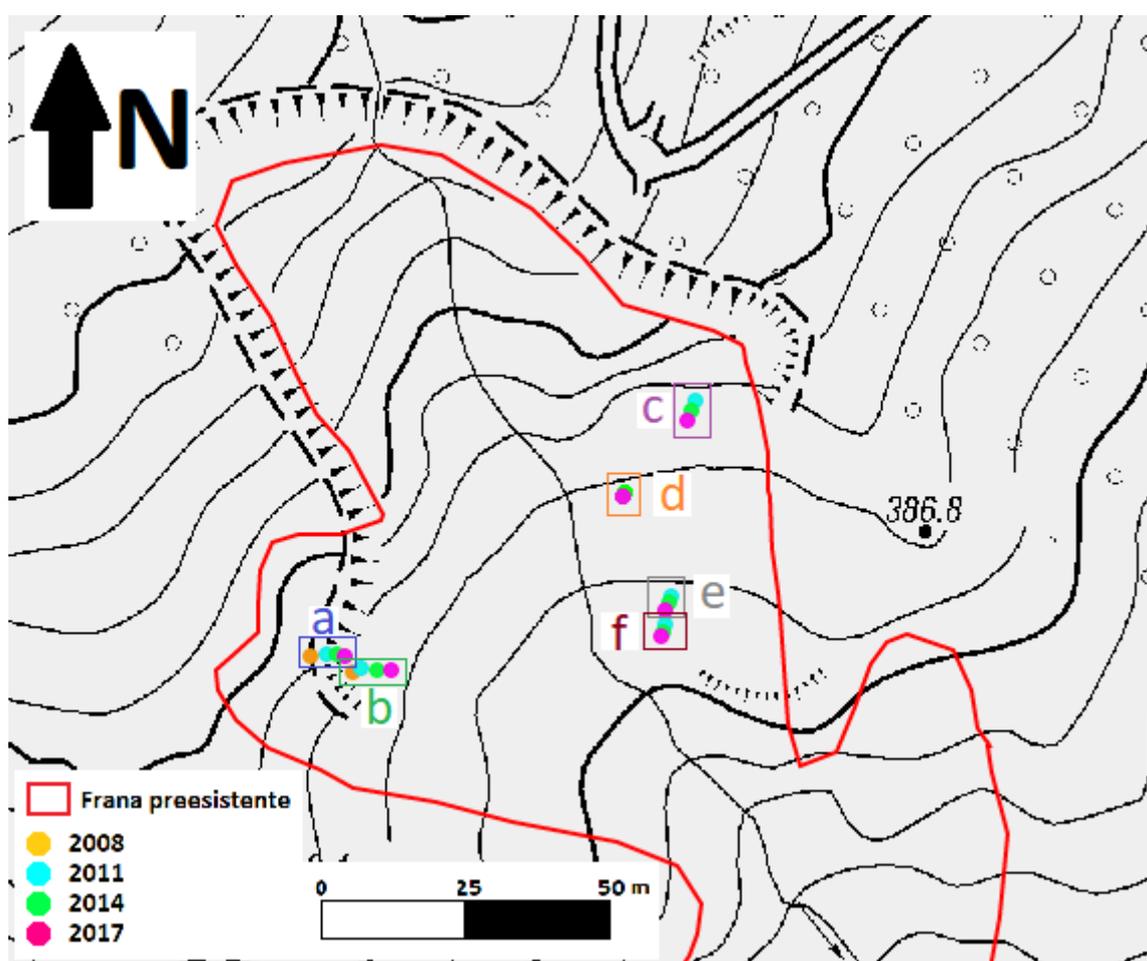
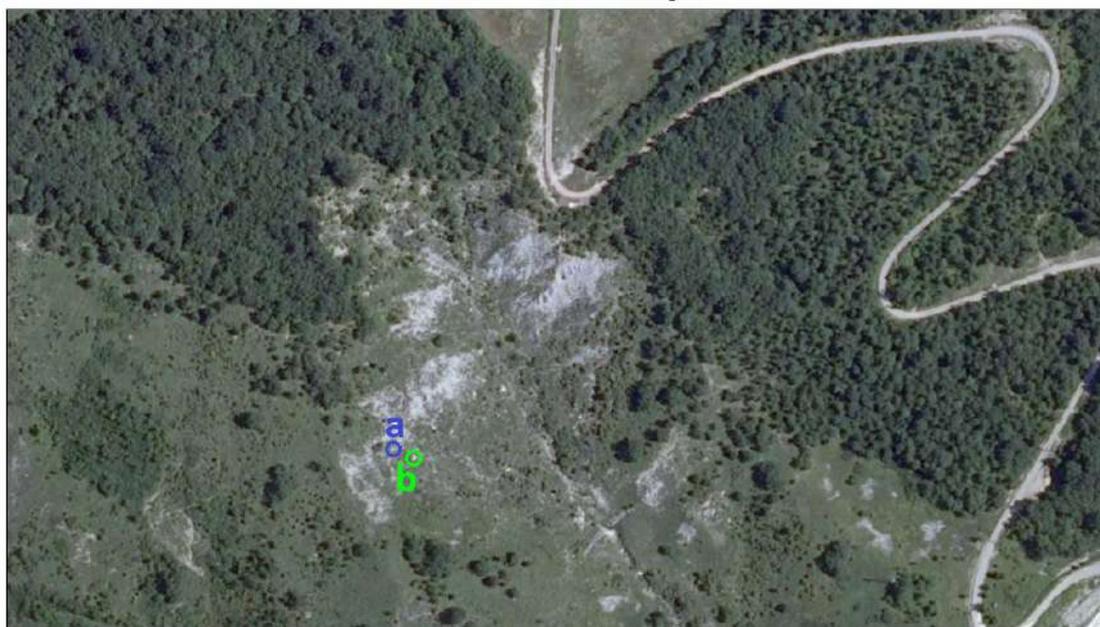


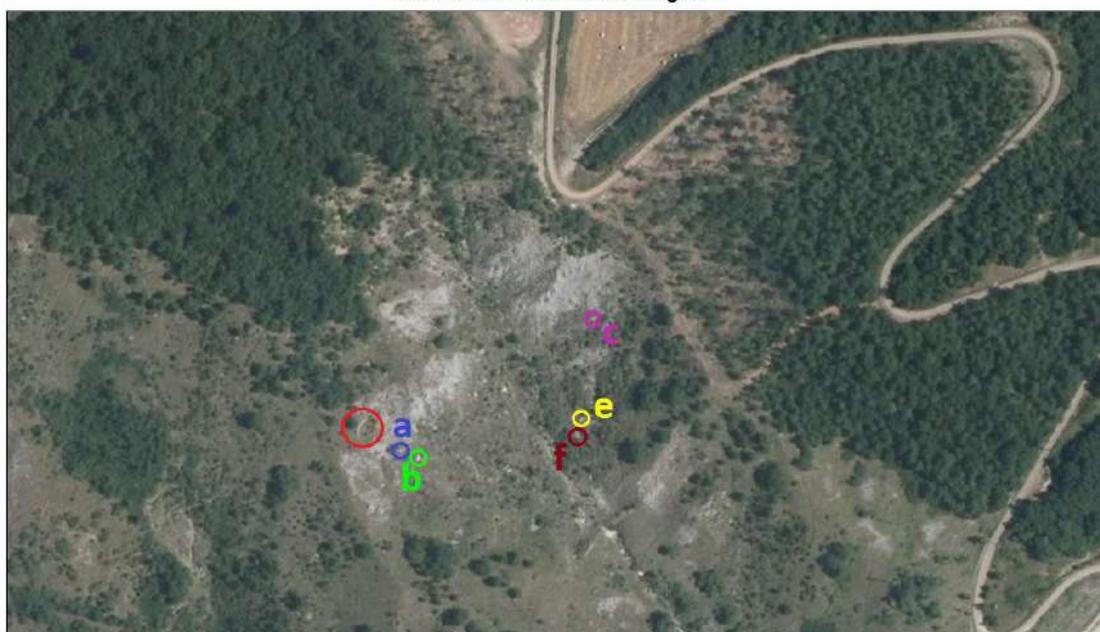
Figura 27: Ubicazione degli elementi di cui si è mappato lo spostamento tramite ArcGis Web Application del Geoportale dell'Emilia-Romagna.

Ortofoto in Emilia-Romagna



*Figura 28: Ortofoto 2008, da Geoportale Emilia-Romagna.. Elementi a e b posizionati al centro del cerchio che li delimita.*

Ortofoto in Emilia-Romagna



*Figura 29: Ortofoto 2011, da Geoportale Emilia-Romagna. All'interno del cerchio rosso frattura in zona di alimentazione della frana di Silla. Elementi a, b, c, e, f posizionati al centro del cerchio che li delimita.*

Ortofoto in Emilia-Romagna



Figura 30: Ortofoto 2014, da Geoportale Emilia-Romagna. All'interno del cerchio rosso frattura in zona di alimentazione della frana di Silla. Elementi a, b, c, d, e, f posizionati al centro del cerchio che li delimita.

Ortofoto in Emilia-Romagna

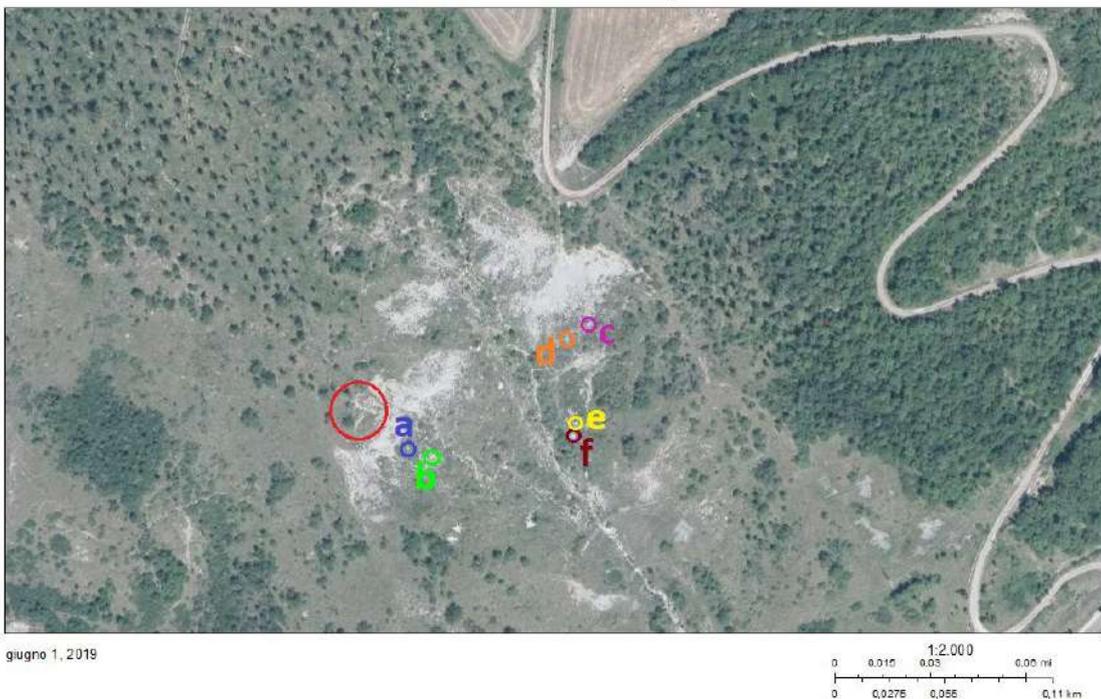


Figura 31: Ortofoto 2017, da Geoportale Emilia-Romagna. All'interno del cerchio rosso frattura in zona di alimentazione della frana di Silla. Elementi a, b, c, d, e, f posizionati al centro del cerchio che li delimita.

Le colate di terra per la maggior parte della loro vita presentano velocità dell'ordine di mm/anno-m/anno ricadendo nelle classi “estremamente lento” e “molto lento” della classificazione di Cruden e Varnes (1996), presentano un incremento del tasso di movimento in relazione a precipitazioni particolarmente intense e/o prolungate e all'aumento stagionale della pressione dei pori (Simoni e al, 2013).

Per le due masse è stata stimata una velocità media di circa 1 m/anno (tabella 1), in accordo con i tipici valori di velocità delle frane in terra.

<b>Elemento</b>	<b>Metri 2008-2011</b>	<b>Velocità media 2008-2011 (m/anno)</b>	<b>Metri 2011-2014</b>	<b>Velocità media 2011-2014 (m/anno)</b>	<b>Metri 2014-2017</b>	<b>Velocità media 2014-2017 (m/anno)</b>
<b>a</b>	<b>4</b>	<b>1,3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0,7</b>
<b>b</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>1,3</b>	<b>4</b>	<b>1,3</b>
<b>c</b>	-	-	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
<b>d</b>	-	-	-	-	<b>2</b>	<b>0,7</b>
<b>e</b>	-	-	<b>2,5</b>	<b>0,8</b>	<b>2</b>	<b>0,7</b>
<b>f</b>	-	-	<b>2,5</b>	<b>0,8</b>	<b>1</b>	<b>0,3</b>

*Tabella 1: Spostamento dagli elementi sul versante estratto dall'analisi delle ortofoto e velocità media derivata.*

### 3.3 La riattivazione del 12-17 febbraio 2018

L'evento parossistico che ha generato la frana di Silla si è verificato tra il 12 e il 17 febbraio 2018.

Il febbraio 2018 è stato un mese particolarmente piovoso, con precipitazioni superiori alla norma, durante il quale sono stati registrati circa 75 mm in eccesso rispetto al trentennio 1961-1990 (Arpae, 2018). Evento rilevante sono state le intense nevicate del 2-3 febbraio, seguite da moderate precipitazioni, circa 10 mm/giorno. Questa aliquota di ricarica è andata con ogni probabilità a saturare il versante.

L'evento parossistico ha inizio il 12 febbraio a seguito di una precipitazione giornaliera di 8 mm (figura 32).

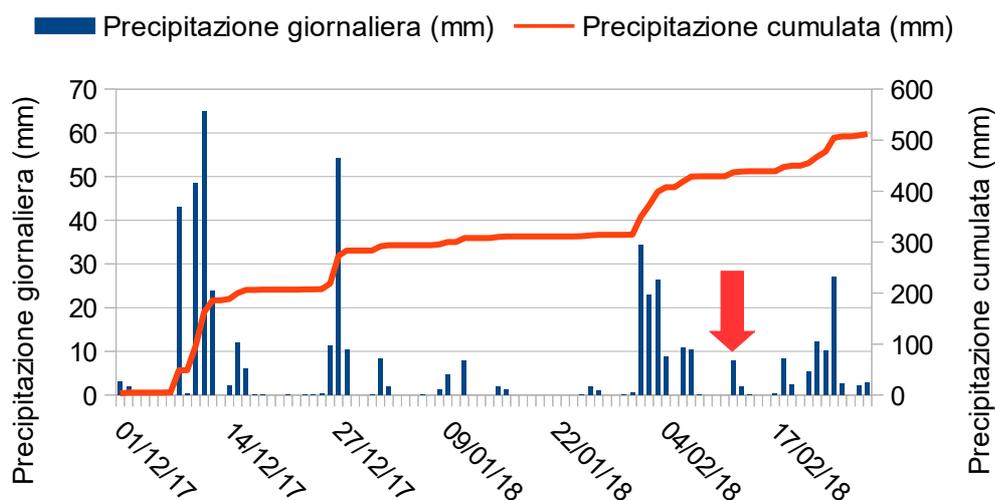


Figura 32: Dati registrati dalla stazione pluviometrica di Porretta (servizio Dext3r, Arpae). La freccia rossa indica il 12 febbraio. La freccia rossa si colloca in prossimità del 12 febbraio 2018.

Le precipitazioni e la presenza di una massa già in movimento sul versante (paragrafo 3.2) con basse proprietà meccaniche favoriscono l'innescò della frana.

All'apice della frana è presente una corona arcuata (figura 33, 36), lunga 80 metri, che sottende una scarpata con un dislivello di circa 10 metri (400-410 metri s.l.m). A monte della corona sono presenti fratture di trazione.



Figura 33: Corona della frana di Silla.

Il 27 marzo 2018 la scarpata presentava striature e solchi (figura 34), e mostrava tre porzioni a diversa pendenza (figura 35, 36).



Figura 34: Strie sulla scarpata della frana di Silla. Figura 35: Panoramica della scarpata della frana di Silla per apprezzare le tre pendenze.

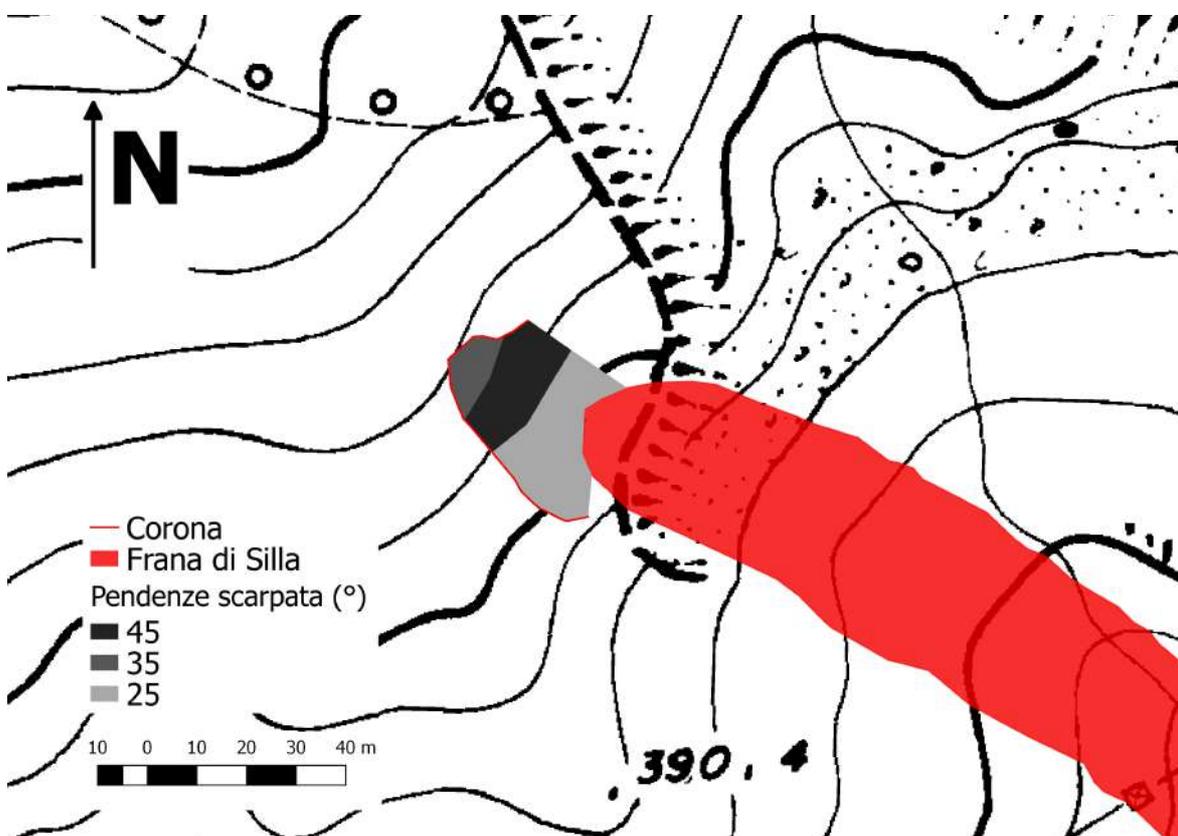


Figura 36: I limiti della frana e le altre caratteristiche sono state acquisite in campagna mediante il software gratuito Locus Map.

Il deposito di frana è lungo circa 420 metri, raggiunge una larghezza massima di 50 metri, e si estende tra le quote di 330 e 400 m s.l.m ricoprendo un ettaro di terreno.

L'estremità superiore del corpo di frana è a contatto con la scarpata (figura 37) e sono presenti contropendenze e gradini di frana (figura 38, 39).



*Figura 37: Deposito di frana a contatto con la scarpata.*

*Figura 38: Contropendenza e gradino di frana con fratture. L'inclinazione verso monte dell'albero permette di apprezzare la contropendenza.*



*Figura 39: Contropendenze e gradini di frana.*

A valle la morfologia diviene più caotica, ondulata (figura 40, 41), assumendo aspetto simile ad un flusso, con superfici di taglio laterali e argini (figura 42, 43).



*Figura 40: Morfologia caotica.*



*Figura 41: Zona di accumulo a valle della briglia.*



*Figura 42: Superfici di taglio sui bordi della frana.* *Figura 43: Panoramica dall'alto della corona.*

La zona di accumulo ha forma lobata (figura 44).



*Figura 44: Verso valle il deposito si espande assumendo forma lobata.*

La frana durante l'evento parossistico ha parzialmente distrutto la briglia collocata lungo il versante (figura 45) ed ha invaso la strada sottostante.



*Figura 45: Briglia coinvolta dal movimento franoso.* *Figura 46: Panoramica della frana di Silla.*

Si tratta di un movimento composto scorrimento di terra-colata (figura 46, 47), la cui velocità non è nota. In genere questo tipo di frane presenta velocità dell'ordine di m/h.

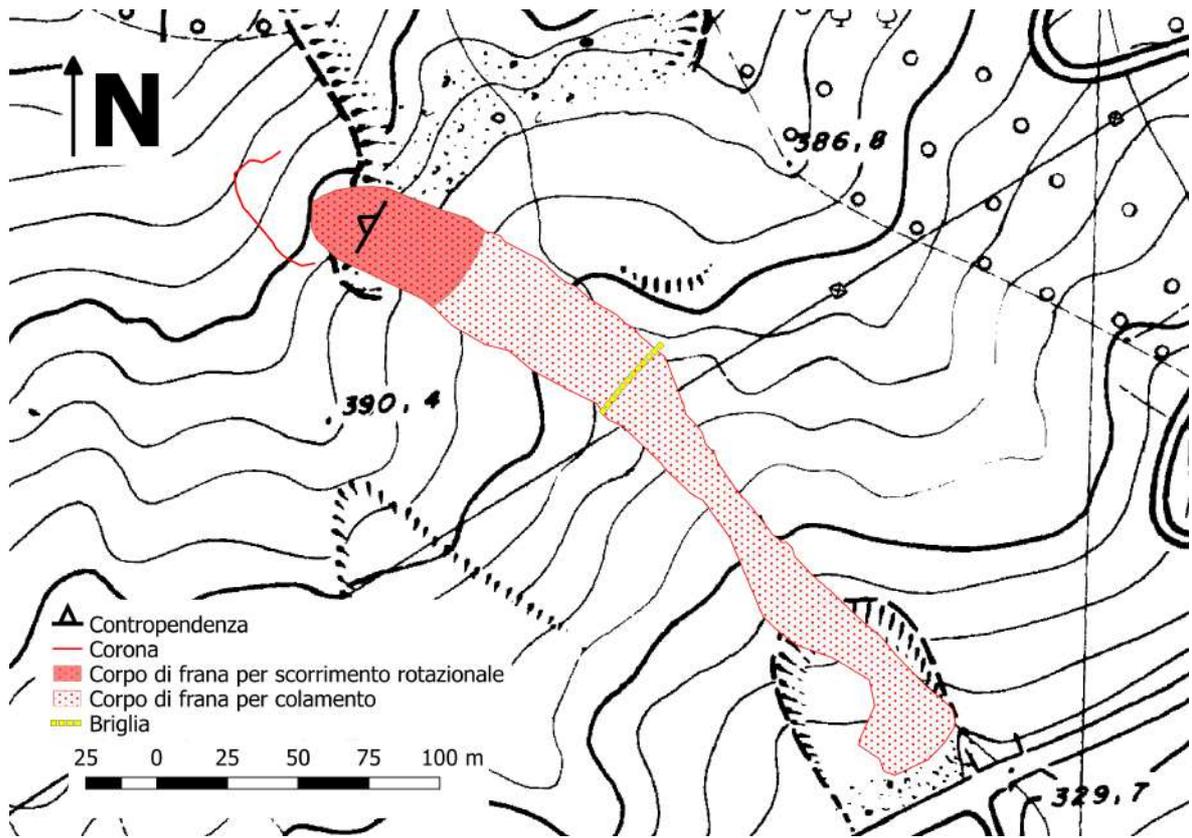


Figura 47: La frana di Silla è stata mappata mediante il software gratuito Locus Map.

### 3.4 Caratterizzazione del terreno della frana di Silla

Il 27 marzo 2018, a più di un mese dall'attivazione, durante il secondo sopralluogo sulla frana di Silla, il deposito risultava talmente molle che era difficile sostare per più di pochi secondi senza sprofondare. Per installare la stazione di monitoraggio (paragrafo 4.2) è stato necessario cambiare spesso posizione e impilare blocchi decimetrici di roccia su cui stare in piedi.

Il terreno era così molle che è stato possibile infiggere con poco sforzo una trivella fino a due metri di profondità (figura 49, 50), contestualmente sono stati prelevati 7 campioni (figura 48, 51).

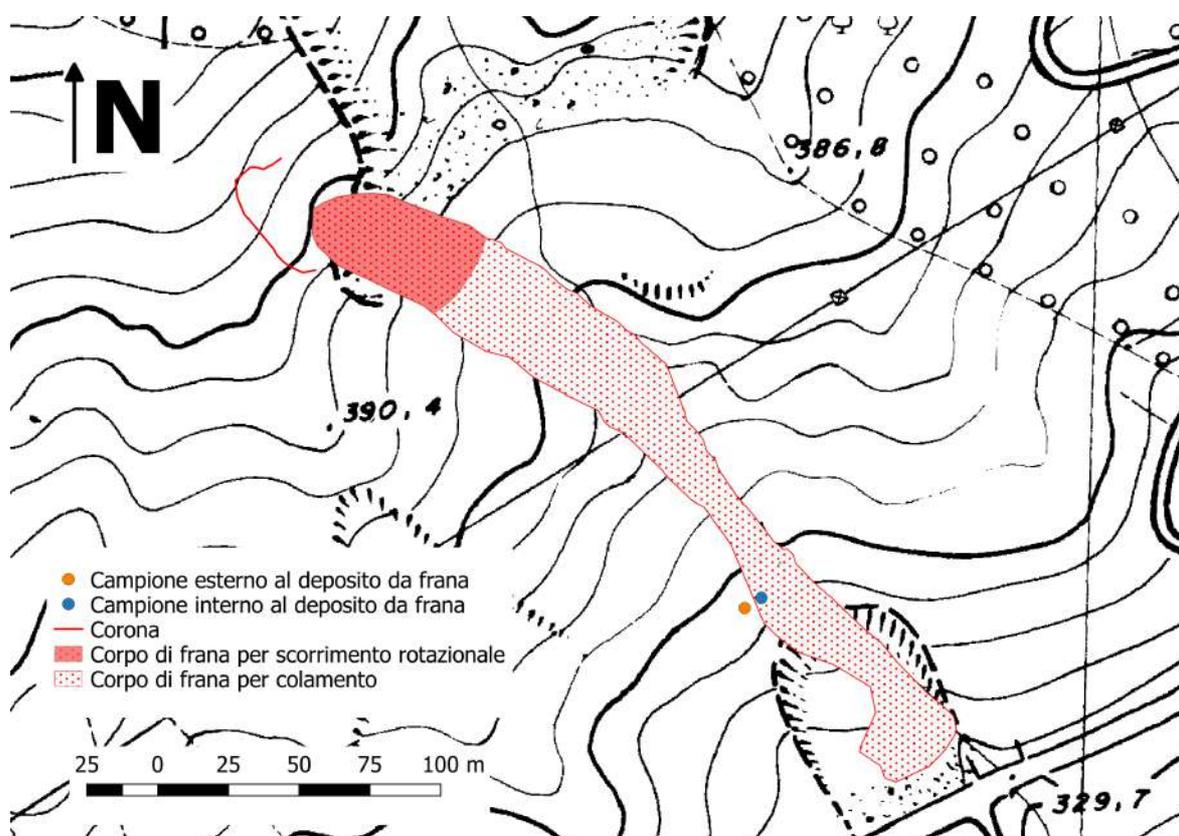


Figura 48: Ubicazione dei punti dove sono stati prelevati campioni mediante trivellazione.



*Figura 49: All'interno del corpo di frana è stato possibile infiggere una trivella fino a due metri di profondità.*



*Figura 50: Nel cerchio rosso l'apice della trivella inserita per due metri all'interno del corpo di frana.*

Per i campioni prelevati è stato stimato il contenuto gravimetrico di acqua ( $W_g\%$ ). Il campione a 2 metri di profondità presentava una parte inferiore più rigida, scagliosa che probabilmente corrispondeva al bedrock. Le due parti del campione sono state quindi analizzate separatamente (tabella 2).

<b>Campioni interni al deposito di frana</b>		
Nome Campione	Profondità prelievo (cm)	Contenuto gravimetrico di acqua ( $W\%$ )
C1	15	24
C2	38	22
C3	50	22
C4	110	23
C5	165	23
C6a	200	19
C6b	200	18

*Tabella 2: Profondità di prelievo e contenuto di acqua naturale dei campioni interni al corpo di frana.*

Sono stati prelevati anche due campioni al di fuori del corpo di frana (figura 48, 51), in tal

caso è stato però possibile raggiungere profondità massima di 60 centimetri (tabella 3, figura 51).

<b>Campioni esterni al deposito di frana</b>		
Nome Campione	Profondità prelievo (cm)	Contenuto gravimetrico di acqua (W%)
F1	20	18
F2	60	15

*Tabella 3: Profondità di prelievo e contenuto in acqua naturale dei campioni esterni al corpo di frana.*



*Figura 51: Campioni essiccati in forno per stima contenuto gravimetrico di acqua (sigle in tabella 2 e 3). Notare le impronte sui campioni interni al corpo di frana dovute all'elevata malleabilità.*

All'interno del corpo di frana nei primi 165 centimetri di profondità il contenuto gravimetrico di acqua varia tra 22 e 24%, mentre a 2 metri di profondità cala a 18-19%. Bassi valori sono stati riscontrati anche al di fuori del corpo di frana dove il contenuto di acqua è risultato essere 15-18%. Questi valori sono in accordo con il fatto che in genere il contenuto di acqua del deposito di frana risulta maggiore rispetto le zone al contorno (Picarelli e al, 2005), è quindi possibile ipotizzare che internamente alla frana in prossimità del punto di prelievo dei campioni la superficie di scorrimento si collochi a 2 metri di profondità.

In laboratorio sono stati determinati i limiti di Atterberg del terreno, ricavati dopo aver ripetuto le prove varie volte per la difficoltà che si è incontrata in quanto con variazioni minime di acqua il terreno si è mostrato passare repentinamente da uno stato all'altro. Il limite liquido ottenuto è pari a 29% e il limite plastico a 18.5%, da questi valori emerge un terreno poco plastico (indice di plasticità uguale a 10,5%).

Plottando in un grafico la profondità di prelievo dei campioni in funzione del contenuto di acqua naturale del terreno interno ed esterno al corpo di frana, e indicando il limite plastico e il limite liquido, è possibile constatare che il corpo di frana ha un contenuto d'acqua prossimo al limite liquido (figura 52).

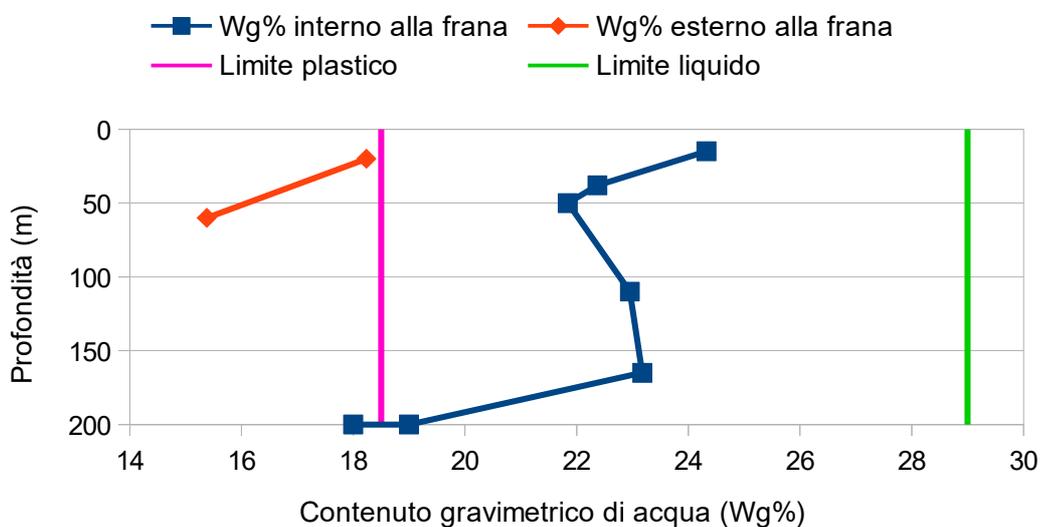


Figura 52: Contenuto di acqua naturale all'interno e all'esterno del corpo di frana.

È stato poi calcolato l'indice di liquidità del terreno (figura 53), il depositi di frana mostra fluidità media ( $IL \approx 0,5$ ) mentre al di fuori risulta estremamente bassa ( $IL < 0$ ).

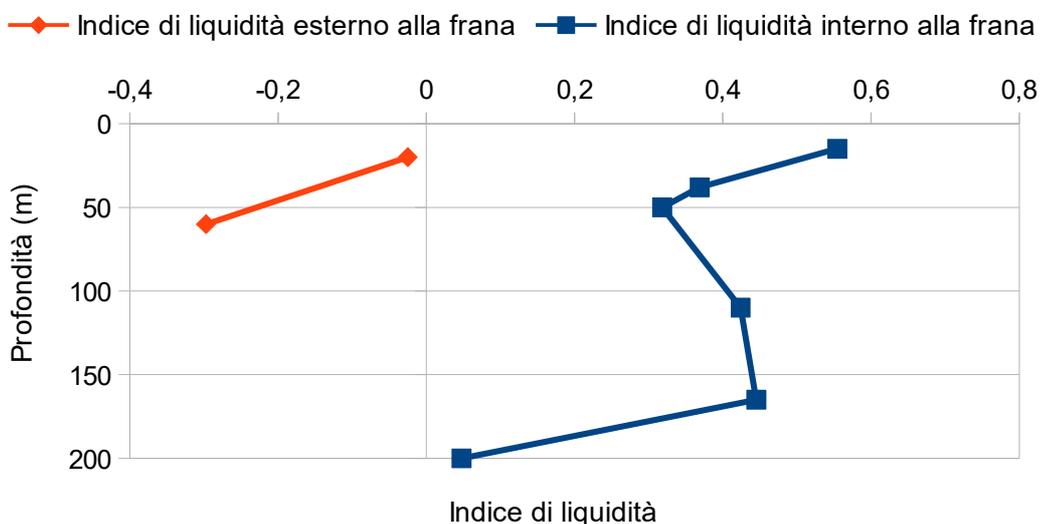


Figura 53: Indice di liquidità all'interno e all'esterno del corpo di frana.

Il deposito di frana consiste in matrice caotica di argilla e argillite con inclusi clasti di calcare di dimensioni anche decimetriche.

Al fine di caratterizzare al meglio il terreno è stata eseguita un'analisi granulometrica (Raviolo, 1993; figura 54). Per grani con diametro superiore a 0,075 mm è stata eseguita una setacciatura per via umida (figura 55), mentre per i diametri inferiori è stata utilizzata un'analisi per sedimentazione con il metodo del densimetro (figura 56).

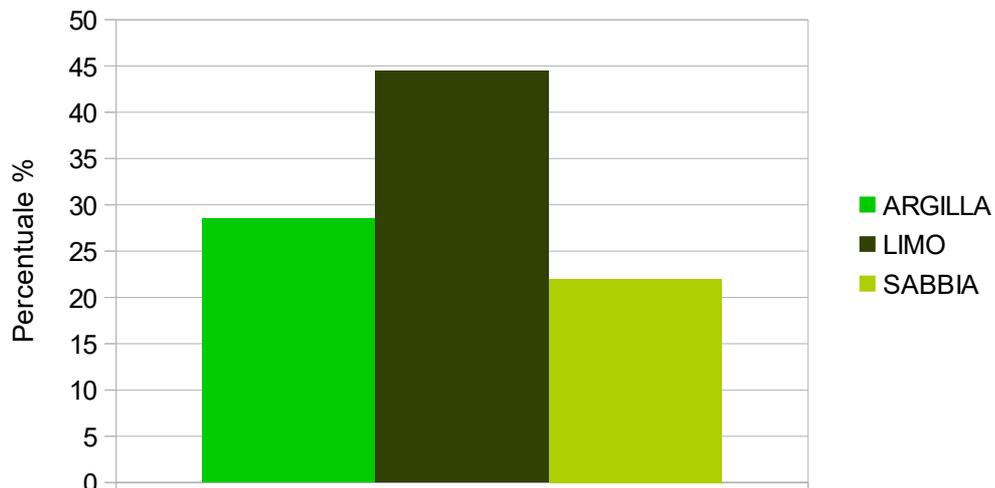


*Figura 54: Campione di matrice su cui Figura 55: Setacciatura per via umida. eseguita analisi granulometrica.*



*Figura 56: Analisi per sedimentazione con metodo del densimetro.*

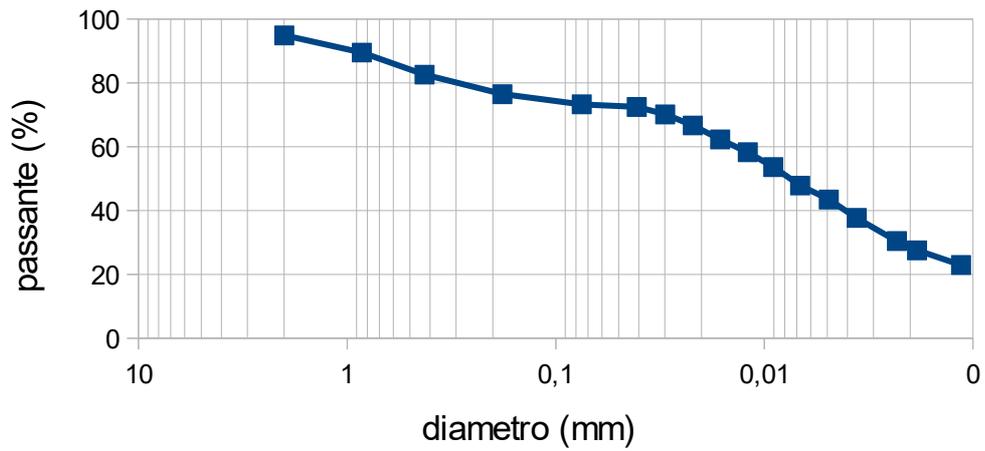
La matrice (figura 57) è risultata composta da 28.5% di argilla, 44.5% di limo (8% grosso, 19% medio, 17.5% fine) 22% di sabbia (9% grossa, 9% media, 4% fine).



*Figura 57: La matrice della frana di Silla è limo sabbioso con argilla.*

Sulla base di questa prova la matrice del deposito di frana è classificabile come limo sabbioso con argilla (figura 58). Sebbene la curva granulometrica occupa vari cicli della scala logaritmica è un terreno principalmente a grana fine in quanto la percentuale

passante al setaccio 200 è circa 75%.



*Figura 58: Curva granulometrica della matrice della frana di Silla.*

Nonostante il risultato dell'analisi granulometrica la sedimentazione in ambiente pelagico delle Argille a Palombini porta ad ipotizzare che ciò che viene individuato come limo e sabbia consista in realtà in aggregati lamellari di argilla.

## **CAPITOLO 4: MONITORAGGIO E INDAGINI GEOFISICHE IN SITO: METODOLOGIE**

### **4.1 Introduzione**

All'inizio di questo lavoro di tesi non era noto come si sarebbe evoluto il corpo di frana, in particolare se ci sarebbe stato un secondo fenomeno di colata o meno. Sono state quindi utilizzate due differenti metodologie di indagine al fine di registrare la variazione della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nella colata in entrambi i casi. Un metodo consiste nella misura in continuo di  $V_s$  mediante una stazione di monitoraggio installata in sito capace di registrare segnale prodotto da rumore sismico ambientale utile nel caso di un secondo evento di colata, ma probabilmente inefficiente in assenza di riattivazione in quanto il rumore sismico ambientale del sito è molto basso. L'altro metodo riguarda misure periodiche di  $V_s$  in modalità passiva e attiva tramite il sistema di acquisizione digitale multicanale *SoilSpy* dove l'energizzazione da parte dell'operatore permette l'acquisizione di segnali energetici.

In generale, i parametri geofisici di un materiale variano con il suo coinvolgimento in un movimento franoso e queste variazioni permettono di delineare il corpo di frana e di monitorarne l'evoluzione.

Le indagini geofisiche sono potenzialmente capaci di localizzare i limiti verticali e orizzontali della superficie di scorrimento e mappare le strutture interne del corpo di frana (come fratture, blocchi), inoltre possono rilevare la presenza di acqua (Picarelli e al, 2005). I vantaggi delle indagini geofisiche sono la loro elevata flessibilità (relativamente veloci e facilmente stendibili su un pendio), il fatto di essere tecniche non invasive e che possono indagare estesi volumi di materiale.

L'applicabilità di un indagine geofisica dipende dall'esistenza di un contrasto geofisico, dalle caratteristiche del metodo geofisico stesso, ovvero la profondità di penetrazione e la risoluzione (capacità del metodo di rilevare un corpo di una determinata dimensione), dalla calibrazione del dato per rendere la soluzione univoca (necessari dati geologici, geotecnici, idrogeologici), e dalla performance della tecnica geofisica che è fortemente dipendente a *signal-to-noise ratio* (M<sup>c</sup> Cann e Foster, 1990).

Principalmente i tre parametri geofisici di resistività elettrica, velocità dell'onde P e velocità delle onde S, sono stati utilizzati in passato per riconoscere e caratterizzare corpi di frana in materiale argilloso (Jongsman e al, 2009).

Generalmente in argille e marne compatte, il valore di resistività diminuisce da terreno indisturbato (60-75  $\Omega$ m) a corpo di frana (10-30  $\Omega$ m), questo perchè il coinvolgimento nel movimento franoso provoca l'alterazione del materiale e l'aumento del contenuto d'acqua con conseguente riduzione di resistività. Tuttavia in materiale saturo, molle e conduttivo (come quello della frana di Silla) non esiste una chiara relazione tra la resistività elettrica e la zona deformata, al contrario di ciò che accade in argille e marne compatte. Questo perchè la deformazione gravitativa non varia significativamente la resistività del terreno

saturo, molle e conduttivo, che risulta già di per sé bassa.

I metodi sismici mostrano in genere un contrasto di velocità (delle onde P o S) tra la frana e il terreno indisturbato, questo perchè il movimento e il conseguente strain interno al materiale ne riducono la compattezza. Il problema delle onde P è che la loro velocità, in caso di materiale saturo, è controllata dal livello d'acqua e poco influenzata dalla deformazione gravitazionale. La velocità delle onde S, invece, è altamente sensibile alla decompattazione e all'intenso cracking del materiale argilloso saturo o meno (Jogsmans e al., 2009).

**La velocità delle onde di taglio risulta quindi il migliore parametro geofisico da applicare al fine di caratterizzare la frana di Silla.**

Jongmans e Garambois nel loro lavoro del 2007 riassumano i principali metodi geofisici impiegati nello studio di frane.

La sismica a riflessione è raramente applicata allo studio delle frane in quanto il suo successo richiede un buon *signal-to-noise* ratio e la registrazione di onde ad alta frequenza per raggiungere la risoluzione desiderata. Queste due condizioni possono essere difficili da soddisfare su frane in cui il terreno è fortemente disturbato ed eterogeneo, con difficile accoppiamento geofono-suolo, attenuazione delle onde sismiche e scattering delle onde. Inoltre il processing delle misure è molto impegnativo.

La sismica a rifrazione ha necessità di stendimenti lunghi, in quanto la profondità di indagine è  $1/4-1/5$  l'apertura dello stendimento, quindi è una tecnica di campagna scomoda da eseguire su un pendio, inoltre le onde sono attenuate nel materiale fortemente disturbato. Con questa tecnica non è possibile individuare inversioni di velocità.

La sismica moderna, a differenza della sismica tradizionale, considera il sottosuolo a strati piano paralleli, sono quindi sufficienti stendimenti corti.

Le indagini geofisiche che vengono applicate in questo lavoro di tesi sono la tecniche di sismica attiva (MASW) e passiva (ReMi) multicanale e la tecnica sismica passiva a stazione singola (prova H/V).

## 4.2 Il sistema di monitoraggio

Al fine di avere un controllo continuo sulla colata è stata installata una stazione di monitoraggio, comprensiva di strumenti per osservare l'evoluzione delle proprietà idrauliche del corpo di frana, le condizioni meteo correlate, e la variazione della velocità delle onde di taglio in caso di un ulteriore evento parossistico.

### 4.2.1 Strumentazione installata

Il sistema di monitoraggio è così composto:

1. Centralina dotata di *Datalogger CAMPBELL CR-MILL* (figura 59) con alimentazione da batteria di 12 Volt e 7 Ampere di capacità ricaricata da pannello solare a 20 Watt;



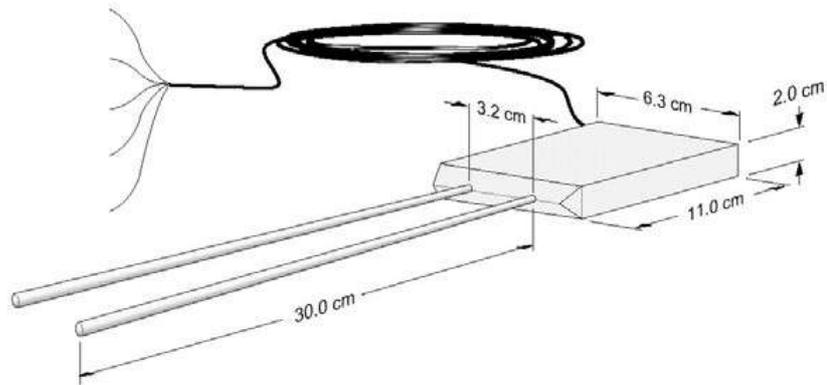
Figura 59: Centralina dotata di *Datalogger CAMPBELL CR-MILL*.

2. Quattro geofoni verticali a 4.5 Hz con amplificatori di segnale;
3. Il pluviometro ARG100 (figura 60), si tratta di un pluviometro aerodinamico progettato per ridurre al minimo l'effetto del vento sulla cattura della pioggia, è uno strumento robusto, calibrato con precisione e capace di registrare costantemente misure accurate sul campo. L'imbuto è alto 340 mm e il diametro dell'area di captazione è di 254 mm, il sistema di misura è a vaschette oscillanti con sensibilità di 0.2 mm di pioggia a scatto.



Figura 60: Pluviometro ARG100.

- Misuratore di contenuto volumetrico di acqua del terreno *CAMPBELL CS616* (figura 61). La sonda *CS616* genera un impulso elettromagnetico, e tramite la lettura del suo tempo di viaggio viene derivato il contenuto di acqua volumetrica del suolo con una precisione di  $\pm 2.5\%$ . Il sistema ha risoluzione di  $0.1\%$ .



*Figura 61: Sensore CAMPBELL CS616.*

- Sensore di pressione *KELLER S26 W* (figura 62) per misura del livello d'acqua, con fondoscala a 0.5 bar.



*Figura 62: Sensore KELLER S26 W.*

#### *4.2.2 Installazione in sito*

La stazione di monitoraggio è stata installata il 27 marzo 2018 (figura 65) ed è stata dismessa il 29 marzo 2019. È stata posizionata a ridosso del piede della frana tra le quote di 350 e 345 metri. La centralina e il pluviometro sono stati collocati all'esterno del deposito mentre i sensori e i geofoni all'interno (figura 63).

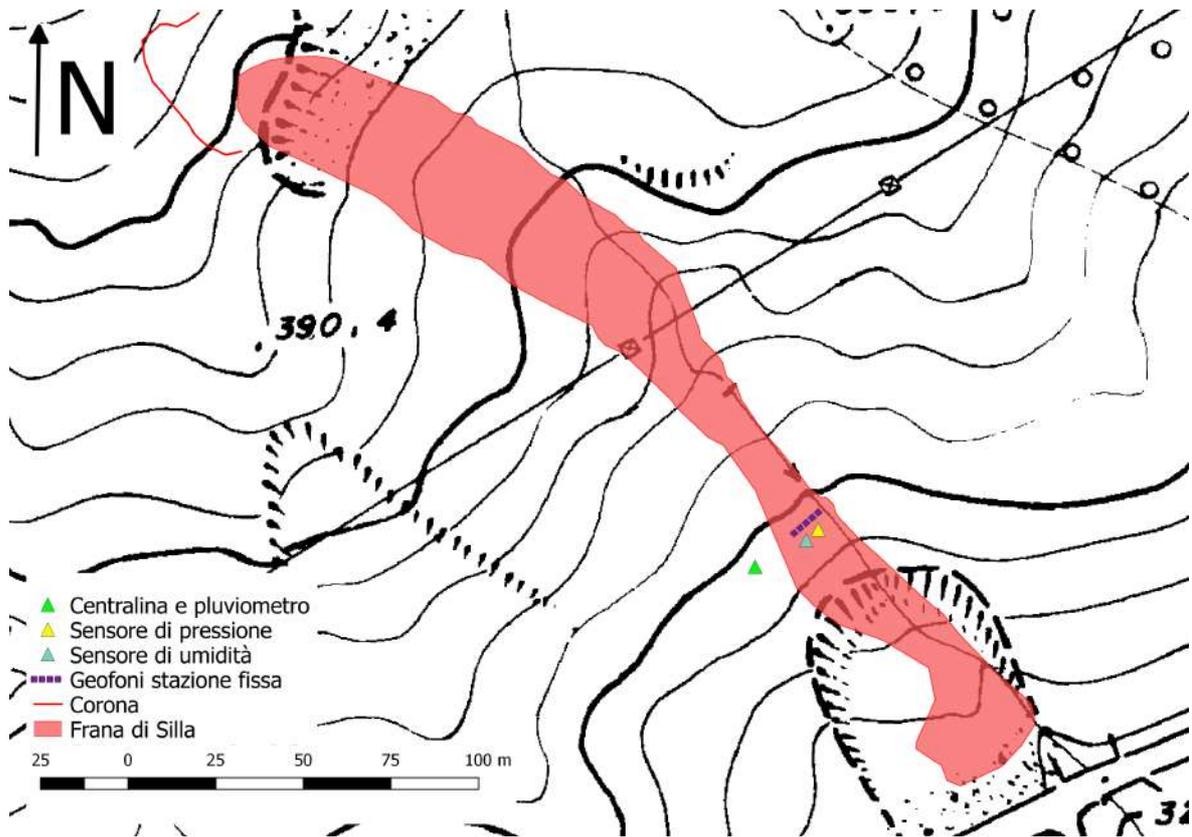


Figura 63: Ubicazione strumenti stazione di monitoraggio.

I quattro geofoni sono stati disposti secondo uno stendimento lineare ad una profondità di 20 centimetri con distanza intergeofonica di 1 metro (figura 64). Tale distanza permette una profondità minima di indagine di 0.5 metri.

I dati geofisici sono stati acquisiti dalla centralina ogni ora per un tempo di registrazione di 2 minuti a partire dal 31 marzo 2018.



Figura 64: Posizionamento geofoni.

I sensori di pressione e umidità sono stati sistemati a valle dello stendimento di geofoni. Il primo ad una profondità di 60 centimetri ed immerso in calza di sabbia così che risultasse in equilibrio con il terreno registrando in maniera immediata variazioni della tavola

d'acqua. Il secondo a 20 centimetri di profondità.  
 I due strumenti hanno acquisito una misura ogni 10 minuti a partire dal 6 maggio 2018.  
 In tabella 4 sono riassunte le caratteristiche della stazione.

STRUMENTO	PROFONDITA' INSTALLAZIONE (cm)	NOTE
4 geofoni verticali	20	Posizionati in linea con distanza intergeofonica di 1 metro
		Dal 31/03/2018 ogni ora viene eseguita una registrazione di due minuti
CAMPBELL CS616	20	Dal 6/05/2018 ogni 10 minuti viene acquisita una misura
KELLER S26 W	60	Immerso in calza di sabbia
		Dal 6/05/2018 ogni 10 minuti viene acquisita una misura

*Tabella 4: Caratteristiche stazione di monitoraggio.*



*Figura 65: Installazione stazione di monitoraggio.*

### 4.3 Indagini geofisiche periodiche

Ad integrazione dei dati di monitoraggio sono state eseguite indagini geofisiche periodiche con cadenza bimensile (in alcuni casi mensile per condizioni meteo avverse), con l'obiettivo di estrarre il trend di variazione della velocità delle onde di taglio nel ripristino dei valori precedenti la frana, in caso di assenza di riattivazione.

#### 4.3.1 Metodologie (MASW, H/V)

In questo studio sono state applicate **tecniche di sismica attiva (MASW, Park e al, 1999) e passiva (ReMi, Louie, 2001) multicanale (Castellaro, 2016).**

La velocità delle onde di superficie dipende dalla loro frequenza. Ovvero, le onde di superficie interessano il terreno fino ad una profondità pari a  $2\lambda$ , concentrando il loro moto alla profondità di  $\lambda/2$ - $\lambda/3$ , quindi assumendo come velocità propria dell'onda la velocità che caratterizza il terreno a tale profondità.

Dato un sismogramma, viene prodotto lo **Spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh/Love** tramite i seguenti step:

1. Viene assunta una velocità di prova, con la quale è calcolato il tempo che l'onda impiegherebbe per andare dal 1° al n° geofono;
2. La traccia registrata da ogni n° geofono viene traslata indietro del tempo stimato,
3. Vengono sommate le varie tracce;
4. Il segnale ottenuto viene sottoposto alla Trasformata Veloce di Fourier (FFT), così da individuare le frequenze maggiormente presenti nel segnale. I picchi corrispondono alle armoniche messe in fase e che quindi viaggiano alla velocità di prova assunta;
5. Lo spettro prodotto viene inserito in un grafico frequenza-velocità, in corrispondenza della velocità di prova da cui è stato ottenuto, e l'ampiezza spettrale è raffigurata in scala di grigi (figura 66).

Questi step sono ripetuti per diverse velocità di prova. Se l'acquisizione è stata ben svolta, e la stratigrafia del sottosuolo lo permette, i vari spettri affiancati andranno a tracciare il modo fondamentale e i modi superiori con cui vibra il terreno in oggetto.

Il modo fondamentale sarà composto da uno o più change-point, che rappresentano l'interfaccia tra due strati, n change-point corrispondono a n+1 strati.

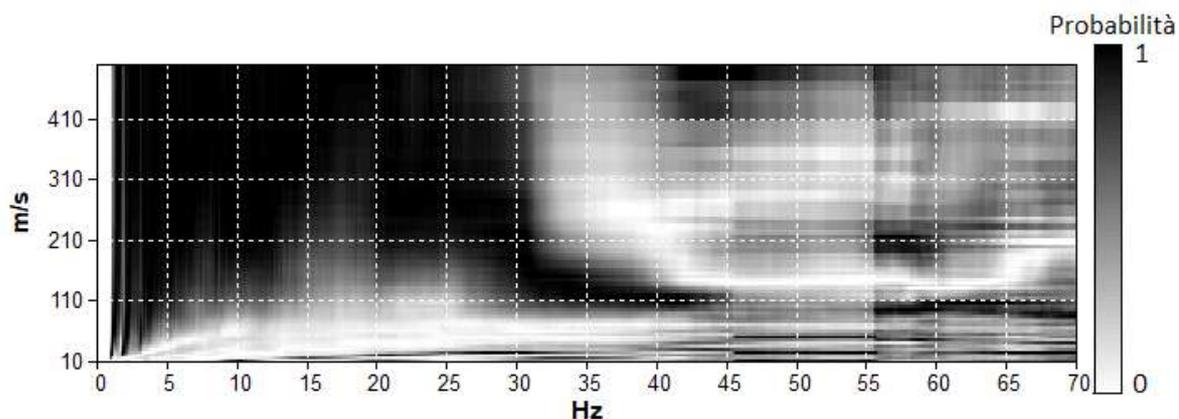


Figura 66: Spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh. Il livello di grigio rappresenta la probabilità di una velocità di essere quella reale.

Mediante la relazione fisica  $V=\lambda \cdot f$ , ricordando che  $z= \lambda/2-\lambda/3$ , è possibile ricostruire il profilo di variazione della velocità con la profondità. Questi metodi hanno una sensibilità di  $\lambda/2-\lambda/4$ .

Per entrambe le tecniche ci sono degli accorgimenti da adottare che precludono la buona riuscita dell'indagine.

- La sorgente prodotta per le MASW non deve essere troppo ricca in alte frequenze (ad esempio fucile sismico), diversamente il segnale andrà ad enfatizzare i modi superiori. Inoltre il punto di energizzazione deve essere almeno 5-10 metri distante dal primo geofono altrimenti ai ricevitori arrivano fronti d'onda non piani.
- La sorgente deve essere allineata con i geofoni, così che venga registrata la velocità reale [  $V_r = \Delta x / t$  ] e non la velocità apparente [  $V_a = (\Delta x / t) / \cos \alpha$  ], dove  $\alpha$  è l'angolo tra lo stendimento e la direzione di provenienza della sorgente.
  - Per le MASW è sufficiente energizzare in linea con lo stendimento,
  - Per le ReMi, che registrano rumore ambientale, che quindi può provenire da qualsiasi direzione, è necessario andare a scomporre il segnale in più finestre e individuare la finestra con velocità più bassa dato che  $\cos \alpha < 1$ .

Queste tecniche possono indagare il terreno fino a profondità pari a 2 volte la lunghezza dello stendimento, sebbene andando più in profondità la banda del modo fondamentale risulta meno definita. Questo perché le onde lunghe coinvolgono più terreni e quindi sono influenzate da più velocità, e perché la risoluzione propria dell'onda è  $\lambda/4$ . Quindi il limite principale di questi metodi è la reale profondità di indagine.

La **tecnica sismica passiva a stazione singola** (metodo H/V o HVSR, Nakamura, 1989) è un metodo di indagine del sottosuolo non invasivo, rapido, applicabile ovunque ed economico (Castellaro et al., 2005; Albarello & Castellaro, 2011).

Per estrarre informazioni da questa tecnica si deve considerare che il segnale registrato al sito è funzione della sorgente, del percorso che l'onda compie dalla sorgente al sito, e della risposta dello strumento.

La sorgente è rumore sismico ambientale (microtremore) generato da fenomeni atmosferici, dall'attività dinamica terrestre e dall'attività antropica.

Durante il percorso le onde elastiche subiscono riflessioni, rifrazioni, vengono intrappolate per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo

attraversato.

In un sistema costituito da uno strato tenero sovrastante un semispazio rigido, l'onda di volume SH proveniente dal bedrock tende a rimanere intrappolata nello strato tenero e andrà ad interferire costruttivamente con onde provenienti dal sottosuolo. Per il coefficiente di Zoepritz per la riflessione, ciò avviene ogni qualvolta l'onda compie quattro volte lo spessore dello strato tenero così che risulti in fase con le onde in arrivo dal bedrock.

Ciò permette di individuare le varie frequenze di risonanza del sito.

La frequenza fondamentale di risonanza dello strato tenero, relativa all'onda SH incidente verticalmente dal basso, è data dalla legge  $f = V_s / (4H)$ , dove  $V_s$  è la velocità delle onde di taglio nello strato che risuona e  $H$  il suo spessore.

Le informazioni di questa tecnica sono contenute principalmente nella componente verticale del moto, in quanto questa si annulla in corrispondenza delle frequenze di risonanza dell'onda SH.

Il risultato di una prova H/V è una curva sperimentale (nel piano frequenza-ampiezza H/V) che deriva dal rapporto tra la componente spettrale orizzontale e quella verticale, così facendo viene eliminata l'informazione relativa alla sorgente e alla strumentazione, ed enfatizzato il percorso dell'onda.

Le frequenze alle quali la curva H/V mostra dei massimi corrispondono alle frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura (ad eccezione di picchi antropici). A  $n$  picchi corrispondono  $n+1$  strati (escluso il caso di inversione di velocità dove la curva H/V risulta sotto il valore 1 per un ampio range di frequenza).

La curva H/V va sempre osservata assieme agli spettri delle singole componenti da cui deriva in modo tale da discriminare tra risonanze stratigrafiche e artefatti, ovvero vibrazioni fortemente concentrate attorno ad una frequenza, indotte da macchinari o simili, che determinano un picco nella curva H/V.

I picchi stratigrafici sono accoppiati ad un minimo locale della componente spettrale verticale, mentre gli artefatti sono solitamente molto stretti e si presentano come picchi positivi di diversa ampiezza su tutte e tre le componenti del moto.

Dato che l'obiettivo delle misure H/V è quello di determinare le caratteristiche medie del moto del suolo associato a vibrazioni ambientali, la loro registrazione avviene per un periodo abbastanza lungo. Durante l'analisi la registrazione viene suddivisa in finestre di lunghezza temporale prefissata, che dipende dalla frequenza minima che si vuole andare ad investigare. Disponendo le singole finestre l'una accanto all'altra, in maniera contigua, ne risulta il diagramma temporale di H/V, in cui può essere apprezzata la persistenza temporale di un picco che ne definisce l'origine naturale, a differenza dei picchi antropici che risultano casuali nel tempo (Alberello & Castellaro, 2011; Castellaro et al., 2005; figura 67).

Il limite principale della tecnica H/V è che per ogni profilo esistono infinite stratigrafie. È necessario un vincolo sulla profondità o sulla velocità del primo strato per rendere il risultato univoco.

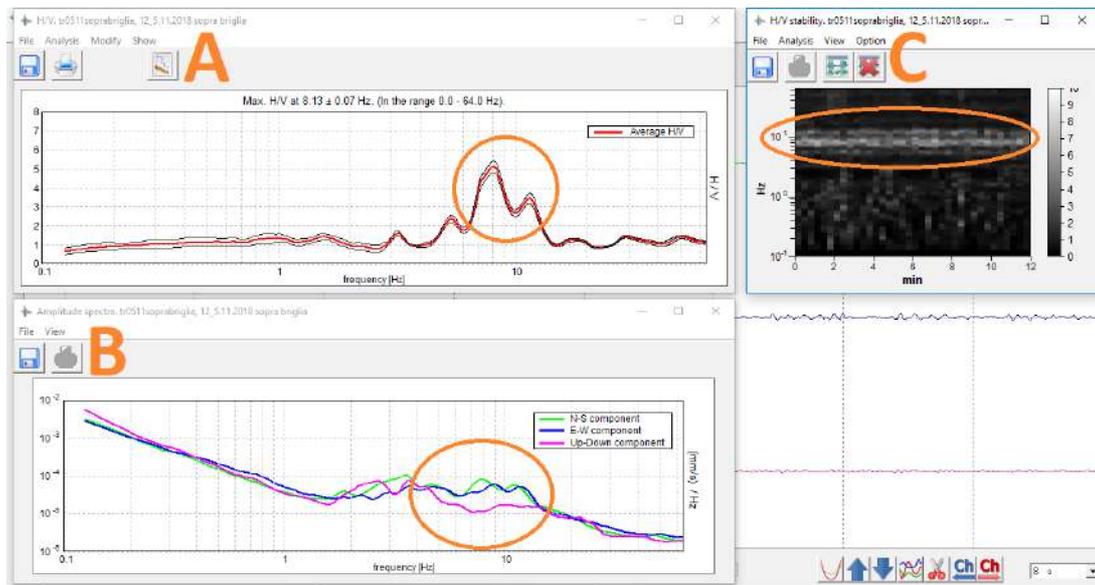


Figura 67: A: curva H/V, B: spettri delle singole componenti, C: finestra temporale. In questa misura H/V è possibile riconoscere la presenza di due discontinuità sismiche (9 Hz, 11 Hz).

Dato che MASW e ReMi sono in grado di fornire una stima di velocità delle onde elastiche, la combinazione di queste con H/V permette di ricavare informazioni sul sottosuolo.

#### 4.3.2 Misure effettuate

Le acquisizioni di array sismico passivo e attivo sono state ottenute tramite il sistema di acquisizione sismica digitale multicanale *SoilSpy*, dotato di software proprio.

*SoilSpy* è composto da un cavo di trasmissione dati lungo cui vengono distribuiti i moduli di amplificazione, che trasmettono i dati dai geofoni a un PC tramite l'interfaccia della porta USB.

Le registrazioni sono state eseguite energizzando tramite un pedata al terreno ogni 15 secondi per 3 minuti e registrando in passivo per ulteriori 2 minuti con frequenza di campionamento di 512 Hz. All'inizio della campagna delle indagini geofisiche sono state individuate delle sezioni lungo il versante dove queste misure sono state ripetute nel tempo con cadenza mensile o bimensile (in relazione alle condizioni meteo), ed ogni volta al centro di ogni sezione è stata eseguita una misura H/V tramite Tromino® con un tempo di acquisizione di 12 minuti.

Sia gli spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh che le misure H/V sono stati poi analizzati con il Software *Grilla*.

Il primo sopralluogo sulla frana risale al 23/03/2018 ed era finalizzato a individuare il luogo di installazione della stazione di monitoraggio. Inizialmente era stato pensato di posizionarla una cinquantina di metri a monte della briglia, zona denominata '*sopra briglia*', (in realtà poi è stata posizionata in una zona più a valle in quanto più facilmente raggiungibile, paragrafo 4.2.2) per cui sono state eseguite una MASW-ReMi con distanza intergeofonica di 2 metri e una misura H/V per ricavare lo spessore della frana in tale

sezione, tuttavia il Tromino® utilizzato si è poi rivelato guasto quindi per tale data si dispone solo di una MASW-ReMi.

Il 27/03/2018 nel giorno di installazione della stazione di monitoraggio sono state individuate ulteriori sezioni in cui eseguire le indagini geofisiche, quattro interne al corpo di frana (*corona, corona briglia, sotto briglia, sopra stazione*) e una al di fuori (*fuori destra idrografica*). In tale data non sono state ripetute misure in zona *sopra briglia*.

Il 17/04/2018 sono state eseguite tutte le misure, le successive indagini sono state fatte ad un mese di distanza per condizioni meteo avverse.

In zona *fuori destra idrografica* sia il 27/03 che il 17/04 le misure MASW si sono mostrate prive di informazioni, per cui dal 17/05/2019 è stato deciso di iniziare ad acquisire in un'ulteriore zona esterna al corpo di frana, *fuori sinistra idrografica*.

In un primo momento le brutte curve di dispersione sono state ricondotte alla presenza di uno strato rigido a bassa profondità (Castellaro, 2016), in realtà dal 17/05 le MASW-ReMi in zona *fuori destra idrografica* si sono mostrate leggibili.

Le misure sono proseguite nel periodo estivo con cadenza bimensile, per poi in autunno proseguire con misure mensili. L'ultima acquisizione risale al 5/11/2018, circa 8 mesi e mezzo dopo l'evento parossistico periodo di tempo sufficiente per valutare il comportamento della frana, sebbene studi precedenti monitorano l'evoluzione delle velocità delle onde di Rayleigh per più anni (Berti e al, 2018).

In figura 68 è riportata l'ubicazione dei sette punti di indagine.

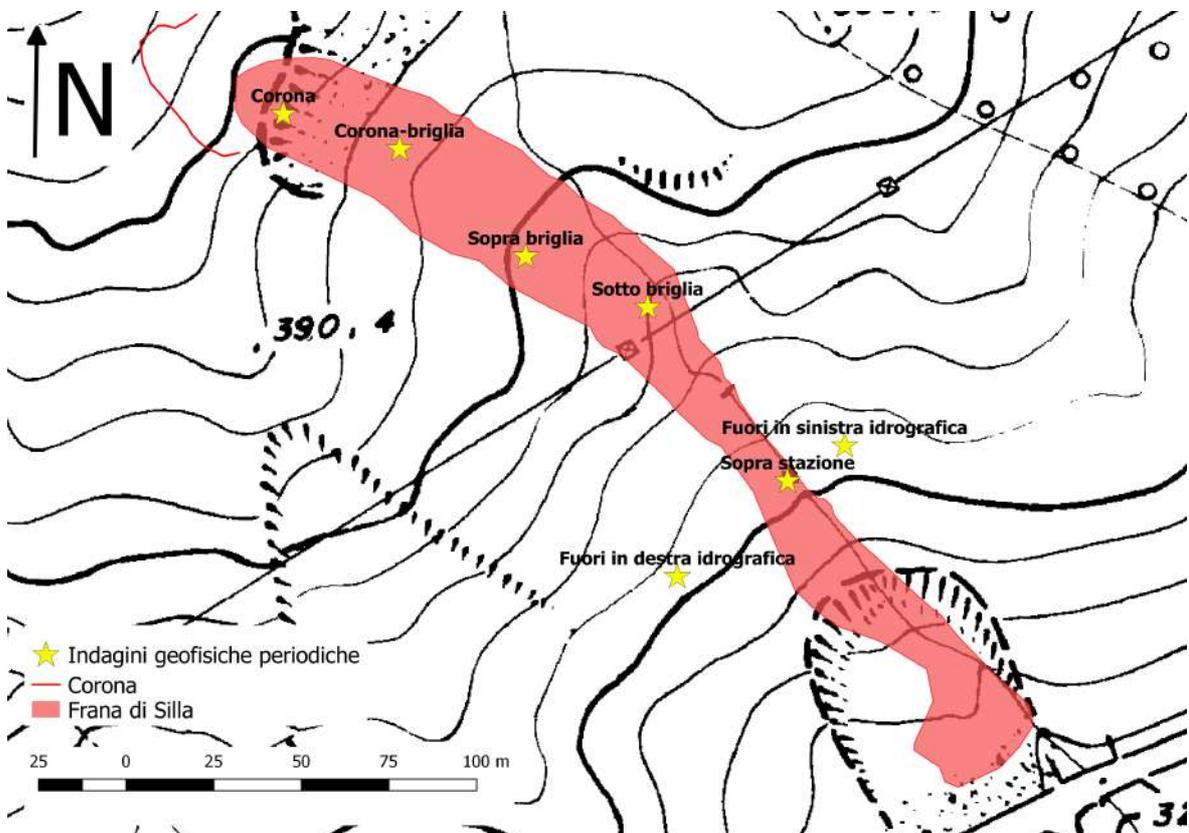


Figura 68: Ubicazione delle indagini periodiche.

Per le MASW-ReMi sono stati impiegati un numero variabile di geofoni in base alla larghezza della frana nel punto di misura (in *corona 7, corona briglia 5, sopra briglia 7, sotto briglia 5, sopra stazione 5, fuori destra idrografica 7, fuori sinistra idrografica 7*). La distanza intergeofonica è stata impostata a un metro, ad eccezione del 23/03/2018 in *sopra briglia* dove i geofoni sono stati posizionati a due metri di distanza. In tabella 5 sono riassunte le misure eseguite e indicato se per queste è stato possibile o meno estrarre informazioni. In allegato al testo sono riportate le varie misure analizzate.

	CORONA		CORONA-BRIGLIA		SOPRA BRIGLIA		SOTTO BRIGLIA		SOPRA STAZIONE		FUORI DESTRA IDROGRAFICA		FUORI SINISTRA IDROGRAFICA	
	ALLEGATO 1		ALLEGATO 2		ALLEGATO 3		ALLEGATO 4		ALLEGATO 5		ALLEGATO 6		ALLEGATO 7	
	MASW ReMi	HVSR	MASW ReMi	HVSR	MASW ReMi	HVSR	MASW ReMi	HVSR	MASW ReMi	HVSR	MASW ReMi	HVSR	MASW ReMi	HVSR
23/03/18	-	-	-	-	X	NO	-	-	-	-	-	-	-	-
27/03/18	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	NO	X	-	-
17/04/18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	NO	X	-	-
17/05/18	X	X	NO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
01/06/18	X	X	X	X	X	X	NO	X	X	X	X	X	X	NO
20/06/18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10/07/18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
31/07/18	X	X	NO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
09/08/18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
31/08/18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
21/09/18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
11/10/18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
05/11/18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

*Tabella 5: Misure MASW-ReMi e H/V eseguite. Il 23/03/2018 le misure sono state eseguite solo in zona sopra briglia, in tale zona le misure non sono state ripetute il 27/03/2018. Con il simbolo "-" si indicano misure non eseguite, con "NO" misure eseguite ma da cui non è stato possibile estrarre informazioni, "X" misure eseguite da cui sono state estratte informazioni.*

## CAPITOLO 5: RISULTATI

### 5.1 Interpretazione delle misure geofisiche periodiche

Per ogni misura periodica è stato estratto un modello di sottosuolo tramite fit congiunto MASW (o ReMi) e curva H/V, vincolando il modello mediante velocità estratta dalle prime. Nei casi in cui non è stato possibile riconoscere il modo fondamentale negli spettri di velocità di fase delle onde di Rayleigh, il modello è stato vincolato mediante la stratigrafia ottenuta da misure eseguite nello stesso punto in altre date.

I picchi stratigrafici sono stati riconosciuti tramite l'analisi dell'evoluzione temporale del rapporto HVSR.

Non è stato semplice individuare un modello di sottosuolo univoco nel tempo per ogni sezione di indagine, in particolare per *corona-briglia* e *sotto briglia*. La difficoltà è connessa al fatto che le discontinuità sismiche non sono sempre ben contraddistinte da picchi significativi, ma da plateau con debole ampiezza ( $H/V < 2$ ), inoltre nel tempo è possibile osservare una migrazione delle curve H/V che non facilita il problema; successivamente verrà approfondito questo aspetto.

In tabella 6 sono riportati i modelli di sottosuolo più realistici per ogni sito, in quanto riscontrati più volte dai modelli sintetici.

Sito	Frequenza (Hz)	N° discontinuità	Profondità (m)
CORONA	Picco tra 10 e 13	1	1,6
CORONA-BRIGLIA	Plateau da 8 a 20	2	1
			5
SOPRA BRIGLIA	Picchi a 8 e 11	2	2
			5
SOTTO BRIGLIA	Plateau da 8 a 20	2	2
			8
SOPRA STAZIONE	Picco tra 8 e 11	1	3
FUORI DX IDROGRAFICA	Picco a 11	1	3
FUORI SX IDROGRAFICA	Plateau tra 8 e 20	3	2
			3
			8,5

Tabella 6: Spessori della frana di Silla da modelli congiunti tra MASW (e/o ReMi) e H/V.

Da questi dati si può dedurre che sopra la briglia la massa in frana abbia spessore da 2 metri in zona di corona a 5 metri a ridosso della briglia, a valle di quest'ultima lo spessore

è di circa 2 metri per raggiungere i 3 metri in prossimità del piede (figura 69, 70).

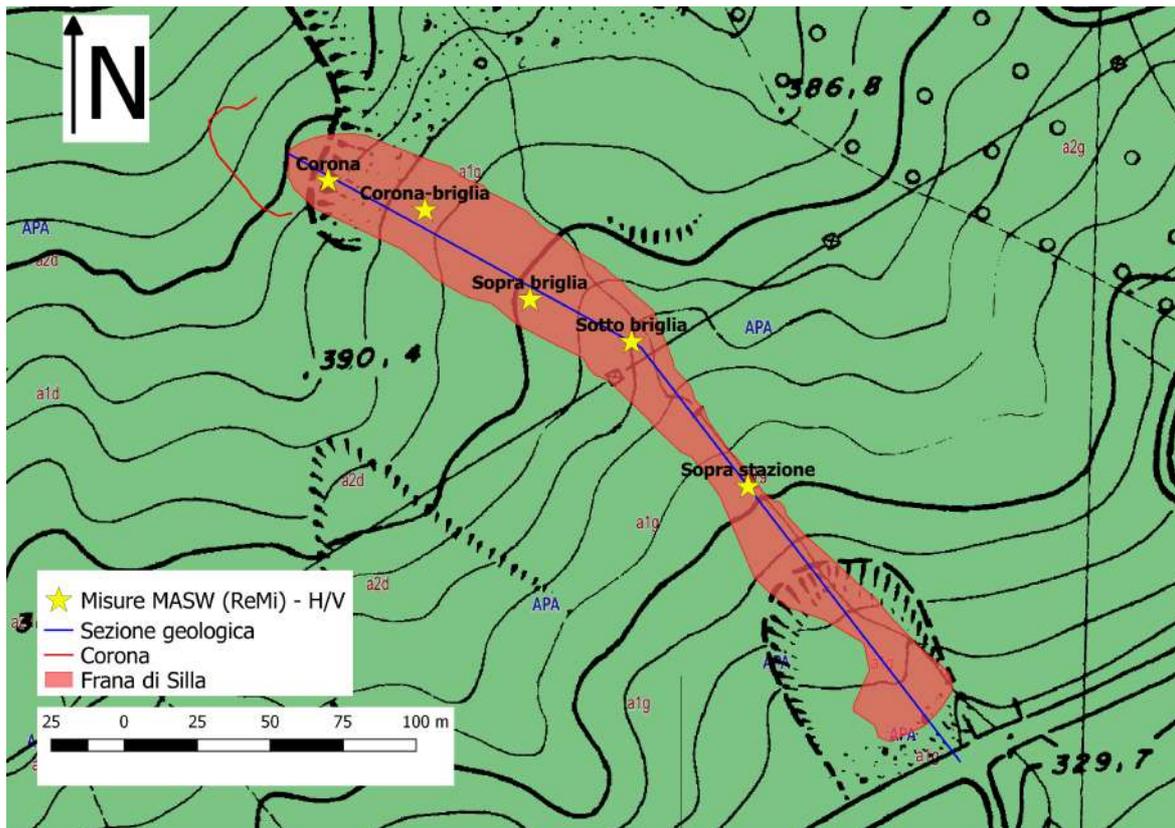


Figura 69: Traccia della sezione del profilo stratigrafico in figura 68.

