



https://gngts.ogs.it/sites/default/files/PROGRAMMA_GNGTS_2022.pdf

Sessione 3.3 - Metodi e Tecnologie Innovative

Citazione: Dal Moro G., 2022. *MASW? Oltre la soggettività nell'analisi delle onde di superficie: velocità di fase e gruppo nella ri-elaborazione FVS di un vecchio e complesso dataset multi-componente*. Atti del 40° convegno nazionale GNGTS (Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida), Trieste (Italy), 27-29 Giugno 2022

MASW? Oltre la soggettività nell'analisi delle onde di superficie: velocità di fase e gruppo nella ri-elaborazione FVS di un vecchio e complesso dataset multi-componente

Giancarlo Dal Moro

*Institute of Rock Structure and Mechanics - Academy of Sciences of the Czech Republic
Prague, Czech Republic*

dalmoro@irms.cas.cz / gdm@winmasw.com

keywords: onde di superficie; onde di Rayleigh; onde di Love; MASW multi-componente; FVS (*Full Velocity Spectrum*); analisi congiunta; velocità di fase; velocità di gruppo; HVSR; HS (*Holistic analysis of Surface waves*)

Introduzione

Gli sviluppi nel campo dell'acquisizione e analisi delle onde di superficie, hanno di fatto reso privo di un chiaro ed univoco significato il noto acronimo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). Tale acronimo, infatti, non risulta più in grado di definire nulla di puntuale: che genere di (combinazione di) geofoni connettiamo ai canali (M)? Che analisi (A) svolgiamo? Quali onde (SW) consideriamo?

Il lavoro presenta i risultati della ri-elaborazione delle onde di Rayleigh di un vecchio dataset multi-componente acquisito con strumentazione dalle caratteristiche che oggi sono da considerarsi obsolete (acquisitore a 16 bit e geofoni con bassa sensibilità – 0.28 V/cm/s) e originariamente analizzato secondo l'approccio congiunto classico a curve modali (interpretate) in Dal Moro (2011). I dati delle due componenti (Z e R) dell'onda di Rayleigh sono qui riconsiderati secondo una tecnica che consente di andare oltre la soggettività delle interpretazioni degli spettri di velocità ed ottenere una soluzione finale (il profilo della velocità delle onde di taglio - V_s) significativamente robusta.

Nel lavoro qui illustrato, gli spettri di velocità sono considerati non tramite interpretazione (soggettiva) delle curve modali ma secondo l'approccio FVS (*Full Velocity Spectrum*) che, in modo analogo a quello considerato da Dou and Ajo-Franklin (2014), consente di riprodurre l'effettiva coerenza degli spettri su tutta la matrice frequenza-velocità (Dal Moro, 2014; 2019). È da sottolineare che, in termini generali, gli spettri di velocità delle componenti verticale (Z) e radiale (R) sono differenti e forniscono dunque informazioni complementari che, grazie all'approccio FVS, risultano utili a meglio definire il profilo V_s . Inoltre, al fine di incrementare la profondità investigata, l'analisi FVS degli spettri di velocità è svolta congiuntamente all'HVSR (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) (Arai and Tokimatsu, 2005).

Il *dataset* considerato è stato raccolto nella media pianura friulana, in un'area in cui complesse alternanze di sedimenti limosi, sabbiosi e ghiaiosi (occasionalmente parzialmente cementati) possono creare importanti inversioni di velocità (strati più rigidi sopra a strati più teneri) e, anche a causa di non irrilevanti variazioni laterali, spettri di velocità particolarmente complessi.

Dati e analisi

Per quanto la definizione delle velocità di fase richieda un numero di canali decisamente inferiore, il *dataset* multi-componente qui considerato fu acquisito considerando 24 canali con spaziatura 2 m e *offset* minimo pari a 4 m. Gli spettri delle velocità di fase delle componenti verticale (Z) e radiale (R) sono mostrati in Fig. 1 unitamente alla curva HVSR e ai risultati dell'inversione congiunta.

