

Misure GPS e cinematica alpina: il caso del Trentino (Italia nord-orientale)

Dino Buffoni ^(a), Franco Chistè ^(a), Paolo Fabris ^(b), David Zuliani ^(b),
Giuliana Rossi ^(b) e Alfio Viganò ^(c)

^(a) Provincia autonoma di Trento, Servizio Catasto, Ufficio Geodetico, Via Gilli 4, 38121 Trento, dino.buffoni@provincia.tn.it, franco.chiste@provincia.tn.it

^(b) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale OGS, Centro di Ricerche Sismologiche CRS, Via Treviso 55, 33100 Udine, pfabris@inogs.it, dzuliani@inogs.it, grossi@inogs.it

^(c) Provincia autonoma di Trento, Servizio Geologico, Ufficio Studi sismici e geotecnici, Via Vienna 17, 38121 Trento, alfio.vigano@provincia.tn.it

Riassunto

I dati della Rete GNSS TPOS (*Trentino POsitioning Service*) del Trentino (Italia nord-orientale) sono stati elaborati al fine di ottenere, nel periodo temporale 2006–2017, le stime giornaliere delle coordinate stazione e le velocità di spostamento secondo i sistemi di riferimento ITRF08 ed EURA. Per cercare di migliorare la stima delle velocità sono stati rimossi gli effetti idrologici stagionali semi-annuali ed annuali, nonché possibili oscillazioni pluriannuali. I relativi spostamenti sono stati calcolati su una griglia con spaziatura 0.25°. I risultati confermano una direzione di spostamento verso NNE/NE, con velocità di spostamento orizzontale che al massimo raggiungono 1 mm/anno, in accordo con il quadro geodinamico e sismotettonico di riferimento.

Dati e metodi

I dati (*file RINEX, Receiver INdependent EXchange format*) della Rete GNSS TPOS (*Trentino POsitioning Service*) del Trentino (Italia nord-orientale) sono stati utilizzati per calcolare stime giornaliere delle coordinate stazione e le relative velocità, secondo due sistemi di riferimento: il sistema internazionale ITRF08 (*International Terrestrial Reference Frame 2008*, http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008) e quello europeo EURA (Altamimi et al., 2012).

Il *dataset* della Rete TPOS è disponibile in sessioni giornaliere e con campionamento a 30 secondi (2880 osservazioni quotidiane); le registrazioni sono liberamente accessibili all'indirizzo www.mobilekat.provincia.tn.it/tpos. I dati considerati in questo studio sono relativi al periodo 2006–2017 (11 anni). Le giornate elaborate sono 4183 e hanno prodotto 4137 soluzioni, pari al 98,9% dei dati iniziali, a conferma di un *dataset* formalmente corretto.

Il calcolo, che include la stima delle posizioni 3D relative delle stazioni GNSS e delle orbite satellitari, è stato effettuato utilizzando il pacchetto *software* GAMIT/GLOBK (versione 10.60; Herring et al., 2015), sviluppato dal

Massachusetts Institute of Technology (web.mit.edu), dall'*Harvard University* (www.harvard.edu) e dallo *Scripps Institution of Oceanography* (scripps.ucsd.edu). Il calcolo delle serie temporali e delle velocità GPS è stato trasferito dai server locali dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale-OGS al server MARCONI ad alta prestazione presso il Consorzio Interuniversitario CINECA (www.cineca.it), così da poter includere il maggior numero di siti per la stabilizzazione della soluzione ed ottimizzare i tempi di elaborazione.

Le stazioni GNSS della Rete TPOS sono state inquadrate rispetto a:

- sistema di riferimento globale ITRF08, riferito al centro di massa della Terra con asse Z passante per l'asse terrestre ed assi X e Y giacenti sul piano equatoriale. L'epoca di riferimento per le soluzioni dell'ITRF08 è il 2008. I file di configurazione utilizzati per tale sistema di riferimento sono itr08.apr (file di coordinate a priori) e stab site.global (file di stabilizzazione) (Herring et al., 2015);
- sistema di riferimento europeo EURA, che evidenzia i movimenti della crosta terrestre rispetto alla placca euroasiatica, considerata come un blocco fisso. In questo modo la rappresentazione dello spostamento non risente del movimento delle placche litosferiche a livello globale, ma si riferisce alla sola placca europea, permettendo così un'analisi di maggiore dettaglio dei movimenti tettonici a scala regionale e locale. I file di configurazione utilizzati per il sistema di riferimento fisso di Eurasia sono itr08 eura.apr e stab sites.igscore (Herring et al., 2015).

