

Rapporti tecnici

INGV

**La stazione GPS BLGN per il
monitoraggio della subsidenza**

100



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

LA STAZIONE GPS BLGN PER IL MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA

Giuseppe Casula, Arianna Pesci, Maria Giovanna Bianchi, Gabriele Ponzoni e Fabiana Loddo

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

1000

Indice

| | |
|--|----|
| Introduzione..... | 5 |
| 1. Descrizione dell'installazione | 6 |
| 1.1 Monumentazione..... | 6 |
| 1.2 Ricevitore/Antenna e struttura dell'acquisitore dati | 7 |
| 1.3 Il Server per acquisizione e analisi dati | 9 |
| 2. Software e procedure di analisi | 9 |
| 2.1 Processamento dati | 9 |
| 2.2 Statistica e stima degli errori..... | 12 |
| 3. Discussione e Conclusioni..... | 14 |
| 4. Ringraziamenti | 14 |
| 5. Bibliografia..... | 15 |

Introduzione

Il sistema di posizionamento GPS (*Global Positioning System*) è nato negli Stati Uniti negli anni '90 per scopi militari e negli ultimi decenni si è notevolmente diffuso anche in ambiente civile.

Il GPS è un sistema basato sulla ricezione di segnali radio emessi da satelliti posizionati in orbite a circa 20000 km di altezza la cui configurazione attuale permette la visibilità di almeno 4 satelliti in ogni istante e luogo del pianeta. Si tratta di una tecnica di intersezione spaziale distanziometrica nel sistema di riferimento ellissoidico geocentrico WGS84. La distanza geometrica (*range*) tra il centro di fase dell'antenna di stazione a terra ed i satelliti, viene calcolata misurando il ritardo temporale tra il segnale ricevuto ed un clone generato dal ricevitore fornendo, in prima approssimazione, il tempo di volo del tragitto satellite-ricevitore. Il segnale GPS è caratterizzato da una componente fondamentale, due onde sinusoidali chiamate L1 e L2 e da una componente impulsiva, i due codici *pseudorandom* C/A e P; viene inoltre inviato un messaggio di navigazione (codice D) nel quale sono presenti importanti informazioni quali lo stato di salute dei satelliti, le effemeridi (parametri per il calcolo delle orbite) e la deriva degli orologi di bordo. Un ricevitore GPS geodetico può effettuare due tipi di misure su entrambe le portanti L1 ed L2, cioè misure di codice e di fase. Il posizionamento GPS si può effettuare in varie modalità tra cui la modalità relativa che permette di raggiungere le massime precisioni (pochi millimetri) in quanto i sistemi di equazioni vengono risolti utilizzando le componenti dei vettori linea-di-base che, adeguatamente combinate, permettono di ridurre e/o eliminare una buona parte degli errori sistematici [Hofmann-Wellenhof, *et al.* 2008]. Inoltre, le misure possono essere ottenute da applicazioni statiche o cinematiche [Cina, 2001]. Il grande sviluppo tecnologico degli ultimi decenni ha reso possibile la realizzazione di strumenti di rilievo geodetico e topografico ad alta precisione, compatti e maneggevoli, caratterizzati da notevole facilità di utilizzo, versatili e spesso corredati da *software* ad elevate prestazioni per l'acquisizione, la gestione e l'elaborazione dei dati. I moderni ricevitori vengono implementati con la capacità di immagazzinare un numero sempre più elevato di dati generalmente in memorie *Compact Flash* (CF) sempre più veloci (oltre 30 MB/s di *transfer rate*) e della capienza che raggiunge e supera i 4Gb, il numero dei canali supera la ventina ed i *firmware* sono dotati di tecniche spettrali e di filtraggio in grado di distinguere la maggior parte del codice P (Precision o Protected) criptato poiché destinato ad applicazioni militari.

Attualmente, non si parla più solo di sistemi GPS, ma di sistemi GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) in quanto esistono altre costellazioni di satelliti artificiali come il GLONASS ed il nascente sistema Galileo. I moderni ricevitori, dunque, sono in grado di captare in contemporanea almeno i segnali delle due principali costellazioni (GPS e GLONASS). Inoltre, è interessante notare che il numero attuale dei satelliti GPS è di 31 grazie alla vita media superiore alle aspettative dei satelliti di ormai vecchia generazione.

In questi ultimi anni molti Enti o Università italiane e straniere impegnate in studi geofisici a carattere geodinamico e geodetico, hanno lavorato alla realizzazione di reti GPS di monitoraggio continuo con lo scopo di ottenere risultati affidabili ad alta precisione e di costruire una struttura adatta alla definizione di un sistema di riferimento stabile. I dati GPS acquisiti in continuo su reti appositamente realizzate, dotate di procedure automatiche di acquisizione, trasmissione e analisi dei dati, rappresentano un potente mezzo per studiare le deformazioni del suolo di origine tettonica e vulcanica, consentendo avanzamenti significativi nella ricerca geofisica e geodetica. I prodotti che derivano dalla realizzazione delle reti permanenti sono vari e generalmente si possono riassumere come segue: la produzione di soluzioni giornaliere e settimanali di coordinate delle stazioni della rete; la produzione di soluzioni di velocità e di deformazione; l'archivio di dati GPS; divulgazione dei prodotti e risultati delle reti GPS.

Grazie alla presenza di una copertura di reti permanenti a scala regionale del territorio italiano è inoltre più semplice la pianificazione e realizzazione di sottoreti atte agli studi di fenomeni locali che necessitano una geometria a più stretta maglia, per esempio con linee di base di alcune decine di chilometri o inferiori. È infatti possibile contare su una ricca banca dati, e quindi utilizzare le soluzioni già disponibili per orientare i risultati in un corretto sistema di riferimento senza introdurre necessariamente nel data processing dati appartenenti a stazioni troppo distanti e quindi senza affrontare soluzioni troppo eterogenee in termini di linee-di-base.

In questo lavoro vengono descritte le caratteristiche tecniche di materializzazione, messa in funzione e analisi dati di una stazione GPS su edificio atta al monitoraggio di precisione del fenomeno della subsidenza che affligge in particolar modo alcune zone della città di Bologna per effetto di fenomeni antropici come l'estrazione di idrocarburi e lo sfruttamento di falde acquifere. Uno dei progetti seguiti dalla Sezione INGV di Bologna, infatti, si propone di apportare un significativo miglioramento della conoscenza dei fenomeni locali di subsidenza tramite l'integrazione di informazioni già esistenti con nuove misure ottenute da

metodologie InSAR (Interferometric Syntetic Aperture Radar) e GPS. Per questo, è importante utilizzare una rete GPS che abbia le caratteristiche necessarie per fornire risultati affidabili e che sia oltretutto direttamente vincolabile al dato SAR perciò visibile nelle immagini radar. Da qui l'ulteriore necessità di monumentare le stazioni su edificio e di illustrare con precisione tutti i dettagli tecnici relativi alla stazione BLGN.

