

Rapporti tecnici

INGV

**Campagna di Misure Sismiche
nella conca Subequana**

156



Istituto Nazionale di
Geofisica e Vulcanologia

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

CAMPAGNA DI MISURE SISMICHE NELLA CONCA SUBEQUANA

Simone Marzorati¹, Chiara Ladina², Davide Piccarreda¹, Gabriele Ameri¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Milano-Pavia | Sismologia Applicata all'Ingegneria)

²INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Centro Nazionale Terremoti)

156

Indice

Introduzione.....	5
1. Inquadramento dell'area di studio e realizzazione della campagna di misure.....	5
2. Strumentazione sismica e caratteristiche delle misure di <i>noise</i> sismico ambientale	10
3. Analisi preliminare dei dati di <i>noise</i> sismico ambientale	12
4. La micro rete di monitoraggio di Castelvecchio Subequo	16
5. Conclusioni.....	24
Ringraziamenti	25
Bibliografia	25

Introduzione

A seguito del terremoto del 6 aprile 2009 che ha colpito la città de L'Aquila e la valle dell'Aterno, la Sezione di Milano-Pavia dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV-MIPV) ha intrapreso una serie di attività strumentali che hanno riguardato l'installazione di stazioni sismiche temporanee e misure di *noise* sismico ambientale. INGV-MIPV è intervenuta sia durante le fasi di emergenza nei giorni seguenti il sisma, sia durante successive indagini utili a studi di microzonazione per la caratterizzazione sismica dei territori colpiti dal terremoto [Ameri et al., 2009].

Gli studi di effetti locali in alcuni paesi colpiti dal sisma e gli studi di sismotettonica in corso nell'area abruzzese hanno condotto alcune ricerche di INGV-MIPV a concentrarsi nella conca Subequana, bacino sedimentario a sud della media valle dell'Aterno. In tale area sono presenti piccoli centri urbani, dotati di centri storici antichi che hanno subito gravi danni all'edificato pur essendo già a notevole distanza dall'area epicentrale del sisma del 6 Aprile 2009 (circa 50 Km). Come indicato nel rapporto macrosismico redatto congiuntamente da INGV e il Dipartimento di Protezione Civile Nazionale [Galli e Camassi, 2009], i centri abitati della conca Subequana Castelvechio Subequo, Goriano Sicoli e Castel di Ieri hanno subito un danno rispettivamente di grado 7.0, 7.0 e 6.5 della scala MCS. Castelvechio Subequo è stato indicato nel rapporto macrosismico tra i paesi con possibili effetti di sito.

Utilizzando strumentazione mobile è stata realizzata una campagna di misure di *noise* sismico ambientale che ha coperto l'area del bacino sedimentario della conca Subequana e l'abitato di Castelvechio Subequo. Le misure effettuate sulla superficie del bacino sedimentario sono utili per indagare la risposta 1D del bacino, attraverso la tecnica di Nakamura [Nakamura, 1989] e per stimare la profondità del substrato roccioso. Inoltre, la serie di misure all'interno del centro storico di Castelvechio Subequo può essere utilizzata per indagare alcuni aspetti della risposta sismica locale dovuti alla morfologia sulla quale è costruito il centro urbano.

Una micro rete di monitoraggio di terremoti, composta da tre stazioni, è stata installata per ottenere ulteriori informazioni sulla risposta sismica locale del centro urbano, applicando le tecniche d'analisi con stazione di riferimento.

1. Inquadramento dell'area di studio e realizzazione della campagna di misure

La conca Subequana è collocata a sud delle conche di L'Aquila e di Fossa-S.Demetrio e a nord dell'area tra la piana del Fucino e la piana di Sulmona; essa rappresenta una delle depressioni intermontane più orientali dell'Appennino abruzzese. La conca Subequana è interessata da faglie che emergono nel lato occidentale del monte Urano-Le Serre, le quali hanno condizionato l'evoluzione del suo assetto strutturale [Falcucci et al., 2009]. Nel corso del Quaternario, tali strutture sono state caratterizzate da movimenti prevalentemente distensivi, confermati dalla dislocazione di depositi pleistocenici [Miccadei et al., 1997]. La conca è una depressione di circa 10x2.5 Km e comprende porzioni di territorio appartenenti ai Comuni di Secinaro, Castelvechio Subequo, Gagliano Aterno, Castel di Ieri e Goriano Sicoli.

La campagna di misure sismiche è stata realizzata con l'intenzione di ottenere informazioni sul bacino sedimentario della conca Subequana e sulla presenza di effetti sismici locali nel Comune di Castelvechio Subequo. Le indagini sono state svolte a partire da un sopralluogo nel centro storico del paese, in cui sono state realizzate le prime misure di *noise* sismico ambientale, e da un sopralluogo per individuare l'area e i punti d'interesse della depressione in cui realizzare le ulteriori indagini sui sedimenti del bacino. Successivamente, la campagna di misure di *noise* e l'installazione e disinstallazione della micro rete nel centro storico di Castelvechio Subequo sono state eseguite in successivi tre interventi, per una durata totale di 11 giorni lavorativi. Tali interventi sono avvenuti rispettivamente a metà Settembre, a inizio Novembre del 2009 e a metà Febbraio del 2010. Questo ha implicato che, soprattutto per quel che riguarda le misure speditive di *noise*, in alcuni giorni fossero presenti condizioni meteo avverse, tali da rallentare le operazioni.

In totale sono state realizzate 87 misure di *noise* sismico ambientale e sono state installate 3 stazioni sismiche. Delle 87 misure speditive, 12 sono risultate totalmente inaffidabili e affette da raffiche di vento; in tre casi è stato possibile replicare la misura ed ottenere un dato affidabile.

La Fig.1 mostra la mappa delle misure speditive di *noise* sismico ambientale volte all'indagine della profondità del substrato roccioso del bacino sedimentario della conca Subequana. I punti di misura ricoprono un'area che parte a nord di Gagliano Aterno e termina a sud di Castel di Ieri. Quest'area ricopre la maggior parte degli affioramenti sedimentari della conca. La campagna effettuata lascia scoperte alcune zone (ad

esempio quella a nord di Gagliano Aterno che al momento delle misure è risultata inaccessibile) ma permette in ogni caso di eseguire l'indagine sul bacino sia in senso longitudinale che in vari punti in senso trasversale.

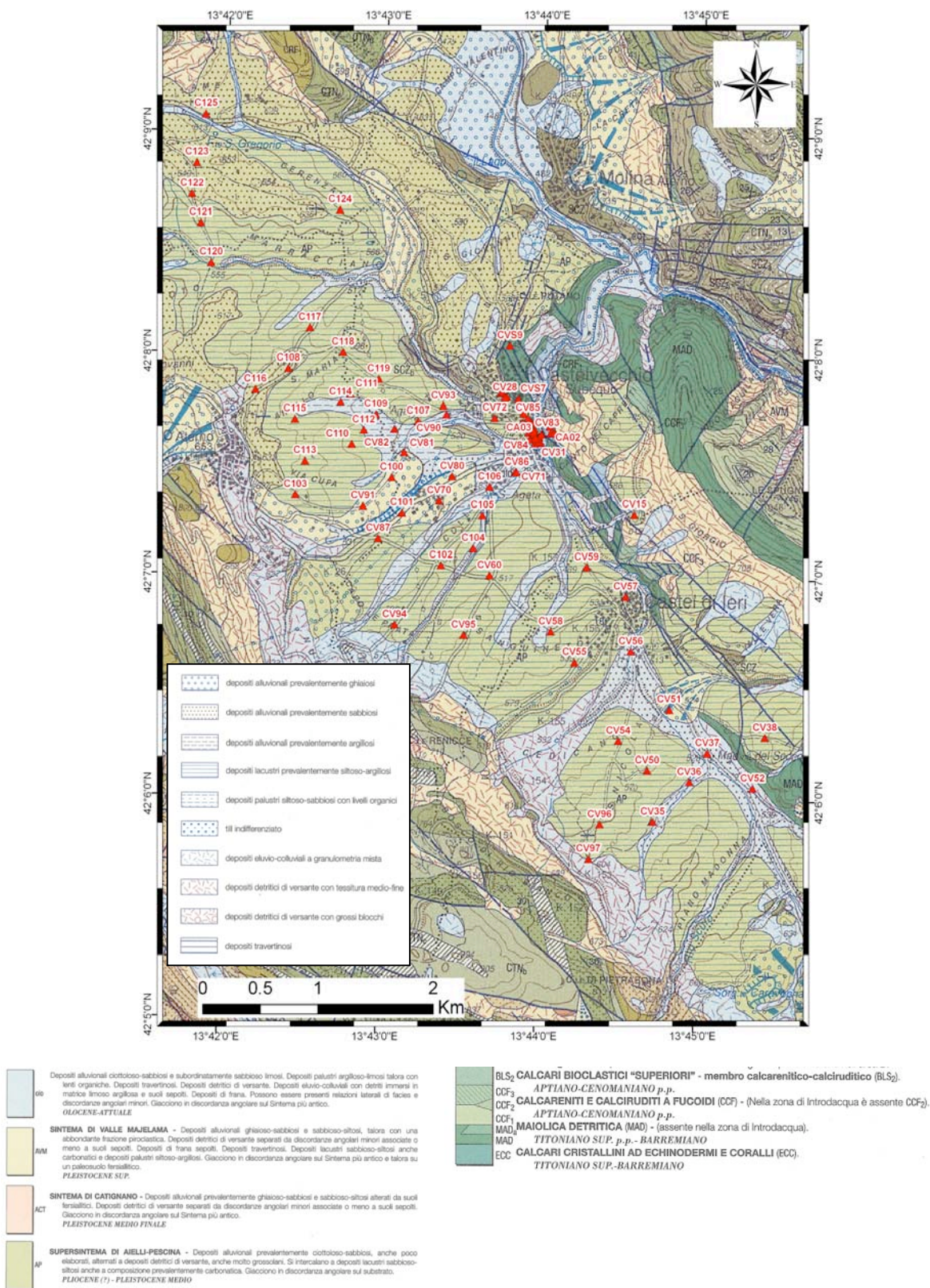


Figura 1. Mappa delle misure speditive di *noise* sismico ambientale realizzate nel bacino sedimentario della conca Subequana. Lo sfondo appartiene alla carta geologica CARG 1:50.000, di cui si mostrano gli elementi della leggenda maggiormente rappresentati in figura.

Nell'area del bacino prospiciente a Castelvechio Subequo, compresa tra Gagliano Aterno e Castel di Ieri, sono state effettuate gran parte delle misure poichè tale area è quella in cui viene ipotizzato un maggior approfondimento del substrato, con presenza di faglie, come indicato da studi geologici in corso [Falcucci et al., 2009]; si è deciso di concentrare l'indagine in tale area per avere un maggior dettaglio delle variazioni laterali degli strati sedimentari. Inoltre, sono state effettuate alcune misure di controllo, come CV15 (Fig.1), sugli affioramenti calcarei del substrato roccioso, o dove il substrato è ipotizzato a pochi metri di profondità (ad esempio CV72 e CV90).

