L. Isella
Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle Sue Risorse - Università degli Studi di Genova

E. D'Alema
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

G. Ferretti, S. Solarino, D. Spallarossa, Claudio Eva
Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle Sue Risorse - Università degli Studi di Genova

STUDI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE IN VALLE ARGENTINA (LIGURIA)

Estratto dal numero 1/2003
di Geologia dell'ambiente

L. Isella
Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle Sue Risorse - Università degli Studi di Genova

E. D'Alema
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

G. Ferretti
S. Solarino
D. Spallarossa
Claudio Eva
Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle Sue Risorse - Università degli Studi di Genova

STUDI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE IN VALLE ARGENTINA (LIGURIA)

Parole chiave: *microzonazione, microtremore, rischio sismico, amplificazione locale, scuotimento.*

ABSTRACT

The analysis of local seismic amplification phenomena is a valuable tool to correctly estimate the effects of an earthquake and they consequently play a significant role in the evaluation of the seismic risk.

In this work we describe how we compiled a series of local site amplification maps using a fast and easy to use technique based on the acquisition of environmental noises or seismic microtremors (Nakamura's method) in the Argentina Valley (Liguria, Italy).

The technique consists in computing the spectral ratios between horizontal and vertical components of seismic recordings. The resulting plots evidence one or more frequencies for which the amplification is higher than expected.

Mapping of the estimated frequencies and/or amplifications gives interesting insights about the local response of soils.

The Argentina Valley is characterised by the presence of three urban agglomerates and, from the geological point of view, by alluvial fan with very complex morphology and stiff bedrock visible in the outcrops along the banks of the valley. The frequencies correspondent to the maximum amplification peak (site effect) of most of the 158 sites considered show significant values when they are relative to points of measure where the geological and geomorphological conditions of the studied area suggest the existence of altered rock or sedimentary deposits. The frequencies of maximum amplification peak are proportional to the thickness of the recent alluvial formations starting from 1-5 Hz for thickness of about 50 m to 6 Hz for thickness less than 10 m. An indirect confirmation of this trend is provided by the results of few electric vertical surveys mapping depth and geometry of the bedrock at the bottom of the alluvial deposits.

Conversely the non-altered rock sites are characterised by the absence of seismic amplification effects.

RIASSUNTO

Lo studio degli effetti di sito rappresenta un aspetto estremamente importante per valutare con correttezza gli effetti di un terremoto. Nelle analisi di microzonazione sismica effettuati in questi ultimi anni per valutare il rischio sismico in un determinato territorio il contributo dovuto ai fenomeni di amplificazione locale risulta essere estremamente significativo e non trascurabile.

In questo lavoro viene presentato l'applicazione di un metodo speditivo applicato a misure di rumore ambientale o microtremore (metodo Nakamura) nella valle Argentina (Liguria, Italia) per la determinazione di una serie di mappe di amplificazione sismica locale valide all'interno della valle analizzando la frequenza naturale e l'amplificazione relativa del terreno.

La valle Argentina è caratterizzata dalla presenza di tre agglomerati urbani e, dal punto di vista geologico, da situazioni di pianura alluvionale con morfologia molto complessa e di sub-strato rigido visibile negli affioramenti lungo le sponde che delimitano la valle. Gli effetti di sito, ovvero le frequenze corrispondenti ai picchi di massima amplificazione ricavate per ciascuno dei 158 punti misura considerati, presentano valori significativi e sono correlabili con le caratteristiche geologiche-geomorfologiche dell'area indagata.

L'assenza di fenomeni di amplificazione sismica locale è caratteristica dei punti misura effettuati presso formazioni rocciose non alterate mentre effetti di sito considerevoli si sono riscontrati in punti in cui la copertura sedimentaria si presentava più potente (lungo il paleoalveo); le frequenze corrispondenti al picco di massima amplificazione sono proporzionali allo spessore delle formazioni alluvionali recenti partendo da 1 - 1.5 Hz per coltri di circa 50 m di spessore fino a 6 Hz per spessori inferiori a 10 m. Tale proporzionalità viene confermata dallo studio effettuato attraverso indagini geoelettriche (Sev) sull'andamento del substrato della valle.

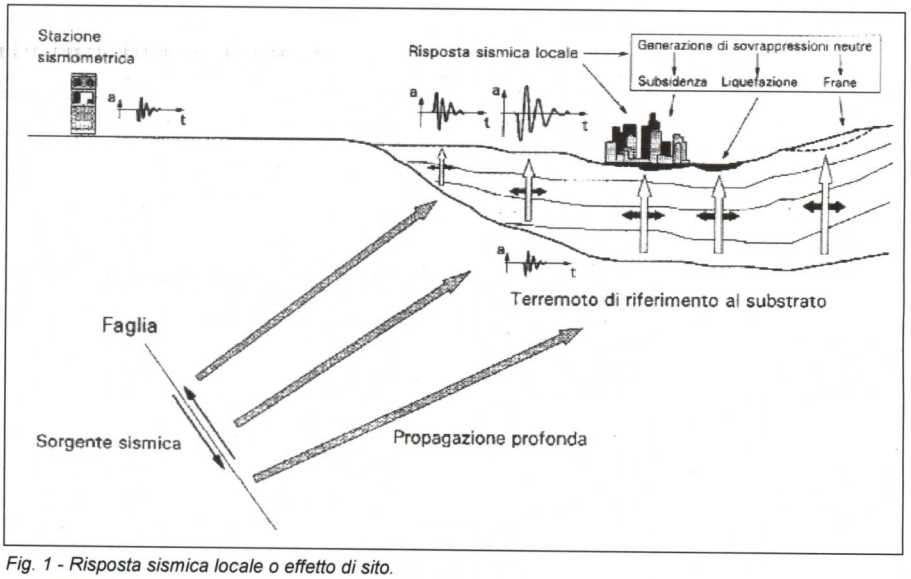


Fig. 1 - Risposta sismica locale o effetto di sito.

