

CARATTERIZZAZIONE SISMICA A GRANDE SCALA DELLA PROVINCIA DI FOGGIA TRAMITE L'ANALISI DELLE COMPONENTI PRINCIPALI (PCA) DI MISURE HVSR

E. Paolucci¹, D. Albarello¹, S. D'Amato¹, G.P. Cavinato², G. Cavuoto³, M. Coltella², G. Cosentino², M. Simionato²

¹ Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Siena, Italy

² CNR-IGAG, Montelibretti (Roma), Italy

³ CNR-IAMC, Napoli, Italy

Introduzione. La rapidità e il basso costo delle misure a stazione singola del campo di vibrazioni ambientali hanno reso questa prospezione un elemento fondamentale per gli studi di Microzonazione Sismica. Tali acquisizioni, analizzate con la tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio; Nakamura, 1989), permettono di caratterizzare in maniera estensiva l'area di studio identificando le zone potenzialmente soggette a fenomeni di amplificazione del moto sismico in occasione di futuri terremoti. In particolare, le misure HVSR possono rilevare l'eventuale presenza di marcati contrasti di impedenza sismica nel sottosuolo, fornendo informazioni di massima circa la loro profondità e la loro rilevanza (Albarello *et al.*, 2011). L'applicazione estensiva di queste misure ha permesso di indagare anche vaste aree, dell'ordine di 2000-3000 km² (Paolucci *et al.*, 2015): in questo contesto, procedure di carattere automatico finalizzate al raggruppamento di curve HVSR simili possono fornire un contributo fondamentale nell'identificare le eterogeneità geologiche (e quindi le caratteristiche sismiche) a larga scala, soprattutto con un dataset costituito da centinaia di misure.

Lo scopo di questo lavoro è quello di effettuare una caratterizzazione sismica dell'intero territorio della Provincia di Foggia individuando le eterogeneità geologiche a larga scala utilizzando l'analisi delle componenti principali (PCA) su dati HVSR. In particolare, il dataset utilizzato è composto da circa 400 curve HVSR realizzate durante il progetto di Microzonazione Sismica di livello I della Provincia di Foggia (Cavinato *et al.*, 2011). Il vantaggio principale della PCA è quello di permettere il raggruppamento di zone caratterizzate da curve HVSR simili, identificando contestualmente gli andamenti HVSR caratteristici.

Descrizione della metodologia. L'Analisi delle Componenti Principali (PCA) è una tecnica usata nel contesto della statistica multivariata ed è adottata in diversi campi. La sua applicazione su diversi dataset di curve HVSR è descritta in maniera dettagliata da Paolucci *et al.*, 2014. In particolare, l'idea che sta alla base dell'applicazione della PCA in questo contesto è quella che ciascun andamento HVSR sperimentale presente nell'area studio può essere interpretato come una combinazione lineare di un insieme di andamenti caratteristici (detti Componenti Principali o PC), non correlati tra di loro, che corrispondono ad una specifica configurazione di sottosuolo presente nell'area di studio. Assumendo che i valori HVSR corrispondono a F frequenze che sono state misurate a S siti e considerando la matrice centrata delle osservazioni $[O']$ di dimensione $S \times F$, tale matrice sarà definita come

$$[O'] = [E][U], \tag{1}$$

dove $[E]$ è la matrice degli autovettori della matrice di varianza/covarianza delle osservazioni e $[U]$ è la matrice definita dalle singole PC. Quindi, la misura HVSR centrata all' s -esimo sito $\{O'\}_s$ può essere espressa come combinazione lineare degli S andamenti $\{U\}_j$ (ovvero le PC):

$$\{O'\}_s = \sum_{j=1}^S E_{sj} \{U\}_j, \tag{2}$$

dove E_{sj} sono gli elementi della matrice $[E]$. In questo contesto, le S componenti principali definiscono un insieme di andamenti ciascuno rappresentativo di una frazione della variabilità complessiva del dataset originale. In particolare, ogni PC, visualizzata rispetto alla frequenza,

ricorda l'andamento di una curva HVSR sperimentale, ma senza nessuna corrispondenza quantitativa tra le rispettive ampiezze, in quanto ciascuna PC è a sua volta una combinazione lineare di ciascun andamento sperimentale. È importante notare che il segno di E_{sj} determina la "polarità" della PC al sito corrispondente, ovvero i suoi massimi e minimi si invertono quando il segno di E_{sj} cambia: da ciò si deduce che ciascuna PC potrebbe rappresentare due differenti configurazioni di sottosuolo. Questi due pattern opposti saranno indicati come $\{U+\}_j$ e $\{U-\}_j$. Di particolare importanza nella procedura è la determinazione del parametro W_{sj} , definito come