1. Descrizione dell'installazione

In questa sezione del lavoro vengono descritti gli aspetti logistici relativi alla messa in stazione della stazione GPS BLGN, ovvero alla installazione del supporto su cui posizionare l'antenna (monumentazione), al collegamento antenna-ricevitore ed al sistema di scarico e archiviazione dati.

La minuziosa descrizione tecnica di questi argomenti vuole essere una sorta di manuale e fornire un protocollo di procedura per il trattamento dati.

1.1 Monumentazione

La struttura di supporto di base per l'antenna GPS, si può considerare come una evoluzione del sistema 3D ampiamente utilizzato dall'INGV nell'ambito di campagne di misura ad alta precisione o nella installazione di stazioni semipermanenti/permanenti [Anzidei *et al.*, 2006]. Tale struttura, ubicata sul tetto della sede della sezione di Bologna è stata realizzata grazie ad un tubolare di acciaio inossidabile austenico (tipo Aisi 340) su cui sono state saldate 2 barre di fissaggio dello stesso materiale mediante un procedimento ad arco con elettrodo in fusibile (TIG, Tungsten Inert Gas).

Alla sommità della struttura è stato montato un elemento auto-allineante ovvero uno snodo sferico *Iglubal* (in tecnopolimeri) per permettere la messa in bolla dell'antenna (**figura 1**) e quindi consentire un posizionamento di precisione. L'estrema resistenza, il basso coefficiente di attrito nel funzionamento a secco, la buona ammortizzazione delle vibrazioni, la resistenza all'usura in condizioni d'uso esterne e agli agenti chimici rendono tale elemento esente dalla ordinaria manutenzione e quindi assicurano una buona stabilità nel tempo dell'antenna GPS. Inoltre, una serie di elementi stringi tubo in tecnopolimeri con vite in acciaio (tipo Aisi 340) permettono di regolare e bloccare la base dell'antenna su più assi fino alla posizione finale di stazione.

La scelta di tale modello di supporto, realizzato appositamente su commissione non essendo prodotto da alcuna ditta, ha permesso di ovviare a problemi di "tenuta" puramente meccanici (effetto vento e pioggia), nonché a quelli determinati da una corretta ed accurata calibrazione "in bolla" dello strumento stesso. L'installazione è avvenuta in due fasi successive: 1) montaggio verticale del palo con una prima taratura grossolana della verticalità; 2) taratura di precisione, grazie allo snodo sferico predetto, della base dell'antenna GPS sul piano orizzontale (messa in bolla definitiva).



Figura 1. Foto della tecnica adottata per la monumentazione della stazione BLGN.

1.2 Ricevitore/Antenna e struttura dell'acquisitore dati

L'antenna GPS Leica AX1202 è stata installata sul supporto precedentemente descritto ed è stata collegata al ricevitore Leica System 500 (12 canali di acquisizione e *firmware* 5.06) mediante un cavo di 30 m fissato al tetto e passato all'interno dell'edificio (**figure 1 e 2**).

Non essendo questo ricevitore dotato di porta di rete ethernet, è stato connesso in rete LAN mediante un dispositivo MOXA D-311 che converte l'input da una porta seriale RS232 ad una porta ethernet 10/100. Il dispositivo è dotato di funzioni di server TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) ed è programmabile a seguito dell'attivazione dello switch numero 1 mediante una connessione seriale RS232 da un PC utilizzando il comando *hyperteminal* di Windows.

La programmazione remota e lo scarico dati dei ricevitori GPS Leica in ambienti Microsoft Windows XP e Linux è stata ottenuta implementando uno strato *software*, sviluppato in collaborazione con la Leica Geosystems Italia, costituito da una serie di comandi in linguaggio C per l'esecuzione di tutte le operazioni di controllo dei ricevitori satellitari di cui sopra al di fuori di un'interfaccia grafica utente (GUI) quale quella di Windows XP®. Questa prerogativa consente di eseguire tali comandi in background mediante differenti programmi di *scheduling* dei *task* di un sistema operativo come ad esempio il demone *cron* di un sistema Unix o di Microsoft Windows®.

La logica dei predetti comandi è quella delle *pipe* di Unix e quindi simile alle *r-utils* realizzate da Trimble per Unavco (University NAVstar Consortium; <http://facility.unavco.org>).

A tal proposito si riportano di seguito alcuni esempi di utilizzo dei Leica commands in ambiente Microsoft Windows XP®. I comandi utilizzati sono essenzialmente 3: *inf_500.exe*, *cfg_500.exe* e *dwn_500.exe*; la versione contrassegnata dalla sigla 500 viene utilizzata per operare sui ricevitori Leica System 500 mentre quella contrassegnata dalla sigla 1200 per i più moderni GRX1200PRO e GRX1200PROGG.

Il comando *inf* serve per la diagnostica del sensore, quello *cfg* per la sua configurazione mentre quello *dwn* per lo scarico dati e l'eventuale cancellazione della memoria, in **Figura 3** viene mostrata un'applicazione del comando di diagnostica in ambiente Microsoft Windows XP®.



