

Relazione Scientifica del
Programma di Ricerca STM 2014

Tony Alfredo Stabile

Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Titolo del programma

Applicazione di metodologie avanzate per lo studio dei processi di sorgente sismica e di clustering in regioni sismogeniche complesse

Dipartimento di afferenza:

Scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente

Istituto ospitante:

Institut de Physique du Globe de Paris – Équipe de Sismologie, Parigi (Francia)

Durata:

21 giorni, 16/06/2014 – 07/07/2014



INDICE

<u>INDICE</u>	<u>2</u>
<u>INTRODUZIONE</u>	<u>3</u>
<u>1 – AREA DI STUDIO</u>	<u>3</u>
<u>2 – DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SVOLTA</u>	<u>5</u>
<u>3 – CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</u>	<u>10</u>
<u>RINGRAZIAMENTI</u>	<u>11</u>
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>11</u>

Introduzione

L'osservazione e lo studio di faglie attive si sono rivelati fondamentali per comprendere la geometria, le proprietà meccaniche e i processi che avvengono sulle zone di faglia. Studi svolti in diverse aree sismiche del pianeta (Vidale et al., 1994; Nadeau e McEvilly 1999, 2004; King e Cocco, 2001; Waldhauser e Ellsworth, 2002; Hardebeck, 2006; Waldhauser e Schaff, 2008; Stabile et al., 2012; Valoroso et al., 2013) hanno dimostrato che anche l'utilizzo della microsismicità può fornire elementi utili per la comprensione dei sistemi di faglia attivi.

Il programma di ricerca di mobilità breve svolto presso *l'Institut de Physique du Globe de Paris* (IPGP) è stato rivolto all'applicazione di metodologie avanzate per lo studio dei processi di sorgente sismica e di clustering in contesti sismotettonici complessi attraverso l'utilizzo della microsismicità. Tenendo conto del forte interesse della comunità scientifica sul tema della sismicità indotta, le analisi si sono concentrate su un cluster di sismicità indotta da iniezione di fluidi in Val d'Agri (Italia).

L'applicazione sui dati della Val d'Agri dei programmi sviluppati dall'IPGP ha consentito di avviare una collaborazione tra il CNR-IMAA e l'IPGP indirizzata allo sviluppo di codici di calcolo e alla loro applicazione su altri cluster di sismicità sia in Val d'Agri che nel Rift di Corinto. Questo ultimo è un sito di grande importanza per lo studio dei terremoti in Europa in quanto ha generato cinque terremoti di magnitudo superiore a 5.8 negli ultimi 35 anni, frequenti sciami sismici e terremoti storici distruttivi. L'area è monitorata dal Corinth Rift Laboratory di cui l'IPGP è partner.

1 – Area di studio

La Val d'Agri è un bacino intermontano con direzione NO-SE che si è formato durante l'era quaternaria lungo la zona assiale della dorsale appenninica meridionale. Si tratta di una delle zone d'Italia con il più alto potenziale sismogenico, con sistemi di faglie (Figura 1) in grado di generare terremoti di magnitudo 7. Storicamente, tra gli eventi più distruttivi, si ricorda il terremoto del 1857 del Vallo di Diano e della Val D'Agri (Mallet, 1862; Burrato e Valensise, 2008), avente una magnitudo pari a 7 e che provocò frane, numerosi crolli di edifici e circa 11000 vittime.

Nonostante i numerosi studi, ancora oggi è oggetto di dibattito scientifico la posizione della struttura sismogenica del terremoto del 1857. In letteratura vi sono due ipotesi contrastanti. La prima ipotesi (Benedetti et al., 1998; Cello et al., 2003; Galli et al., 2006) sostiene che l'evento sismico del 1857 sia stato generato dall'attivazione del sistema di faglie orientale dell'Agri (Eastern Agri Fault System, EAFS) ed il sistema di faglie sismogenico del Vallo di Diano. La seconda

ipotesi (Pantosti e Valensise, 1988; Burrato e Valensise, 2008) sostiene che l’evento sismico del 1857 sia stato generato dall’attivazione della struttura sismogenica che interessa il bacino del Pergola – Melandro e del sistema di faglie dei Monti della Maddalena (Monti della Maddalena Fault System, MMFS).

Secondo la classificazione sismica nazionale la pericolosità sismica dell’area è molto rilevante, con un’accelerazione massima attesa compresa tra 0.25 e 0.275 g per una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

Il rischio sismico è amplificato dalla presenza di due importanti attività antropiche legate a tecnologie energetiche:

1. lo sfruttamento del più grande giacimento produttivo on-shore di petrolio in Europa occidentale, gestito dalla società Eni S.p.A., e la re-iniezione delle acque di strato nel pozzo Costa Molina 2 (CM2, Figura 1);
2. il lago artificiale del Pertusillo, con una capacità di 155 milioni di metri cubi e uno sbarramento costituito da una diga di 95 m di altezza.

