

Risultati preliminari del confronto dei parametri di sorgente stimati applicando diversi metodi.

Giovanna Calderoni

WP2 - Caratteristiche della Sorgente dei Terremoti e Propagazione delle Onde Sismiche
nell'Appennino Centrale

SECURE 2023-2025 – Riunione Plenaria 30-01-2024

Alcuni degli obiettivi del WP2:

- Stima dello stress drop degli eventi sismici della Sequenza sismica di Amatrice-Visso-Norcia (AVN)
- Stima della attenuazione anelastica delle onde S durante la Sequenza AVN

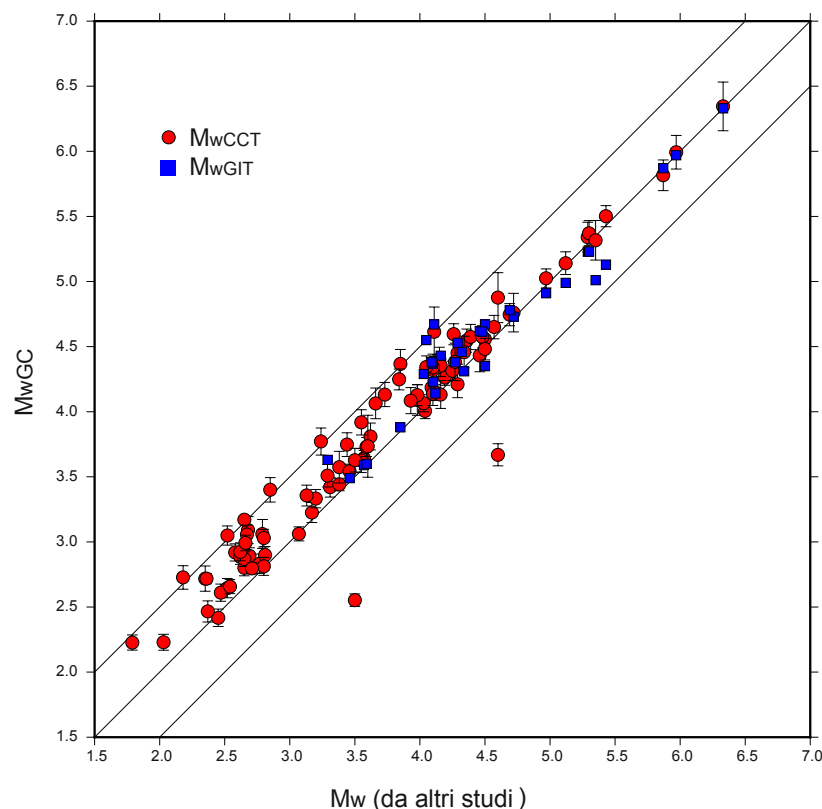
Stima dello stress drop

Metodi di analisi:

- ✓ Adattamento Spettrale (SP, Calderoni et al., 2019 e Calderoni & Abercrombie, 2023);
- ✓ Rapporto Spettrali di eventi co-localizzati di diversa magnitudo (SR, Calderoni et al., 2013 e Calderoni & Abercrombie, 2023);
- ✓ Calibrazione delle Code (CCT, Mayeda et al. 2003 e Morasca et al. 2022);
- ✓ Tecnica di Inversione Generalizzata (GIT, Bindi & Spallarossa, 2020)

Preliminare della stima dello Stress Drop è la valutazione della M_w :

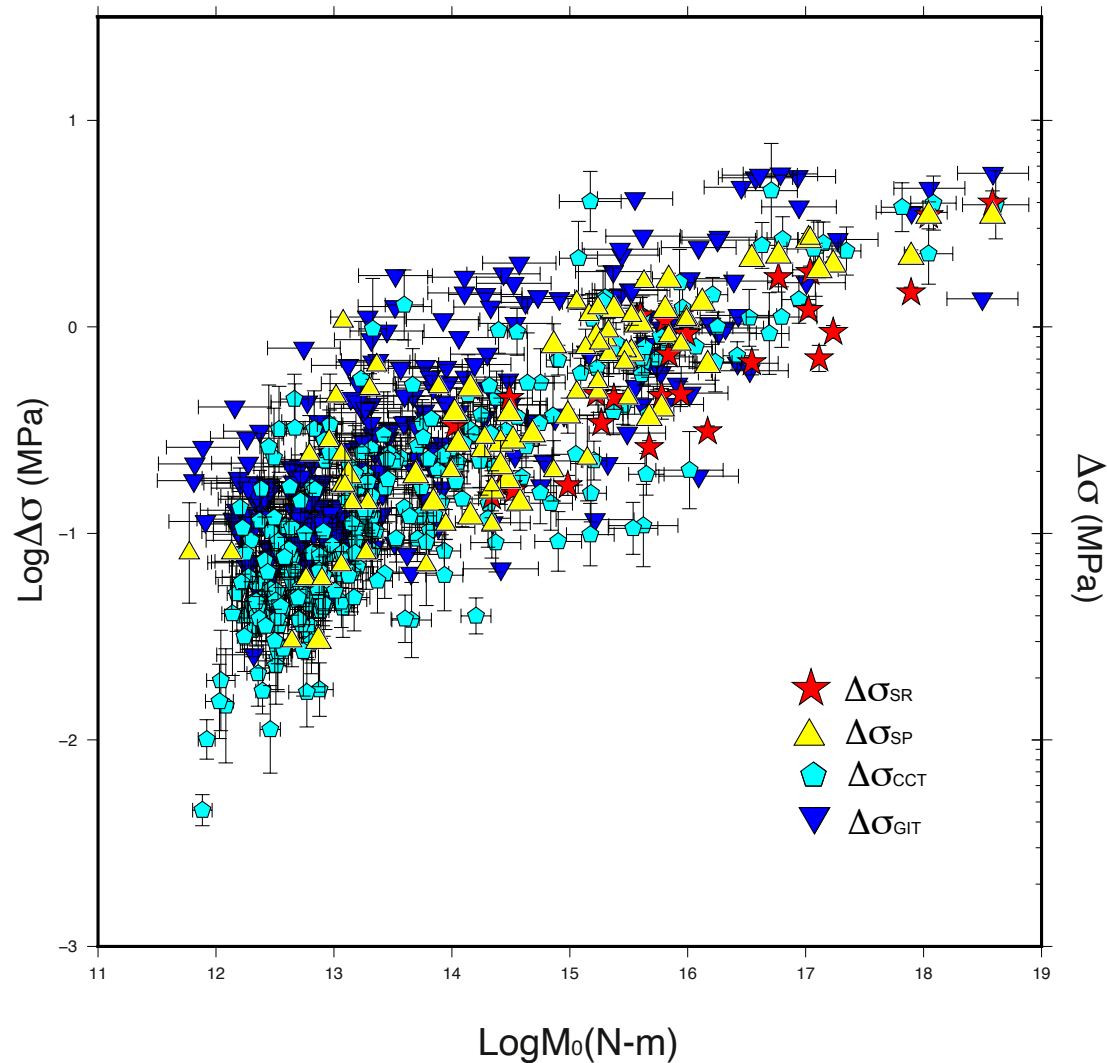
- ✓ Nel metodo SP, SR e CCT vengono considerate, quando disponibili, le stime del momento sismico fornite dal catalogo del momento tensore di Herrmann et al., (2011)
- ✓ Nel metodo SP, SR la magnitudo momento degli eventi sismici non presenti nel catalogo vengono stimate dallo scaling a bassa frequenza del rapporto spettrale rispetto ad un evento co-localizzato di magnitudo maggiore con momento noto
- ✓ Nel metodo GIT le magnitudo vengono stimate dalla procedura



