

IL MONITORAGGIO DELL'AREA VULCANICA NAPOLETANA ATTRAVERSO LA RETE GPS PERMANENTE

Prospero DE MARTINO, Umberto TAMMARO, Francesco OBRIZZO,
Vincenzo SEPE, Gianpaolo CECERE, Claudio SERIO, Andrea D'ALESSANDRO,
Mario DOLCE, Giuseppe BRANDI, Santa MALASPINA, Folco PINGUE.

I.N.G.V. Sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano,
via Diocleziano 328, 80124 Napoli, tel. 0816108452, e-mail demartino@ov.ingv.it

Riassunto

Le deformazioni del suolo sono un importante indicatore dello stato dinamico di un vulcano. Infatti, i processi di risalita di masse magmatiche negli strati superficiali comportano deformazioni statiche anche molto evidenti. L'analisi delle deformazioni del suolo rende possibile caratterizzare la localizzazione, la geometria ed il movimento di masse magmatiche in apparati vulcanici.

L'I.N.G.V.-Osservatorio Vesuviano gestisce, tra l'altro, il monitoraggio geodetico dell'area vulcanica napoletana, ove sono allocati tre complessi vulcanici (il Somma-Vesuvio, la caldera dei Campi Flegrei, e l'isola di Ischia) che, per le loro caratteristiche dinamiche e per la loro posizione in un territorio intensamente urbanizzato, sono caratterizzati da un elevato rischio vulcanico.

Un importante contributo al monitoraggio dell'attività deformativa dei vulcani napoletani è fornito dalla rete GPS permanente (CGPS) che, con 21 stazioni, ricopre l'intera area.

In questo lavoro si descrive l'intero processo di acquisizione ed elaborazione dei dati. Dopo aver descritto la dotazione strumentale, il controllo remoto e la trasmissione dei dati, si descrivono le procedure utilizzate per il controllo della qualità delle informazioni acquisite. Si focalizza, quindi, l'attenzione sui sistemi di elaborazione dei dati, mostrando alcuni risultati recentemente ottenuti.

Abstract

Ground deformation is an important indicator of changes in the equilibrium of the structures in volcanic areas. It is usually connected with changes of pressure in shallow magma chambers or with intrusive events. Therefore, analysis of ground deformation is one of the tools for understanding the geometrical and dynamical parameters characterising magma bodies. The geodetic monitoring system is mainly based on GPS technique. The INGV – Osservatorio Vesuviano installed a permanent GPS network (21 stations) in Neapolitan volcanic area, where there are three active volcanoes: Somma-Vesuvio, Campi Flegrei caldera and Ischia Island.

In this paper the entire chain of acquisition, processing and analysis is described. After a description of the instrumental characteristics, the remote control, the data transmission and procedure for the quality check is illustrated. Then, we describe data processing and discuss some results obtained in the last years.

Introduzione

L'Osservatorio Vesuviano, Sezione di Napoli dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.), gestisce la sorveglianza dell'area vulcanica napoletana, costituita da tre distinte strutture vulcaniche attive:

- il complesso del Somma-Vesuvio, attualmente caratterizzato da una bassa attività sismica e deformativa. L'ultima eruzione è avvenuta nel 1994.
- la caldera dei Campi Flegrei, caratterizzata da un lento e continuo movimento verticale del suolo noto come bradisisma. L'area è in generale subsidenza, interrotta nel 1969-1972 e nel 1982-1984 da rapidi e consistenti sollevamenti del suolo (alcuni metri) e nel 1989, 1994 e 2000 da modesti episodi di sollevamento (pochi centimetri). L'ultima eruzione è avvenuta nel 1538 (Monte Nuovo).
- l'isola di Ischia, attualmente caratterizzata da significativi fenomeni di subsidenza nei settori sud e nord-ovest. L'ultima eruzione è avvenuta nel 1302. Nel 1881 e 1883 l'isola è stata interessata da forti terremoti.