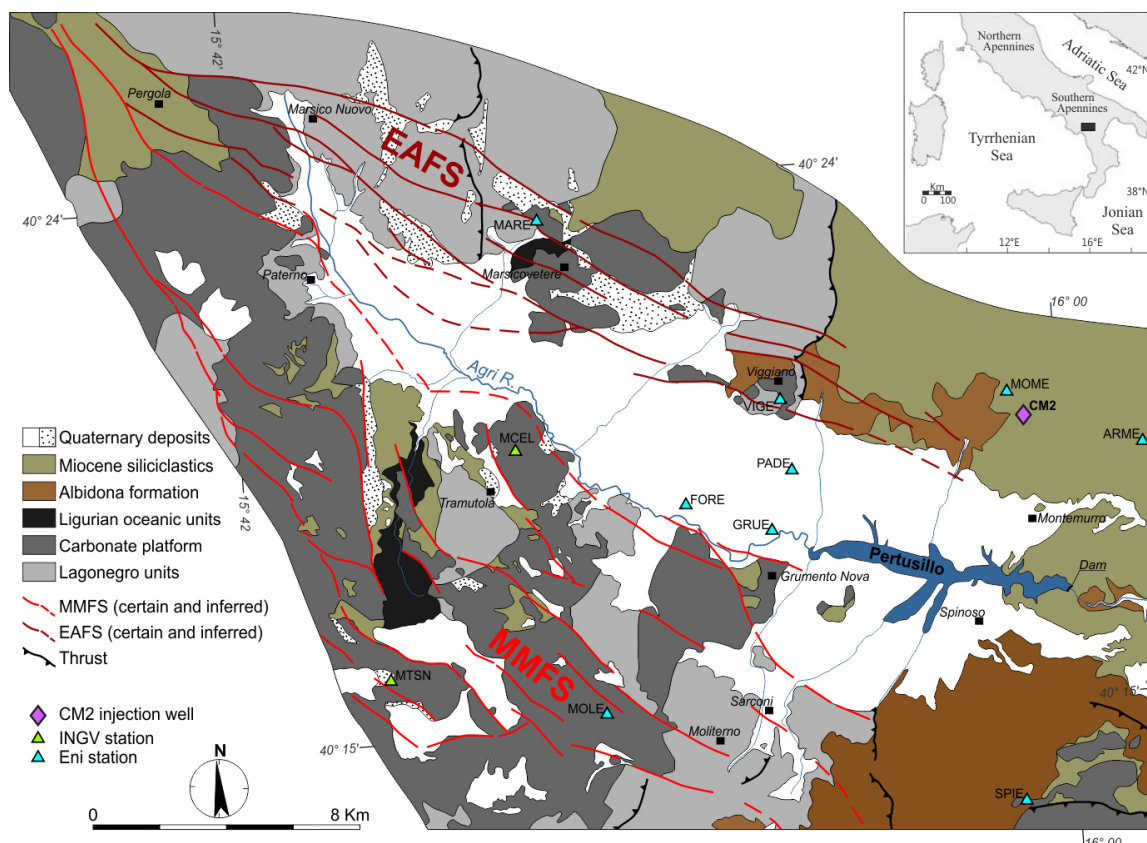


Figura 1: Mappa geologica schematica della Val d’Agri (modificata da Stabile et al., 2014b). In figura sono riportati il sistema di faglie dei Monti della Maddalena (MMFS), il sistema di faglie orientale dell’Agri (EAFS), l’ubicazione del Lago del Pertusillo e quella del pozzo di re-iniezione Costa molina 2 (CM2). I triangoli di colore celeste e verde indicano rispettivamente le stazioni delle reti sismiche ENI e INGV.

2 – Descrizione dell'attività svolta

L'attività svolta in questo progetto è stata rivolta alla selezione ed analisi di specifici cluster individuati in Val d'Agri attraverso metodi avanzati di localizzazione non lineare dei terremoti (NonLinLoc, Lomax et al., 2000). Sono stati rilocalizzati 1786 eventi sismici di piccola magnitudo ($M_l \leq 3.7$) accaduti in Val d'Agri da Luglio 2001 a Dicembre 2012 utilizzando il modello di velocità proposto da Valoroso et al. (2009). In Figura 2 è possibile osservare una sequenza sismica avvenuta tra Settembre ed Ottobre del 2004 presso l'abitato di Marsicovetere e due sciami sismici indotti dalle tecnologie energetiche presenti in Val d'Agri (aree A e B tratteggiate in figura).