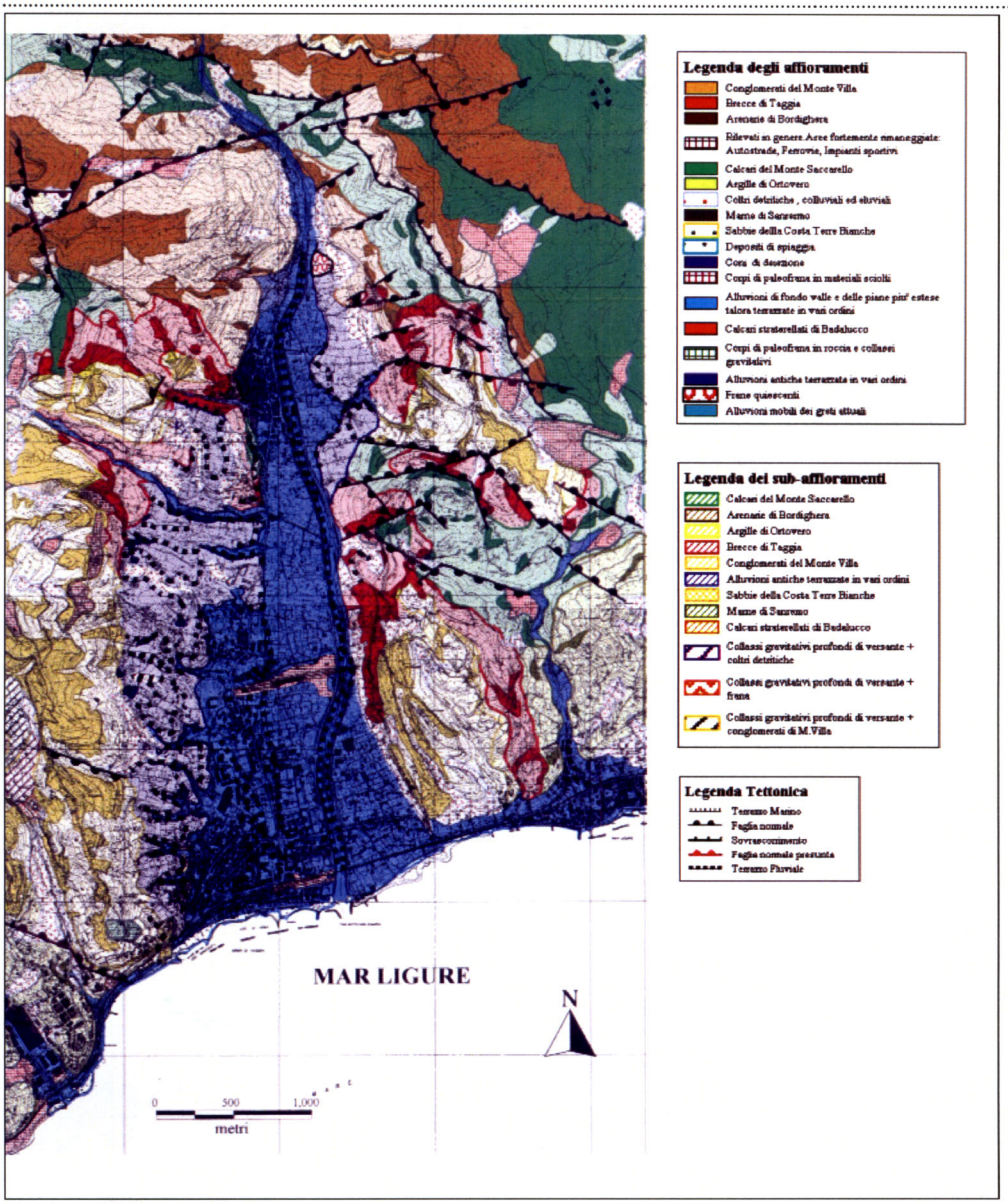


Fig. 2 - Carta geologica della Valle Argentina.

INTRODUZIONE

Lo scuotimento prodotto da un evento sismico dipende da molteplici fattori: la magnitudo dell'evento e la distanza dall'epicentro rappresentano gli elementi predominanti ma anche le caratteristiche del processo di rottura e di attenuazione possono assumere notevole importanza.

Negli ultimi anni, un'analisi dettagliata delle registrazioni accelerometriche e lo studio della distribuzione e della tipologia dei danni prodotti da recenti eventi sismici, hanno evidenziato come anche gli effetti locali possano influenzare considerevolmente lo scuotimento sismico alla superficie terrestre. Con la terminologia "effetti di sito" vengono comunemente indicati tutti i fattori locali che contribuiscono alla modifica in frequenza ed ampiezza del segnale sismico: tali fattori sono generalmente attribuibili alle diverse caratteristiche geologiche-geotecniche e geometriche dei suoli di fondazione (Bard, 1995).

Gli studi di pericolosità' sismica, qualora si tenga conto delle diverse caratteristiche di attenuazione delle coltri sedimentarie, evidenziano notevoli incrementi delle accelerazioni di picco in località caratterizzate da terreni meno competenti. Questo fatto risulta particolarmente evidente in varie mappe di pericolosità sismica elaborate per la Liguria occidentale.

EFFETTI DI SITO

L' onda sismica, durante il suo cammino dalla sorgente al sito, subisce in prossimità della superficie delle brusche variazioni in frequenza ed in ampiezza dovute sostanzialmente alla proprietà dei terreni attraversati; tale onda giunge alla base della copertura sedimentaria con una ampiezza, una durata ed un contenuto in frequenza dipendente sostanzialmente dalle caratteristiche della sorgente (i.e. Magnitudo) e dal percorso di propagazione. Durante l'attraversamento della copertura sedimentaria le componenti del moto sismico vengono alterate in ampiezza e frequenza (risposta sismica locale (fig. 1) in funzione della geometria del substrato "rigido" (*bedrock*) e delle caratteristiche geotecniche della successione sedimentaria sovrastante. Le perturbazioni sismiche dovute alle caratteristiche dei suoli di fondazione possono essere studiate analiticamente operando nel dominio delle frequenze attraverso l'analisi di Fourier del segnale registrato (Lachet et al., 1994; Lanzo et al., 1999).

L'effetto di sito viene determinato considerando la funzione di trasferimento H(f) corrispondente al rapporto tra lo spettro di Fourier del moto alla superficie e quello dell'analoga componente in corrispondenza del basamento roccioso. Si tratta di un rapporto tra due funzioni in genere complesse, quindi la H(f) sarà una funzione complessa, il cui modulo, lo spettro di ampiezza A(f), rappresenta la funzione di Amplificazione.