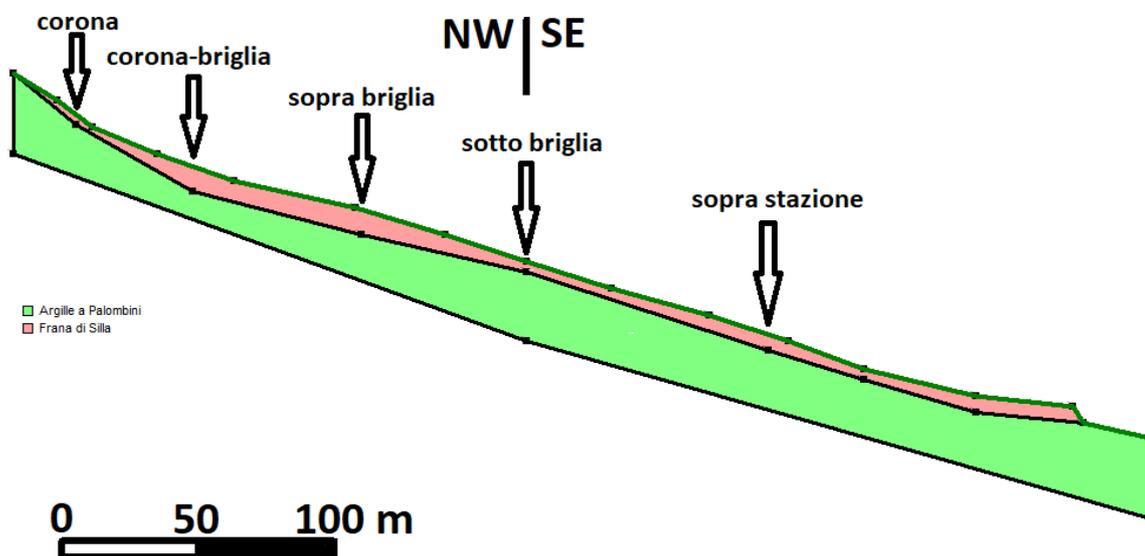


Figura 70: Sezione della frana di Silla ricavata da fit congiunto MASW (ReMi)-H/V. Scala verticale amplificata di un fattore 2.

Dalle misure geofisiche periodiche sono stati ricavati valori delle onde di Rayleigh all'interno e all'esterno della frana di Silla a profondità di 1,5 metri o 1 metro (tabella 7).

CORONA	CORONA BRIGLIA	SOPRA BRIGLIA	SOTTO BRIGLIA	SOPRA STAZIONE	FUORI DX IDROGRAFICA	FUORI SX IDRIGRAFICA
1 m	1 m	1 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m

Tabella 7: Profondità a cui è stata estratta la velocità delle onde di Rayleigh.

Tali dati sono utili per valutare se la frana si è evoluta come una serie di scorrimenti multipli e quindi come composta da vari blocchi rigidi, o se ha subito una completa fluidificazione.

In entrambe le situazioni si dovrebbe osservare diminuzione di velocità (Berti e al, 2018) relativa a decadimento delle proprietà meccaniche del terreno, ma in caso di fluidificazione i valori saranno notevolmente bassi in quanto la velocità delle onde di Rayleigh nei fluidi è teoricamente pari a zero (Reynolds, 1997).

La prima misura geofisica (23/03/2018) risale ad oltre un mese dopo l'evento parossistico (12-17/02/2018). Per rilevare valori di velocità delle onde di taglio estremamente bassi sarebbe stato necessario iniziare ad acquisire subito dopo la riattivazione della frana (Bertello e al, 2018).

In zona *corona* (figura 71) la velocità delle onde di Rayleigh il 27/03 e il 17/04 è di 70 m/s. Da aprile a maggio aumenta di 15 m/s, a seguire un aumento graduale della velocità fino ad estate dove il tasso di crescita diminuisce ulteriormente oscillando tra valori di 100 e 120 m/s.

### CORONA

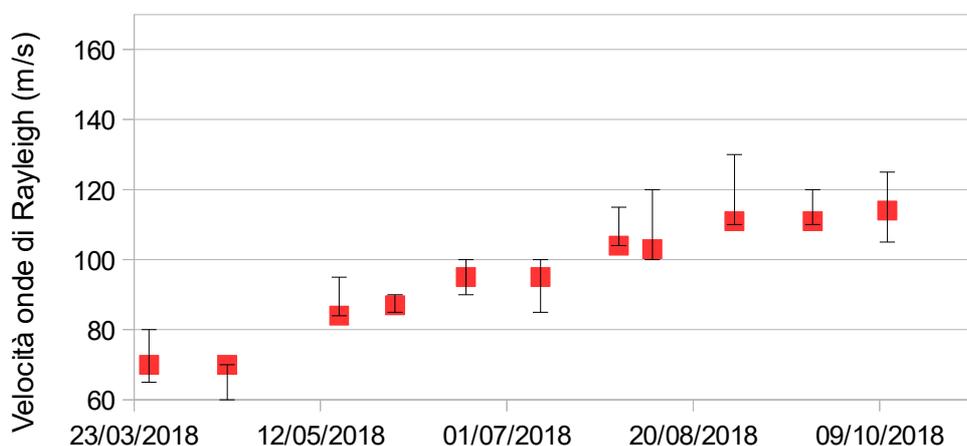
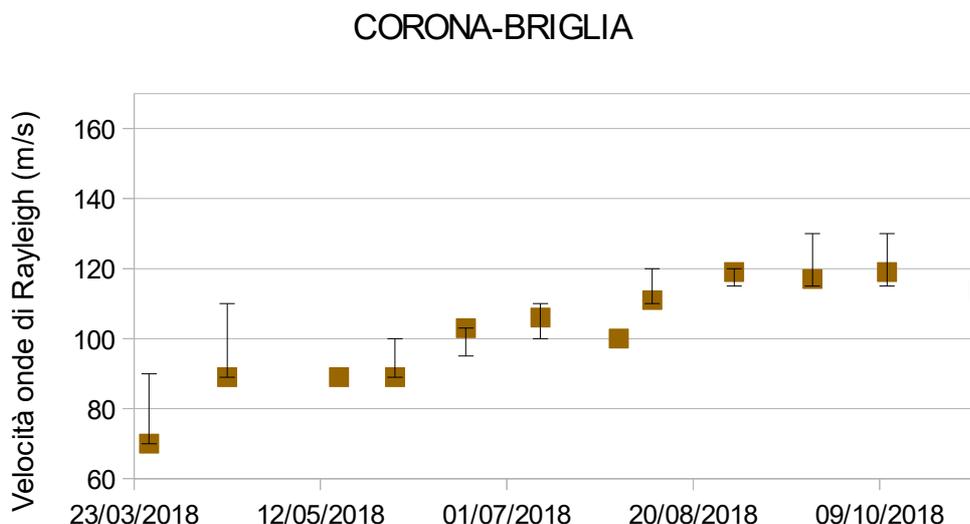


Figura 71: La barra di errore associata alle misure rappresenta il range di velocità, che ha l'80% di probabilità di essere quella reale, ricavato dalle curve di dispersione. L'ultima misura non presenta barra di errore perché il modello sintetico fitta il modo fondamentale a profondità maggiore di 1 metro.

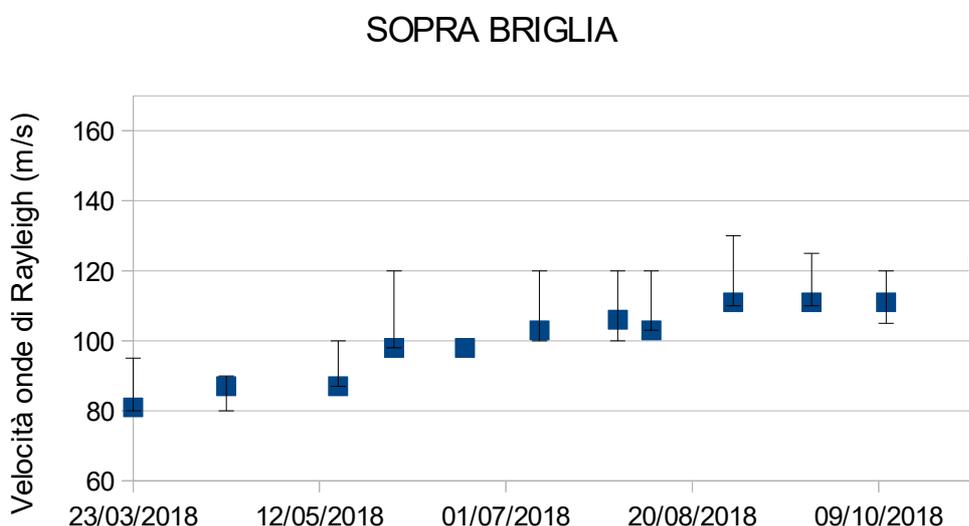
In zona *corona-briglia* (figura 72) la velocità delle onde di Rayleigh il 27/03 è di 70 m/s.

Sono stati riconosciuti due passaggi importanti di velocità, il primo di 20 m/s tra il 27/03 e il 17/04, il secondo di 15 m/s tra il 1/06 e il 20/06, poi la velocità fluttua tra 100 e 120 m/s.



*Figura 72: La barra di errore associata alle misure rappresenta il range di velocità, che ha l'80% di probabilità di essere quella reale, ricavato dalle curve di dispersione. Le velocità prive di barra di errore sono state ottenute da curve H/V (l'incertezza per queste è  $V=4Hf$  con  $H=\lambda/2-\lambda/4$ ).*

In zona sopra briglia (figura 73) il 23/03 la velocità delle onde di Rayleigh è di 83 m/s, poi aumenta gradualmente fino a raggiungere 110 m/s in estate.



*Figura 73: La barra di errore associata alle misure rappresenta il range di velocità, che ha l'80% di probabilità di essere quella reale, ricavato dalle curve di dispersione. La velocità relativa al 20 giugno è priva di barra di errore perché ottenuta da curve H/V (l'incertezza per queste è  $V=4Hf$  con  $H=\lambda/2-\lambda/4$ ), il 5 novembre il modello sintetico fitta modo fondamentale a profondità maggiore di 1 metro.*

La velocità del 27/03 in zona *sotto briglia* (figura 74) è la più bassa riscontrata in tutto il corpo di frana, ovvero 65 m/s, questa poi sale progressivamente fino a maggio raggiungendo 81 m/s, dopo di che da maggio a giugno si innalza di ben 30 m/s, a seguire oscilla tra i valori di 120-140 m/s.

### SOTTO BRIGLIA

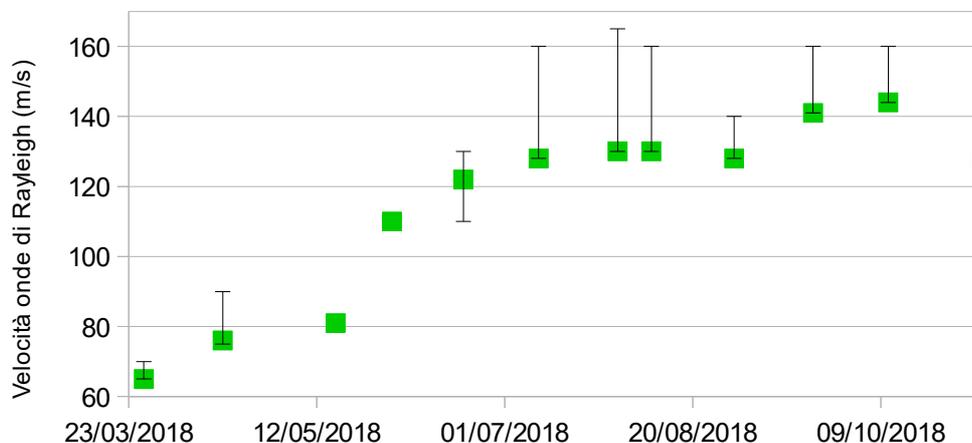


Figura 74: La barra di errore associata alle misure rappresenta il range di velocità, che ha l'80% di probabilità di essere quella reale, ricavato dalle curve di dispersione. La velocità relativa al 1 giugno è priva di barra di errore perché ottenuta da curve H/V (l'incertezza per queste è  $V=4Hf$  con  $H=\lambda/2-\lambda/4$ ), il 20 giugno il modello sintetico fitta modo fondamentale a profondità maggiore di 1.5 metri.

In zona *sopra stazione* (figura 75) la velocità delle onde di Rayleigh aumenta gradualmente da marzo a giugno da 76 m/s a 95 m/s, da giugno a luglio si verifica un aumento di 20 m/s, poi la velocità oscilla tra 110 e 125 m/s.

### SOPRA STAZIONE

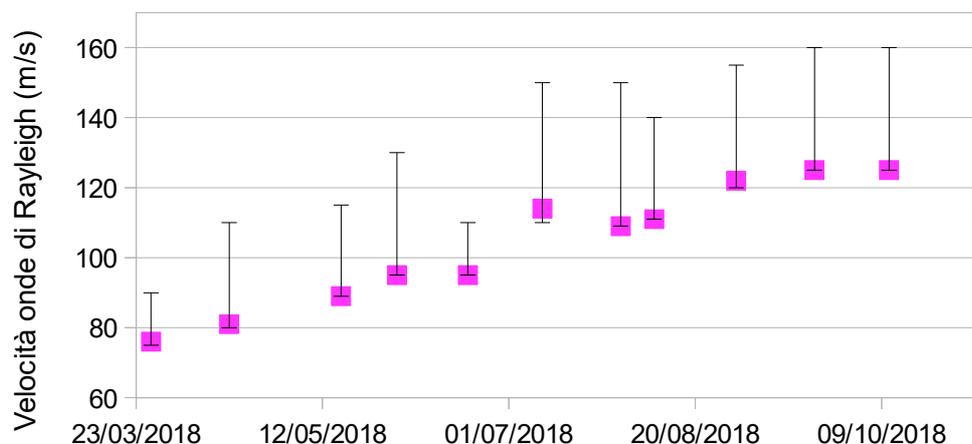


Figura 75: La barra di errore associata alle misure rappresenta il range di velocità, che ha l'80% di probabilità di essere quella reale, ricavato dalle curve di dispersione.

La velocità delle onde di Rayleigh all'esterno del corpo di frana è circa costante, *Fuori in destra idrografica* varia tra 150 e 160 m/s (figura 76), *Fuori in sinistra idrografica* tra 145 e 165 m/s (figura 77).

### FUORI DESTRA IDROGRAFICA

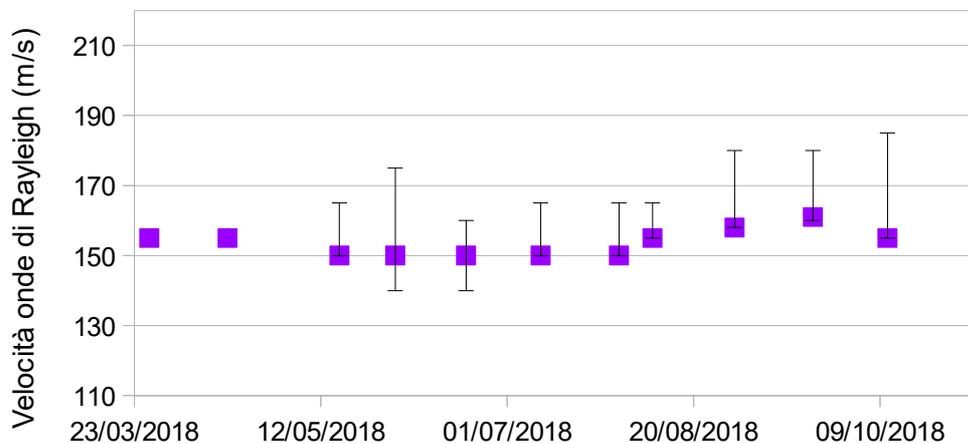


Figura 76: La barra di errore associata alle misure rappresenta il range di velocità, che ha l'80% di probabilità di essere quella reale, ricavato dalle curve di dispersione. La velocità relativa al 27 marzo e 17 aprile sono prive di barra di errore perché ottenute da curve  $H/V$  (l'incertezza per queste è  $V=4Hf$  con  $H=\lambda/2-\lambda/4$ ).

### FUORI SINISTRA IDROGRAFICA

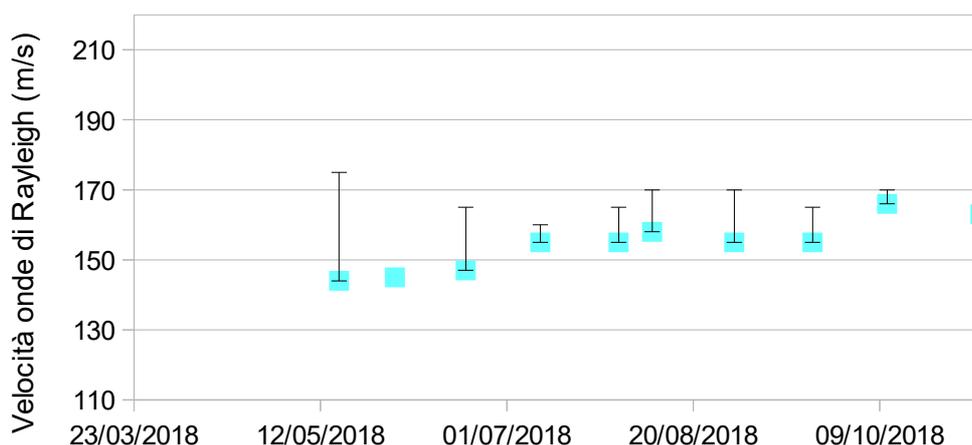


Figura 77: La barra di errore associata alle misure rappresenta il range di velocità, che ha l'80% di probabilità di essere quella reale, ricavato dalle curve di dispersione. La velocità relativa al 1 giugno è priva di barra di errore perché ottenuta da curve  $H/V$  (l'incertezza per queste è  $V=4Hf$  con  $H=\lambda/2-\lambda/4$ ).

Come si può osservare nel grafico di figura 78 a marzo 2018 la velocità delle onde di

Rayleigh all'interno del corpo di frana è notevolmente ridotta rispetto l'esterno, inoltre mentre nel primo caso aumenta nel tempo nel secondo rimane costante.

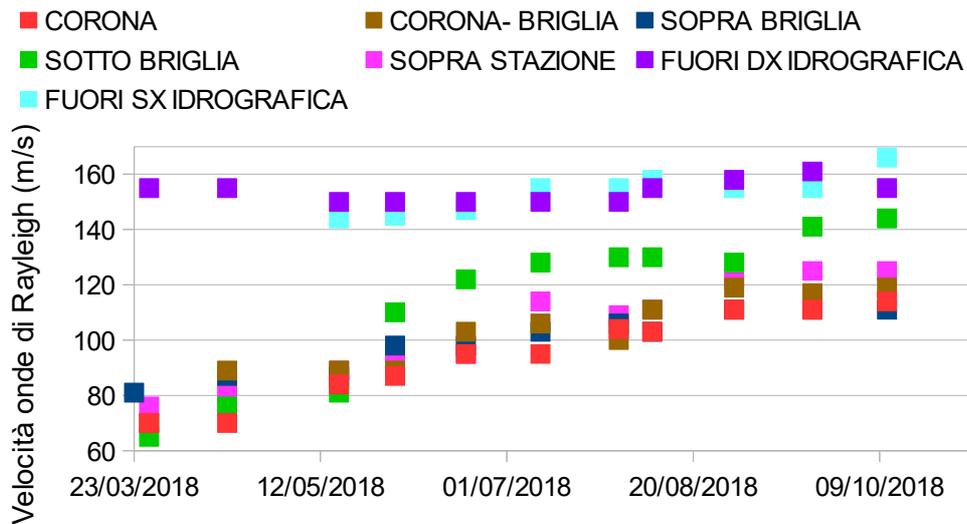


Figura 78: Velocità delle onde di Rayleigh dentro e fuori il corpo di frana. Fuori dalla frana la velocità è maggiore e costante nel tempo.

La velocità delle onde di Rayleigh da marzo ad autunno passa da 65-80 m/s a 120-140 m/s, con variazione massima registrata di 79 m/s in zona sotto briglia, e minima di 39 m/s in zona sopra briglia.

La velocità tende ai valori precedenti alla riattivazione (e quindi agli esterni) in tutte le sezioni all'interno del corpo di frana tuttavia con un tasso di recupero diverso (ad esempio in zona sotto briglia questi sono stati quasi raggiunti).

Achenbach (2012) ha definito la relazione tra la velocità delle onde di Rayleigh e di taglio:

$$\frac{V_r}{V_s} = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu}$$

Le onde di taglio sono state calcolate considerando il rapporto di Poisson ( $\nu$ ) caratteristico di suoli molli e in condizioni non drenate che è 0.5 (figura 79).

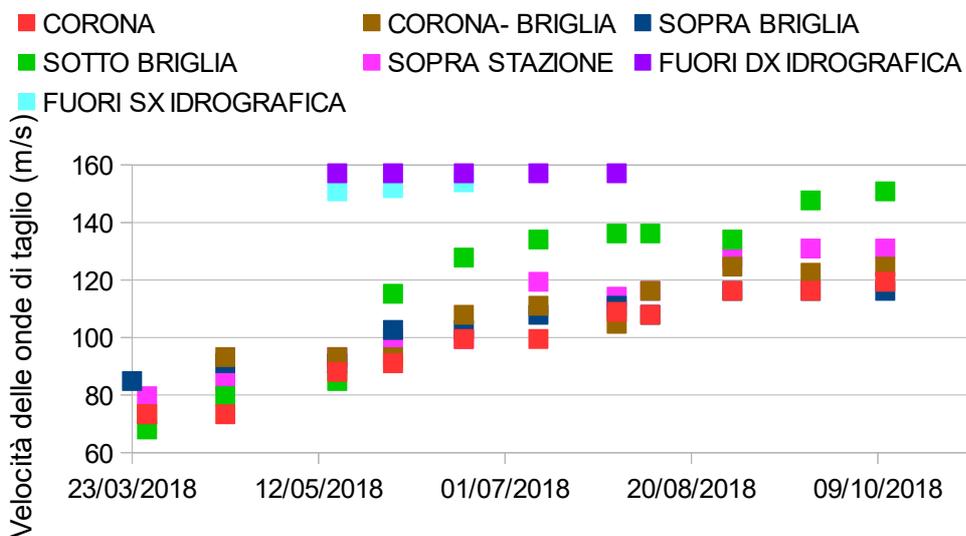


Figura 79: Velocità delle onde di taglio dentro e fuori il corpo di frana.

Il grafico in figura 80 mostra l'andamento della velocità delle onde di taglio lungo il corpo di frana. I diversi valori di velocità nella stessa data in aree diverse della frana sono molto probabilmente dovuti al diverso tasso di spostamento delle varie parti della frana. Jongmans e al (2009), Renalier e al (2010) hanno osservato una correlazione inversa tra la velocità delle onde di taglio e il tasso di spostamento. In questo studio non è possibile verificare se i diversi valori di velocità sono attribuiti a ciò in quanto non si dispone di misure di spostamento

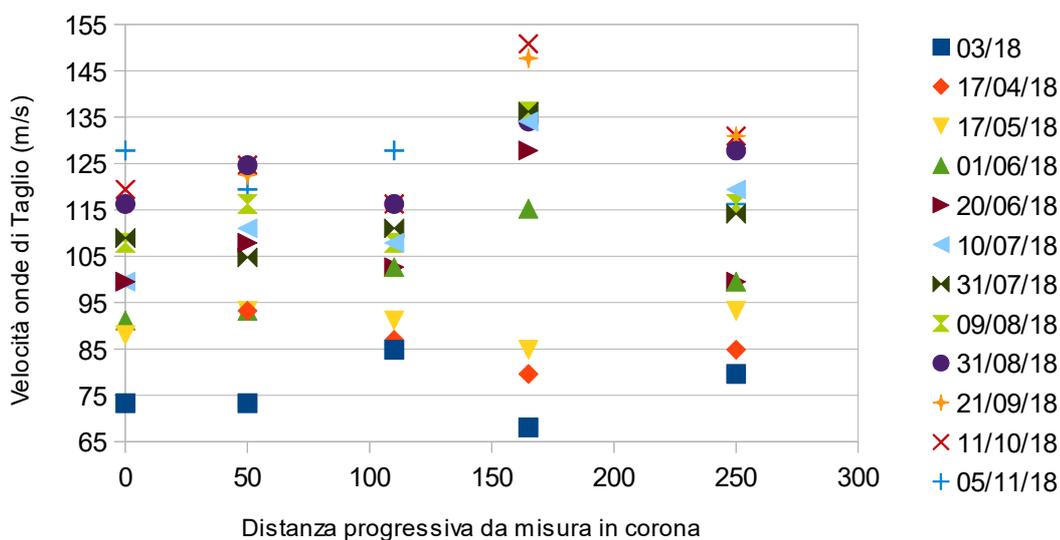


Figura 80: Variazione di velocità delle onde di taglio lungo il corpo di frana. la distanza di 0 metri corrisponde alla misura eseguita in corona, 50 metri corona-briglia, 110 metri sopra briglia, 165 metri sotto briglia, 250 metri sopra stazione.

Dalla teoria elastica è nota la relazione  $V_s = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}}$ , da cui è possibile ricavare il modulo di taglio iniziale  $G_0$  a bassa deformazione (0.001% o inferiore), dove  $\rho$  è la densità del suolo alla profondità di indagine (1600 kg/m<sup>3</sup>-1700 kg/m<sup>3</sup>).

Il modulo di taglio misurato all'interno del corpo di frana dopo un mese dall'evento parossistico (circa 10 MPa) è molto inferiore rispetto quello misurato all'esterno (40-50 Mpa). Nel tempo il modulo di taglio all'interno tende a quello esterno. Tali valori sono consistenti con i valori tipici di  $G_0$  per suoli argillosi (Ortiz e al, 1986) indicando che il materiale varia da molle a rigido (figura 81).

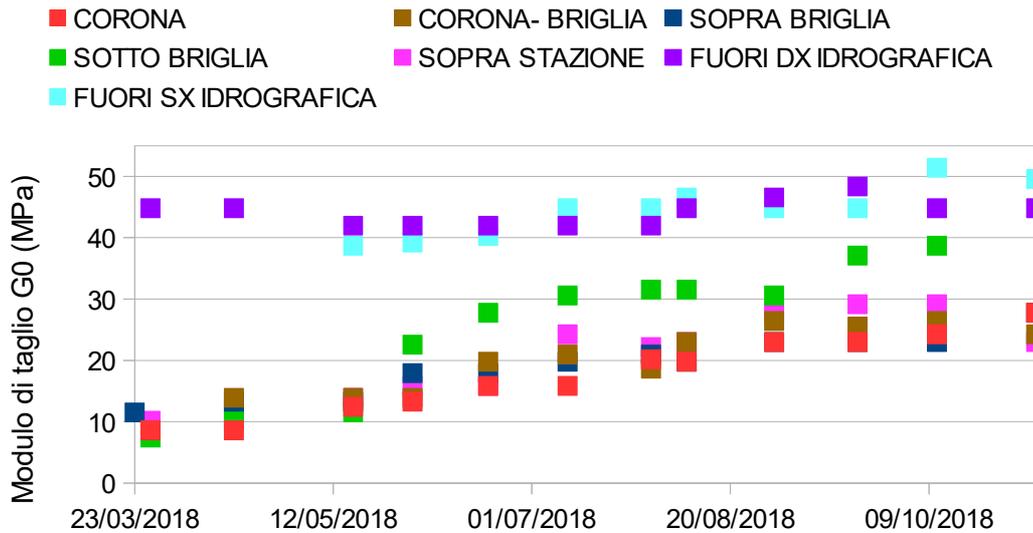


Figura 81: Indice di rigidezza dentro e fuori il corpo di frana. Fuori dalla frana  $G_0$  è maggiore e costante nel tempo.

Santos e Correia (2000), tramite indagini di laboratorio esaminano varie combinazioni modulo di taglio-indice dei vuoti, proponendo la relazione:

$$G_0 = 4000 * e^{-1.3 * p'} * p'^{0.5}$$

per suoli con alta percentuale di fine, dove  $p'$  è lo sforzo efficace alla profondità di indagine (tabella 7) considerando la falda a piano campagna ( $p'$  e  $G_0$  sono espressi in KPa). Da quest'ultima formula viene derivato l'indice dei vuoti.

L'indice dei vuoti del terreno al di fuori del corpo di frana è pari a 0.4 e permane costante in tutto il periodo di analisi. Mentre all'interno del deposito, ad un mese dall'evento parossistico, l'indice dei vuoti varia da 1.4 a 0.9 lungo il corpo di frana, poi nel tempo cala tendendo ai valori esterni ad indicare una possibile contrazione dello scheletro solido (figura 82).

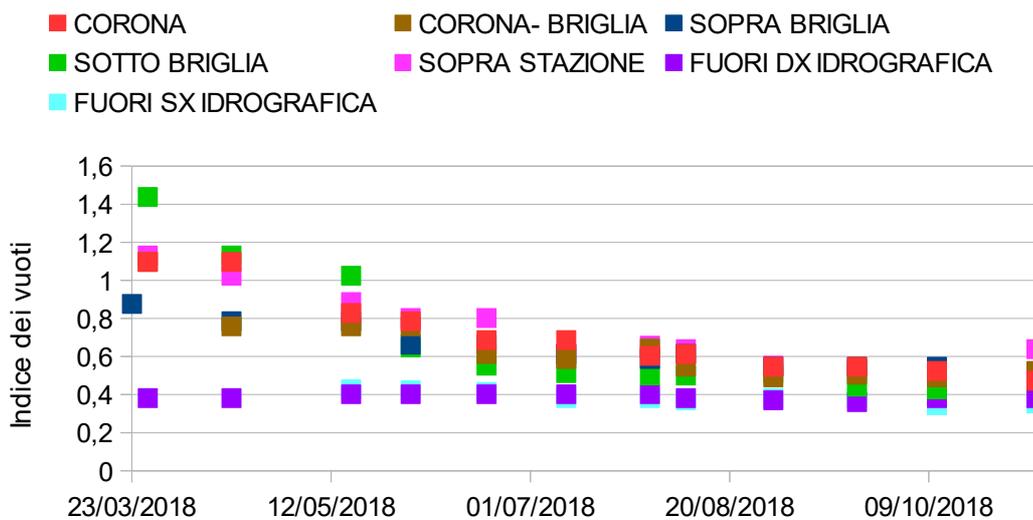


Figura 82: Indice dei vuoti in funzione del tempo all'interno e all'esterno del corpo di frana.

Infine, assumendo suolo saturo, è possibile ricavare il contenuto gravimetrico di acqua ( $W_g$ ) dalla relazione  $W_g = \frac{e}{G_s}$ , dove  $G_s$  è il peso specifico dei grani assunto pari a 2.7.

Come si può notare in figura 83, il contenuto d'acqua nel corpo di frana risulta superiore rispetto l'esterno, con valori iniziali addirittura maggiori del limite liquido (30-50%) per poi diminuire gradualmente fin sotto il limite plastico (LL=29%, LP=18,5%, paragrafo 3.4). All'esterno il contenuto di acqua è circa 15% e rimane costante per tutto il periodo di misura.

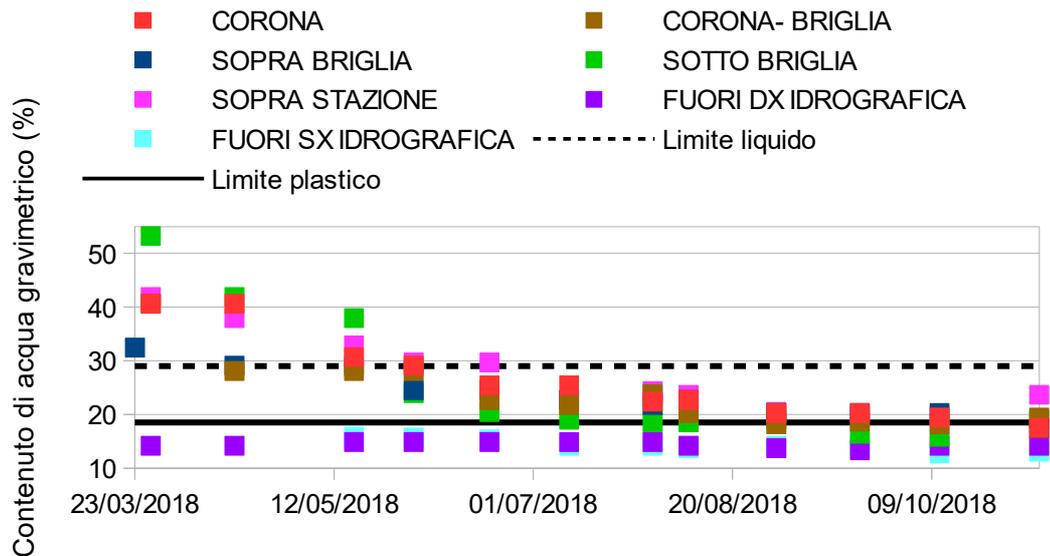


Figura 83: Contenuto di acqua gravimetrico in funzione del tempo. Indicati il limite liquido e il limite plastico.

Diagrammando l'indice dei vuoti rispetto al tempo in scala logaritmica (figura ) è interessante notare che questo diminuisce fino a raggiungere un valore stazionario in concomitanza delle date in cui il contenuto gravimetrico di acqua si è mostrato prossimo al limite plastico (tra 20 e 16 %).

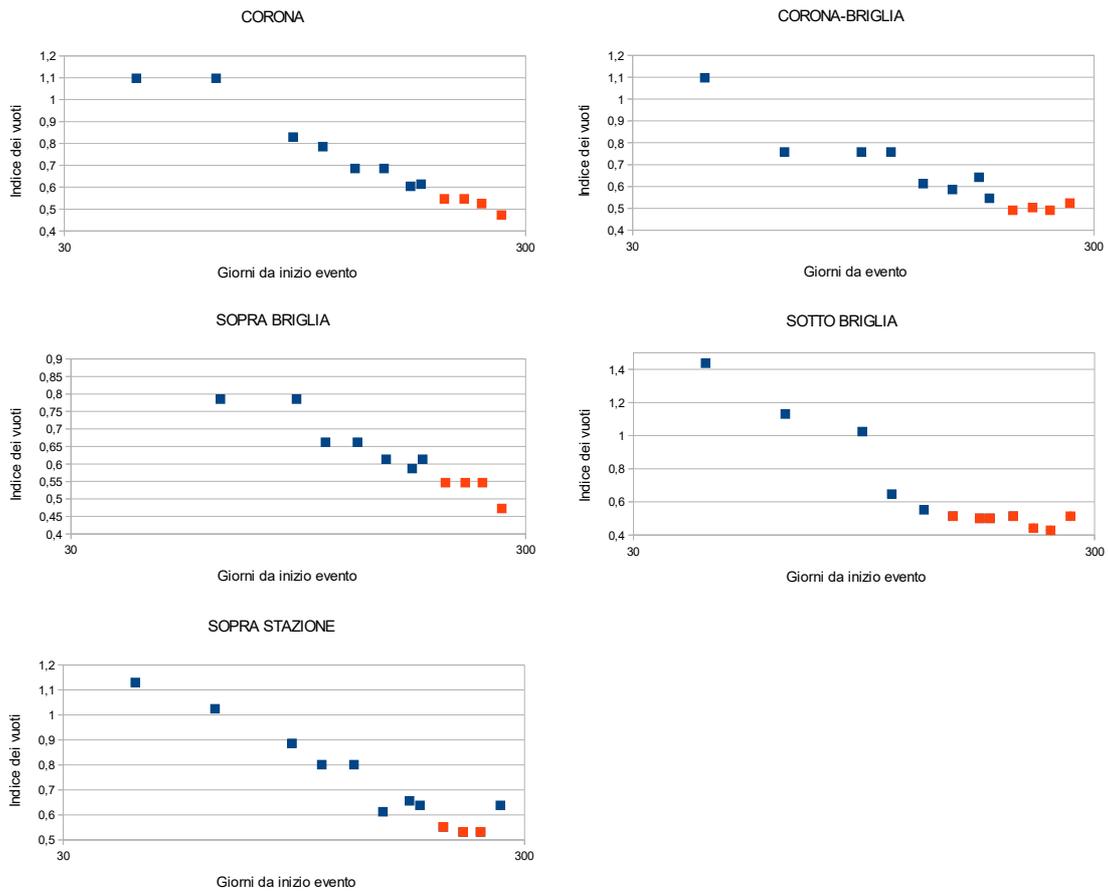


Figura 84: L'indice dei vuoti assume valore costante quando il contenuto gravimetrico del suolo è prossimo al limite plastico (icone arancioni).

Confrontando per uno stesso sito l'andamento delle curve H/V nel tempo, è possibile osservare una certa migrazione dei picchi verso le alte frequenze all'interno del corpo di frana (figura 85, 86, 87, 88, 89) mentre all'esterno (figura 90, 91) risultano impilati sulle stesse frequenze. Notare che misure H/V del 27/03/2018 non sono state eseguite nei siti sopra briglia e fuori in sx idrografica. Inoltre nel sito sotto briglia la situazione non è molto chiara, probabilmente per errata interpretazione delle misure H/V.

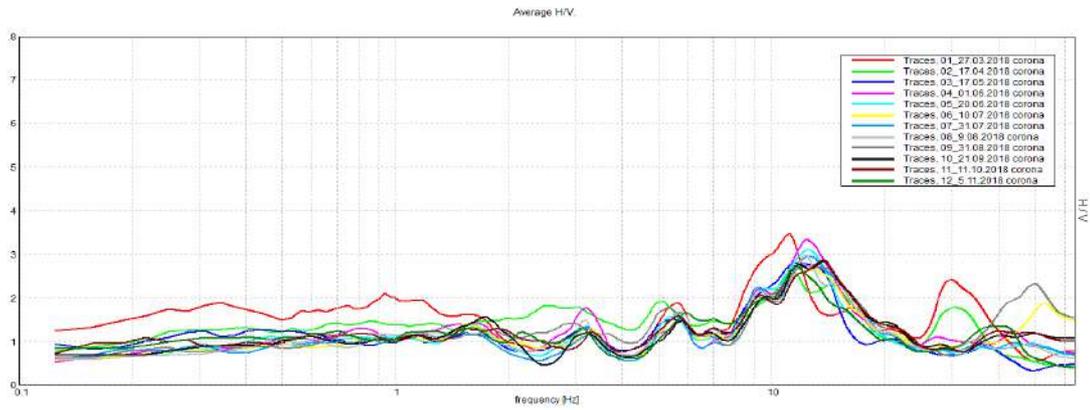


Figura 85: Picchi H/V in corona, le misure di 27/03/2018 e 17/04/2018 si discostano dalle altre.

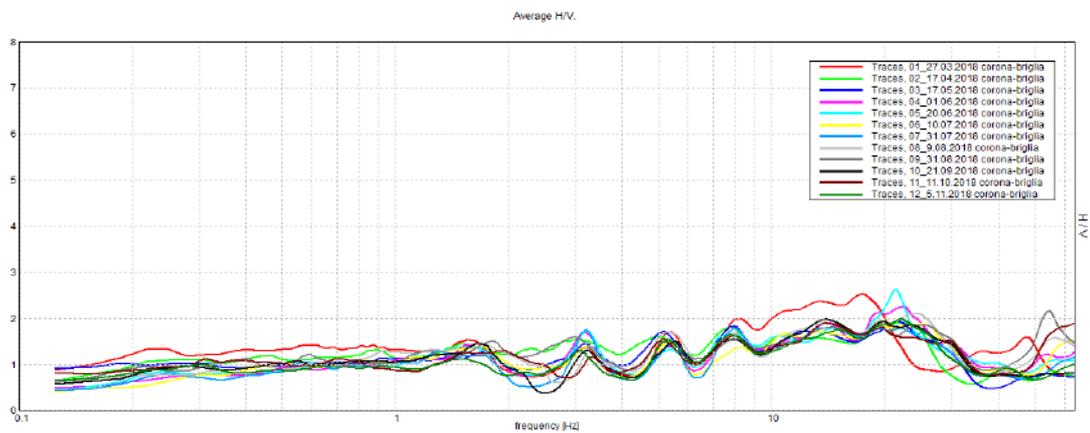


Figura 86: Picchi H/V in corona-briglia, la misura di 27/03/2018 si discosta dalle altre.

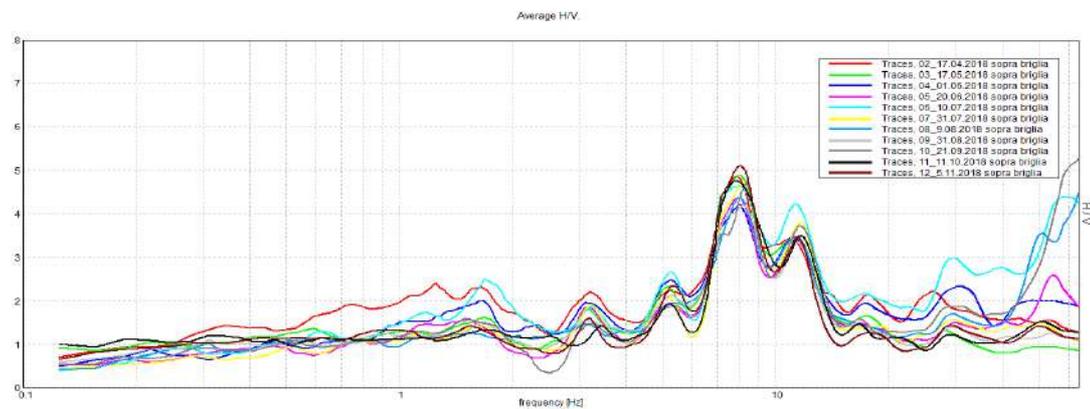


Figura 87: Picchi H/V in sopra briglia. Notare che la prima H/V è del 17/04/2018, è stata acquisita una misura H/V il 23/03/2018 ma lo strumento era guasto.

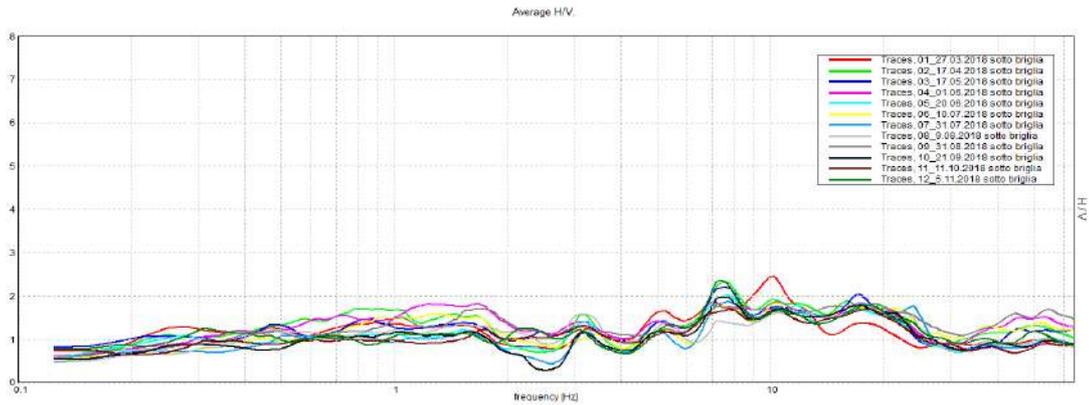


Figura 88: Misure H/V in sotto briglia. La misura di 27/03/2018 sembra discostarsi dalle altre ma la situazione non è chiara, in quanto i picchi (erroneamente) considerati nel fit congiunto con MASW (ReMi) sembrano indicare una diminuzione di velocità da marzo ad aprile, cosa non vera analizzando le MASW (ReMi).

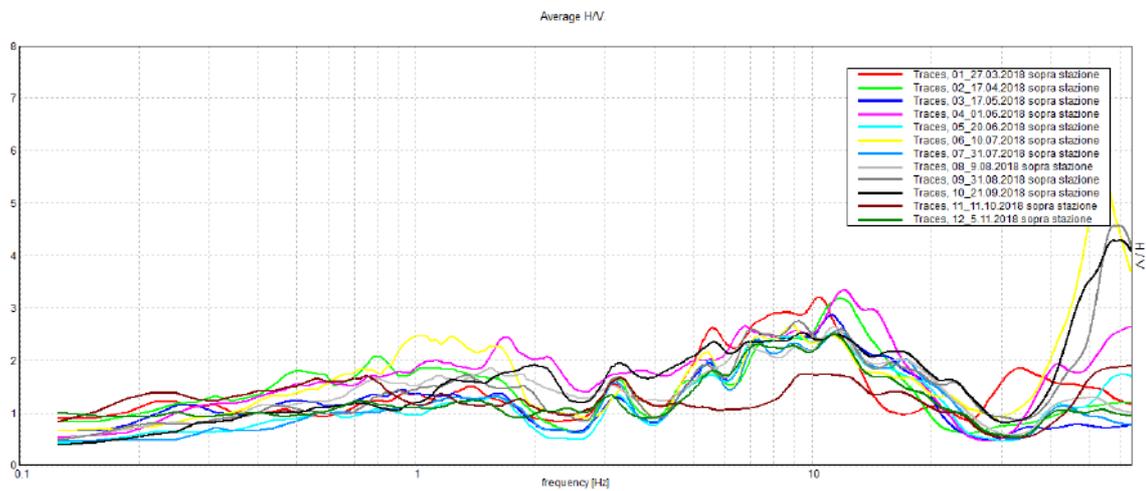


Figura 89: Picchi H/V in sopra stazione, la misura di 27/03/2018 si discosta dalle altre.

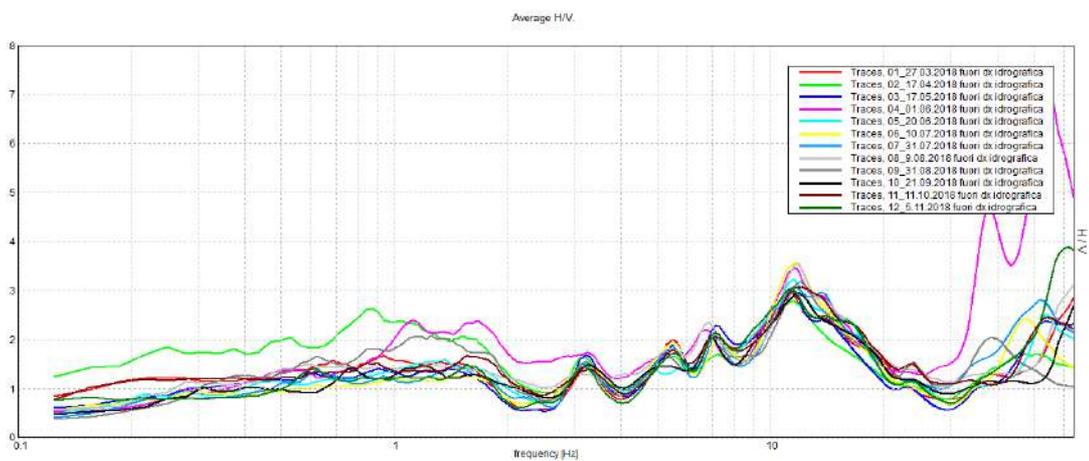


Figura 90: Picchi H/V in fuori in destra idrografica. I picchi sono impilati sulle stesse frequenze.

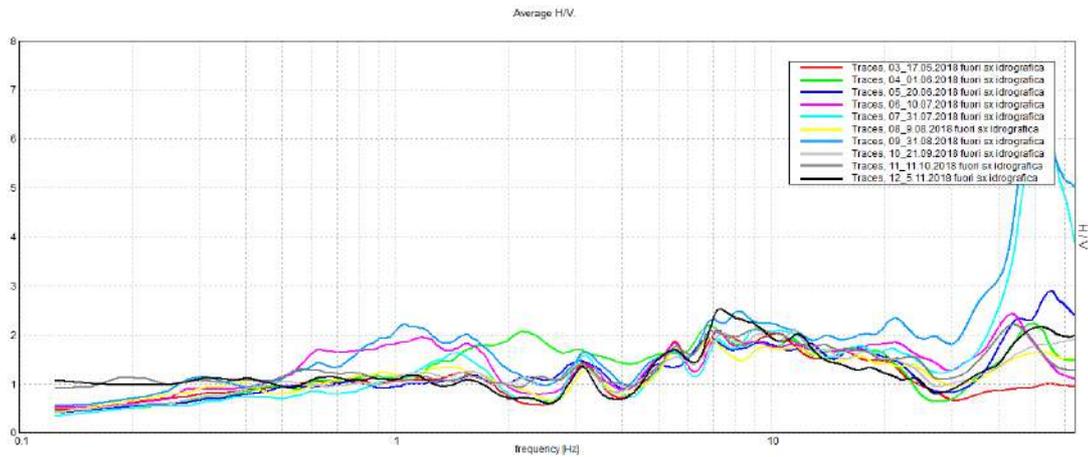


Figura 91: Picchi H/V in fuori in sinistra idrografica. Notare che la prima H/V è del 17/05/2018 (si è iniziato ad acquisire anche in questo punto per avere due misure esterne al corpo di frana). In quanto sembrava che in dx idro non fosse possibile acquisire buone MASW.

Considerato che *fuori in destra idrografica* la misura del 27/03/2018 si sovrappone alle successive in termini di frequenza:

- può essere esclusa una deriva strumentale,
- può essere dedotto che questo shift sia relativo alla presenza della frana.

La frequenza di risonanza del terreno è data dalla relazione  $f = \frac{V_s}{4H}$  (paragrafo 4.3), quindi lo shift può essere causato da variazione di spessore del corpo di frana e/o della velocità delle onde di Rayleigh che viaggiano al suo interno.

A questo riguardo sono state confrontate le curve H/V in *corona* dei giorni 27/03/2018 e 1/06/2018. Entrambe presentano un picco di circa stessa ampiezza H/V, ma il secondo è shiftato rispetto al primo verso le alte frequenze di 1.5 Hz (figura 92).

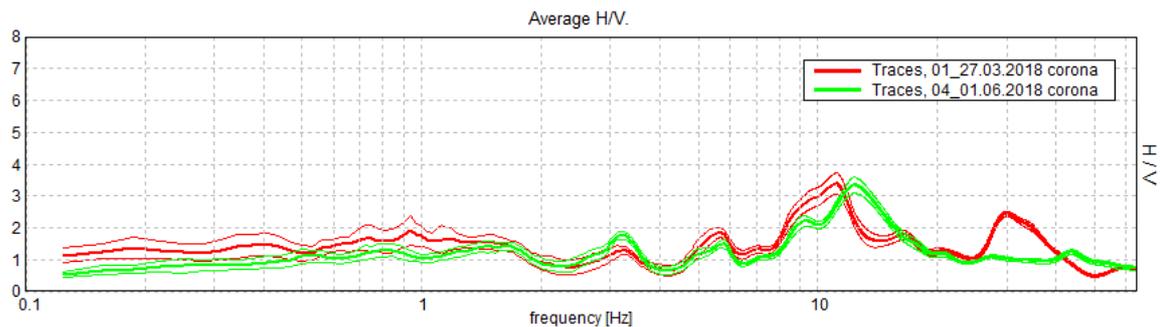


Figura 92: Curva H/V in corona nei giorni 27/03/2018 e 1/06/2018.

Il picco a 11 Hz del 27/03/2018, da modello congiunto MASW-H/V, è relativo a spessore di 1.6 metri a cui associata velocità delle onde di Rayleigh di 70 m/s (figura 93).

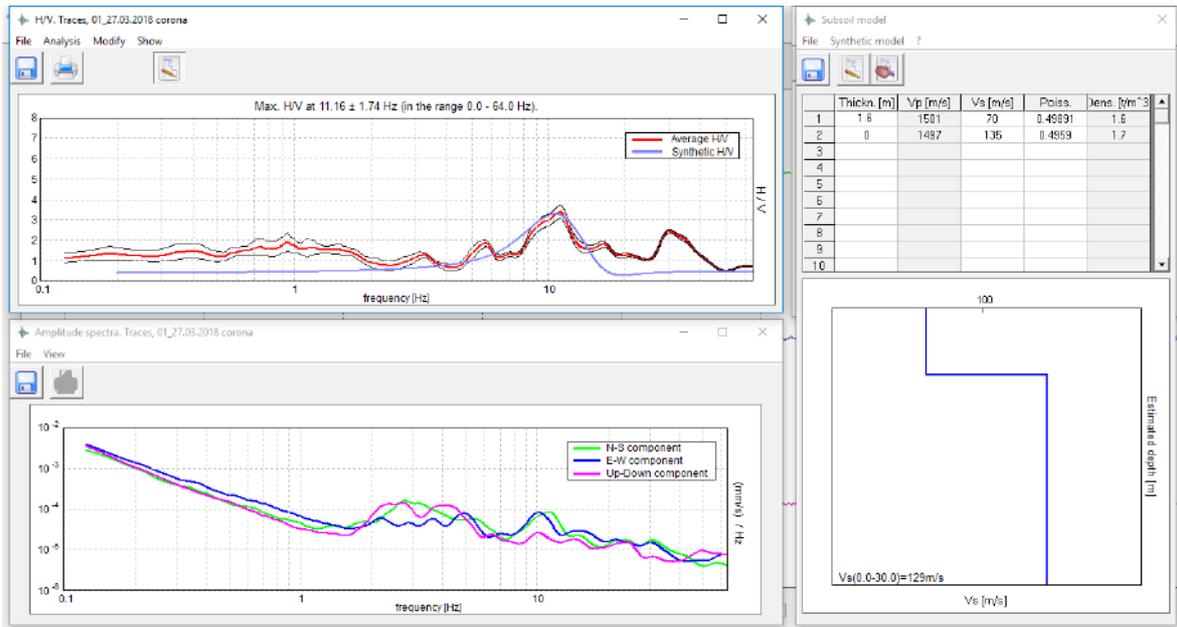


Figura 93: Il picco a 11 Hz del 27/03/2018 considerando la velocità delle onde di Rayleigh di 70 m/s è relativo a una discontinuità sismica posta a 1.6 metri dal piano campagna.

Mantenendo invariata  $V_s$ , lo shift osservato avviene per variazione di 20 cm di spessore in due mesi (figura 94).

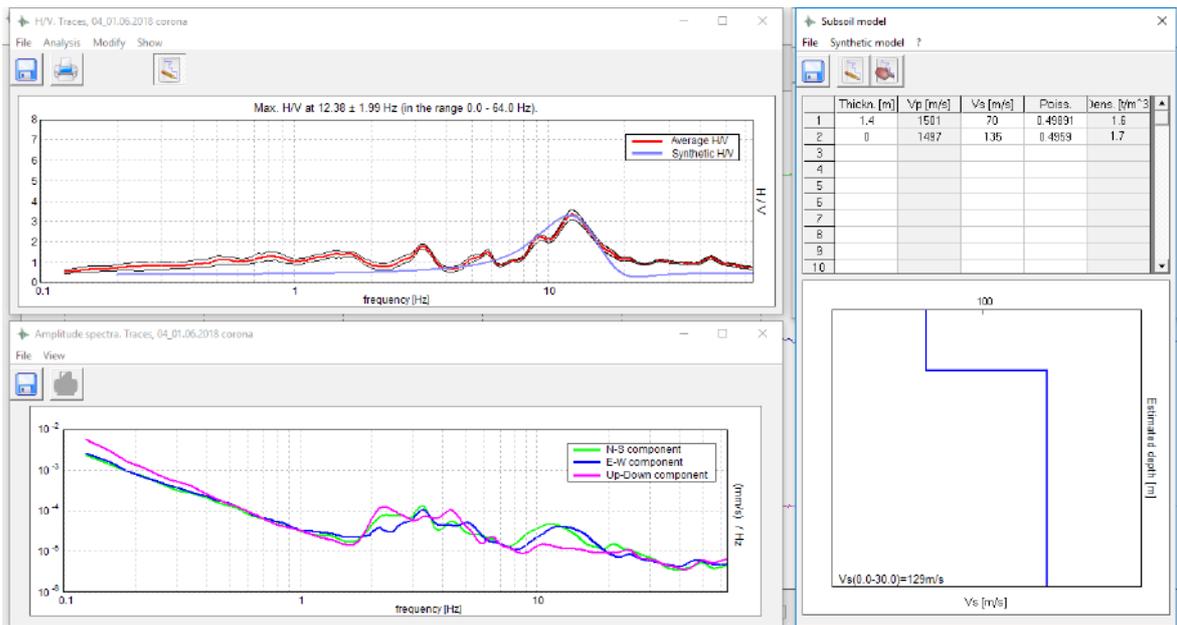


Figura 94: Il picco a 12.5 Hz del 1/06/2018 considerando la velocità delle onde di Rayleigh di 70 m/s è relativo a una discontinuità sismica posta a 1.4 metri dal piano campagna.

Se invece, viene considerato costante lo spessore è necessaria una variazione di velocità di propagazione delle onde di Rayleigh nel primo strato di 15 m/s, e di conseguenza per mantenere il contrasto di impedenza deve essere variata anche la velocità dello strato inferiore (figura 95).

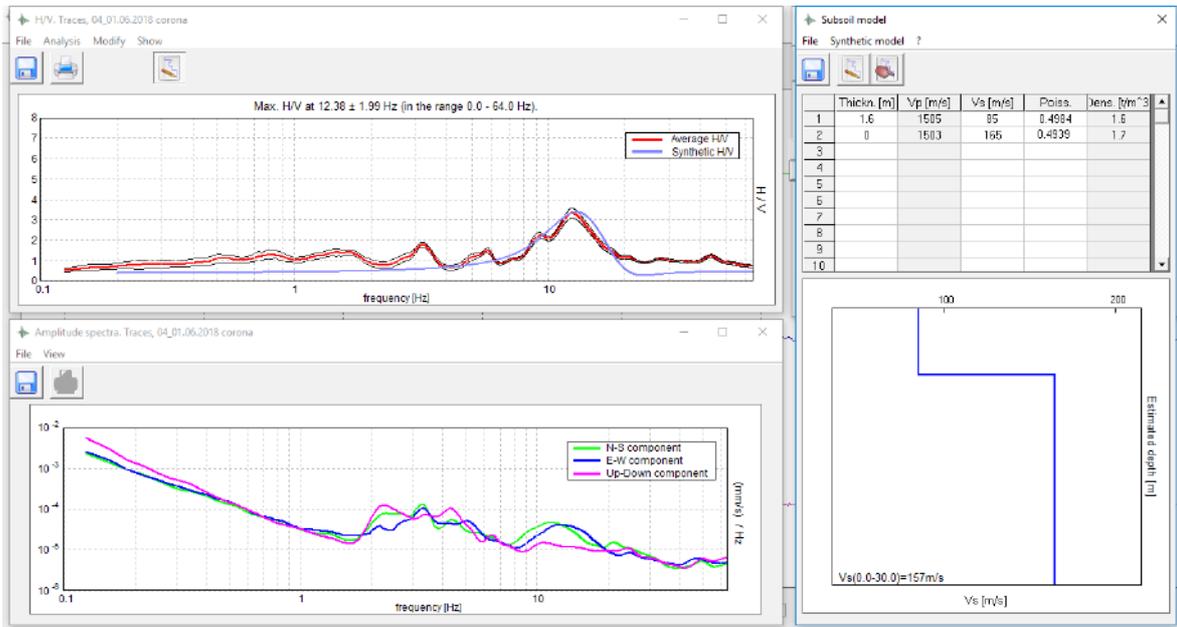


Figura 95: Il picco a 12.5 Hz del 1/06/2018 è relativo a uno spessore di 1.6 m se la velocità delle onde di Rayleigh è di 85 m/s.

Più realistica è una variazione di velocità di 15 m/s rispetto a una variazione di spessore di 20 cm in due mesi, tuttavia il fenomeno osservato può essere dovuto alla variazione simultanea delle due incognite.

Interessante è notare che il grande scostamento in frequenza nei siti *corona*, *corona-briglia*, *sopra stazione* non è relativo alla massima variazione di velocità osservata. Ad esempio in *corona* tra il 27/03/2018 e il 17/05/2018 la variazione di velocità è di 14 m/s, tra il 17/05/2018 e il 31/08/2018 di 27 m/s, eppure mentre nel primo caso si osserva un ampio spostamento in frequenza nel secondo caso è minimo, forse per compensazione tra l'aumento della velocità e la diminuzione dello spessore per compattazione dovuta alla consolidazione del corpo di frana.

## 5.2 Interpretazione dei dati del sistema di monitoraggio

Le misure della stazione fissa si sono dimostrate inutilizzabili, in quanto lo spettro di frequenza dei quattro geofoni non mostra picchi significativi, impedendo il riconoscimento di chiare curve di dispersione (figura 96, 97). Questo problema deriva dal fatto che il rumore sismico ambientale nel sito è molto basso, per cui le misure fisse sarebbero state utili solo in caso di riattivazione quando la variazione della velocità delle onde di taglio è molto forte.

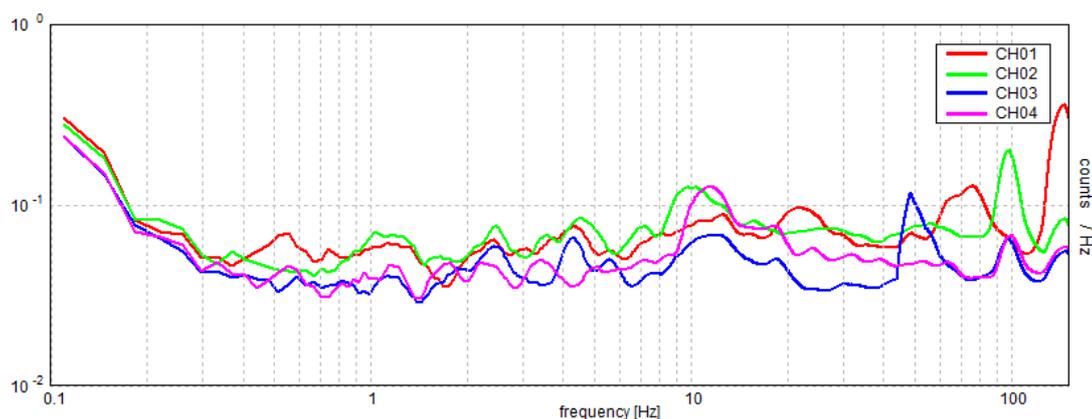


Figura 96: Spettro di frequenza tipico di una misura eseguita da stazione fissa. Notare la differenza di scala sull'asse delle ordinate rispetto a quella del grafico di figura 97.

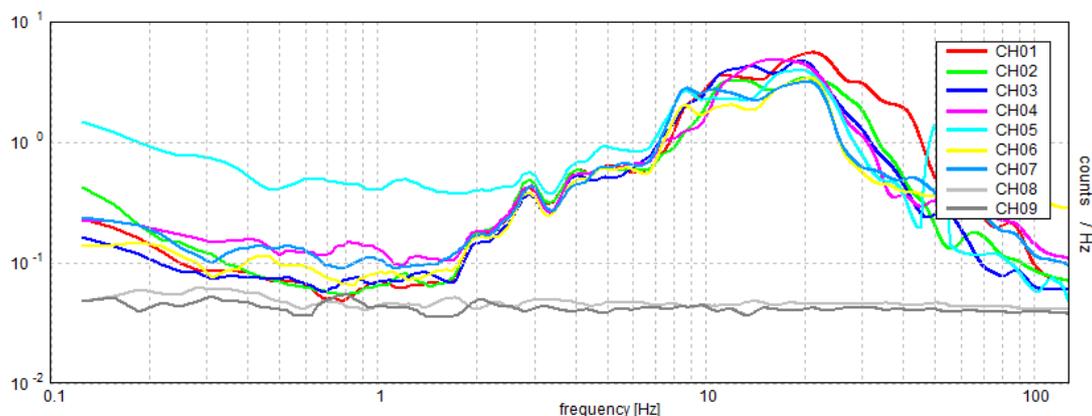


Figura 97: Spettro di frequenza tipico di una misura eseguita da acquisizione periodica.

Il sensore di pressione installato a 60 cm al di sotto del piano campagna registra la variazione della tavola d'acqua mostrata in figura 98.

È possibile osservare una risposta immediata del terreno alle precipitazioni, probabilmente a causa dell'intensa fratturazione del corpo di frana.

Il grafico mostra alcuni picchi non direttamente connessi alle precipitazioni. Il più evidente è quello collocato tra il 17 e 21 maggio 2018 dove il sensore registra un tavola d'acqua a circa 1.5 metri sopra il piano campagna, ciò è probabilmente connesso ad aumento della pressione dei pori per compressione meccanica prodotto da un piccolo avanzamento del corpo di frana. Altri due picchi non correlati a precipitazione si verificano il 18 dicembre e il 22 gennaio.

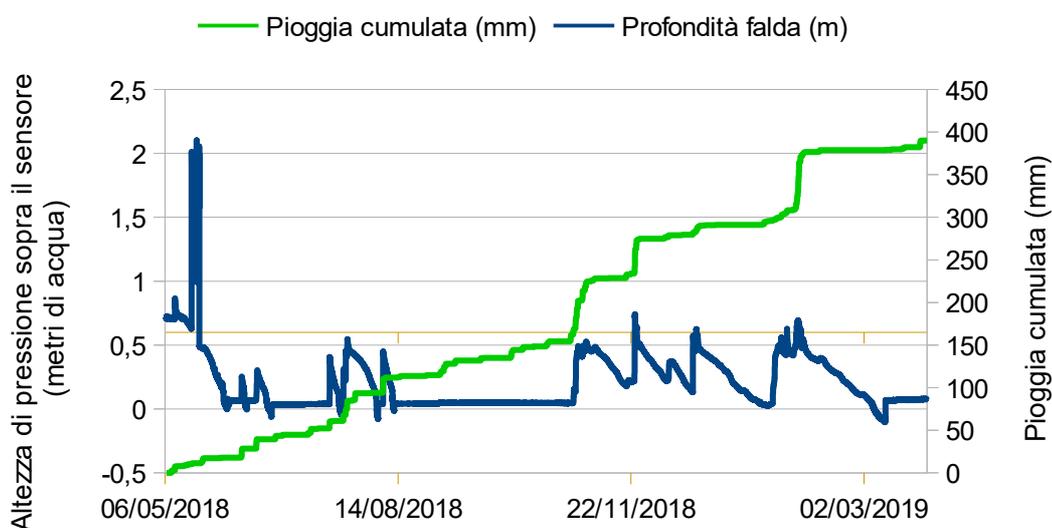


Figura 98: Profondità falda (misurata da sensore di pressione) e pioggia cumulata (registrata da pluviometro) in funzione del tempo. La linea marrone orizzontale indica il piano campagna.

Relazione diretta è stata osservata anche tra il contenuto volumetrico di acqua registrato dal sensore di umidità e le precipitazioni (figura 99) e l'innalzamento della tavola d'acqua (figura 100). Anche in questo caso probabilmente la causa è l'intensa fratturazione del deposito.

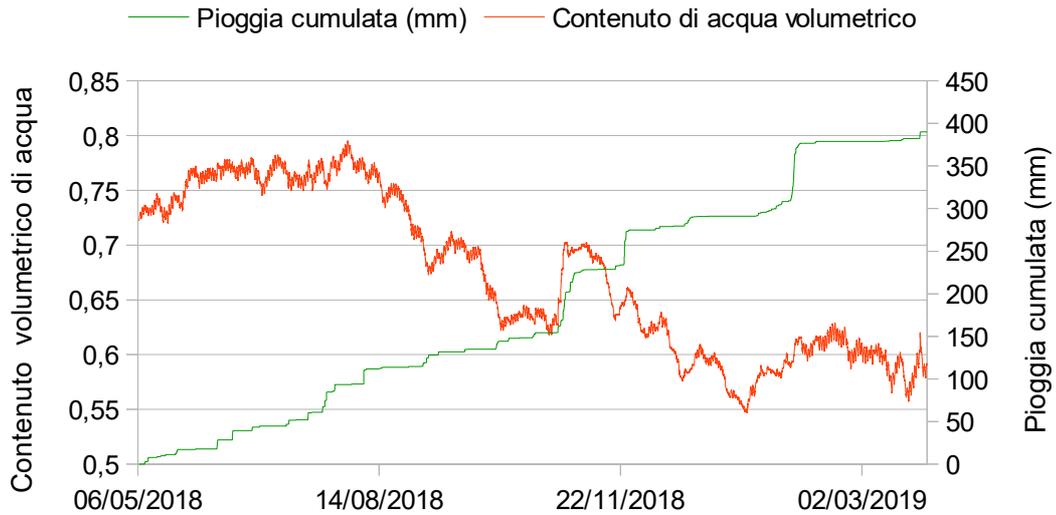


Figura 99: Contenuto volumetrico di acqua (misurato da sensore di umidità) e pioggia cumulata (registrata da pluviometro) in funzione del tempo.

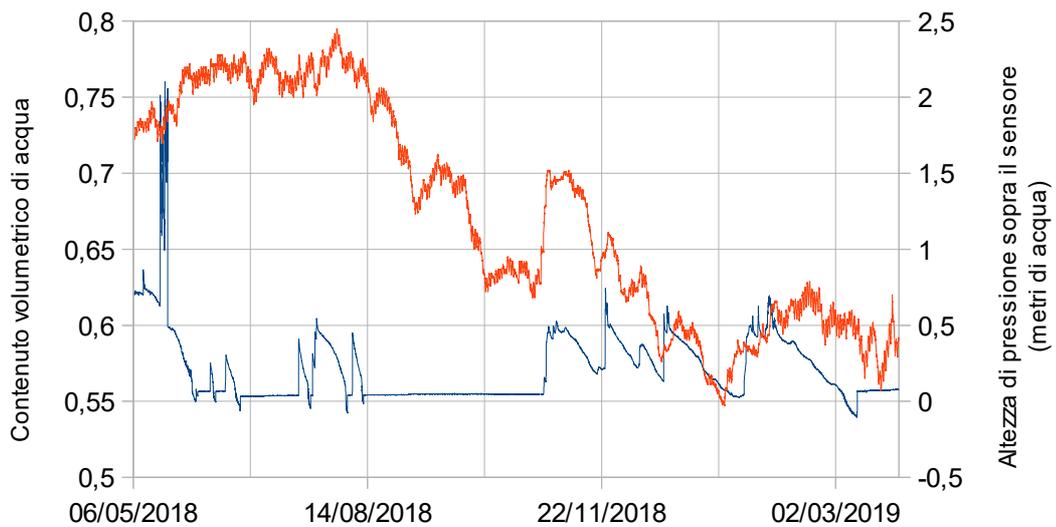
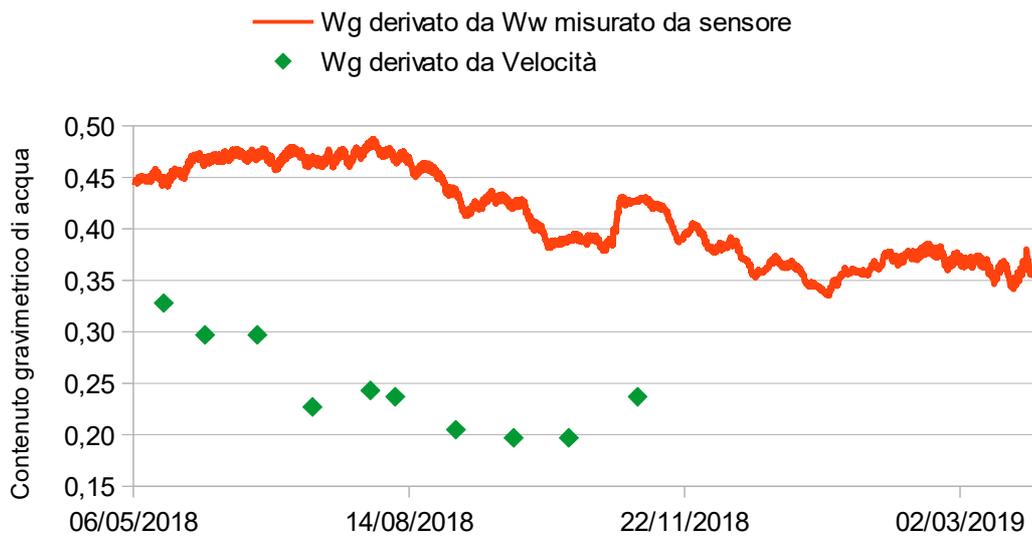


Figura 100: Contenuto volumetrico di acqua (misurato da sensore di umidità) e pioggia cumulata (registrata da pluviometro) in funzione del tempo.

Tenendo presente che le misure eseguite dal sensore di pressione sono misure continue mentre le altre puntuali, che le prime indagano il terreno a 20 cm di profondità mentre le seconde a 1.5 m, tramite la formula  $W_g = W_w * \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_w}\right)$ , considerando per il terreno in oggetto un peso di volume secco ( $\gamma_d$ ) di 16 KN/m<sup>3</sup> (Knappett e Craig, 2014) sono stati convertiti i dati di contenuto volumetrico di acqua registrato dal sensore in contenuto gravimetrico così da confrontarli con il contenuto gravimetrico derivato dalle velocità delle onde di taglio (figura 101).



*Figura 101: Contenuti gravimetrici di acqua derivati dalla velocità delle onde di Rayleigh e dal contenuto volumetrico di acqua registrato dal sensore di umidità a confronto.*

Tra le due misure c'è un differenza di contenuto in acqua superiore al 10%.

Il sensore di pressione mostra un contenuto gravimetrico di acqua molto alto, anche questo fatto può essere ricondotto alla probabile influenza sul sensore dell'intensa fratturazione del corpo di frana.

Tuttavia durante l'intero periodo di monitoraggio il contenuto di acqua volumetrico diminuisce di oltre 20%.

## **CAPITOLO 6: CONCLUSIONI**

A circa un mese dall'evento parossistico sono stati prelevati campioni di terreno all'interno e all'esterno del deposito della frana di Silla.

Dalle indagini di laboratorio condotte sui campioni risulta un terreno classificabile come limo sabbioso con argilla, tuttavia la sedimentazione in ambiente pelagico delle Argille a Palombini porta ad ipotizzare che ciò che viene individuato come limo e sabbia consista in realtà in aggregati lamellari di argilla.

I limiti di Atterberg sono stati stimati pari a 29 % il liquido, e 18.5 % il plastico, da cui si deduce che si tratta di un terreno poco plastico (10.5 %).

Il deposito di frana presentava un contenuto gravimetrico di acqua prossimo al limite liquido (22-24 %), mentre al di fuori è risultato minore del limite plastico (15-18 %). Inoltre dalla stima dell'indice di liquidità è risultata una fluidità media per corpo di frana e bassa per il terreno non coinvolto nel movimento franoso.

A distanza di un mese dalla riattivazione la velocità delle onde di Rayleigh all'interno del corpo di frana è notevolmente ridotta rispetto l'esterno (65-80 m/s rispetto a 150-160 m/s), inoltre mentre nel primo caso aumenta nel tempo (da marzo ad autunno passa da 65-80 m/s a 120-140 m/s) nel secondo rimane costante.

A partire dai valori di velocità sono stati ricavati il modulo di taglio, l'indice dei vuoti e il contenuto gravimetrico di acqua del terreno.

Inizialmente il modulo di taglio misurato all'interno del corpo di frana è molto inferiore rispetto quello misurato all'esterno (circa 10 MPa rispetto 40-50 MPa), l'indice dei vuoti del deposito è 1.4-0.9 mentre al di fuori 0.4, il contenuto gravimetrico di acqua nel corpo di frana risulta addirittura maggiore del limite liquido (30-50%) mentre all'esterno è circa 15%.

Nel tempo tutti questi parametri misurati dentro il corpo di frana si sono mostrati tendere ai valori esterni.

Diagrammando l'indice dei vuoti rispetto al tempo in scala logaritmica si osserva che questo diminuisce fino a raggiungere un valore stazionario in concomitanza delle date in cui il contenuto gravimetrico di acqua si è mostrato prossimo al limite plastico.

Le misure di precipitazione, contenuto volumetrico del terreno, altezza della tavola d'acqua registrate dalla stazione di monitoraggio installata in sito mostrano correlazione diretta ad indicare che le misure di pressione e umidità sono probabilmente influenzate dall'intensa fratturazione del corpo di frana.

Il contenuto volumetrico di acqua è stato convertito in gravimetrico in maniera tale da confrontarlo con il contenuto derivato dalla velocità delle onde di Rayleigh, il primo risulta maggiore del secondo di oltre il 10 %, ciò è un'ulteriore evidenza del probabile condizionamento delle misure dei sensori da parte dell'intensa fratturazione del deposito di frana.

Tuttavia durante l'intero periodo di monitoraggio il contenuto di acqua volumetrico diminuisce di oltre 20%.

In definitiva la variazione della velocità delle onde di Rayleigh e i dati da questa derivati suggeriscono una consolidazione della massa, tuttavia il monitoraggio della velocità delle onde di Rayleigh non è sufficiente a dichiarare in maniera certa la consolidazione del

corpo di frana in quanto il decadimento di queste può verificarsi anche per deformazione della massa in relazione allo sviluppo di superfici di taglio interne. Fondamentale è stato quindi il monitoraggio del contenuto di acqua volumetrico mediante il sensore di umidità che durante l'intero periodo di monitoraggio ha mostrato un decadimento di oltre il 20%.