Come già accennato, la possibilità di realizzare le misure è stata influenzata dalle condizioni meteorologiche, unite alle conseguenti condizioni del terreno. Il bacino della conca Subequana è caratterizzato dalla presenza di morfologie collinari costituite da termini limosi e argillosi, sottostanti a pendii rocciosi che riversano l'acqua meteorica all'interno della conca; durante e a seguito di eventi piovosi le condizioni delle strade bianche che percorrono la conca diventano non praticabili (Fig.2) poichè parte del flusso alluvionale viene incanalato proprio lungo le strade. Questo ha fatto sì che alcune zone dell'area indagata rimanessero scoperte.



Figura 2. Condizioni morfologiche e meteorologiche durante le misure sveditive di *noise* sismico. Pannello di sinistra: l'aspetto morfologico della conca Subequana. Pannello di destra: flusso alluvionale lungo le strade della conca.

Una situazione differente a quella appena descritta riguarda le misure effettuate nel centro storico di Castelvechio Subequo per indagare la presenza di effetti sismici locali. La Fig.3 rappresenta la mappa di ubicazione dei punti all'interno e nei dintorni del centro storico del paese. Il centro storico è impostato su un rilievo morfologico roccioso, composto da rocce calcaree, di dimensioni ridotte; si estende in direzione circa nord-sud per una lunghezza di 300 m (in Fig.3 è la lunghezza compresa tra la misura CVS7 e la misura CV19). Trasversalmente il rilievo misura un centinaio di metri e si eleva dall'area circostante per poche decine di metri (30-40 m). Il rilievo è stato coperto da 24 misure di *noise*, tali da indagare tutte le situazioni date dalla morfologia: le misure hanno ricoperto sia la base che la cresta del rilievo. Inoltre sono state investigate sia le aree più danneggiate (vicino alle misure CV84 e CV33) che quelle meno danneggiate (vicino alle misure CVS6, CVS4, CV30). Il centro storico ha subito un danno generalizzato alle strutture; inoltre, nella porzione sommitale del rilievo sono presenti crolli totali degli edifici.

L'esecuzione delle misure all'interno del centro storico è stato condizionato dall'elevata densità degli edifici ma facilitata dalla presenza di affioramenti rocciosi in molte porzioni dell'abitato (Fig.5) e dalla presenza di un archeologo locale il quale è stato di supporto per indicare ed evitare l'eventuale presenza di cavità al di sotto della pavimentazione stradale, sulla quale sono state eseguite alcune misure. Tutte le misure sono state eseguite in free-field, all'esterno delle strutture, con l'eccezione di tre punti, in cui i sensori sono stati posti volutamente alla base di alcuni edifici di cui si voleva avere una stima dei periodi di vibrazione. Per il resto, le misure sono state eseguite nei cortili tra gli edifici, nelle piazzette, e in cantine scavate direttamente nella roccia come, ad esempio, nel caso della misura CVS4 (Fig.6).

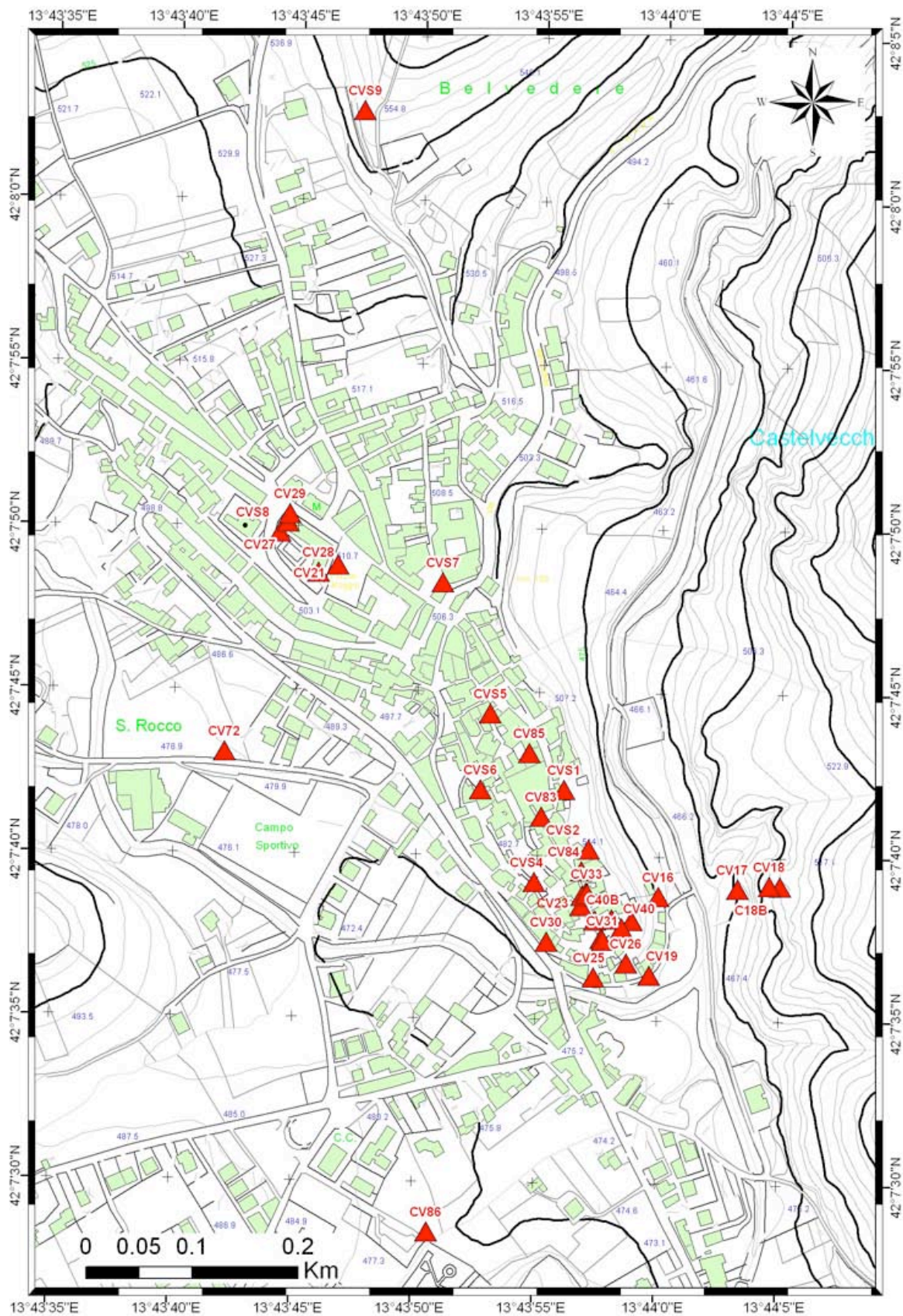


Figura 3. Mappa delle misure speditive di *noise* sismico ambientale realizzate per indagare gli effetti sismici locali nel centro storico di Castelvechio Subequo. Lo sfondo è rappresentato dalla Carta Tecnica Regionale digitale dell’Abruzzo a scala 1:5000.



Figura 4. Vista panoramica del centro storico di Castelvechio Subequo con particolare dell'area maggiormente danneggiata dal terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009.

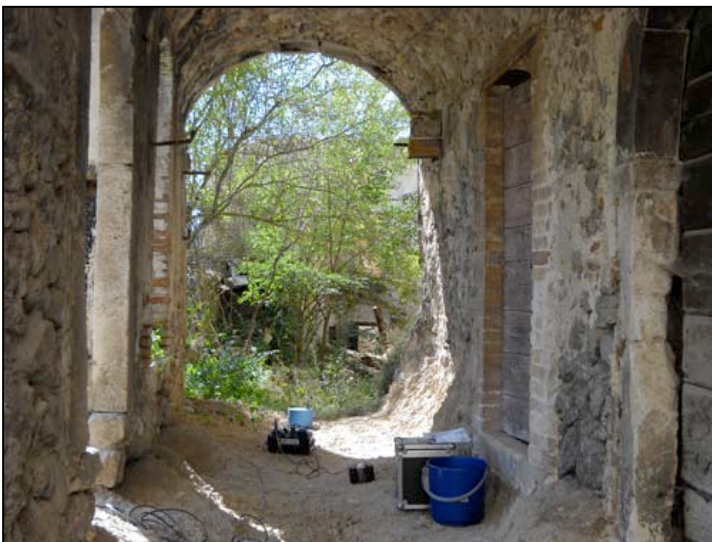


Figura 5. Esempi di affioramenti rocciosi all'interno del centro storico di Castelvechio Subequo.



Figura 6. Esempio di misura (CVS4) in cantina scavata direttamente nella roccia.

Oltre che nell'interno del centro storico, sono state effettuate misure intorno al rilievo morfologico, per poter avere un confronto tra l'area danneggiata e le aree circostanti. Le misure CVS8, CV28, CV29 (Fig.3) sono state eseguite nei pressi del centro scolastico del paese, in un'area non danneggiata ma che è di particolare interesse per l'amministrazione locale. All'interno della scuola sono state eseguite ulteriori due misure al primo piano dell'edificio, per una stima dei periodi di vibrazione dell'edificio. La misura CVS7 è stata eseguita ai piedi della chiesa il cui campanile è stato danneggiato dal sisma e che si trova appena all'esterno del centro storico. La misura CVS9 è stata eseguita all'esterno dell'area urbana, sul rilievo a nord del paese. Le misure CV72 e CV86 sono state eseguite per le indagini relative al bacino sedimentario ma sono utili per rilevare la risposta nei dintorni del centro storico, in aree non danneggiate. Infine, sono state eseguite tre misure (CV17, CV18 e C18B) sulle pendici del monte Urano, ad est di Castelvecchio Subequo. Tali misure sono state eseguite per indagare una situazione rocciosa simile a quella presente nel centro storico del paese, in quanto dal pendio del monte emergono dei pinnacoli rocciosi (Fig.7). La misura CV17 è stata posta alla base dei pinnacoli, mentre la misura CV18 alla sommità di uno di essi; C18B è stata eseguita in una posizione scostata dai pinnacoli ma sempre alla stessa quota di CV18. In tal modo si è voluta indagare la possibilità che tali pinnacoli siano strutture con un loro proprio comportamento di vibrazione.



Figura 7. Sinistra: misure di *noise* effettuate sui pinnacoli del pendio del monte Urano. Destra: pinnacoli rocciosi affioranti al di sotto del centro storico di Castelvecchio Subequo.

2. Strumentazione sismica e caratteristiche delle misure di *noise* sismico ambientale

La campagna di misure di *noise* sismico ambientale è stata condotta con strumentazione mobile dotata di acquisitori Reftek 130 a 24 bit (<http://www.reftek.com/model130-0.html>) connessi a sensori Lennartz 3D-5s (<http://www.lennartz-electronic.de>). La strumentazione è stata alimentata con batterie da 12V/12Ah/20Hr, delle dimensioni di 9.5x15x9 cm, permettendo un facile trasporto a mano. Ad ogni stazione è stata connessa un'antenna GPS per individuare le coordinate del punto di misura, il quale è sempre stato ricontrollato successivamente sulla Carta Tecnica Regionale digitale a scala 1:5000. In Fig.8 è visualizzata la composizione di una stazione sismica per le misure di *noise*.