Ai segnali delle stazioni della Rete TPOS sono state applicate le elaborazioni standard del software GAMIT/GLOBK. La Figura 1 mostra le serie temporali analizzate per la stazione PARR (in Trentino meridionale), secondo i due sistemi di riferimento considerati.

Oltre all'analisi standard sopra descritta si è cercato di migliorare ulteriormente la stima delle velocità, riducendo sia il rumore presente nelle serie temporali che le oscillazioni dovute ad alcuni salti temporali (per le stazioni MOCA e PEJO).

Sono quindi stati rimossi gli effetti dovuti al carico idrologico, presenti nelle registrazioni GNSS su un ampio intervallo di frequenze (Blewitt e Lavallée, 2002; Bennett, 2008). Tramite la metodologia descritta in Rossi et al. (2016; 2017; 2018) sono stati presi in considerazione effetti stagionali semi-annuali ed annuali, nonché possibili oscillazioni pluriannuali, tramite l'applicazione dell'approccio ibrido parametrico di Chamoli et al. (2014). Questo metodo comporta la sottrazione dei termini stagionali per identificare variazioni del carico idrologico a diverse scale temporali, mentre il fattore di scala annuale e semi-annuale per le oscillazioni cicliche viene stimato direttamente dalle osservazioni GNSS con il metodo dei minimi quadrati.

Per la stima del carico idrologico si è fatto uso del modello *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) che incorpora osservazioni, da satellite e da terra, della temperatura della superficie terrestre, di umidità, precipitazioni,

radiazione, vento e pressione. Nel caso specifico, la mancanza del carico oceanico tra i fattori considerati non è considerata rilevante. In particolare, sono stati estratti i dati corrispondenti a ogni sito e sono stati poi interpolati per ottenere un campionamento giornaliero ([http:// loading.u-strasbg.fr/displa/ index.html](http://loading.u-strasbg.fr/displa/index.html)). Gli spostamenti sono stati calcolati su una griglia di 0.25° dai dati GLDAS/Noah (Rodell et al., 2004). Il metodo è quello descritto da van Dam e Wahr (1987) e van Dam et al. (2001). Le deformazioni elastiche sono state calcolate con l'approccio delle funzioni di Green di Boy e Hinderer (2006). A titolo di esempio, la Figura 2 riporta la serie temporale di TREN NORD (la stazione è collocata a Trento, in Valle dell'Adige), prima e dopo la correzione.

Il processo di raffinamento dei dati ha previsto anche una rimozione dei salti presenti nelle serie temporali delle stazioni MOCA e PEJO, per permettere la stima delle loro velocità di deformazione.

