

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Osservatorio Vesuviano

**Stima del campo di spostamento ai Campi Flegrei
da dati CGPS e di livellazione di precisione
nel periodo maggio 2004 - marzo 2006.**

Pingue F., De Martino P., Obrizzo F., Serio C., Tammaro U.



Open File Report n. 5 – Maggio 2006

Osservatorio Vesuviano
via Diocleziano 328, 80124 Napoli.
www.ov.ingv.it

Stima del campo di spostamento ai Campi Flegrei da dati CGPS e di livellazione di precisione nel periodo maggio 2004 – marzo 2006.

Pingue F., De Martino P., Obrizzo F., Serio C., Tammaro U.

INGV, Osservatorio Vesuviano, Unità Funzionale di Geodesia, via Diocleziano, 328, 80124 Napoli
email: pingue@ov.ingv.it

1. Introduzione

La caldera dei Campi Flegrei, localizzata ad ovest della città di Napoli, nel settore centro-meridionale del graben della Piana Campana, è il prodotto di più collassi causati da eruzioni fortemente esplosive (ad es., Rosi e Sbrana, 1987; Lirer et al., 1987; Orsi et al., 1996). Il recinto calderico più esterno è associato alla catastrofica eruzione dell'Ignimbrite Campana avvenuta circa 39000 anni fa (Rosi e Sbrana, 1987; De Vivo et al., 2001). Un successivo processo di calderizzazione è imputato all'eruzione del tufo giallo napoletano avvenuta circa 15000 anni fa (Deino et al., 2004), che ha prodotto uno sprofondamento della parte interna della caldera, individuabile anche con metodi geofisici (ad es. Rosi e Sbrana, 1987; Cubellis et al., 1995). L'attività eruttiva successiva si sviluppa all'interno della caldera con la formazione di numerosi apparati prevalentemente monogenici. L'ultima eruzione è avvenuta nel 1538 ed ha portato alla formazione di Mt. Nuovo (Di Vito et al., 1987, 1999). Lo studio condotto da vari autori (ad es. Parascandola, 1947; Dvorak and Mastrolorenzo, 1991; Morhange et al., 1999), sfruttando anche tracce di ingressione marina presenti su antichi monumenti, ha evidenziato che negli ultimi due millenni l'area ha attraversato una fase di generale subsidenza (con un tasso dell'ordine del cm/anno), alla quale sono sovrapposti alcuni rapidi ed intensi episodi di sollevamento, come quello legato all'eruzione del 1538. A tale evento è seguito un lungo periodo di abbassamento del suolo, fino alla fine del 1969 quando iniziò un nuovo episodio di sollevamento, che durò fino al 1972 e produsse un sollevamento massimo di circa 1.7 m., parte del quale (circa 0.30 m) fu recuperato nella fase di subsidenza che interessò la zona fino al 1982. Nel periodo 1982-1984 l'area dei Campi Flegrei fu interessata da un nuovo fenomeno di intenso sollevamento, per un totale di circa 1.8 m (Barberi et al., 1984; De Natale et al., 1991).

I recenti episodi di sollevamento hanno consentito l'acquisizione di una notevole mole di dati (in particolar modo l'episodio 1982-1984), che ha permesso la definizione dettagliata della forma della deformazione superficiale e della sua distribuzione spazio-temporale, evidenziando un campo caratterizzato da una notevole simmetria circolare, con rapida diminuzione del segnale allontanandosi dall'area di massimo sollevamento. Ciò ha permesso di formulare modelli dettagliati per il meccanismo di formazione del fenomeno, legato alla dinamica interna del vulcano. Diverse reologie crostali e diverse forme della sorgente sono state ipotizzate e confrontate con i dati (ad es., Berrino et al., 1984; Bianchi et al., 1987; Dragoni e Magnanensi, 1989; Bonafede, 1991; De Natale et al., 1991, 1997; Luongo et al., 1991; Todesco et al., 2003; Beauducel et al., 2004; Troise et al., 2004; Trasatti et al., 2005; Battaglia et al., 2006; Gottsmann et al., 2006).

Una caratteristica peculiare ultimamente evidenziata, grazie soprattutto all'apporto delle reti di monitoraggio in continuo, nell'area flegrea è che la generale subsidenza, che si è instaurata dopo la fine dell'ultima crisi di sollevamento è interrotta da alcuni modesti fenomeni di sollevamento (con massimo da 3 a 11 cm e con durata di pochi mesi) che sembrano avere l'effetto di diminuire il successivo tasso di subsidenza. Gaeta et al. (2003) interpretano tali "mini-uplift", sulla base di un modello fluido-dinamico, come la risposta del sistema geotermico presente a piccole perturbazioni

dell’acquifero superficiale dovute a modificazioni della sorgente profonda e/o del suo accoppiamento con gli strati superiori.

L’evidente complessità strutturale dell’area flegrea e la sempre più chiara evidenza di una forte interazione camera magmatica-acquiferi superficiali, anche nei periodi non eruttivi, rende importante da un lato una sempre maggiore conoscenza della localizzazione degli acquiferi e delle sorgenti magmatiche e dall’altra, tra i parametri geofisici, una sempre più capillare e dettagliata determinazione della distribuzione spazio-temporale degli spostamenti del suolo.

2. Campagne di Livellazione

Nell’ambito del programma di sorveglianza geofisica dei Campi Flegrei, l’Osservatorio Vesuviano-INGV gestisce una rete di livellazione (fig. 1) che copre l’intera area flegrea ed è collegata a quella corrispondente che insiste sull’area vesuviana.

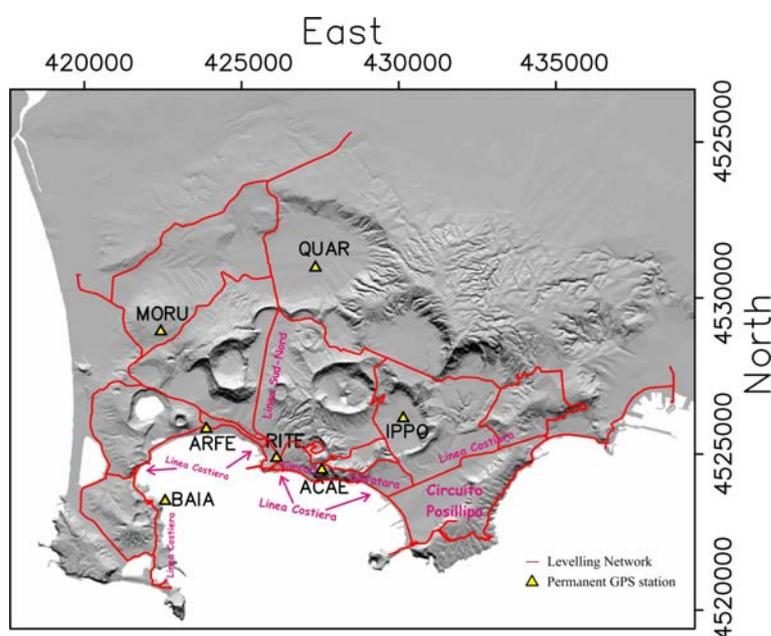


Fig. 1: Rete altimetrica dei Campi Flegrei. Sono riportate anche le stazioni CGPS.