L'utilizzo di un sistema di acquisizione ad alta dinamica e risoluzione permette di registrare i microtremori di fondo anche in zone particolarmente tranquille e lontane dai centri industriali. A tal scopo gli acquisitori sono stati impostati con guadagno alto, in modo da ottenere una maggior risoluzione e quindi la possibilità di registrare vibrazioni ancor minori del terreno. Per poter rilevare le basse frequenze di risonanza dei terreni attraverso la Tecnica di Nakamura [Nakamura,1989], si è scelto di utilizzare dei sensori con periodo di oscillazione naturale di 5 s; infatti, nel caso in cui i punti di misura vengano effettuati su spessori di sedimento di alcune centinaia di metri, le frequenze rilevate scendono al di sotto di 1 Hz.

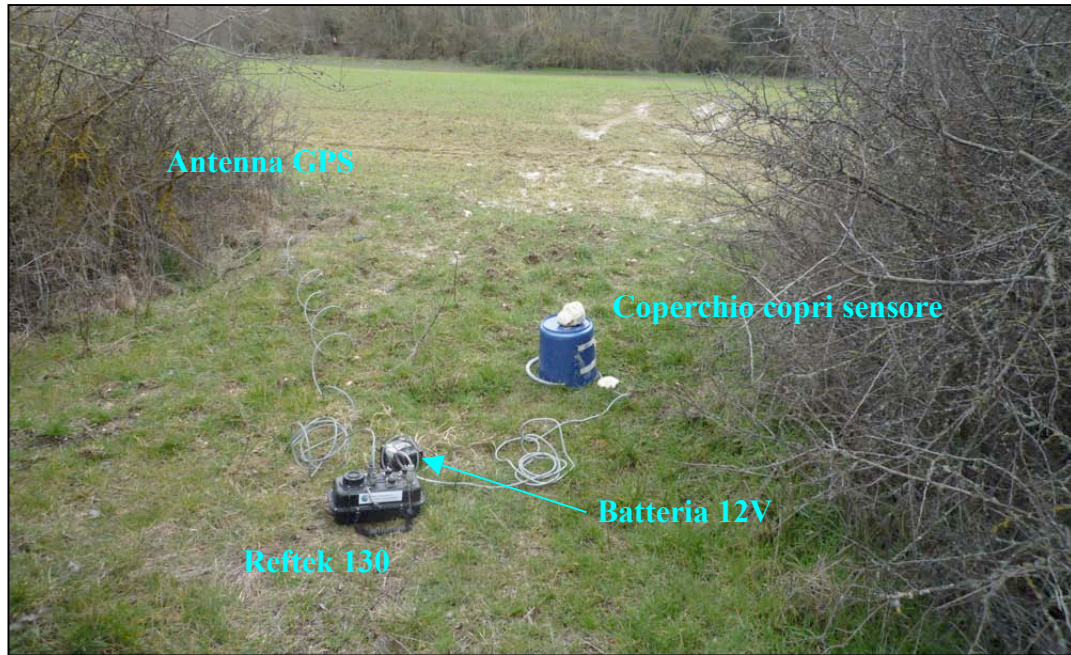


Figura 8. Strumentazione utilizzata per le misure di *noise* sismico ambientale.

Per mitigare sia l'effetto delle condizioni meteorologiche (vento e pioggia) presenti in alcuni giorni di misura, sia la presenza di vegetazione sul terreno, per molte delle misure di *noise* svolte in aperta campagna sono stati adottati alcuni accorgimenti. Contro pioggia e vento, i sensori sono stati riparati da un secchio di plastica, facendo attenzione che lo stesso non tocchi le pareti del sensore; inoltre è stato posto un peso sia sopra il secchio che sopra il cavo del sensore, in modo da attenuare le vibrazioni dovute al vento (Fig.8). Quando possibile, nei punti di misura in cui era presente un'alta vegetazione che poteva interagire con il sensore a causa del vento, il sensore è stato interrato nel suolo in modo da ricoprirlo fino all'orlo di terreno di riporto; questo permette di assicurarsi che il sensore sia ancora in bolla; successivamente il sensore veniva riparato comunque dal secchio.

Diversamente, effettuando le misure di *noise* all'interno del centro storico di Castelvecchio Subequo si ponevano altri problemi di disturbo o di distorsione dei dati registrati. Oltre agli agenti atmosferici, per poter effettuare delle misure di *noise* all'interno di un denso centro urbano bisogna considerare le condizioni di pavimentazione delle strade, la presenza di vuoti nel sottosuolo (cantine, garage, ecc...), la presenza degli edifici, del traffico veicolare e la presenza di qualsiasi tipo di macchinario in funzione che possa generare vibrazioni nel terreno nella banda di frequenza di analisi. Il centro storico di Castelvecchio Subequo, al momento delle misure, era chiuso al traffico ed evacuato, in quanto dichiarato zona rossa inaccessibile per la presenza di edifici pericolanti. Quindi era possibile escludere l'immediata vicinanza ai punti di misura di traffico e macchinari. In alcuni punti di misura è stato possibile posizionare i sensori direttamente sugli affioramenti di roccia in cortili interni o in cantine scavate nella roccia stessa; in altri casi i sensori sono stati posizionati su pavimentazione sottile al di sopra della roccia. Le misure sono state eseguite al di fuori degli edifici per minimizzare l'effetto di vibrazione indotto dalle strutture.

Gli acquisitori Reftek 130 sono stati configurati in laboratorio, in modo da ridurre il tempo delle operazioni sul campo. Sono stati impostati un campionamento a 100 cps, una durata dei *file* di registrazione di 1 ora, gain alto, trigger continuo, formato dei file reftek compresso; i dati dei 3 canali di acquisizione, uno per componente del sensore, sono stati indirizzati sulla scheda di memoria compact flash in modo da essere archiviati su un unico *stream*.

Una volta posizionata la strumentazione, in modo che sia pronta per la registrazione dei dati, è possibile avviare l'acquisizione attraverso l'utilizzo di un palmare connesso alla porta seriale dell'acquisitore; in alternativa, l'acquisitore può essere connesso ad un notebook tramite una porta TCP/IP.

Come controllo preliminare di funzionamento dell'apparato, vengono visualizzati i canali di acquisizione uno alla volta sul monitor del palmare (Fig.9). In tal modo è possibile accorgersi se il segnale sismico viene trasmesso dal sensore all'acquisitore e se la massa del sensore è libera di muoversi; infatti essa potrebbe rimanere bloccata per forti contraccolpi durante l'installazione. Infatti, è possibile che in un

utilizzo frequente del sensore durante le misure speditive di *noise*, lo strumento si blocchi o si debba riequilibrare mentre è alimentato.



Figura 9. Palmare dotato di copertura protettiva, utilizzato per la configurazione degli acquisitori, per lo *start* delle acquisizioni e per il controllo del segnale.

3. Analisi preliminare dei dati di *noise* sismico ambientale

Le misure di *noise* sismico ambientale hanno subito un processo di selezione preliminare, in modo da poter discriminare le misure riuscite da quelle inaffidabili. Per ottenere tale scopo sono state utilizzate codici Matlab[®] scritti da personale dell'INGV-MIPV, concepite in modo da permettere ad un utente esperto di selezionare visivamente le finestre di segnale utili. In Fig.10 e Fig.11 è mostrata l'interfaccia Matlab[®] utilizzata per la selezione delle finestre; in essa vengono visualizzati tre oggetti principali per ogni componente del segnale: la traccia (Fig.10c e 11c), la *Power Spectral Density* (Fig.10a e 11a), il rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e verticale (Fig.10b e 11b). L'intera misura di *noise* (ad esempio 30 minuti) è suddivisibile in finestre d'analisi mobili con sovrapposizione scelta. E' possibile visualizzare una finestra per volta, indicando se la si vuole escludere dall'analisi perché ritenuta disturbata. Nella scelta si è aiutati dallo sfondo dei grafici (in grigio in Fig.10 e in Fig.11), i quali rappresentano tutti gli spettri e i rapporti spettrali calcolati in quella misura; essi compongono una nuvola di valori dalla quale si intuiscono le caratteristiche medie del *noise* sismico. Se nella forma delle tracce risultano ampi transienti (Fig.10c), i quali generano spettri e rapporti spettrali anomali (rispettivamente Fig.10a e 10b), è possibile escludere dalle analisi tale finestra di segnale. Al contrario, se le tracce non presentano particolari transienti e gli spettri e rapporti spettrali di quella finestra d'analisi ricadono nella nuvola di valori (Fig.11), si può ritenere la finestra d'analisi non disturbata. Da ogni misura vengono scartate le finestre disturbate e in base al numero di finestre valide e alla stabilità delle caratteristiche del *noise* nel tempo si ritiene una misura affidabile.

Durante ogni misura, l'operatore sul campo indica sulla scheda di campagna eventuali disturbi rilevati come il vento, la pioggia, il traffico, linee elettriche, gasdotti ecc... In questo modo è possibile aspettarsi segnali anomali nelle misure e risalire alla natura e all'origine del disturbo. Analizzando i dati, sono state individuate 12 misure affette da disturbi per l'intera durata della registrazione; per la maggior parte dei 12 casi, l'origine è stata imputata al vento. Pur avendo riparato i sensori con un coperchio e in molti casi avendoli interrati, la presenza di violente e persistenti raffiche di vento ha comunque inficiato alcune misure; sia per l'azione diretta del vento sullo strumento sia probabilmente per la presenza di alberi e vegetazione, i quali interagiscono con il terreno, originando microtremiti. L'effetto risulta evidente nelle forme spettrali che si osservano elaborando i dati di tali misure (Fig. 12), in cui gli spettri del segnale sono modificati a tutte le frequenze analizzate, soprattutto per quel che riguarda le componenti orizzontali. Un altro esempio di

disturbo da vento è mostrato in Fig.13, in cui le misure C118 e C119 sono state eseguite in presenza di raffiche di vento più sporadiche e meno violente. L'ipotesi presa in considerazione è che il mancato interrimento, per le condizioni del terreno, e l'assenza di un peso che tenesse saldo il coperchio sopra il sensore, hanno fatto sì che le raffiche di vento agissero direttamente sulla copertura che probabilmente ha interagito o con il cavo o con il sensore stesso. Il risultato è la presenza di impulsi sulle sole componenti orizzontali con un periodo di oscillazione vicino a quello naturale del sensore. La differente forma degli impulsi rispecchia probabilmente la diversa interazione data dall'accoppiamento coperchio-sensore. Sono stati esclusi problemi elettrici o strumentali in quanto tale effetto è stato riscontrato su entrambe le misure, eseguite a poche centinaia di metri in contemporanea; quindi il fenomeno era presente su due strumenti differenti. In ogni caso, tale effetto, data la frequenza di accadimento del disturbo e la durata delle misure (circa 1 ora e mezza), non ha impedito l'utilizzo dei dati per le analisi spettrali.