Le deformazioni del suolo provocate dai movimenti e dalle modificazioni delle condizioni del sistema d'alimentazione superficiale, hanno un ruolo molto importante nell'analisi dello stato dinamico di un vulcano. L'analisi delle deformazioni del suolo, infatti, rende possibile caratterizzare la localizzazione, la geometria ed il movimento delle masse magmatiche degli apparati vulcanici. Quindi, la modellazione delle sorgenti e dei relativi effetti sul territorio, è indispensabile per la definizione dei probabili scenari di previsione e prevenzione, anche per scopi di Protezione Civile.

Alla base di quanto sopra, la necessità di dover disporre di robusti dati 3D di deformazione del suolo rende necessaria l'installazione e la gestione di reti geodetiche in aree vulcaniche per la misurazione delle componenti del campo di spostamento e delle sue variazioni spazio-temporali.

Un importante contributo al monitoraggio dell'attività deformativa dei vulcani napoletani è fornito dalla rete GPS permanente (CGPS) dell'INGV-Osservatorio Vesuviano (Pingue et al. 2003).

La rete GPS permanente (CGPS) dell'area vulcanica napoletana

La rete CGPS dell'area vulcanica napoletana (Figura 1) è costituita da 21 stazioni, la cui dotazione strumentale è riportata in Tabella 2. Tutte le stazioni sono provviste di linea telefonica e rete elettrica indipendente e dispongono, inoltre, di batterie a tampone che garantiscono autonomia in caso di guasti elettrici.

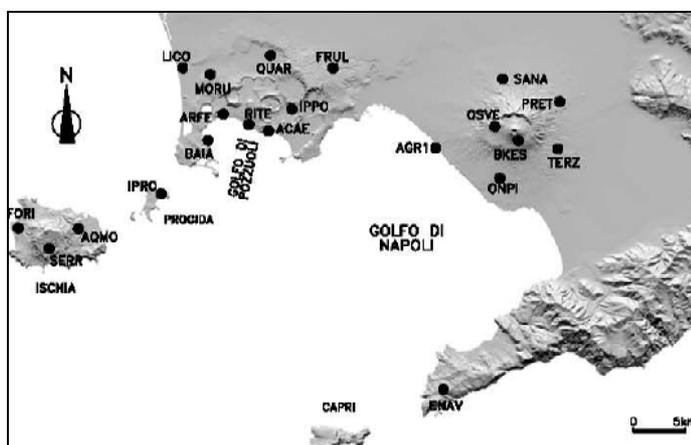


Figura 1 – La rete CGPS dell'area vulcanica napoletana.

STAZIONE	RICEVITORE ANTENNA
AGRI, ARFE, ENAV, FRUL, IPRO, LICO, ONPI, OSVE, PRET, SANA, SERR, TERZ	LEICA RS500 LEIAT504
ACAE, BAIA, IPPO, MORU, QUAR, RITE, FORI	TRIMBLE 4000SSI TRM29659.00
BKES	LEICA RS500 LEIAT502
AQMO	TRIMBLE 4000SSI TRM33429.00+GP

Tabella 2 – Caratteristiche strumentali delle stazioni della rete CGPS.

Acquisizione, scarico e controllo di qualità dei dati GPS

I ricevitori GPS sono impostati per l'acquisizione in locale di file giornalieri con intervallo di campionamento di 30 secondi ed angolo di *cut-off* di 15 gradi.

Tutte le procedure di gestione remota delle stazioni (scarico dei *raw data*, creazione dei file dati in formato *rinex* e controllo di qualità dei dati) avvengono in automatico.

Il controllo remoto delle stazioni e lo scarico dei *raw data* è gestito dal software *GeoGloSS* (*Geodetic Global Survey System*), che consente di eseguire le seguenti operazioni:

- Programmare e lanciare le sessioni di misura, interromperle o modificarne le impostazioni.
- Verificare i parametri di funzionamento della stazione, quali - ad esempio - lo stato della batteria, la percentuale di memoria libera del ricevitore ed il numero di satelliti visibili.
- Programmare ad orari stabiliti lo scarico dei *raw data*, eliminarli e formattare la memoria del ricevitore.

Terminata la procedura giornaliera di scarico dei *raw data* viene lanciato il programma *SETA*, sviluppato all'interno della sezione di Napoli dell'INGV, che provvede ad effettuare:

- il controllo dei *raw data* scaricati, verificandone dimensioni, data ed ora di creazione.
- la generazione dei file dati in formato *rinex* ed il controllo di qualità degli stessi, utilizzando il software *TEQC* dell'*UNAVCO*.
- il controllo dei file *rinex* creati, verificando le informazioni contenute nell'*header*, la dimensione del file, il numero di epoche perse e di quelle che hanno meno di 4 satelliti.

