Relazione sulle attività legate al monitoraggio geodetico dell'Italia Centro – Settentrionale nell'ambito della Convenzione tra il Coordinamento Prevenzione Sismica della Regione Toscana e il Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Siena

1. Analisi dati geodetici

L'attività di monitoraggio geodetico del Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Siena (DFSTA) nell'ambito della Convenzione con il Coordinamento Prevenzione Sismica della Regione Toscana riguarda la gestione di una rete di 9 stazioni GPS permanenti localizzate lungo i margini delle principali fosse tettoniche dell'Appennino settentrionale (Lunigiana, Garfagnana, Mugello-Pistoia-Firenze, Alta Val Tiberina) e la stima dell'attuale quadro cinematico presente nell'Italia centro-settentrionale. Quest'ultimo viene determinato analizzando le osservazioni GPS acquisite dalla stazioni di proprietà del DFSTA integrate con quelle provenienti da altre 339 stazioni presenti nell'area di interesse. (Fig. 1). Queste stazioni sono state istituite da Enti di ricerca o istituzioni universitarie per studi di carattere scientifico, oppure appartengono a istituti pubblici e privati che le utilizzano come infrastruttura di riferimento per le tecniche di posizionamento in tempo reale in ambito professionale. Per poter accedere ai dati raccolti da questi Enti sono state istituite apposite convenzioni con i diversi gestori.



Figura 1. Distribuzione delle stazioni GPS permanenti utilizzate per l'attività di monitoraggio. Le stazioni gestite da Enti di ricerca o istituti universitari (stazioni scientifiche) sono indicate da pallini e quelle gestite da Agenzie commerciali

(stazioni commerciali) da triangoli. I colori dei simboli indicano le diverse organizzazioni di appartenenza, in particolare le stazioni gestite dal Dipartimento Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Siena in collaborazione con il Dipartimento di Fisica ed Astronomia dell'Università di Bologna sono indicate da pallini rossi. Nell'inserto è riportata la posizione delle 6 stazioni permanenti IGS/EUREF: BRAS (Brasimone), CAGL (Cagliari), GRAZ, MATE (Matera), ZIMM (Zimmervald), WTZR (Wetzell) utilizzate per inquadrare le soluzioni giornaliere di tutte le stazioni della rete nel sistema di riferimento internazionale ITRF2005.

Le osservazioni giornaliere con passo di campionamento a 30 secondi di tutte le 348 stazioni GPS permanenti considerate nell'attività di monitoraggio sono state memorizzate in un archivio secondo gli standard internazionali relativi alla gestione dei dati geodetici. Questi dati sono periodicamente analizzati utilizzando il software GAMIT/GLOBK versione 10.4 sviluppato e distribuito dal Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences, del Massachusetts Institute of Technology (MIT). Attualmente l'analisi è stata eseguita su tutte le osservazioni disponibili dal 01 gennaio 2001 al 6 settembre 2012. La procedura di calcolo richiede anche informazioni relative all'orbita dei satelliti GPS (effemeridi), al movimento di rotazione e rivoluzione della Terra (EOP) e i parametri per modellare il centro elettronico delle diverse antenne utilizzate (parametri di calibrazione assoluta). Queste informazioni sono fornite, con un ritardo di circa 2 settimane dagli enti internazionali preposti a questo scopo. Visto l'alto numero di stazioni inserite nel calcolo è stata adottata una procedura di elaborazione distribuita che consente di eseguire la prima parte dell'elaborazione suddividendo la rete in un certo numero di sottoreti contenenti un numero minore di siti. Nell'analisi eseguita la rete iniziale è stata suddivisa in 20 diverse sottoreti, inserendo in ciascuna le osservazioni di 6 stazioni (inserto Fig.1): Brasimone (BRAS), Cagliari (CAGL), Graz (GRAZ), , Matera (MATE), Zimmerwald (ZIMM) e Wettzel (WTZR); distribuite attorno e al centro dell'area di nostro interesse, ed operative da una decina d'anni o più con una sicura affidabilità. Al termine dell'elaborazione le soluzioni giornaliere di tutte le sottoreti sono state combinate insieme utilizzando le soluzioni comuni delle precedenti 6 stazioni, per ottenere una soluzione giornaliera generale. Questa soluzione è stata inserita nel sistema di riferimento noto con l'acronimo ITRF2005 (International Terrestrial Reference Frame, versione 2005) utilizzando le informazioni di 5 stazioni di riferimento (inserto Fig. 1): Cagliari (CAGL), Graz (GRAZ), , Matera (MATE), Zimmerwald (ZIMM) e Wettzel (WTZR). Al termine di questa fase si ottengono le serie temporali della componenti nord, est e quota ellissoidica (sistema di riferimento locale) della posizione giornaliera di ciascuna stazione.