Per chiarire meglio la situazione in futuro sarà necessario eseguire misure di contenuto volumetrico di acqua a varie profondità all'interno delle colate di terra ed esaminare questi valori in relazione a medesime misure acquisite all'esterno di esse.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Achenbach, J. D. (2012). Wave propagation in elastic solids. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Albarelo D., Castellaro S., 2011. Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII, n.2.
- Arpae Emilia Romagna (2017) - Atlante climatico dell'Emilia-Romagna 1961-2015 edizione 2017. [https://www.arpae.it/dettaglio\\_documento.asp?id=6147&idlivello=1528](https://www.arpae.it/dettaglio_documento.asp?id=6147&idlivello=1528)
- Arpae Emilia Romagna (2018) - Rapporto idrometeoclima Emilia Romagna – Rapporto annuale dati 2018.
- Arpae Emilia Romagna - Servizio Dext3r. [https://www.arpae.it/dettaglio\\_generale.asp?id=3284&idlivello=1625](https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=3284&idlivello=1625)
- Bertello L, Berti M, Castellaro S, Squarzoni G (2018) Dynamics of an active earthflow inferred from surface-wave monitoring. *J Geophys Res Earth Surf* 123(8):1811–1834.
- Berti M, Bertello L, Squarzoni G (2018) Surface-wave velocity measurements of shear stiffness of moving earthflows. Springer-Verlag GmbH Germany part of Springer Nature.
- Bertolini G, Guida M, Pizziolo M (2005) Landslides in Emilia-Romagna region (Italy): strategies for hazard assessment and risk management. *Landslides* 2(4):302–312.
- Castellaro S., Mulargia F., Bianconi L., 2005. Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Journal of Geotechnical and Environmental geology* 3: 51–77.
- Castellato S., 2016. The complementarity of H/V and dispersion curves. *Geophysics*. Vol. 81, n.6: 1-16.
- Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslide types and processes. In: Turner K, Schuster RL (eds) Special report, transportation research board. National Academy Press, Washington DC, p 36–75
- Guida D, Iaccarino G (1991) Fasi evolutive delle frane tipo colata nell'alta valle del F. Basento (Potenza) *Studi Trentini di Scienze Naturali. Acta Geologica* 68:127–152
- Elter P. (1994) - Introduzione alla geologia dell'Appennino ligure-emiliano. In G. Zanzucchi (Ed.) *Appennino Ligure Emiliano, 10 itinerari. Guide Geologiche Regionali S.G.I., BE-MA Editrice*, 6: 17-24.
- Hutchinson, J. N., Prior, D. B., & Stephens, N. (1974). Potentially dangerous surges in an Antrim [Ireland] mudslide. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 7(4), 363–376.
- Jongmans, D., and Garambois, S., 2007, Geophysical investigation of landslides: A review: *Bulletin Société Géologique de France*, 178, 2.
- Jongmans, D. G. Bièvre, F. Renalier, S. Schwartz, N. Bearez, and Y. Orengo (2009), Geophysical investigation of a large landslide in glacio-lacustrine clays in the Trièves area (French Alps), *Eng. Geol.*, 109, 45 –56.
- Jongmans D, Baillet L, Larose E, Bottelin P, Mainsant G, Chambon G, Jaboyedoff M (2015) Application of ambient vibration techniques for monitoring the triggering of rapid landslides. *Eng Geol Soc Territory* 2:371–374.
- Knappett e Craig (2014), *Craig's Soil Mechanics*, eighth edition. Spon.
- Keefer DK, Johnson AM (1983) Earthflows: morphology, mobilization and movement. US Geological Survey Professional Paper 1264
- Louie, J., 2001, Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction

- microtremor arrays: Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 347–364, doi: 10.1785/0120000098.
- Mainsant G, Larose E, Bronnima C, Jongmans D, Michoud C, Jaboyedoff M (2012a) Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: toward failure prediction. *Geophys Res Lett* 117:1–12.
- Mainsant G, Jongmans D, Chambon G, Larose E, Baillet L (2012b) Shear-wave velocity as an indicator for rheological changes in clay materials: lessons from laboratory experiments. *Geophys Res Lett* 39(19):1–5.
- Mainsant G, Chambon G, Jongmans D, Larose E, Baillet L (2015) Shear-wave-velocity drop prior to clayey mass movement in laboratory flume experiment. *Eng Geol* 192:26–32.
- Marroni M, Meneghini F, Pandolfi L (2010) Anatomy of the Ligure-Piemontese subduction system: evidence from Late Cretaceous-middle Eocene convergent margin deposits in the Northern Apennines, Italy. *International Geology Review*.
- Mc Cann D.M. & Forster A. (1990). – Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations. – *Eng. Geol.*, 29, 59–78.
- MoHo s.r.l., DATA. Introduzione al modulo di analisi delle onde di superficie in *Grilla*. A cura di VEGA-Edificio Lybra.
- MoHo s.r.l., DATA. Introduzione alla modellazione delle curve H/V a fini stratigrafici in *Grilla*. A cura di VEGA-building Lybra.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the ground surface: Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute, 30, 25–33.
- Ortiz, J.M.R, J Serra, and C. Oteo. 1986. *Curso Aplicado de Cimentaciones*. Third ed. Colegio de Arquitectos de Madrid. Madrid.
- Park, C. B., R. D. Miller, and J. Xia, 1999, Multichannel analysis of surface waves: *Geophysics*, 64, 800–808, doi: 10.1190/1.1444590.
- Picarelli L, Urcioli L, Ramondini G, Comegna L (2005) Main features of mudslides in tectonised highly fissured clays shales. *Landslides* 2(1):15–30
- Raviolo P. L. (1993). *Il laboratorio geotecnico*. Controls.
- Renalier, F., G. Bièvre, D. Jongmans, M. Campillo, and P. Y. Bard (2010), Clayey landslide investigations using active and passive VS measurements, in *Advances in Near-Surface Seismology and Ground-Penetrating Radar*, *Geophys. Dev. Ser.*, vol.15, edited by R.D. Miller et al., chap.24, pp. 397–414, Soc. of Explor. Geophys., Tulsa, Okla.
- Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester: John Wiley.
- Santos, J. A., & Correia, G. (2000). Shear modulus of soils under cyclic loading at small and medium strain level. Paper presented at 12WCEE 2000, Auckland, New Zealand.
- SESAME Project, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. WP12, deliverable n. D23.12, <ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.pdf>.
- Simoni A, Ponza A, Picotti V, Berti M, Dinelli E. (2013) Earthflow sediment production and Holocene sediment record in a large Apennine catchment. *Geomorphology* 188 (2013) 42-53

Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) ISPRA - Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.  
<http://www.progettoiffi.isprambiente.it>

Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna - Carta Inventario delle frane a scala 1:10000 della Regione Emilia-Romagna.Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna - Archivio storico delle frane della Regione Emilia-Romagna.Varnes DJ (1978) Slope movement types and processes. In: Landslides, Analysis and Control, Transportation Research Board, Spec. Rep. no. 176, pp 11-23

## RINGRAZIAMENTI

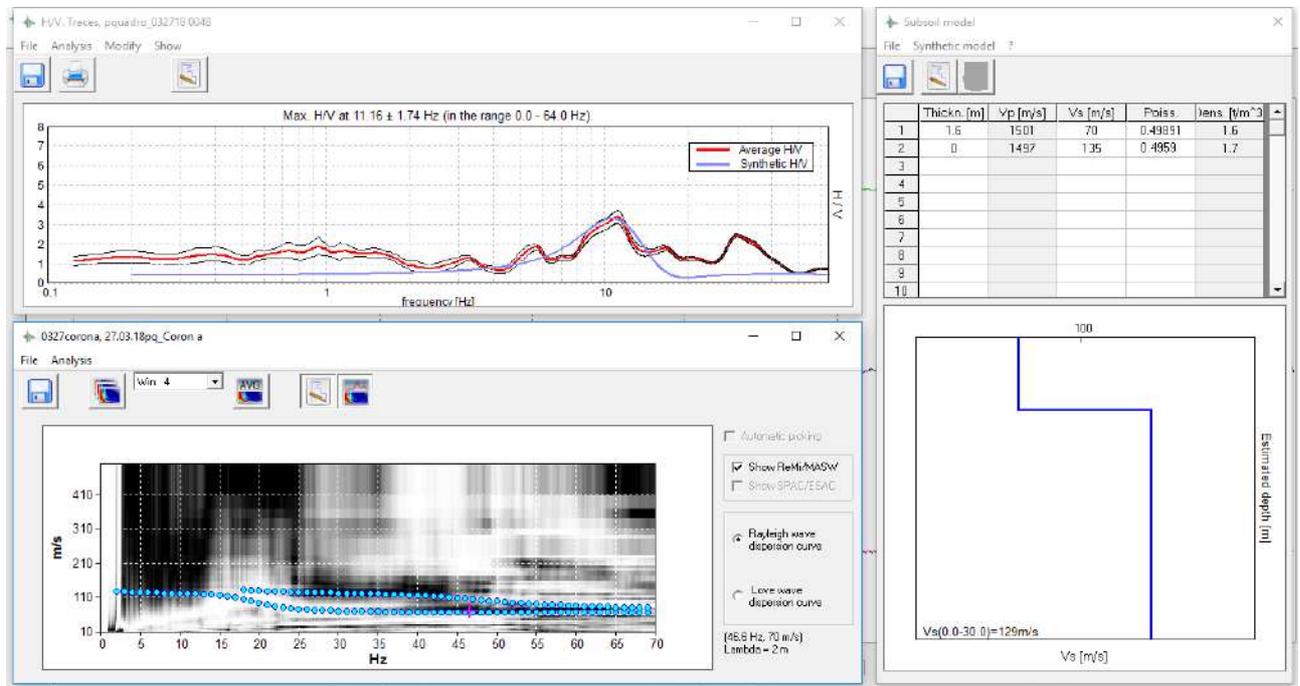
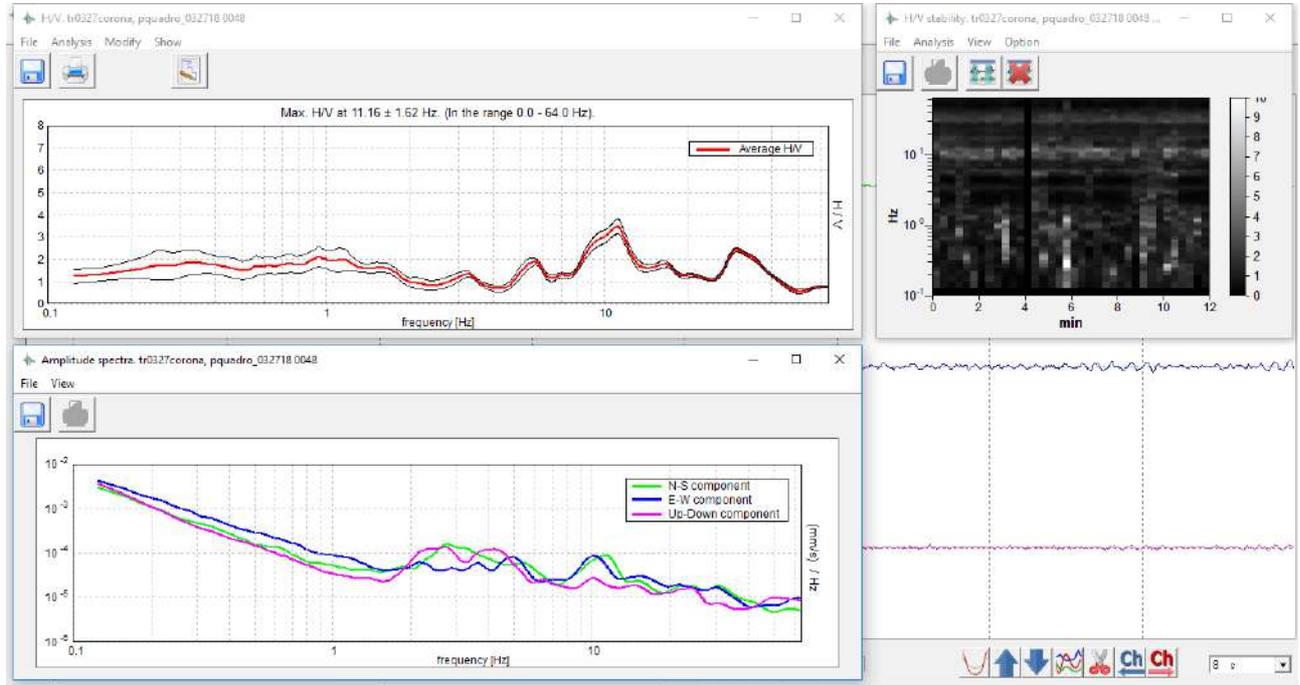
*Ringrazio il Professore Matteo Berti per avermi dato l'opportunità di lavorare a questa tesi e perché andare alle sue lezioni era un piacere.*

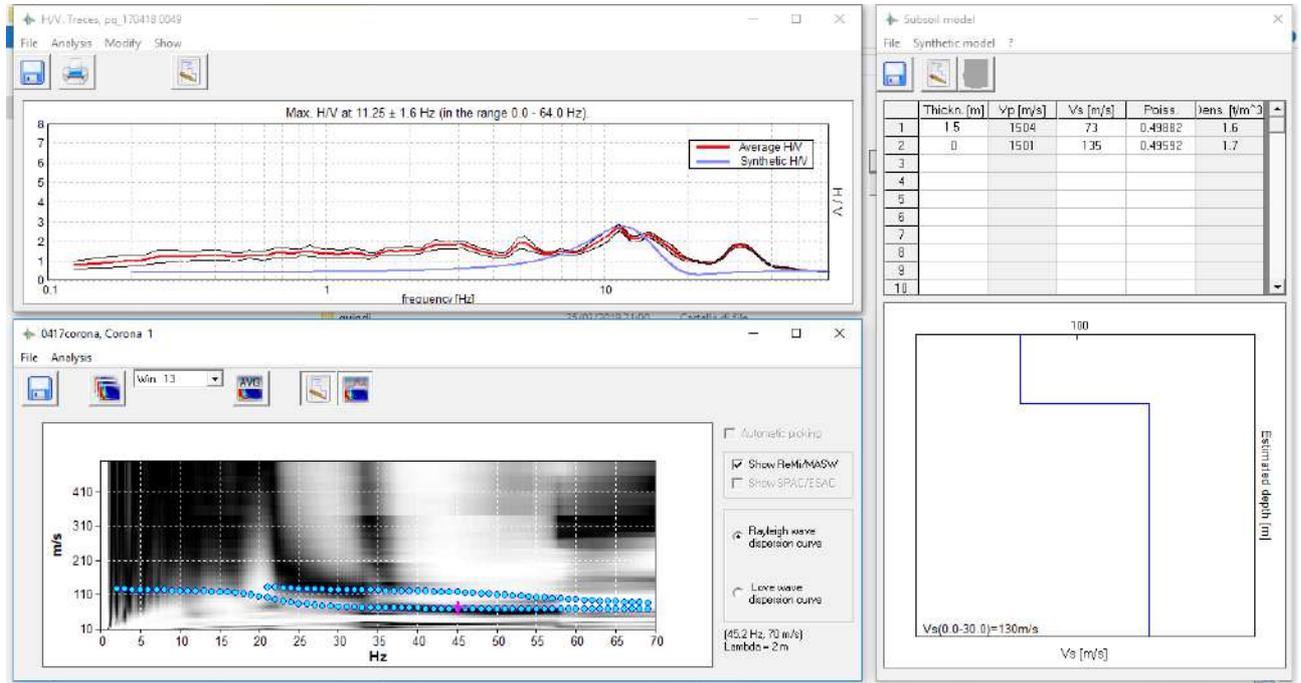
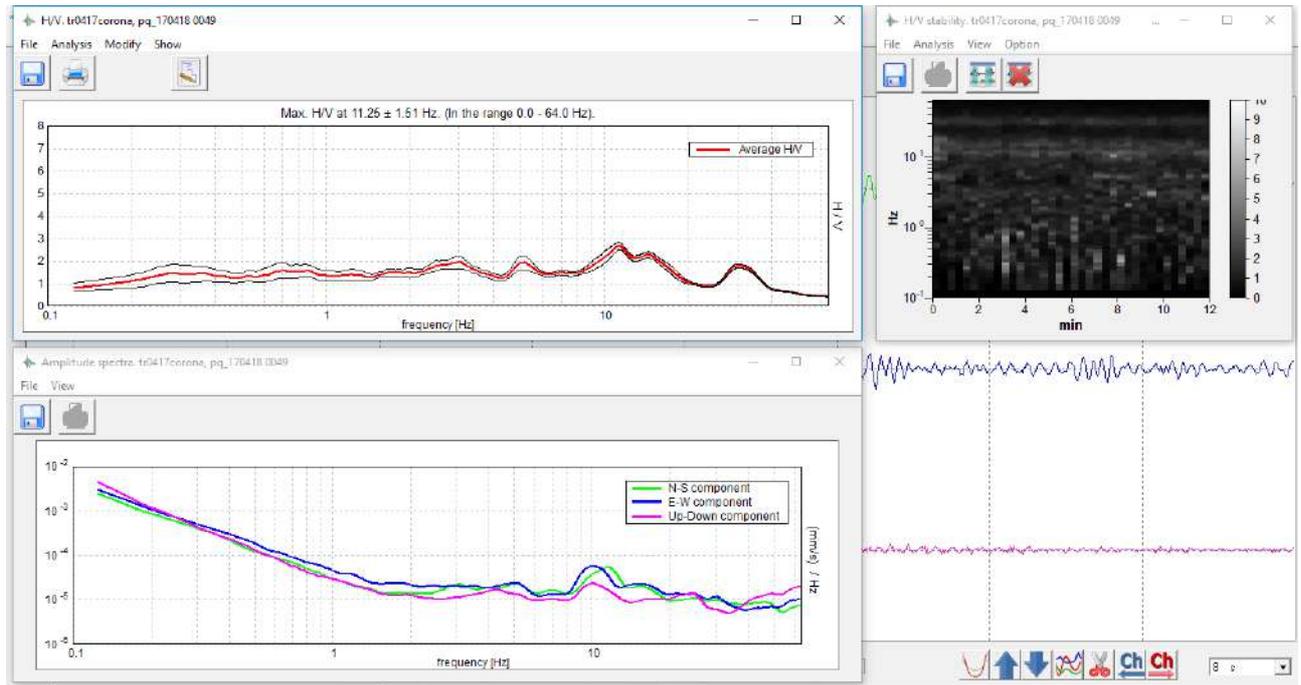
*Ringrazio Gabriela Squarzoni per il suo prezioso supporto nella stesura di questa tesi.*

*Ringrazio Antonino Calafato per la sua pazienza in laboratorio.*

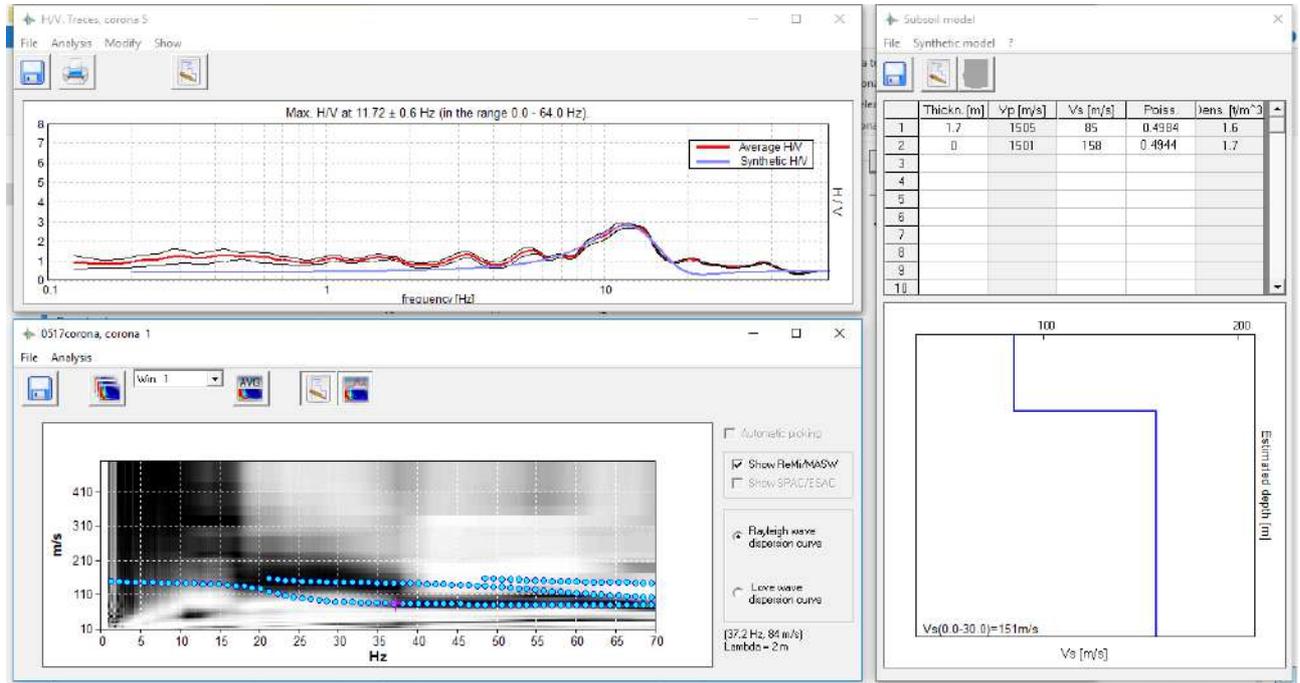
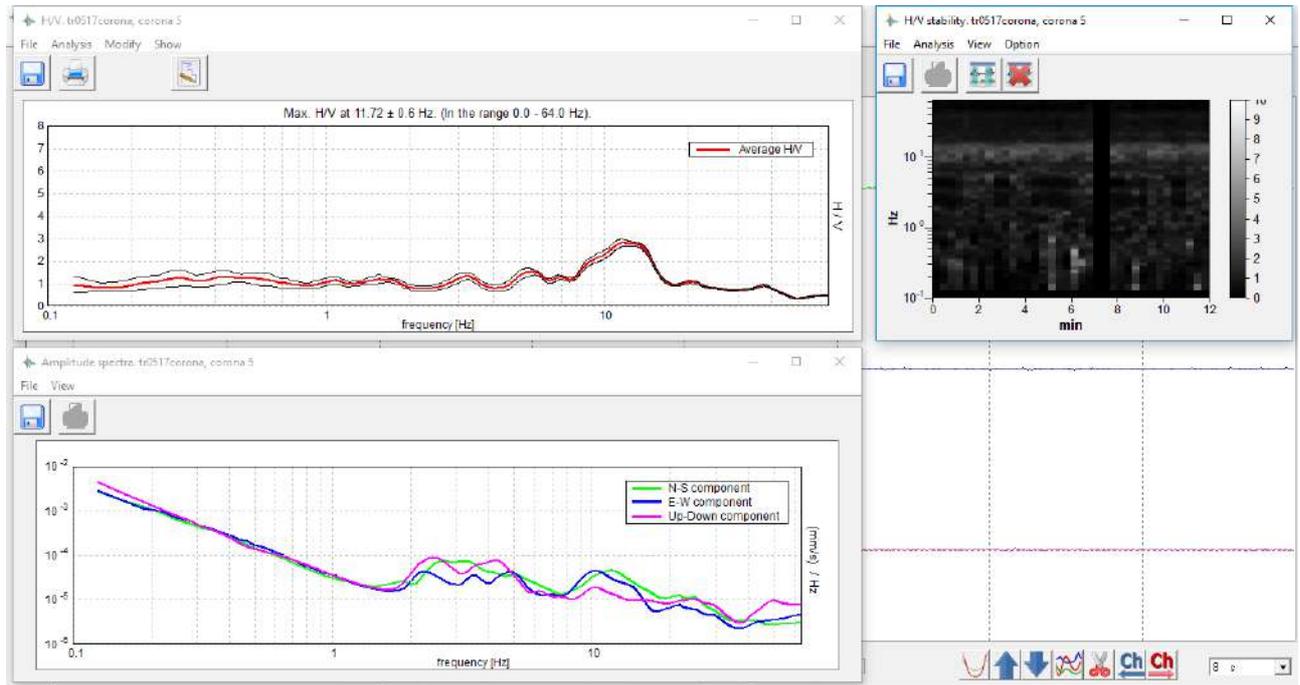
# ALLEGATO 1: CORONA

27/03/2018

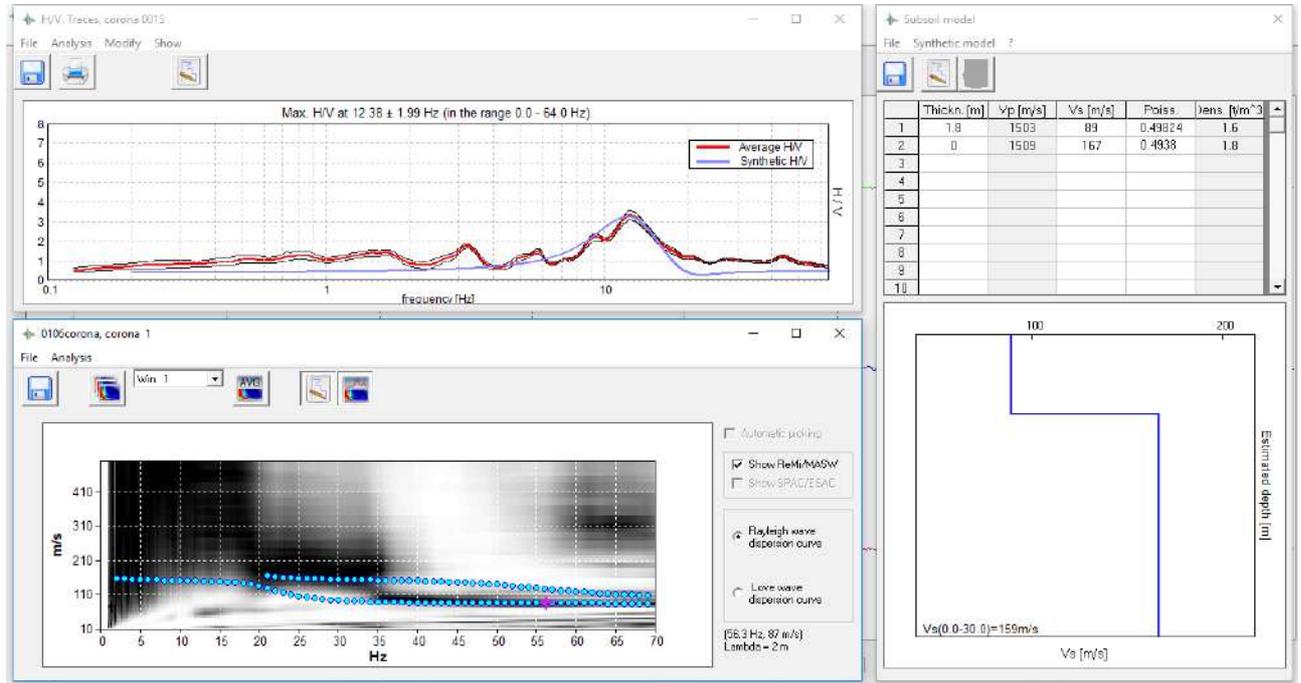
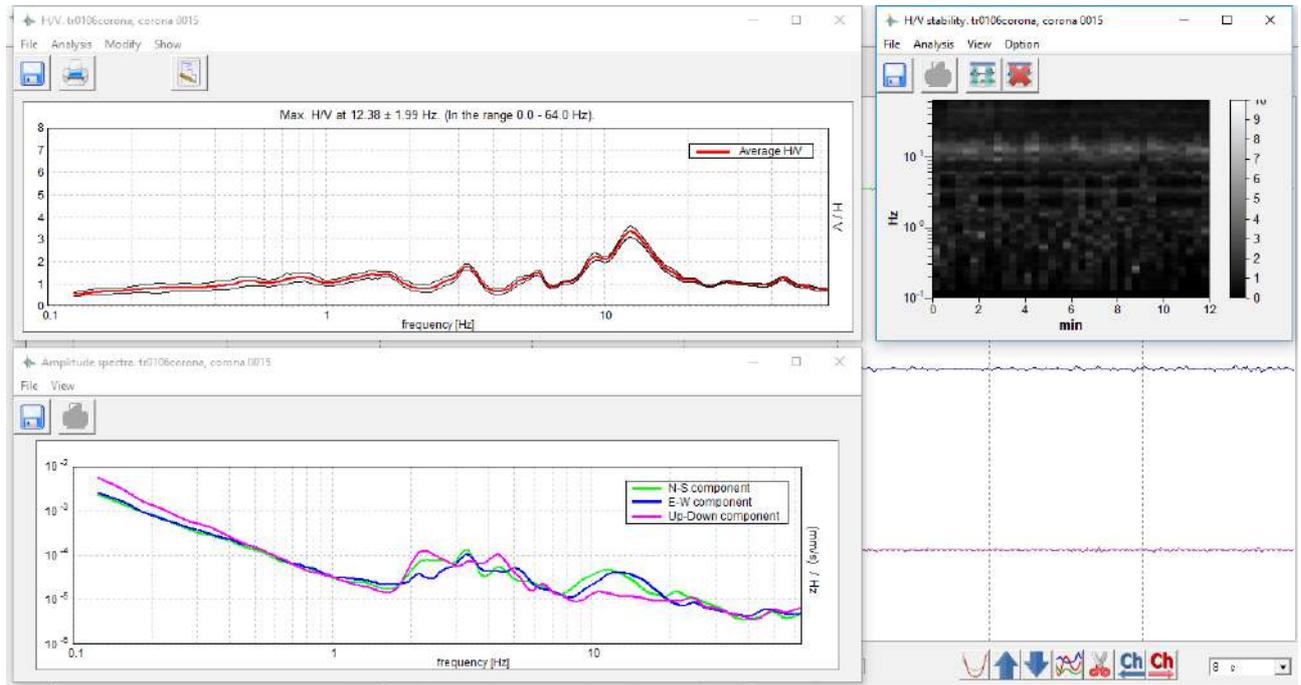




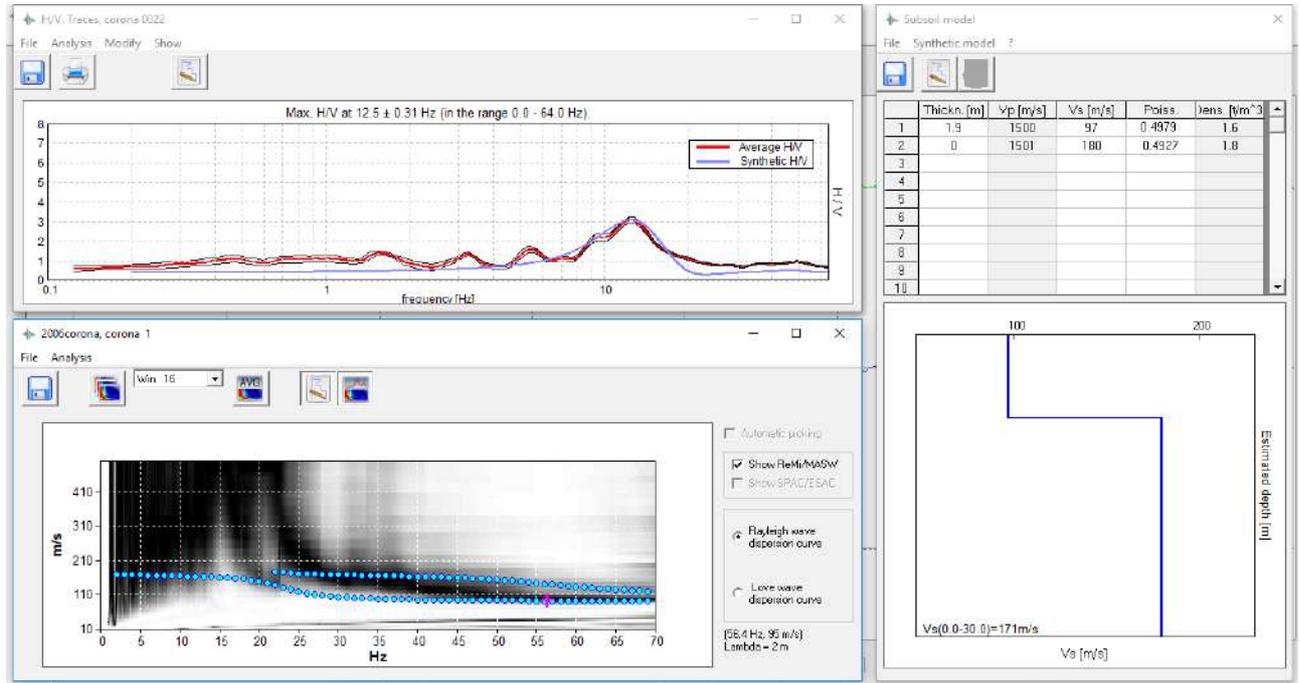
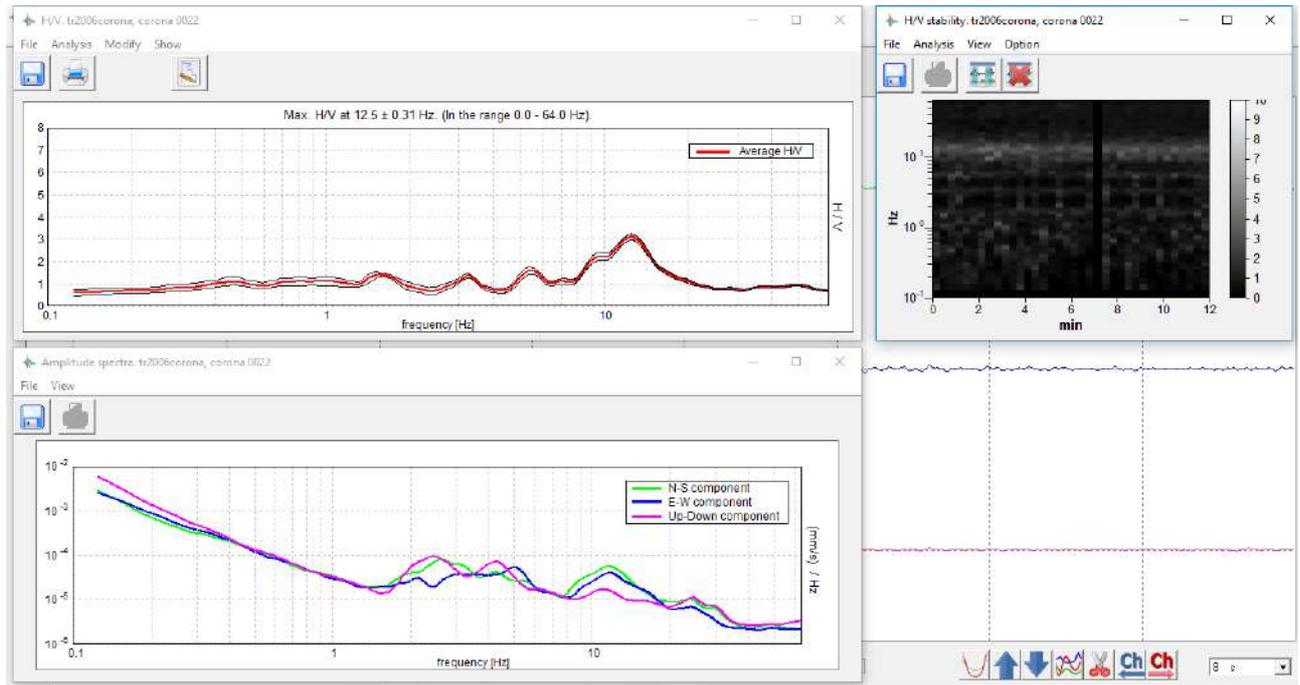
17/05/2018



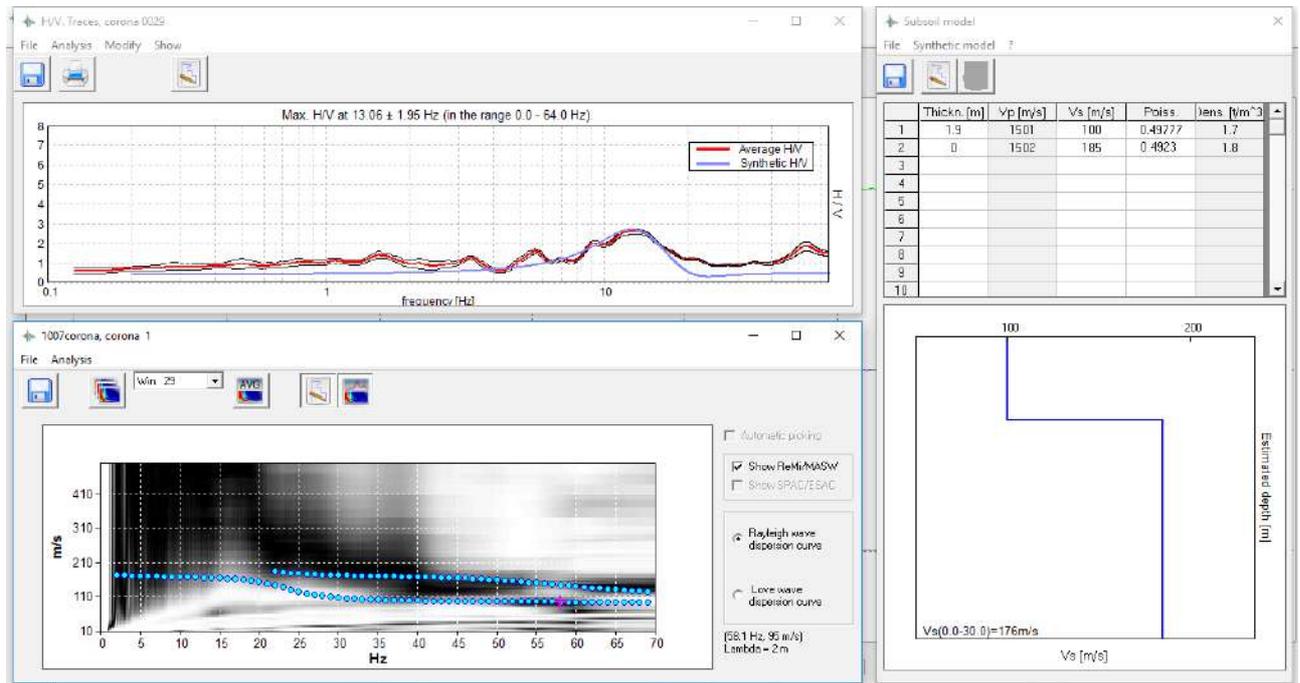
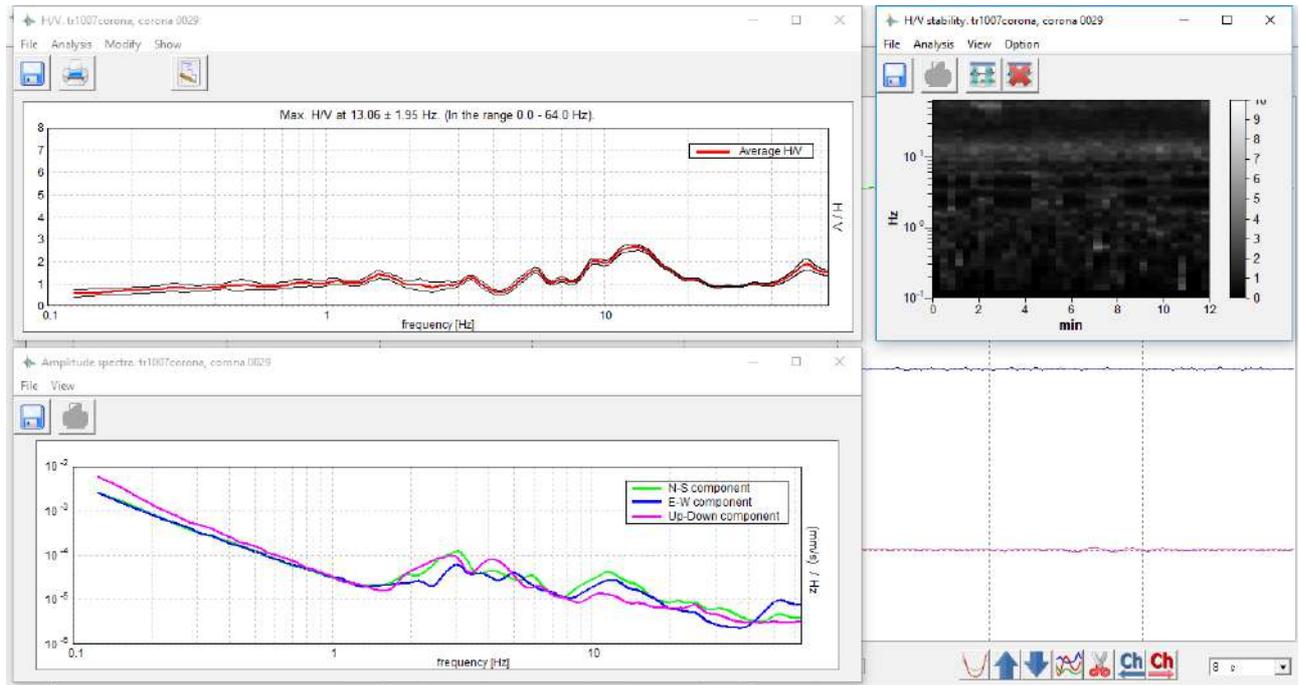
1/06/2018

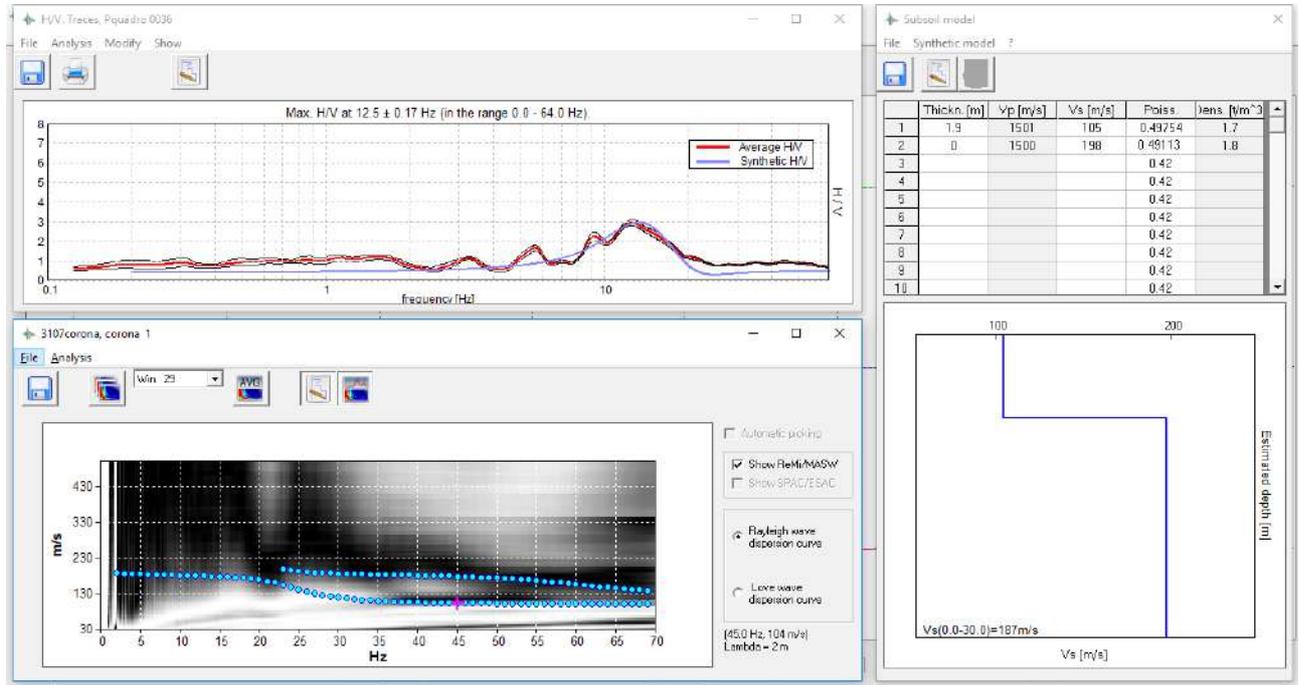
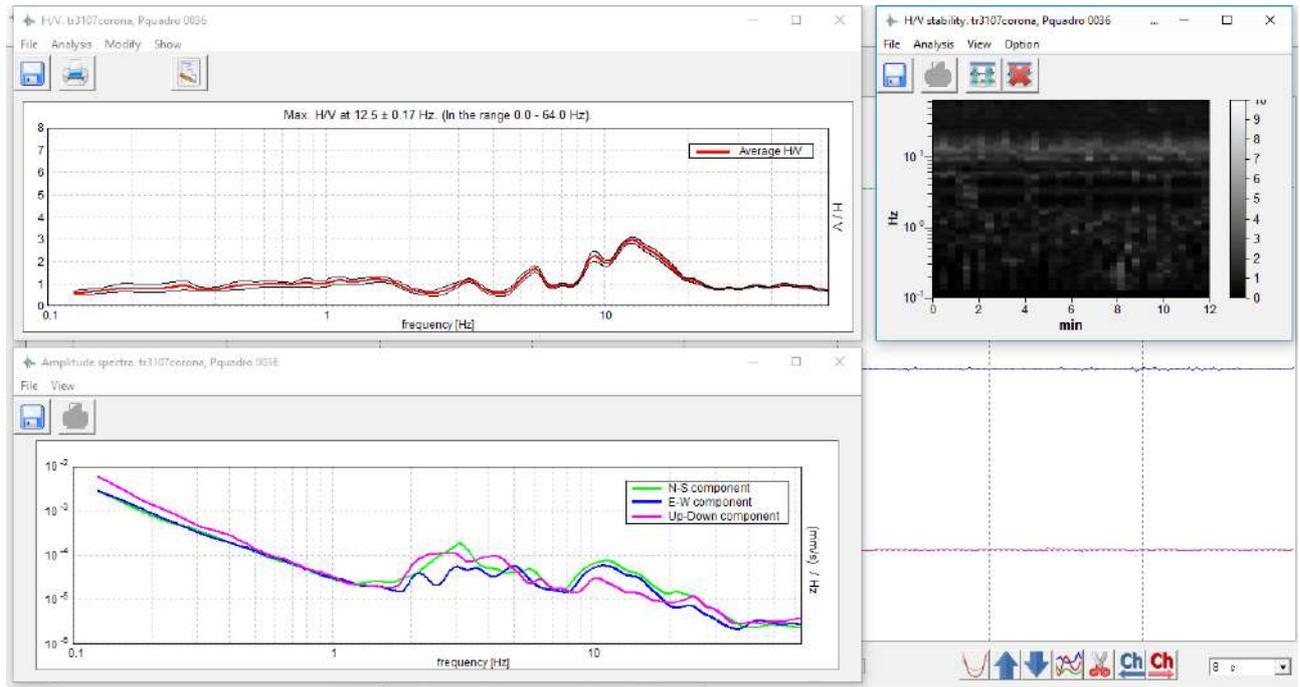


20/06/2018

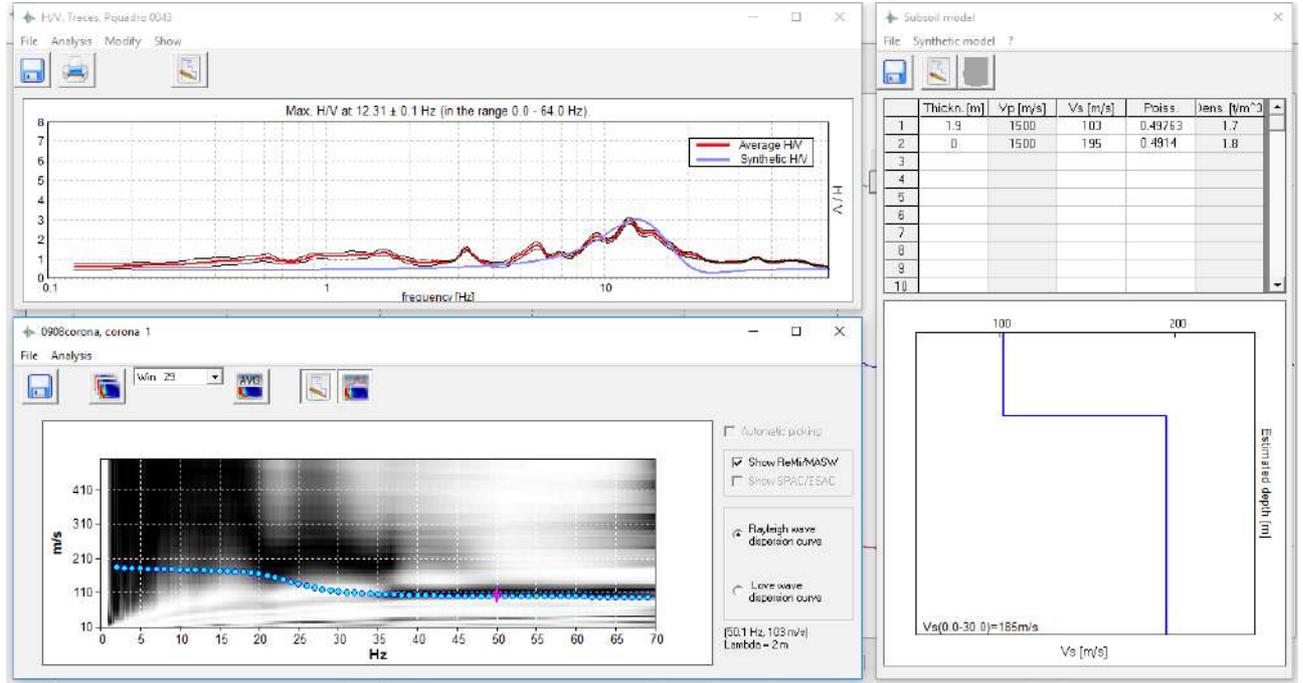
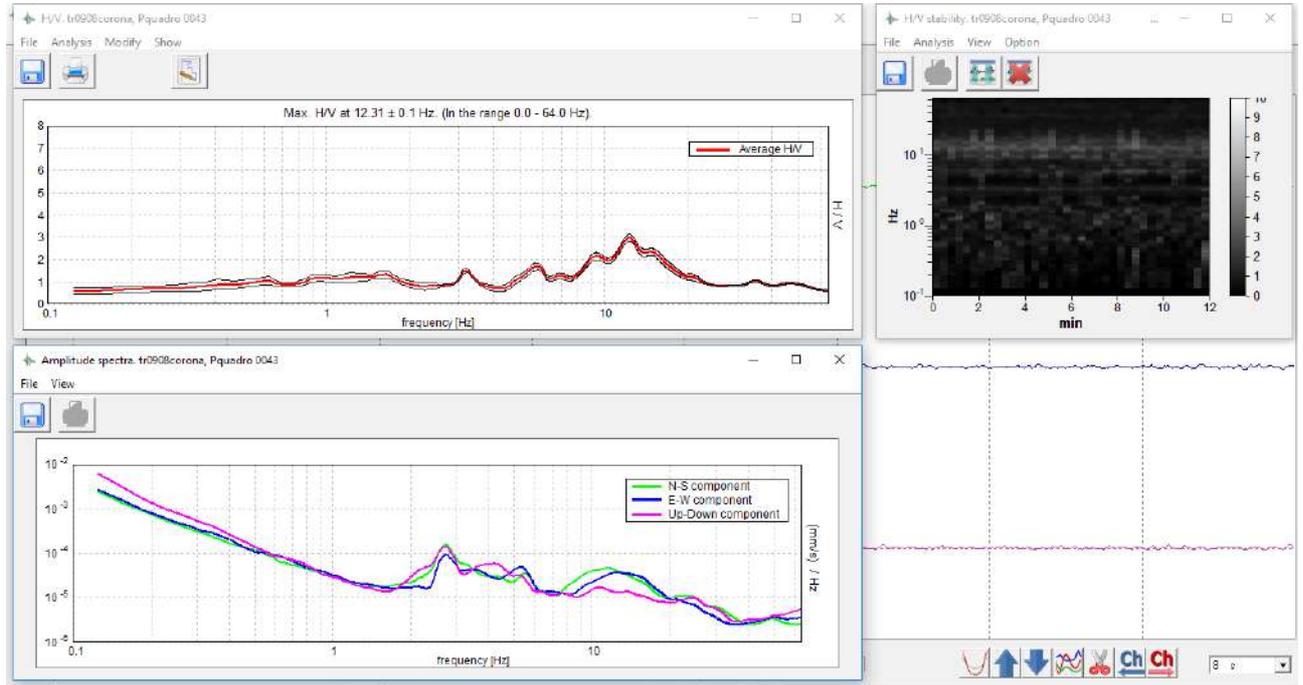


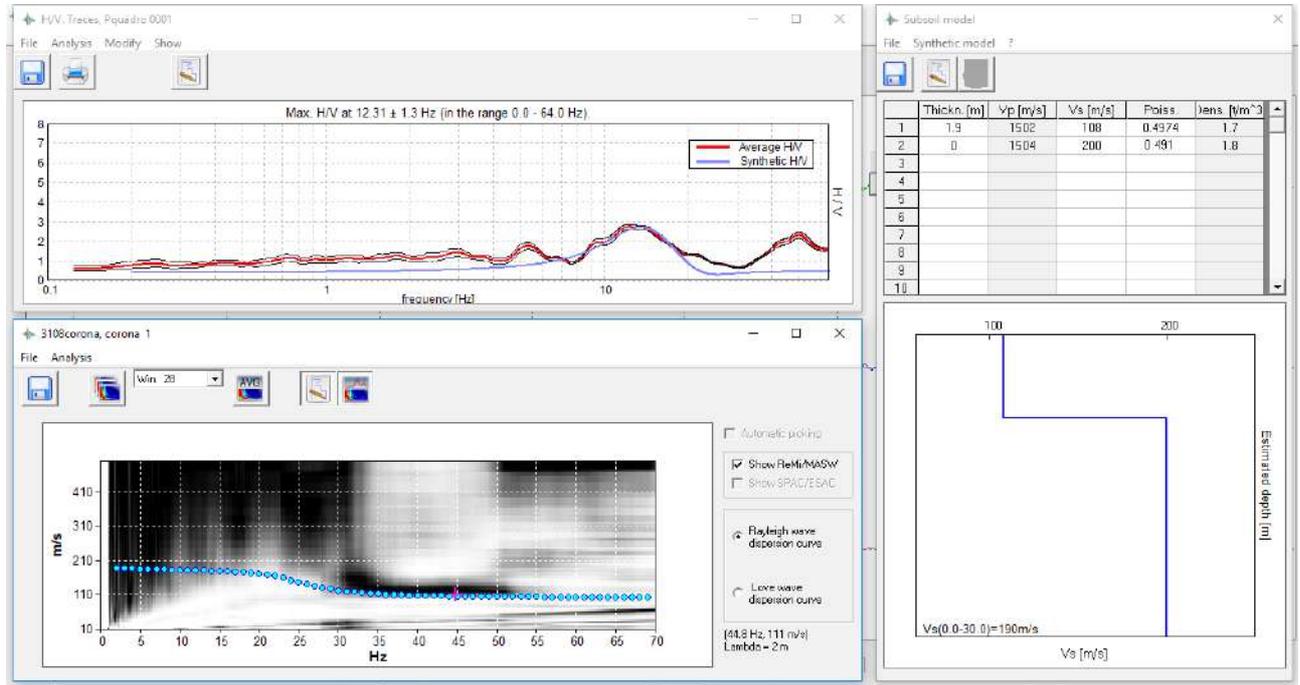
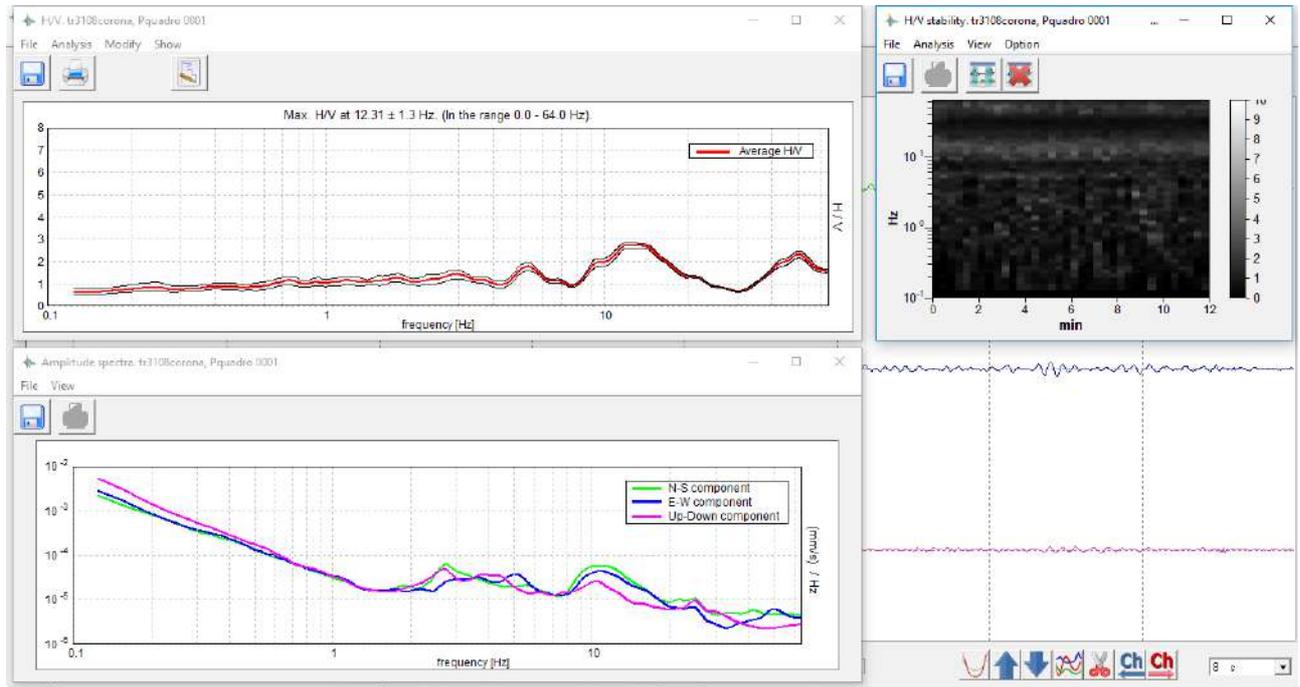
10/07/2018

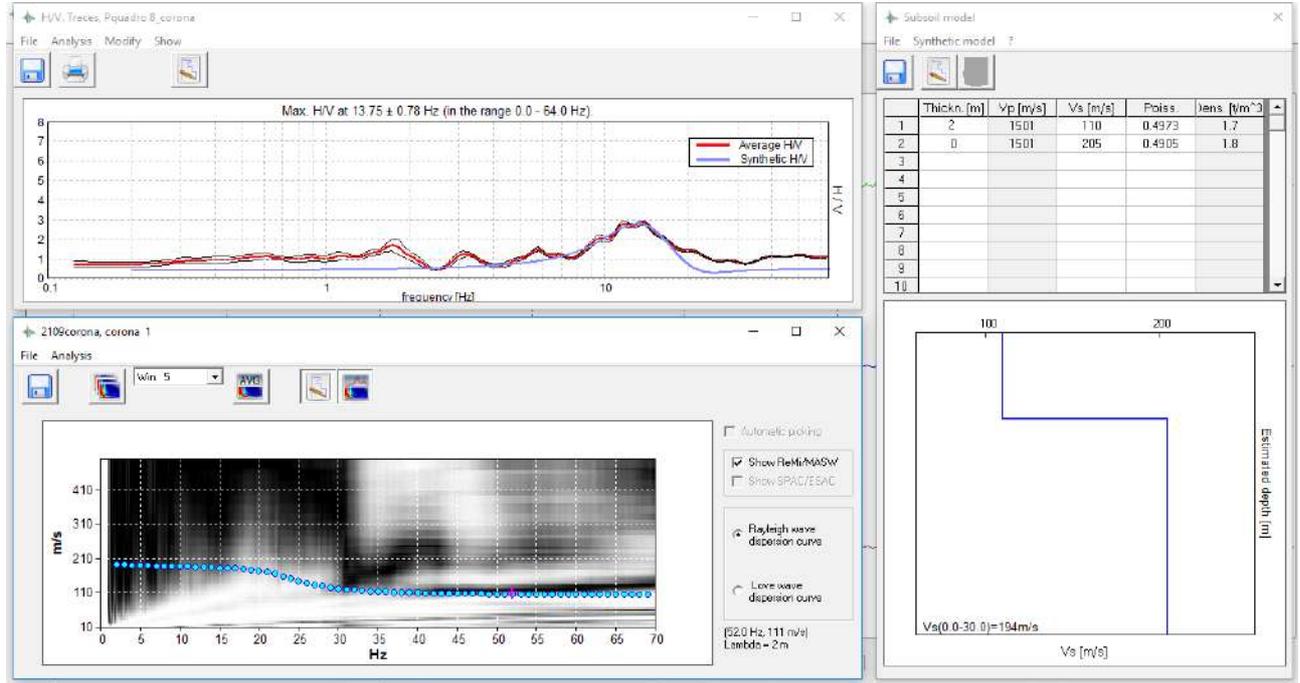
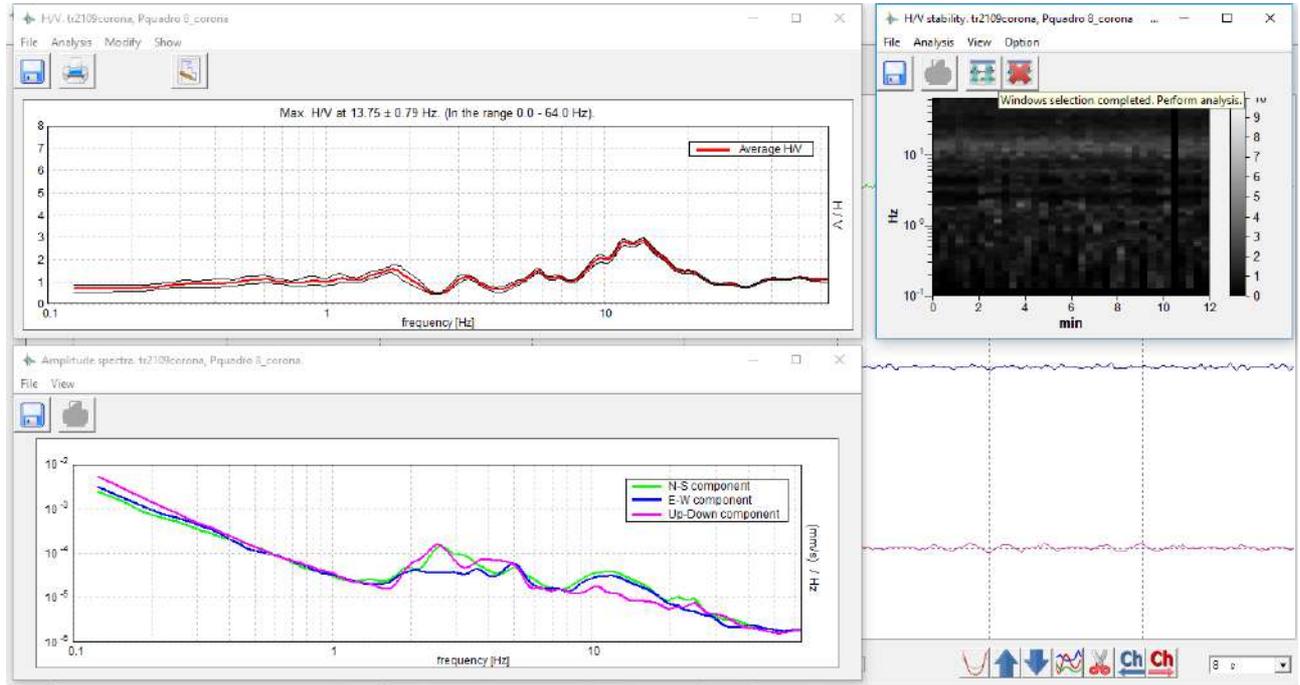




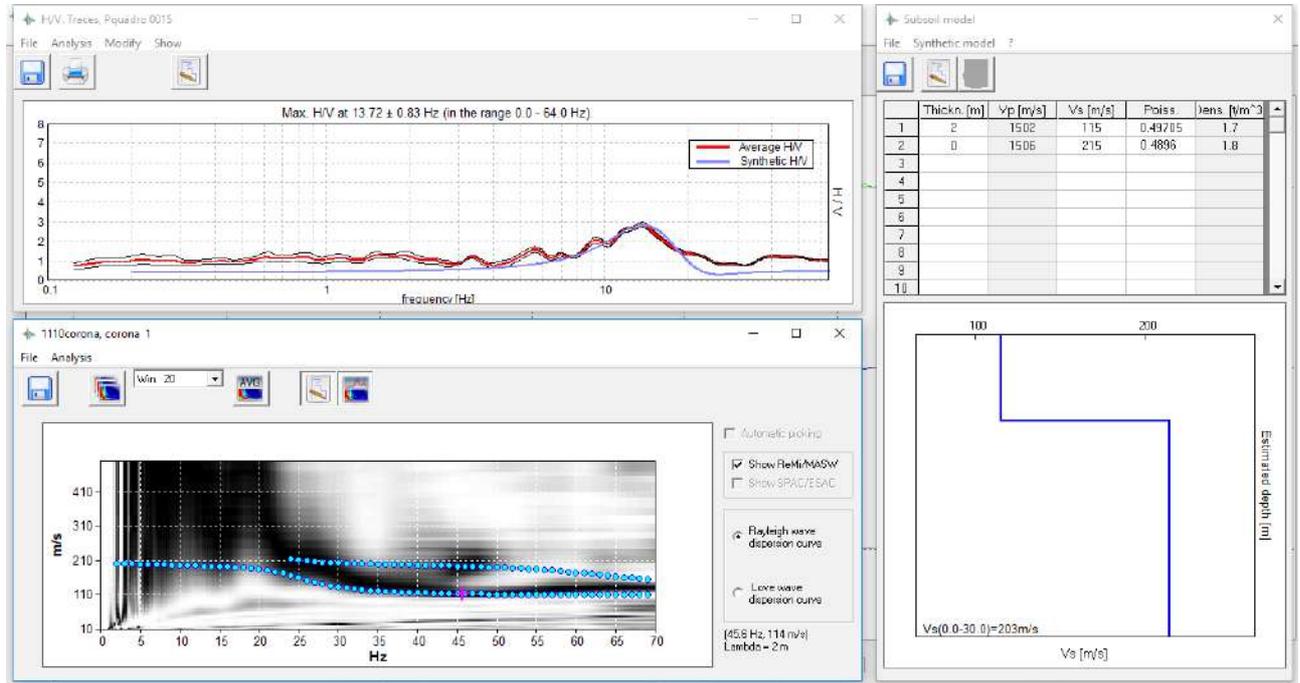
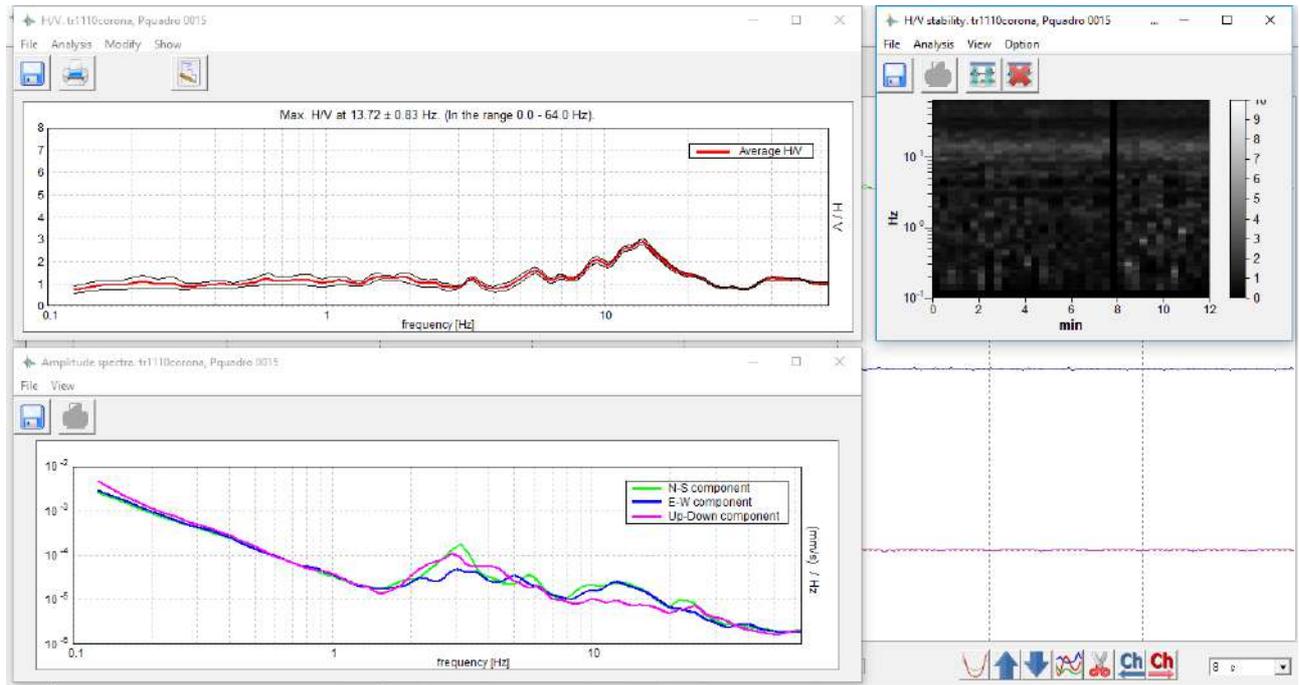
9/08/2018



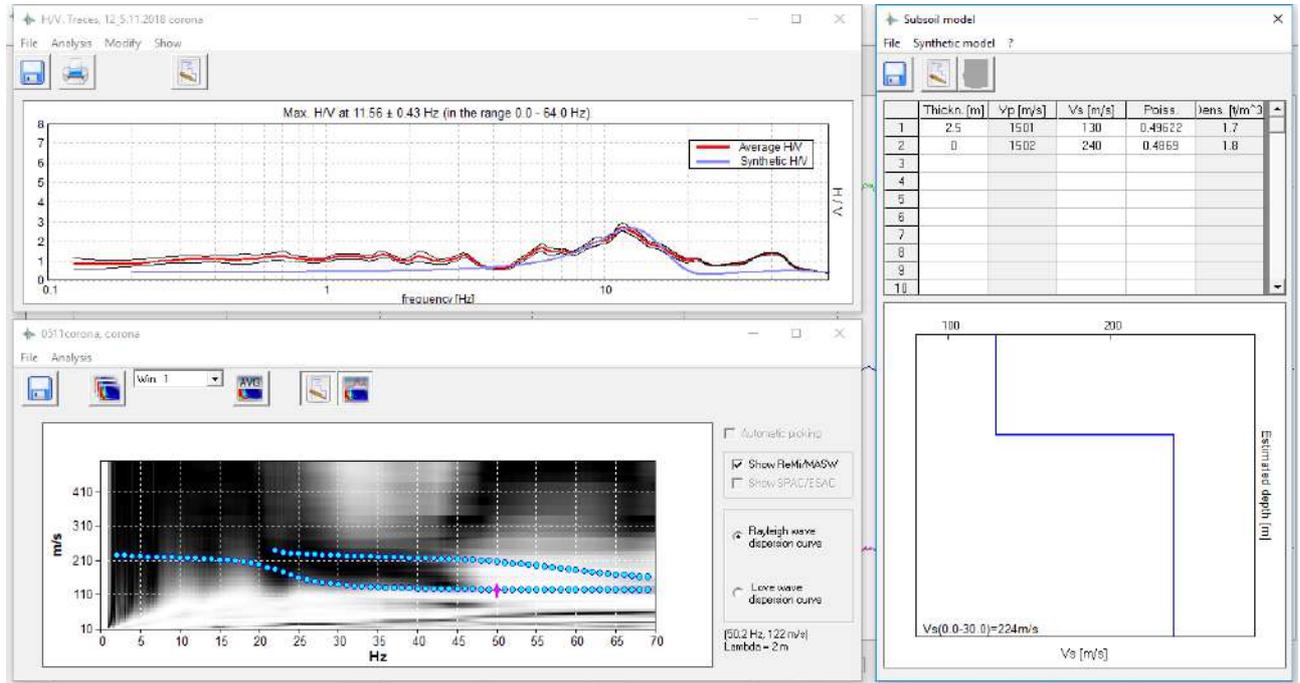
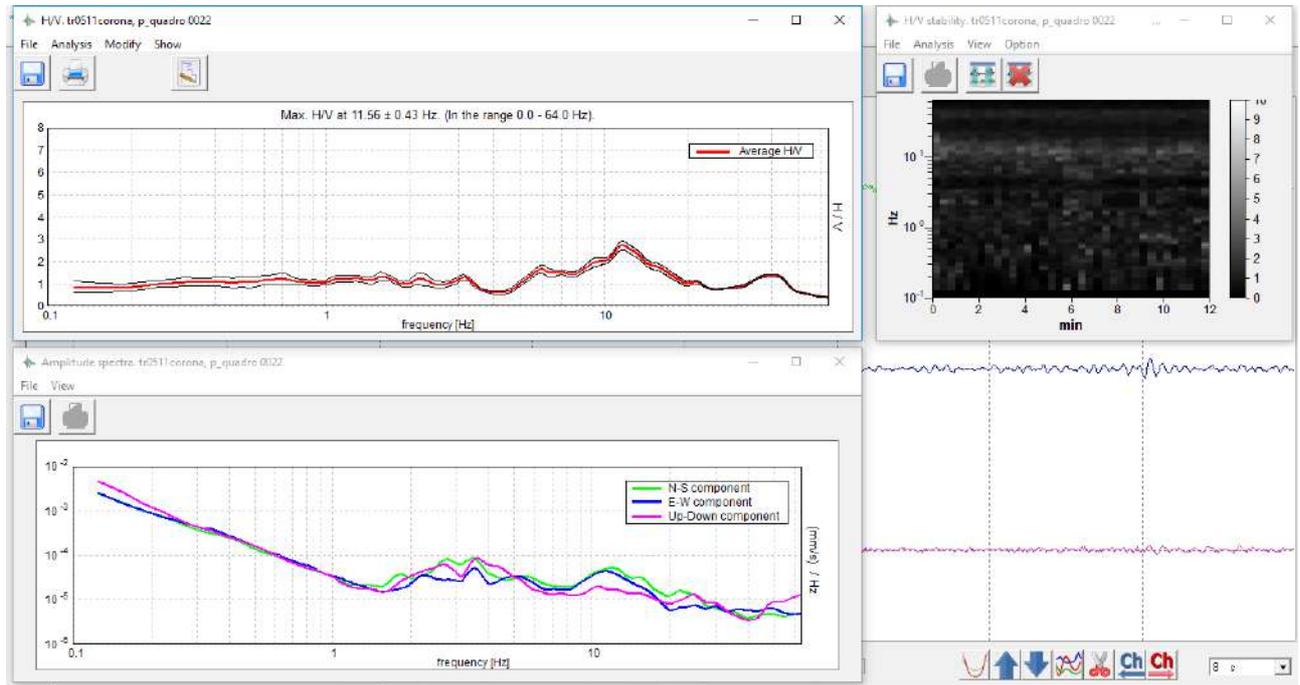