Figura 2. Foto della stazione BLGN, si notano il ricevitore Leica System500 e in basso: a destra il dispositivo MOXA-DX-311, a sinistra l'alimentatore e la batteria tampone.

```

cmd - diagno1
C:\ipgn\blgn\trasf>inf_500 -T1 -B38400 -A192.168.100.20 -P2101 -030
01/29/09 10:19:51 - Avvio Procedura.
Tipo connessione = TcpIp
TcpIp Address = 192.168.100.20
TcpIp Port = 2101
Log File Name = (null)
TimeOut = 30
Connessione in corso a: 192.168.100.20 port: 2101
Connessione eseguita!
Verifica comunicazione Gps Ok!

Tipo Sensore : SR520
Serial Number : 22282
Firmware : 5.6
Measurement Engine : 1.39
Boot Loader : 1.62
Temperatura interna : 42°
Batteria A : Non Presente
Batteria B : Non Presente
Alimentazione Esterna : 90%
Internal Memory : Non Presente
PC Card : 100%
System : 90%
System Memory Total : 73Kb
System Memory Used : 508Kb
PC-Card Memory Total : 14944Kb
PC-Card Memory Used : 126880Kb
WGS84 Latitudine : 44° 30' 39.599253"
WGS84 Longitudine : 11° 21' 02.063521"
WGS84 Quota : 91.656
GPS Date & Time : 29\01\2009 9:19:42.00
Elenco Satelliti visibili: 11
-----
Prn      Azi      Ele      Stato
-----
3        302      57       Used
6        312      70       Used
7        311      9        Visible
15       47       6        Visible
16       199      55       Used
18       94       52       Used
19       294      23       Used
21       58       39       Used
22       150     47       Used
25       293     10       Used
26       29       3        Visible
-----
Nome Antenna : AX1202 Pillar
Antenna Serial Number :
L1 V Phase Center offset : 0.0000

```

Figura 3. Esempio di applicazione del comando *inf_500* in connessione tramite rete ethernet al ricevitore Leica System 500 della stazione GPS BLGN.

1.3 Il Server per acquisizione e analisi dati

Al fine di acquisire i dati RAW e RINEX (Receiver INdependent EXchange [Gurtner and Mader, 1990]) di questa e altre stazioni GPS si è provveduto alla implementazione di un PC dotato di un bi-processore modello Athlon AMDX2 5700+ con 2.2 Ghz di clock delle cpu, 500Gb di Hard Disk e 4Gb di RAM DDR2, configurato per l'analisi del dato GPS come segue. Inizialmente è stata effettuata l'installazione del Sistema Operativo Open Source Linux Novell® OpenSUSE 11, ambiente in cui il *software* Gamit/Globk è in grado di operare. È stata quindi eseguita l'installazione del compilatore C e FORTRAN (gcc versione 4.2.1) compatibile con il predetto software.

Il sistema operativo in questione è stato implementato mediante l'installazione del Kernel multiprocessore e dei *software* atti all'analisi e alla visualizzazione dei dati GPS come ad esempio GMT (Generic Mapping Tools) – [Wessel *et al.*, 1998], TSVIEW [Herring, 2003], CATS [Williams, 2008], eccetera.

È stato implementato un *software* in *script* della BASH e FORTRAN (*sh_get_rinex*) finalizzato alla creazione di un archivio di dati GPS basato sul protocollo di internet ftp (file transfer protocol) e sue successive implementazioni (es. demone Linux *ncftp*).

La struttura dell'archivio risulta essere compatibile con la struttura dati dei server geodetici, in cui i dati RINEX compressi vengono archiviati in una struttura ad albero contenente a monte l'anno (es. 2000) il DOY (Day Of Year) e per ogni DOY tutte le stazioni appartenenti al cluster di rete che si sta analizzando. Inoltre, tutti i dati vengono compressi mediante il compressore di Hatanaka (<ftp://terras.gsi.go.jp/software/RNXCMP/>, [Hatanaka *et al.*, 2003]) che consente di ridurre il volume del dato RINEX del 90%. Nell'archivio vengono inoltre memorizzati anche i file delle orbite trasmesse (BRDC), precise (IGS) e dei parametri di orientazione terrestre (EOP) oltre ai metadati delle stazioni GPS permanenti utilizzate (log files, station.info ecc. ecc.).

2. Software e procedure di analisi

In questo capitolo viene fornita una descrizione del procedimento base dell'analisi dati con particolare dettaglio alla procedura di stabilizzazione dei risultati e inquadramento nel sistema di riferimento internazionale prescelto. Viene inoltre descritto il pacchetto *software* inerente all'*editing* delle serie temporali delle coordinate di stazione GPS e al trattamento degli errori o meglio rumori in esse contenute fino al raggiungimento del risultato finale in termini di velocità di stazione e accuratezza.

2.1 Processamento dati

Il processamento dati GPS viene effettuato mediante il *software* GAMIT/GLOBK versione 10.3 sviluppato al CFA (Harvard Smithsonian Center of Astrophysics) del Massachusetts Institute of Technology (MIT), e presso l'Institution of Oceanography, University of California (San Diego).

Il *software* è articolato in diverse *routine* e *subroutine* per il processamento e la modellazione delle osservazioni GPS mediante una procedura a *multi-step* [Herring *et al.*, 2006 a, b; Serpelloni *et al.*, 2006].

Nella prima fase, mediante il pacchetto GAMIT (GPS at MIT) si creano e processano gli osservabili doppia-differenza iono-free che vengono utilizzati per la stima delle soluzioni giornaliere svincolate (*h-files*): coordinate di stazione, orbite, ritardi atmosferici, ambiguità e matrici di varianza covarianza delle soluzioni stesse.

A causa della non linearità delle equazioni che legano gli osservabili, si utilizza una procedura iterativa per migliorare la stima delle coordinate mediante l'applicazione di uno stimatore ai minimi quadrati (*solve*). Tale procedura viene iterata due o più volte al fine di ridurre i residui da valori centimetrici a valori millimetrici o sub-millimetrici.

Di seguito si procede a individuare e rimuovere i salti di ciclo e gli *outliers* (*screening*) mediante un programma automatico (*autcln*).

Le ambiguità delle doppie differenze vengono risolte utilizzando combinazioni lineari fase-codice. È previsto l'utilizzo delle orbite post calcolate dall'International GNSS Service (IGS) e scaricate dal SOPAC (<ftp://sopac.uscd.edu>).