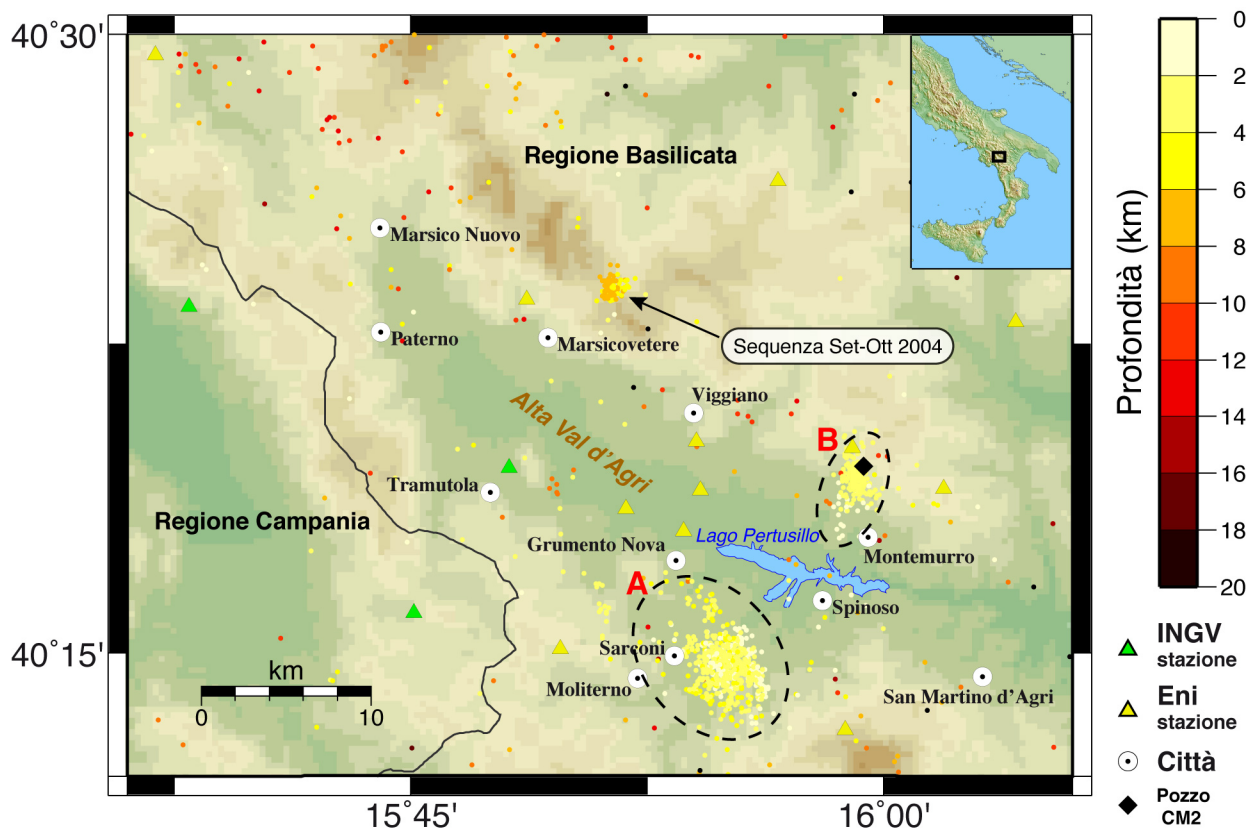


Figura 2: Rilocalizzazione degli eventi sismici accaduti in Val d'Agri da Luglio 2001 a Dicembre 2012. Di particolare interesse sono la sequenza sismica di Marsicovetere del 2004 e i due sciami sismici localizzati intorno al Lago del Pertusillo (aree A e B tratteggiate in figura) e indotti dall'attività antropica.

In particolare, l'area A è interessata da una sismicità continua indotta dal Lago Pertusillo (Stabile et al., 2014a) mentre l'area B è interessata da una sismicità indotta dalla re-iniezione delle acque di strato nel pozzo CM2 provenienti dal processo di estrazione e separazione degli idrocarburi nella concessione Eni in Val d'Agri che si distribuisce su una faglia normale con immersione NE e con strike di 310° (Stabile et al., 2014b).

Analizzando le forme d'onda degli eventi sismici registrati nelle aree A e B, è stato possibile osservare un'elevata similitudine delle tracce sismiche per gli eventi appartenenti al cluster B. Ci si aspetta quindi che questa somiglianza possa migliorare la localizzazione e la stima dei parametri di

sorgente per gli eventi del cluster B, di conseguenza le analisi sono state focalizzate su questo cluster.

Nel periodo compreso tra il 6 giugno 2006 e il 30 giugno 2012 sono stati registrati 206 terremoti di bassa magnitudo ($M_l \leq 2.0$) appartenenti a tale cluster di sismicità. La Figura 3 riporta le sezioni sismiche di tutti gli eventi del cluster registrati alla stazione ARME (installata nel territorio comunale di Armento, PZ) della rete Eni, allineati rispetto al primo arrivo dell'onda sismica P. La stessa figura mostra le registrazioni degli eventi sismici lungo le tre componenti assiali del sensore: SHN (componente Nord), SHE (componente Est), SHZ (componente verticale). In alto ad ogni sezione sismica della Figura 3 è riportata anche la traccia stack, ovvero la traccia ottenuta dalla somma delle registrazioni di tutti gli eventi della sezione sismica. I 206 eventi sismici sono organizzati in ordine temporale, quindi l'evento N. 1 è il primo ad essere stato registrato mentre l'evento N. 206 è l'ultimo.