11/10/2018

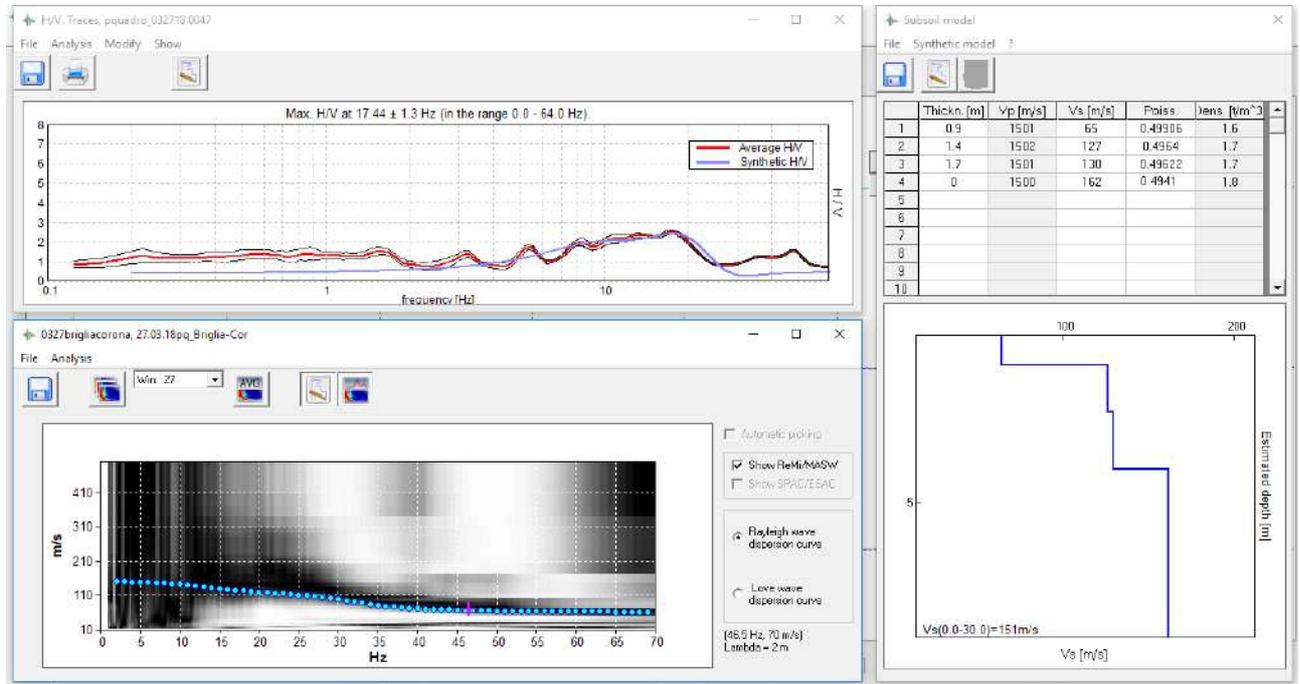
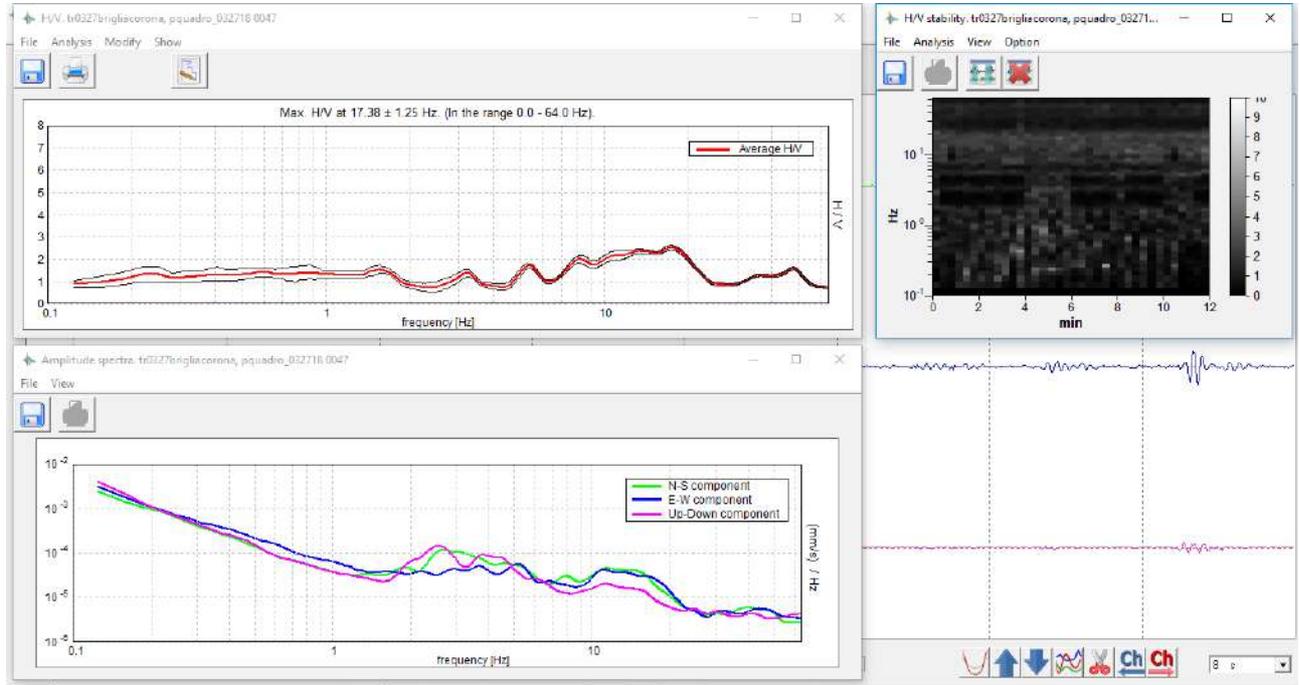


5/11/2018

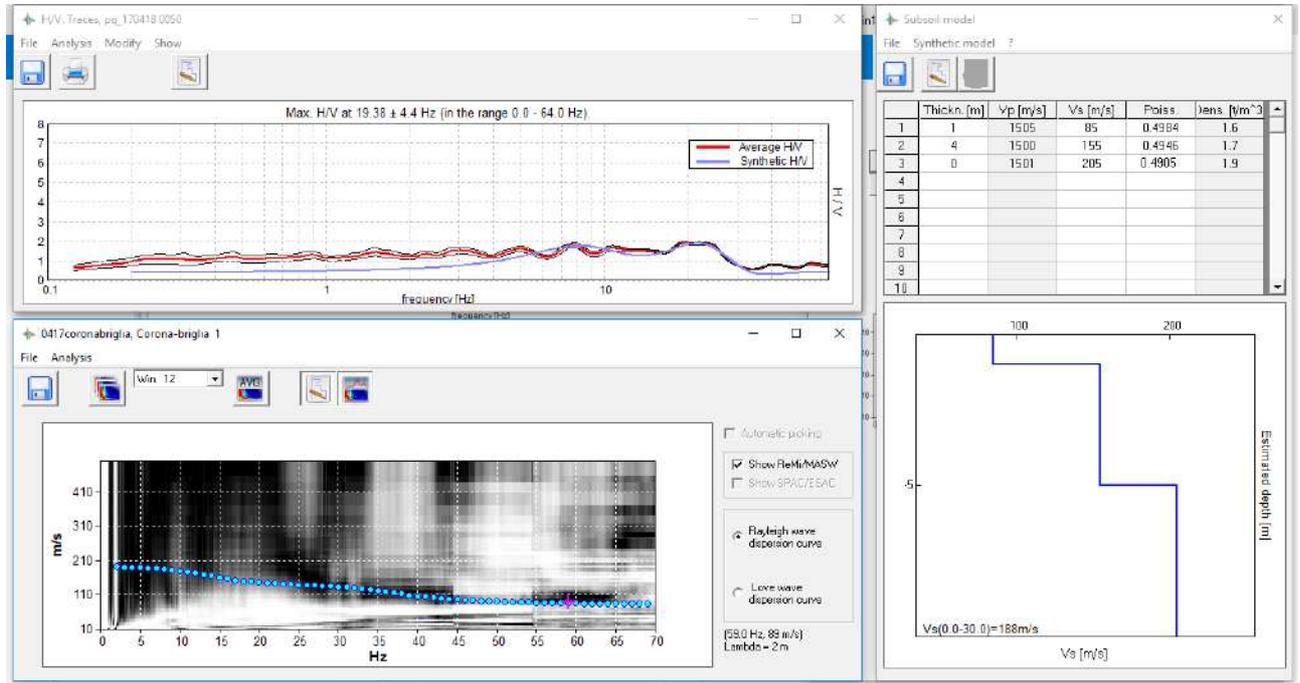
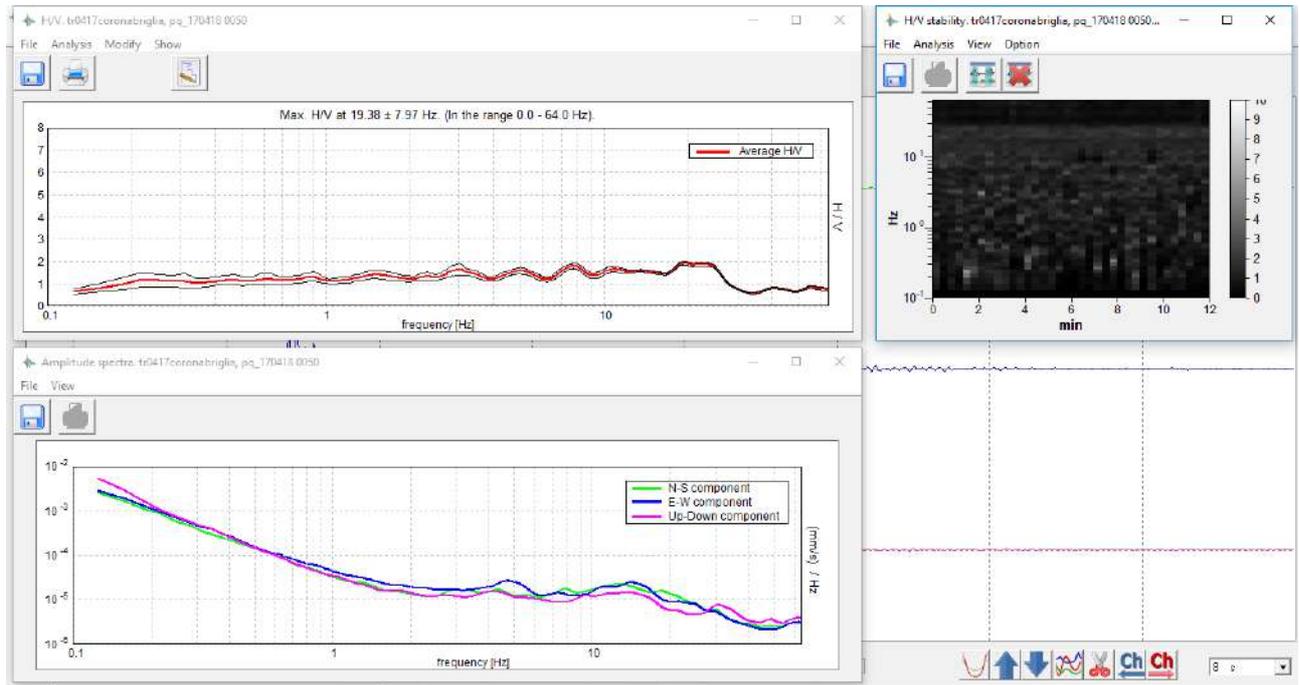


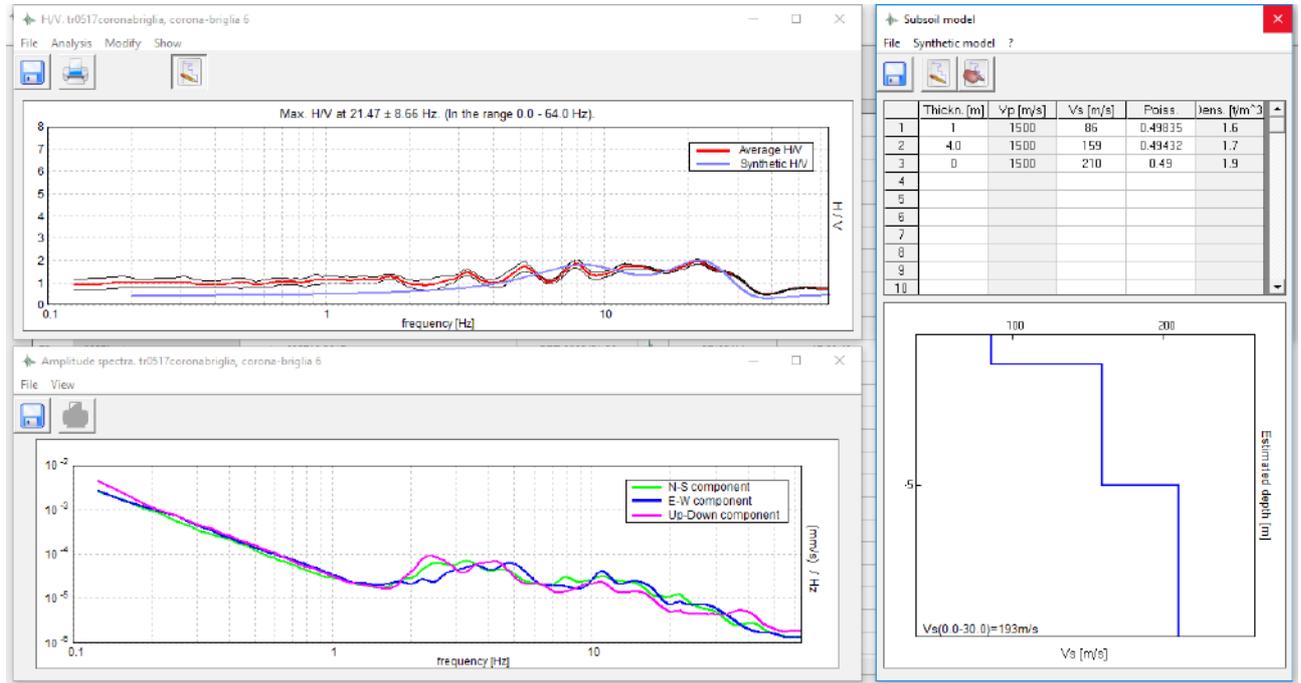
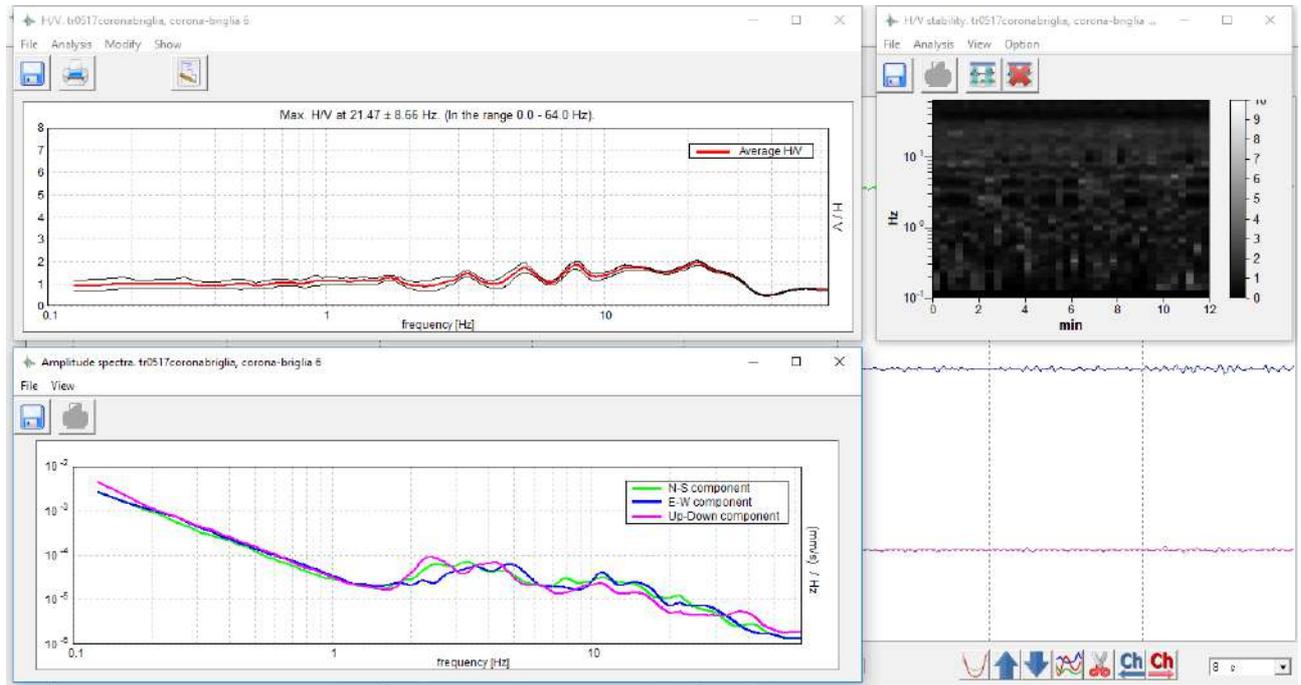
# ALLEGATO 2: CORONA-BRIGLIA

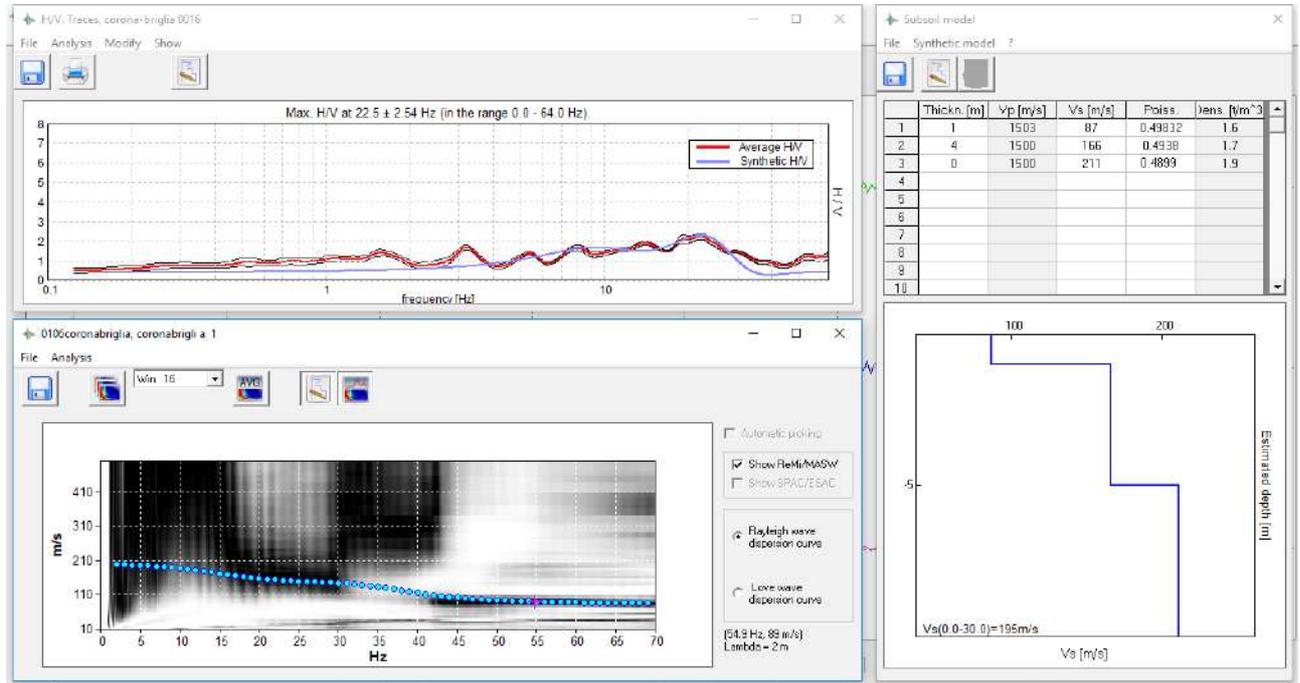
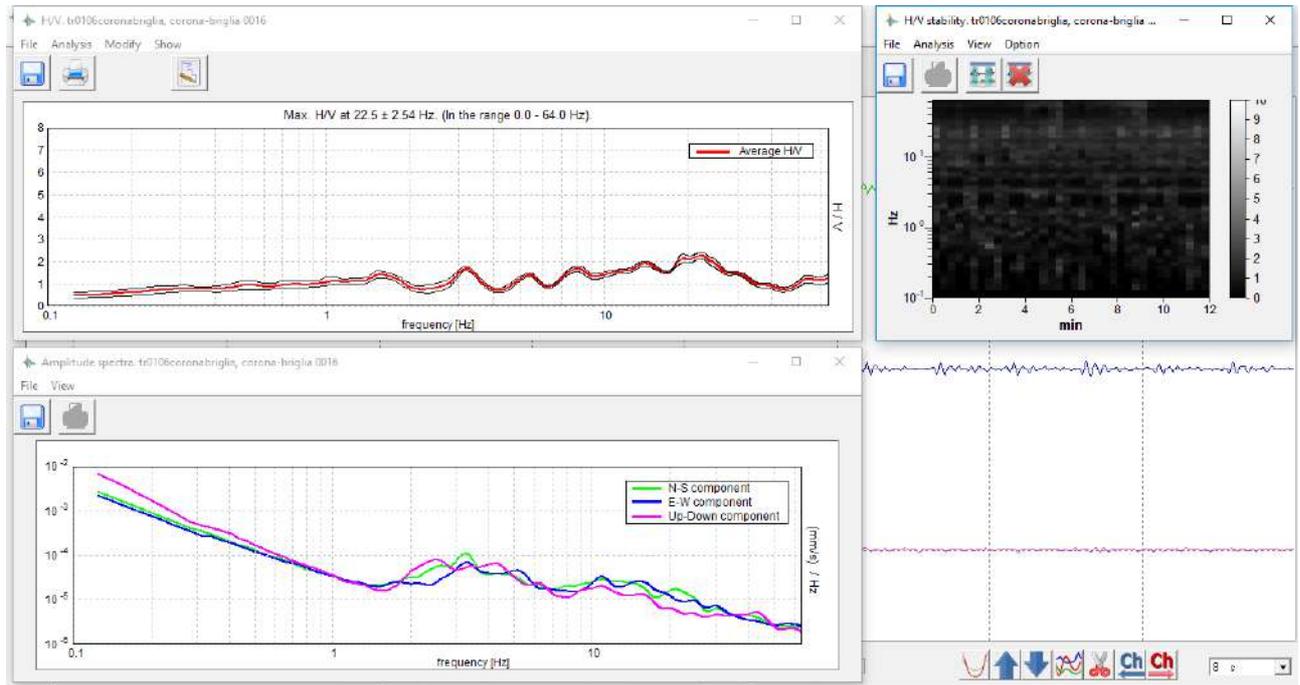
27/03/2018



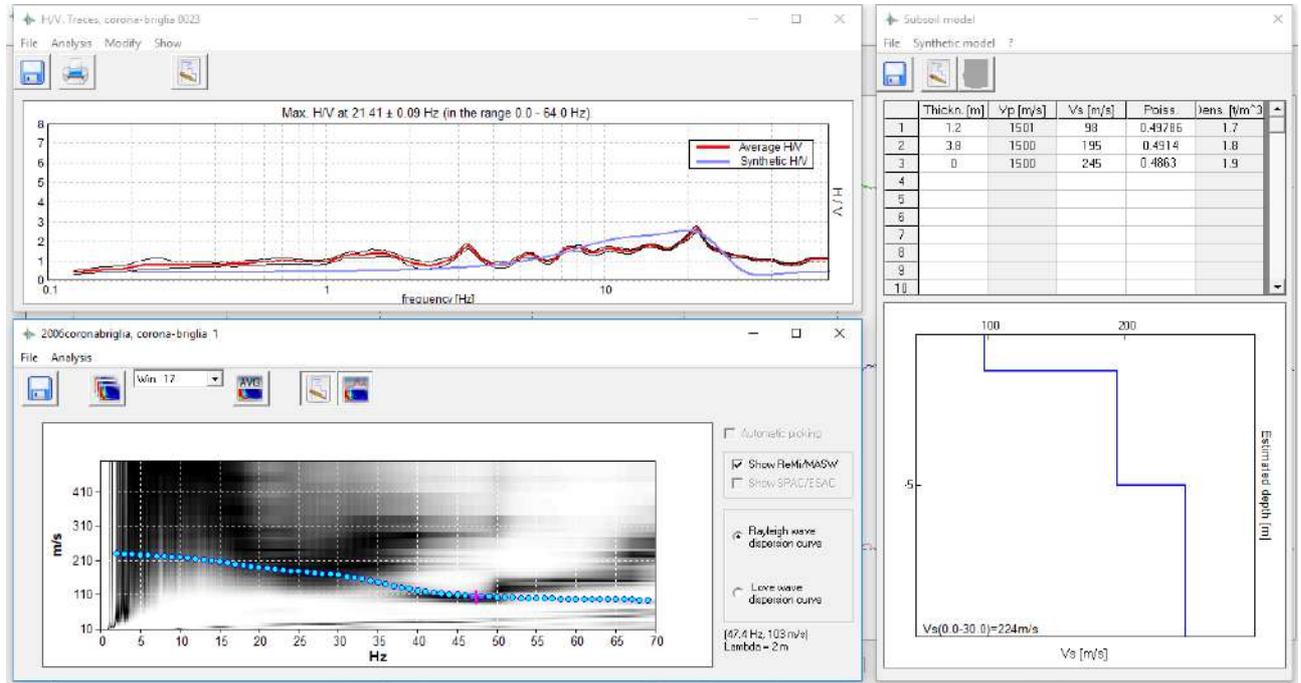
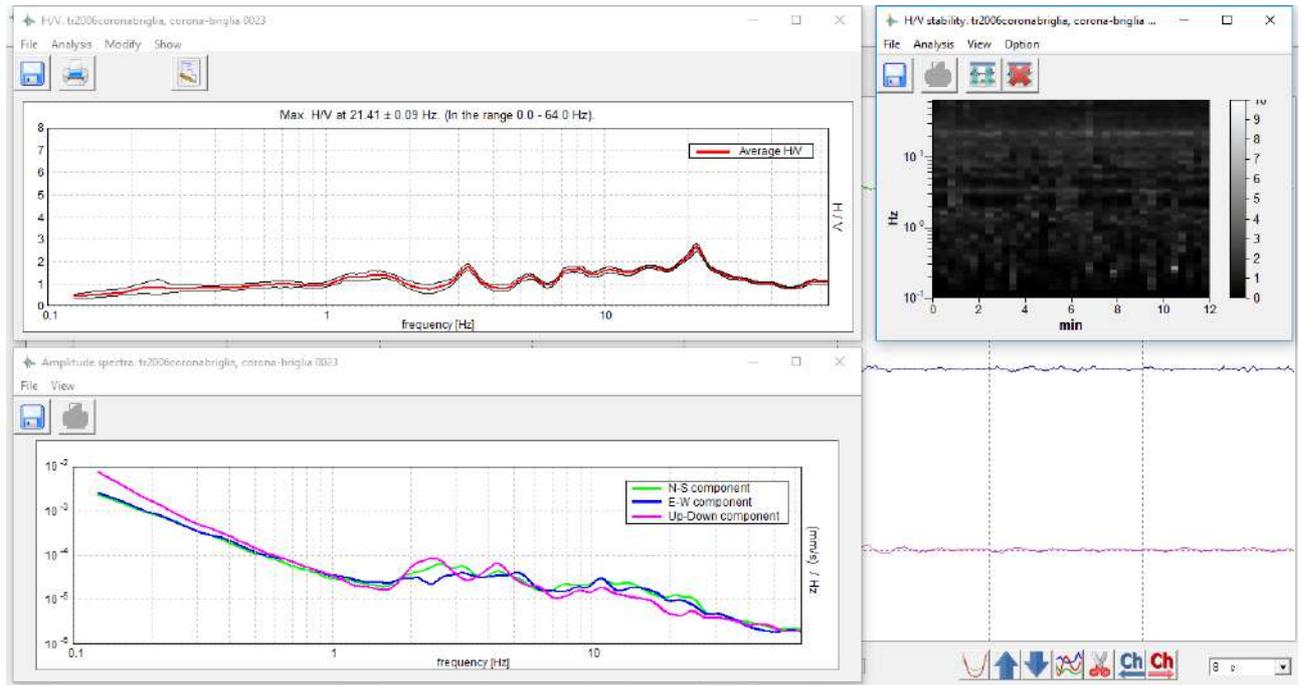
17/04/2018



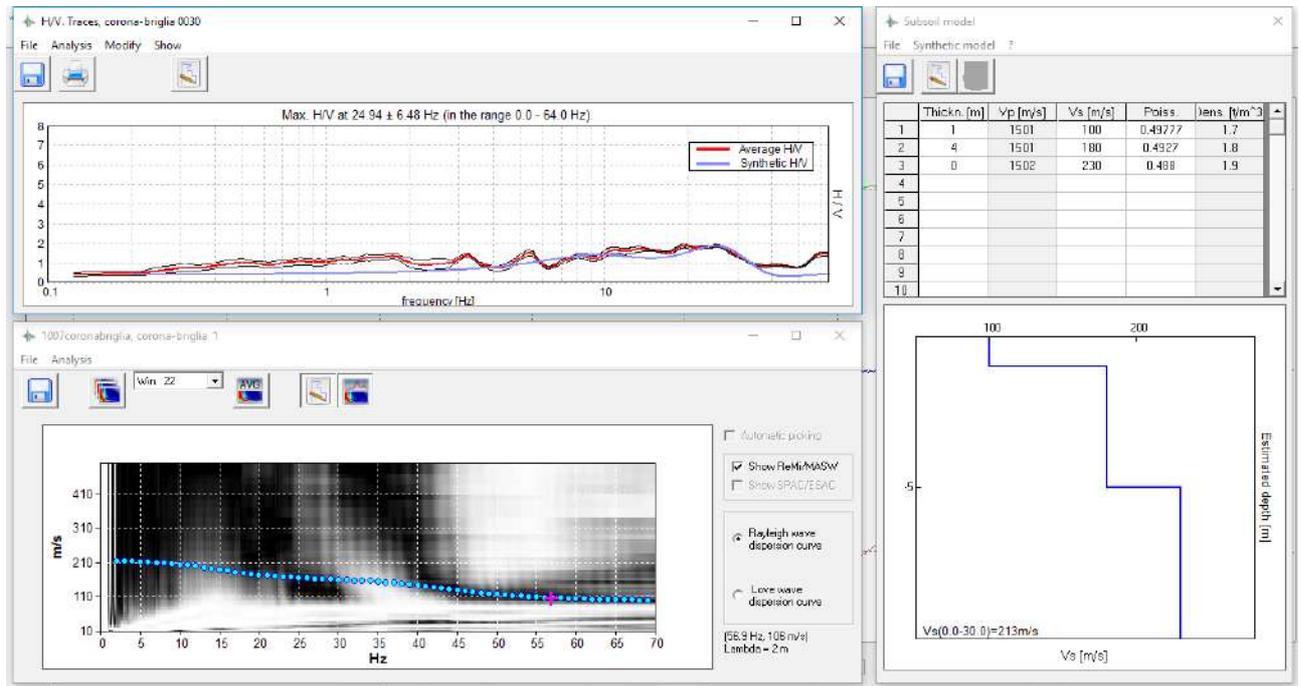
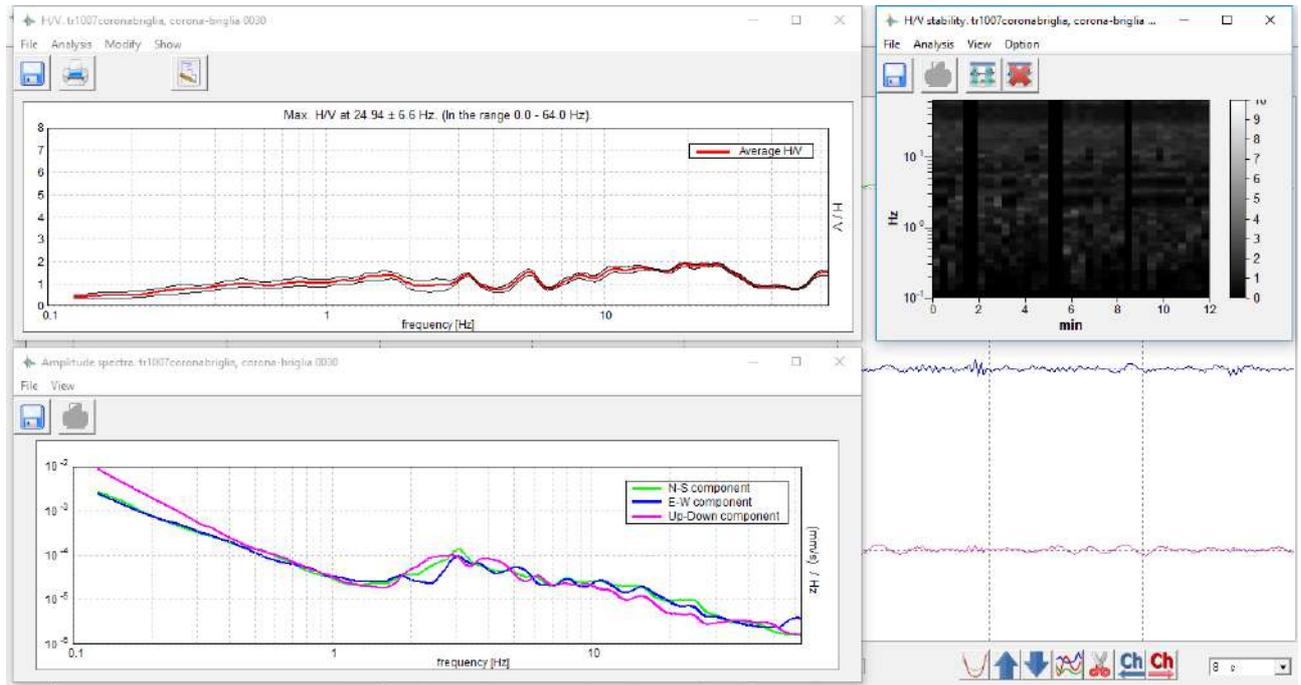


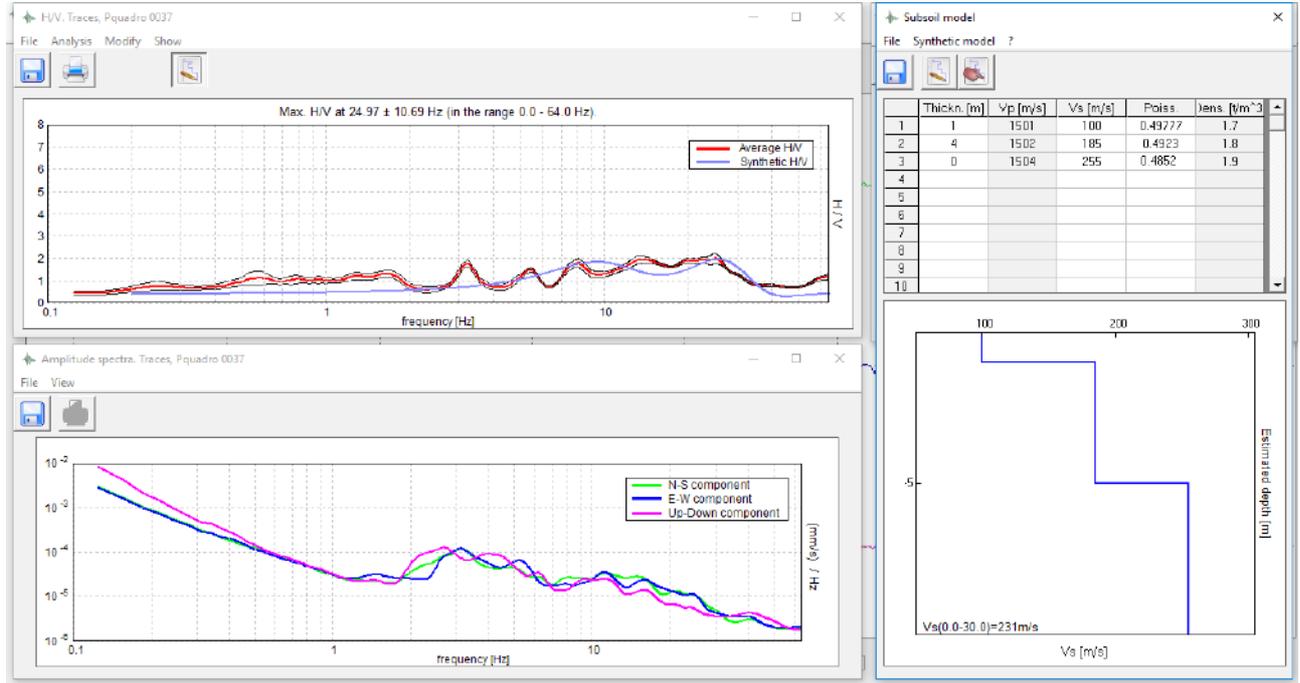
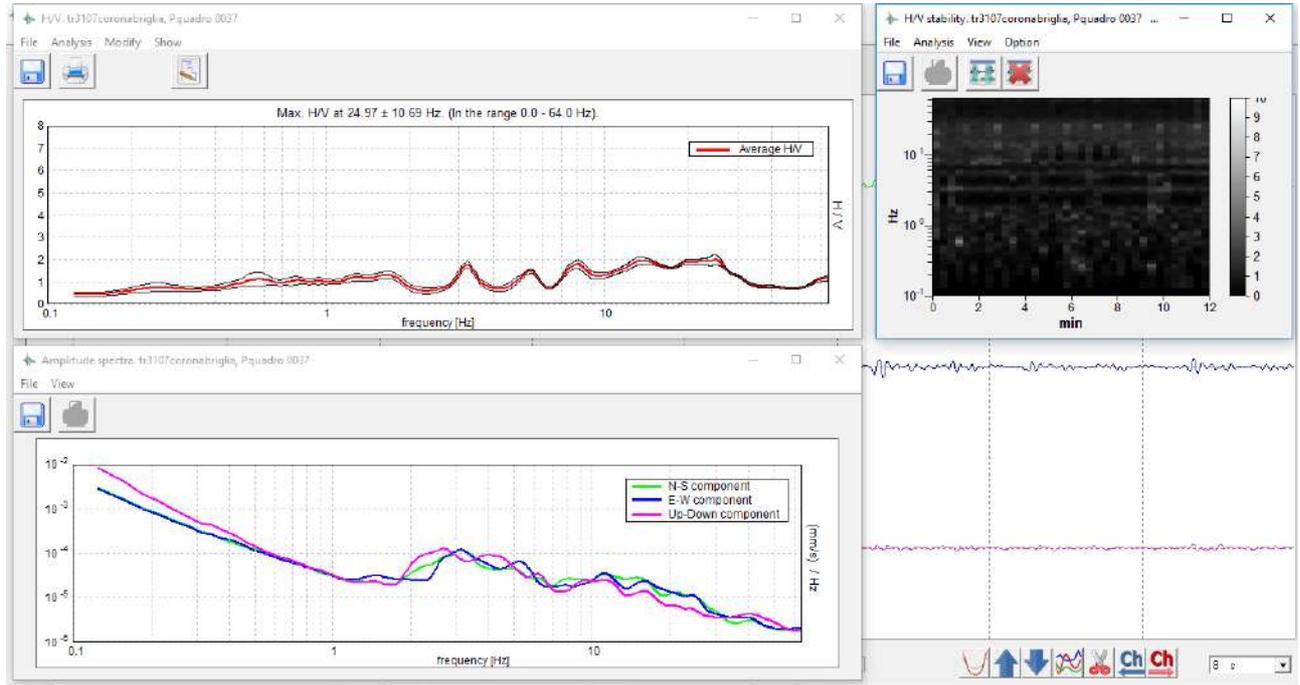


20/06/2018

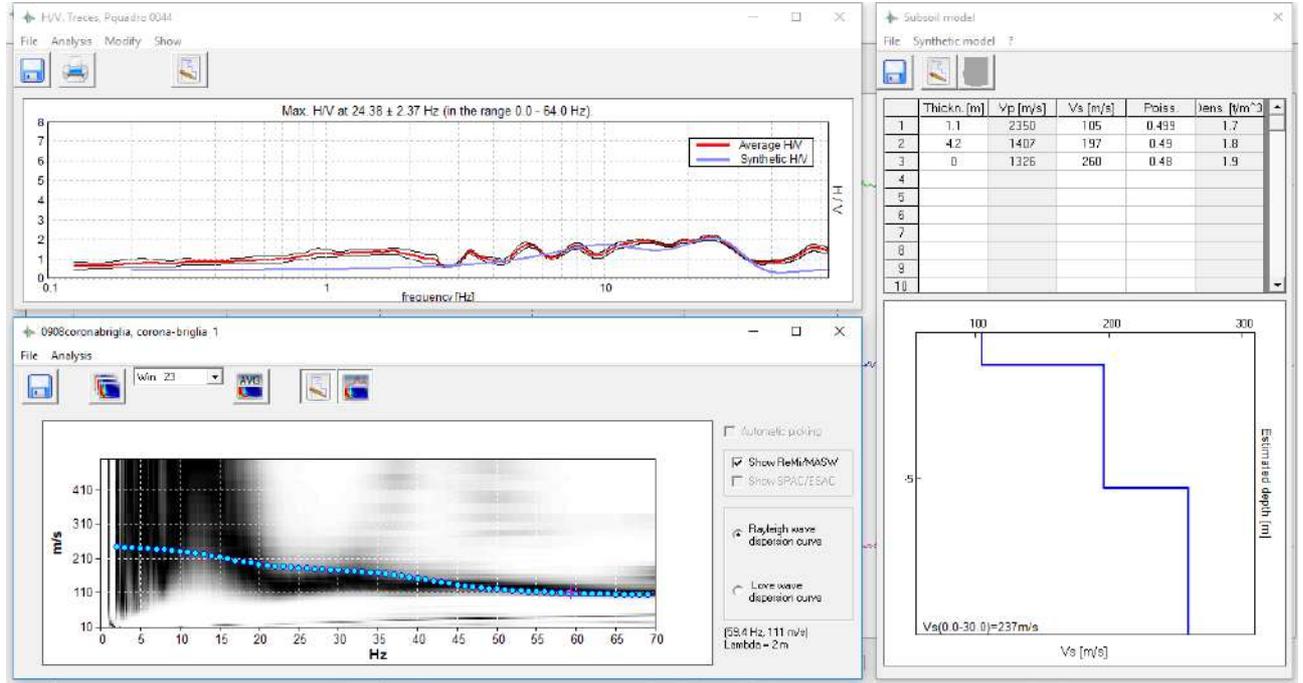
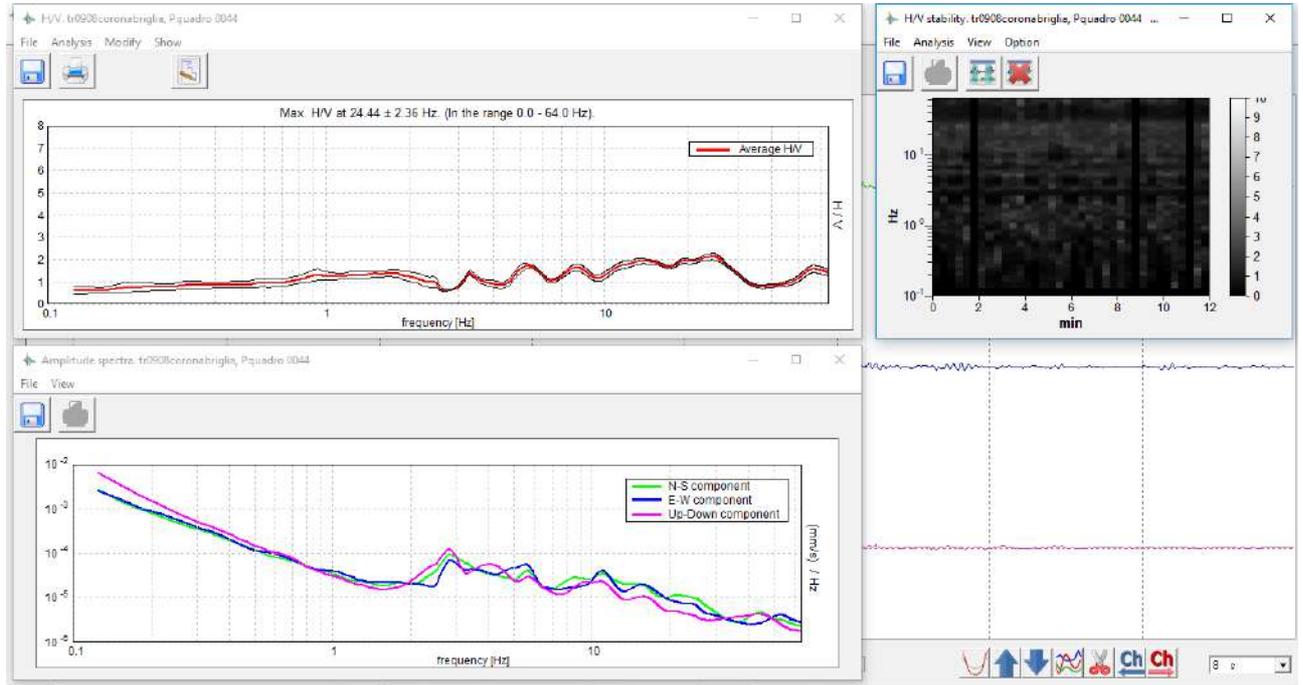


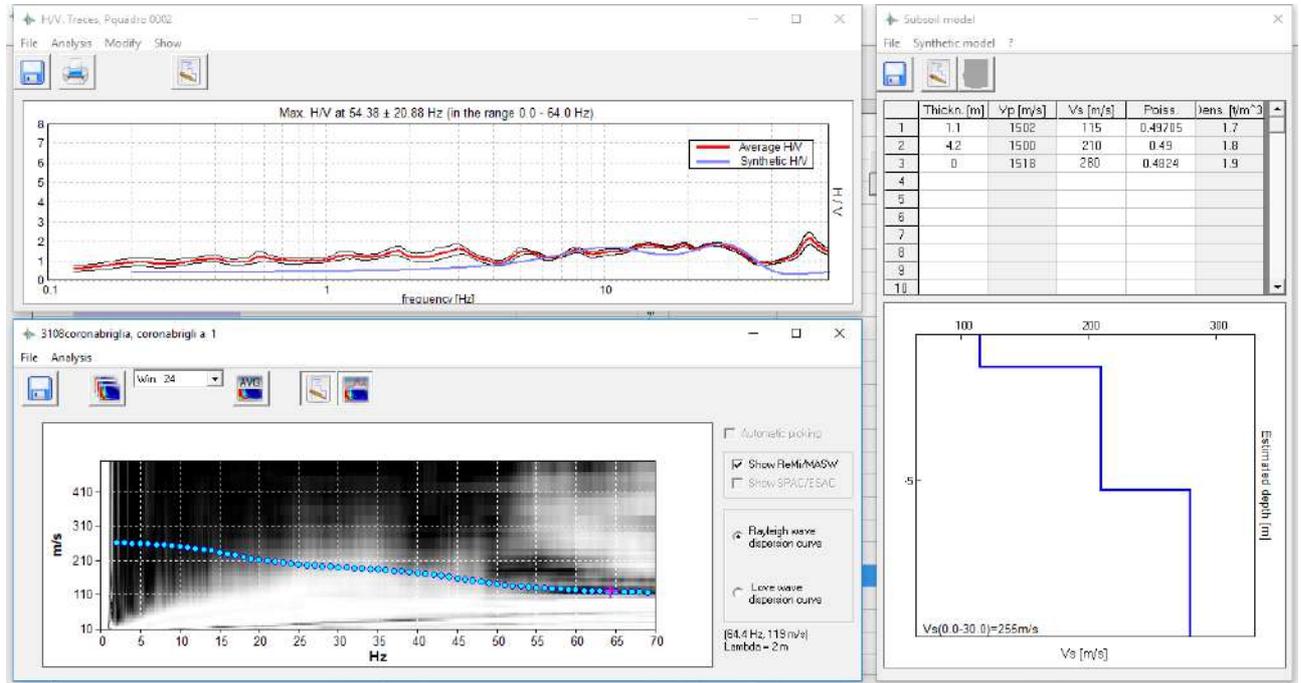
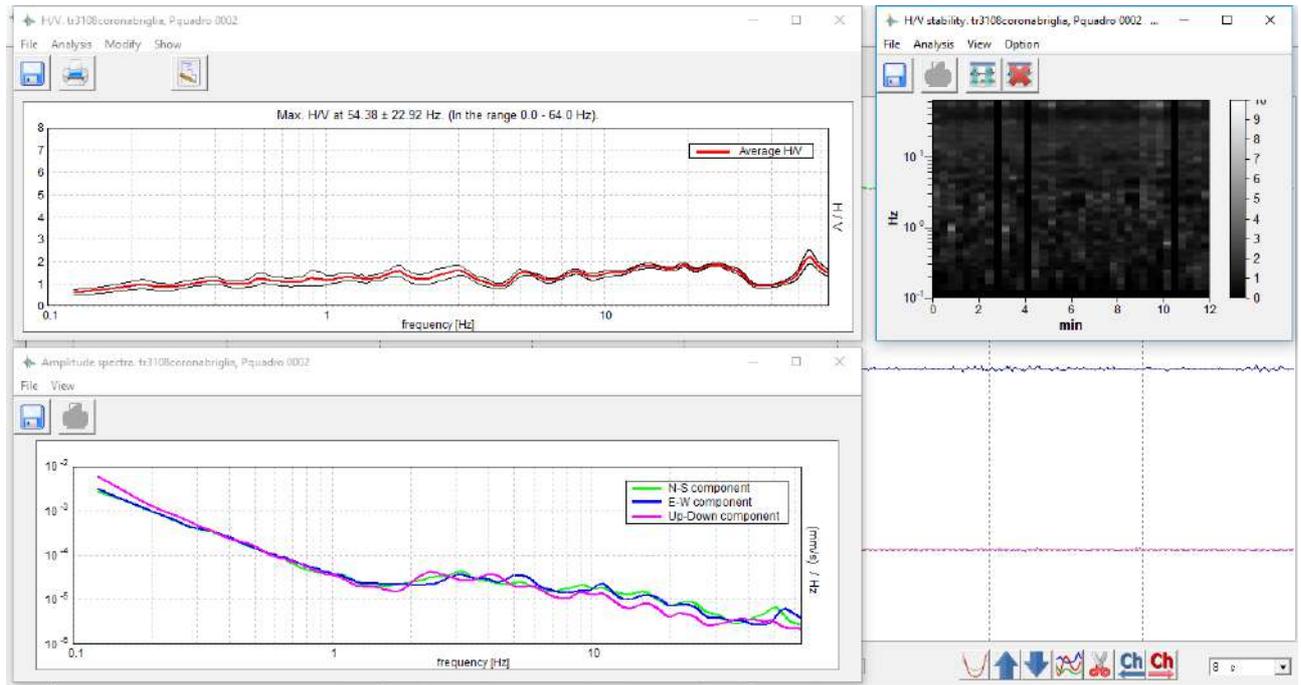
10/07/2018

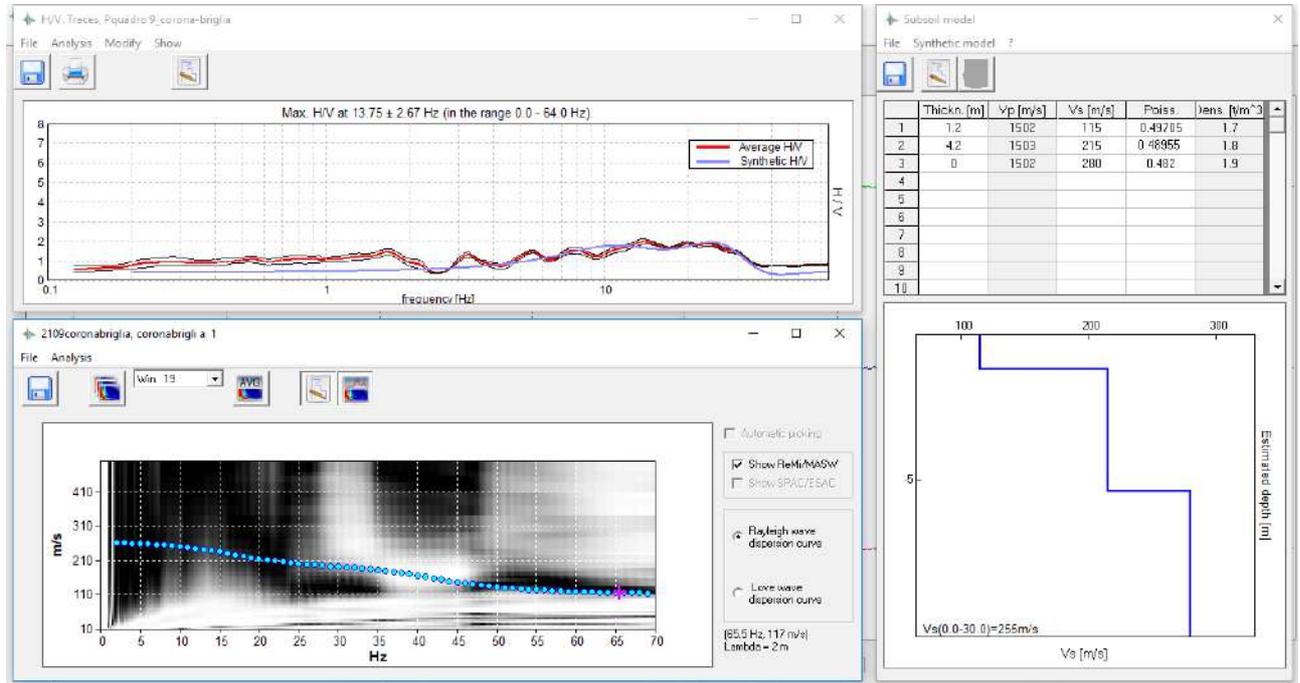
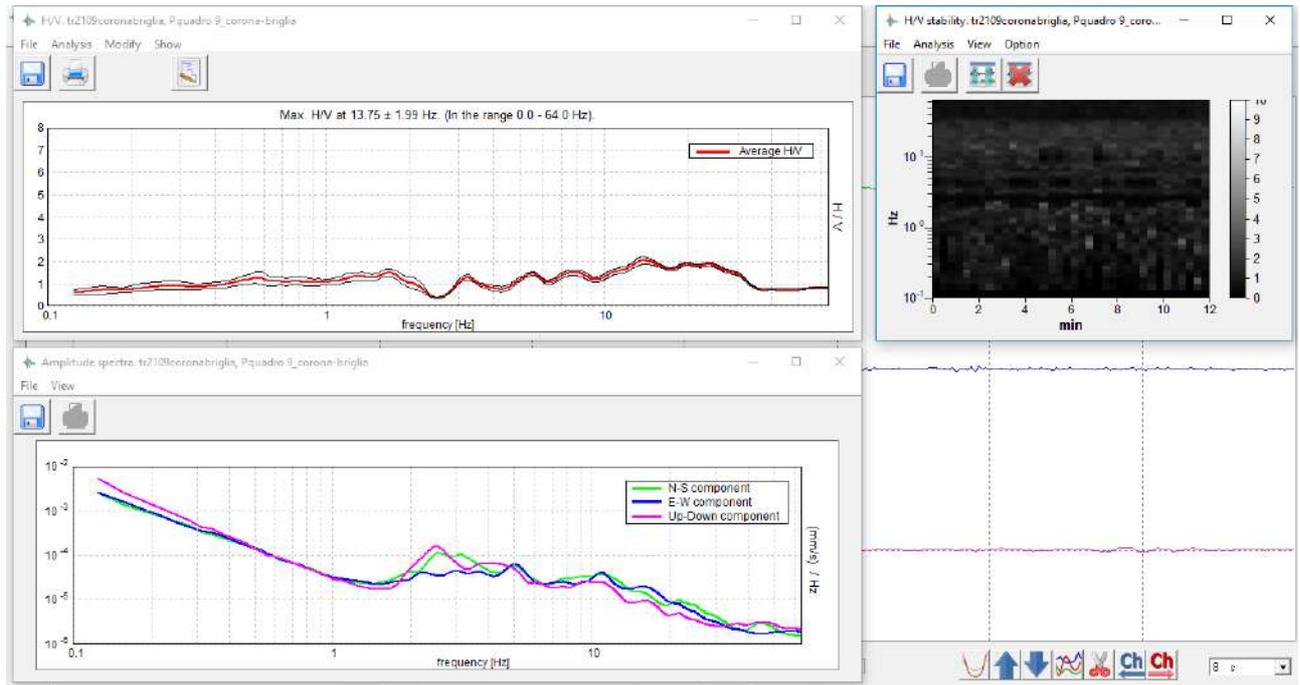




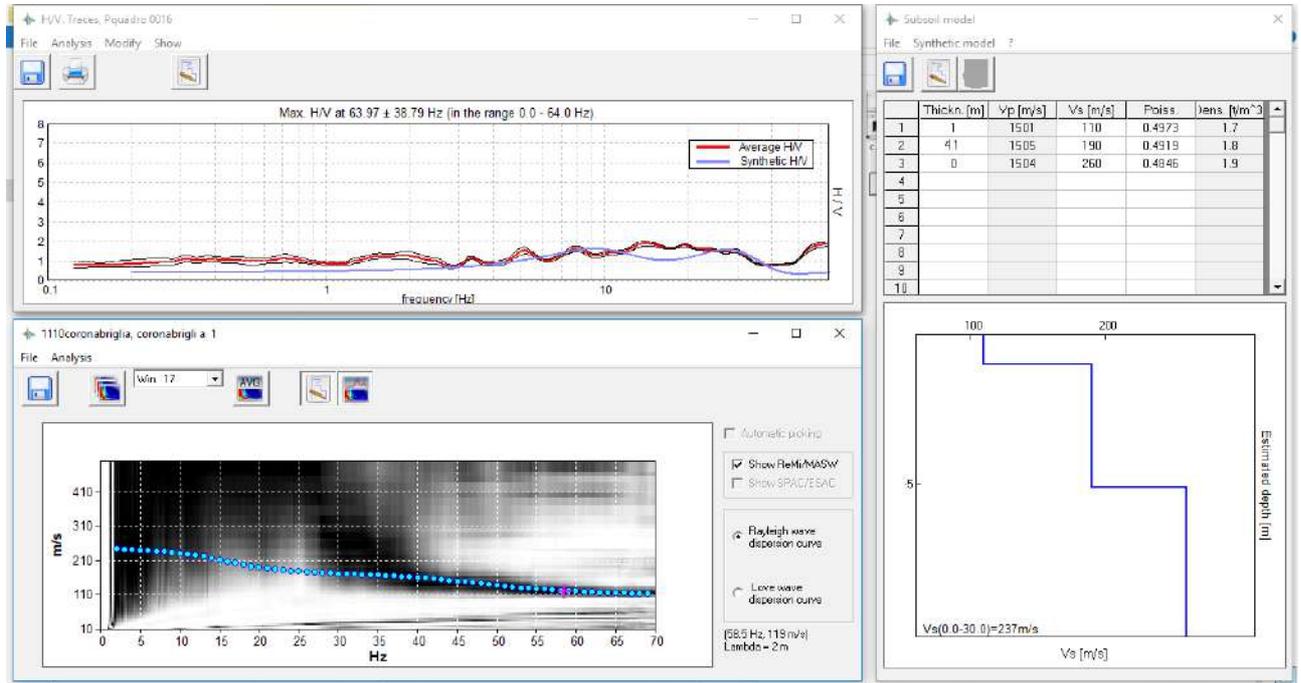
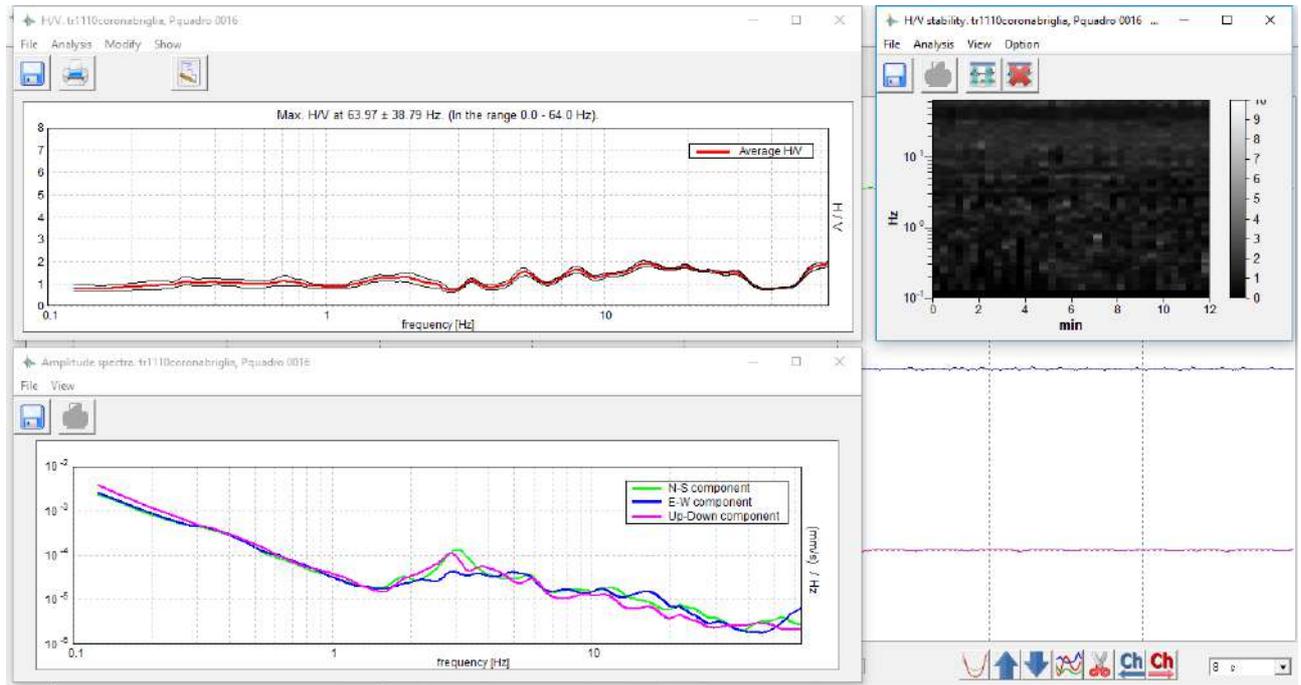
9/08/2018



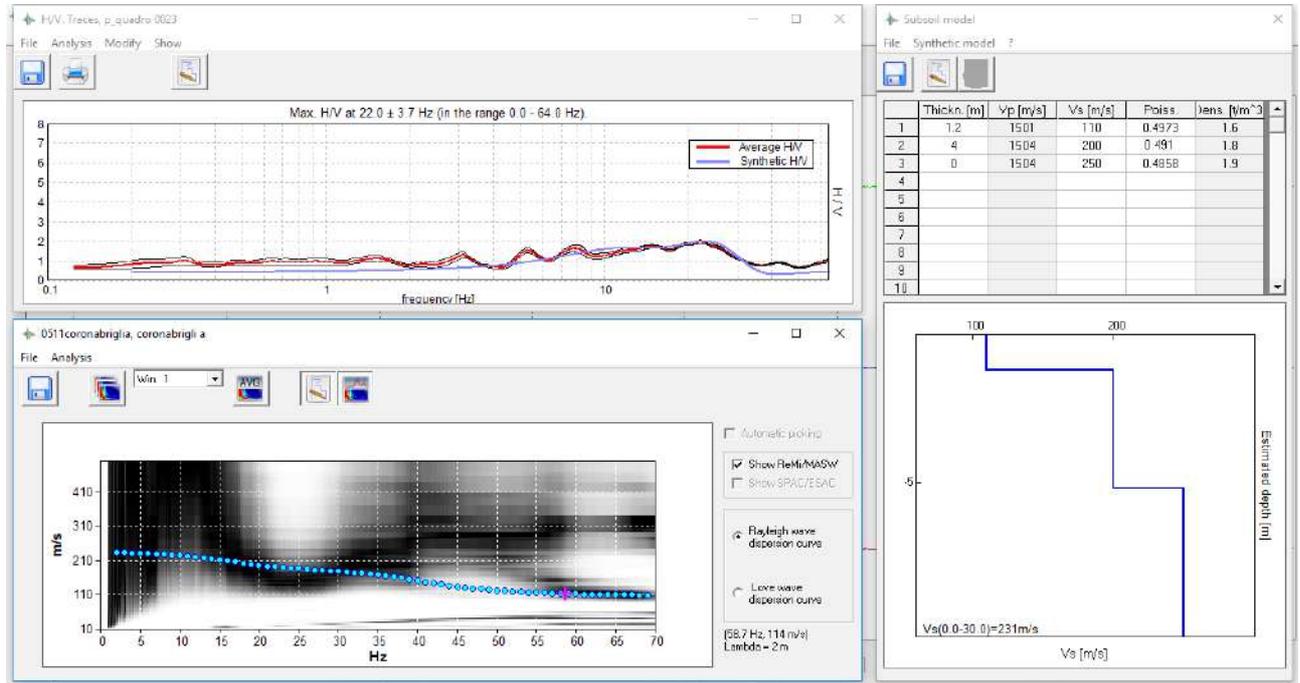
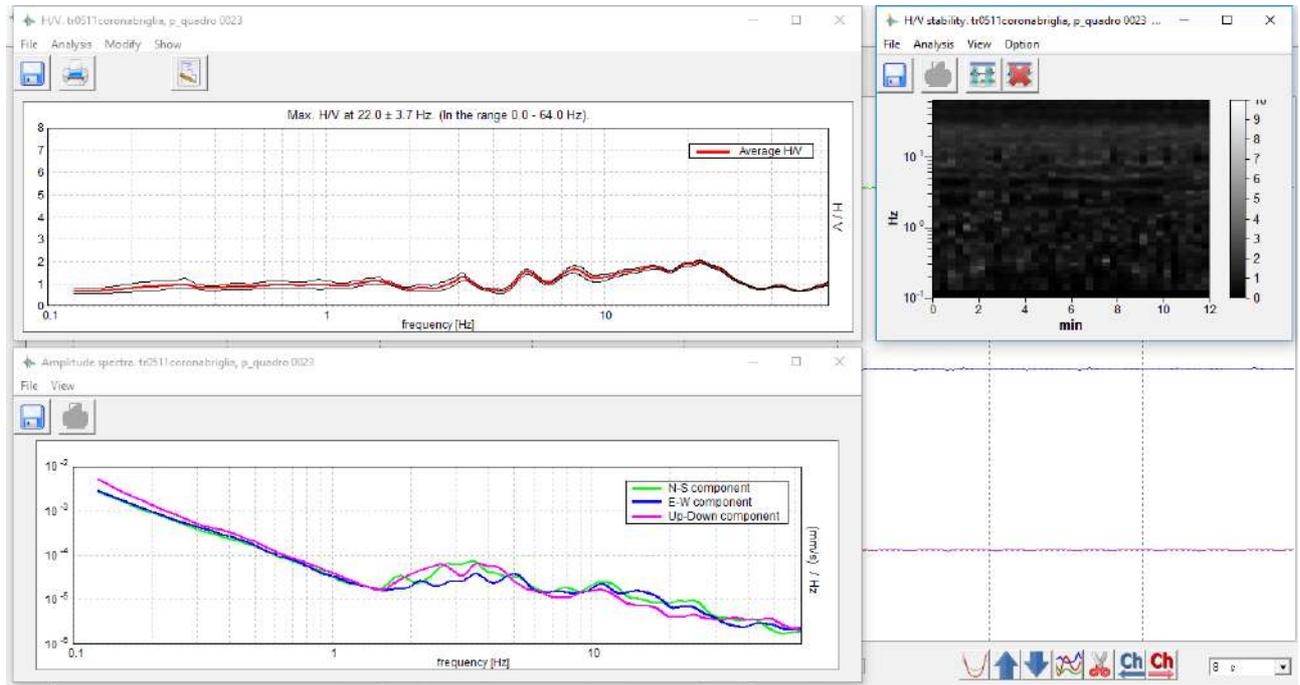




11/10/2018

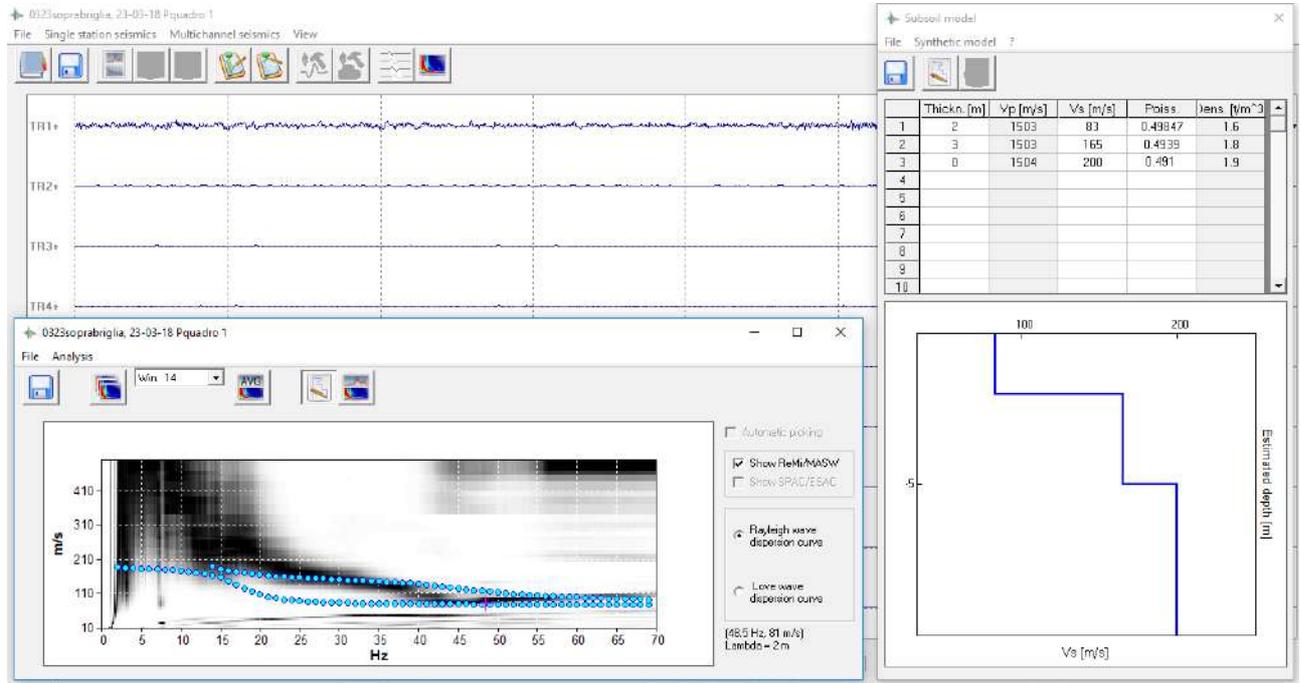


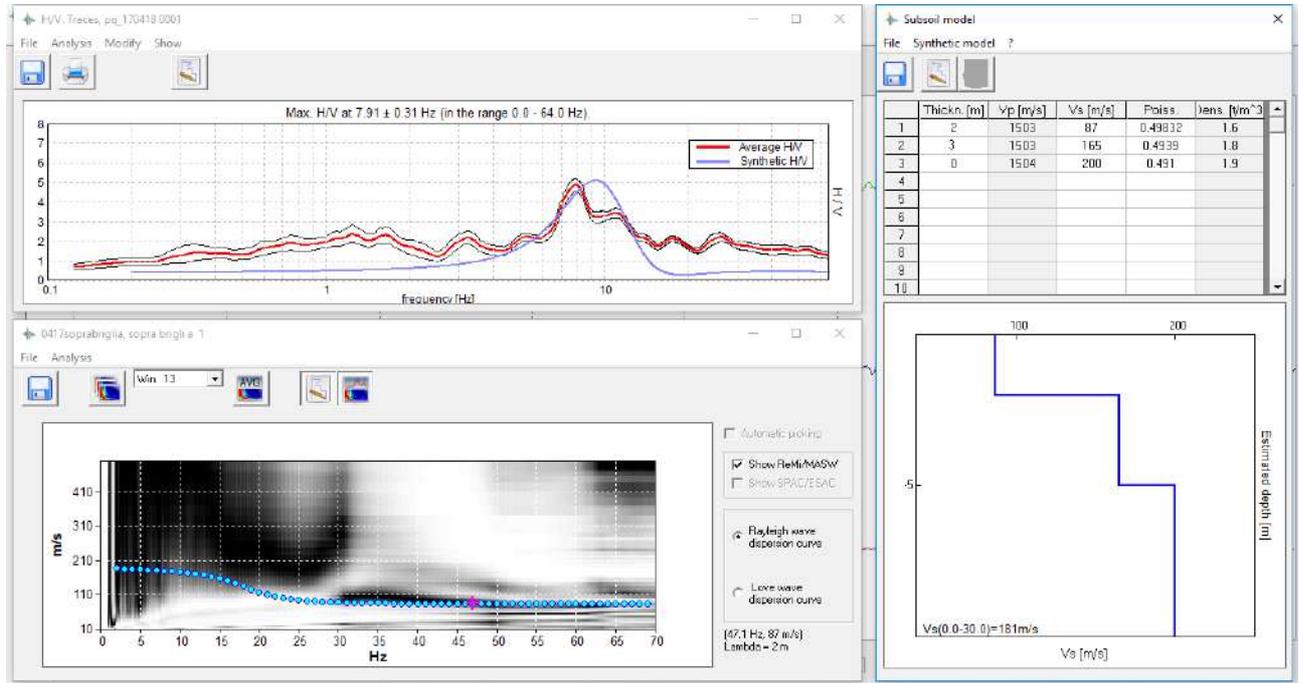
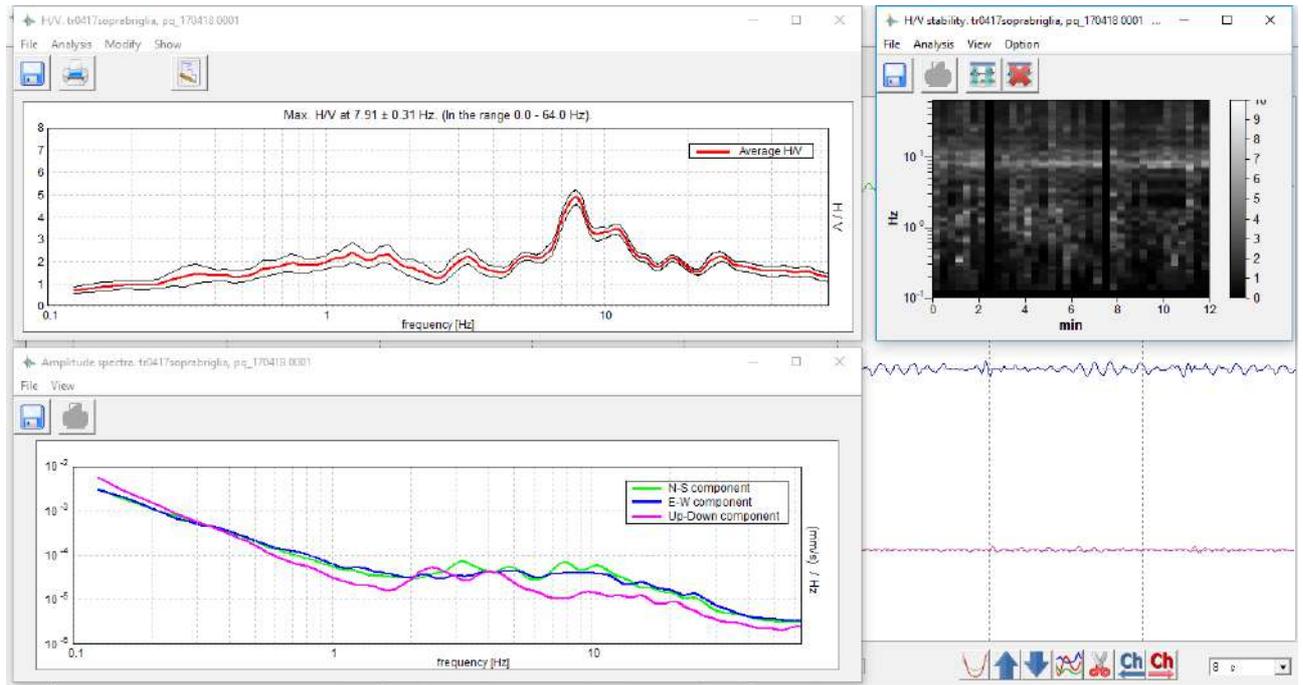
5/11/2018



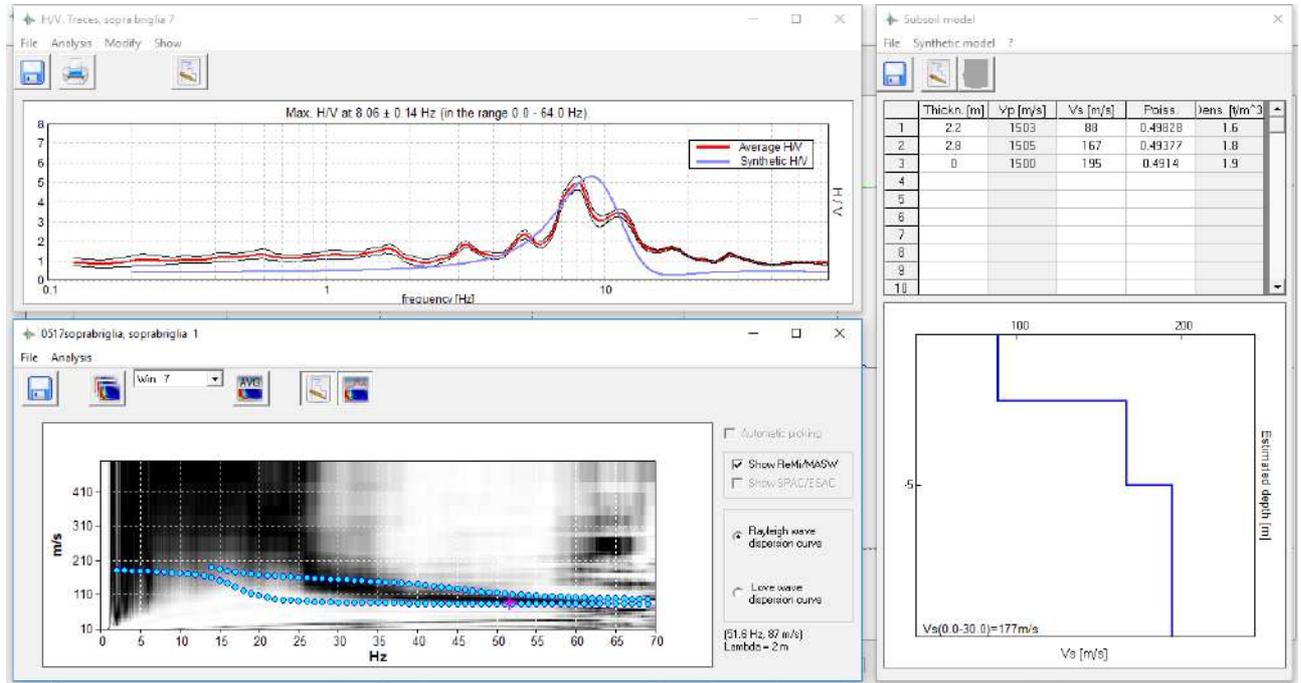
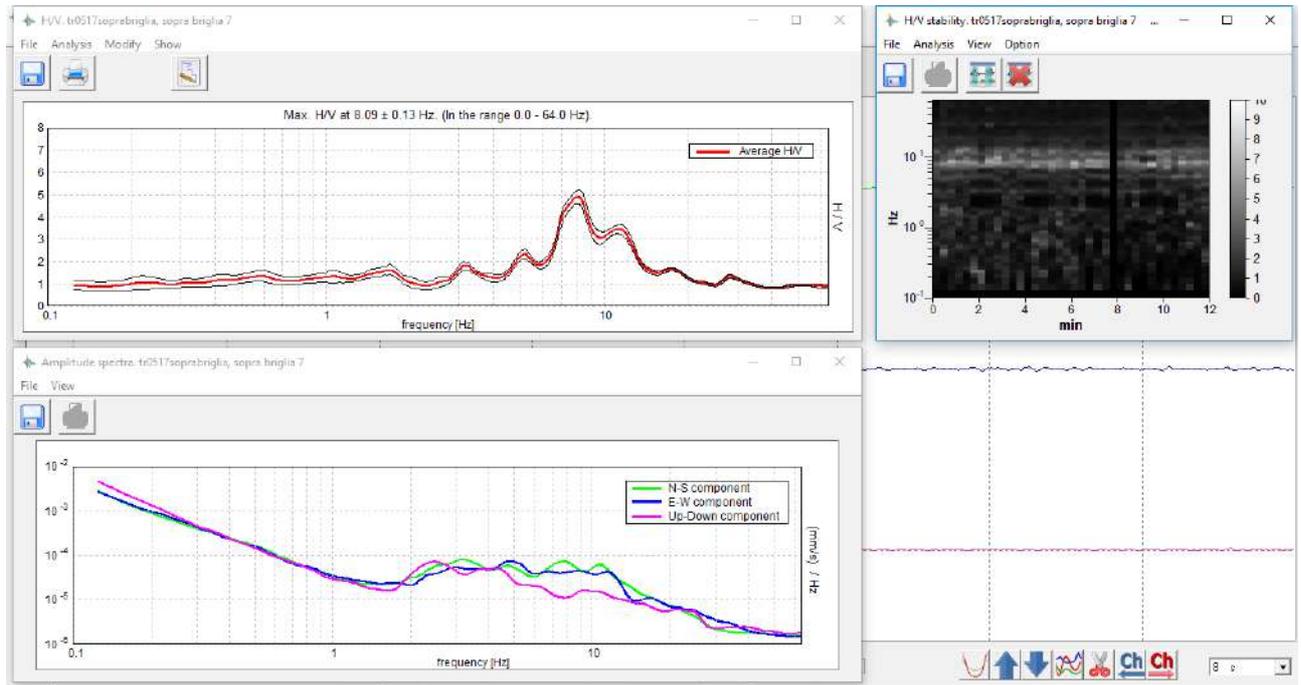
# ALLEGATO 3: SOPRA BRIGLIA