E' abbastanza buono l'accordo tra magnitudo stimate con i diversi metodi anche se risulta evidente una dispersione delle stime fino ad una unità di magnitudo rispetto alla M_{wGC} , presa come riferimento, soprattutto per eventi di magnitudo minore.

Confronto delle stime di stress drop ottenute applicando i diversi metodi:

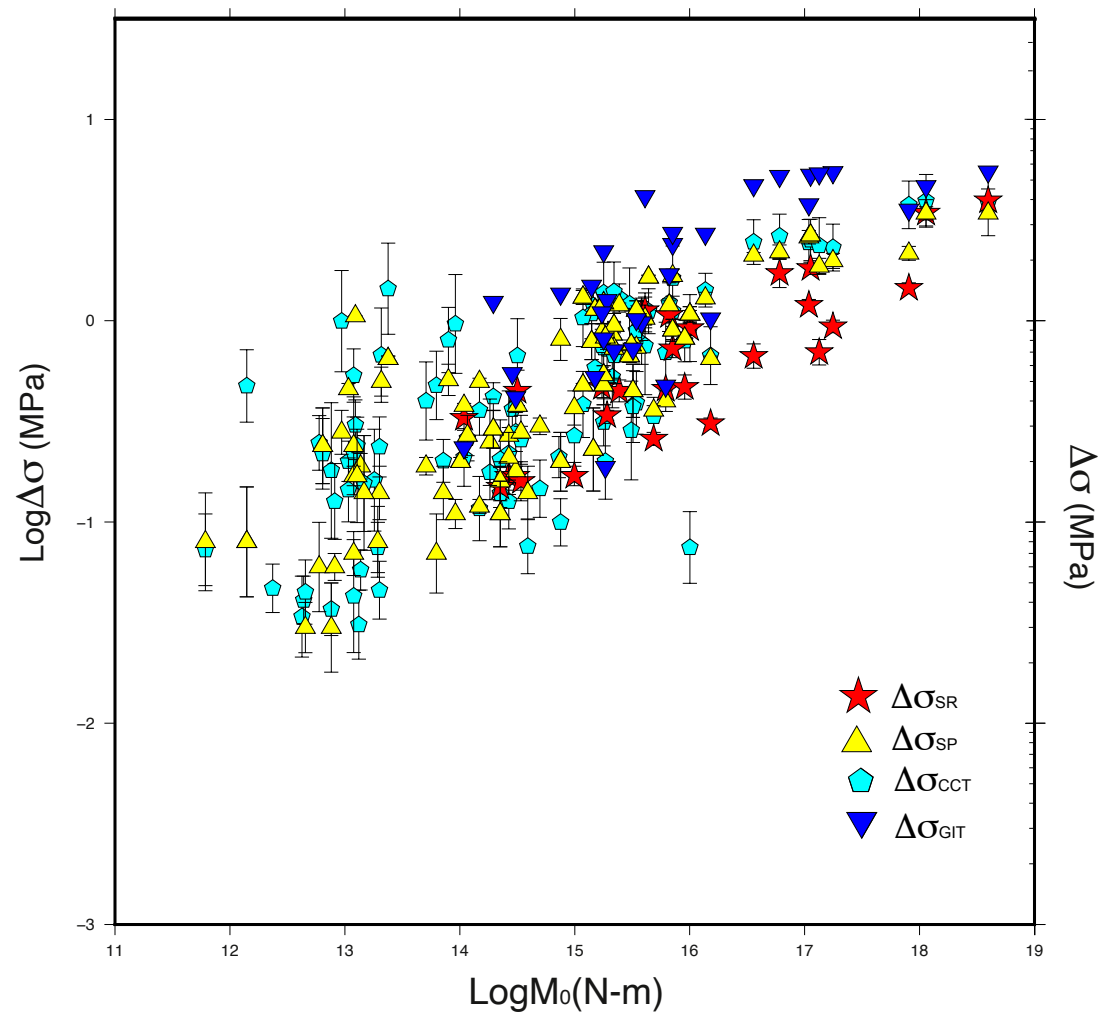
➤ $\Delta\sigma_{\text{SR}}$, $\Delta\sigma_{\text{SP}}$, $\Delta\sigma_{\text{CCT}}$ e $\Delta\sigma_{\text{GIT}}$



Risulta buono l'accordo tra le stime di stress drop ottenute applicando il metodo SP e CCT mentre si osserva una sovrastima applicando il metodo GIT e una sottostima con il metodo SR. La discrepanza di tali risultati può essere attribuita alla procedura che stima sia il momento sismico che lo stress drop nel caso del GIT o ad una riduzione della banda di frequenza nel caso del metodo SR, vincolata alla riduzione del rapporto segnale/rumore dovuto agli eventi di bassa magnitudo considerati nel rapporto spettrale.