La serie temporale di ciascuna componente è stata analizzata in modo indipendente dalle altre allo scopo di eliminare eventuali dati anomali (*outlier*). Successivamente, eliminati i dati anomali, viene eseguita una stima della velocità e degli eventuali salti causati da interventi sulla strumentazione o da eventi sismici avvenuti nelle vicinanze del sito. I valori di questi parametri vengono stimati utilizzando un metodo ai minimi quadrati pesato e sono successivamente utilizzati per eliminare dalle singole serie temporali delle 3 componenti l'andamento a lungo periodo (velocità) e i salti ottenendo così delle serie temporali definite residue. Le serie dei residui sono utilizzate per calcolare lo spettro di frequenze della serie da cui dedurre il periodo del principale segnale periodico presente. Questo valore viene poi inserito in un nuovo calcolo per stimare nuovamente, sempre con un approccio ai minimi quadrati pesato, il valore della velocità, dei salti, e questa volta anche l'ampiezza e la fase del segnale periodico principale ripartendo dalle serie temporali prive di outlier. Questa procedura consente di stimare in modo indipendente il valore di velocità di ciascuna componente di ogni stazione presente nella rete illustrata in Figura 1.

2. Risultati ottenuti

Il quadro cinematico orizzontale risultante dall'analisi brevemente descritta nel paragrafo precedente è mostrato nella Figura 2. In particolare, viene riportato il quadro cinematico orizzontale residuo ottenuto eliminando dalla velocità stimata di ciascuna stazione il moto planimetrico di rotazione della placca Euroasiatica modellato attraverso il polo di rotazione proposto da Altamimi et alii (2007). Solo i risultati ottenuti analizzando i 295 siti caratterizzati da un periodo di osservazione superiore a 2 anni e da un'efficienza superiore al 50% durante il periodo di attività sono stati riportati nella Figura 2, questo permette di ridurre l'incertezza associata alle singole stime delle velocità.



Figura 2. Campo di velocità residue orizzontali. Il moto della placca Euroasiatica è stato modellato mediante il polo euleriano proposto Altamimi et alii (56.330 °N, –95.979 °E; velocità di rotazione $\omega = 0.261^{\circ}/Myr$). Le aree di diverso colore sono state ottenute interpolando con un metodo statistico (Kriging) i valori dei moduli delle velocità GPS su una griglia regolare di 0.1°x0.1°. Queste aree indicano le zone in cui il modulo delle velocità è omogeneo, mentre la direzione di spostamento è data dalle frecce presenti all'interno di ogni area colorata.

L'aspetto più significativo del quadro cinematico di Figura 2 è che la velocità delle stazioni poste sulla parte esterna della catena appenninica comprendente alle Unità Romagna-Marche-Umbria (RMU, Mantovani et alii 2011, 2012) e alla parte orientale del cuneo Toscana-Emilia (TE, Mantovani et alii 2011, 2012), è caratterizzato da velocità significativamente più elevate (3-5 mm/anno) rispetto a quelle delle zone circostanti. Inoltre si può notare che il settore più mobile si muove verso Nord-Est, mentre nel settore interno tirrenico i movimenti sono orientati prevalentemente a Nord. Si può notare che l'area caratterizzata da velocità più alte corrisponde al settore Appenninico che è stato caratterizzato da maggior mobilità fino dal Pliocene Medio (Mantovani et alii 2012, Cenni et alii 2012); ciò può suggerire che il contesto dinamico che ha

caratterizzato l'evoluzione tettonica recente, e che ha causato l'estrusione laterale del cuneo RMU, è tuttora attivo.