Tutte le informazioni derivate dalle operazioni sopra descritte sono immagazzinate dal software *SETA* in un *database* e visualizzate in 4 finestre grafiche che, per ogni stazione, mostrano l'andamento nel tempo dei seguenti parametri:

- rapporti $L1/(L1+L2)$ e $L2/(L1+L2)$, che da soli già permettono di valutare la qualità delle registrazioni nel tempo. Infatti, rapporti prossimi a zero o all'unità indicano una perdita del segnale in L1 o L2, mentre valori intorno a 0,5 indicano una corretta acquisizione in doppia frequenza.
- valori del *multipath* in L1 e L2 e rapporto percentuale fra il numero di osservazioni registrate e il numero di osservazioni attese.
- rapporto segnale/rumore in L1 e L2 per classi di elevazione. Ciò è molto utile, perché i fenomeni di inquinamento e.m. tendono a presentarsi, in genere, prima a basse elevazioni.

In Tabella 3, per ciascuna stazione, sono elencati i valori medi del rapporto percentuale osservati/attesi e quelli del *multipath* in L1 ed L2. I valori più bassi del rapporto osservati/attesi si riscontrano alle stazioni BKES, TERZ e FORI. Per tutti questi siti sono state avviate operazioni per migliorare la qualità della ricezione del segnale. La marcata differenza che si riscontra fra valori del *multipath* di diverse stazioni è dovuta anche alla diversa strumentazione utilizzata, comunque i valori sono paragonabili, a parità di strumentazione, a quelli di stazioni inserite nella rete IGS.

STAZIONE	%	MP1	MP2	STAZIONE	%	MP1	MP2
ACAE	98.62	0.201	0.624	LICO	99.26	0.077	0.114
AGR1	97.44	0.083	0.140	MORU	97.62	0.183	0.578
AQMO	98.13	0.265	0.663	ONPI	98.45	0.129	0.189
ARFE	99.28	0.071	0.102	OSVE	99.12	0.065	0.119
BAIA	98.64	0.182	0.522	PRET	99.11	0.084	0.121
BKES	82.85	0.161	0.288	QUAR	98.65	0.185	0.599
ENAV	96.26	0.082	0.124	RITE	98.62	0.224	0.763
FORI	88.52	0.259	1.220	SANA	99.04	0.085	0.125
FRUL	95.48	0.065	0.199	SERR	99.29	0.075	0.108
IPPO	98.55	0.215	0.619	TERZ	90.85	0.209	0.339
IPRO	99.28	0.072	0.111				

Tabella 3 – Valori medi del rapporto osservati/attesi e del *multipath* in L1 ed L2 per le stazioni della rete CGPS.

Banca Dati Geodetici

L'esigenza di poter disporre di strumenti *hardware* e *software* per gestire e razionalizzare la grande quantità di dati prodotti dal monitoraggio geodetico dell'area vulcanica napoletana, ha portato, a partire dal 2001, all'implementazione di un servizio di Banca Dati Geodetici con le seguenti finalità:

- omogeneizzare e centralizzare i sistemi di scarico e accumulo dei dati provenienti dalle diverse reti geodetiche sia in continuo che discontinue.
- implementare il *database* delle registrazioni e del relativo contenuto informativo (metadato).
- creare un sistema di accesso comune ai dati geodetici per garantire, sia ampia disponibilità dei dati, che un'adeguata sicurezza contro le manomissioni (accidentali e non) delle informazioni.

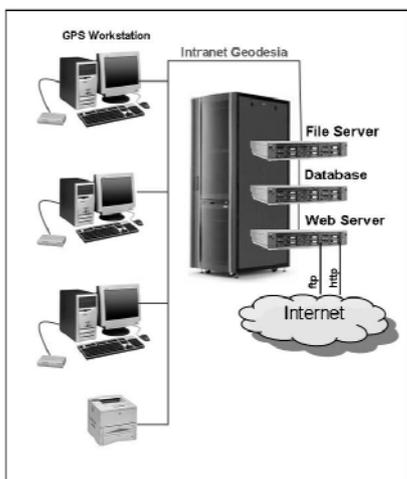


Figura 4 - Schema dell'infrastruttura hardware della Banca Dati Geodetici.