Confronto delle stime di stress drop Eventi COMUNI:

➤ $\Delta\sigma_{\text{SR}}$, $\Delta\sigma_{\text{SP}}$, $\Delta\sigma_{\text{CCT}}$, $\Delta\sigma_{\text{GIT}}$



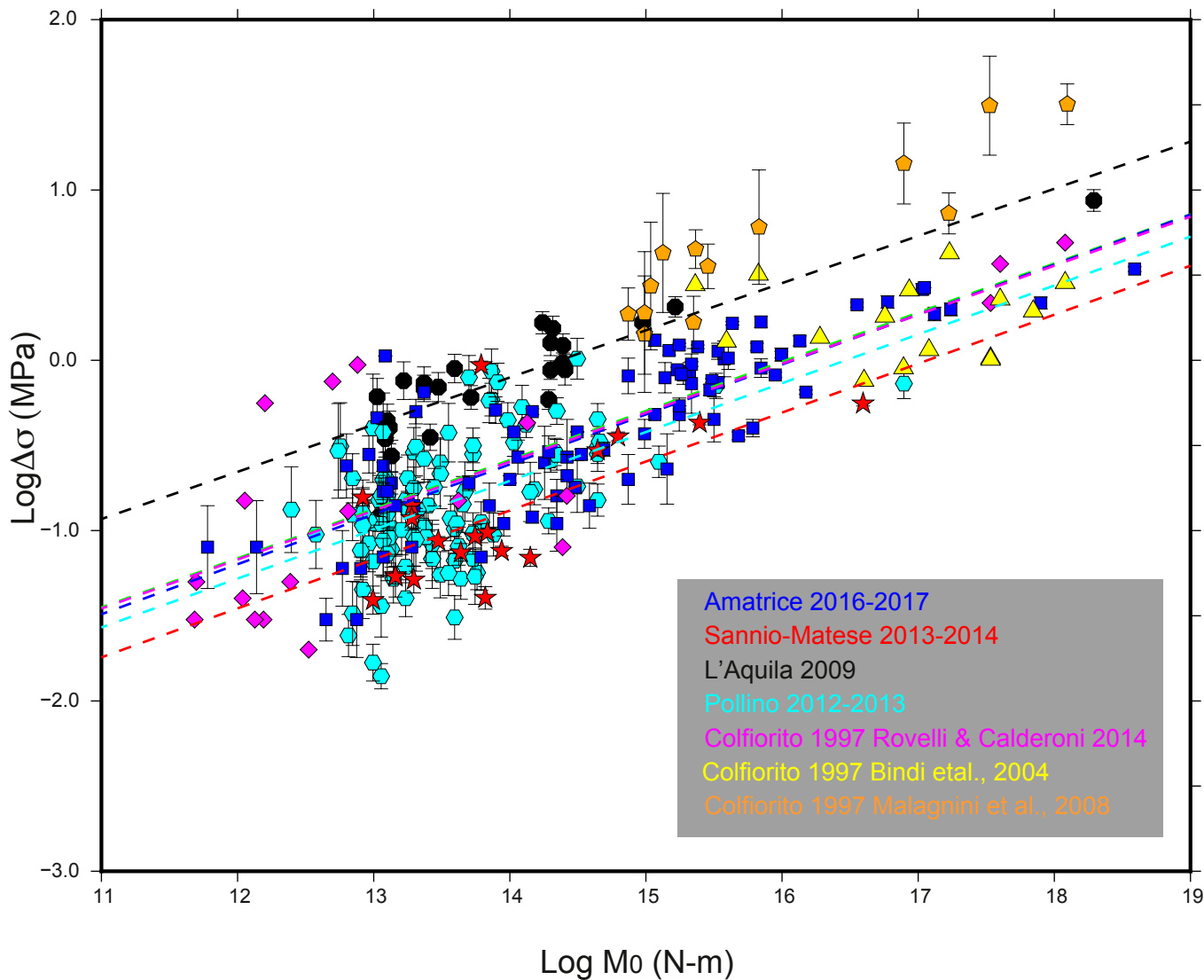
Metodo	Riferimento Bibliografico	Slope	CC
$\Delta\sigma_{\text{SR}}$	Calderoni & Abercrombie, 2023	0.27	84%
$\Delta\sigma_{\text{SP}}$	Calderoni & Abercrombie, 2023	0.29	88%
$\Delta\sigma_{\text{SP}}$	Calderoni & Abercrombie, 2023 Aggiunti altri 66 eventi	0.29	83%
$\Delta\sigma_{\text{CCT}}$	Mayeda et al. 2003; Morasca et al. 2022	0.27	74%

In letteratura

Il trend del $\text{Log}(\Delta\sigma)$ in funzione del $\text{Log}(M_0)$ è in accordo con:

- Calderoni et al. (2013) $\text{Log}\Delta\sigma = 0.26 \text{ Log}M_0 - 4.0 \rightarrow 2009 \text{ L' Aquila}$
- Rovelli and Calderonii (2014) $\text{Log}\Delta\sigma = 0.32 \text{ Log}M_0 - 5.3 \rightarrow 1997\text{-}98 \text{ Cofiorito}$
- Malagnini and Mayeda (2008) che hanno trovato un valore simile (circa 0.22)
- Archuleta and Ji (2016), ed inizialmente, Mayeda and Walter (1996) che hanno trovato un valore simile (0.25) per eventi di magnitude $M_w < 5.3$

Confronto delle stime di stress drop relative a diverse sequenze sismiche:



➤ $\Delta\sigma_{\text{SR}}, \Delta\sigma_{\text{SP}}$

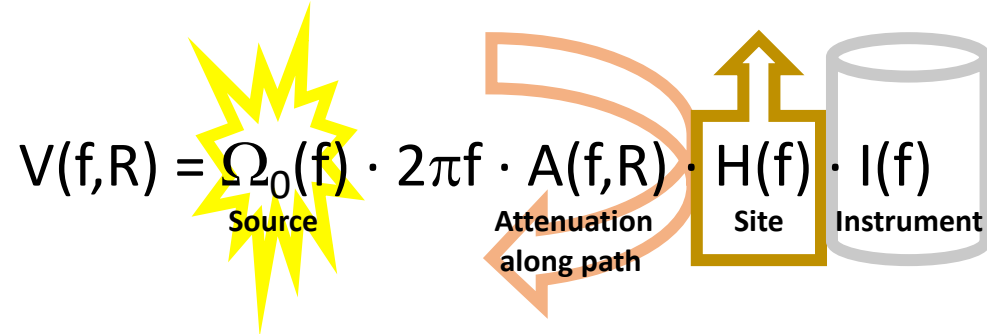
Seismic Sequence	Slope	CC
Amatrice 2016-2017 Calderoni & Abercrombie, 2023	0.29	83%
Sannio Matese 2013-2014 Calderoni et al., 2023	0.27	74%
L'Aquila 2009 Calderoni et al., 2013	0.28	65%
Pollino 2013-2014	0.29	83%
Colfiorito 1997-1998 Rovelli & Calderoni, 2014	0.28	79%

Come possiamo utilizzare la Legge di Scala

Alcune informazioni sui metodi applicati

✓ Adattamento Spettrale (SP, Calderoni et al., 2019)

The amplitude spectrum of the ground motion at distance R from the source ($V(f,R)$) is the convolution of source ($\Omega_0(f)$), propagation along the path ($A(f,R)$), site ($H(f)$), and the instrument response ($I(f)$):



$$\Omega_0(f) = \frac{F_S R_{\theta,\varphi}}{4\pi\rho\beta^3} \frac{M_0}{1 + (f/f_0)^2} \quad A(f, R) = 1/R e^{-\pi\kappa f}$$

- Following Anderson and Hough (1984) and Calderoni et al. (2013) the attenuation along the path is estimated by the combined effects of geometrical spreading and crustal attenuation assuming that geometrical spreading is inversely proportional to distance and that attenuation produces an exponential decay parameterized by a frequency-independent attenuation parameter, κ .
- The site terms $H(f)$ is estimated using the approach described by Calderoni et al. (2019). For each event, we average the scaled spectra of available stations and calculate the difference from the mean event spectrum at each station. These differences are averaged over the event ensemble to obtain a mean curve $H(f)$ for each station.