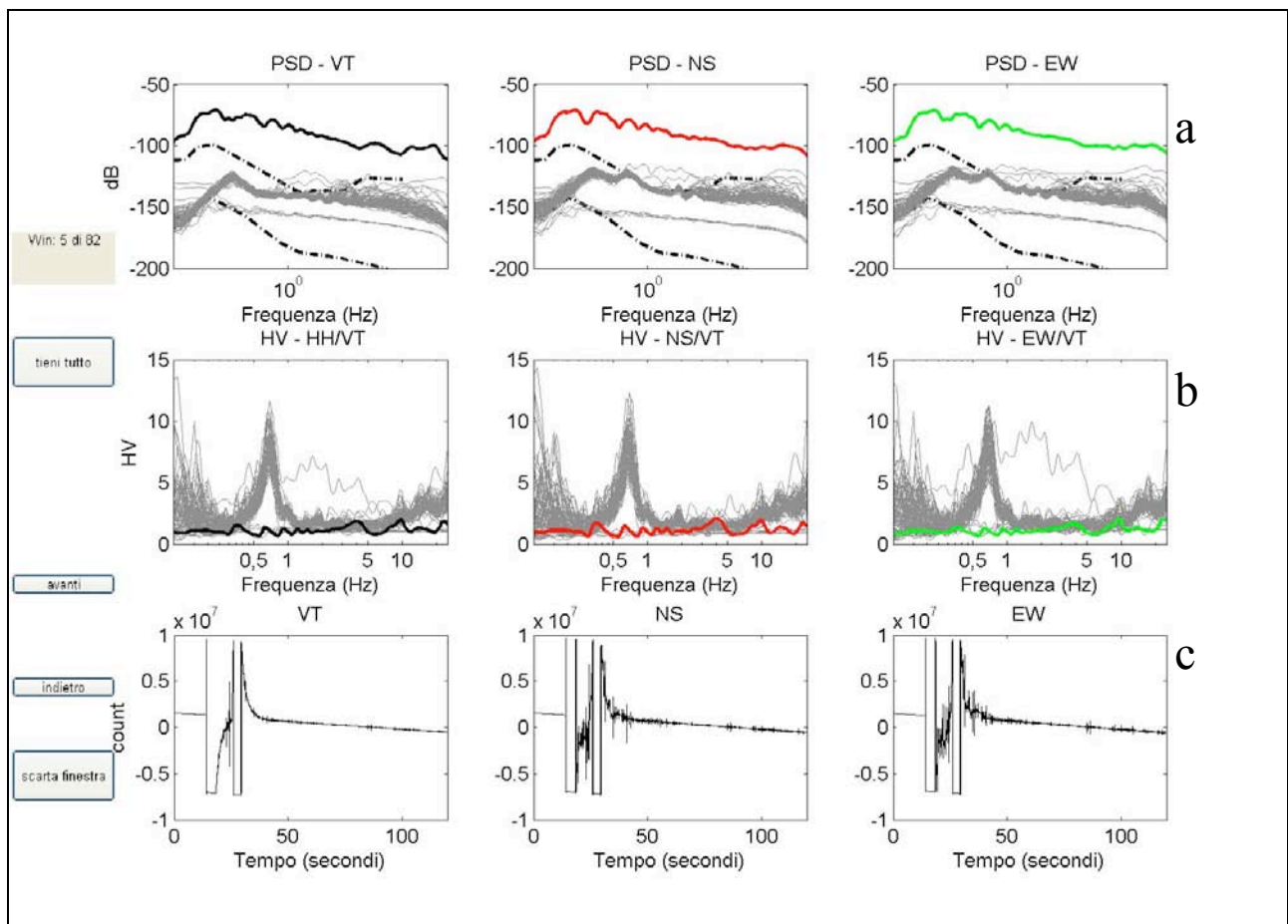


Figura 10. Esempio di schermata dell'interfaccia Matlab® per la selezione di finestre di segnale di *noise*. PSD di tutte le finestre analizzate (a), HV di tutte le finestre analizzate (b), e una finestra di segnale disturbata e scartata dall'analisi (c). I colori ed i tratti utilizzati in (a) e (b) indicano: grigio= PSD e HV di tutte le finestre di segnale della misura; nero = componente verticale; rosso= componente nord-sud; verde: componente est-ovest; nero tratteggiato: curve di Peterson [Peterson,1993].

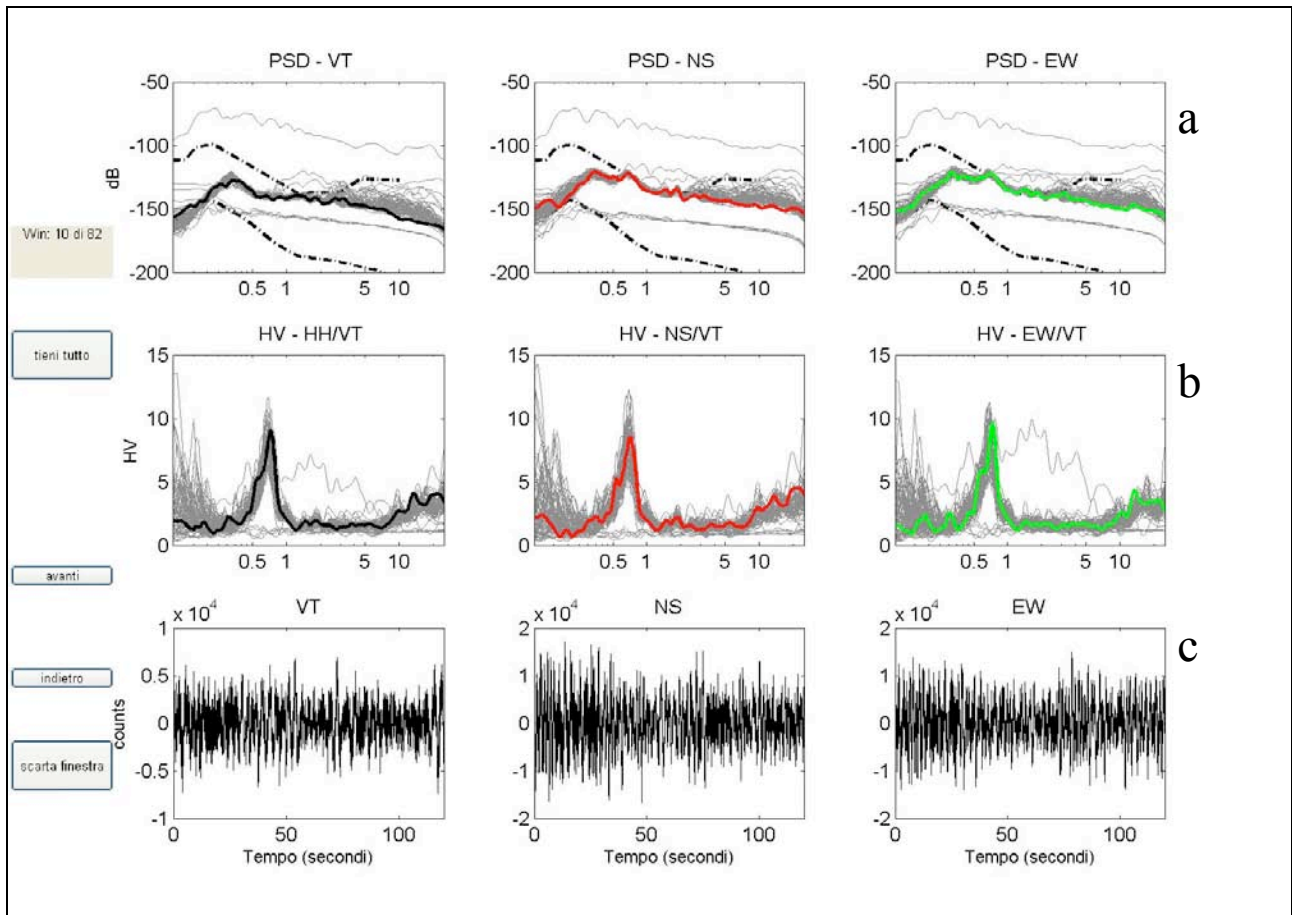


Figura 11. Schermata dell'interfaccia Matlab[®] per la selezione di finestre di segnale di *noise*. Nell'esempio viene riportata una finestra di segnale non disturbata e ritenuta utile per l'analisi. Grigio: PSD e rapporti spettrali di tutte le finestre di segnale della misura. PSD e HV: nero = componente verticale; rosso: componente nord-sud; verde: componente est-ovest. Nero tratteggiato: curve di Peterson [Peterson, 1993].

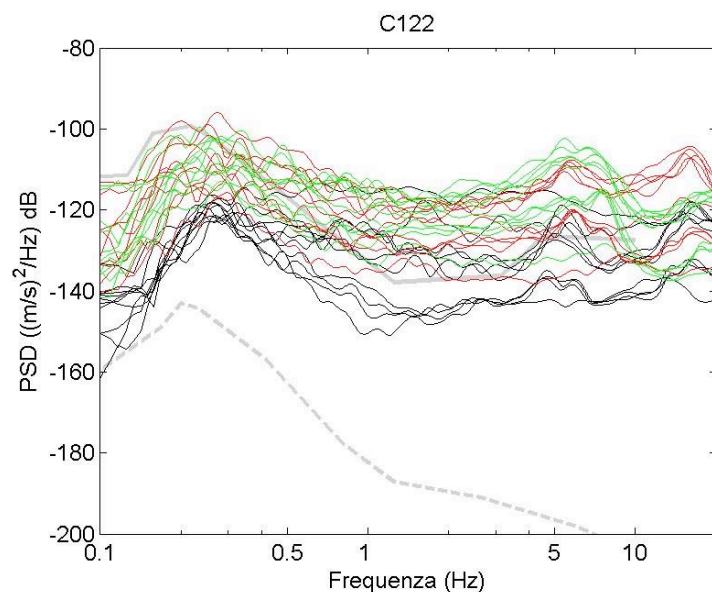


Figura 12. *Power Spectral Density* da finestre di segnale della durata di 120 s della misura C122. Durante tale misura erano presenti violente e persistenti raffiche di vento. Nero: componente verticale. Rosso: componente nord-sud. Verde: componente est-ovest.

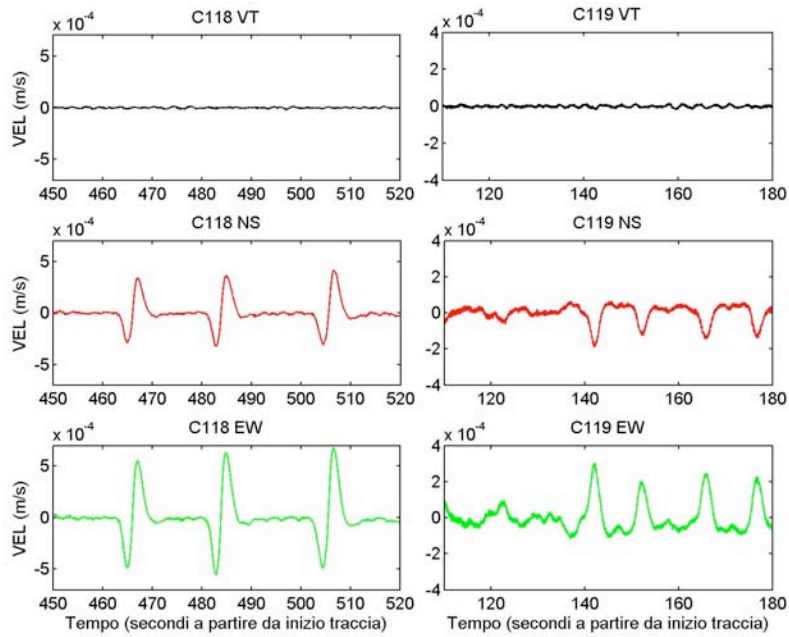


Figura 13. Tracce delle misure C118 (sinistra) e C119 (destra). In questi siti sono state segnalate sporadiche raffiche di vento. Nero: componente verticale. Rosso: componente nord-sud. Verde: componente est-ovest.

