Il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009: deformazione cosmica da dati GPS

Marco Anzidei, Valentina Cannelli, Roberto Devoti, Alessandra Esposito, Alessandro Galvani, Daniele Melini, Grazia Pietrantonio, Federica Riguzzi, Vincenzo Sepe, Enrico Serpelloni

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, via di Vigna Murata 605, 00143 Roma, tel. 0651860660, e-mail: Grazia.Pietrantonio@ingv.it

Riassunto

A seguito dell'evento sismico di magnitudo 4 del 30 marzo 2009, l'unità funzionale "Analisi Dati per la Geodesia" dell'INGV decise di installare 5 ricevitori GPS in acquisizione continua in prossimità della zona epicentrale, su altrettanti capisaldi della rete *CaGeoNet* (Central Apennine Geodetic Network): CADO (Castello d'Ocre), CPAG (Castel Paganica), ROIO (Roio), SELL (Sella di Corno) e SMCO (San Marco).

Tali ricevitori, in registrazione dal giorno 2 aprile 2009, hanno misurato direttamente gli spostamenti cosismici dovuti al terremoto del 6 aprile, di magnitudo Mw 6.3.

In questo lavoro presentiamo il campo di deformazione cosismica stimato analizzando i dati a 30 secondi di questi 5 siti GPS, localizzati in zona epicentrale, e di varie stazioni permanenti nell'area abruzzese e nelle regioni limitrofe. Gli spostamenti massimi osservati sono di circa 10 cm in planimetria e 15 cm in quota.

Gli spostamenti cosismici GPS sono stati modellati tramite un'inversione non lineare, basata sul modello di Okada, al fine di definire la geometria e la distribuzione di *slip* sulla faglia.

Abstract

After the March 30, Ml 4.0 event near L'Aquila, the group "Analisi Dati per la Geodesia" at INGV decided to install 5 GPS receivers on selected benchmarks of the CaGeoNet (Central Apennine Geodetic Network) network, bordering the L'Aquila basin: CADO (Castello d'Ocre), CPAG (Castel Paganica), ROIO (Roio), SELL (Sella di Corno) and SMCO (San Marco).

These receivers, continuously recording data since April 2, allowed a direct observation of the details of coseismic displacement related to the April 6, Mw 6.3 earthquake.

In this work we present the coseismic deformation of these 5 GPS sites, located in the epicentral area, and of other permanent sites in Abruzzo and surrounding regions. Maximum observed displacements are about 10 cm for the horizontal component and 15 cm for the vertical one.

The coseismic displacements have been modelled by a non linear inversion, based on the Okada model, with the aim to define fault geometry and slip distribution.

Introduzione

La porzione di Appennino centrale oggetto di questo studio, appartiene al dominio della piattaforma carbonatica meso-cenozoica laziale-abruzzese. Dal punto di vista strutturale l'area è caratterizzata dal sovrascorrimento verso est delle unità stratigrafiche, riconducibile ai processi di subduzione e di apertura del Mar Tirreno (Doglioni et al., 1998). La distribuzione della sismicità, registrata per la crosta superiore, segue l'andamento ad arco della catena montuosa ed è caratterizzata da meccanismi focali distensivi lungo antiche strutture tettoniche compressive (Bigi et al., 2002). Gli eventi sismici principali presentano meccanismi focali normali consistenti con il *trend* estensionale regionale NE-SW riportato da vari autori tra cui (Serpelloni et al., 2005; Devoti et al., 2008).

Dalla fine di dicembre 2008, il bacino dell'Aquila è stato interessato da una lunga sequenza sismica culminata nell'evento del 6 aprile di magnitudo Mw 6.3, preceduto dall'evento di magnitudo Ml 4.0 del 30 marzo. Si tratta del più forte terremoto in questa regione dopo l'evento distruttivo del 1703 (Boschi et al., 2000). Il meccanismo focale del *mainshock* è quello di una faglia normale quasi pura con asse T orientato NE-SW (INGV, 2009).
Dopo il terremoto di Colfiorito del 1997, una densa rete GPS nell'area dell'Appennino centrale (*CaGeoNet* - Central Apennine Geodetic Network) è stata implementata e ripetutamente misurata (Anzidei et al., 2005) per aumentare la risoluzione spaziale della deformazione crostale ottenibile dalle sole stazioni GPS permanenti di quell'area.
Dopo la scossa di magnitudo 4 del 30 marzo 2009, si è deciso di installare 5 ricevitori GPS in acquisizione continua in prossimità della zona epicentrale, su altrettanti capisaldi della rete *CaGeoNet*: CADO (Castello d'Ocre), CPAG (Castel Paganica), ROIO (Roio), SELL (Sella di Corno) e SMCO (San Marco). Queste stazioni, in funzione dal giorno 2 Aprile, hanno registrato direttamente il *mainshock* del 6 Aprile e ci hanno permesso di stimare con grande accuratezza la deformazione cosismica nel *near field.*