To estimate Brune Stress Drop ($\Delta\sigma$) of all the seismic events (Brune, 1970; Brune 1971; Eshelby, 1957; Keilis-Borok, 1959), assuming a circular source:

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r^3} \quad r = \frac{0.3723 \beta}{f_0}$$

where r is a source radius and $\Delta\sigma$ is the mean stress drop is calculated from the corner frequency (f_0) and seismic moment (M_0) using a circular source assumption

- ✓ Rapporto Spettrali di eventi co-localizzati di diversa magnitudo (SR, Calderoni et al., [2013](#) e Calderoni & Abercrombie, [2023](#))

In the EGF approach a co-located smaller earthquake is assumed to experience the same site and path effects as the event of interest

$$\frac{V_1(f)}{V_2(f)} = \frac{M_{01}}{M_{02}} \cdot \frac{1 + (f/f_{02})^2}{1 + (f/f_{01})^2}$$

where M_{01} and f_{01} are seismic moment and corner frequency of the target event and M_{02} and f_{02} are the same parameters of the EGF.

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r^3} \quad r = \frac{0.3723 \beta}{f_0}$$

(Brune, [1970](#); Brune [1971](#); Eshelby, [1957](#); Keilis-Borok, [1959](#))

- In the first step, the best fit values of $\Delta\sigma_1$ and $\Delta\sigma_2$ are estimated through a grid search procedure where M_{01} and M_{02} are fixed;
- in the second step, the best fit value of $\Delta\sigma_{1,EGF}$ is estimated through a grid search procedure where M_{01} , M_{02} and $\Delta\sigma_2$ are fixed.
- $\Delta\sigma_1$ is computed as the weighted average over target-EGF pairs.

Mettiamo a confronto le seguenti stime di stress drop:

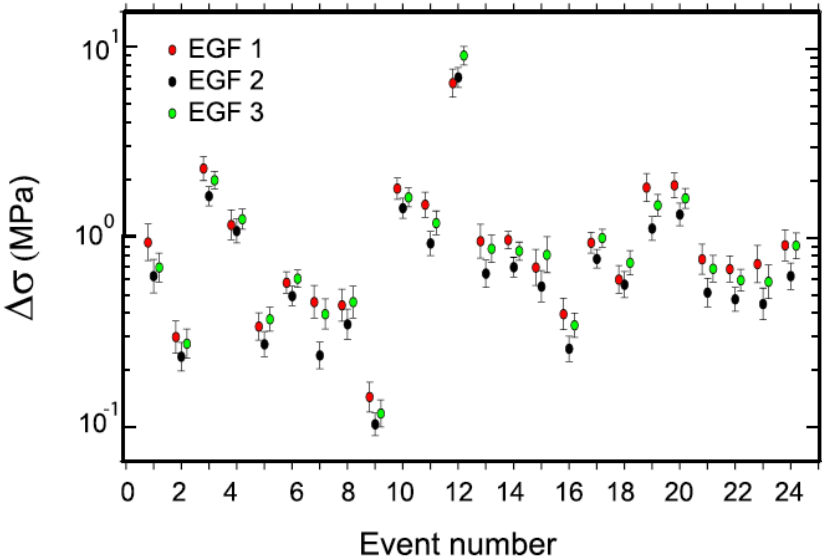
- ✓ $\Delta\sigma_{SR, EGF}; \Delta\sigma_{SR}$
- ✓ $\Delta\sigma_{SP}$

L' Aquila 2009

➤ All the EGFs selected are within 2-3 km ipocentral distance from the target event

Calderoni, G., Rovelli, A., & Di Giovambattista, R. (2019). Stress drop, apparent stress, and radiation efficien clustered earthquakes in the nucleation volume of the 6 April 2009, Mw 6.1 L'Aquila earthquake. Journ Geophysical Research: Solid Earth, 124, 10,360–10,375. <https://doi.org/10.1029/2019JB017513>

Figure 3. (a) Behavior of individual-station misfit v event (#5 of Table 1) using the available stations of empirical Green's functions. The 5% range around the inverse-error weight in the average operation. (b) Cor the estimates of individual-event stress drop for the d Green's functions

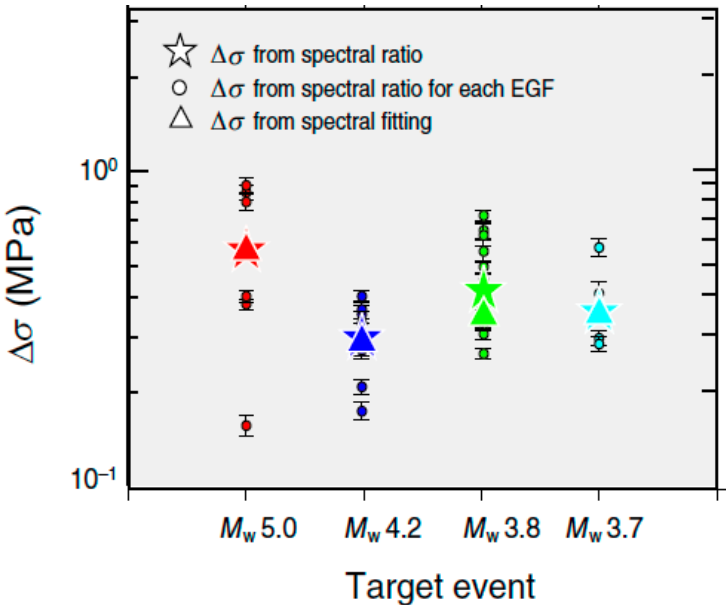


Sannio-Matese 2013-2014

➤ All the EGFs selected are within 5 km ipocentral distance from the target event

Calderoni, G., L. Improta, and R. Di Giovambattista (2023). Investigating the Role of Fluids in the Source Parameters of the 2013–2014 Mw5 Matese Seismic Sequence, Southern Italy, Seismol. Res. Lett. XX, 1–21, doi: 10.1785/0220230046.