$$W_{sj} = D_j |E_{sj}|, \quad (3)$$

dove D_j è l'intervallo di massima variazione di ampiezza relativo alla j -esima PC. Il parametro W_{sj} esprime l'importanza relativa della j -esima PC all' s -esimo sito: la PC associata al valore massimo di W_{sj} , chiamato d'ora in avanti W_0 , è definita come PC dominante per l' s -esima misura HVSR sperimentale. Una volta stimata tale PC per ciascuna delle curve sperimentali, le misure con la stessa PC dominante vengono inserite nella stessa classe di similarità. Dopodiché, per discriminare le ampiezze dei massimi delle curve sperimentali, vengono introdotte delle sottoclassificazioni sulla base del valore di W_{sj} (maggiore è W_{sj} , maggiore sarà l'ampiezza dei massimi). Infine, tra i risultanti valori di W_{sj} , viene determinato empiricamente (attraverso un numero di tentativi preliminari) un valore soglia W_0 : le misure con $W_{sj} < W_0$ sono identificate come misure piatte che testimoniano l'assenza di fenomeni significativi di risonanza.

Descrizione dei risultati ottenuti. Il dataset preso in considerazione è costituito da 403 misure HVSR realizzate nell'ambito del progetto di Microzonazione di livello I della Provincia di Foggia (Cavinato *et al.*, 2011). In particolare, sono stati indagati 61 dei Comuni facenti parte della Provincia, effettuando in media 10 misure per Comune. Il campo di vibrazioni ambientali è stato acquisito utilizzando un tromografo digitale tridirezionale del tipo TROMINO™, prodotto da MoHo s.r.l. e dotato di un sistema di acquisizione a 24 bit equivalenti. Le misure sono state eseguite principalmente su terreno libero con frequenza d'acquisizione di 128 Hz e con durata pari a 20 minuti; tutte le acquisizioni sono state analizzate secondo il protocollo formulato da Picozzi *et al.*, 2005.

Dopo aver realizzato la PCA, è stato possibile notare che la Componente Principale più importante (la prima PC) spiega circa il 40% della varianza complessiva del dataset: ciò suggerisce una configurazione di sottosuolo piuttosto eterogenea per l'area indagata. Questo risulta del tutto plausibile, visto che il territorio della Provincia di Foggia (circa 7000 Km²) presenta domini geologici del tutto differenti tra di loro (Subappennino Dauno, Tavoliere e Gargano). Per quanto riguarda le PC dominanti almeno un sito, la più rappresentativa è la PC -1, la quale è caratterizzata da un picco principale a circa 0.3 Hz: questo andamento domina in 105 dei 403 siti considerati. La PC+1, che domina in 101 siti, è invece caratterizzata da un picco principale a circa 6 Hz. La seconda PC, che spiega circa il 25% dell'intera varianza, comprende anch'essa due pattern: la PC+2, caratterizzata da un massimo a circa 2 Hz, e la PC-2, caratterizzata da due massimi a 0.3 Hz e circa 8 Hz. Per la terza PC (rappresentativa per circa il 10% della varianza complessiva), è presente un pattern (PC+3) costituito da un picco a circa 1.5 Hz e da uno a 10 Hz, ed un pattern (PC-3) costituito da un massimo a 0.3 Hz e da uno a 4 Hz. Le restanti PC dominanti, che spiegano insieme circa il 25% della varianza complessiva dell'intero dataset, sono quasi tutte caratterizzate da due massimi. Tra queste, di particolare rilevanza sono le PC dominanti PC-4 e PC-6: la prima presenta due picchi, uno a circa 1 Hz e l'altro a circa 6 Hz; la seconda è caratterizzata da un picco in bassa frequenza a 0.4 Hz.

Tutte le curve HVSR sperimentali (e quindi tutti i siti indagati) sono stati raggruppati in funzione della PC dominante e, all'interno di ogni gruppo, le ampiezze dei massimi sono stati valutati considerando il corrispettivo valore del parametro W_{sj} , in modo da mettere in evidenza i siti caratterizzati da più significativi effetti di risonanza.