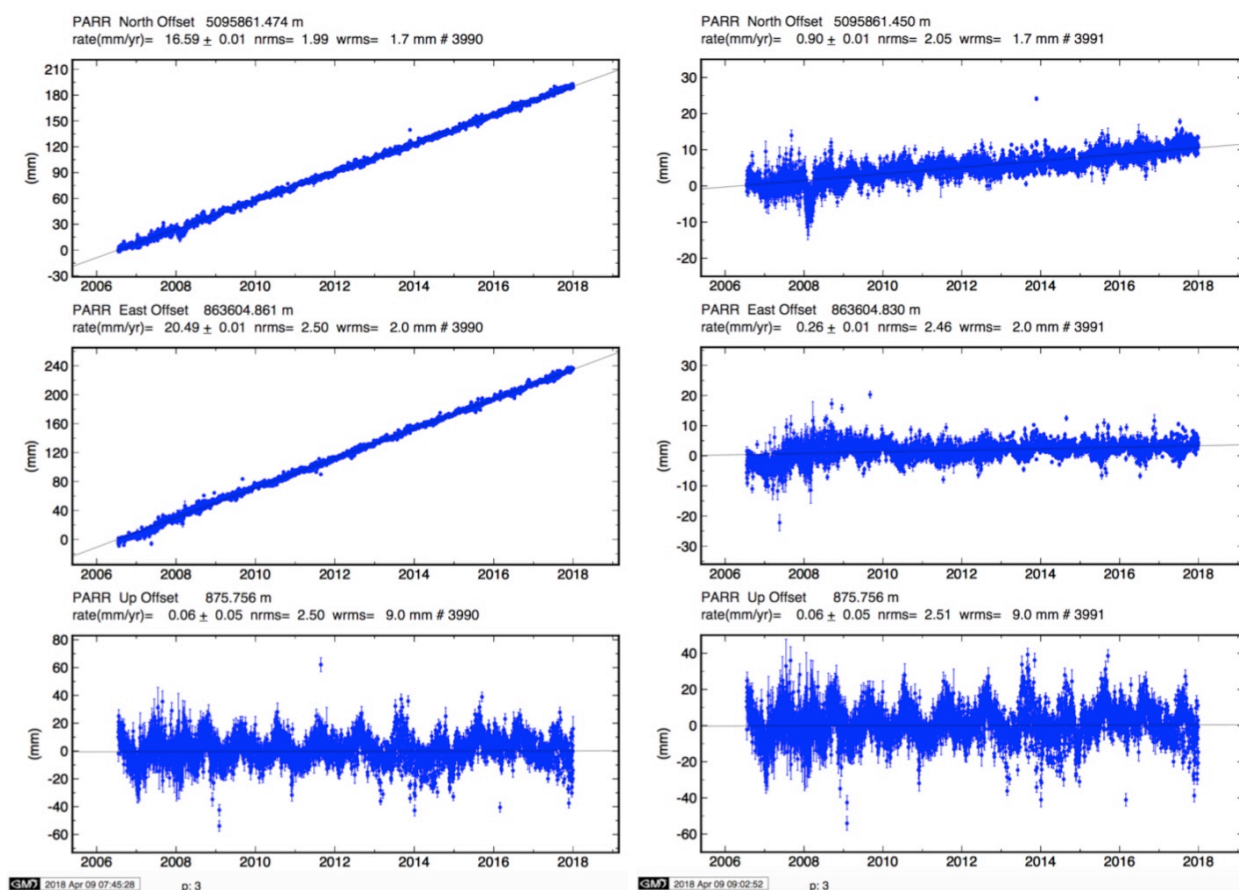


Figura 1 – Serie temporali della stazione PARR secondo il sistema di riferimento internazionale ITRF08 (a sinistra) ed europeo EURA (a destra). I grafici riportano lo spostamento giornaliero stimato, in direzione nord, est e verticale. Ogni punto e relativa barra d'errore sono ottenuti dalle 2880 osservazioni quotidiane. La pendenza della retta interpolante, calcolata secondo Bevington e Robinson (1992), fornisce una stima di velocità e relativo errore (sui grafici si veda "rate(mm/yr)") accanto ai parametri NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e WRMS (errore quadratico medio pesato).