Utilizzando le informazioni derivanti dal quadro cinematico orizzontale è possibile ricostruire l'attuale campo deformativo presente nell'area utilizzando un metodo di interpolazione su griglia regolare basato sulle equazioni che descrivono i movimenti e le deformazioni di un mezzo elastico. In particolare, questo metodo utilizza una procedura di minimi quadrati pesati in cui la funzione peso dipende anche da un parametro di decadimento che è funzione della distanza D tra il punto griglia e la stazione GPS utilizzata. I pesi vengono stimati scalando la varianza della velocità con un fattore moltiplicativo e^{(d}_{km}^{/D)}, dove d_{km} è la distanza tra il k_{mo} nodo della griglia ed il m_{mo} punto GPS; ciò porta ad attribuire un maggior peso nel processo di interpolazione alle stazioni vicine. Alcuni criteri basati sulla distribuzione areale e geometrica dei punti GPS aumentano l'affidabilità dell'approccio (Cenni et alii, 2012). La Figure 3 e 4 mostrano il risultato dell'interpolazione ottenuto utilizzando un valore di D di 50 Km, valore che corrisponde a circa tre volte l'interdistanza media tra le stazioni.



Figura 3. Tasso di deformazione orizzontale (strain rate) derivato dal campo di velocità mostrato in figura 2 mediante la tecnica brevemente descritta nel testo e in maggior dettaglio da Cenni et alii (2012), le frecce rosse convergenti indicano gli assi principali di raccorciamento, quelle blu divergenti quelli di allungamento



Figura 4. Valore della traccia del tensore del tasso di deformazione, le aree rosse indicano le zone in cui è prevalente la compressione, mentre quelle blu indicano aree in cui prevale la compressione, i vettori neri strain rate. La scala cromatica quantifica i valori calcolati del tasso di deformazione. Le frecce nere sono i vettori di velocità delle stazioni GPS riportate in figura 2.

Le figure 3 e 4 mostrano una notevole variazione laterale degli stili deformativi, in particolare è possibile notare un regime compressivo con direzione di accorciamento SSE-NNO che caratterizza il settore orientale della catena alpina, in corrispondenza del bordo di collisione tra la placca adriatica e il dominio euroasiatico. Il regime estensionale è dominante negli Appennini settentrionali, con asse prevalente in direzione perpendicolare alla catena. Si può inoltre notare che nell'Appennino centrale la distensione è associata ad una piccola componente di compressione, indicando un regime non totalmente distensivo. La Pianura Padana, compresi i settori che ricoprono la parte sepolta della catena appenninica settentrionale, è anch'essa caratterizzata da raccorciamento orientato circa N-S. Questo stile deformativo è in accordo con i meccanismi degli eventi sismici occorsi in questa zona tra il 20 maggio e il 6 giugno del 2012.



Figura 5. Campo di velocità verticale. Le aree celesti e rosa indicano rispettivamente zone di sollevamento e abbassamento. Il colore dei cerchi indica il valore del modulo di abbassamento o sollevamento secondo la scala cromatica presente sulla sinistra della figura.