Attualmente la rete altimetrica dei Campi Flegrei è costituita pressappoco da 330 capisaldi distribuiti su circa 135 km con interdistanza media di 400 m e strutturata in quattordici circuiti concatenati.

Nel seguito si riportano i dettagli delle campagne di livellazione effettuate nel periodo maggio 2004 – marzo 2006.

2.1. Campagna di maggio 2004

Nel maggio 2004 è stata effettuata una campagna di misura sull’intera rete. Le misurazioni sono state eseguite, come di consueto, mediante livellazione geometrica di precisione, nel rispetto delle tolleranze imposte dal metodo e utilizzando autolivelli Leica mod. Na2, corredati di micrometri a lamina piano-parallela e mire con graduazione centimetrica su nastro invar.

Le misurazioni di campagna eseguite sono state sottoposte a compensazione ai minimi quadrati con il metodo delle osservazioni indirette riscontrando, a conferma della buona qualità dei dati, una deviazione standard per unità di peso σ_0 di 1.02 mm.

Le quote compensate dell'intera linea sono state calcolate imponendo quale riferimento il caposaldo LNA/001 localizzato a Napoli Mergellina ($Q_0 = 2.7540$ m slm).

Tali misure, confrontate con quelle precedenti effettuate nel novembre 2003 e nel maggio 2003, mostravano (Del Gaudio et al., 2005) il perdurare di una fase di subsidenza, sia pure con una velocità (pari a ~ -1 cm/anno) minore rispetto a periodi precedenti.

2.2. Campagna di novembre 2004

Nel novembre 2004 è stata condotta una misura su parte della rete flegrea (Circuito Solfatara, linea costiera Napoli - Miseno e linea S-N dal Faro di Pozzuoli verso Quarto).

Le misurazioni sono state eseguite con le stesse modalità predette e la compensazione ai minimi quadrati dei dati ha fornito una deviazione standard per unità di peso σ_0 di 0.39 mm. I risultati di tale campagna (che sono stati oggetto di una relazione consegnata al Direttore della Sezione OV-INGV nel novembre 2004) sono riassunti nella fig. 2, ove sono riportate le curve di variazioni di quota dei capisaldi posizionati lungo il circuito e le due linee misurate.

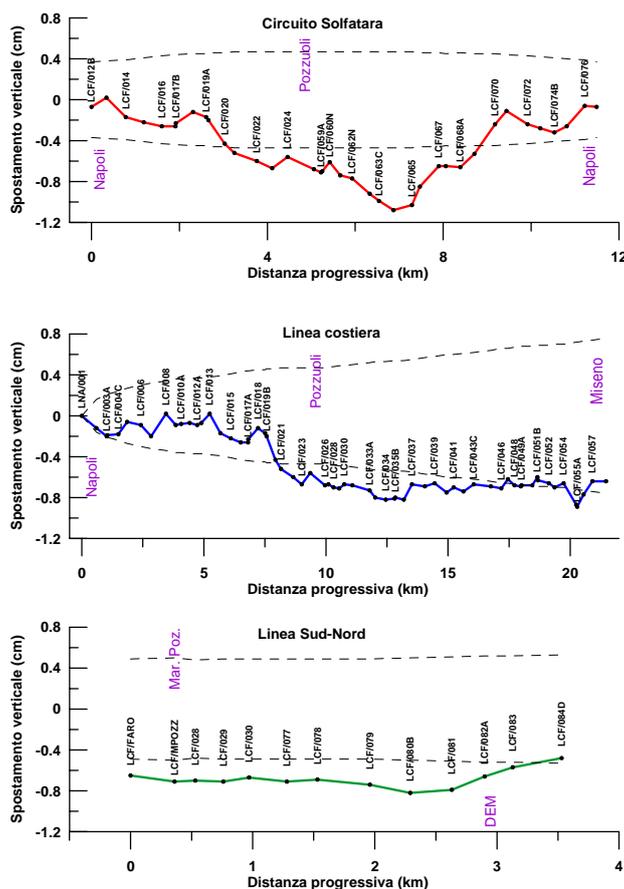


Fig. 2: *Spostamenti verticali relativi al periodo maggio-novembre 2004. Le curve in colore sono le variazioni calcolate; le curve tratteggiate delimitano la zona di confidenza al 95%. Sono indicati alcuni specifici siti.*

Innanzitutto da tali curve si evidenzia il perdurare di un regime di abbassamento nell'area flegrea nel periodo maggio-novembre 2004. La massima subsidenza sembra concentrata nella zona della Solfatara (circa -10 mm). In particolare va notato che il caposaldo vicino al mareografo di Pozzuoli mostra uno spostamento in quota di -7 mm, l'area in superficie corrispondente ai tiltmetri posti in galleria (DEM) ha un abbassamento di circa 6 mm e l'area nelle vicinanze dello storico caposaldo 25A (oggi scomparso) si sarebbe abbassata di circa 5-6 mm.

Va notato che tali conclusioni si accordano bene con i dati CGPS e mareografici disponibili per lo stesso periodo.

2.3. Campagna di maggio 2005

Nel maggio 2005 si ritenne opportuno eseguire una misurazione su parte della rete di livellazione, limitandosi solo al Circuito Solfatara ed alla linea costiera dal caposaldo LCF/4B (Napoli, Galleria 4 Giornate) fino al caposaldo LCF/30 (Pozzuoli-Serapeo) (Del Gaudio et al. 2005). Anche questa breve campagna fu condotta con le usuali metodologie e la compensazione ai minimi quadrati ha evidenziato una deviazione standard per unità di peso σ_0 di 1.10 mm. Per i dettagli si rimanda a Del Gaudio et al. (2005) che evidenziò un generale sollevamento dell'area rispetto a novembre 2004, che aveva annullato la subsidenza avvenuta nel periodo precedente.

2.4. Campagna di ottobre 2005

Nell'ottobre 2005 fu ripetuta una misurazione della rete di livellazione dei Campi Flegrei più ampia di quanto fatto nel maggio dello stesso anno. Infatti furono completati tre circuiti (Solfatara, Posillipo e Pisciarelli) e due linee (la costiera da Napoli a Miseno e la S-N da Pozzuoli a Quarto). I dati ottenuti indicarono (Del Gaudio, personal communication) che nel periodo maggio-ottobre 2005 non si è evidenziato alcun movimento significativo nell'area.

2.5. Campagna di marzo 2006

L'Osservatorio Vesuviano partecipa al progetto "Piattaforme Evolute di Telecomunicazioni e di Information Technology per Offrire Servizi al settore Ambiente" (PETIT-OSA) PON-MIUR. Relativamente alla parte geodetica, si coordina con il Dipartimento di "Scienza delle Costruzioni" (DiSCO) dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II", nell'ambito dell'OR Monitoraggio del campo di deformazioni lente del suolo e del costruito a scala locale, con il compito del rilevamento di dettaglio del campo di spostamento del suolo in prossimità di strutture e/o infrastrutture per la definizione dell'interazione tra fenomeno naturale ed il costruito. Pertanto, sono state previste misure di livellazione su capisaldi installati nei dintorni della struttura scelta dal DiSCO.