23/03/2018

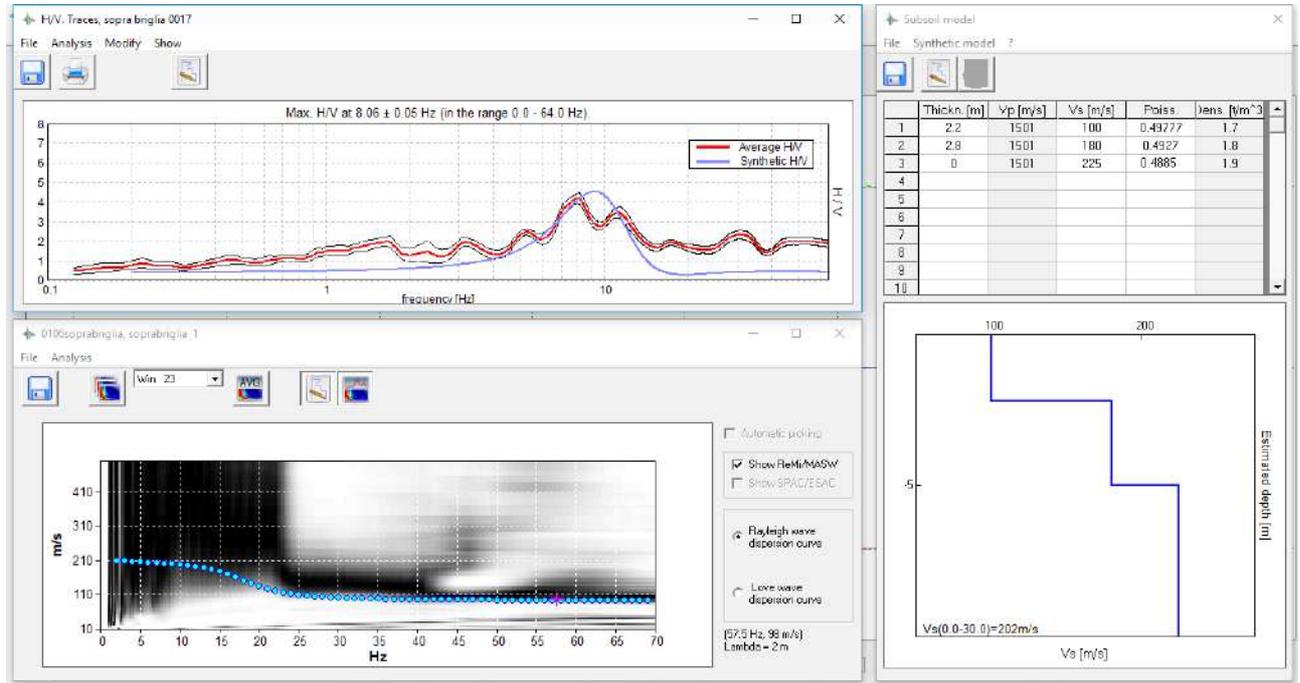
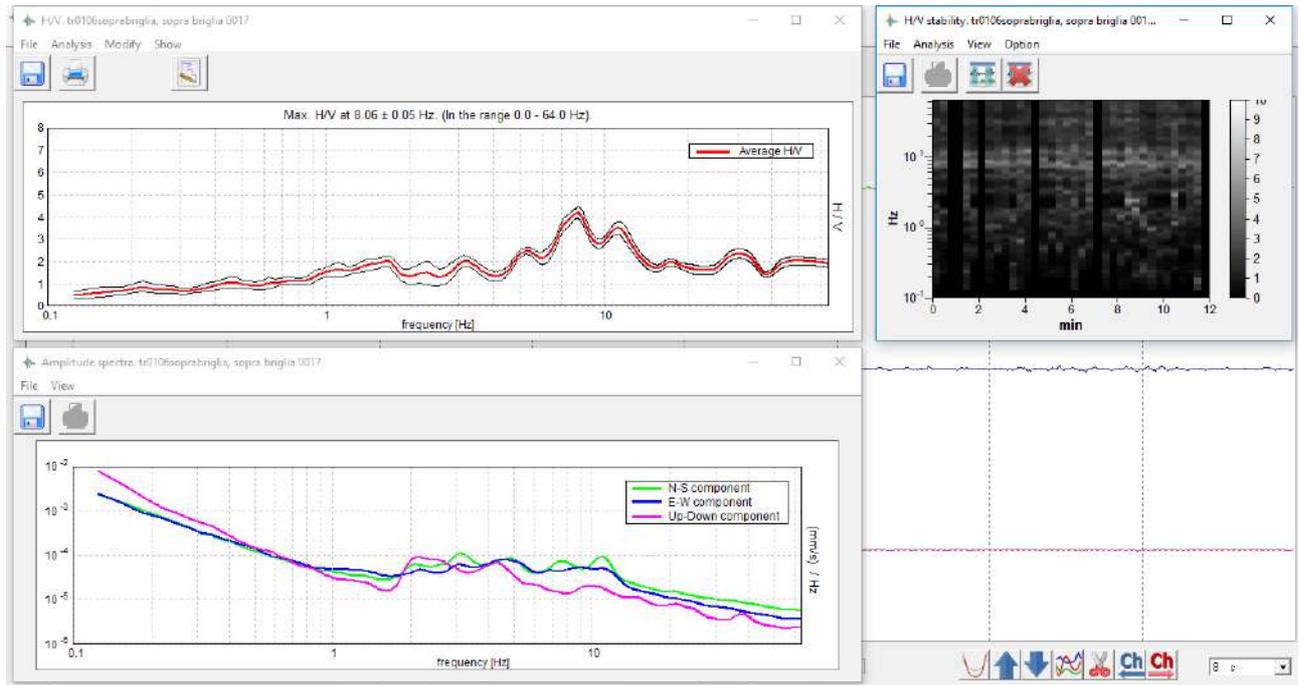




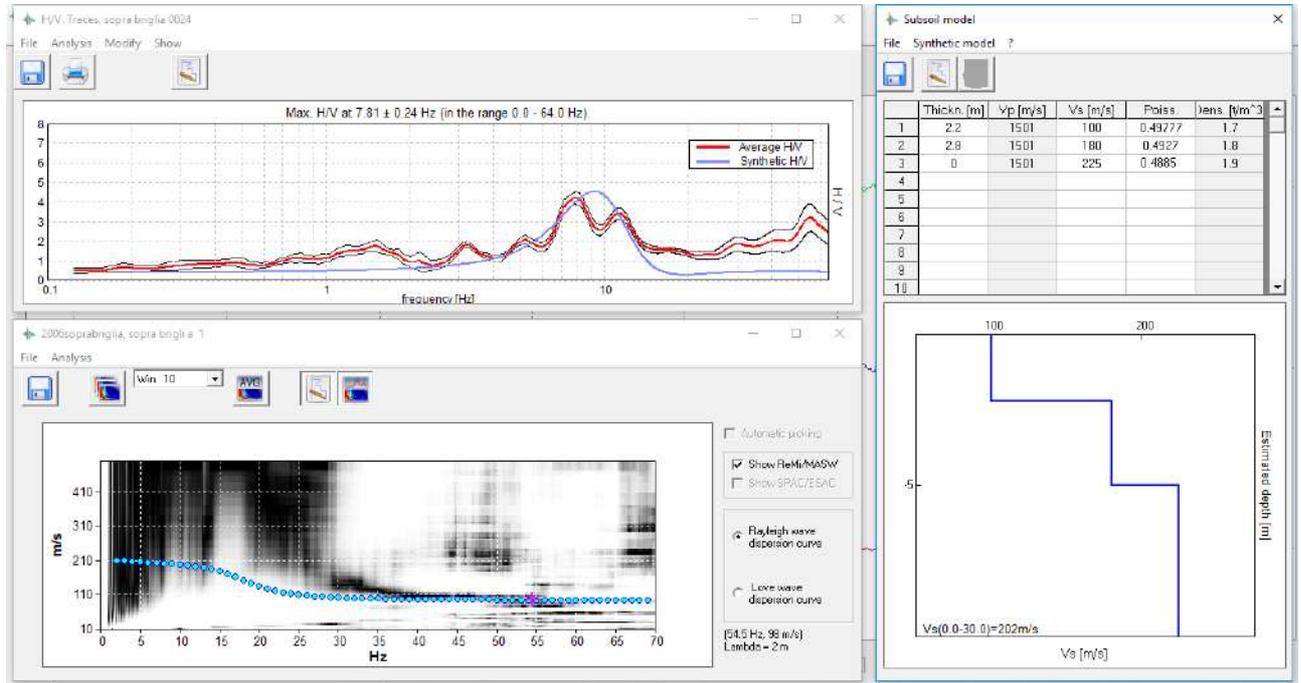
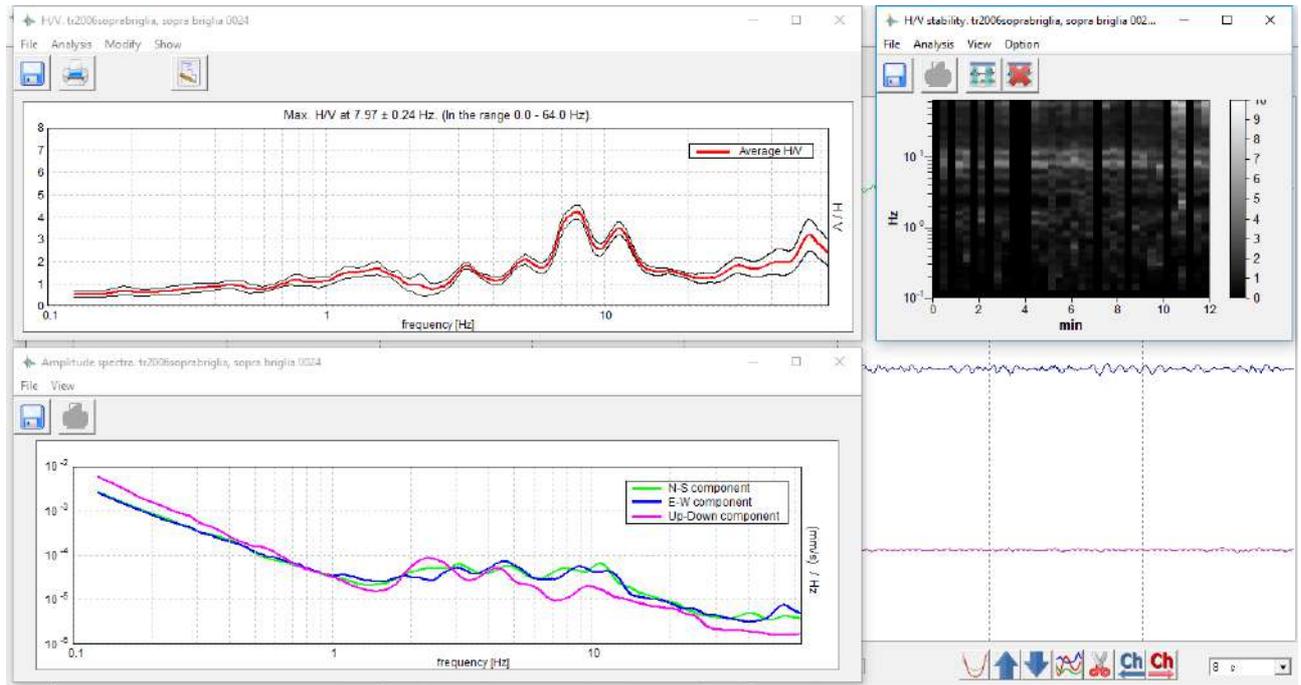
17/05/2018



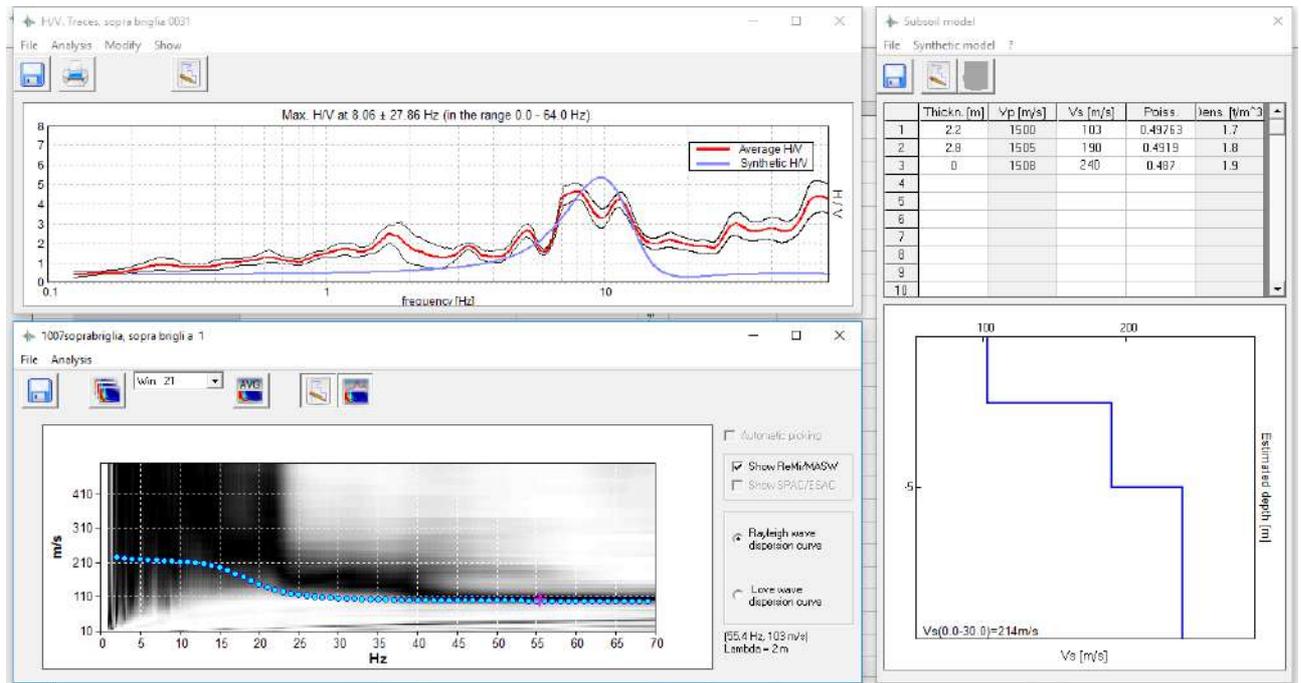
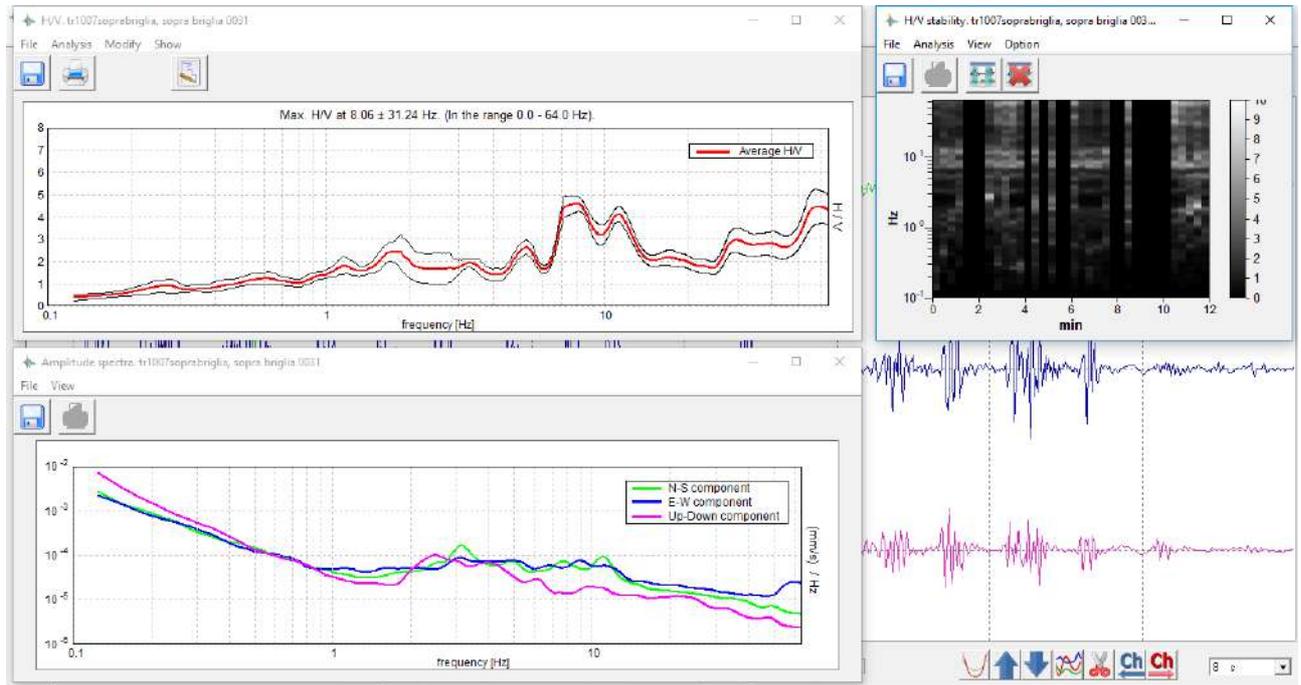
1/06/2018

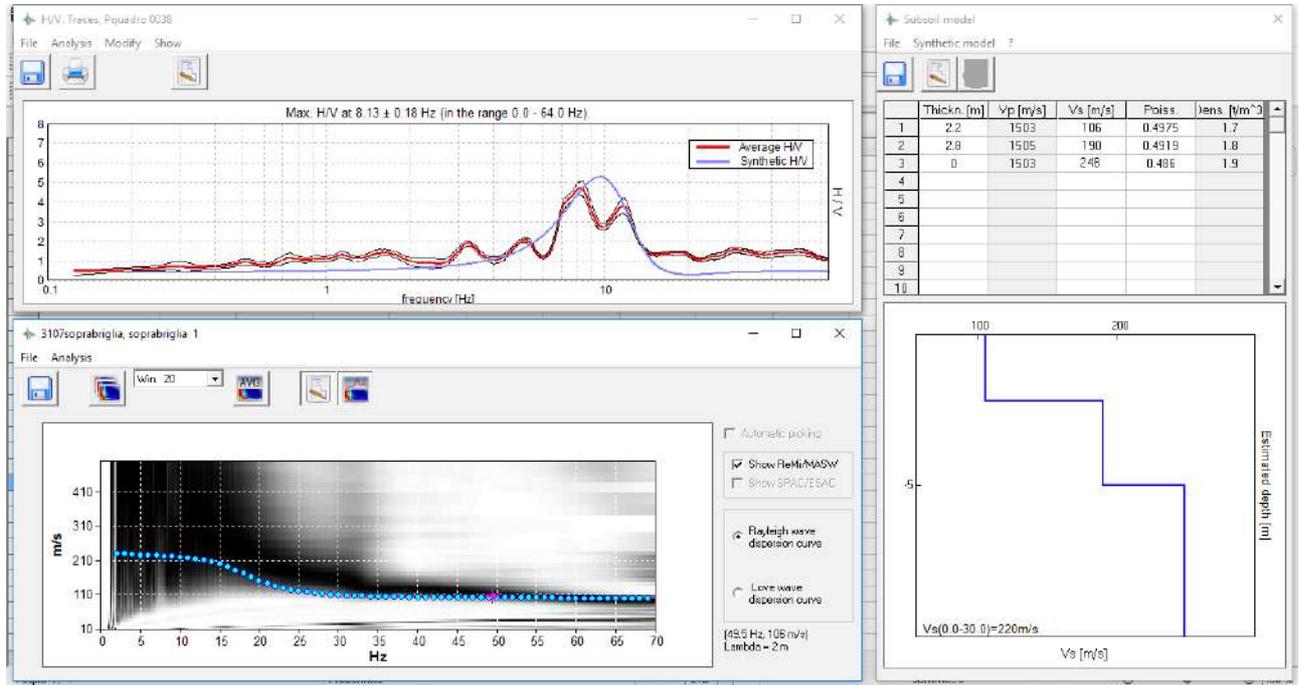
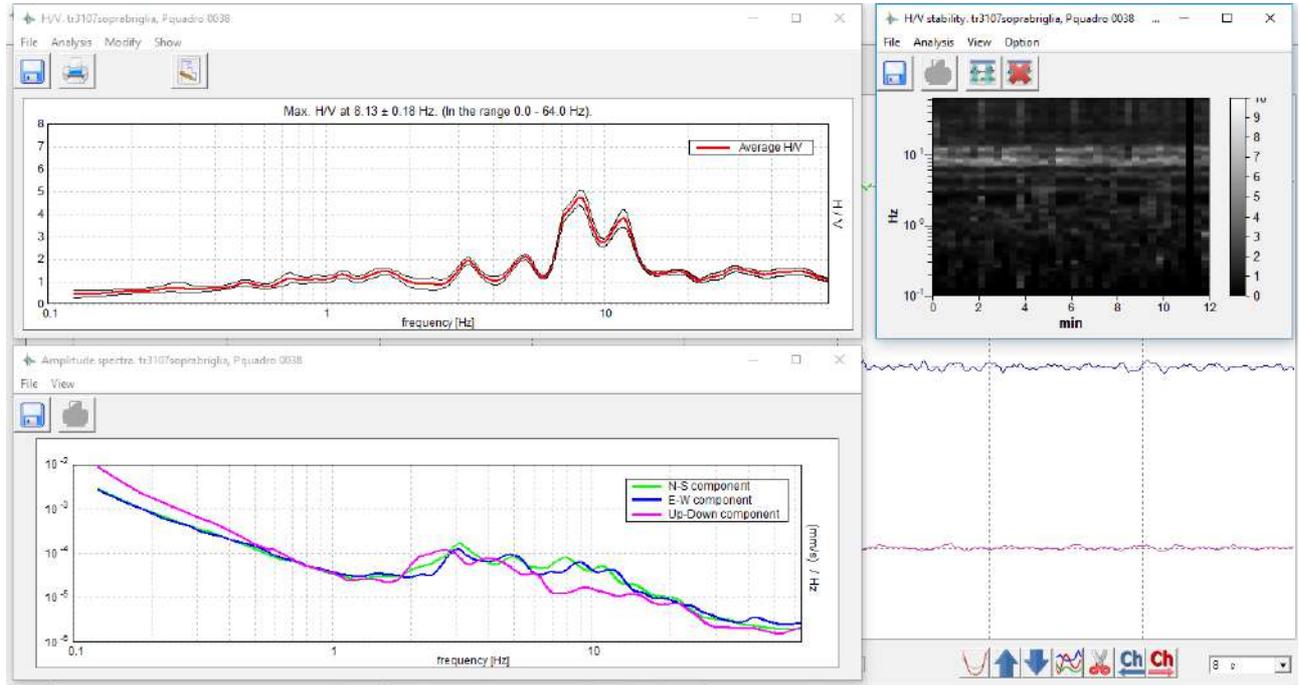


20/06/2018

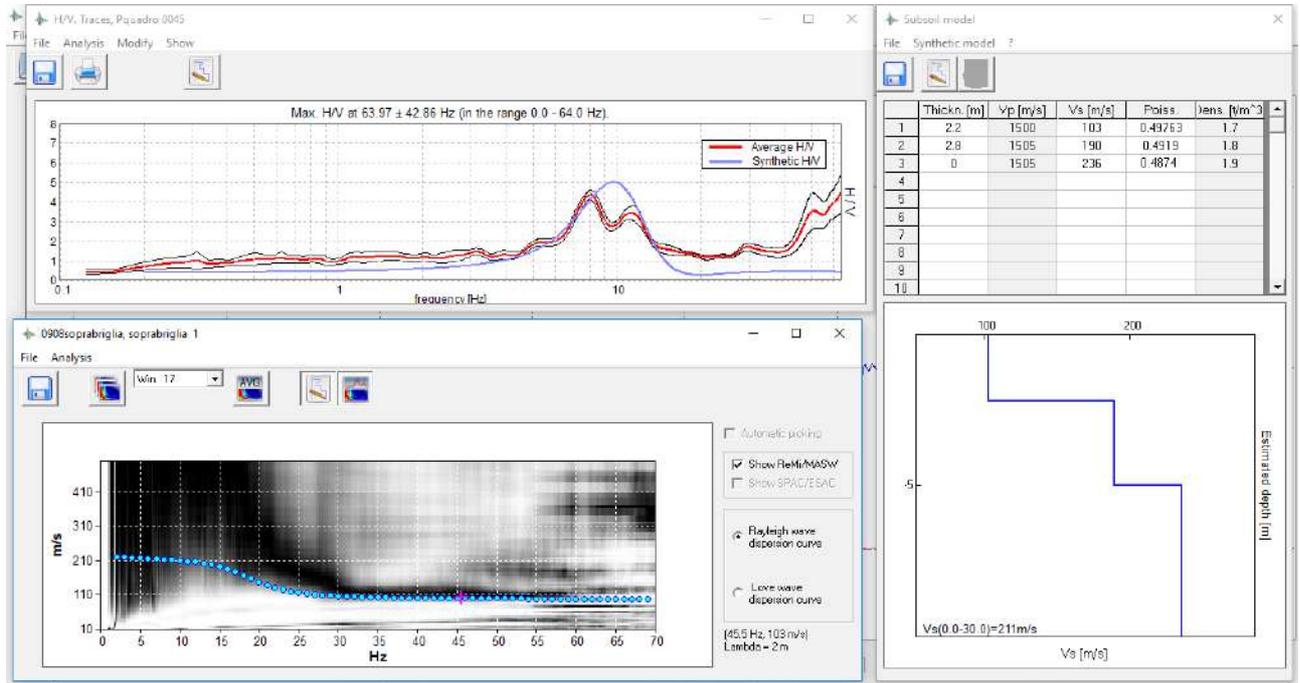
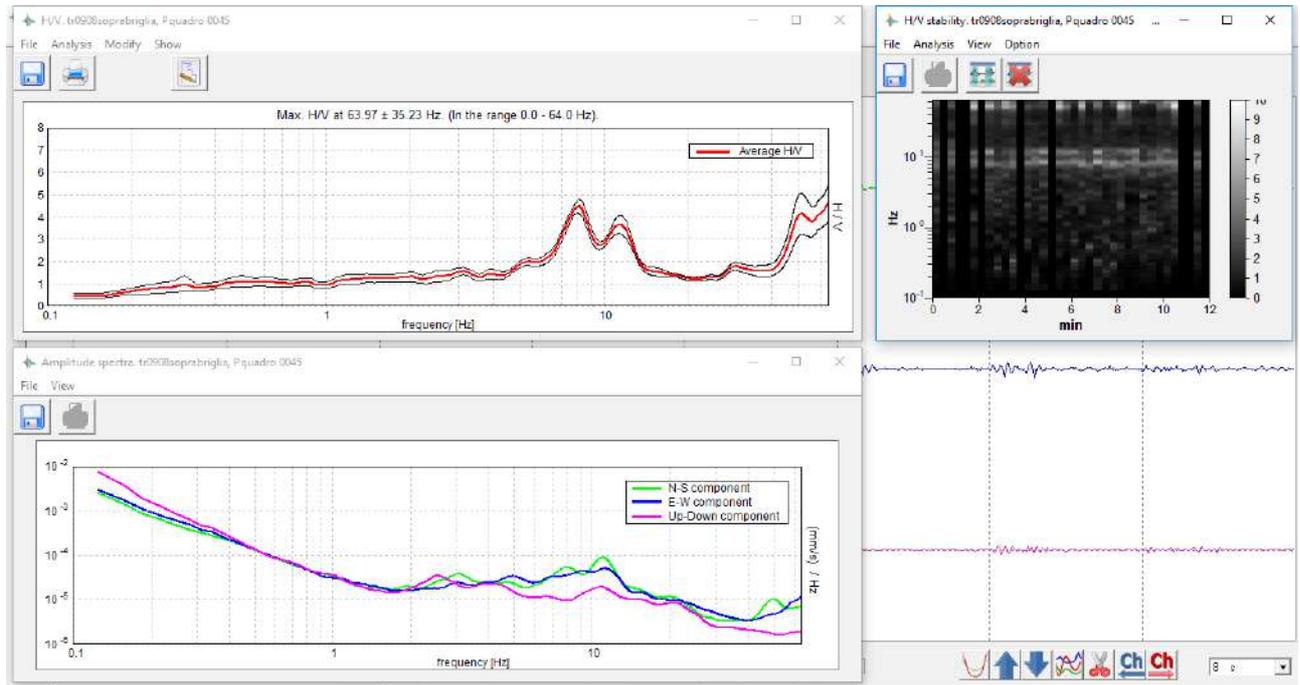


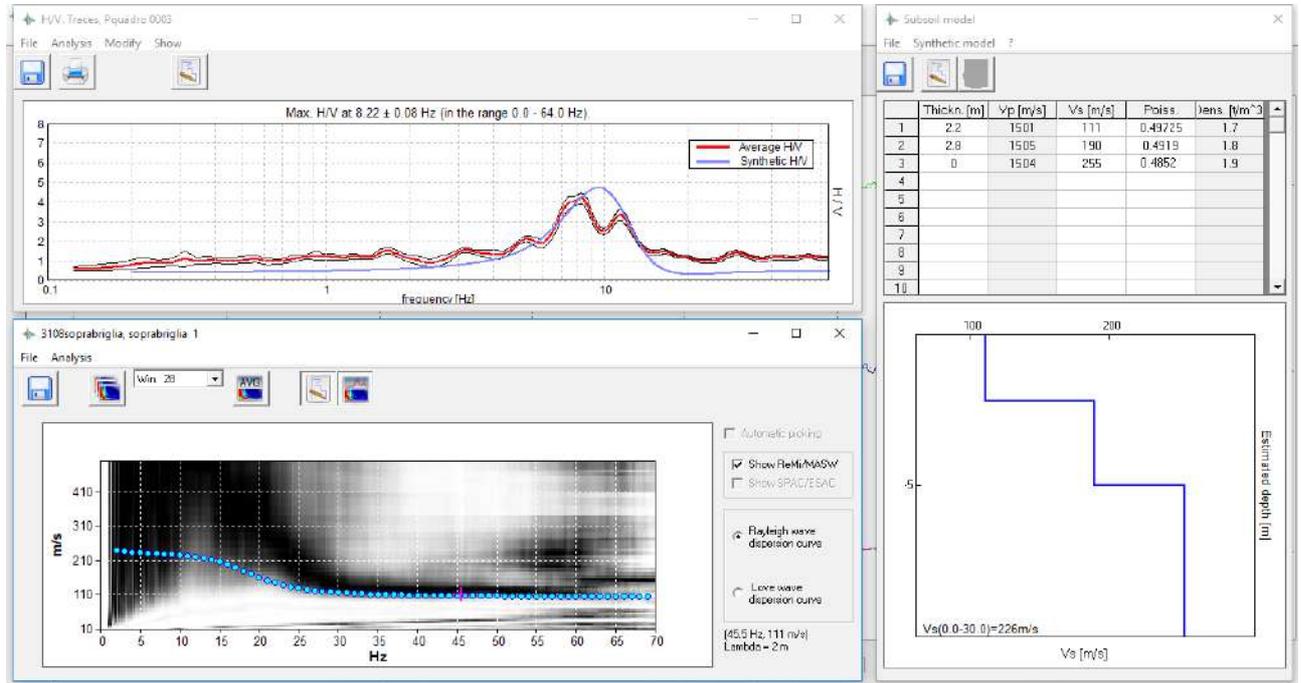
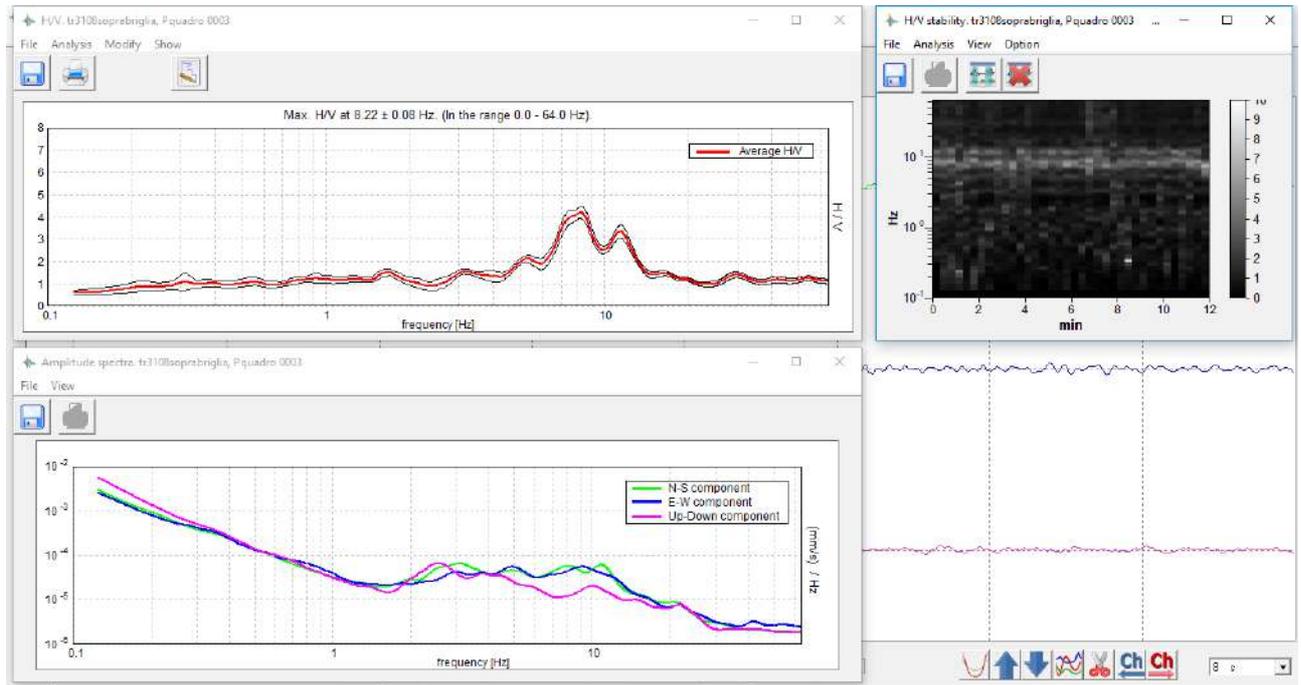
10/07/2018

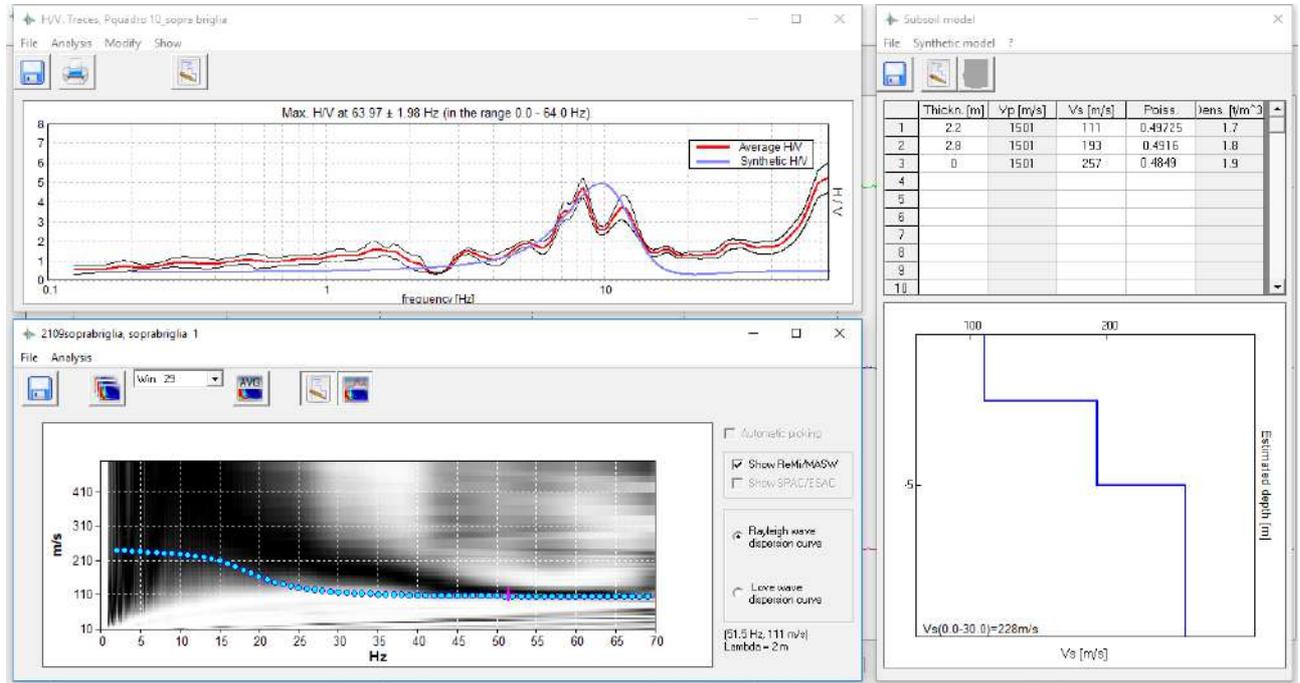
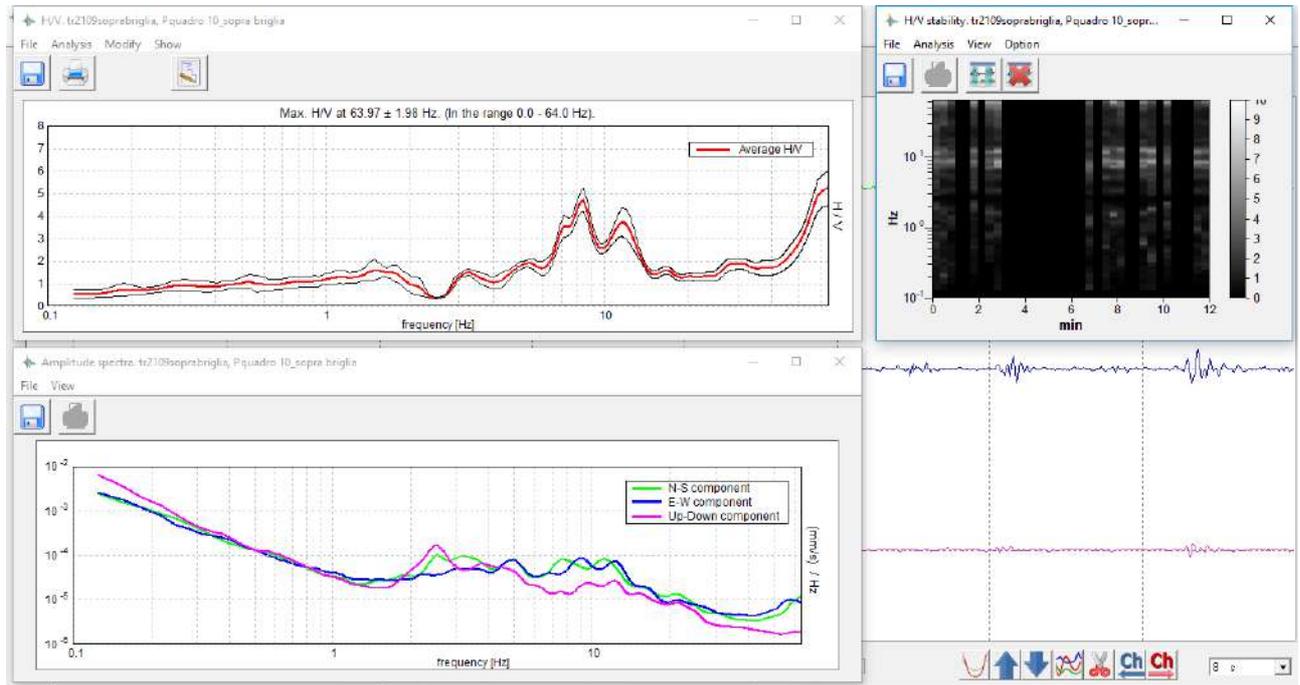




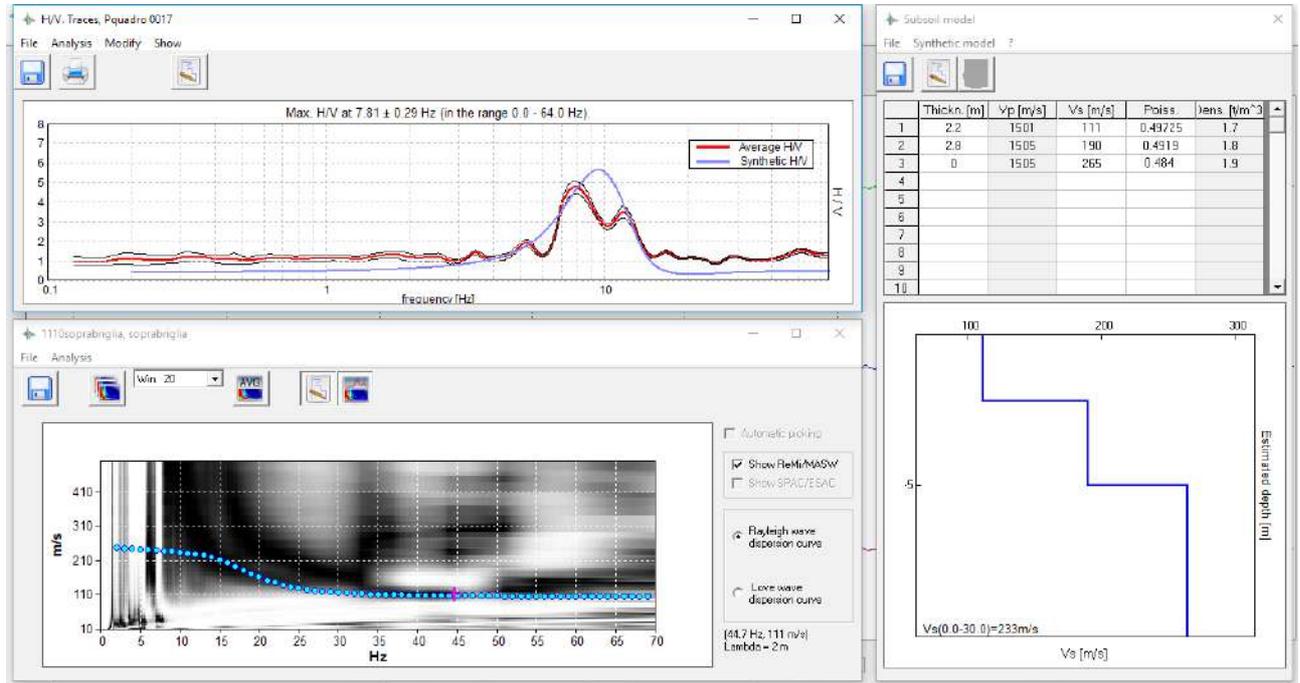
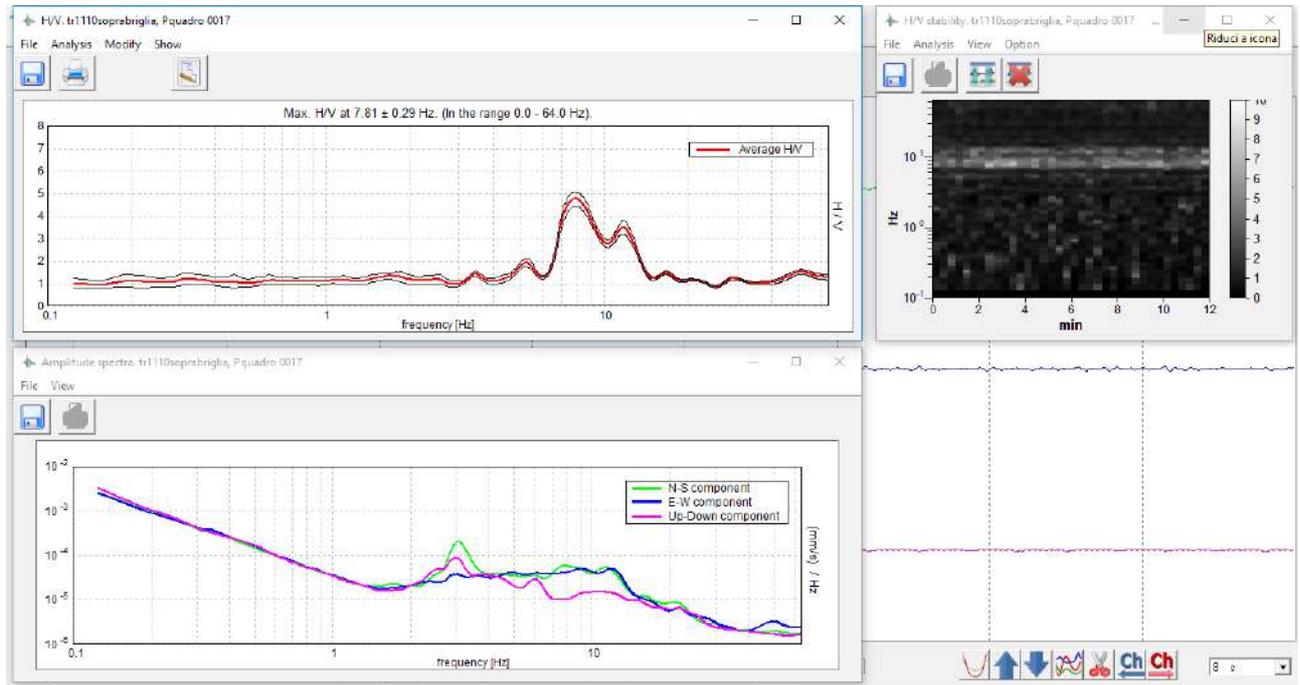
9/08/2018



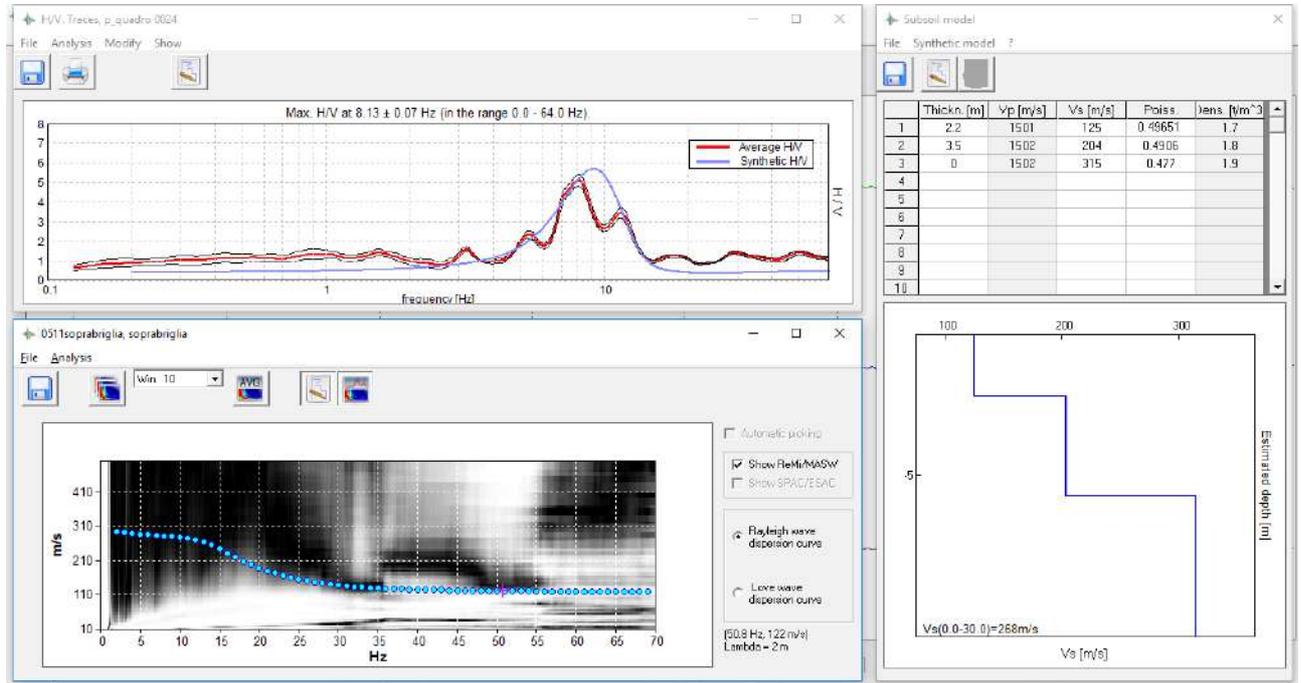
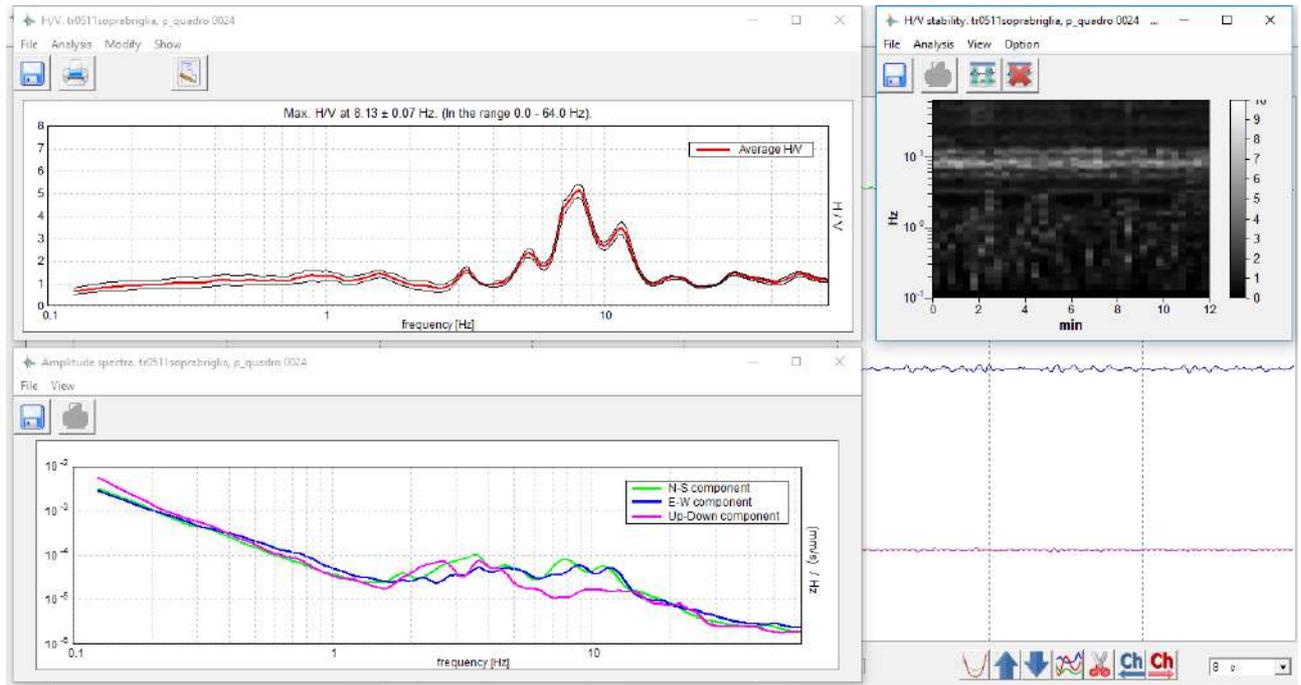




11/10/2018

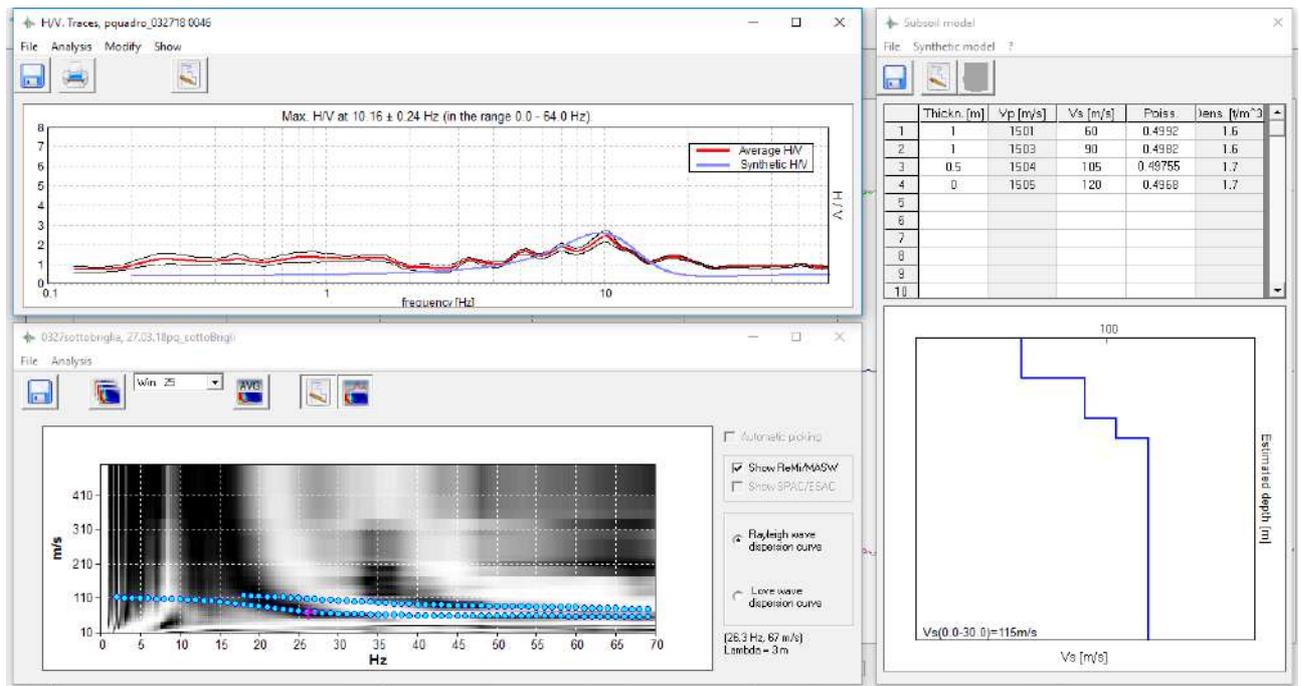
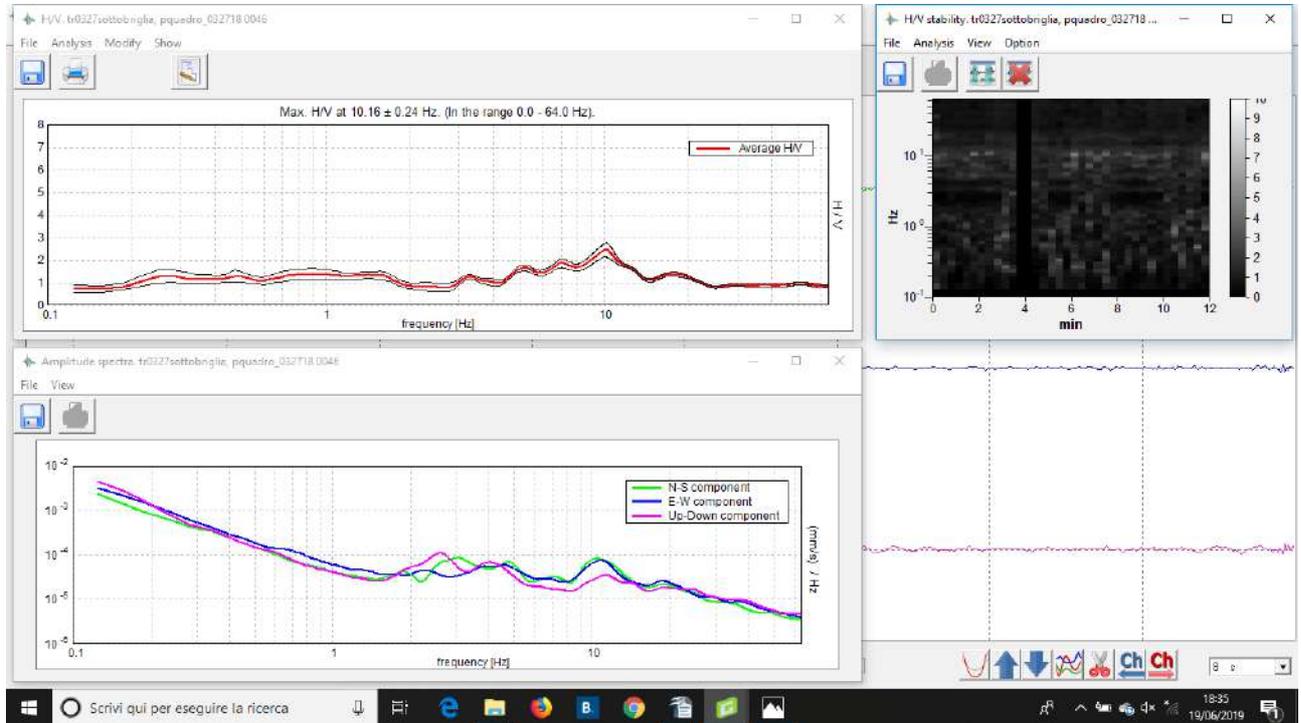


5/11/2018

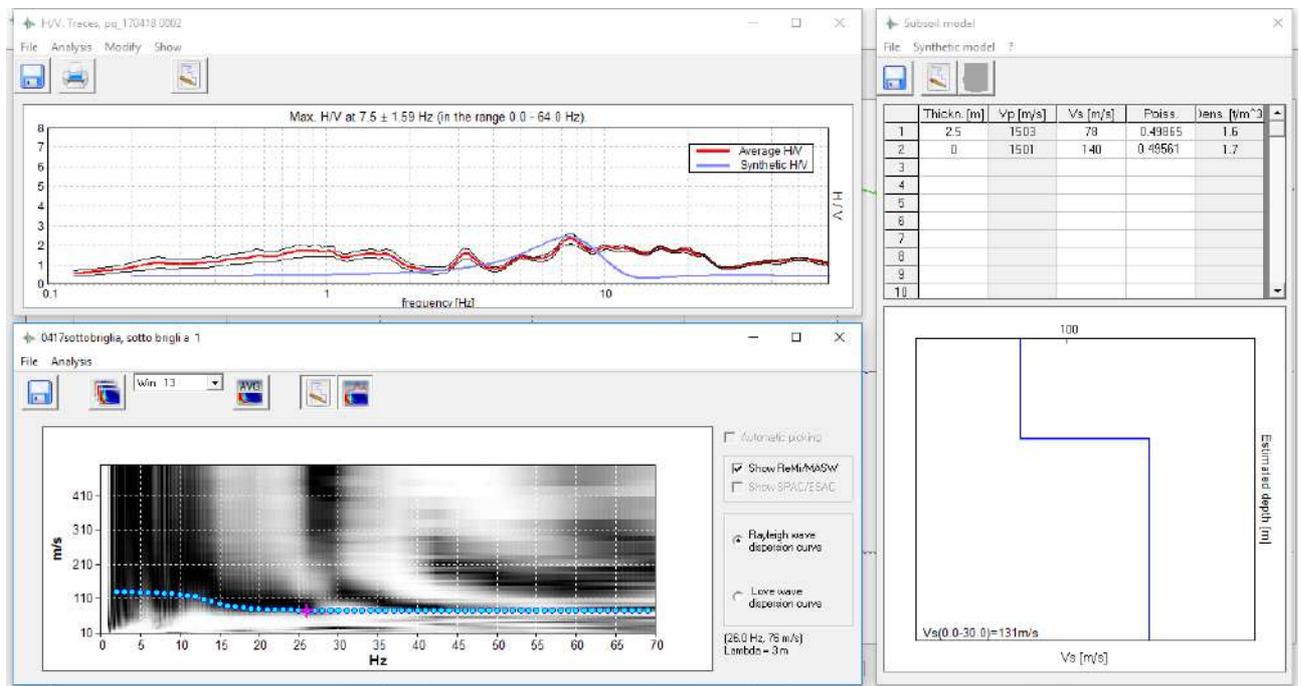
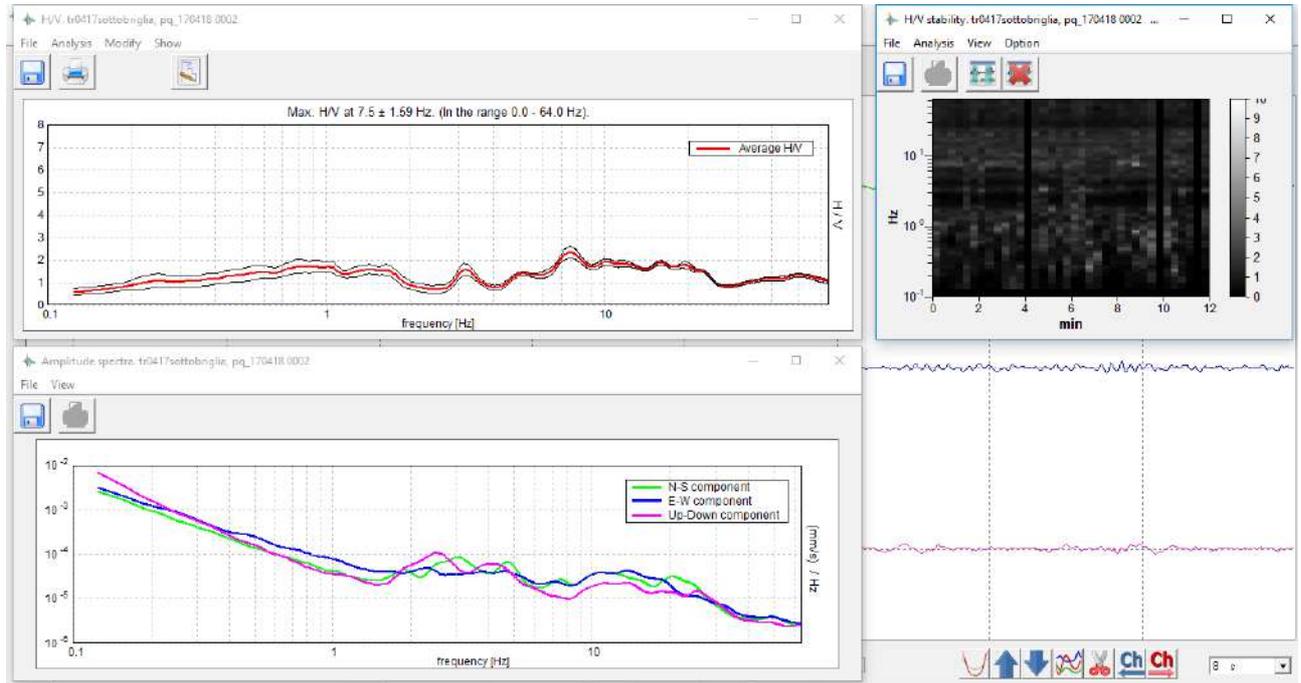


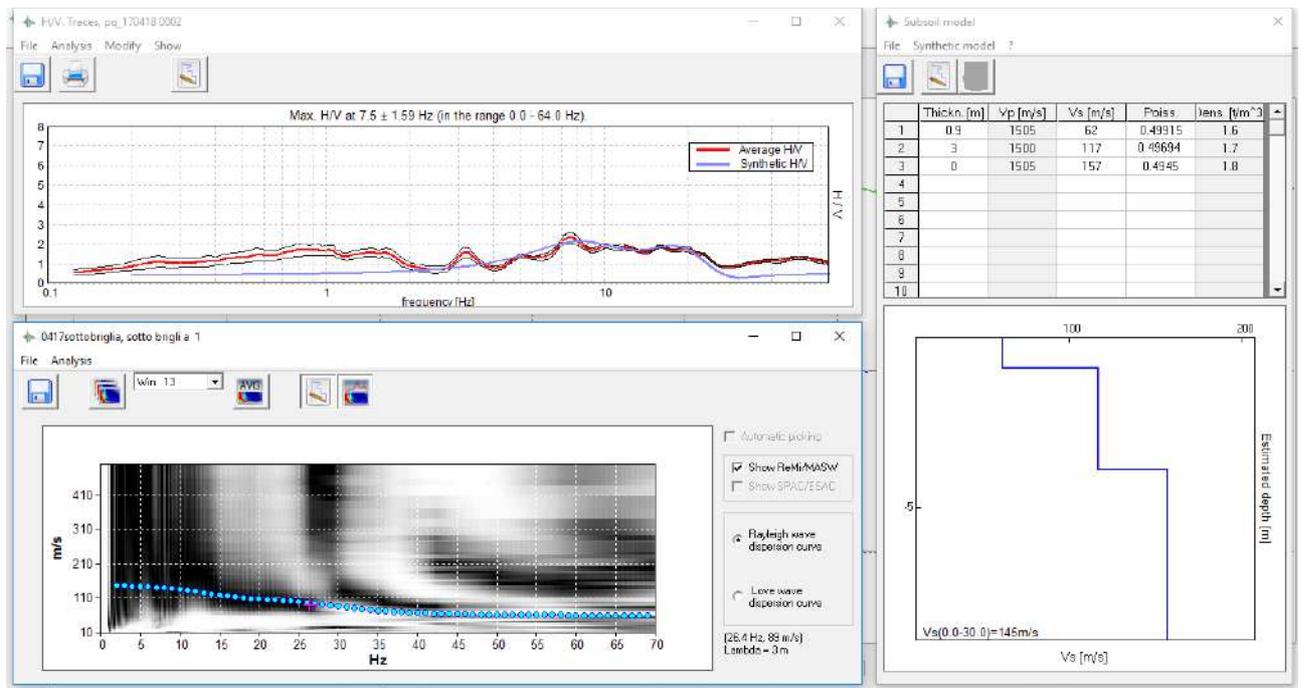
# ALLEGATO 4: SOTTO BRIGLIA

27/03/2018

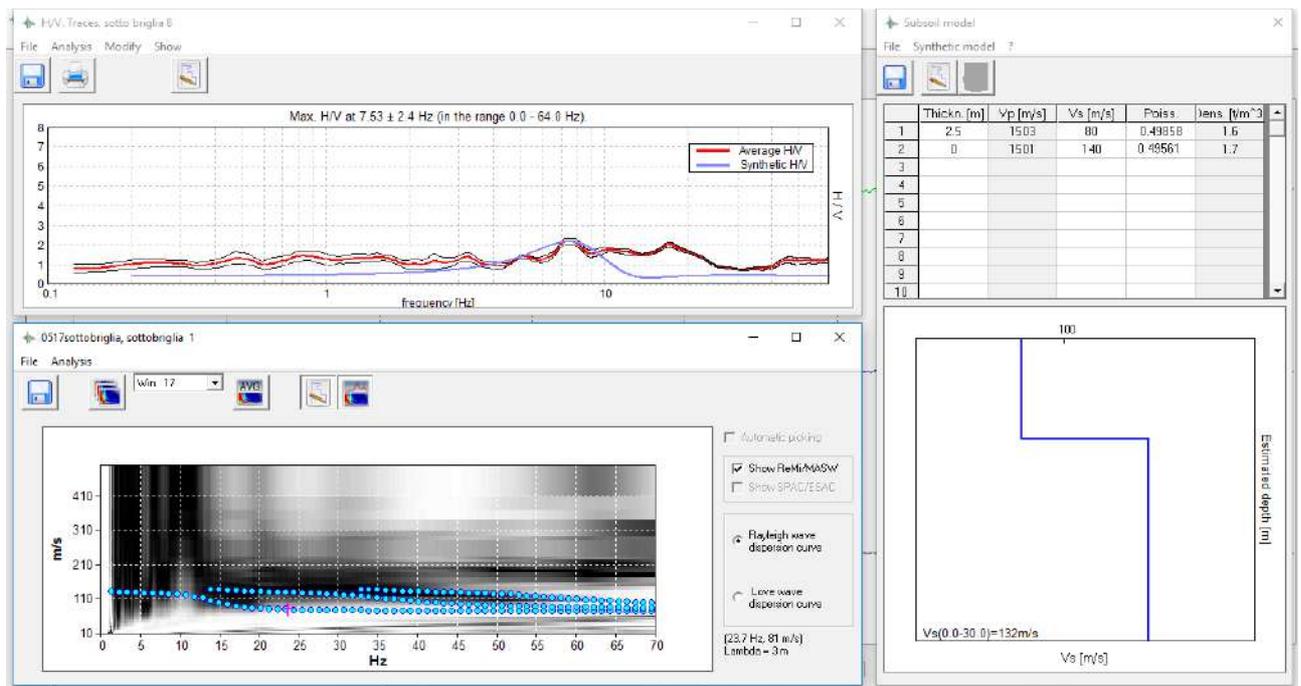
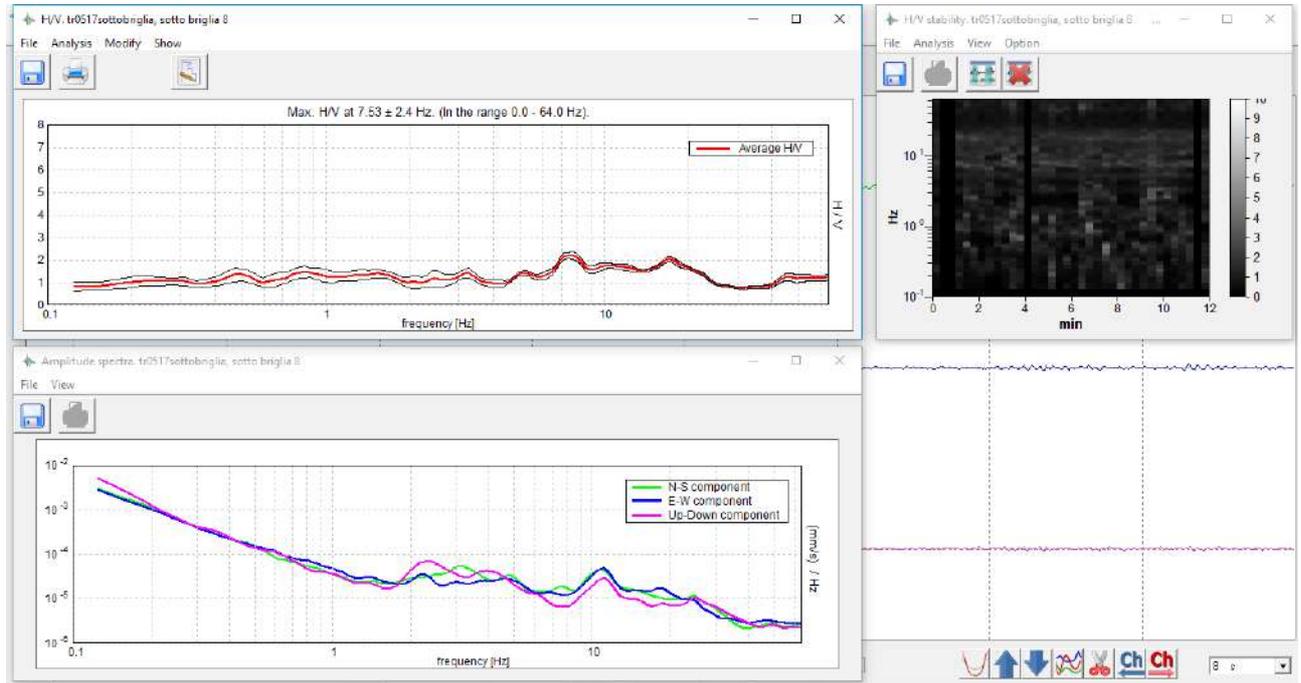


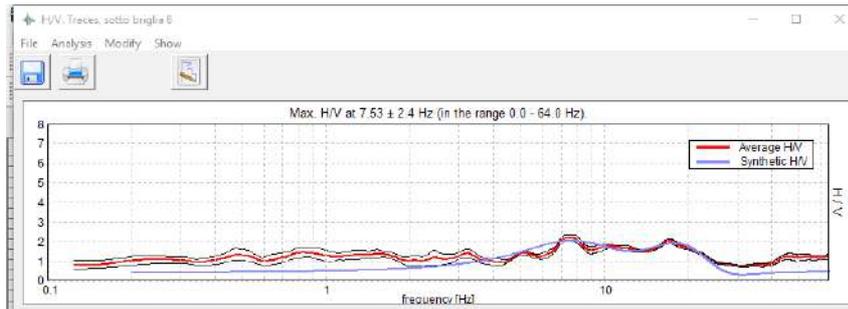
17/04/2018





17/05/2018

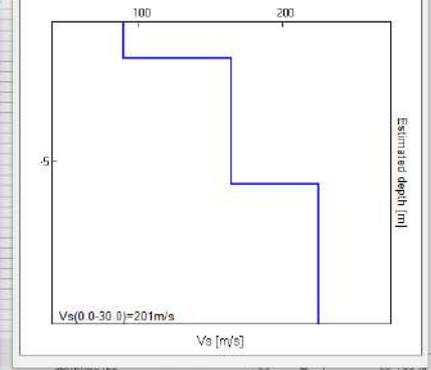
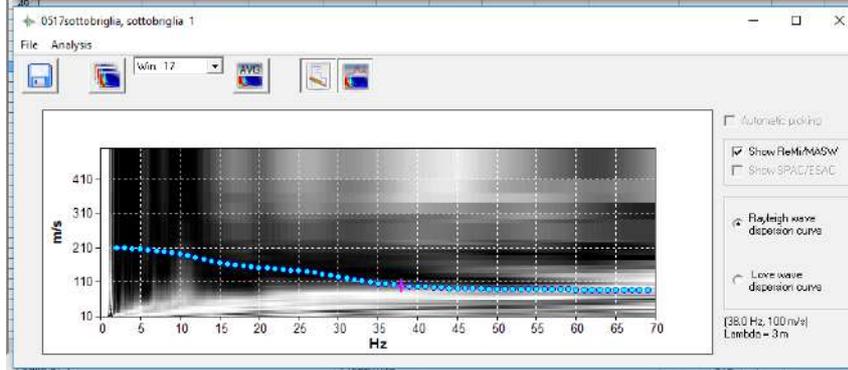


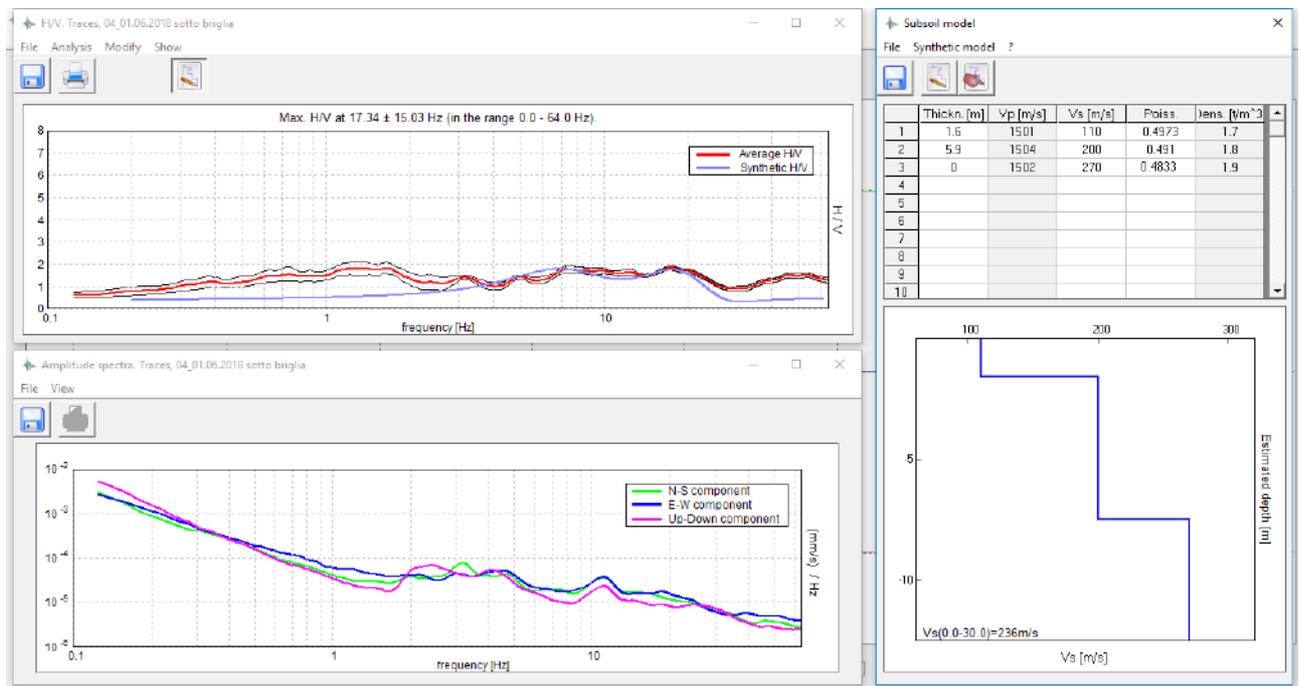
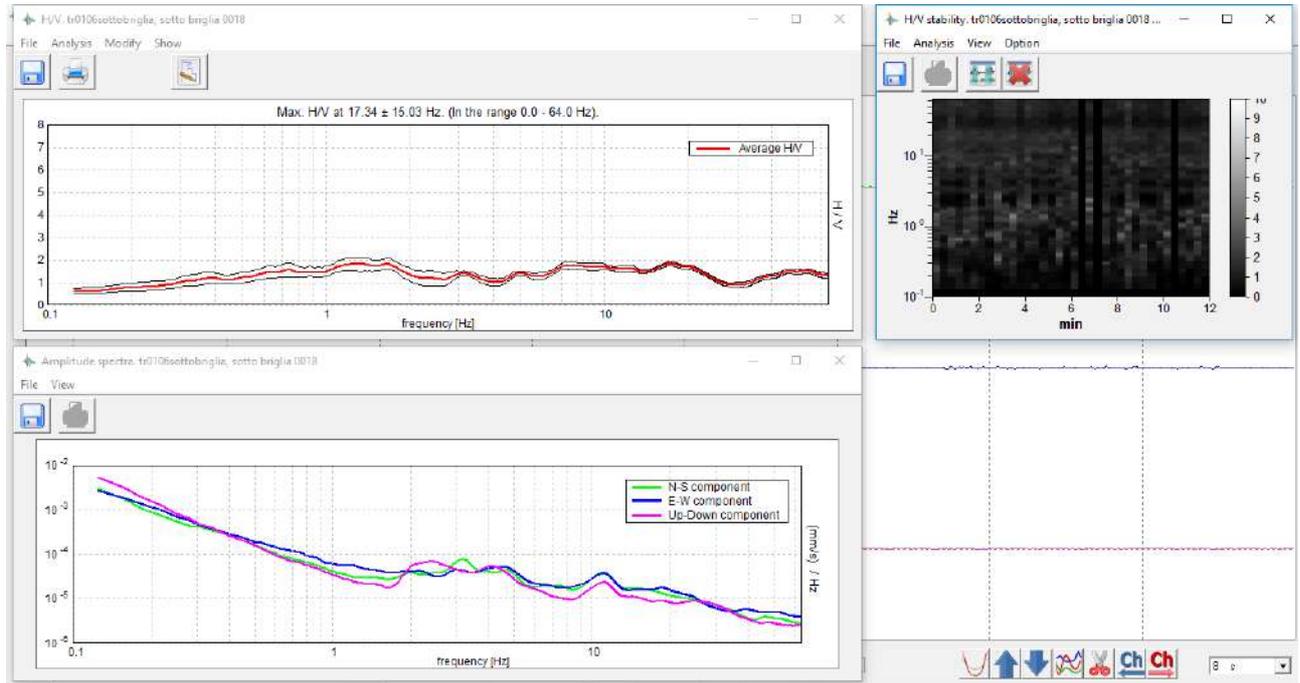


Subsoil model

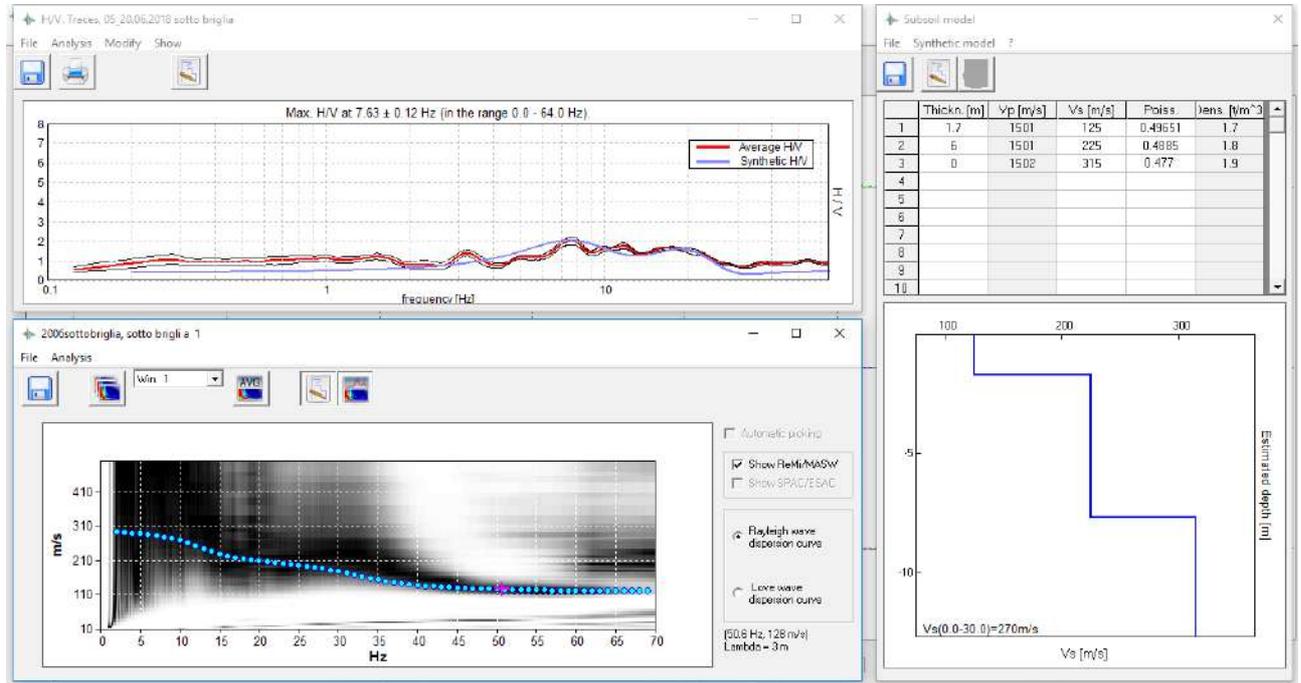
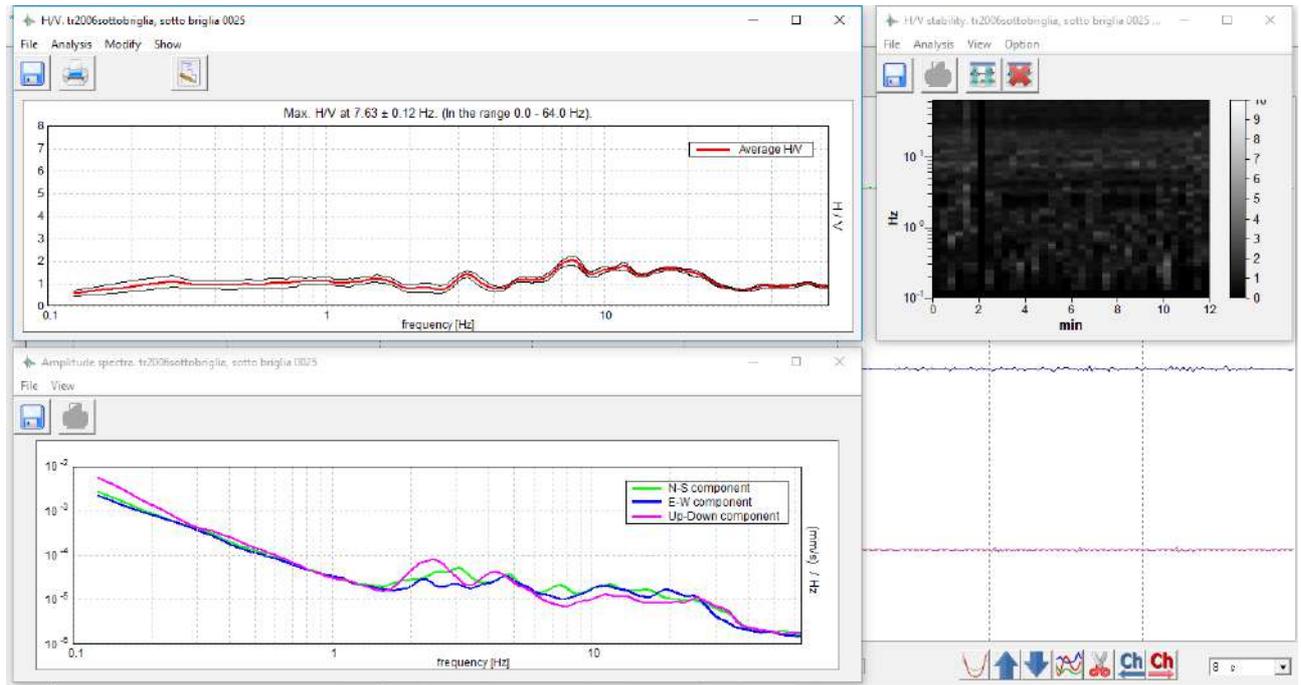
File Synthetic model ?

