

## STUDIO PRELIMINARE PER LA STIMA DELLA MAGNITUDO MOMENTO (MW) E DEI PARAMETRI DI SORGENTE DELLA MICROSISMICITÀ REGISTRATA NELL'AREA DI COLLALTO (PROVINCIA DI TREVISO, VENETO)

L. Moratto<sup>1</sup>, M.A. Romano<sup>1</sup>, G. Laurenzano<sup>1</sup>, S. Colombelli<sup>2</sup>, E. Priolo<sup>1</sup>, A. Zollo<sup>2</sup>, A. Saraò<sup>1</sup>, M. Picozzi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ist. Naz. di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS, Centro di Ricerche Sismologiche, Trieste e Udine

<sup>2</sup> Dip. di Fisica Ettore Pancini, Università "Federico II", Napoli

**Introduzione.** Dal 2012 OGS è impegnato nel monitoraggio e nello studio della microsismicità eventualmente indotta dalle attività di stoccaggio di gas metano nella concessione di Collalto (Treviso), oltre che della sismicità naturale nell'area circostante (Priolo *et al.*, 2015a). In un simile contesto, una stima affidabile della magnitudo momento ( $M_w$ ) associata agli altri parametri di sorgente per gli eventi locali, anche se molto piccoli, diventa essenziale per l'analisi dei meccanismi di sorgente e la discriminazione tra terremoti indotti e terremoti di origine naturale.

**Metodologia.**  $M_w$  è correlata alla quantità di energia rilasciata dal terremoto, e può essere derivata dalle stime del momento sismico ( $M_0$ ) (Hanks and Kanamori, 1979). Al tal fine, abbiamo utilizzato la procedura sviluppata da Zollo *et al.* (2014) che si basa sull'inversione dello spettro di sorgente delle onde S e, separatamente, di quello delle onde P. Tale analisi ha lo scopo di separare dallo spettro registrato alle stazioni sismiche, mediante operazioni di deconvoluzione dei segnali registrati sulle componenti orizzontali per le onde S e sulle verticali per le onde P, lo spettro di sorgente dai contributi dovuti agli effetti di propagazione (attenuazione anelastica

e *geometrical spreading*) e da quelli di sito. In questa procedura, oltre al momento sismico, viene stimata anche la *corner frequency* ( $f_c$ ), sia nel caso delle onde S, sia nel caso delle onde P. L'inversione è effettuata in un intervallo di frequenze predefinito: la frequenza minima ( $f_{\min}$ ) è definita dalla lunghezza del segnale in secondi, selezionata in funzione del valore di  $M_L$ ; la frequenza massima ( $f_{\max}$ ) è posta pari a tre volte la  $f_c$  teorica (ricavata anch'essa dalla  $M_L$  dell'evento). Inoltre, il rapporto segnale/rumore osservato sulle singole registrazioni è usato come fattore di peso.

L'operazione di inversione per la stima di  $M_0$  e  $f_c$  è preceduta da un processo iterativo (multi-step) che testa differenti valori di  $Q$  ( $Q_s$  o  $Q_p$ ) e del parametro che controlla il decadimento dello spettro di sorgente ad alte frequenze ( $Y$ ) per tutte le coppie sorgente-ricevitore. Una volta stabilizzati, i valori dei parametri  $Q$  e  $Y$ , questi vengono fissati ed utilizzati nell'inversione finale. I valori finali di  $M_0$  e  $f_c$  per ciascun terremoto sono ottenuti dalla media dei valori stimati per ogni singola registrazione relativa all'evento sismico considerato.

A questo punto è possibile calcolare il valore di  $M_w$  dal momento sismico e dagli stessi valori di  $M_0$  e  $f_c$  è possibile stimare anche il raggio di sorgente (adottiamo il modello di Madariaga, 1976) e lo *stress drop* statico per ogni terremoto considerato; inoltre, l'energia sismica irradiata può essere ricavata direttamente dai segnali registrati. Dai parametri di sorgente stimati, utilizzando modelli teorici, è anche possibile derivare lo *stress drop* apparente e l'efficienza sismica, che è un indicatore della radiazione sismica connessa allo stress rilasciato dal terremoto.