Al fine di contribuire al controllo dello stato attuale del fenomeno bradisismico, è stata programmata ed eseguita, a carico del suddetto Progetto, una campagna di livellazione su parte della rete dei Campi Flegrei. Le misure di livellazione sono state condotte nel periodo febbraio-marzo 2006 ed hanno interessato parti della rete di sorveglianza flegrea (Circuito Solfatara; Linea Costiera Napoli-Miseno, Circuito Posillipo, Linea Pozzuoli-Montagna Spaccata), per un totale di circa 40 km, che sono periodicamente oggetto d'indagine per scopi di monitoraggio (fig. 1). Anche questa campagna è stata condotta con le usuali metodologie e la compensazione ai minimi quadrati ha evidenziato una deviazione standard per unità di peso σ_0 di 0.63 mm.

I principali risultati ottenuti sono riportati nella fig. 3 a,b,c,d che mostra le variazioni risultanti nel periodo Ottobre 2005 - Marzo 2006 sui due circuiti e sulle due linee aperte.

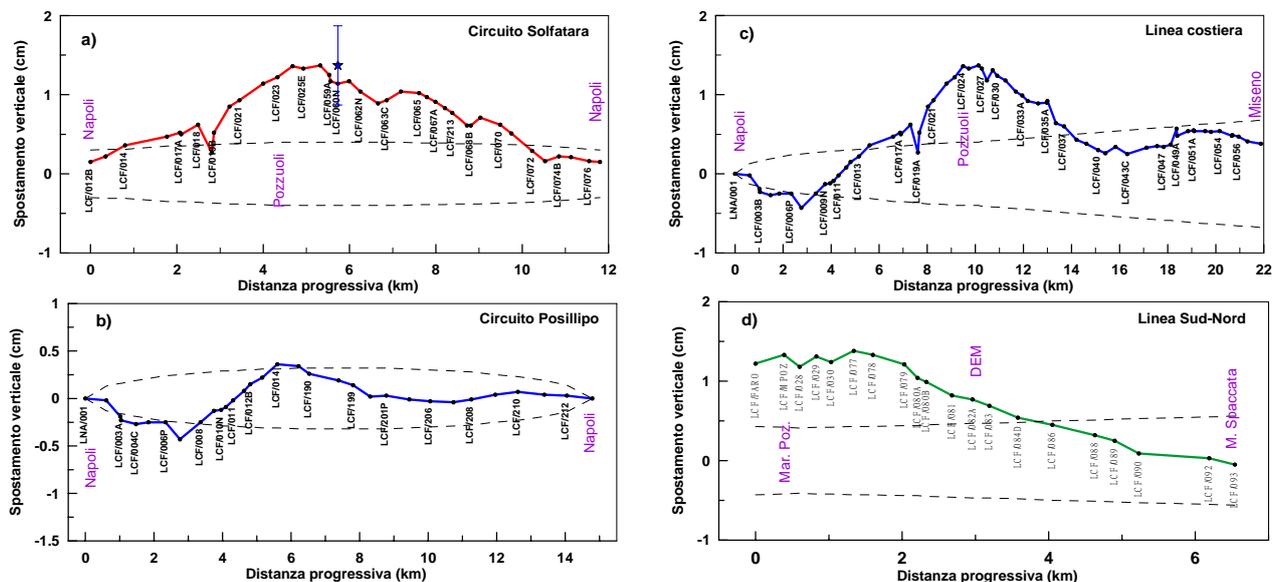


Fig. 3: *Variazioni di quota nel periodo Ottobre 2005-Marzo 2006 lungo il Circuito Solfatara (a), il Circuito Posillipo (b), la linea costiera (c) e la linea Pozzuoli-Quarto (d). In a) è anche mostrata la variazione di quota ricavata dalle misure CGPS sul vertice RITE. Le linee tratteggiate delimitano i livelli di confidenza $\pm 2\sigma$.*

L’andamento delle variazioni di quota lungo il circuito Solfatara (fig. 3a) bene evidenzia un sollevamento del suolo che ha interessato la zona “storica” di Pozzuoli negli ultimi mesi, e che raggiunge un massimo di quasi 1.4 cm tra i capisaldi LCF/024 e LCF/026. Nella stessa figura è riportato (stella), con il suo errore, la variazione di quota mostrata per lo stesso intervallo di tempo dalla stazione CGPS di RITE, posta nelle immediate vicinanze del caposaldo LCF/060. I due dati sono in buon accordo.

Il circuito di Posillipo (fig. 3b), invece, non mostra deformazioni chiaramente significative, specie nella zona costiera da Nisida a Napoli.

La linea costiera (fig. 3c), oltre alle informazioni già riportate dai due circuiti precedenti, evidenzia un calo del sollevamento man mano che si va verso Miseno, rientrando nell’intervallo di confidenza riportato.

La linea Sud-Nord (fig. 3d) mostra come il sollevamento decresca andando da Pozzuoli verso Quarto, rientrando all’interno del livello di confidenza considerato poco oltre l’altezza della stazione tiltmetrica DEM.

3. La rete GPS permanente (CGPS)

La rete di stazioni permanenti GPS dell’area flegrea (fig. 4), è costituita da 8 stazioni, la cui dotazione strumentale è riportata in tabella 1. 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 (Tammaro et al., 2004).

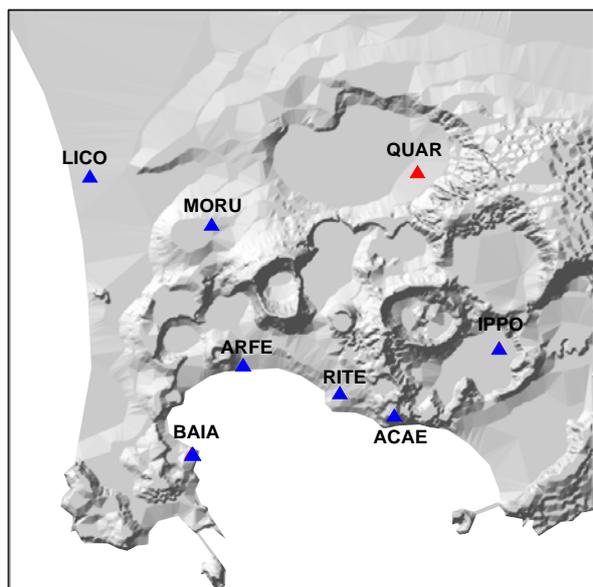


Fig. 4: Rete permanente GPS operante nell'area flegrea. Con il triangolo rosso è indicata la stazione di riferimento.

Tab. 1: Elenco dei vertici della rete di stazioni permanenti GPS dell'area flegrea.

Sito	Ricevitore	Antenna
ACAE	Trimble 4000SSI	TRM29659.00
ARFE	Leica RS500	LEAIT504+R
BAIA	Trimble 4000SSI	TRM29659.00
IPPO	Trimble 4000SSI	TRM29659.00
LICO	Leica RS500	LEAIT504+R
MORU	Trimble 4000SSI	TRM29659.00
QUAR	Trimble 4000SSI	TRM29659.00
RITE	Trimble 4000SSI	TRM29659.00

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 secondo il diagramma di flusso in fig. 5.

In particolare, il controllo remoto delle stazioni e lo scarico dei raw data è gestito dal software GeoGloss (Geodetic Global Survey System), successivamente viene lanciato il programma SETA, sviluppato all'interno della sezione, 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.