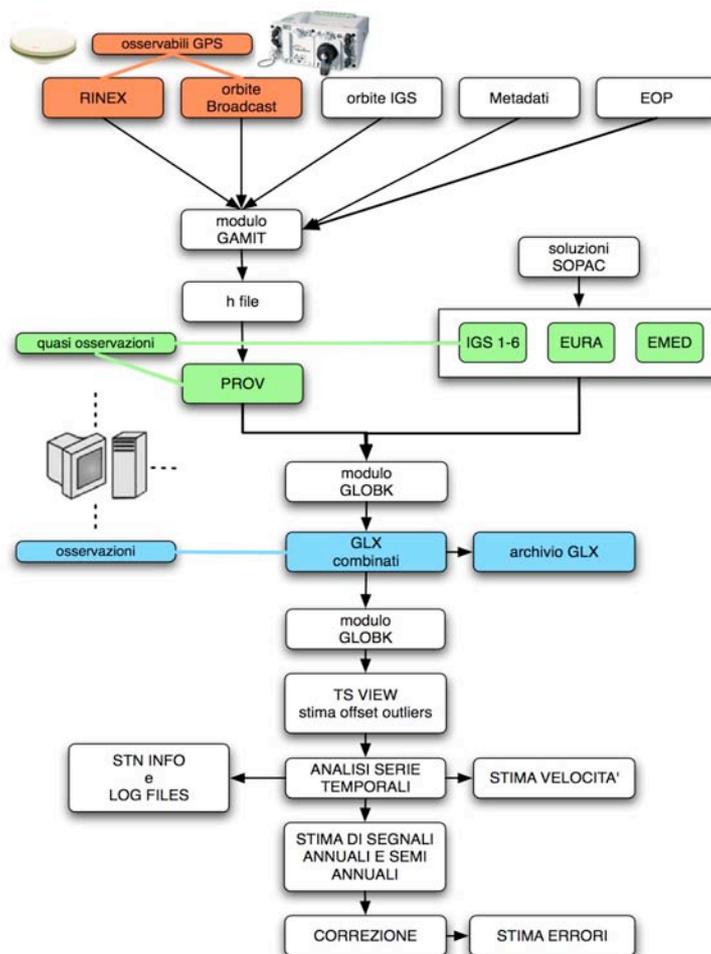


Figura 4. Diagramma di flusso dell'archiviazione e processamento del dato GPS; in marrone, verde e blu vengono evidenziati rispettivamente: gli osservabili GPS, le quasi osservazioni (*h-files*) e le osservazioni.

Sulla base di quanto espresso in precedenza, si effettua il calcolo di soluzioni giornaliere a bassi vincoli (quasi-osservazioni), comprendenti, oltre a BLGN, anche alcune stazioni appartenenti alle reti RING (Rete Integrata Nazionale Gps, [Selvaggi *et al.*, 2006]), EPN (EUREF Permanent Network, [Bruyninx, 2004; Kenyeres and Bruyninx, 2004]) e IGS (International GNSS Service, [Dow *et al.*, 2005]). A partire da queste ultime e da alcune soluzioni generate dal SOPAC, si ottengono le osservazioni mediante la combinazione robusta delle prime con le seconde. Come descritto nel lavoro pubblicato da Dong [Dong *et al.*, 1998], le osservazioni ottenute dalla combinazione robusta di soluzioni sono equivalenti alle soluzioni che si otterrebbero se si processassero tutte le stazioni simultaneamente, purché esistano almeno 2 o 3 stazioni di riferimento in comune a tutte le soluzioni inserite nella combinazione e che si utilizzino orbite precise post calcolate.

Le soluzioni poco vincolate (*loose-constrain*) giornaliere ottenute mediante procedimenti di combinazione robusta effettuati mediante il modulo GLRED del pacchetto GLOBK (GLOBAL Kalman filter) vengono di seguito inquadrati nel sistema di riferimento International Terrestrial Reference Frame (ITRF) 2005 [Altamimi *et al.*, 2007], mediante una trasformazione di Helmert: al tal proposito si utilizzano coordinate e velocità di un certo numero di stazioni IGS della rete permanente globale prese dalle soluzioni dell'EUREF [Bruyninx, 2004].

A seguito del predetto procedimento di stabilizzazione è possibile calcolare le serie temporali delle coordinate di tutte le stazioni permanenti GPS i cui osservabili sono contenuti nelle soluzioni giornaliere combinate (osservazioni).

In **figura 4** si riporta un diagramma di flusso indicante lo schema del processamento dati GPS a sessioni distribuite.

La stabilità della definizione del sistema di riferimento utilizzato per calcolare le coordinate di stazione nei sistemi di riferimento ITRF2005 e quindi anche IGS05, e inoltre la ripetibilità delle coordinate

di stazione vengono testate mediante il calcolo dei residui tra le coordinate stimate nelle nostre soluzioni e le coordinate delle soluzioni combinate di EUREF di circa 40 stazioni fiduciali scelte a priori per la definizione del sistema di riferimento (**Tabella I-a**).

Questo calcolo viene effettuato mediante i programmi GLORG e TFORM e viene rappresentato in **Tabella I-a**. Come si può evincere da una lettura attenta della predetta tabella i residui delle stazioni presenti nella penisola Italiana sono generalmente contenuti all'interno di una tolleranza di +/- 3mm in planimetria e circa +/-6mm in quota, che rappresentano l'accuratezza nominale delle coordinate relative alle soluzioni EUREF.

