

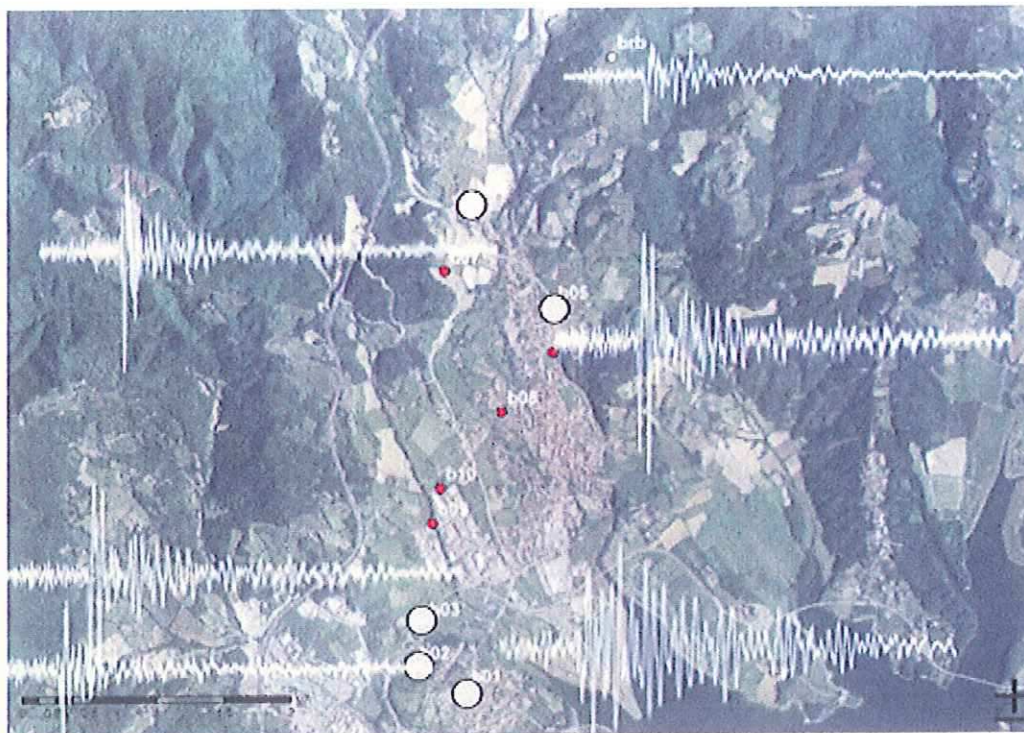


Università degli Studi di Firenze

Dipartimento di Scienze della Terra
CENTRO DI COMPETENZA DEL DIPARTIMENTO DELLA
PROTEZIONE CIVILE - PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI



Microzonazione Sismica Strumentale del Comune di Barberino del Mugello (FI)



*Laboratorio di Geofisica Sperimentale – <http://lgs.geo.unifi.it/>
Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze
via G. La Pira, 4 – 50121, Firenze
tel: 055 2757479, 2757574, fax: 055 218628*

Indice

1. Introduzione.....	3
2. Campagna di misura sismica strumentale.....	3
3. Analisi di rumore sismico.....	7
4. Analisi dei terremoti e confronto con la stazione di riferimento.....	15
5. Mappa della profondità del livello risonante.....	23
Tabelle.....	26

1. Introduzione

Il Laboratorio di Geofisica Sperimentale del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze ha effettuato su commissione del Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica, Ufficio tecnico del Genio Civile della Regione Toscana, la microzonazione sismica strumentale del comune di Barberino del Mugello (Fi). L'indagine è stata svolta attraverso registrazioni sismiche strumentali in 10 siti, distribuiti nell'abitato di Barberino del Mugello, nell'area artigianale e nella frazione di Cavallina, ed è basata sia sull'analisi del rumore sismico ad una singola stazione che sul confronto tra le registrazioni di terremoti alle stazioni d'indagine installate sui terreni di copertura rispetto ad una stazione di riferimento posizionata su substrato sismico (Standard Spectral Ratio). Questa microzonazione sismica strumentale s'inserisce all'interno del più ampio accordo di collaborazione scientifica tra la Regione Toscana e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze per la "Realizzazione di misure strumentali in alcuni siti campione dei territori relativi al progetto VEL".

2. Campagna di misura sismica strumentale

La microzonazione sismica strumentale del comune di Barberino del Mugello è stata realizzata con cinque stazioni sismiche triassiali della rete mobile del Laboratorio di Geofisica Sperimentale del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze, che sono state installate in 10 diversi siti di indagine (Figura 1, Tabella 1) durante due successive campagne di misura. Le stazioni sono state posizionate per coprire l'area di indagine nel modo quanto più possibile uniforme e in accordo con le condizioni geolitologiche locali, e per andare a completare il quadro delle indagini geofisiche disponibili per l'area di indagine. I punti di acquisizione sono stati scelti durante un sopralluogo effettuato con il personale del Coordinamento Regionale della Prevenzione Sismica e con l'ausilio dei tecnici del comune. Delle 10 misure effettuate, 5 sono state effettuate nell'abitato di Barberino del Mugello e immediatamente a nord di questo, 2 nell'area artigianale e 3 nella frazione di Cavallina.

Il comune di Barberino del Mugello si sviluppa in un'area piuttosto complessa da un punto di vista geo-litologico. Ubicata al margine Nord/Ovest del bacino fluvio-lacustre del Mugello, l'area di indagine si sviluppa prevalentemente su terreni di copertura di natura fluvio-lacustre di spessore variabile, che consistono in argilliti/siltiti lacustri e materiali più grossolani depositi dai torrenti Stura e Loda, impostati su un substrato sia di natura arenacea che argillitica affiorante (Figura 2).

La natura dei terreni, che suggerisce possibili contrasti di impedenza acustica tra le coperture e il substrato roccioso, e la posizione marginale nel bacino fluvio-lacustre del Mugello, che suggerisce spessori di copertura relativamente limitati, sono possibili indizi di un complesso quadro di amplificazione sismica dell'area di indagine che richiede sicuramente opportune verifiche ed approfondimenti. E' per questo motivo che la microzonazione sismica strumentale in oggetto è stata programmata in siti specifici, per migliorare il quadro delle indagini in un'area già ricca di informazioni maturate prevalentemente nell'ambito dei progetti VEL della Regione Toscana.



Figura 1: Posizione delle stazioni sismiche installate nell'ambito della microzonazione sismica strumentale del comune di Barberino del Mugello (FI).

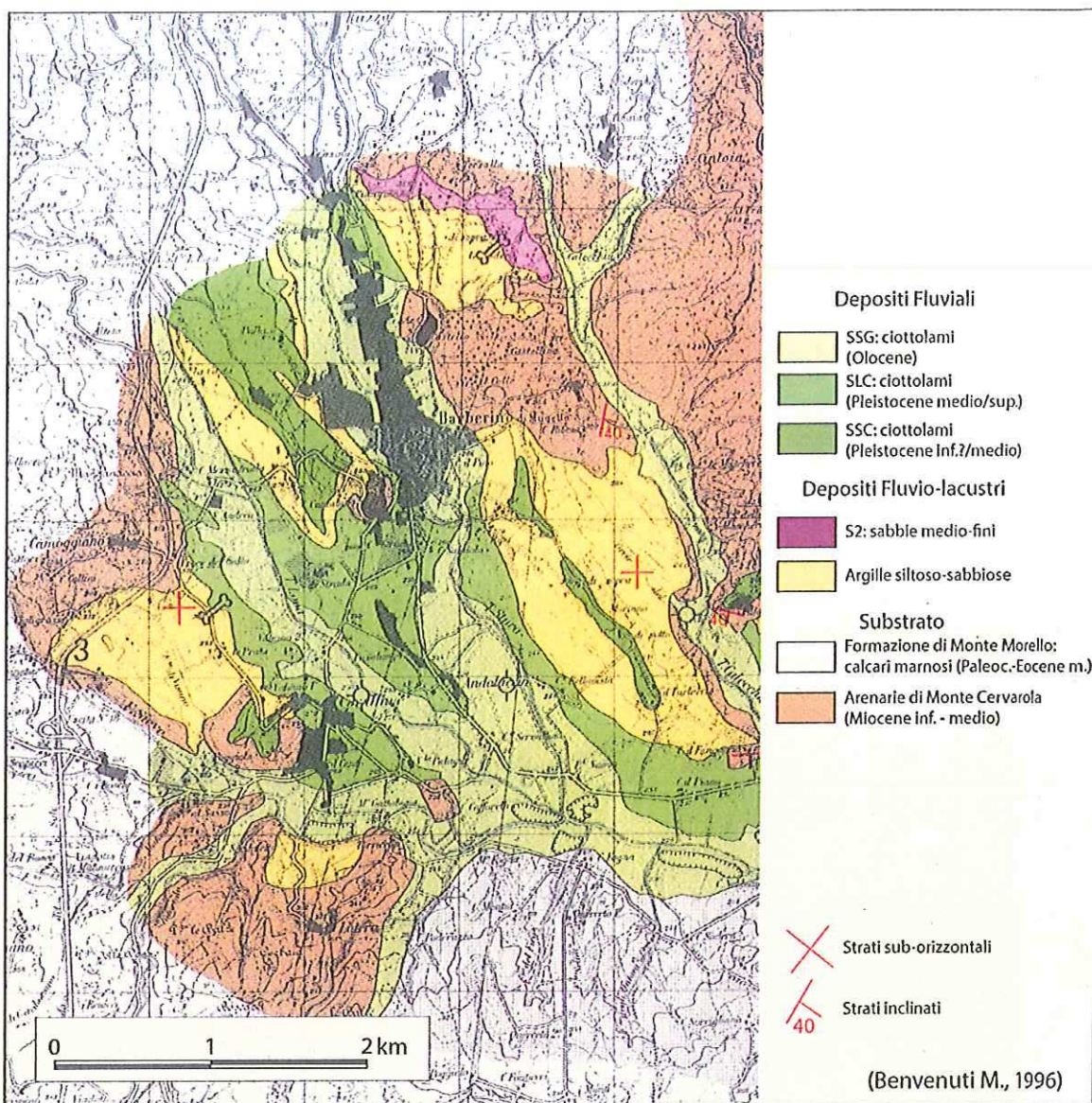


Figura 2: Carta Geologica d'insieme dell'area d'indagine, rielaborata dalla Carta Geologica del Bacino Fluvio-Lacustre del Mugello (Firenze), ARCA (M. Benvenuti, 1996).

La campagna di misura sismica strumentale si è protratta per un periodo complessivo di 48 giorni, dal 7 al 22 Marzo 2012 per le prime 5 stazioni di misura (b01-b05) e dal 23 Marzo al 24 Aprile 2012 per gli altri siti di indagine (b06-b10). Per la stazione b09 sono disponibili solo poche ore di registrazione, perché la stazione è stata vandalizzata il giorno successivo all'installazione e parte della strumentazione è stata rubata.

Per la campagna di acquisizione sismica strumentale del comune di Barberino del Mugello, abbiamo utilizzato come stazione di riferimento la stazione permanente brb del Laboratorio di

Geofisica Sperimentale del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, installata a nord/est dell'abitato di Barberino del Mugello a poca distanza (2-4 km) dall'area d'indagine e attiva dall'Aprile 2008. Il sito di installazione della stazione, su substrato sismico privo di effetti di amplificazione sismica significativi, e la ridotta distanza dall'area di indagine, permettono di utilizzare la stazione *brb* per effettuare la valutazione dell'amplificazione sismica attraverso il rapporto con la stazione di riferimento (SSR).

Le stazioni sismiche utilizzate nella microzonazione sismica del comune di Barberino del Mugello (FI) consistono in digitalizzatori Guralp CMG-DM24 a 24 bits e sismometri triassiali Lennartz 3D/5sec, con sensibilità di 400 V/m/s e frequenza di oscillazione propria di 0.2 Hz. I dati, acquisiti con una frequenza di campionamento di 100 Hz, sono stati immagazzinati nella memoria interna dei digitalizzatori e sono stati scaricati durante le operazioni di manutenzione ordinaria della strumentazione. La sincronizzazione oraria delle sette stazioni è stata ottenuta tramite ricevitore GPS. Le stazioni, generalmente installate all'aperto, sono alimentate con un pannello solare da 100 W e batterie. I sismometri, quando possibile, sono stati interrati per migliorare l'accoppiamento con il terreno e per minimizzare il rumore.

La stazione di riferimento *brb* è equipaggiata con un digitalizzatore Gural CMG-DM24, analogo a quelli impiegati nella rete mobile ed utilizzati nella campagna di microzinazione sismica strumentale, e con un sismometro Guralp CMG-40T con periodo proprio di 60 secondi e sensibilità di 800 V/m/s.



Figura 3: Foto della stazione sismica *brb* installata nel comune di Barberino del Mugello e attiva dall'Aprile del 2008, i cui dati sono trasmessi al Laboratorio di Geofisica Sperimentale del Dipartimento di Scienze della Terra.

3. Analisi del rumore sismico

La microzonazione sismica condotta a Barberino del Mugello prevede come prima cosa la valutazione del rapporto spettrale tra la componente orizzontale e quella verticale del rumore sismico registrato (HVSr, Horizontal to Vertical Spectral Ratio). Questa metodologia di indagine è largamente utilizzata per valutare l'amplificazione delle onde sismiche in una coltre sedimentaria e ipotizza che la componente verticale non subisca una significativa amplificazione nell'attraversare i sedimenti dal substrato alla superficie.

L'analisi HVSr è applicata su dati di accelerazione, derivati dalla registrazione del segnale sismico di velocità, a cui è applicato un filtro passa banda Butterworth (0.1 – 40 Hz). L'analisi spettrale FFT (Fast Fourier Transform) è effettuata su finestre mobili della durata di 60 secondi con 50% di sovrapposizione, dopo aver rimosso la media ed eventuali derive lineari, e dopo aver applicato un taper di Hanning. Gli spettri risultanti vengono poi smussati su finestre pari a 100 valori di frequenza e mediati su intervalli orari. Il rapporto spettrale viene poi calcolato sugli spettri orari e mediato ulteriormente sull'intera durata della campagna di misura, in modo da essere quanto più rappresentativo possibile del sito di indagine. L'andamento del rapporto spettrale indica il rapporto tra le componenti orizzontali e verticale del rumore e rappresenta eventuali fenomeni di amplificazione nell'ipotesi che la componente verticale del rumore sia libera da amplificazione. In questo modo il periodo di risonanza del sito di indagine è calcolato utilizzando la frequenza per la quale il rapporto HVSr risultasse massimo (Tabella 2).

Per ogni misura HVSr, viene eseguito un controllo su eventuali direttività della sorgente di rumore, che, se presenti, potrebbero influenzare la forma e la posizione del picco spettrale. L'assenza di direttività indica infatti che il rapporto spettrale calcolato sul rumore può essere ritenuto rappresentativo, mentre la presenza di picchi spettrali con una chiara direttività suggerisce la possibile presenza di sorgenti locali di segnale sismico, che potrebbero generare prevalentemente segnale sulle componenti orizzontali del moto, andando così ad inficiare la validità del rapporto spettrale.

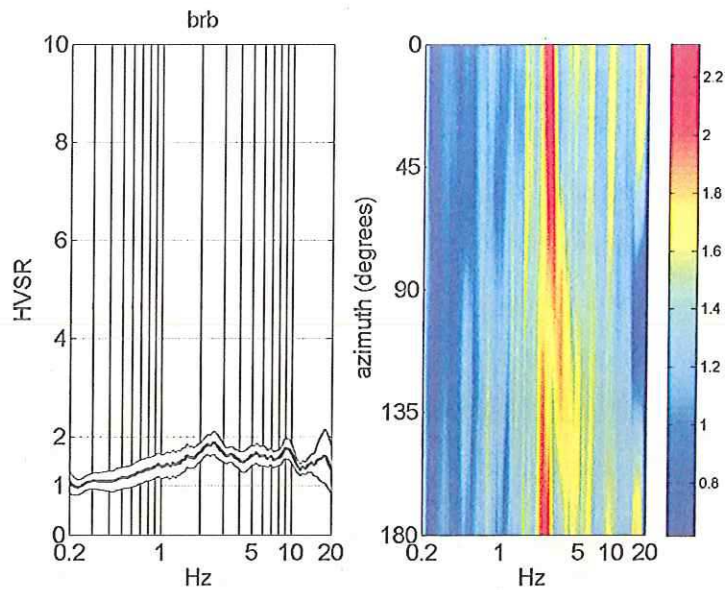


Figura 4: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVS) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione di riferimento *brb* installata su substrato. Il rapporto spettrale HVS mostra la generale assenza di fenomeni di amplificazione significativi.

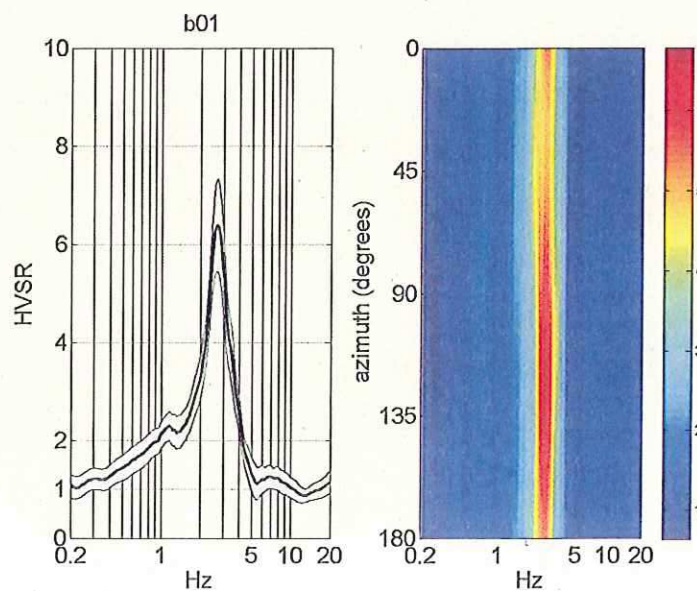


Figura 5: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVS) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B01, installata nella frazione di Cavallina. Il rapporto spettrale HVS mostra un chiaro picco di amplificazione a frequenza di 2.7 Hz privo di effetti direttivi particolari, che suggerisce la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica.

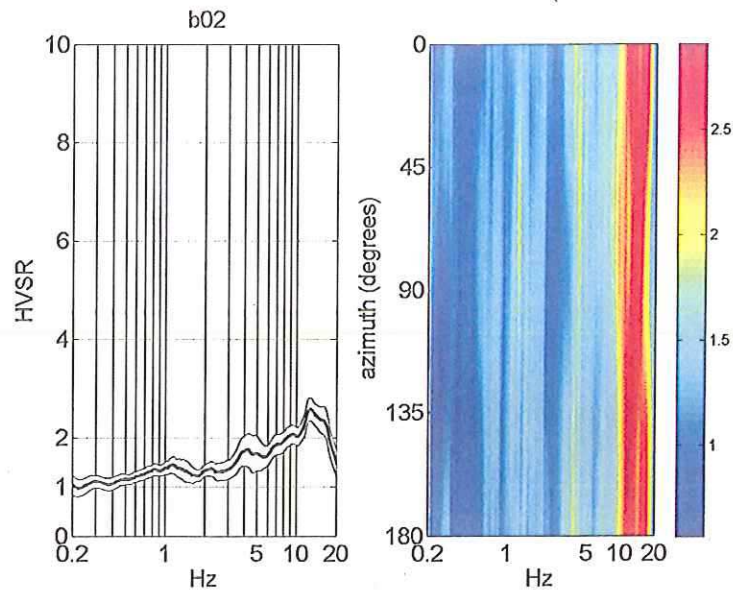


Figura 6: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVS) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B02, installata nella frazione di Cavallina in prossimità di substrato affiorante. Il rapporto spettrale HVS mostra un progressivo aumento dell'ampiezza con la frequenza, come tipicamente osservato nelle zone di bordo con sottili spessori delle coperture, che suggeriscono possibili amplificazioni ad alta frequenza ($< 10\text{Hz}$).

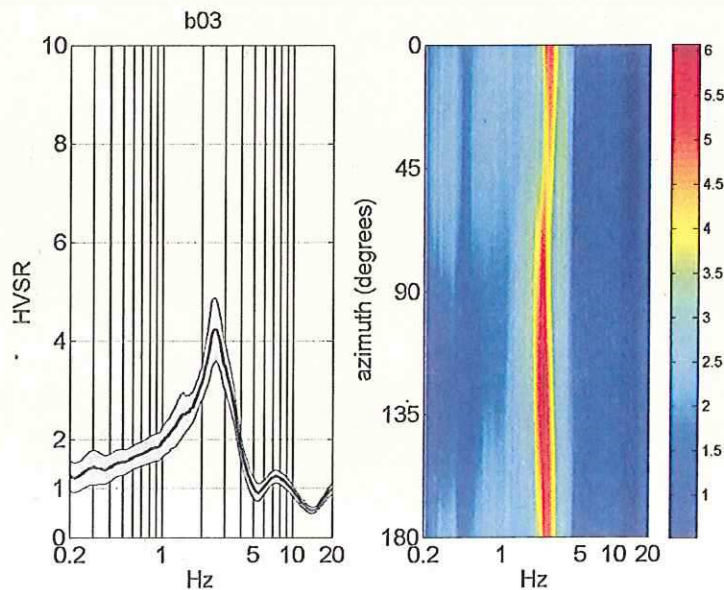


Figura 7: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVS) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B03, installata su terreni di copertura a nord della frazione di Cavallina. Il rapporto spettrale HVS mostra un chiaro picco a bassa frequenza (2.5 Hz) con una buona persistenza angolare, molto simile al rapporto osservato in B01, che indica un chiaro contrasto di impedenza acustica.

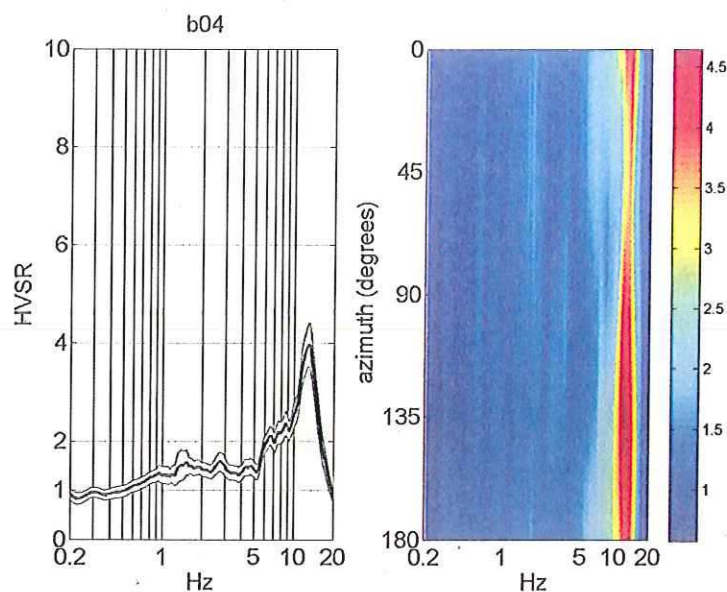


Figura 8: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVSr) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B04, installata su terreni di copertura a nord dell'abitato di Barberino del Mugello. Il rapporto spettrale HVSr è abbastanza piatto per bassi valori di frequenza (< 5 Hz) mentre mostra un chiaro picco di amplificazione con buona persistenza angolare a frequenza più elevata (12.6), indicando un contrasto di impedenza acustica molto superficiale.

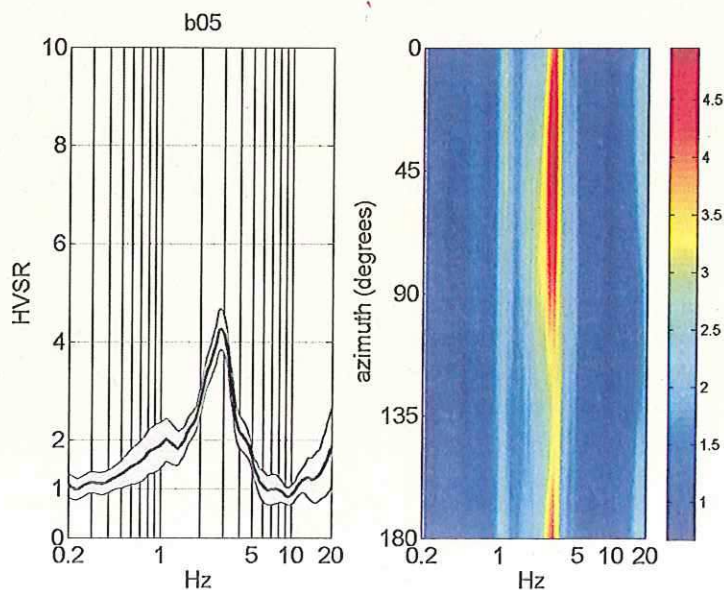


Figura 9: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVSr) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B05, installata nell'abitato di Barberino del Mugello. Il rapporto spettrale HVSr mostra un chiaro picco con una buona persistenza angolare a bassa frequenza (2.9).

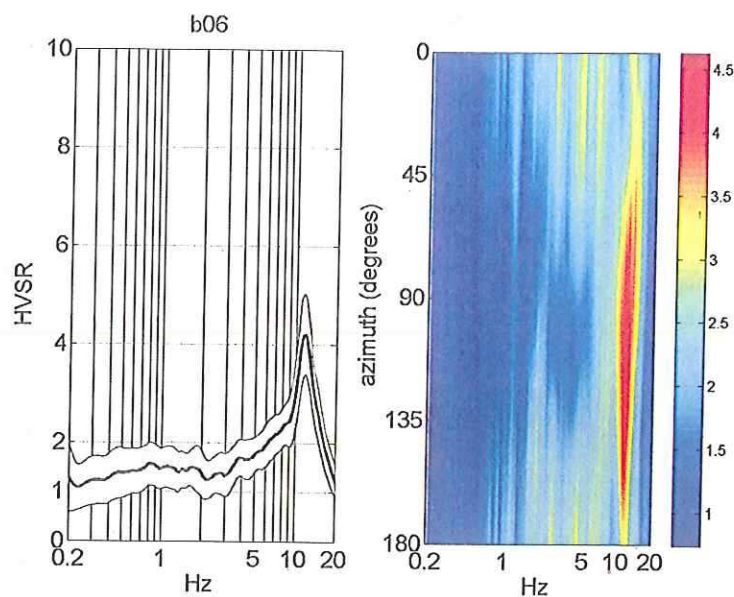


Figura 10: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVSR) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B06, installata nell'abitato di Barberino del Mugello nel campo da calcio comunale. Il rapporto spettrale HVSR è abbastanza prossimo ad 1 a bassa frequenza ($< 5\text{ Hz}$) per aumentare a frequenze superiori fino ad un picco a 11.4 Hz, che indica un contrasto di impedenza acustica superficiale.

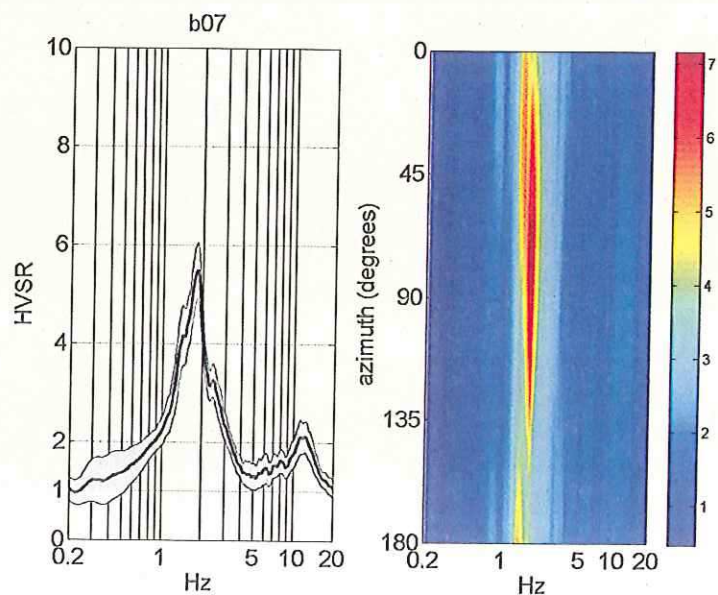


Figura 11: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVSR) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B07, installata ad est dell'abitato di Barberino del Mugello. Il rapporto spettrale HVSR mostra un picco principale a bassa frequenza (1.8 Hz) e un picco secondario a frequenza elevata (11.8).

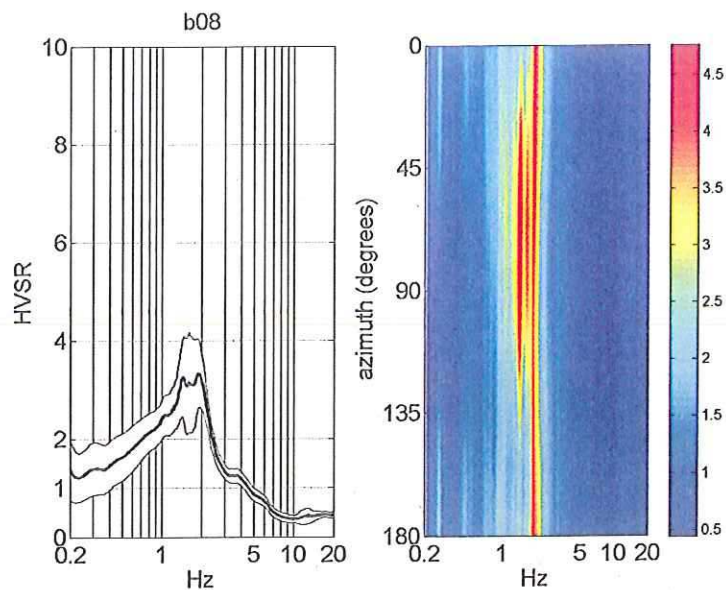


Figura 12: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVS) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B08, installata nell'abitato di Barberino del Mugello. Il rapporto spettrale HVS mostra un chiaro picco spettrale a bassa frequenza (1.6 Hz), con una buona persistenza angolare.

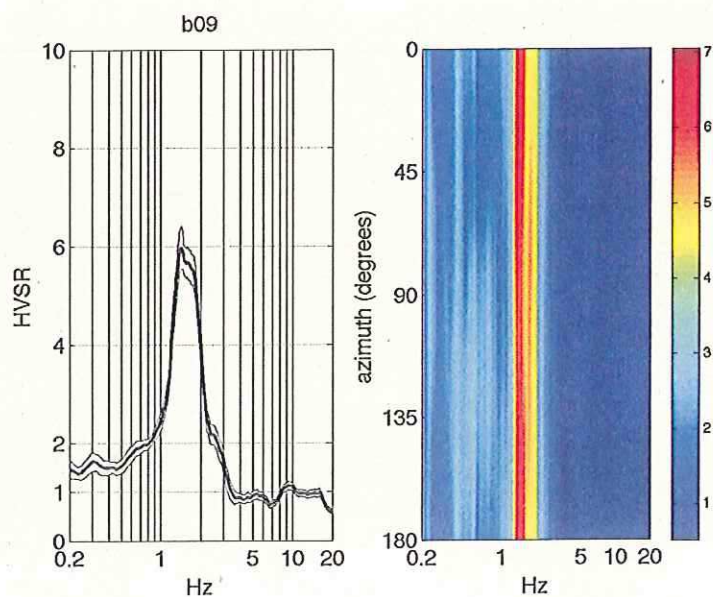


Figura 13: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVS) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B09, installata nell'area industriale di Barberino del Mugello. Il rapporto spettrale HVS mostra un chiaro picco spettrale a bassa frequenza (1.5 Hz), con una buona persistenza angolare.

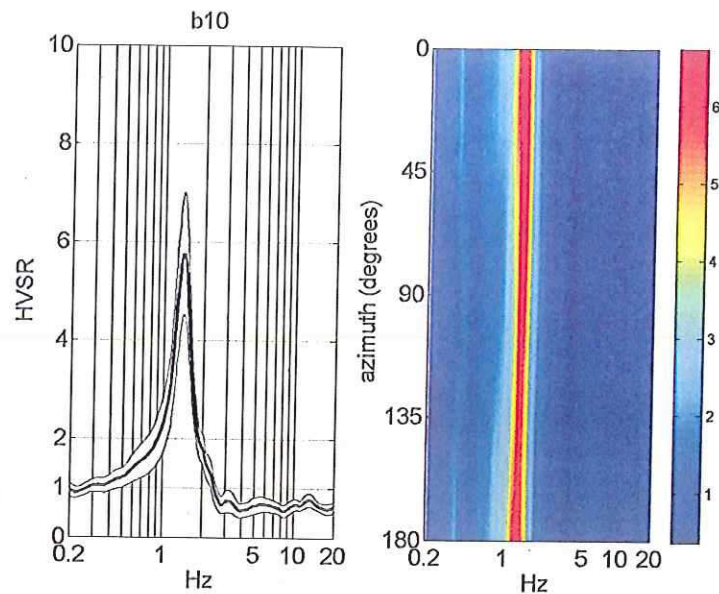


Figura 14: Rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e la componente verticale del rumore sismico (HVS) e diagramma angolare corrispondente valutati durante l'intero periodo di indagine alla stazione B10, installata nell'area industriale di Barberino del Mugello. In accordo con la stazione B09, il rapporto spettrale HVS mostra un chiaro picco spettrale a bassa frequenza (1.4 Hz), con una buona persistenza angolare.

Nel Comune di Barberino del Mugello sono state effettuate 10 misure sismiche strumentali, con stazioni mobili installate sulla copertura detritica/sedimentaria, parallelamente alla stazione permanente *brb* che ha rappresentato la stazione di riferimento per la campagna di misura. Per tutte le stazioni di misura è stata effettuata l'analisi HVS (Figure 4 -14) che ha permesso per ogni sito di indagine di valutare lo spettro HVS e la direttività su tutto il periodo di indagine.

L'analisi HVS su rumore sismico ha permesso di definire le frequenze di risonanza per l'area di indagine (Figura 15, Tabella 2), dominata da frequenze relativamente ridotte (< 2 Hz) in corrispondenza della porzione orientale dell'abitato di Barberino del Mugello e della zona industriale (stazioni B07, B08, B09, B10), frequenze leggermente più alte a Cavallina e nell'area centrale di Barberino (B01, B03, B05), e frequenze decisamente più alte (> 10 Hz) per la stazione B04 installata a nord dell'abitato e per le stazioni installate a breve distanza da substrato affiorante (B02, B06). Questa distribuzione delle frequenze di risonanza mostra un buon accordo con l'assetto stratigrafico locale, con Barberino del Mugello impostato in una porzione marginale del bacino fluvio-lacustre del Mugello, con asse principale in direzione Nord-Sud e apertura a Sud-Est verso la porzione principale del bacino del Mugello e limitato ad Ovest da substrato affiorante riconducibile

alla formazione delle Arenarie di Monte Cervarola e ad est dalla dorsale che separa il bacino di Barberino dalla porzione principale del bacino del Mugello.

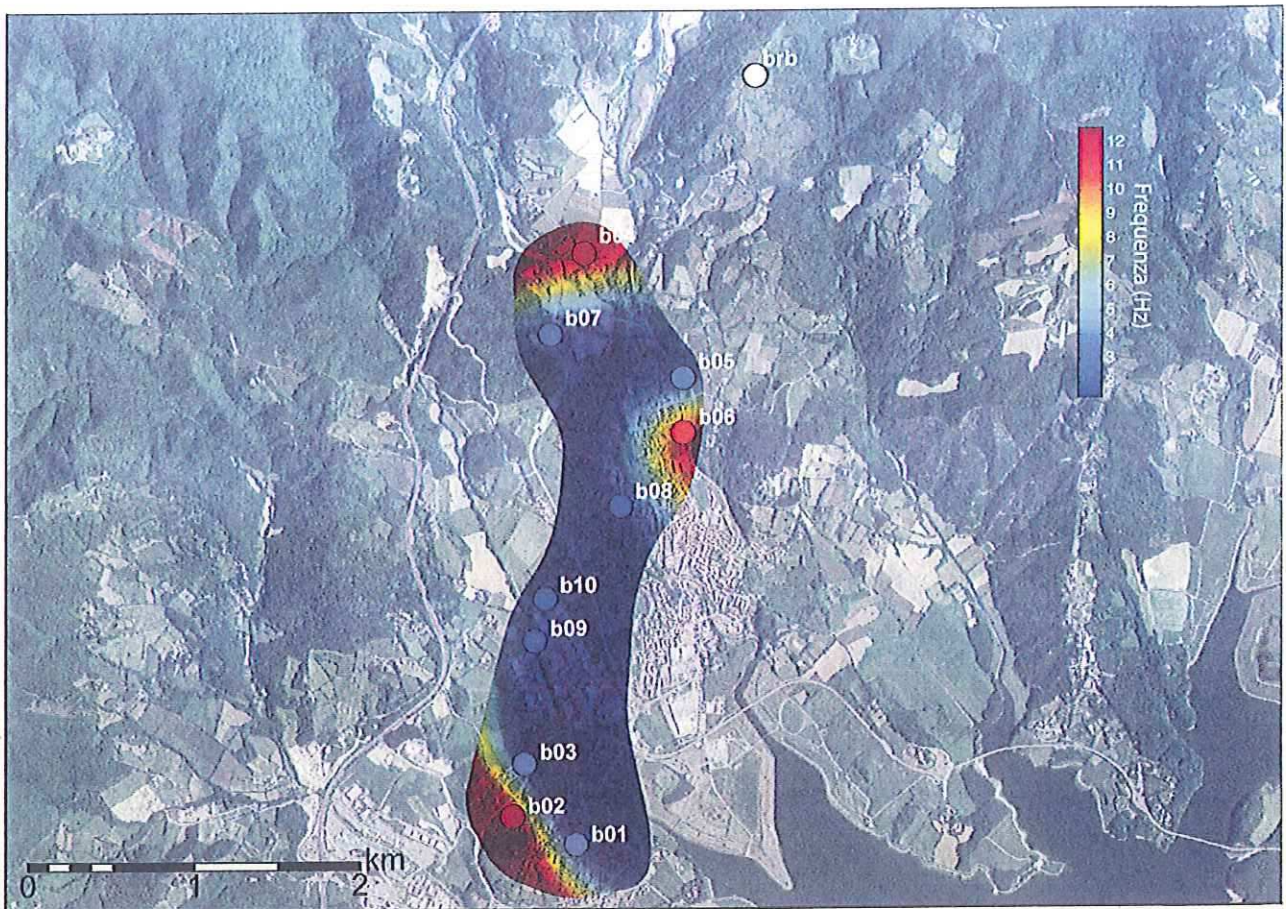


Figura 15: Mappa delle frequenze di risonanza dei terreni per il comune di Barberino del Mugello (FI), calcolata come interpolazione dei picchi del rapporto tra gli spettri delle componenti orizzontali e la componente verticale (HVSr) del rumore sismico.

Allo stesso modo, abbiamo ottenuto una mappa dei fattori di amplificazione sismica per l'area di indagine come interpolazione dei valori puntuali, ottenuti dall'integrale dell'ampiezza del rapporto spettrale HVSr nelle banda spettrale 1-10 Hz (Figura 16). In generale si osserva un'amplificazione generalizzata che, in quasi tutta l'area di indagine, raggiunge valori superiori ad 1.6. Tuttavia, si osservano valori di amplificazione leggermente inferiori (<1.5) in corrispondenza delle stazioni B08, posizionata in paese, e delle stazioni B09 e B10, posizionate nella zona industriale. Per questi siti di indagine, che pur sono caratterizzati da ampi picchi del rapporto HVSr nell'intervallo spettrale di interesse per il calcolo del fattore di amplificazione, la diminuzione dell'integrale del rapporto deriva da una diminuzione del rapporto, fino a valori inferiori ad 1, per frequenze superiori

ai 3 Hz, che suggerisce l'amplificazione di onde sismiche a bassa frequenza (< 3 Hz) e l'attenuazione selettiva delle onde a più alto contenuto spettrale.

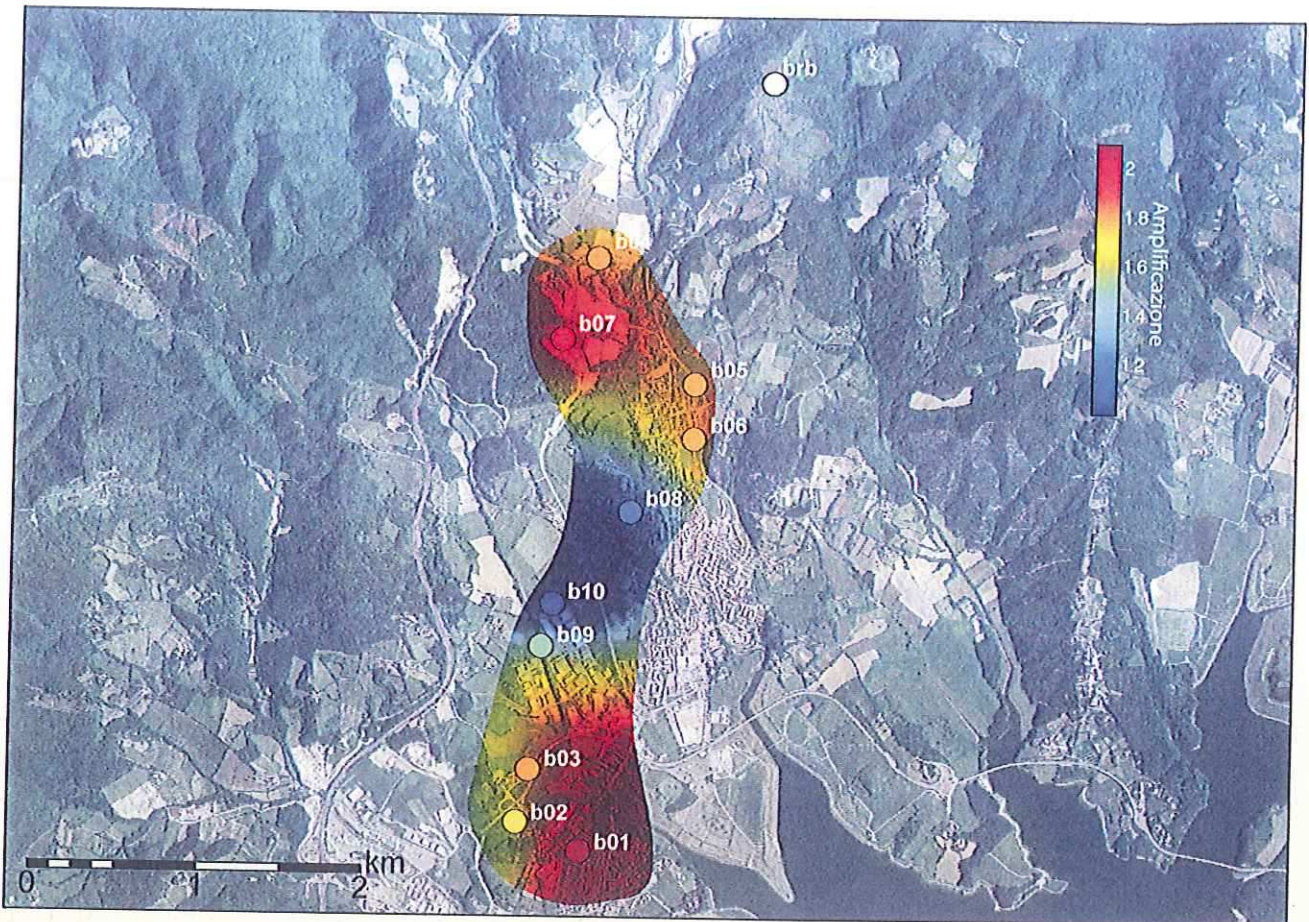


Figura 16: Mappa dei Fattori di Amplificazione sismica ottenuti come integrale del rapporto spettrale HVSR, calcolato sul solo rumore sismico, nella banda 1-10 Hz.

4. Analisi dei terremoti e confronto con la stazione di riferimento

La campagna di microzonazione sismica strumentale del comune di San Godenzo è stata progettata per permettere la valutazione della risposta sismica locale anche attraverso il metodo della Stazione Sismica di Riferimento (Standard Spectral Ratio), basato sul rapporto tra tracciati sismici di eventi sismici registrati alle stazioni di misura e una stazione di riferimento posizionata su substrato. Per questo motivo le stazioni sono state lasciate in acquisizione per un tempo

sufficientemente lungo da permettere, in rapporto all'attività sismica locale e regionale, la registrazione di un numero sufficiente di terremoti (Tabella 1). Tra le 10 stazioni di indagine solo per la stazione B09, rubata dopo appena 1 giorno dall'installazione, non è stato possibile applicare la metodologia di indagine SSR mentre per la stazione B08, installata in un'area densamente antropizzata, è stato possibile estrarre soltanto 3 eventi sismici con rapporto segnale/rumore utile ad analizzare i tracciati sismici.

L'utilizzo della metodologia d'analisi SSR permette non soltanto di verificare, validare o correggere le frequenze fondamentali dei terreni ottenute da indagini HVSR basate sul solo rumore sismico, che sono ritenute generalmente attendibili nella valutazione della frequenza di risonanza dei terreni di copertura, ma di ottenere anche una valutazione quantitativa dell'ampiezza dei possibili effetti di amplificazione sismica che, a meno di fenomeni di direttività particolari e con le dovute assunzioni, viene riflessa dall'ampiezza dei tracciati sismici registrati su sedimento e su substrato.

L'analisi di amplificazione basata sui terremoti prevede l'estrazione di tutti i tracciati sismici registrati sia alla stazione di indagine che alla stazione di riferimento (Figura 17). Per ottenere la funzione di trasferimento del terreno di copertura si effettua l'analisi spettrale dei due tracciati e successivamente il rapporto tra gli spettri. In questo modo tutti i termini comuni si eliminano, come la funzione sorgente del terremoto e la parte di propagazione nel mezzo comune ai due tracciati, mentre rimarrà il contributo del terreno di copertura.

I risultati dell'elaborazione sono espressi, per ogni stazione di misura, in termini di rapporto tra l'ampiezza spettrale delle componenti verticali e orizzontali valutate alla stazione di misura e a quella di riferimento (Z/Z_{ref} , H/H_{ref} , N/N_{ref} , E/E_{ref}) oltre al rapporto tra le componenti orizzontali e verticale dei terremoti alla stazione di misura ($HVSR_T$). I primi rappresentano direttamente la funzione di trasferimento della copertura sedimentaria sulle componenti verticale (Z/Z_{ref}) ed orizzontali (H/H_{ref} , N/N_{ref} , E/E_{ref}) del moto e forniscono quindi la valutazione quantitativa dello spettro di amplificazione alle varie stazioni su sedimento. Il rapporto $HVSR_T$ permette invece il confronto diretto con quello valutato su rumore, nell'ipotesi che la componente verticale del terremoto, come nel caso del rumore sismico, non sia affetta da fenomeni di amplificazione. Per i 9 siti di indagine (tutti eccetto B09) i risultati delle frequenze di risonanza valutate dal rapporto H/H_{ref} e i fattori di amplificazione valutati sui rapporti $HVSR_T$, Z/Z_{ref} e H/H_{ref} (Figure 18-26) sono riassunti in Tabella 2.

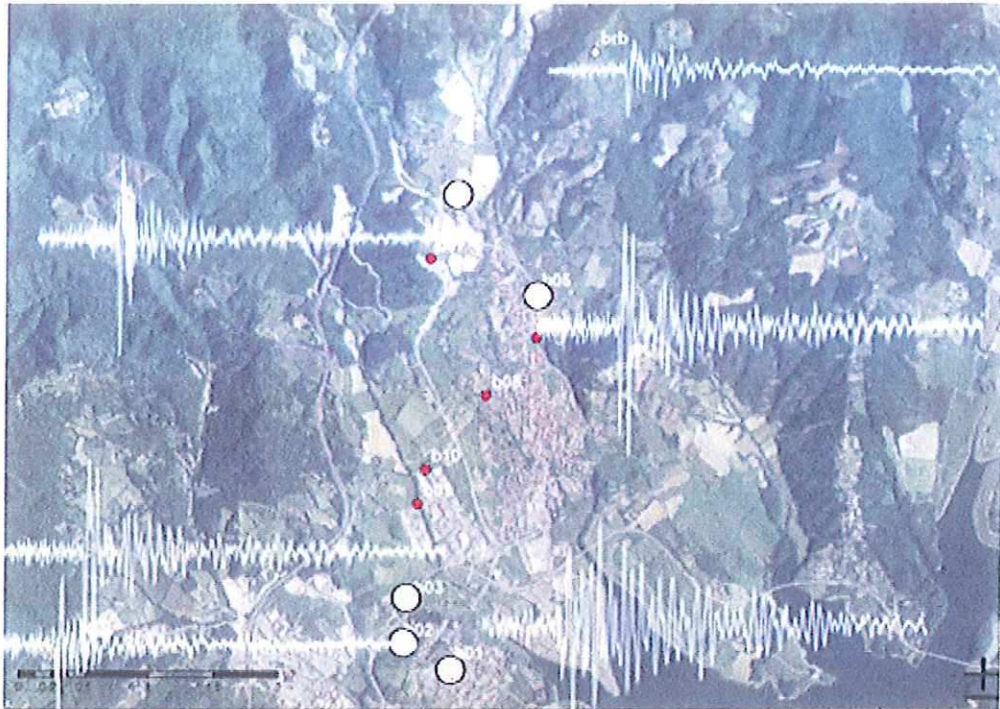


Figura 17: Tracciati sismici di un terremoto ($M_l=1$, $D=15$ km) registrato nella notte del 13/03/2012 (22:15:18 GMT) a 5 stazioni di indagine installate a Barberino del Mugello (B01-B05) e alla stazione di riferimento *BRB*. I tracciati sismici registrati dalle stazioni installate su sedimento appaiono più ampi e più lunghi, come conseguenza dell'amplificazione sismica per effetti stratigrafici.

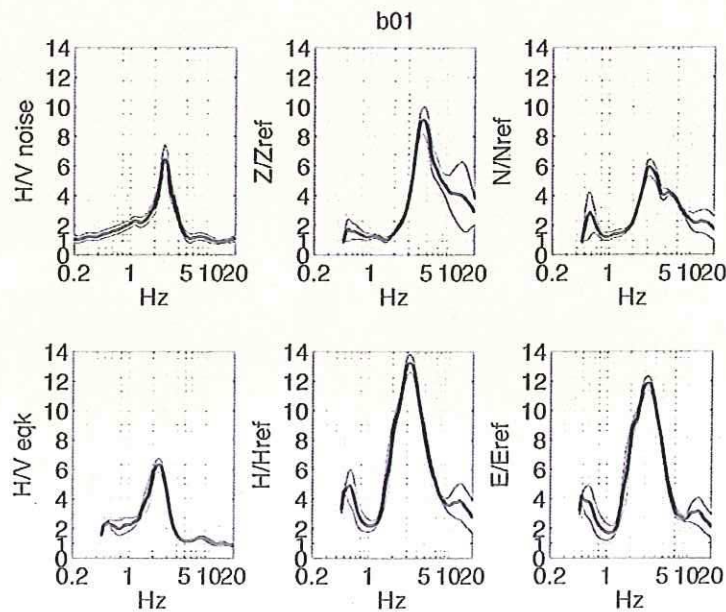


Figura 18: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B01 e alla stazione di riferimento (*BRB*) valutati per tutti i terremoti disponibili (5) e lungo le diverse direzioni del moto. In termini di frequenza di risonanza, l'analisi SSR appare coerente con l'analisi HVSR valutata su rumore, ed identifica un picco di

amplificazione principale a bassa frequenza (3.2). Il valore del fattore di amplificazione ($H/H_{ref}=6.9$) è però significativamente più alto rispetto all'analisi HVSR.

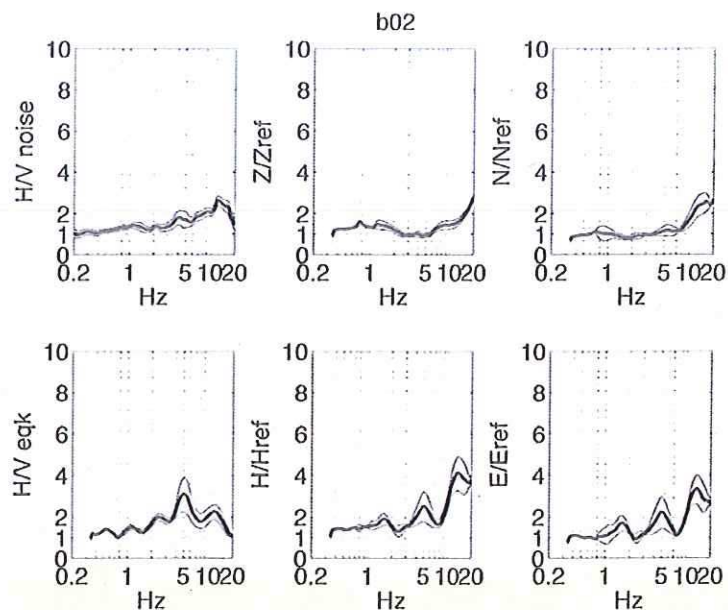


Figura 19: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B02 e alla stazione di riferimento (BRB) valutati per tutti i terremoti disponibili (5) e lungo le diverse direzioni del moto. L'analisi SSR riflette abbastanza bene l'analisi HVSR, suggerendo amplificazione ad alta frequenza (13 Hz), ma sembra suggerire l'esistenza di un picco secondario a frequenza più bassa (5 Hz).

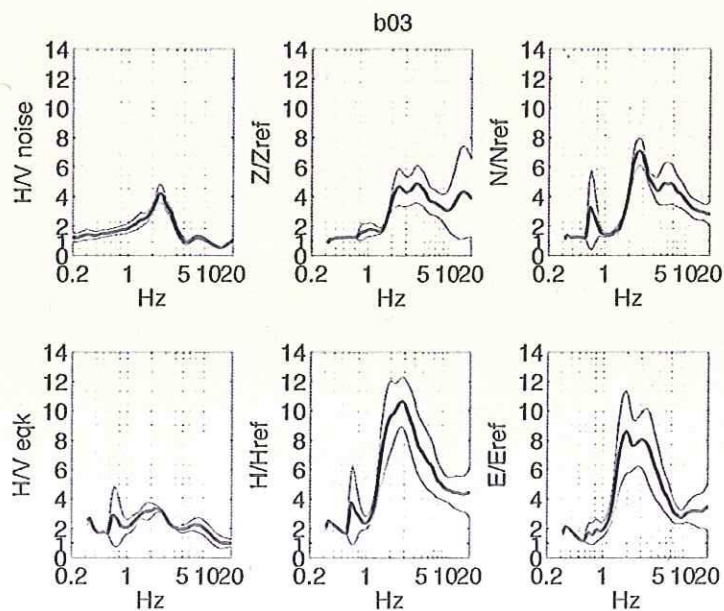


Figura 20: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B03 e alla stazione di riferimento (BRB) valutati per tutti i terremoti disponibili (5) e lungo le diverse direzioni del moto. L'analisi SSR identifica lo stesso picco

spettrale (2.8 Hz) ottenuto dall'analisi HVSR (2.5 Hz) ma indica ampiezze del fenomeno di amplificazione molto più alte dell'amplificazione dedotta dal rumore.

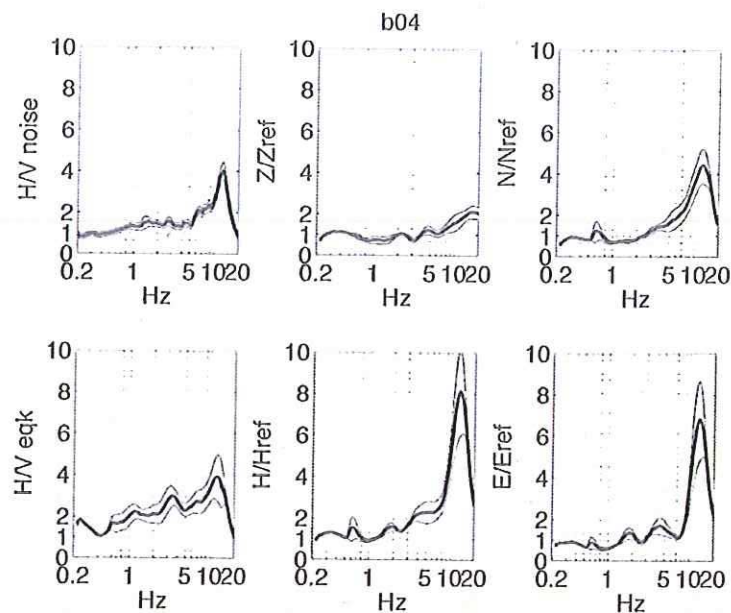


Figura 21: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B04 e alla stazione di riferimento (BRB) valutati per tutti i terremoti disponibili (5) e lungo le diverse direzioni del moto. Le due analisi forniscono risultati confrontabili, indicando amplificazione ad alta frequenza (13 Hz), ma anche in questo caso l'analisi HVSR effettuata su rumore tende a sottostimare l'ampiezza assoluta del fenomeno.

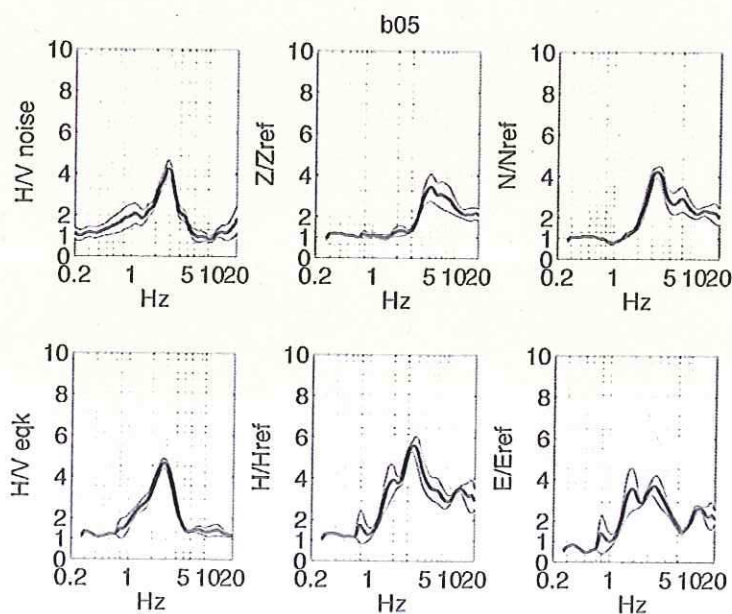


Figura 22: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B05 e alla stazione di riferimento (BRB) valutati per tutti i terremoti disponibili (5) e lungo le diverse direzioni del moto. L'analisi SSR identifica un piccolo

spettrale (3.5 Hz) simile a quello dedotto dall'analisi HVSR (2.9 Hz), ma suggerisce anche effetti di amplificazione a frequenza superiore (> 5 Hz), dove il rapporto HVSR è sensibilmente più basso (~ 1).

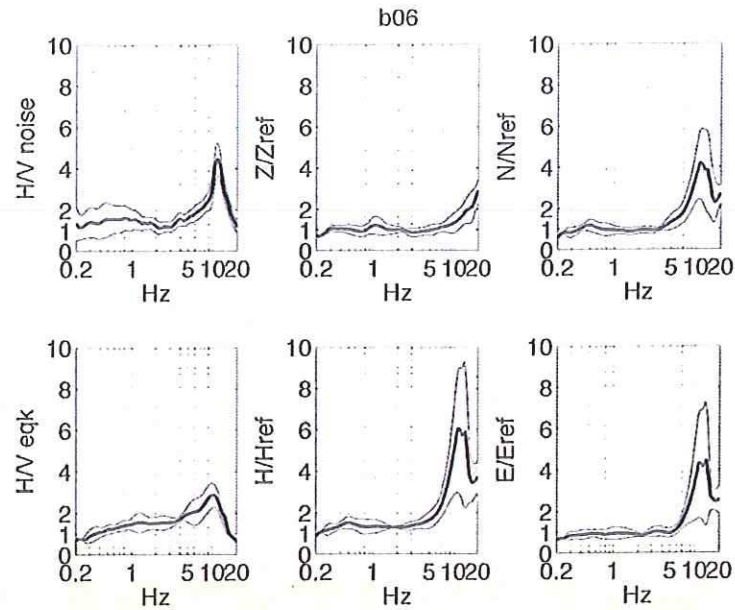


Figura 23: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B06 e alla stazione di riferimento (BRB) valutati per tutti i terremoti disponibili (8) e lungo le diverse direzioni del moto. Le due tipologie di analisi sono tra loro coerenti, indicando amplificazione ad alta frequenza (12.4 Hz).

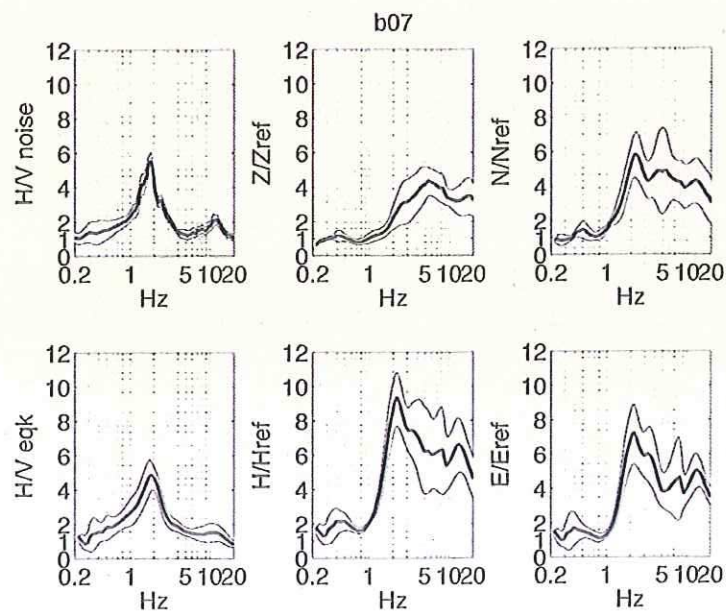


Figura 24: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B07 e alla stazione di riferimento (BRB) valutati per tutti i terremoti disponibili (8) e lungo le diverse direzioni del moto. Le due tipologie di analisi sono tra loro coerenti e identificano un picco di amplificazione a bassa frequenza (2.2 Hz). Tuttavia l'analisi H/Href

suggerisce effetti di amplificazione anche a frequenza maggiore (> 5 Hz), dove il rapporto HVSR è prossimo ad 1.

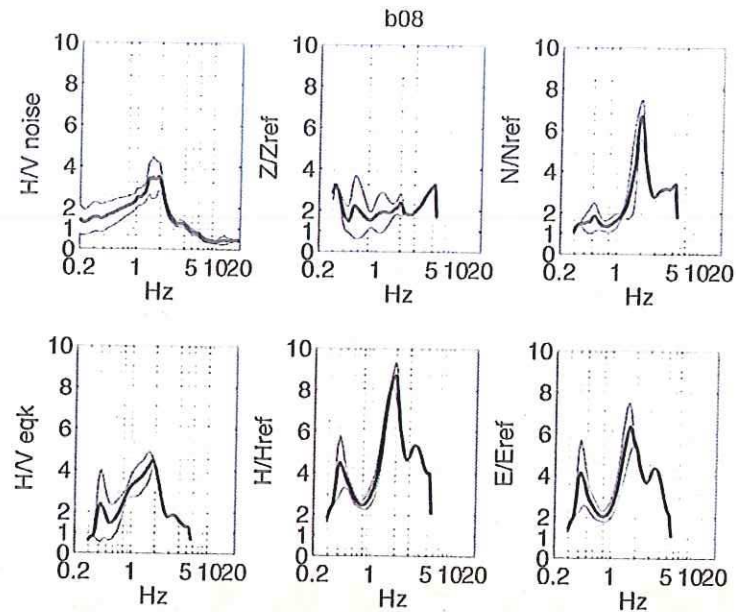


Figura 25: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B08 e alla stazione di riferimento (*BRB*) valutati per tutti i terremoti disponibili (3) e lungo le diverse direzioni del moto. Le due tipologie di analisi identificano uno stesso picco spettrale a bassa frequenza (1.9 Hz), sebbene l'analisi HVSR tenda a sottostimare l'entità del fenomeno. L'analisi SSR è limitata a frequenze < 5 Hz, per il ridotto numero di terremoti e per l'elevato livello di rumore.

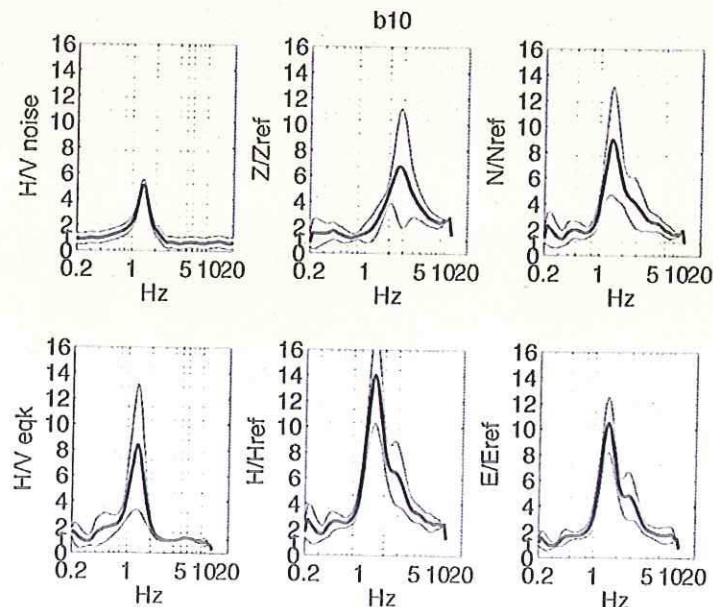


Figura 26: Rapporto tra gli spettri registrati alla stazione B10 e alla stazione di riferimento (*BRB*) valutati per tutti i terremoti disponibili (8) e lungo le diverse direzioni del moto. Le due tipologie di analisi identificano

uno stesso picco spettrale a bassa frequenza (1.5 Hz). Anche in questo caso l'analisi HVSR tende a sottostimare l'entità del fenomeno.

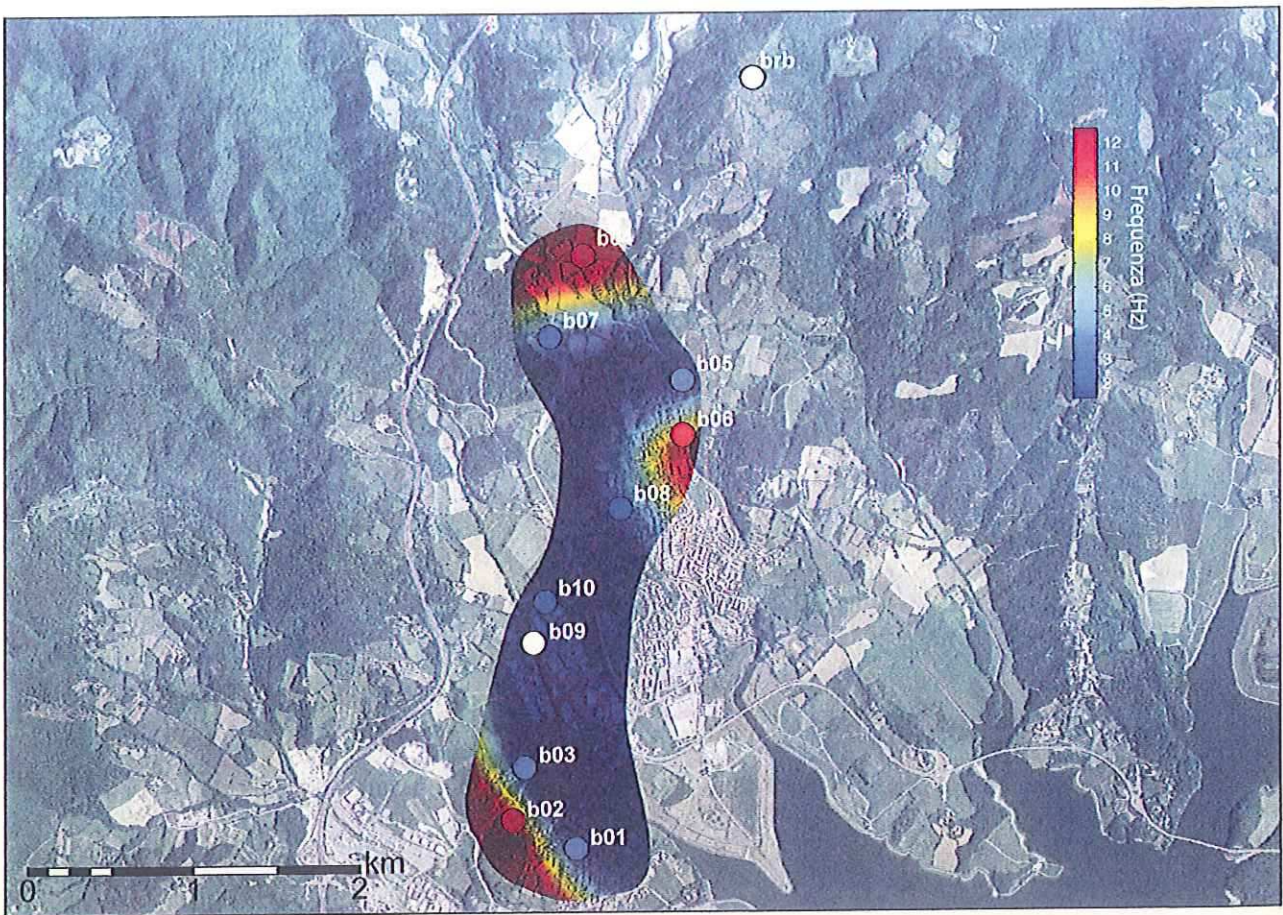


Figura 27: Mappa delle frequenze di risonanza dei terreni per il comune di Barberino del Mugello (FI), calcolata come picchi del rapporto H/H_{ref} . Le stazioni BRB e B09 (cerchi bianchi) sono escluse dall'interpolazione.

In generale le analisi della risposta sismica locale effettuate con il solo rumore sismico (HVSR) e con l'utilizzo della stazione di riferimento (SSR) convergono, per l'intera area di indagine, verso un risultato univoco nella valutazione delle frequenze di risonanza. Al di là di una migrazione sistematica del picco di risonanza, con valori sistematicamente più alti di circa il 10% per l'analisi SSR, le due analisi effettuate permettono di definire con relativa fiducia l'andamento delle frequenze di risonanza per l'intera area di indagine. Tuttavia, il confronto dei risultati (Tabella 2, Figure 18-26), indica che l'analisi HVSR tende a sottostimare in modo sistematico l'ampiezza del fenomeno di amplificazione. Allo stesso modo l'analisi SSR, pur identificando lo stesso picco di amplificazione, in molti casi indica effetti di amplificazione a frequenze superiori al picco di

risonanza e non evidenziate dall'analisi HVSR (B03, B05, B07), fornendo quindi una descrizione più esaustiva del fenomeno.

I risultati dell'analisi SSR sono riassunti nella mappa delle frequenze di risonanza (Figura 27) e del fattore di amplificazione (Figura 28) valutati dal rapporto H/H_{ref} . Le frequenze di risonanza sono sostanzialmente invariate rispetto all'analisi HVSR effettuata sul solo rumore sismico, mentre i fattori di amplificazione sono sensibilmente più alti in accordo con le osservazioni effettuate.

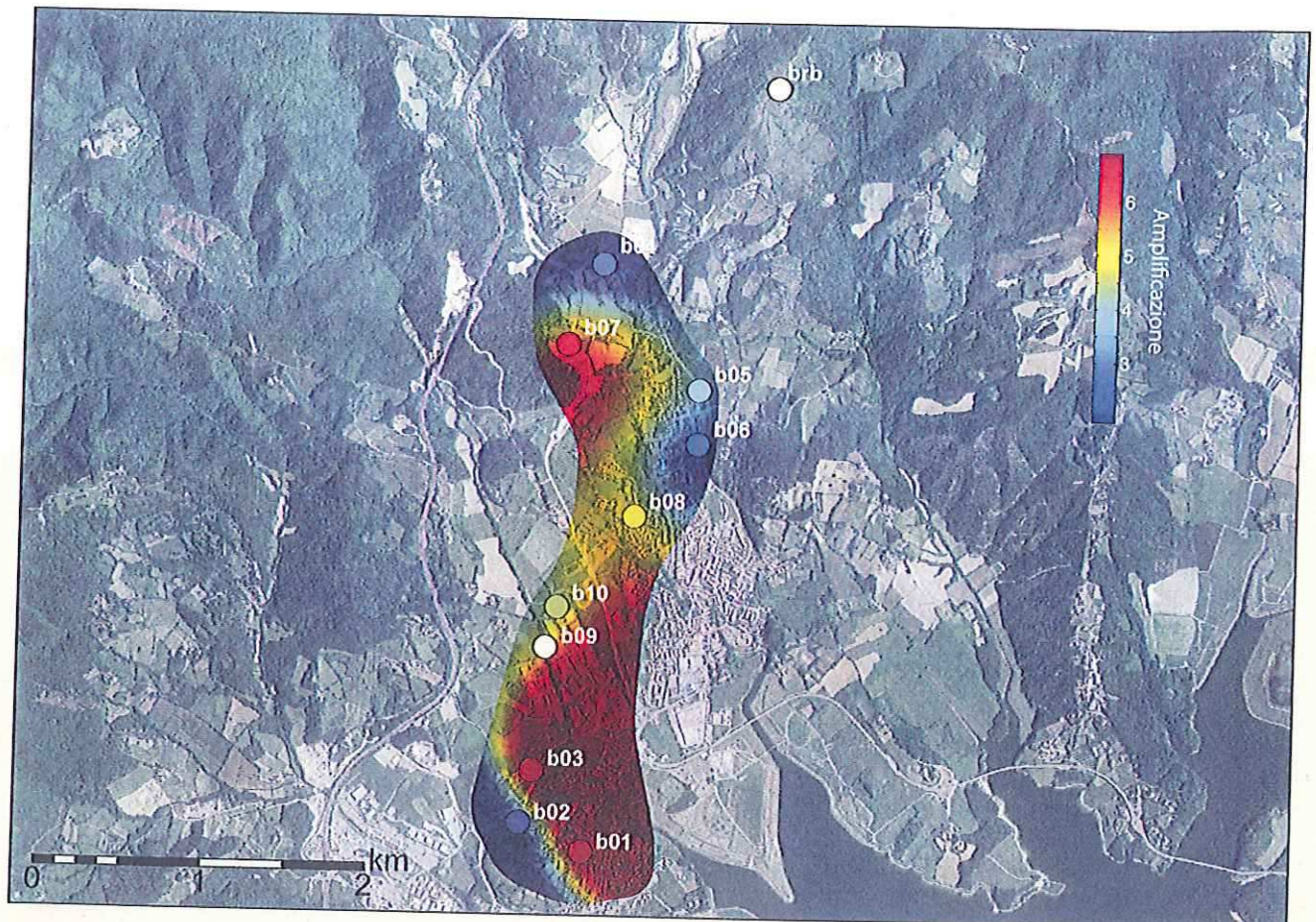


Figura 28: Mappa dei Fattori di Amplificazione sismica ottenuti come integrale del rapporto spettrale H/H_{ref} nella banda 1-10 Hz.

5. Mappa della profondità del livello risonante

La Regione Toscana ha effettuato nel territorio comunale di Barberino del Mugello 17 sondaggi downhole, distribuiti tra l'abitato di Barberino del Mugello, la zona industriale e la frazione di

Cavallina. I sondaggi effettuati evidenziano un quadro di profondità del substrato sismico piuttosto complessa, con aree in cui il substrato è posizionato a profondità superiori ai 60/70 m (zona industriale) e aree in cui il substrato è molto più superficiale (15-20 m). Per quanto riguarda la velocità di propagazione delle onde s nel substrato, si ottiene una velocità media di circa 1000 m/s, con un picco di 1550 m/s misurata nel sondaggio DH10 effettuato nella frazione di Cavallina, ad una profondità di circa 20 metri. Per quanto riguarda le velocità dei terreni di copertura, il valore medio si aggira intorno a 350 m/s.

La misura della velocità dei terreni di copertura può essere utilizzata per valutare, dalle frequenze di risonanza, lo spessore del terreno di copertura ($f=v_s/4H$). Per questo scopo è stata associata, ad ogni sito di misura (Tabella 2), una velocità di propagazione delle onde s nei terreni di copertura sulla base delle velocità misurate nei sondaggi downhole più prossime ai siti di misura.

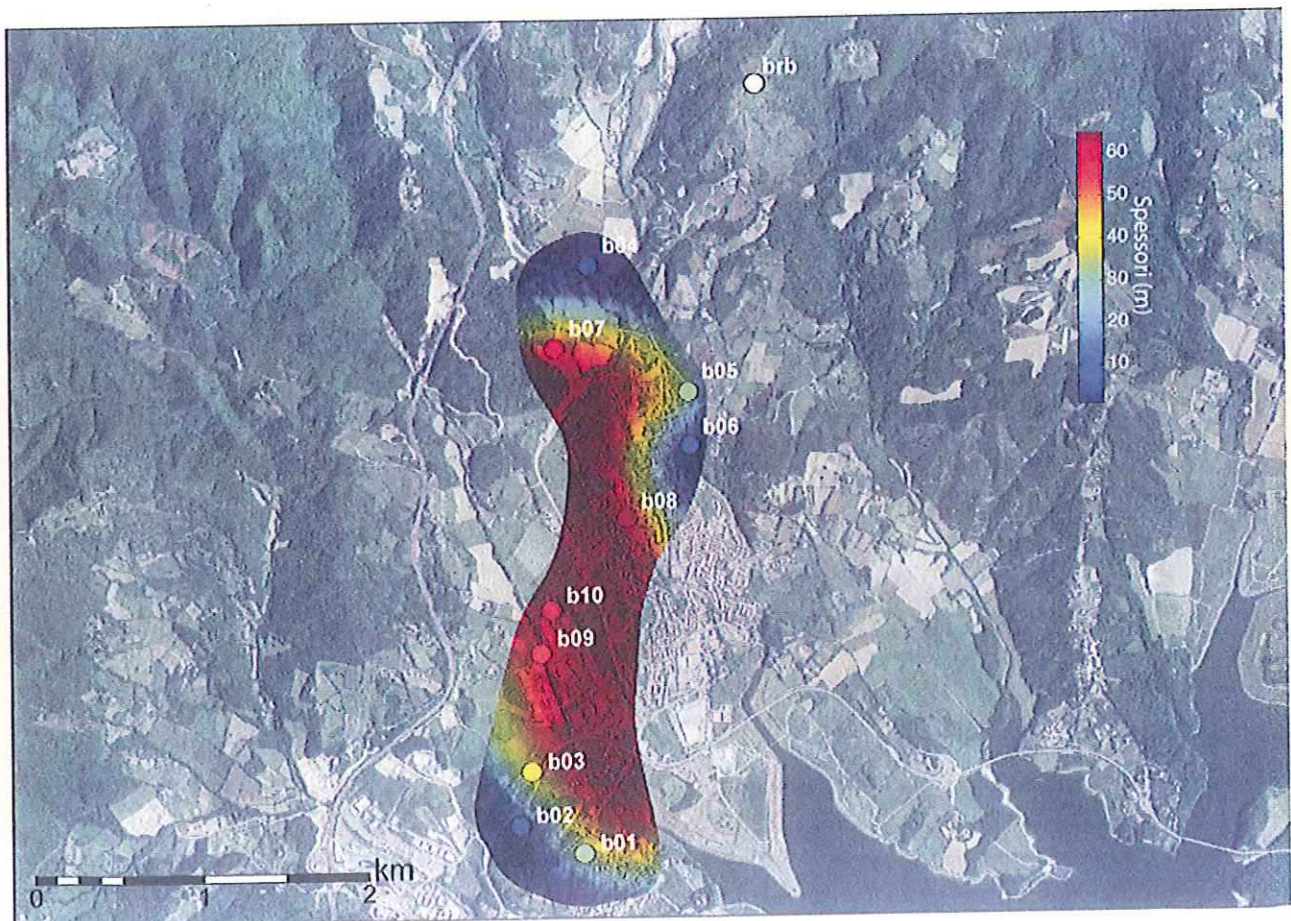


Figura 29: Mappa dello spessore dei terreni di copertura ottenuti dalle frequenze di risonanza valutate sul rumore sismico (Figura 15) e dalle velocità di propagazione delle onde s nelle coperture misurate nei 17 sondaggi sismici downhole disponibili per l'area di indagine.

La Figura 29 mostra l'andamento della profondità del substrato valutato dalle frequenze di risonanza e dalla velocità di propagazione delle onde s nei terreni di copertura. Lo spessore dei terreni di copertura è piuttosto eterogeneo nell'area di indagine, passando da substrato sub-affiorante (b02, b04, b06) a profondità decisamente superiori, fino ai 70 m valutati per l'area industriale e la porzione centro-orientale dell'abitato di Barberino.

Tabella 1: Coordinate delle stazioni di acquisizione installate nel comune di Barberino del Mugello (FI) durante la campagna di microzonazione sismica strumentale e numero di terremoti registrati ad ogni singola stazione di misura ed utilizzati nella procedura di analisi SSR.

Stazione	Latitudine	Longitudine	Quota	Periodo Acq	# terremoti
B01	43.98367	11.23046	287	07-22/03/2012	5
B02	43.98502	11.22571	284	07-22/03/2012	5
B03	43.98824	11.22673	268	07-22/03/2012	5
B04	44.01615	11.23225	290	07-22/03/2012	5
B05	44.00950	11.23950	280	07-22/03/2012	5
B06	44.00610	11.23944	245	23/03-24/04/2012	8
B07	44.01172	11.22951	293	23/03-24/04/2012	8
B08	44.00221	11.23453	281	23/03-24/04/2012	3
B09	43.99490	11.22778	274	23-24/03/2012	-
B10	43.99724	11.22861	272	23/03-24/04/2012	8
BRB	44.02566	11.24575	468	07/03-24/04/2012	

Tabella 2: Frequenze di risonanza (picco principale ed eventuale picco secondario) e fattori di amplificazione valutati per tutte le stazioni di indagine sia sul rumore sismico (f_{pN} , f_{sN} , HVSR) che sui terremoti (f_{pE} , f_{sE} , HVSR_T, F_{aZ} , F_{aH}), e velocità di propagazione delle onde s (V_s) nelle coperture utilizzate per stimare la profondità del livello risonante:

STZ	f_{pN} (Hz)	f_{sN} (Hz)	f_{pE} (Hz)	f_{sE} (Hz)	HVSR	HVSR _T	F_{aZ}	F_{aH}	V_s (m/s)
B01	2.7	-	3.2	-	2.1	2.2	5.1	6.9	340
B02	12.6	-	13.2	5	1.7	2.1	1.2	1.9	340
B03	2.5	-	2.8	-	1.8	2.3	3.7	6.9	390
B04	12.6	-	13	-	1.8	2.6	1.1	2.4	331
B05	2.9	-	3.5	-	1.8	2.2	2.5	3.7	380
B06	11.4	-	12.4	-	1.8	2	1	2.2	380
B07	1.8	11.8	2.2	13.2	2	2	3.5	6.4	405
B08	1.6	-	1.9	-	1.1	2.2	2.3	5.1	380
B09	1.5	-	-	-	1.5	-	-	-	315
B10	1.4	-	1.5	-	1	1.6	3.6	4.5	315
BRB	-	-	-	-	1.2	-	-	-	-

