

## LOCALIZZAZIONE IPOCENTRALE E CLUSTERING DEGLI EVENTI SISMICI REGISTRATI DURANTE LA CAMPAGNA OBS CONDOTTA NEL TIRRENO MERIDIONALE

A. D'Alessandro<sup>1</sup>, G. Mangano<sup>1</sup>, G. D'Anna<sup>1</sup>, D. Luzio<sup>2</sup>, N. Agnello<sup>1</sup>, R. D'Anna<sup>1</sup>, G. Passafiume<sup>1</sup>, S. Speciale<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti, Roma

<sup>2</sup> Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienza della Terra e del Mare, Palermo

Il Tirreno meridionale è caratterizzato da una intensa attività sismica, per lo più crostale, che ha spesso generato forti terremoti e importanti sequenze sismiche come nel settembre 2002 (Giunta et al., 2004). Nel 2009 è stata condotta una campagna di monitoraggio sismico sottomarino della durata di 8 mesi, che ha portato alla deposizione di un OBS/H nell'area epicentrale dell'evento principale della sequenza sismica di Palermo 2002 (D'Anna et al., 2009; Mangano et al., 2011). L'analisi dei segnali sismici e di pressione registrati dalla stazione sottomarina ha permesso di rivelare una intensa attività sismica locale, di piccola magnitudo, non localizzata dalla RSN-INGV (D'Alessandro et al., 2011). Tale sismicità è stata studiata tramite un algoritmo di clusterizzazione che sfrutta la similitudine tra le forme d'onda generate da eventi distinti ed è stata localizzata tramite una tecnica di localizzazione a stazione singola, basata sull'analisi di polarizzazione dei segnali 3C e la stima dell'intervallo temporale  $T_S-T_P$  (D'Alessandro et al., 2009; 2010).

Il massimo della funzione di cross-covarianza normalizzata è stato utilizzato come misura del livello di similitudine tra le forme d'onda e nella costruzione della Matrice di Similarità (MS, Fig. 1). Per identificare la presenza di multipletti sismici è stata usata una tecnica di clusterizzazione basata su Algoritmi Gerarchici (AG). Questi creano una decomposizione gerarchica dell'insieme complessivo di oggetti e i vari sottoinsiemi determinati risultano annidati e organizzati all'interno di alberi gerarchici. Le tecniche di clusterizzazione gerarchica hanno il vantaggio di non esigere una preventiva determinazione del numero di cluster da ricostruire. Tra le possibili varianti degli AG, è stato utilizzato il Metodo Agglomerativo (MA). In questo metodo, gli elementi iniziano ad aggregarsi, due alla volta, in piccoli gruppi, fino ad ottenere un unico gruppo. L'algoritmo necessita, come unico dato di input la MS e di una Strategia di Fusione (SF). La SF utilizzata nel presente lavoro è quella del Legame Singolo (LS). In questa tecnica i gruppi sono fusi definendo la distanza tra due gruppi come la distanza più piccola esistente tra gli elementi appartenenti ad un gruppo e quelli appartenenti all'altro.

I risultati ottenuti sono stati sintetizzati nel grafico ad albero o dendrogramma di Fig. 1. Il dendrogramma è una rappresentazione grafica che visualizza, secondo ordinate crescenti, il livello di aggregazione delle unità, che in questa applicazione coincidono con i multipletti, e permette di visualizzare l'intero processo di aggregazione ossia una gerarchia di partizioni. Le singole partizioni sono state ottenute "tagliando" il dendrogramma ad un livello di distanza (distanza=1-similitudine) pari a 0.3. Così facendo sono stati individuati 9 multipletti, e diversi doppietti e triplete (Fig. 1). In aree sismicamente attive, non di rado vengono registrati terremoti caratterizzati da campi d'onda molto simili, che in ognuna delle stazioni sismiche producono segnali molto simili (Geller and Mueller, 1980; Pechmann and Kanamori, 1982; Ito, 1985; Scherbaum and Wendler, 1986; Maurer and Deichmann, 1995). Gruppi di eventi di questo tipo vengono appunto chiamati multipletti sismici. Un alto livello di similitudine tra i segnali è una chiara indicazione che gli eventi sono stati generati in un piccolo volume sismo-genetico e da simili meccanismi sorgente. Gli eventi dei multipletti sono in genere interpretati come un rilascio di stress sullo stesso piano di dislocazione (Geller and Mueller, 1980; Pechmann and Kanamori, 1982; Maurer and Deichmann, 1995). La distanza massima tra gli ipocentri di questi terremoti non può essere maggiore di un quarto della lunghezza d'onda predominante (Geller and Mueller, 1980).