	Thickn. [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Poisson	Dens. [t/m <sup>3</sup> ]
1	1.3	1503	90	0.4982	1.6
2	4.5	1503	165	0.4933	1.8
3	0	1501	225	0.4885	1.9
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

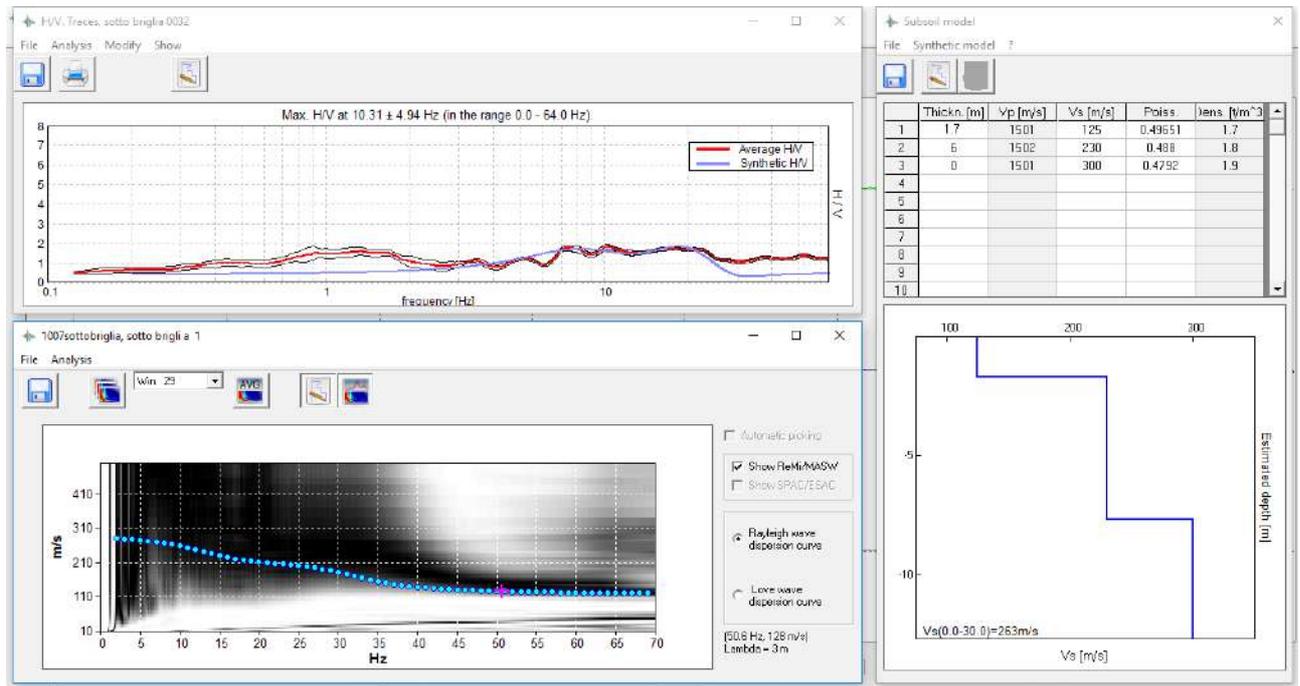
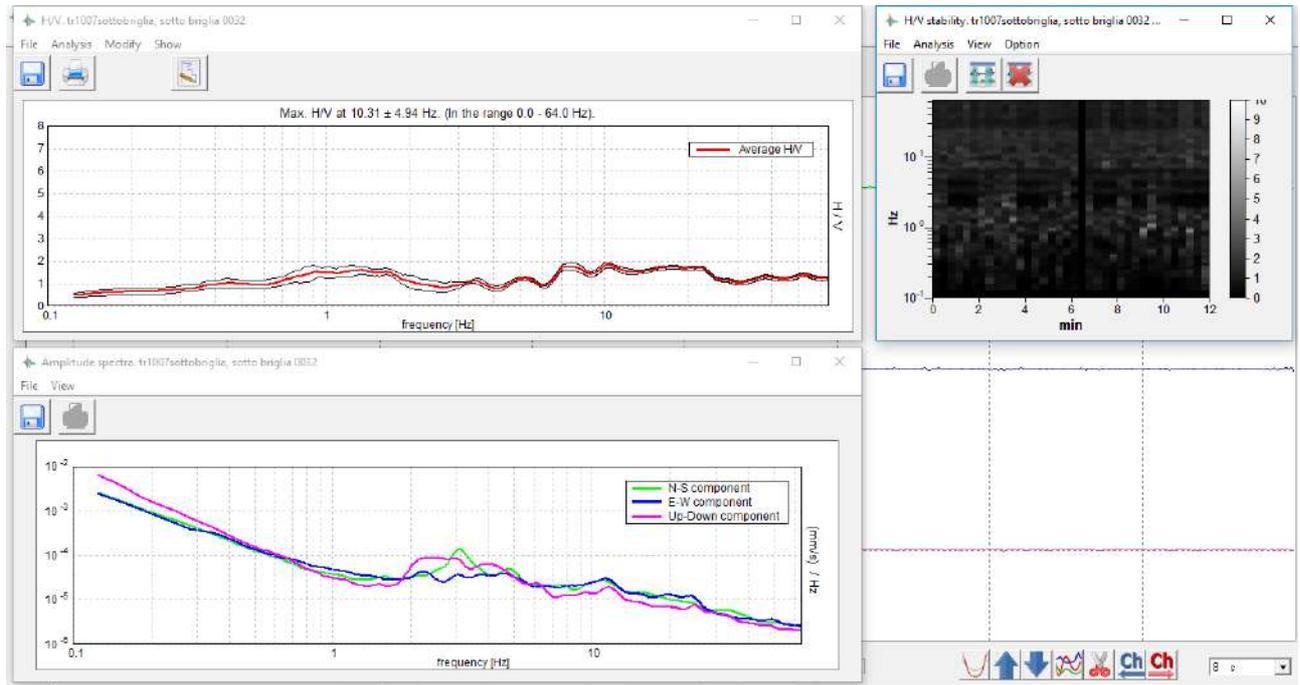


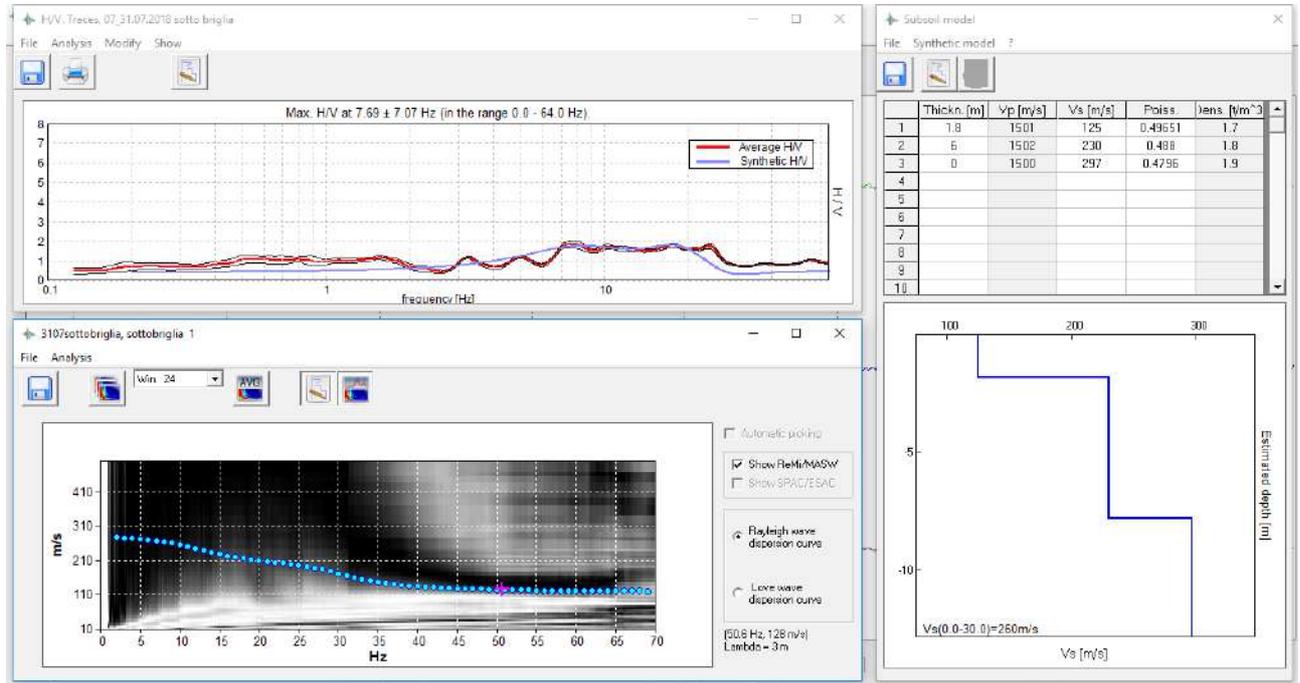
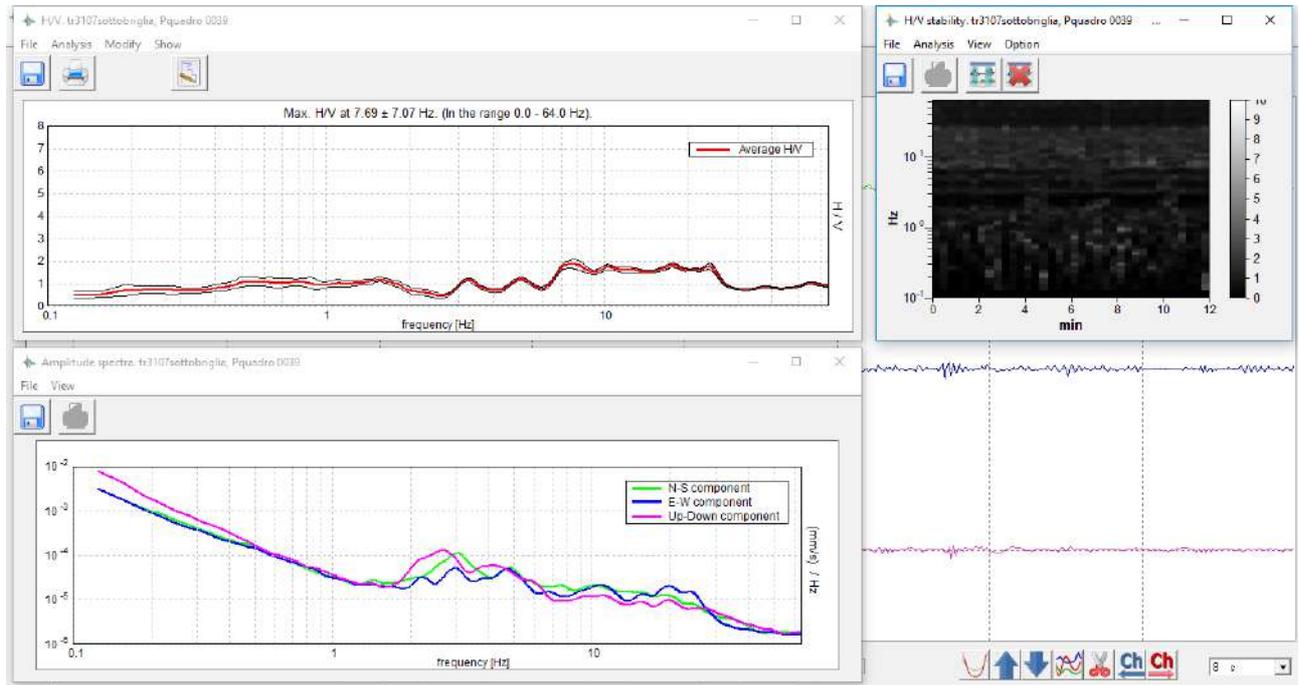


20/06/2018

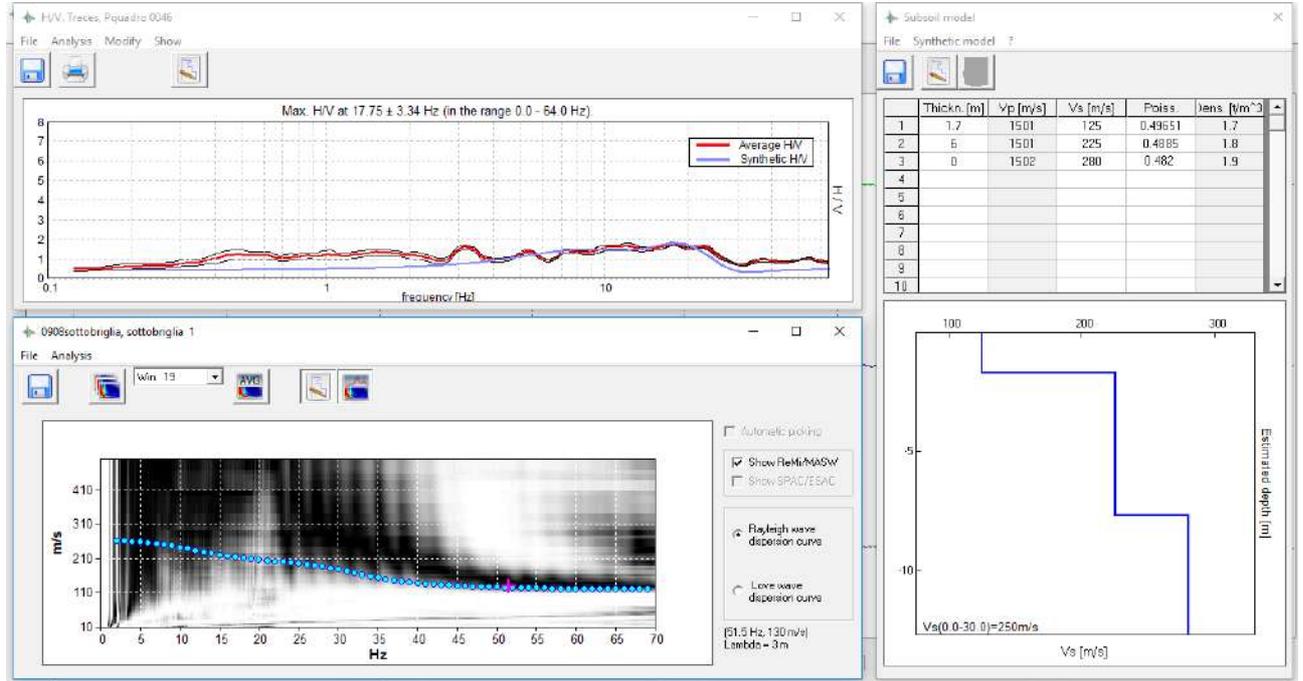
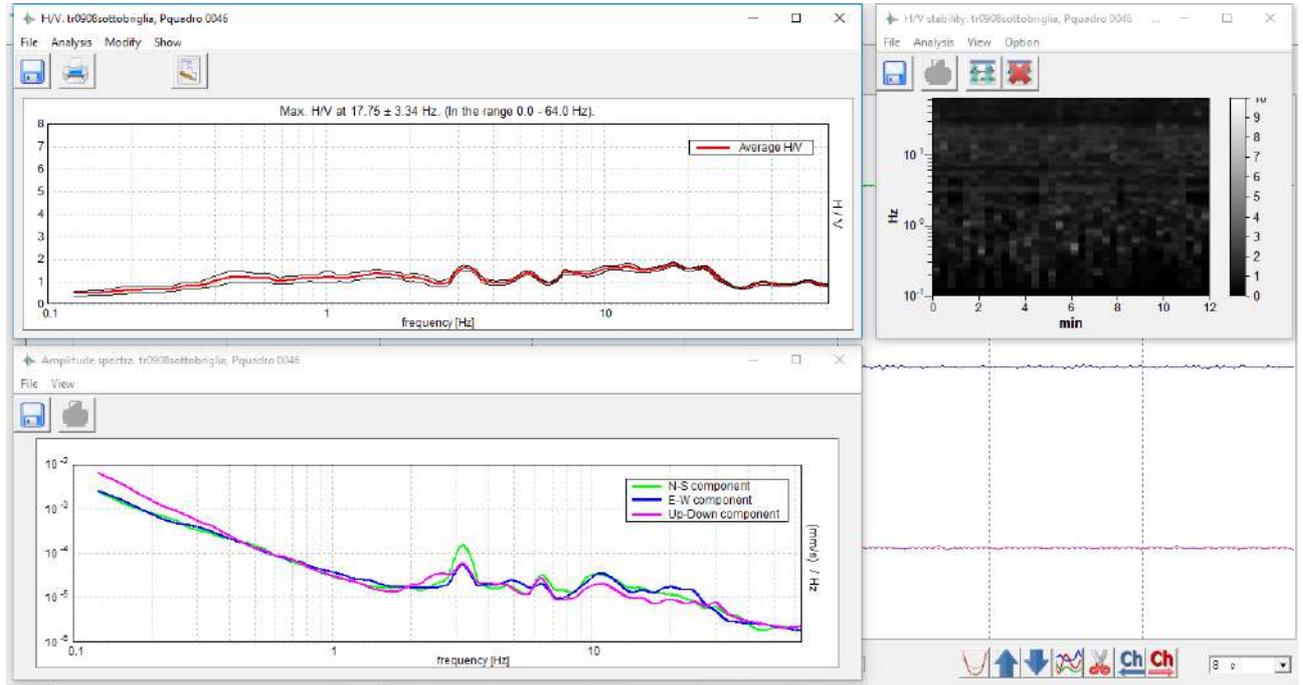


10/07/2018

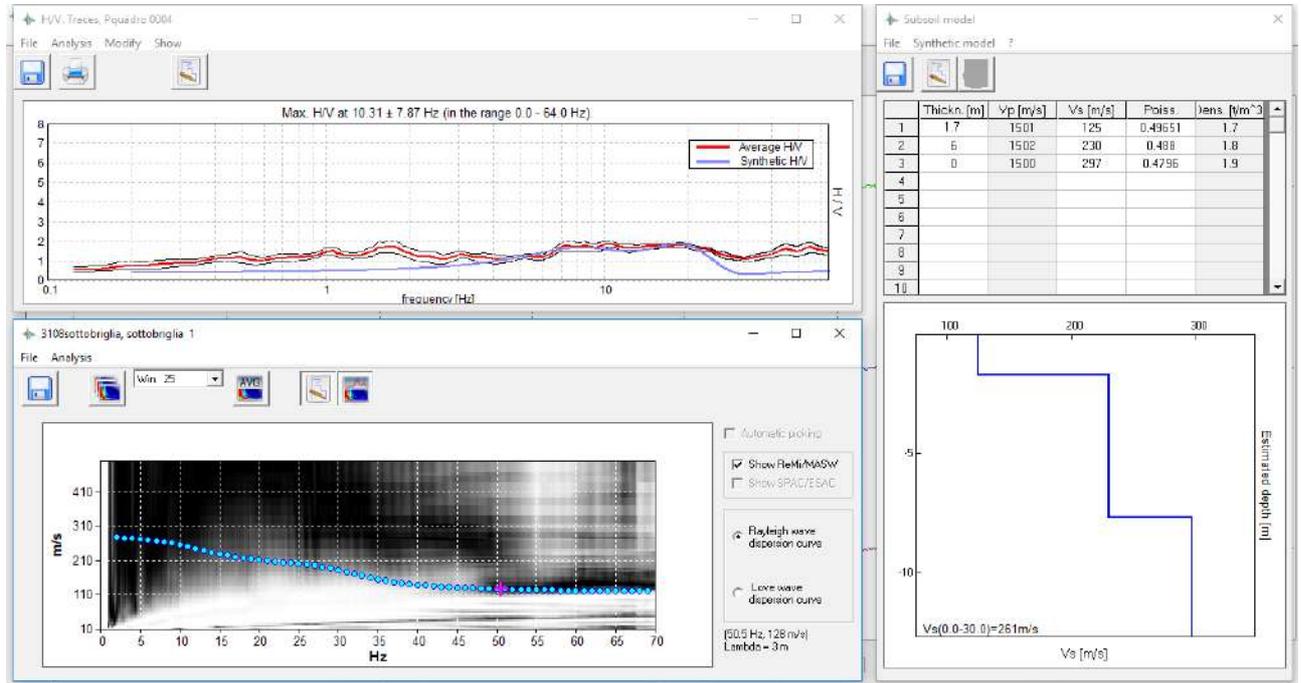
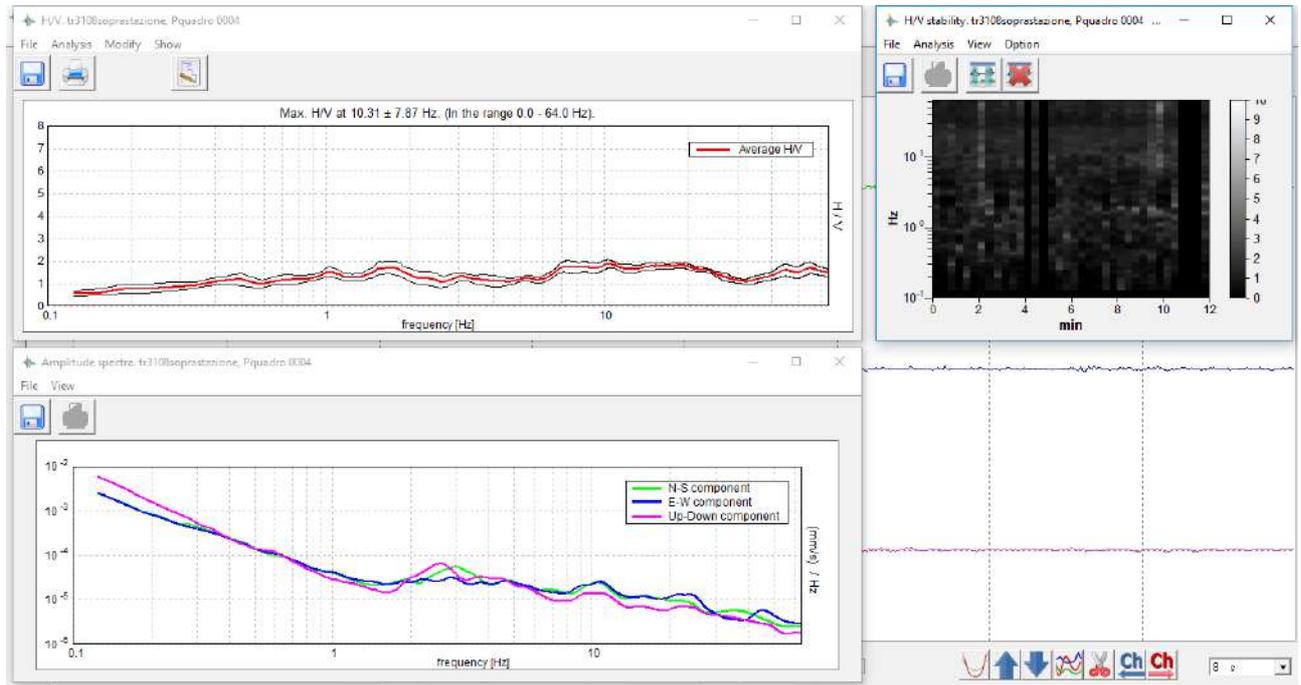


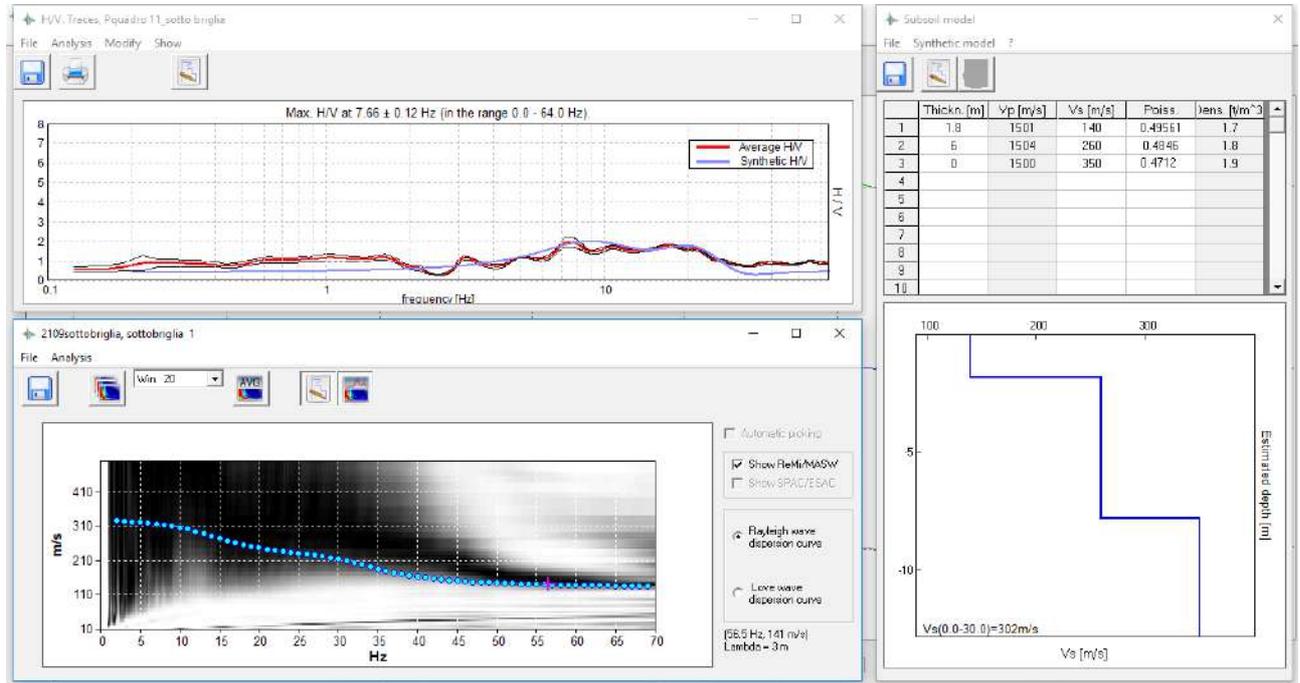
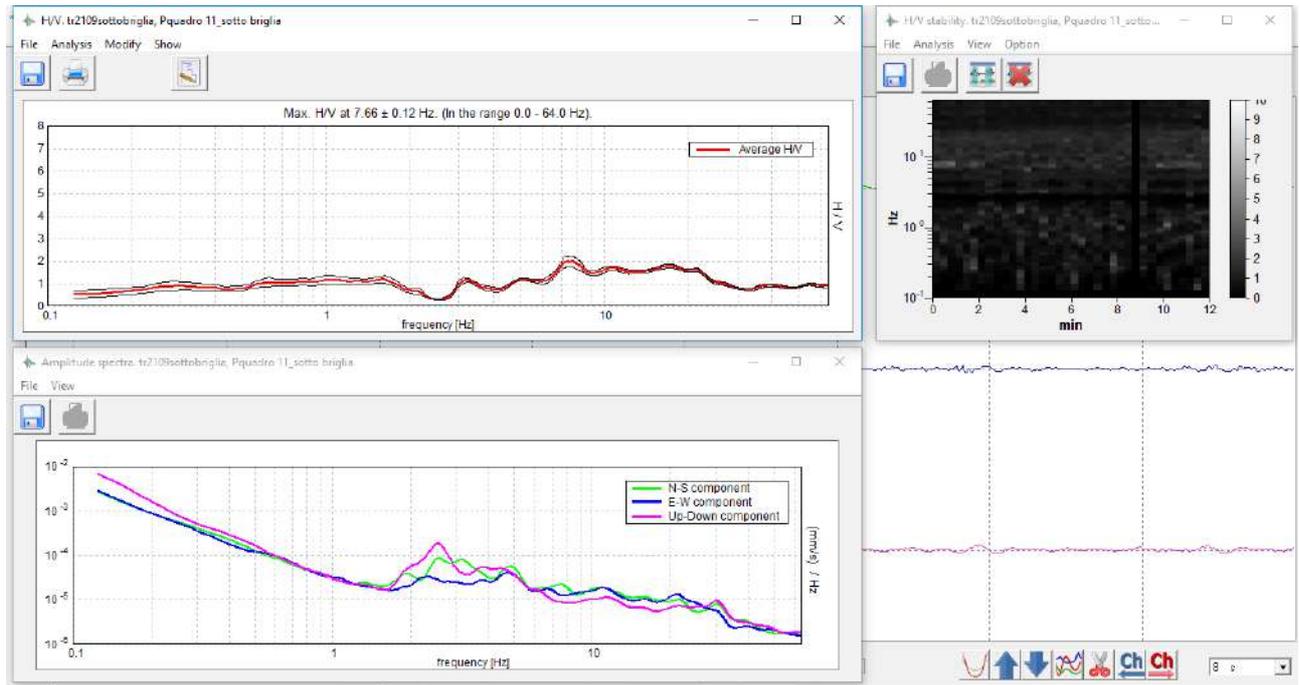


9/08/2018

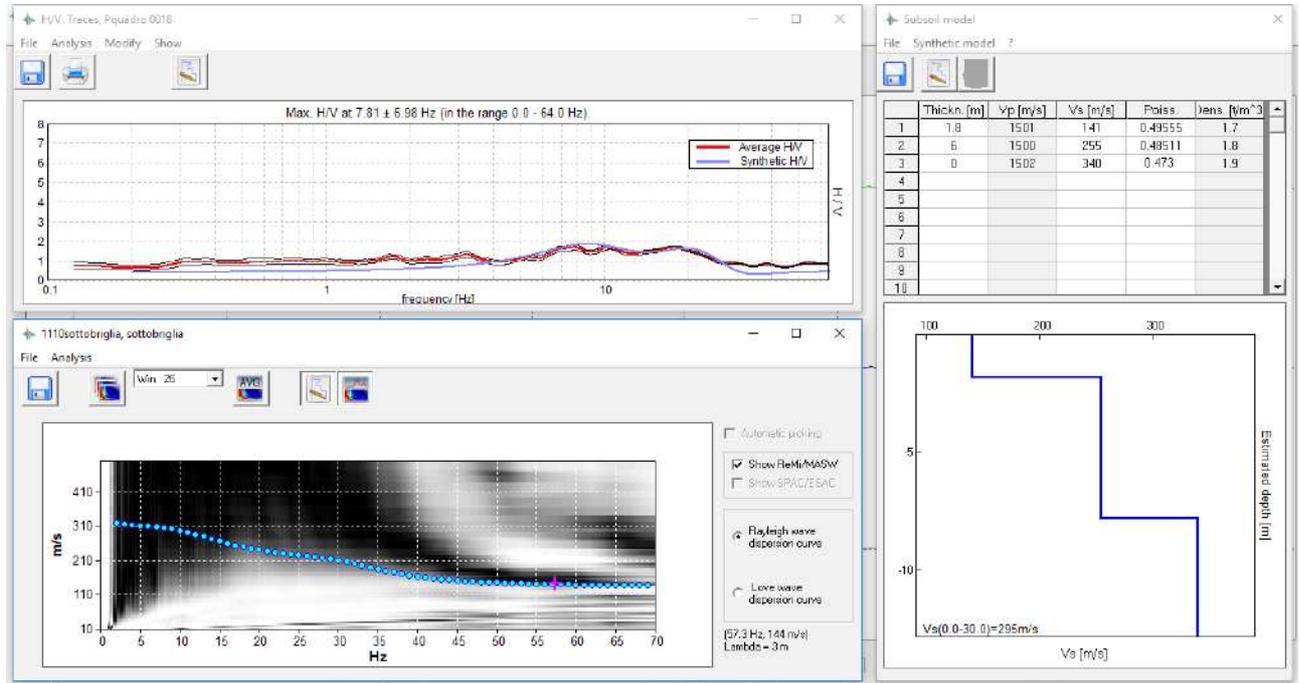
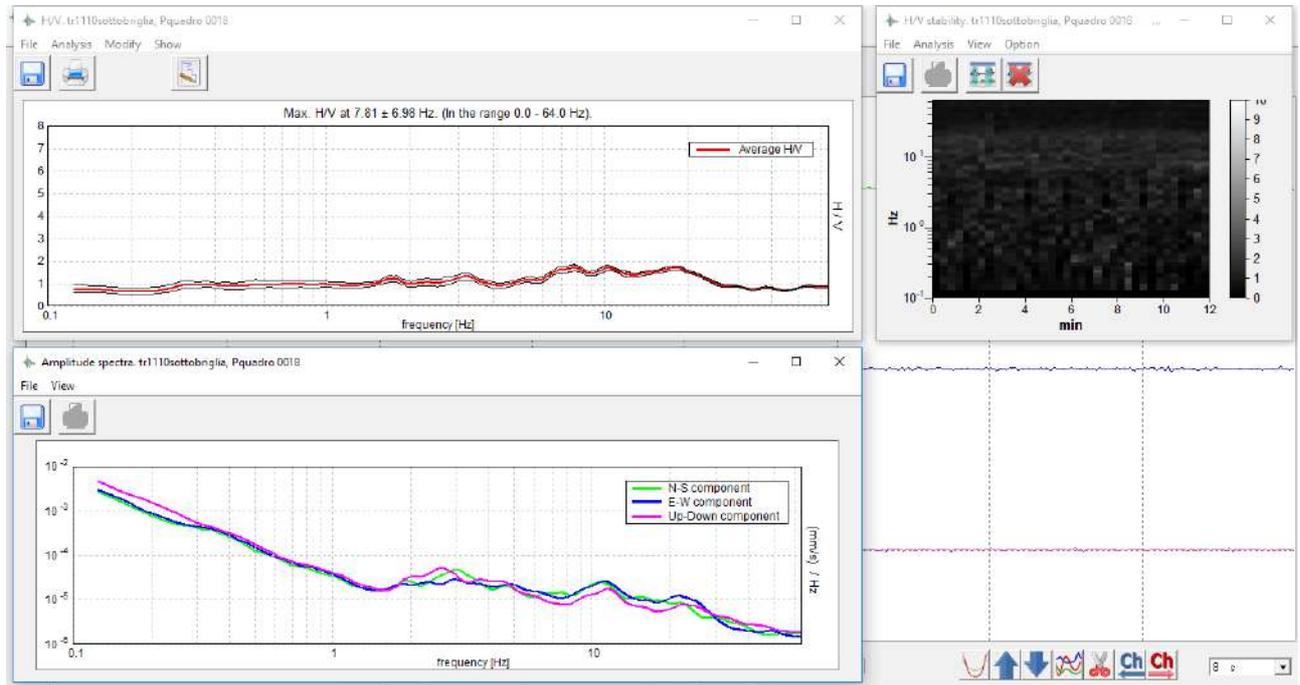


31/08/2018

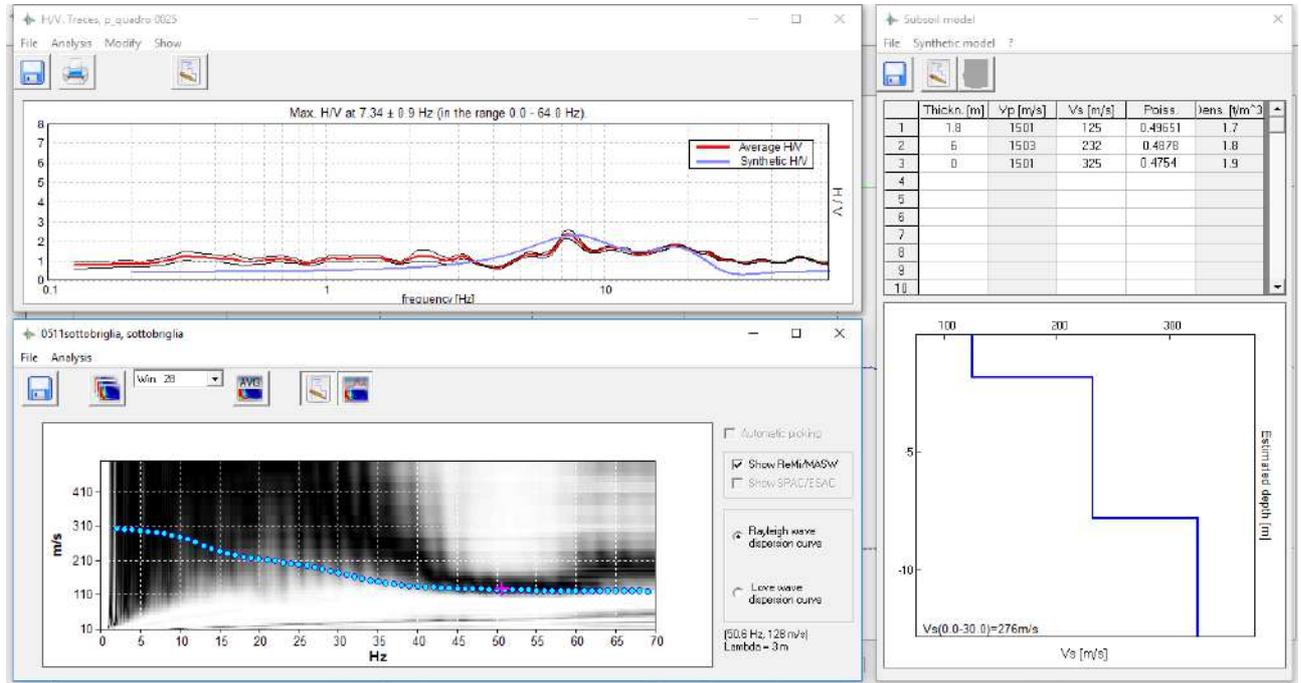
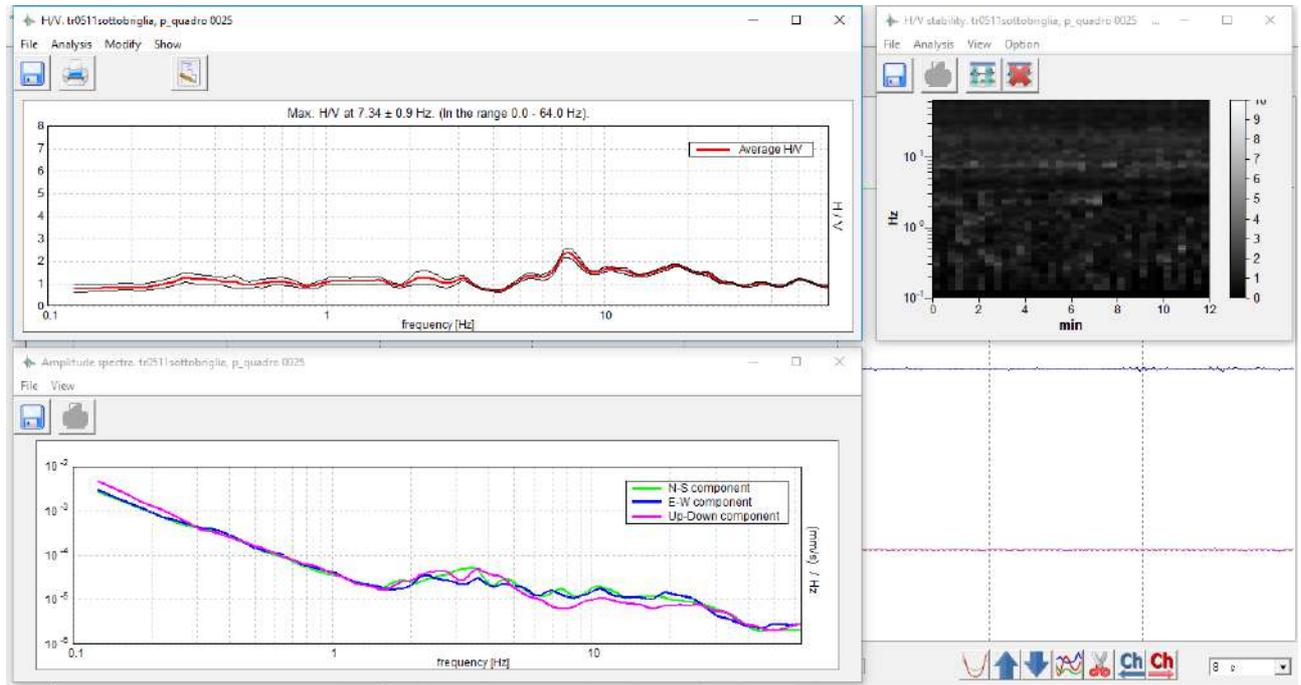




11/10/2018

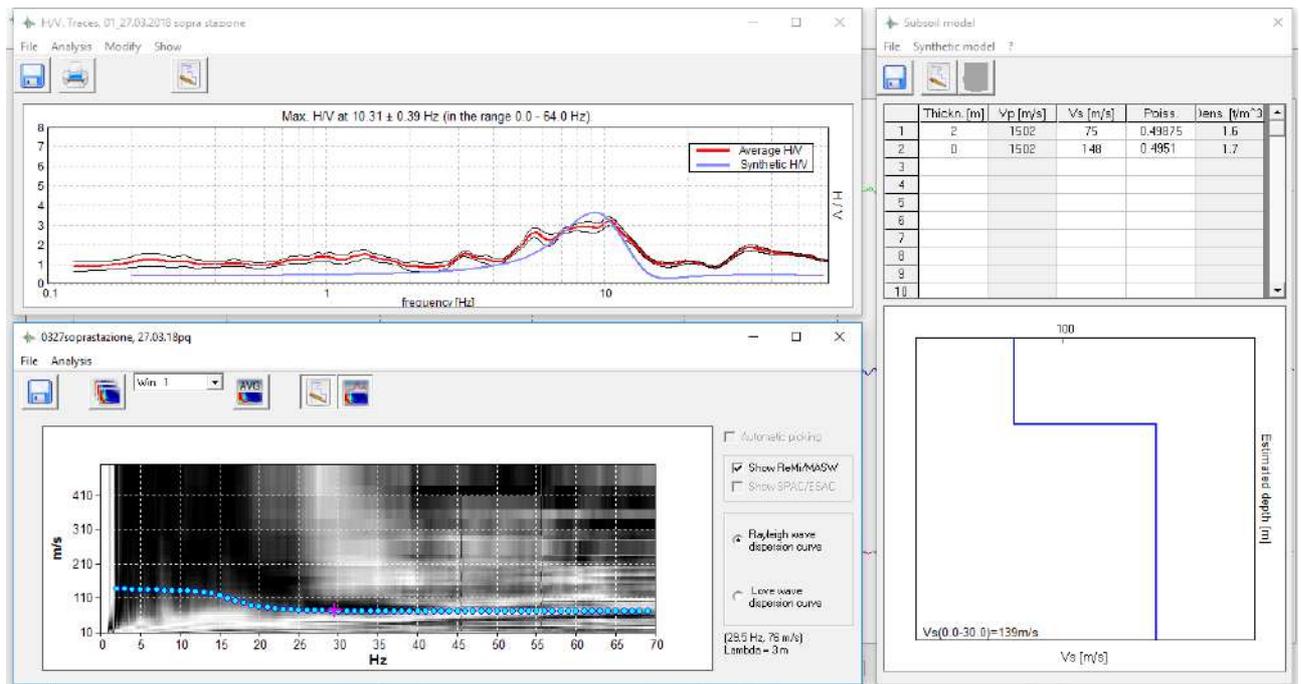
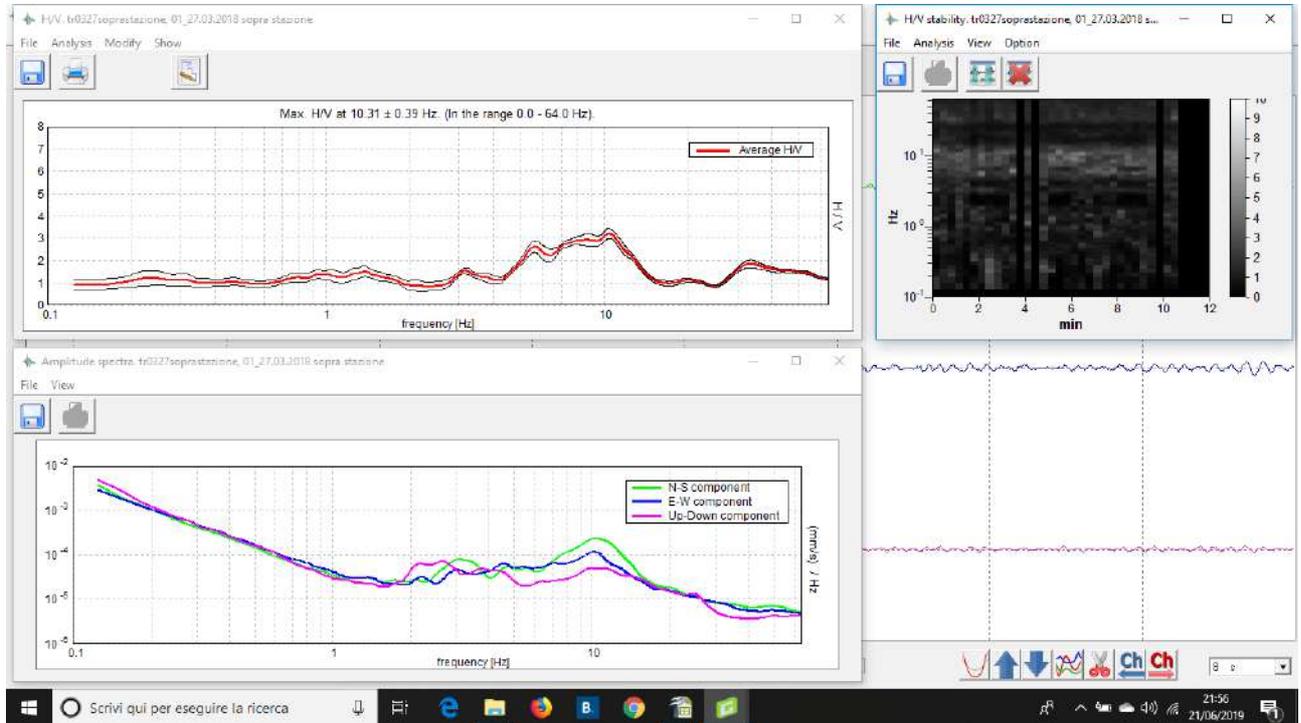


5/11/2018

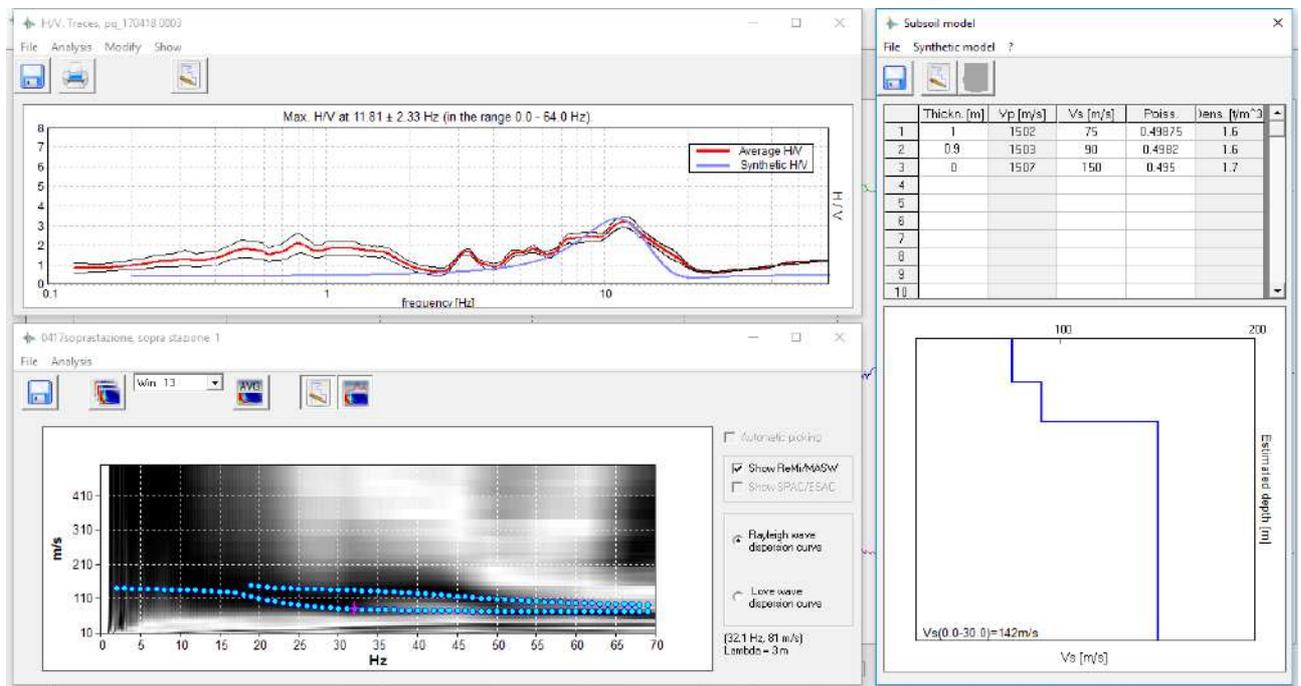
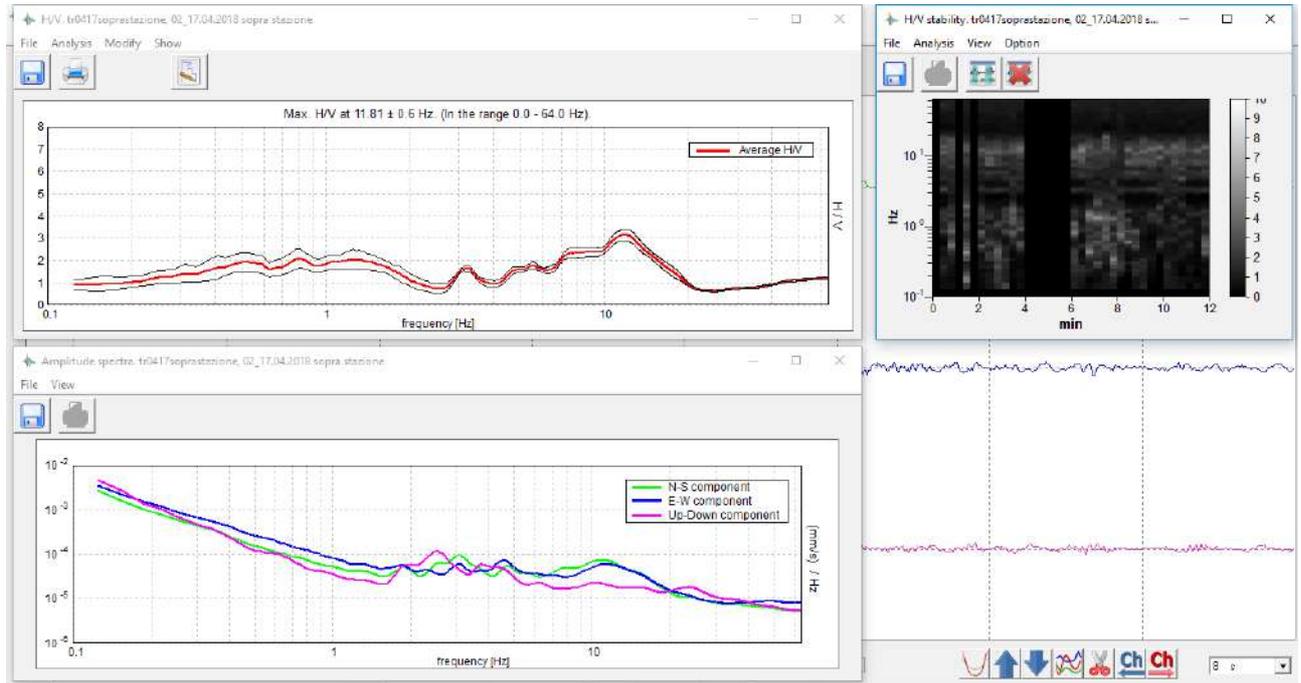


# ALLEGATO 5: SOPRA STAZIONE

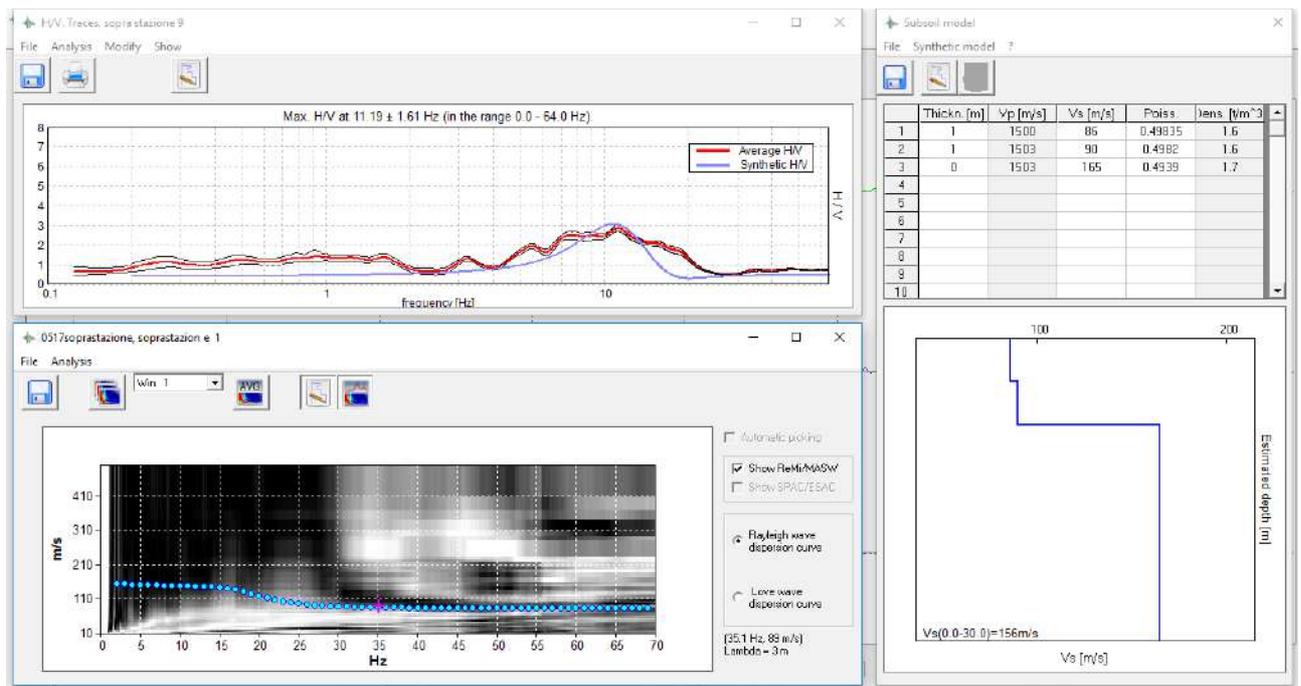
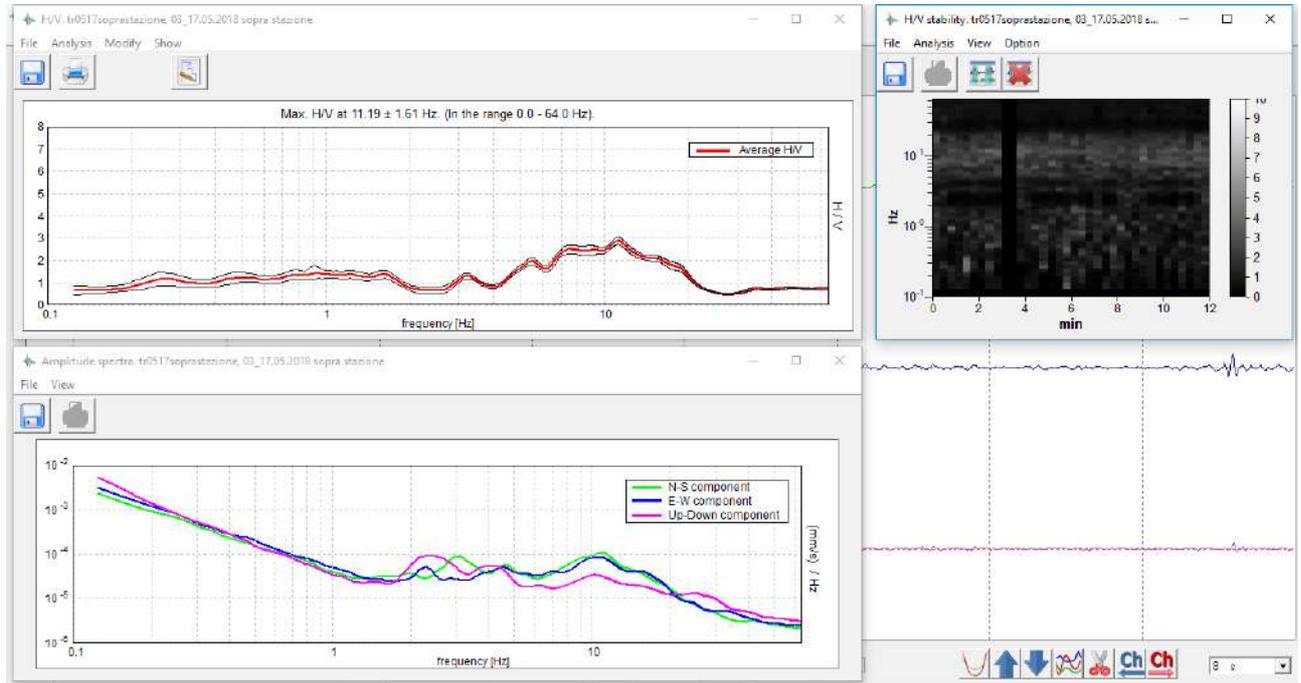
27/03/2018



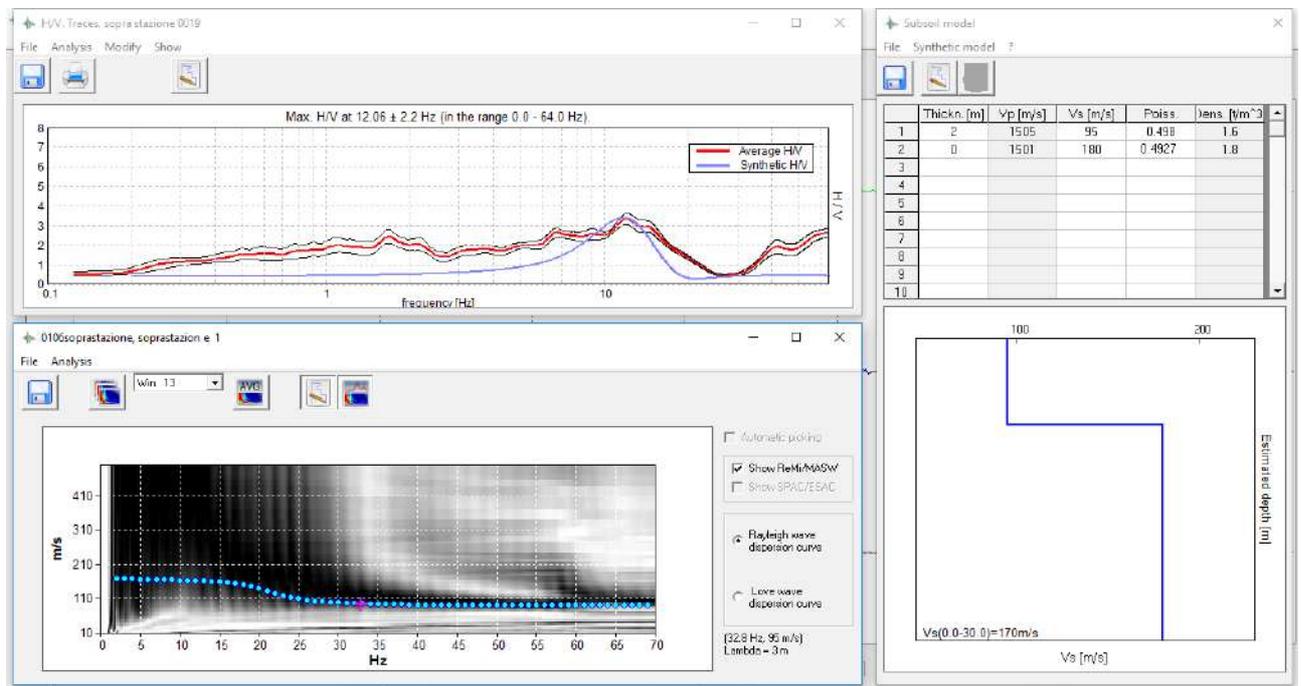
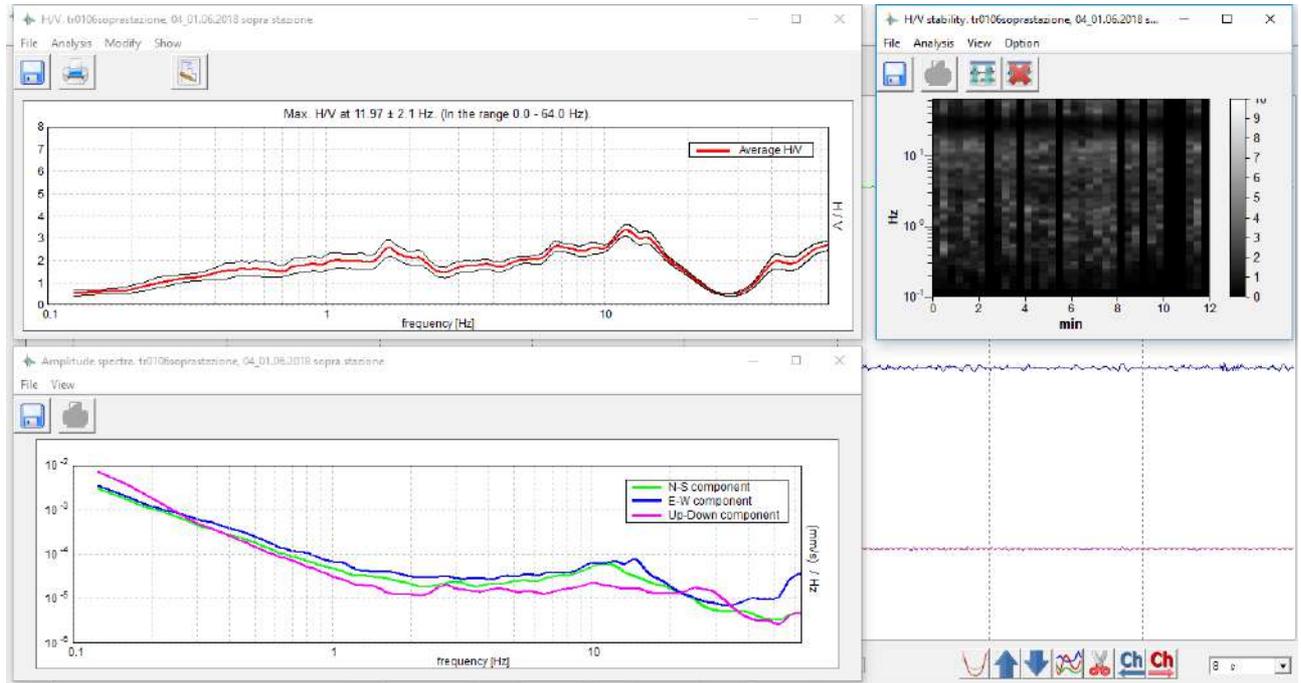
17/04/2018



17/05/2018

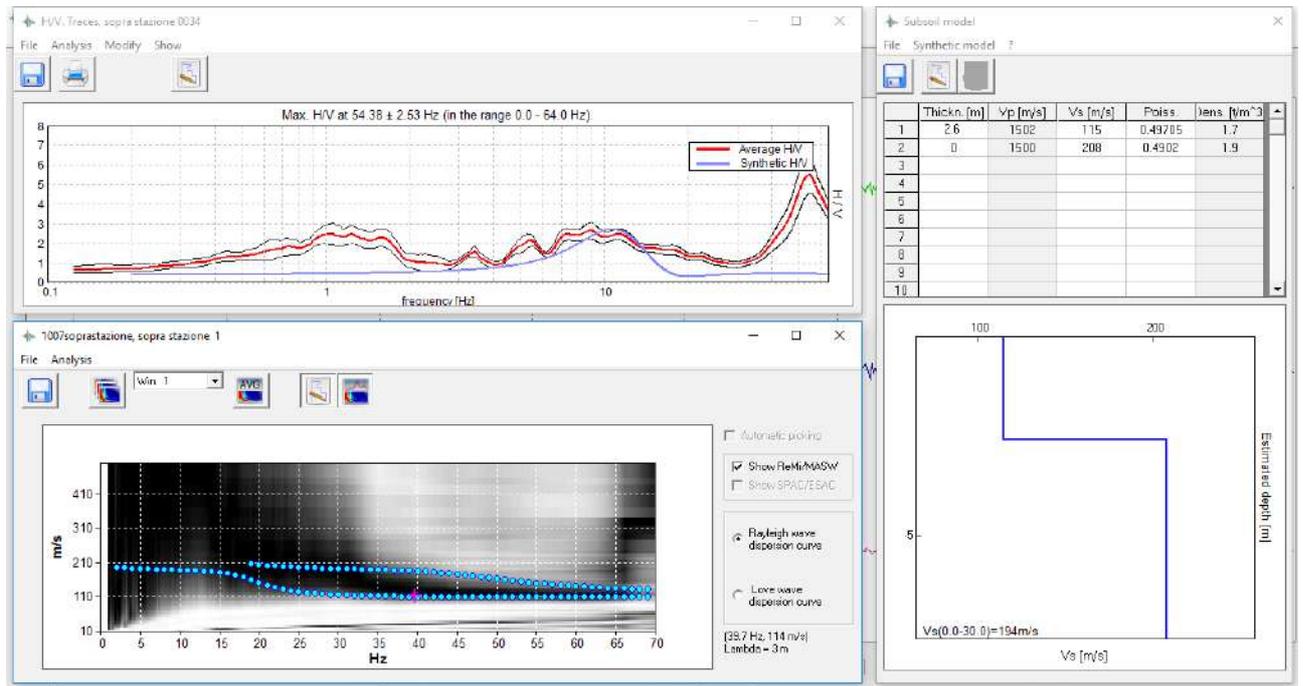
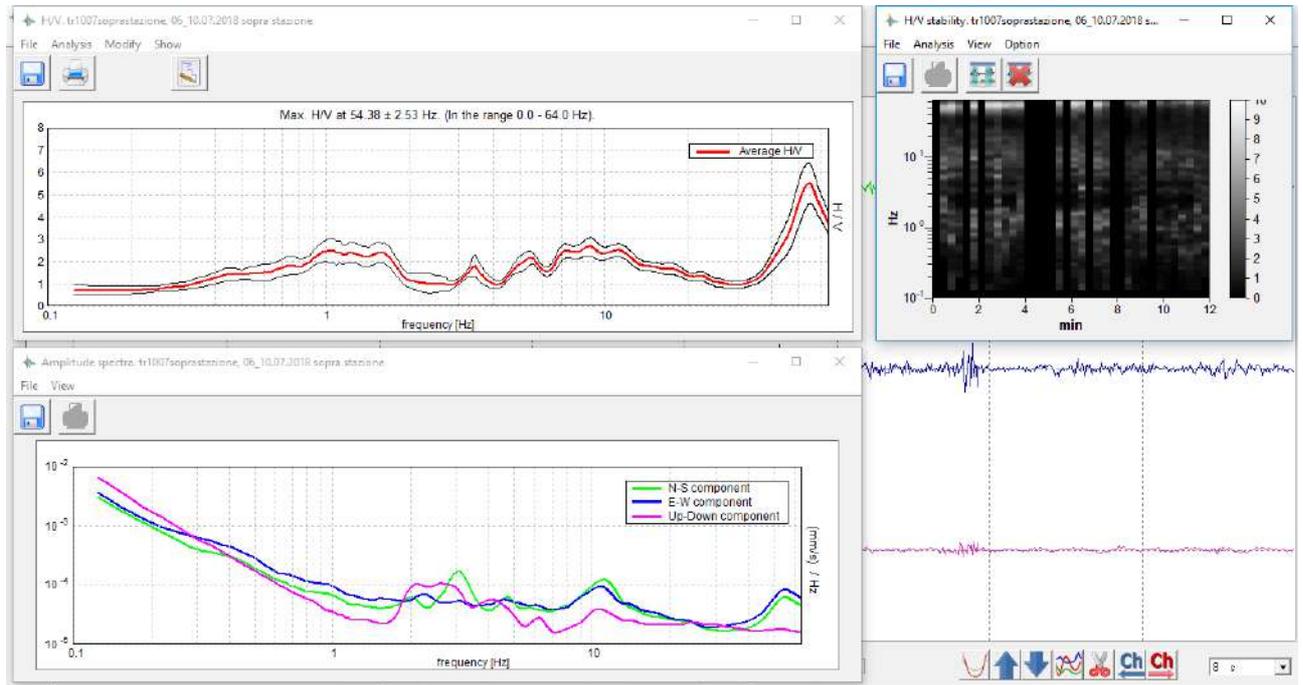