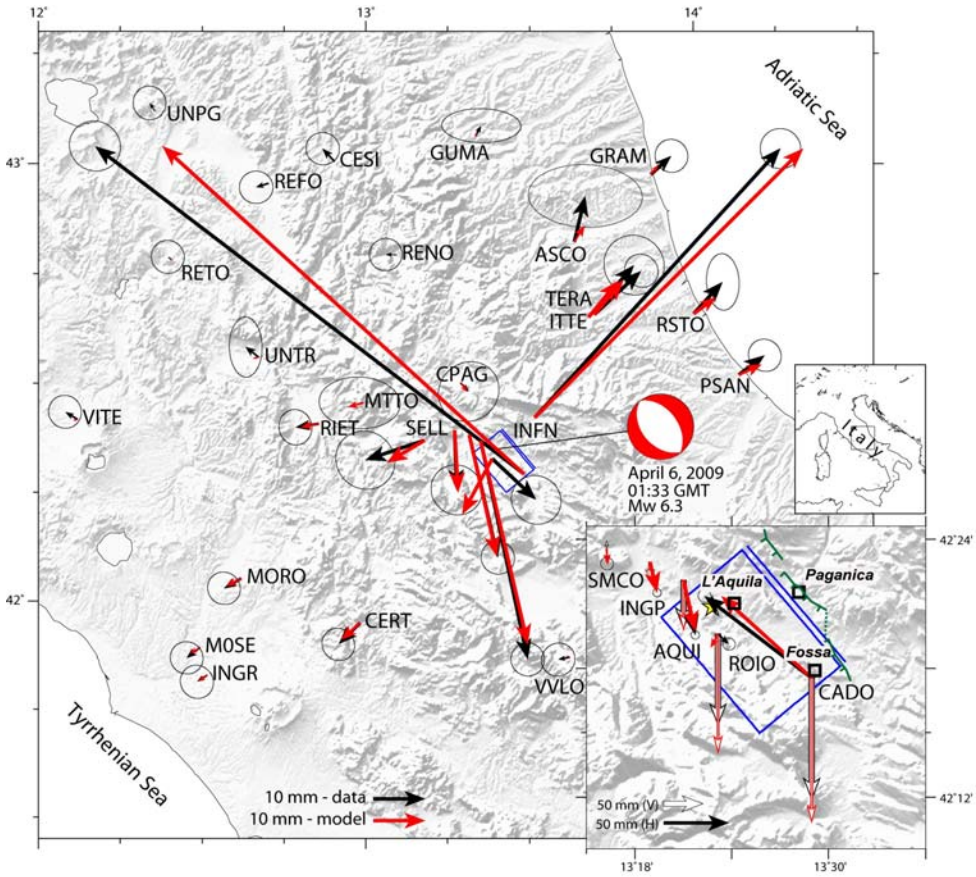

Figura 1 – Spostamenti cosismici GPS (vettori neri) e modellati (vettori rossi). Il riquadro in basso a destra mostra un ingrandimento dell'area epicentrale con gli spostamenti orizzontali e verticali e la faglia modellata.

Analisi dati GPS

I dati analizzati sono relativi ad un intervallo temporale di 12 giorni, di cui 10 precedenti e 2 successivi al *mainshock* del 6 Aprile, avendo avuto cura di tagliare opportunamente i dati per non includere anche eventuali effetti dovuti all'*aftershock* principale (7 Aprile, 17:47 UTC, Ml 5.3).

