

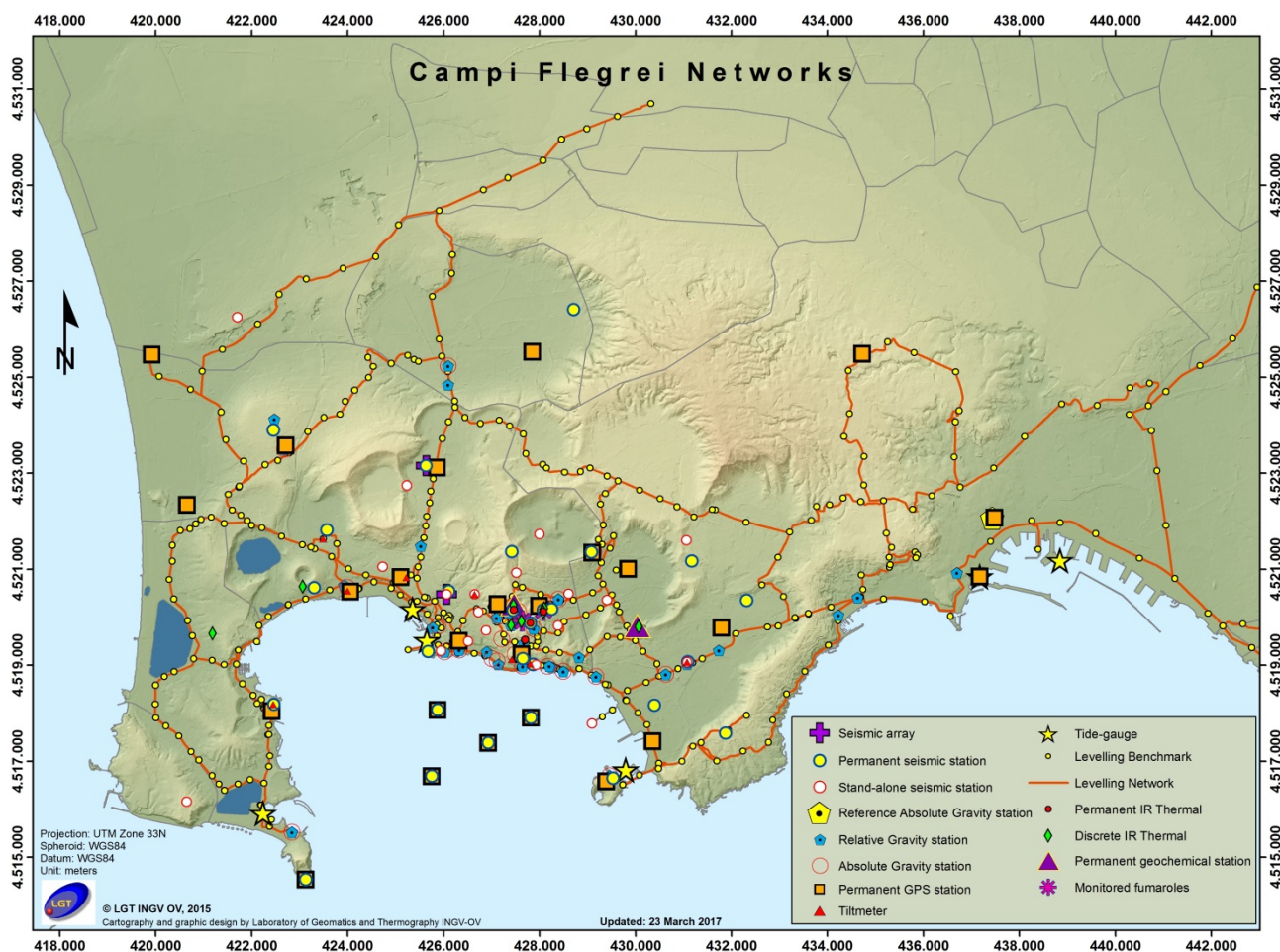


ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Bollettino di Sorveglianza

CAMPI FLEGREI

NOVEMBRE 2017



CAMPI FLEGREI

1 - Sismicità

Nel corso del mese di novembre 2017 ai Campi Flegrei sono stati registrati 25 terremoti di bassa magnitudo ($M_{Dmax}=1.3$; evento del 16/11 alle ore 08:31 UTC) (Fig. 1.1). 14 eventi sono stati registrati durante uno sciame sismico iniziato alle 07:44 UTC del 16/11 e terminato alle 12:31 UTC del 16/11 e localizzato nell'area compresa tra il bordo meridionale degli Astroni e la Solfatara a profondità ≤ 1.5 km.

E' stato possibile determinare l'ipocentro di 16 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).

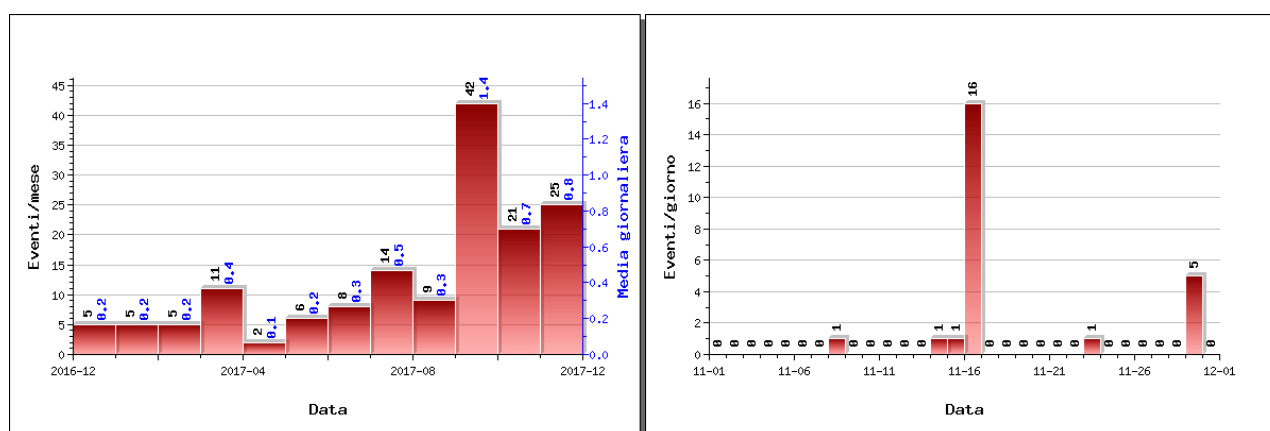


Figura 1.1 - A sinistra numero di eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in totale 153), mentre a destra quelli avvenuti nell'ultimo mese (in totale 25).

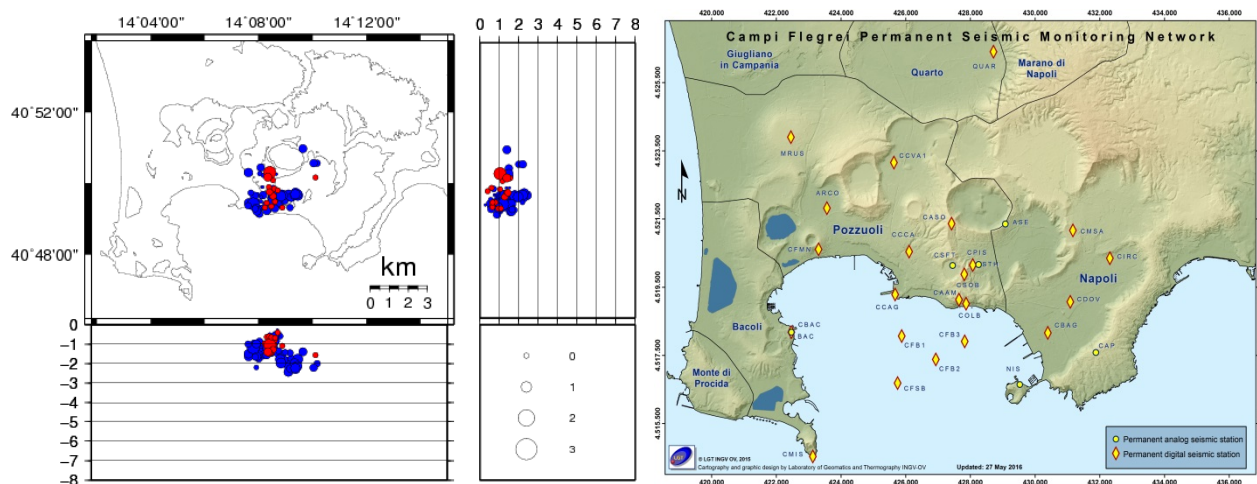


Figura 1.2 - Localizzazioni ipocentrali ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in blu) e dell'ultimo mese (in rosso). La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo, come indicato nel riquadro in basso. A destra è mostrata la mappa con la Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.