| a) | | | | b) | | | |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Stazione | ΔX (mm) | ΔY (mm) | ΔZ (mm) | Stazione | ΔX (mm) | ΔY (mm) | ΔZ (mm) |
| VILL_GPS | 0.0016 | 0.0037 | 0.0053 | VILL_GPS | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 |
| SFER_GPS | -0.0017 | 0.0037 | 0.0066 | SFER_GPS | 0.0001 | 0.0000 | 0.0001 |
| HOFN_GPS | 0.0046 | 0.0032 | -0.0028 | HOFN_GPS | -0.0001 | 0.0000 | -0.0002 |
| REYK_GPS | 0.0063 | 0.0014 | 0.0039 | REYK_GPS | 0.0000 | -0.0001 | -0.0002 |
| POLV_GPS | 0.0020 | -0.0037 | -0.0025 | POLV_GPS | 0.0000 | -0.0001 | 0.0000 |
| NICO_GPS | 0.0027 | 0.0028 | 0.0088 | NICO_GPS | 0.0000 | 0.0000 | 0.0001 |
| GLSV_GPS | 0.0000 | -0.0016 | 0.0014 | GLSV_GPS | 0.0000 | -0.0001 | 0.0000 |
| METS_GPS | -0.0008 | -0.0013 | -0.0069 | METS_GPS | -0.0001 | 0.0000 | -0.0001 |
| SOFI_GPS | -0.0078 | -0.0001 | -0.0039 | SOFI_GPS | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| JOZE_GPS | -0.0017 | -0.0008 | 0.0022 | JOZE_GPS | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| PENC_GPS | -0.0034 | 0.0058 | -0.0047 | PENC_GPS | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| TRO1_GPS | 0.0080 | 0.0005 | 0.0088 | TRO1_GPS | -0.0001 | -0.0001 | -0.0002 |
| BOR1_GPS | -0.0021 | -0.0003 | -0.0039 | BOR1_GPS | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| MATE_GPS | -0.0045 | 0.0029 | 0.0021 | MATE_GPS | 0.0003 | -0.0004 | -0.0002 |
| GRAZ_GPS | -0.0058 | -0.0012 | -0.0022 | GRAZ_GPS | -0.0001 | 0.0000 | 0.0000 |
| NOT1_GPS | -0.0007 | 0.0009 | 0.0056 | NOT1_GPS | -0.0004 | 0.0003 | -0.0004 |
| POTS_GPS | -0.0022 | -0.0035 | -0.0016 | POTS_GPS | 0.0000 | 0.0001 | 0.0001 |
| ZOUF_GPS | -0.0040 | -0.0020 | -0.0002 | WTZR_GPS | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| WTZR_GPS | -0.0082 | 0.0016 | -0.0047 | MILO_GPS | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| MILO_GPS | -0.0022 | -0.0015 | 0.0041 | ONSA_GPS | -0.0001 | 0.0000 | -0.0001 |
| ONSA_GPS | -0.0015 | 0.0001 | -0.0047 | PADO_GPS | 0.0004 | -0.0002 | 0.0003 |
| PADO_GPS | -0.0017 | -0.0003 | 0.0034 | BLGN_GPS | -0.0001 | 0.0000 | 0.0000 |
| PRAT_GPS | -0.0039 | -0.0012 | -0.0004 | BRAS_GPS | 0.0000 | -0.0001 | 0.0000 |
| MOPS_GPS | -0.0030 | -0.0003 | 0.0000 | MOPS_GPS | -0.0001 | -0.0001 | -0.0001 |
| ELBA_GPS | -0.0015 | -0.0024 | 0.0008 | ELBA_GPS | -0.0003 | 0.0000 | -0.0002 |
| COMO_GPS | -0.0024 | -0.0014 | -0.0012 | LASP_GPS | 0.0002 | 0.0000 | 0.0005 |
| CAGL_GPS | -0.0018 | 0.0007 | 0.0036 | COMO_GPS | -0.0002 | 0.0000 | -0.0001 |
| GENO_GPS | -0.0065 | -0.0005 | -0.0011 | CAGL_GPS | -0.0003 | 0.0000 | 0.0000 |
| AJAC_GPS | -0.0051 | 0.0025 | -0.0002 | GENO_GPS | -0.0004 | 0.0000 | 0.0000 |
| ZIMM_GPS | -0.0039 | 0.0048 | -0.0006 | ZIMM_GPS | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| GRAS_GPS | -0.0055 | 0.0039 | -0.0036 | GRAS_GPS | -0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| WSRT_GPS | -0.0047 | 0.0012 | -0.0064 | WSRT_GPS | 0.0000 | 0.0000 | -0.0001 |
| BRUS_GPS | -0.0045 | 0.0019 | -0.0054 | BRUS_GPS | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

Tabella I. a) Esempio di test di consistenza del sistema di riferimento, per circa 40 stazioni fiduciali vengono rappresentati i residui fra la nostra soluzione e quella combinata settimanale dell'EUREF alla stessa epoca; **b)** confronto fra le coordinate stimate dalla combinazione di due soluzioni relative a due sottoreti in cui è stato diviso il cluster di prova e le coordinate ottenute risolvendo il cluster di prova in un unico calcolo.

Mediante il test di consistenza del sistema di riferimento così effettuato risulta possibile evidenziare i punti in cui i residui superano le tolleranze indicate in precedenza e la presenza di anomalie quali *offset* o cambi di strumentazione non correttamente modellati. In **Figura 5** sono rappresentate le serie temporali della stazione BLGN materializzata sul tetto dell'edificio della Sezione di Bologna dell'INGV.

Infine, è stato effettuato un confronto diretto fra le coordinate di stazione stimate nel sistema di riferimento IGS05 mediante un calcolo diretto che coinvolge tutte le stazioni GPS del *cluster* di prova e le coordinate delle medesime stazioni ottenute suddividendo il cluster di prova in due soluzioni (h-files) in

seguito combinate fra di loro. Il risultato di quest'ultimo calcolo viene rappresentato in **Tabella I-b** e come previsto dalla teoria di Dong [Dong *et al.*, 1998], mostra dei residui trascurabili (decimi di millimetro) fra le coordinate calcolate con le due tecniche.

2.2 Statistica e stima degli errori

Lo screening del dato GPS all'interno del pacchetto Gamit/Globk può essere effettuato mediante il modulo *tsview* (matlab tools: [Herring *et al.*, 2003]) sviluppato in ambiente MATLAB 6-7, tuttavia in ambiente Linux è possibile eseguire il predetto modulo senza avere installato il programma MATLAB aggiungendo un semplice link alle librerie MATLAB. *TSVIEW* è un'applicazione con interfaccia grafica utente (GUI) che consente l'editing interattivo dei dati delle serie temporali di stazioni GPS calcolate mediante il *software* Globk (vedi **Figura 5**).