Il multipletto 1 è quello costituito dal numero maggiore di microeventi (Fig. 1). Gli eventi di questo cluster presentano un alto livello di somiglianza; 25 dei 31 microeventi sono caratterizzati da un livello di similitudine maggiore di 0.9. I microsismi di questo cluster presentano tutti una prima fase P con inizio di tipo dilatativo-emergente, una prima fase S molto energetica ed impulsiva ed un tempo  $T_S-T_P$  medio di circa 3.16 s. Arrivi successivi a bassa frequenza sono individuabili dopo 8 s sia sulla componente verticale che sulle orizzontali. Questo cluster mostra un certo grado di

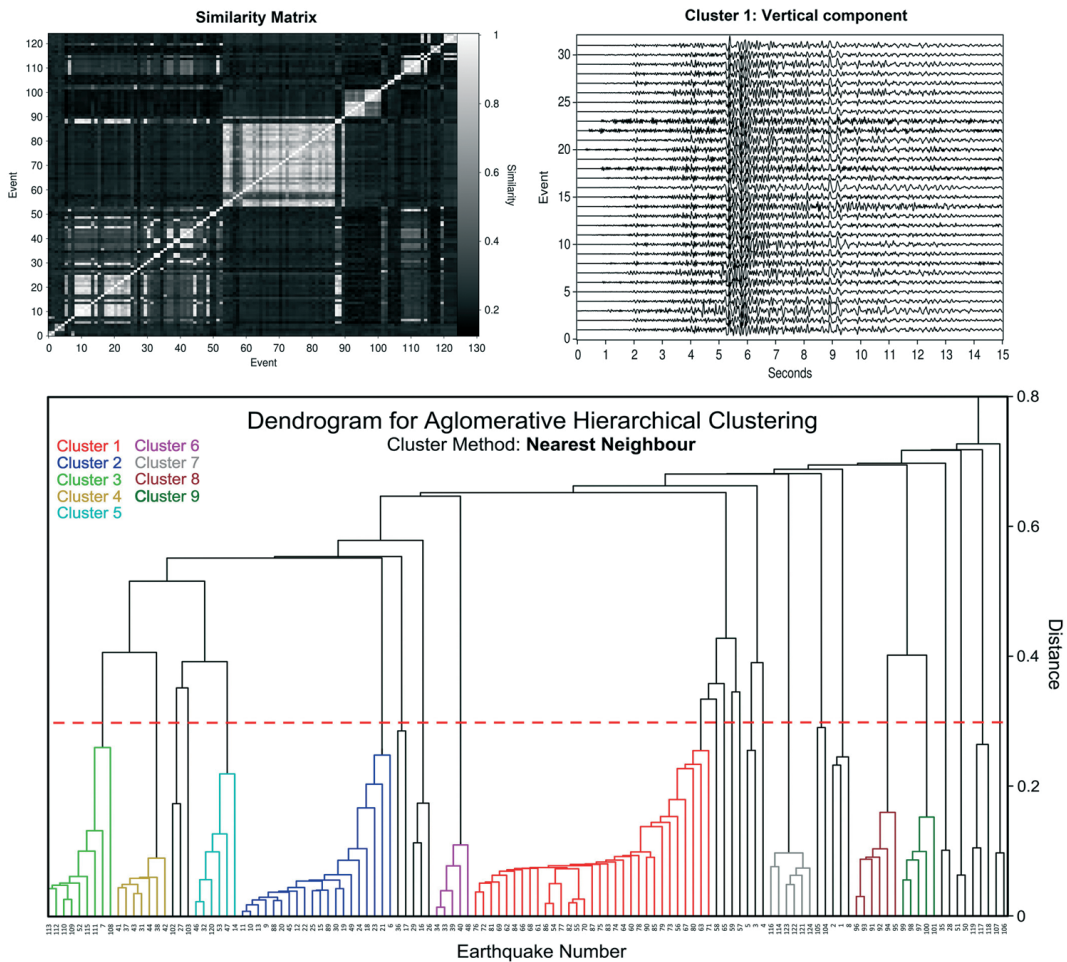


Fig. 1 - Matrice di Similarità e dendrogramma relativi ai 124 microsismi analizzati. A titolo di esempio sono inoltre riportate le forme d'onda relative al cluster 1.