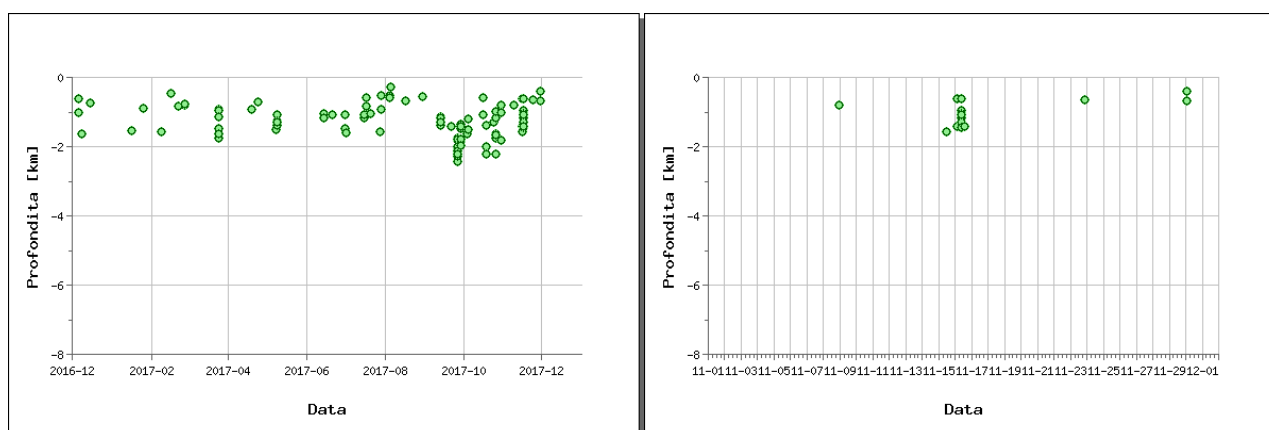


Figura 1.3 - Profondità ipocentrali degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

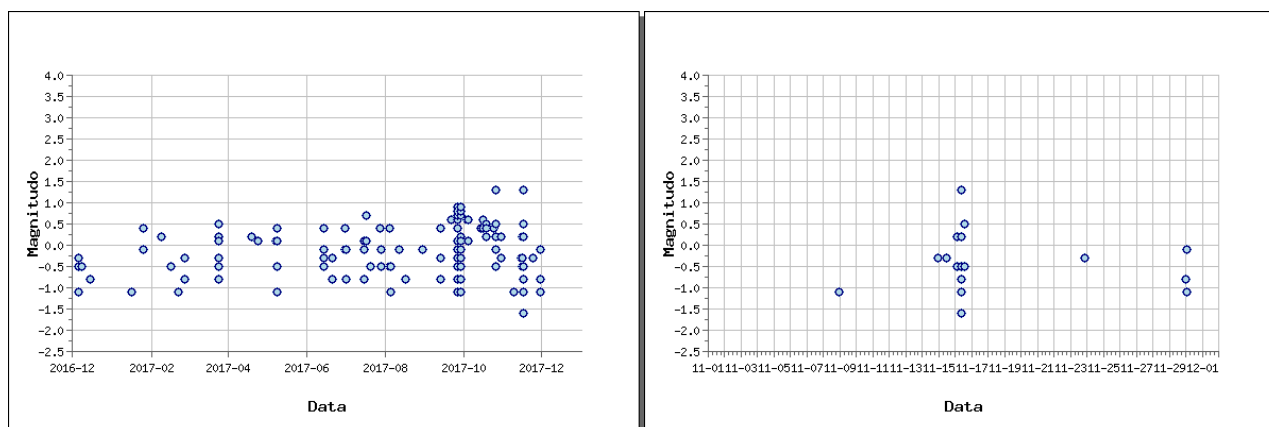


Figura 1.4 - Magnitudo degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

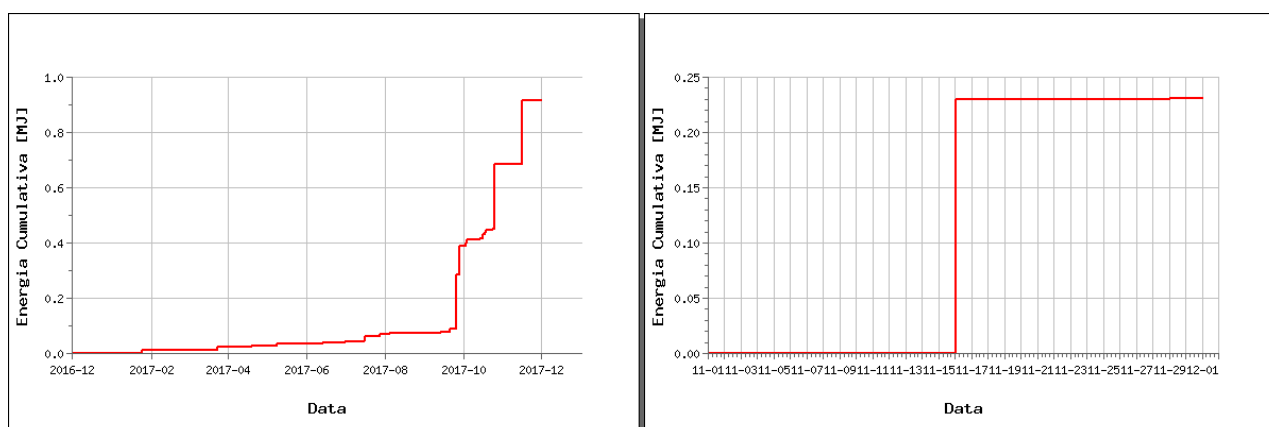


Figura 1.5 - Rilascio cumulativo di energia sismica ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

2 - Deformazioni del Suolo

GPS

Seppur in presenza di diverse oscillazioni, l'analisi dei trend delle serie temporali da luglio 2017 ha permesso di valutare che l'area flegrea, in questo periodo, è interessata da un sollevamento medio di circa 0.5 cm/mese. Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 23 cm a partire da gennaio 2014, di cui circa 11 cm da gennaio 2016 (Fig. 2.2 e Fig. 2.3).

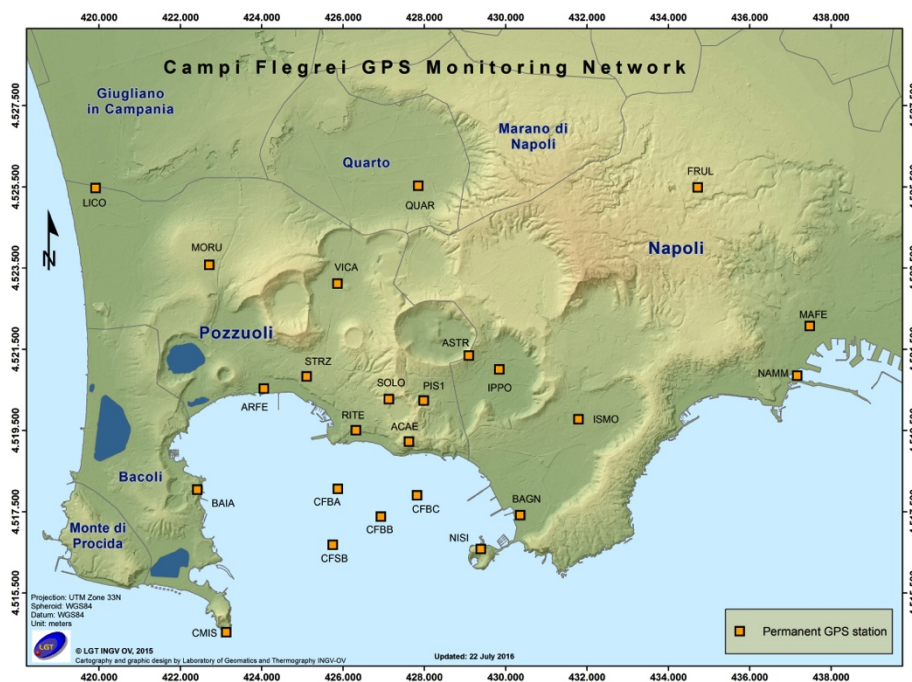


Figura 2.1 - Rete GPS Permanente dei Campi Flegrei.