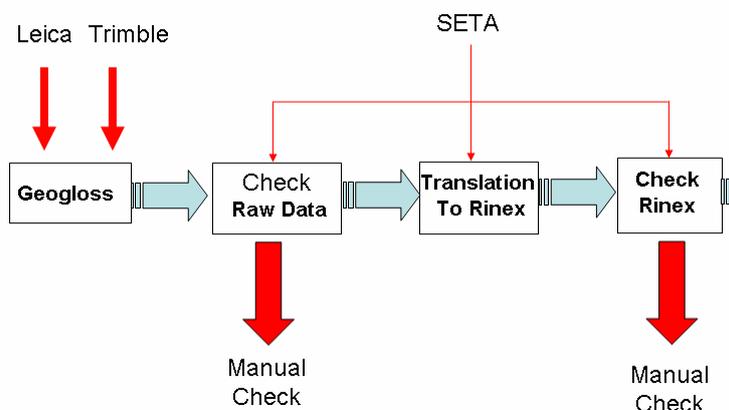


Fig. 5: Diagramma di flusso delle procedure automatiche di gestione remota delle stazioni, scarico dei raw data, creazione dei file rinex e controllo di qualità dei dati.

Tutte le informazioni derivate dalle operazioni sopra descritte sono immagazzinate dal software SETA in un database e visualizzate in opportune finestre grafiche.

Al termine delle suddette procedure e della successiva archiviazione dei files dati in formato rinex sul fileserver della banca dati geodetiche dell'UF Geodesia, viene avviata una procedura automatica di elaborazione dei dati GPS basata sul software Bernese v. 4.2 (Beutler et al., 2001) che, tramite uno script batch, esegue schematicamente le seguenti operazioni, riportate con colori diversi nel diagramma di flusso di fig. 6:

- scarico tramite ftp dei dati rinex dal fileServer e di alcuni files necessari all'elaborazione (parametri di rotazione terrestre, informazioni e problemi dei satelliti, etc) dal centro analisi IGS del CODE di Berna.
- 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.

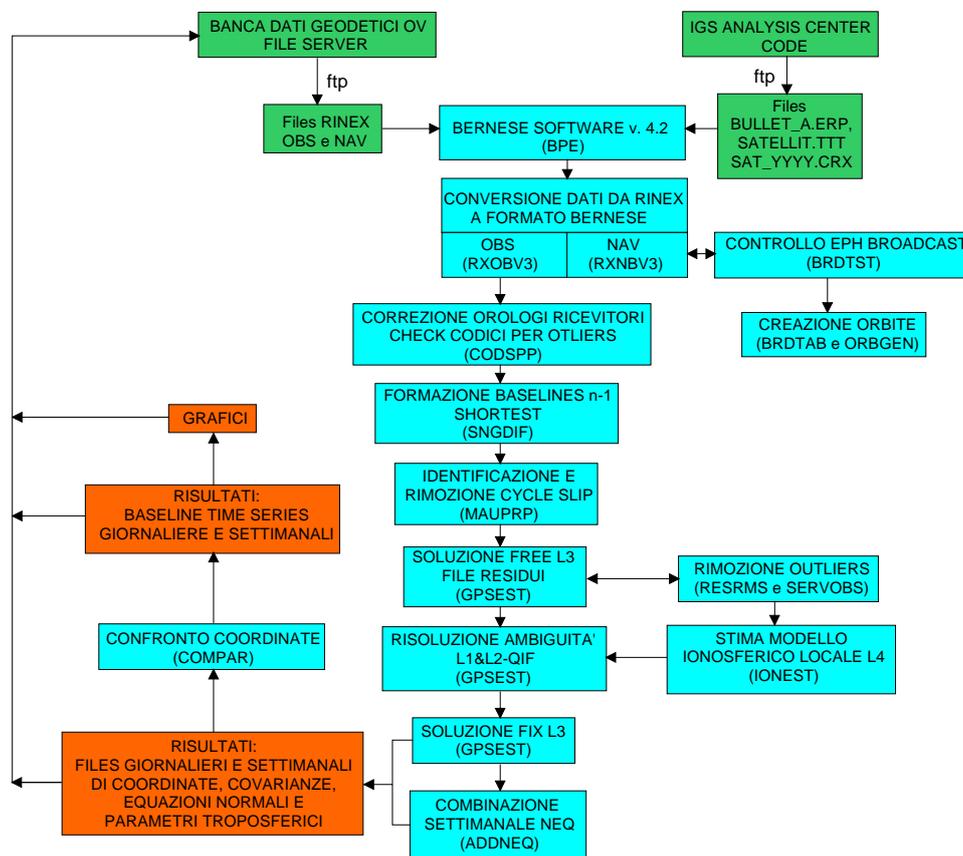


Fig. 6: Diagramma di flusso della procedura automatica di elaborazione dei dati GPS.

I principali parametri di processamento utilizzati sono quelli tipici per l'elaborazione di reti GPS locali e sono riassunti in tabella 2.

La soluzione finale giornaliera viene ottenuta in modalità multibase vincolando fortemente (al livello di 0,1 mm) le coordinate della stazione di riferimento QUAR (triangolo rosso in fig. 4), la stabilità della quale viene continuamente monitorata tramite un'altra elaborazione con stazioni

esterne (CAGL, MATE, MEDI, NOT1) della rete IGS e/o EUREF ed inquadrata nel sistema ITRF00 (De Martino et al., 2005).

Tab. 2: *Principali parametri di processamento utilizzati nell'elaborazione dei dati GPS con il software Bernese v. 4.2.*

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

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.

4. Analisi complessiva dei dati

I dati compensati delle 4 campagne di livellazione condotte da novembre 2004 a marzo 2006¹ sono stati utilizzati per graficare gli andamenti delle quote sui vertici del circuito Solfatara e per quelli lungo le linee Costiera e Sud-Nord, rispetto al maggio 2004 (fig. 7). Da tale rappresentazione si possono dedurre alcune interessanti considerazioni circa il campo di spostamento attivo nell'area flegrea negli ultimi 2 anni.

Ad un'iniziale fase di subsidenza che ha portato ad un abbassamento dell'area centrale di Pozzuoli già descritta in fig. 2, è seguito un periodo di sollevamento di circa pari entità che ha riportato le variazioni di quota avvenute nell'anno maggio 2004-maggio 2005 a rientrare sostanzialmente nei limiti d'errore del metodo (curva blu in fig. 7), come già riferito da Del Gaudio et al. (2005), pur se generalmente verso valori più alti rispetto a maggio 2004, specie nell'area storicamente interessata alle maggiori variazioni.

A causa della sostanziale stabilità intercorsa nel periodo maggio 2005-ottobre 2005, la curva cumulativa rispetto al maggio 2004 (in verde in fig. 7) va praticamente a sovrapporsi alla precedente.

La ripresa del sollevamento rilevato dalle misure del marzo 2006 (fig. 3), ha portato lo spostamento cumulativo rispetto al maggio 2004 (curva in magenta in fig. 7) a valori massimi di poco inferiori ai 2 cm nell'area puteolana.