La rete analizzata comprende 30 siti permanenti localizzati in Abruzzo e nelle regioni confinanti (appartenenti a varie reti gestite da diversi Enti) e 10 siti permanenti IGS più lontani (dall'Europa centrale al sud Italia) necessari per il successivo inquadramento della rete nel sistema di riferimento IGS05. Nell'analisi sono stati inoltre inclusi i dati dei 5 siti installati dall'INGV sui capisaldi della rete *CaGeoNet.*

Pochi giorni dopo il terremoto il campo di spostamento preliminare di tutti questi siti GPS era già stato reso disponibile *on line* (INGV, 2009).

I file *rinex* giornalieri a 30 secondi sono stati processati con il *software* Bernese 5.0 (Beutler et al., 2007) stimando per ogni stazione coordinate giornaliere e parametri troposferici orari.

Nell'analisi le orbite precise e i parametri di rotazione terrestre IGS sono stati fissati e le coordinate a priori delle stazioni sono state vincolate a 10 metri, al fine di ottenere delle soluzioni *loosely constrained.* Il sistema di riferimento IGS05 è stato successivamente imposto vincolando la rete attraverso una trasformazione di Helmert a 4 parametri (traslazioni e scala), ottenendo in questo modo le serie temporali giornaliere delle stazioni. Le posizioni medie prima del terremoto e gli *offset* cosismici di tutte le stazioni sono stati stimati simultaneamente a minimi quadrati, usando la matrice di covarianza completa. Gli errori associati agli *offset* cosismici sono stati riscalati secondo la tecnica di analisi del rumore descritta in (Williams, 2003).

Gli errori medi ottenuti sugli spostamenti cosismici sono di 3.8 mm in planimetria e 7.4 mm in quota. Lo spostamento di INFN è allineato al movimento del *footwall* (7.03±0.36 cm in direzione NE e 2.60±0.55 cm in quota). La stazione di CADO mostra lo spostamento cosismico maggiore (10.39±0.45 cm in direzione NW e -15.64±1.55 cm in quota). Gli altri siti della rete *CaGeoNet* mostrano spostamenti di pochi centimetri, così come le altre stazioni permanenti nell'area (Figura 1, Tabella 1).

Sito			**Valori osservati**						**Valori modellati**		
SITO	Long	Lat	E (mm)	±E (mm)	N (mm)	±N (mm)	Up (mm)	± Up (mm)	E (mm)	N (mm)	Up (mm)
AQUI	13.3502	42.3682	9.0	2.1	-42.4	2.1	-61.9	5.8	9.0	-39.5	-64.0
CADO	13.4826	42.2926	-82.2	3.2	63.6	3.2	-156.4	15.5	-69.3	63.6	-185.8
CPAG	13.2884	42.5012	1.6	3.9	-1.7	3.8	15.8	13.7	1.3	-1.8	3.9
INGP	13.3156	42.3825	5.5	2.1	-23.9	2.1	-25.5	6.9	5.3	-23.7	-21.6
INFN	13.5158	42.4208	47.1	2.6	52.2	2.6	26.0	5.5	51.5	52.2	15.9
ROIO	13.3859	42.3268	8.4	3.2	-8.0	3.1	-117.4	8.2	-5.8	-10.9	-153.1
SELL	13.1797	42.3691	-11.4	3.7	-3.8	3.7	7.3	17.3	-7.3	-4.4	-0.5
SMCO	13.2708	42.3927	0.4	3.2	-11.6	3.2	10.3	3.2	0.7	-12.1	-6.2

Tabella 1 – Coordinate ed offset cosismici osservati e modellati per le stazioni GPS del near field

Modello di sorgente

Al fine di stimare i parametri della sorgente sismica a partire dal dato di deformazione geodetica, è stata effettuata un'inversione non lineare basata sulla tecnica del *simulated annealing* (Ingber, 1989). Gli *offset* modellati sono stati calcolati con le soluzioni analitiche fornite da (Okada, 1992) per dislocazioni in un semi-spazio elastico.