In particolare per la metodologia *GPS* è stata realizzata una rete di *PC client*, appartenenti alla *intranet* Geodesia (Figura 4), destinati unicamente alla gestione remota delle stazioni *GPS* e allo scarico dei *file* delle registrazioni giornaliere (*raw data*). I *raw data* raccolti, i *rinex* creati ed i risultati del controllo di qualità dei dati vengono, successivamente, indirizzati in un unico centro di raccolta dati costituito dal *fileServer*.

Un ulteriore *server* archivia e distribuisce verso l'esterno le informazioni caratteristiche delle reti di monitoraggio, organizzate secondo i modelli logici di un *database* di tipo relazionale (*RDBMS*). La presenza del *database* si è resa indispensabile al fine di associare ad ogni *dataset* (file di misura), contenuto nel *fileServer*, il relativo contenuto informativo necessario alla completa comprensione del dato, dal punto di vista sia qualitativo sia quantitativo. Il contenuto informativo spazia dalle caratteristiche del sito di misura (la

monografia) alle sue modalità di acquisizione, la strumentazione utilizzata etc.

La scelta di centralizzare tutti i file in un unico sistema di *storage* ha permesso sia di ridurre al minimo i rischi di perdite (o indisponibilità temporanea) dei dati, che di assicurare una corretta diffusione del patrimonio informativo. L'accesso alla banca dati *GPS* è assicurata nella sottorete dell'Osservatorio Vesuviano da un opportuno servizio di *File Transfer Protocol (FTP)*, mentre l'accesso dall'esterno avviene tramite la rete *internet*. Ciò ha reso indispensabile interfacciare tutti i processi di modifica/interrogazione delle informazioni contenute nei *server*, mediante l'utilizzo di un *software* di *file sharing* basato su architettura *web*, che consente la gestione controllata degli accessi ai dati e al relativo metadato. Tale *software*, implementato su piattaforma *J2EE (Java 2 Enterprise Edition)*, permette l'*upload* ed il *download* dei *file* tramite *internet* grazie all'utilizzo di un protocollo di rete basato sullo standard di sicurezza *ACL (Access Control List)* e sugli algoritmi di *hash (MD5)* per ciò che concerne la crittografia dei dati.

Il sistema utilizza, inoltre, *JSP (Java Server Page)* e *Servlet* per consentire la gestione delle informazioni monografiche dei sensori distribuiti sul territorio e dei *file* dati attraverso pagine *HTML* dinamiche.

Elaborazione dati GPS

Terminata la fase di scarico e controllo di qualità dei dati *GPS*, con successiva archiviazione dei files dati in formato *rinex* nel *fileServer* della Banca Dati, vengono avviate due procedure automatiche di elaborazione dei dati *GPS* una basata sul *Bernese v. 4.2* (Beutler et al., 2001) e l'altra sul *software NDA (Network Deformation Analysis)* (Pingue et al., 2005).

La prima procedura di calcolo è stata implementata attraverso uno *script batch* che, in sequenza, esegue i seguenti passaggi:

- scarico dei dati *rinex* dal *fileServer* alla *directory* di elaborazione sul *PC* dedicato.
- scarico dal *Center of Orbit Determination in Europe (CODE)* dell'Università di Berna dei *file* necessari all'elaborazione (effemeridi, file dei parametri di rotazione terrestre, file di variazione del centro di fase delle antenne, informazioni e problemi dei satelliti, etc).
- lancio dell'elaborazione utilizzando il *software Bernese* in modalità *BPE (Bernese Processing Engine)*.
- lettura dei *file* di *output* dell'elaborazione, creazione delle serie temporali ed aggiornamento dei grafici, *storage* dei risultati dell'elaborazione sul *server* ed aggiornamento del *database*.

L'elaborazione consiste nel lanciare, seguendo un preciso ordine cronologico, vari programmi del *software Bernese* che, in generale, eseguono le seguenti operazioni:

- Trasformazione dei dati dal formato *rinex* al formato *Bernese*.
- Creazione delle orbite tabulari e dei *file* degli orologi.
- Creazione delle orbite in formato *standard*.
- Sincronizzazione degli orologi.
- Creazione dei *file* di singola differenza delle fasi.
- Individuazione dei *Cycle-slip* e loro riparazione.
- Risoluzione delle ambiguità e stima dei parametri.

Per controllare i vari passi dell'elaborazione, sono generati dal *BPE* dei *Protocol File*, che specificano se un programma è stato lanciato e se è stato eseguito correttamente; in caso contrario è generato un messaggio d'errore utile per intervenire e risolvere il problema. I principali parametri di processamento utilizzati sono quelli tipici per l'elaborazione di reti *GPS* locali e sono riassunti in Tabella 5.

Orbite e file ERP	Orbite Broadcast e file BULLET A.ERP
Centro di fase delle antenne	File di calibrazione PHAS_IGS.01 e NGS
Reference Frame	WGS84
Angolo di cut-off	15 gradi con elevation dependent weighting (cosz)
Sampling rate	30 secondi
Baseline indipendenti	SHORTEST – Distanza minima tra le stazioni
Risoluzione Ambiguità	Strategia QIF
Soluzione finale	L3 fixed
Ionosfera	Eliminata usando la combinazione L3
Troposfera	Parametri TZD stimati ogni 2h con la funzione mappante "dry Niell" e senza modello a priori

Tabella 5 – Principali parametri di processamento utilizzati nell'elaborazione dei dati *GPS* con il *software Bernese v. 4.2*.

La soluzione finale giornaliera viene ottenuta in modalità *multibase* vincolando fortemente (al livello di 0,1 mm) le coordinate di una stazione di riferimento. Nella rete *CGPS* diverse stazioni possono essere considerate di riferimento, perchè ubicate in aree stabili o, comunque, nettamente al di fuori delle zone di massima deformazione. Queste stazioni (QUAR, FRUL, ENAV, LICO) sono continuamente monitorate tramite un'elaborazione con stazioni esterne (CAGL, MATE, MEDI, NOT1) della rete *IGS* e/o *EUREF* ed inquadrate nel sistema *ITRF00*.

I prodotti giornalieri dell'elaborazione sono *file* di coordinate, covarianze, equazioni normali, parametri troposferici. Tramite compensazione delle soluzioni giornaliere vengono prodotte anche soluzioni settimanali.

Dagli *output* della combinazione delle soluzioni giornaliere e settimanali vengono ricavate le serie temporali delle variazioni in *Nord*, *Est*, *Up* delle coordinate delle stazioni.

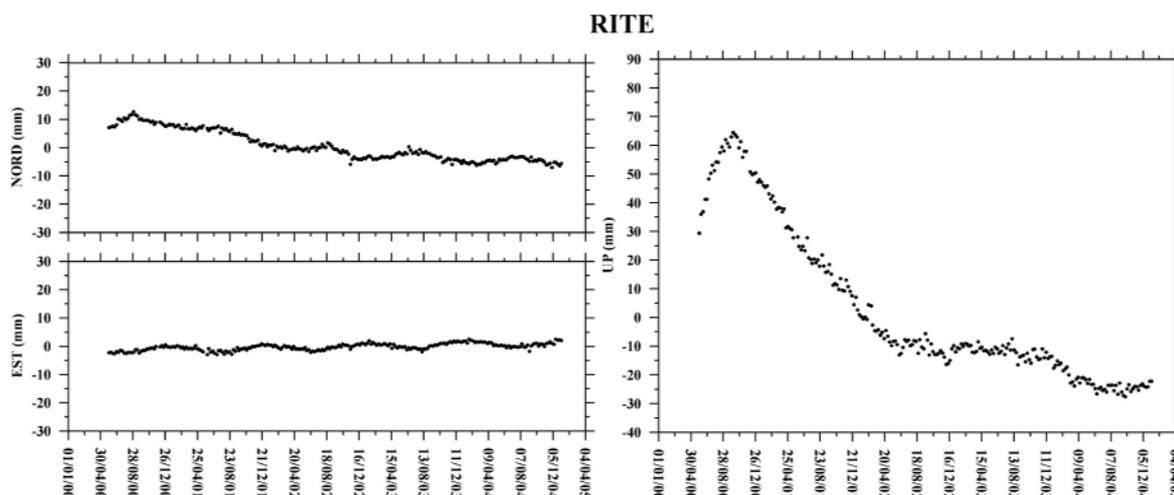


Figura 6 – Serie temporale delle variazioni in Nord, Est, Up delle coordinate settimanali della stazione di RITE relativamente a QUAR.