Figure 3. (a) $\Delta\sigma$ versus azimuth for the strongest seismic events and (b) comparison of the $M_w + 3.7$ stress-drop estimates from spectral ratio computed as the weighted average over target-EGF pairs, spectral ratio from the different EGF, and spectral fitting. The color version of this figure is available only in the electronic edition.



Tyrrhenian Sea, Subduction Zone - 2019

- All the EGFs selected are within 5 km ipocentral distance from the target event

Calderoni, G., A. Gervasi, M. La Rocca, and G. Ventura (2020). Strike-Slip Earthquakes at the Northern Edge of the Calabrian Arc Subduction Zone, *Seismol. Res. Lett.* XX, 1–13, doi: 10.1785/0220200251.

The corner frequencies of the target event are estimated at the different stations, using unilateral and bilateral rupture processes.

Unilateral model of pulse-type rupture (e.g., [Haskell, 1964](#); [Hirasawa and Stauder, 1965](#)).

$$T(\vartheta) = \frac{L}{v_r} - \frac{L \cos \vartheta}{\beta} = T_0 \left(1 - \frac{v_r}{\beta} \cos \vartheta \right),$$

Bilateral model ([Ben-Menahem, 1961](#); [Hirasawa and Stauder, 1965](#); [Boatwright, 2007](#))

$$C_d = \left(\frac{k^2}{(1 - \frac{v_r}{\beta} \cos \vartheta)^2} + \frac{(1 - k^2)}{(1 + \frac{v_r}{\beta} \cos \vartheta)^2} \right)^{1/2},$$

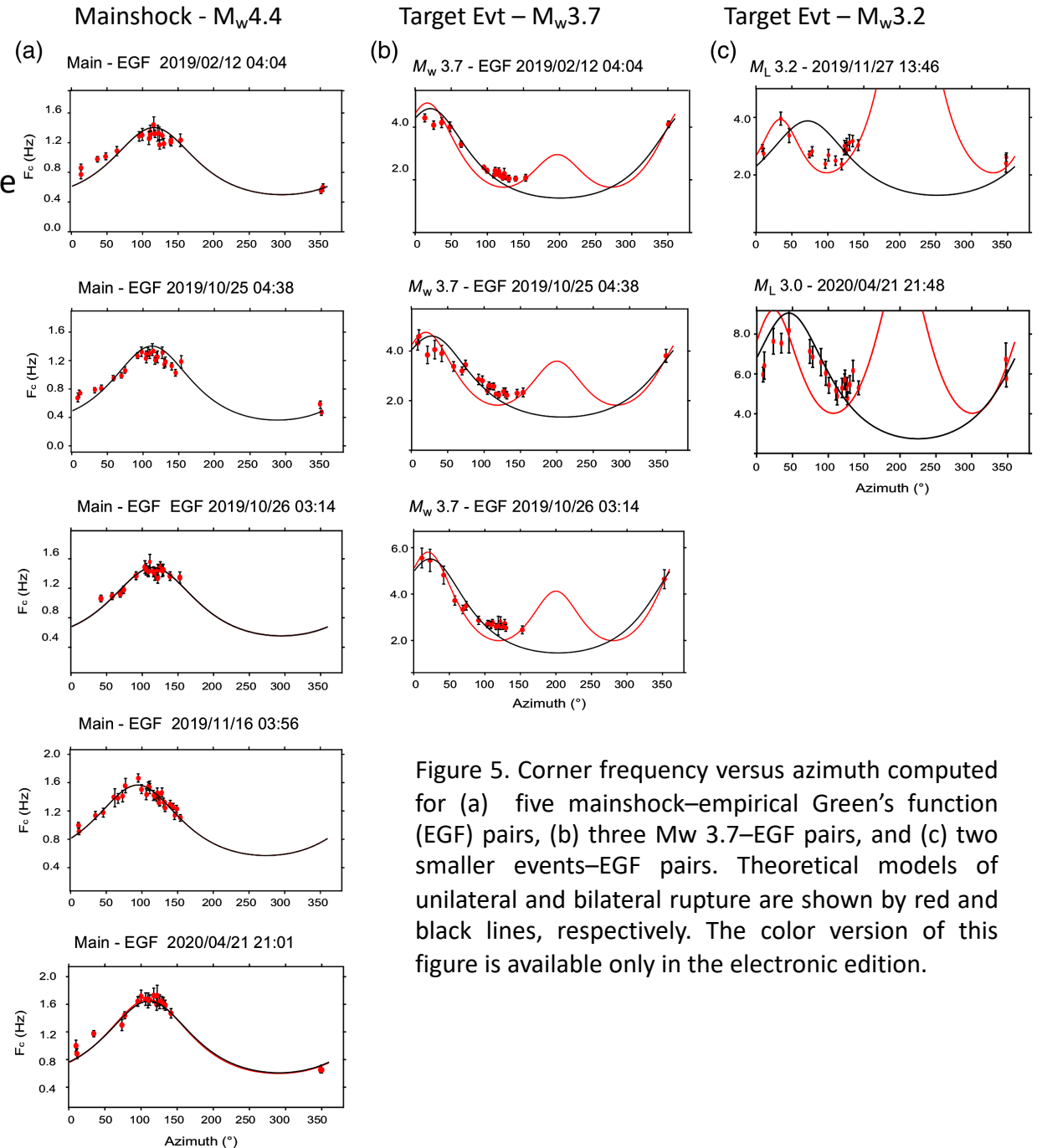
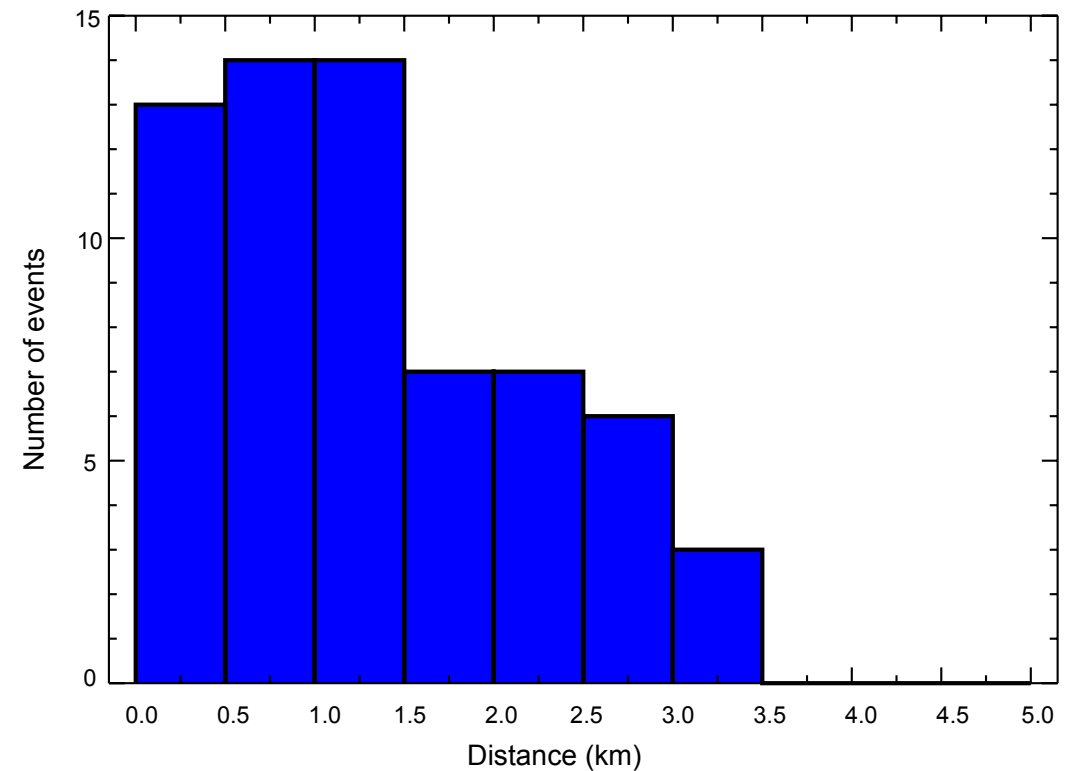