È da notare come entrambe le componenti si caratterizzano per il fatto che, tranne una piccola porzione di modo fondamentale attorno ai 25-30 Hz, tutta l'energia si riferisce altrimenti a modi superiori (confronta con Dal Moro, 2011): il segnale che caratterizza gli

spettri di velocità per le frequenze inferiori a circa 22 Hz rappresenta di fatto la coalescenza di vari modi superiori e la sua continuità non deve indurre a ritenere sia riferito ad un unico modo (per una panoramica su questi aspetti vedi Dal Moro, 2014).

I sismogrammi sintetici utilizzati per l'analisi FVS sono computati tramite somma modale (Panza, 1985; Hermann, 2013) e l'inversione è svolta sulla base dei criteri del fronte di Pareto (Ramík and Vlach, 2002; Pardalos et al., 2008; Dal Moro et al., 2015).

La correttezza del modello identificato appare evidente dalla sua generale coerenza rispetto tutti i tre osservabili considerati ed è anche confermata dall'analisi delle onde di Love.

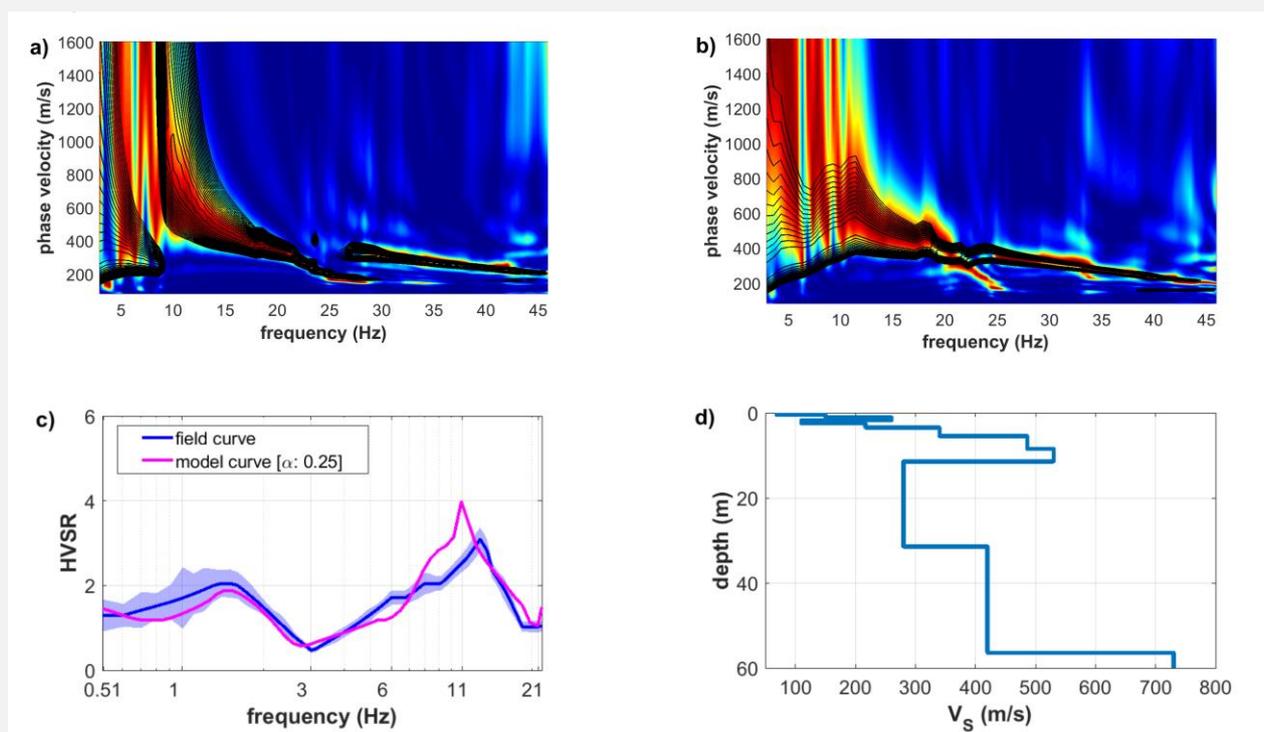


Figura 1. Analisi congiunta degli spettri delle velocità di fase delle componenti Z e R (approccio FVS) e della curva HVSR: a) componente Z - velocità di fase dei dati di campagna (colori di sfondo) e del modello identificato (linee di *contour* nere); b) componente R - velocità di fase dei dati di campagna (colori di sfondo) e del modello identificato (linee di *contour* nere); c) HVSR di campagna e del modello (il parametro α indica la quantità di onde di Love utilizzate nella modellazione dell'HVSR - Arai and Tokimatsu, 2004); d) modello V_s identificato dall' inversione congiunta.