Le velocità verticali mostrate in Figura 5 mettono in evidenza comportamenti cinematici estremamente differenziati nell'area: prevalente sollevamento delle aree Alpine ed Appenniniche, subsidenza nella Pianura Padana, nella Pianura veneta e in un settore dell'Appennino Centrale. Il sollevamento misurato nelle Alpi, valutabile nell'ordine di 1-2 mm/anno, può essere associato all'effetto combinato del raccorciamento tettonico, al processo di compensazione isostatica della crosta a seguito della rimozione dello strato di ghiacci Pliocenici, erosione e rapida riduzione dei ghiacciai. Il sollevamento osservato nell'Appennino settentrionale, generalmente inferiore ai 2 mm/anno, è in accordo con le osservazioni effettuate dall'Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI) nel secolo scorso tramite livellazioni di precisione. Questo comportamento è consistente con gli effetti attesi collegabili con il raccorciamento longitudinale della catena, come suggerito da vari autori (p.es. Mantovani et alii, 2009; Cenni et alii, 2012). Il settore centrale dell'Appennino mostra un comportamento non omogeneo; il settore Abruzzese risulta in abbassamento, mentre i siti localizzati nel Molise-Sannio sono soggetti ad un sollevamento. Più complessi e di maggiore entità sono i movimenti verticali osservati nella Pianura Padana, dove gli effetti tettonici sono sovrapposti a processi di subsidenza legati sia alla compattazione naturale dei sedimenti superficiali che all' abbassamento del suolo causato dall'estrazione di fluidi a diverse profondità. In particolare le velocità di subsidenza raggiungono valori superiori a 5 mm/anno nella parte orientale della pianura, mentre si annullano nella parte occidentale.

3. Risultati preliminari relativi alla crisi simica del maggio 2012 nella Pianura Padana.

Il settore orientale della Pianura Padana il 20 e 29 maggio 2012 è stato interessato da due terremoti di Magnitudo (Mw) 5.9 e 5.8 rispettivamente (INGV: <u>http://cnt.rm.ingv.it/</u>). La sequenza sismica è stata caratterizzata da numerosi "aftershocks", alcuni dei quali con magnitudo superiore a 5.



Figura 6. Mappa degli eventi avvenuti nella Pianura Padana dal 20 maggio al 7 giugno 2012. In rosso gli eventi dal 20 al 28 maggio, in blu quelli dal 29 maggio al 2 giugno e in verde quelli dal 3 al 7 giugno. Le stelle indicano gli eventi con magnitudo superiore a 5, i quadrati quelli con magnitudo tra 4 e 5 e i cerchi gli eventi con magnitudo inferiore a 4. La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo dell'evento (informazioni tratte dall' Italian Seismic Instrumental and parametric Data-basE - ISIDE).

I meccanismi focali degli eventi principali della sequenza emiliana (Fig. 7) mostrano che si tratta di eventi provocati dall'attivazione di strutture inverse orientate all'incirca Est-Ovest, con movimento compressivo in senso Nord-Sud in corrispondenza del fronte sepolto della Dorsale Ferrarese. Questo tipo di meccanismo è compatibile con il quadro deformativo dedotto dalle osservazioni geodetiche e mostrato in Figura 7.



9°00' 9°30' 10°00' 10°30' 11°00' 11°30' 12°00' **Figura 8.** Tasso di deformazione orizzontale presentato in Figura 3 e meccanismi focali dei principali eventi sismici avvenuti nella Pianura Padana dal 20 maggio al 7 giugno 2012.

La deformazione permanente della superficie terrestre causata dai diversi è stata registrata dalle stazioni GPS permanenti presenti nell'area. Per poter stimare questi spostamenti sono state analizzate in dettaglio le serie temporali di 33 stazioni GPS permanenti gestite da vari enti sia scientifici che commerciali (Tab. 1) ubicate ad una distanza inferiore a 100 Km dagli epicentri .

		Ente di			Ente di
Sigla	Comune	Appartenenza	Sigla	Comune	Appartenenza
BLGN	Bologna	INGV	MSEL	Medicina (Bo)	Euref
BOLG	Bologna	Euref	PERS	San Giovanni in Perisiceto (Bo)	Foger
BOLO	Bologna	Italpos-Leica	PTO1	Porto Tolle (Ro)	Italpos-Leica
BTAC	Bonavigo (Vr)	Reg. Veneto	RAVE	Ravenna	UNIBO
CAST	Castelnuovo (Re)	Foger	RAVS	Ravenna	Foger
CGIA	Chioggia (Ve)	Reg. Veneto	RE01	Gualtieri (Re)	Stonex -UNIBO
CODI	Codigoro (Fe)	Foger	REBO	Rebosola (Ve)	Italpos-Leica
CONS	Conselice	UNIBO	REGG	Reggio Emilia	Foger
CTMG	Castel Maggiore	Prov. Di Bologna	ROVI	Rovigo	Reg. Veneto
FERA	Ferrara	Foger	SBPO	San Benedetto Po (Mn)	RING-INGV