¹ Le misure condotte a Maggio 2005 non hanno raggiunto il caposaldo di riferimento LNA/001, come le altre, ma sono state limitate al caposaldo LCF/004C, posto circa 1.5 km prima. Per uniformare il vertice di riferimento tra tutte le campagne, è stata apportata una correzione alle quote del Maggio 2005, calcolata tramite interpolazione lineare tra le quote compensate del caposaldo LCF/004C nelle due campagne di novembre 2004 e di ottobre 2005. Tale termine correttivo è risultato essere appena di 1.52 mm.

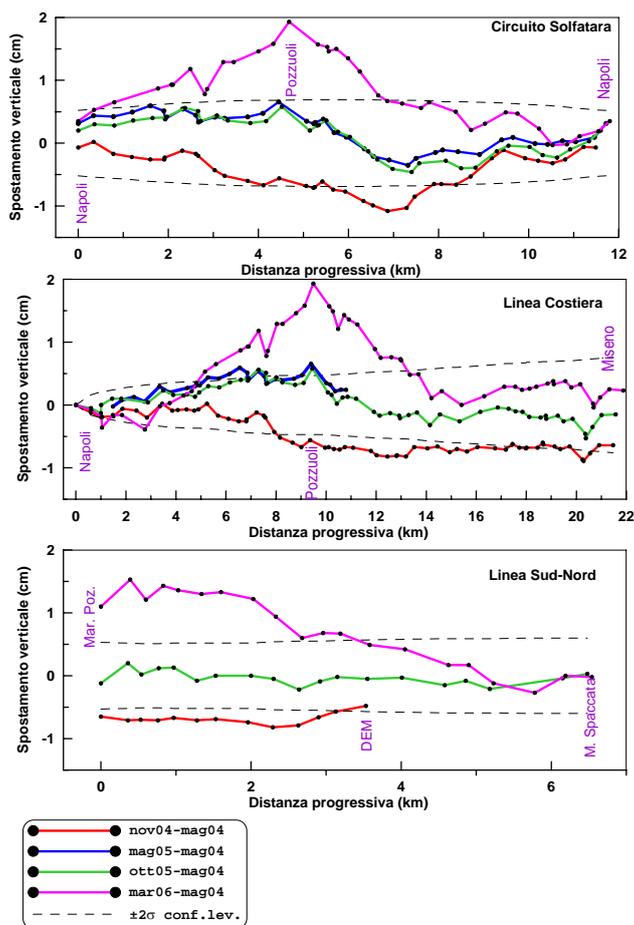


Fig. 7: *Variazioni di quota nel periodo Maggio 2004 - Marzo 2006 lungo il Circuito Solfatara , la Linea Costiera e la Linea Sud-Nord (Pozzuoli-Quarto). Le linee tratteggiate delimitano i livelli di confidenza $\pm 2\sigma$.*

Nelle figg. 8, 9, 10 e 11 sono riportate le curve dell'andamento temporale, nell'intervallo gennaio 2000-marzo 2006, delle tre componenti Nord, Est ed Up di quattro stazioni GPS (ACAE, ARFE, RITE, BAIA) poste nelle immediate vicinanze di punti della rete di livellazione. Tali dati sono già stati utilizzati (Lanari et al., 2004) per evidenziare come il sistema CGPS abbia dato informazioni importanti per l'analisi dell'ultimo mini-uplift avvenuto nel periodo marzo-settembre del 2000. Infatti, anche se parte della fase ascendente del movimento è mancante in alcune stazioni, perché installate successivamente, risulta chiaramente che i siti più vicini all'area di massimo sollevamento (ACAE e RITE) indicano uno spostamento verticale di circa + 4 cm, mentre a BAIA il sollevamento è praticamente nullo. Dal punto di vista planimetrico ACAE e BAIA evidenziano uno spostamento di circa 2 cm nelle direzioni ENE e OSO rispettivamente. La stazione di ARFE non era ancora operativa nella fase di sollevamento. L'analisi dei movimenti plano-altimetrici registrati a queste stazioni nel periodo del mini-uplift del 2000 sono coerenti con l'ipotesi di una sorgente posizionata nell'area centrale di Pozzuoli (Lanari et al. 2004).

Dopo tale episodio, l'area sembra interessata da una generale subsidenza accompagnata dall'inversione dello spostamento planimetrico alle stazioni RITE, BAIA, ACAE ed ARFE. Tale subsidenza è continuata fino all'inizio del 2003, quando la velocità di abbassamento si è attenuata drasticamente per poi riprendere nel corso del 2004. Alla fine del 2004 sembra iniziare una fase di modesto sollevamento, proseguito per quasi tutto il 2005.

Da ottobre 2005 circa vi sono segni (vedi riquadri in figg. 8, 9, 10 e 11) di un nuovo episodio di sollevamento (che dura tuttora), molto evidente alle stazioni CGPS di RITE, ACAE ed ARFE, con un massimo, a marzo 2006, compreso nel range 1÷2 cm. Va notato che anche le componenti

planimetriche delle stazioni presentano un trend simile a quello mostrato dalle stesse nella fase di sollevamento del 2000 (ed opposto, quindi, rispetto al trend planimetrico presente nella successiva fase di subsidenza).

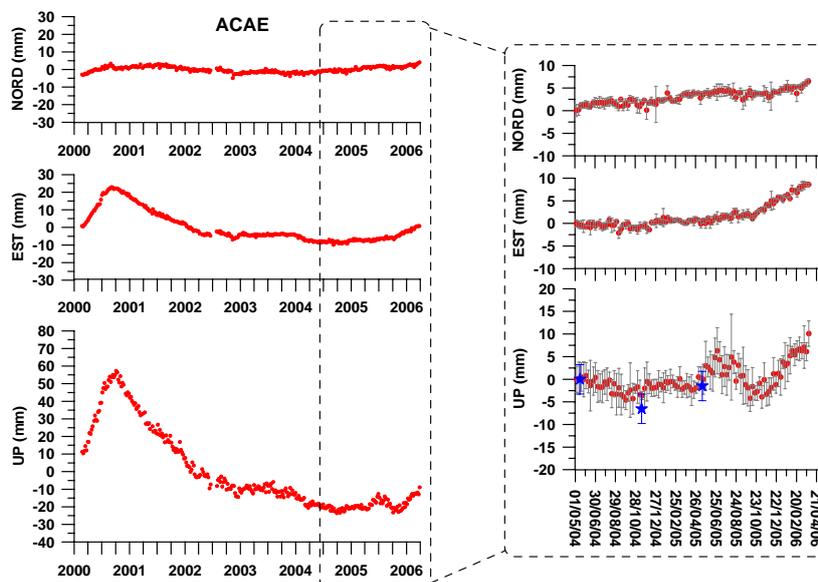


Fig. 8: Serie temporale delle variazioni settimanali delle coordinate della stazione ACAE. Nel riquadro sono evidenziate le variazioni registrate nel periodo maggio 2004 - marzo 2006, con le barre d'errore $\pm \sigma$. Sono anche riportate, per confronto, le variazioni di quota (stelle blu) calcolate dalle campagne di livellazione effettuate nel 2004 e 2005, rispetto a maggio 2004, con le rispettive deviazioni standard, per il caposaldo di livellazione posto nei pressi della stazione CGPS.