La funzione di amplificazione è estremamente significativa sotto il profilo fisico, in quanto indica quali componenti del moto sismico sono state amplificate nel passaggio attraverso il terreno, quali smorzate, e in quale rapporto.

È possibile esprimere il fenomeno di amplificazione attraverso l'operazione di convoluzione (prodotto frequenza per frequenza):

$$FS(f) = H(f) \circ FR(f)$$

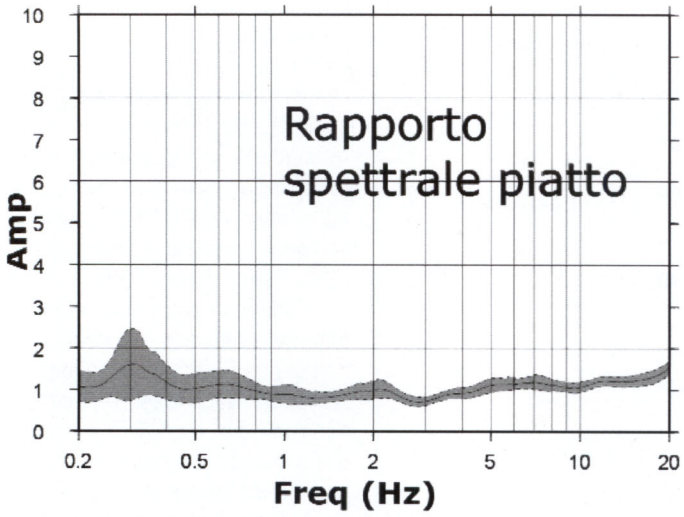
Dove FR (f) è lo spettro di Fourier del moto al *bedrock*, H (f) è la funzione di trasferimento ed il risultato FS (f) è lo spettro di Fourier del moto in superficie.

Il moto sismico alla superficie di un deposito pertanto risulta essere significativamente condizionato anche dai caratteri del moto atteso al basamento roccioso, caratterizzato da contenuti in frequenze dipendenti dal meccanismo di sorgente, dalla magnitudo, dal percorso di propagazione.

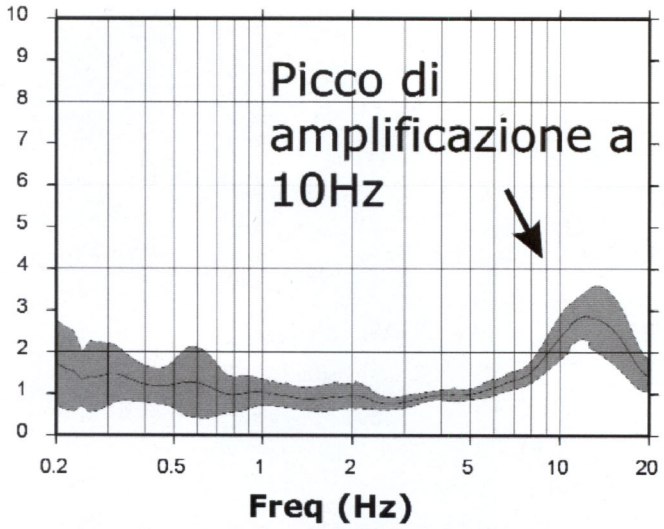
Ai fini di una valutazione quantitativa dell'effettiva risposta sismica locale, la determinazione del terremoto di riferimento va poi accoppiata ad una realistica modellizzazione del sottosuolo per definire la funzione di amplificazione, che non è caratteristica univoca del sito, ma dipende anche dai caratteri del moto di riferimento. Lo studio e la determinazione degli effetti di sito rappresentano una delle fasi più complesse di un'indagine di microzonazione sismica. I metodi per la ricerca degli effetti di sito possono essere di varia natura e i metodi più rigorosi richiedono oltre ad indagini di superficie anche esperimenti in pozzo.

METODO NAKAMURA

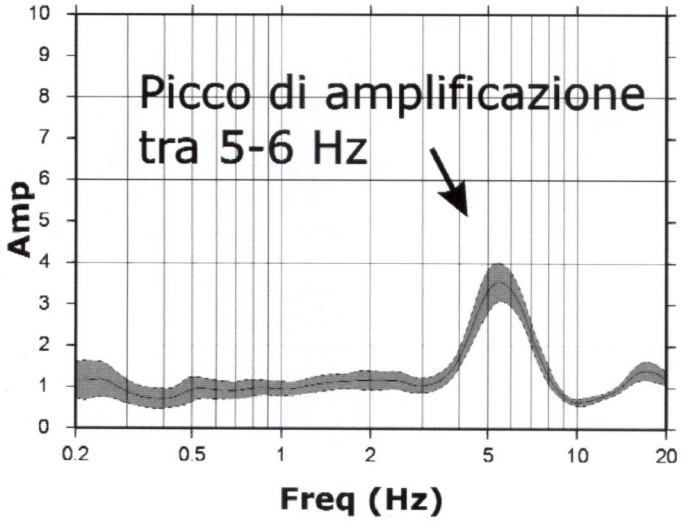
Nell'ultimo decennio, in seguito all'aumentata sensibilità e dinamica degli stru-



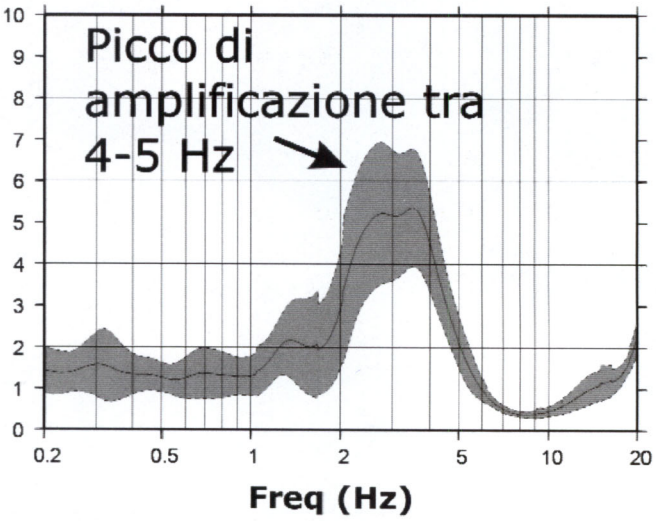
Ca01: misura effettuata sui Conglomerati di M.te Villa