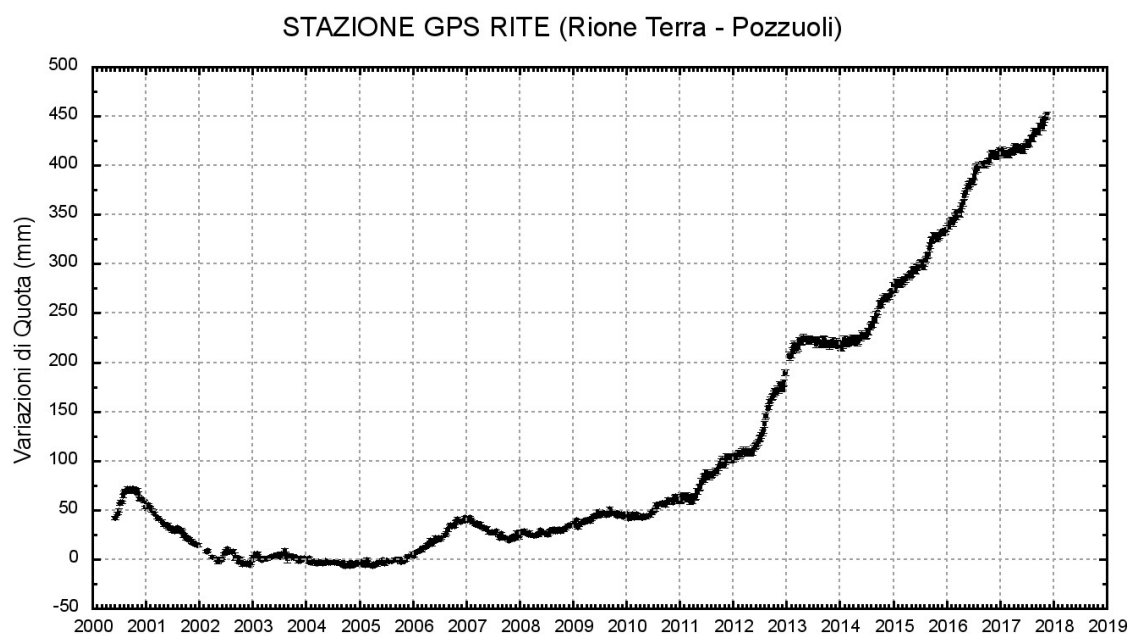


Figura 2.2 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di RITE (Pozzuoli – Rione Terra) dal 2000 a novembre 2017.

La figura 2.2 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.

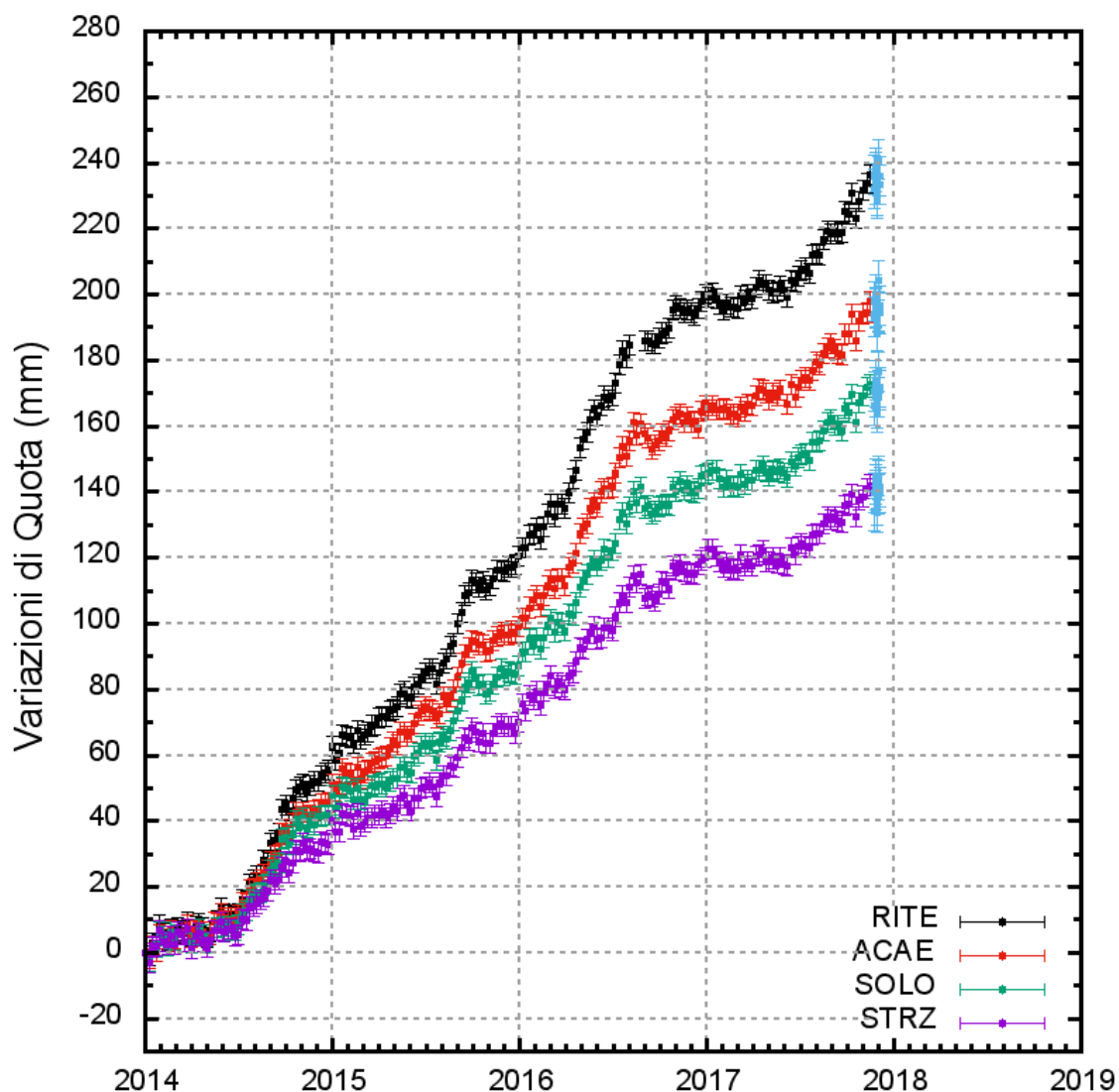


Figura 2.3 - Serie temporale delle variazioni in quota della stazione di RITE (Pozzuoli - Rione Terra), ACAE (Accademia Aeronautica), SOLO (Solfatara) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) dal 01 gennaio 2014 al 04 dicembre 2017.

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.

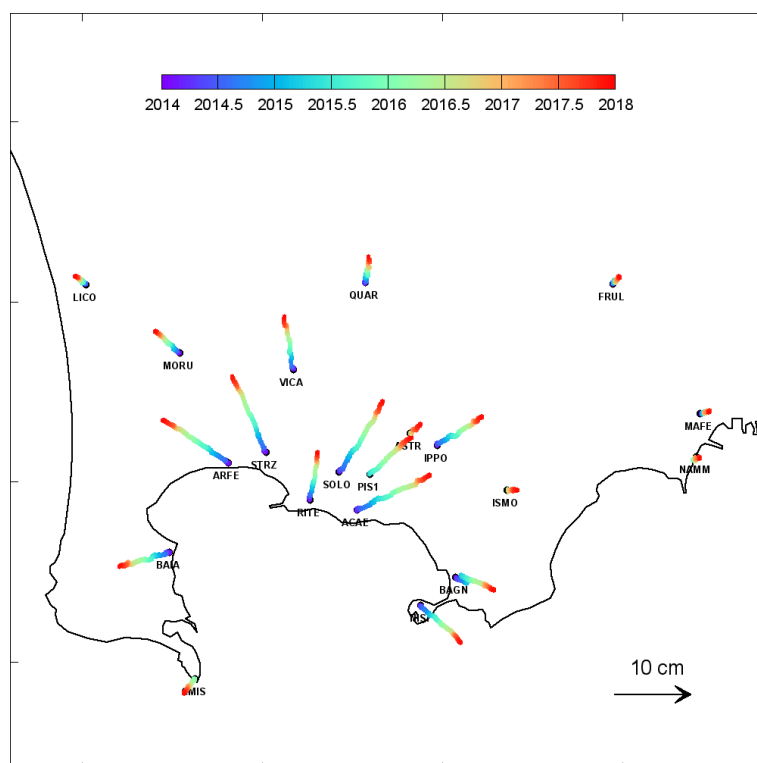


Figura 2.4 - Mappa degli spostamenti GPS orizzontali registrati nell'area flegrea dal 01 gennaio 2014 al 04 dicembre 2017.