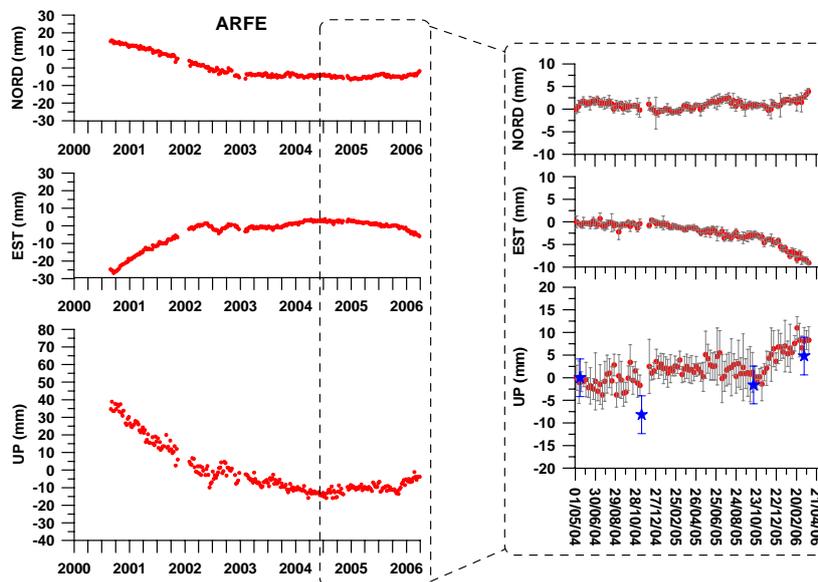


Fig. 9: Serie temporale delle variazioni settimanali delle coordinate della stazione ARFE. Nel riquadro sono evidenziate le variazioni registrate nel periodo maggio 2004 - marzo 2006, con le barre d'errore $\pm \sigma$. Sono anche riportate, per confronto, le variazioni di quota (stelle blu) calcolate dalle campagne di livellazione effettuate nel 2004, 2005 e 2006, rispetto a maggio 2004, con le rispettive deviazioni standard, per il caposaldo di livellazione posto nei pressi della stazione CGPS.

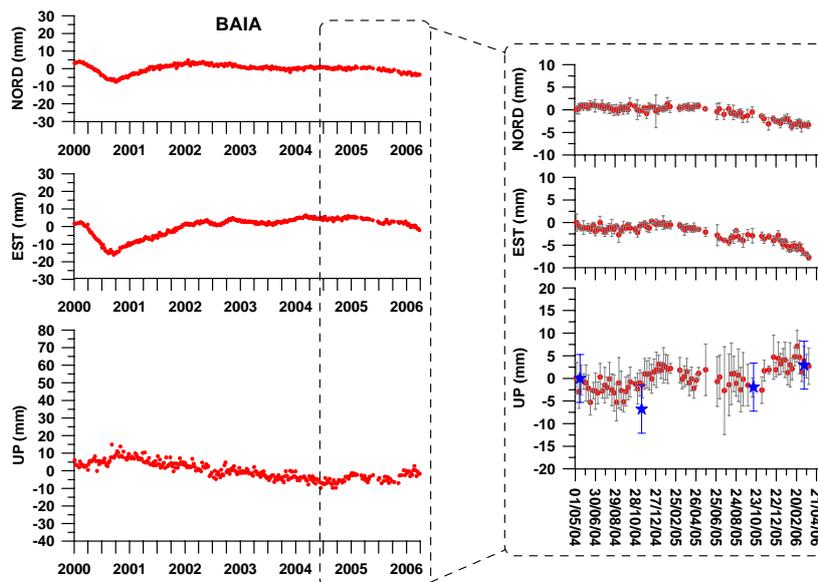


Fig. 10: Serie temporale delle variazioni settimanali delle coordinate della stazione BAIA. Nel riquadro sono evidenziate le variazioni registrate nel periodo maggio 2004 - marzo 2006, con le barre d'errore $\pm \sigma$. Sono anche riportate, per confronto, le variazioni di quota (stelle blu) calcolate dalle campagne di livellazione effettuate nel 2004, 2005 e 2006, rispetto a maggio 2004, con le rispettive deviazioni standard, per il caposaldo di livellazione posto nei pressi della stazione CGPS.

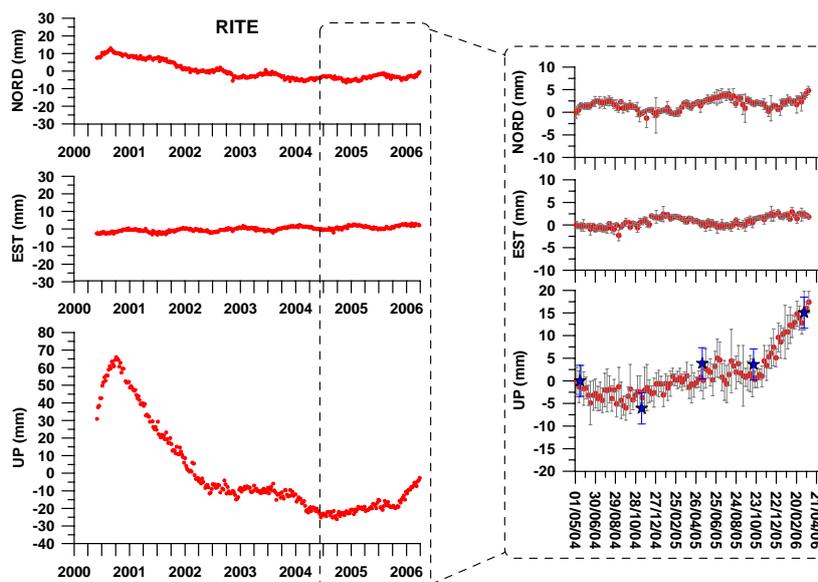


Fig. 11: Serie temporale delle variazioni settimanali delle coordinate della stazione RITE. Nel riquadro sono evidenziate le variazioni registrate nel periodo maggio 2004 - marzo 2006, con le barre d'errore $\pm \sigma$. Sono anche riportate, per confronto, le variazioni di quota (stelle blu) calcolate dalle campagne di livellazione effettuate nel 2004, 2005 e 2006, rispetto a maggio 2004, con le rispettive deviazioni standard, per il caposaldo di livellazione posto nei pressi della stazione CGPS.

Il confronto tra dislivelli GPS e di livellazione mostra un buon accordo come trend ed anche come valori numerici degli spostamenti; le differenze, comunque limitate entro pochi millimetri, sono con ogni probabilità ascrivibili a ovvi fatti da tener presente (non coincidenza dei vertici e quindi possibili differenti effetti di sito, valori non alti dello spostamento che di fatto spesso sono confrontabili con le deviazioni standard dei dati, influenze delle differenze di geoida, ecc.).

5. Note conclusive

I dati della rete CGPS e di livellazione riportati ed analizzati nei paragrafi precedenti confermano un trend evidenziato da alcuni anni. Infatti, l'area flegrea da qualche anno non è più caratterizzata da una fase di subsidenza a seguito del sollevamento avvenuto nel periodo 1982-1984. Sebbene la fase di subsidenza sia stata talvolta interrotta, con periodicità di 5-6 anni, da episodi minori di "mini-uplift" (Gaeta et al., 2003) della durata di qualche mese, l'ultimo dei quali è avvenuto nel 2000 (Pingue et al., 2003; Lanari et al., 2004; De Martino et al., 2005), negli ultimi anni sembra che la subsidenza di background sia terminata e che sia probabilmente iniziata una fase di sollevamento di periodo molto più lungo che nei rapidi "mini-uplift" degli ultimi 20 anni. L'ultima livellazione mostra un aumento del tasso deformativo, peraltro ancora molto basso, di questo trend a lungo periodo.