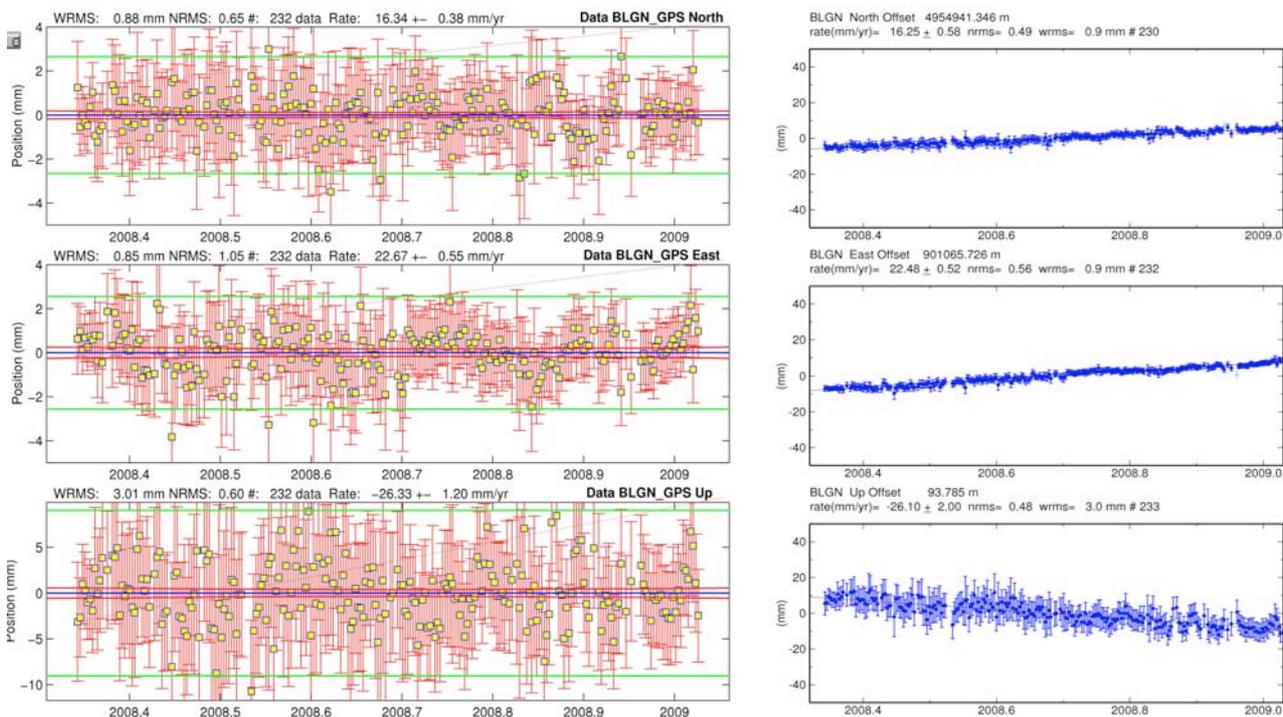


Figura 5. Serie temporali della stazione permanente di BLGN ottenute con l'ausilio dei programmi *tsview* ed *enfit*, rispettivamente appartenenti al pacchetto *matlab-tools* e *Globk*. Si noti come entro la tolleranza degli errori i valori delle componenti di velocità stimate sono ripetibili.

Il predetto modulo consente di stimare e correggere *offsets* ed *outliers* e di salvare le stime in formato compatibile con i file di comandi di *Globk*, in maniera da poterli eliminare in fase di compensazione mediante un'unica applicazione del Global Kalman-Filter.

È possibile, inoltre, stimare le velocità dalle serie temporali mediante operazioni di *fit* ai minimi quadrati pesati e adattare e correggere alcune armoniche agli effetti stagionali con periodo semi-annuale ed annuale (vedi anche **Figura 5**).

È noto dalla letteratura che gli spettri di potenza di diversi fenomeni geofisici possono essere correttamente approssimati mediante una semplice espressione funzione della frequenza. In particolare, data una serie N di misure GPS $x_{j=1, \dots, N}$ discrete ed equispaziate, il tasso di errore (varianza) secondo la teoria di Mao [Mao *et al.*, 1999] risulta composto da tre componenti: la prima indipendente dalla frequenza e quindi detta *white-noise*, la seconda Gaussiana con potenza spettrale dipendente dall'inverso della frequenza ($1/f$) detta *flicker-noise* (rumore rosa) e la terza con caratteristiche di moto browniano non sempre rilevabile o rilevabile solo dopo 2 anni di registrazioni continue e con potenza spettrale dipendente dall'inverso del quadrato della frequenza ($1/f^2$) detta *random-walk noise* (rumore rosso).

Secondo, dunque, la letteratura citata in precedenza la componente di *flicker-noise* dipende da effetti atmosferici stagionali e dal periodo ($1/f$) delle orbite satellitari (periodicità più brevi), mentre il *random-walk noise* dipende essenzialmente dalla stabilità dei monumenti (periodicità più ampie).

In generale i pacchetti di analisi del dato GPS sottostimano il rumore delle serie temporali GPS di un fattore che oscilla tra 2 e 11 [Dixon *et al.*, 2000] poiché tendono a stimare l'errore come semplice rumore bianco e quindi indipendente dalla frequenza.

È possibile in prima approssimazione realizzare una stima più realistica del tasso di rumore delle serie temporali GPS che tenga conto anche del rumore colorato calcolando la varianza delle velocità della j -esima componente (Nord, Est, Quota) mediante la seguente formula di Mao:

$$\sigma_r^2 \cong \frac{12\sigma_w^2}{gT^3} + \frac{a\sigma_f^2}{g^bT^2} + \frac{\sigma_{RW}^2}{T}; \quad (1)$$

Nell'equazione (1) σ_r^2 rappresenta la varianza della generica componente Nord, Est e Quota della velocità della serie temporale GPS stimata e risulta essere composta da tre termini in cui g è il numero di osservazioni per anno, T la durata totale delle stesse, a e b due parametri empirici che possono essere stimati fittando i dati e: σ_f^2 , σ_w^2 e σ_{RW}^2 le varianze delle componenti di rumore *flicker*, *white* e *random-walk*, rispettivamente.

Nel caso delle serie di BLGN, se per a e b sono stati usati i valori stimati da Mao *et al.* 1999 ($a \approx 1.78$, $b \approx 0.22$), per la stima delle tre già citate varianze è stata utilizzata la teoria sviluppata da Dixon [Dixon *et al.*, 2000], e successive modifiche in Mazzotti [Mazzotti *et al.*, 2003]. A partire dall'ipotesi che esista una forte correlazione fra la variazione dello scarto quadratico medio del *fit* lineare pesato (*WRMS*) di una serie temporale e le corrispondenti ampiezze del rumore bianco e colorato, si possono ottenere con buona approssimazione i valori delle tre quantità σ_f^2 , σ_w^2 e σ_{RW}^2 dalle formule (2):

$$\sigma_{RW}^2 \cong 0.5 * WRMS^2; \quad \sigma_w^2 \cong 0.7 * WRMS^2; \quad \sigma_f^2 \cong 1.0 * WRMS^2 \quad . \quad (2)$$

Dove come già espresso in precedenza: *WRMS* rappresenta lo scarto quadratico medio del *fit* lineare pesato delle serie temporali della stazione GPS in esame.

Una stima realistica ed efficace del tasso di rumore di una serie temporale GPS può essere effettuata anche mediante un utilizzo efficace del programma *Globk*, questo modulo infatti consente di inserire un certo tasso di errore dovuto al rumore colorato (dipendente dal tempo) mediante l'attivazione di condizioni di Markov (*mar_neu*) all'interno dei *files* di comandi utilizzati per "pilotare" l'esecuzione del Global Kalman Filter (Vedi anche **Tabella II**).