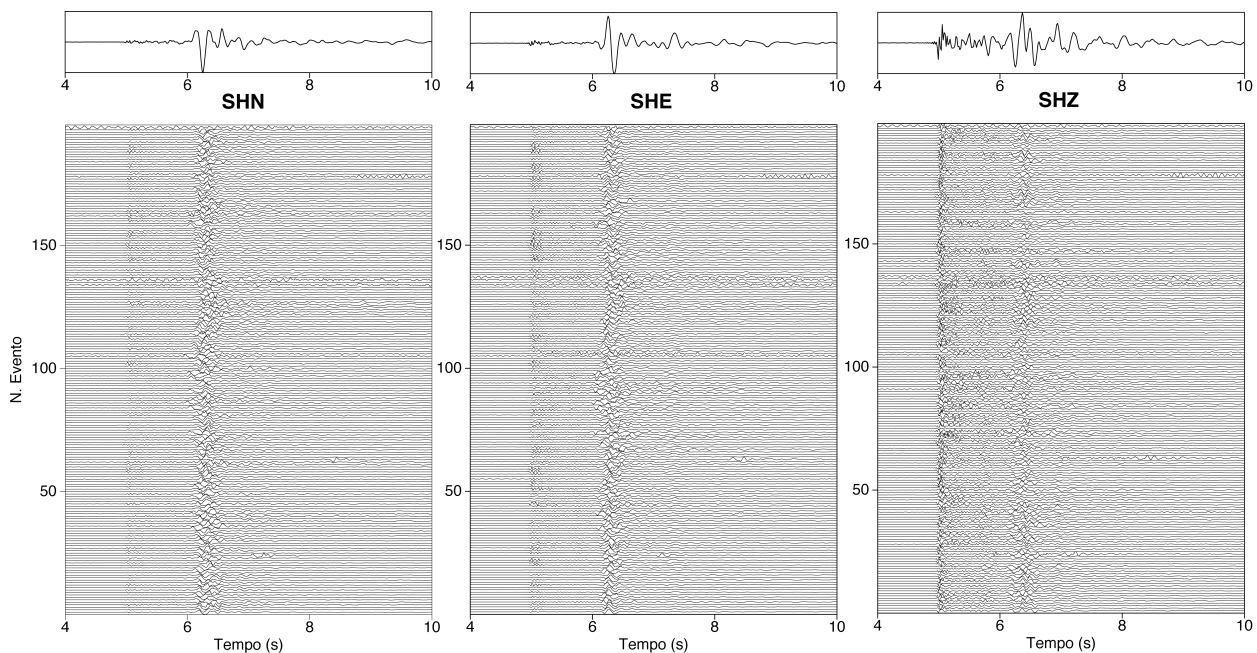


Figura 3: Registrazioni sismiche dei 206 eventi (sezioni sismiche) localizzati nei pressi del pozzo Costa Molina 2, a nord del Lago del Pertusillo, lungo le tre componenti assiali SHN (componente Nord), SHE (componente Est), SHZ (componente verticale) del geofono della stazione sismica ARME installata nel territorio comunale di Armento. In alto ad ogni sezione sismica è riportata anche la corrispondente traccia stack.

Al fine di comprendere il livello di correlazione tra le tracce sismiche a diverse stazioni si è deciso di contare il numero di stazioni per le quali la correlazione delle fasi P e S è superiore ad un certo livello prefissato piuttosto che costruire la matrice di correlazione tra gli eventi ad una fissata stazione. Per ogni coppia di eventi e per ogni livello di correlazione è stata costruita quindi la matrice di correlazione riportante il numero di stazioni con valori di correlazione superiori al livello considerato. La cross-correlazione delle forme d'onda è stata effettuata utilizzando il codice CCHAR (Rowe et al., 2002).