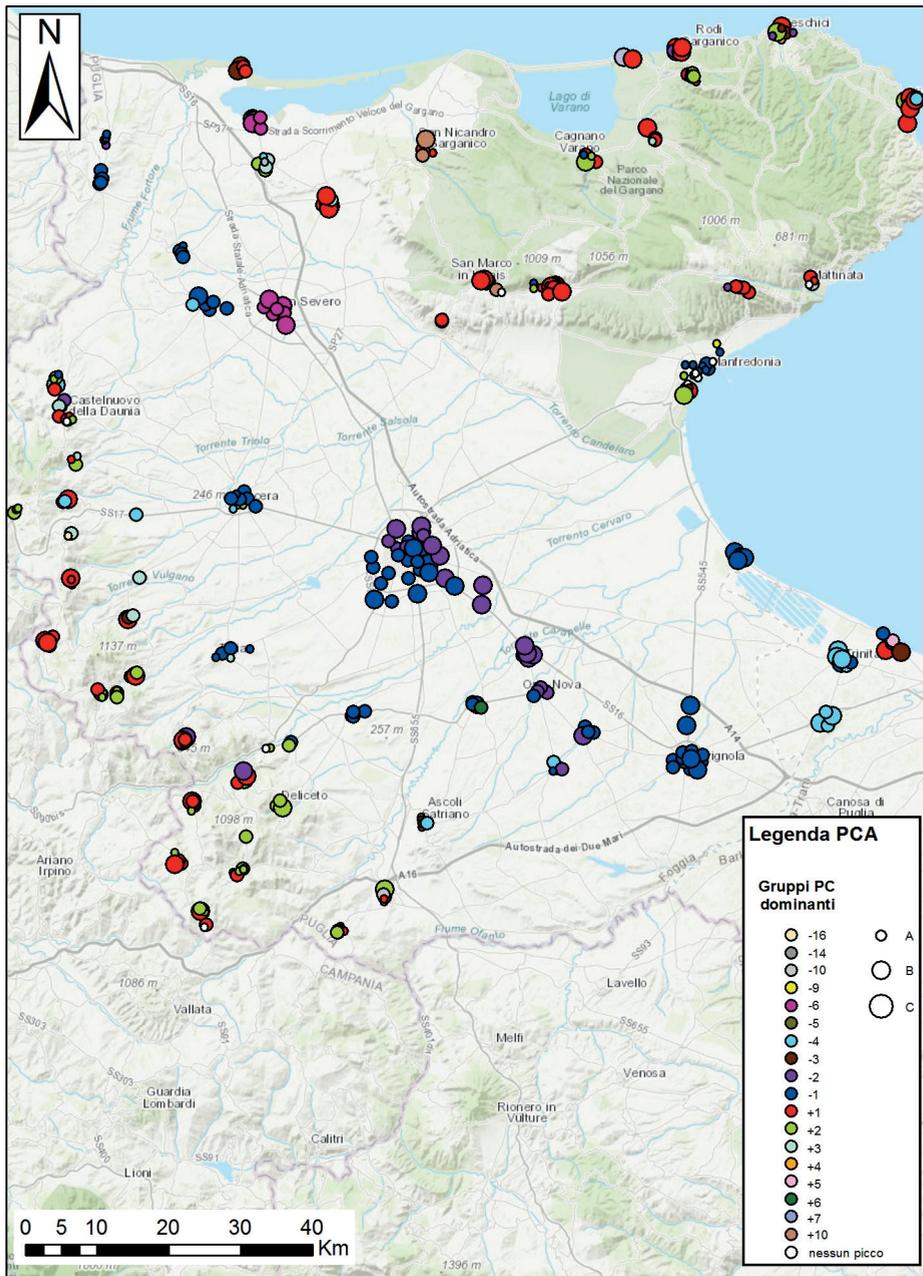


Fig. 1 - I punti sulla mappa rappresentano le ubicazioni delle misure HVSR realizzate nei Comuni appartenenti alla Provincia di Foggia. La distribuzione spaziale dei gruppi definiti dalle PC dominanti e i loro differenti livelli di ampiezza (A, B e C) sono indicati rispettivamente dal colore e dalla grandezza dei punti.