**La Rete Sismica di Collalto.** La Rete Sismica di Collalto (RSC) è una rete sismometrica locale e permanente, realizzata da OGS su commissione di Edison Stocaggio S.p.A; la RSC è situata presso i rilievi collinari del Montello (Fig. 1), nella zona pedemontana delle Prealpi venete (Italia nord-orientale). Essa è composta da 10 stazioni sismologiche con le seguenti caratteristiche:

- 1 stazione (ED06) a banda larga ( $T=120$  s) ed elevata dinamica;
- 4 stazioni (ED01, ED05, ED07 ed ED08) a periodo esteso ( $T=10$  s) ed elevata dinamica;
- 5 stazioni (ED02, ED03, ED04, ED09 ed ED10) a periodo esteso ( $T=10$  s).

Al fine di migliorare il rapporto segnale/rumore, tutti i sismometri sono stati installati in pozzo (a profondità variabile da 5 a 155 m), mentre gli accelerometri sono stati installati in superficie, in siti collocati all'interno di proprietà private. L'elevata dinamica e l'elevata sensibilità della strumentazione assicurano un'elevata qualità delle registrazioni sia di terremoti medio-forti, sia di eventi microsismici. Inoltre, la disposizione delle stazioni sismiche, distanti mediamente 4 km nell'area del serbatoio, garantisce un'adeguata risoluzione alla profondità dello stesso (1.5 km).

La RSC è ufficialmente operativa dall'1/1/2012, e da allora acquisisce e trasmette dati in continuo, con campionamento a 200 Hz nel caso dei sismometri e a 100 Hz in quello degli accelerometri. I dati della rete locale sono integrati con quelli delle stazioni sismiche della rete dell'Italia nord-orientale gestita da OGS (rts.crs.inogs.it), ed elaborati sia in *real-time* che *off-line*. Il *processing* standard dei dati prevede: 1) identificazione automatica degli eventi, ossia di aumenti di ampiezza del segnale sincroni su più stazioni; 2) riconoscimento e *picking* manuale dei terremoti locali; 3) localizzazione e stima della magnitudo locale (Priolo *et al.*, 2015a).

Il catalogo relativo ai primi quattro anni di monitoraggio (1/1/2012-31/3/2016) conta 962 terremoti, con magnitudo locale  $M_L$  compresa tra -1.8 e 4.5, localizzati nell'area compresa tra Belluno e Treviso da nord a sud, e tra Bassano del Grappa e Pordenone da ovest a est (rettangolo giallo più esterno in Fig.1). La magnitudo locale di completezza è 0.2 nell'area prossima al serbatoio di Collalto (rettangolo giallo più interno in Fig.1), dove la capacità di *detection* della rete è massima, e 0.5 nella zona circostante (Priolo *et al.*, 2016).

**Effetti di sito.** Per tutte le stazioni della RSC, è stata stimata l'amplificazione spettrale di sito utilizzando la *Generalized Inversion Technique* - GIT di Andrews (1986). Con questo metodo, che rappresenta un'estensione del più noto Reference Site Spectral Ratio - RSSR (Borcherdt, 1970), è possibile stimare la risposta di sito, rispetto uno o più siti di riferimento su roccia, la cui