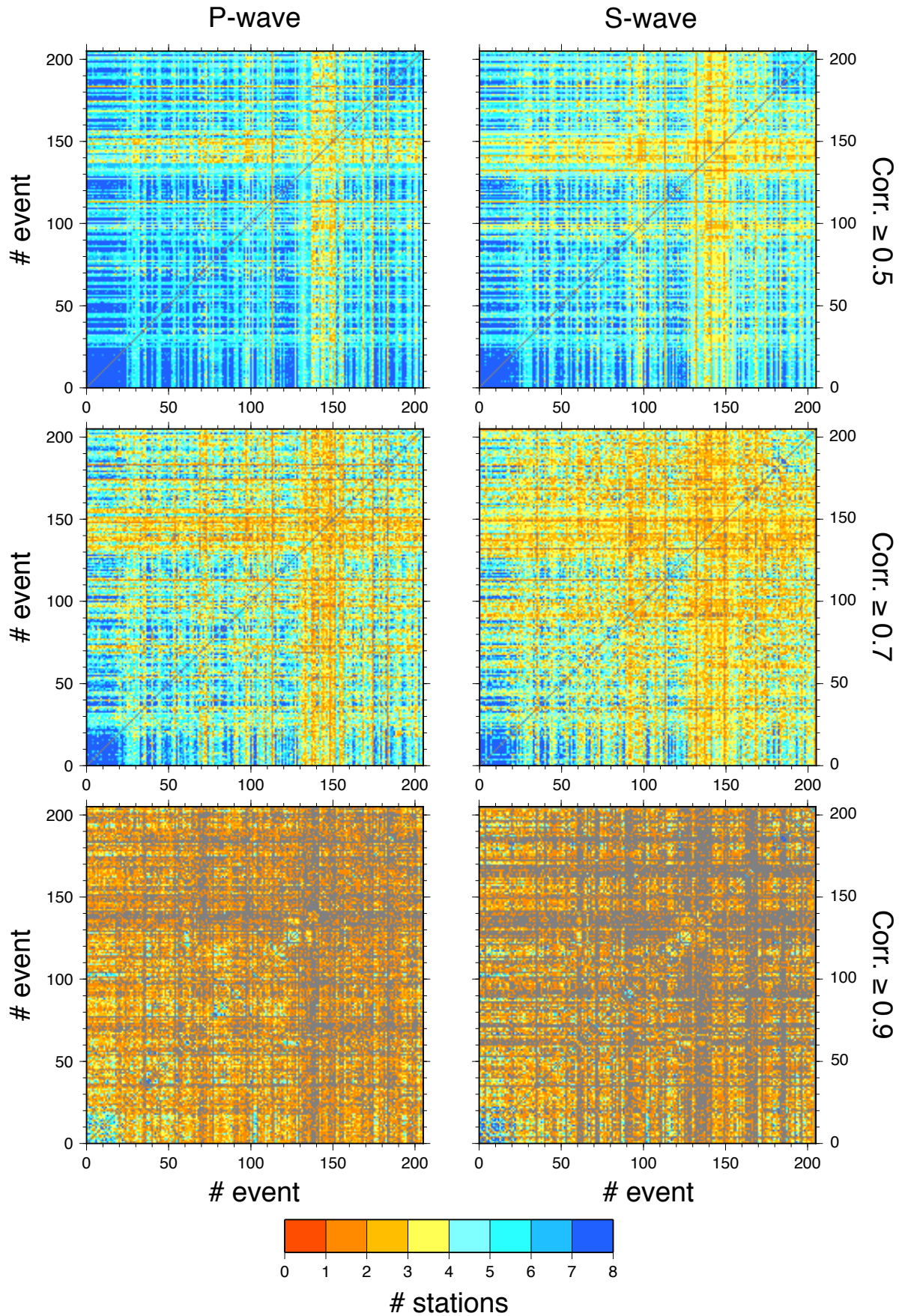


Figura 4: Numero di stazioni con valori di correlazione delle fasi P e S dei 206 eventi superiori a 0.5 (pannelli in alto), 0.7 (pannelli centrali) e 0.9 (pannelli in basso). Il colore grigio indica che in nessuna stazione si ha un valore di correlazione superiore al livello fissato per la coppia di eventi considerata, mentre il colore blu indica che ci sono almeno 8 stazioni.

La Figura 4 mostra i risultati dell'analisi di correlazione tra tutte le fasi P e le fasi S di tutti gli eventi per tutte le stazioni. I 206 eventi riportati nella matrice di correlazione sono organizzati seguendo la stessa numerazione adottata per le sezioni sismiche riportate in Figura 3. In ciascun pannello, il colore grigio indica che in nessuna stazione si ha un valore di correlazione superiore al livello fissato per la coppia di eventi considerata, mentre il colore blu indica che ci sono almeno 8 stazioni.

È possibile notare che in tutto il dataset ci sono almeno due stazioni con valori di correlazione superiori a 0.5 sia per la fase P sia per la fase S. Un'altissima correlazione a diverse stazioni si ha soprattutto per gli eventi iniziali dello sciame sismico ed in particolare per i primi 20 eventi. Un'alta correlazione delle fasi P e S a diverse stazioni si ha anche tra alcuni eventi occorsi intorno all'evento N. 126 del 26 ottobre 2010 (ora 15:54 UTC), che risulta essere il più grande dell'intero sciame sismico ($M_I=2.0$).