1/06/2018

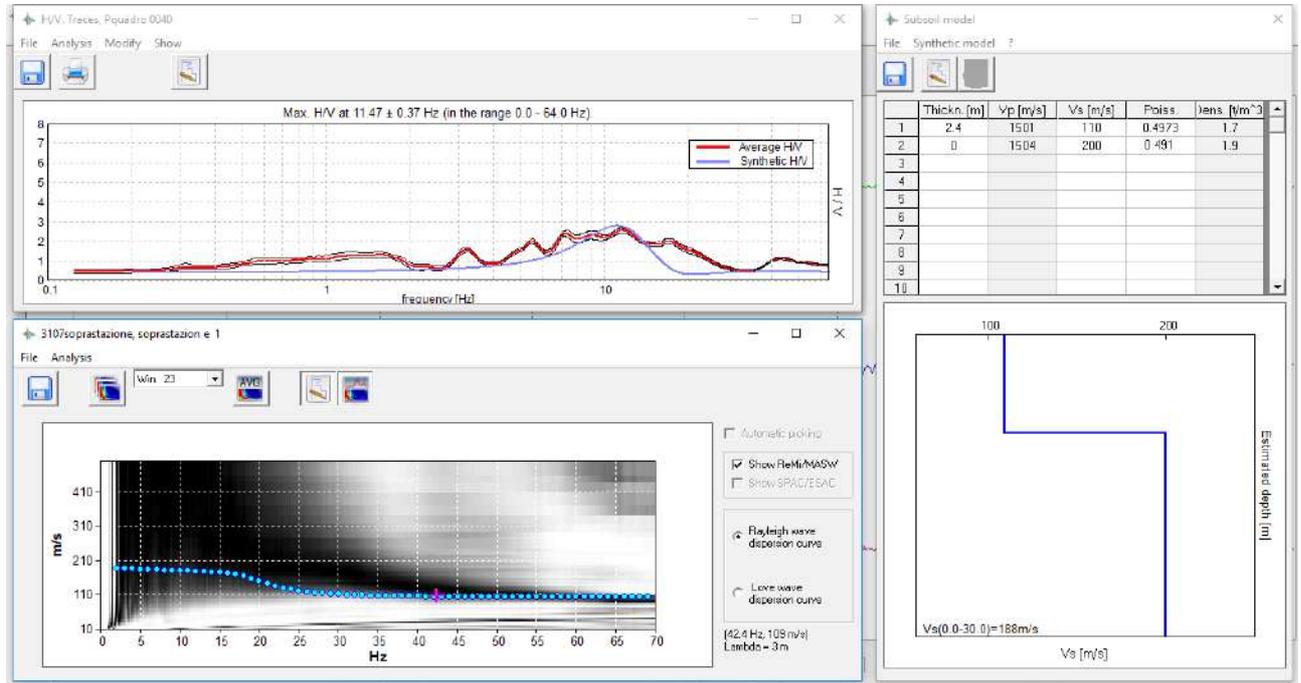
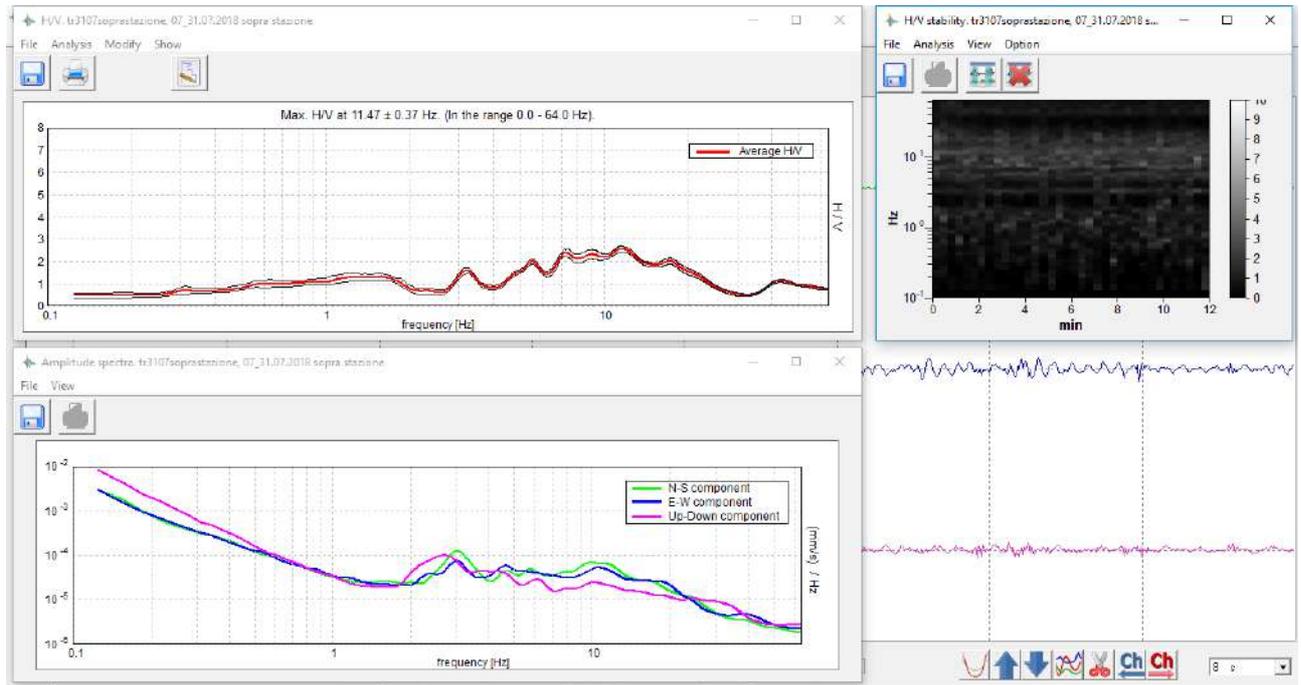




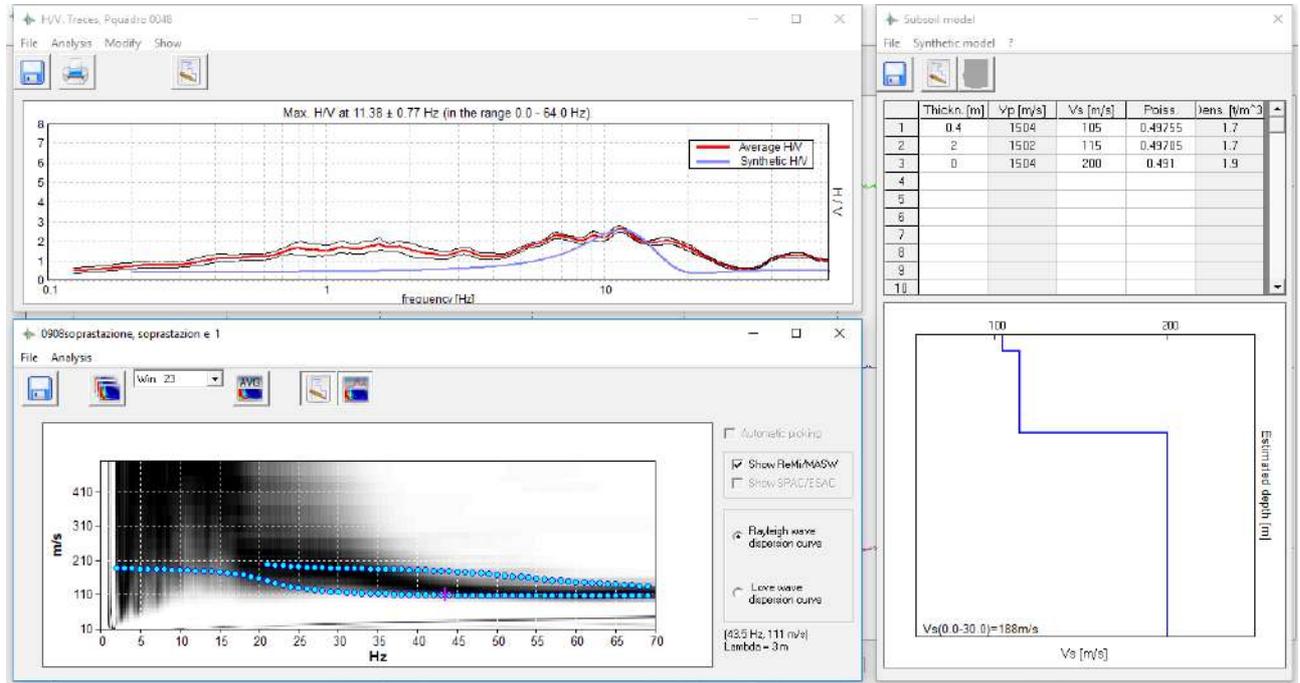
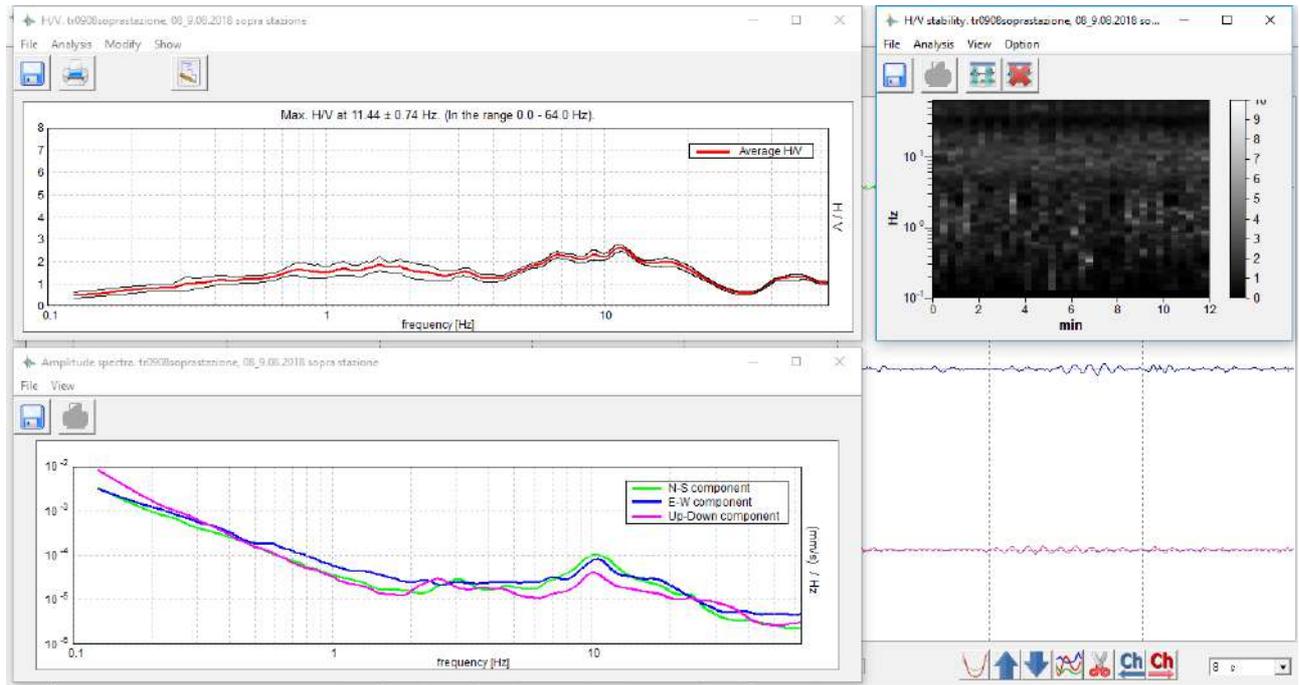
10/07/2018



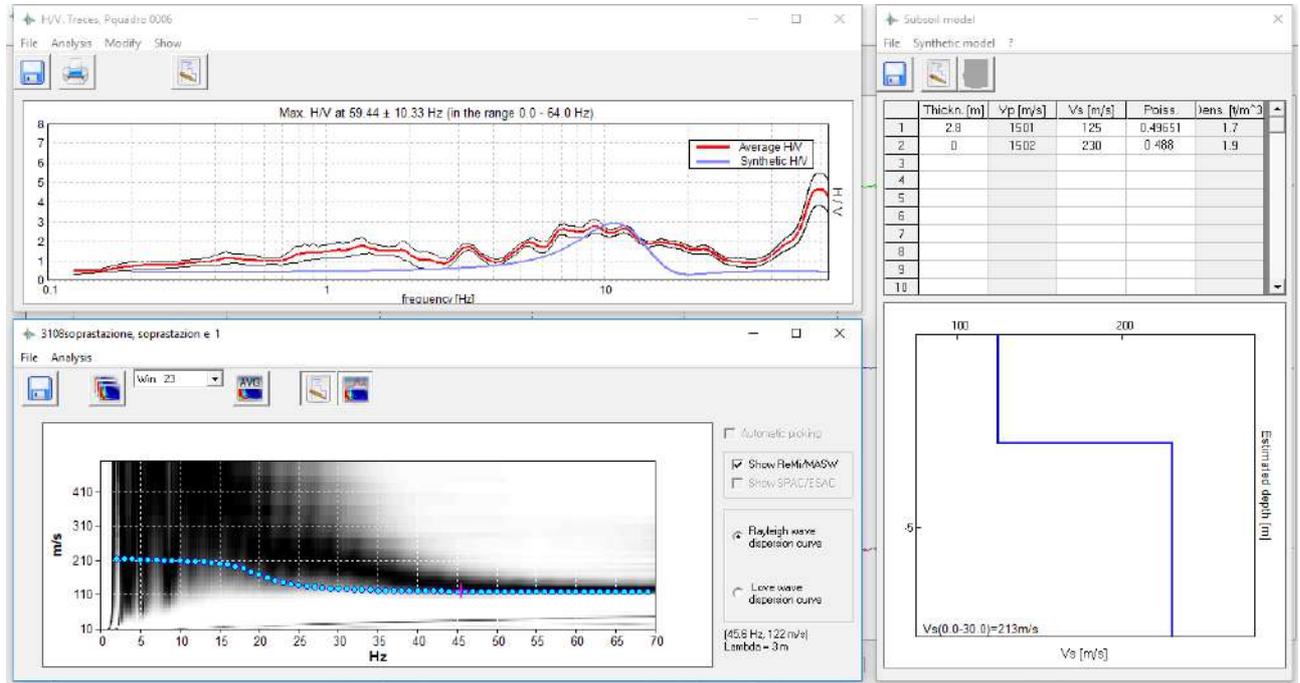
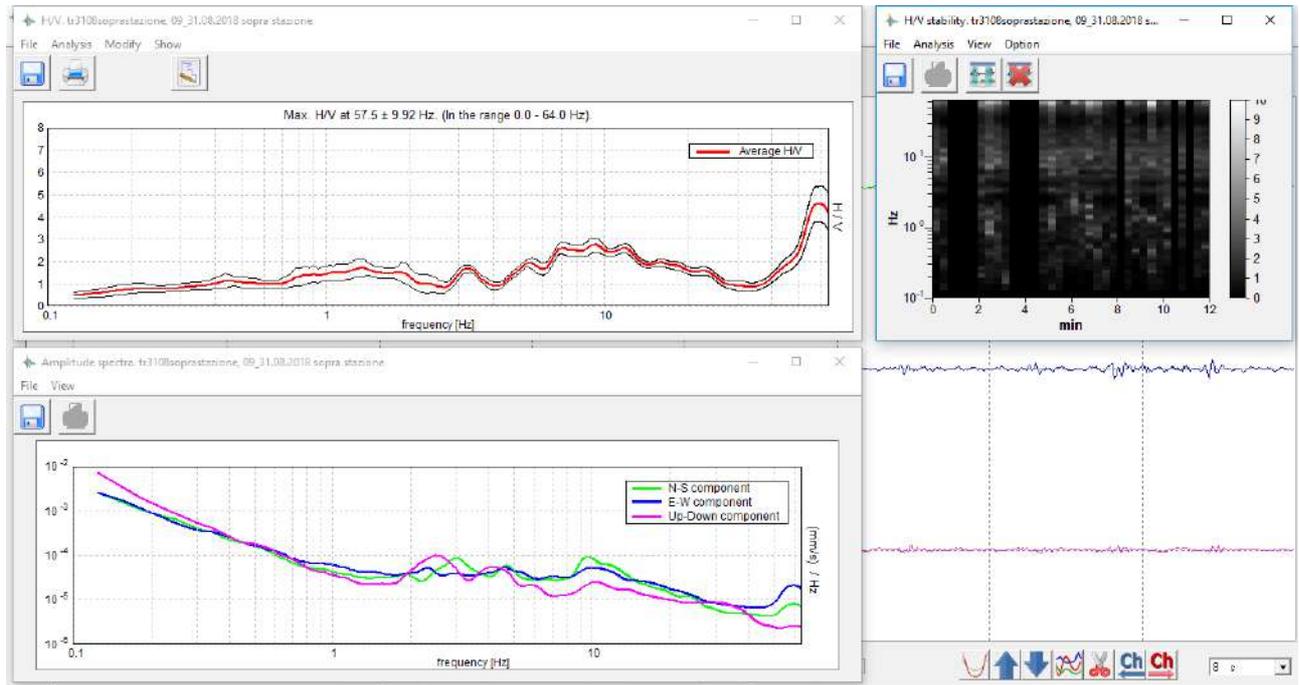
31/07/2018



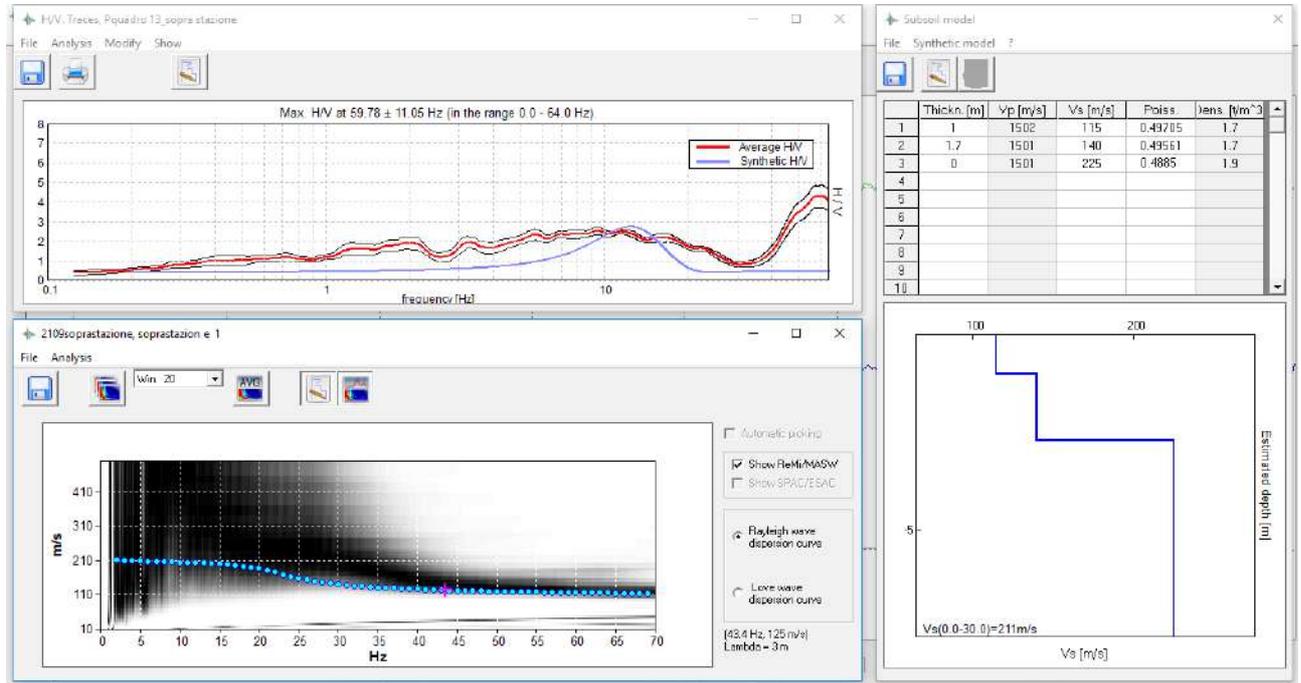
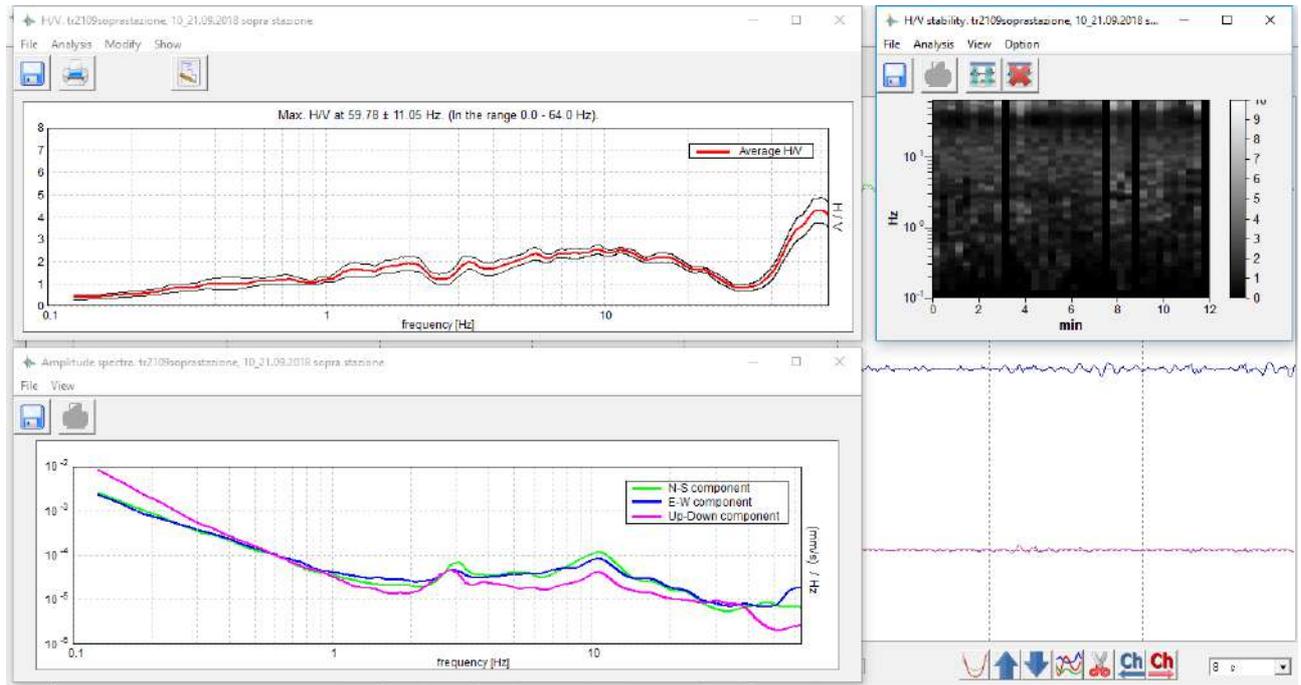
9/08/2018



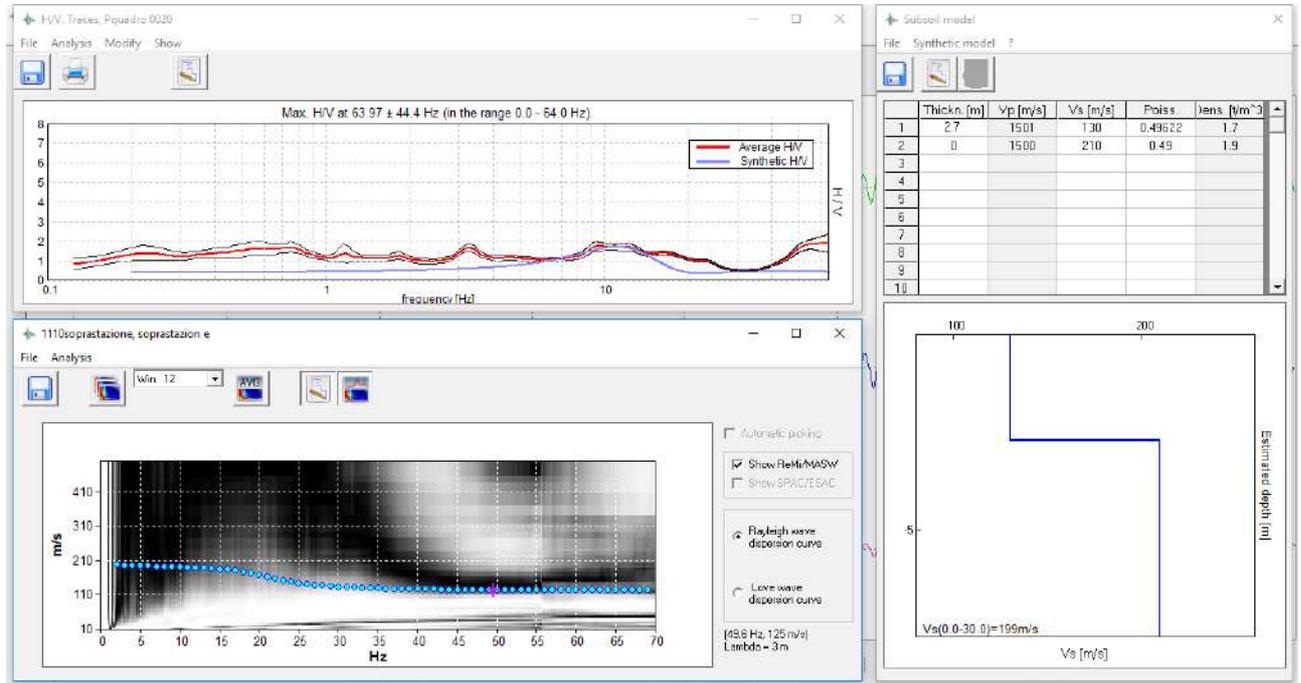
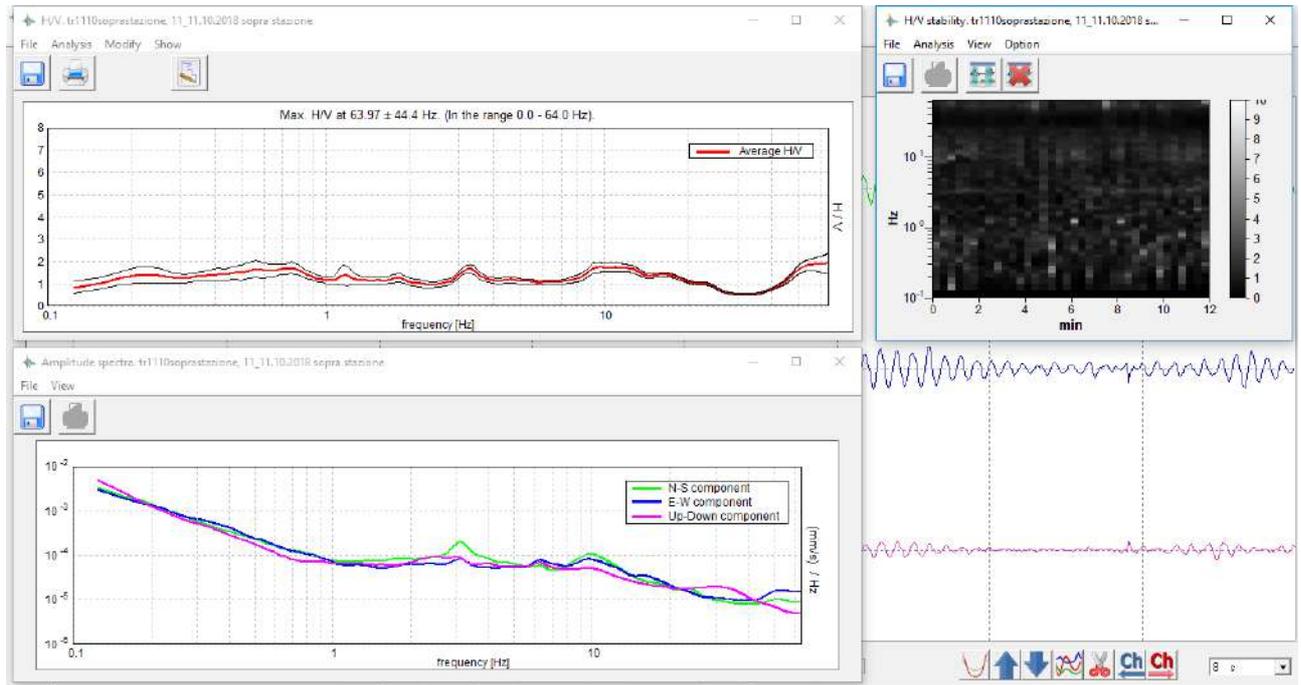
31/08/2018



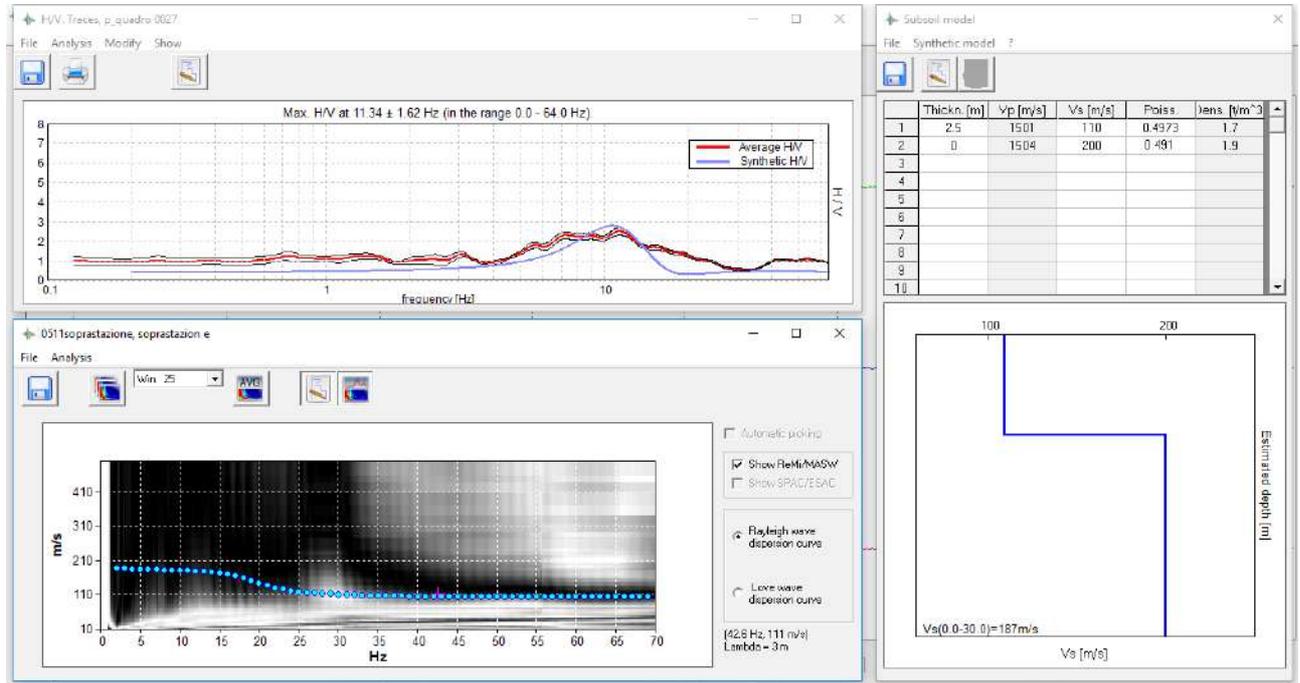
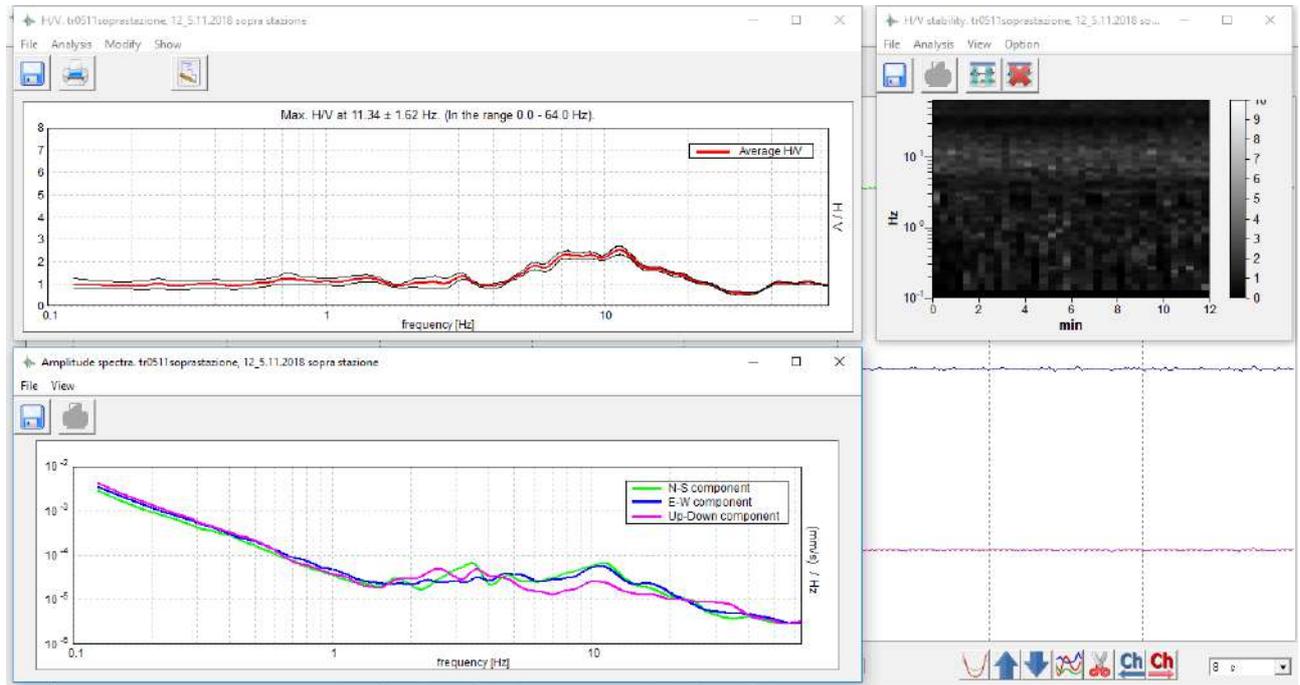
21/09/2018



11/10/2018

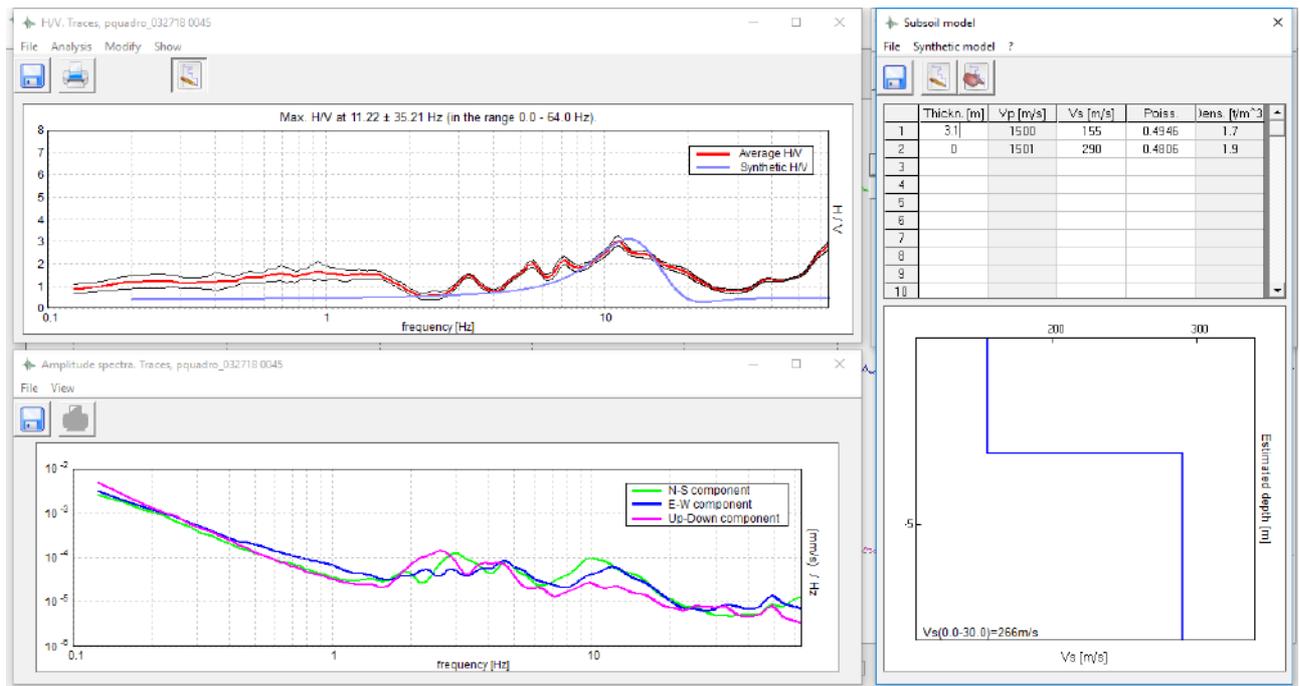
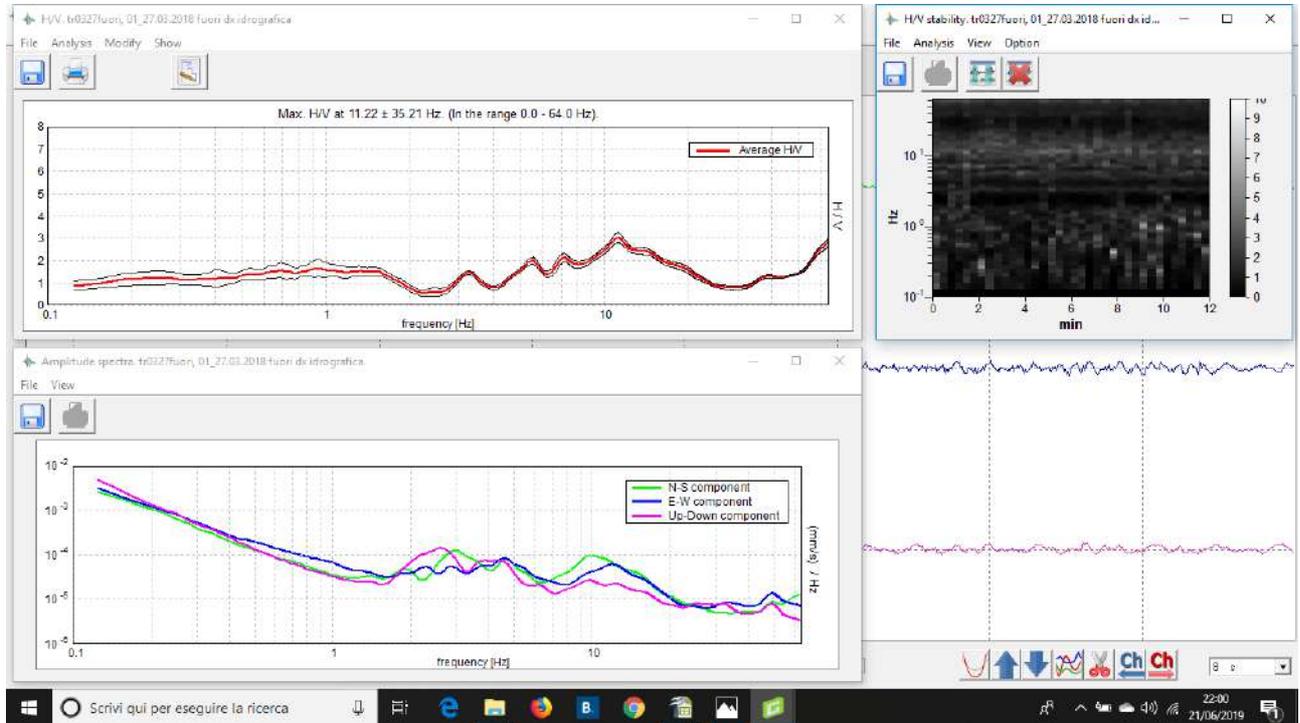


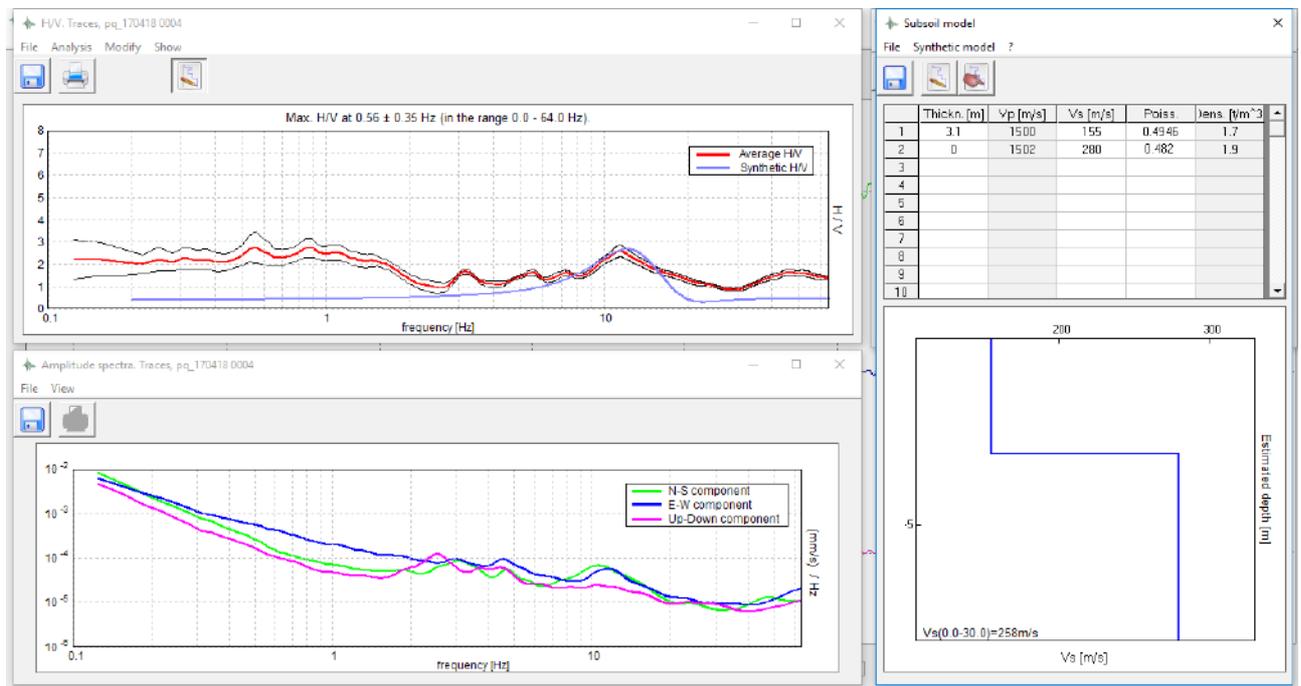
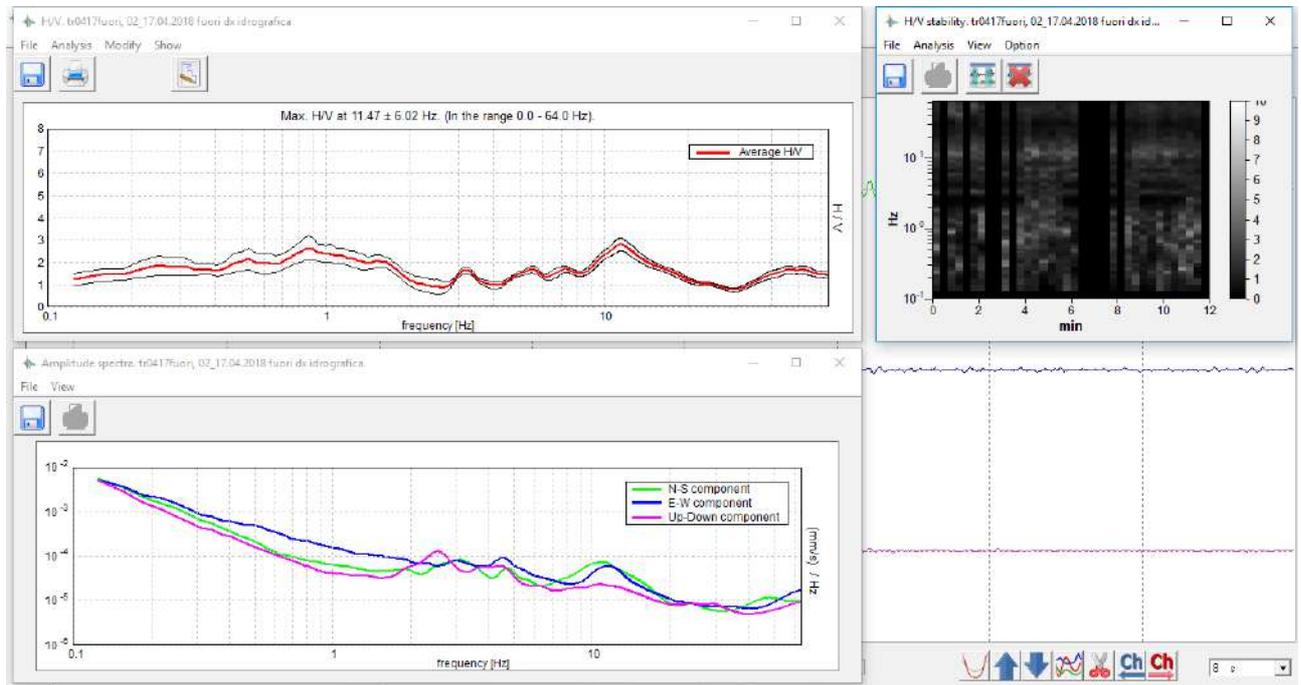
5/11/2018



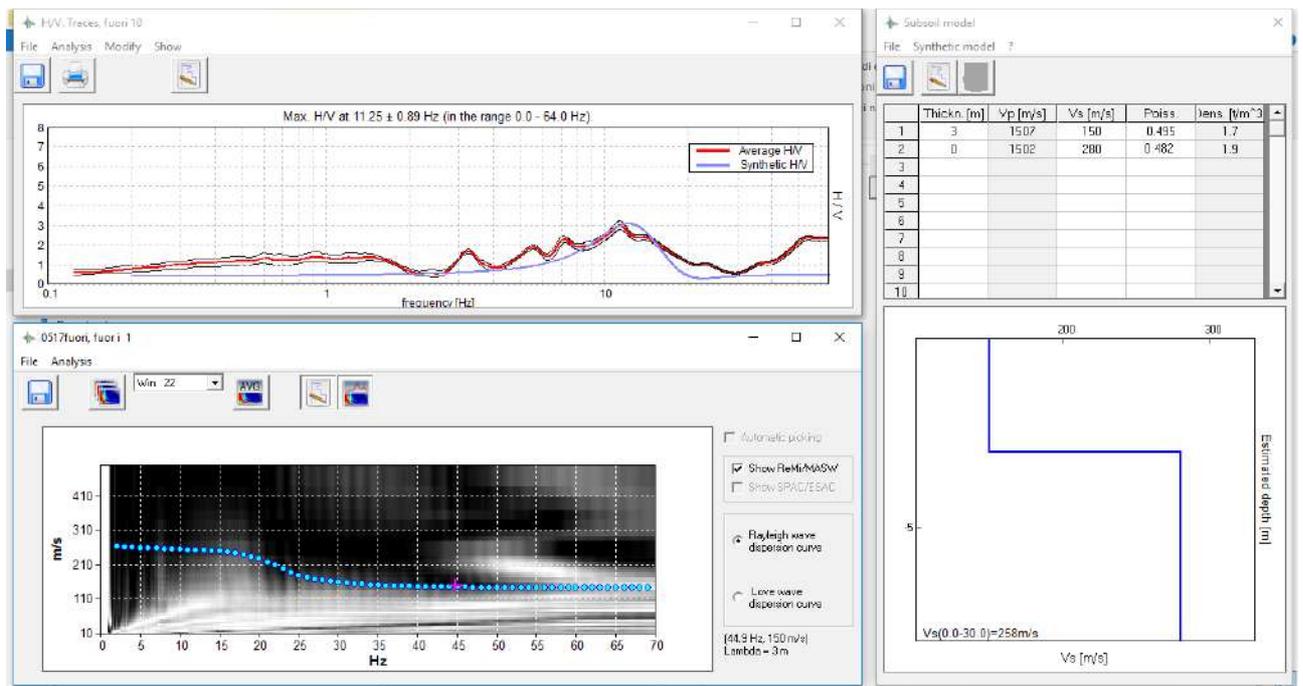
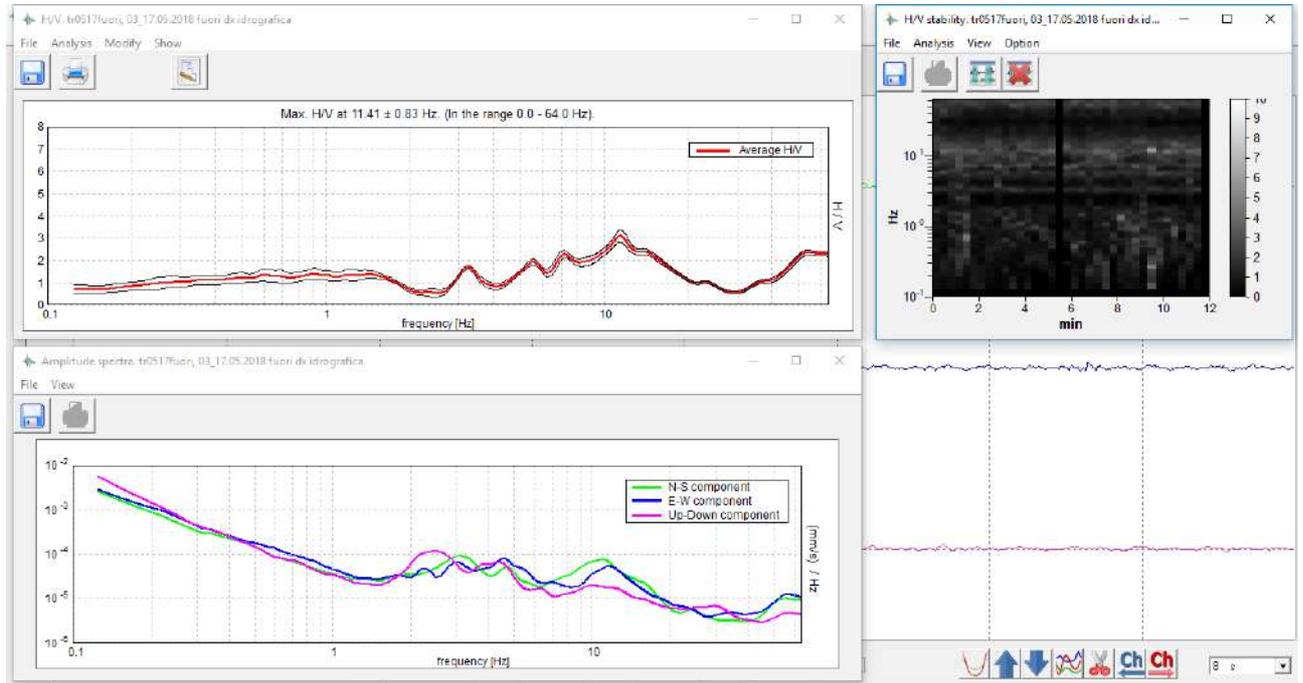
# ALLEGATO 6: FUORI DESTRA IDROGRAFICA

27/03/2018

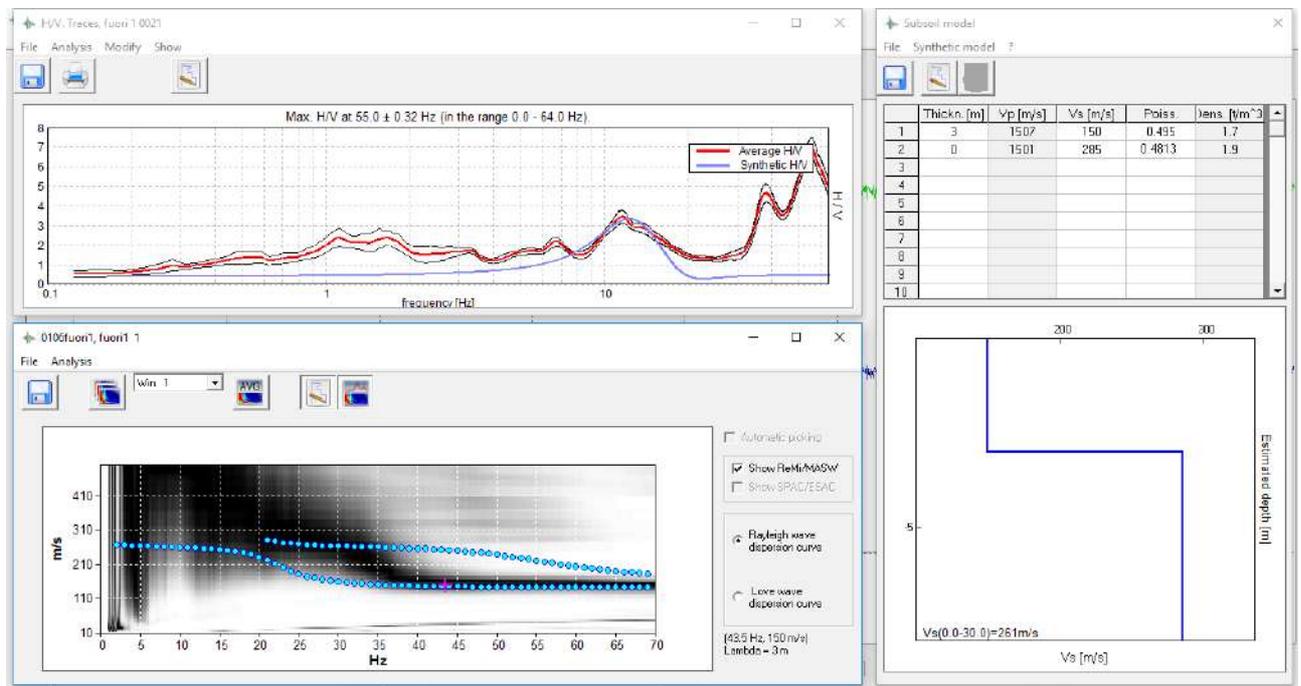
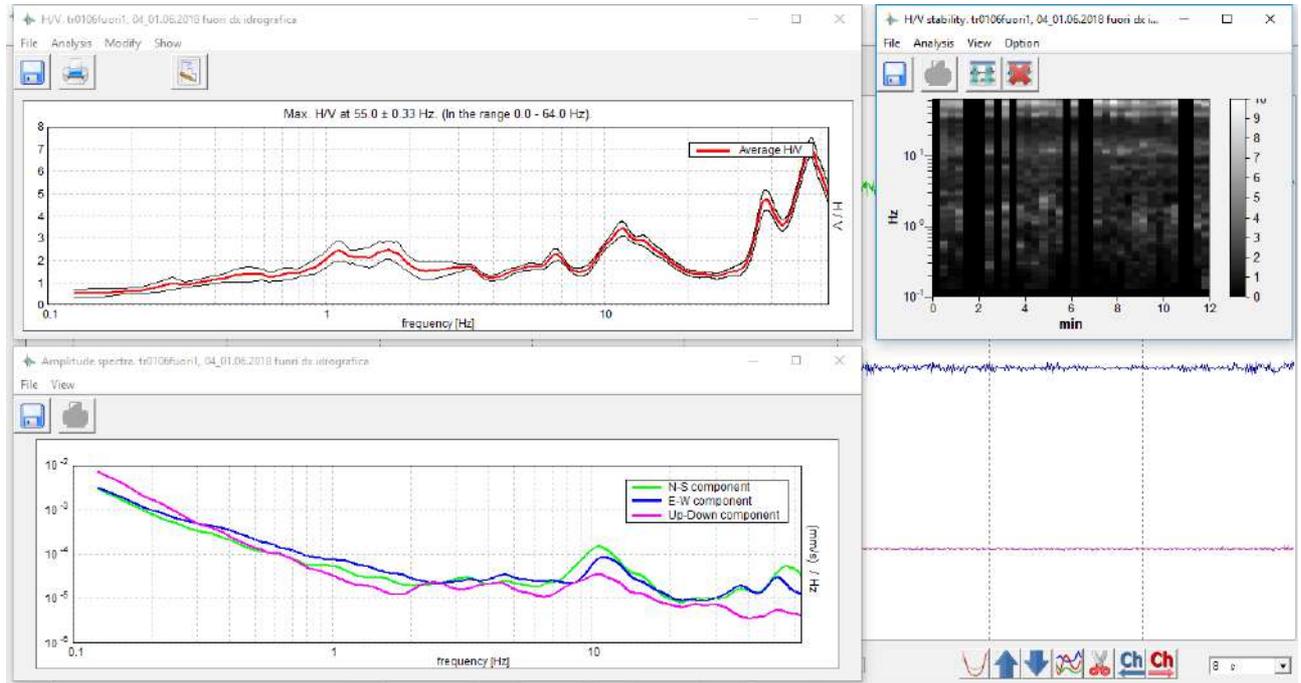




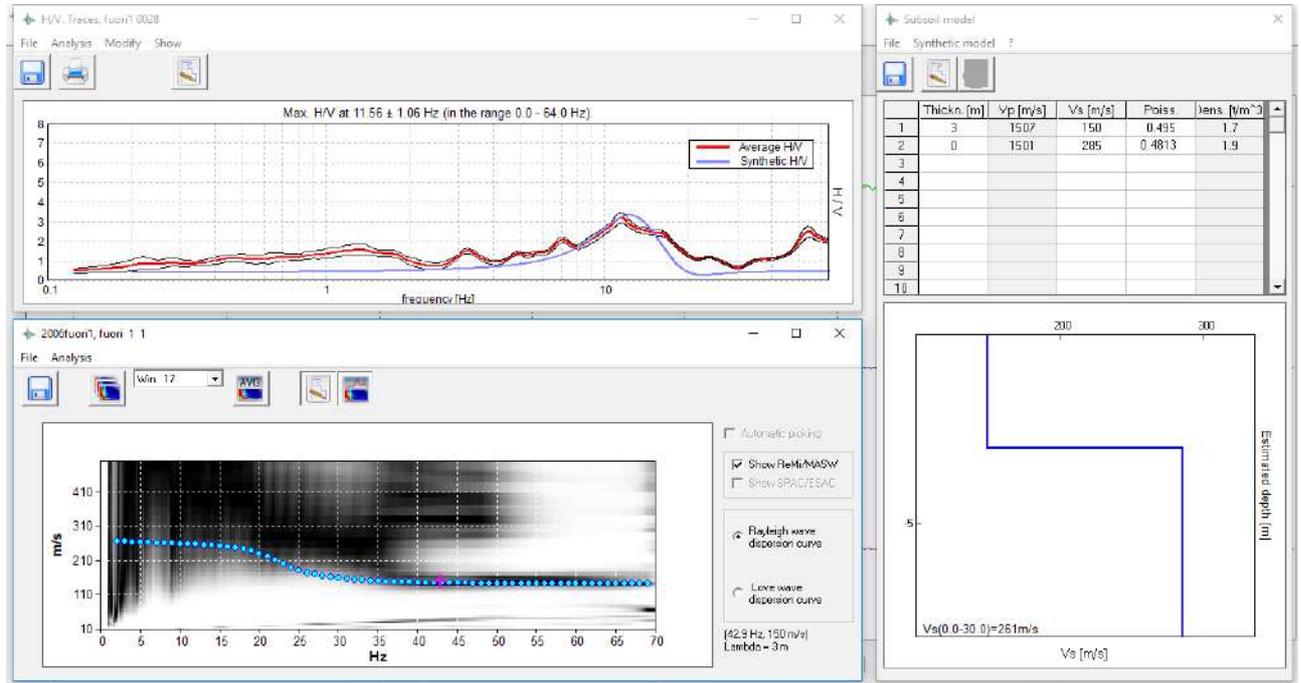
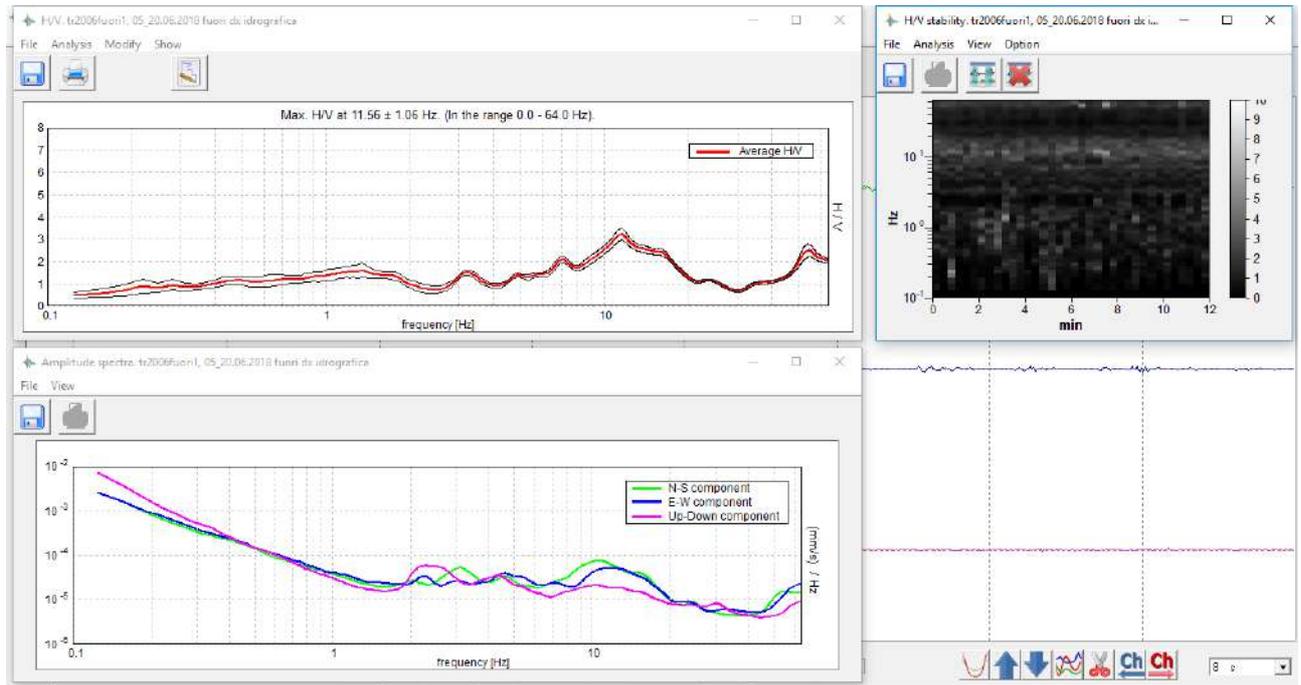
17/05/2018



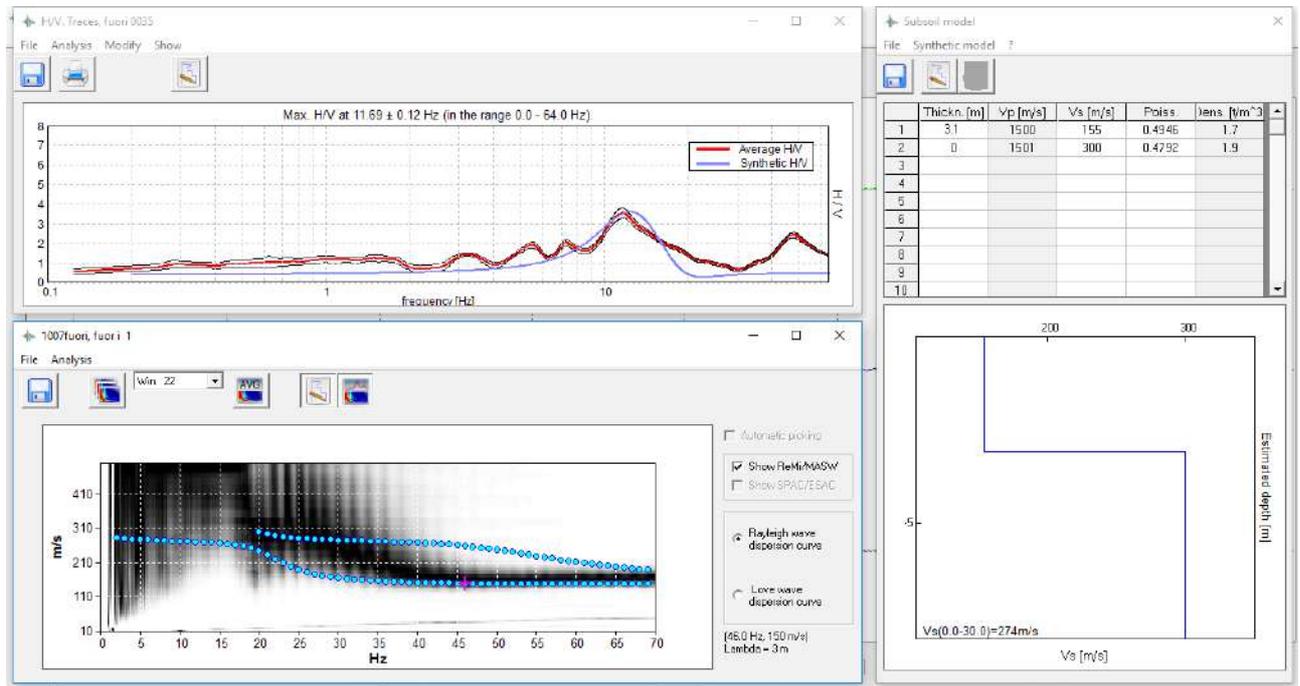
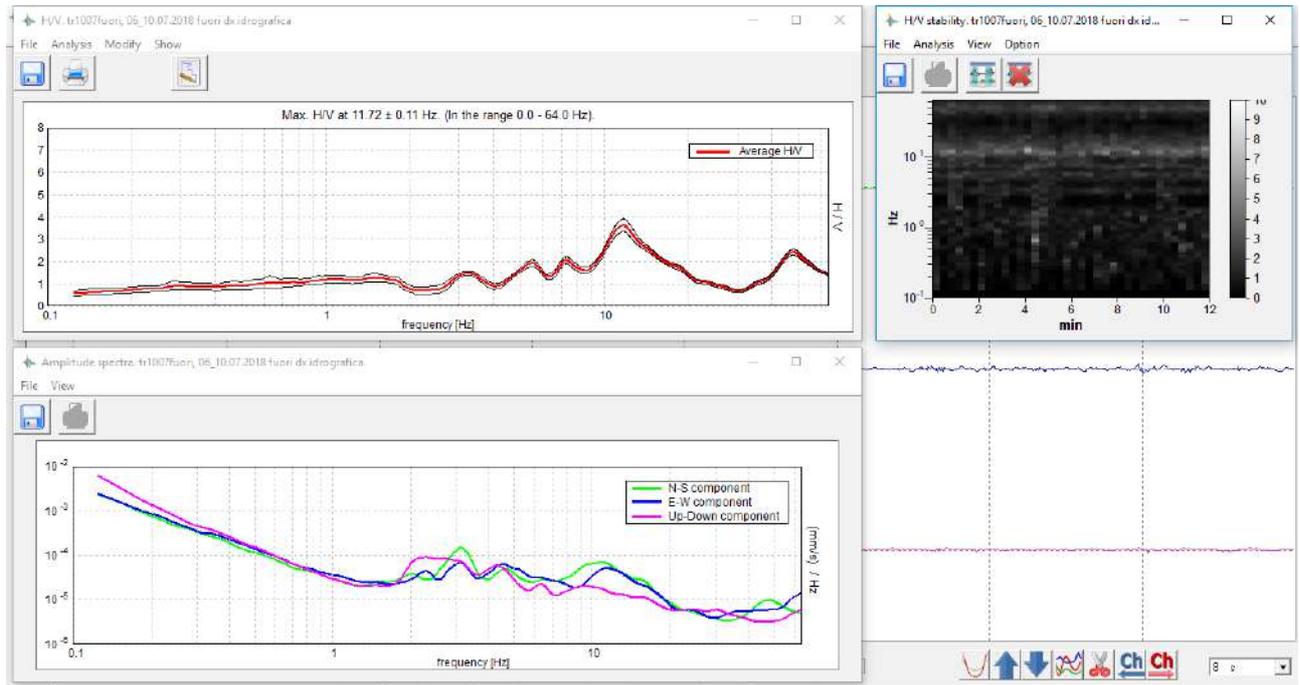
1/06/2018

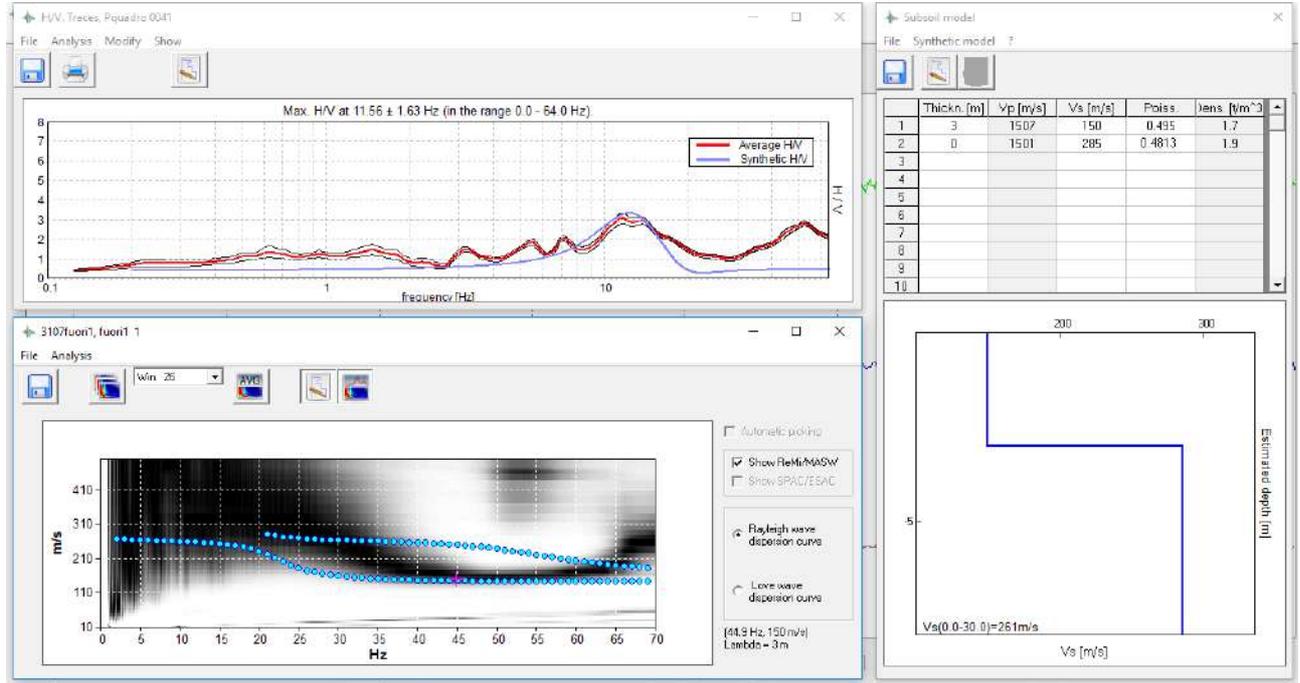
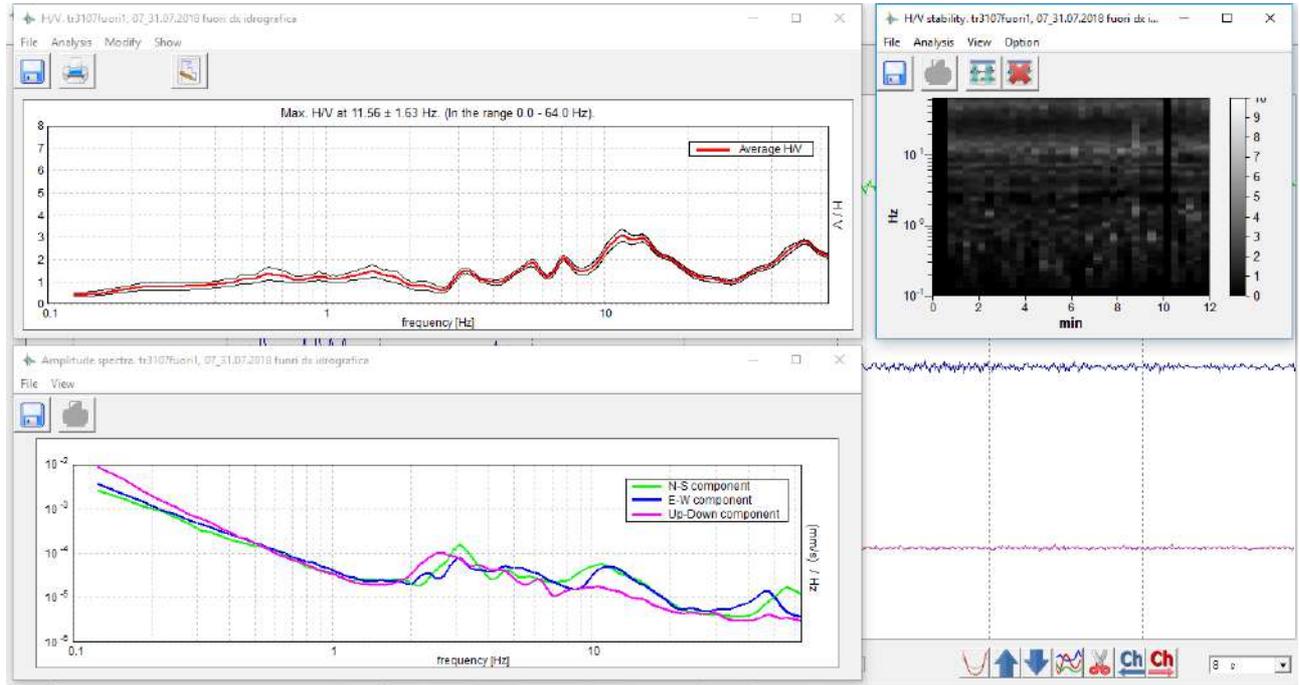