similitudine con alcuni eventi e con un doppietto, non inclusi in esso poichè la soglia di distanza è stata fissata pari a 0.3.

Il multipletto 2 è costituito da 20 microeventi, molti dei quali con un elevatissimo livello di similitudine. Gli eventi di questo insieme presentano tutti un inizio di tipo dilatativo-impulsivo, una netta fase S che precede l'onda d'acqua ed un ritardo  $T_S-T_P$  medio di circa 1.18 s. Anche in questo insieme sono individuabili sulle componenti di velocità degli arrivi a bassa frequenza con un ritardo di 6 s dal primo arrivo, ma non presenta similitudine con alcuno dei restanti cluster.

Il multipletto 3 è costituito da 9 eventi che presentano una prima fase P di tipo dilatativo-impulsivo, seguita da una chiara seconda fase P e da una prima fase S emergente, con un ritardo  $T_S-T_P$  medio di circa 1.15 s. Caratteristiche molto simili al cluster precedente sono individuabili nel multipletto 4, costituito da 7 eventi sismici. Questi presentano infatti anch'essi una prima fase P di tipo dilatativo-impulsivo seguita da una seconda fase P, dopo pochi decimi di secondo, e da una prima fase S emergente, con un tempo  $T_S-T_P$  medio di circa 1.16 s.

Inoltre, anche molti arrivi a bassa frequenza dopo i 6 s appaiono piuttosto simili. L'analisi del

dendrogramma mostra che il cluster 3 e 4 si uniscono ad una distanza di circa 0.4, confermando e quantificando l'elevato livello di similitudine individuato dall'analisi visiva delle forme d'onda.

Il multipletto 5, costituito da 6 microeventi, è ancora caratterizzato da una prima fase P di tipo dilatativo-impulsivo seguita da una chiara seconda fase P e da una prima fase S emergente, con un tempo  $T_S-T_P$  medio di circa 1.13 s. Anche in questo caso, gli eventi sismici mostrano alcuni arrivi a bassa frequenza dopo i 6 s. Questo insieme presenta un elevato grado di similitudine con una tripletta e insieme a questa, presentano una distanza non molto superiore a 0.5 dai multipletti 3 e 4.

Il multipletto 6 è costituito da soli 5 microeventi con un livello di similitudine minimo maggiore di 0.9. Queste tracce mostrano caratteristiche morfologiche dei primi arrivi simili a quelle dei multipletti precedenti e un tempo medio  $T_S-T_P$  pari 1.16 s, pertanto simile a quello del multipletto 4. Nonostante ciò, dall'analisi del dendrogramma si osserva come questo multipletto appare isolato dagli altri, unendosi ad essi solo a distanza di circa 0.7.

Il multipletto 7 è costituito da 6 microeventi con un livello medio di similitudine molto alto, pari a circa 0.95. Gli eventi di questo insieme presentano una fase P con inizio impulsivo di tipo dilatativo, seguita da una chiara fase S anch'essa impulsiva e un tempo medio  $T_S-T_P$  di circa 4.75 s. Questo multipletto non presenta similitudine con i restanti.