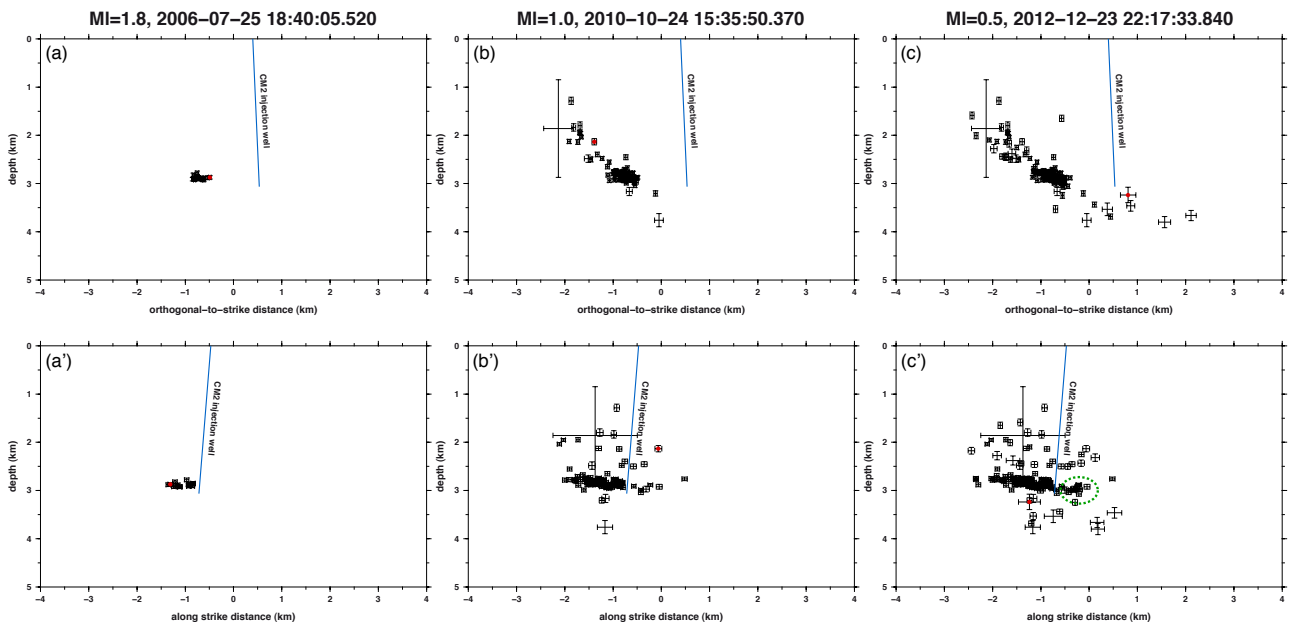


Figura 5: Evoluzione spazio temporale della sismicità in tre istanti di tempo corrispondenti all'evento evidenziato in rosso in ciascun pannello e le cui informazioni sono riportate in alto a ciascuna coppia di pannelli (a, a'), (b, b'), (c, c'). I pannelli a, b, c mostrano la proiezione degli eventi sismici lungo la direzione ortogonale allo strike della faglia, mentre i pannelli a', b', c' mostrano la proiezione degli eventi lungo lo strike della faglia. L'area tratteggiata di colore verde in Figura 5c' indica la localizzazione dell'evento N. 126 e degli eventi occorsi nei due giorni successivi.

La Figura 5 mostra l'evoluzione spazio temporale della sismicità lungo la direzione dello strike della faglia interessata dalla sismicità indotta (pannelli a', b', c') e lungo la direzione ortogonale allo strike (pannelli a, b, c) in tre differenti istanti temporali:

1. evento $M_I=1.8$ del 25 luglio 2006, ore 18:40:06 UTC (18-mo evento dello sciame, Figura 5a e 5a');
2. evento $M_I=1.0$ del 24 ottobre 2010, ore 15:35:50 UTC (124-mo evento dello sciame, Figura 5b e 5b');

3. evento $M_l=0.5$ del 23 dicembre 2012, ore 17:33:34 UTC (ultimo evento dello sciame, Figura 5c e 5c').

In particolare, le Figure 5a e 5a' mostrano come sono estremamente co-localizzati i primi 18 eventi dello sciame per i quali sono stati osservati valori di correlazione altissimi. Il confronto tra le Figure 5b' e 5c' mostra invece che dopo l'evento N. 126 del 26 ottobre 2010 ($M_l=2.0$) una piccola patch è stata attivata più a destra del resto degli altri eventi sismici (area tratteggiata di colore verde in Figura 5c').

Infine, è stato utilizzato un codice di calcolo ed inversione degli spettri dei segnali sismici per la stima dei parametri di sorgente dei 206 eventi della sequenza. Il codice si chiama *source_spec*, è stato sviluppato da alcuni ricercatori dell'IPGP ed è scritto in linguaggio Python. I parametri che si possono stimare dal processo di inversione degli spettri delle registrazioni sismiche sono il momento sismico M_0 , la frequenza d'angolo f_c , e il t^* . Attraverso M_0 e f_c è poi possibile ricavarsi le stime della magnitudo momento M_w , dello stress drop $\Delta\sigma$ e del raggio sorgente r .

Dopo un training iniziale sull'utilizzo del codice applicato ad alcuni dati disponibili presso l'IPGP, si è proceduto a preparare il file di configurazione per i dati della sequenza selezionata.

La Figura 6 mostra un esempio di processing della registrazione dell'evento N. 126 alla stazione VIGE installata a Viggiano (PZ). Il pannello a sinistra della Figura 6 mostra le registrazioni dell'evento nel dominio del tempo alle tre componenti SHE, SHN, SHZ. La parte iniziale della registrazione viene utilizzata per valutare il livello di rumore mentre la parte di segnale da invertire è la finestra evidenziata in giallo della durata di 2 secondi a partire dal tempo di arrivo della fase sismica S. Il pannello a destra della Figura 6 mostra lo spettro del segnale selezionato (linee colorate continue) e del rumore (linee colorate tratteggiate). La linea continua di colore nero è il fit dei dati ottenuto dal processo di inversione e in basso sono riportate le stime dei parametri M_0 , M_w , f_c , t^* .

