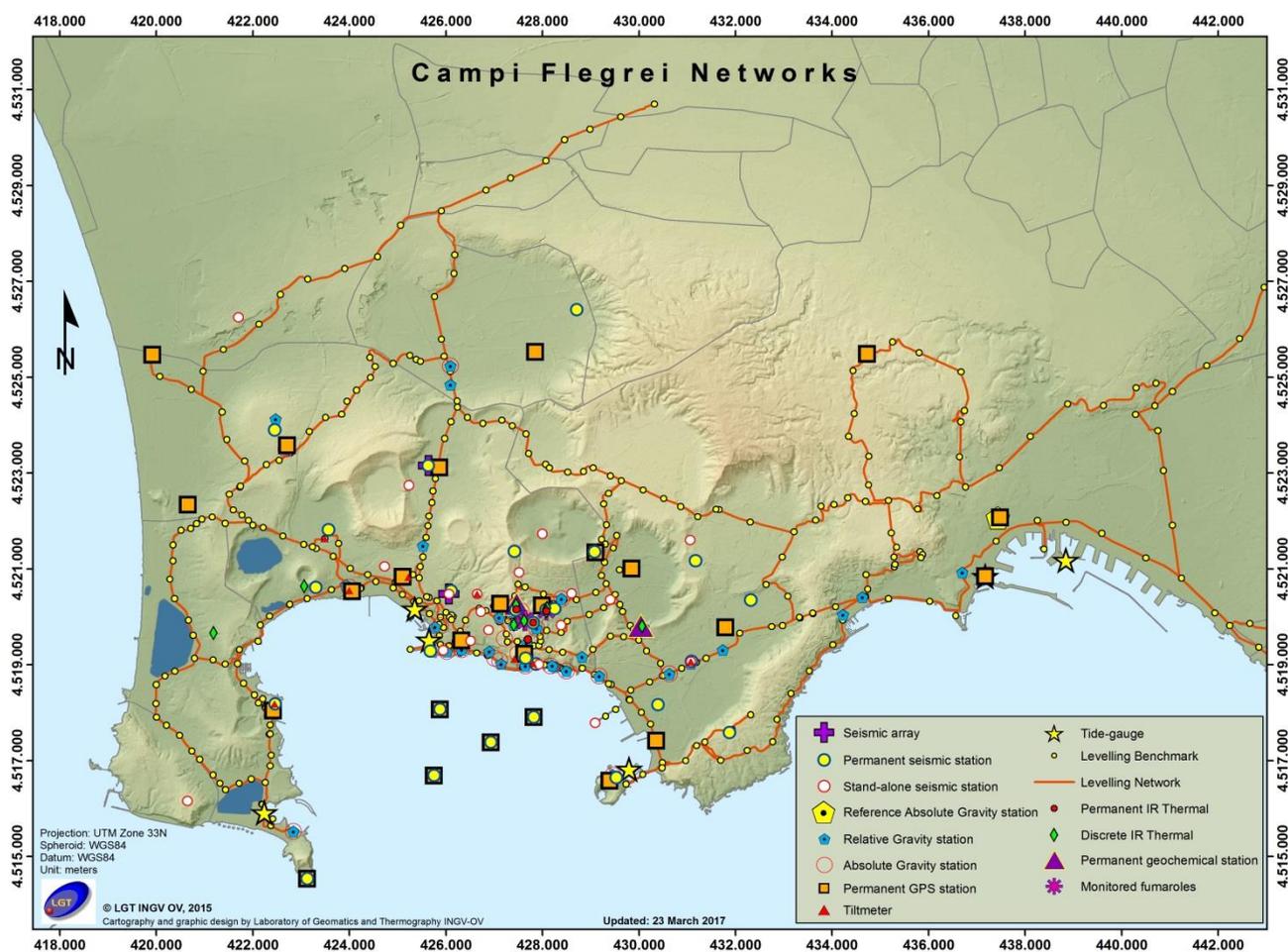




Bollettino di Sorveglianza

CAMPI FLEGREI

MARZO 2018



1. SISMOLOGIA

Nel corso del mese di marzo 2018 ai Campi Flegrei sono stati registrati 57 terremoti generalmente di bassa magnitudo ($M_{dmax}=2.4$; evento del 12/03 alle 14:99 UTC) (Fig. 1.1).

54 terremoti sono stati registrati durante tre brevi sciami sismici:

- il primo, tra le 13:34 e le 15:35 UTC del 12/03, è consistito in una sequenza di 42 terremoti con $-0.8 \leq M_d \leq 2.4$, localizzati nell'area tra Pisciarelli e Solfatara a profondità comprese tra 1.1 e 2.6 km;
- il secondo, tra le 00:59 e le 01:38 UTC del 21/03, è consistito in una sequenza di 6 terremoti con $-1.1 \leq M_d \leq 1.0$, localizzati nell'area tra Pisciarelli e Solfatara a profondità comprese tra 0.5 e 0.9 km;
- il terzo, tra le 06:52 e le 07:00 UTC del 22/03, è consistito in una sequenza di 6 terremoti con $-0.8 \leq M_d \leq 0.2$, localizzati nell'area tra Pisciarelli e Solfatara a profondità comprese tra 0.5 e 0.9 km.

E' stato possibile determinare l'ipocentro di 42 degli eventi registrati. Le localizzazioni sono mostrate in Fig. 1.2. Non si evidenziano trend significativi negli altri parametri sismologici (Fig. 1.3, 1.4, 1.5).

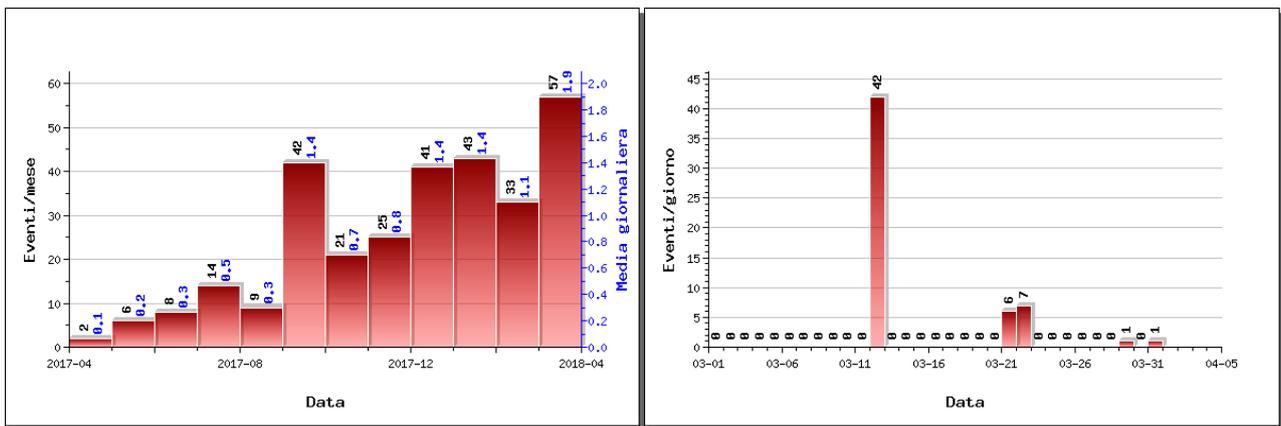


Figura 1.1 - A sinistra numero di eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in totale 301), mentre a destra quelli avvenuti nell'ultimo mese (in totale 57).

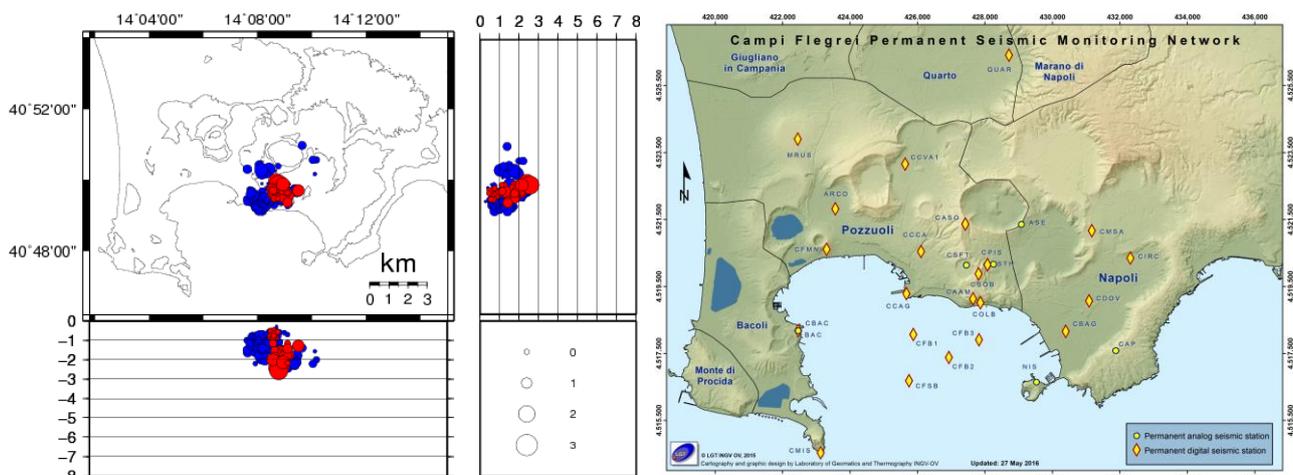


Figura 1.2 - Localizzazioni ipocentrali ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in blu) e dell'ultimo mese (in rosso). La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo, come indicato nel riquadro in basso. A destra è mostrata la mappa con la Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.

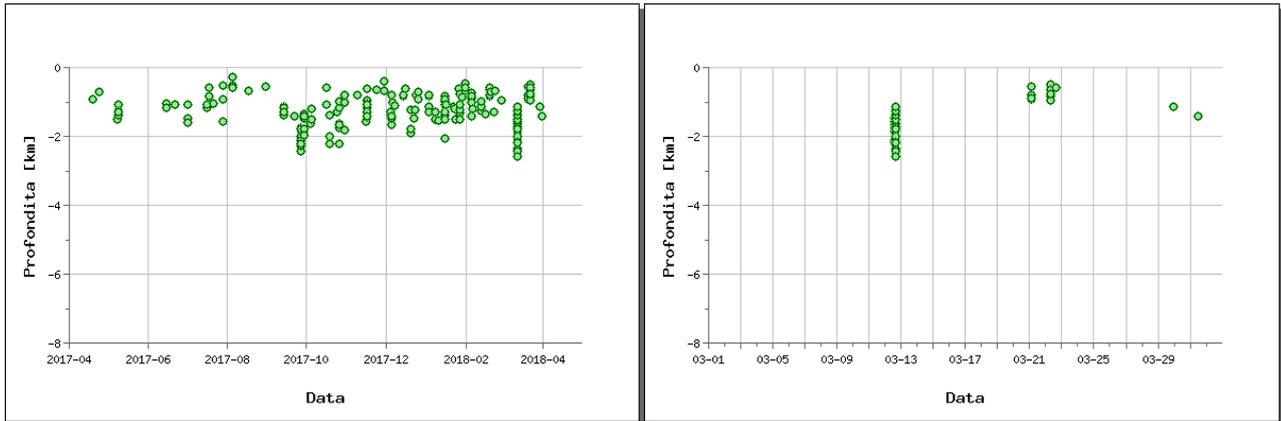


Figura 1.3 - Profondità ipocentrali degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

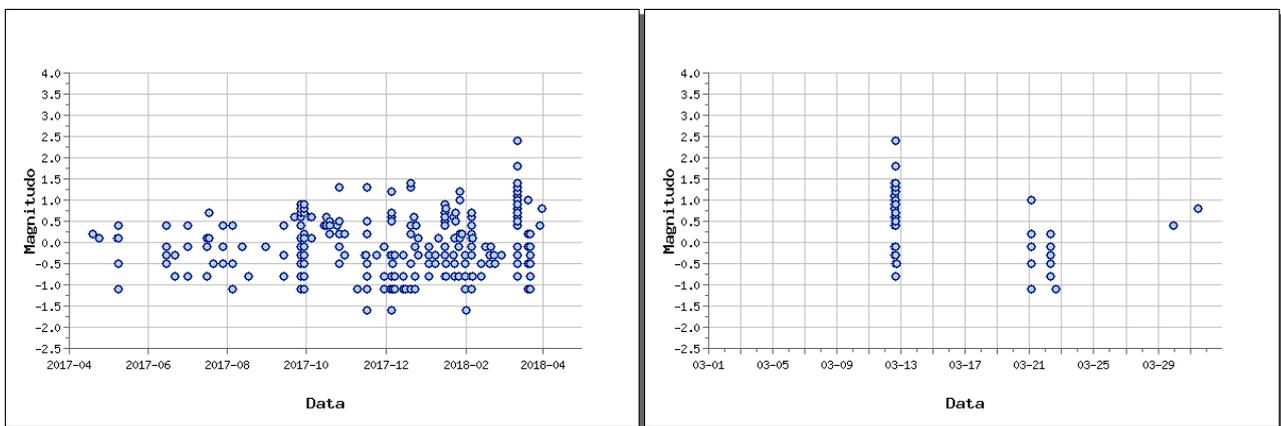


Figura 1.4 - Magnitudo degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

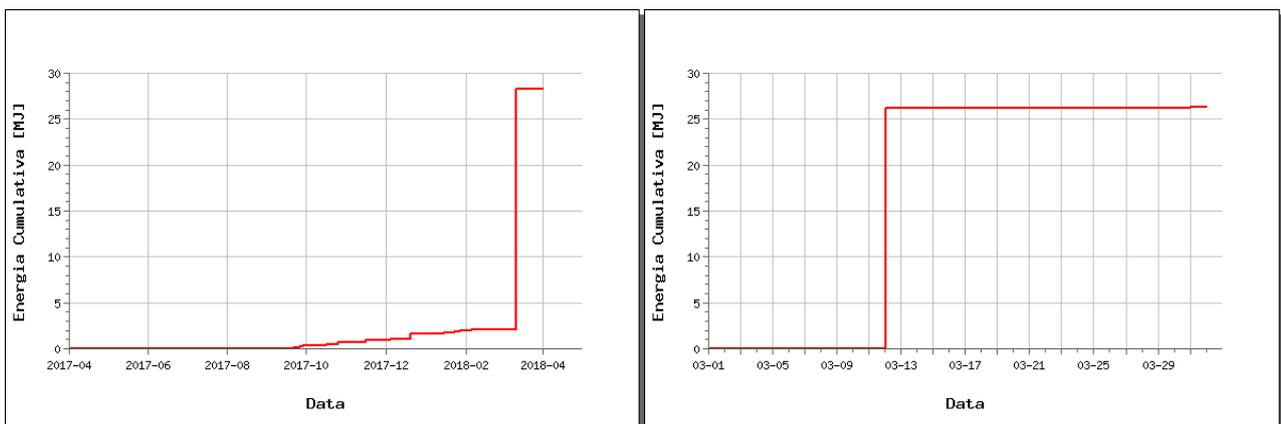


Figura 1.5 - Rilascio cumulativo di energia sismica ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

L'analisi dei meccanismi focali degli eventi più energetici del mese di marzo (Tabella 1.1) mostra, per entrambi gli eventi, soluzioni associabili a meccanismi con componente di movimento prevalentemente di tipo dip-slip (Fig. 1.6).