Utilizzando le finestre di segnale selezionate in tutte le misure eseguite, è possibile restituire l'intervallo dei livelli di *noise* sismico ambientale rilevati nella conca Subequana. La Fig.14 riporta le *Probability Density Function* (PDF) ottenute da tutte le *Power Spectral Density* (PSD) risultanti dalle finestre selezionate. Le PDF sono state calcolate come descritto in [McNamara and Buland, 2004] e [Marzorati and Bindi, 2006]; esse rappresentano la probabilità dei livelli di *noise* in tutte le misure effettuate nella conca Subequana e nel paese di Castelvecchio Subequo. Come si nota dalla Fig.14, i livelli di *noise* non superano praticamente mai la curva del *New High Noise Model* [Peterson, 1993], indicando che in generale i disturbi non sono elevati, anche se presenti. Infatti, come ci si aspetta, al di sopra di 1 Hz, il livello del *noise* aumenta per la presenza di disturbi antropici dovuti a macchinari industriali o ad attività antropiche di vario genere; anche il traffico veicolare, il quale si esprime a frequenze intorno ai 10 Hz [McNamara and Buland, 2004] risulta contenuto. A bassa frequenza, per valori minori di 1 Hz, è possibile constatare un maggior livello del *noise* sismico ambientale sulle componenti orizzontali; probabilmente il fenomeno è dovuto all'amplificazione dei segnali microsismici dovuta alla presenza dei sedimenti profondi del bacino della conca Subequana.

La selezione accurata dei dati di *noise* sismico permette di avere a disposizione un *data set* affidabile, in modo da poter considerare i risultati l'espressione del comportamento e delle caratteristiche del terreno. Il *data set* raccolto con la campagna di misure permetterà di ottenere utili informazioni sulle caratteristiche del bacino sedimentario della conca Subequana, stimando le frequenze fondamentali dei terreni. Grazie alla strumentazione utilizzata e alla qualità dei dati, è possibile ottenere risultati come quello riportato in Fig.15, in cui il chiaro picco spettrale del rapporto tra le componenti orizzontali e verticale del segnale (HV) indica una profondità cospicua dei sedimenti ed un buon contrasto di impedenza tra i termini limosi che compongono il bacino rispetto al sottostante substrato calcareo.

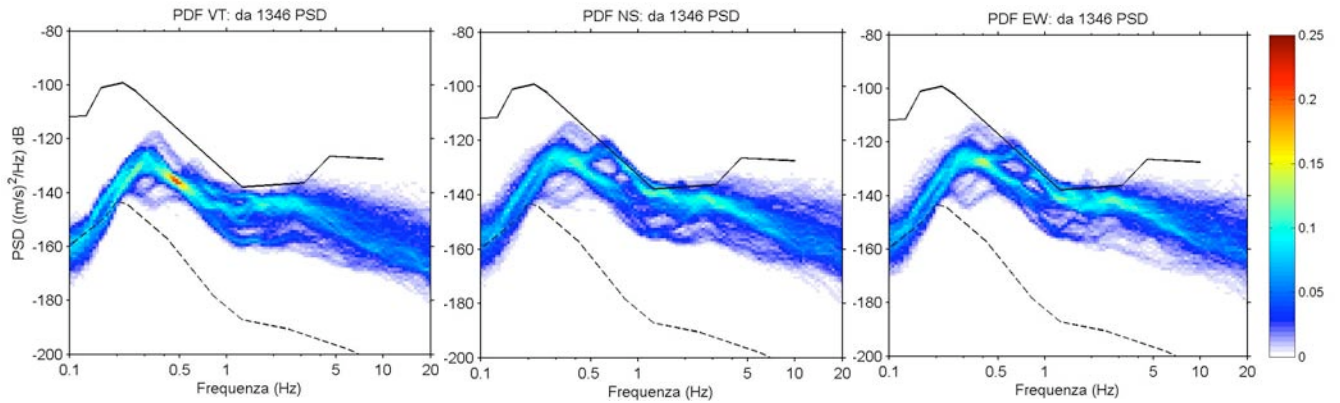


Figura 14. PDF ottenute dalle 1346 PSD di finestre da 120 s selezionate in tutte le misure di *noise* sismico effettuate. La scala di colori rappresenta la probabilità. Sinistra: componente verticale. Centro: componente nord-sud. Destra: componente est-ovest. Nero continuo e tratteggiato: curve di Peterson (1993).

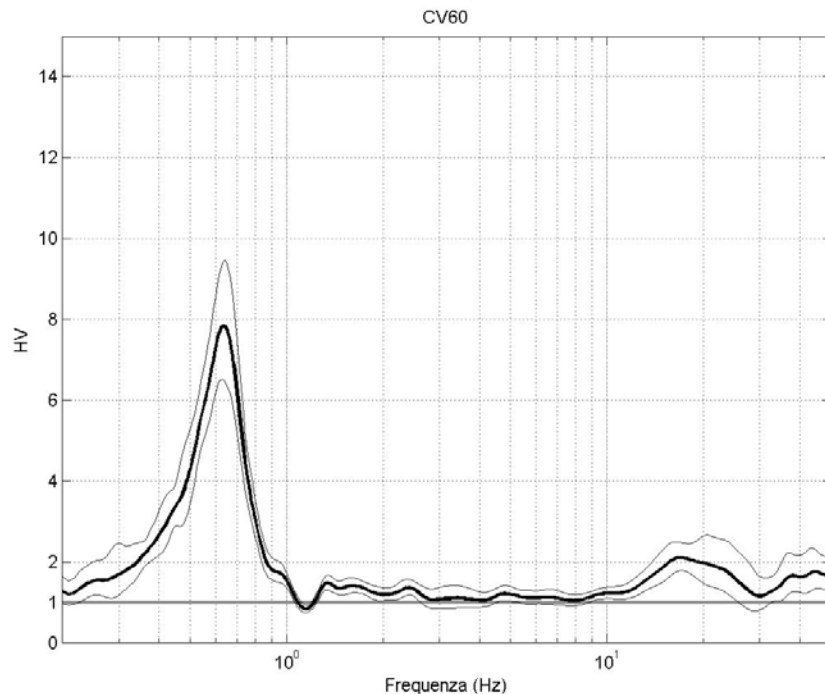


Figura 15. Rapporto spettrale HV nel punto di misura CV60. Il picco spettrale è centrato sulla frequenza di 0.63 Hz.

4. La micro rete di monitoraggio di Castelvechio Subequo

Al fine di completare lo studio degli effetti locali nel centro storico di Castelvechio Subequo, si è deciso di installare una micro rete di monitoraggio composta da 3 stazioni sismiche, in modo da registrare segnali di terremoti.

La rete è stata installata il giorno 17 Settembre 2009 e disinstallata il giorno 4 Novembre 2009, funzionando ininterrottamente per 48 giorni.

Le 3 stazioni sono state installate a seguito delle prime indagini di *noise* sismico. La progettazione della micro rete doveva coinvolgere almeno un sito di riferimento e un sito in cui ci si aspettavano effetti di amplificazione. Dalle misure di *noise* sismico e dall'applicazione della Tecnica di Nakamura [Nakamura, 1989] si avevano indicazioni di amplificazioni delle componenti orizzontali rispetto alla componente verticale del moto del terreno nella porzione sommitale del rilievo morfologico, su quale è costruito il centro

storico di Castelvecchio Subequeo. Al contrario, alle pendici del monte Urano, prospiciente il paese, gli affioramenti dello stesso litotipo calcareo davano risposta piatta e quindi priva di amplificazioni delle componenti del moto (Fig.16 e Fig.17). A partire da questo inquadramento del problema, si è deciso di impiegare le tre stazioni con il seguente schema:

- stazione di analisi installata sulla cresta del rilievo morfologico su cui è costruito il paese;
- stazione di riferimento installata sul versante adiacente il paese, ad una quota simile a quella della stazione di analisi;
- seconda stazione di riferimento alla base del rilievo morfologico su cui è costruito il paese

Quindi, l'idea è di studiare le caratteristiche del moto del suolo per terremoti che arrivano alla base del rilievo morfologico ed osservare le eventuali modificazioni all'apice del rilievo, confrontandole con il moto che si osserva in un sito in cui non ci si aspettano anomalie.

In Fig.18 è visualizzata la mappa delle tre stazioni, rispetto la topografia che circonda l'abitato di Castelvecchio Subequeo, mentre in Fig.19 è presentata una panoramica dell'area di studio con indicate le posizioni delle stazioni.

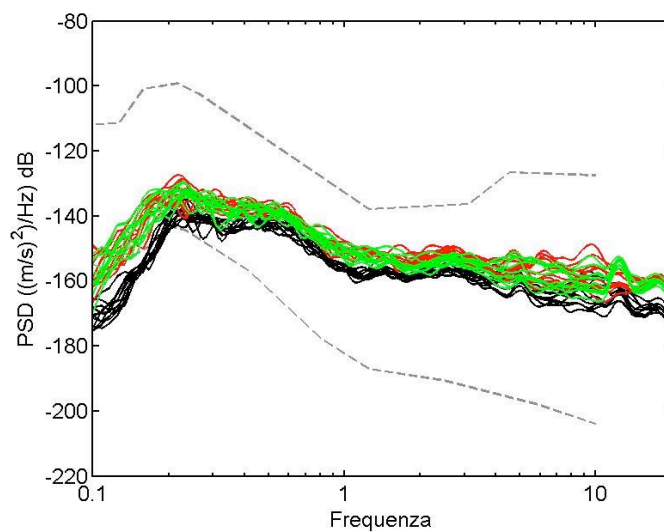


Figura 16. *Power Spectral Density* delle 11 finestre di *noise* selezionate del punto di misura CV18. Nero: componente verticale; rosso: componente nord-sud; verde: componente est-ovest. Grigio: curve di riferimento di Peterson (1993).

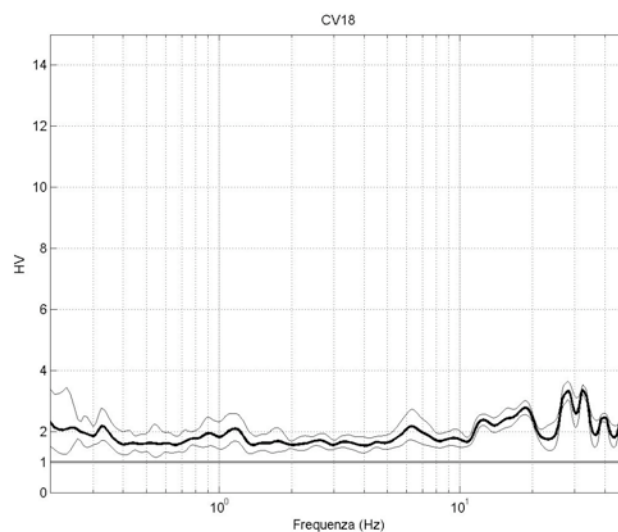


Figura 17. Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la verticale del *noise* registrato al punto di misura CV18, il quale può essere utilizzato come sito di riferimento.

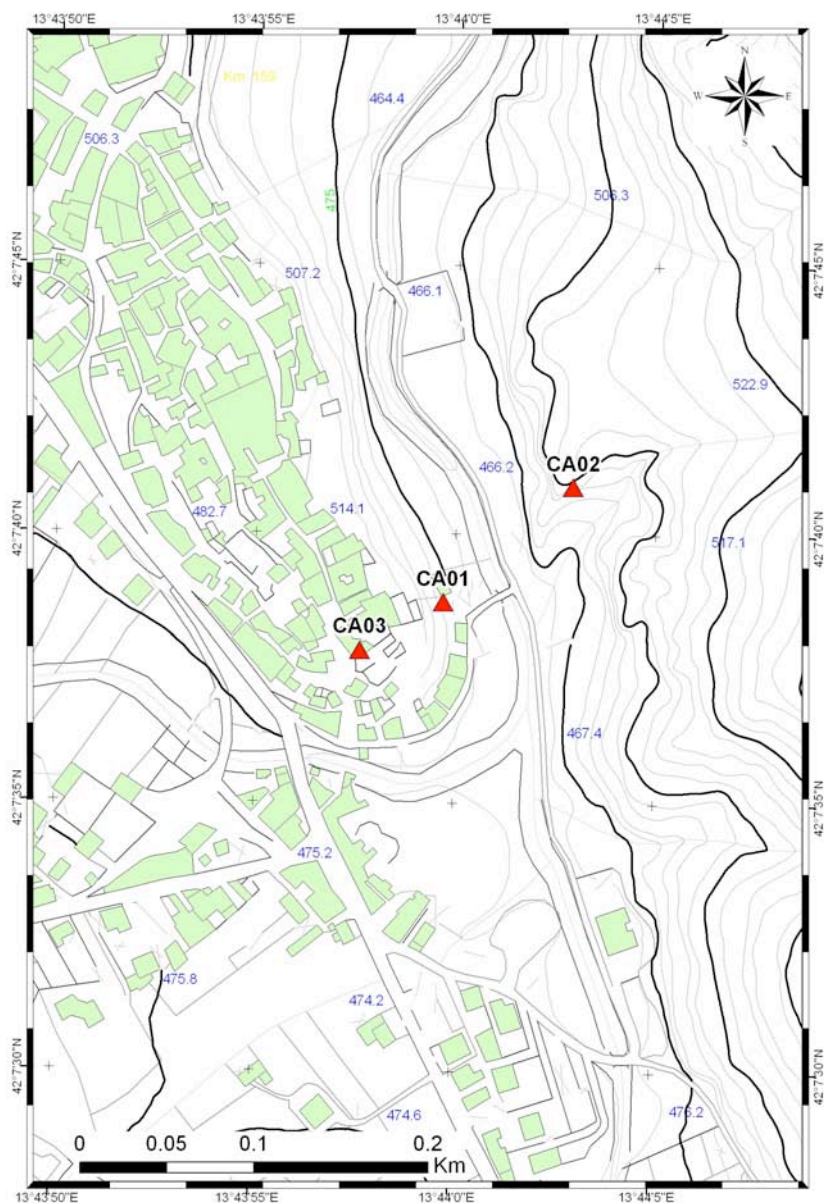


Figura 18. Mappa della micro rete di 3 stazioni per lo studio degli effetti di sito. Lo sfondo rappresenta la Carta Tecnica Regionale della Regione Lazio alla scala 1:5000 con equidistanza tra isoipse di 5 m. Triangoli rossi: stazioni sismiche; poligoni verdi: edifici del Comune di Castelvecchio Subequo; numeri blu: quote in metri s.l.m.; numeri verdi: quote in m s.l.m. dell'isoipsa direttrice.

Data la relativa vicinanza con l'area sismicamente attiva dell'aquilano e per non incorrere nella saturazione dei segnali dovuti ad eventuali forti terremoti nelle vicinanze, le stazioni sismiche sono state dotate di sensori accelerometrici Episensor (con *fullscale* impostato dalla fabbrica produttrice a 2 g; <http://www.kinematics.com/p-87-EpiSensor-ES-T.aspx>), affiancati ai sensori velocimetrici Lennartz 3D-5s.

Per registrare il segnale di entrambi i sensori, ogni stazione è stata equipaggiata di acquisitori Reftek 130 a 6 canali. Gli acquisitori sono stati configurati in modo da archiviare i dati del velocimetro e dell'accelerometro su due *stream* separati (Tab.1). Alla fine, nella scheda di memoria si ritrovano i dati in una struttura a sottocartelle con un percorso del tipo: anno_giornogiuliano/reftek_code/stream/. Nel caso di questo esperimento i *file* formato compresso reftek sono stati impostati della lunghezza di 1 ora.

I sensori Episensor utilizzati hanno un voltaggio di *output* di 20 V picco-picco, mentre gli acquisitori Reftek 130 hanno un voltaggio di *input* di 10 V picco-picco. Questo significa che il segnale elettrico in uscita dal sensore è tagliato a metà della sua dinamica dall'acquisitore; essendo gli Episensor impostati con un *fullscale* di 2 g, il massimo segnale registrabile dall'apparato di acquisizione Episensor-Reftek utilizzato nell'esperimento è di 1 g.

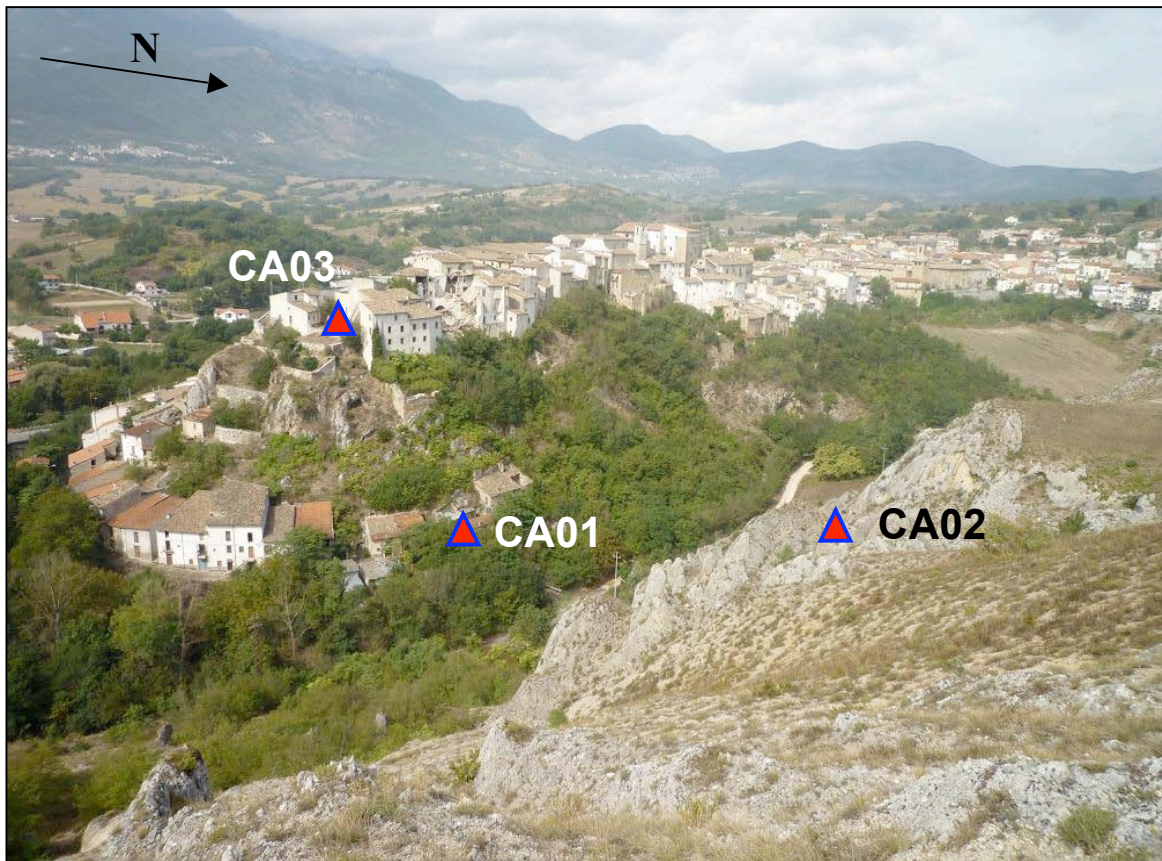


Figura 19. Panoramica del centro storico di Castelvechio Subequo. Triangoli rossi-blu: posizione delle stazioni sismiche della micro rete. CA03: stazione di analisi sulla cresta del rilievo morfologico; CA02: stazione di riferimento sulle pendici del monte Urano; CA01: stazione di riferimento alla base del rilievo morfologico. La freccia nera indica la direzione del nord.

COD STAZ	ACQ.	CH 1-3 Sensore	CH 4-6 Sensore	START (ora UTC)	STOP (ora UTC)	LAT	LON	QUOTA
CA01	RT130	Le3D-5s	Episensor	17-09-2009 07:04	03-11-2009 15:17	42.128079	13.733157	476
CA02	RT130	Le 3D-5s	Episensor	18-09-2009 09:38	03-11-2009 15:49	42.128683	13.734050	495
CA03	RT130	Le 3D-5s	Episensor	17-09-2009 11:44	04-11-2009 10:44	42.127830	13.732578	520

Tabella 1. Stazioni sismiche della micro rete di Castelvechio Subequo.

I sensori sono stati appoggiati su affioramenti di roccia calcarea. La stazione CA01, alla base del paese, è stata alloggiata in una cavità rocciosa adibita a cantina. La stazione CA02, sulle pendici del monte Urano, è stata alloggiata in una cavità naturale tale da ospitare la strumentazione riparata dalle intemperie. La stazione CA03, all'interno del paese di Castelvechio Subequo, è stata installata all'altezza delle fondamenta di un edificio di un solo piano, in un vano scavato direttamente nella roccia. In Fig.20 sono mostrate le immagini delle tre stazioni installate.

Le tre stazioni sono state dotate di antenna GPS in modo da sincronizzare il tempo assoluto di registrazione e permettere un confronto dei dati tra la stazione d'analisi e le stazioni di riferimento.

Tutte le stazioni sono state alimentate tramite un pannello solare ed una batteria tampone, entrambi da 12V/65Ah. Tale alimentazione è stata sufficiente per alimentare in continuo le stazioni per tutti i 48 giorni di registrazione. Inoltre ogni Reftek 130 è stata dotata di due *Compact Flash* per un totale di 4 Gb di memoria a stazione. Alla fine dei 48 giorni di registrazione, con un campionamento a 100 cps e con $gain = 1$, i dati

avevano occupato per le stazioni CA01 e CA02 circa 2,6 Gb di memoria, mentre per la stazione CA03 3,5 Gb di memoria; le stazioni hanno funzionato in continuo senza interruzione per tutta la durata dell'esperimento. I dati raccolti in CA03 hanno occupato più memoria che in CA01 e CA02 a causa delle maggiori ampiezze del segnale, dovute probabilmente alla presenza di disturbi provenienti dal centro abitato e alle amplificazioni.



Figura 20. Immagini dei siti (sinistra) e delle stazioni (destra) della micro rete. Alto: CA01. Centro: CA02. Basso: CA03. Le frecce rosse indicano la posizione di ogni strumento.