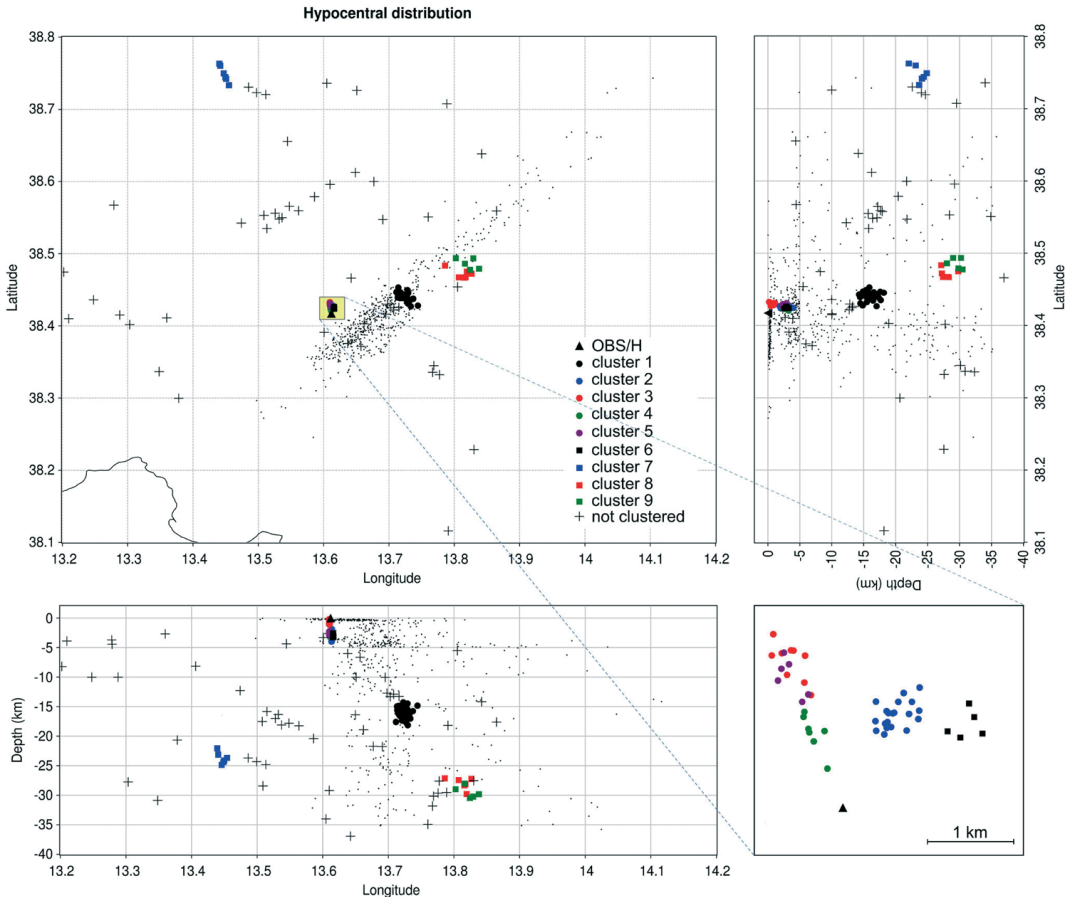


Fig. 2 - Mappa della distribuzione degli ipocentri dei 159 microeventi registrati dalla stazione OBS/H. I puntini neri indicano gli ipocentri degli eventi del cluster di Palermo del 2002.

Infine i multipletti 8 e 9 costituiti rispettivamente da 6 e 5 microeventi, presentano entrambi prime fasi P con inizio di tipo dilatativo-emergente, seguito da una fase S anch'essa emergente e da un tempo medio  $T_S-T_P$  di circa 4.78 s per il multipletto 8 e di circa 4.99 s per il 9. Questi due insiemi presentano tra loro un alto livello di similitudine; infatti l'analisi del dendrogramma mostra che i due gruppi si uniscono ad una distanza di poco inferiore a 0.4.

Infine l'analisi del dendrogramma permette di individuare, oltre al doppietto già associato al multipletto 1 e alla tripletta associata al multipletto 3, la presenza di altre 2 triplette e di 3 doppietti che non presentano alcuna similitudine con i gli altri multipletti individuati.