Una delle più accurate tecniche di stima del rumore delle serie temporali GPS attualmente disponibile in letteratura viene fornita dal metodo della Massima Verosimiglianza (MLE) [Langbein and Johnson, 1997]; questo consiste nella stima di quei valori delle varianze associate alle componenti del tasso di rumore che massimizzano una funzione di Massima Verosimiglianza (*Maximum Likelihood Estimator*, MLE), poiché tale funzione rappresenta essenzialmente la probabilità complessiva del data set delle serie temporali GPS in esame [Dixon *et al.*, 2000]. La predetta operazione può essere effettuata mediante il pacchetto *CATS* (*Create and Analyze Time Series*, [Williams 2008]).

Il pacchetto *CATS* utilizza il metodo dei minimi quadrati per adattare un modello multi-parametrico alle serie temporali delle stazioni permanenti GPS mentre in parallelo analizza i residui al fine di stimare la forma e l'ampiezza del rumore stocastico [Williams, 2008].

Il modello multiparametrico da far fittare ai dati è costituito da un'espressione suddivisa in due termini: una funzione lineare per la stima delle velocità simile ad una retta della quale è possibile stimare intercetta e coefficiente angolare, e una seconda funzione non lineare che permette di stimare ampiezze e coefficienti dei funzionali che rappresentano vari tipi di rumore noti in letteratura e adattarli ai dati.

È inoltre possibile stimare i valori degli *offset* più elevati (es. terremoti o cambi di strumentazione) e qualunque periodicità nota (esempio termini annuali e semi-annuali).

Il pacchetto, che può essere fornito all'utente per funzionare anche in ambiente Linux, consente di stimare il tasso di rumore rappresentato da un'espressione contenente all'interno oltre al rumore bianco almeno una delle due componenti spettrali di cui si è parlato in precedenza (F , RW); è possibile, inoltre, stimare la potenza spettrale più verosimigliante al rumore di una determinata serie temporale, la periodicità di alcuni effetti stagionali ed infine ottenere una stima delle velocità con il corretto valore dell'errore associato.

Attualmente, per la stima del rumore delle serie temporali GPS oltre al metodo della MLE il pacchetto consente di utilizzare anche metodi spettrali ed infine un metodo empirico sviluppato nel 2003 dall'autore e basato sulla già citata teoria di Langbein e Johnson [Langbein & Johnson, 1997; Williams *et al.*, 2003, 2008].

In **Tabella II** vengono comparati i differenti metodi applicati alla serie temporale della stazione GPS BLGN al fine di stimare la velocità delle tre componenti Nord, Est e Quota sull'ellissoide di riferimento.

La stima costituisce un calcolo preliminare poiché viene applicata ad un periodo di poco inferiore ad un anno di dati e tuttavia la velocità stimata per la quota cioè circa -2.6 cm/yr è in accordo con i valori di subsidenza stimata nell'area della stazione da altri enti (Regione Emilia Romagna, INGV-CNT) con l'ausilio di tecniche di livellazione, GPS statico e cinematico e SAR (Synthetic Aperture Radar) [Stramondo *et al.*, 2007].

| Componente | Mao - Mazzotti | TSVIEW | Globk | CATS |
|---------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| Nord (mm/yr) | 16.3 ± 1.1 | 16.3 ± 0.4 | 16.3 ± 0.6 | 16.2 ± 0.6 |
| Est (mm/yr) | 22.3 ± 1.1 | 22.7 ± 0.6 | 22.5 ± 0.5 | 22.6 ± 0.7 |
| Quota (mm/yr) | -26.0 ± 1.9 | -26.3 ± 1.2 | -26.1 ± 2.0 | -25.7 ± 2.4 |

Tabella II. Stima delle componenti della velocità della serie temporale della stazione BLGN con diversi metodi stocastici, si noti la ripetibilità di tutti i valori stimati entro la tolleranza degli errori.

3. Discussione e Conclusioni

La stazione GPS BLGN è stata installata sul tetto dell'edificio in cui ha sede la Sezione INGV di Bologna. La monumentazione è stata realizzata con un pezzo meccanico di nostra progettazione migliorando i criteri utilizzati per i supporti 3D.

L'acquisizione del dato GPS avviene in maniera automatica e tramite porta RJ45 di un dispositivo MOXA D-311, connesso alla porta RS232 del ricevitore Leica System 500, atto alla conversione dei pacchetti RS232 in ethernet e con l'ausilio di procedure automatiche.

Il dato GPS, convertito in formato RINEX ed archiviato su supporti magnetici, viene processato regolarmente mediante il *software* Gamit/Globk versione 10.3 ed una serie di pacchetti aggiuntivi per l'analisi statistica delle serie temporali GPS, utilizzando un PC dotato di Sistema Operativo Linux Novell® OpenSuse 11 ed implementato dagli autori di questo rapporto.

Una prima stima delle velocità della stazione mediante le procedure citate in precedenza fornisce dei valori della quota, sia pure preliminari, in accordo con le stime della subsidenza in atto nella pianura padana ed in particolar modo nella zona Nord-Est della città di Bologna (circa -2/3 cm/y).

Infine, è stata implementata anche con l'ausilio di differenti pacchetti scientifici una statistica basata sulla letteratura più recente e in grado di fornire valori accettabili di precisione ed accuratezza delle misure di velocità della serie temporale di BLGN. Dai valori delle stime effettuate con differenti metodi [Langbein and Johnson, 1997; Mao *et al.*, 1999; Dixon *et al.*, 2000; Mazzotti *et al.*, 2003; Herring *et al.* 2006b; Williams, 2003, 2008] si evince che se il numero delle osservazioni equispaziate di una serie temporale GPS è sufficientemente elevato, la stima della componente di rumore bianco e colorato effettuata con un uso efficiente del Global Kalman Filter (Globk) è comparabile nella maggior parte dei casi con quella effettuata con metodi apparentemente più efficaci come la funzione di massima verosimiglianza (MLE) e gli errori associati alle misure di velocità sono rappresentativi della ripetibilità reale della serie temporale in esame.

Il presente lavoro si propone di fornire un valido supporto per future procedure di messa in stazione di nuove stazioni GPS costruite su edificio, mettendo in evidenza la stabilità di questo genere di installazioni, spesso non ritenute idonee, e l'efficienza del sistema per l'elaborazione dei dati.

4. Ringraziamenti

Si ringrazia il Dottor Marco Marchese e la divisione GPS della Leica Geosystems per il supporto dato nello sviluppo del *software* di comunicazione operante in ambienti Microsoft Windows® e Linux.