Nell'inversione, la direzione di *strike* della faglia è stata fissata a 140° coerentemente con le stime del meccanismo focale e le evidenze geologiche (INGV, 2009); tutti gli altri parametri di faglia

sono stati stimati. I risultati dell'inversione sono riportati in Tabella 2 e la proiezione in superficie della sorgente è evidenziata con una *box* blu in Figura 1.
Il modello di sorgente è un meccanismo normale quasi puro, con una piccola componente laterale destra; i parametri di sorgente forniscono un "momento geodetico" $M_0 = \mu LWd = 3.2 \cdot 10^{18}$ Nm, dove μ = 26GPa è la rigidità elastica (Di Luzio et al., 2009) mentre L, W, d sono rispettivamente lunghezza, larghezza e *slip* della faglia. Questo risultato corrisponde ad una magnitudo momento Mw 6.3 in eccellente accordo con i risultati sismologici preliminari (http://eqinfo.eas.slu.edu/Earthquake_Center/MECH.IT/).
Le incertezze sui parametri di faglia riportate in tabella 2 sono state stimate con un approccio statistico basato sul metodo Monte Carlo.
Le rotture superficiali osservate lungo la faglia di Paganica (Falcucci et al, 2009) sono in ottimo accordo con la posizione e l'estensione superficiale del piano di faglia NW-SE risultanti dalla nostra inversione.
Gli spostamenti cosismici modellati (Tabella 1, Figura 1) sono in eccellente accordo con i dati sperimentali (χ^2/dof=1.5; *WRMS* dei residui 3.8 mm); il disaccordo sulla componente orizzontale di ROIO, localizzato sull'*hanging wall* della sorgente ottenuta, è probabilmente dovuto all'effetto di eterogeneità locali che interessano il bacino dell'Aquila (INGV, 2009). D'altra parte abbiamo verificato che i dati a nostra disposizione non ci permettono di risolvere un modello con distribuzione di *slip* non uniforme.

Parametro	**Valore di *best-fit***	**Deviazione standard**
Centro	42°19'14.7" N 13°25'11.2" E	0.73 km 0.36 km
Rake	-98.0°	1.9°
Slip	494.5 mm	29.1 mm
Strike (fissato)	140°	
Dip	55.3°	1.8°
Lunghezza	13.0 km	0.9 km
Larghezza	15.7 km	1.3 km

Tabella 2 – Parametri di sorgente stimati dall'inversione e deviazioni standard a 1 sigma

Conclusioni

L'installazione di 5 stazioni GPS prima del terremoto dell'Aquila del 6 Aprile 2009 ci ha permesso di stimare con grande accuratezza il campo di deformazione cosismica nel *near field*. I massimi *offset* cosismici orizzontali e verticali sono stati registrati alla stazione di CADO (10.39±0.45 cm e -15.64±1.55 cm rispettivamente). Deformazioni significative sono state osservate in un raggio di circa 60 km, in un ampio settore dell'Italia centrale, in accordo con il ben noto regime tettonico estensionale di lungo termine dell'Appennino centrale.
Un semplice modello di sorgente a *slip* uniforme ha fornito un buon *fit* dei dati osservati; inoltre tutti i parametri di faglia sono risultati ben vincolati, ad eccezione della larghezza, che è comunque entro le limitazioni intrinseche delle inversioni di dati GPS.
La sorgente invertita è un piano di faglia di 13x15.7 km^2 con *dip* SW di 55.3°. Dallo *slip* cosismico dei dati invertiti abbiamo stimato un "momento geodetico" corrispondente ad una magnitudo momento 6.3 in ottimo accordo con le stime sismologiche preliminari (INGV, 2009). La geometria della sorgente modellata è tipica delle faglie normali della catena appenninica (*strike* NW, *dip* 40°-50°). Infine lunghezza e posizione della faglia invertita sono congruenti con le rotture superficiali osservate nell'area di Paganica-Fossa (E-SE dell'Aquila, traccia verde in Figura 1).