Al fine di localizzare la microsismicità registrata dalla stazione OBS/H, è stata implementata una tecnica di localizzazione con stazione singola interamente basata sull'analisi di polarizzazione del segnale 3C e dell'intervallo temporale  $T_S-T_P$ . La Fig. 2 mostra la distribuzione degli ipocentri dei 159 microeventi registrati dalla stazione OBS/H mentre la Fig. 3 ne mostra la distribuzione temporale e della magnitudo. Tutti i multipletti risultano generati da eventi con ipocentri molto vicini tra loro (Fig. 2). Tuttavia non tutti i cluster individuati risultano clusterizzati nel dominio tempo-magnitudo (Fig. 3). Tale diverso rate di rilascio sismico può essere giustificato da differenti modelli di processi evolutivi della sorgente sismica e dalle diverse proprietà meccaniche del mezzo fratturato. Si può inoltre osservare come alcuni multipletti presentino nuvole di ipocentri tra di loro sovrapposte. Tali gruppi, non distinguibili se non grazie ad una opportuna tecnica di clusterizzazione, presentano differenze nelle forme d'onda che devono essere attribuite a differenze nei meccanismi focali che le hanno generate. Si può ipotizzare che la sismicità poco profonda generata dallo scorrimento di differenti piani di faglia appartenenti ad un unico volume sismogenetico complesso, riconoscibile nei multipletti 2, 4, 5 e 6, abbia innescato in ordine temporale due ben distinte sequenze sismiche a profondità di circa 17 km (multipletto 1) e di circa 27 km (multipletto 8 e 9).

Alcune considerazioni possono inoltre essere fatte sulla base della frequenza media di accadimento degli eventi all'interno di ogni multipletto. Infatti, nell'ipotesi che ogni terremoto all'interno di un cluster, rappresenti la rottura ripetuta di un'area di faglia, allora l'intervallo temporale tra un

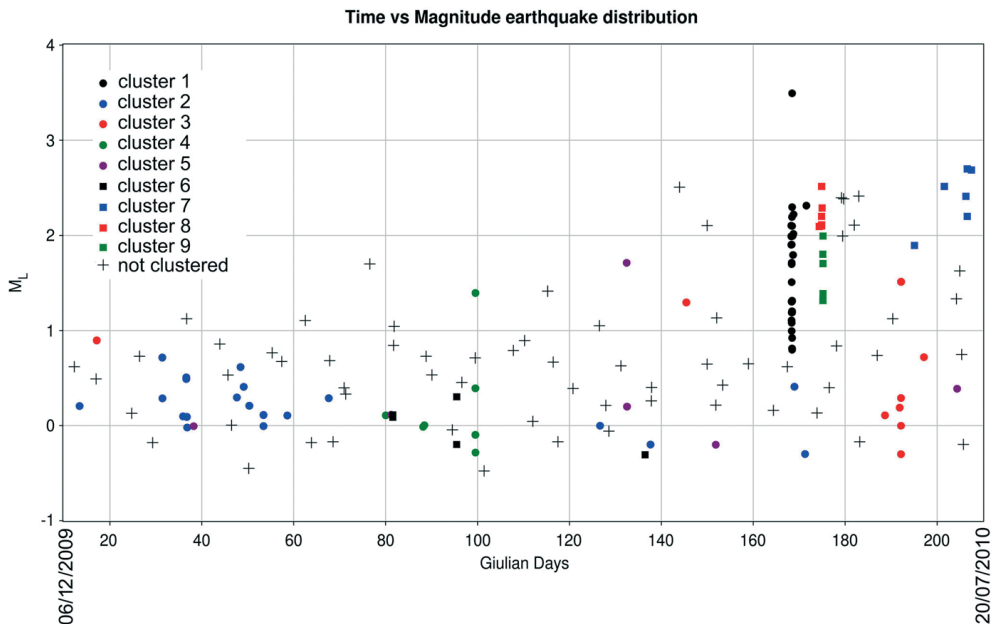


Fig. 3 - Distribuzione temporale e della magnitudo dei 159 microeventi registrati dalla stazione OBS/H.

terremoto e il successivo, ovvero l'intervallo di ricorrenza, risulta inversamente proporzionale alla frazione di carico tettonico medio che agisce sulla faglia.

È comunemente accettato che il trasferimento dello sforzo cosismico prodotto da ciascuna dislocazione sia il principale responsabile dell'interazione fra faglie in un range di scale molto ampio. Questo fenomeno sta alla base della interazione fra le faglie del volume sorgente dei clusters sismici e fra diversi segmenti della stessa faglia. Però è ormai noto che esso non è sufficiente a giustificare l'innescò di altri eventi sismici con gli intertempi comunemente osservati e modellati con leggi empiriche come quella di Omori.