Mareometria

La Rete Mareografica è riportata in Figura 2.5.

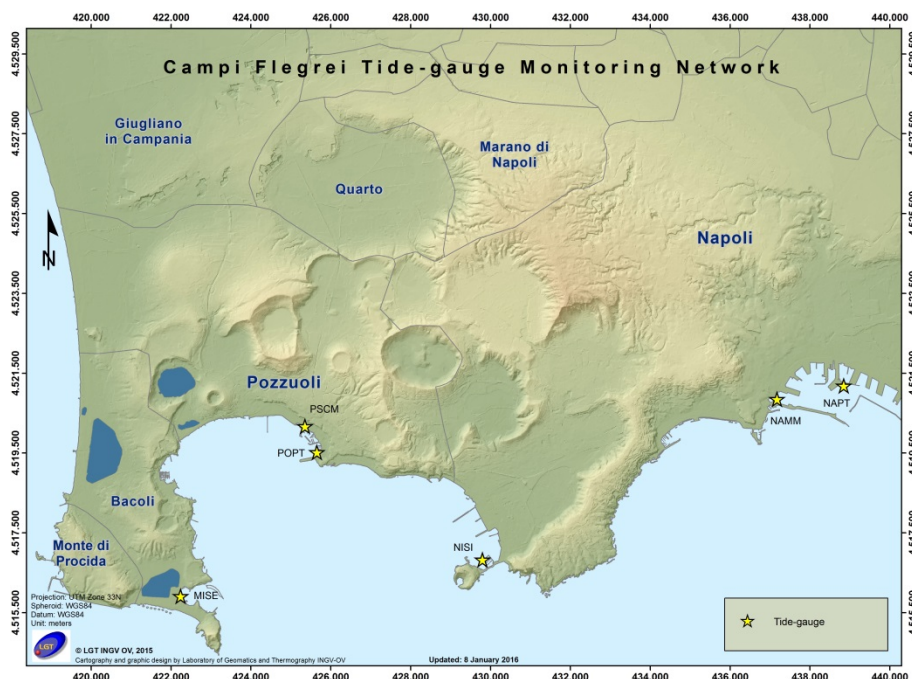


Figura 2.5 - Rete Mareografica di Campi Flegrei.

I dati mareografici relativi alla stazione di Pozzuoli Porto nel periodo gennaio 2014 – novembre 2017 mostrano l'andamento di Figura 2.6a, dal quale si evince un sollevamento di poco inferiore ai 22 cm. Da gennaio 2016 a novembre 2017 si ha un contributo di circa 11 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 NMM.

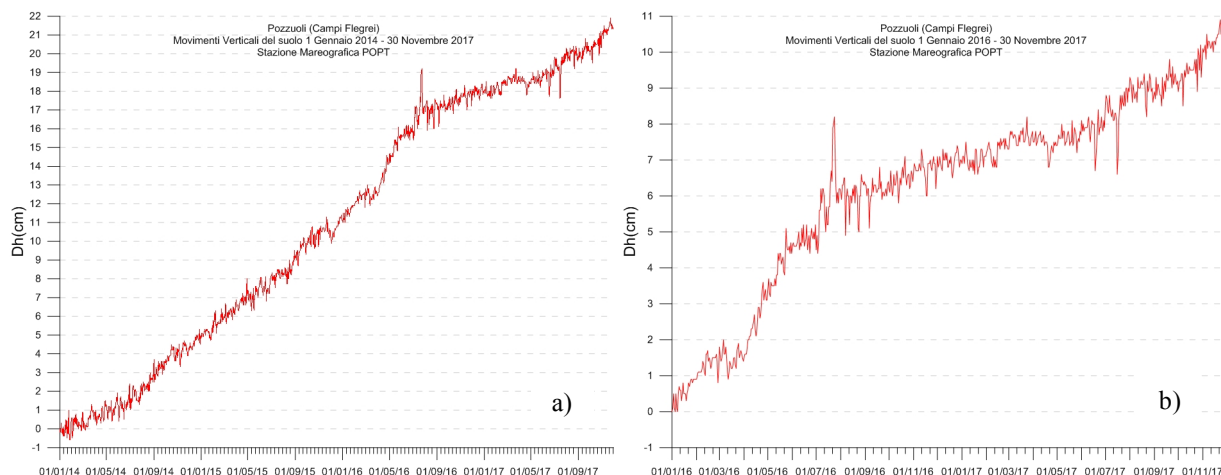


Figura 2.6 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2014 - novembre 2017 (a) e gennaio 2016 - novembre 2017 (b), ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli molo S.Vincenzo (NMM).

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).

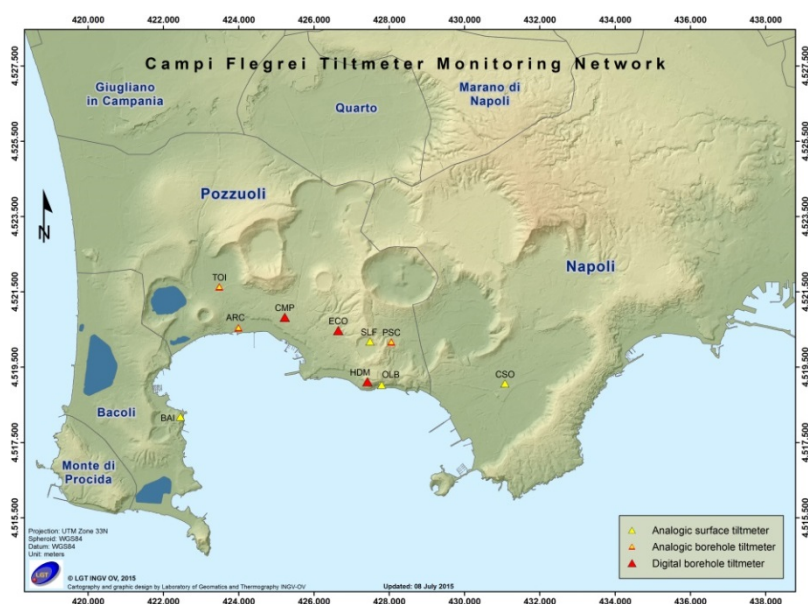


Figura 2.7 – Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.

La variazione tiltmetrica osservata ai Campi Flegrei nel periodo gennaio-novembre 2017 concorda con un uplift radiale ma solo dalla fine di settembre e cioè dopo gli sciame sismici di bassa energia occorsi il 26/9 ed il 28/9, ed è visibile in Figura 2.8.

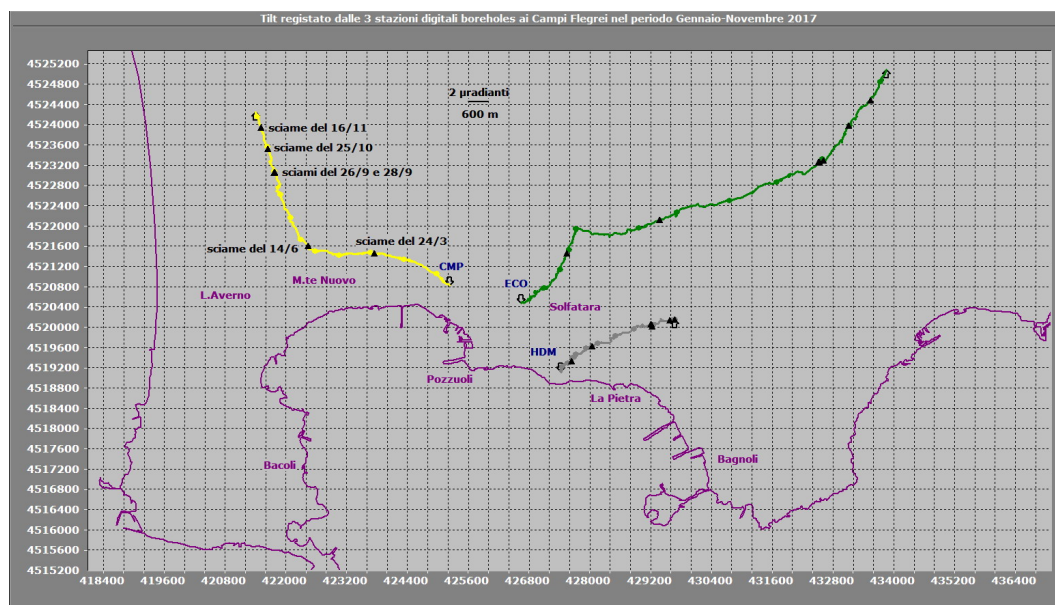


Figura 2.8 - Odografo del tilting registrato a 3 stazioni dei Campi Flegrei nel periodo gennaio-novembre 2017. Per chiarezza di rappresentazione grafica sono state selezionate solo le stazioni borehole con sensori ubicati a 25 m di profondità. I triangolini neri sovrapposti al tilt cumulativo indicano i 4 sciame sismici di bassa energia occorsi fino al 28/9.