Figure 5. Corner frequency versus azimuth computed for (a) five mainshock–empirical Green’s function (EGF) pairs, (b) three $M_w 3.7$ –EGF pairs, and (c) two smaller events–EGF pairs. Theoretical models of unilateral and bilateral rupture are shown by red and black lines, respectively. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

Pollino 2012-2013

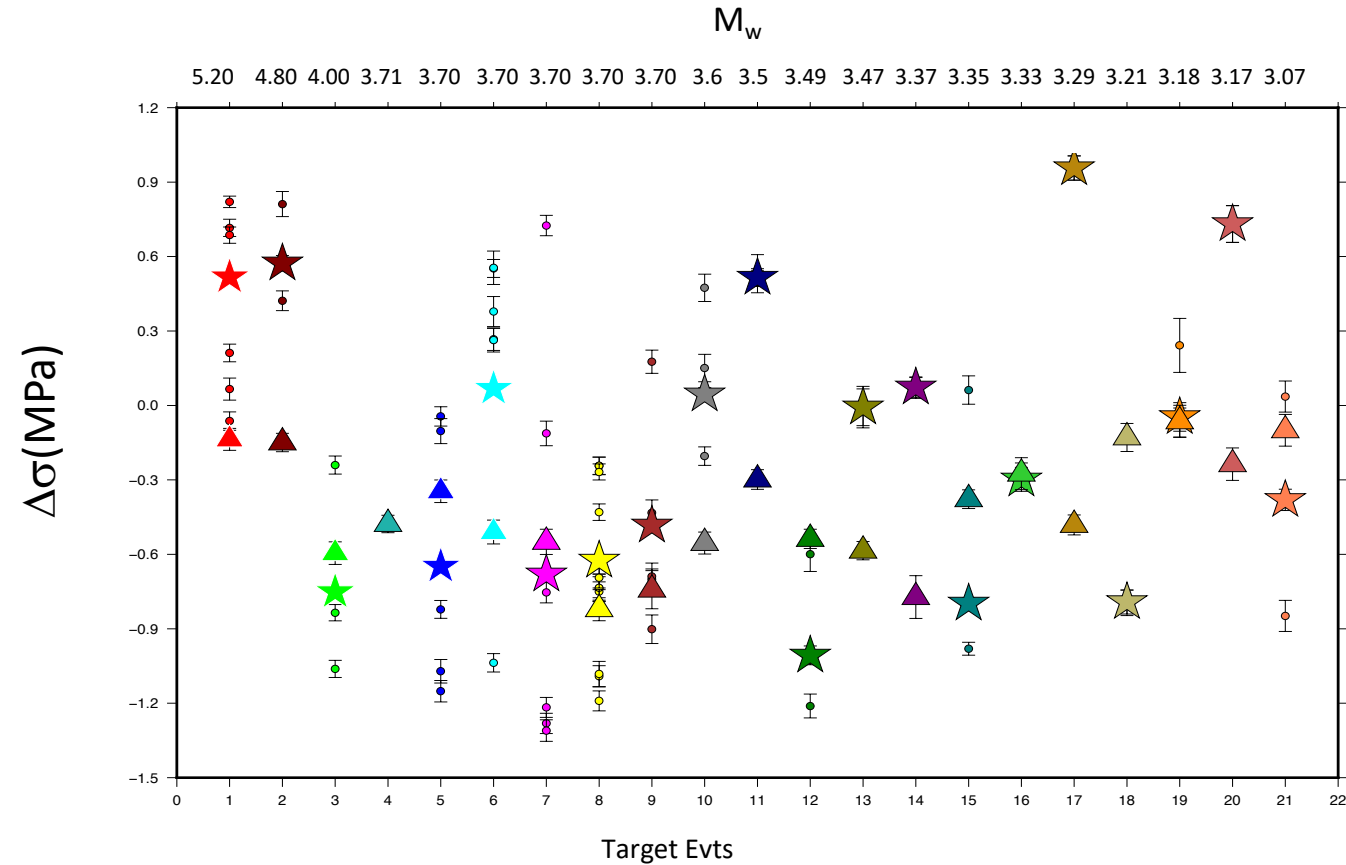
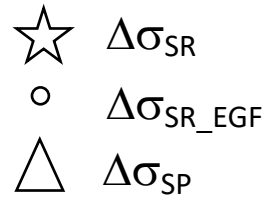
- Select 20 seismic events with $3.1 \leq M_w \leq 5.2$ with M_w known (TDMT) and 80 small events with $2.4 \leq M_L \leq 3.0$ and M_w unknown.
- Select 65 Target-EGF pairs
 - 85% EGFs selected are at distance < 2.5 km
 - 15% EGFs selected are at $2.5 \leq \text{distance} \leq 3.5$



Pollino 2012-2013

Mettiamo a confronto le seguenti stime di stress drop:

- ✓ $\Delta\sigma_{\text{SR, EGF}}$; $\Delta\sigma_{\text{SR}}$
- ✓ $\Delta\sigma_{\text{SP}}$



L' accordo tra $\Delta\sigma_{\text{SR}}$ e $\Delta\sigma_{\text{SP}}$ è terribile!