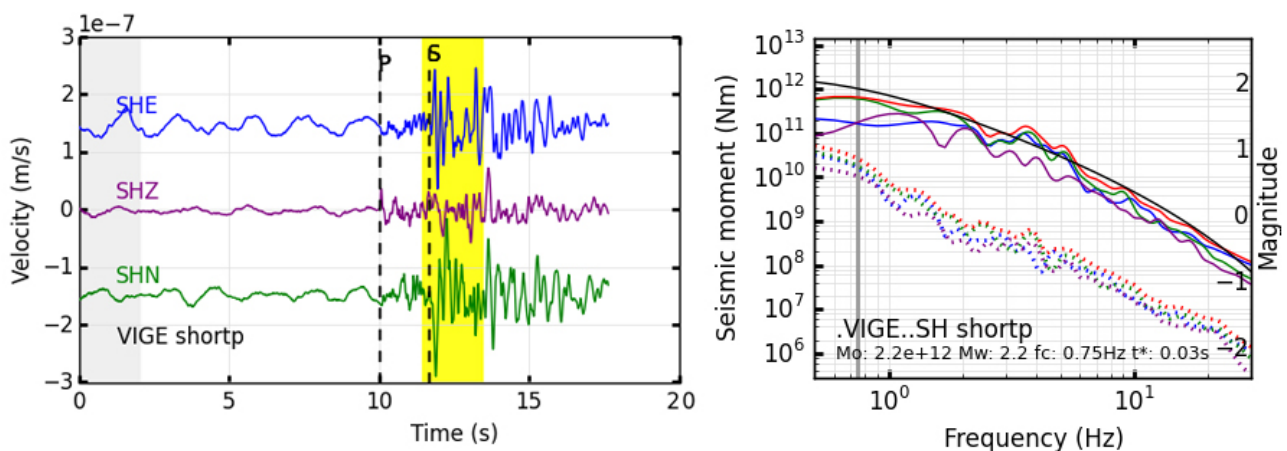


Figura 6: (sinistra) Registrazione dell'evento sismico nel dominio del tempo alle tre componenti SHE, SHN, SHZ. La parte iniziale del segnale è utilizzata per la stima del rumore (finestra evidenziata in grigio) mentre in giallo è evidenziata la finestra del segnale analizzato. (destra) Spettro del segnale (linee colorate continue) e del rumore (linee colorate tratteggiate) per le componenti SHE, SHN, SHZ. La linea continua di colore nero è il fit dei dati ottenuto dal processo di inversione.

Eseguendo lo stesso processing iterativamente su tutte le stazioni che hanno registrato l'evento è possibile avere una stima dei parametri ad ogni stazione. La stima finale dei parametri di sorgente può essere valutata mediando le stime ottenute alle singole stazioni.

Il periodo di soggiorno presso l'IPGP è stato anche molto utile per il trasferimento del know-how acquisito dai ricercatori dell'IPGP sull'area di studio del Rift di Corinto e sull'installazione e gestione della rete sismica del Corinth Rift Laboratory. Tale know-how potrà rivelarsi estremamente utile per future installazioni di array di monitoraggio in Val d'Agri.

3 – Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati ottenuti durante il programma di ricerca di mobilità breve svolto presso l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) hanno consentito di programmare ed avviare un'attività di ricerca per lo studio accurato dei processi di sorgente sismica e di clustering per le aree della Val d'Agri e del Rift di Corinto. Nel breve periodo si concluderà l'analisi del cluster di sismicità selezionato per la Val d'Agri, cercando di comprendere la variabilità a piccola scala del meccanismo di rottura e l'interazione tra gli eventi sismici. Particolare attenzione sarà rivolta ai primi eventi dello sciame sismico (Figure 5a e 5a') e a quelli localizzati vicino all'evento N. 126 (area tratteggiata di colore verde in Figura 5c'). Successivamente sarà analizzata la sequenza sismica di settembre-ottobre 2004 (Figura 2) e infine sarà avviata la stessa procedura di analisi per il Rift di Corinto. I risultati derivanti da tale attività saranno pubblicati su riviste scientifiche internazionali.

Sebbene i risultati preliminari sono molto soddisfacenti, ci si è resi conto che sono necessari alcuni sviluppi del codice *source_spec* per stimare correttamente i parametri di sorgente per terremoti di piccola magnitudo ed in particolare per i dati della Val d'Agri che presentano alcune problematiche. Attualmente la stima del momento sismico, e quindi della magnitudo momento, è molto stabile mentre la stima della frequenza d'angolo è molto instabile. Si è pensato inoltre di aggiungere nel codice anche l'analisi dei rapporti spettrali tra due differenti eventi.

In riferimento alla opportunità di installare in Val d'Agri strumentazione per il monitoraggio sismico, è stata valutata insieme ai ricercatori dell'IPGP la possibilità di installare un prototipo di sensore sismico a basso consumo in fibra ottica basato sul principio dell'interferometria laser (Chawah, 2013). Rispetto ai sistemi tradizionali, il sensore sismico in fibra ottica ha una migliore stabilità nel tempo (assenza di deriva elettronica del sensore), è insensibile alle perturbazioni del campo elettromagnetico (correnti telluriche, attività industriali, linee elettriche ad alto voltaggio, ecc.), è poco sensibile alle alte temperature (non ha componenti elettroniche) ed è semplice e robusto. Tale attività richiederà la stesura di una proposta progettuale congiunta, che tenga conto del

coinvolgimento anche di altri partner, indispensabile per il reperimento di fondi utili all'acquisto della strumentazione necessaria per il potenziamento di quanto già presente in Val d'Agri.