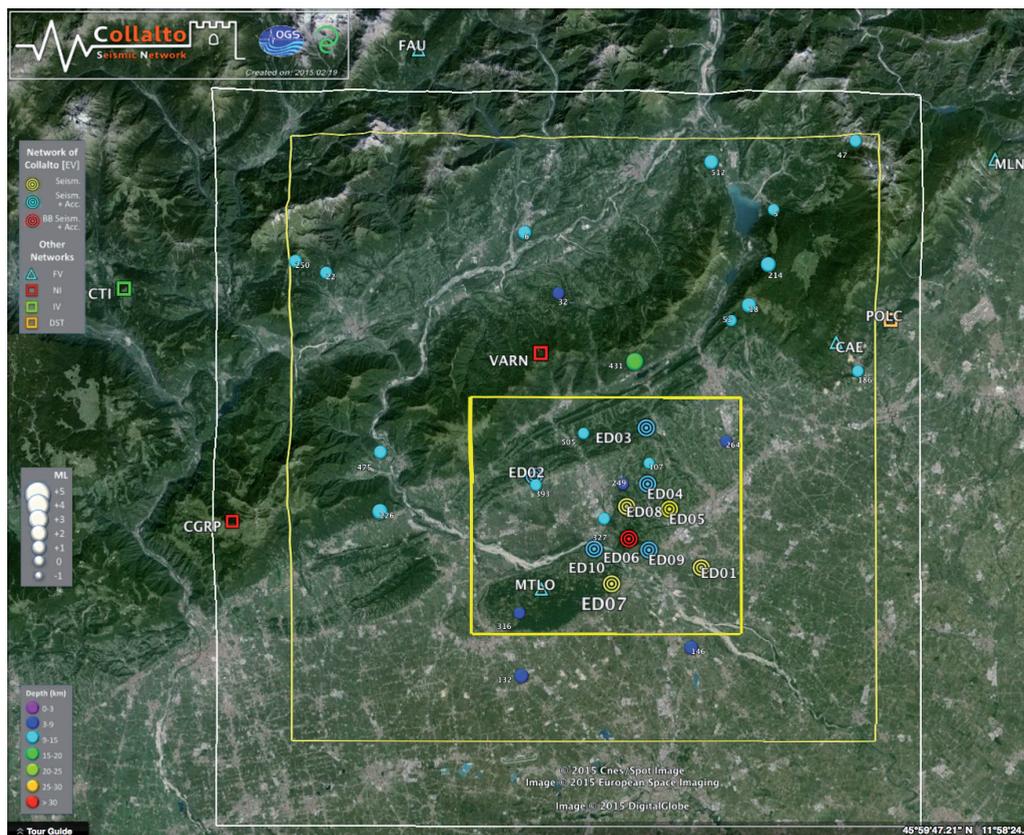


Fig. 1 – Mappa delle stazioni sismiche della RSC e degli epicentri dei terremoti selezionati per la stima dei parametri di sorgente con la procedura di Zollo *et al.* (2014).

risposta viene assunta unitaria. Uno dei vantaggi di questo metodo è la possibilità di utilizzare anche registrazioni asincrone tra sito d'interesse e sito di riferimento, e quindi, in totale, un maggior numero di registrazioni.

Per la stima dell'amplificazione spettrale presso i siti delle stazioni della RSC con il GIT sono stati utilizzati 51 eventi registrati dalla rete locale nel periodo 2014-2015 con  $3.0 \leq M_L \leq 4.4$ . I dati di tutte le stazioni della RSC e di quella scelta come sito di riferimento su roccia (VARN, della rete regionale dell'Italia Nord-orientale gestita da OGS), sono stati scaricati dal database OASIS (<http://oasis.crs.inogs.it/>, Priolo *et al.* 2015b). Dopo opportuna correzione strumentale dei segnali, il calcolo delle amplificazioni spettrali è stato eseguito mediante un codice di calcolo del GIT implementato in linguaggio MatLab® (Laurenzano *et al.*, 2012), nel quale è stato introdotta una valutazione della qualità del dato basata sul rapporto spettrale tra il segnale (evento) e il rumore (pre-evento).

Le curve di amplificazione spettrale ottenute per tutti i siti della RSC sono mostrate in Fig. 2. Si noti come le ampiezze delle curve dipendano dalla profondità del sensore in pozzo, con valori inferiori ad 1 per la maggior parte dei siti, essendo il sito di riferimento posto invece in superficie.

**Calibrazione.** Il codice per la stima dei parametri di sorgente (Zollo *et al.*, 2014) è stato testato e calibrato su un sottoinsieme di terremoti locali, selezionati dal catalogo della RSC in modo tale da garantire ampia variabilità dei valori di:  $M_L$ , distanza epicentrale e azimuth dalle stazioni, profondità ipocentrale e qualità della localizzazione.