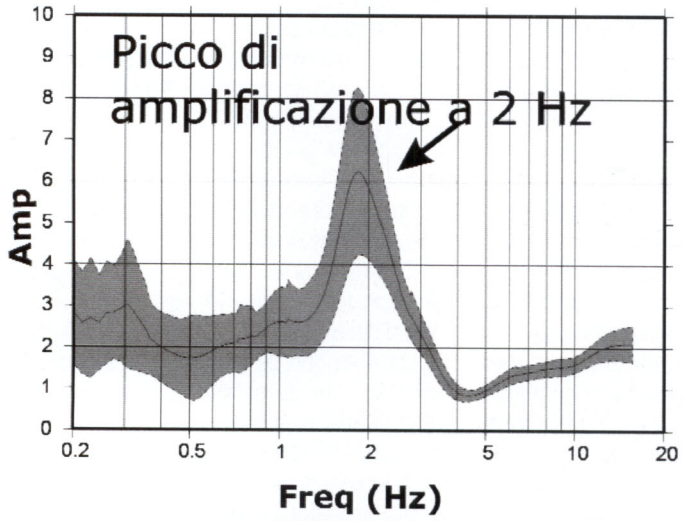
Ar05: misura effettuata su alluvioni di fondo valle



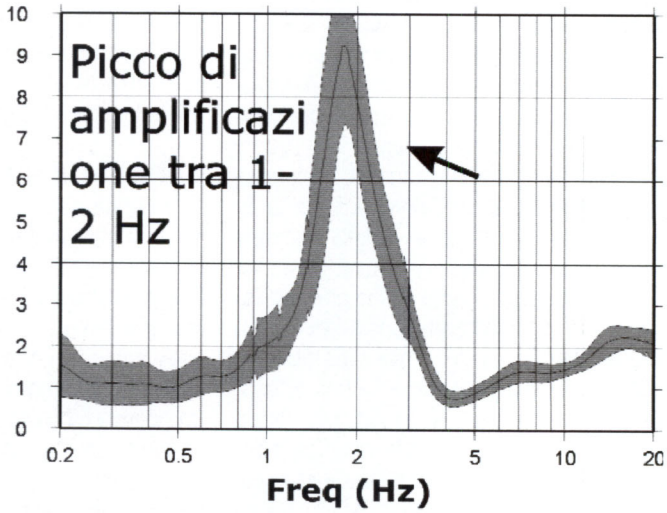
Ta01: misura effettuate su alluvioni di fondo valle



Ar32: misura effettuata su alluvioni di fondo valle



Ar47: misura effettuata su alluvioni fondo valle



Ar28: misura effettuata su misure di fondo valle (foce)

Fig. 3 - Rapporti spettrali H/V relativi a 6 differenti punti misura; l'andamento medio (linea nera) e la zona a deviazione standard minore di 3s (area grigia).

menti sismici, è stato possibile elaborare nuove metodologie speditive per la determinazione della funzione di amplificazione utilizzando rumore ambientale anziché terremoti (Lermo et al., 1994). Questo ha permesso di ricavare gli effetti di sito anche in zone caratterizzate da sismicità poco frequente e/o di bassa energia.

Tra esse, il metodo Nakamura (Nakamura,1989), basato sul calcolo dei rapporti spettrali tra la componente verticale e quella orizzontale del segnale registrato, consente di ottenere la funzione di amplificazione di un sito utilizzando il rumore ambientale (microtremore) nell'ipotesi che lo spettro della componente verticale simuli quello di un rumore bianco. Attraverso un sistema di acquisizione composto da un sensore a tre componenti (verticale, Est-Ovest e Nord-Sud), da un convertitore analogico digitale e da un Gps si registrano finestre di rumore ambientale dalle quali è possibile elaborare i rapporti H/V. Tali rapporti presentano un comportamento differente a seconda del sito considerato, mostrando a seconda dei casi un picco di amplificazione alla frequenza fondamentale del sito. È importante sottolineare che nei casi più semplici la tecnica Nakamura fornisce l'esatto valore della frequenza fondamentale, dimostrando peraltro che essa dipende da alcune caratteristiche dei litotipi di indagine; tra le più importanti si ricordano lo spessore delle coltri di copertura e i differenti parametri geotecnici che definiscono il contrasto tra i litotipi. È ancora in fase di studio se la topografia del sito di indagine possa influire sui risultati dei rapporti spettrali.

I valori di amplificazione ottenuti dall'analisi di misure di microtremore (rumore ambientale a corto periodo inferiore a 5 s) in un'area di indagine, elaborate con la tecnica sopra descritta, devono essere interpretati in relativo, ovvero riconoscendo quali siti amplificano più di altri in funzione delle misure effettuate, senza però poter definire quale sia l'amplificazione "assoluta" su ogni sito.

Recenti studi hanno dimostrato che per ottenere il valore reale dell'amplificazione è necessario effettuare il calcolo dei rapporti spettrali sui terremoti; questo perché durante un evento sismico il terreno viene sollecitato in maniera differente, essendo coinvolti differenti tipi di onde sismiche, rispetto al rumore ambientale che si ipotizza essere caratterizzato dalle sole onde superficiali, generate da sorgenti locali ed escludendo qualsiasi sorgente profonda.

La teoria Nakamura si basa sul fatto che la componente verticale del movimento non viene amplificata durante il suo percorso tra substrato roccioso e copertura sedimentaria e, se si ipotizza che alla base del substrato roccioso la sorgente locale non influisca sul microtremore (Bour et al., 1998), è possibile stimare la forma spettrale della sorgente del microtremore, AS, come funzione della frequenza w, attraverso il rapporto

AS (w) = VS (w) / VB (w)

Dove VS e VB sono rispettivamente le ampiezze spettrali del movimento verticale alla superficie e alla base dello strato.

Per la stima dell'effetto di sito SE si utilizza

SE (w) = HS (w) / HB (w)

Dove HS e HB sono rispettivamente le ampiezze spettrali della componente orizzontale del movimento alla superficie e alla base dello strato.