Ringraziamenti

Si ringraziano:

- il CNR, per la concessione del finanziamento nell'ambito del programma di “Short Term Mobility 2014” con il quale la presente attività di ricerca è stata svolta;
- l'IPGP, per l'ospitalità e i software messi a disposizione per l'analisi dei dati sismici;
- il Prof. Pascal Bernard e il Dr. Claudio Satriano, per la collaborazione e il supporto scientifico forniti durante lo svolgimento delle attività di ricerca.

Bibliografia

- Benedetti L., Tapponnier P., King G. C. P., and Piccardi L. (1998). Surface Rupture of the 1857 Southern Italian Earthquake. *Terra Nova*, **10**, 206-210.
- Burrato P., and Valensise G. (2008). Rise and fall of a hypothesized seismic gap: Source complexity in the 16 December 1857, Southern Italy earthquake (Mw 7.0), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **98**(1), 139–148.
- Cello G., Tondi E., Micarelli L., and Mattioni L. (2003). Active tectonics and earthquake sources in the epicentral area of the 1857 Basilicata earthquake (Southern Italy). *Journal of Geodynamics*, **36**, 37–50.
- Chawah P. (2013). Développement d'un capteur de déplacement à fibre optique appliqué à l'inclinométrie et à la sismologie. PhD thesis, Université Montpellier II, Montpellier, France.
- Galli P., Bosi V., Piscitelli S., Giocoli A., and Scionti V. (2006). Late Holocene earthquakes in southern Apennine: paleoseismology of the Caggiano fault, *Int. J. Earth Sci.*, **95**(5), 855-870.
- Hardebeck J. L. (2006). Homogeneity of small-scale earthquake faulting, stress, and fault strength. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**(5), 1675–1688.
- King G., and Cocco M. (2001). Fault interaction by elastic stress changes: New clues from earthquake sequences. *Advances in Geophysics*, **44**, 1-38.
- Lomax A., Virieux J., Volant P., and Berge C. (2000). Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in *Advances in Seismic Event Location*, Thurber, C. H. & Rabinowitz, N. (eds.), Kluwer, Amsterdam, pp. 101–134.
- Mallet R. (1862). The Great Neapolitan Earthquake of 1857. The First Principles of Observational Seismology. London, vol. I, pp. 431, vol. II, pp. 399.

- Nadeau R. M., and McEvilly T. V. (1999). Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes. *Science*, **285**(5428), 718.
- Nadeau R. M., and McEvilly T. V. (2004). Periodic pulsing of characteristic microearthquakes on the San Andreas Fault. *Science*, **303**(5655), 220.
- Pantosti D., and Valensise G. (1988). La faglia sud-appenninica: identificazione oggettiva di un lineamento sismogenetico nell'Appennino meridionale. *Proc. VII Meeting Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida*, Rome, 205–220.
- Rowe C. A., Aster R. C., Borchers B., and Young C. J. (2002). An automatic, adaptive algorithm for refining phase picks in large seismic data sets, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**(5), 1660–1674.
- Stabile T. A., Satriano C., Orefice A., Festa G., and Zollo A. (2012). Anatomy of a microearthquake sequence on an active normal fault. *Scientific reports*, **2**, Art. N. 410, doi:10.1038/srep00410.
- Stabile T. A., Giocoli A., Lapenna V., Perrone A., Piscitelli S., and Telesca L. (2014a). Evidences of low-magnitude continued reservoir-induced seismicity associated with the Pertusillo artificial lake (Southern Italy), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **104**(4), 1820–1828, doi:10.1785/0120130333.
- Stabile T. A., Giocoli A., Perrone A., Piscitelli S., and Lapenna V., (2014b). Fluid injection induced seismicity reveals a NE dipping fault in the southeastern sector of the High Agri Valley (southern Italy), *Geophys. Res. Lett.*, **41**, doi:10.1002/2014GL060948.
- Valoroso L., Improta L., Chiaraluce L., Di Stefano R., Ferranti L., Govoni A., and Chiarabba C. (2009). Active faults and induced seismicity in the Val d'Agri region (southern Apennines, Italy), *Geophys. J. Int.*, **178**, 488–502, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04166.x.
- Valoroso L., Chiaraluce L., Piccinini D., Di Stefano R., Schaff D., and Waldhauser F. (2013). Radiography of a normal fault system by 64,000 high-precision earthquake locations: The 2009 L'Aquila (central Italy) case study, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**.
- Vidale J., Ellsworth W. L., Cole A., and Marone C. (1994). Variations in rupture process with recurrence interval in a repeated small earthquake. *Nature*, **368**(6472), 624–626.
- Waldhauser F., and Ellsworth W. L. (2002). Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations. *J. Geophys. Res.*, **107**, B3.
- Waldhauser F., and Schaff D. P. (2008). Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods. *J. Geophys. Res.*, **113**, B08311.