FERR	Ferrara	Italpos-Leica	SERM	Sermide (Mn)	Italpos-Leica
FOZA	Ravenna	Italpos-Leica	SGIP	San Giovanni in Perisiceto (Bo)	RING- UNIBO
GARI	Porto Garibaldi (Fe)	Euref	TGPO	Taglio di Po (Ro)	Reg. Veneto
GUAS	Guastalla (Re)	Foger			
LEGN	Legnago (Vr)	Reg. Veneto			
MANT	Mantova	Reg. Lombardia			
MEDI	Medicina (Bo)	Euref			
M005	Finale Emilia (Mo)	Stonex -UNIBO			
MODE	Modena	Euref			

Tabella 1. Elenco delle stazioni GPS permanenti analizzate per la stima delle deformazioni permanenti cosismiche causate dagli eventi del 20 e 29 maggio 2012. Sigla rappresenta il codice alfanumerico internazionale che contraddistingue ogni stazione GPS permanente. Nella seconda colonna è riportato il comune in cui si trova il sito e con Ente di appartenenza viene indicata l'istituzione che si occupa della gestione del sito.

Dall'analisi degli spostamenti co-sismici riportati in Figura 8 e 9 mostra gli spostamenti cosismici orizzontali provocati dagli eventi principali del 20 e 29 maggio di Mw= 5.9 e Mw=5.8 rispettivamente. 29; è possibile notare che gli spostamenti maggiori si sono verificati in seguito al sisma del 20 maggio con deformazioni permanenti registrate fino ad una distanza di oltre 40 Km dall'epicentro, anche se gli spostamenti orizzontali in stazioni localizzate nei pressi di Bologna, Ferrara, Modena sono generalmente dell'ordine o inferiori al centimetro. Gli spostamenti massimi sono stati osservati nelle stazioni di Finale Emilia (MO05 orizzontale = 34 mm, verticale = 86 mm), San Giovanni in Persiceto (SGIP orizzontale = 21 mm, verticale = 1 mm) e a Sermide (SERM orizzontale = 17 mm, verticale = -3 mm). Gli spostamenti avvenuti in seguito all'evento del 29 Maggio sono inferiori a quelli sopra citati, con valori massimi in orizzontale di 1 cm (Fig.7 b, 8b).



Figura 8. a) Spostamento cosismico orizzontale a seguito delle scossa del 20 maggio 2012 Le stelle rosse indicano la posizione degli eventi con magnitudo superiore a 5 avvenuti dal 20 al 28 maggio. b) Spostamento cosismico orizzontale prodotto dalla scossa del 29 maggio 2012. Le stelle blu indicano la posizione degli eventi sismici avvenuti dal 29 maggio al 2 giugno.



Figura 9. a) Spostamento cosismico verticale orizzontale a seguito delle scossa del 20 maggio 2012. Le stelle rosse indicano la posizione degli evneti con magnitudo superiore a 5 avvenuti dal 20 al 28 maggio. b) Spostamento cosismico verticale prodotto dalla scossa del 29 maggio 2012. Le stelle blu indicano la posizione degli eventi sismici avvenuti dal 29 maggio al 2 giugno.



Figura 10. Serie temporale giornaliera delle 3 componenti della posizione della stazione di Finale Emilia (MO05), posizioni espresse in mm. Le barre nere verticali indicano la posizione temporale degli eventi sismici principali: 20 maggio, 29 maggio e 3 giugno.

La Figura 10 mostra lo spostamento registrato nelle serie temporali giornaliere della componenti nord, est e quota della stazione ubicata nel comune di Finale Emilia (MO05). Come si può notare l'evento che ha prodotto lo spostamento maggiore è quello del 20 maggio, mentre gli effetti degli altri terremoti sulla stazione sono di limitata entità.