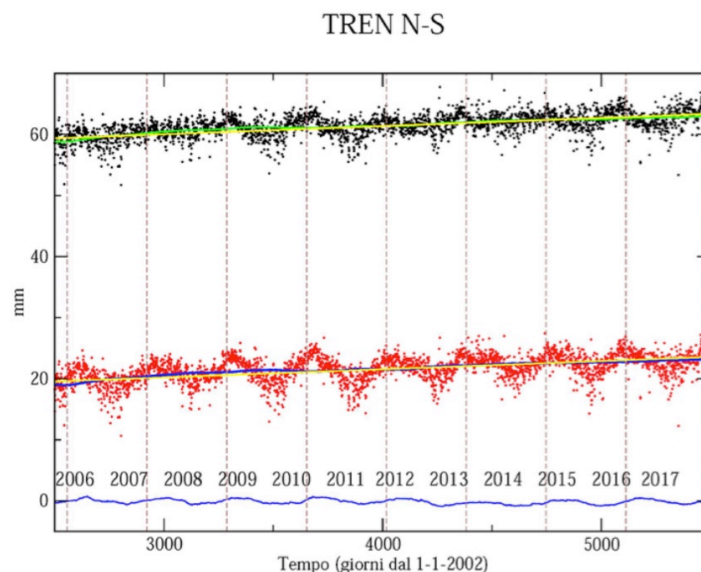


Figura 2 – Serie temporale della stazione TREN NORD, prima e dopo la correzione (si veda il testo per i dettagli). In rosso la serie originale, in nero quella dopo la correzione per il carico idraulico (traslata per questioni grafiche). In blu e verde le stesse, filtrate per eliminare ogni residuo delle componenti ad alta frequenza, ed in giallo l'approssimazione lineare. In colore blu, il carico idraulico stimato per TREN NORD (<http://loading.u-strasbg.fr/displa/index.html>).

Risultati e discussione

Le mappe di Figura 3 mostrano le velocità orizzontali calcolate per l'area di studio, secondo i due sistemi di riferimento considerati. In Tabella 1 ed in Figura 4 sono inoltre riportate le velocità calcolate, nel sistema di riferimento EURA, dopo aver effettuato le correzioni descritte nella sezione precedente.

I tassi di deformazione stimati nel sistema internazionale ed in quello europeo sono coerenti con i campi di velocità riportati in letteratura (per es., Avallone et al., 2010; Devoti et al., 2011; Houlié et al., 2018) (Figura 3). Le velocità nel sistema di riferimento europeo sono significativamente più basse rispetto a quelle del sistema internazionale e, per quanto riguarda la componente orizzontale, si riducono in media a circa 0.7 mm/anno, mantenendo però una direzione coerente (Figura 3). Tale comportamento è amplificato nel sistema internazionale dove i tassi di deformazione ammontano a circa 26 mm/anno su tutte le stazioni (circa 40 volte maggiori rispetto a quelli di EURA) (Figura 3).

Il prevalente moto verso nord, ben visibile nel sistema di riferimento EURA, è in accordo con il quadro geodinamico della regione, situata al margine settentrionale della placca Adriatica (Viganò et al., 2015). Inoltre, le basse velocità orizzontali osservate sono in accordo con le osservazioni di letteratura e con l'attuale raccorciamento dell'area (Viganò et al., 2008; 2013).

Le direzioni di movimento mostrate in Figura 4 sono largamente coincidenti con quelle di Figura 3. La riduzione del rumore permette però una migliore stima del *trend* lineare ed un calcolo più corretto delle velocità. In quasi tutti i casi le variazioni sono comunque contenute, per valori delle velocità orizzontali compresi tra 0.25 e 1.9 mm/anno (Figura 4). Il valore minimo è alla stazione MOCA (si ritiene però sia influenzato dal gran numero di interruzioni nella serie

temporale), il valore massimo alla stazione PEJO. Quest'ultima si distingue anche in termini di direzione che, a differenza delle altre, è in direzione sud-est. Tale evidenza è interpretata come dovuta allo specifico sito di installazione della stazione, posta in corrispondenza di un'area attualmente in deformazione a seguito di processi di tipo gravitativo. Per la maggior parte delle altre stazioni l'orientazione non cambia in modo apprezzabile rispetto a quanto già mostrato in Figura 3. Una leggera rotazione antioraria del vettore velocità è osservabile solamente per le stazioni RONC e ROVE.

Il quadro di Figura 4 costituisce un'utile base informativa per studi di tipo sismotettonico e geodinamico in area trentina. I modelli sismotettonici derivanti dalle informazioni sismotettoniche e geologiche ad oggi disponibili (Viganò et al., 2015) possono essere infatti meglio vincolati a partire dai dati di deformazione superficiale (si faccia riferimento, ad esempio, a Caporali et al., 2018), soprattutto se il più possibile depurati dagli effetti legati a processi di natura non-tettonica. Un maggiore dettaglio ed una maggiore accuratezza dei dati, sia sismotettonici che di deformazione superficiale, sono infatti necessari per migliorare la rappresentatività dei modelli e per meglio discriminare il ruolo di zone di possibile partizione della deformazione, all'interno di quest'area delle Alpi Meridionali tettonicamente complessa.