Al momento di disinstallare le stazioni, al sito CA02 è stato ritrovato il sensore velocimetrico ribaltato, probabilmente per un tentativo di furto del pannello solare. Controllando i dati dei canali 1-3 della stazione CA02, è stato individuato il momento del ribaltamento del sensore (Fig.21), il quale è avvenuto il giorno 17 ottobre 2009. Quindi, per quel che riguarda il sensore velocimetrico, rimangono comunque salvi 1 mese di dati. Un altro problema riscontrato è il mal funzionamento della componente verticale dell'accelerometro della stazione CA03.

Nonostante i problemi riscontrati, è stato possibile realizzare un *data set* di forme d'onda dei terremoti registrati nel periodo 17 Settembre – 3 Novembre 2009. Il giorno 9 Novembre 2009 sono stati selezionati i terremoti dal portale ISIDE (<http://iside.rm.ingv.it>), corrispondenti al periodo dell'esperimento in un'area di

raggio pari a 100 Km da Castelvechio Subequo. Sono risultati 903 eventi in un intervallo di magnitudo M_L da 0.1 a 4.1 (Fig.20). Gran parte di questi eventi ha localizzazione nell'area aquilana; oltre a questi, è stata registrata una sequenza nella zona di Cassino a sud della conca Subequana, più altri terremoti distribuiti intorno alla micro rete; gli unici azimuth scoperti sono quelli relativi ad un'area a E-SE della micro rete, in direzione di Sulmona.

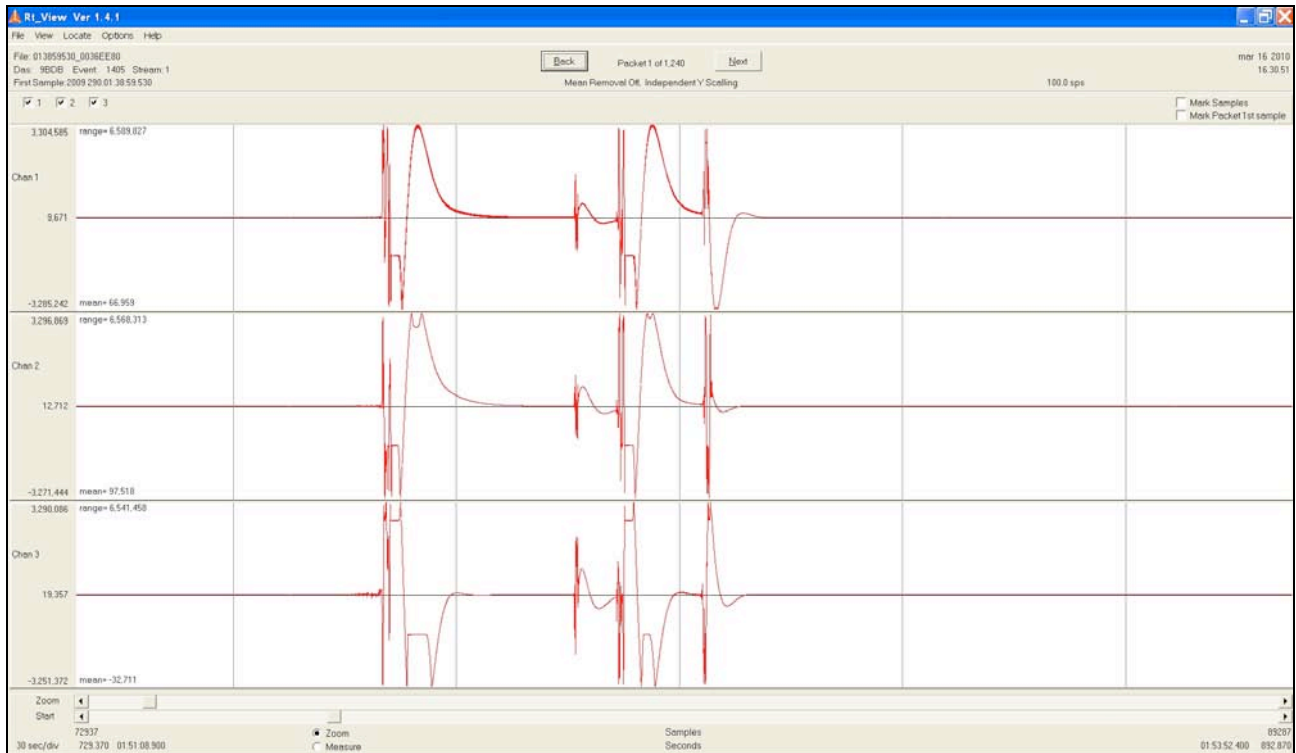


Figura 21. Traccia del segnale registrato al sensore velocimetrico della stazione CA02 nel momento di ribaltamento dello strumento. Schermata del programma RT View (http://www.reftek.com/modelRT_View.html).

Per poter estrarre le forme d'onda degli eventi dalle registrazioni in continuo, sono stati utilizzati alcuni *script* Linux scritti da personale INGV-MIPV, i quali automatizzano l'utilizzo di *routine* del pacchetto PASSCAL (<http://www.passcal.nmt.edu/content/software-resources>) per la trasformazione dei dati dal formato reftek al formato SEG Y e da questo al formato SAC (http://www.iris.edu/manuals/sac/SAC_Home_Main.html). A tal punto i dati sono stati trasformati in formato SAC e sono sempre strutturati in file di un'ora di registrazione. Utilizzando ulteriori script che permettono un utilizzo automatico del codice SAC (Seismic Analysis Code), l'intestazione di ogni file viene fornita delle informazioni di acquisizione, in modo da poter risalire a tutti i parametri di registrazione; uno schema delle informazioni inserite in ogni file SAC può essere reperita al link: http://accel.mi.ingv.it/statiche/ABRUZZO-2009/form_sac.html. Infine è stata utilizzata una routine Matlab[®] sviluppata in INGV-MIPV al fine di estrarre gli eventi a partire dai tempi origine del bollettino di ISIDE. La routine è stata impostata in modo che per ogni evento venisse estratta una forma d'onda a partire 20 secondi prima del tempo origine e per una durata di 120 e 300 secondi oltre il tempo origine, per i terremoti rispettivamente di magnitudo minore-uguale a 4 e maggiore di 4. I dati sono stati archiviati in una struttura a cartelle in cui ogni cartella riporta il tempo origine dell'evento (formato *yyyymmddhhmmss*) e dentro ad ogni cartella evento si trovano le forme d'onda di tutte le stazioni che l'hanno registrato.

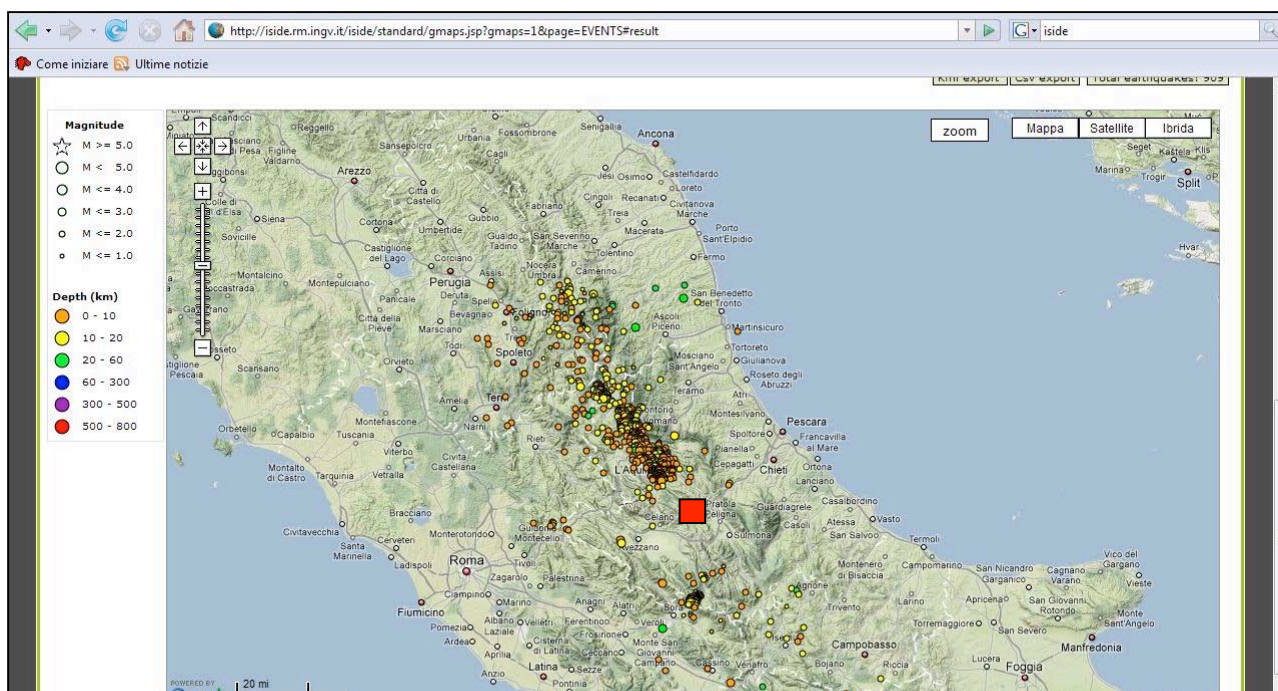


Figura 22. Schermata dei terremoti selezionati attraverso il portale ISIDE il giorno 9 Novembre 2009, per il periodo dal 17 Settembre al 3 Novembre 2009 ad una distanza massima di 100 Km dalla micro rete di monitoraggio. Il rettangolo rosso indica l'area in cui si trova la conca Subequana.

Una volta ottenute le forme d'onda degli eventi, per gli scopi dello studio sono stati individuati manualmente gli arrivi delle onde S sulle tracce velocimetriche di ogni stazione. In tal modo è stato possibile selezionare visivamente gli eventi che sono stati effettivamente registrati tra i 903 estratti automaticamente dal bollettino di ISIDE. Tale operazione ha dato i seguenti risultati: alle stazioni CA01, CA02 e CA03 è possibile analizzare rispettivamente 295, 234 e 308 eventi. Data la distanza e la magnitudo degli eventi selezionati, non è stata riscontrata saturazione del segnale in nessuna delle tracce velocimetriche. Questo permette di poter utilizzare a pieno tutti i dati registrati alla stazione CA03 che presentava problemi alla componente verticale dell'accelerometro. In Fig.23 sono visualizzate le tracce delle tre componenti velocimetriche per l'evento di magnitudo MI 4.1 del 24 Settembre 2009 alle 16:14, registrato dalla stazione CA03. Per evidenziare l'utilità del *data set* raccolto al fine di studiare gli effetti locali nel centro storico di Castelvecchio Subequo, si mostra la Fig.24, in cui è possibile avere un raffronto diretto tra le tracce delle componenti est-ovest (EW) delle stazioni di riferimento rispetto alla stazione di analisi.