Limitandosi al periodo qui analizzato, i dati disponibili per l'area di massimo sollevamento, riportati in fig. 11 (riquadro di RITE) e più chiaramente visibili in fig. 12, inducono ad ipotizzare quattro periodi a comportamento diverso:

1. nei mesi che grossomodo vanno dal maggio 2004 al novembre 2004 i dati di livellazione e CGPS mostrano una leggera subsidenza con un tasso nel range $-0.3 \div -1.0$ mm/mese;
2. nei sei mesi successivi, fino a maggio 2005, si evidenzia un periodo di sollevamento (Del Gaudio et al., 2005) con un tasso simile $+0.6 \div +1.6$ mm/mese), ma opposto, a quello del periodo precedente, tanto da tornare sui livelli del maggio 2004;
3. da maggio ad ottobre 2005 la situazione deformativa ai Campi Flegrei sembra caratterizzata da una sostanziale stabilità (tasso di subsidenza < -0.1 mm/mese), considerato i livelli di tolleranza;
4. infine, nell'ultimo periodo ottobre 2005-marzo 2006 si rileva una fase di sollevamento più significativa, con un tasso di $+2.3 \div +3.1$ mm/mese, che sembra ancora continuare.

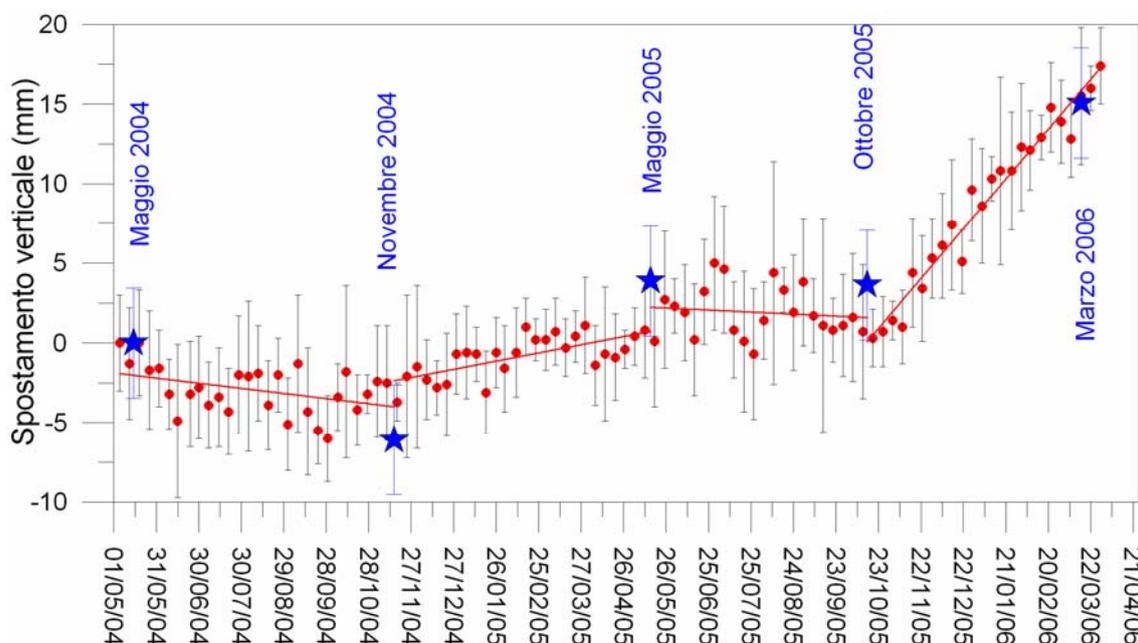


Fig. 12: Serie temporale delle variazioni della quota su base settimanale per la stazione permanente RITE della rete CGPS per il periodo maggio 2004 – marzo 2006 (vedi fig. 11). Sono riportati anche le curve di regressione lineare dei dati GPS per i quattro intervalli temporali evidenziati. Le stelle blu indicano le variazioni di quota calcolate dalle campagne di livellazione effettuate nel 2004, 2005 e 2006, rispetto a maggio 2004.

Va chiaramente evidenziato che le caratteristiche generali sopra riportate sono ricavabili sia dai dati di livellazione che da quelli delle stazioni permanenti GPS; il che ci conforta nell'affermare che l'attuale sistema di stazioni permanenti nell'area flegrea, sia pure sempre migliorabile, è perfettamente in grado sia per la sua configurazione che per le metodiche di analisi dei dati di seguire e tracciare correttamente, nell'ambito delle tolleranze del metodo, il fenomeno bradisismico in atto in tale area. Le informazioni planimetriche provenienti dal GPS hanno una precisione comparabile a quella della componente verticale determinata con la livellazione. Pertanto l'unione delle informazioni ricavabili da entrambe le tecniche costituisce un potente mezzo per un miglior vincolo nella stima dei parametri geometrici della sorgente. Infatti, il rapporto tra le deformazioni orizzontali e quelle verticali varia fortemente con la forma della sorgente (Esposito et al., 2001).

Va anche segnalato che, guardando con maggior dettaglio l'andamento temporale della deformazione in questi ultimi periodi, si nota una minore coerenza a piccola scala (temporale e spaziale), rispetto al passato, come se il campo di deformazione fosse più disturbato. L'effetto sembra essere prodotto dall'assenza negli ultimi anni di un segnale deformativo forte e coerente come quello che ha caratterizzato la fase di subsidenza dal 1985.

Quanto detto, alla luce di modelli recenti (De Natale et al., 1991; Battaglia et al., 2006), che ipotizzano il massimo rischio eruttivo nelle fasi iniziali di sollevamento, suggerisce di seguire molto attentamente il fenomeno in atto, che mostra tutti i segnali di una possibile inversione della deformazione a lungo periodo verso una fase di sollevamento.

6. Ringraziamenti

Si è grati, innanzitutto, al Direttore Giovanni Macedonio per la pubblicazione di questo lavoro. Per i dati grezzi delle campagne di livellazione di maggio e novembre 2005 si ringrazia vivamente C. Del Gaudio. Si desidera ringraziare tutti i contrattisti che hanno lavorato alla realizzazione della livellazione di marzo 2006. Un sentito ringraziamento a Giuseppe Brandi e Mario Dolce per la disponibilità e l'impegno che hanno sempre dimostrato nella cura quotidiana della rete CGPS. Un cenno particolare va ad Andrea D'Alessandro, che è stato tra i principali artefici dell'attuale sistema di trasmissione dati GPS, ed a Santa Malaspina, che nel corso degli anni, non ha mai fatto mancare il suo contributo. Un particolare ringraziamento ad Angelo Serio, senza il quale, diverse implementazioni avrebbero avuto tempi di realizzazione molto più lunghi.