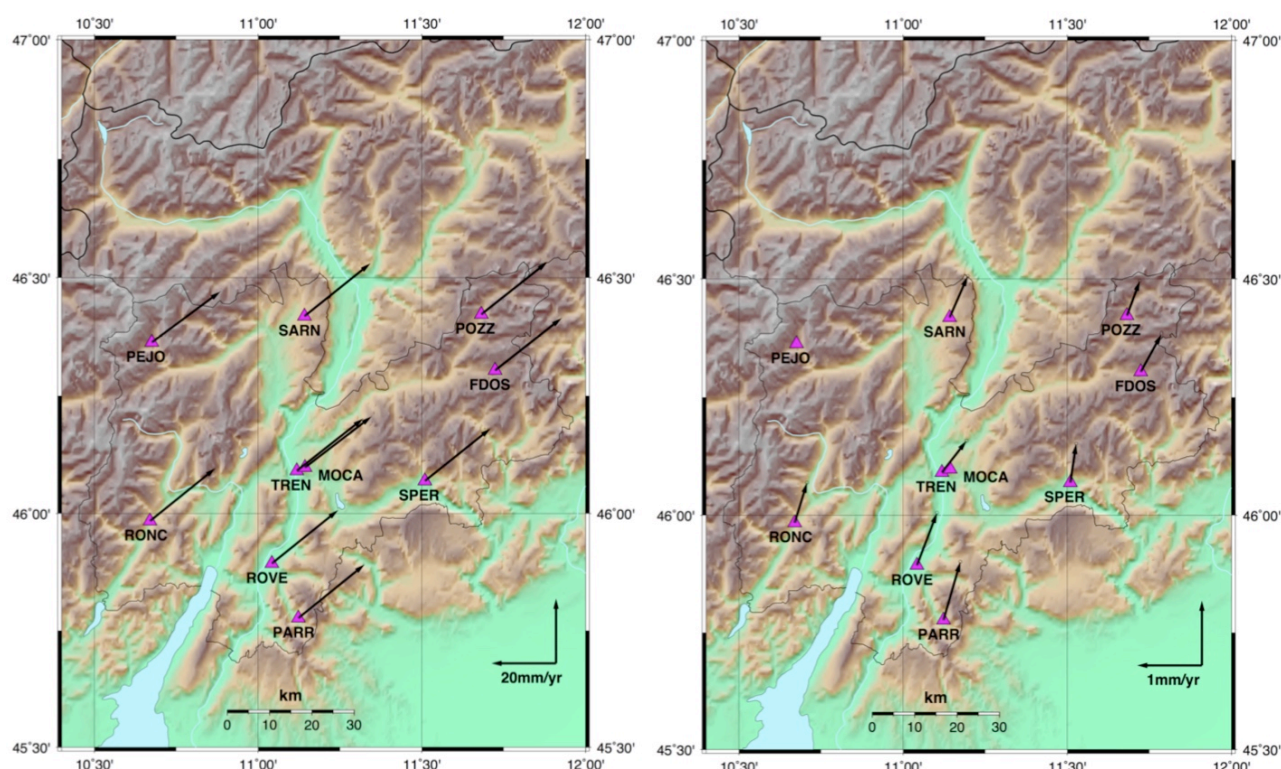


Figura 3 – Mappa delle velocità orizzontali nel sistema di riferimento internazionale ITRF08 (a sinistra) ed europeo EURL (a destra). Le ellissi d'errore, presentate con l'intervallo di confidenza del 95%, non sono visibili, in quanto troppo piccole rispetto ai vettori velocità. Nella mappa di destra non sono presenti i vettori per le stazioni MOCA e PEJO in quanto, a causa di anomalie, non possono essere calcolati per semplice interpolazione lineare sui dati disponibili.