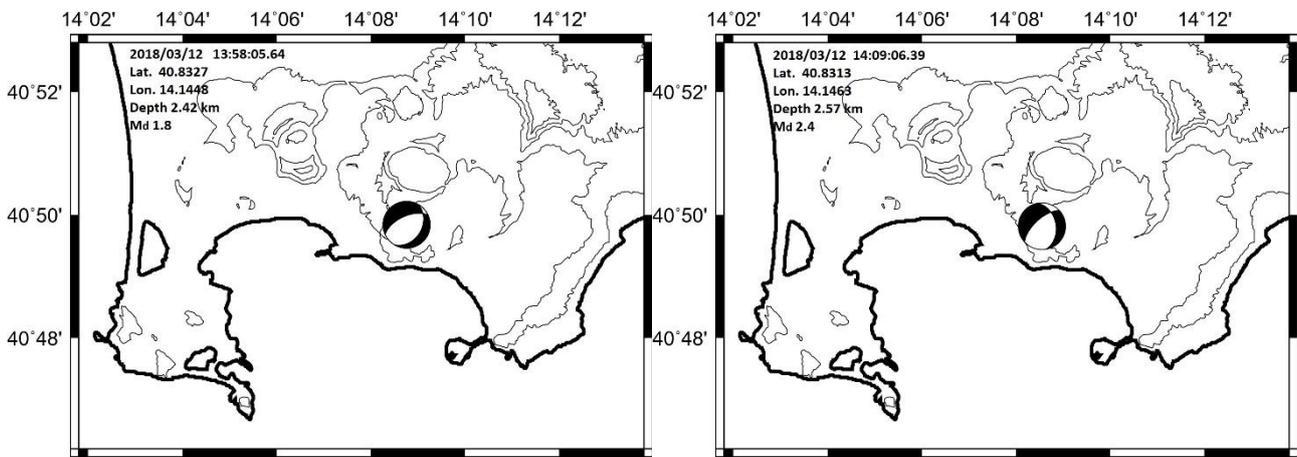


Figura 1.6 - Localizzazione e meccanismi focali degli eventi del 12/03 alle 13:58 e 14:09 UTC.

Tabella 1.1 - Parametri ipocentrali dei terremoti di magnitudo ≥ 1.5 registrati ai Campi Flegrei nel mese di marzo.

Data UTC	Md	Lat N	Long E	Prof. (km)
2018/03/12 13:58:05.64	1.8	40.8327	14.1448	2.42
2018/03/12 14:09:06.39	2.4	40.8313	14.1463	2.57

In figura 1.7 sono rappresentati gli andamenti dei principali parametri sismologici a partire dal 2005.

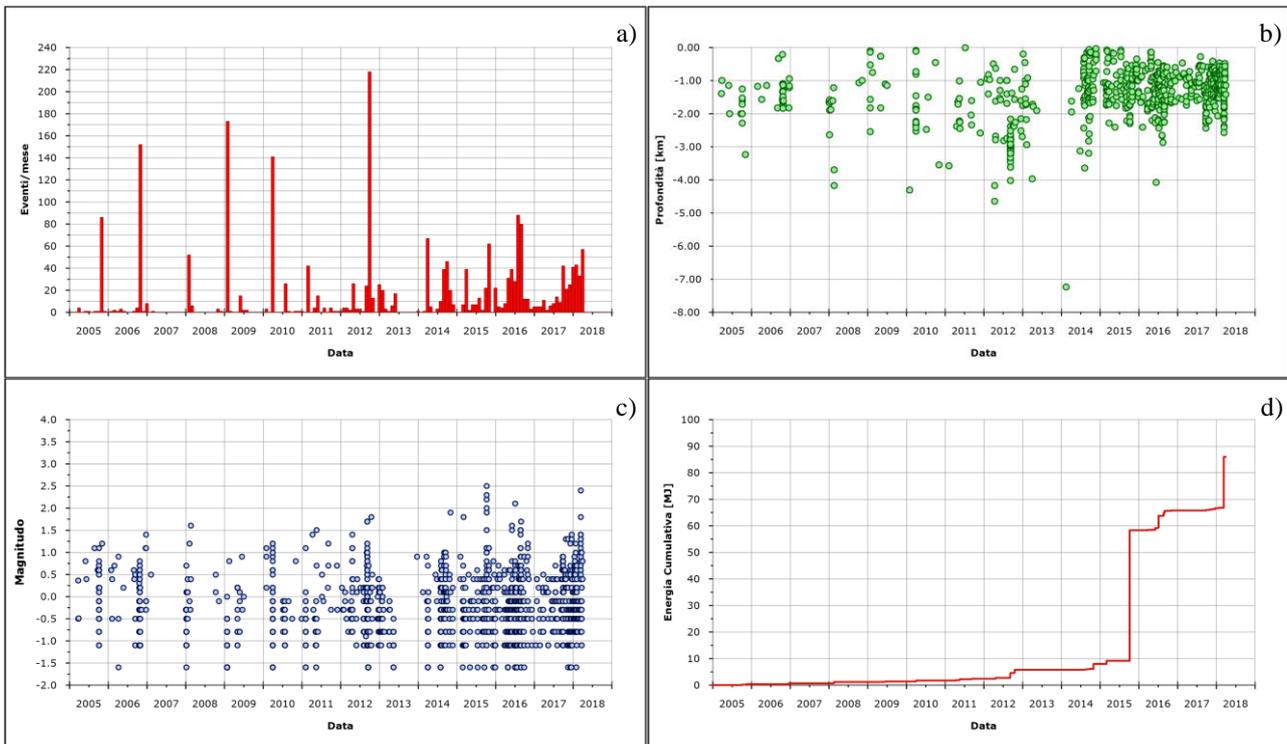


Figura 1.7 - Andamento dei principali parametri sismologici a partire dal 2005: a) frequenza di accadimento; b) profondità ipocentrali; c) magnitudo; d) energia cumulativa.

2. DEFORMAZIONI DEL SUOLO

GPS

Il sollevamento che interessa l'area flegrea a partire da luglio 2017 è caratterizzato dalla presenza di oscillazioni nelle serie temporali (probabilmente dovute anche a disturbi atmosferici) e mostra un valore medio nell'area di massima deformazione di circa 0.7 cm/mese.

Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 26 cm a partire da gennaio 2014, di cui circa 7 cm da gennaio 2017 (Fig. 2.2 e Fig. 2.3).

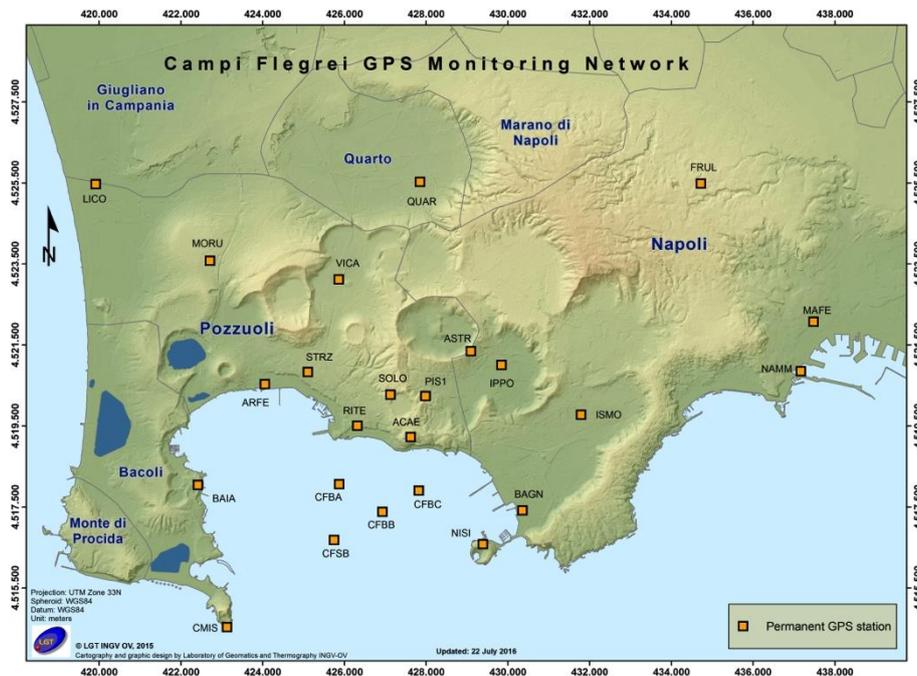


Figura 2.1 - Rete GPS Permanente dei Campi Flegrei.

STAZIONE GPS RITE (Rione Terra - Pozzuoli)

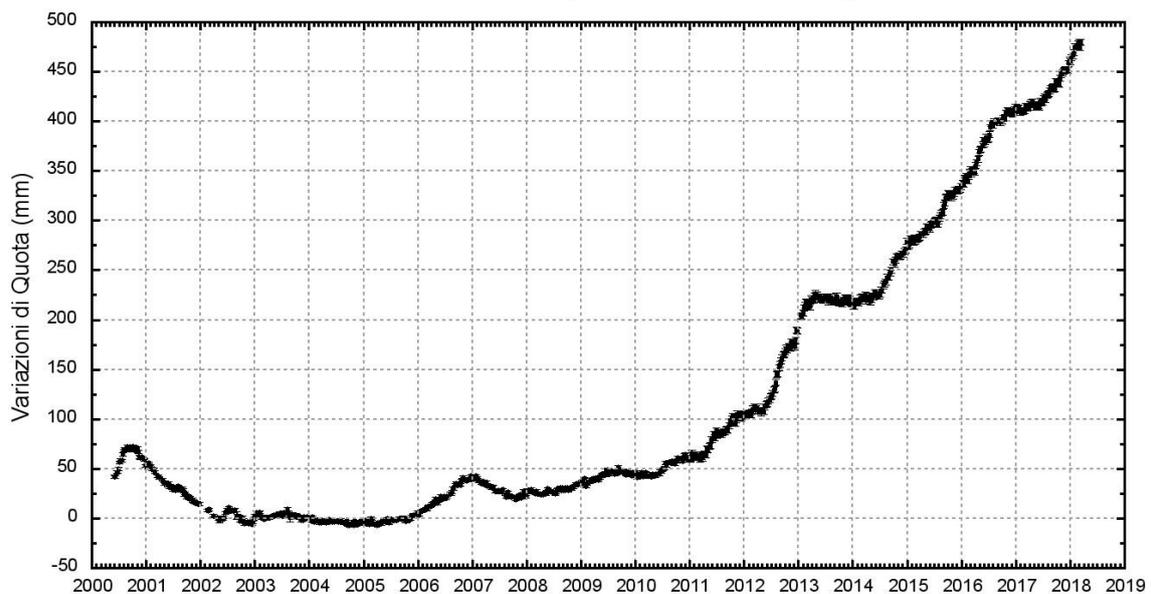


Figura 2.2 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di RITE (Pozzuoli – Rione Terra) dal 2000 a marzo 2018.

La figura 2.3 riporta le serie temporali delle variazioni in quota di alcune stazioni GPS ubicate nella zona di massima deformazione dei Campi Flegrei. I punti in nero, rosso, verde e viola rappresentano le variazioni settimanali calcolate con i prodotti finali IGS (effemeridi precise e parametri della rotazione terrestre) i quali vengono rilasciati con un ritardo di 12-18 giorni. I punti in blu rappresentano le variazioni giornaliere calcolate con prodotti rapidi IGS in attesa della rielaborazione con i prodotti finali IGS appena disponibili.

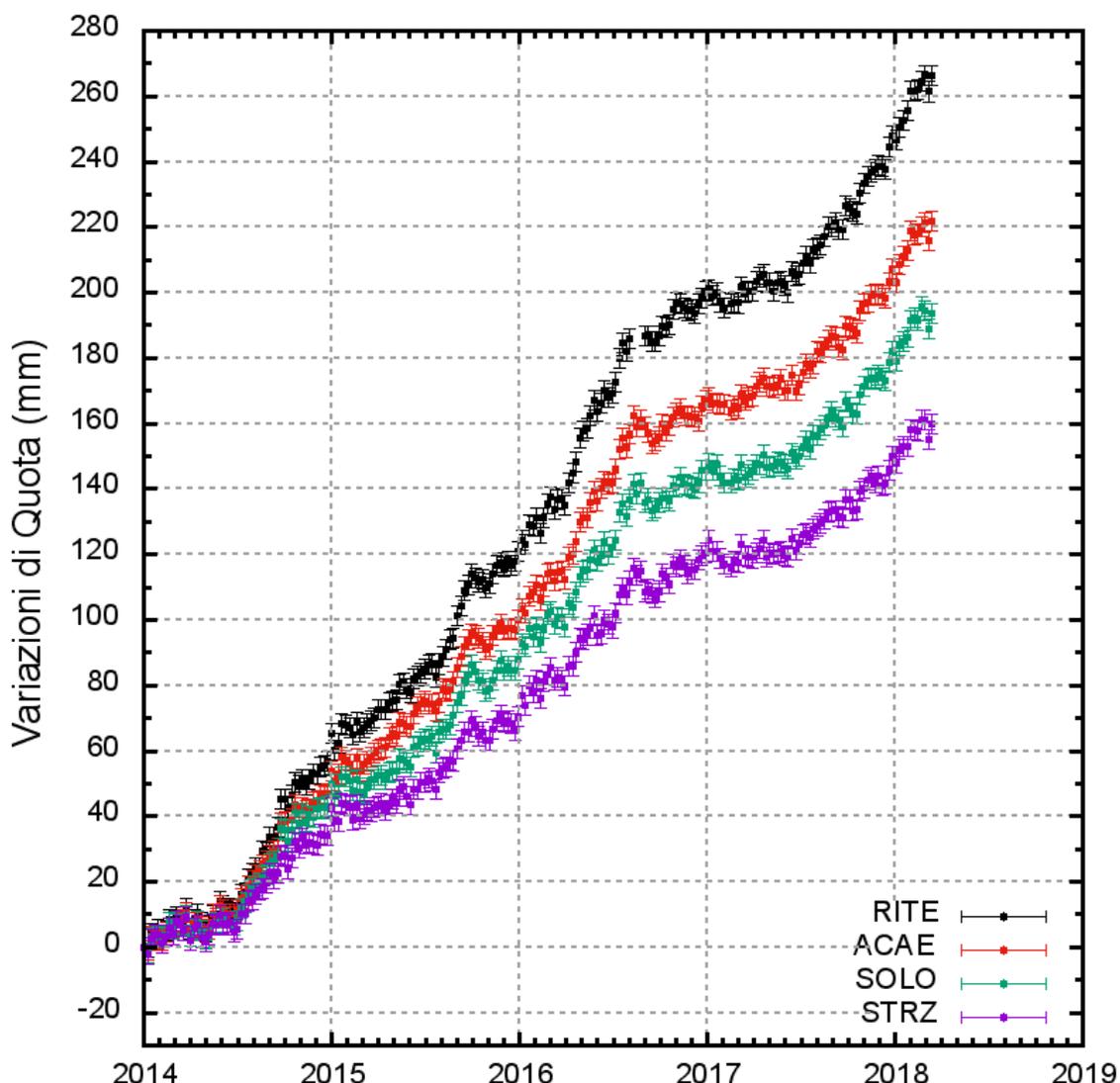


Figura 2.3 - Serie temporale delle variazioni in quota della stazione di RITE (Pozzuoli - Rione Terra), ACAE (Accademia Aeronautica), SOLO (Solfatara) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) da gennaio 2014 a marzo 2018.

In Figura 2.4 è riportata la mappa dei vettori degli spostamenti orizzontali registrati alle stazioni CGPS ai Campi Flegrei dal 2014.

La forma del campo di deformazione è simile a quelle già individuate nelle precedenti fasi del sollevamento e suggerisce una stabilità della sorgente di deformazione, localizzata nel Golfo di Pozzuoli a qualche centinaio di metri a sud della stazione di RITE.

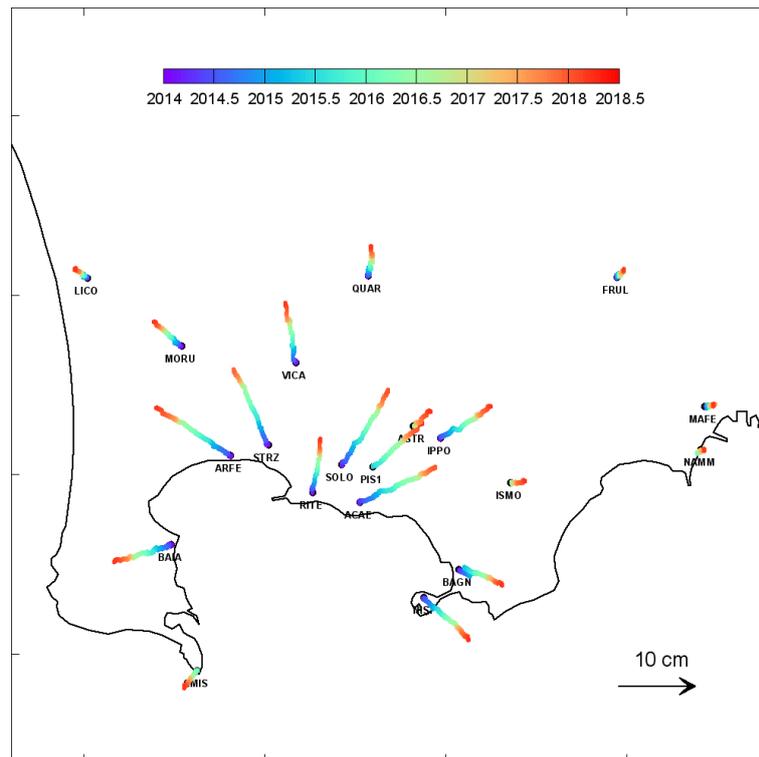


Figura 2.4 - Mappa degli spostamenti GPS orizzontali registrati nell'area flegrea da gennaio 2014 a marzo 2018.

Mareometria

La Rete Mareografica è riportata in Figura 2.5.

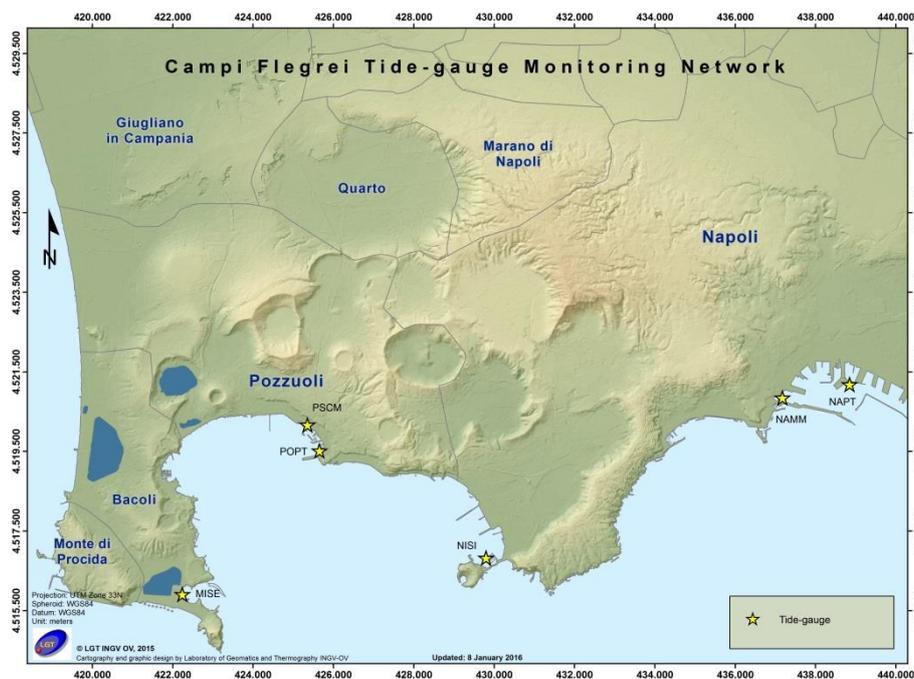


Figura 2.5 - Rete Mareografica di Campi Flegrei.

Nel mese di marzo 2018 resta invariato il leggero trend in sollevamento a Pozzuoli Porto. I dati mareografici relativi alla stazione di Pozzuoli Porto nel periodo gennaio 2014 – marzo 2018 mostrano l'andamento di Figura 2.6a, dal quale si evince un sollevamento superiore ai 25 cm. Da gennaio 2016 a marzo 2018 si ha un contributo di circa 15 cm di sollevamento (Figura 2.6b). Il picco visibile verso la fine del mese di luglio 2016 è stato determinato dal malfunzionamento temporaneo del sensore della stazione di riferimento NAMM.

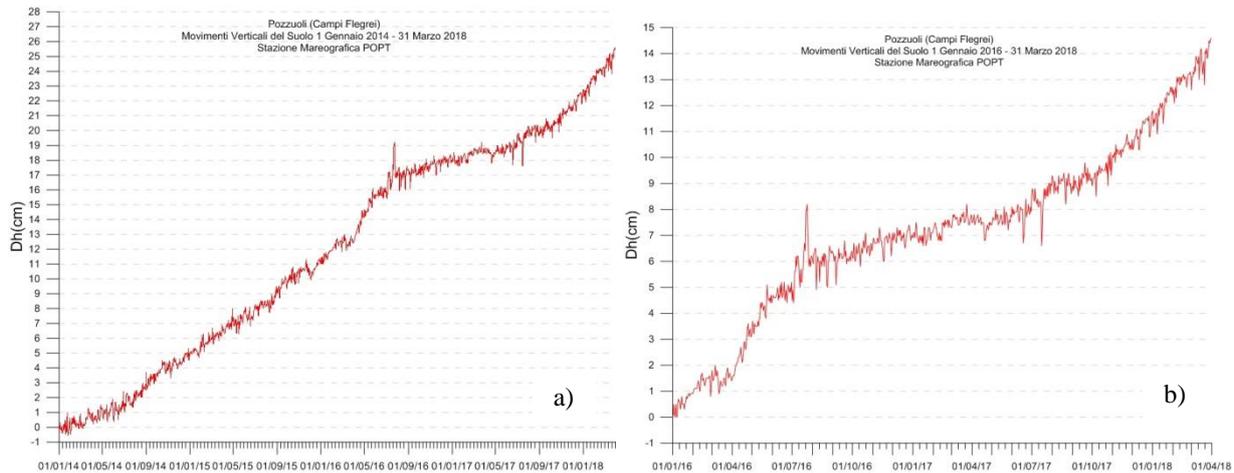


Figura 2.6 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2014 - marzo 2018 (a) e gennaio 2016 - marzo 2018 (b), ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli molo S.Vincenzo (NAMM).

I dati nella serie temporale dal 2006 ad oggi (Figura 2.7), sono stati raccordati con i dati riferiti alla ex stazione NAPT (dismessa a febbraio 2016), potendoli considerare omogenei all'interno degli errori di misura.

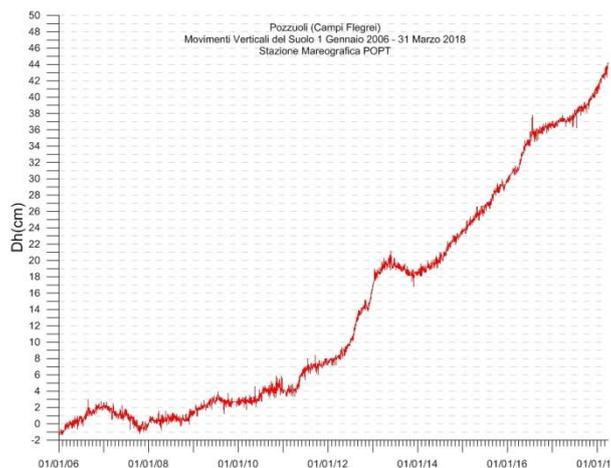


Figura 2.7 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2006 - marzo 2018, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli molo S.Vincenzo (NAMM).

Tiltmetria

La Rete di Monitoraggio delle inclinazioni del suolo dei Campi Flegrei consiste in 10 stazioni di cui 4 equipaggiate con sensori analogici di superficie (BAI, SLF, TOI, CSO), 3 con tiltmetri analogici da pozzo (PSC, ARC, TOI installati da 1 a 7 m di profondità) e 3 con sensori digitali da pozzo (CMP, ECO, HDM installati a 25 m di profondità) (Fig. 2.7).

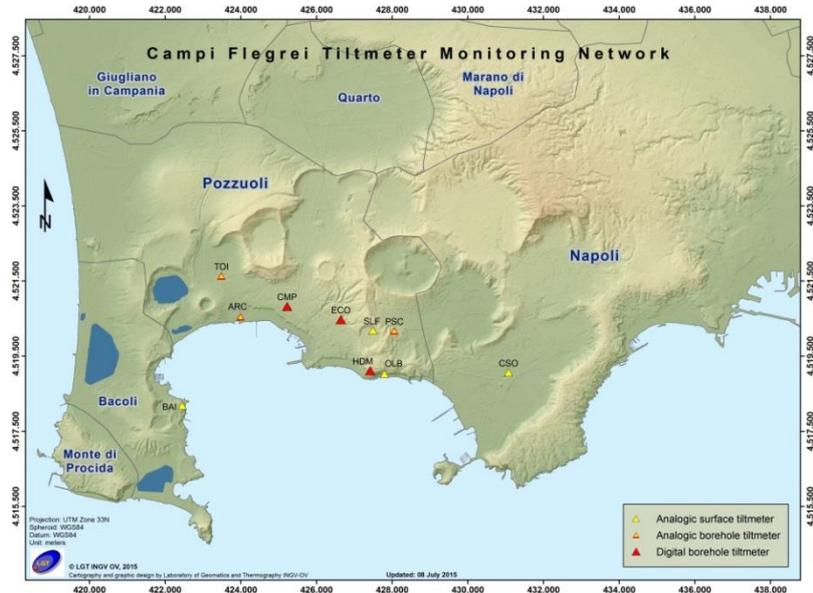


Figura 2.7 – Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.

La variazione tiltmetrica osservata ai Campi Flegrei nel periodo gennaio-marzo 2018 segue una simmetria radiale, dovuta alla fase di uplift, ma con una maggiore inclinazione del suolo in direzione NNE (Figura 2.8).

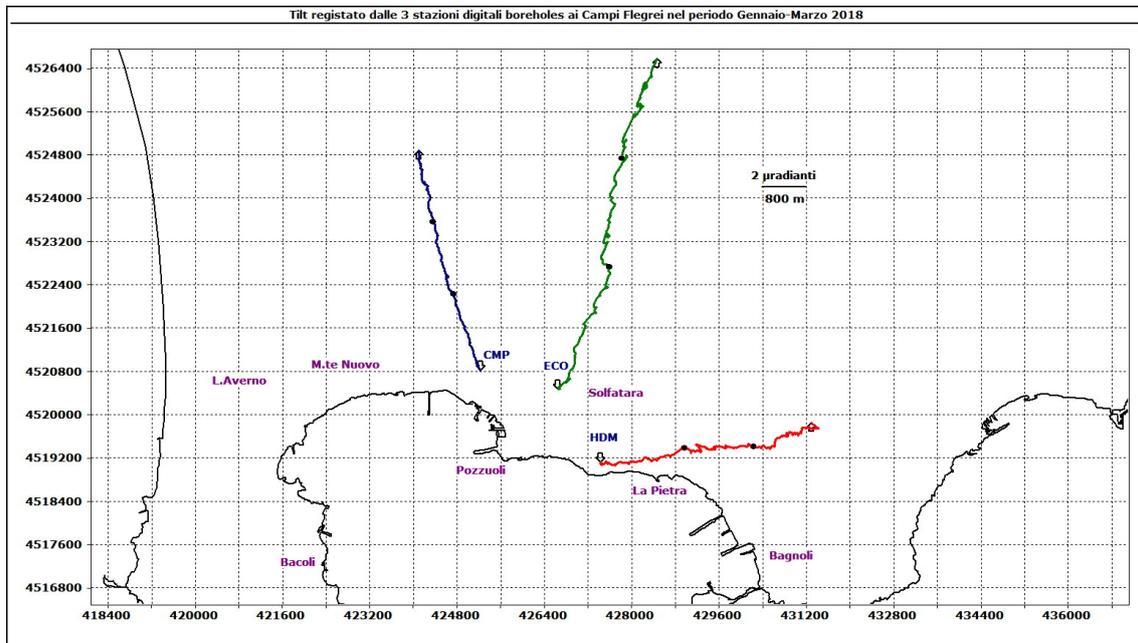


Figura 2.8 - Pattern tiltmetrico osservato ai Campi Flegrei nel periodo gennaio-marzo 2018. Per chiarezza di rappresentazione grafica sono state selezionate solo le stazioni borehole con sensori ubicati a 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 2 μradianti o 800 m. I pallini neri sovrapposti sui vettori tilt indicano l'inizio di ogni mese.

La deformazione relativa ad ogni sito-stazione è rappresentata con segmenti orientati di colore diverso; l'origine di ogni vettore tilt è siglata con il nome del sito stesso ed evidenziata con una freccia puntata verso il basso mentre l'estremo libero è indicato con una freccia puntata verso l'alto. Il verso di ogni vettore indica settori di crosta in abbassamento ed è univocamente definito dal suo estremo libero.

Nella Tabella seguente sono riportati, per le stazioni digitali, i valori di inclinazione del suolo, la direzione di tilting e la variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (≈ -25 m dal p.c.) acquisiti nel periodo gennaio-marzo 2018.

Sito	Inclinazione e direzione	Temperatura
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	15.9 μ radianti a NNE	0.02 °C
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	10.5 μ radianti a NNW	-0.02 °C
Stazione HDM (112 m s.l.m.)	9.8 μ radianti a ENE	-0.02 °C

In Figura 2.9 sono riassunti gli andamenti delle componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 3 stazioni borehole.

Per evidenziare la continuità dei segnali, il periodo di tempo rappresentato parte dal 1 gennaio 2017; poiché, inoltre, i segnali acquisiti rappresentano la variazione di tilt, sono stati tutti azzerati a partire da quella data.

Tutte le componenti NS mostrano un trend di inclinazione verso N e quindi un sollevamento del suolo a S delle stesse, mentre le componenti EW delle 2 stazioni situate ad E di Pozzuoli mostrano trend verso E e quindi sollevamento ad W; infine l'unica stazione situata ad W di Pozzuoli mostra ovviamente un trend opposto.

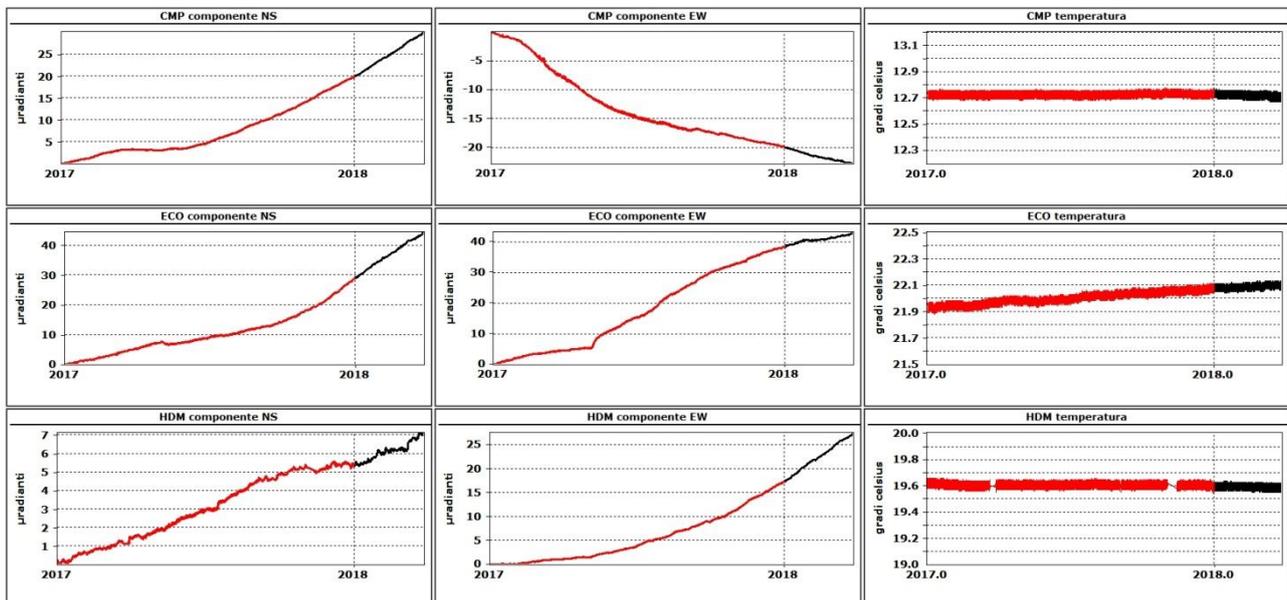


Figura 2.9 – Serie temporali dei segnali registrati a partire dal 2017 dalle 3 stazioni “borehole” della rete flegrea, con sensori ubicati a 25 m di profondità, ordinate dal basso verso l’alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E, mentre la terza colonna riporta la temperatura in °C registrata da ogni sensore. In rosso sono riportati i segnali relativi al 2017 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel 2018.

Dall'analisi della Figura 2.8 risulta evidente la radialità nella deformazione del suolo iniziata dalla fine di settembre del 2017 che in precedenza era meno marcata.

L'intersezione delle direzioni di tilting individua l'uplift massimo a Pozzuoli ma la maggiore inclinazione del suolo avviene in direzione NNE.

Inoltre, si calcola un maggiore incremento del tilt ($\approx 0.5 \mu\text{radianti}$) ad ECO e CMP nel mese di marzo mentre il rateo di HDM resta invariato.

Per quanto riguarda invece i tiltmetri di superficie i cui segnali, di regola, sono riportati e commentati in questo Bollettino solo nel caso in cui mostrino caratteristiche particolarmente interessanti, riteniamo importante segnalare che, circa 5 ore prima dello sciame sismico avvenuto il 12 marzo alle ore 13:34:57 UTC, la stazione tiltmetrica PSC (Pisciarelli) ha registrato in entrambe le componenti un'oscillazione di periodo compreso tra 60 e 80 minuti.

Essa, evidenziata sia nei segnali stessi che negli spettri che vengono effettuati nell'analisi di routine, è maggiormente visibile nello spettro CWT (*continuous wavelet transform*) ottenuto a partire dalle serie tiltmetriche filtrate nella banda $5\div 144$ minuti (Figg. 2.10 e 2.11).

In queste *contour map* le unità sull'asse z sono misurate in dB e le sfumature di colore variano dal rosso (minima ampiezza del segnale) al viola|blu (massima ampiezza del segnale).

La sola componente NS della stazione PSC aveva già registrato nel passato delle oscillazioni quasi monocromatiche il 17 e 24 maggio 2017 ($20\div 30$ minuti) ed il 4 e $10\div 11$ giugno 2017 (60 minuti) le quali, sebbene avessero un'ampiezza maggiore di quella registrata il 12 marzo 2018, non precedettero alcun evento sismico. In quest'ultimo caso, invece, le ampiezze sono minori e le componenti tiltmetriche che le hanno rilevato sono 2 e non la sola NS. Questa osservazione va ovviamente confrontata con quanto risulterà dalle analisi dei segnali registrati dalle stazioni sismiche broad-band installate nelle aree prospicienti la polla di Pisciarelli, alla cui attività di degassamento tali osservazioni fenomenologiche possono essere ricondotte.

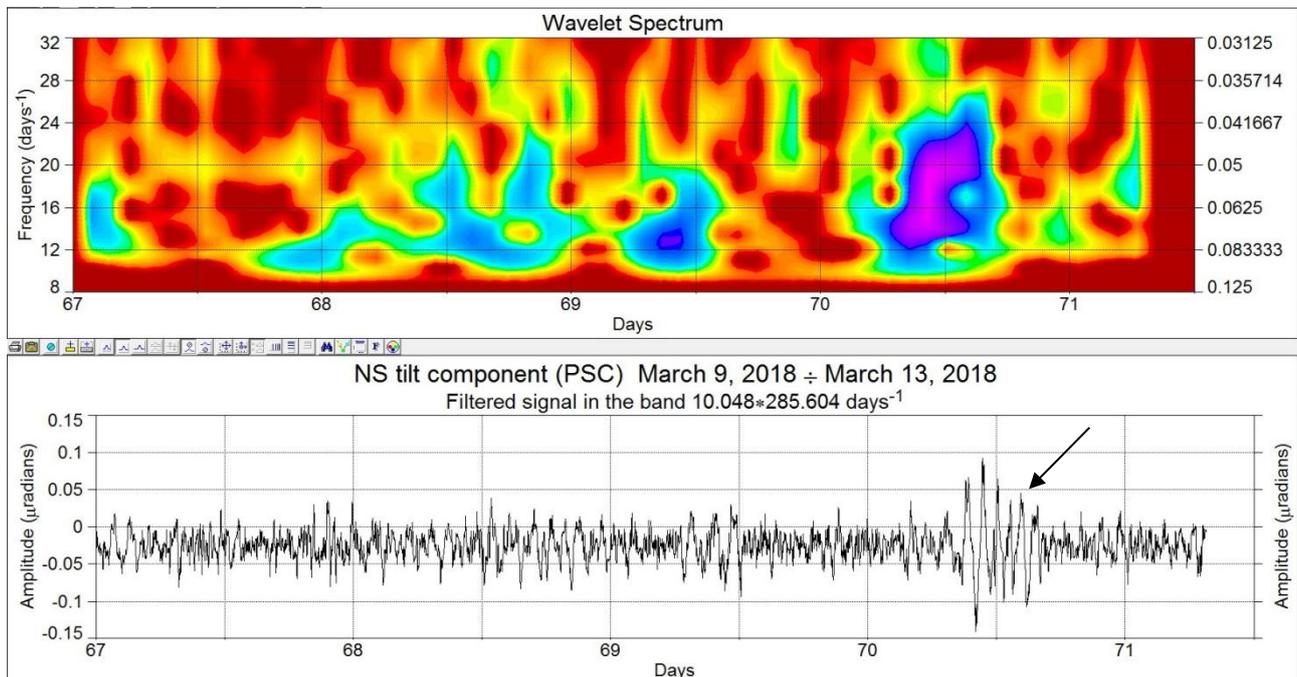


Figura 2.10 - Spettro CWT (*continuous wavelet transform*) ottenuto a partire dal segnale tiltmetrico di PSC (componente NS) filtrato nella banda $5\div 144$ minuti. L'oscillazione di lungo periodo ($60\div 80$ minuti) che precede lo sciame sismico del 12 marzo (il cui inizio è indicato dalla freccia nera) è visibile sia nel segnale che nello spettro.

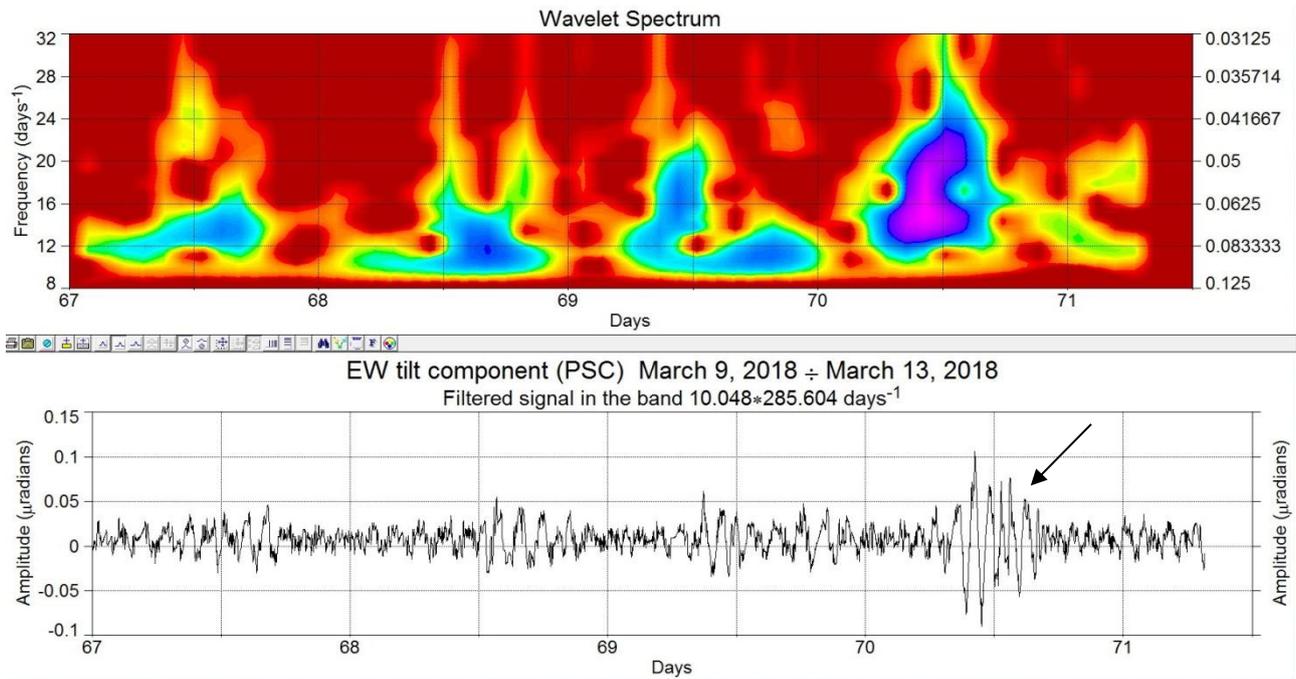


Figura 2.11 - Spettro CWT (continuous wavelet transform) ottenuto a partire dal segnale tiltmetrico di PSC (componente EW) filtrato nella banda $5\div 144$ minuti. L'oscillazione di lungo periodo ($60\div 80$ minuti) che precede lo sciame sismico del 12 marzo (il cui inizio è indicato dalla freccia nera) è visibile sia nel segnale che nello spettro.

Gravimetria

Dal 13 al 29 marzo 2018 è stata effettuata una campagna gravimetrica nell'area dei Campi Flegrei. I dati rilevati, che necessitano di ulteriori controlli, sono stati sottoposti ad una preliminare compensazione, risultandone un errore medio sulle misure di $\pm 7 \mu\text{Gal}$. Le differenze di gravità di ciascuna stazione, rispetto a quella di riferimento di Napoli (Università), sono state confrontate con quelle ottenute nella precedente campagna del 11/2017, il cui errore medio è di $\pm 8 \mu\text{Gal}$. I risultati preliminari evidenziano che, nell'intervallo di tempo considerato (11/2017-3/2018), l'area flegrea non è stata interessata da variazioni di gravità significative; solo in corrispondenza di due stazioni ubicate lungo la fascia costiera ad Est di Pozzuoli (GCF33-Chiesa S. Vincenzo e GCF06-Gerolomini) si osservano diminuzioni di gravità significative, rispettivamente di -26 e $-31 \mu\text{Gal}$. Inoltre, alle stazioni Pisciarelli (GCF21) e "Belvedere S. Gennaro" (GCF18ABS) nei pressi dell'Accademia Aeronautica sono state rilevate rispettivamente una diminuzione e un aumento di g di circa $20 \mu\text{Gal}$. Il campo variometrico preliminare (Figura 2.12) è stato rappresentato con isolette a equidistanza di $15 \mu\text{Gal}$.

I dati non sono stati ancora correlati con le variazioni di quota occorse nello stesso intervallo di tempo in quanto non sono disponibili dati altimetrici coevi rilevati in corrispondenza delle stazioni gravimetriche, né sono ancora disponibili quelli finali delle stazioni GPS.

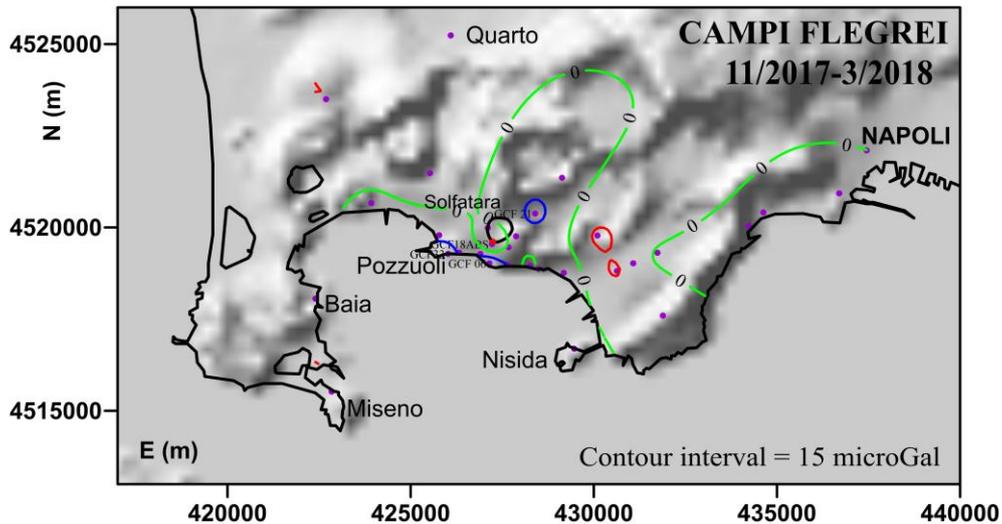


Figura 2.12 - Campo preliminare delle variazioni di gravità sull'intervallo di tempo novembre 2017-marzo 2018. Le variazioni positive, negative e la linea di zero sono rispettivamente rappresentate con le curve in colore rosso, blu e verde. I cerchi pieni viola rappresentano le stazioni gravimetriche misurate.

3. MONITORAGGIO TERMICO AD IMMAGINE

La stazione SF2 della Rete Permanente di Monitoraggio Termico dei Campi Flegrei acquisisce immagini all'infrarosso termico del settore settentrionale del versante interno del cratere della Solfatara, mentre la stazione PS1 acquisisce immagini all'infrarosso termico della parte alta del versante ad ovest della fumarola principale in località Pisciarelli (Fig. 3.1; Silvestri et al., 2017; Vilardo et al., 2015).



Figura 3.1 - Stazione SF2 e PS1. Punto giallo: posizione della stazione; base del triangolo: area campionata.

Le figure 3.2 e 3.3 mostrano l'elaborazione delle rispettive serie temporali dei valori di temperatura massima delle immagini IR processati in tempo reale con l'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition) implementato nel software A.S.I.R.A. (Automated System for IR Analysis). Tale procedura, largamente utilizzata nell'elaborazione statistica di serie temporali, ha una elevata affidabilità ed il vantaggio di restituire il trend in termini di valori di temperatura osservati anziché di valori residui.

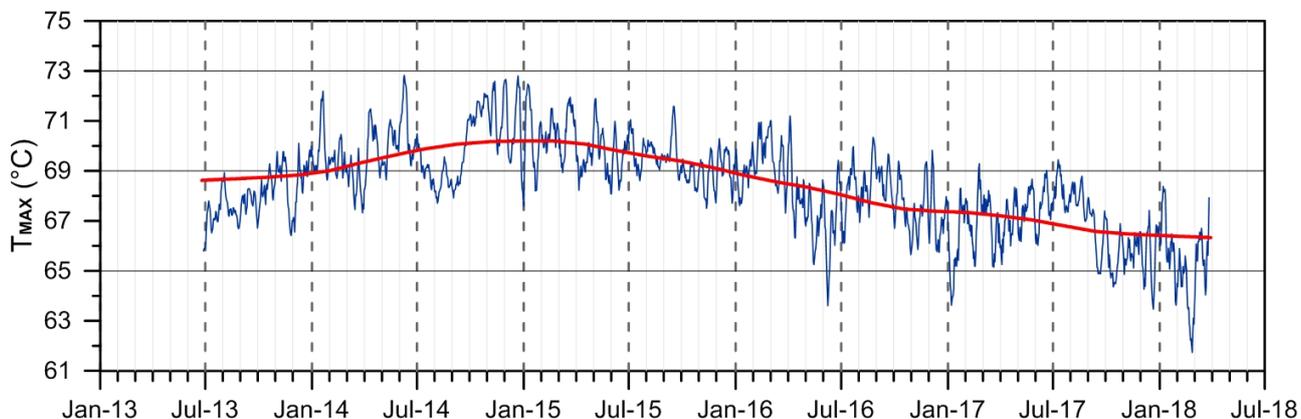


Figura 3.2 - Stazione SF2. Serie temporali delle medie settimanali (blu) e del trend a lungo termine (rosso) dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

L'andamento delle temperature massime rilevate dalla stazione SF2 mostra dall'inizio del 2015, un trend in lieve e costante diminuzione seppur in presenza di ampie oscillazioni a corto periodo (Fig. 3.2). Le temperature massime delle immagini termiche, dopo aver raggiunto nel mese di febbraio 2018 il valore minimo degli ultimi 5 anni, hanno ripreso ad assumere valori paragonabili a quelli osservati nel 2017.

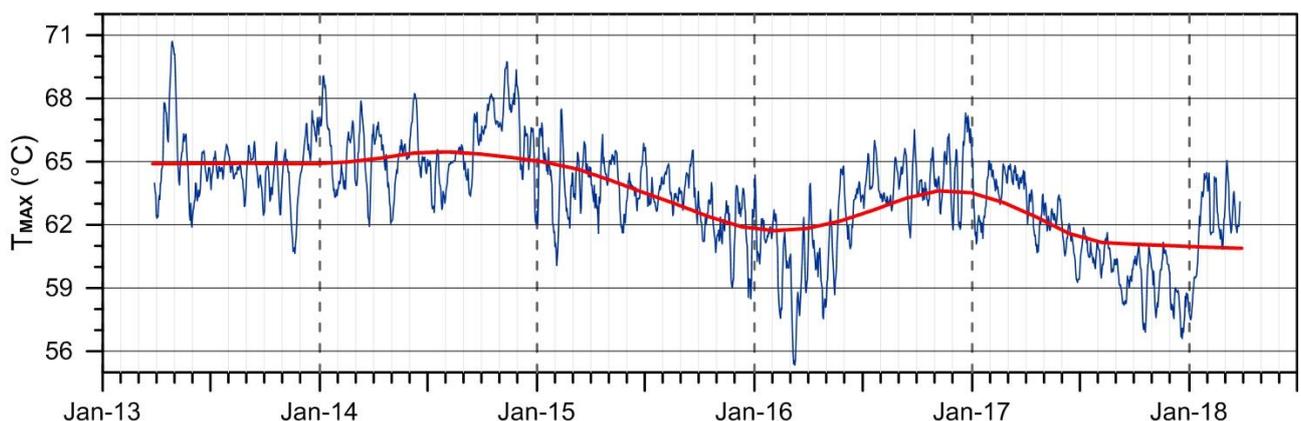


Figura 3.3 - Stazione PS1. Serie temporali delle medie settimanali (blu) e del trend a lungo termine (rosso) dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

L'andamento delle temperature massime rilevate dalla stazione PS1, dopo una costante diminuzione durante tutto il 2017 fino al raggiungimento dei valori tra i più bassi degli ultimi 5 anni, a seguito di un repentino e significativo aumento di temperatura verificatosi nel mese di gennaio 2018 è ritornato ad assumere valori simili a quelli di inizio 2017.

In Figura 3.4 è mostrata la serie temporale completa da ottobre 2007 a marzo 2018 delle variazioni delle temperature massime superficiali rilevate dalla stazione PS1, ottenuta destagionalizzando, con filtro di media mobile di ampiezza 365, la serie temporale IR.



Figura 3.4 - Stazione PS1: Stazione Pisciarelli. Cronogramma delle temperature massime (°C) destagionalizzate con filtro di media mobile di ampiezza 365 campioni.

La Figura 3.4 evidenzia, dopo il raggiungimento del picco massimo dei valori nella seconda metà del 2012, il verificarsi di una costante diminuzione delle temperature superficiali, seppure in presenza di oscillazioni a lungo periodo.

4. GEOCHIMICA DEI FLUIDI

L'attività di monitoraggio svolta nel mese di marzo 2018 ha riguardato:

- l'acquisizione in continuo di dati di flusso di CO₂ dal suolo tramite la stazione automatica FLXOV3 installata a Pisciarelli;
- l'acquisizione in continuo del flusso di CO₂ dal suolo (stazioni FLXOV5 e FLXOV1), della temperatura della fumarola BG e del gradiente termico nel cratere della Solfatara;
- il campionamento delle fumarole principali Bocca Grande e Bocca Nuova nel cratere della Solfatara.

Nel mese di marzo la Procura della Repubblica ha autorizzato l'accesso del personale INGV al cratere della Solfatara per l'esecuzione delle attività di monitoraggio geochimico e la manutenzione/ripristino dei sistemi di monitoraggio.

Di seguito vengono riportate le osservazioni più rilevanti sui nuovi dati.

Una dettagliata descrizione del modello geochimico interpretativo del sistema idrotermale della Solfatara, delle variazioni composizionali registrate e delle possibili interpretazioni sono riportate nei seguenti lavori scientifici: Caliro et al., (2007; 2014); Chiodini (2009); Chiodini et al., (2010; 2011; 2012; 2015a,b; 2016), ai quali si rimanda per approfondimento.

Le analisi di laboratorio dei campioni prelevati evidenziano il perdurare dei trends già identificati in precedenza (vedi rapporti di sorveglianza precedenti; Figg. 4.1-4.4).

Il rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ delle fumarole (Fig. 4.1) nei campioni di Marzo ha mostrato valori tra i più elevati misurati (~ 0.42 per la fumarola BG; ~ 0.37 per la fumarola BN) che in generale testimoniano una elevata frazione di gas magmatici presente nei fluidi fumarolici (Caliro et al., 2007; Chiodini et al., 2010). In particolare, l'interpretazione di queste variazioni risulta più complessa alla luce dei recenti studi che mettono in evidenza come possibili processi di condensazione del vapore nel sistema idrotermale, in risposta ad un aumento del flusso dei fluidi magmatici (e della pressione) e allo stato termico del sistema, possano influenzare il rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ misurato alle fumarole (Chiodini et al., 2015a; 2016). Inoltre è possibile che una frazione della CO_2 emessa dalle fumarole sia prodotta, in seguito all'aumento di temperatura del sistema, da reazioni che coinvolgono la calcite di origine idrotermale presente nel sistema (Chiodini et al., 2015b).

L'analisi di geoindicatori di Temperatura e Pressione, basati sulle composizioni delle fumarole BG e BN, indicano il progressivo riscaldamento delle parti più superficiali del sistema idrotermale della Solfatara. In particolare, le concentrazioni di CO, disponibili alla Solfatara di Pozzuoli fin dalla crisi del 1983-84, a partire dagli inizi degli anni 2000 mostrano un evidente trend di crescita, che sembra essere rallentato a partire dal mese di luglio 2017 (fumarola BG, Fig. 4.2). Tale crescita, resta comunque rilevante poiché il CO è fra le specie fumaroliche analizzate quella più sensibile alla temperatura. Assumendo come buffer delle condizioni redox del sistema idrotermale la funzione di D'Amore and Panichi (1980), che in generale ben descrive la $f\text{O}_2$ in molti dei sistemi idrotermali del mondo, il trend del CO corrisponderebbe ad un aumento di temperatura di 20-25 °C fra gli inizi degli anni 2000 (T circa 215 °C) e il 2014-2018 (T circa 240 °C, Fig. 4.3). Tale processo di riscaldamento del sistema flegreo e le possibili cause sono trattate in modo approfondito nei lavori scientifici Chiodini et al. (2015a; 2016) a cui si rimanda per approfondimento.

Il cronogramma del rapporto CO_2/CH_4 (Fig. 4.4) mostra picchi positivi, interpretabili come dovuti all'arrivo di fluidi magmatici ossidanti, e a basso contenuto in CH_4 , nel sistema idrotermale (Chiodini 2009; Chiodini et al., 2010; 2011; 2012). Nei campioni di marzo, il rapporto CO_2/CH_4 mostra una significativa diminuzione dopo i valori massimi raggiunti nei periodi precedenti. I vari picchi corrisponderebbero, quindi, ad eventi di degassamento magmatico e conseguente immissione di fluidi magmatici nel sistema idrotermale che alimenta le fumarole della Solfatara. Per maggiori dettagli su tale processo si rimanda ad uno specifico lavoro scientifico (Chiodini et al., 2012). Inoltre, in Figura 4.4, è possibile riconoscere un trend d'aumento del rapporto a partire dal 2000. Sia l'aumento della temperatura di equilibrio della parte più profonda del sistema idrotermale che variazioni delle sue condizioni redox (verso condizioni più ossidanti, magmatiche) possono essere la causa dell'aumento del rapporto CO_2/CH_4 (i.e. diminuzione relativa delle concentrazioni di CH_4) (Chiodini et al., 2015a).

Il processo di riscaldamento e pressurizzazione del sistema idrotermale è supportato dalle misure periodiche, su punti fissi nel cratere della Solfatara (Fig. 4.5), del flusso di CO_2 dal suolo e della temperatura del suolo che mostrano trends di aumento pluriennali. In particolare, i valori di flusso di CO_2 dal suolo relativi alle campagne mensili di misura (dati aggiornati al mese di febbraio),

mostrano un andamento caratterizzato da una periodicità annuale, rientrando in un trend di aumento pluriennale dei valori a partire dal 2006 (Fig. 4.6). Analogamente, la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, mostra un chiaro andamento stagionale sovrapposto ad un trend d'aumento della temperatura (Fig. 4.7), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 5 °C nel periodo 2002-2018. Nella mappa di Figura 4.8a è riportato l'incremento di temperatura espresso in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale; naturalmente, l'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo del cratere a NE dove le temperature sono vicine al limite fisico di condensazione per i fluidi emessi dalla Solfatara (~95°C, Fig. 4.8b).

La stazione multiparametrica FLXOV5, attiva dal dicembre 2014 e installata nel cratere della Solfatara a pochi metri dalla fumarola BG, ha misurato un significativo aumento del flusso di CO₂ dal suolo, a partire dal febbraio 2016 e confermato dopo l'intervento di manutenzione della stazione (marzo-giugno) da luglio 2016 (Fig. 4.9). Tale aumento del flusso di CO₂ è da mettere in relazione all'evidente processo di fumarolizzazione che interessa l'intera area.

Il processo di riscaldamento e pressurizzazione della parte più superficiale del sistema idrotermale, iniziato a partire dal 2007 (Chiodini et al., 2011) e tuttora in corso, causa a nostro avviso le variazioni macroscopiche osservate a Pisciarelli (Fig 4.10) e che negli ultimi anni sono consistite nell'apertura di nuovi vent fumarolici e di polle bollenti, nell'emissione di fango, in attività sismica localizzata, nell'aumento della temperatura della fumarola principale (Fig 4.11) e nell'aumento dei flussi misurati in continuo dalla stazione FLXOV3 (Fig 4.12).

La temperatura della fumarola principale di Pisciarelli, a causa del malfunzionamento della stazione FLXOV3, è stata acquisita con altri data-logger. Nel periodo di interesse la temperatura della fumarola ha mostrato un valore medio di circa 113 °C (Fig. 4.13). Poiché la fumarola è un sistema naturale in continua evoluzione, con variazioni macroscopiche del sito di emissione, la temperatura registrata potrebbe non sempre coincidere con la temperatura massima. L'ambiente aggressivo a cui è stata sottoposta la stazione per oltre dieci anni ha danneggiato irrimediabilmente l'elettronica. L'acquisitore dovrà essere sostituito con una nuova stazione multiparametrica denominata "GEMMA", sviluppata e realizzata nell'ambito delle attività di ricerca tecnologica dell'Osservatorio Vesuviano, per l'acquisizione di parametri geochimici e ambientali correlati.

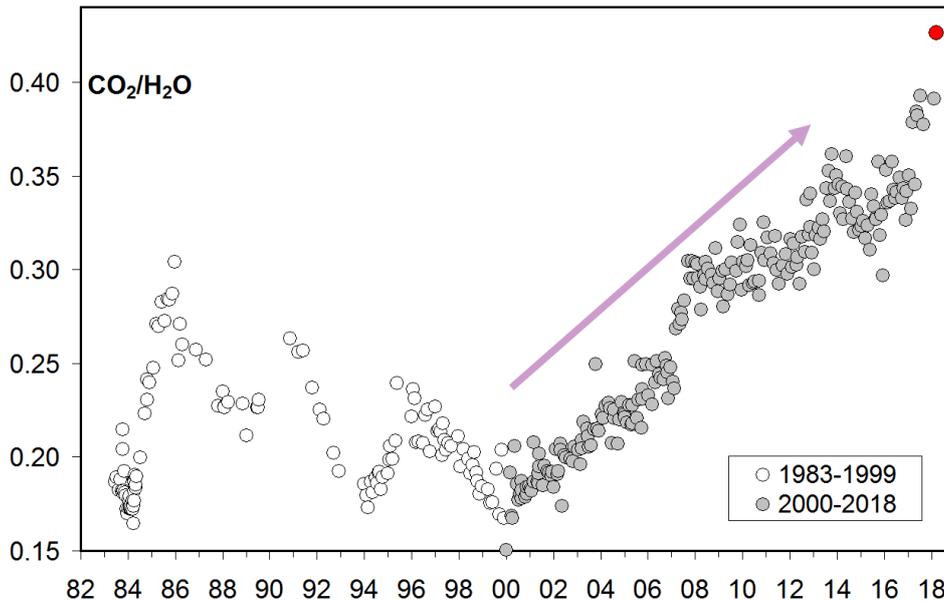


Figura 4.1 - Cronogramma del rapporto CO₂/H₂O per la fumarola BG. In grigio sono riportati i dati a partire dal 2000, quando è iniziato un trend d'aumento del rapporto CO₂/H₂O, in generale, indicativo di una crescente frazione della componente magmatica nei fluidi fumarolici. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di marzo 2018.

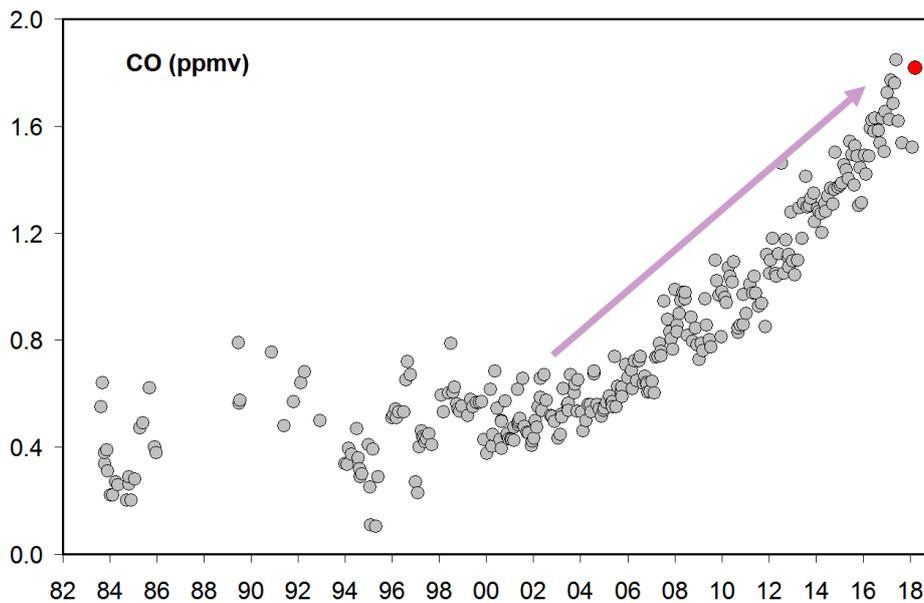


Figura 4.2 – Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di marzo 2018. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici ad elevata temperatura mentre fumarole alimentate da sistemi idrotermali mostrano concentrazioni più basse, in tali sistemi un aumento delle concentrazioni di CO può riflettere un incremento delle condizioni di pressione e temperatura.

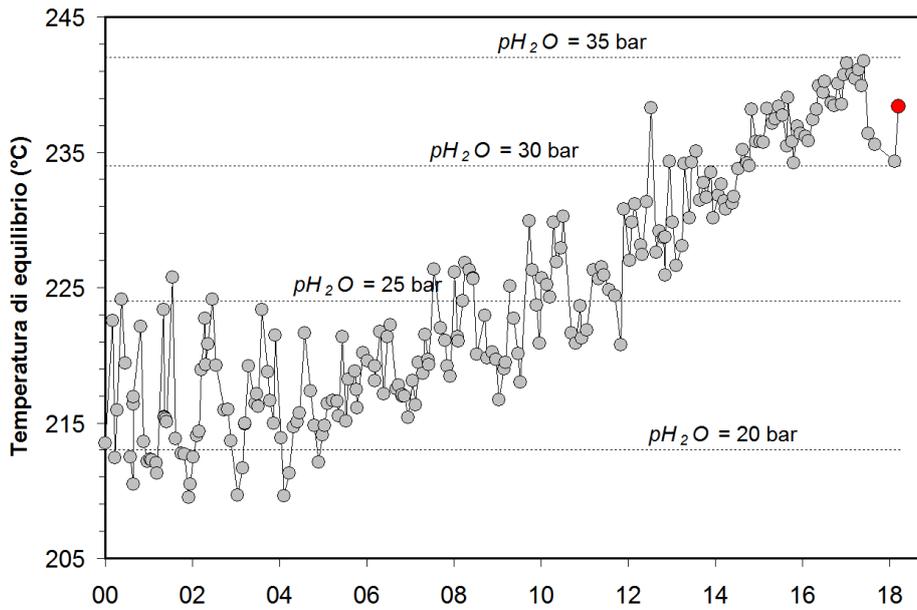


Figura 4.3 – Cronogramma delle temperature di equilibrio per il sistema $CO-CO_2$, stimate assumendo condizioni redox fissate dalla relazione di D’Amore and Panichi (1980). Tali temperature, rappresentative della parte più superficiale del sistema idrotermale (Caliro et al., 2007), mostrano un trend d’aumento a partire dai primi anni del 2000. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di marzo 2018 relativo alla fumarola BG.

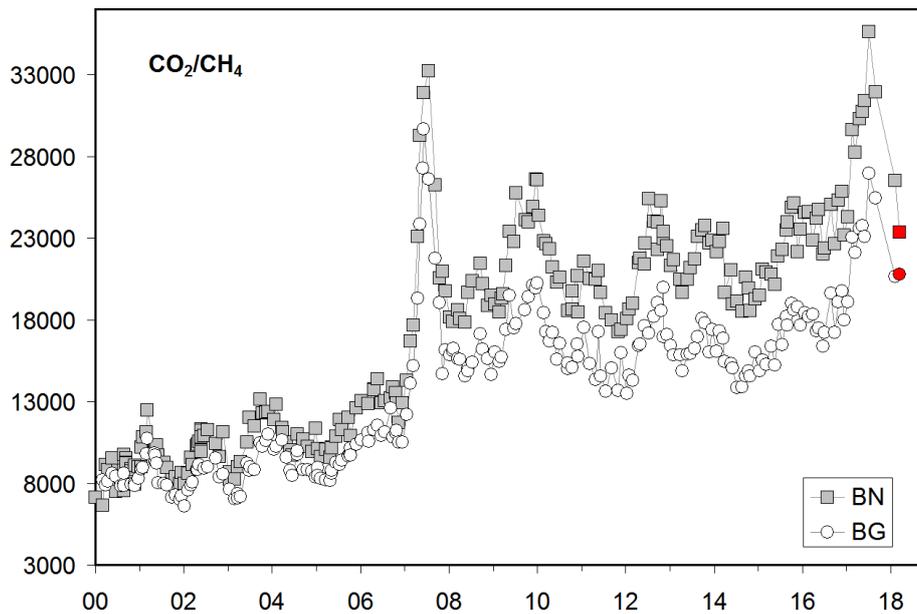


Figura 4.4 – Variazioni del rapporto CO_2/CH_4 per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico occorsi ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). Con i simboli rossi sono evidenziati i campioni di marzo 2018.

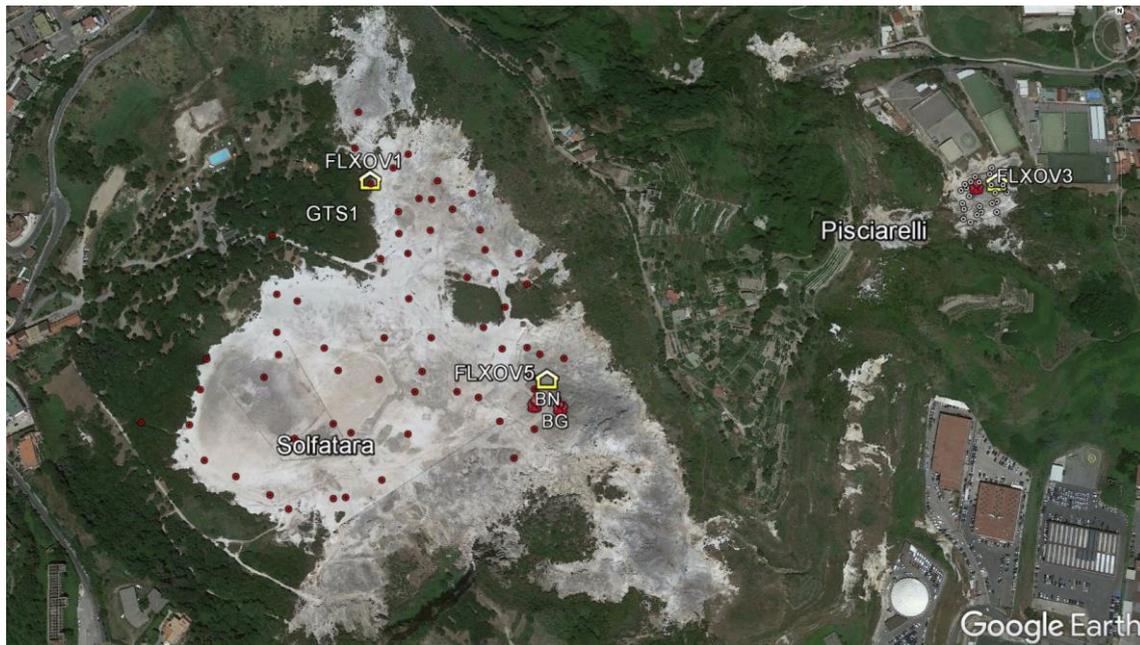


Figura 4.5 - Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. In particolare sono riportate le quattro stazioni geochimiche ubicate in area Solfatara-Pisciarelli e le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e di Pisciarelli; sono inoltre riportati i punti fissi per la misura del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura del suolo in area Solfatara (simboli rossi) e in area Pisciarelli (simboli bianchi).

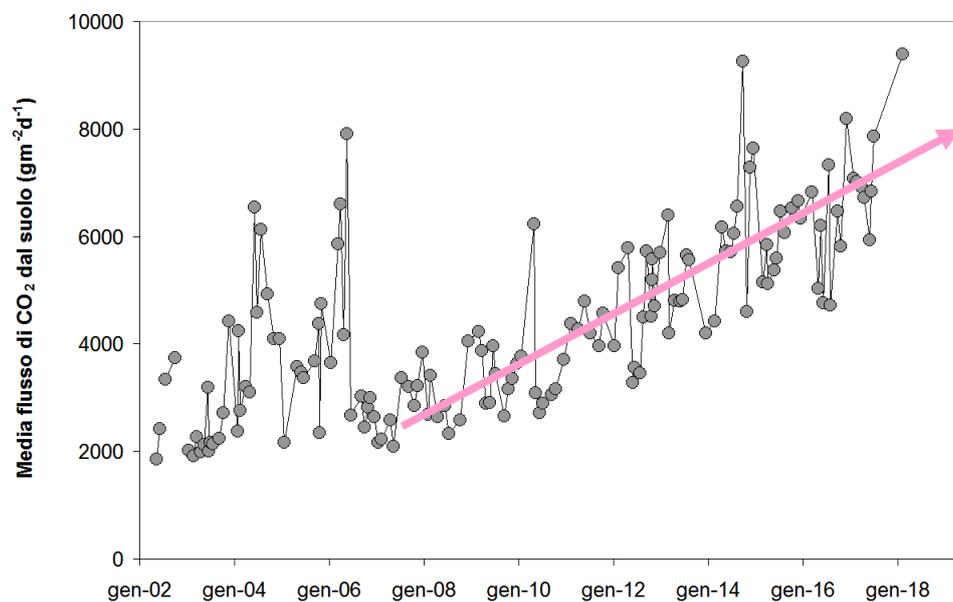


Figura 4.6 – Cronogramma della media dei flussi di CO₂ dal suolo misurati mensilmente su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara.

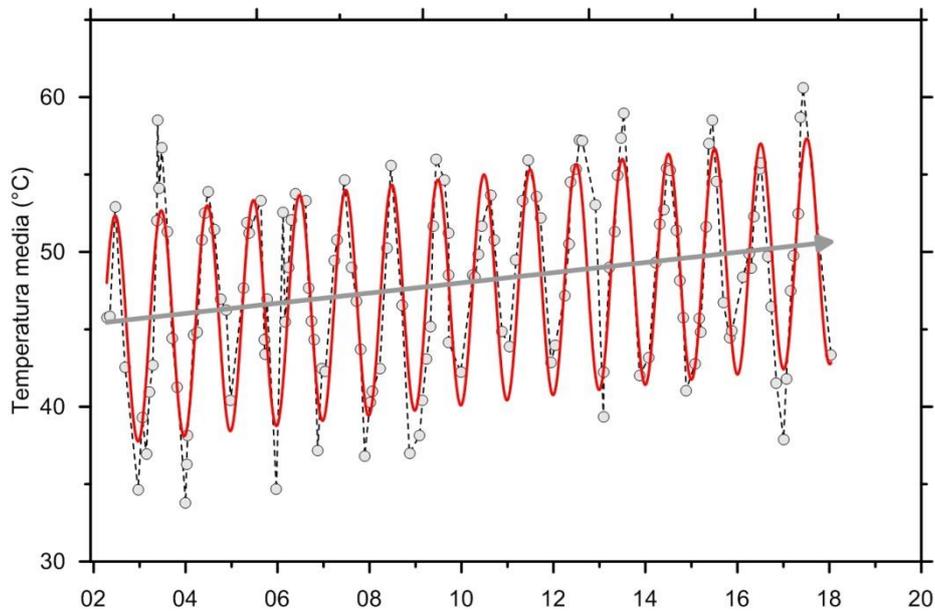


Figura 4.7 – Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. Va evidenziato l'incremento del valore medio nel periodo 2002-2018 di oltre 5 °C.

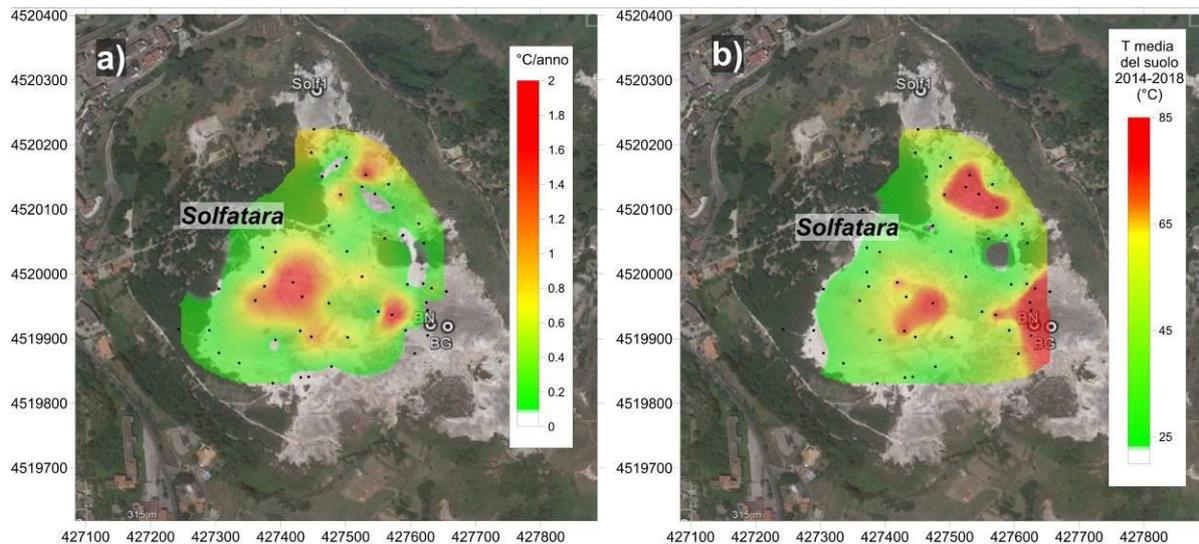


Figura 4.8 – a) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale. L'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo del cratere a NE dove le temperature sono vicine al limite fisico di condensazione per i fluidi emessi dalla Solfatara (~95°C). b) mappa delle temperature dei punti misurati (media dal 2014 al 2018).

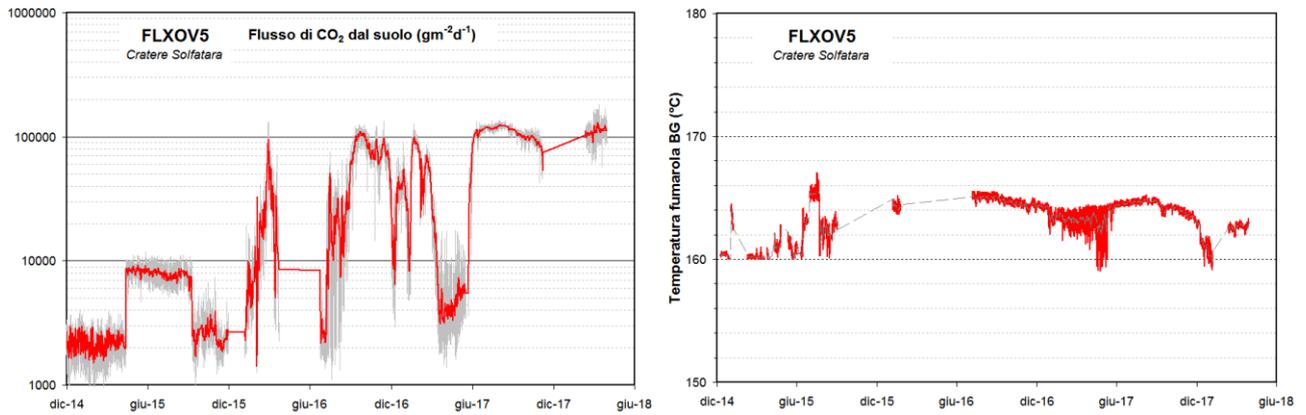


Figura 4.9 - Valori del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura della fumarola BG misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara a pochi metri dalla fumarola principale BG. I valori di flusso di CO₂ dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2015 (la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere).



Figura 4.10 - Variazioni macroscopiche dell'area di emissione di Pisciarelli dal 2005.

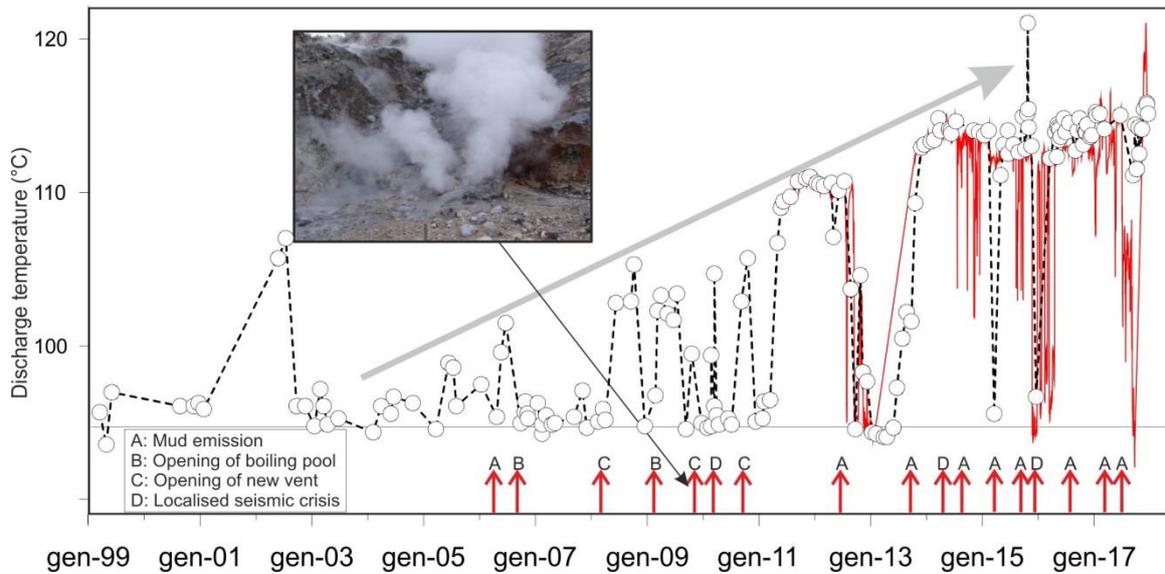


Figura 4.11 – Cronogramma delle temperature (°C) della fumarola di Pisciarelli e dei maggiori eventi occorsi legati all’aumento dell’attività idrotermale (i cerchi si riferiscono a misure discrete riferite al punto di maggior flusso dei gas, la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere delle misure in continuo). La temperatura di ~95°C rappresenta la temperatura di ebollizione per i fluidi fumarolici di Pisciarelli. Nella foto è riportata la nuova vigorosa fumarola sorta il 20 dicembre 2009.

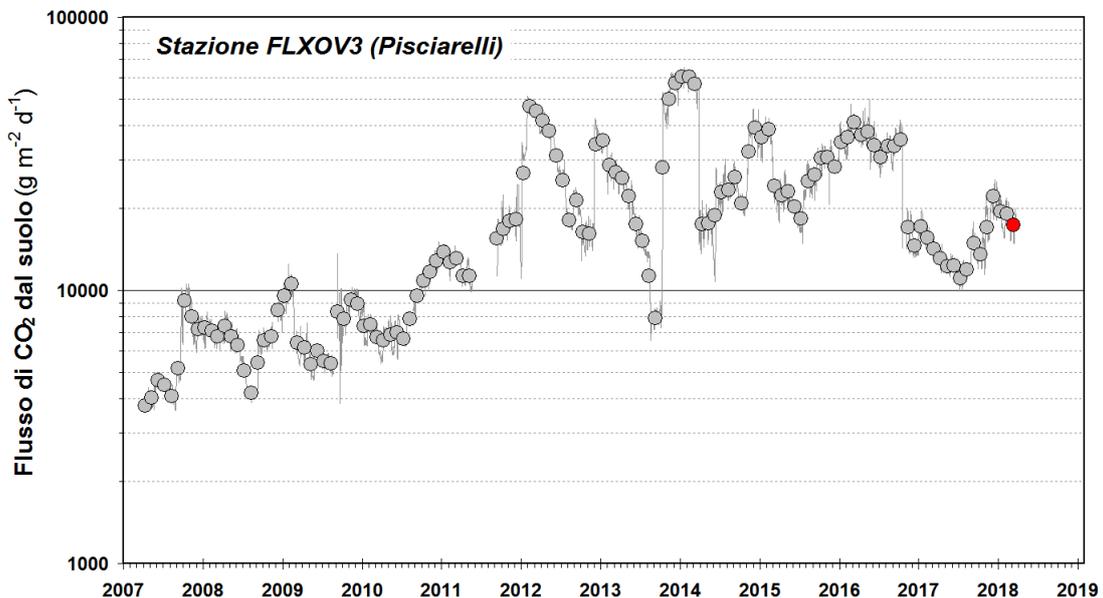


Figura 4.12 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO₂ misurati a Pisciarelli (FLXOV3). E’ da evidenziare il continuo trend d’aumento nel tempo a partire dal 2007 del flusso CO₂. La media dei flussi relativa al mese di marzo è riportata con il simbolo rosso. L’intervento di riparazione della stazione, effettuato nel mese di novembre 2016, resosi necessario per ripristinare il sistema per la misura del flusso di CO₂ dal suolo, ha comportato una modifica permanente del sito con valori misurati di flusso di CO₂ più bassi.

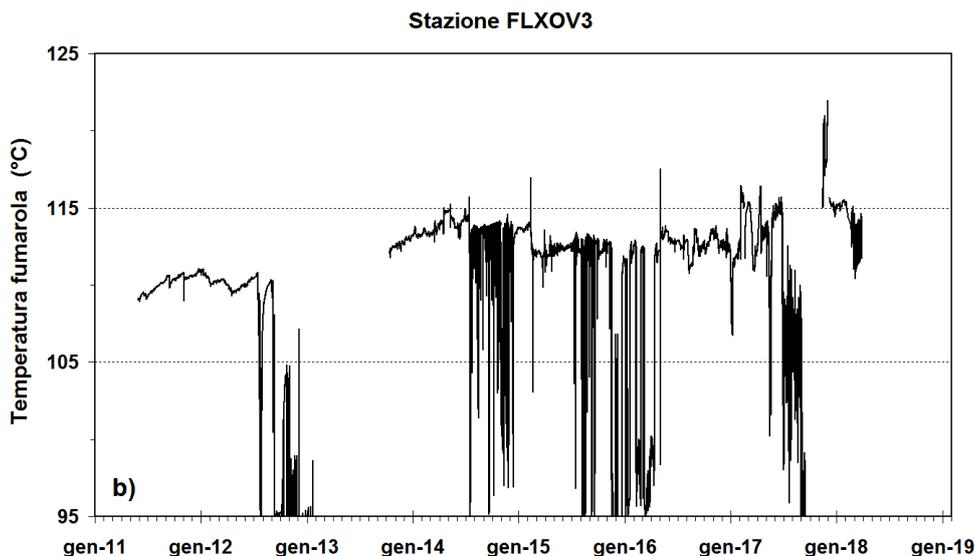


Figura 4.13 - Cronogramma delle temperature della fumarola di Pisciarelli registrate in continuo dal 2011.

5. QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEL VULCANO NEL MESE DI MARZO 2018 E VALUTAZIONI

1) **SISMOLOGIA:** Nel corso del mese di marzo 2018 sono stati registrati 57 terremoti generalmente di bassa magnitudo ($M_{dmax}=2.4$). Gli eventi si collocano nell'area tra Solfatara e Pisciarelli.

2) **DEFORMAZIONI:** Seppur in presenza di diverse oscillazioni, l'analisi dei trend delle serie temporali GPS da luglio 2017 ha permesso di valutare che l'area flegrea è interessata da un sollevamento medio di circa 0.7 cm/mese. Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 26 cm a partire da gennaio 2014, di cui circa 7 cm da gennaio 2017.

L'orientazione dei vettori tilt a partire dalla fine di settembre 2017 concorda con un uplift radiale centrato nell'area della città di Pozzuoli ma con una maggiore inclinazione del suolo in direzione NNE.

I primi risultati della Campagna Gravimetrica non evidenziano variazioni significative rispetto al dato precedente del novembre 2017.

3) **TERMOGRAFIA:** L'analisi delle serie temporali delle aree campionate della Solfatara e Pisciarelli, seppur in presenza di ampie oscillazioni a breve periodo, mostra valori paragonabili a quelli del 2017.

4) **GEOCHIMICA:** I parametri geochimici rientrano nei trend già identificati in precedenza. Nel periodo di interesse la temperatura della fumarola FLXOV3 di Pisciarelli ha mostrato un valore medio di circa 113 °C.

Nella Figura 5.1 sono rappresentati i parametri di monitoraggio più indicativi in un confronto temporale a breve e medio termine.

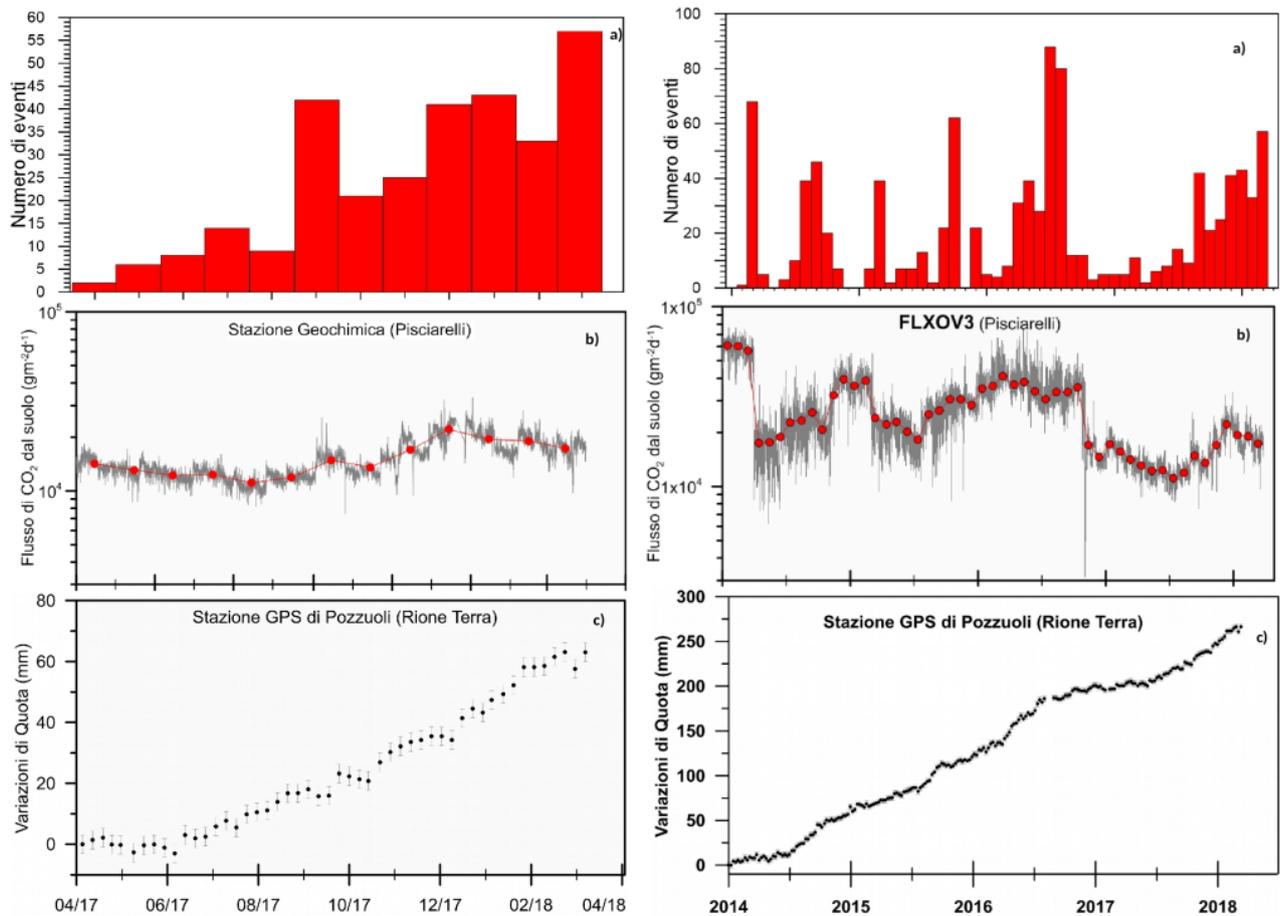


Figura 5.1 – Frequenza di accadimento degli eventi sismici (a), variazioni del flusso di CO₂ alla stazione FLXOV3 di Pisciarelli (b) e andamento delle deformazioni del suolo alla stazione GPS di RITE negli ultimi dodici mesi (a sinistra) e dal 2014 (a destra).

Sulla base dell’attuale quadro dell’attività vulcanica sopra delineato, non si evidenziano elementi tali da suggerire significative evoluzioni a breve termine.

N.B. Eventuali variazioni dei parametri monitorati possono comportare una diversa evoluzione degli scenari di pericolosità sopra descritti.

Il monitoraggio dell’area flegrea permane al livello di “Attenzione”.

Bibliografia

Caliro S., Chiodini G., Moretti R., Avino R., Granieri D., Russo M., and Fiebig J. (2007) The origin of the fumaroles of La Solfatara (Campi Flegrei, South Italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta* **71**, 3040-3055. doi:10.1016/j.gca.2007.04.007.

Caliro S., Chiodini G., and Paonita A. (2014) Geochemical evidences of magma dynamics at Campi Flegrei (Italy). *Geochim. Cosmochim. Acta* **132**, 1-15. doi:10.1016/j.gca.2014.01.021.

Chiodini, G. (2009), CO₂/CH₄ ratio in fumaroles a powerful tool to detect magma degassing episodes at quiescent volcanoes., *Geophys. Res. Lett.*, doi: [10.1029/2008GL036347](https://doi.org/10.1029/2008GL036347)

Chiodini, G., S. Caliro, C. Cardellini, D. Granieri, R. Avino, A. Baldini, M. Donnini, and C. Minopoli (2010), Long-term variations of the Campi Flegrei, Italy, volcanic system as revealed by the monitoring of hydrothermal activity, *J. Geophys. Res.*, **115**, B03205, doi:10.1029/2008JB006258.

- Chiodini, G., R. Avino, S. Caliro, C. Minopoli (2011) Temperature and pressure gas geoindicators at the Solfatara fumaroles (Campi Flegrei). *Annals Geophysics*, 54, 2. doi: 10.4401/ag-5002
- Chiodini G., Caliro S., De Martino P., Avino R. and Gherardi F. (2012). Early signals of new volcanic unrest at Campi Flegrei caldera? Insights from geochemical data and physical simulations. *Geology*, doi:10.1130/G33251.1
- Chiodini G., Vandemeulebrouck J., Caliro S, D'Auria L., De Martino P, Mangiacapra A., Petrillo Z. (2015a) Evidence of thermal driven processes triggering the 2005-2014 unrest at Campi Flegrei caldera. *Earth Planet. Sci. Lett.* 414, 58–67. doi:10.1016/j.epsl.2015.01.012
- Chiodini G., Pappalardo L., Aiuppa A. and Caliro S. (2015b) The geological CO₂ degassing history of a long-lived caldera. *Geology*. doi:10.1130/G36905.1
- Chiodini G., Paonita A., Aiuppa A., Costa A., Caliro S., De Martino P., Acocella V. and Vandemeulebrouck J. (2016) Magmas near the critical degassing pressure drive volcanic unrest towards a critical state. *Nat. Commun.* 7, 13712. doi: 10.1038/ncomms13712
- D'Amore F. and Panichi C. (1980) Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta* **44**, 549-556.
- Silvestri M., Diaz J.A., Marotta E., Dalla Via G., Bellucci Sessa E., Caputo T., Buongiorno M.F., Sansivero F., Musacchio M., Belviso P., Carandente A., Peluso R., Nave R., Vilardo G., Doumaz F. and E. Corrales (2017). The 2016 field campaign of la Solfatara volcano: monitoring methods and instruments for volcanic surveillance. *Rapporti Tecnici INGV*, ISSN 2039-7941, Anno 2017, Numero 380.

Responsabilità e proprietà dei dati

L'INGV, in ottemperanza a quanto disposto dall'Art.2 del D.L. 381/1999, svolge funzioni di sorveglianza sismica e vulcanica del territorio nazionale, provvedendo alla organizzazione della rete sismica nazionale integrata e al coordinamento delle reti simiche regionali e locali in regime di convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile.

L'INGV concorre, nei limiti delle proprie competenze inerenti la valutazione della Pericolosità sismica e vulcanica nel territorio nazionale e secondo le modalità concordate dall'Accordo di programma decennale stipulato tra lo stesso INGV e il DPC in data 2 febbraio 2012 (Prot. INGV 2052 del 27/2/2012), alle attività previste nell'ambito del Sistema Nazionale di Protezione Civile. In particolare, questo documento, redatto in conformità all'Allegato A del suddetto Accordo Quadro, ha la finalità di informare il Dipartimento della Protezione Civile circa le osservazioni e i dati acquisiti dalle reti di monitoraggio gestite dall'INGV su fenomeni naturali di interesse per lo stesso Dipartimento.

L'INGV fornisce informazioni scientifiche utilizzando le migliori conoscenze scientifiche disponibili; tuttavia, in conseguenza della complessità dei fenomeni naturali in oggetto, nulla può essere imputato all'INGV circa l'eventuale incompletezza ed incertezza dei dati riportati e circa accadimenti futuri che differiscano da eventuali affermazioni a carattere previsionale presenti in questo documento. Tali affermazioni, infatti, sono per loro natura affette da intrinseca incertezza.

L'INGV non è responsabile dell'utilizzo, anche parziale, dei contenuti di questo documento da parte di terzi, e/o delle decisioni assunte dal Dipartimento della Protezione Civile, dagli organi di consulenza dello stesso Dipartimento, da altri Centri di Competenza, dai membri del Sistema Nazionale di Protezione Civile o da altre autorità preposte alla tutela del territorio e della popolazione, sulla base delle informazioni contenute in questo documento. L'INGV non è altresì responsabile di eventuali danni recati a terzi derivanti dalle stesse decisioni.

La proprietà dei dati contenuti in questo documento è dell'INGV. La diffusione anche parziale dei contenuti è consentita solo per fini di protezione civile ed in conformità a quanto specificatamente previsto dall'Accordo Quadro sopra citato tra INGV e Dipartimento della Protezione Civile.