4. Problemi riscontrati nella gestione delle stazioni

In questo periodo di gestione delle stazioni GPS permanenti nell'ambito della convenzione sono stati riscontrati diversi problemi a causa anche del logorio della strumentazione. Infatti, la rete ormai è circa 10 anni che osserva in modo ininterrotto, consentendo l'acquisizione di un'importante mole di informazioni. In particolare, nell'anno solare sono state cambiate le batterie interne a tutti i ricevitori della rete a perché esaurite con un notevole impegno economico

in quanto tale sostituzione è possibile eseguirla solo nel centro specializzato indicato dalla casa produttrice degli strumenti. Inoltre, la casa produttrice degli strumenti avendo posto fuori produzione da circa 4 anni i modelli da noi utilizzati ed acquistati nel 2003-2004, questo fa si che il centro specializzato non garantisce più la riparazione della nostra apparecchiatura. Questo a partire da settembre 2012 ha influito significativamente sulle nostre attività di monitoraggio costringendoci a cessare momentaneamente il controllo dei movimenti della frana di Patigno per poter recuperare il ricevitore GPS per continuare il monitoraggio dei movimenti nella vicina stazione di Zum Zeri. Inoltre, l'attività di controllo delle stazioni ha subito un incremento notevole delle spese per via anche delle problematiche relative al controllo telefonico remoto, in particolare visti i continui problemi legati al collegamento telefonico di tipo analogico stiamo provvedendo ad aggiornare la rete passando al collegamento ADLS con un incremento delle spese sia di gestione ordinaria che per l'acquisto di nuovi dispositivi di trasmissione e ricezione dati. Nei mesi di marzo – aprile 2012 abbiamo inoltre ampliato la rete di stazioni GPS permanenti acquisendo la disponibilità di utilizzare per monitoraggio di tipo scientifico le stazioni commerciali di proprietà della Stonex s.r.l. che ha acquisito gli strumenti appartenenti alla vecchia rete commerciale Assogeo che per problemi di natura economica ha cessato le sue attività commerciali. L'infrastruttura costituita dalle stazioni permanenti non è stata smantellata dalla nuova proprietà, ed è stato quindi possibile ripristinare il funzionamento degli strumenti, questo però ha aumentato le spese di gestione per le diverse missioni necessarie per riattivare le stazioni ed eseguire lo scarico manuale periodico dei dati. Le osservazioni di alcune di queste stazioni ubicate nell'area epicentrale degli eventi sismici del maggio-giugno 2012 sono state richieste dal Dipartimento di Protezione Civile e dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per la gestione delle emergenze .

5. Bibliografia

- Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B. and Boucher C., 2007. ITRF2005: a new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. J. Geophys. Res., 112, B09401. doi:10.1029/2007JB004949.
- Cenni N., Mantovani E., Baldi P., Viti M., 2012 Present kinematics of Central and Northern Italy from continuous GPS measurements. Journal of Geodynamics 58, 62–72.
- Mantovani E., Babbucci D., Tamburelli C., Viti M., 2009. A review on the driving mechanism of the Tyrrhenian-Apennines system: Implications for the present seismotectonic setting in the Central-Northern Apennines. Tectonophysics, 476, 22-40.
- Mantovani E., Viti M., Babbucci D., Cenni N., Tamburelli C., Vannucchi A., Falciani F., Fianchisti G., Baglione M., D'Intinosante V., Fabbroni P., 2011. Sismotettonica dell'Appennino Settentrionale: implicazioni per la pericolosità sismica della Toscana. Centro Stampa della Giunta della Regione Toscana, Firenze, pagg. 85 (http://www.regione. toscana.it).
- Mantovani E., Viti M., Babbucci D., Cenni N., Tamburelli C., Vannucchi A., Falciani F., Fianchisti G., Baglione M., D'Intinosante V., Fabbroni P., 2012a. Potenzialità sismica della Toscana e criteri di priorità per interventi di prevenzione. Centro Stampa della Giunta della Regione Toscana, Firenze, pagg. 141 (http://www.regione.toscana.it).