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 (che indica settori di crosta in abbassamento) è univocamente definito dal suo estremo libero.

Nella Tabella seguente sono riportati, per ogni stazione, 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 nei primi undici mesi del 2017. Si segnala che dagli inizi di novembre non è stato possibile acquisire dati alla stazione HDM per problemi di trasmissione.

Sito	Inclinazione e direzione	Temperatura
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	42.8 μ radianti a ENE	0.13 °C
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	25.6 μ radianti a WNW	0.00 °C
Stazione HDM (112 m s.l.m.)	12.4 μ radianti a ENE	- 0.01 °C

Dagli ultimi sciame sismici occorsi il 26/9 ed il 28/9, le direzioni di tilting subiscono un riorientamento tale da farle intersecare a Pozzuoli, cosa che prima non accadeva configurandosi una radialità meno marcata.

La forte variazione in azimuth registrata a CMP a partire dagli inizi di giugno è visibile in Fig. 2.8, testimoniava l'incremento della deformazione del suolo, fenomeno che tuttora perdura.

Va segnalato inoltre il persistere dell'aumento di temperatura localizzato alla stazione ECO.

Per quanto riguarda la zona della Solfatara di Pozzuoli, dal confronto tra le serie termiche registrate dal sensore di temperatura a corredo del tiltmetro installato a Pisciarelli (PSC, sensore a -1 m da p.c.), si segnala il perdurare di una maggiore variazione termica nell'anno in corso rispetto ai 2 precedenti. (Fig. 2.9).

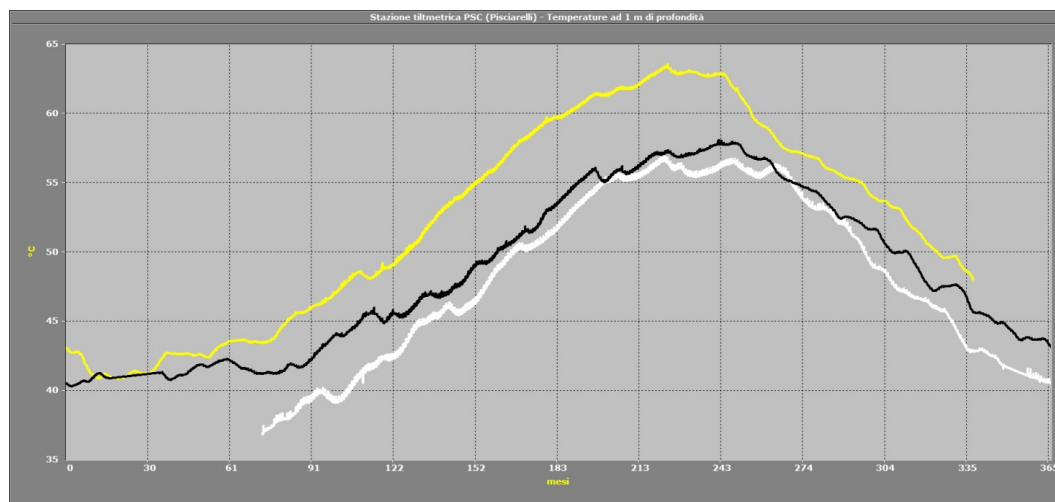


Figura 2.9 - Temperatura registrata dal sensore termico del tiltmetro borehole in località Pisciarelli (stazione PSC, sensore a -1 m da p.c.). I diversi colori contraddistinguono gli anni: giallo 2017, nero 2016, bianco 2015.

3 – Geochimica dei Fluidi

L'attività di monitoraggio svolta nel mese di novembre 2017 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 di dati di flusso di CO₂ dal suolo, della temperatura della fumarola BG e del gradiente termico nel cratere della Solfatara;
- misure di flusso di CO₂ dal suolo e temperatura del suolo su punti fissi selezionati nell'area di Pisciarelli.

Per il periodo di interesse non sono disponibili nuove analisi delle fumarole del cratere della Solfatara (BG e BN), dove permane il divieto di accesso anche per il personale INGV.

Di seguito sono riportate le osservazioni più rilevanti sui nuovi dati acquisiti nelle attività di monitoraggio.

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.

L'analisi di geoindicatori di Temperatura e Pressione, basati sulle composizioni delle fumarole BG e BN, indicano il riscaldamento e la pressurizzazione del sistema idrotermale della Solfatara (vedi Bollettini mensili e Relazioni semestrali precedenti).

Tale processo di riscaldamento e pressurizzazione del sistema è supportato dalle misure periodiche, su punti fissi nel cratere della Solfatara (Fig. 3.1), del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura del suolo, che mostrano trend di aumento pluriennali. In particolare, i valori di flusso di CO₂ dal suolo relativi alle campagne mensili di misura (aggiornate ad agosto u.s.), mostrano un andamento caratterizzato da una periodicità annuale, rientrando in un trend di aumento pluriennale dei valori a partire dal 2006 (Fig. 3.2). Analogamente, la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, mostra un chiaro andamento stagionale sovrainposto ad un trend d'aumento della temperatura (Fig. 3.3), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 5 °C nel periodo 2002-2017. Nella mappa di Figura 3.4a 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. 3.4b).

La stazione multiparametrica FLXOV5, attiva dal dicembre 2014 e installata 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. 3.5). Tale aumento del flusso di CO₂ è da mettere in relazione all'evidente processo di fumarolizzazione che interessa l'intera area. A partire da circa metà del mese di novembre la stazione non misura più correttamente il flusso di CO₂ dal suolo, si rende quindi necessario un intervento di manutenzione.

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. 3.6) 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 3.7) e nell'aumento dei flussi misurati in continuo dalla stazione FLXOV3 (Fig 3.8).

E' stato ripristinato il sistema di misura della temperatura della stazione FLXOV3 alla fumarola di Piscarelli. Il sensore è stato riposizionato nel punto che attualmente mostra il maggiore flusso di gas e la maggiore temperatura. La temperatura registrata dalla stazione è variata da ~ 115 °C fino ad una temperatura massima di ~121 °C (Figg. 3.9, 3.10). Si precisa che essendo la fumarola un sistema naturale in continua evoluzione, con variazioni macroscopiche del sito di emissione, la temperatura registrata in continuo potrebbe non sempre coincidere con la temperatura massima.

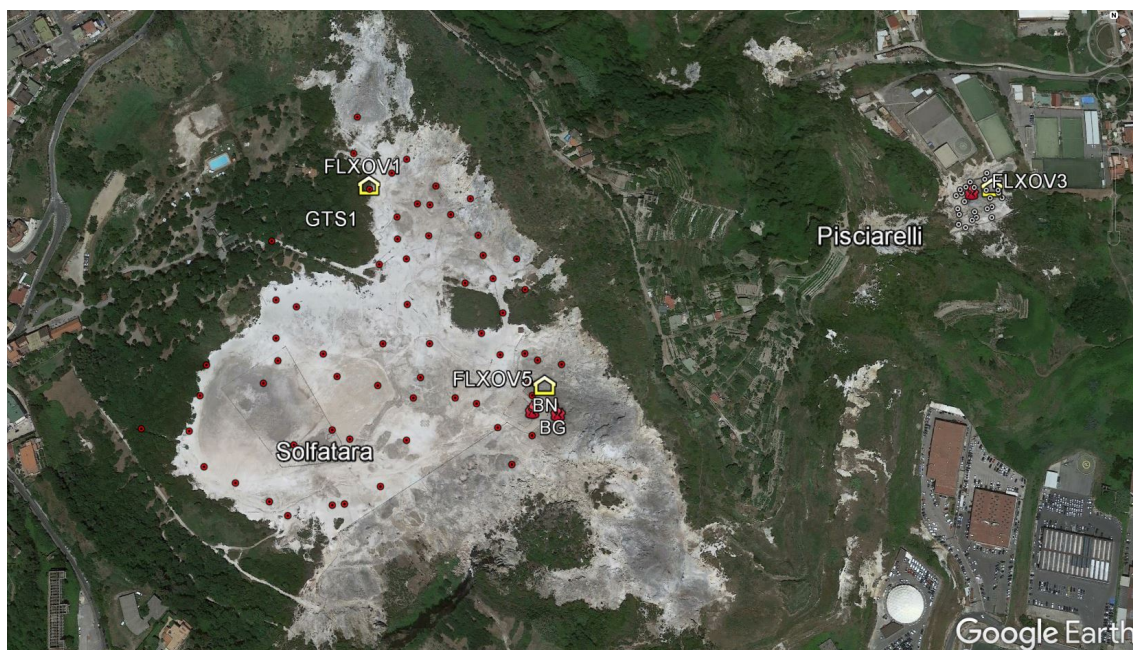


Figura 3.1 - Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. In particolare sono riportate le quattro stazioni geochimiche ubicate in area Solfatara-Pisciarelli e le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e 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).

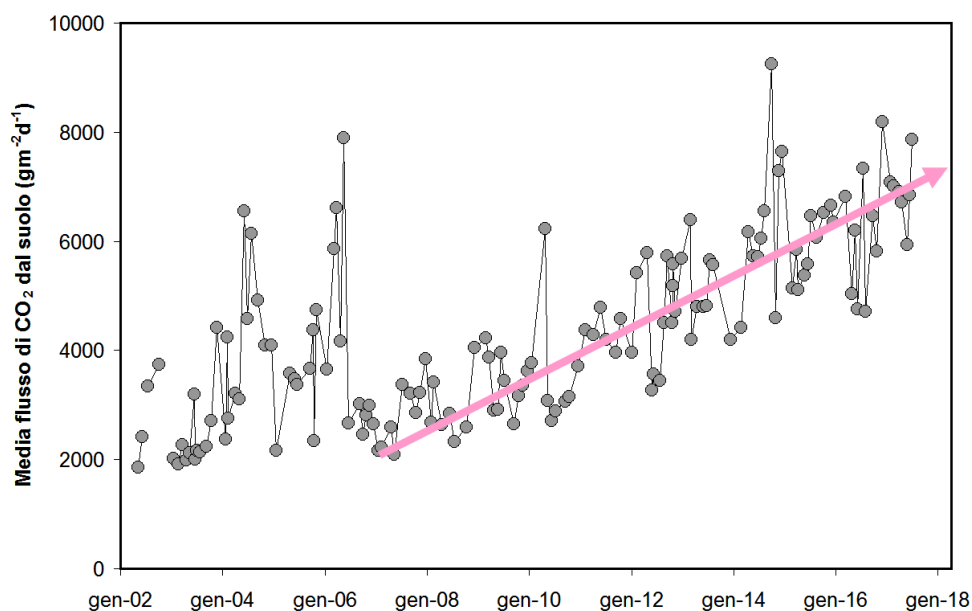


Figura 3.2 – Cronogramma della media dei flussi di CO₂ dal suolo misurati mensilmente su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. NB: dati aggiornati ad agosto 2017.

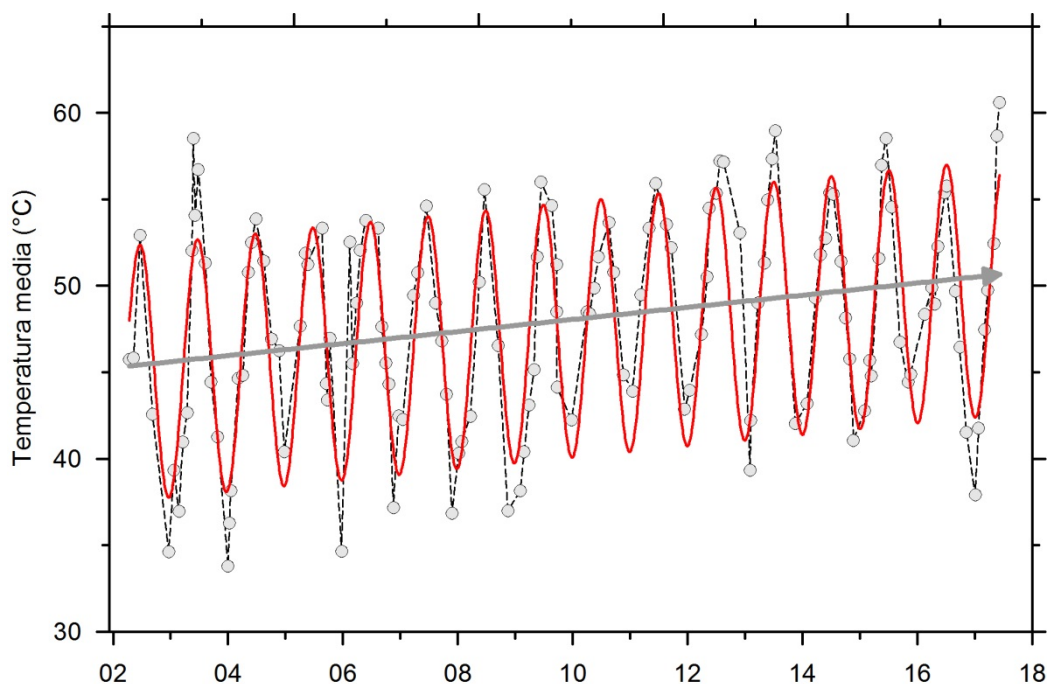


Figura 3.3 – Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. Va evidenziato l'incremento del valore medio nel periodo 2002-2017 di oltre 5 °C. NB: dati aggiornati ad agosto 2017.

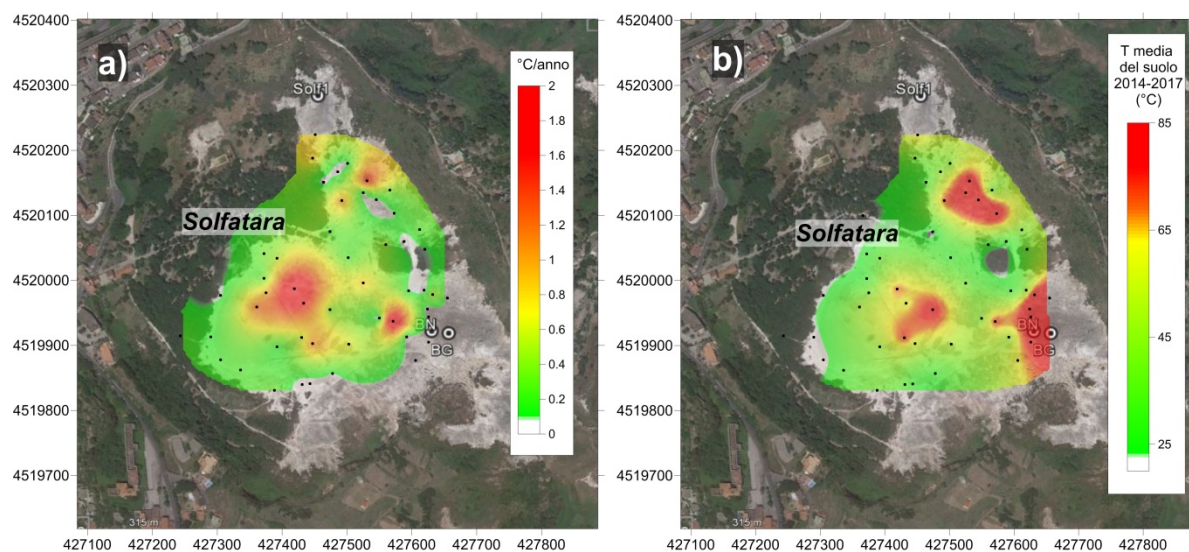


Figura 3.4 – a) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale. L'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo 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 2017).

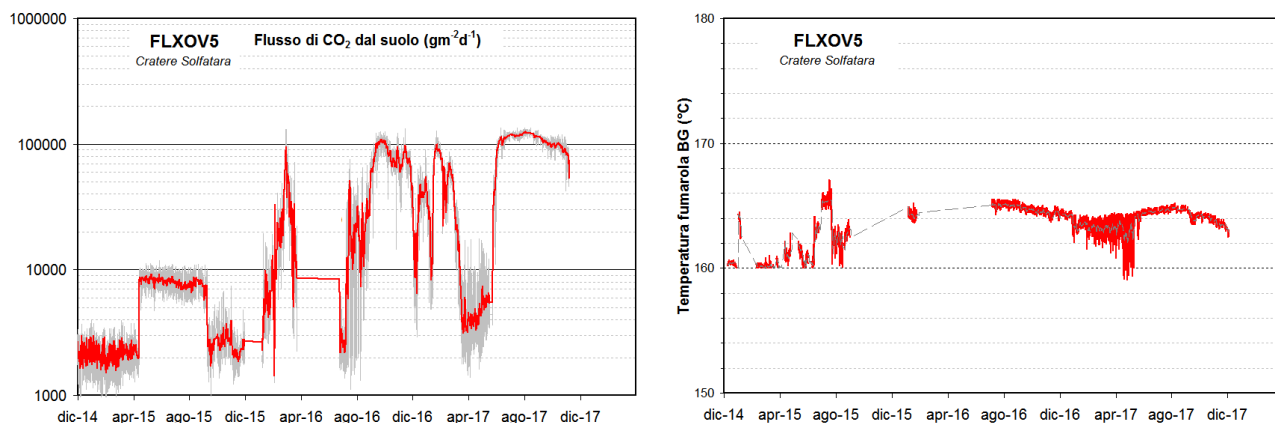


Figura 3.5 – Valori del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura della fumarola BG misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara a pochi metri dalla fumarola principale BG. I valori di flusso di CO₂ dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2015 (la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere).



Figura 3.6 - Variazioni macroscopiche dell'area di emissione di Pisciarelli dal 2005.

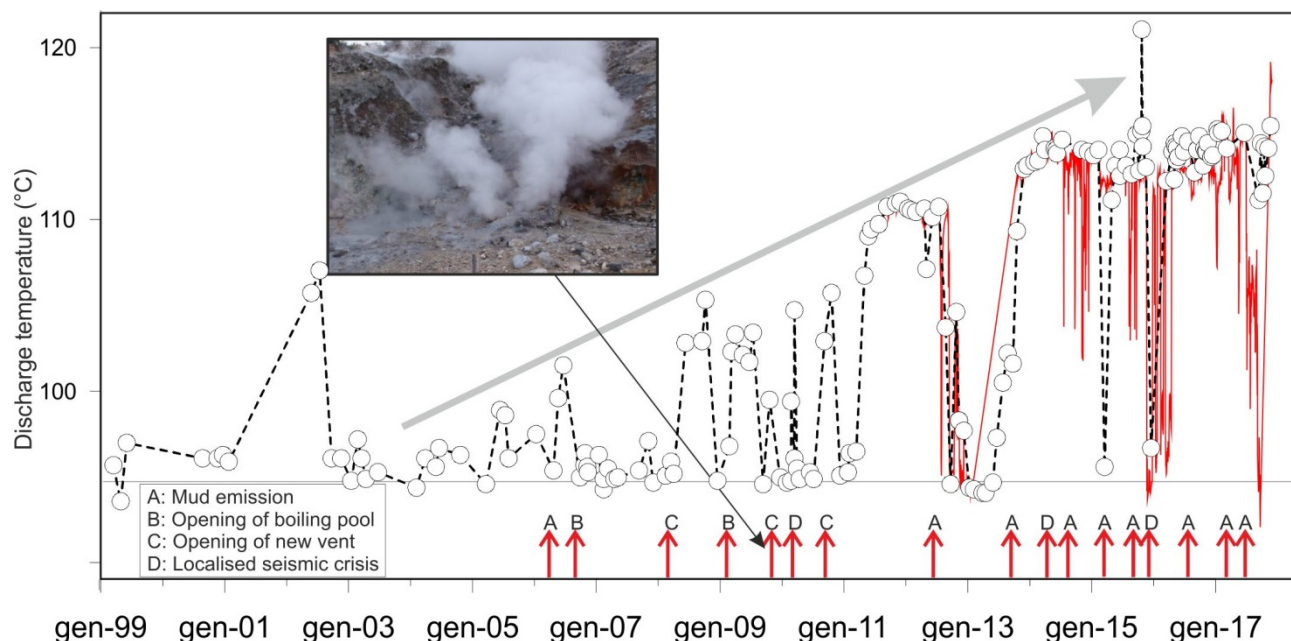


Figura 3.7 - Cronogramma delle temperature (°C) della fumarola di Pisciarelli e dei maggiori eventi occorsi legati all'aumento dell'attività idrotermale (i cerchi si riferiscono a misure discrete riferite al punto di maggior flusso dei gas, la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere delle misure 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.

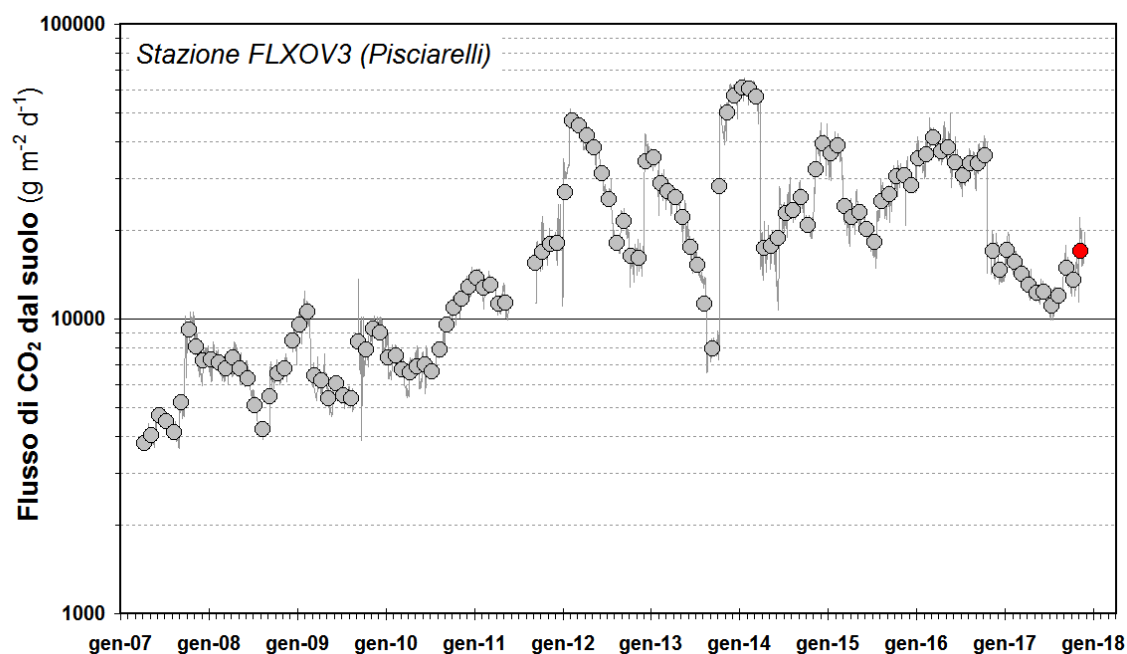


Figura 3.8 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO₂ misurati a Pisciarelli (FLXOV3). E' da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo a partire dal 2007 del flusso CO₂. La media dei flussi relativa al mese di Ottobre è riportata con il simbolo rosso. L'intervento 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.

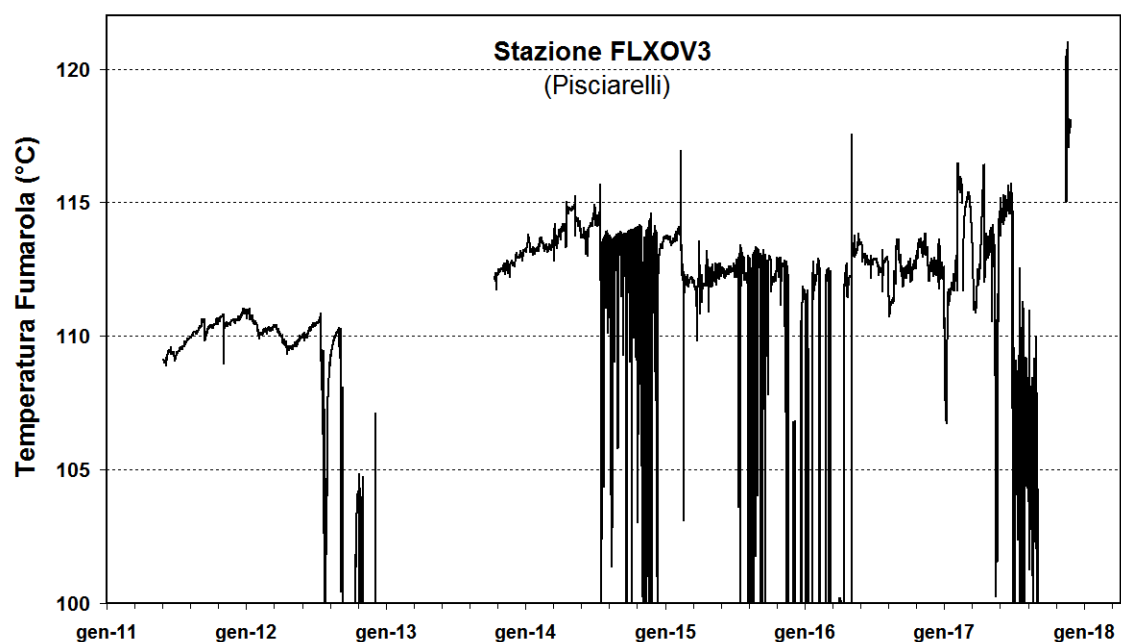


Figura 3.9 - Cronogramma delle temperature della fumarola di Pisciarelli registrate in continuo dal 2011.

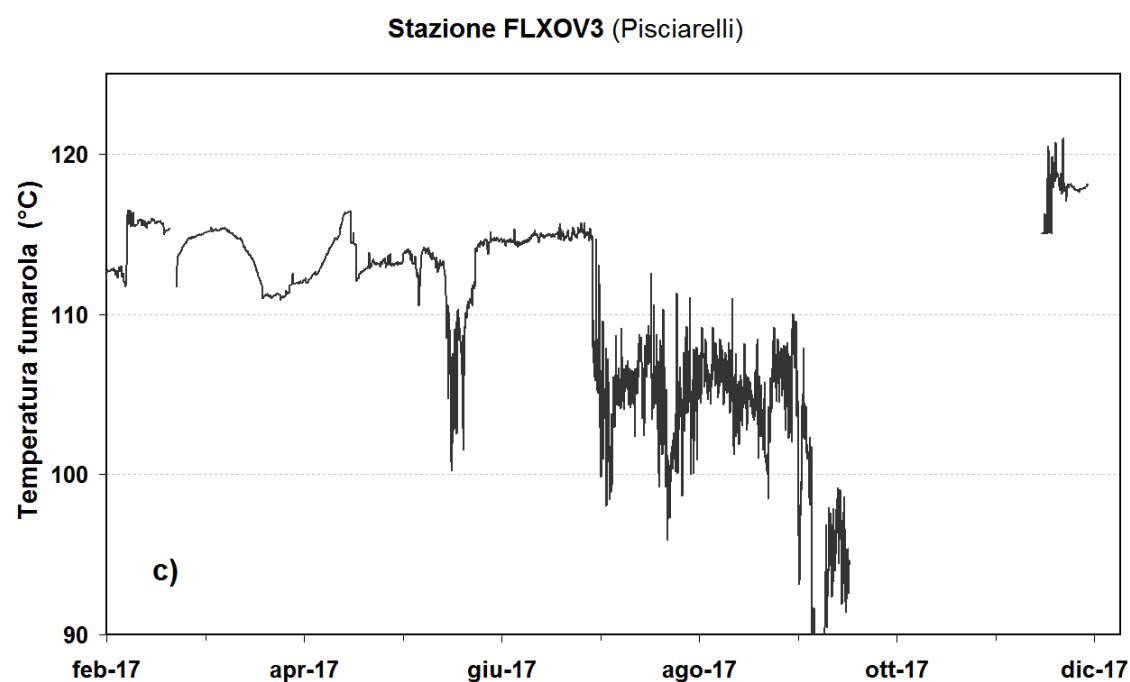


Figura 3.10 - Dettaglio da febbraio 2017 della temperatura della fumarola principale nel sito di Pisciarelli registrata in continuo dalla stazione FLXOV3.

4 - QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEL VULCANO NEL MESE DI NOVEMBRE 2017 E VALUTAZIONI

Nel corso del mese di novembre 2017 sono stati registrati 25 terremoti di bassa magnitudo ($M_{Dmax}=1.3$). Gli eventi si collocano tra l'area della Solfatara e il bordo meridionale degli Astroni.

Nello stesso periodo, 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 0.5 cm/mese. Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 23 cm a partire da gennaio 2014, di cui circa 11 cm da gennaio 2016.

L'orientazione dei vettori tilt dalla fine di settembre 2017 concorda con un uplift radiale centrato nell'area della città di Pozzuoli.

I parametri geochimici rientrano nei trend già identificati in precedenza. E' stato ripristinato il sistema di misura della temperatura alla fumarola di Pisciarelli. Il sensore è stato riposizionato nel punto che attualmente mostra il maggiore flusso di gas e la maggiore temperatura. La temperatura registrata dalla stazione ha raggiunto un valore massimo di $\sim 121^\circ\text{C}$.

Nella Figura 4.1 sono rappresentati i parametri di monitoraggio più indicativi in un confronto temporale a breve e medio termine.

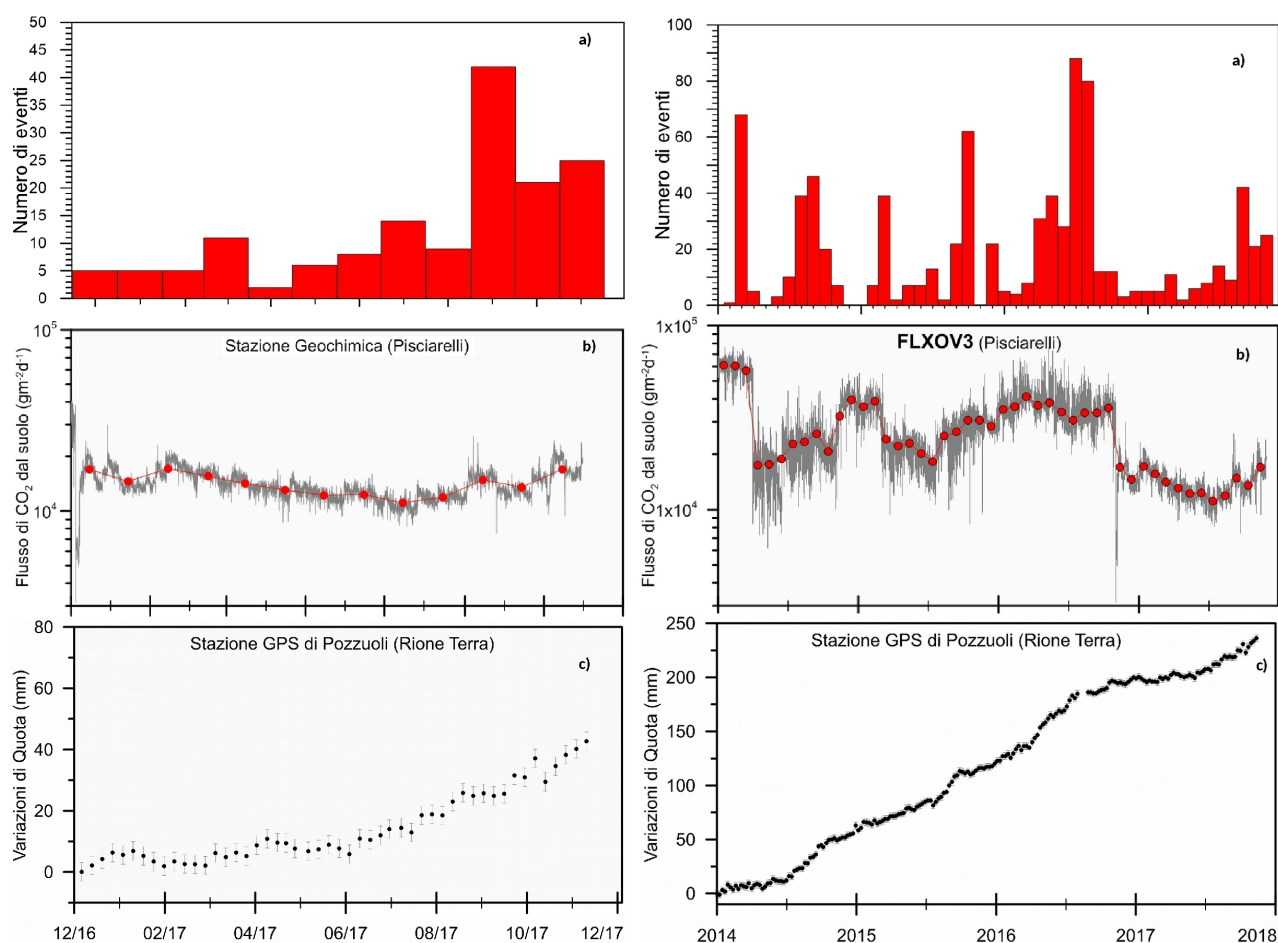


Figura 4.1 – Frequenza di accadimento degli eventi sismici (a), variazioni del flusso di CO₂ alla stazione FLXOV3 di Pisciarelli (b) e andamento delle deformazioni del suolo alla stazione GPS di RITE negli ultimi dodici mesi (a sinistra) e dal 2014 (a destra).

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

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.