

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e
Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea triennale in Fisica

Analisi della deformazione del suolo ai Campi Flegrei

Relatori:

Dott. G. Russo

Dott. U. Tamaro

Candidato:

Giulia Buono

Matricola N85001260

A.A. 2019/2020

Agli abitanti di questa terra ballerina

Indice

Introduzione	4
Capitolo 1	5
1. Deformazione del suolo dei Campi Flegrei.....	5
1.1. L'origine dei Campi Flegrei.....	5
1.2. La rete NeVoCGPS dell'Osservatorio Vesuviano	7
Capitolo 2	10
2. Analisi dati	10
2.1. Confronto temporale e media mobile centrata.....	10
2.2. Processing dei dati e determinazione del trend.....	11
2.3. Interpretazione dei trend	18
Conclusioni.....	21
Bibliografia.....	22

Introduzione

La caldera dei Campi Flegrei è un vulcano attivo che occupa una vasta area che va dal litorale domizio alla parte occidentale della città di Napoli. In essa è possibile ritrovare monumenti invasi dall'acqua, coste che sono emerse e poi di nuovo tornate sotto il livello del mare facendo scomparire pezzi di vita e di storia, un territorio vulcanico che già i greci avevano definito "terre ardenti", appunto, i Campi Flegrei. La sismicità di quest'area è accoppiata ad un fenomeno chiamato bradisismo, tipico delle caldere, cioè delle zone dove si è avuto un importante ribassamento iniziale del suolo a causa di una eruzione molto intensa. Esso consiste infatti in un periodico innalzamento o abbassamento del livello del suolo, relativamente lento sulla scala dei tempi umani ma molto veloce rispetto ai tempi geologici. Data la notevole densità di popolazione dell'area, L'Osservatorio Vesuviano ha dispiegato sul terreno diverse reti di sorveglianza, ciascuna dedicata ad uno specifico parametro geochimico o geofisico utile a caratterizzare lo stato del vulcano.

In questo lavoro di tesi, utilizzando i dati che mi sono stati forniti dall'Unità Funzionale di Geodesia dell'Osservatorio, ho svolto un'analisi al fine di ricavare informazioni sul comportamento dello spostamento del suolo di quest'area. La tesi è strutturata in due capitoli: nel primo capitolo è fornita una breve introduzione storica dei Campi Flegrei e una descrizione della rete di stazioni NeVoCGPS installata sul territorio flegreo per un accurato monitoraggio; nel secondo capitolo è presentata l'analisi dei dati seguita da commenti sui risultati ottenuti e conclusioni che offrono un suggerimento per una modellizzazione più complessa sulla struttura calderica.

Capitolo 1

1. Deformazione del suolo dei Campi Flegrei

1.1. L'origine dei Campi Flegrei

Centinaia di migliaia di persone vivono nella caldera dei Campi Flegrei, un sistema vulcanico situato ad ovest di Napoli, che ha mostrato negli ultimi 60 anni chiari segni di attività. La storia vulcanica dei Campi Flegrei è caratterizzata da due grandi eventi connessi a due episodi di sprofondamento che, sovrapponendosi, hanno generato una caldera complessa che rappresenta la struttura più evidente del Distretto Vulcanico Flegreo: l'eruzione dell'Ignimbrite Campana avvenuta circa 39.0000 anni fa e l'eruzione del Tufo Giallo Napoletano avvenuta circa 15.000 anni fa, la quale fu accompagnata dalla formazione di una caldera che determinò lo sprofondamento di circa 600 m dell'area compresa tra Capo Miseno e Nisida [1].

L'attività vulcanica più recente, concentrata sul bordo della caldera stessa, consiste in eruzioni di minore magnitudine, l'ultima delle quali, nel 1538 d.C., formò il cono di tufo del Monte Nuovo. Questa eruzione è l'unica di cui possediamo una documentazione storica. Sappiamo quindi che essa fu preceduta da una intensa attività sismica e da variazioni del livello del suolo molto importanti: seguì un periodo di innalzamento del terreno, che interruppe una tendenza secolare di subsidenza. Tale subsidenza continuò con lo stesso tasso dopo l'eruzione del Monte Nuovo fino al 1950, quando iniziò una nuova fase di sollevamento. Questo nuovo periodo è caratterizzato da frequenti rialzi episodici, accompagnati da attività sismica, seguiti da periodi di subsidenza che non hanno però riportato il suolo a livelli precisi.

Nei periodi compresi tra il 1970-72 ed il 1982-84 gli abitanti dell'area flegrea, e di Pozzuoli in particolare, sono stati testimoni e vittime di un fenomeno di sollevamento del suolo accompagnato da un elevato numero di scosse sismiche (Figura 1) che, in pochi mesi, ha portato quest'ultimo ad un livello, complessivamente, di circa 3.5 m più alto. Questo fenomeno è noto con il nome di bradisismo (dal greco *bradýs*, "lento" e *seismós*, "scossa"), un periodico abbassamento/innalzamento del livello del suolo, il quale interessa altre caldere nel mondo, come quella di Rabaul in Indonesia, Long Valley negli USA, Santorini in Grecia. Tuttavia, la caratteristica che differenzia la caldera dei Campi Flegrei è che la velocità di deformazione del suolo è più alta rispetto ad altre parti del mondo.

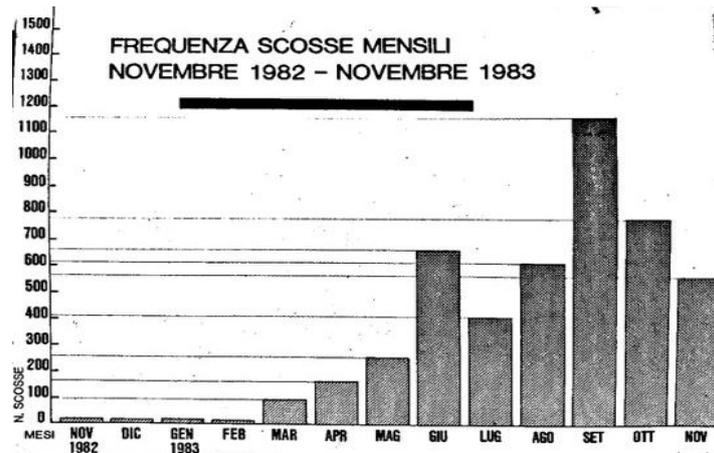


Figura 1: Istogramma del numero di scosse mensili verificatesi durante l'attività bradisismica del 1982-1983 nella zona dei Campi Flegrei pubblicato il 22 Dicembre 1983 su "Il Mattino"

Da sempre il bradisismo ha condizionato la vita e l'economia dei popoli di questo territorio: la Pozzuoli romana decadde principalmente per la sommersione delle opere portuali. Nel X secolo il mare occupava buona parte dell'attuale borgo, circondando quasi completamente la rocca del Rione Terra, e tre colonne bianco marmo affioravano dall'acqua per segnalare il sito dell'antico *macellum* (mercato di epoca romana meglio conosciuto con il nome di "Tempio di Serapide"), luogo, più di ogni altro, testimonianza nei secoli del bradisismo flegreo (Figura 2). Le rovine di tale costruzione (che risale alla fine del I sec.d.C) sono state di grande utilità per la ricostruzione dell'andamento del bradisismo grazie ai fori prodotti dai litodomi (molluschi marini che vivono in ambiente costiero al limite tra l'alta e la bassa marea) sulle colonne che, a partire dal IV sec. d.C. in poi, testimoniano le variazioni del suolo rispetto al livello marino. Inoltre, la presenza di resti di ville romane nel mare antistante Baia dimostra che il fenomeno è attivo almeno da 2000 anni [5].