La mappa in Fig. 1 mostra la distribuzione spaziale dei gruppi individuati: i colori indicano le PC dominanti (i colori più “freddi” indicano gli andamenti con massimi a frequenze minori di 1 Hz, mentre quelli più “caldi” gli andamenti con massimi a frequenze maggiori di 1 Hz), mentre la grandezza dei punti è riferita alle 3 sottoclassi di ampiezza individuate sulla base dei valori di . Osservando la mappa, risulta evidente che la zona del Subappennino Dauno (zona W-SW dell’area indagata) e la zona del Gargano (zona NE dell’area indagata) esprimono una

marcata presenza delle PC dominanti (soprattutto della PC+1) caratterizzate da massimi a frequenze maggiori di 1 Hz, mostrando una significativa eterogeneità in termini di ampiezza. Tale caratteristica indica la presenza di contrasti di impedenza relativamente superficiali in questi due domini geologici, mentre le marcate differenze in ampiezza sono presumibilmente collegate alle forti eterogeneità geologiche a scala locale.

Per quanto riguarda la zona del Tavoliere (parte centrale dell'area indagata), risulta evidente la marcata presenza di PC dominanti caratterizzate da massimi a frequenze minori di 1 Hz, in particolar modo comprese tra 0.3 Hz (PC-1 e PC-2) e 0.4 Hz (PC-6). Questa caratteristica indica la presenza, in questo dominio geologico, di contrasti di impedenza molto profondi, dell'ordine delle centinaia di metri di profondità, del tutto conformi con la configurazione geologica del dominio in questione. Per quanto riguarda le ampiezze, è possibile notare che tali contrasti di impedenza sono più elevati nelle aree di San Severo, Foggia e Cerignola, dove presumibilmente il substrato calcareo risale a profondità meno elevate. Ampiezze minori ma sempre alle stesse frequenze sono rilevabili nelle zone tra Foggia e Cerignola, Troia, Lucera e Torremaggiore: è ipotizzabile che in queste aree il bacino si approfondisca e presumibilmente che le interfacce risonanti corrispondano a corpi geologici posti all'interno delle coperture che creano contrasti di impedenza meno significativi.

Per quanto riguarda le misure piatte, è possibile notare che i siti caratterizzati da valori del parametro inferiori al valore di soglia W_0 (scelto in questo caso uguale a 0.4), sono prevalentemente concentrati nella zona del Gargano, in particolare nelle località di Manfredonia e Mattinata.

Conclusioni. L'applicazione della PCA sul dataset costituito da circa 400 misure HVSR realizzate nell'intera Provincia di Foggia ha dimostrato la capacità di questa tecnica nell'individuare delle eterogeneità geologiche a larga scala, caratterizzate da diversi comportamenti in termini di amplificazione sismica. Tali eterogeneità sono compatibili con il modello geologico regionale dell'area indagata. Questa tecnica ha inoltre permesso di identificare in maniera rapida e speditiva gli andamenti HVSR più rappresentativi e di raggruppare le curve simili senza aver necessità di informazioni a priori di qualsiasi tipo.

Bibliografia

- Albarello D., Cesi C., Eulilli V., Guerrini F., Lunedei E., Paolucci E., Pileggi D., Puzzilli L.M.; 2011: *The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzonation: an example from the area damaged by the 26th April 2009 L'Aquila (Italy) earthquake*. Boll. Geofis. Teor. Appl., 52(3), 513-538, doi:10.4430/bgta0013.
- Cavinato G.P., Cavuoto G., Ciotoli G., Coltella M., Cosentino G., Paolucci E., Peronace E., Trulli I.; 2011: *La Microzonazione Sismica di Livello 1 dei Comuni della Provincia di Foggia: metodologie di studio e primi risultati*. Atti del convegno dell'Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica (ANIDIS), 2011.
- Nakamura Y.; 1989: *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. Q. Rep. Railw. Tech. Res. Inst., 30, 25-33.
- Paolucci E., Albarello D., D'Amico S., Lunedei E., Martelli L., Mucciarelli M., Pileggi D.; 2015: *A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy*. Bull. Earthquake Eng., 13(11): 3187-3206, DOI: 10.1007/s10518-015-9767-5.
- Paolucci E., Lunedei E., Albarello D.; 2017: *Application of the principal component analysis (PCA) to HVSR data aimed at the seismic characterization of earthquake prone areas*. Geophysical Journal International, 211: 650-662, doi: 10.1093/gji/ggx325.
- Picozzi M., Parolai S., Albarello D.; 2005: *Statistical analysis of Horizontal to Vertical Spectral Ratios (HVSR)*. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 95, NO. 5, PP. 1779-1786, 2005, DOI: 10.1785/0120040152.