Al fine di delineare una procedura efficace per la determinazione non ambigua del modello di sottosuolo è possibile fare un ulteriore passo recuperando ed aggiornando in chiave FVS (Dal Moro, 2018a) il metodo più classico con cui, specie in studi crostali, viene in sismologia analizzata la propagazione delle onde di superficie. Oltre all'analisi delle velocità di fase (la

cui definizione richiede l'utilizzo di dati *multi offset*), è infatti possibile analizzare le velocità di gruppo definibili considerando i dati raccolti da un unico sensore (dati *single offset* elaborati secondo l'analisi frequenza-tempo - e.g. Levshin et al., 1972; Ritzwoller and Levshin, 2002).

Nel presente caso, unitamente alla curva HVSR possiamo dunque definire le velocità di gruppo delle due componenti dell'onda di Rayleigh riferendoci alle tracce di un unico *offset*. In Fig. 2 sono riportati i risultati delle analisi eseguite considerando le velocità di gruppo delle componenti Z e R riferite all'*offset* 48 m. Il confronto con i risultati ottenuti considerando le velocità di fase (dati *multi offset* di Fig. 1) mostra l'evidente equivalenza dei due approcci, ponendo dunque in evidenza le potenzialità dell'analisi FVS multi-componente delle velocità di gruppo anche nell'analisi di dati complessi come quelli qui considerati.