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.
- Barberi, F., Corrado, G., Innocenti, F. and Luongo, G., (1984). *Phlegraen Fields 1982 – 1984: Brief chronicle of a volcano emergency in a densely populated area*, Bull. Volcanol., 47, 175 – 185.
- Battaglia M., Troise C., Obrizzo F., Pingue F., De Natale G. (2006). Evidence for fluid migration as the source of deformation at Campi Flegrei caldera (Italy), Geophysical Research Letters, 33, doi:10.1029/2005GL024904.
- Beauducel F., De Natale G., Obrizzo F. and Pingue F. (2004). 3-D Modelling of Campi Flegrei Ground deformations: Role of caldera boundary discontinuities, Pure Applied Geophysics, 161, doi:10.1007/s00024-004-2507-4.
- Berrino G., Corrado G., Luongo G., Toro B., (1984). Ground deformation and gravity changes accompanying the Pozzuoli uplift. Bulletin Volcanologique 47, 187–200.
- Bianchi R., Coradini A., Federico C., Giberti, G., Lanciano P., Pozzi J. P., Sartoris G., Scandone R. (1987). Modelling of surface ground deformation in volcanic areas: the 1970–1972 and 1982–1984 crises of Campi Flegrei, Italy. Journal of Geophysical Research 92, 14139–14150.
- Bonafede M. (1991). Hot fluid migration; an efficient source of ground deformation; application to the 1982-1985 crisis at Campi Flegrei-Italy. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 48, 187-198.
- Cubellis E., Ferri M., Luongo G. (1995). Internal structures of Campi Flegrei caldera by gravimetric data, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 65, 147-156.
- Deino A. L., Orsi G., de Vita S., Piochi M. (2004). The age of the Neapolitan Yellow Tuff caldera-forming eruption (Campi Flegrei caldera-Italy) assessed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating method. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 133, 157-170.
- Del Gaudio C., Ricco C., Aquino I., Brandi G., Serio C., Siniscalchi V. (2005). Misura di livellazione di precisione e dati tiltmetrici per il controllo delle deformazioni del suolo ai Campi Flegrei. Open File Report Osservatorio Vesuviano, n. 4.
- De Martino P., Tammaro U., Obrizzo F., Sepe V., Cecere G., Serio C., D’Alessandro A., Dolce M., Brandi G., Malaspina S., Pingue F. (2005). Il monitoraggio dell’area vulcanica napoletana attraverso la rete GPS permanente. Atti della 9^a Conferenza Nazionale ASITA, I, 915-920.
- De Natale G., Pingue F., Allard P., Zollo A. (1991). Geophysical and geochemical modeling of the Campi Flegrei caldera. In: Luongo G., Scandone R. (Eds.), Campi Flegrei. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 48, 199–222.
- De Natale G., Pingue F. (1993). Ground deformations in collapsed caldera structures. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 57, 19–38.
- De Natale G., Petrazzuoli S. M., Pingue F. (1997). The effect of collapse structures on ground deformations in calderas. Geophysical Research Letters, 24, 1555–1558.
- De Vivo B., Rolandi G., Gans P. B., Calvert A., Bohrson W. A., Spera F. J., Belkin H. E. (2001). New constraints on the pyroclastic eruptive history of the Campanian volcanic Plain (Italy). Mineralogy and Petrology, 73, 47-65.
- Di Vito M. A., Lirer L., Mastrolorenzo G., Rolandi G. (1987). The Monte Nuovo eruption Campi Flegrei, Italy. Bull. Volcanol. 49, 608–615.
- Di Vito M., Isaia R., Orsi G., Southon J., D’Antonio M., de Vita S., Pappalardo L., Piochi M. (1999). Volcanic and deformation history of the Campi Flegrei caldera in the past 12 ka. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 91, 221-246
- Dragoni M., Magnanensi C. (1989). Displacement and stress produced by a pressurized, spherical magma chamber, surrounded by a viscoelastic shell, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 56, 316-328.

- Dvorak J. J., Mastrolorenzo G. (1991). The mechanism of recent vertical crustal movements in Campi Flegrei caldera, Southern Italy, *Geology Society of America, Special Paper*, 263.
- Esposito T., Grassi V., Malaspina S., Serio C., Tammaro U. (2001). Rilevamento dei movimenti lenti del suolo al Somma-Vesuvio. Criteri di progettazione e prospettive di sviluppo delle reti esistenti. *Bollettino SIFET*, 3, 31-46.
- Gaeta F. S., De Natale G., Peluso F., Mastrolorenzo G., Castagnolo D., Troise C., Pingue F., Mita D. G., Rossano S. (1998). Genesis and evolution of unrest episodes at Campi Flegrei caldera: the role of the thermal fluid-dynamical processes in the geothermal system. *Journal of Geophysical Research*, 103, 20921-20933.
- Gaeta F. S., Peluso F., Arienzo I., Castagnolo D., De Natale G., Milano G., Albanese C., Mita D. G. (2003). A physical appraisal of a new aspect of bradyseism: The miniuplifts. *Journal of Geophysical Research*, 108, 20921-20933, doi:10.1029/2002JB001913.
- Gottsmann J., Rymer H., Berrino G. (2006). Unrest at the Campi flegrei caldera (Italy): a critical evaluation of source parameters from geodetic data inversion, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 150, 1-3, 132-145.
- 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.
- Lirer L., Luongo G., Scandone R. (1987). On the volcanological evolution of Campi Flegrei. *EOS*, 68, 16, 226-234.
- Luongo G., Cubellis E., Obrizzo F., Petrazzuoli S. M. (1991). The mechanics of the Campi Flegrei resurgent caldera-a model. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 45, 161-172.
- Morhange Ch., Bourcier M., Laborel J., Giallanella C., Goiran J. P., Crimaco L., Vecchi L. (1999). New data on historical relative sea level movements in Pozzuoli, Phlaegrean Fields, southern Italy. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24, 4, 349-354.
- Orsi G., de Vita S., Di Vito M. (1996). The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 74, 179-214.
- Parascandola A. (1947). I fenomeni bradisismici del Serapeo di Pozzuoli, Naples, privately published.
- 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 volcanic area*. 11th International FIG Symposium on Deformation Measurements. Nomicos Conference Centre, Santorini (Thera) Island, Grecia.
- Rosi M., Sbrana A. 1987. Phlegraean Fields, Quaderni de " La Ricerca Scientifica", 114 CNR, Roma, 114-175.
- Tammaro U., Malaspina S., Serio C., Cecere G., Siniscalchi V., D'Alessandro A., Pinto S., Brandi G., Dolce M., Russo A. (2004). La rete GPS in continuo dell'area vulcanica napoletana: dotazione strumentale, parametri di elaborazione e sviluppi tecnologici. Open File Report Osservatorio Vesuviano, n. 4.
- Todesco M., Chiodini G., Macedonio G. (2003). Monitoring and modelling hydrothermal fluid emission at La Solfatara (Phlegrean Fields, Italy). An interdisciplinary approach to the study of diffuse degassing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125,1-2, 57-79.
- Trasatti E., Giunchi C., Bonafede M. (2005). Structural and rheological constraints on source depth and overpressure estimates at Campi Flegrei Caldera, Italy, *Journal of Volcanology and Geothermal. Research*, 144, 105-118.
- Troise C., De Natale G., Pingue F. (2004) Non linear effects in ground deformation at calderas due to the presence of structural discontinuities, *Annals of Geophysics*, 47, 1513-1520.