Per compensare SE dello spettro della sorgente modifichiamo il rapporto spettrale di sito SM come

SM (w) = SE (w) / AS (w) =
[HS (w)/VS (w)]/[HB (w)/VB (w)]

Un'assunzione finale risulta che per tutte le frequenze di interesse

HB (w)/VB (w) =1

Quindi la stima degli effetti di sito è il risultato del rapporto spettrale tra la componente orizzontale e verticale del movimento alla superficie dello strato.

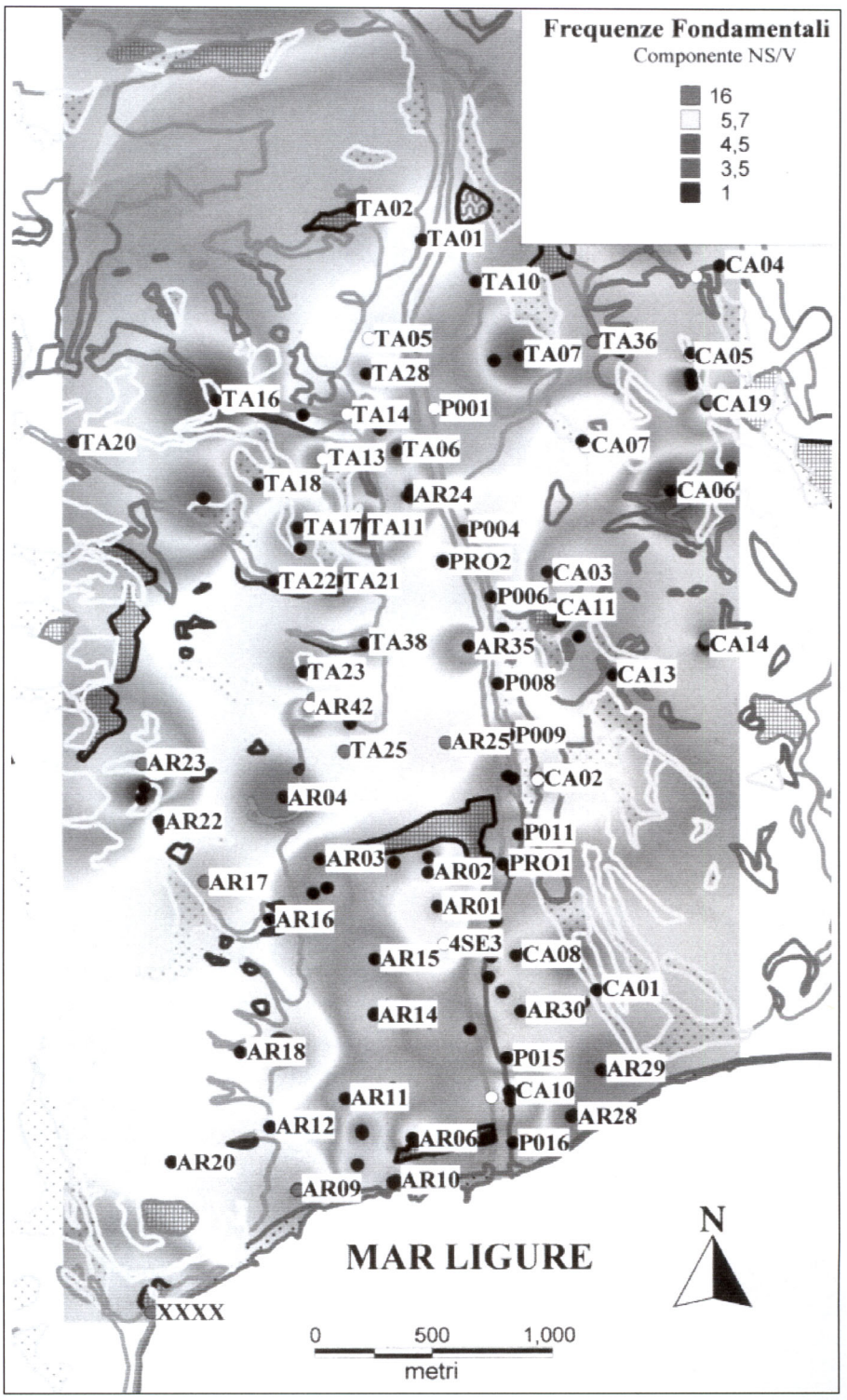


Fig. 4 - Mappa delle frequenze relative al picco di massima amplificazione per il rapporto tra la componente Nord-Sud e la componente verticale.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E PUNTI MISURA

L' area in esame si estende dalla linea di costa verso Nord per circa 6 Km ed è larga 4,2 Km rispetto all'asse della valle lungo il torrente Argentina. In quest'area sono presenti tre centri abitati facenti parte di due distinti Comuni: il Comune di Taggia, che comprende i due borghi distinti di Arma di Taggia e Taggia, ed il Comune di Castellaro.

Come visibile dalla carta geologica (fig.2) il *bedrock* della zona è rappresentato dal Flysch ad Elmintoidi di età Cretaceo-Terziaria. Litologicamente il *flysch* è composto da arenarie torbiditiche massicce granulometricamente piuttosto grossolane sino conglomeratiche (Arenarie di Bordighera) e da una formazione essenzialmente calcareo-marnosa relativamente monotona e potente (Flysch di San Remo) (Guide geologiche regionali, 1994). La geologia superficiale dell'area è caratterizzata dai depositi quaternari, costituiti principalmente da ghiaie e sabbie fluviali che possono essere classificati, in base all'età dei depositi, in tre categorie di alluvioni (antiche, medie, recenti) (Marini, 2000).

In questo studio si è cercato primariamente di ricoprire in maniera omogenea i tre centri abitati e di pianificare misure su tutte le formazioni geologiche. Sono state effettuate 158 misure direttamente nell'alveo del Torrente Argentina e del Rio Batesi ed in prossimità di sondaggi geotecnici e dei profili Sev (Sondaggi elettrici verticali) trasversali all'alveo della valle.