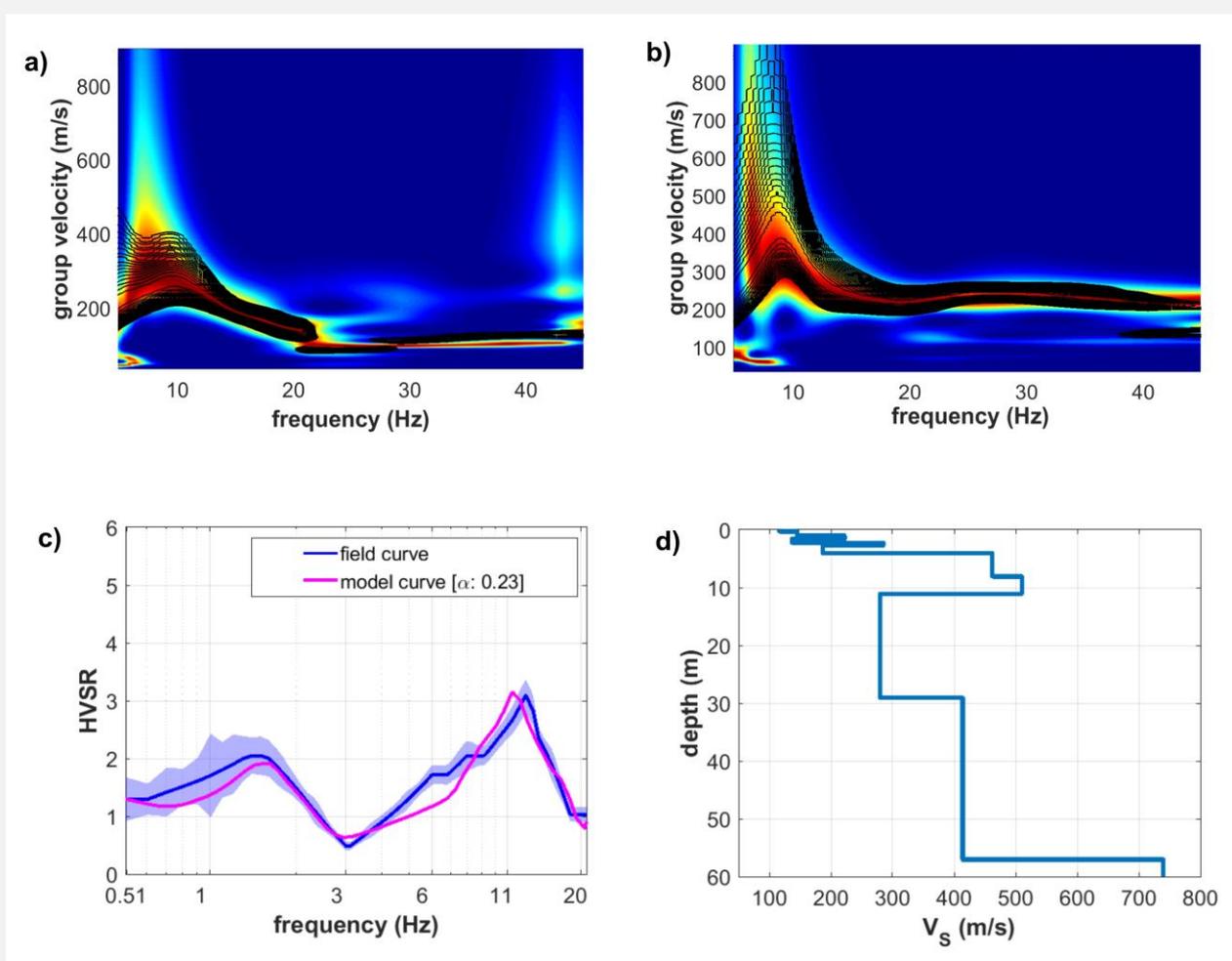


Figura 2. Analisi congiunta degli spettri delle velocità di gruppo delle componenti Z e R (analisi FVS) e della curva HVSR. Medesimi dati considerati per le analisi delle velocità di fase riportate in Fig. 1.

In termini generali, sono due gli aspetti che vanno considerati nella valutazione dei risultati di un'inversione svolta secondo le procedure sopra delineate:

- 1) un'inversione congiunta è sempre ed inevitabilmente un *compromesso* e non è possibile trovare un modello perfetto rispetto tutti gli osservabili considerati; cionondimeno il modello determinabile risulta necessariamente più robusto (Dal Moro and Puzilli, 2017);
- 2) la presenza di variazioni laterali (che non possono essere prese in considerazione dall'analisi della dispersione) può rendere ulteriormente difficile la ricerca di un buon *match* per tutti gli osservabili considerati (nell'area in esame tali variazioni sono certamente presenti e rivelate dalle differenze nelle curve HVSR determinate in diversi punti dell'area attorno allo stendimento).

Considerazioni conclusive

Riguardo le caratteristiche degli spettri di velocità osservati nel sito in esame, l'evidenza che entrambe le componenti dell'onda di Rayleigh risultino dominate dai modi superiori in modo così deciso può far sorgere la domanda su quale sia il motivo per cui ciò accade. A questo proposito vengono spesso invocate inversioni di velocità presenti nel sottosuolo (strati con V_s inferiori a quelle degli strati superiori) ma, sulla base di una lettura critica di varie modellazioni, tale ipotesi si dimostra mancante di validità generale. Nello specifico dei dati qui esaminati, consideriamo la modellazione illustrata in Fig. 3 in cui sono riportati gli spettri di velocità di fase delle tracce sintetiche computate per le componenti Z, R e T considerando un modello che differisce da quello identificato durante le analisi dei dati di campagna (Fig. 1) unicamente per il fatto che sono state rimosse tutte le inversioni di velocità. Come si nota, l'andamento dell'energia (cioè il fatto che a dominare siano i modi superiori) non cambia in modo significativo.

L'eccitazione dei modi risulta un fenomeno molto comune ma non attribuibile a singoli e specifici aspetti. Oltre alla geometria dello stendimento, i fattori critici risultano il gradiente di velocità nella parte più superficiale, l'azione dell'attenuazione (bassi valori dei fattori di qualità favoriscono l'accentuarsi dei modi superiori - Panza, 1989 e Dal Moro et al., 2015) e alti valori del rapporto di Poisson.

Da un punto di vista prettamente metodologico possiamo rimarcare i seguenti punti:

- 1) il *dataset* di campagna qui considerato non potrebbe essere risolto correttamente assumendo l'approccio classico basato sull'interpretazione (soggettiva) delle curve modali della sola componente Z in quanto, a frequenze inferiori a circa 22 Hz il segnale, pur continuo, è di fatto riferito ad una pluralità di modi (la continuità di un segnale nello spettro di velocità non significa che tale segnale si riferisce ad un singolo modo): interpretare come modo fondamentale la dispersione a frequenze inferiori a 28 Hz porterebbe ad una pesante sovrastima delle V_s ;

- 2) l'utilizzo delle velocità di fase (che richiedono l'acquisizione di dati *multi offset*) o di gruppo (dati a singolo *offset*) risulta necessariamente equivalente;
- 3) l'elaborazione FVS si rivela utile per l'analisi sia delle velocità di fase che di gruppo;
- 4) l'analisi FVS della dispersione non richiede alcuna interpretazione degli spettri di velocità e consente dunque di evitare la soggettività dell'approccio standard basato sull'interpretazione delle curve modali;
- 5) l'elaborazione FVS risulta particolarmente importante durante l'analisi delle velocità di gruppo al fine di risolvere i problemi legati all'analisi frequenza-tempo ("deformazione" degli spettri dovuta all'azione dei filtri Gaussiani utilizzati per la determinazione degli spettri di velocità di gruppo – Dal Moro et al., 2019).

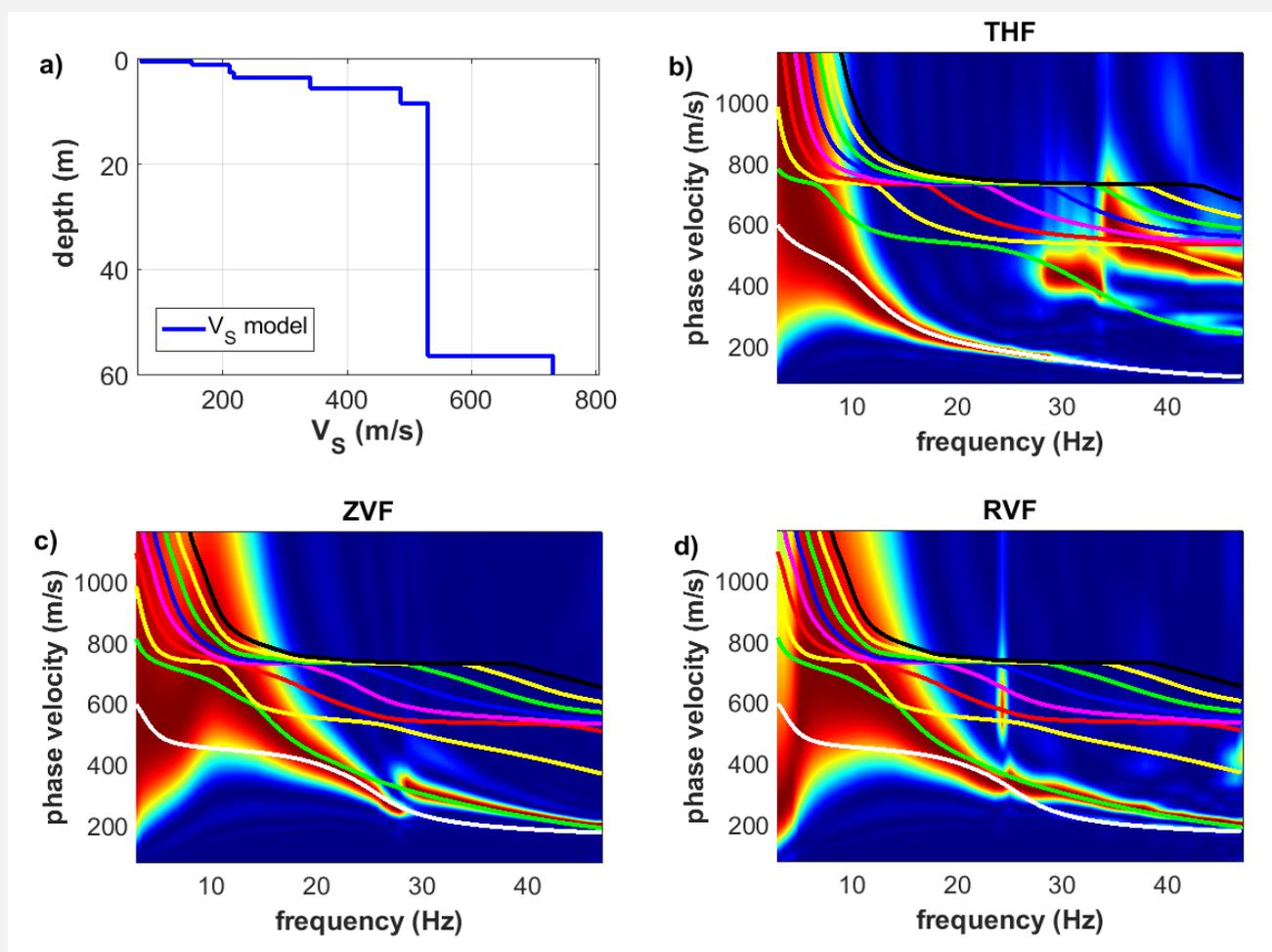


Figura 3. Modello (plot a) derivato da quello identificato durante l'analisi congiunta delle velocità di fase (Fig. 1d) ma privo di qualsiasi inversione di velocità. Mostrati gli spettri delle velocità di fase delle componenti T (onde di Love – plot b), Z (c) e R (d) con, in sovrapposizione, le curve modali dei primi 9 modi.

6)

Si può infine considerare che nel processo di inversione è anche possibile aggiungere ulteriori osservabili tra i quali lo spettro di velocità delle onde di Love e la curva RPM (*Rayleigh-wave Particle Motion*) che rappresenta il reale moto della particella al passaggio dell'onda di Rayleigh e, dipendendo dalle condizioni del sottosuolo, risulta utile a vincolare ulteriormente il processo di inversione (Dal Moro et al., 2018a; 2018b; 2019; Dal Moro, 2020).

Tutto questo mostra come l'acronimo MASW abbia perso oramai qualsiasi preciso connotato e i risultati ottenibili dall'approccio standard basato sull'interpretazione (soggettiva) delle curve modali della sola componente verticale siano di fatto superati (per precisione ed oggettività) da quelli ottenibili con diversi tipi di analisi a partire da dati multi-componente raccolti anche ad un unico *offset* dalla sorgente (velocità di gruppo multi-componente). Va da sé che l'utilizzo di un (unico) sensore triassiale consente di definire le velocità di gruppo di tutte le componenti (Z, R e T), della curva RPM e dell'HVSR (e.g. Dal Moro and Puzzilli, 2017; Dal Moro et al., 2018a; 2018b; Dal Moro, 2020).

Riferimenti

- Arai H. and Tokimatsu K.; 2005: *S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum*. Bull. Seismol. Soc. Am., **95**, 1766-1778.
- Arai H. and Tokimatsu K.; 2004: *S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum*. Bull. Seismol. Soc. Am., **94**, 53-63.
- Dal Moro G.; 2020: *Efficient Joint Analysis of Surface Waves and Introduction to Vibration Analysis: Beyond the Clichés*, Springer, ISBN 978-3-030-46303-8, 273 pages
- Dal Moro G.; 2019: *Surface wave analysis: improving the accuracy of the shear-wave velocity profile through the efficient joint acquisition and Full Velocity Spectrum (FVS) analysis of Rayleigh and Love waves*. Exploration Geophysics, **50**, 408-419, DOI: 10.1080/08123985.2019.1606202
- Dal Moro G., Al-Arifi N. and Moustafa S.R.; 2019: *On the efficient acquisition and holistic analysis of Rayleigh waves: Technical aspects and two comparative case studies*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **125**, 105742, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105742>
- Dal Moro G., Moustafa S.R. and Al-Arifi N., 2018a. *Improved Holistic Analysis of Rayleigh Waves for Single- and Multi-Offset Data: Joint Inversion of Rayleigh-Wave Particle Motion and Vertical- and Radial-Component Velocity Spectra*. Pure and Applied Geophysics, **175**, 67-88
- Dal Moro G.; 2018b: *Effective Active and Passive Seismics for the Characterization of Urban and Remote Areas: Four Channels for Seven Objective Functions*. Pure and Applied Geophysics, **176**, 1445–1465, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2043-2>.
- Dal Moro G. and Puzzilli L. M.; 2017: *Single- and Multi-Component Inversion of Rayleigh Waves Acquired by a Single 3-Component Geophone: an Illustrative Case Study*, Acta Geodyn. Geomater., **14**, 431–444, DOI: 10.13168/AGG.2017.0024
- Dal Moro G., Moura R.M. and Moustafa S.; 2015: *Multi-component Joint Analysis of Surface Waves*. J. Appl. Geophysics, **119**, 128-138.
- Dal Moro G.; 2011: *Some Aspects about Surface Wave and HVSR Analyses: a Short Overview and a Case Study*. BGTA - Bollettino Geofisica Teorica e Applicata, **52**, 241-259 (invited paper)
- Dal Moro G.; 2014: *Surface wave analysis for near surface applications*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 252 pp. ISBN 978-0-12-800770-9
- Dou S. and Ajo-Franklin J.B.; 2014: *Full-wavefield inversion of surface waves for mapping embedded low-velocity zones in permafrost*. Geophysics, **79**, EN107–EN124.
- Herrmann R.B.; 2013: *Computer programs in seismology: an evolving tool for instruction and research*. Seismol Res Lett, **84**, 1081–1088.

- Levshin A.L., Pisarenko V.F. and Pogrebinsky G.A.; 1972: *On a frequency-time analysis of oscillations*. Ann. Geophys., **28**, 211–218.
- Panza G.F.; 1985: *Synthetic seismograms: the Rayleigh waves modal summation*. J Geophys, **58**, 125–145.
- Panza G.F.; 1989: *Attenuation Measurements by Multimode Synthetic Seismograms*. In: Cassinis, R., Nolet, G., Panza, G.F. (eds) Digital Seismology and Fine Modeling of the Lithosphere. Ettore Majorana International Science Series. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6759-6_5
- Pardalos P.M., Migdalas A. and Pitsoulis L. (eds); 2008: *Pareto optimality, game theory and equilibria*. Springer, New York. ISBN 978-0-387-77247-9
- Ramík J. and Vlach M.; 2002: *Pareto-optimality of compromise decisions*. Fuzzy Sets and Systems, **129**, 119–127.
- Ritzwoller M.H. and Levshin A.L.; 2002: *Estimating shallow shear velocities with marine multicomponent seismic data*. Geophysics, **67**, 1991–2004.