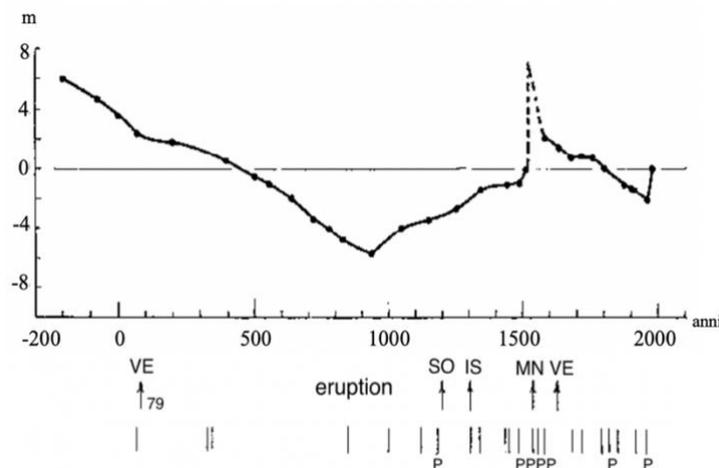


Figura 2: Trend di deformazione di Serapeo proposto da Parascandola (1947). Eruzioni: le frecce indicano le principali eruzioni locali probabilmente in grado di influenzare Pozzuoli (VE: Vesuvio; SO: Solfatarata; IS: Ischia; MN: Monte Nuovo). Terremoti: le barre indicano i principali terremoti in Campania e le barre con la lettera P indicano i terremoti nella zona di Pozzuoli.

Il massimo innalzamento del terreno e la posizione dei terremoti durante le cosiddette "crisi bradisimiche" sono localizzati al centro della caldera dei Campi Flegrei, vicino al cratere della Solfatara. Attualmente, l'area della Solfatara è sede di attività fumarolica ed è interessata da un intenso processo di degassamento diffuso della CO₂ vulcanica-idrotermale. Recenti studi hanno messo in evidenza che episodi di degassamento del magma hanno un ruolo rilevante nell'innescare i periodi di agitazione vulcanica che interessano l'area. [2]. Il sollevamento delle due crisi bradisimiche è stato parzialmente recuperato nel periodo successivo portando ad una diminuzione del livello del suolo stabile fino al 2004. Tale fase di discesa è caratterizzata da fenomeni di mini up-lift, cioè episodi di innalzamento del suolo limitati nel tempo e nel massimo valore di spostamento raggiunto. L'area flegrea ha ripreso a salire a seguito di un episodio di mini uplift registrato nel 2006, con un'evidente accelerazione a partire dal 2011.

1.2. La rete NeVoCGPS dell'Osservatorio Vesuviano

Essendo l'area dei Campi Flegrei un territorio intensamente urbanizzato e di complessa storia eruttiva, essa è tenuta sotto sorveglianza dall'Osservatorio Vesuviano, sezione dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), ente incaricato del monitoraggio multiparametrico dell'area vulcanica napoletana, ove sono allocati tre complessi vulcanici (il Somma-Vesuvio, la caldera dei Campi Flegrei, e l'isola di Ischia). L'Osservatorio ha dispiegato sul terreno diverse reti di sorveglianza, ciascuna dedicata ad uno specifico parametro geochimico (volume di emissione di CO₂, composizione chimica e isotopica e temperatura delle fumarole, ecc.) o geofisico (sismicità, variazioni di accelerazione di gravità, deformazioni del suolo, ecc.) utile a caratterizzare lo stato del vulcano.

Per quanto riguarda la misura del livello del suolo, fino al 2007 l'Osservatorio conduceva periodiche campagne di livellazione geodetica. Dal 2000 in poi ha implementato una rete di stazioni GPS in continua che consentono l'acquisizione di molte più misure nel tempo, anche se in un minor numero di punti rispetto alla livellazione geodetica. Tale rete di GPS, la Neapolitan Volcanoes Continuous GPS (NeVoCGPS), costituita attualmente da 30 stazioni, monitora in continuo la posizione dei caposaldi della rete e trasmette le sue misure automaticamente all'Osservatorio che processa i dati e li immagazzina [3]. La rete geodetica è stata completata con la messa in opera di una rete mareografica per il monitoraggio di Pozzuoli, Napoli e del litorale vesuviano.

L'Unità Funzionale di Geodesia dell'Osservatorio Vesuviano mi ha fornito i dati acquisiti dall'inizio dell'installazione della rete fino a circa la metà del 2013 delle 14 stazioni che operano nell'area flegrea mostrate in Figura 3.

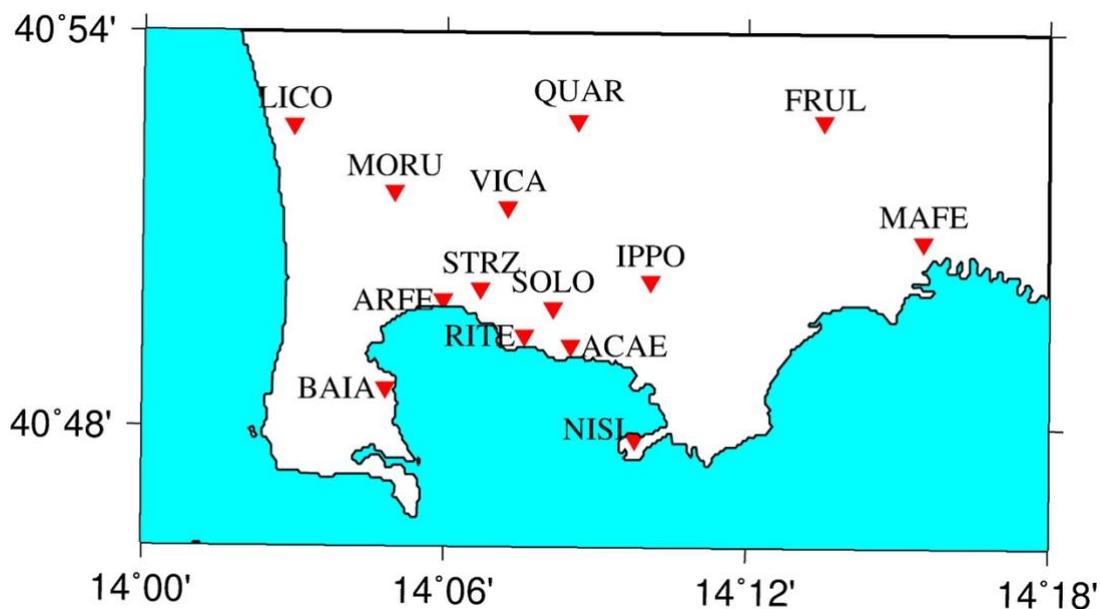


Figura 3: Stazioni della rete NeVoCGPS operanti nell'area flegrea (la proiezione scelta (utm) determina una leggera rotazione del rettangolo)

I ricevitori GPS sono impostati per l'acquisizione in locale con intervallo di campionamento di 30 secondi [4], i dati vengono poi processati su base giornaliera per correggere effetti dovuti alla propagazione del segnale attraverso la ionosfera e alle antenne di ricezione. Quando vengono comunicati i dati sul passaggio dei satelliti, i dati acquisiti vengono riprocessati su base settimanale e le posizioni delle stazioni determinate. Nella rete GPS diverse stazioni possono essere considerate di riferimento, perché ubicate in aree stabili o, comunque, nettamente al di fuori delle zone di massima deformazione, come la stazione ENAV situata sulla penisola sorrentina e considerata immune dal bradisismo. Per mettere in luce le variazioni di posizione dovute al bradisismo, a tutte le stazioni viene sottratto il segnale della stazione ENAV. In questo modo la componente tettonica di 2.5 cm/anno in direzione NE dovuta al movimento della placca Eurasiatica viene eliminata e le posizioni delle stazioni sono tutte riferite ad un sistema di riferimento con gli assi orientati in direzione S-N, W-E e verticale verso l'alto. Infine, i dati vengono mediati su di una settimana, dato che non ci si aspetta variazioni significative del livello del suolo su questo periodo.

Dagli output della combinazione delle soluzioni giornaliere e settimanali vengono ricavate le serie temporali delle variazioni in Nord, Est, Up delle coordinate delle stazioni. Come esempio viene riportata in Figura 4, la serie temporale delle variazioni della componente verticale settimanale calcolate per la stazione di RITE, ubicata nelle adiacenze della zona di massima deformazione dei Campi Flegrei, che ben rileva gli spostamenti dell'area.

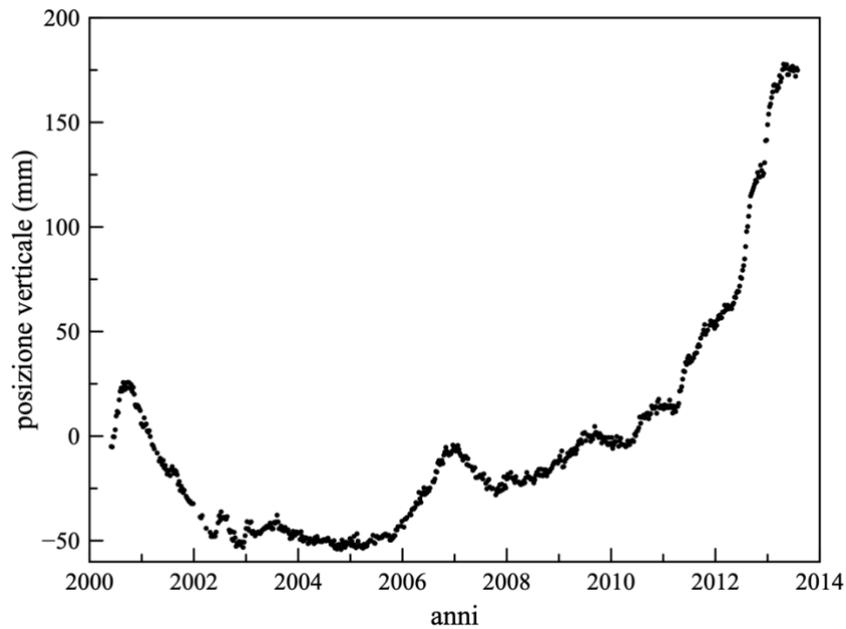


Figura 4: Serie temporale delle variazioni della componente verticale settimanale (in millimetri) della stazione di RITE.

La sorveglianza GPS deve essere considerata un importante strumento nel monitoraggio geodetico di aree ad alto rischio vulcanico. Come già rilevato, rispetto alla sorveglianza geodetica tradizionale fatta con la livellazione su rete di percorsi chiusi, il GPS fornisce dati spazialmente meno estesi, ma relativi a tutte le componenti dello spostamento (non solo quella verticale) e, soprattutto, in quasi real time, particolarmente utili in caso di dinamica veloce.

Capitolo 2

2. Analisi dati

2.1. Confronto temporale e media mobile centrata

Per ridurre le variazioni di alta frequenza presenti nei dati e non significative per la mia analisi ho applicato ai dati la procedura di media mobile centrata con finestra temporale di cinque settimane. Questa finestra temporale è stata scelta perché non mi aspetto significative variazioni del bradisismo su questo arco temporale. Ho osservato che vi sono delle settimane in cui alcune stazioni non hanno funzionato, dunque non tutte le stazioni presentano i dati agli stessi istanti di tempo. Di tali “buchi” temporali ho tenuto conto nell’operazione di media mobile. Dal confronto delle due immagini in Figura 5 si può notare che il grafico di sinistra, in cui sono riportati i dati non mediati, vede molto rumore dovuto a variazioni rapide che non sono però sintomo di nessun fenomeno vulcanologico ma sono solo variazioni di fluttuazioni dovute al caso. Nel grafico di destra si può vedere come la procedura di media a cinque punti permetta di ottenere una curva più liscia. Ai dati così ottenuti è stato associato un errore calcolando la deviazione standard sull’intervallo.

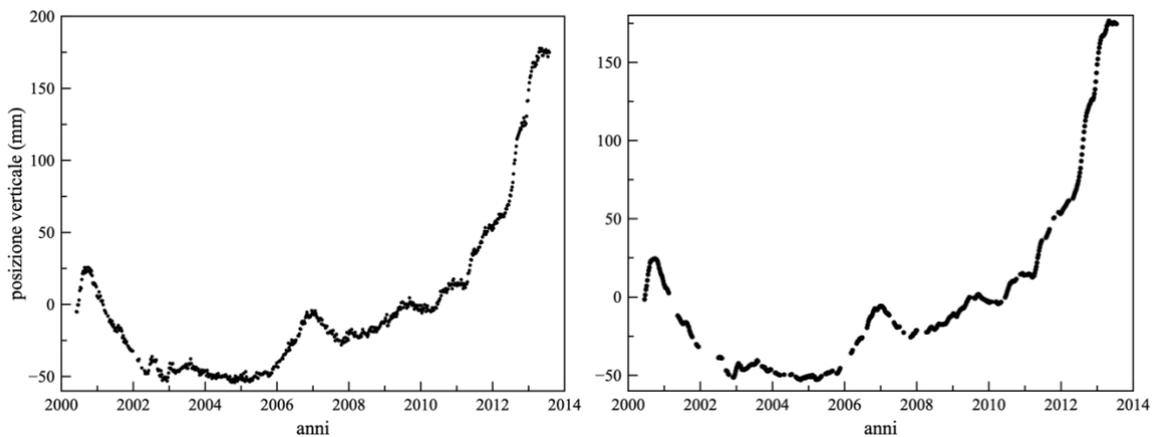


Figura 5: A destra la serie temporale delle variazioni della componente verticale di RITE utilizzando i dati originali. A sinistra la serie temporale delle variazioni della componente verticale di RITE utilizzando i dati ottenuti con la procedura di media mobile.

2.2. Processing dei dati e determinazione del trend

Analizziamo quindi l'andamento del sollevamento della stazione di RITE. Come si può osservare in Figura 6, dopo una fase di subsidenza terminata circa a metà del 2002, la posizione della stazione è rimasta praticamente costante fino alla fine del 2005, momento dal quale è iniziato un periodo di risalita tuttora attivo. Nel grafico si osserva un periodo di risalita breve localizzato tra il 2006 e il 2008, che si può considerare come evento di mini uplift, sovrapposto ad un trend globale più ampio che interessa tutto l'arco temporale che va dal 2006 al 2013. A partire dalla seconda metà del 2011 il trend cambia decisamente mostrando un aumento della velocità di sollevamento. Oggetto di studio di questo lavoro di tesi sono stati i due eventi di uplift evidenziati in Figura 6, in particolar modo la determinazione di un trend bilineare in grado di descrivere la variazione della velocità del suolo dell'area Flegrea.

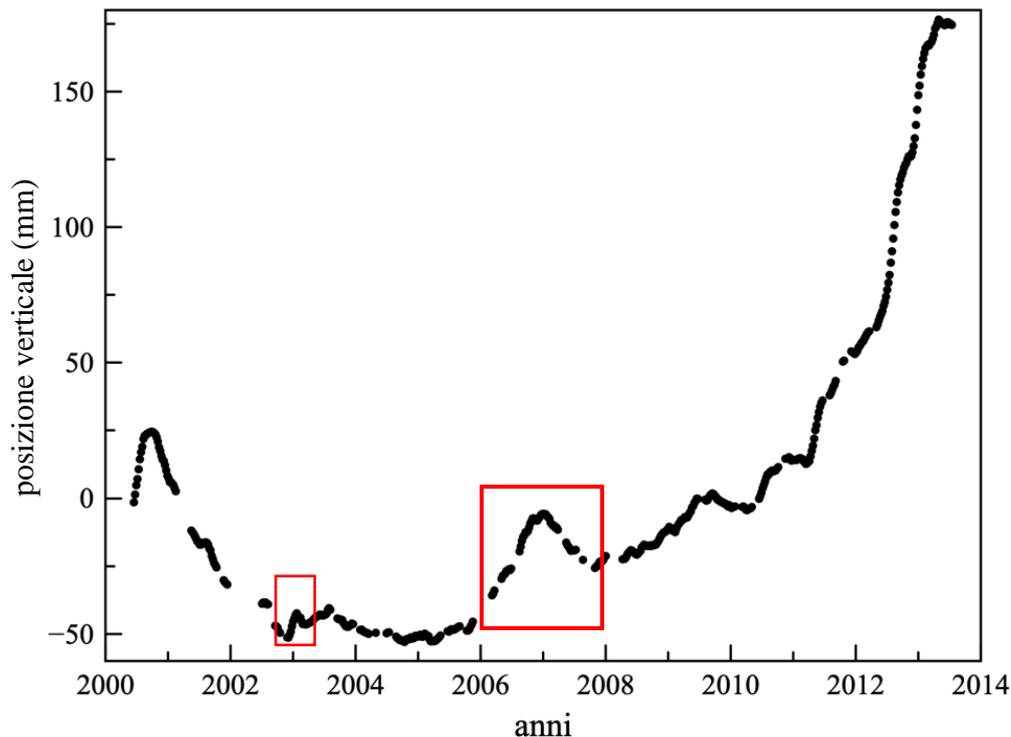


Figura 6: Serie temporale del sollevamento di RITE. I rettangoli individuano i periodi studiati nel lavoro di tesi.

Tale procedura è stata applicata a tutte le stazioni GPS che operano nell'area Flegrea. Siccome non tutte le stazioni sono state installate nello stesso momento, ho isolato solamente quelle attive dal 2000.

In primo luogo, ho considerato un intervallo temporale prima dell'evento di uplift del 2006-2008. Ho determinato le rette di best-fit in grado di riprodurre l'andamento dei dati del suddetto

intervallo. Tuttavia, tali rette non sono indipendenti. Il punto di ginocchio è comune alle due rette, in modo da determinare un trend continuo. Questo comportamento può essere descritto con un trend bilineare del tipo:

$$f(x) = \begin{cases} a_1 + b_1 t, & t \leq t_0 \\ a_1 + b_1 t_0 + b_2(t - t_0), & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

Tale condizione di continuità riduce il numero di parametri poiché è possibile scrivere l'intercetta della seconda retta in funzione dei coefficienti della prima.

Attraverso l'utilizzo del programma Excel sono stati ricavati la pendenza, l'intercetta e il punto di raccordo t_0 dei due trend secondo la seguente procedura di fit pesato: è stato determinato un intervallo di tempo che ragionevolmente potesse contenere il punto di ginocchio. Ogni punto di questo intervallo è stato poi considerato come punto di ginocchio, è stato fatto il fit e calcolato l'RMS. Il dato t_0 che restituisse il valore di RMS minore può essere considerato effettivamente come il punto comune delle due rette. Fissato un t_0 all'interno di quest'intervallo, ho determinato i parametri della prima retta a_1 , b_1 , e i rispettivi errori. Ho ottenuto la seconda retta sostituendo nella formula (1) i parametri a_1 e b_1 ricavati. Il parametro b_2 è stato determinato svolgendo una seconda regressione lineare per i dati da t_0 in poi in cui si è richiesto il solo coefficiente angolare b_2 in quanto l'intercetta è fissata dai parametri a_1 , b_1 , e t_0 . Infine si è ricavato lo scarto quadratico medio RMS pesato dato dalla formula:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(y_i - f(x_i))^2}{N}} \quad (2)$$

dove ho indicato con y_i i dati, con $f(x_i)$ i valori ottenuti dalle rette e N il numero di dati.

La procedura è stata poi ripetuta per ogni istante t_0 dell'intervallo scelto. Per capire con che criterio riusciamo a determinare t_0 osserviamo l'andamento dell'RMS in funzione del punto di ginocchio in Figura 7 ottenuto per la stazione di RITE:

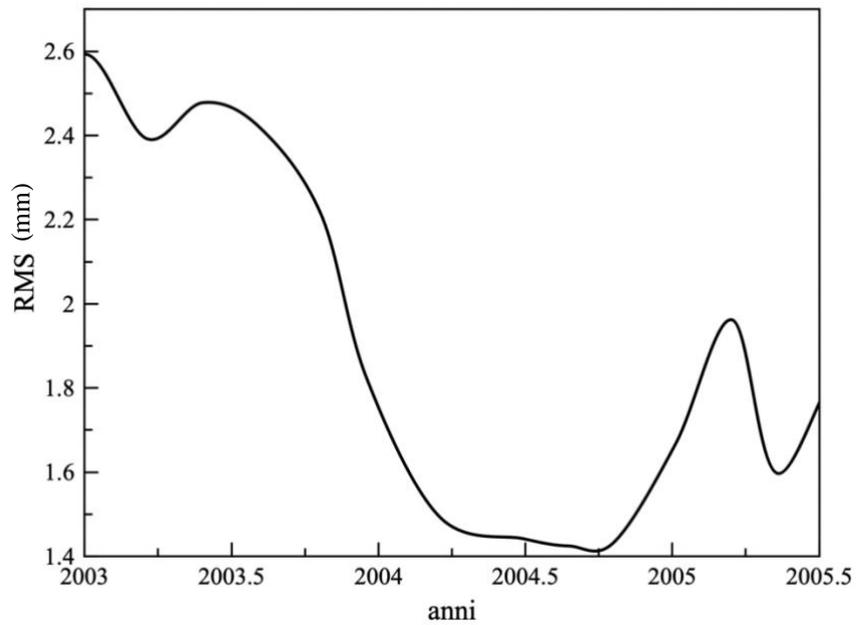


Figura 7: Andamento dell'RMS della stazione di RITE in funzione del tempo.

Il trend che si ottiene con il minimo assoluto dell'RMS è quello che meglio riproduce l'andamento dei dati rispetto a quello che si ottiene dal minimo relativo.

Attraverso questa procedura è stato possibile ottenere i trend di tutte le stazioni riportati in Figura 8.

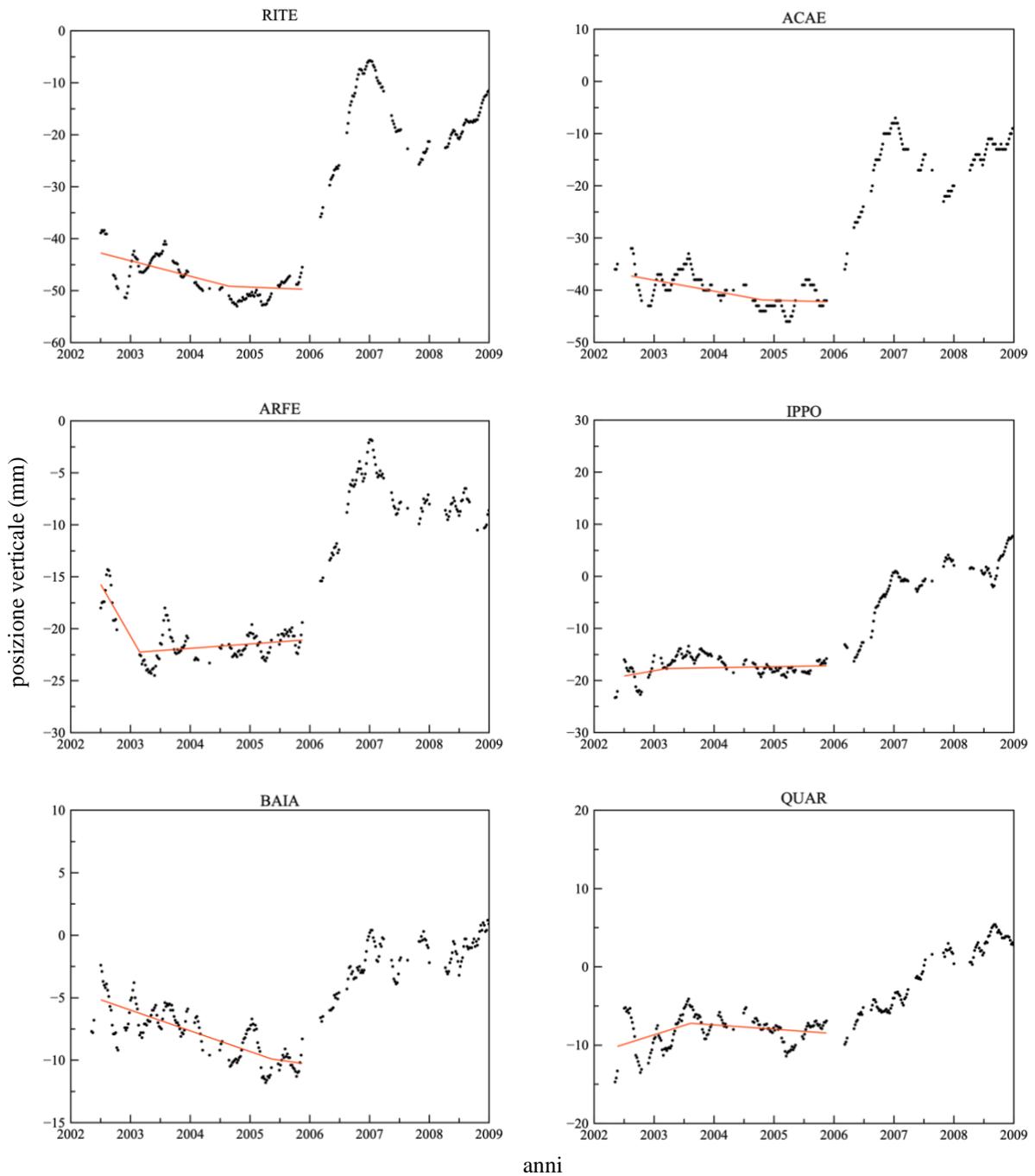


Figura 8: Andamento dei trend ottenuti con la procedura di fit. Sull'asse delle ascisse sono riportati gli anni, su quello delle coordinate la coordinata verticale. Le stazioni sono ordinate per ordine di distanza crescente da RITE da sinistra a destra e dall'alto verso il basso.

Dalla Figura 8 si può notare che non tutte le stazioni identificano lo stesso ginocchio, ciò individua comportamenti diversi da una stazione all'altra. In particolare, osservando il trend di RITE, esso riproduce bene l'andamento dei dati, così come ACAE, il che è plausibile in quanto

quest'ultima è la più vicina a RITE tra quelle considerate (Figura 3). Anche ARFE, leggermente più lontana di ACAE da RITE, ha un trend abbastanza coerente. Il cambiamento si ha per le stazioni di IPPO e QUAR: queste stazioni presentano un trend opposto a quello di RITE. Per BAIA si osservano due rette quasi allineate (ciò è legato alla presenza di grandi oscillazioni nei dati) quindi è impossibile decidere se il trend abbia caratteristiche più simili a quelle di RITE o, per esempio, QUAR. In Tabella 1 sono riportati i parametri dei trend delle stazioni.

	a_1 (mm)	b_1 (mm/anno)	b_2 (mm/anno)	RMS (mm)
RITE	$(5,9 \pm 1,2) \cdot 10^3$	$-2,97 \pm 0,61$	$-0,46 \pm 0,46$	1,42
ACAE	$(4,1 \pm 8,7) \cdot 10^3$	$-2,09 \pm 0,43$	$-0,3222 \pm 0,0005$	1,57
ARFE	$(1,9 \pm 5,9) \cdot 10^3$	$-9,9 \pm 2,9$	$0,421 \pm 0,071$	0,94
IPPO	$(-4,1 \pm 3,5) \cdot 10^3$	$2,0 \pm 1,7$	$0,19 \pm 0,11$	1,10
BAIA	$(3,3 \pm 2,8) \cdot 10^3$	$-1,65 \pm 0,14$	$-0,70 \pm 0,44$	0,48
QUAR	$(-4,8 \pm 1,9) \cdot 10^3$	$2,40 \pm 0,98$	$-0,546 \pm 0,097$	1,01

Tabella 1: risultati del fit dei dati in Figura 8.

I trend determinano una distinzione tra le stazioni in base alla distanza da RITE, con le stazioni vicine (ACAE e ARFE) aventi trend analoghi. Questa tendenza potrebbe essere legata ad una causa strutturale, oppure ad una caratteristica peculiare della sorgente attiva in quella fase iniziale della crisi. Bisogna quindi andare a ripetere l'analisi per il mini uplift del 2006. In questo caso c'è un inequivocabile episodio inflattivo nelle vicinanze di RITE che non si riscontra nella fase precedente, mentre ovviamente i fattori strutturali rimangono inalterati.

A tale scopo ho quindi effettuato il fit per un intervallo di dati con istante iniziale nel punto di ginocchio precedentemente trovato ed istante finale successivo all'evento di uplift del 2006. I trend ottenuti sono riportati Figura 9.

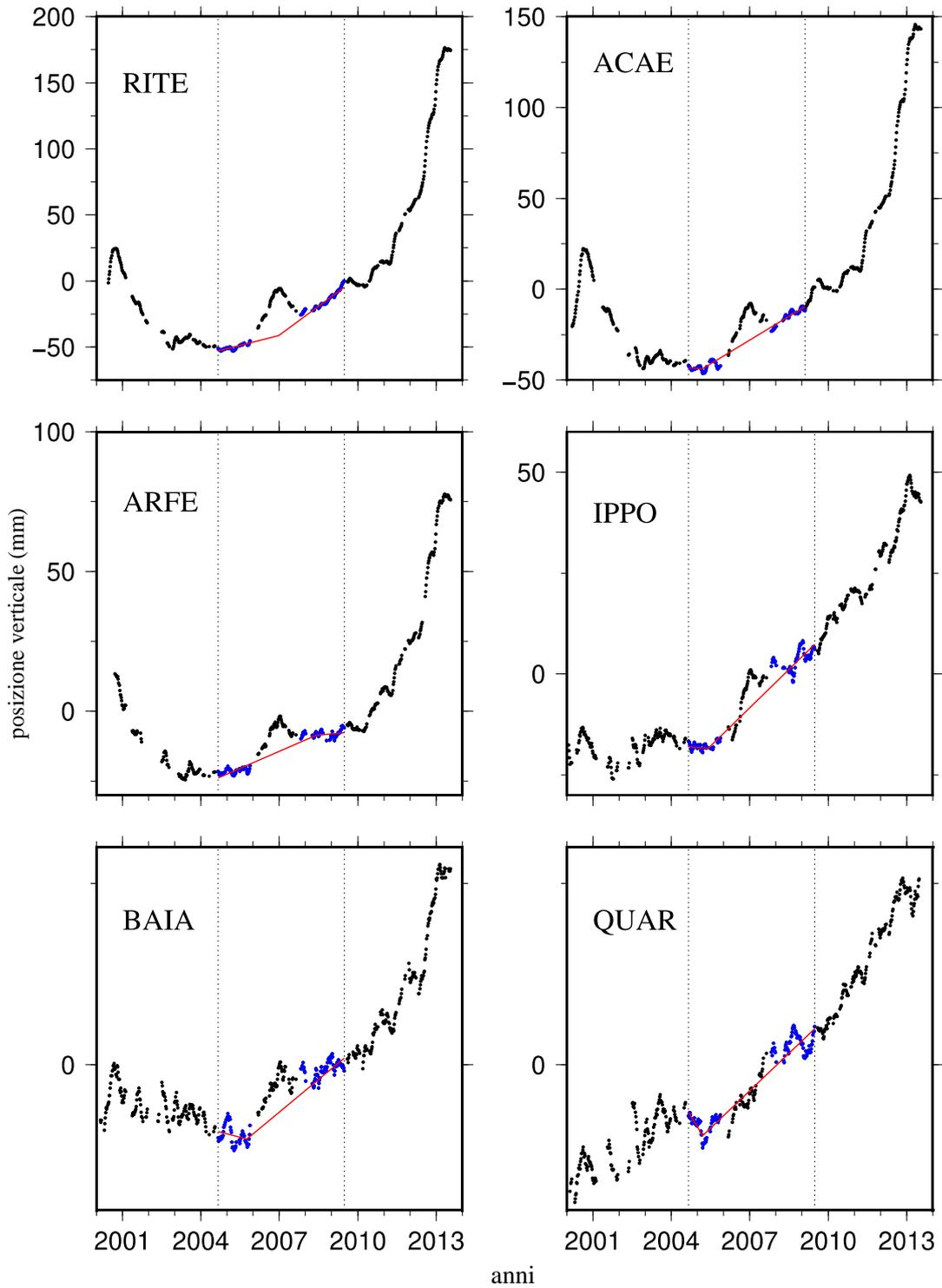


Figura 9: Andamento dei trend ottenuti con la procedura di fit. Le linee tratteggiate delimitano il periodo di tempo considerato e i punti blu i dati usati per il fit.

In Tabella 2 sono riportati i parametri dei trend di Figura 9:

	a ₁ (mm)	b ₁ (mm/anno)	b ₂ (mm/anno)	RMS (mm)
RITE	$(-10,54 \pm 0,53) \cdot 10^3$	$5,23 \pm 0,26$	$14,60 \pm 0,24$	205,20
ACAE	$(2,4 \pm 1,3) \cdot 10^3$	$-1,24 \pm 0,69$	$8,6 \pm 6,6$	335,09
ARFE	$(-8,19 \pm 0,16) \cdot 10^3$	$4,0 \pm 8,1$	$0,77 \pm 0,42$	124,24
IPPO	$(0,7 \pm 1,1) \cdot 10^3$	$-0,38 \pm 0,57$	$6,3 \pm 7,1$	266,04
BAIA	$(1,89 \pm 0,56) \cdot 10^3$	$-0,95 \pm 0,28$	$3,0 \pm 8,0$	230,06
QUAR	$(11,7 \pm 1,4) \cdot 10^3$	$-5,82 \pm 0,69$	$3,4 \pm 5,8$	166,72

Tabella 2: risultati del fit dei dati in Figura 9.

Nei grafici in Figura 9 le due linee tratteggiate individuano l'intervallo scelto sui dati totali, i punti blu sono i punti considerati per determinare il doppio trend. La procedura di fit è stata in primo luogo applicata alla stazione di RITE, in cui non sono stati presi in considerazione i dati in corrispondenza del mini uplift per la determinazione del punto di ginocchio poiché tale evento non ha a che fare con una variazione a lungo termine, e successivamente ad ACAE, per la quale si è notato che l'intervallo di tempo per cui è durato il mini uplift è esattamente lo stesso che su RITE. Tale analogia mi ha permesso di determinare il range di dati anche per le stazioni in cui l'uplift è meno evidente, ovvero quelle più lontane quali IPPO, BAIA e QUAR determinando così il punto di ginocchio per tutte le stazioni.

Dai grafici in Figura 9 e dai risultati riportati in Tabella 2 si osserva che RITE ed ACAE mostrano un andamento abbastanza simile, riscontrando un ginocchio pressappoco nello stesso punto; per la stazione di ARFE vediamo che il ginocchio differisce di molto dalle due precedenti; IPPO ha un andamento diverso, ha il punto di ginocchio molto spostato a sinistra, presenta una parte di discesa che non è uguale a quella di RITE e di ACAE e vede direttamente il trend in salita; BAIA invece ha un andamento prima discendente e poi di risalita; QUAR vede direttamente la salita del trend. Notiamo che a tutte le stazioni in cui si vede il massimo dell'uplift chiaramente identificabile a RITE, questo è praticamente contemporaneo a quello di questa stazione.

2.3. Interpretazione dei trend

Alla luce di questi risultati possiamo dire che, sebbene vi sia un uplift, si riscontrano fasi di subsidenza diverse per le varie stazioni: una subsidenza marcata come quella di RITE e ACAE è impedita alle stazioni di BAIA, IPPO e ARFE da qualcosa che è in grado di sostenerle. Questo sembra suggerire la presenza di una sorgente di uplift principale a RITE, ma anche di una secondaria nell'area di ARFE e BAIA, e in quella di IPPO. Per QUAR c'è un effetto di distanza: questa risente del trend generale, cioè qualcosa che fa sollevare tutto il suolo, da RITE a QUAR. Tali sorgenti possono essere legate ad iniezione di fluidi. Petrillo e collaboratori hanno infatti dimostrato con una simulazione numerica che un'iniezione di fluidi alla Solfatara è capace di diffondersi in tutta l'area della caldera, in particolare concentrandosi nella zona di ARFE (Figura 10) [2].

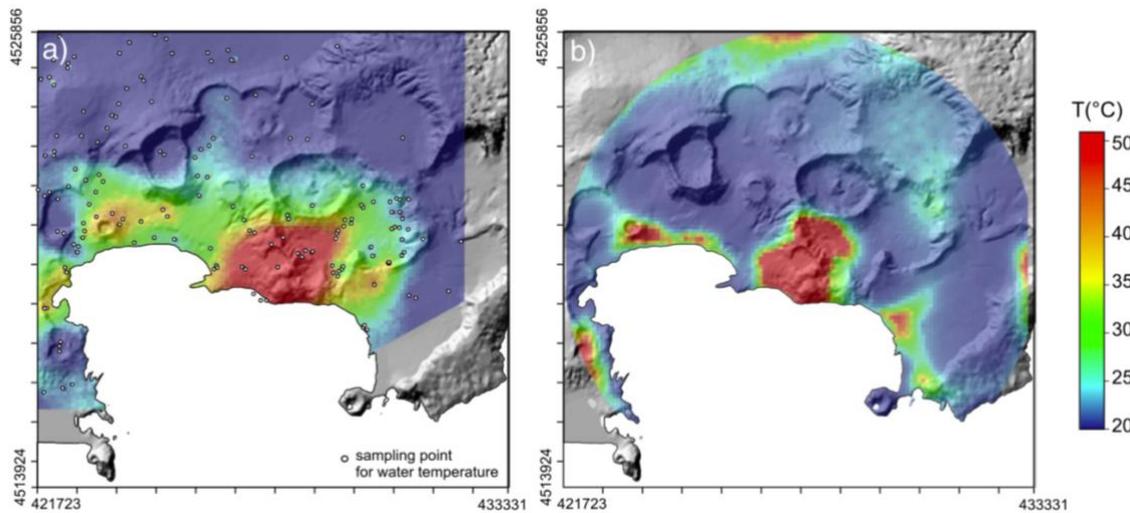


Figura 10: Confronto tra la temperatura della falda calderica misurata (a) e la temperatura simulata a 10 m b.s.l (b).

A seguito delle analisi dei trend, si osserva una analogia tra RITE, ACAE e, in qualche misura, ARFE che hanno uno stesso andamento in entrambi i periodi considerati, e tra IPPO, BAIA e QUAR che hanno un andamento consistente tra di loro ma diverso dalle prime due stazioni. L'ipotesi di un effetto strutturale prende allora consistenza. Le analisi effettuate, inoltre, mostrano che la crisi è iniziata molto prima del 2006: tra il 2002 e il 2006 si è attenuato il trend di discesa di tutta la caldera che si è invertito a partire dal 2006.

Al fine di verificare l'ipotesi di un effetto strutturale sulla deformazione calderica ho ottenuto i grafici dello spostamento verticale. Scelto quindi un istante di riferimento comune a tutte le stazioni, ho fatto la differenza delle posizioni verticali di ogni stazione con una posizione fissata.

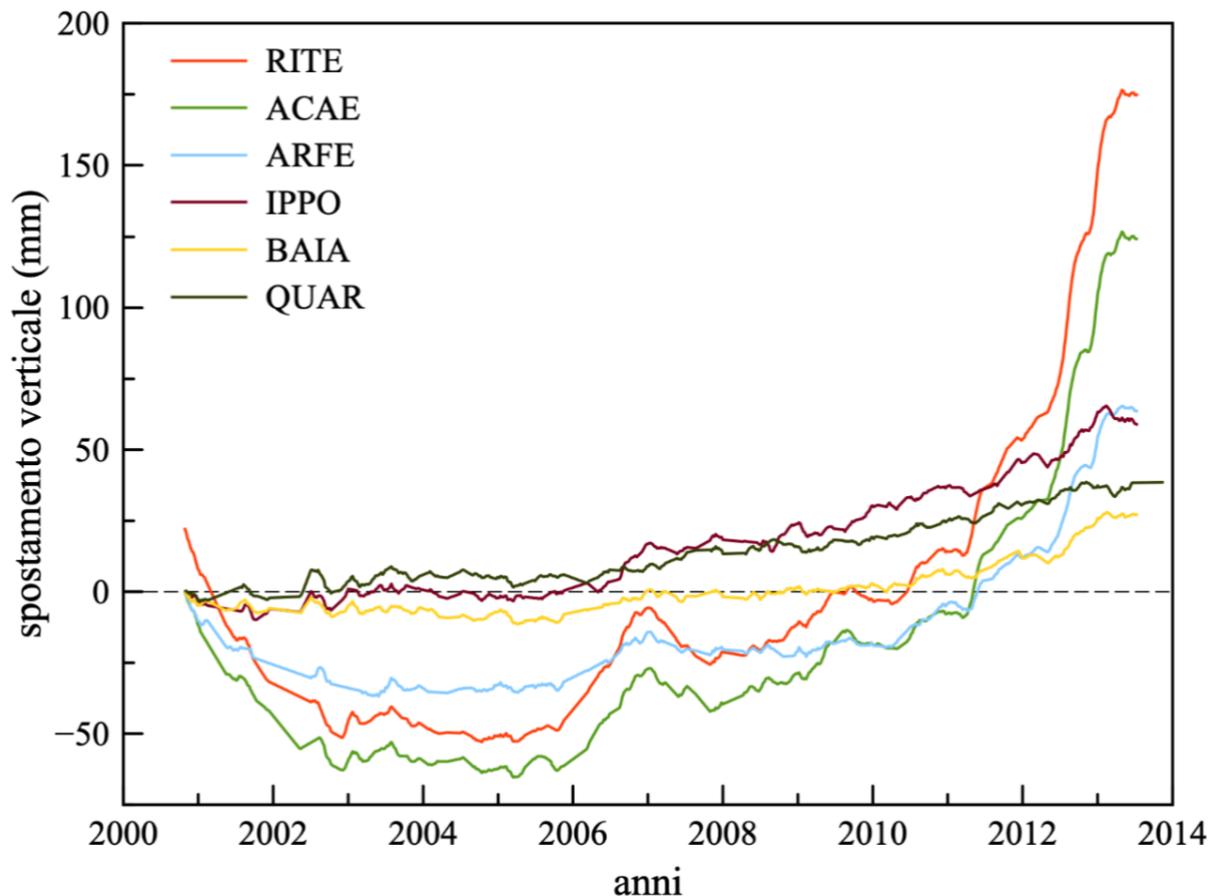


Figura 11: Grafico dello spostamento verticale delle varie stazioni in funzione del tempo.

Dalla Figura 11 si nota che le stazioni più vicine a RITE (ARFE e ACAE) mostrano uno spostamento negativo mentre quelle più lontane (IPPO, BAIA, QUAR) uno spostamento positivo. Questo ci consente di dire che la parte più esterna dell'area risente meno di quello che succede internamente. Le stazioni periferiche non partecipano alla discesa ma solo alla risalita: mentre all'interno vi è una subsidenza, il suolo scende, all'esterno no, il che è in pieno accordo con il fatto che le parti periferiche di una caldera siano meno mobili di quelle centrali. Tuttavia ciò potrebbe anche indicare che la caldera è frammentata muovendosi quindi in modo differente nella parte centrale rispetto all parte periferica. Infatti guardando il mini uplift centrato in RITE del 2006 si nota che c'è un effetto di questo fino alla stazione di ARFE, le restanti cambiano semplicemente la pendenza. Dunque c'è un evento locale centrale ma in qualche modo tutta la caldera, centro e periferia, comincia a salire più velocemente.

Inoltre, osservando sempre il mini uplift del 2006, si vede chiaramente che il salto (differenza di spostamento tra inizio e picco) scala con la distanza: è massimo per RITE e diminuisce gradualmente fino a QUAR. Il fatto che si abbia una diminuzione del salto al crescere della

distanza è coerente con l'avere una sorgente localizzata. Se si guarda ora la prima parte della curva, si osserva che il salto per RITE, ACAE e ARFE è uguale, l'effetto di distanza è molto più attenuato, questo suggerisce che la sorgente di questo sollevamento (che marca a mio modo di vedere, l'inizio della crisi) non è localizzata ma è diffusa.

Conclusioni

Dai risultati ottenuti possiamo concludere che se si volesse veramente ottenere un modello della deformazione ai Campi Flegrei si dovrebbe rinunciare all'idea di una singola sorgente poiché probabilmente queste sorgenti sono in realtà sparse. L'analisi dei trend evidenzia comportamenti differenti a seconda della zona dell'area Flegrea considerata. Vi è un generale sollevamento del suolo confermato dalle variazioni di velocità riscontrate per ogni stazione ma al contempo esso differisce in base alla loro localizzazione. Dunque la simulazione di tale sollevamento non può essere effettuata con il modello a singola sorgente e seppur si volesse utilizzare tale approssimazione bisognerebbe rimuovere i trend. Infatti, se i trend venissero considerati, si avrebbe una sovrastima della spinta, nonché una sottostima della profondità della sorgente. In ogni caso l'analisi mostra una dinamica complessa in cui aspetti vulcanologici e strutturali si combinano per dare un pattern di deformazione non semplice da decifrare. Come nessun'altra area vulcanica italiana lo studio dei Campi Flegrei chiama ad uno sforzo per acquisire dati su diversi parametri geochimici e geofisici che devono essere interpretati tutti insieme. In questo quadro, i dati delle stazioni GPS forniscono importanti indicazioni sulla dinamica della caldera.

Bibliografia

- [1] Rosi, M., e Sbrana, A. Phlegraean Fields. Quaderni della Ricerca Scientifica, 114, CNR, Roma, p.176, 1987.
- [2] Z. Petrillo, G. Chiodini, A. Mangiacapra, S. Caliro, P. Capuano, G. Russo, C. Cardellini, R. Avino. Defining a 3D physical model for the hydrothermal circulation at Campi Flegrei caldera (Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 264 (2013) 172–182
- [3] De Martino, P., Tammaro, U., e Obrizzo, F. GPS time series at Campi Flegrei caldera (2000-2013). *Ann. Geophys-Italy*, 57, S0213, 2014.
- [4] P. De Martino, U. Tammaro, F. Obrizzo, V. Sepe, G. Cecere, C. Serio, A. D'Alessandro, M. Dolce, G. Brandi, S. Malaspina, Folco Pingue. Il monitoraggio dell'area vulcanica napoletana attraverso la rete GPS permanente, I.N.G.V. Sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano,
- [5] Storia eruttiva dei Campi Flegrei reperita al sito dell'Osservatorio Vesuviano: <http://www.ov.ingv.it/ov/it/campi-flegrei/storia-eruttiva.html>
- [6] Mogi, K. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Earthq. Res. Inst.*, 36, 99-134, 1958.
- [7] Frodesen, A.G., Skjeggstad, O., Tøfte, H. (1979) Probability and statistics in particle physics Universitetsforlaget, Bergen, p. 501.