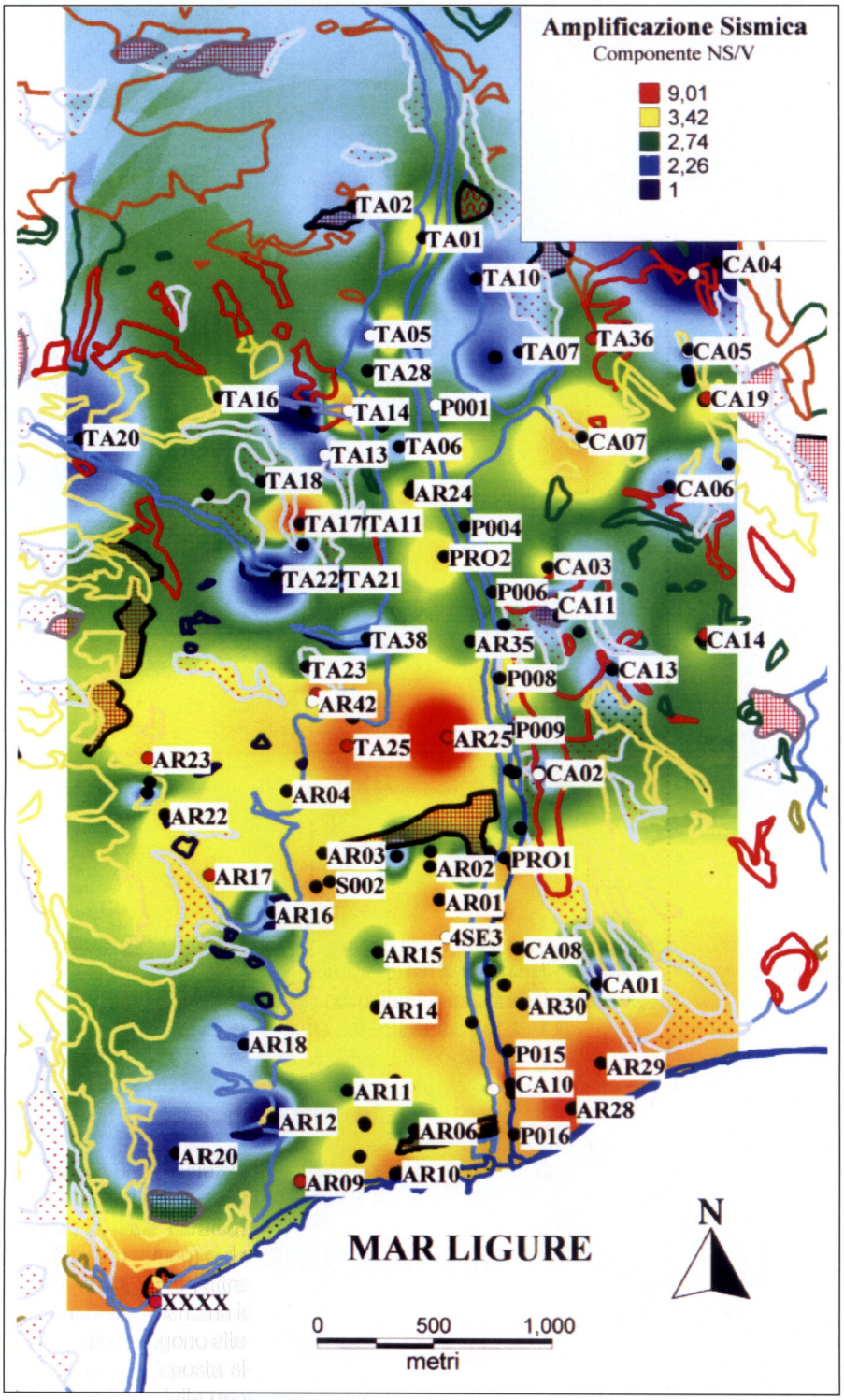


Fig. 5 - Mappa delle amplificazioni sismiche riscontrale considerando il rapporto tra la componente Nord-Sud e la componente verticale.

RISULTATI

Nelle figure 3,4,5 e 6 sono presentati alcuni risultati ottenuti applicando il metodo Nakamura.

In figura 3 vengono mostrati alcuni esempi di rapporti H/V tra la componente orizzontale N-S e la componente verticale Z: le misure sono state effettuate su differenti litologie con particolare riguardo al confronto tra roccia e sedimento e, all'interno della stessa formazione sedimentaria, al fine di determinare una corrispondenza tra lo spessore della copertura ed il picco di amplificazione. Le misure effettuate su roccia non presentano picchi di amplificazione (rapporto spettrale piatto) mentre le misure effettuate sui sedimenti rivelano picchi di amplificazione la cui frequenza e ampiezza dipendono dallo spessore del sedimento.

In generale, quindi, la frequenza del picco di amplificazione risulta essere inversamente proporzionale allo spessore del sedimento:

sedimenti di elevata potenza -> picchi di amplificazione a bassa frequenza.

Dai valori di amplificazione e di frequenza ottenuti dai rapporti spettrali sono state create della mappe tematiche in termini di frequenza fondamentale (fig. 4) e di fattore di amplificazione (fig. 5) correlabili con la geo-litologia dell'area.

Per meglio evidenziare la relazione frequenza fondamentale/spessore del sedimento, è stato eseguito un confronto con gli spessori della coltre sedimentaria dell' alveo del Torrente Argentina ottenuti con metodi geoelettrici (Sev). La morfologia complessa del substrato, con la presenza di un paleoalveo, viene evidenziata sia dai Sev sia dai valori di frequenza ottenuti dai rapporti H/V (fig. 6).

Al fine di validare i risultati ottenuti con l'analisi del microtremore ed evidenziare i limiti del metodo Nakamura rispetto al metodo tradizionale (sorgenti sismiche), sono state installate due stazioni accelerometriche nel comune di Arma di Taggia. Attraverso la registrazione di alcuni eventi sismici e' stato possibile effettuare un confronto tra i rapporti H/V calcolati sui microtremori e i rapporti H/V calcolati sui terremoti.

La figura7 mostra la funzione di amplificazione calcolata per uno stesso sito utilizzando sia il metodo Nakamura (parte sinistra) sia il metodo tradizionale (parte destra), considerando il rapporto H/V per tre terremoti.

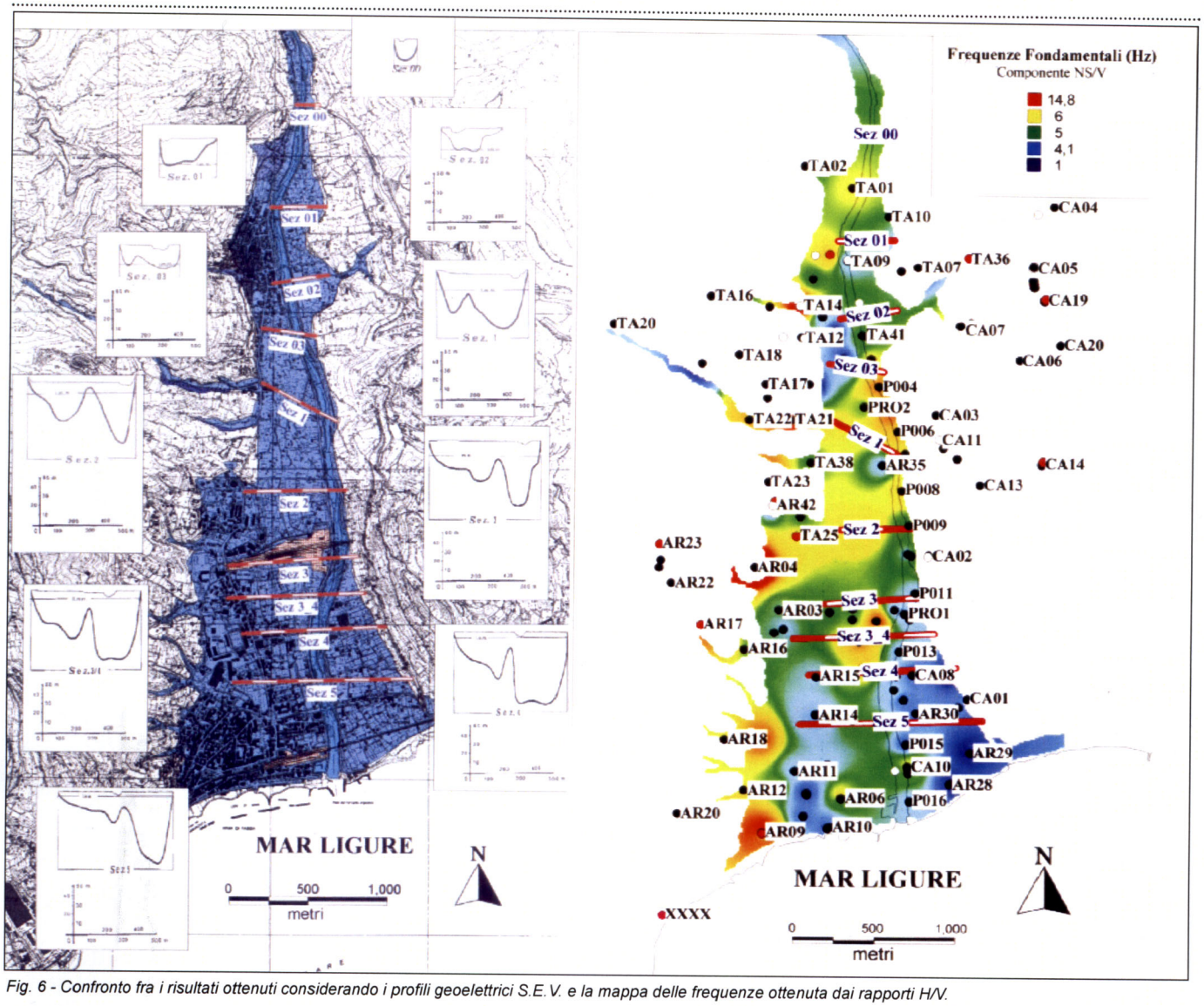


Fig. 6 - Confronto fra i risultati ottenuti considerando i profili geoelettrici S.E.V. e la mappa delle frequenze ottenuta dai rapporti H/V.

I due rapporti H/V mostrano un picco di amplificazione tra 4 e 5 Hz, con un valore di amplificazione differente (4 per il microtremore e 7 per i terremoti).

Il microtremore, tende infatti a sottostimare il valore di amplificazione.

Le discrepanze evidenziate possono essere imputate al differente contenuto in frequenza del microtremore rispetto al terremoto ma si conferma che il metodo Nakamura risulta sufficientemente preciso nella determinazione della frequenza fondamentale.

BIBLIOGRAFIA

Bard P.Y. (1995) Effects Of Surface Geology On Ground Motion: Recent Results And Remaining Issues. 10th European Conference On Earthquake Engineering, Duma (Ed.) Balkema, Rotterdam.

Bour M., Foussac D., Dominique P., Martin C. (1998) On The Use Of Microtremor Recordings In Seismic Microzonation. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, Vol. 17.

Guide Geologiche Regionali (1994) Alpi Liguri, Societa' Geologica Italiana. Be-Ma Editrice.

Lachet C., Bard P.Y. (1994) Numerical And Theoretical Investigations On The Possibilities And Limitations Of Nakamura's Technique. J. Phys. Earth, Vol. 42.

Lanzo G., Silvestri F. (1999) Risposta Simica Locale. Teoria Ed Esperienze. Argomenti Di Ingegnaria Geotecnica.

Lermo J., Chavez-Garcia J.F. (1994) Are Microtremor Useful In Site Response Evaluation? B.S.S.A. Vol. 84, N.5.

Marini M. (2000) Il Pliocene Ligure A Taggia (Imperia, Alpi Marittime Liguri): Stratigrafia Fisica Ed Evoluzione Sedimentaria. Boll. Soc. Geol. It., 119, 22ff, 2 Tav.F.T.

Nakamura J. (1989) A Method For Dynamic Characteristics Estimation Of Subsurface Using Microtremor On The Ground Surface. Qr Railway Tech. Res. Inst., 30, 1.