Un ringraziamento particolare va a tutti i tecnici, tecnologi e ricercatori dell'INGV che hanno partecipato e tuttora collaborano ai lavori di installazione, manutenzione e gestione delle stazioni della rete RING.

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*, in: Journal of Geophysical Research, 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- Anzidei, M., Casula, G., Galvani, A., Riguzzi, F., Pietrantonio, G., Massucci, A. e Del Mese, S., (2006). *Le prime stazioni GPS permanenti INGV-CNT per il monitoraggio delle deformazioni crostali dell'area Italiana*, Quaderno Num. 39, pp 1-45.
- Boehm, J., Werl, B. and Schuh, H., (2006). *Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium Range Weather Forecasts operational analysis data*, Journal of Geophysical Research 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629.
- Bruyninx, C., (2004), *The EUREF Permanent Network: a multi-disciplinary network serving surveyors as well as scientists*, GeoInformatics, Vol. 7, pp. 32-35. <http://www.epncb.oma.be/>
- Casula, G., Dubbini, M. and Galeandro, A., (2007). *Modeling environmental bias and computing velocity field from data of Terra Nova Bay network in Antarctica by means of a quasi-observation processing approach*. U.S. Geological Survey and the National Academies, Short research paper, USGS OF-2007-1041, doi:10.3133/of2007-1047.srp054.
- Cina, A., (2001). *GPS. Principi, modalità e tecniche di posizionamento*. Celid, Torino, 216 pp.
- Dixon, T.H., Miller, M., Farina, F., Wang, H., and Johnson, D., (2000). *Present-day motion of the Sierra Nevada block and some tectonic implications for the Basin and Range province, North American Cordillera*. Tectonics, 19(1), pp. 1-24.
- Dong, D., Herring, T.A. and King, R.W., (1998). *Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data*. Journal of Geodesy Vol.72 No.4, pp. 200–214.
- Dow, J.M., Neilan, R.E. and Gendt, G., (2005). *The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade*, Adv. Space Res. 36 vol. 36, no. 3, pp. 320-326, 2005. doi:10.1016/j.asr.2005.05.125.
- Gurtner, W., and Mader, G., (1990). *Receiver Independent Exchange Format Version 2*. CSTG GPS Bulletin Vol.3 No.3, National Geodetic Survey, Rockville.
- Kenyeres, A. and Bruyninx, C., (2004). *Monitoring of the EPN Coordinate Time Series for Improved Reference Frame Maintenance*. GPS solutions, Vol. 8, No 4, pp. 200-209.
- Hatanaka, Y., Iizuka, T., Sawada, M., Yamagiwa, A., Kikuta, Y., Johnson, J. M. and Rocken, C., (2003) *Improvement of the Analysis Strategy of GEONET*. Bulletin of GSI, Vol. 49, pp. 11-36.
- Herring, T.A., (2003), *MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series*. GPS Solutions, Vol. 7, No. 3, pag. 194-199.
- Herring, T.A., King, R.W. and McClusky, S.C., (2006a). *GPS Analysis at MIT, GAMIT Reference Manual, Release 10.3*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA. Available at: http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT_Ref_10.3.pdf. Accessed 14 May 2008
- Herring, T.A., King, R.W. and McClusky, S.C., (2006b). *Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, GLOBK Reference Manual, Release 10.3*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA. Available at: http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GLOBK_Ref_10.3.pdf. Accessed 23 May 2008.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E., (2008). *GNSS: Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More*. Springer, Wien, 516 pp.
- Langbein, J. and Johnson, H., (1997). *Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation*, Journal of Geophysical Research, 102(B1), 591-603.
- Mao, A., Christopher, G., Harrison, A., and Dixon, T.H., (1999), *Noise in GPS coordinate time series*, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. B4, 2797-2816.
- Mazzotti, S., Dragert, H., Henton, J., Schmidt, M., Hyndman, R.D., James, T.S., Lu, Y. and Craymer, M., (2003). *Current tectonics of northern Cascadia from a decade of GPS measurements*, Journal of Geophysical Research, Vol. 108, 2554.

- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. and Francis, O., (2006). *Modelling the global ocean tides: insights from FES2004*, Ocean Dynamics, 56, pag. 394-415.
- McCarthy, D. D. and G. Petit, IERS Conventions, (2003). *IERS Technical Note 32*, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt, 2004.
- Selvaggi, G., Mattia, M., Avallone, A., D'Agostino, N., Anzidei, M., Cantarero, M., Cardinale, V., Castagnozzi, A., Casula, G., Cecere, G., Cogliano, R., Criscuoli, F., D'Ambrosio, C., D'Anastasio, E., De Martino, P., Del Mese, S., Devoti, R., Falco, L., Galvani, A., Giovani, L., Hunstad, I., Massucci, A., Minichiello, F., Memmolo, A., Migliari, F., Moschillo, R., Obrizzo, F., Pietrantonio, G., Pignone, M., Pulvirenti, M., Rossi, M., Riguzzi, F., Serpelloni, E., Tammaro, U. e Zarrilli, L., (2006), *La Rete Integrata Nazionale GPS (RING) dell'INGV: un'infrastruttura aperta per la ricerca scientifica*, X Conferenza ASITA, Bolzano, Atti Vol. II, 1749-1754. <http://ring.gm.ingv.it>
- Serpelloni, E., Casula, G., Galvani, A., Anzidei, M. and Baldi, P., (2006). *Data analysis of permanent GPS networks in Italy and surrounding regions: application of a distributed processing approach*. Annals of Geophysics 49(4/5):897-928.
- Stramondo, S., Saroli, M., Tolomei, C., Moro M., Doumaz, F., Pesci, A., Loddo, F., Baldi, P. and Boschi, E., (2007). *Surface movements in Bologna (Po Plain — Italy) detected by multitemporal DInSAR*. Remote Sensing of Environment, 110, 304–316, 2007.
- SOPAC, (2008). *SOPAC Facilities site*. Available at: <http://sopac.ucsd.edu/other/facilities.html>. Accessed 20 May 2008.
- Wessel, P., and W.H.F. Smith, (1998). *New, Improved Version of Generic Mapping Tools Released*, EOS Trans. AGU, 79 (47), 579.
- Williams, S.D.P., (2003). *The effect of colored noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series*. Journal of Geodesy, 76(9-10), 483-494.
- Williams, S.D.P., (2008). *CATS: GPS coordinates time series analysis software*. GPS Solutions, 12, 147-153.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2008 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia