

## RENDICONTO SULL'ATTIVITA' DI SORVEGLIANZA SVOLTA NEL 2008 (1 Gennaio – 31 Dicembre 2008)

### MISURE GRAVIMETRICHE AI CAMPI FLEGREI

Giovanna BERRINO, Vincenzo d'ERRICO & Giuseppe RICCIARDI

28 gennaio 2009

#### 1. Introduzione

Nel 2008 sono state effettuate due campagne gravimetriche ai Campi Flegrei; la prima nel mese di febbraio, la seconda dal 20 ottobre al 11 novembre. In entrambe le campagne le misure sono state rilevate sull'intera rete che, nel corso della secondo rilevamento, è stata ampliata con l'istituzione di due nuovi vertici posizionati lungo la linea costiera, e precisamente tra le stazioni di Bagnoli e La Pietra. Le due stazioni sono state indicate con i numeri CFG27 (Villa Anna) e CFG28 (Tonga Club) (figura 1). La rete è, quindi, ora costituita da 28 vertici (figura 1), tutti posizionati in corrispondenza, o in prossimità, di capisaldi di livellazione e collegati alla stazione assoluta di Napoli assunta quale riferimento.

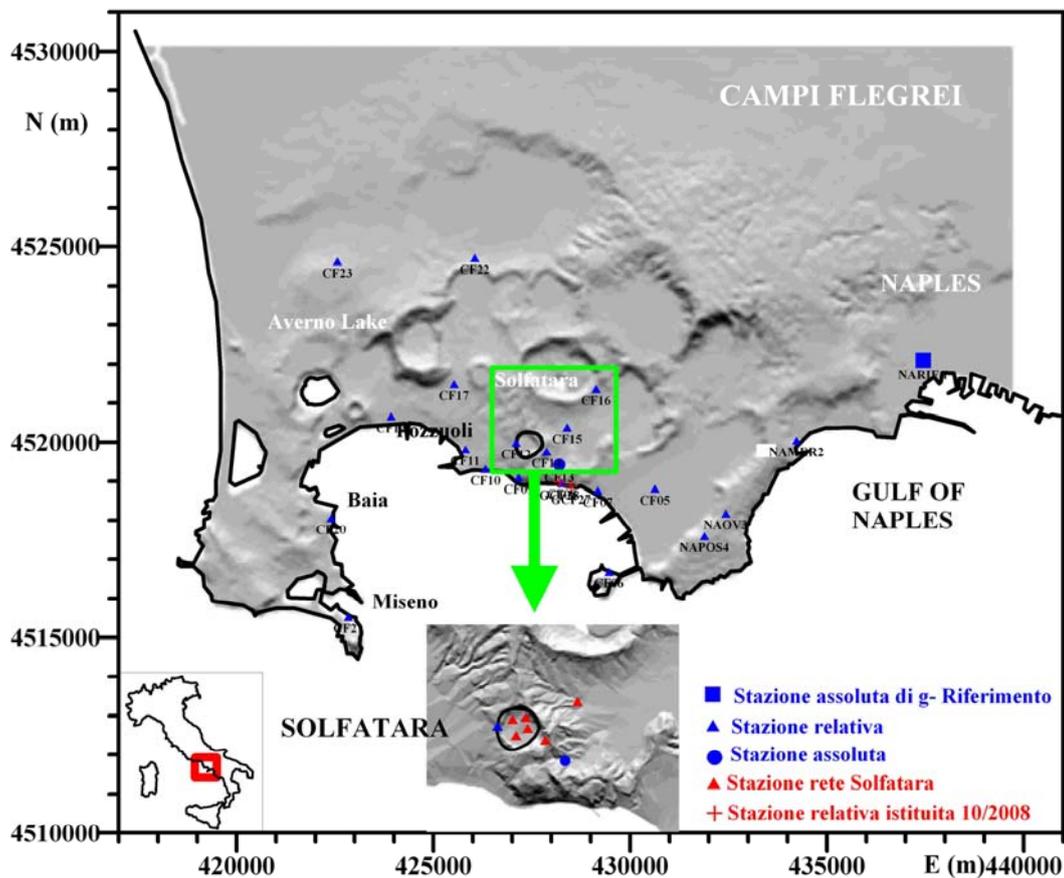


Figura 1: Rete gravimetrica ai Campi Flegrei

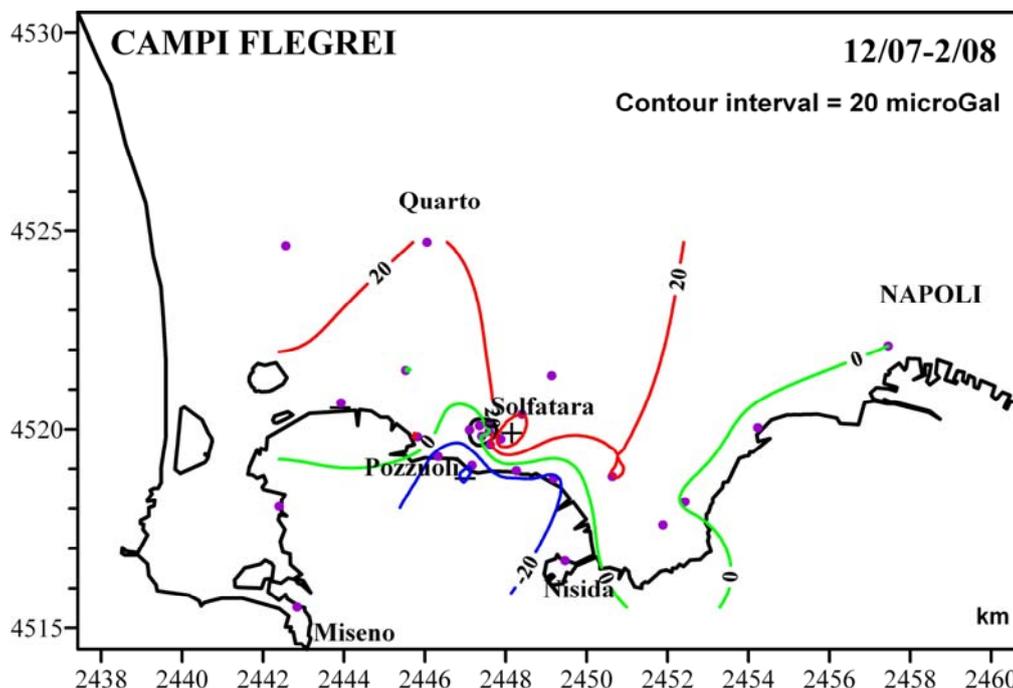
L'ubicazione della prima stazione (CFG27 – Villa Anna) è stata scelta al fine di dettagliare le variazioni di gravità nell'area dove solitamente si osservano i maggiori residui gravimetrici. La seconda (CFG28 – Club Tonga), invece, è stata posizionata nelle vicinanze del sito dove a breve sarà realizzata una stazione gravimetrica registratrice, alla quale sarà associata una nuova stazione

gravimetrica assoluta; essa sarà utilizzata quale stazione satellite per la validazione sul lungo termine delle variazioni di  $g$  registrate in continuo, oltre che per il controllo della deriva del gravimetro registratore e per contribuire alla definizione delle variazioni di gravità nell'area di La Pietra. La stazione gravimetrica permanente e la misura assoluta dell'accelerazione di gravità saranno realizzate nell'ambito del progetto "UNREST" (DPC-INGV, UR #3).

## 2. Le campagne del 2008

Tutte le letture gravimetriche sono state eseguite con il gravimetro LaCoste & Romberg, modello D numero 85 (LCR-D85). Gli errori medi risultanti dalle compensazioni sono, rispettivamente per la campagna di febbraio e quella di novembre, pari a  $\pm 9$  e  $\pm 8 \mu\text{Gal}$ . Le differenze di gravità tra le singole stazioni e quella di riferimento di Napoli per ciascuna campagna sono state confrontate tra loro e con quelle dell'ultima campagna condotta nel 2007 (dicembre) il cui errore medio era  $\pm 13 \mu\text{Gal}$ . I campi delle variazioni di gravità relativi a ciascun confronto sono stati tracciati tenendo conto degli errori ottenuti nelle singole campagne.

Per l'intervallo dicembre 2007 – febbraio 2008, il campo variometrico (**figura 2**) è stato tracciato con equidistanza di  $20 \mu\text{Gal}$ , e perciò sono considerate significative solo le variazioni superiori, in valore assoluto, a  $20 \mu\text{Gal}$ .



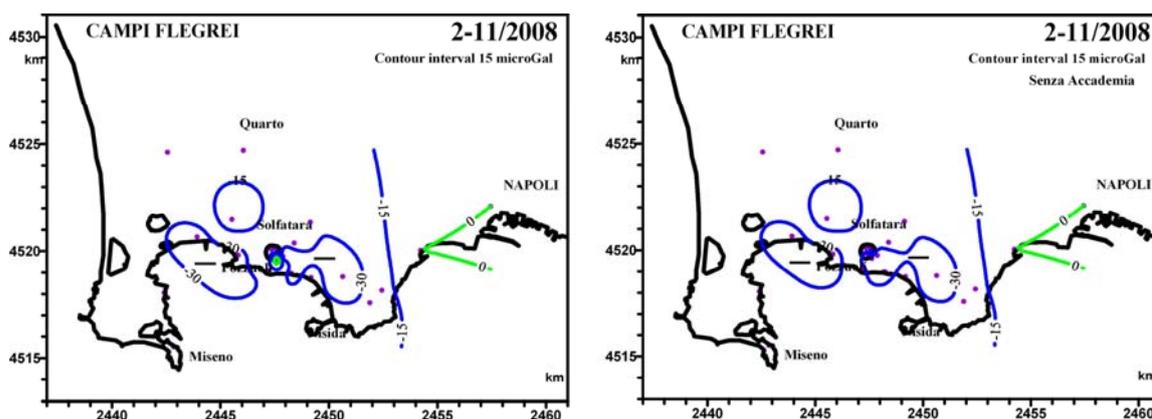
**Figura 2:** *Variazioni di gravità ai Campi Flegrei, riferite alla stazione assoluta di Napoli, nel periodo Dicembre 2007- Febbraio 2008.*

Il confronto mostra che le variazioni rilevate sono, in generale, ai limiti della significatività statistica, anche se sono individuabili due aree separate da una fascia a variazione di gravità nulla che corre praticamente lungo la costa, attraversando il cratere Solfatara. L'area settentrionale è caratterizzata da un aumento della gravità, mentre una diminuzione di  $g$  interessa la zona centrale della fascia costiera, da La Pietra a Pozzuoli Lungomare Yalta (ex Via Napoli) che è l'area dove vengono rilevati i maggiori movimenti verticali del suolo. Si ribadisce che tali variazioni non sono statisticamente significative; le uniche variazioni che possono essere considerate tali sono la diminuzione rilevata alla stazione di Gerolomini e l'aumento di  $g$  osservabile sul fianco orientale

del cratere Solfatarà, tra Pisciarelli e Accademia Aeronautica, che comunque si è presentato molto limitato nello spazio.

Il campo variometrico che mostra le variazioni di gravità relative all'intervallo di tempo successivo (Febbraio – Novembre 2008) è stato, invece, tracciato con equidistanza di 15  $\mu\text{Gal}$ , sempre tenendo in conto gli errori ottenuti nel corso delle singole campagne (**figura 3**). Per il tracciamento del campo non sono stati considerati i valori delle variazioni di gravità alle stazioni Monte Ruscello (-81  $\mu\text{Gal}$ ) e Accademia Aeronautica (+22  $\mu\text{Gal}$ ) poiché chiaramente indicativi di fenomeni a carattere locale. E' da far rilevare che la stazione Accademia è l'unica che mostra un aumento di  $g$  in un campo tutto negativo e che tale incremento continua un trend già osservato sin dall'intervallo marzo-dicembre 2007; ad oggi l'aumento totale di  $g$  è pari a 56  $\mu\text{Gal}$ . Il carattere puramente locale dell'incremento di  $g$  alla stazione Accademia Aeronautica è stato confermato anche dai risultati della livellazione condotta nel settembre 2008 dalla quale risulta, nello stesso punto, una subsidenza che, nell'intervallo di tempo dicembre 2007–settembre 2008, ammonta a -11 mm. Tale valore è risultato anomalo rispetto a movimenti di pochi millimetri misurati sul resto della rete (C. Del Gaudio, comunicazione personale).

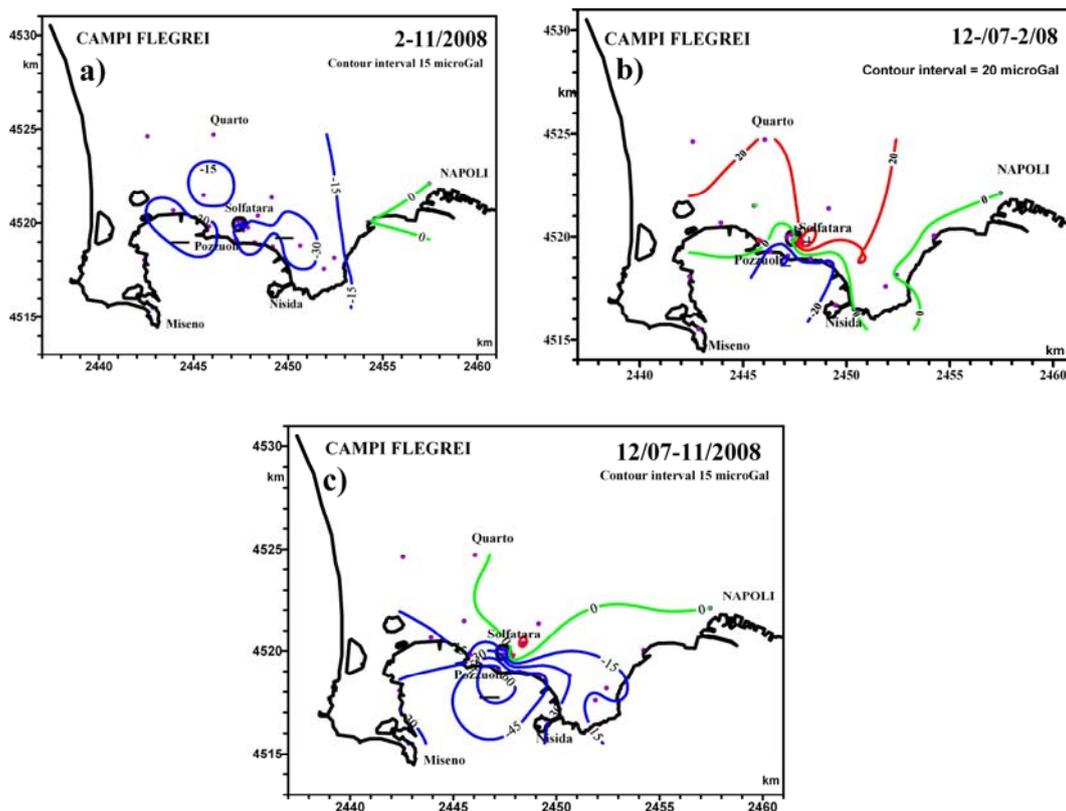
In ogni modo, l'esclusione del valore di Accademia non comporta alcuna modifica sostanziale nella geometria del campo variometrico, come si può osservare nella **figura 3** dove sono stati messi a confronto i campi tracciati con (immagine a sinistra) e senza (immagine a destra) il contributo della variazione di  $g$  in tale stazione.



**Figura 3: Confronto tra i campi delle variazioni di gravità ai Campi Flegrei nel periodo: Febbraio -Novembre 2008 tracciate con (sinistra) e senza (destra) il contributo del valore ottenuto alla stazione Accademia Aeronautica**

Il confronto tra i dati rilevati nel 2008 (febbraio e novembre – **figura 2, destra**) evidenzia che l'intera area è stata interessata da una generale diminuzione di gravità; le variazioni da considerare significative (comprese tra -30 e -40  $\mu\text{Gal}$ ) interessano la fascia costiera da Bagnoli ad Arco Felice. Il campo è però spezzato da una fascia, allineata in direzione Gerolomini- Solfatarà, con variazioni ai limiti della significatività statistica.

La diminuzione di gravità occorsa nel periodo febbraio-novembre 2008 (**figure 2 e 4a**) può considerarsi l'evoluzione di quella già evidenziata nel periodo precedente ( dicembre 2007 – febbraio 2008, **figure 2 e 4b**) nella zona centrale della fascia costiera, da La Pietra a Pozzuoli Lungomare Yalta (ex Via Napoli), che all'epoca appariva con valori statisticamente non significativi.



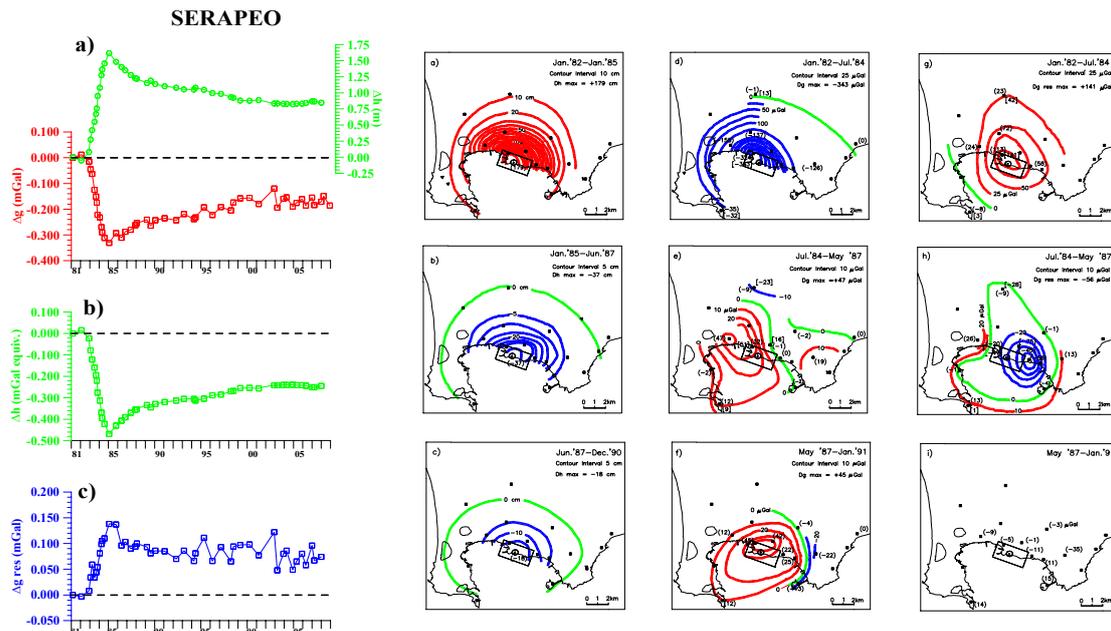
**Figura 4: Variazioni di gravità ai Campi Flegrei, riferite alla stazione assoluta di Napoli, nei periodi: a) Febbraio -Novembre 2008; b) Dicembre 2007 - Febbraio 2008; c) Dicembre 2007 – Novembre 2008**

La conferma si ha considerando il campo delle variazioni di  $g$  nell'intervallo dicembre 2007 – novembre 2008 (**figura 4c**) che è caratterizzato da una generale diminuzione di gravità; i valori più significativi, di  $-30$  e  $-60 \mu\text{Gal}$ , sono localizzati lungo l'intera fascia costiera, da Nisida a Miseno e le maggiori diminuzioni interessano come sempre la zona tra La Pietra e Serapeo. Il campo, che è stato tracciato escludendo il contributo della stazione Accademia, è ancora deformato dalle variazioni positive, anche se ai limiti della significatività statistica, lungo l'allineamento Solfatara – Pisciarelli, confermando altresì che tale zona, come visto sin dal 2003, ha un comportamento diverso da quello del resto dell'area flegrea. Il campo analizzato può considerarsi depurato, per la maggior parte, dell'effetto delle variazioni a carattere stagionale in quanto mette a confronto dati rilevati negli stessi periodi stagionali; inoltre esso evidenzia la ricomparsa di un campo con una distribuzione spaziale a geometria ben definita e omogenea, a simmetria quasi radiale e con le massime variazioni localizzate nell'area dove avvengono i maggiori movimenti del suolo, come dal novembre 2003 all'aprile 2006.

### **3. Le variazioni di gravità nel periodo 2003-2008 e confronto con i dati precedenti**

Al fine di inquadrare le variazioni di  $g$  sin dal 2003 è utile riassumere le caratteristiche principali del comportamento gravimetrico dell'area flegrea sin dal 1981, quando è stata istituita la rete. Quanto di seguito brevemente descritto è stato dettagliatamente presentato e discusso, oltre che in numerosi rapporti tecnici, in diverse pubblicazioni, tra le quali si segnalano in particolare quelle riportate nell'elenco di riferimenti bibliografici che segue.

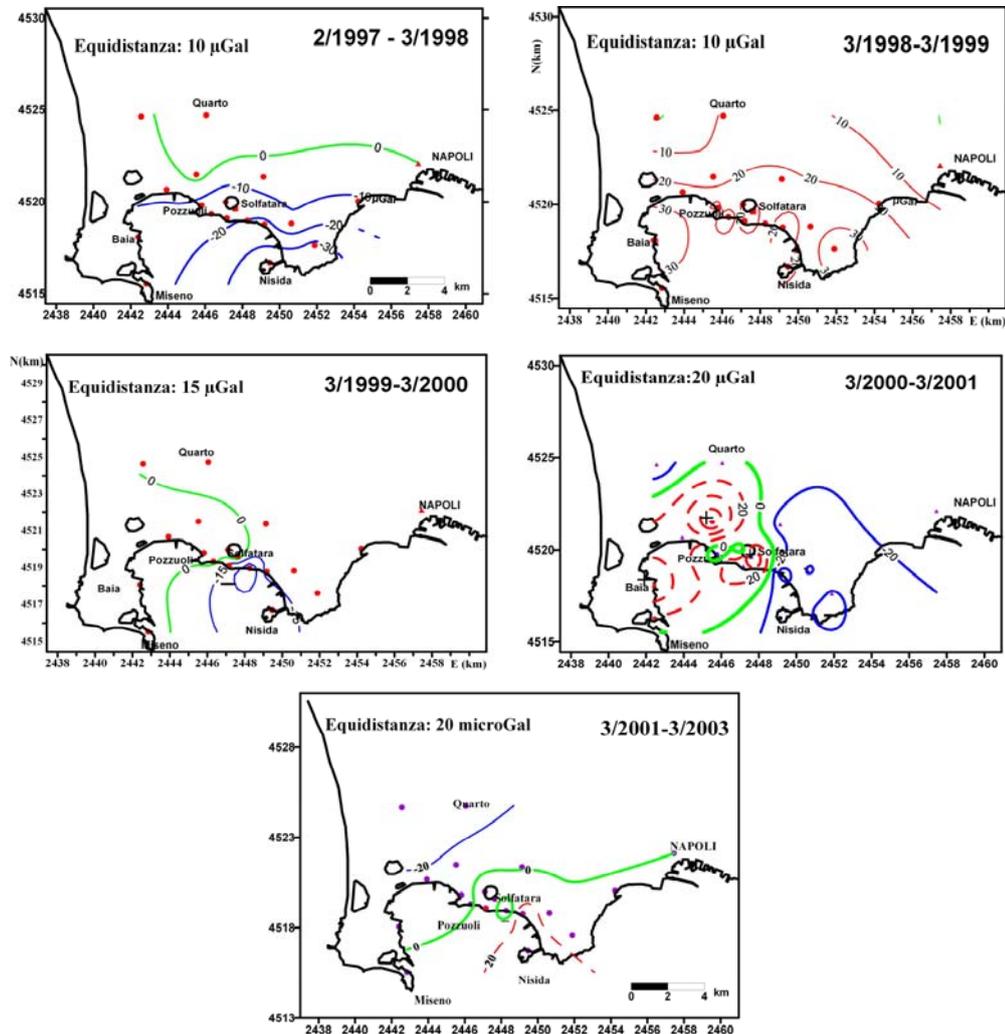
La caratteristica principale delle variazioni di gravità ai Campi Flegrei è che esse sono sempre state inversamente correlate con i movimenti del suolo, sia durante fasi di sollevamento che di abbassamento, sia durante significativi che piccoli movimenti del suolo. Residuando dalle variazioni di gravità l'effetto di quota, si ottengono i cosiddetti "residui gravimetrici" che sono indicativi di variazione e/o redistribuzione di massa. Durante la ben nota fase bradisismica 1982-1984 sono stati evidenziati significativi residui positivi (fino a  $+150 \mu\text{Gal}$  totalmente), mentre, sino al 1987, durante la fase di abbassamento più veloce, si sono ottenuti residui gravimetrici negativi. Dagli anni '90 i residui che si hanno sono di piccola entità. Quale esempio, in **figura 5 (a,b,c)** si mostra la variazione di gravità nel tempo (1981 – 2008) alla stazione Serapeo, scelta perché tra quelle che hanno la più lunga serie temporale di misure e, tra queste, quella più vicina all'area di massima variazione di quota.



**Figura 5:** A sinistra è illustrata la variazione di gravità e di quota (a) alla stazione Serapeo; b) e c) rappresentano rispettivamente il movimento del suolo espresso in  $\Delta g$  equivalenti e i residui gravimetrici dopo aver sottratto dai  $\Delta g$  i  $\Delta g$  equivalenti (effetto di variazione di quota). A destra sono illustrati, per diversi intervalli di tempo, e rispettivamente nelle colonne a sinistra, centrale e a destra, i campi delle distribuzioni dei movimenti verticali del suolo, delle variazioni di gravità e dei residui gravimetrici (da Berrino, 1994, modificati e aggiornati). In tutti i campi, le curve rosse indicano variazioni positive, le blu variazioni negative, le verdi variazioni nulle.

I vari campi della distribuzione spaziale delle variazioni di gravità (**figura 5, mappe colonna centrale**), dal 1981 alla fine degli anni '80, hanno mostrato una geometria simile a quella dei movimenti verticali del suolo (**figura 5, mappe colonna a sinistra**), con una forma a "campana" con valori massimi al centro della caldera e con variazioni nulle o non significative ai bordi. Sia durante la fase di sollevamento che quella di abbassamento i massimi residui gravimetrici erano localizzati ad est dell'area dove venivano misurati i maggiori movimenti, ovvero nella zona di La Pietra (**figura 5, mappe colonna destra**) che cade in corrispondenza dell'area dove si hanno i più forti gradienti dei movimenti verticali e le maggiori deformazioni orizzontali. Dalla fine degli anni '80/inizi anni '90 e sino al 2003, la distribuzione delle variazioni di  $g$ , in genere ai limiti della significatività statistica e in particolare su brevi intervalli di tempo, non ha più mostrato una geometria ben definita, pur rimanendo la correlazione inversa con i movimenti del

suolo. Alcuni esempi di campi variometrici tracciati per alcuni periodi dagli anni '90 al 2003 sono rappresentati nella **figura 6**.



**Figura 6:** Alcuni esempi che rappresentano i campi della distribuzione spaziale delle variazioni di gravità dagli anni '90 al 2003.

Come già fatto presente in diversi precedenti rapporti sull'attività di sorveglianza svolta dall'INGV-OV, dal novembre 2003 e sino all'aprile 2006, si ricomincia ad osservare una distribuzione spaziale delle variazioni di  $g$  caratterizzata da una geometria ben definita e omogenea, a simmetria quasi radiale e con le massime variazioni localizzate nell'area dove avvengono i maggiori movimenti del suolo. La differenza con quanto evidenziato negli anni '80 è che la correlazione inversa tra  $\Delta g$  e  $\Delta h$  non è più ben evidente. Infatti, le variazioni di  $g$  e di  $h$  presentano lo stesso segno. Inoltre i movimenti verticali sono di piccola entità e, di conseguenza, il  $\Delta g$  equivalente è altrettanto piccolo, contenuto entro l'errore sulla misura gravimetrica. Pertanto, le variazioni di gravità misurate possono essere considerate esclusivamente "residui gravimetrici", indicativi di variazioni di massa. Infine, mentre le profondità delle sorgenti negli anni '80 erano dell'ordine di 3 km, i fenomeni rilevati dal 2003 al 2005 sono associabili a sorgenti la cui profondità è contenuta entro i 2 km e inferiore a 1 km per i periodi successivi sino al 2006.

Come già dettagliatamente riportato nei numerosi rapporti di sorveglianza redatti all'epoca dall'Osservatorio Vesuviano, quanto detto suggerisce che le variazioni di  $g$  rilevate dal 2003 al

2006 possono essere associabili alla dinamica del sistema idrotermale dell'area. Alla stessa conclusione si perviene se si analizzano le relazioni dirette tra variazioni di gravità ( $\Delta g$ ) e variazioni di quota ( $\Delta h$ ). Confrontando i gradienti sperimentali con quelli indicati in uno schema teorico (Gottsmann et al., 2003), si evidenzia molto chiaramente che le variazioni di  $g$  rilevate sono da attribuire a processi superficiali quali ad esempio l'attività del sistema idrotermale e/o fluttuazioni nelle emanazioni gassose.

Allo scopo di inquadrare le ultime variazioni con quanto osservato dal novembre 2003, i dati rilevati nell'ultima campagna sono stati organizzati anche tenendo conto di tutte le osservazioni precedenti. Il confronto con i periodi precedenti è stato fatto solo per le variazioni di gravità non residue, poiché gli ultimi dati rilevati non sono stati ancora corretti dell'effetto delle variazioni di quota che, nella zona di maggiore interesse e nel periodo dicembre 2007 – settembre 2008, sono dell'ordine di alcuni millimetri (-2; -3). Siffatti movimenti in termini di  $\Delta g$  equivalenti significano variazioni di  $g$  largamente inferiori all'errore sulle misure gravimetriche. Inoltre le due ultime campagne di livellazione sono state condotte solo su una porzione della rete altimetrica. Nella **figura 7 (a-e)** sono rappresentate le variazioni di gravità dal novembre 2003 al dicembre 2007 per intervalli annuali, mentre nella **figura 7 (f-i)** le variazioni in diversi intervalli ciascuno riferito al novembre 2003.

La scelta di rappresentare tali intervalli è stata dettata dall'aver osservato, dal novembre 2003, due importanti fenomeni che si sono sviluppati prevalentemente in due distinti periodi: novembre 2003-novembre 2004 (**figura 7a**) e novembre 2004-novembre 2005 (**figura 7b**) (periodi già dettagliatamente descritti in precedenti rapporti sull'attività di sorveglianza INGV - Osservatorio Vesuviano) e precedentemente alla fase di sollevamento rilevata nel 2004-2006. Le due fasi sono state paragonabili per estensione, ma l'incremento di gravità è risultato pari a circa il 50% della diminuzione di  $g$ . Infatti, il confronto complessivo novembre 2003 – novembre 2005 ha evidenziato il permanere di un residuo negativo nel centro della caldera, osservabile fino al 2006. Dopo un periodo di tempo in cui sono state misurate variazioni di  $g$  poco significative, nell'ultimo intervallo considerato (dicembre 2007-novembre 2008; **figura 7e**) si ripresenta, per grosse linee, lo stesso fenomeno osservato nell'intervallo novembre 2003-novembre 2004 (**figura 7a**); ciò è ancor più enfatizzato se si considerano le variazioni cumulative rispetto al novembre 2003 (**colonna destra della figura 7; figura 7i**). Il riformarsi di una estesa area di diminuzione di  $g$ , centrato nella zona centrale della fascia costiera, e il progressivo ampliamento della fase negativa residua dei primi due fenomeni (dal novembre 2004 al novembre 2005) era già stata evidenziata nel 2007 dal confronto complessivo novembre 2003-dicembre 2007 (**figura 7h**) (Riferimento Rendiconto sull'attività di sorveglianza INGV-OV, Il semestre 2007) dove l'area negativa appariva già paragonabile come entità a quella relativa all'intero periodo novembre 2003 – novembre 2005 (**figura 7f**). Il perdurare di questa fase negativa anche nel 2008, maggiormente ampliata, sia in estensione che entità, confermerebbe quanto già suggerito alla fine del 2007, ovvero il riproporsi di una fenomenologia simile a quella osservata nel periodo novembre 2003-novembre 2004 che ha preceduto il sollevamento del suolo verificatosi nel 2004-2006.

#### **Riferimenti bibliografici suggeriti:**

- Berrino G., Corrado G., Luongo G., Toro B., 1984. Ground deformation and gravity changes accompanying the 1982 Pozzuoli uplift. *Bull. Volcanol.*, vol. 47-2, pp. 187-200
- Berrino G., Rymer H., Brown G.C., Corrado G., 1992. Gravity-height correlations for unrest at calderas. *Journ. Volcanol. Geoth. Res.*, vol. 53, 11-26
- Berrino G., 1994. Gravity changes induced by height-mass variations at Campi Flegrei caldera. *Journ. Volcanol. Geoth. Res.*, 61, 293-309
- Gottsmann J., Berrino G., Rymer H., William-Jones G., 2003. Hazard assessment during unrest caldera at the Campi Flegrei, Italy: a contribution from gravity-height gradients. *Earth and Planetary Science Letters.*, 211, 295-309

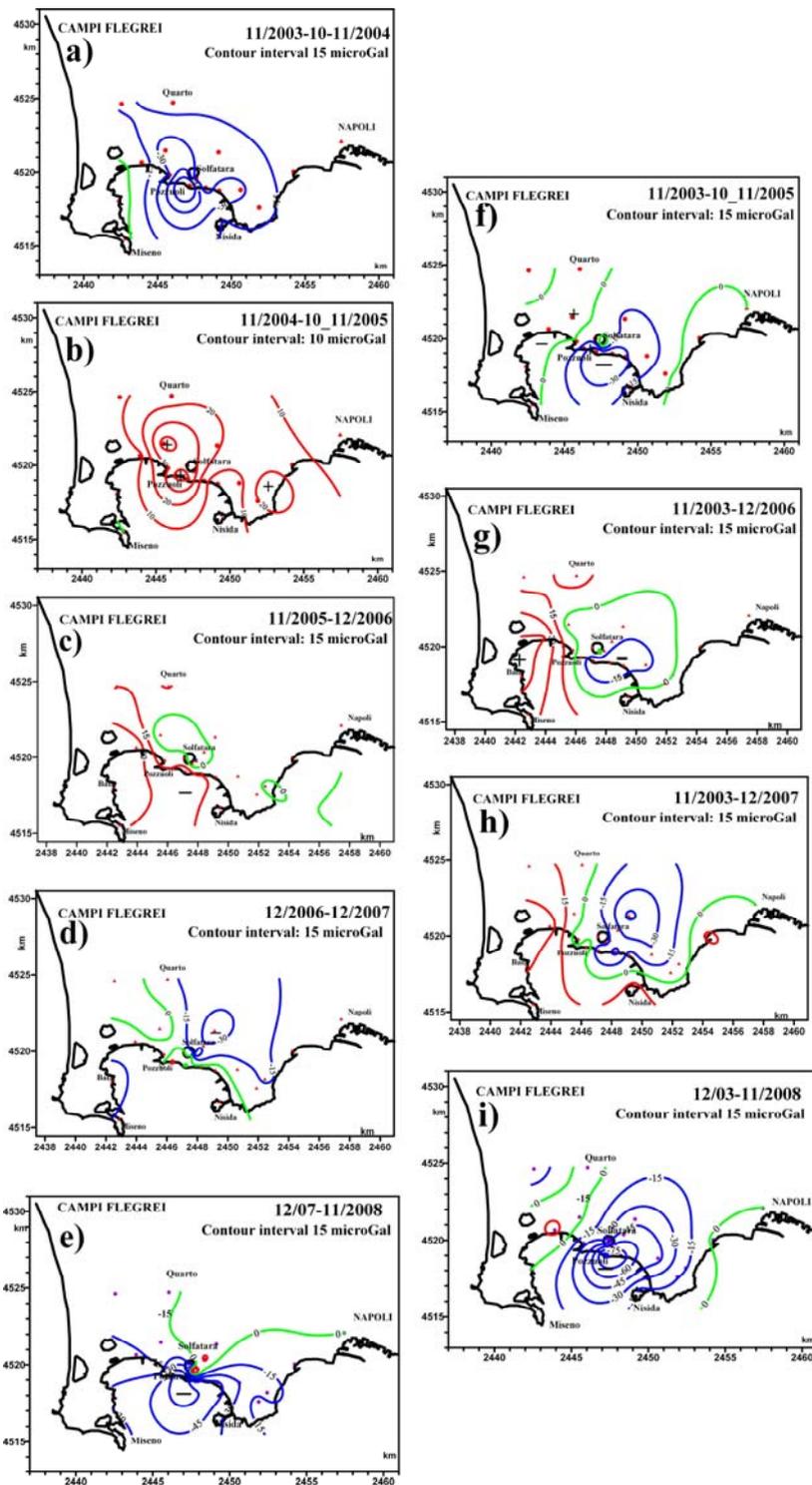


Figura 7: Variazioni di gravità ai Campi Flegrei per diversi periodi di lunghezza annuale. Colonna a sinistra (a-e): variazioni, per intervalli annuali dal novembre 2003. Colonna a destra (f-i): variazioni cumulative rispetto al novembre 2003