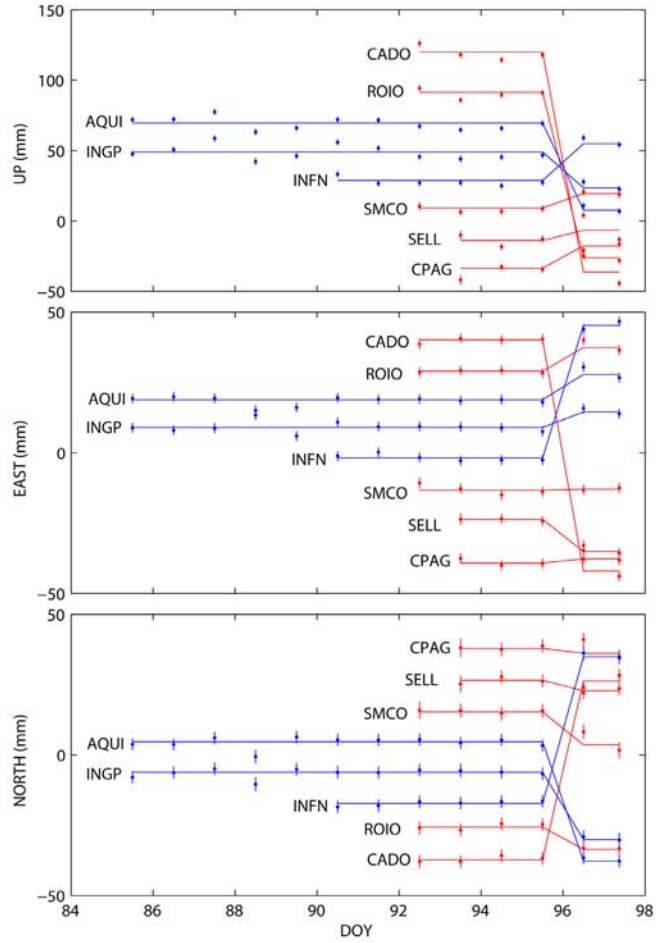

Figura 2 – Serie temporali delle stazioni GPS del near field; in blu le 3 stazioni permanenti, in rosso i 5 siti della rete CaGeoNet

Bibliografia

Anzidei M., Baldi P., Pesci A., Esposito A., Galvani A., Loddo F., Cristofoletti P., Massucci A., Del Mese S. (2005), "Geodetic deformation across the Central Apennines from GPS data in the time span 1999-2003", *Ann. Geophys*., 48, 2.

Anzidei M., Boschi E., Cannelli V., Devoti R., Esposito A., Galvani A., Melini D., Pietrantonio G., Riguzzi F., Sepe V., Serpelloni E. (2009), "Coseismic deformation of the destructive April 6, 2009 L'Aquila earthquake (central Italy) from GPS data", *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17307.

Beutler et al. (2007), *Bernese GPS Software*, in: R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl eds., Astronomical Institute University of Bern.

Bigi S., Doglioni C., Mariotti G. (2002), "Thrust vs normal fault decollements in the Central Apennines", *Boll. Soc. Geol. It.,* Vol. Spec. n.1, 161-166.

Boschi E., Guidoboni E., Ferrrari G., Mariotti D., Valensise G., Gasperini P. (2000), "Catalogue of strong Italian earthquakes from 461 B.C. to 1997", *Ann. Geofis*., 43, 609-868.

Devoti R., Riguzzi F., Cuffaro M., Doglioni C. (2008), "New GPS constraints on the kinematics of the Apennines subduction", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 273, 163–174.
Di Luzio E., Mele G., Tiberti M.M., Cavinato G.P., Parotto M. (2009), "Moho deepening and shallow upper crust delamination beneath the central Apennines", *Earth Planet. Sci. Lett.,* 280, 1/12.
Doglioni C., Mongelli F., Pialli G. (1998), "Boudinage of the alpine belt in the Apenninic back-arc", *Mem. Soc. Geol*., 52, 457-468.
Falcucci E., Gori S., Peronace E., Fuselli G., Moro M., Saroli M., Giaccio B., Messina P., Naso G., Scardia G., Sposato A., Voltaggio M., Galli P., Galadini F. (2009), "Surface faulting due to the L'Aquila Earthquake of April 6th, 2009", *Seism. Res. Lett.*, accettato.
Ingber L. (1989), "Very fast simulated reannealing", *Math. Comput. Model.*, 12, 967–993.
INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2009), *La sequenza sismica de L'Aquilano - Aprile 2009*, *http://portale.ingv.it/*
Okada Y. (1992), "Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018–1040.
Serpelloni E., Anzidei M., Baldi P., Casula G., Galvani A. (2005), "Crustal velocity and strain-rate fields in Italy and surrounding regions: new results from the analysis of permanent and non-permanent GPS networks", *Geophys. J. Int.*, 161(3), 861-880.
Williams S. D. P. (2003), "The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series", *J. Geod.*, 76, 483.