EURA	Vel N [mm/anno]	Vel E [mm/anno]	Vel U [mm/anno]
FDOS	0.54 ± 0.02	0.31 ± 0.01	-1.27 ± 0.08
MOCA	0.07 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.77 ± 0.36
PARR	0.95 ± 0.01	0.32 ± 0.01	0.99 ± 0.05
PEJO	-1.54 ± 0.04	1.07 ± 0.02	2.42 ± 0.05
POZZ	0.61 ± 0.01	0.19 ± 0.01	3.14 ± 0.05
RONC	0.75 ± 0.01	0.09 ± 0.01	2.55 ± 0.05
ROVE	0.93 ± 0.01	0.21 ± 0.01	2.70 ± 0.06
SARN	0.73 ± 0.01	0.33 ± 0.01	0.41 ± 0.05
SPER	0.62 ± 0.01	0.07 ± 0.01	2.56 ± 0.05
TREN	0.49 ± 0.01	0.38 ± 0.01	1.19 ± 0.05

Tabella 1 – Valori di velocità secondo il sistema di riferimento europeo EURA (Altamimi et al., 2012) dopo le correzioni per le interruzioni, gli effetti stagionali e di carico idrologico. Si veda per confronto la Figura 4.

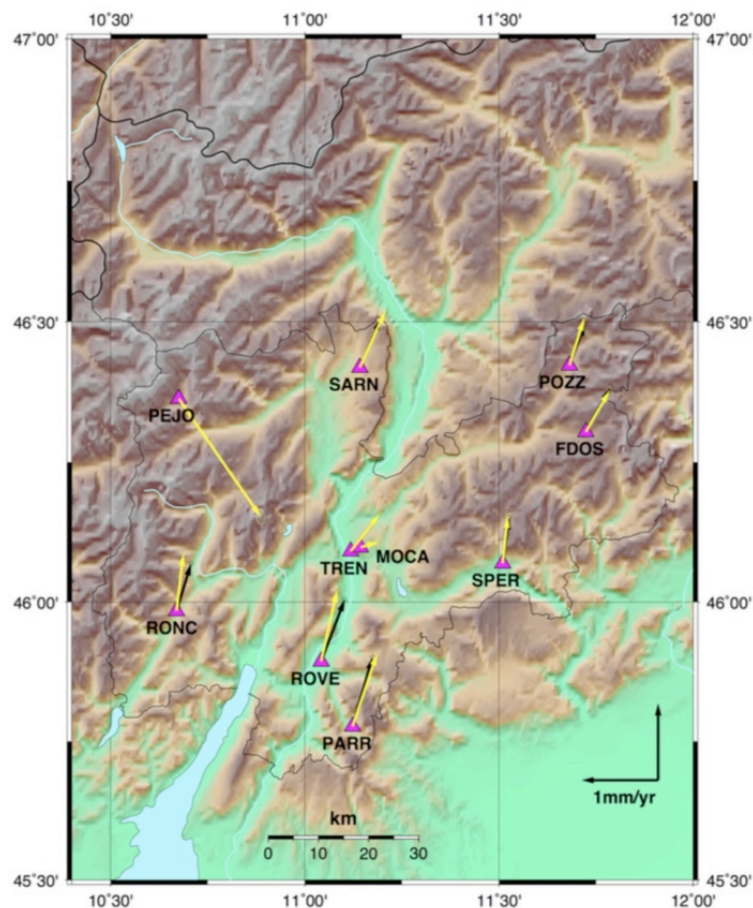


Figura 4 – Mappa delle velocità nel sistema di riferimento europeo EURA dopo le correzioni per le interruzioni, gli effetti stagionali ed il carico idrologico (freccie gialle), sovrapposte a quelle originali (freccie nere) di Figura 3. Si veda per confronto la Tabella 1.