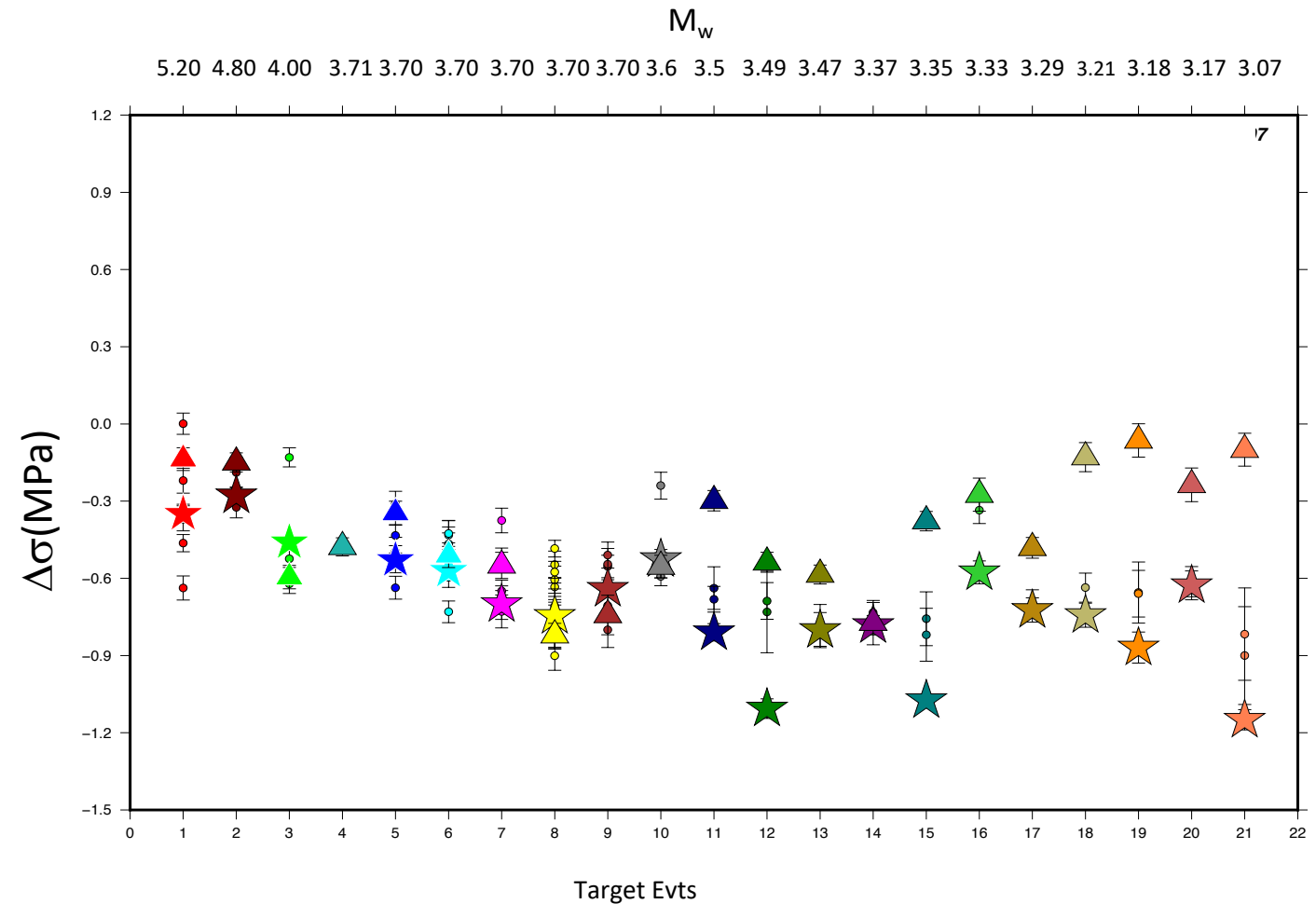
Modifica della procedura che stima lo stress drop dai Rapporti spettrali (SR) descritta in Calderoni et al., (2013) e Calderoni & Abercrombie ,(2023)

- Vincolo imposto su $\Delta\sigma_{\text{SR,EGF_LS}}$ in base alla di scala dedotta da Calderoni et al., (2013) per sequenza sismica del L' Aquila 2009

☆ $\Delta\sigma_{\text{SR_LS}}$
○ $\Delta\sigma_{\text{SR_LS_EGF}}$
△ $\Delta\sigma_{\text{SP}}$

L' accordo tra $\Delta\sigma_{\text{SR_SL}}$ and $\Delta\sigma_{\text{SP}}$ è buono:

- La Legge di scala è una buona approssimazione della legge di attenuazione, soprattutto in condizioni geologico-strutturali complesse



Stima della attenuazione anelastica delle onde S tramite il parametro di attenuazione kappa

Metodi di analisi:

- ✓ Procedura empirica semiautomatica di Lanzano et al., (2022), dove il parametro di attenuazione kappa è stato utilizzato per separare i contributi di sorgente, percorso e sito tramite una procedure di inversione proposta da Castro et al., (2022).
- ✓ Procedura proposta da Calderoni et al., (2019), dove l'attenuazione viene stimata tramite il parametro kappa e l'effetto di sito in funzione della frequenza, come scarto medio di evento e di stazione.

Confronto delle due procedure

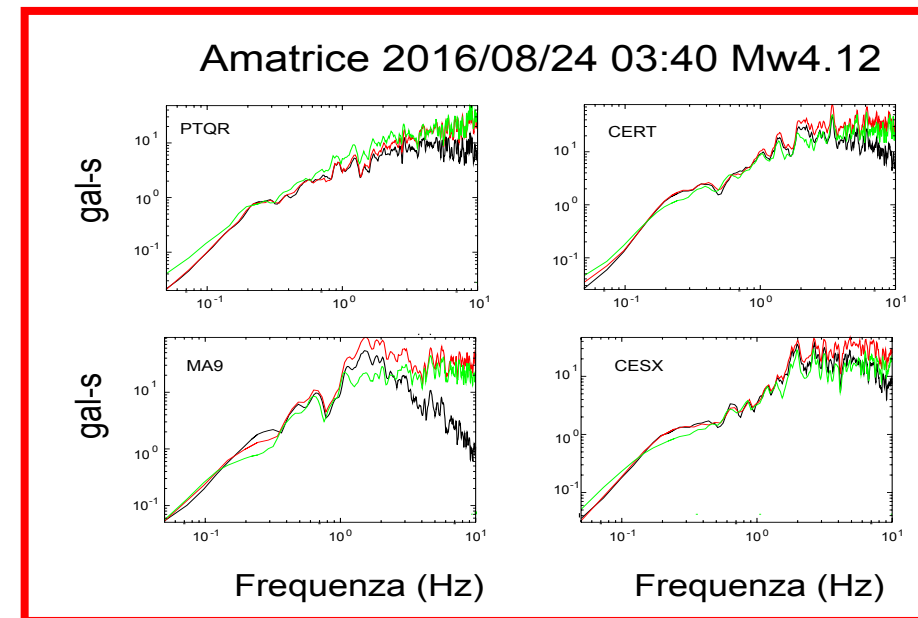
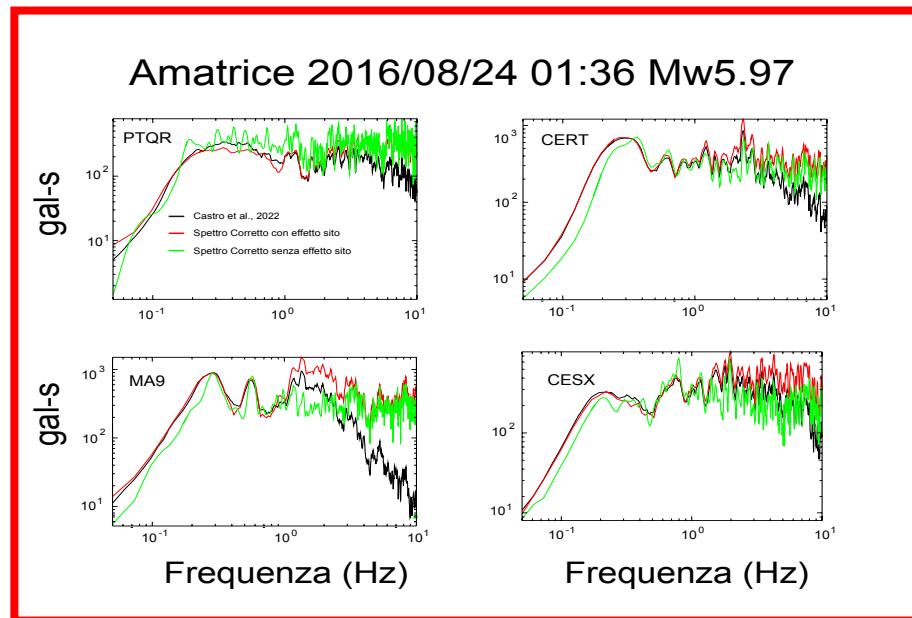
Spettri di accelerazione riportati alla sorgente di alcuni eventi della sequenza AVN:

$$V(f,R) = \underbrace{\Omega_0(f)}_{\text{Source}} \cdot \underbrace{2\pi f \cdot A(f,R)}_{\text{Attenuation along path}} \cdot \underbrace{H(f)}_{\text{Site}} \cdot \underbrace{I(f)}_{\text{Instrument}}$$

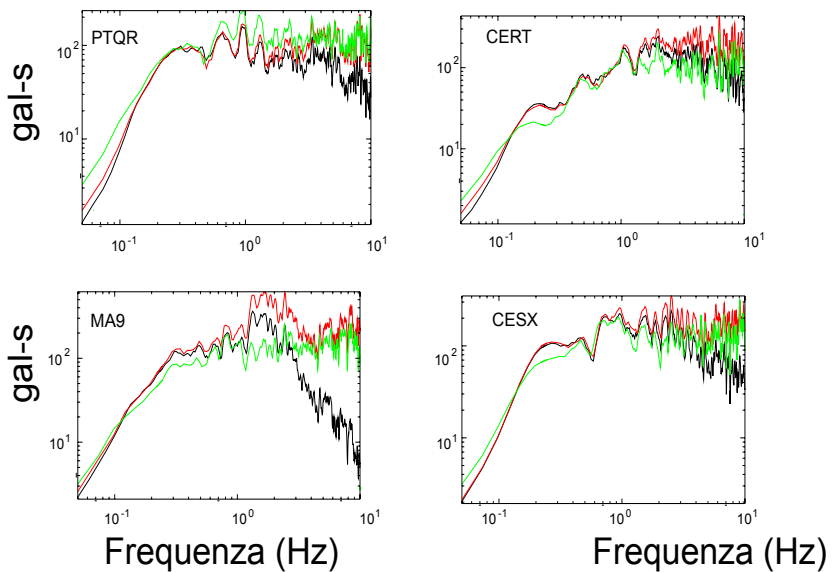
$$\Omega_0(f) = \frac{F_S R_{\theta,\varphi}}{4\pi\rho\beta^3} \frac{M_0}{1 + (f/f_0)^2}$$

$$A(f, R) = 1/R e^{-\pi\kappa f}$$

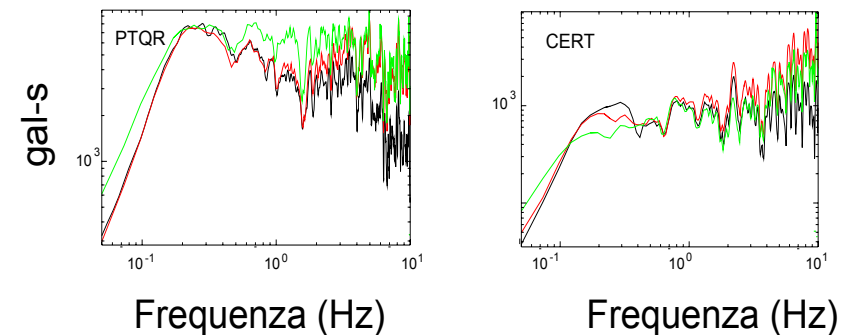
- la curva nera corrisponde allo spettro corretto mediante il parametro kappa => A(f,R) stimato da Castro et al., (2022)
- la curva verde corrisponde allo spettro corretto mediante il parametro kappa e senza considerare l'effetto di sito => A(f,R) kappa da Calderoni et al., (2019)
- la curva rossa corrisponde allo spettro corretto mediante il parametro kappa + l'effetto di sito => A(f,R) + H(f) stimato da Calderoni et al., (2019).



Visso 2016/08/24 02:33 Mw5.29



Norcia 2016/10/30 06:40 Mw6.50



La differenza tra le procedure messe a confronto consiste principalmente nella stima dell'effetto di sito che riesce a correggere l'attenuazione spettrale fino a 10 Hz.

Grazie per l'attenzione!