Recentemente si è osservato che serie di eventi con bassa energia, elevata frequenza di accadimento e contenenti spesso multipletti sono la tipica sismicità prodotta dall'iniezione di fluidi in rocce granitiche (Baisch et al., 2008). Il meccanismo di triggering in queste condizioni è ormai largamente accettato. Sembra probabile che, in situazioni molto comuni, il campo di sforzi cosismico causi un flusso dei fluidi di poro e che tale flusso, dipendente dal gradiente di pressione e dalla permeabilità del mezzo, produca con tempi caratteristici compatibili con le osservazioni sperimentali, una variazione della pressione di poro in grado di determinare una diminuzione dell'attrito sulla faglia stessa e su quelle vicine, tale da innescare successivi scorrimenti.

Gli eventi sismici locali registrati dall'OBS/H sembrano avere, tranne poche eccezioni, le caratteristiche di una sismicità generata in un volume caratterizzato da un'elevata complessità del pattern di fratturazione, e da un ruolo importante nella dinamica dell'intero sistema di fluidi che, data l'elevata profondità di alcuni multipletti, potrebbero essere di provenienza mantellica.

#### Bibliografia

- Baisch, S., Ceranna, L., and Harjes, H.P. (2008). Earthquake Cluster: What Can We Learn from Waveform Similarity? *Bull. Seismol. Soc. Am.* 98, no. 6, 2806-2814.
- D'Alessandro, A., D'Anna G., Luzio D., Mangano G., (2009). The INGV's new OBS/H: analysis of the signals recorded at the Marsili submarine volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 183, 17-29.
- D'Alessandro, A., Luzio, D., D'Anna, G., Mangano, G., Panepinto, S., (2010). Single station location of small-magnitude seismic events recorded by OBS in the Ionian Sea. *Geophysical Research Abstracts*, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 02-07 May 2010, vol. 12<sup>o</sup>, EGU2010-8840.
- D'Alessandro, A., Luzio, D., D'Anna, G., Mangano, G., (2011). Seismic Network Evaluation through Simulation: an application to the Italian National Seismic Network, *Bull. Of Seism. Soc. Of Am*, 101, 3.
- D'Anna, G., Mangano, G., D'Alessandro, A., D'Anna, R., Passafiume, G., Speciale, S., Amato, A., (2009). Il nuovo OBS/H dell'INGV. *Quaderni di Geofisica*, 65, ISSN 1590-2595.
- Geller, R. J., and C. S. Mueller (1980). Four similar earthquakes in Central California, *Geophys. Res. Lett.* 7, 821-824.
- Frohlich, C., and J. Pulliam (1999). Single-station location of seismic events: A review, and a plea for more research, *Phys. Earth Planet. Int.*, 113, 277-291.
- Giunta, G., Luzio, D., Tondi, E., De Luca, L., Giorgianni, A., D'Anna, G., Renda, P., Cello, G., Nigro, F., e Vitale, M., (2004). The Palermo (Sicily) seismic cluster of September 2002, in the seismotectonic framework of the Tyrrhenian Sea-Sicily border area, *Ann. of Geoph.*, 47, 6, 1755-1770.
- Ito, A. (1985). High resolution relative hypocenters of similar earthquakes by cross-spectral analysis method, *J. Phys. Earth* 33, 279-294.
- Mangano, G., D'Alessandro, A., D'Anna, G., (2011). Long term underwater monitoring of seismic areas: Design of an Ocean Bottom Seismometer with Hydrophone and its performance evaluation, *OCEANS*, 2011 IEEE - Spain, ISBN: 978-1-4577-0086-6, DOI: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003609
- Maurer, H., and N. Deichmann (1995). Microearthquake cluster detection based on waveform similarities with an application to the western Swiss Alps, *Geophys. J. Int.* 123, 588-600.
- Pechmann, J. C., and B. S. Thorbjarnardottir (1990). Waveform analysis of two preshock-mainshock-aftershock sequences in Utah, *Bull. Soc. Seismol. Am.* 80, 519-550.
- Scherbaum, F., and J. Wendler (1986). Cross spectral analysis of Swabian Jura (SW Germany) three-component microearthquake recordings, *J. Geophys.* 60, 157-166.