Come esempio viene riportata in Figura 6, la serie temporale delle variazioni delle coordinate settimanali calcolate per la stazione di RITE, ubicata nelle adiacenze della zona di massima deformazione dei Campi Flegrei, che ben rileva gli spostamenti dell'area, come è messo in evidenza dall'episodio di sollevamento del marzo–settembre 2000 (Lanari et al., 2004), seguito da un'iniziale consistente abbassamento per poi ritornare a valori modesti della velocità di subsidenza.

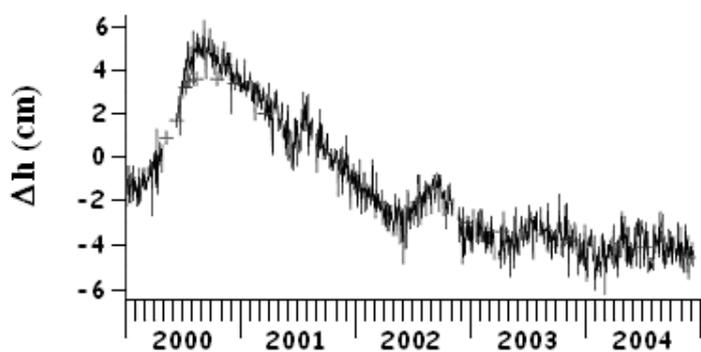


Figura 7 - Deformazione verticale del suolo dedotta dai dati mareografici per il sito di Pozzuoli. Con le croci è indicata quella ottenuta da misure di livellazione di precisione.

Tali risultati concordano con quelli ottenuti da altre tecniche di monitoraggio (livellazione geometrica e mareografia). Infatti, la Figura 7 mostra la deformazione verticale del suolo ricavata per il sito di Pozzuoli determinata da misure mareometriche e quella derivante dalla livellazione. In essa è evidente come anche queste tecniche seguano il fenomeno di *uplift* del 2000 e la successiva fase di diminuzione del *rate* di abbassamento (Pingue et al., 2003).

La seconda procedura automatica, quella basata sul *software NDA*, effettua elaborazioni giornaliere per singola *baseline* rispetto ad una stazione di riferimento.

In Tabella 8 sono elencati i principali parametri di calcolo utilizzati. In Figura 9, invece, sono mostrate le serie temporali delle variazioni in *Nord*, *Est*, *Up* delle coordinate giornaliere della stazione SANA, ubicata nell'area vesuviana. Per questa rete locale, i risultati delle due procedure di calcolo sono coerenti tra loro sulle componenti planimetriche, mentre sulle quote il *Bernese* mostra una minore dispersione, dovuta essenzialmente alla stima dei parametri troposferici.

Orbite	Effemeridi Broadcast
Centro di fase delle antenne	File di calibrazione PHAS IGS.01 e NGS
Reference Frame	WGS84
Angolo di cut-off	15 gradi
Sampling Rate	30 secondi
Baseline indipendenti	Configurazione a stella con FRUL come nodo
Risoluzione ambiguità	Secondo il metodo <i>Lambda</i>
Soluzione finale	L3 <i>fixed</i>
Ionosfera	Stimata secondo l'algoritmo Euler Goad
Troposfera	Stima del ritardo troposferico allo zenit TZD

Tabella 8 - Principali parametri di calcolo utilizzati nell'elaborazione dei dati GPS con il software NDA .

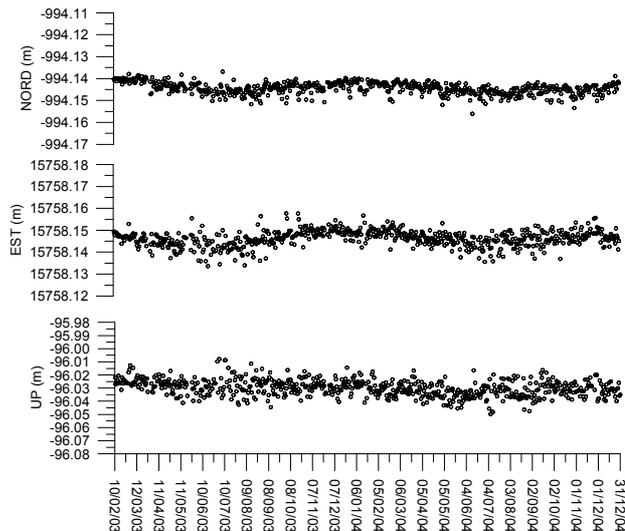


Figura 9 - serie temporali delle variazioni in Nord, Est, Up delle coordinate giornaliere della stazione SANA.

Conclusioni

In questo lavoro è stata descritta l'intera catena di acquisizione, l'analisi del segnale e l'elaborazione dei dati della rete di stazioni permanenti GPS dell'area vulcanica napoletana. Particolare attenzione è stata posta nell'illustrare il controllo, tramite il codice SETA, dei dati raw e rinex e nel descrivere la banca dati. Sono stati presentati i due sistemi di calcolo automatici basati sui software Bernese e NDA. E' stata illustrata la capacità di detezione del sistema attraverso la presentazione della serie temporale delle variazioni delle coordinate della stazione RITE. La netta congruenza, in ampiezza e nella scala del tempo, con i risultati ottenuti da misure mareometriche e di livellazione di precisione mostra ancora una volta come la tecnica GPS debba essere considerata un importante strumento nel monitoraggio geodetico di aree ad alto rischio vulcanico. Questa consapevolezza rappresenta la base per i futuri sviluppi, che oltre all'ovvio ammodernamento tecnologico, tenderanno ad infittire la rete ed a passare a sistemi di elaborazione automatici *real time*, particolarmente utili in caso di dinamica veloce.

Riferimenti bibliografici

- Beutler G, Bock H, Brockmann E, Dach R, Fridez P, Gurtner W, Hugentobler U, Ineichen D, Johnson J, Meindl M, Mervart L, Rotacher M, Schaer S, Springer T, Weber R. (2001), *Bernese GPS Software Version 4.2*, AIUB, University of Berne.
- Lanari R, Berardino P, Borgstrom S, Del Gaudio C, De Martino P, Fornaro G, Guarino S, Ricciardi G. P, Sansosti E, Lundgren P. (2004), *The use of IFSAR and classical geodetic techniques in civil protection scenarios: Application to the Campi Flegrei uplift event of 2000*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 133, 247-260.
- Pingue F, Del Gaudio C, De Natale G, Obrizzo F, Sepe V, Cecere G, De Martino P, Malaspina S, Serio C, Siniscalchi V, Tammaro U. (2003), *Monitoring and deformation analysis in neapolitan area (Southern Italy)*, Proc. 11th Int. FIG Symposium on Deformation Measurements, 105-116, Santorini-Greece.
- Pingue F, Capuano P, Del Gaudio C, Obrizzo F, Sepe V, Cecere G, De Martino P, La Rocca A, Malaspina S, Pinto S, Russo A, Serio C, Siniscalchi V, Tammaro U. (2003), *Mareografia, CGPS e Livellazione: analisi congiunta per lo studio della dinamica delle aree vulcaniche attive*, Atti 7^a Conferenza Nazionale ASITA, Verona, 1627-1632.
- Pingue F, Berrino G, Borgstrom S. E. P, Brandi G, Capuano P, Cecere G, D'alessandro A, De Martino P, Del Gaudio C, d'Errico V, La Rocca A, Malaspina S, Obrizzo F, Pinto S, Ricciardi G. P, Ricco C, Russo A, Sepe V, Serio C, Siniscalchi V, Tammaro U, Aquino I, Dolce M. (2005), *Geodesia (Vesuvio, Campi Flegrei, Ischia) in Attività di Sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano*. Rendiconto anno 2003, a cura di Giovanni Macedonio e Umberto Tammaro.