In tutto sono stati selezionati 23 eventi (Fig. 1), precedentemente localizzati con Hypo71

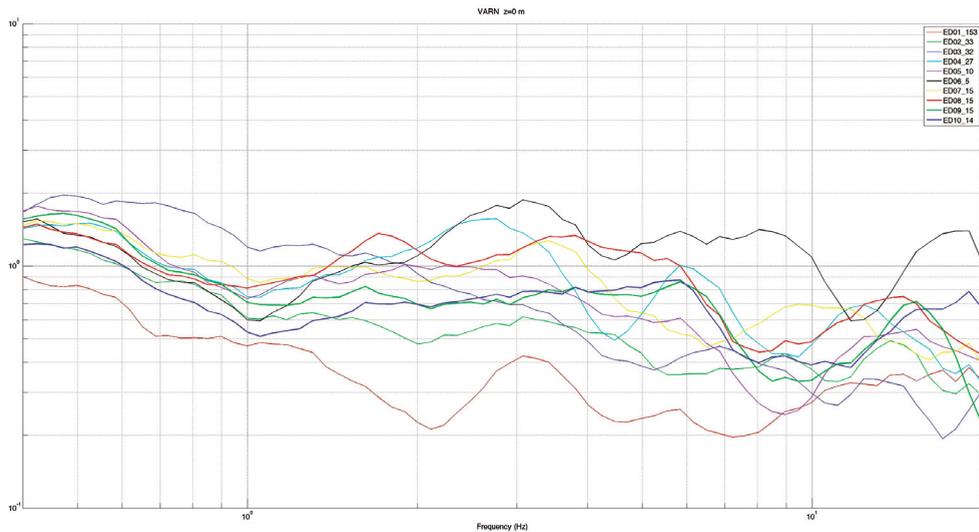


Fig. 2 – Curve di amplificazione spettrale di sito in funzione della frequenza per le stazioni della Rete Sismica di Collalto (RSC). Il numero accanto alla sigla di stazione nella legenda indica la profondità del sensore in metri.

(Lee e Lahr, 1975) utilizzando un modello di velocità 1D regionale ( $V_p=5.85$  km/s da 0 a 22 km di profondità;  $V_p=6.80$  km/s da 22 a 39.5 km;  $V_p=8.00$  km/s da 39.5 km in poi) e rapporto  $V_p/V_s = 1.78$  ricavato sperimentalmente dal diagramma di Wadati modificato.

Il codice utilizza i dati di evento in formato sac, con una porzione di segnale pre-evento lunga 40 s, utile alla stima del rapporto segnale/rumore, e con *header* contenente informazioni su tempi di arrivo delle fasi P ed S (se disponibili), tempo origine, coordinate ipocentrali e valore di  $M_L$  (stimata applicando la legge di attenuazione calibrata per l'Italia nord-orientale da Bragato e Tento, 2005).

La procedura richiede che vengano definiti a priori i valori di  $V_p$ ,  $V_s$ , la densità ( $\rho$ ), il fattore di attenuazione  $Q$  e un valore di riferimento di *stress drop* per l'area; nel nostro studio abbiamo utilizzato i valori proposti da Laurenzano and Priolo (2008) e abbiamo fissato  $\rho=2.7$  g/cm<sup>3</sup>,  $V_s=3.4$  km/s,  $V_p=6.0$  km/s,  $Q_s=160$ ,  $Q_p=400$ . Inoltre l'angolo del raggio di *take-off* viene calcolato utilizzando un modello di velocità a gradiente in funzione della profondità, ricavato specificatamente per l'area monitorata dalla RSC. Lo *stress drop* di Madariaga di riferimento per l'area di studio è stato fissato a 1 MPa dopo aver testato altri valori pubblicati in letteratura. Al riguardo, si noti che Franceschina *et al.* (2006), dopo aver stimato i parametri di sorgente per terremoti locali nell'area del Friuli Venezia Giulia, hanno osservato valori di *stress drop* di Brune variabili tra 0.07 e 5.31 MPa (con una media di 0.73 MPa) senza trovare alcuna evidenza di *self-similarity*.

La procedura multi-step ha generato valori stabili di  $Q$  e  $\gamma$  dopo 7 iterazioni ottenendo i valori medi di  $Q_s=302$  e  $\gamma=2.56$ ; quindi, è stata effettuata l'inversione finale per ottenere le stime di  $M_0$  e  $f_c$ . La stessa procedura è stata ripetuta per le onde P e i risultati sono presentati in Fig. 3a. La stima di  $M_0$  risulta stabile per tutti gli eventi sismici analizzati, mentre quella della  $f_c$  presenta un'incertezza maggiore, soprattutto nel caso delle onde P. È significativo, comunque, come le stime indipendenti dei valori di  $f_c$  per le onde S e P siano in ottimo accordo tra loro. Infine, lo *stress drop* risulta variare tra 0.05 e 10 MPa, senza alcuna correlazione evidente con la stima di  $M_0$ . Dalle stime del momento sismico abbiamo calcolato  $M_w$  per tutti gli eventi considerati ottenendo dei valori compresi tra  $0.9 \leq M_w \leq 2.8$ ; il confronto  $M_w - M_L$  (Fig. 3b) evidenzia una sovrastima di  $M_w$  rispetto a  $M_L$  nel caso degli eventi più piccoli ( $M_L < 1.5$ ) similmente a quanto osservato in altre aree di studio.

**Conclusioni.** In questo studio abbiamo calcolato i valori di  $M_w$  e  $f_c$  di 23 terremoti

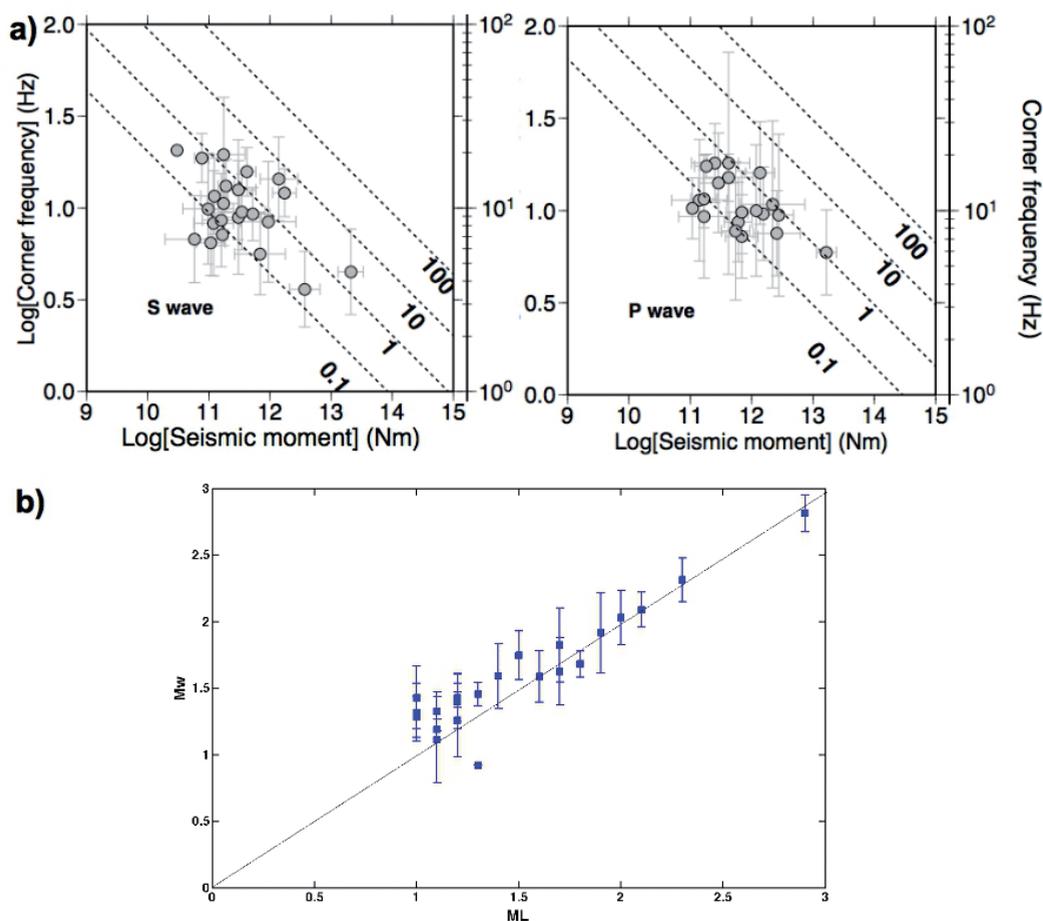


Fig. 3 – a) Risultati ottenuti per il momento sismico e la corner frequency (con le relative incertezze) nel caso delle onde S (a destra) e delle onde P (a sinistra); le linee tratteggiate indicano i valori a stress drop costante espresso in MPa. b) Confronto fra le stime di  $M_L$  e di  $M_W$  per i terremoti considerati in questo studio.

( $1.0 \leq M_L \leq 2.9$ ;  $0.9 \leq M_W \leq 2.8$ ) localizzati nell'area di Collalto (TV) utilizzando la metodologia proposta da Zollo et al. (2014).

I risultati ottenuti mostrano che le stime di  $M_0$  (e di conseguenza della magnitudo da momento) sono stabili in tutto l'intervallo di magnitudo considerato. La stima di  $f_c$  soffre di un'incertezza maggiore rispetto a quella di  $M_0$ , nonostante la correzione per gli effetti di sito abbia migliorato la qualità dei risultati finali. Infine, è stato ottenuto un valore medio di *stress drop* pari a 1 MPa, che riteniamo essere adeguato riferimento per l'area di Collalto.

In conclusione, la metodologia utilizzata ha consentito di stimare con successo i valori di  $M_w$  e gli altri parametri di sorgente di terremoti naturali con  $M_L \geq 1.0$  e profondità intorno ai 10 km. Riteniamo che la stessa procedura possa fornire risultati affidabili anche in caso di terremoti più superficiali e deboli, prossimi al serbatoio di stoccaggio, consentendoci di avere elementi per discriminare gli eventi naturali da quelli eventualmente indotti.

#### Bibliografia

Andrews D.J.; 1986: *Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different sizes*. In: S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz (Editors), *Earthquake Source Mechanics*, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 259–267.

Bragato P. L. and Tenta A.; 2005: *Local magnitude in northeastern Italy*. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **95**, 579–591.

- Borcherdt R.D.; 1970: *Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay*. Bull. Seism. Soc. Am., **60**, 29–61.
- Franceschina G., Kravanja S. and Bressan G.; 2006: *Source parameters and scaling relationships in the Friuli-Venezia Giulia (Northeastern Italy) region*. Phys. Earth Planet Inter., **154**, 148-167.
- Hanks T.C. and Kanamori H.; 1979: *A moment magnitude scale*. J. Geophys. Res., **84**, 2348–2350.
- Laurenzano G. and Priolo E.; 2008: *Numerical modelling of earthquake strong ground motion in the area of Vittorio Veneto (NE Italy)*. Boll. Geof. Teor. Appl., **49**, 401-425.
- Laurenzano G., Priolo E. and Klin P.; 2012: *Codice MatLab® per il calcolo della risposta sismica di sito con il metodo dell'inversione generalizzata (GIT)*. In: M. Mucciarelli (Ed.), *Tecniche Speditive per la Stima dell'Amplificazione Sismica Studi teorici ed applicazioni professionali*, Aracne Ed., 61-72.
- Lee W.H.K. and Lahr J.C.; 1975: *Hypo 71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes*. USGS Open File Report 75-311, Menlo Park.
- Madariaga R.; 1976: *Dynamics of an expanding circular fault*. Bull. Seismol. Soc. Am. **66**, 639–666.
- Priolo E., Romanelli M., Plasencia Linares M.P., Garbin M., Peruzza L., Romano M.A., Marotta P., Bernardi P., Moratto L., Zuliani D. and Fabris P.; 2015a: *Seismic Monitoring of an Underground Natural Gas Storage Facility: The Collalto Seismic Network*. Seism. Res. Lett., **86**, 109-123.
- Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A.; 2015b: *OASIS: The OGS Archive System of Instrumental Seismology*. Seismological Research Letters, **86**, 978-984.
- Priolo E., Romano M.A., Romanelli M., Plasencia-Linares M.P., Garbin M., Bernardi P., Zuliani D., Fabris P. and Peruzza L.; 2016: *Rete di rilevamento sismico finalizzata al monitoraggio della sismicità naturale e microsismicità indotta presso la concessione di stoccaggio gas metano denominata "Collalto Stoccaggio" (TV). Anno di esercizio 2016 – Prima relazione annuale*. Prescr. min. di cui alla nota DVA-2013-0005150 dd. 27/03/2013. Rel. 2016/58 CRS 12, 27 luglio.
- Zollo A., Orefice A. and Convertito V.; 2014: *Source parameter scaling and radiation efficiency of microearthquakes along the Irpinia fault zone in southern Apennines, Italy*. J. Geophys. Res. Solid Earth, **119**, 325-3275.