Bibliografia

- Caporali A., Braitenberg C., Montone P., Rossi G., Valensise G., Viganò A., Zurutuza J. (2018), "A quantitative approach to the loading rate of seismogenic sources in Italy", *Geophysical Journal International*, 213(3): 2096-2111
- Houlié N., Woessner J., Giardini D., Rothacher M. (2018), "Lithosphere strain rate and stress field orientations near the alpine arc in Switzerland", *Scientific Reports*, 8(1): 2045-2322
- Rossi G., Fabris P., Zuliani D. (2018), "Overpressure and fluid diffusion causing non-hydrological transient GNSS displacements", *Pure and Applied Geophysics*, 175(5): 1869-1888
- Rossi G., Zuliani D., Fabris P. (2017), "Corrigendum to «Long-term GNSS measurements from the northern Adria microplate reveal fault-induced fluid mobilization»", *Tectonophysics*, 694: 486-487
- Rossi G., Zuliani D., Fabris P. (2016), "Long-term GNSS measurements from the northern Adria microplate reveal fault-induced fluid mobilization", *Tectonophysics*, 690: 142-159
- Herring T. A., King R. W., Floyd M. A., McClusky S. C. (2015), *GAMIT Reference Manual*, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences MIT, 77 Massachusetts Ave, Cambridge, MA 02139, Stati Uniti
- Viganò A., Scafidi D., Ranalli G., Martin S., Della Vedova B., Spallarossa D. (2015), "Earthquake relocations, crustal rheology, and active deformation in the central-eastern Alps (N Italy)", *Tectonophysics*, 661: 81-98
- Chamoli A., Lowry A. R., Jeppson T. N. (2014), "Implications of transient deformation in the northern basin and range, western United States", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(5): 4393-4413
- Viganò A., Scafidi D., Martin S., Spallarossa D. (2013), "Structure and properties of the Adriatic crust in the central-eastern Southern Alps (Italy) from local earthquake tomography", *Terra Nova*, 25: 504-512
- Altamimi Z., Métivier L., Collilieux X. (2012), "ITRF2008 plate motion model", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7) B07402
- Devoti R., Esposito A., Pietrantonio G., Pisani A. R., Riguzzi F. (2011), "Evidence of large scale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary", *Earth and Planetary Science Letters*, 311(3): 230-241
- Avallone A., Selvaggi G., D'Anastasio E., D'Agostino N., Pietrantonio G., Riguzzi F., Serpelloni E., Anzidei M., Casula G., Cecere G., D'Ambrosio C., Martino P.

- D., Devoti R., Falco L., Mattia M., Rossi M., Obrizzo F., Tammaro U., Zarrilli L. (2010), "The RING network: improvement of a GPS velocity field in the central mediterranean", *Annals of Geophysics*, 53(2): 39-54
- Bennett R. A. (2008), "Instantaneous deformation from continuous GPS: contributions from quasi-periodic loads", *Geophysical Journal International*, 174(3): 1052-1064
- Viganò A., Bressan G., Ranalli G., Martin S. (2008), "Focal mechanism inversion in the Giudicarie-Lessini seismotectonic region (Southern Alps, Italy): insights on tectonic stress and strain", *Tectonophysics*, 460: 106-115
- Boy J.-P., Hinderer J. (2006), "Study of the seasonal gravity signal in superconducting gravimeter data", *Journal of Geodynamics*, 41(1): 227-233
- Rodell M., Houser P. R., Jambor U., Gottschalck J., Mitchell K., Meng C.-J., Arsenault K., Cosgrove B., Radakovich J., Bosilovich M., Entin J. K., Walker J. P., Lohmann D., Toll D. (2004), "The global land data assimilation system", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3): 381-394
- Blewitt G., Lavallée D. (2002), "Effect of annual signals on geodetic velocity", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B7): ETG 9-1-ETG 9-11
- van Dam T., Wahr J., Milly P. C. D., Shmakin A. B., Blewitt G., Lavallée D., Larson K. M. (2001), "Crustal displacements due to continental water loading", *Geophysical Research Letters*, 28(4): 651-654
- Bevington P. R., Robinson D. K. (1992), *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, McGraw-Hill, New York
- van Dam T. M., Wahr J. M. (1987), "Displacements of the Earth's surface due to atmospheric loading: Effects on gravity and baseline measurements", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B2): 1281-1286