

1.6 Valutazione della risposta sismica locale di alcuni siti dell'alta e media valle dell'Aterno

G. Cultrera¹ e L. Luzi² ■

1.6.1 Introduzione

Nei mesi successivi al terremoto che ha colpito l'Abruzzo il 6 aprile 2009, varie istituzioni nazionali ed internazionali hanno installato decine di stazioni per monitorare più di 100 località con l'obiettivo di studiare gli effetti di sito nell'area epicentrale (alta e media valle dell'Aterno).

Le stazioni sismiche (accelerometri e velocimetri) sono state collocate nei centri abitati o in prossimità

di essi. Tra le aree investigate figura Onna, uno dei paesi maggiormente danneggiati e che ha registrato un elevato numero di vittime, e il centro storico de L'Aquila, dove sono state installate numerose stazioni velocimetriche, in alcuni casi affiancate da accelerometri. I risultati per i siti esaminati mostrano una estrema variabilità della risposta sismica locale, con rilevanti effetti di amplificazione in alcuni dei centri abitati più danneggiati.

1.6.2 Campagna di misura

Il 6 Aprile 2009 un terremoto di magnitudo momento 6.3 ha colpito l'Abruzzo nelle immediate vicinanze della città de L'Aquila. A partire dal giorno successivo e per alcuni mesi, varie istituzioni tra cui l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, l'Università della Basilicata, il GFZ-Potsdam (Potsdam, Germania) e il CETE-Méditerranée (Nizza, Francia), hanno installato decine di stazioni per monitorare più di 100 località con l'obiettivo di studiare gli effetti di sito

nell'area epicentrale e nei centri abitati che hanno subito i danni maggiori durante la sequenza sismica (alta e media valle dell'Aterno, Fig. 1). Le attività si sono articolate in una prima fase di emergenza post-evento, mentre una seconda fase è stata svolta nell'ambito di progetti promossi dal Dipartimento di Protezione Civile (progetto C.A.S.E. e microzonazione sismica). La campagna di misura è stata condotta con l'obiettivo di valutare la risposta sismica locale tramite registrazioni di terremoti e/o microtre-

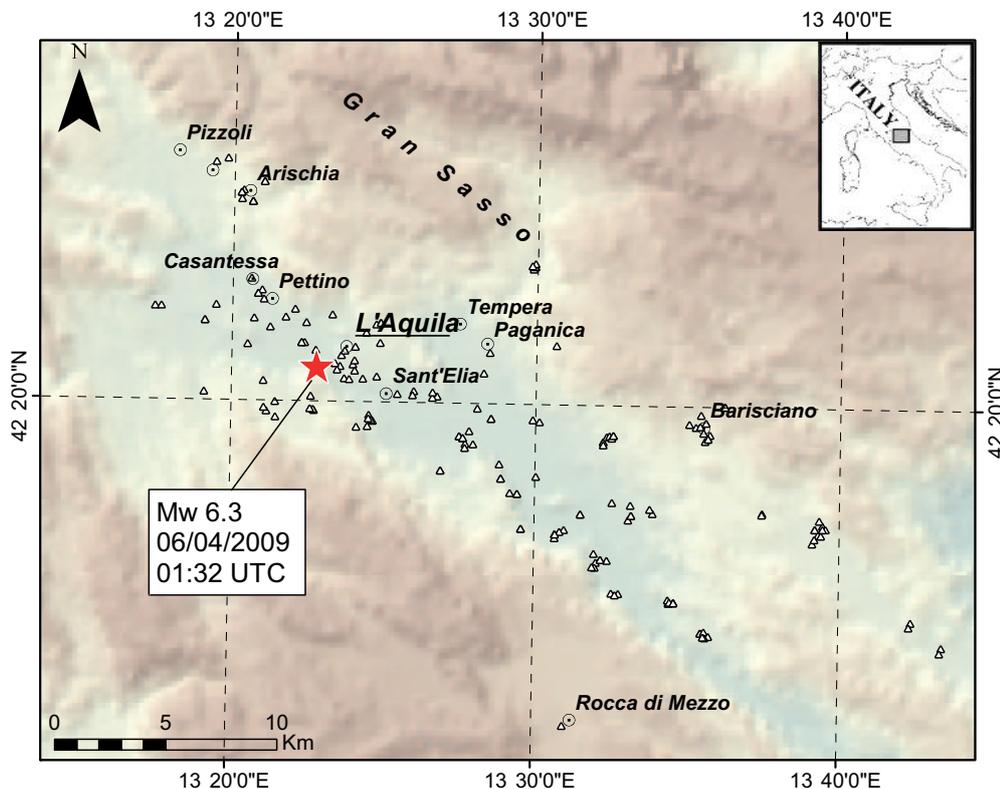


Fig. 1
Mappa dell'area epicentrale con la posizione delle stazioni (triangoli) installate per lo studio degli effetti di sito a partire dal 6 aprile 2009.

¹ INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma.

² INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano.

mori nella media valle dell'Aterno, nel comune de L'Aquila e nei comuni limitrofi. Particolare attenzione è stata rivolta ai siti in prossimità o coincidenti con i paesi maggiormente colpiti, dove l'intensità macrosismica ha raggiunto il IX/X grado MCS (Galli e Camassi eds., 2009) e dove sono stati osservati effetti cosismici superficiali (Emergeo Working Group, 2009).

Le stazioni sismiche (accelerometri e velocimetri) sono state collocate nei centri abitati, in *free-field* o in edifici. In particolare, i sensori accelerometrici sono stati installati per poter registrare senza saturazione le repliche più forti e valutare la presenza di eventuali effetti non lineari del terreno. L'elevato numero di stazioni installate, unitamente alla grande quantità di dati raccolti, consente la stima dei fenomeni di amplificazione

locale attraverso tecniche empiriche, come i rapporti spettrali tra le componenti orizzontali e la verticale alla singola stazione (HVSR; Lermo e Chavez-Garcia, 1993) o i rapporti spettrali tra le componenti orizzontali o verticali del sito in esame e quelle di un sito di riferimento (SSR; Tucker e King, 1984). Le numerose registrazioni di rumore ambientale (microtremore) consentono inoltre l'uso di tecniche speditive HVSR applicate ai microtremori (HVNSR; Bard, 2002) e il confronto tra i risultati forniti da diversi tipi di dati. È ovviamente necessario integrare i dati sismologici con altre informazioni di natura geologico-tecnica per una reale quantificazione ed una eventuale modellazione che porti alla definizione della funzione di trasferimento nei centri abitati colpiti.

1.6.3 Geologia

L'area interessata dalla sequenza sismica è ubicata nell'Appennino Laziale-Abruzzese ed è stata interessata da tettonica distensiva con direzione prevalente SW-NE a partire dal Pliocene medio (Pace et al., 2006). Il regime distensivo ha causato l'apertura del bacino intermontano della valle dell'Aterno, orientato NW-SE e bordato a nord-est dal massiccio del Gran Sasso e a sud-ovest dal complesso Velino-Sirente. I depositi

alluvionali hanno età comprese tra il Pleistocene Medio il presente e sono formati da alternanze di limi calcarei, ghiaie e conglomerati. Questi depositi hanno colmato il bacino e sono stati a loro volta ricoperti da depositi detritici di chiusura (conoidi e detriti di versante), variamente dislocati dalla tettonica recente (Bosi e Bertini, 1970). Tali caratteristiche geologico-geomorfologiche rendono l'area soggetta a possibili fenomeni di amplificazione sismica locale.

1.6.4 Risposta sismica locale della media valle dell'Aterno

La valutazione della risposta sismica locale della media valle dell'Aterno è stata effettuata tramite registrazioni di terremoti, con particolare attenzione ai siti in prossimità o coincidenti con i paesi fortemente danneggiati. Le stazioni sismiche sono state equipaggiate con velocimetri e/o accelerometri (Le3d-5s, Le3d-1s, MarkL4c3d e Episensor) e digitalizzatori (Reftek R72A e R130, EDL), o sistemi integrati digitalizzatore-accelerometro (K2 o ETNA Kinematics). La strumentazione è stata alimentata con batterie e pannelli solari e quasi tutte le stazioni sono state dotate di antenna GPS per la sincronizzazione temporale. Tra tutti i siti monitorati, quattro possono essere considerati come siti di riferimento: Pescomaggiore a nord (calcari), Civita di Bagno, Fossa e Stiffe a sud (conglomerati cementati).

I primi risultati mostrano una estrema variabilità della risposta sismica locale dei siti esaminati (Fig. 2), con amplificazioni comprese nella banda di frequenza tra 1 e 5 Hz in corrispondenza di numerosi centri abitati.

Di seguito si riportano i casi di Onna e Paganica,

due tra i paesi maggiormente danneggiati e che hanno avuto un elevato numero di vittime (Galli e Camassi eds., 2009). In particolare, ad Onna si è verificato il crollo della quasi totalità degli edifici, per il quale è stato ipotizzato un significativo ruolo degli effetti di amplificazione locale.

In entrambi i siti è stata installata una stazione sismica equipaggiata con accelerometro Episensor e acquisitore Reftek130 a 24 bit, e il fondo scala dell'intero sistema di acquisizione è stato fissato a 1 g. Nel periodo di funzionamento sono stati registrati più di 100 terremoti con magnitudo $3.0 \leq M \leq 5.3$, da cui sono stati calcolati i rapporti spettrali a singola stazione (HVSR). Per ogni evento è stata selezionata una finestra di 10 secondi a partire dall'arrivo della fase S; data la distanza e l'entità degli eventi registrati tale finestra comprende interamente la parte più energetica degli eventi.

La stazione sismica di Onna è stata installata in prossimità del centro abitato, edificato su depositi fluvio-lacustri e lacustri (Mi03 in Fig. 2) di cui non si conosce l'esatta entità dello spessore. La stazione sismica di Paganica (Mi02 in Fig. 2) è stata invece installata nel centro storico, edificato su depositi di conoide alluvionale la cui

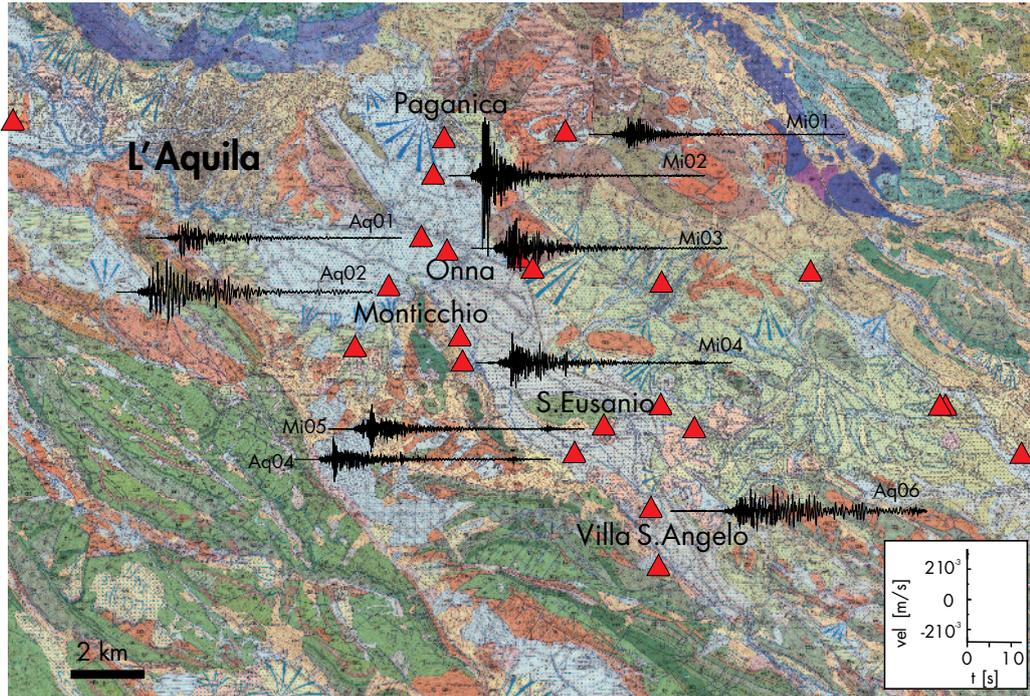


Fig. 2
 Mappa geologica (Foglio CARG, L'Aquila n.359) con la posizione delle stazioni nella Valle dell'Aterno (triangoli). I principali depositi campionati dalle stazioni sono: depositi alluvionali recenti (celeste), breccie cementate (beige), depositi fluvio-lacustri (verde chiaro), calcari (verde), calcari Miocenici (marrone). I sismogrammi rappresentano la componente nord-sud delle velocità in m/s registrate ad alcune stazioni durante un aftershock del 09/04/2009 di $M_l = 3.6$ (ore 13:19 GMT, lat 42.34°N - lon 13.26°E, circa 12 km ad ovest de L'Aquila).

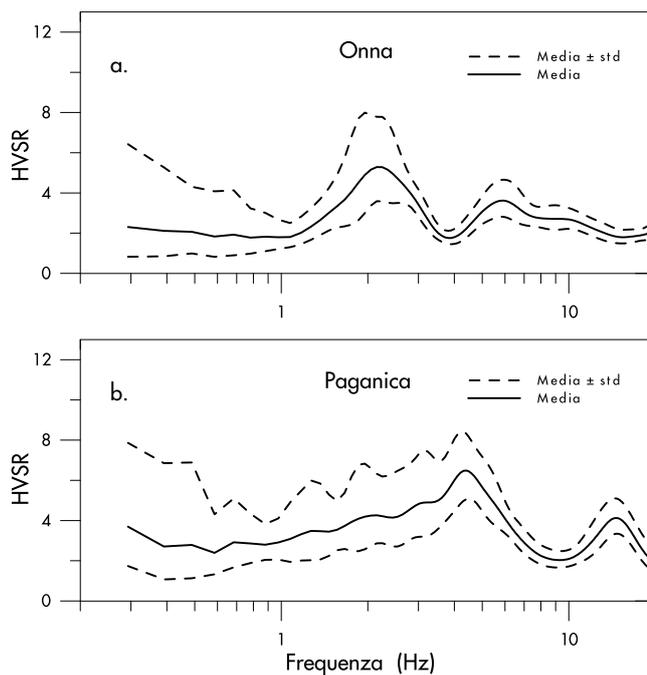


Fig. 3
 Medie e deviazioni standard dei rapporti spettrali HVSR relativi alle stazioni di Onna (a) e di Paganica (b), effettuati su 15 eventi con $3 \leq M_l \leq 5.3$.

geometria sepolta non è conosciuta.

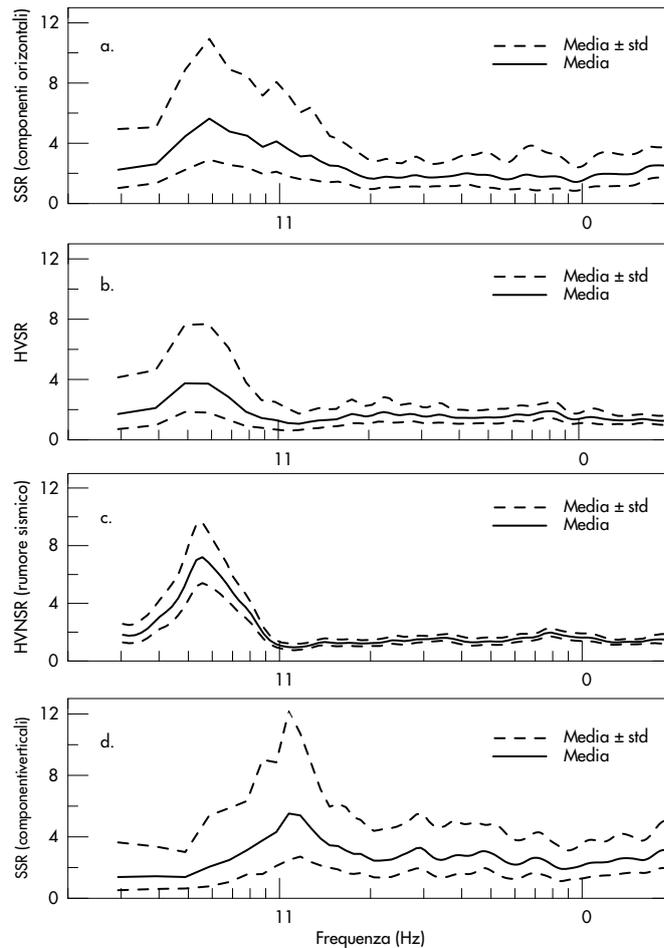
In figura 3 vengono mostrati i rapporti medi HVSR per i due siti, calcolati su un sottoinsieme di eventi. Onna presenta un picco spettrale intorno a 2.5 Hz con ampiezza media delle amplificazioni fino a 5 (Fig. 3a), mentre Paganica ha una frequenza di risonanza di circa 4.5 Hz con un valore dell'amplificazione pari a 6.5 (Fig. 3b).

1.6.5 Risposta sismica locale del comune de L'Aquila
 Nella zona compresa entro la cerchia delle mura medievali del centro storico de L'Aquila ed

I due esempi mostrati sono rappresentativi della maggior parte dei centri abitati edificati sui depositi fluvio-lacustri della media valle dell'Aterno e, come stima preliminare, si può ipotizzare che gli effetti di sito abbiano contribuito al danneggiamento dei centri storici. La grande mole di dati raccolti e le relative elaborazioni saranno oggetto di studi approfonditi.

all'esterno di esse sono stati monitorati 37 siti a partire dal 27 maggio 2009. Tutte le stazioni hanno operato in modalità di acqui-

Fig. 4
 Medie e deviazioni standard dei rapporti spettrali relativi alla stazione installata nei pressi della Casa dello Studente, centro storico de L'Aquila: (a) SSR (rapporto della media delle due componenti orizzontali tra il sito in esame ed il sito di riferimento a Poggio di Roio) per i terremoti registrati dopo il 27 Maggio; (b) HVSR (rapporto della media delle due componenti orizzontali rispetto alla verticale per il sito in esame) riferito agli eventi registrati; (c) HVNSR (rapporto della media delle due componenti orizzontali e la verticale per il sito in esame) riferito ad una registrazione di rumore ambientale; (d) Rapporti spettrali SSR delle componenti verticali tra sito in esame e sito rigido di riferimento per gli eventi registrati.



sizione continua, rendendo possibile la selezione di circa 300 eventi nel periodo 27 maggio - 24 giugno 2009. Gli eventi provengono da tutte le sorgenti sismiche attivate durante la sequenza, compresa quella dei Monti Reatini situata più a nord. Gli spettri di Fourier degli eventi selezionati sono stati calcolati su una finestra di 10 secondi a partire da pochi decimi di secondo prima dell'arrivo dell'onda P. Le finestre selezionate comprendono quindi sia le onde P che le onde S; tale scelta è stata motivata dal fatto che per gli eventi vicini l'intervallo S-P ha una durata inferiore a un secondo e quindi una selezione che includa la finestra S porta comunque ad includere parte o tutto la fase P. Il sito di riferimento scelto è posizionato in località Poggio di Roio (su calcari), circa 2.5 km a sud de L'Aquila. Un secondo sito di riferimento è stato ubicato presso il Convento di San Giuliano (su calcari), 2.5-3 km a nord della città. Tale sito era già stato utilizzato come sito di riferimento da De Luca et al. (2005) per lo studio della risposta sismica nel centro storico de L'Aquila, evidenziando amplificazioni in bassa frequenza. Le analisi preliminari per i siti esaminati confermano i risultati di De Luca et al. (2005) e cioè la

presenza di una persistente amplificazione in bassa frequenza (0.5-0.7 Hz) nel centro storico della città. In particolare, in figura 4 vengono mostrati i risultati della stazione installata in prossimità della Casa dello Studente (Via XX Settembre), tristemente nota per il crollo della palazzina che ha provocato un notevole numero di vittime tra gli studenti residenti. I rapporti spettrali medi SSR e HVSR sono concordanti (Fig. 4a e 4b) e mostrano un'amplificazione spettrale compresa tra 3 e 5 intorno a 0.5 Hz, confermata dai rapporti HVNSR sul rumore ambientale con valori medi di amplificazione di circa 7 (Fig. 4c). Considerando anche le deviazioni standard, il livello di amplificazione stimato dalle tre tecniche varia complessivamente tra 2 e 10 a 0.5 Hz. De Luca et al. (2005) correlano le stesse amplificazioni con la presenza di un bacino sedimentario profondo costituito da sedimenti quaternari. Tali sedimenti non affiorano nel centro storico de L'Aquila in quanto ricoperti da uno strato di brecce calcaree a diverso grado di cementazione. Gli spessori e le velocità delle onde S delle unità descritte sono ricavate da dati gravimetrici (Blumetti et al., 2002) e da misure dirette (De Luca et al., 2005): i depositi quater-

nari presentano spessori superiori ai 200 metri e hanno Vs comprese tra 500 e 650 m/s, mentre le brecce hanno uno spessore che varia tra i 20-50 m con Vs di circa 900 m/s. Le ipotesi sulle geometrie del bacino sono state verificate in De Luca et al. (2005) tramite una modellazione agli elementi finiti che ha permesso di ricostruire le carat-

1.6.6 Discussione

Il terremoto dell'Aquilano ha causato centinaia di vittime ed un diffuso danneggiamento, colpendo duramente la città de L'Aquila e i comuni dell'alta e media valle dell'Aterno. In situazioni analoghe gli effetti di sito sono tra le prime cause da investigare per giustificare la distribuzione del risentimento, insieme alla vicinanza della sorgente sismica e alla vulnerabilità degli edifici. Il tempestivo intervento dei gruppi italiani e stranieri ha apportato un significativo contributo alla raccolta di registrazioni di terremoti di piccola-media magnitudo in un numero elevato di siti. Il monitoraggio di numerosi siti di riferimento permetterà inoltre di confrontare il moto registrato nelle diverse località, in modo da avere delle stime robuste della risposta sismica locale.

I centri abitati ubicati nella media valle dell'Aterno presentano amplificazioni locali rilevanti a

teristiche fondamentali della funzione di amplificazione in bassa frequenza.

Anche la componente verticale misurata alla Casa dello Studente (Fig. 4d) subisce una notevole amplificazione rispetto al sito di riferimento, con valor medio circa 6 ma in corrispondenza di una frequenza leggermente più alta (1.2 Hz).

frequenze superiori a 1 Hz, giustificando in parte l'entità del danneggiamento. Il paese di Onna ha subito amplificazioni di entità analoga a siti limitrofi, come Paganica, anche se per diverse frequenze. Questo suggerisce la presenza di altri fattori che hanno contribuito al forte danneggiamento, come ad esempio la vulnerabilità del costruito. Il centro storico de L'Aquila presenta invece amplificazioni del moto del suolo a bassa frequenza (<1Hz), ben correlate con la geologia locale come già evidenziato da De Luca et al. (2005). È inoltre interessante notare la presenza dell'amplificazione della componente verticale del moto, leggermente spostata verso le alte frequenze.

I risultati preliminari qui discussi rappresentano un primo passo verso la comprensione delle cause del danneggiamento subito in area epicentrale, e saranno oggetto di approfonditi studi successivi.

Co-autori

G. Ameri¹, P. Augliera¹, R.M. Azzara¹, F. Bergamaschi¹, E. Bertrand², P. Bordonì¹, F. Cara¹, R. Cogliano¹, G. Cultrera¹, E. D'Alema¹, D. Di Giacomo³, G. Di Giulio¹, A.M. Duval², A. Fodarella¹, G. Franceschina¹, M.R. Gallipoli⁴, P. Harabaglia⁵, C. Ladina¹, S. Lovati¹, L. Luzi¹, S. Marzorati¹, M. Massa¹, G. Milana¹, M. Mucciarelli⁵, F. Pacor¹, S. Parolai³, M. Picozzi³, M. Pilz³, R. Puglia¹, S. Pucillo¹, J. Régnier², G. Riccio¹, J. Salichon⁶, M. Sobiesiak³

¹ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Milano, Arezzo, Italia

² LRPC de Nice, CETE Méditerranée, Nice Cedex 4, Francia.

³ Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germania

⁴ IMAA-CNR, Contrada S.ta Loja Tito Scalo (PZ)

⁵ Università della Basilicata, dell'Ateneo Lucano 10 - 85100, Potenza, Italia

⁶ UMR GEOAZUR, CNRS-UNSA, Sophia-Antipolis, 06560 Valbonne, Francia

Bibliografia

Bard P.Y. (2002) - Extracting information from ambient seismic noise: the SESAME project (Site EffectS assessment using AMBient Excitations). European Project EVG1-CT-2000-00026 SESAME, <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr> Review meeting, Brussels, Belgium

Blumetti A.M., Di Filippo M., Zaffiro P., Marsan P., Toro B. (2002) - Seismic hazard of the city of L'Aquila (Abruzzo - Central Italy): new data from geological, morphotectonic and gravity prospecting analysis, Studi Geologici Camerti 1, 7-18.

Bosi C., Bertini T. (1970) - Geologia della media valle dell'Aterno, Mem. Soc. Geol. It., IX, 719-777.

De Luca G., Marcucci S., Milana G., Sanò T. (2005) - Evidence of Low-Frequency Amplification in the City of L'Aquila, Central Italy, through a Multidisciplinary Approach Including Strong- and Weak-Motion Data, Ambient Noise, and Numerical Modeling. Bulletin of the Seismological Society of

America, Aug 2005; 95: 1469-1481.

EMERGEO Working Group (2009) - Rilievi geologici nell'area epicentrale della sequenza sismica dell'Aquilano del 6 aprile 2009. Quaderni di geofisica, ISSN 1590-2595, Anno 2009_Numero 70. Galli P., 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/macrodef_sito.pdf

Lermo J., Chávez-García F.J. (1993) - Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1574-1594.

Pace B., Peruzza L., La Vecchia G., Boncio P. (2006) - Layered seismogenic source model and probabilistic seismic-hazard analyses in central Italy, Bull. Seism. Soc. Am., 96, 107-132, doi: 10.1785/0120040231.

Tucker B., King J. (1984) - Dependence of sediment-filled valley response on input amplitude and valley properties, Bull. Seism. Soc. Am. 74, 153-165.