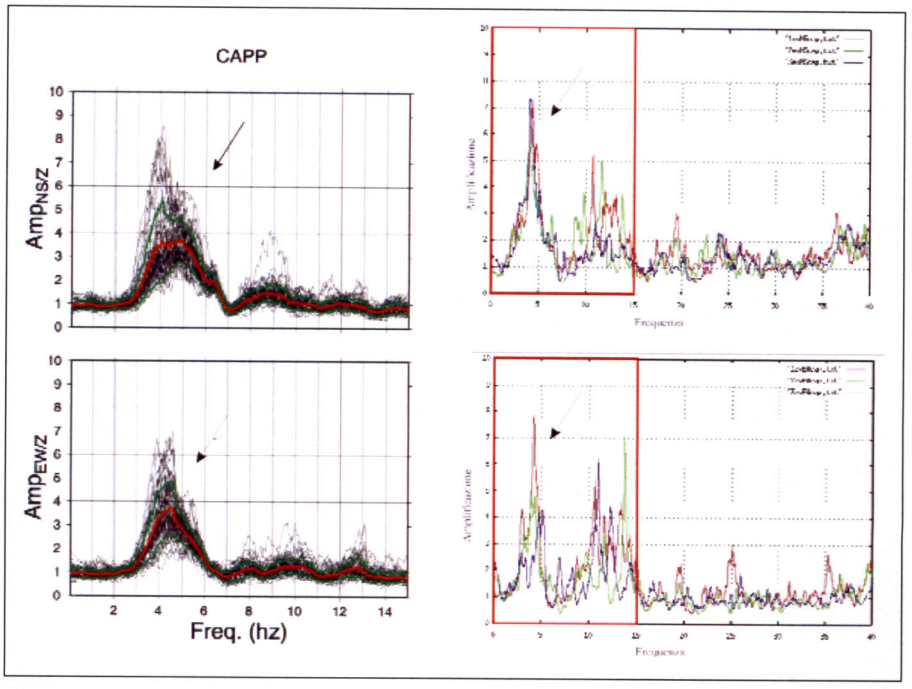


Fig. 7 - confronto fra il valore di frequenza e di amplificazione sismica locale ottenuti per uno stesso punto misura considerando il metodo Nakamura (a sinistra) e il rapporto H/V per tre terremoti.

Società Italiana di Geologia Ambientale
Casella Postale 15244 (00143) ROMA
Tel. 06.5943344; fax 06.8845960
E-mail: info@sigea.org
http://www.sigea.org

La SIGEA è un'associazione culturale, senza fini di lucro, per la promozione del ruolo delle Scienze della Terra nella protezione della salute e nella sicurezza dell'uomo, nella salvaguardia della qualità dell'ambiente naturale ed antropizzato e nell'utilizzazione più responsabile del territorio e delle sue risorse.
Tale associazione è aperta non solo ai geologi, bensì a tutte le persone che hanno interesse alla tutela dell'ambiente. La SIGEA è stata costituita nel maggio 1992 a Roma da 19 Soci fondatori (geologi, ingegneri, architetti, geografi) esperti o cultori di Geologia Ambientale.
L'associazione ha lo scopo di favorire il progresso, la valorizzazione e la diffusione della Geologia Ambientale e di stimolare il coordinamento e la collaborazione interdisciplinare nelle attività conoscitive ed applicative rivolte alla tutela ambientale. Pertanto essa opera nei settori dell'educazione e divulgazione, della formazione professionale, della ricerca applicata e in altri settori correlati con le suddette finalità, organizzando corsi, convegni, escursioni di studio, interventi sui mezzi di comunicazione di massa.
Possono far parte della SIGEA, in qualità di soci, persone fisiche o persone giuridiche.
I soci appartengono a vari Enti, come Servizi Tecnici Nazionali, ENEA, CNR, Università, Regioni, Province, Comuni, Ministeri, Presidi Multizonali di Prevenzione, ANPA, ANAS, Autorità di Bacino, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INAIL, ISPESL, Società private o sono liberi professionisti.
La SIGEA, col suo gruppo di lavoro sui Geositi ed aree protette, ha organizzato il 2° Symposium internazionale sui geotopi tenutosi a Roma nel maggio 1996 e altri Convegni sul ruolo della geologia nella protezione della natura; inoltre collabora con l'associazione internazionale ProGEO per svolgere studi, censimenti e valorizzazione dei geotopi. Col gruppo di lavoro sulla Divulgazione e formazione organizza corsi di aggiornamento professionale o di divulgazione su varie tematiche geoambientali, quali smaltimento dei rifiuti, bonifica siti industriali dismessi, studi d'impatto ambientale, rischi geologici, geositi, ecc.; inoltre rende disponibili per i soci audiovisivi, pubblicazioni, dispense dei corsi SIGEA.
L'Associazione interviene sui mezzi di comunicazione di massa facendo sentire il suo parere sui problemi attuali che coinvolgono l'ambiente geologico (dissesto idrogeologico e difesa del suolo, smaltimento rifiuti, pianificazione territoriale, tutela risorse geologiche, ecc.). La SIGEA pubblica il periodico trimestrale "Geologia dell'Ambiente", in cui si trattano argomenti tecnico-scientifici, che viene inviato a tutti i soci e a numerosi enti pubblici e privati.

Consiglio Direttivo: *Francesco Biondi*, geopedologo (Istituto Sperimentale per la Nutrizione delle Piante, Roma); *Giancarlo Bortolami*, docente universitario (Università di Torino); *Gerardo Brancucci*, docente universitario (Università di Genova); *Aldo Brondi*, geologo (Roma); *Walter Catalani*, geologo (Rete Ferroviaria Italiana SpA, Roma), Tesoriere; *Luigi De Filippis*, geologo, docente Scuola Media Superiore, (Tivoli-RM), Segretario; *Antonio Fiore*, geologo libero professionista (Bari); *Giuseppe Gisotti*, geologo e forestale, Presidente; *Giancarlo Guado*, idrogeologo, libero professionista (Salice Terme - PV); *Gioacchino Lena*, geologo, ricercatore CNR-IRPI (Cerisano - CS); *Raniero Massoli Novelli*, docente universitario (Roma), Vice Presidente; *Giulio Pazzagli*, geologo, libero professionista (Roma); *Ferdinando Petrone*, geologo, membro del Consiglio Nazionale dei Geologi (Roma); *Aleandro Tinelli*, ingegnere, naturalista, (Presidenza della Repubblica, Tenuta di Castelporziano, Roma); *Francesco Zarlenga*, geologo (ENEA, Roma).
Revisori dei Conti: *Filippo Alessi*, dottore in legge (Ministero Affari Esteri - Dir. Gen. Cooperazione allo Sviluppo, Roma); *Marzia Petralia*, geologo, libero professionista (Riposto-CT)