20/06/2018

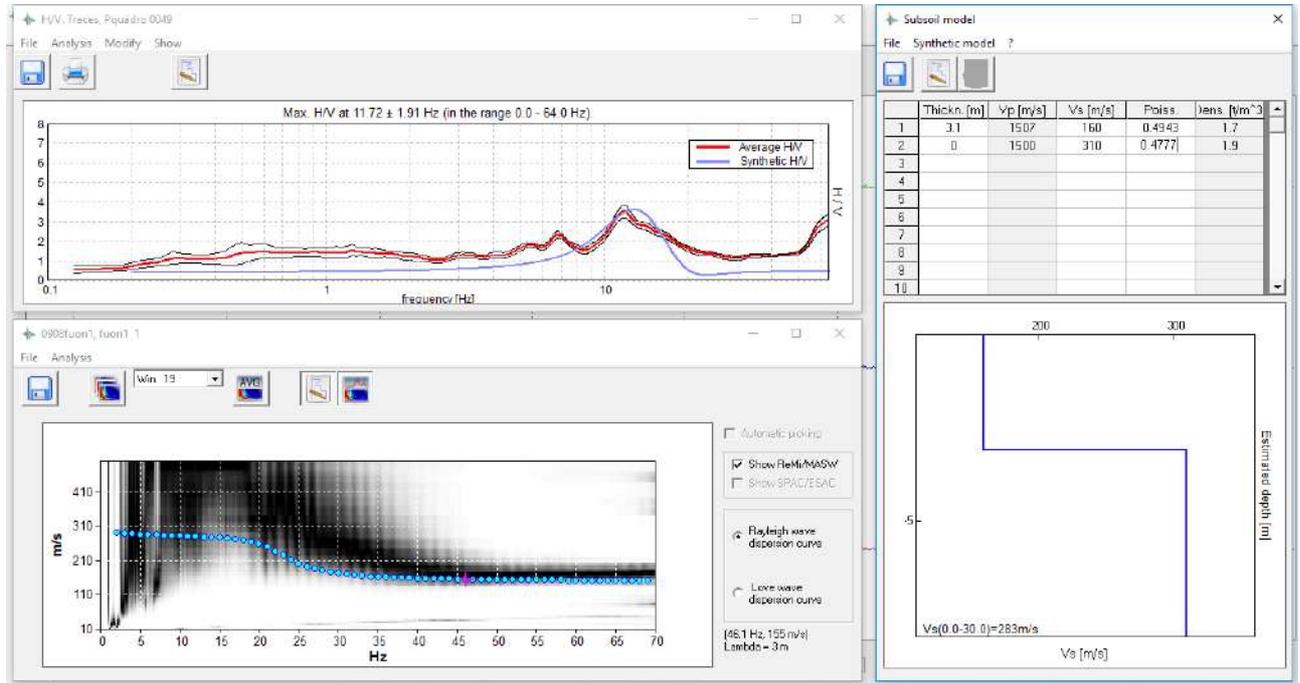
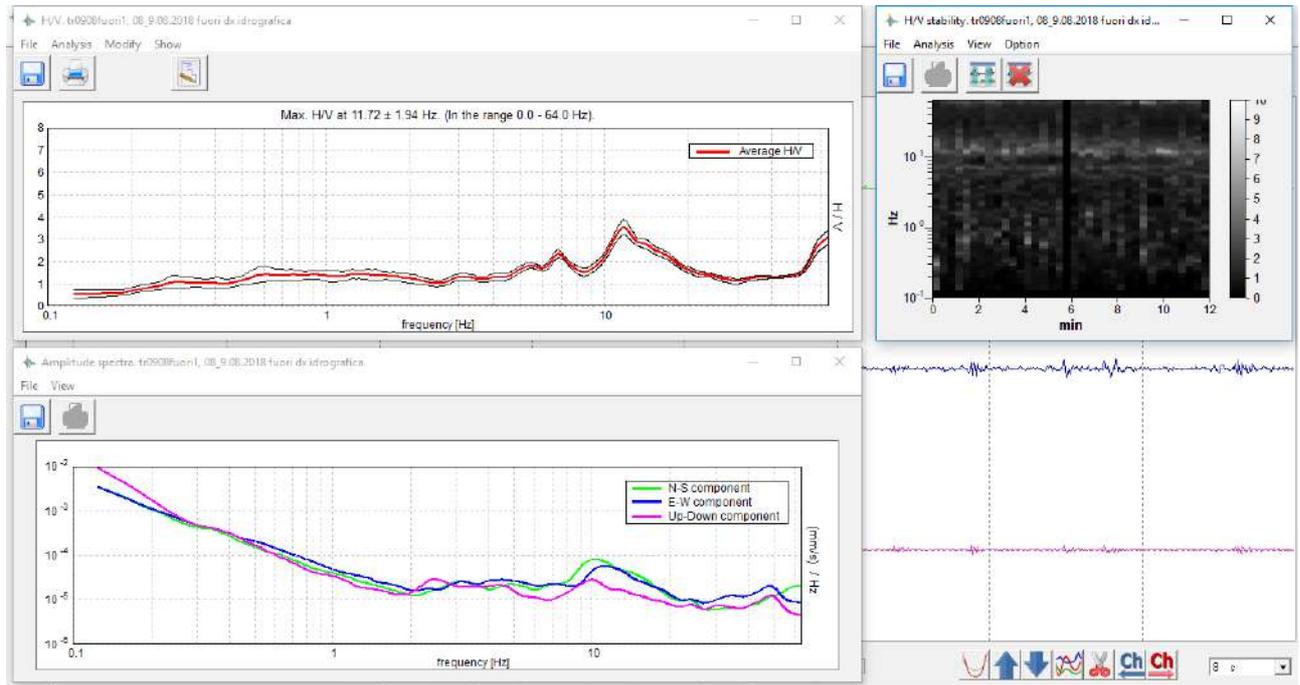


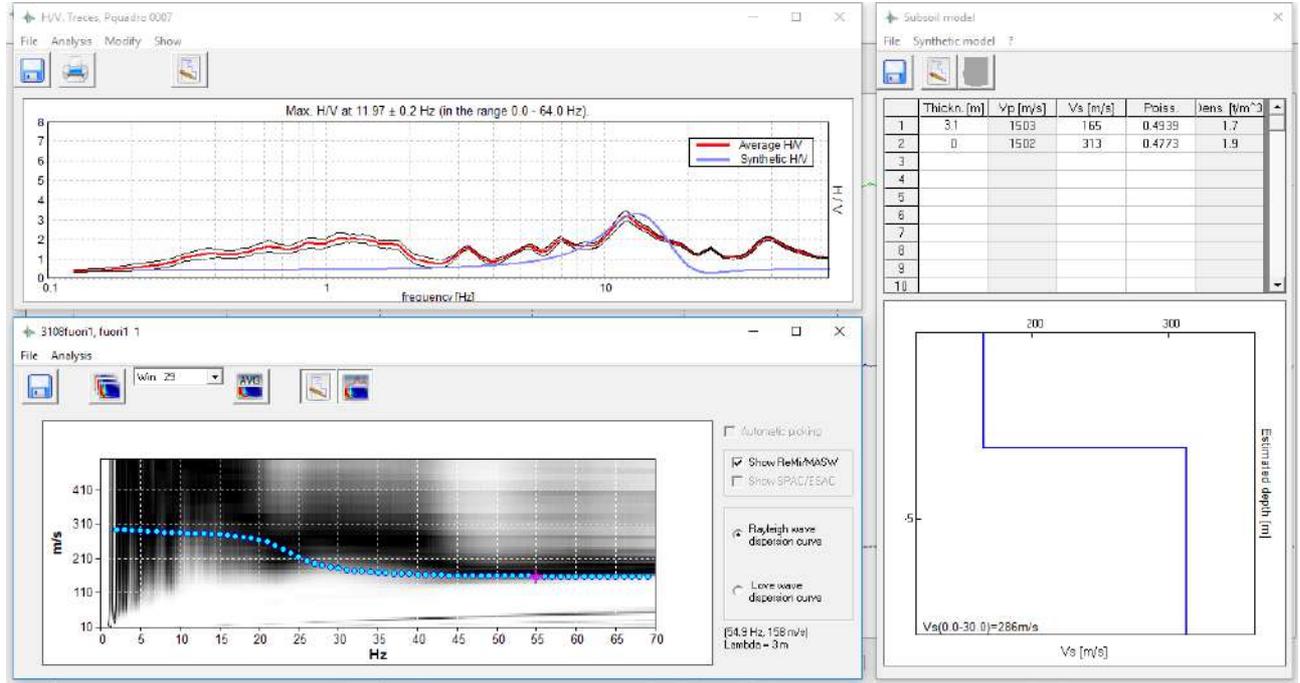
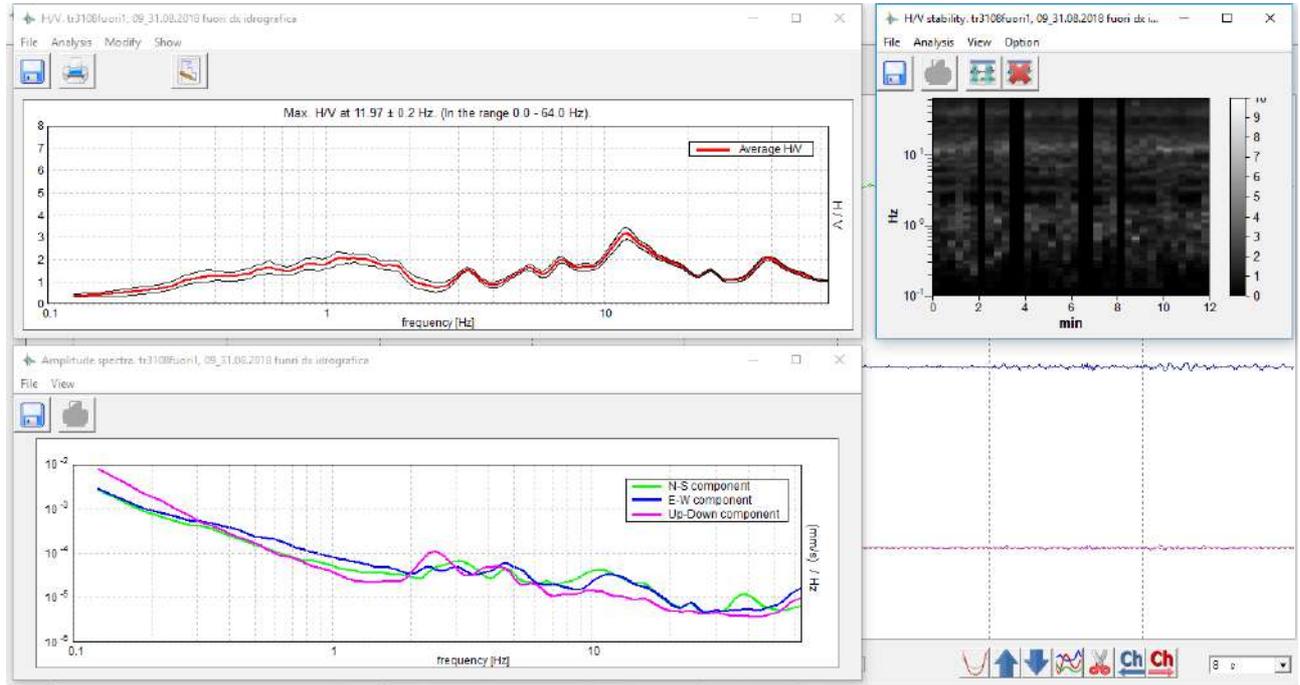
10/07/2018

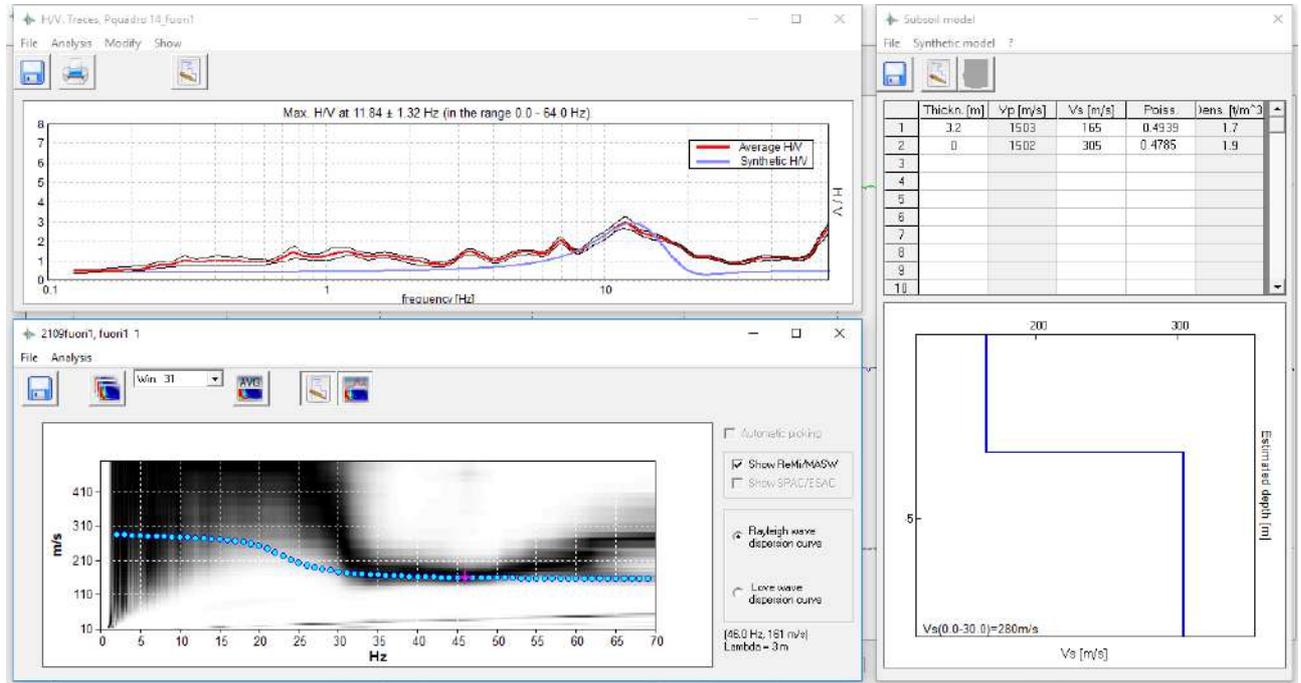
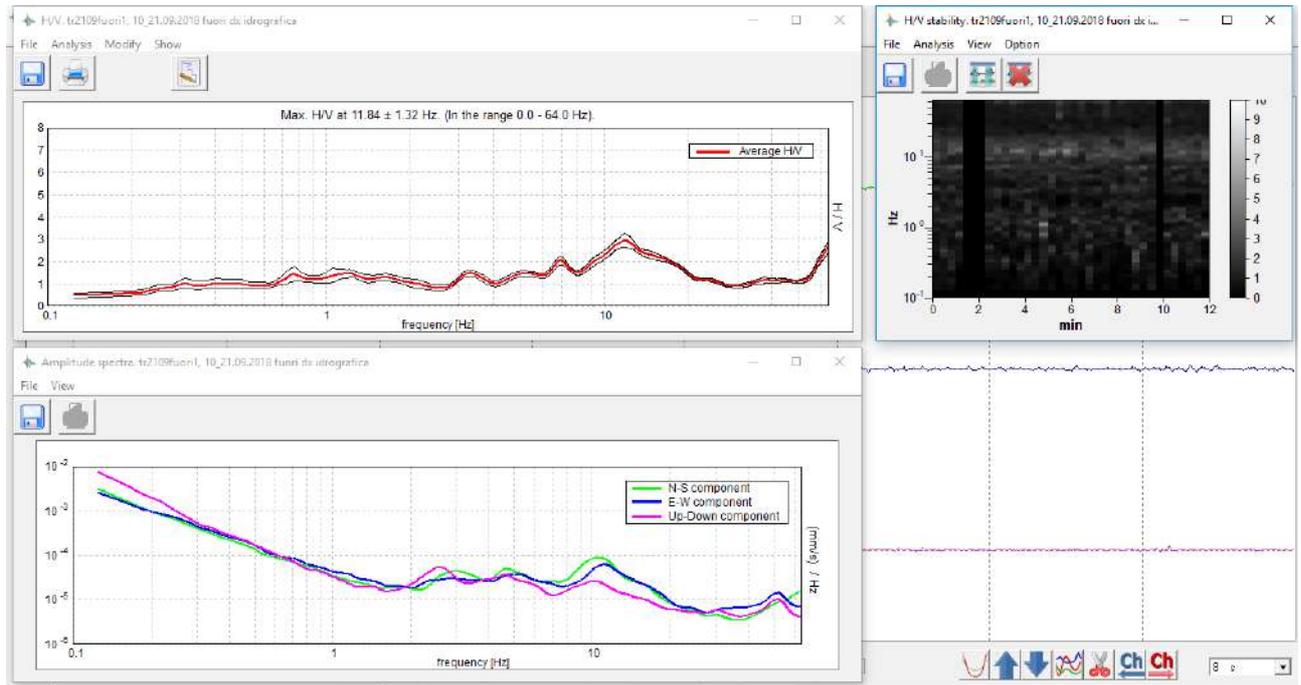




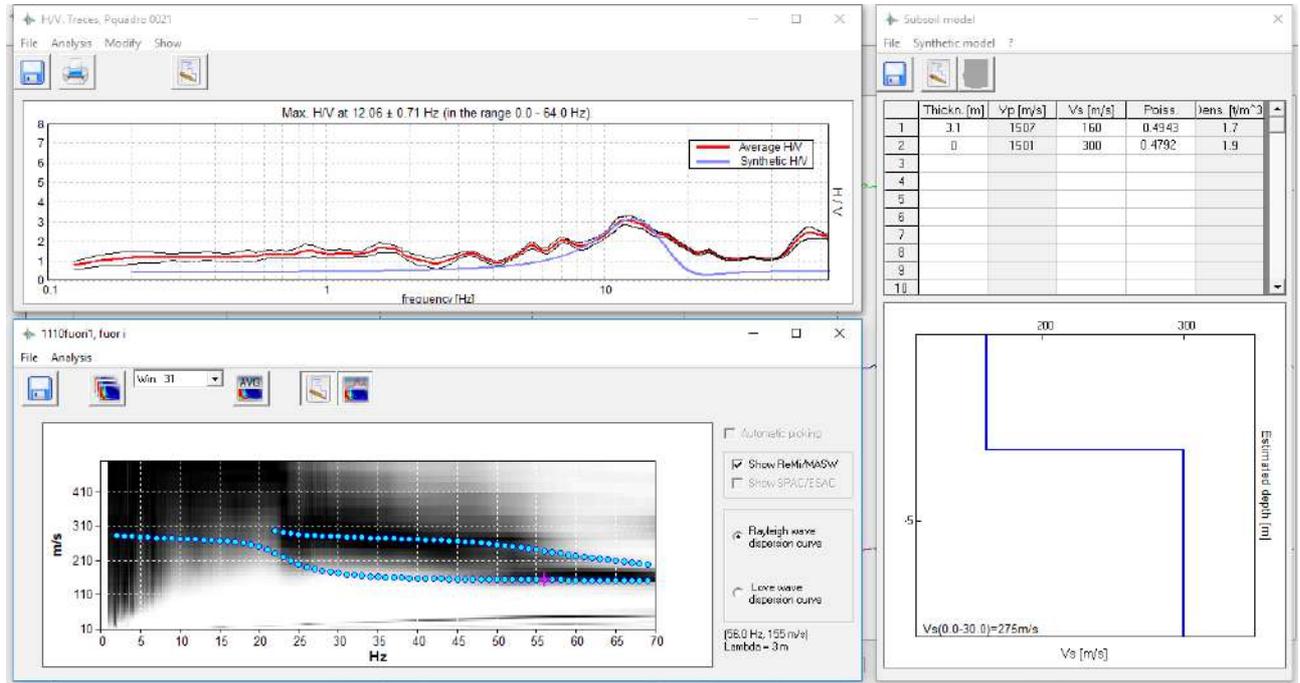
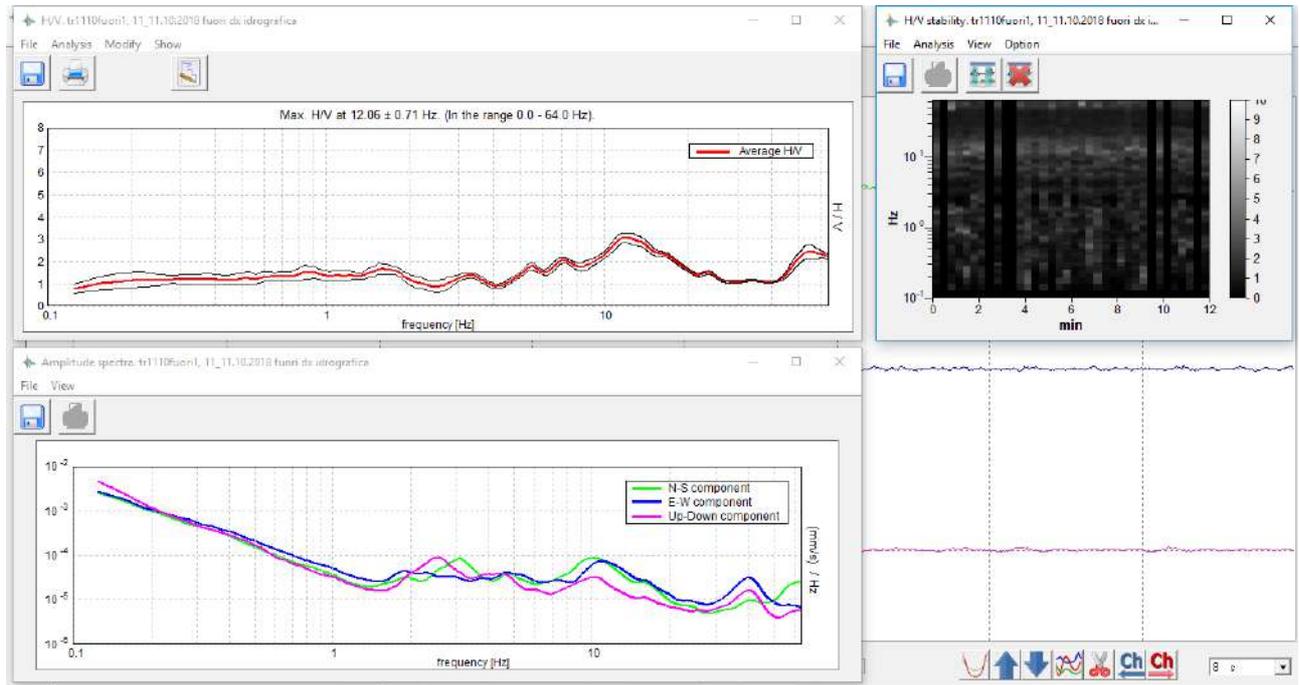
9/08/2018



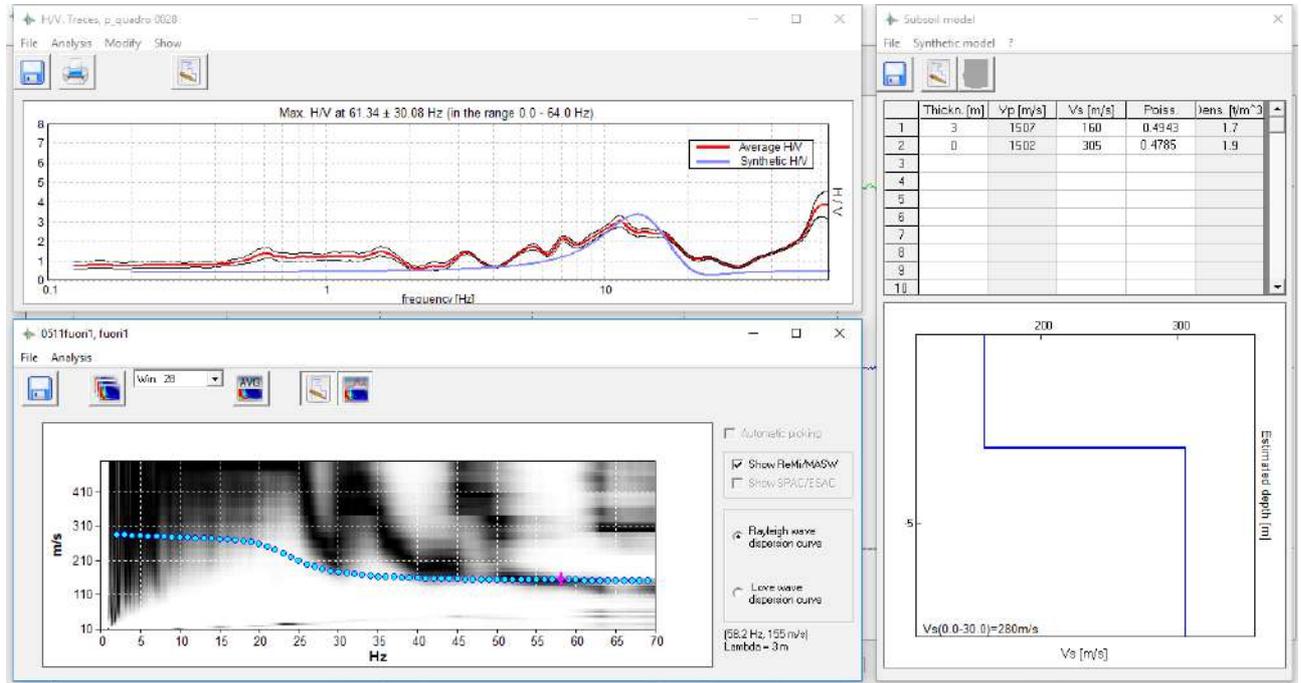
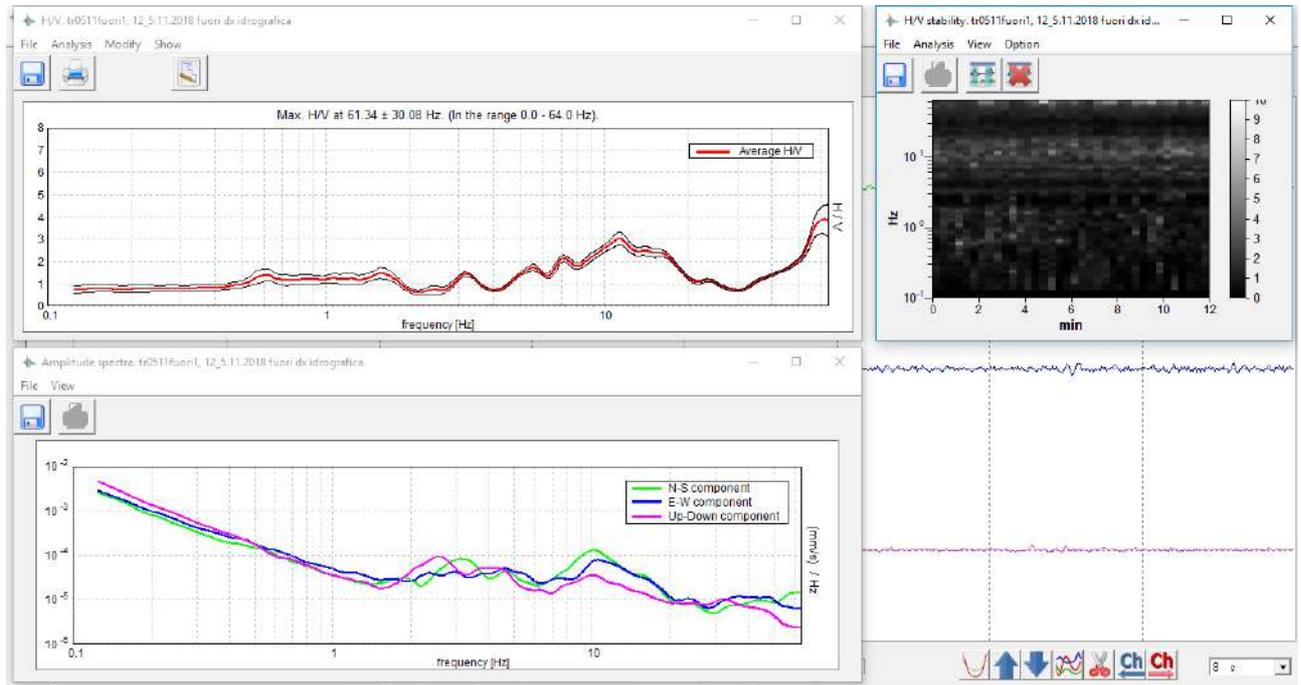




11/10/2018

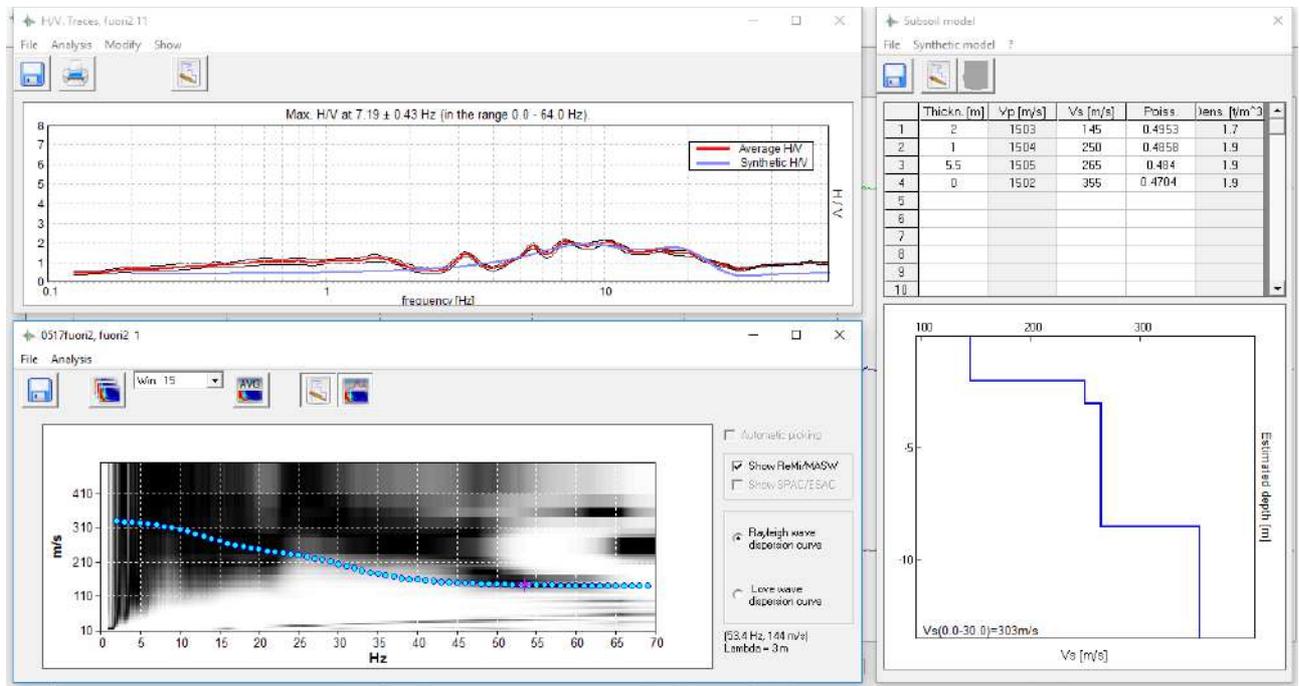
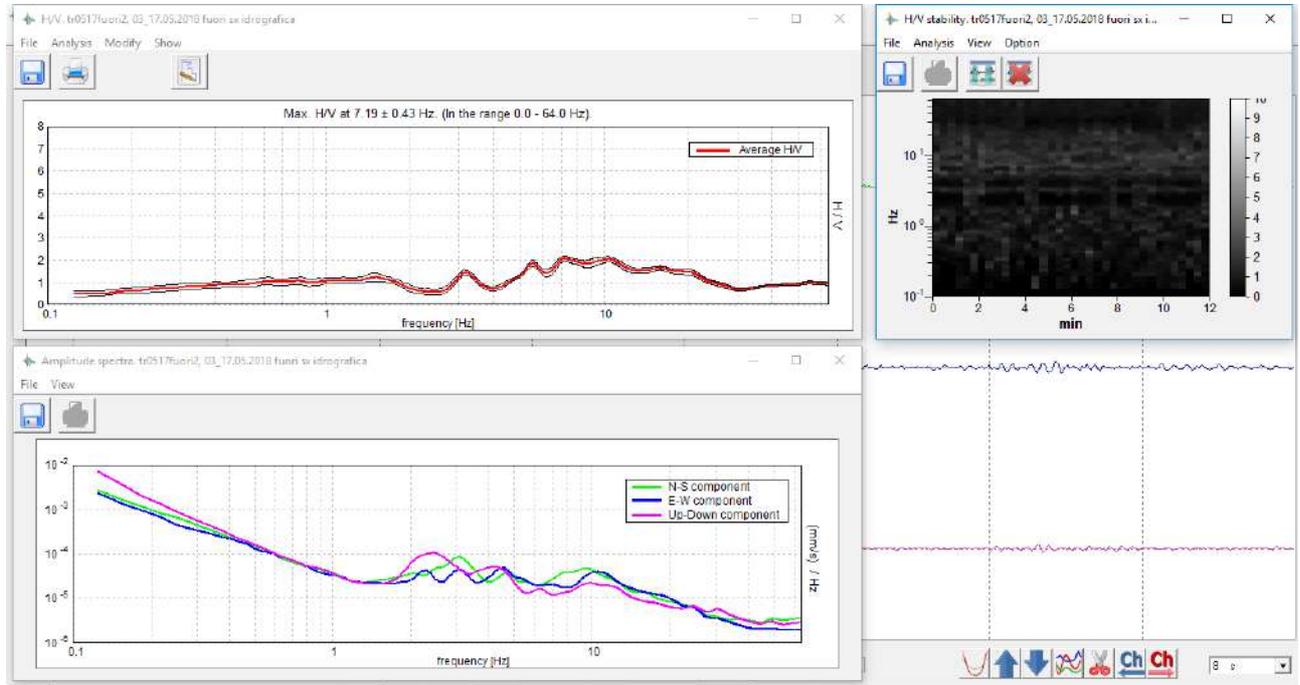


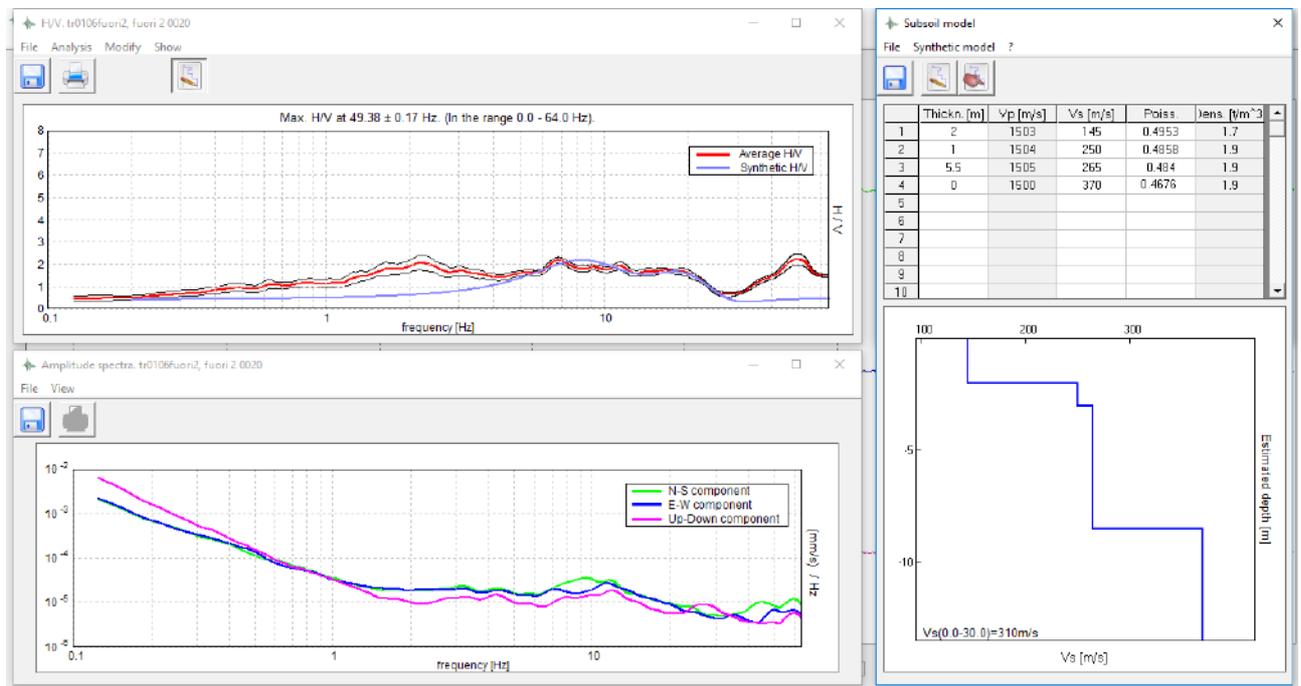
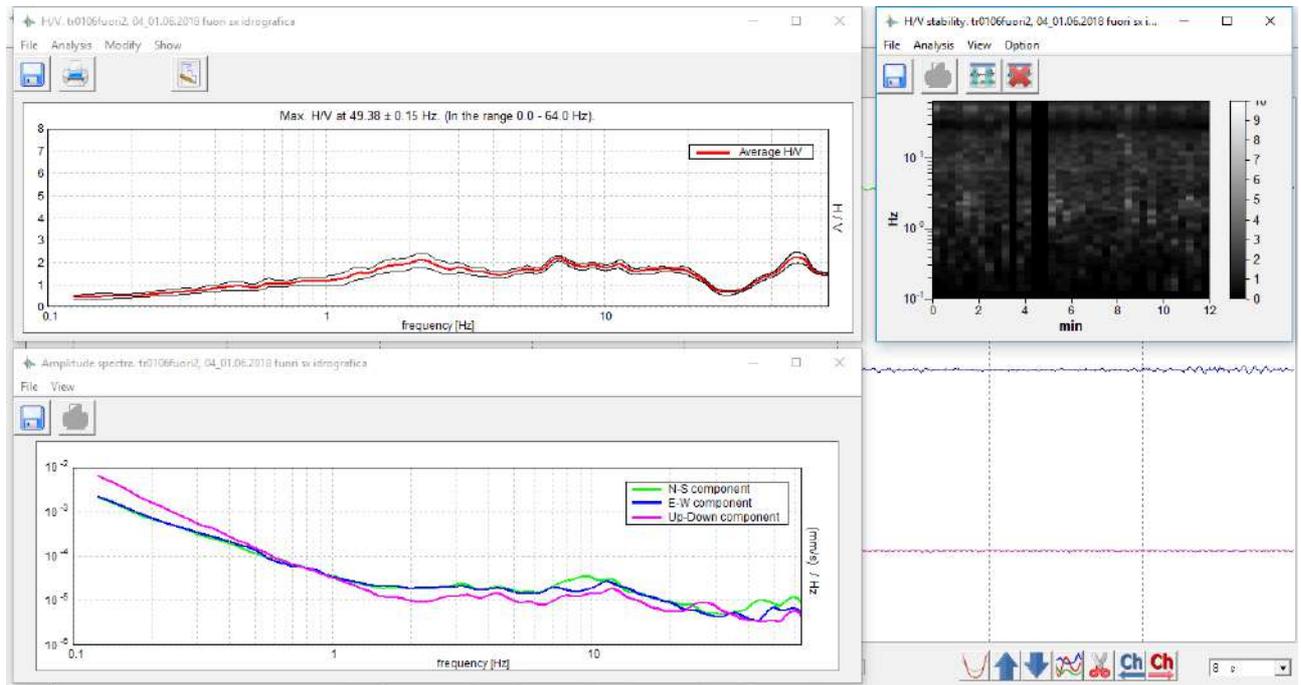
5/11/2018



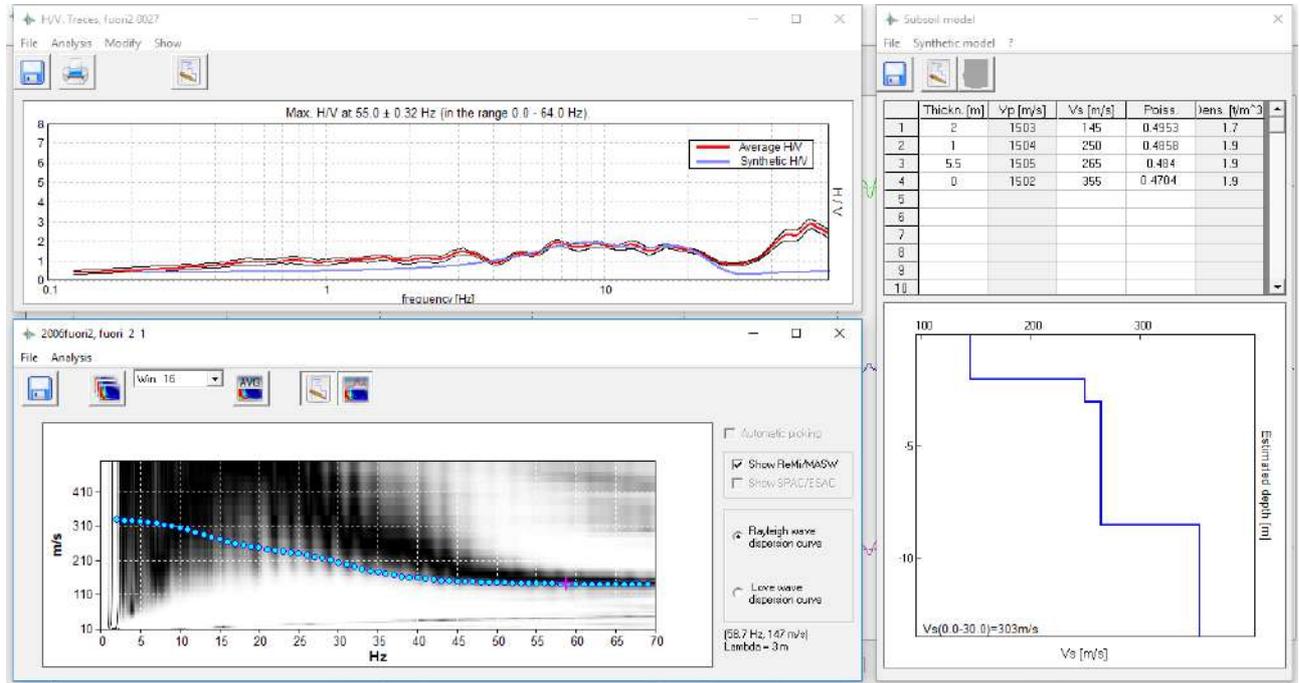
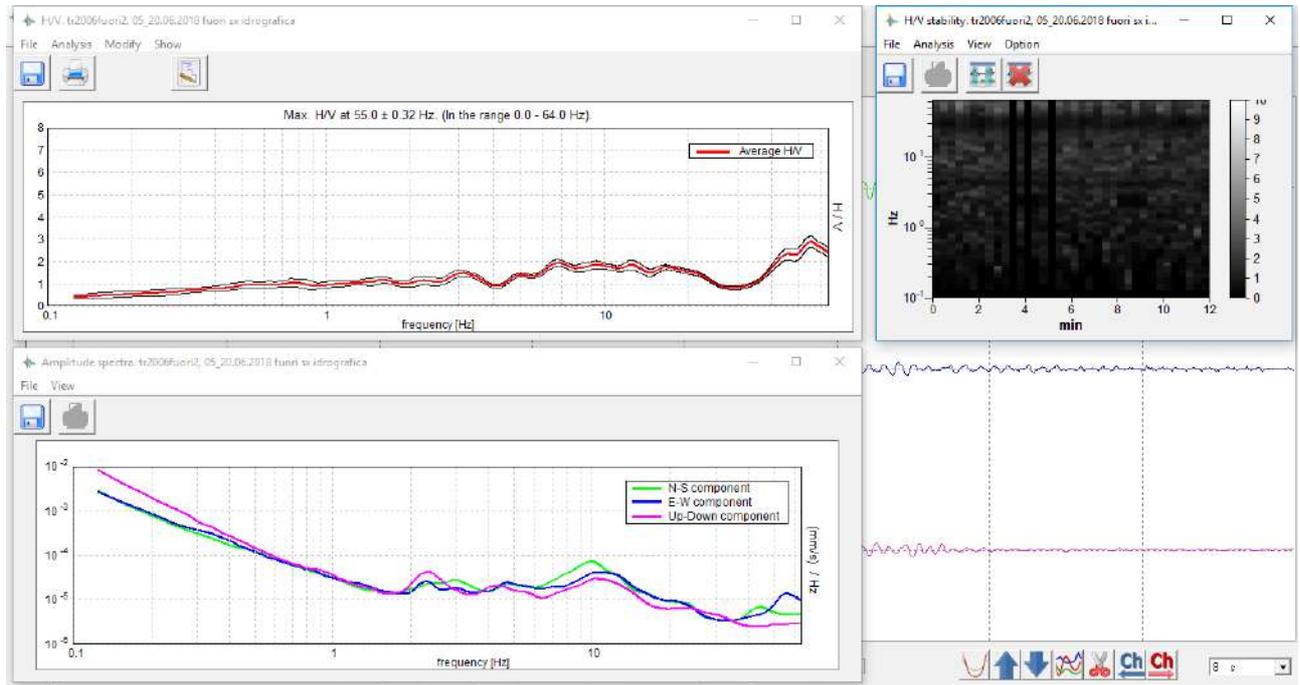
# ALLEGATO 7: FUORI SINISTRA IDROGRAFICA

17/05/2018

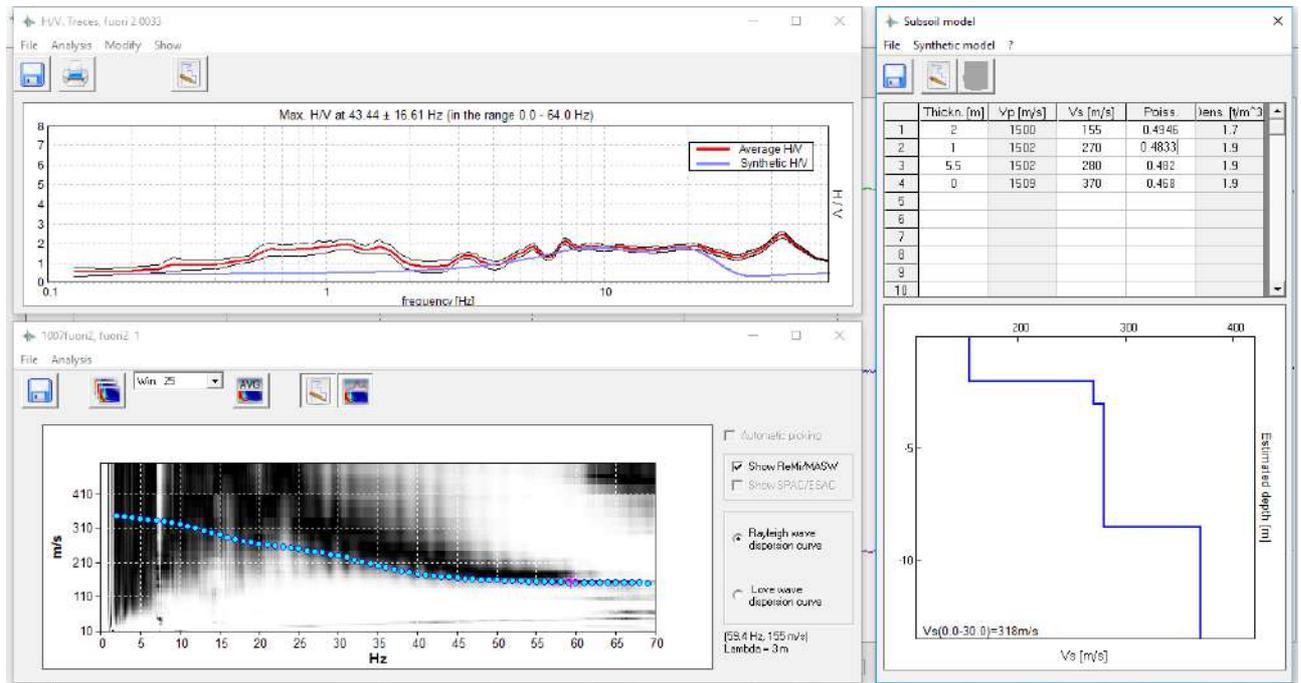
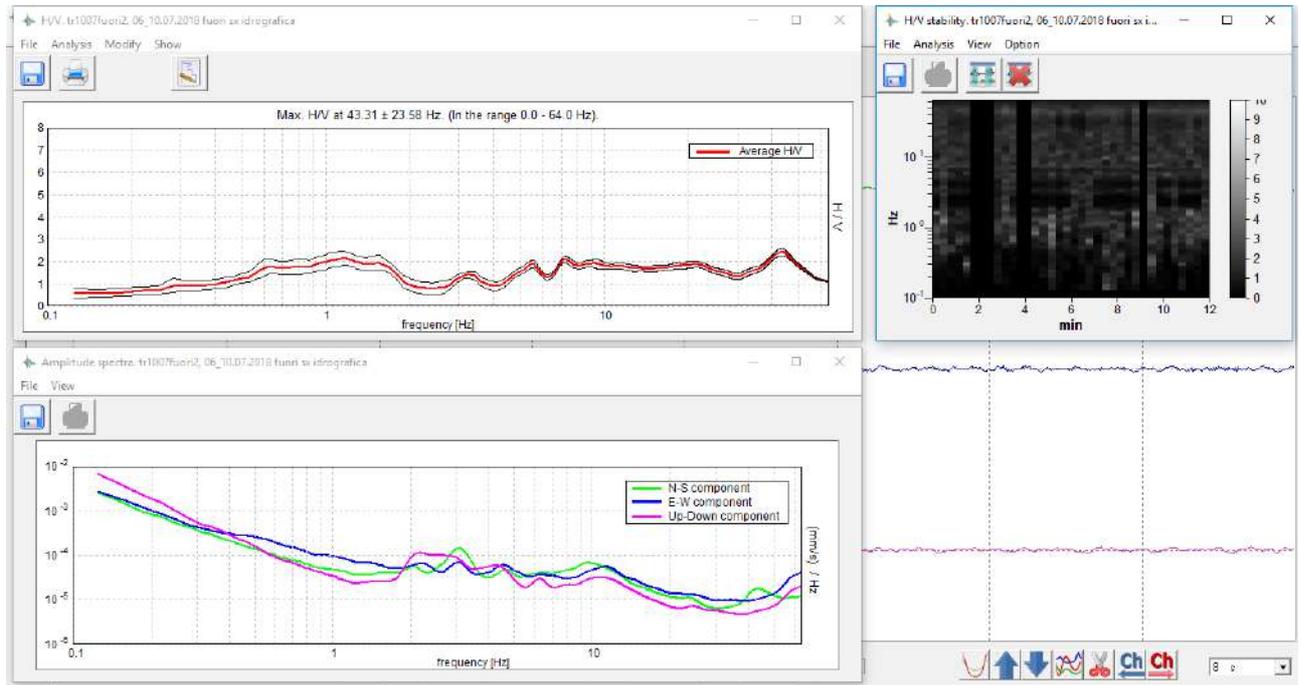


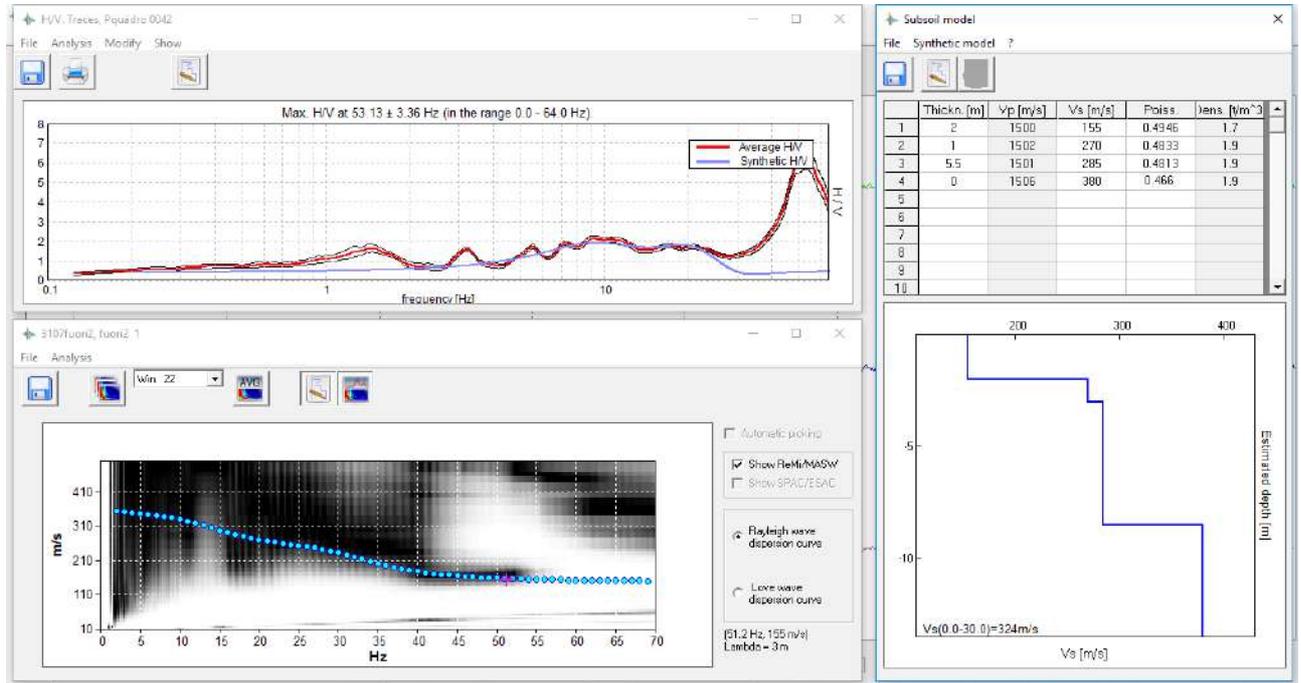
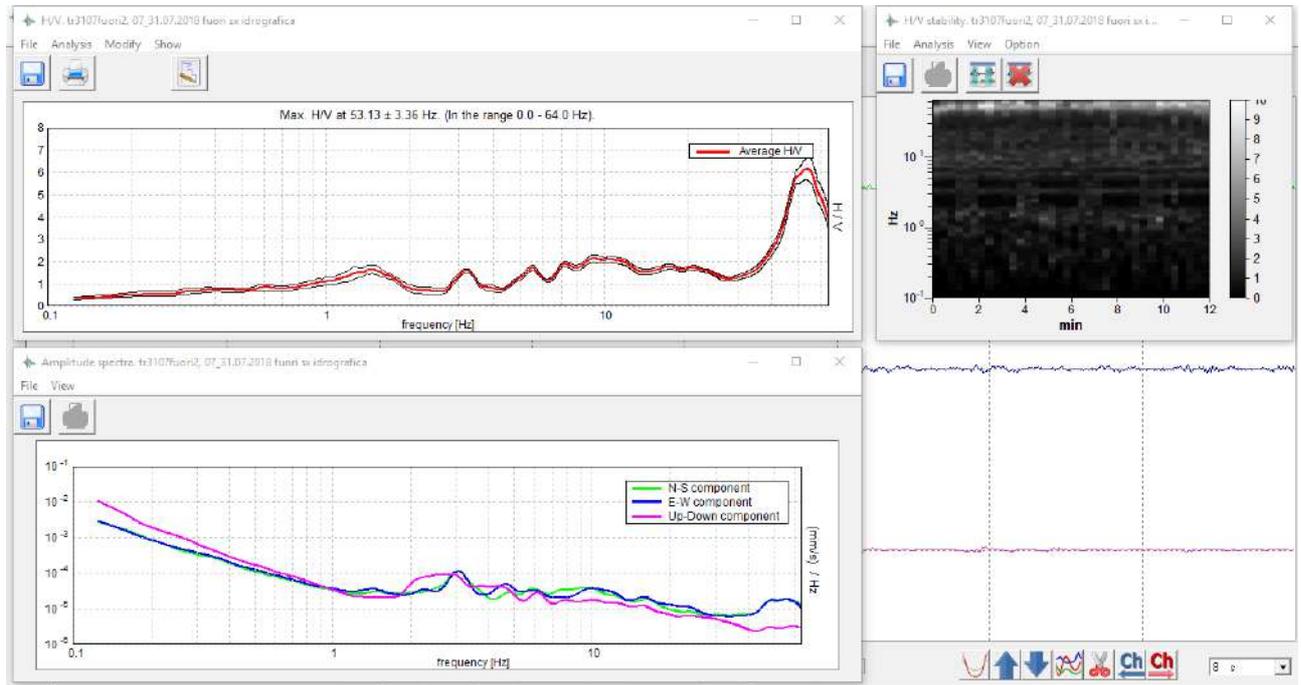


20/06/2018

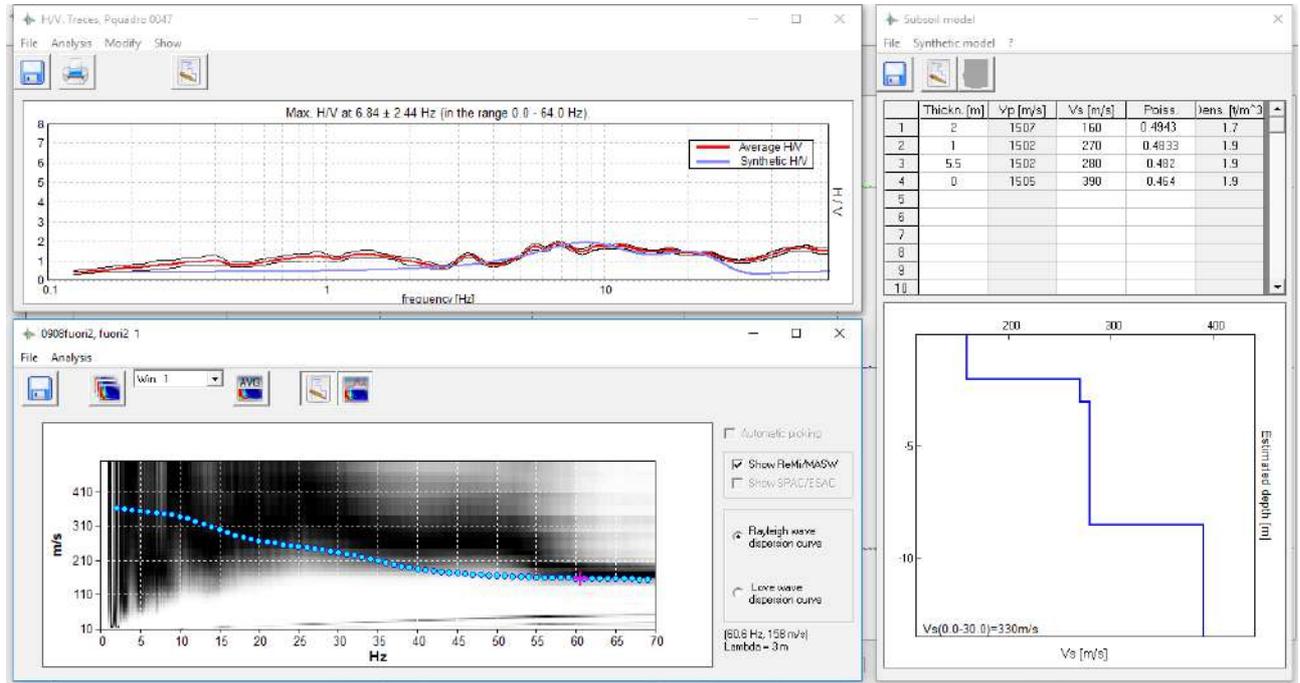
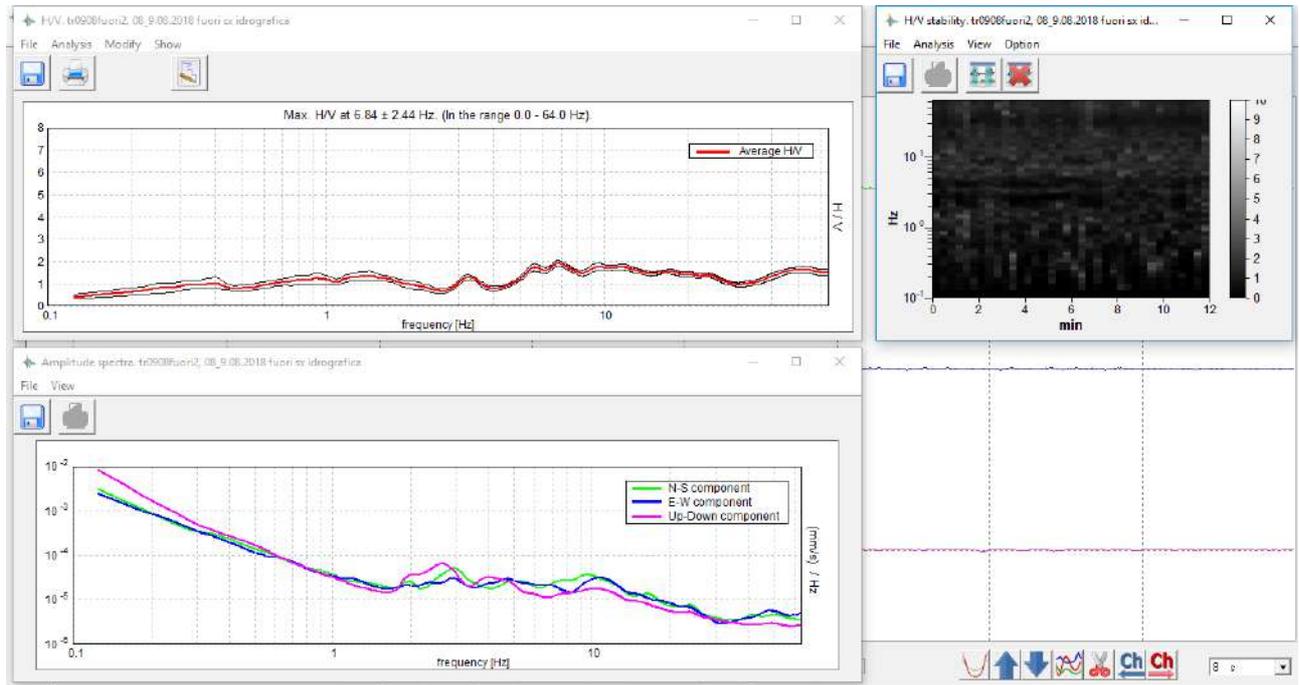


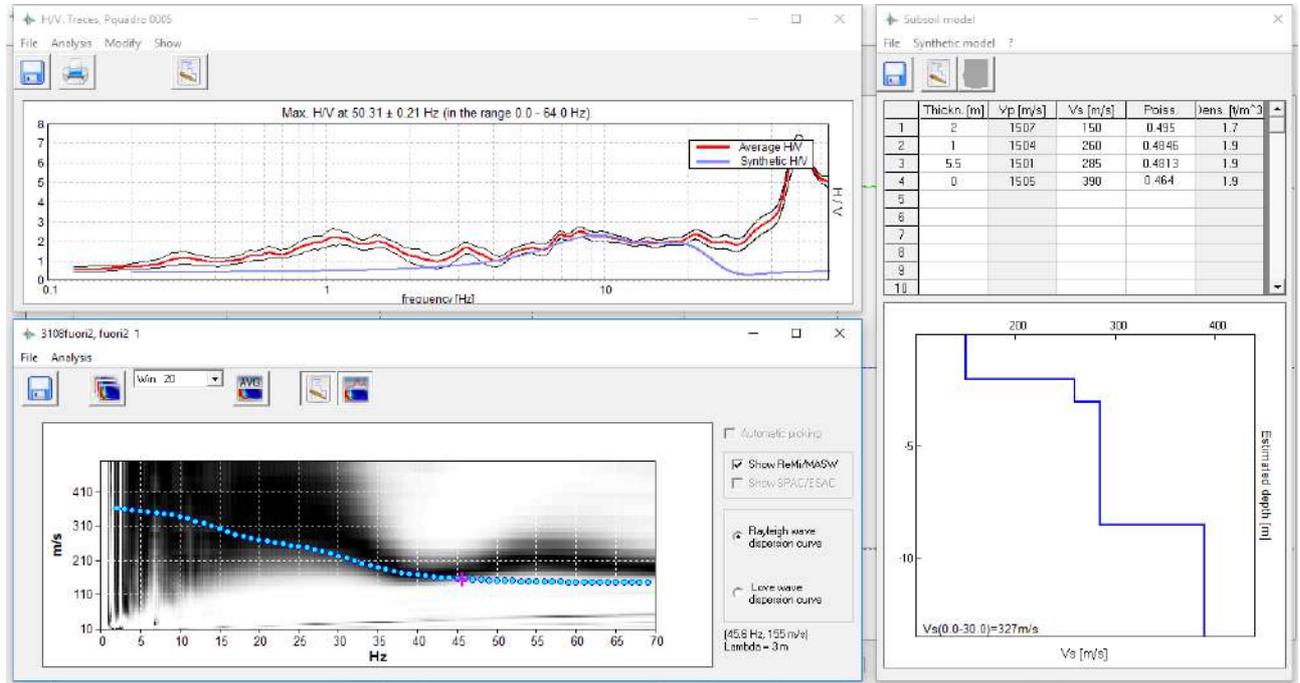
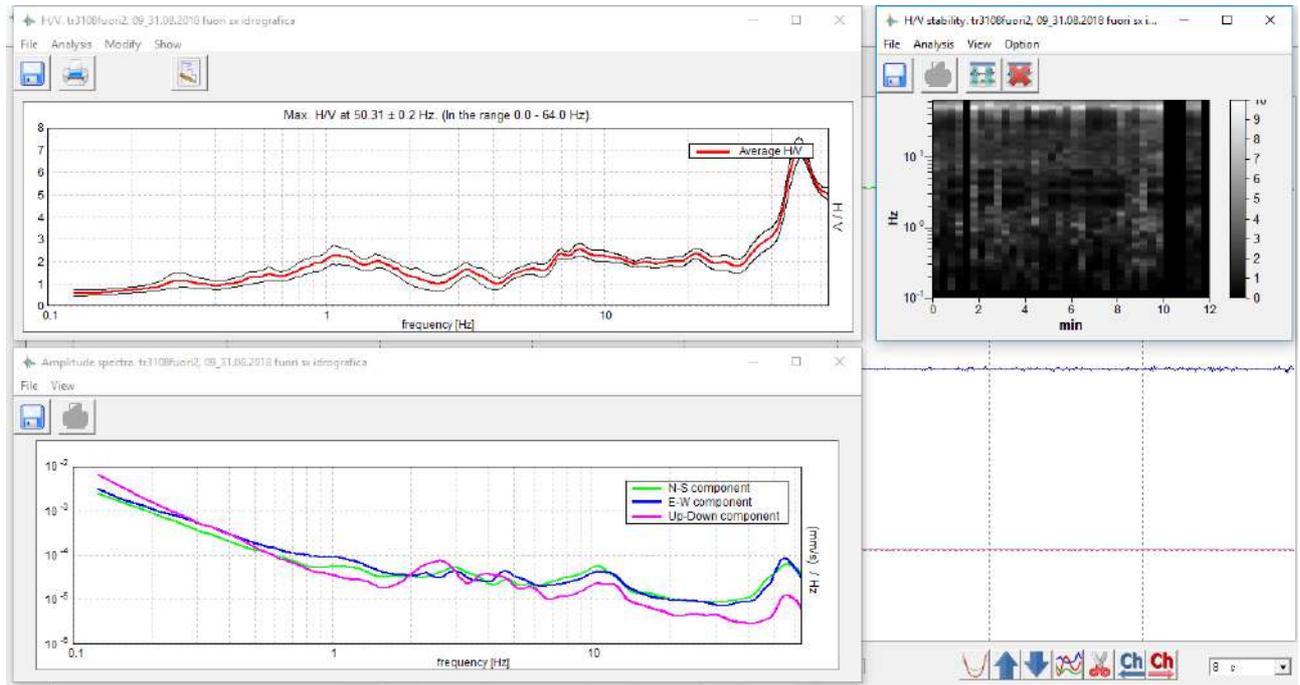
10/07/2018

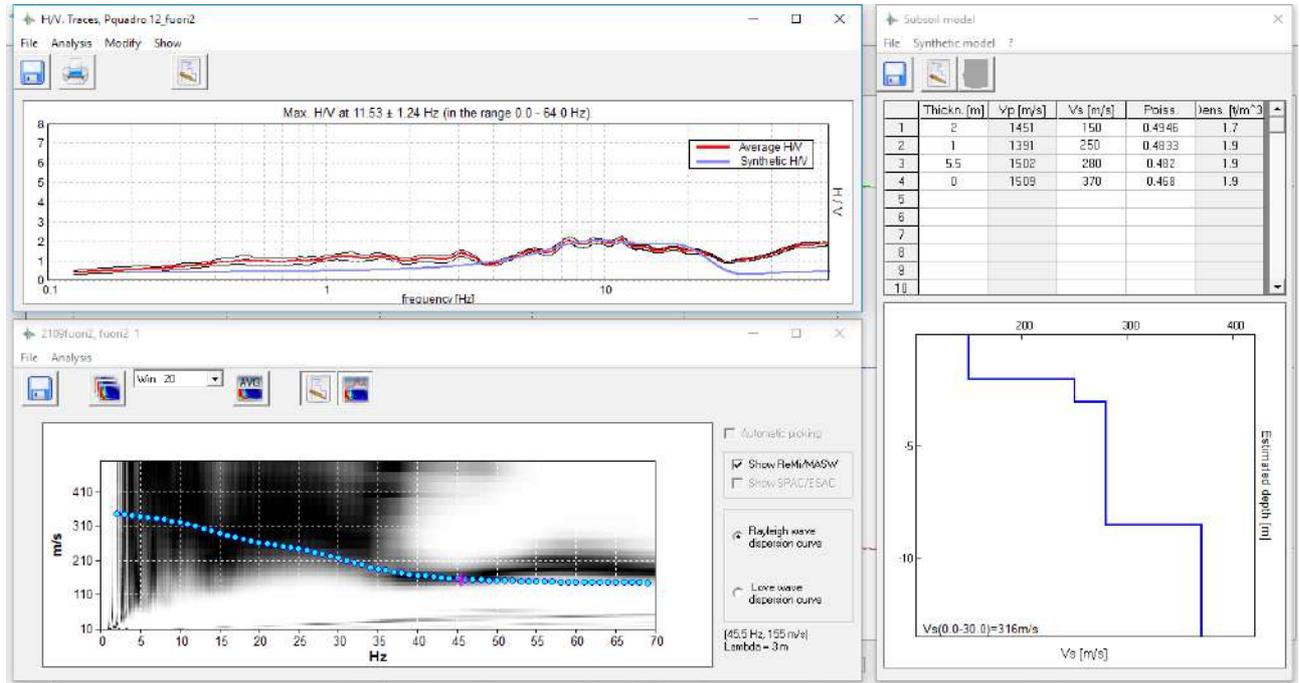
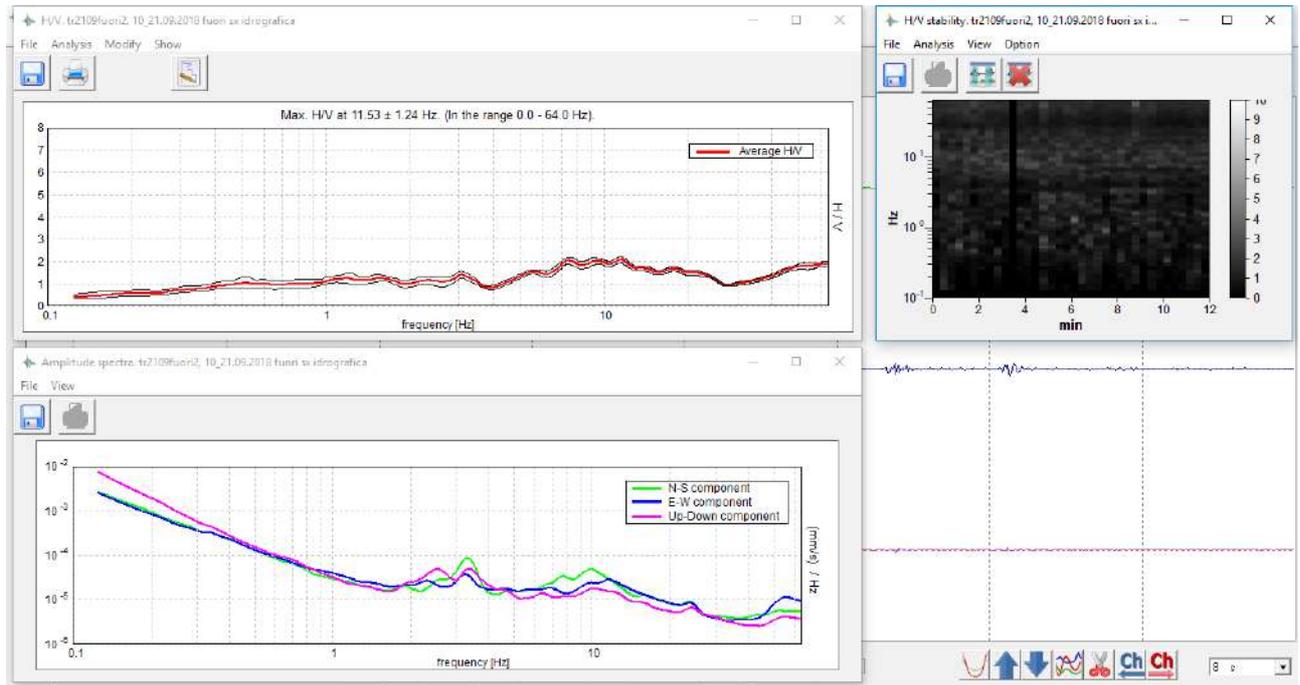




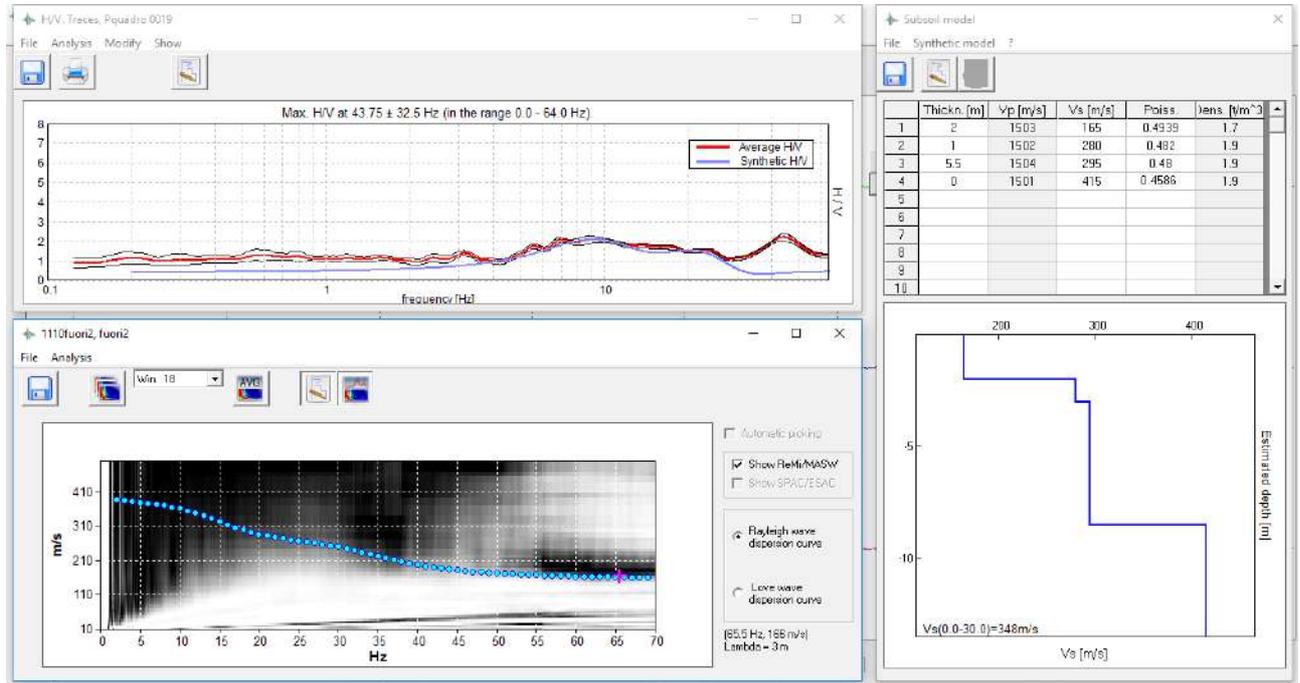
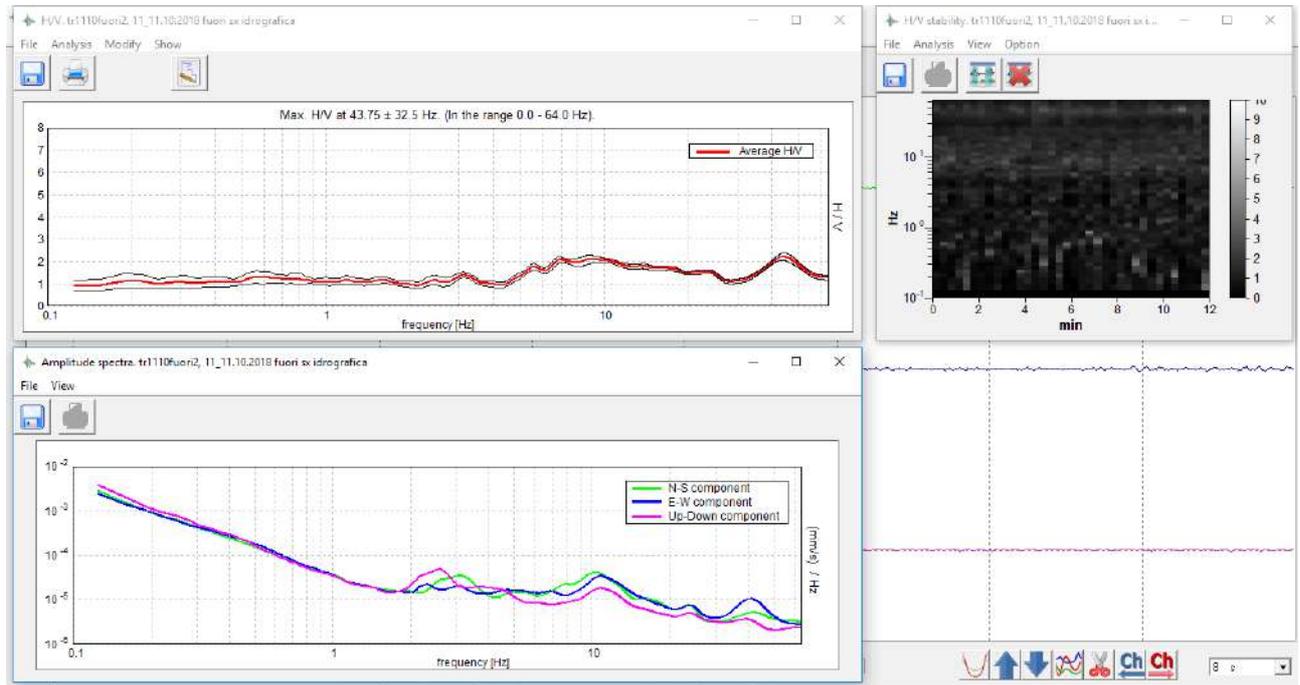
9/08/2018







11/10/2018



5/11/2018