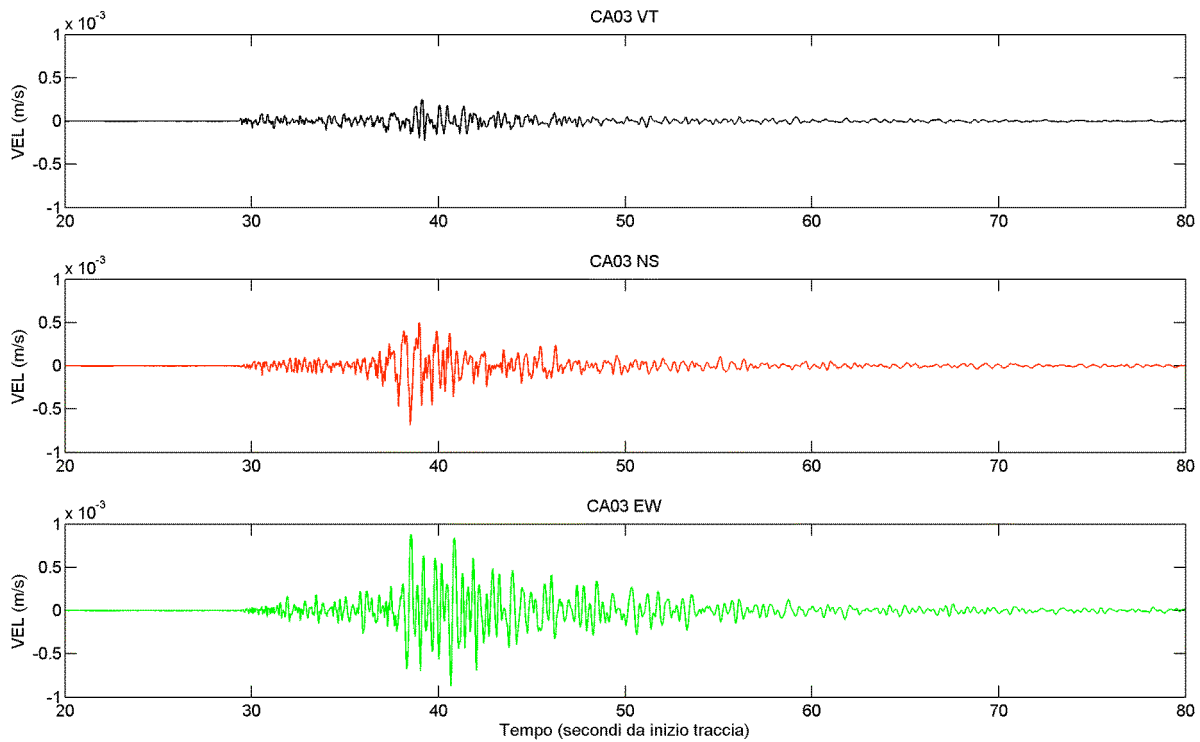


Figura 23. Forme d'onda velocimetriche dell'evento di MI 4.1 del 24 Settembre 2009 alle 16:14, registrato alla stazione CA03. Nero (VT): componente verticale; rosso (NS): componente nord-sud; verde (EW): componente est-ovest.

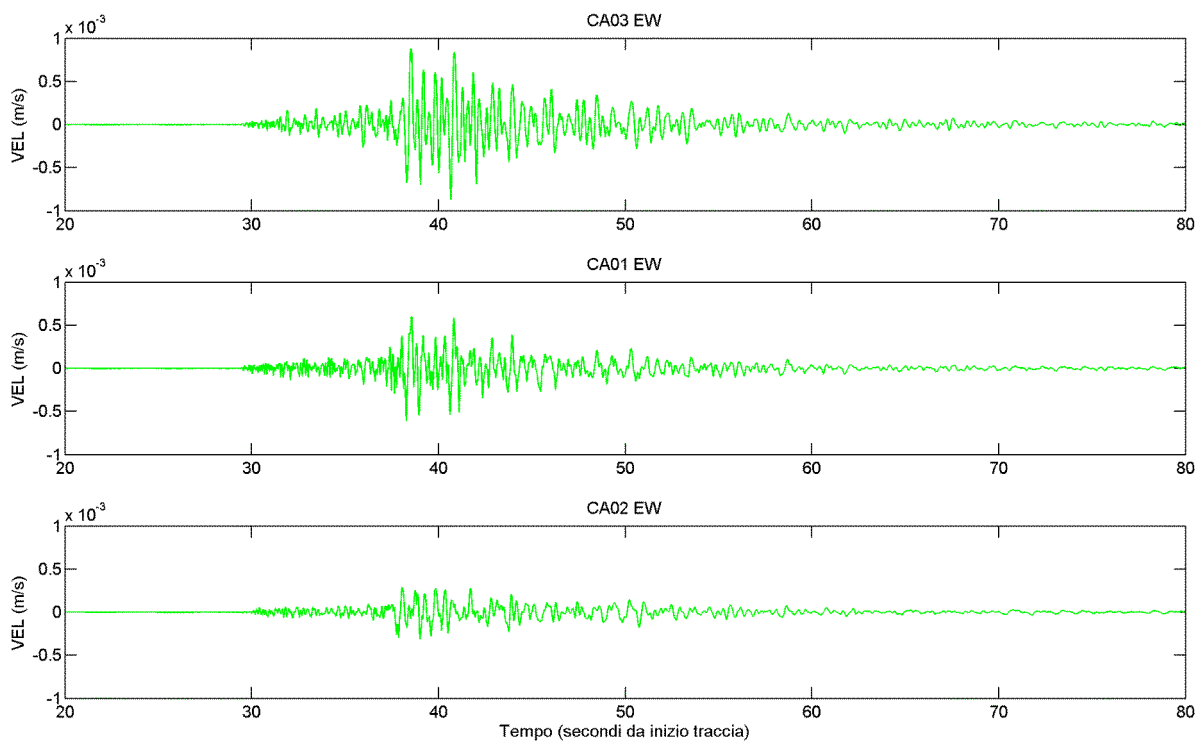


Figura 24. Forme d'onda velocimetriche delle componenti est-ovest (EW) dell'evento di MI 4.1 del 24 Settembre 2009 alle 16:14, registrato alle stazioni CA03, CA01 e CA02.

5. Conclusioni

Attraverso una serie di interventi sul campo, sono stati raccolti dati sismici relativi a *noise* sismico ambientale e terremoti nell'area della conca Subequana e all'interno del centro abitato di Castelvechio Subequo.

La campagna di misure di *noise* sismico ha quasi ricoperto l'intera area del bacino sedimentario della conca Subequana e ha coperto densamente l'area del centro storico di Castelvechio Subequo. Le condizioni ambientali che si sono susseguite durante le misure hanno, in alcuni casi, rallentato le operazioni e disturbato le registrazioni. Una dettagliata analisi preliminare dei dati ha permesso di individuare le registrazioni o le porzioni di registrazione non affidabili in modo da poterle escludere dalle elaborazioni. Inoltre, compilando schede di campagna di ogni misura e indicando le possibili fonti di disturbo, è stato possibile illustrare alcuni effetti di disturbo come quello del vento, risalendo alle possibili cause legate all'installazione della strumentazione. In generale, gli accorgimenti utilizzati per eseguire le misure speditive hanno permesso di raccogliere dati utili per lo studio delle caratteristiche del bacino sedimentario della conca Subequana e nell'individuazione di effetti sismici locali.

L'esperimento è stato ampliato attraverso l'installazione di una micro rete per la registrazione di terremoti, la quale ha funzionato ininterrottamente per circa 50 giorni, permettendo di raccogliere le forme d'onda di alcune centinaia di eventi sismici. Le 3 stazioni della rete, sono state posizionate in modo da poter confrontare la risposta sismica tra l'apice del rilievo morfologico sul quale è costruito il centro storico di Castelvechio Subequo e un sito di riferimento posizionato sugli affioramenti rocciosi del monte Urano, prospicienti il paese.

I risultati preliminari della campagna di raccolta dati, descritta in questo rapporto, sono stati presentati recentemente ad un convegno nazionale [Falcucci et al., 2009; Marzorati et al., 2009] e verranno pubblicati prossimamente su riviste scientifiche internazionali.

Ringraziamenti

Si ringraziano per il supporto logistico e l'accoglienza il Sindaco di Castelvechio Subequo, Carmine Amorosi, e l'Assessore alla Cultura, Pietro Salutari.

Si ringrazia il Gruppo Archeologico Superequano per aver promosso le attività svolte.

Si ringrazia il Dott. Fabrizio Galadini per aver consigliato ed incentivato un caso di studio di particolare interesse.

Si ringrazia Gianfranco Calcagni per le utili indicazioni archeologiche e per l'appoggio logistico durante le operazioni.

Un grazie ad Emanuela Falcucci e Stefano Gori per il proficuo scambio di idee e informazioni geologiche che hanno guidato la campagna di misure.

Un grazie ad Ezio D'Alema che ha sviluppato gli script che gestiscono la trasformazione dei dati e per il supporto tecnologico a distanza.

Un grazie a Lisa, Cristina ed alle loro famiglie per averci deliziato con la loro eccezionale cucina abruzzese.

Un grazie a Lucy e Lucio per la loro sempre presente disponibilità e amicizia.

Ed infine un grazie alla popolazione subequana per l'interesse dimostrato e per l'aiuto spontaneo.

Bibliografia

- Ameri, G., Augliera, P., D'Alema, E., Franceschina, G., Galadini, F., Ladina, C., Lovati, S., Luzi, L., Maistrello, M., Marzorati, S., Massa, M., Piccarreda, D., Puglia, R., (2009). Indagini strumentali a seguito del terremoto del 6 Aprile 2009 (Mw 6.3). Poster: XXVIII Convegno Nazionale GNGTS, 16-19 Novembre 2009, Trieste.
- Falcucci, E., Gori, S., Moro, M., Galadini, F., Marzorati, S., Ladina, C., Piccarreda, D., Fredi, P., (2009). Evidenze di fagliazione normale tardo-olocenica nel settore compreso fra la conca Subequana e la Media Valle dell'Aterno, a sud dell'area epicentrale del terremoto di L'Aquila del 6 Aprile 2009. Implicazioni sismotettoniche. Presentazione: XXVIII Convegno Nazionale GNGTS, 16-19 Novembre 2009, Trieste.
- Galli, P. e Camassi, R., (eds.), (2009). Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 Aprile 2009. Rapporto congiunto DPC-INGV, 12 pp. Sito internet <http://portale.ingv.it/real-time-monitoring/quest/>.
- Marzorati, S. and Bindi, D., (2006). Ambient noise levels in north central Italy. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q09010, doi:10.1029/2006GC001256.
- Marzorati, S., Ladina, C., Falcucci, E., Gori, S., Ameri, G., Piccarreda, D., Galadini, F., (2009). Castelvechio Subequo (Aq): evidenze di amplificazione sismica su roccia. Presentazione: XXVIII Convegno Nazionale GNGTS, 16-19 Novembre 2009, Trieste.
- McNamara, D. E. and Buland, R. P., (2004). Ambient noise levels in the continental United States. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94(4), 1517-1527.
- Miccadei E., Barberi R., De Caterini G., 1997: Nuovi dati geologici sui depositi quaternari della conca Subequana (Appennino abruzzese). *Il Quaternario*, 10(2), 485-488.
- Nakamura, Y., (1989). A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Rept. RTRI Japan*, 30, pp. 25-33.
- Peterson, J., (1993). Observations and modeling of background seismic noise. U.S. Geol. Surv. Open File Rep., 93-322.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2010 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia