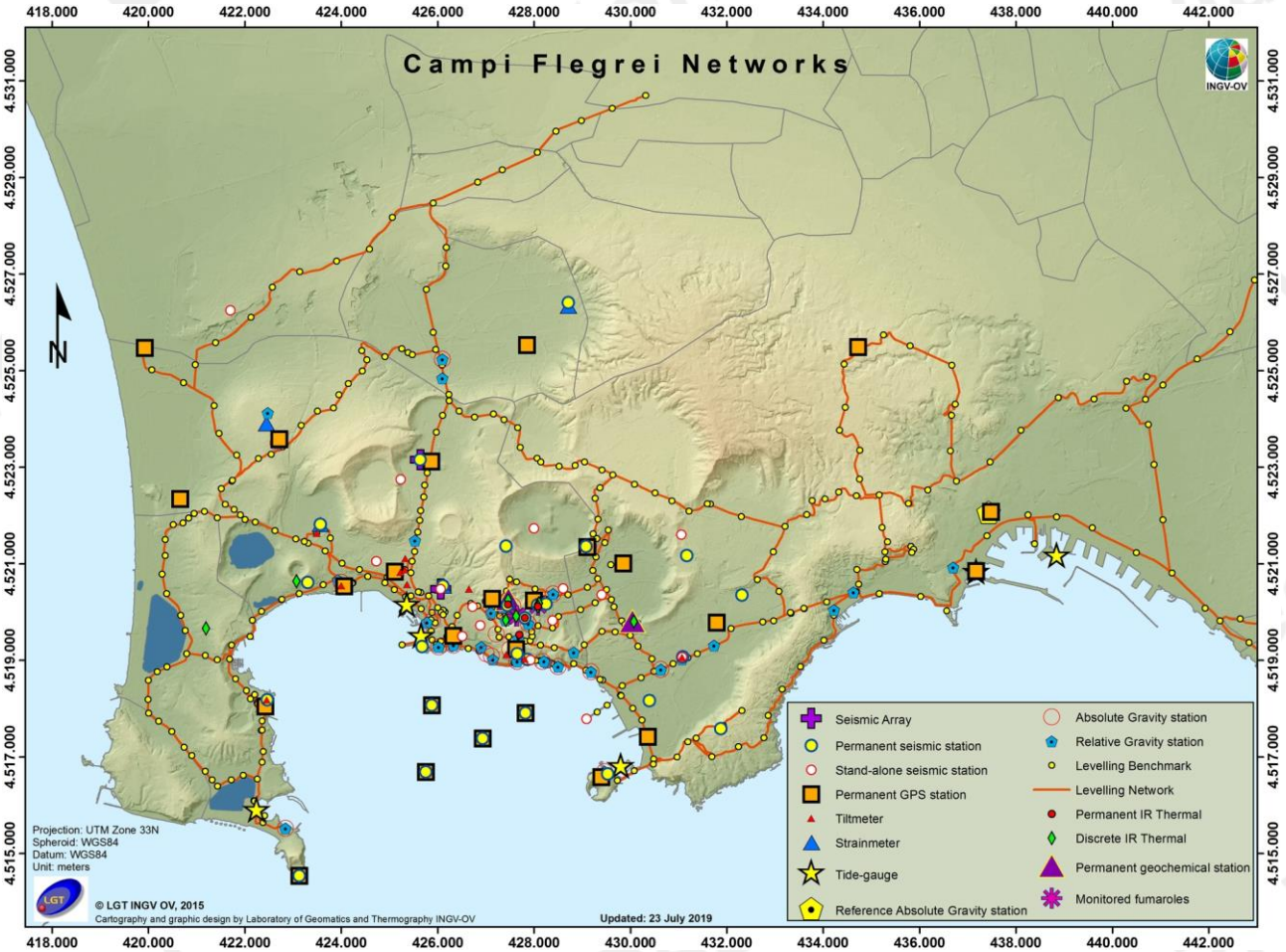
ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

Bollettino di Sorveglianza

CAMPI FLEGREI

OTTOBRE 2019



SEZIONE DI NAPOLI
OSSERVATORIO
VESUVIANO

Via Diocleziano, 328 | 80124 Napoli | Italia | tel. +39.0816108483 | fax +39.0816100811
www.ov.ingv.it | aoo.napoli@pec.ingv.it | www.ingv.it

1. SISMOLOGIA

La Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei è mostrata in Figura 1.1.

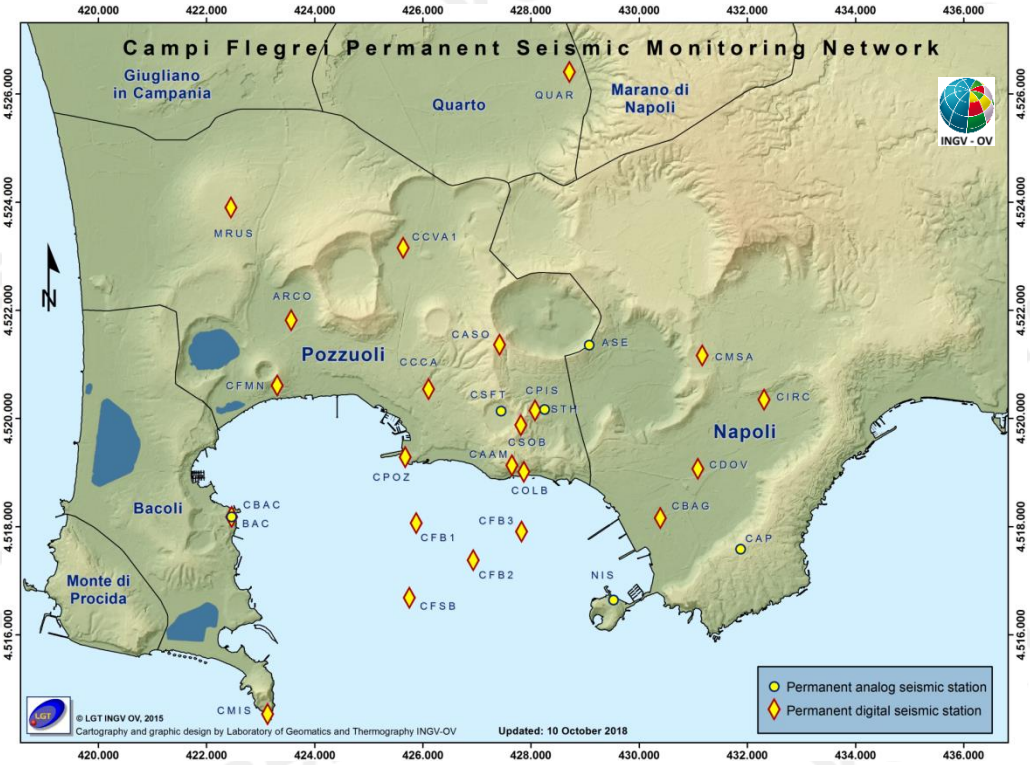


Figura 1.1 *- Mappa della Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.*

Nel corso del mese di ottobre 2019, ai Campi Flegrei, sono stati registrati 83 terremoti (M_{dmax}=2.5; evento del 05/10 alle ore 05:08 UTC) (Fig. 1.2).

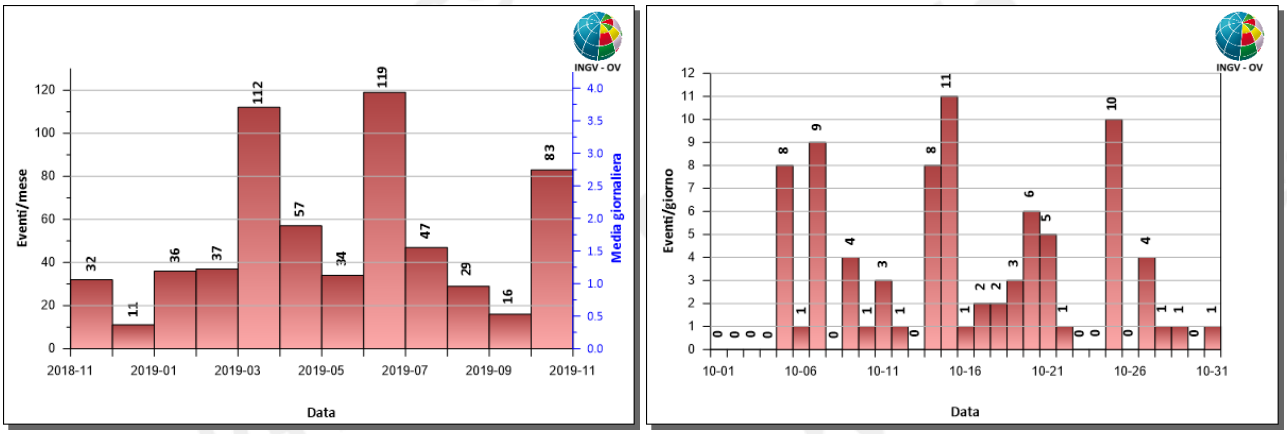


Figura 1.2 *- A sinistra numero di eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in totale 613), mentre a destra quelli avvenuti nell'ultimo mese (in totale 83).*

E' stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 54 degli eventi registrati, le localizzazioni sono mostrate in Fig. 1.3.

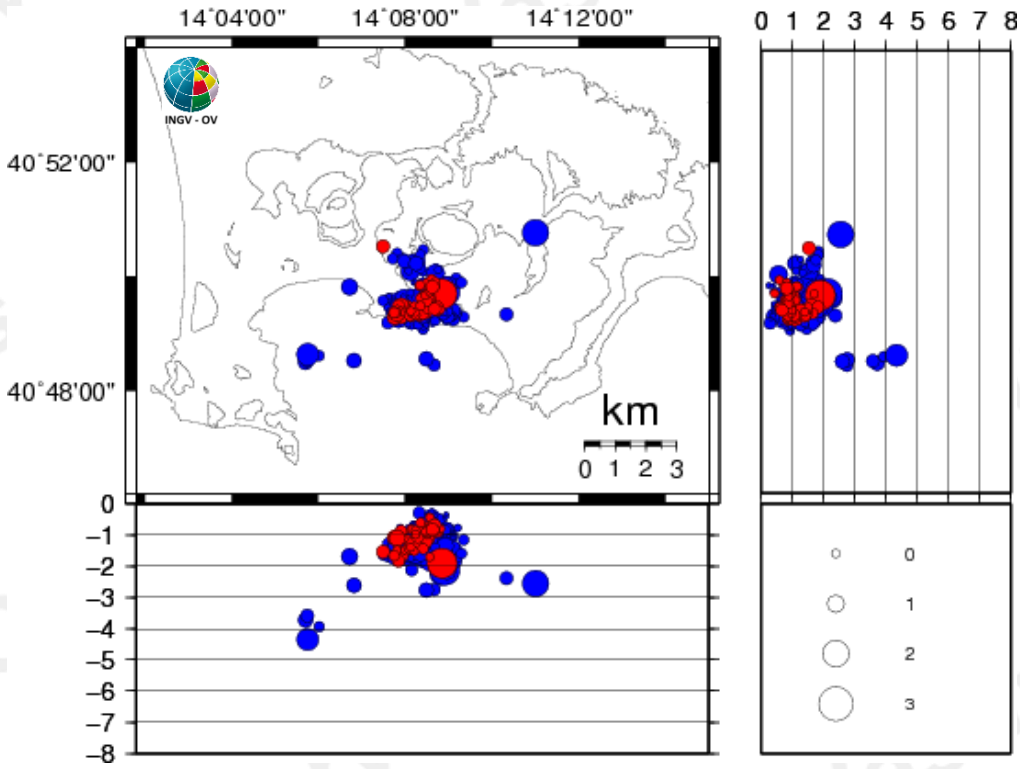


Figura 1.3 *- Localizzazioni ipocentrali ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in blu) e dell'ultimo mese (in rosso). La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo, come indicato nel riquadro in basso.*

Tra le ore 20:34 e 20:37 UTC del 25/10 è stato registrato un breve sciame sismico consistito in una sequenza di 10 terremoti con $-1.1 \leq M_d \leq 0.2$ localizzati nell'area della Solfatara a profondità di poco inferiori a 1 km.
Non si evidenziano trend significativi negli altri parametri sismologici (Figg. 1.2-1.6).

In Tabella 1.1 è rappresentato il numero di eventi registrati divisi per classi di magnitudo e le relative percentuali.

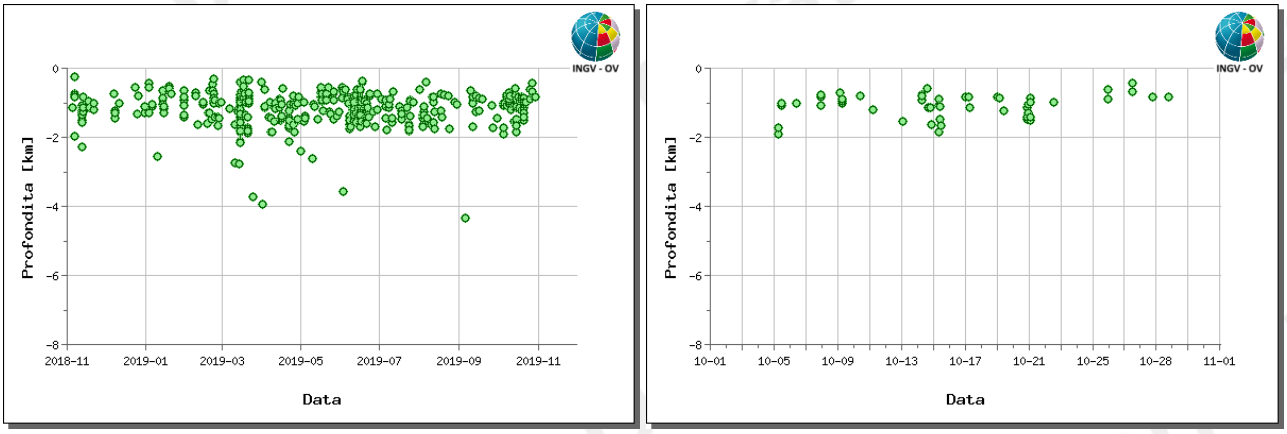


Figura 1.4 *- Profondità ipocentrali degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).*

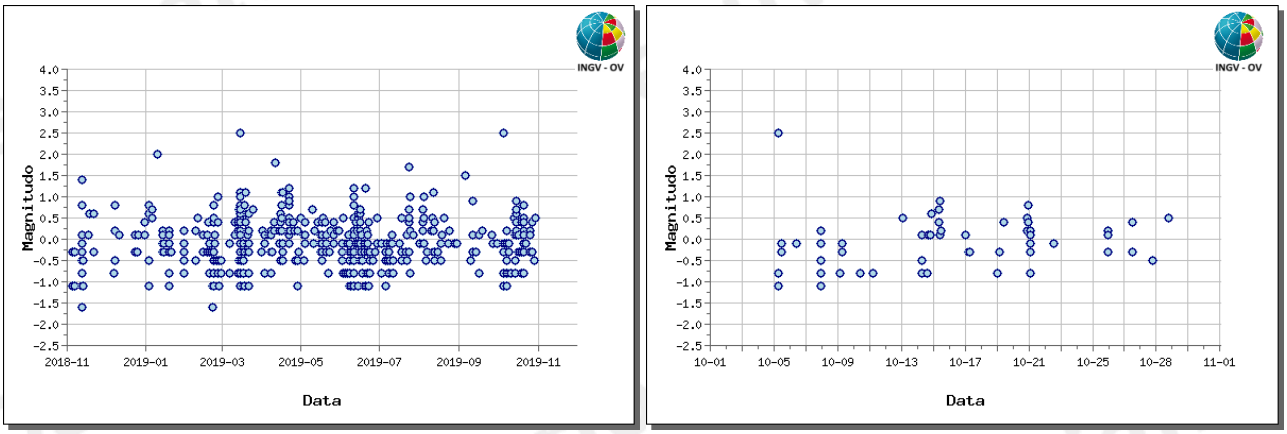


Figura 1.5 *- Magnitudo degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).*

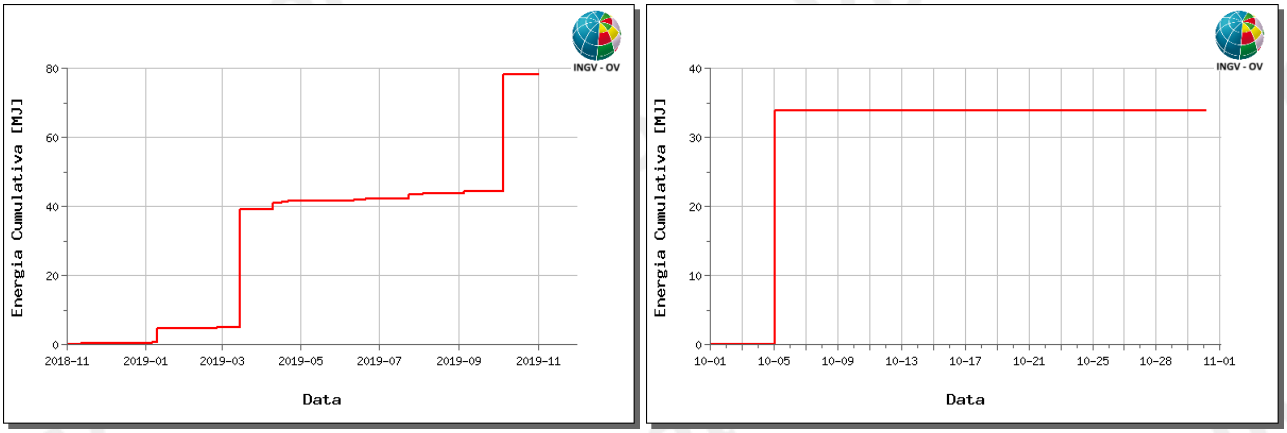


Figura 1.6 *- Rilascio cumulativo di energia sismica ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).*

Tabella 1.1 *– Riepilogo mensile della sismicità registrata ai Campi Flegrei divisa per classi di magnitudo e relativa percentuale.*

Numero totale terremoti: 83		**M_{dmax}=2.5**
Numero terremoti con **Md < 0.0**	45	(54.22%)
Numero terremoti con **0.0 ≤Md< 1.0**	26	(31.32%)
Numero terremoti con **1.0 ≤Md< 1.5**	0	
Numero terremoti con **1.5 ≤Md< 2.0**	0	
Numero terremoti con **2.0 ≤Md≤ 2.5**	1	(1.20%)
Numero terremoti con **Md N.D.**	11	(13.25%)

L'analisi del meccanismo focale dell'evento più energetico del mese di ottobre 2019 (Tab. 1.2) mostra una soluzione associabile ad un meccanismo di tipo normale con componente obliqua (Fig. 1.7).

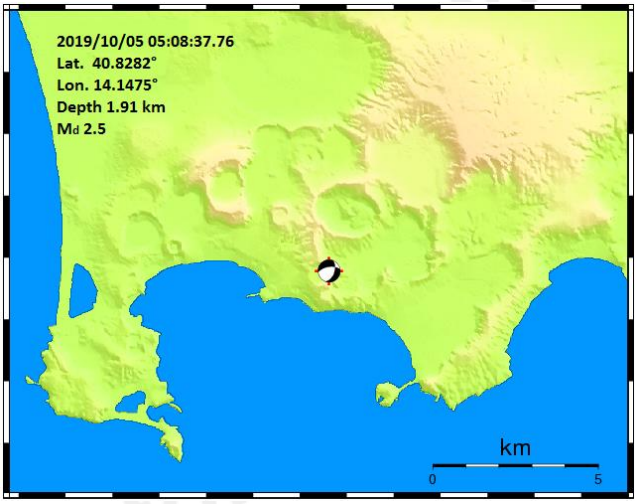


Figura 1.7 *– Localizzazione e meccanismo focale dell'evento del 05/10 alle 05:08 UTC.*

Tabella 1.2 *– Parametri ipocentrali dei terremoti di magnitudo ≥ 1.5 registrati ai Campi Flegrei nel mese di ottobre 2019.*

Data UTC	Md	Lat. N	Long E	Prof. (km)
2019/10/05 05:08:37.76	2.5	40.8282	14.1475	1.91

In figura 1.8 sono rappresentati gli andamenti dei principali parametri sismologici a partire dal 2005.

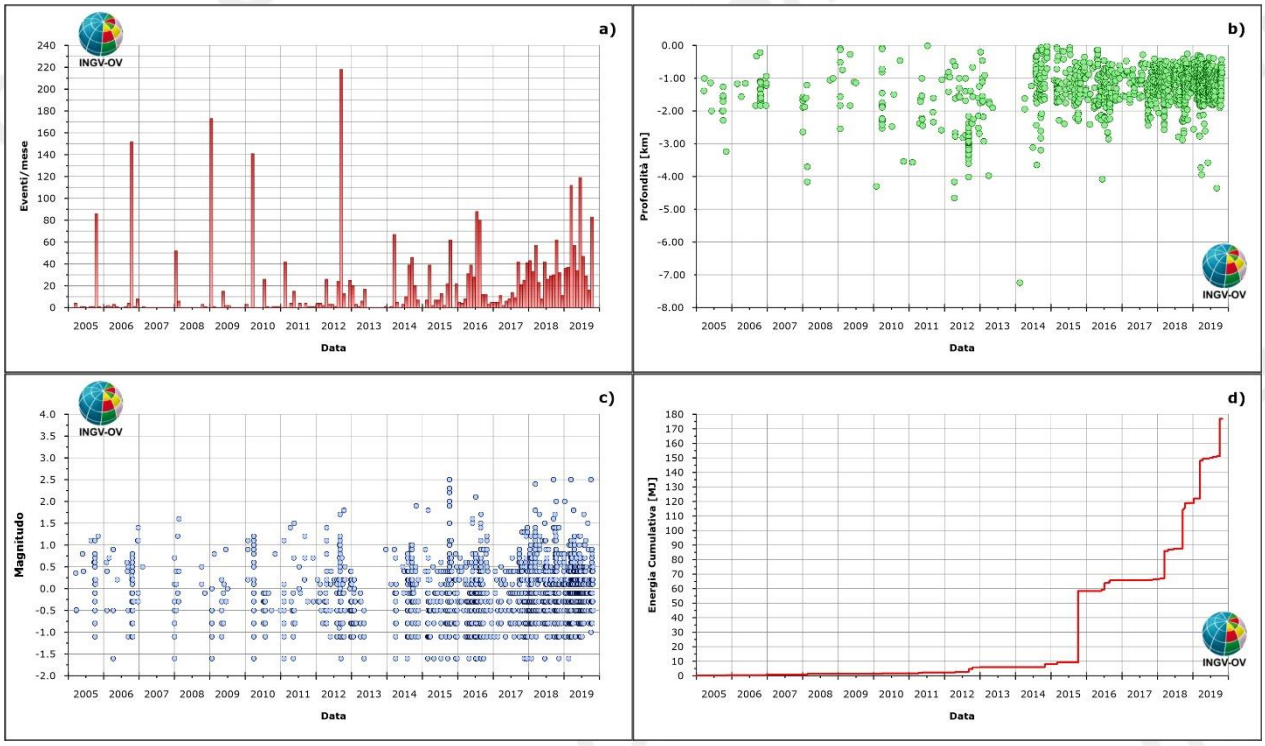


Figura 1.7 *- Andamento dei principali parametri sismologici a partire dal 2005: a) frequenza di accadimento; b) profondità ipocentrali; c) magnitudo; d) energia cumulativa.*

2. DEFORMAZIONI DEL SUOLO

2.1 GPS

I dati GPS confermano il valore medio di sollevamento nell'area di massima deformazione di circa 0.7 cm/mese a partire da luglio 2017.

Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE (Fig. 2.1.1) è di circa 62 cm a partire da novembre 2005, inizio dell'attuale fase di unrest (Fig. 2.1.2). Da gennaio 2016 ad oggi il sollevamento nell'area di massima deformazione è di circa 28 cm (Fig. 2.1.3).

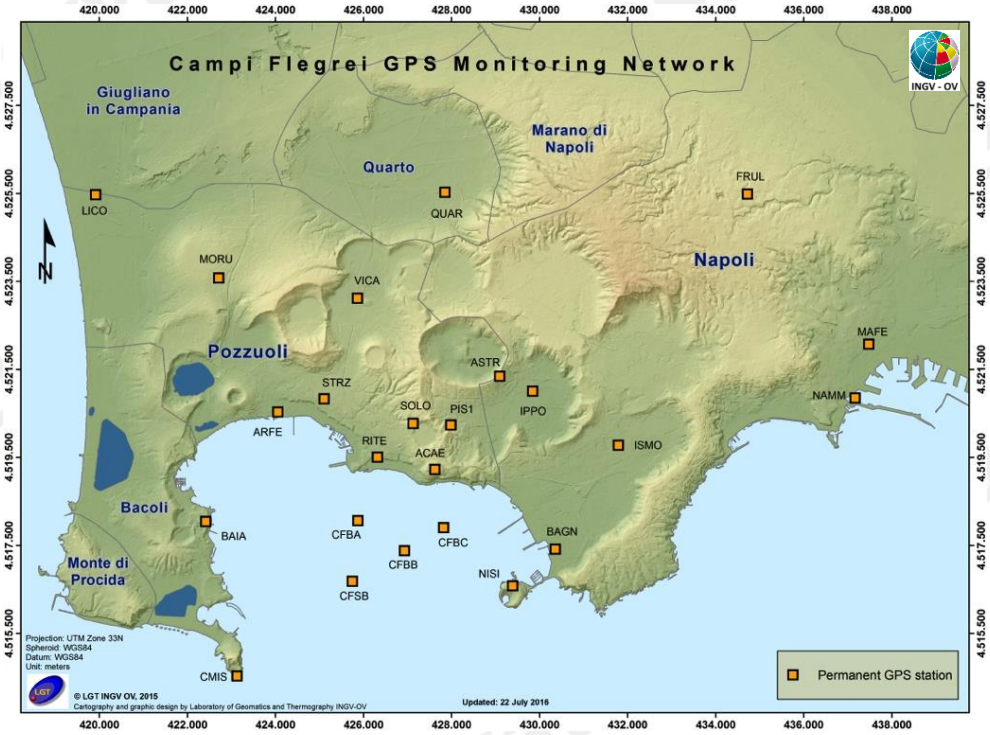


Figura 2.1.1 *- Rete GPS Permanente dei Campi Flegrei.*

Figura 2.1.2 *- Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di RITE (Pozzuoli – Rione Terra) dal 2000 a ottobre 2019.*

La figura 2.1.3 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.

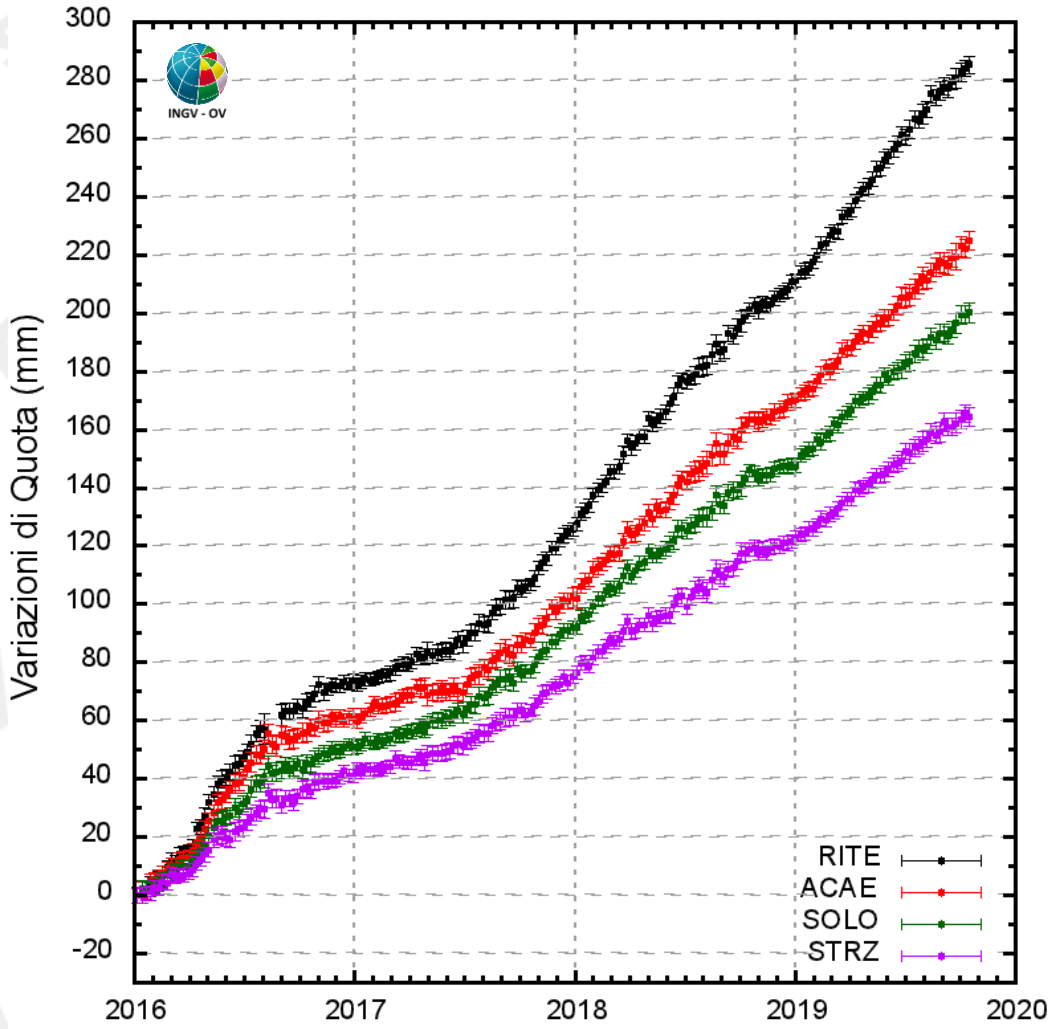


Figura 2.1.3 *- Serie temporale delle variazioni in quota della stazione di RITE (Pozzuoli - Rione Terra), ACAE (Accademia Aeronautica), SOLO (Solfatara) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) da gennaio 2016 a ottobre 2019.*

In Figura 2.1.4 è riportata la mappa dei vettori degli spostamenti orizzontali registrati alle stazioni CGPS ai Campi Flegrei dal 2016.
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.

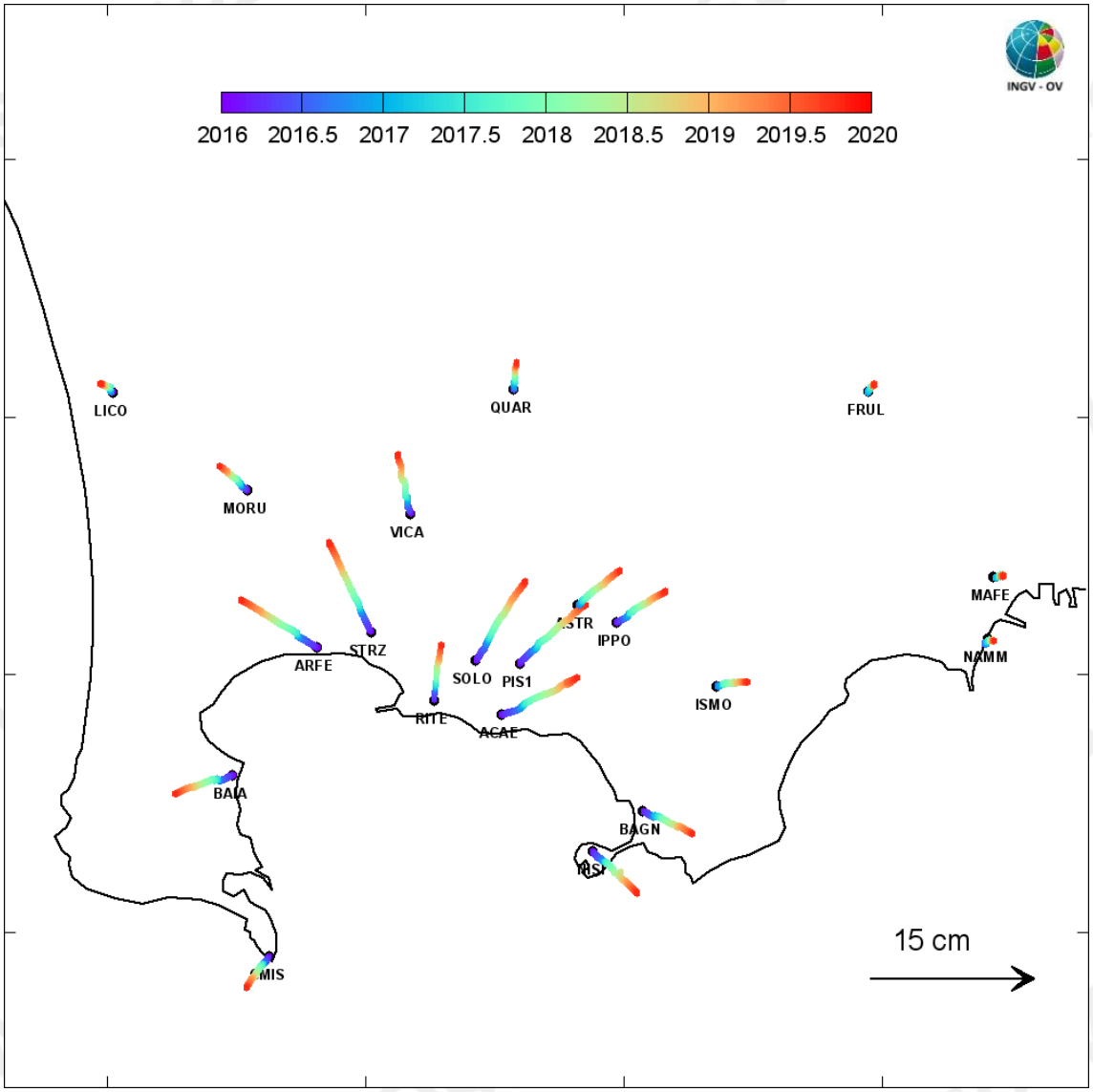


Figura 2.1.4 *- Mappa degli spostamenti GPS orizzontali registrati nell'area flegrea da gennaio 2016 a ottobre 2019.*

2.2 Tiltmetria

La Rete di Monitoraggio delle inclinazioni del suolo dei Campi Flegrei consiste di 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. 2.2.1).

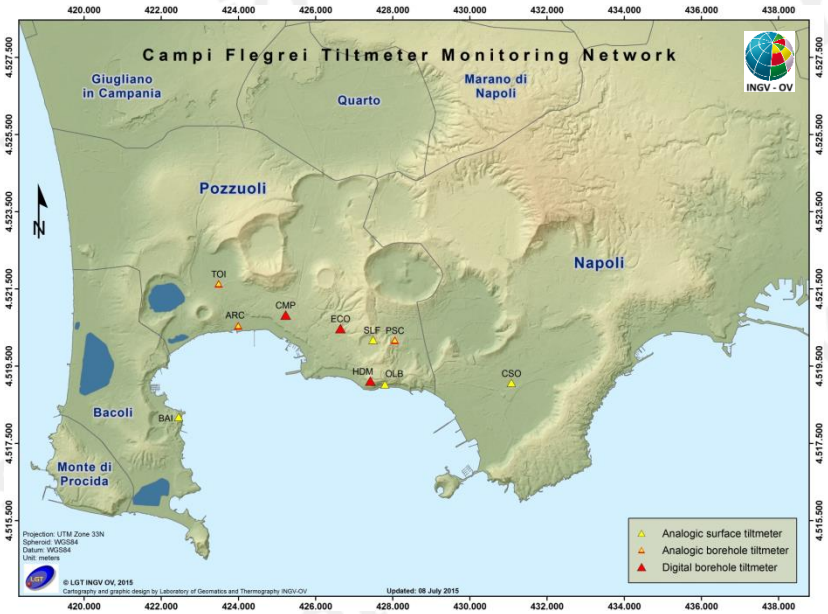


Figura 2.2.1 *– Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.*

La variazione tiltmetrica osservata ai Campi Flegrei nei primi 10 mesi del 2019 mostra un pattern che tende a conformarsi con il campo di deformazione generato dalla fase di uplift che interessa Pozzuoli. (Fig. 2.2.2).

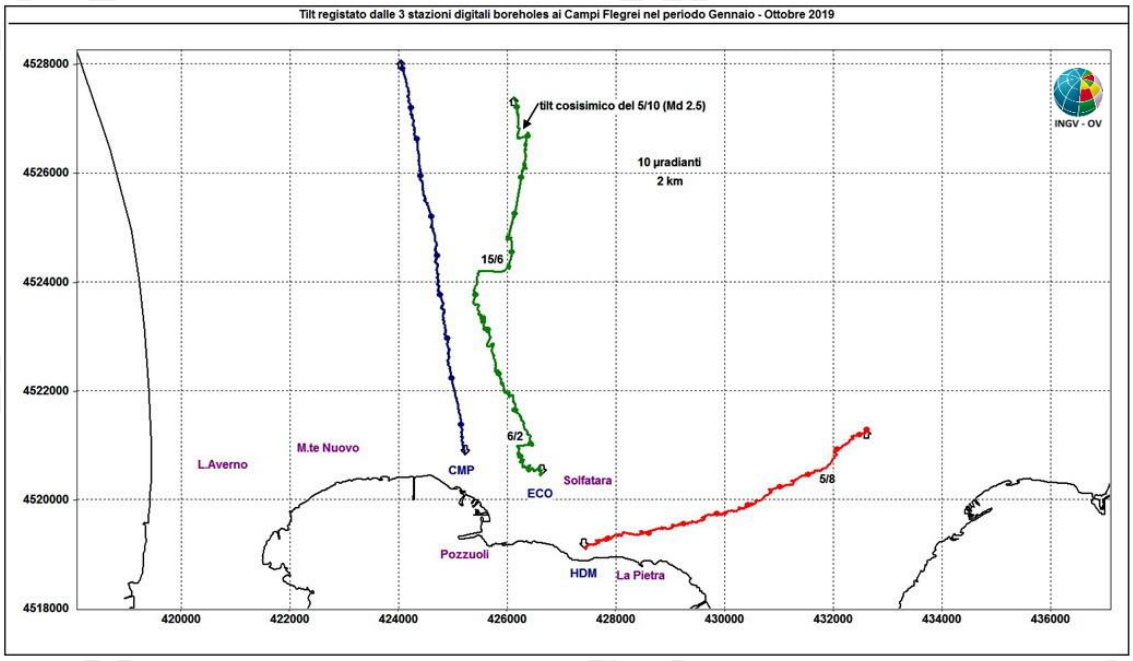


Figura 2.2.2 *- Pattern tiltmetrico osservato ai Campi Flegrei. Per comodità di rappresentazione grafica e per una interpretazione più agevole, sono state selezionate in tale figura solo le 3 stazioni "borehole" con sensori ubicati a 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 10 µradianti o 2 km. In corrispondenza dell'evento sismico del 5 ottobre (Md = 2.5) si osserva un tilt cosismico permanente di poco inferiore ad 1 µradiante.*

La deformazione relativa a 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 d'inclinazione del suolo, la direzione di tilting e la variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (≈ -25 m dal p.c.) nei primi 10 mesi del 2019.

Sito	Inclinazione e direzione	Temperatura
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	34.7 µradianti a N	0.08 °C
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	36.7 µradianti a NNW	0.00 °C
Stazione HDM (112 m s.l.m.)	28.2 µradianti a ENE	0.00 °C

In Figura 2.2.3 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 2018; poiché, inoltre, i segnali acquisiti rappresentano la variazione di tilt, sono stati tutti azzerati a partire da quella data.
Componenti NS del tilt: le 3 stazioni mostrano un trend di inclinazione verso N e quindi un sollevamento del suolo a S delle stesse.
Componenti EW del tilt:
HDM si inclina verso E;
CMP si inclina verso W;
ECO riprende ad inclinarsi molto lentamente ad W dal 16 Ottobre.

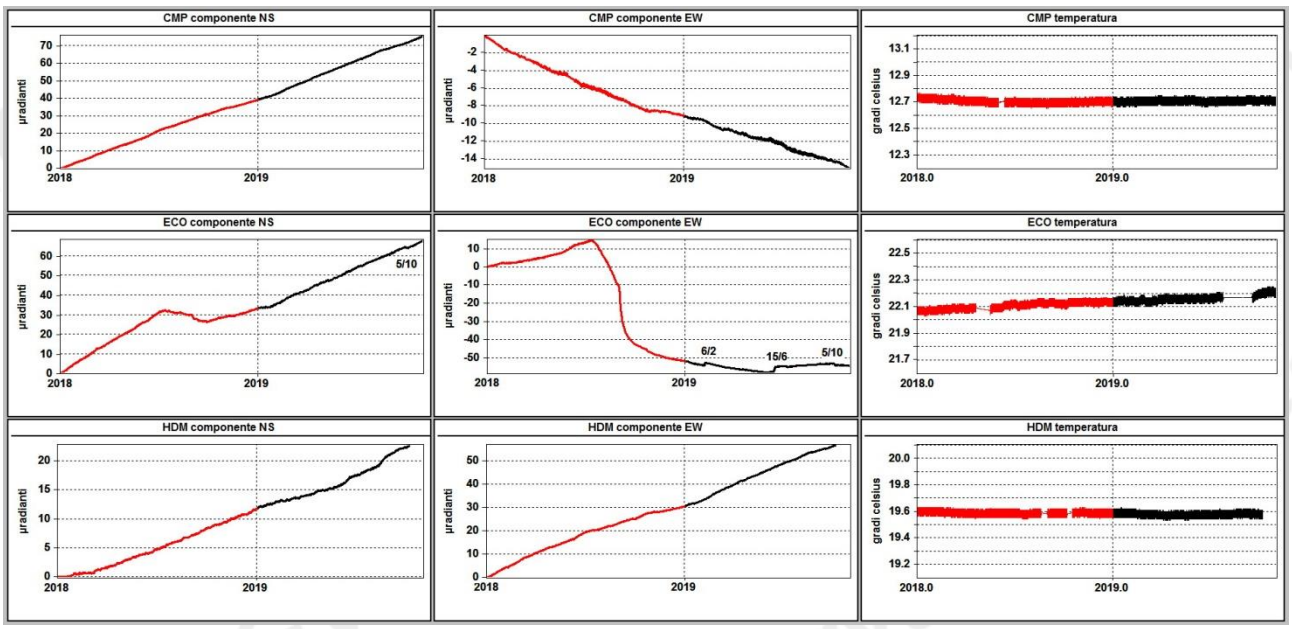


Figura 2.2.3 *– Serie temporali dei segnali registrati a partire dal 2018 dalle 3 stazioni "borehole" della rete flegrea ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in µradianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente 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 2018 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel 2019. Sulla componente EW di ECO sono indicati i 2 stretching verso E avvenuti il 6 febbraio ed il 15 giugno nonché il tilt cosismico verso W del 5 ottobre.*

2.3 Mareometria

La Rete Mareografica dei Campi Flegrei è riportata in Figura 2.3.1.

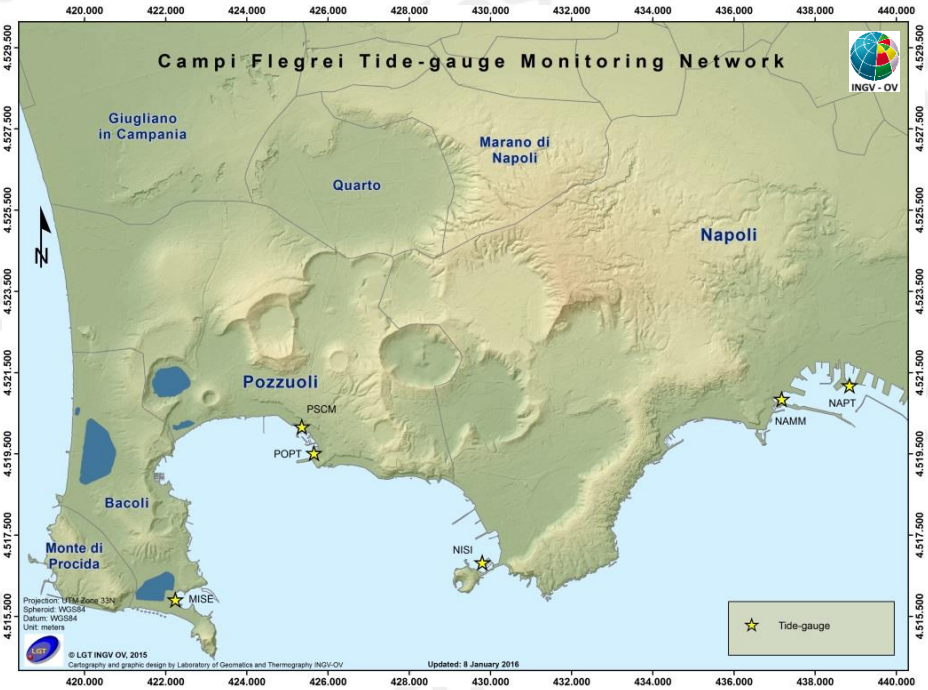


Figura 2.3.1 *- Rete Mareografica dei Campi Flegrei.*

I dati mareografici relativi alla stazione di Pozzuoli Porto nel periodo gennaio 2014 – ottobre 2019 mostrano l'andamento di Figura 2.3.2a, dal quale si evince un sollevamento di circa 38 cm pari ad una velocità media mensile di circa 5.4 mm. Da gennaio 2016 a ottobre 2019 si ha un contributo di circa 27 cm di sollevamento (Figura 2.3.2b).

Il picco visibile verso la fine del mese di luglio 2016 è stato determinato dal malfunzionamento temporaneo del sensore della stazione di riferimento NAMM, mentre quello visibile a fine settembre 2018 è determinato da particolari condizioni meteorologiche.

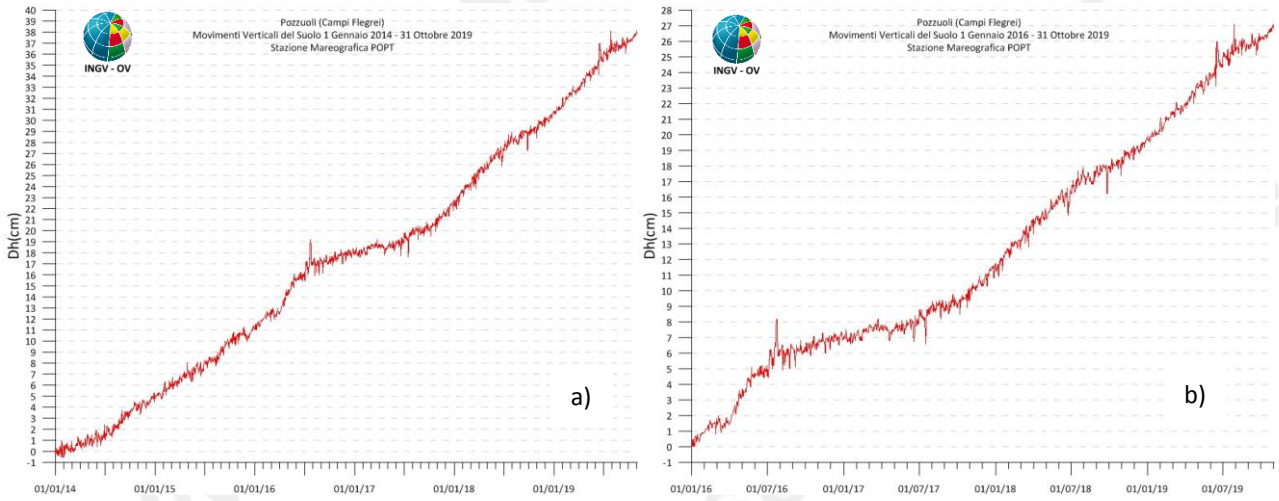


Figura 2.3.2 *- Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2014 – ottobre 2019 (a) e gennaio 2016 – ottobre 2019 (b), ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate 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 2.3.3), sono stati raccordati con i dati riferiti alla ex stazione NAPT (dismessa a febbraio 2016), potendoli considerare omogenei all'interno degli errori di misura.
Dal 2006 a oggi si registra un sollevamento di circa 57 cm alla stazione di Pozzuoli Porto.

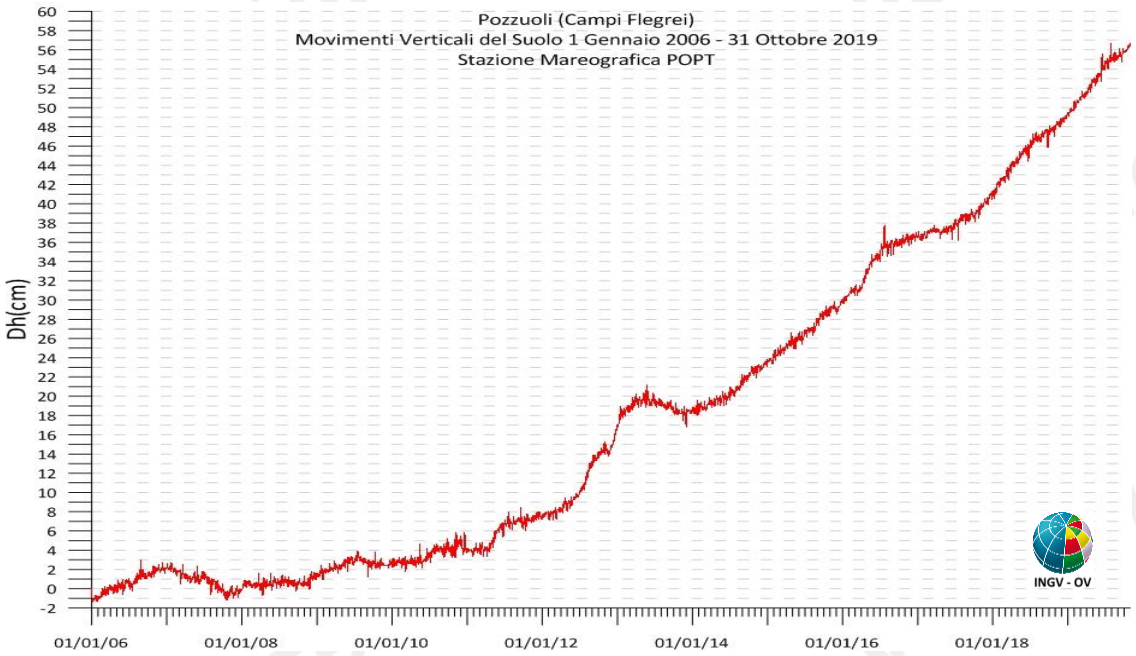


Figura 2.3.3 *- Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2006 – ottobre 2019, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli molo S.Vincenzo (NAMM).*

2.4 Gravimetria

Nel corso del mese di ottobre 2019 è stata effettuata una campagna di misure gravimetriche assolute.
I dati rilevati, ancora in fase di ulteriori controlli, sono stati messi a confronto con quelli dell'ultima campagna di misure assolute effettuata sull'intera rete (10/2018), considerando le stazioni comuni ai due rilievi.
I risultati preliminari evidenziano che nel periodo 10/2018-10/2019 l'area flegrea è stata in generale interessata da variazioni di gravità non rilevanti (Figura 2.4.1). Aumenti di g statisticamente significativi, compresi tra i 20 e i 30 µGal, si osservano solo ad Arco Felice e nel settore centro-orientale della caldera, ai vertici di Pisciarelli, Agnano ed Astroni (aree indicate in figura con il simbolo +). Esclusivamente alla stazione di Pisciarelli Tennis Hotel è stato misurato un aumento di gravità di 60 µGal che recupera la diminuzione di g osservata negli anni precedenti.

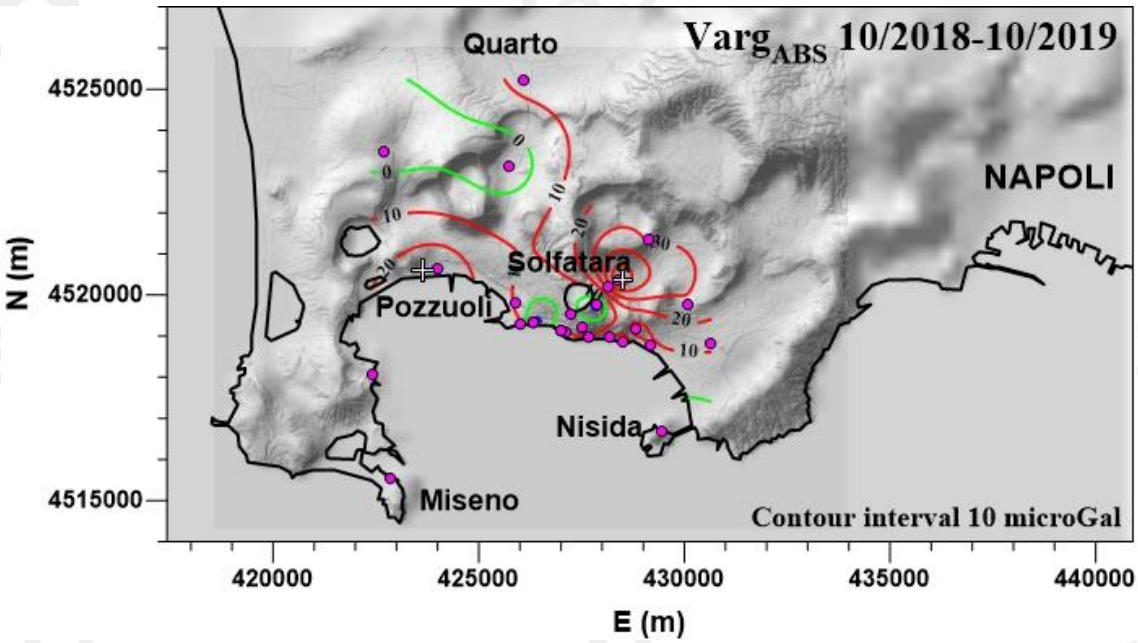


Figura 2.4.1 *- Campo delle variazioni di gravità ottenute da misure assolute sull'intervallo di tempo ottobre 2018 – ottobre 2019. Il campo è tracciato con equidistanza di 10 µGal. Le curve in colore rosso e verde indicano le variazioni positive e nulle. I punti pieni magenta rappresentano i siti di misura.*

3. MONITORAGGIO TERMICO AD IMMAGINE

3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine

La stazione SF2 della Rete Permanente di Monitoraggio Termico (TIRNet) 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. 3.1.1; Silvestri et al., 2017; Vilardo et al., 2015).

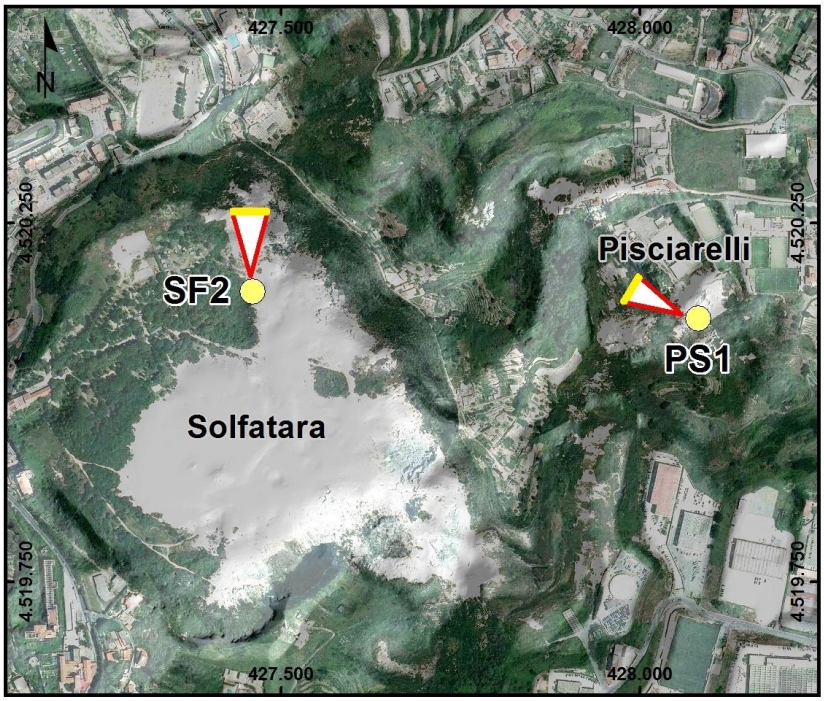


Figura 3.1.1 *- Stazione SF2 e PS1. Punto giallo: posizione della stazione; base del triangolo: area campionata.*

Le figure 3.1.2 e 3.1.3 mostrano l'elaborazione delle rispettive serie temporali dei valori di temperatura massima delle immagini IR processati mediante l'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition).
La serie temporale delle temperature massime rilevate dalla stazione SF2 è caratterizzata dalla presenza di oscillazioni di varia ampiezza e periodo (Fig. 3.1.2). Dall'inizio del 2015 si osserva un trend in lieve e costante diminuzione. Dopo aver raggiunto nel mese di febbraio 2018 il valore minimo degli ultimi 5 anni, le temperature massime hanno mostrato un trend in sensibile aumento nei mesi di marzo e di aprile 2018. Da luglio 2018 a tutto ottobre 2019 si osserva un andamento dei valori di temperatura stazionario.

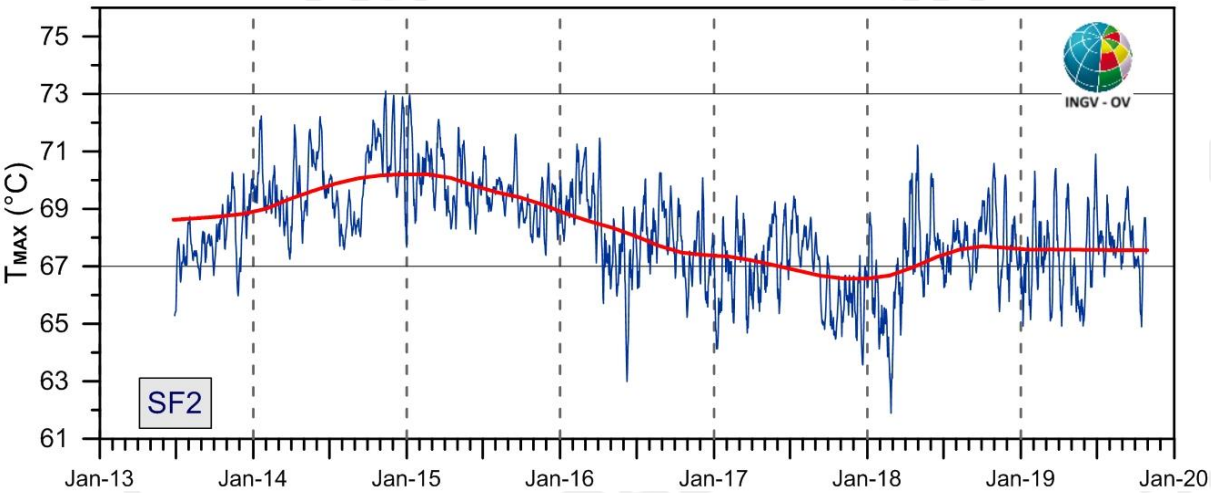


Figura 3.1.2 *- Stazione SF2. Serie temporali delle medie settimanali (blu) e del trend a lungo termine (rosso) dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.*

Così come osservato per la stazione SF2 (Fig. 3.1.2), la serie temporale delle temperature massime rilevate dalla stazione PS1 è caratterizzata dalla presenza di oscillazioni di varia ampiezza e periodo (Fig. 3.1.3). L'andamento delle temperature alla stazione PS1 (Fig. 3.1.3), dopo una costante diminuzione registrata nel 2017 fino al raggiungimento dei valori tra i più bassi degli ultimi 5 anni, ha presentato un significativo aumento nei mesi da gennaio ad aprile 2018. Dall'inizio del mese di luglio 2018 a tutto ottobre 2019 si osserva un andamento dei valori di temperatura sostanzialmente stabile.

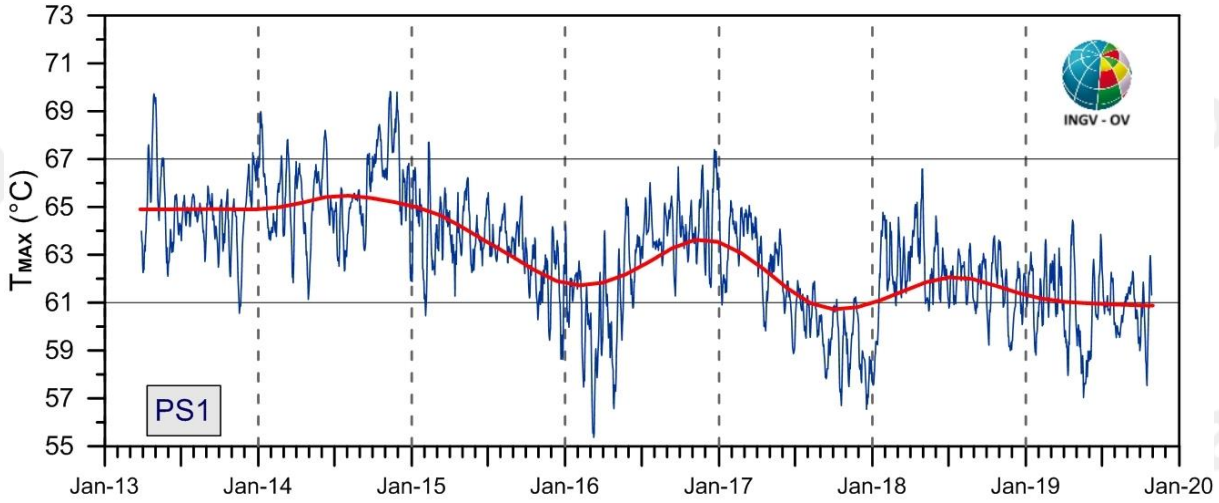


Figura 3.1.3 *- Stazione PS1. Serie temporali delle medie settimanali (blu) e del trend a lungo termine (rosso) dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzate mediante applicazione dell'algoritmo STL.*

In Figura 3.1.4 è mostrato il trend a lungo termine (ottobre 2007 - ottobre 2019) delle variazioni delle temperature massime superficiali rilevate dalla stazione PS1 ottenuto mediante applicazione dell'algoritmo STL.

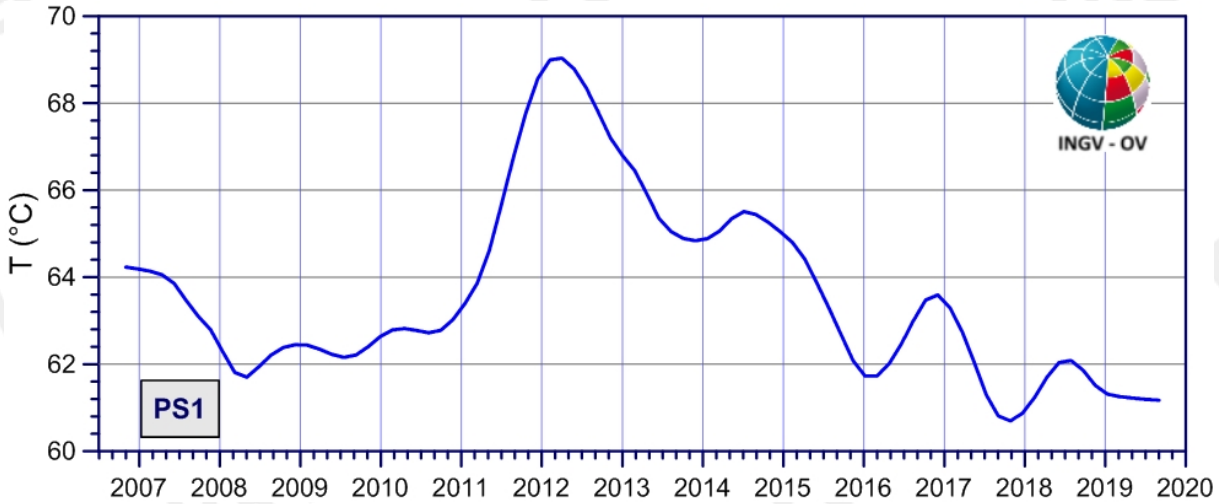


Figura 3.1.4 *- Stazione PS1: Stazione Pisciarelli. Trend a lungo termine dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR ottenuto mediante applicazione dell'algoritmo STL.*

La Figura 3.1.4 evidenzia, dopo il raggiungimento del picco massimo dei valori di temperatura nella prima metà del 2012, il verificarsi di un trend in costante diminuzione, seppure in presenza di ampie oscillazioni a lungo periodo. I valori minimi si sono osservati nella seconda metà del 2017. A partire dagli ultimi mesi del 2017, l'andamento della temperatura superficiale dell'area target mostra un lieve incremento.
Dal mese di luglio 2018 a tutt'oggi, l'andamento del trend a lungo termine della temperatura superficiale dell'area target mostra un andamento stazionario con leggera tendenza alla diminuzione.

3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia

La sorveglianza vulcanologica tramite Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide ha come principale obiettivo l'individuazione di eventuali variazioni nel tempo dei valori di temperatura misurati al suolo in punti discreti e/o di aree a temperatura maggiore in modo da evidenziare eventuali modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico.
I rilievi sono eseguiti mensilmente in condizioni di non irraggiamento solare (essenzialmente di notte), utilizzando una termocamera portatile FLIR SC640 ad alta risoluzione (640 x 480 pixel) e sensibilità (<0.06°C +30°C). La termocoppia utilizzata è di tipo K, con errore strumentale di circa 0.1°C nell'intervallo -200÷1260 °C. Le misure ottenute con la termocamera sono confrontate, quando possibile, con quelle eseguite con termocoppia rigida.

Ubicazione dei punti di misura ai Campi Flegrei
Le aree e i punti in cui sono effettuate le misure termiche nella caldera dei Campi Flegrei sono distribuite in varie zone del fondo della caldera (Fig. 3.2.1).

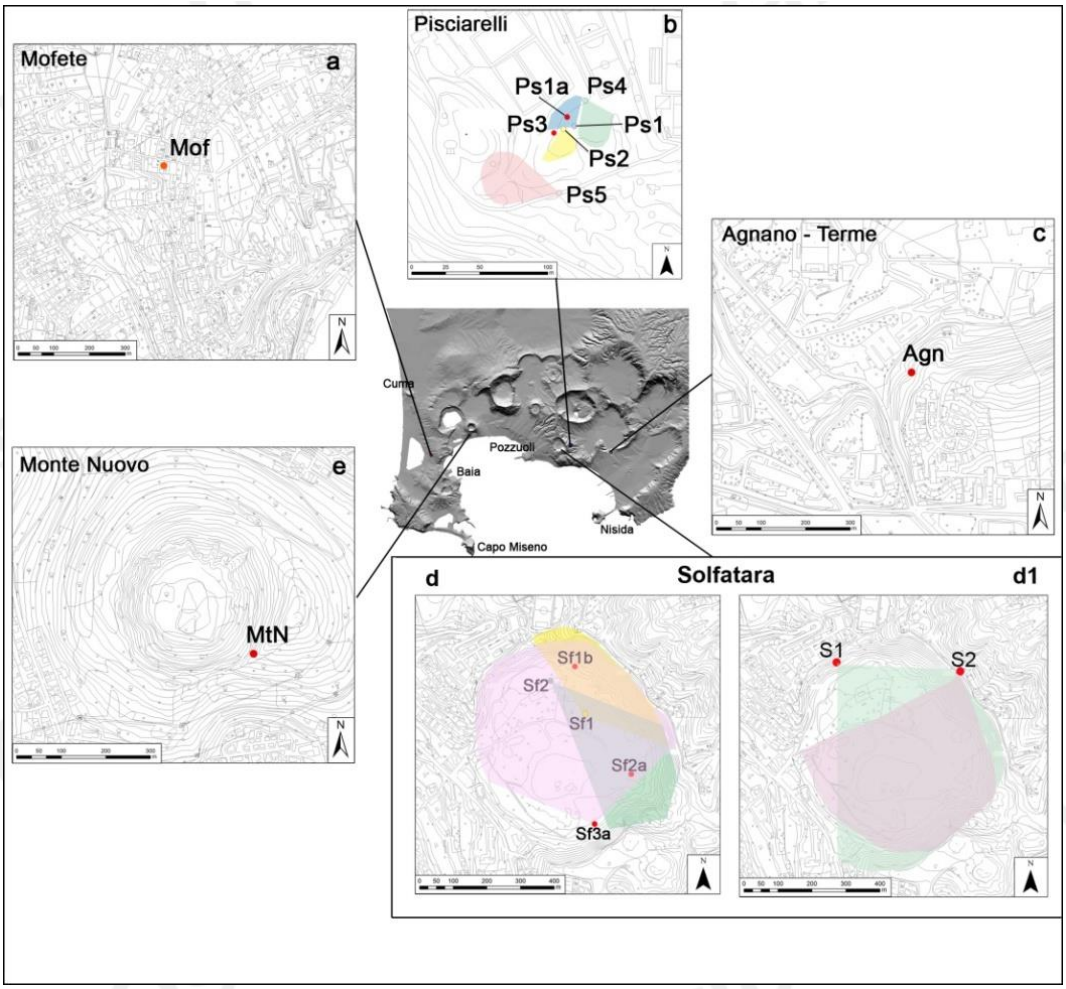


Figura 3.2.1 *– Ubicazione dei punti di misura e dei settori indagati ai Campi Flegrei. I pallini rossi indicano i punti stazione dove sono stati effettuati rilievi con termocoppia rigida e telecamera termica. Nel riquadro b, le aree colorate celeste, verde e rosa indicano i versanti rilevati con termocamera rispettivamente dalle stazioni Ps1, Ps4 e Ps5. Nel riquadro d, le aree in giallo, verde e rosa indicano i versanti rilevati con termocamera rispettivamente dalle stazioni Sf1, Sf2 e Sf3; Sf2a e Sf1b sono misure puntuali effettuate con termocamere e termocoppia; nel riquadro d1, le aree rosa e verde indicano i versanti rilevati con termocamera rispettivamente dalle stazioni S1 e S2.*

In generale, non si osservano significative variazioni di temperatura massima e modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico nei diversi punti di misura.

Di seguito si riportano le osservazioni di tre siti selezionati (Pisciarelli, Monte Nuovo e Agnano Terme).

Pisciarelli

A Pisciarelli l'allargamento dell'area della polla, che già dal mese di agosto 2018 non aveva consentito di rilevare la temperatura al punto Ps3 (Fig. 3.2.1.b), è aumentato tanto da impedire l'accesso a tutti i siti (Fig. 3.2.1.b). Inoltre, il rispetto delle procedure di sicurezza non consente di effettuare le misure strumentali nell'area più prossima alla polla.

Pertanto nel mese di ottobre 2019 sono stati effettuati rilievi termici da drone (Fig. 3.2.2). Il drone utilizzato è un FlySmart esacottero equipaggiato da una termocamera FLIR VUEPRO ad alta risoluzione (640x512 pixel) e precisione ±5 °C.

I valori di temperatura massima così rilevati non si discostano dal valore medio dei mesi precedenti.

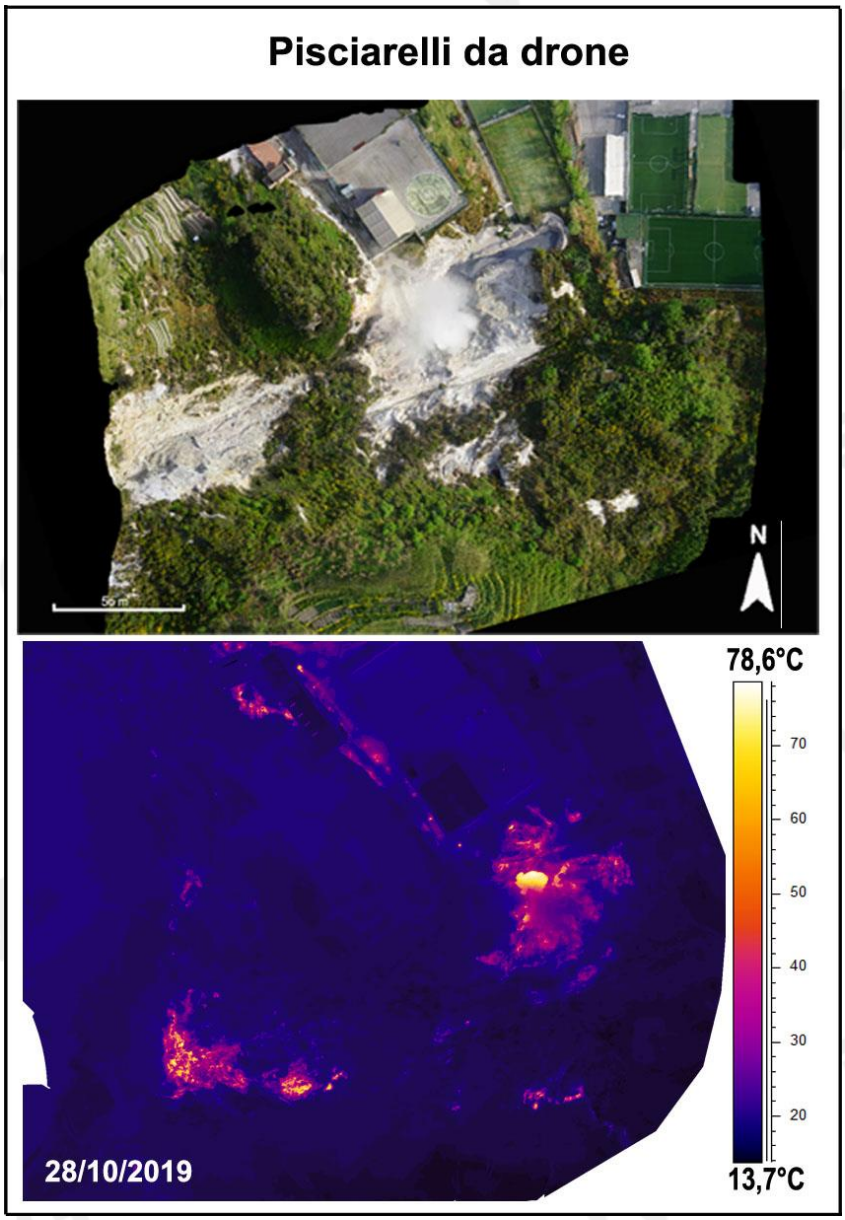


Figura 3.2.2 *– Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese da drone a Pisciarelli il 28 ottobre 2019.*

Monte Nuovo

I valori di temperatura rilevati a ottobre 2019 con telecamera termica e termocoppia rigida, lungo il versante meridionale dell'edificio di Monte Nuovo (MtN, figura 3.2.1e), sono stabili nell'ultimo anno come nei precedenti, a meno di variazioni stagionali (Fig. 3.2.3).

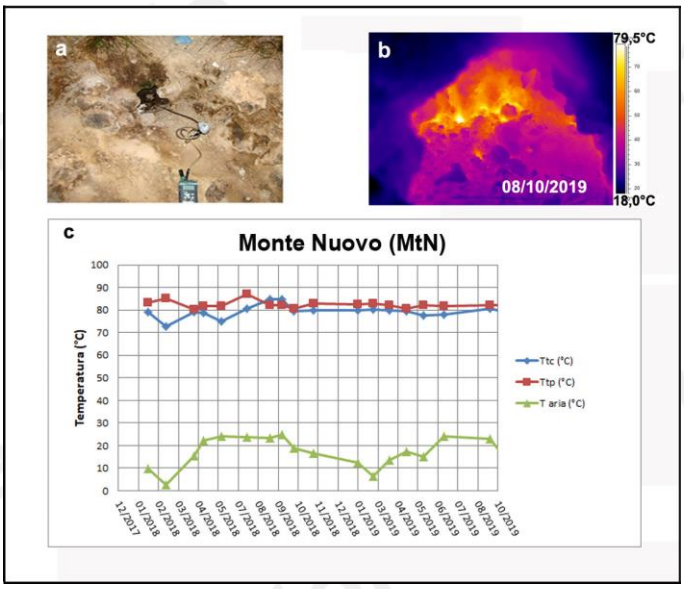


Figura 3.2.3 *– Fumarola lungo il versante meridionale di Monte Nuovo. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto MtN di figura 1.1 e. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2018 a ottobre 2019 (c).*

Agnano Terme

I valori di temperatura rilevati a ottobre 2019 con telecamera termica e termocoppia rigida in corrispondenza di una fumarola non captata presso le "Terme di Agnano" (Agn, figura 3.2.1c), sono stabili nell'ultimo anno come nei precedenti a meno di variazioni stagionali (Fig. 3.2.3c).

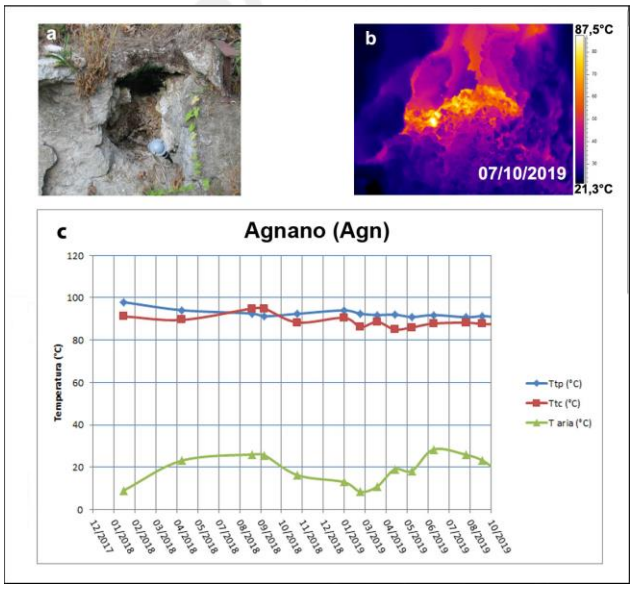


Figura 3.2.3 *– Fumarola all'interno dello stabilimento termale delle "Terme di Agnano". Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Agn di figura 3.2.1c. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2018 a ottobre 2019 (c).*

4. GEOCHIMICA DEI FLUIDI

L'attività di monitoraggio svolta nel mese di ottobre 2019 ai Campi Flegrei (Fig. 4.1) ha riguardato:

- l'acquisizione in continuo del flusso di CO_2 dal suolo (stazione FLXOV5), della temperatura della fumarola BG e del gradiente termico nel cratere della Solfatara;
- l'acquisizione in continuo di dati di flusso di CO_2 dal suolo e della temperatura della fumarola tramite la stazione multiparametrica FLXOV8 installata a Pisciarelli;
- il campionamento delle fumarole principali Bocca Grande e Bocca Nuova nel cratere della Solfatara e di Pisciarelli;
- misure di flusso di CO_2 dal suolo e temperatura del suolo su punti fissi selezionati nell'area della Solfatara e di Pisciarelli.

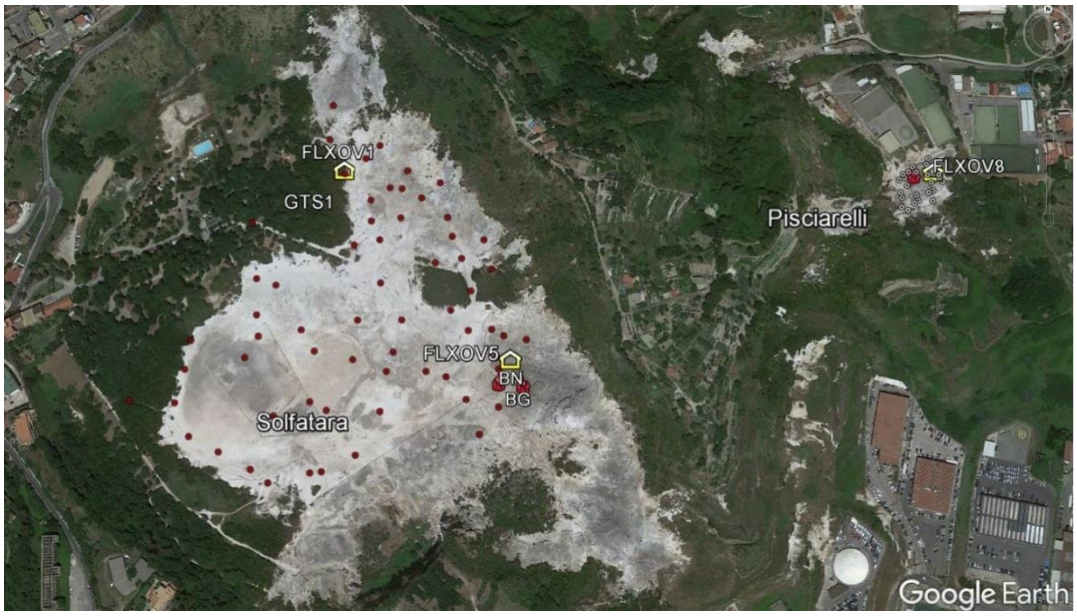


Figura 4.1 *- Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. In particolare sono riportate le quattro stazioni geochimiche ubicate in area Solfatara-Pisciarelli, le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e di Pisciarelli, sono inoltre riportati i punti fissi per la misura del flusso di CO_2 dal suolo e della temperatura del suolo in area Solfatara (simboli rossi) e in area Pisciarelli (simboli bianchi).*

Di seguito sono riportate le osservazioni più rilevanti sui nuovi dati acquisiti.

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 trend già identificati in precedenza (vedi Bollettini di Sorveglianza precedenti; Figg. 4.2 - 4.5).
Il rapporto CO_2/H_2O delle fumarole (Fig. 4.2) nei campioni di ottobre 2019 continua a mostrare valori elevati (~0.44 per la fumarola BG e ~0.39 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 CO_2/H_2O 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, indica il progressivo riscaldamento delle parti più superficiali del sistema idrotermale della Solfatara. In particolare, le concentrazioni di monossido di carbonio (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, tuttora in corso e particolarmente riconoscibile nei campioni degli ultimi mesi (fumarola BG, Fig. 4.3). Tale crescita è 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 fO_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) a oggi (T circa 240 °C, Fig. 4.4). Tale processo di riscaldamento del sistema flegreo e le possibili cause sono trattate nei lavori scientifici di Chiodini et al. (2015a; 2016) a cui si rimanda per approfondimento.

Il cronogramma del rapporto CO_2/CH_4 (Fig. 4.5) mostra picchi positivi, interpretati 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 ottobre 2019, il rapporto CO_2/CH_4 è rimasto su valori bassi, simili a quelli mostrati nei periodi precedenti. Tali osservazioni suggeriscono la fine di un picco che ha raggiunto i valori massimi nei mesi precedenti. I vari picchi corrisponderebbero, quindi, a eventi di degassamento magmatico, occorsi in precedenza, e con conseguente immissione di fluidi magmatici nel sistema idrotermale che alimenta le fumarole della Solfatara. Per maggiori dettagli su tale processo si rimanda a specifici lavori scientifici (Chiodini et al., 2012; 2016). Inoltre, in Figura 4.5, è possibile riconoscere un trend d'aumento del rapporto a partire dal 2000, interrotto dalla fase discendente dell'ultimo picco che caratterizza gli ultimi periodi.

La persistenza di questo basso valore del rapporto CO_2/CH_4 (i.e. elevate concentrazioni di CH_4) contemporaneamente all'aumento della concentrazione del monossido di carbonio e dell'idrogeno evidenzia una variazione del comportamento del sistema idrotermale in risposta ad una iniezione di fluidi magmatici, rispetto a quanto mostrato nei periodi precedenti. I fluidi emessi in questo periodo dal sistema idrotermale mostrano caratteristiche più riducenti; differenti processi possono essere considerati responsabili delle variazioni osservate, ma al momento non è possibile fornire un'interpretazione univoca.

Il processo di riscaldamento e pressurizzazione del sistema idrotermale è supportato dalle misure periodiche, su punti fissi nel cratere della Solfatara, del flusso di CO_2 dal suolo e della temperatura del suolo che mostrano trend di aumento pluriennali. In particolare, i valori di flusso di CO_2 dal suolo relativi alle campagne mensili di misura mostrano un andamento caratterizzato da una periodicità annuale, rientrando in un trend di aumento dei valori a partire dal 2006 (Fig. 4.6).

La media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità mostra un chiaro andamento stagionale sovraimposto a un trend d'aumento (Fig. 4.7), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 6 °C nel periodo 2002-2019.

Nella mappa di Figura 4.8a è riportato l'incremento di temperatura espresso in °C/anno calcolato per ogni punto di misura 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).
Tale processo di riscaldamento è evidenziato anche da misure analoghe, di flusso di CO_2 dal suolo e temperatura del suolo, eseguite periodicamente su 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli. In Figura 4.9 è riportata la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, che dal 2009 mostra un rilevante trend d'aumento, con un incremento del valore medio di circa 5 °C. Nella mappa di Figura 4.10, dove è riportata la distribuzione areale dell'incremento annuo di temperatura, si nota oltre ad un aumento diffuso delle temperature in tutta l'area indagata, la presenza di zone a maggiore riscaldamento legate a processi di fumarolizzazione locale.
La stazione multiparametrica FLXOV5, installata nel cratere della Solfatara a pochi metri dalla fumarola BG, ha misurato un significativo aumento del flusso di CO_2 dal suolo a partire da febbraio 2016 (Fig. 4.11). Tale aumento del flusso di CO_2 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, è presumibilmente la causa delle variazioni macroscopiche del processo di degassamento osservate nel sito di Pisciarelli (Fig 4.12) 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 4.13) e nell'aumento dei flussi di CO_2 dal suolo misurati in continuo dalla stazione geochimica (Fig 4.14). L'incremento del processo di degassamento nell'area è supportato da recenti misure del flusso di CO_2 delle fumarole (Tamburello et al., 2019), effettuate nell'ambito di un progetto di potenziamento e di sviluppo di tecniche di monitoraggio dell'attività idrotermale dell'area di Pisciarelli. Inoltre, l'aumento dell'attività di degassamento nell'area di Pisciarelli è anche indicato dalla misura in continuo della concentrazione di CO_2 in aria che, unitamente ad altri parametri, risulta strettamente correlata all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017) (Fig. 4.15). La serie temporale di concentrazione di CO_2 in aria (registrata con frequenza bioraria dalla stazione geochimica FLXOV8) mostra un significativo aumento nel tempo delle concentrazioni (come medie mensili) da ~1000 ppm nel 2012, fino a ~3000 ppm negli ultimi periodi, con un massimo di ~5000 ppm registrato nel gennaio 2019.

È da evidenziare negli ultimi mesi un continuo incremento dell'area di emissione e in particolare dell'estensione della superficie della polla di Pisciarelli. In considerazione di tali evidenti variazioni, in osservanza al principio di precauzione e al fine di operare in sicurezza nel sito di emissione sono al momento sospese le attività di campionamento dei fluidi della fumarola principale di Pisciarelli e di manutenzione del sensore di temperatura installato nella medesima fumarola.

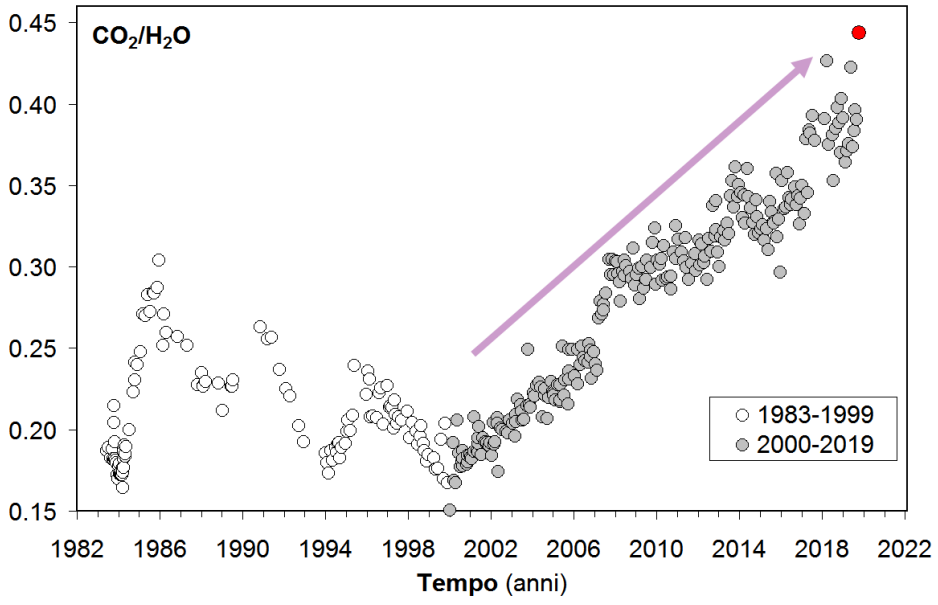


Figura 4.2 *- Cronogramma del rapporto CO_2/H_2O per la fumarola BG. In grigio sono riportati i dati a partire dal 2000, quando è iniziato un trend d'aumento del rapporto CO_2/H_2O, in generale, indicativo di una crescente frazione della componente magmatica nei fluidi fumarolici. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di ottobre 2019.*

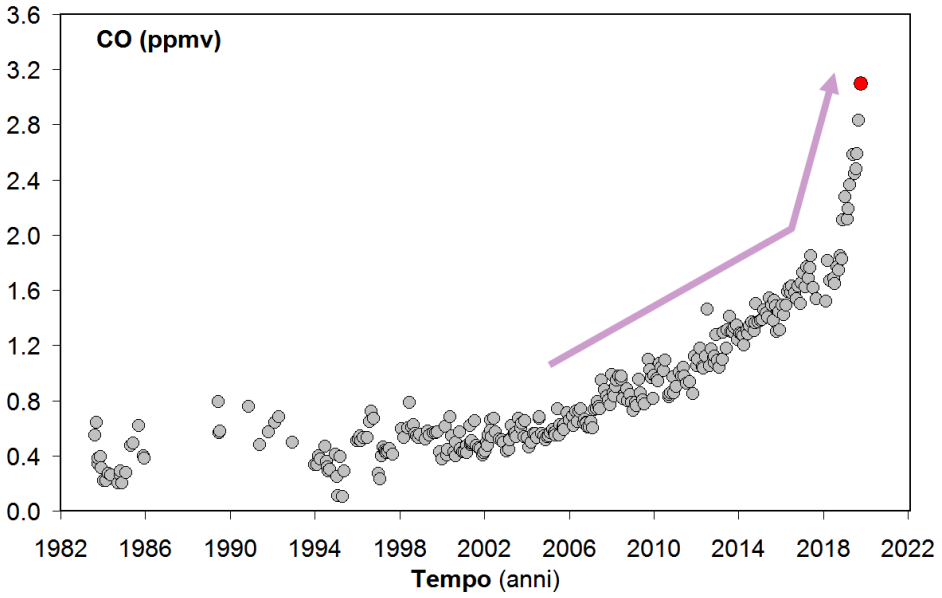


Figura 4.3 *– Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di ottobre 2019. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici ad elevata temperatura mentre fumarole alimentate 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.*

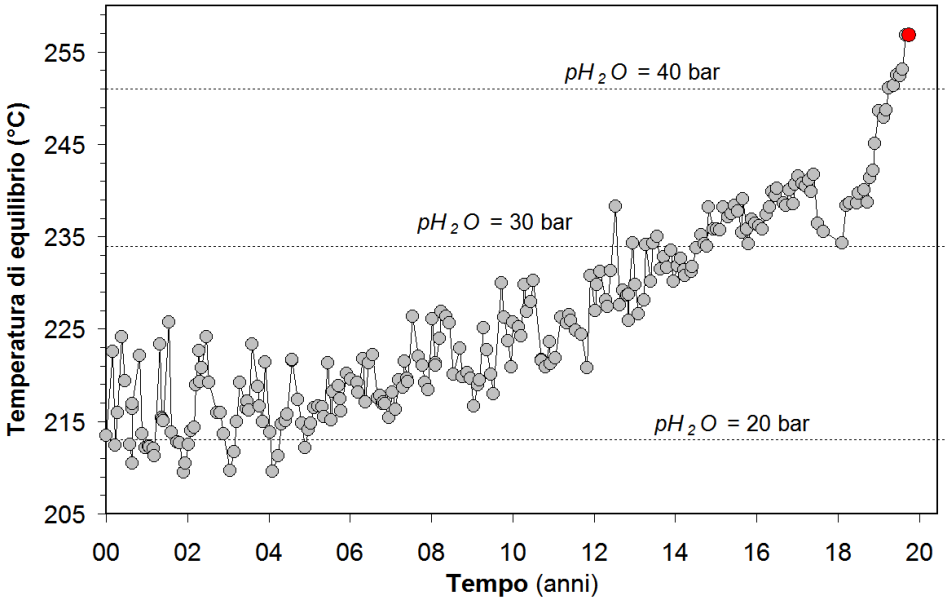


Figura 4.4 *– Cronogramma delle temperature di equilibrio per il sistema CO-CO_2, stimate assumendo condizioni redox fissate dalla relazione di D'Amore and Panichi (1980). Tali temperature, rappresentative della parte più superficiale del sistema idrotermale (Caliro et al., 2007), mostrano un trend d'aumento a partire dai primi anni del 2000. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di ottobre 2019 relativo alla fumarola BG.*

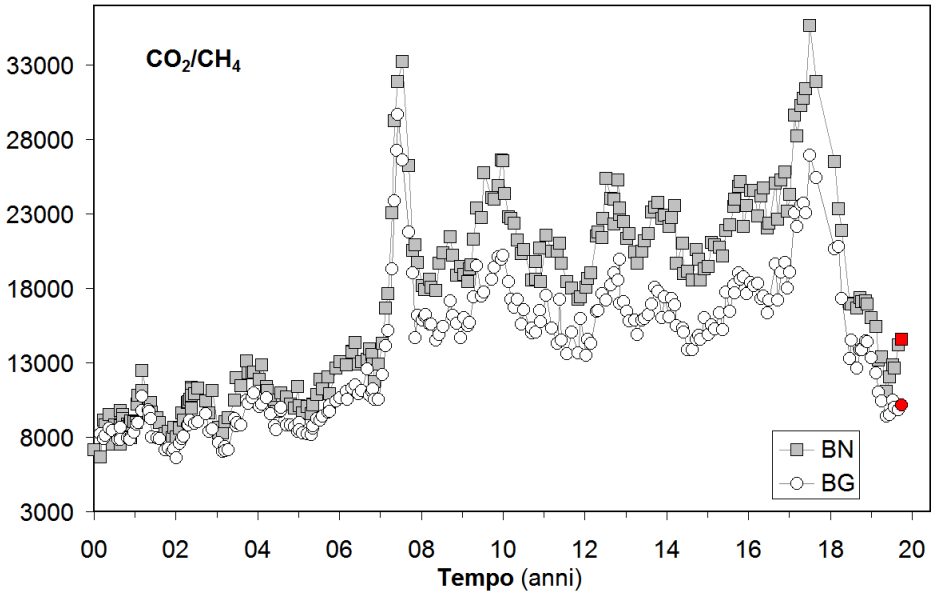


Figura 4.5 *– Variazioni del rapporto CO_2/CH_4 per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico occorsi ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). Con i simboli rossi sono evidenziati i campioni di ottobre 2019.*

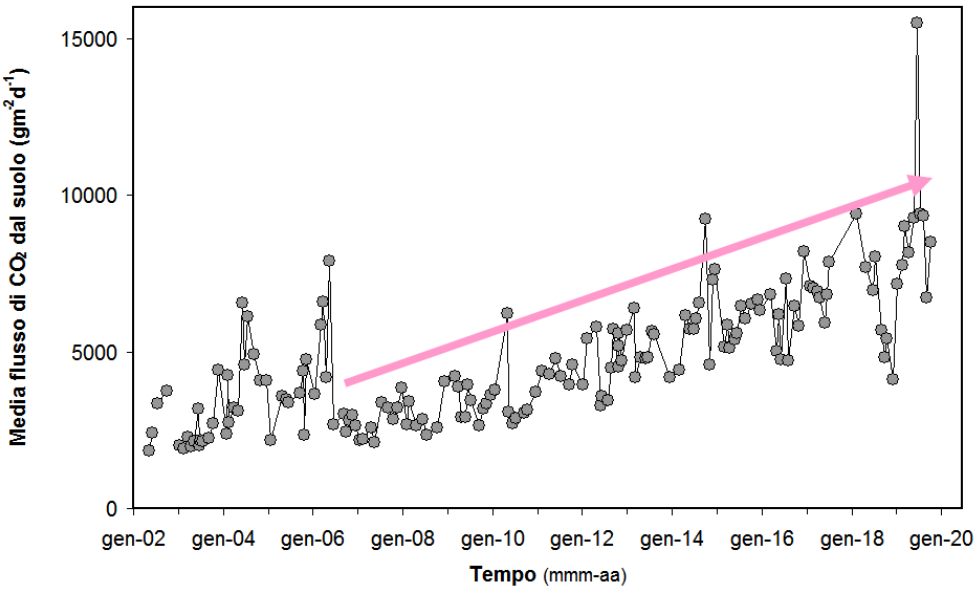


Figura 4.6 *– Cronogramma della media dei flussi di CO_2 dal suolo misurati mensilmente su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara*

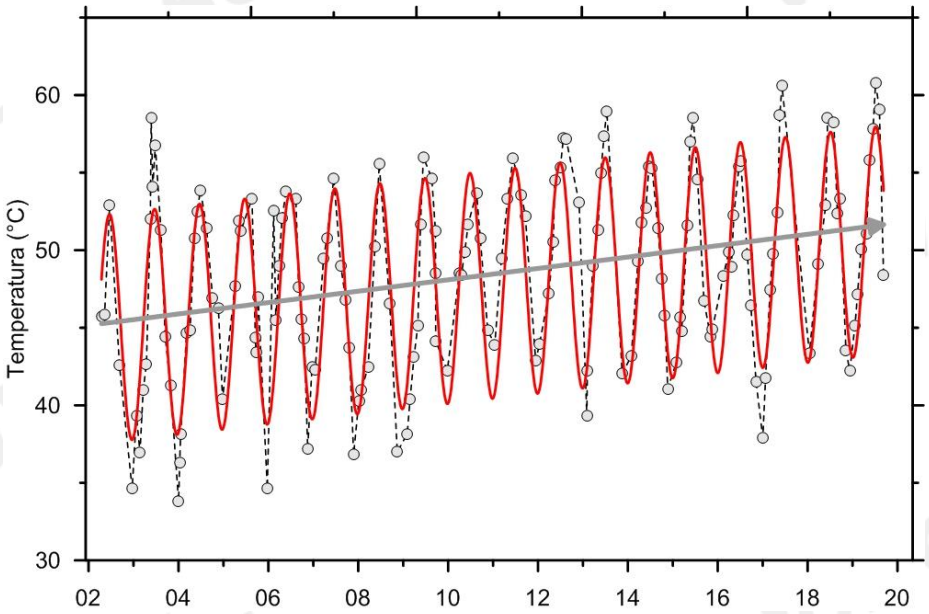


Figura 4.7 *- Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. Va evidenziato l'incremento del valore medio nel periodo 2002-2019 di oltre 6 °C.*

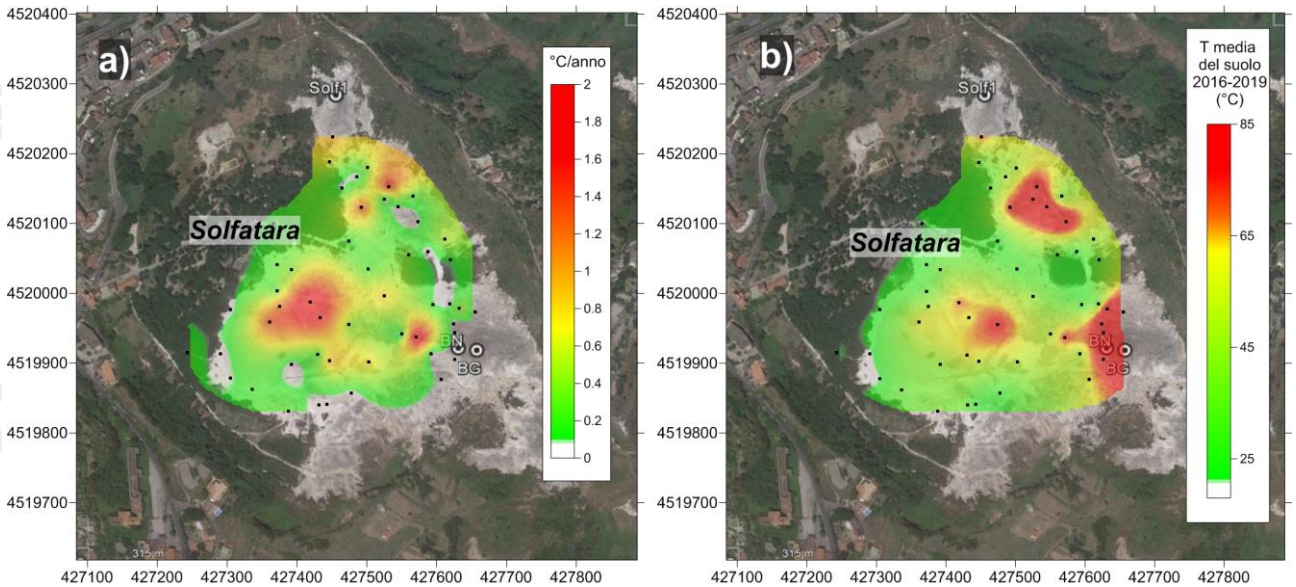


Figura 4.8 *– a) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale. L'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo 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 2016 al 2019).*

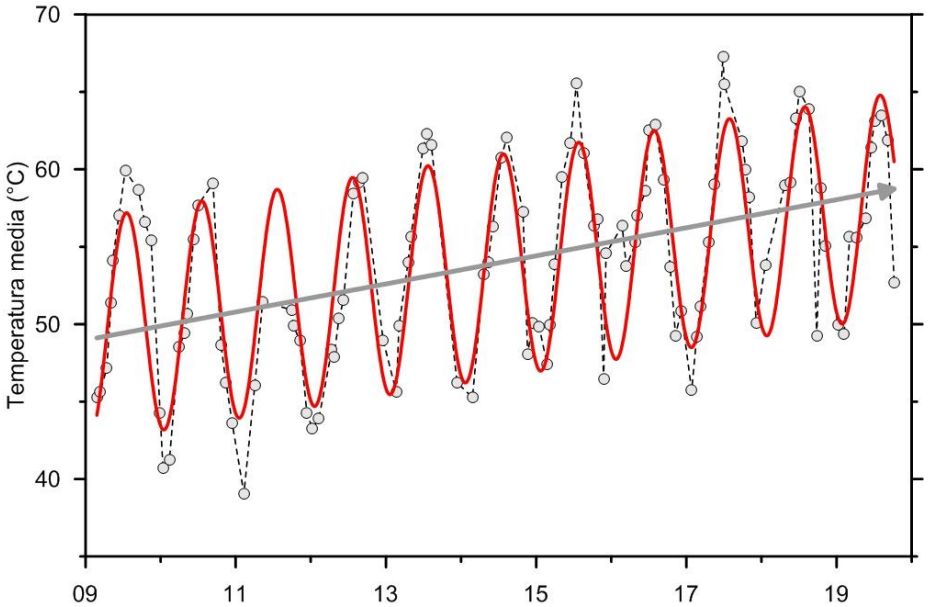


Figura 4.9 *- Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli dal 2009.*

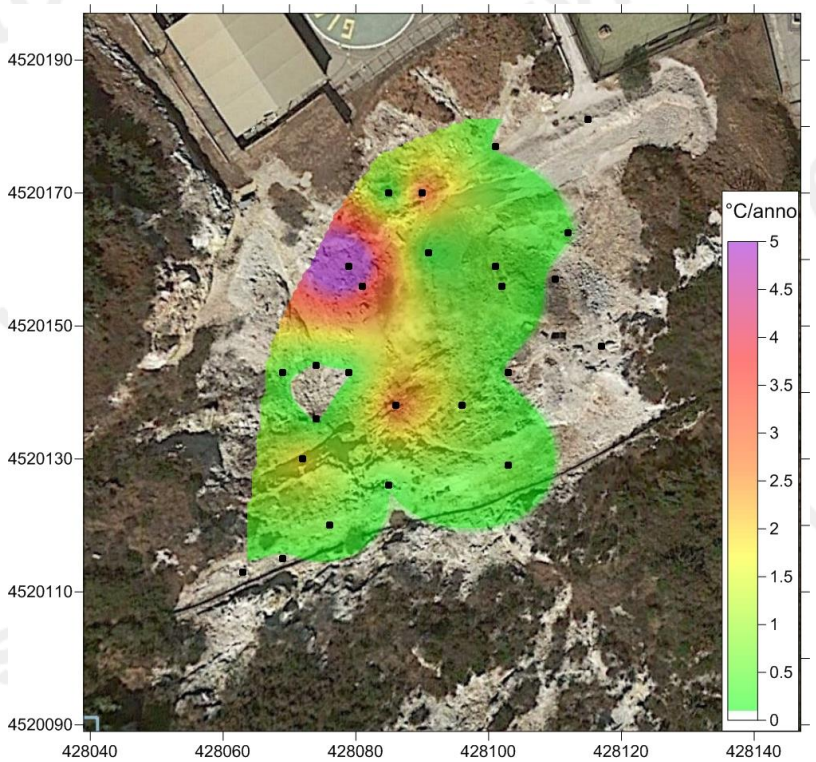


Figura 4.10 *- Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ognuno dei 25 punti misurati a partire dal 2009. L'incremento di temperatura interessa tutta l'area indagata con le zone di maggiore riscaldamento legate a processi di fumarolizzazione locale.*

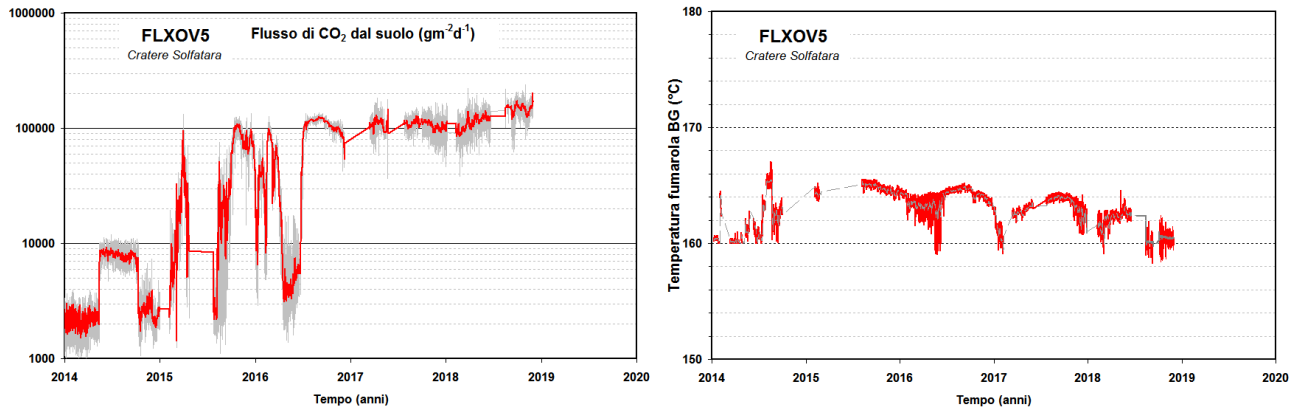


Figura 4.11 *– Valori del flusso di CO_2 dal suolo e della temperatura della fumarola BG misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara a pochi metri dalla fumarola principale BG. I valori di flusso di CO_2 dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2015 (la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere).*

Figura 4.12 *- Variazioni macroscopiche dell'area di emissione di Pisciarelli dal 2005.*

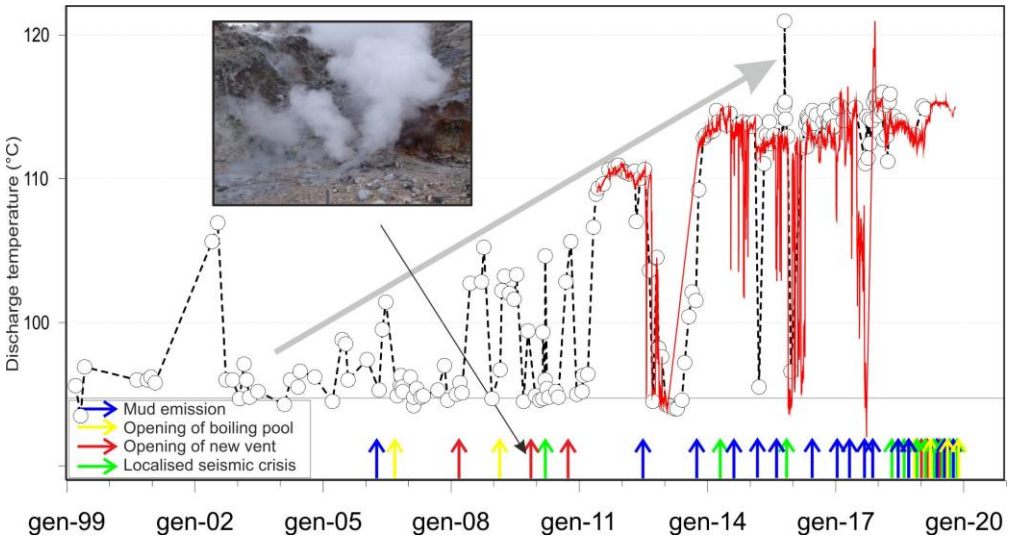


Figura 4.13 *- Cronogramma delle temperature (°C) della fumarola di Pisciarelli e dei maggiori eventi occorsi legati all'aumento dell'attività idrotermale (i cerchi si riferiscono a misure discrete riferite al punto di maggior flusso dei gas, la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere delle misure in continuo della stazione FLXOV8). 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.*

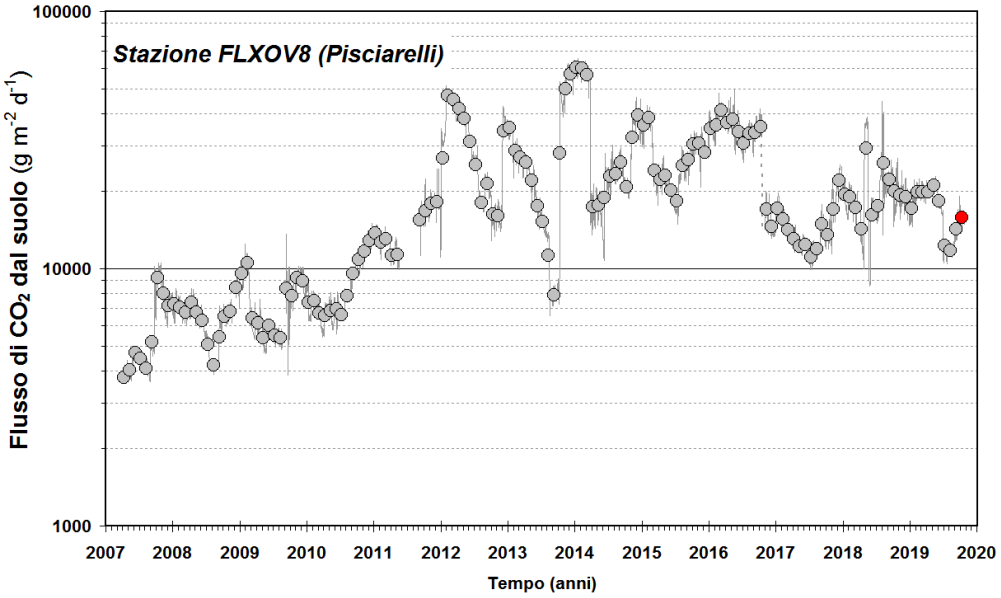


Figura 4.14 *- Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO_2 misurati dalla stazione automatica a Pisciarelli. E' da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo a partire dal 2007 del flusso CO_2. La media dei flussi relativa al mese di ottobre 2019 è riportata con il simbolo 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 CO_2 dal suolo, ha comportato una modifica permanente del sito con valori misurati di flusso di CO_2 più bassi, ma caratterizzati da un simile trend d'aumento.*

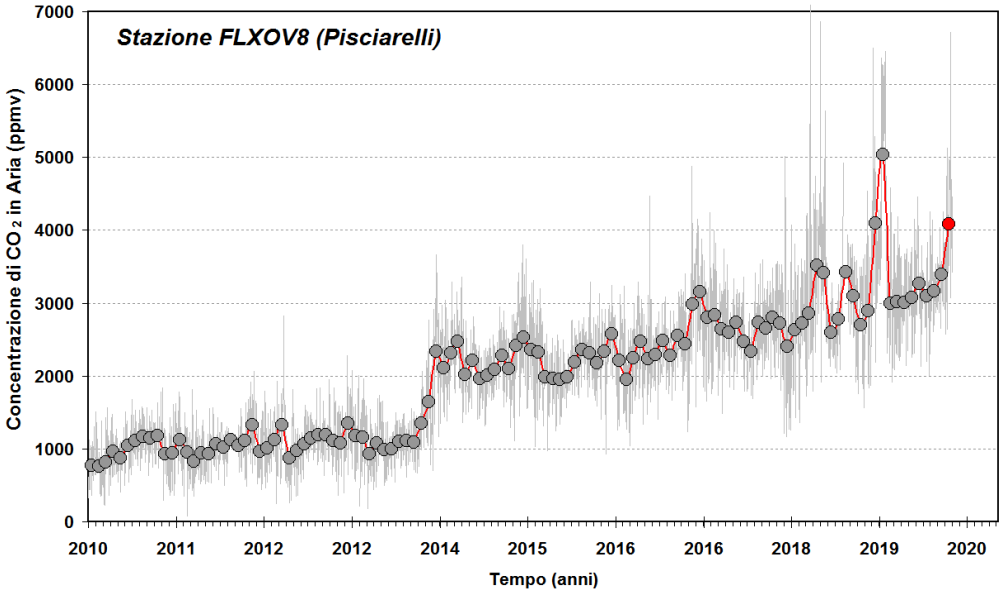


Figura 4.15 *- Cronogramma delle medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) della concentrazione di CO_2 registrata in aria con frequenza bioraria dalla stazione geochimica per la misura del flusso di CO_2 dal suolo di Pisciarelli (FLXOV8). La media della concentrazione del mese di ottobre 2019 è riportata con il simbolo rosso. E' da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo delle concentrazioni sin dal 2013.*

5. QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEL VULCANO NEL MESE DI OTTOBRE 2019 E VALUTAZIONI

1) SISMOLOGIA: Nell'area dei Campi Flegrei sono stati registrati 83 terremoti (M_{dmax}=2.5).
2) DEFORMAZIONI: L'analisi dei trend delle serie temporali GPS da luglio 2017 ha evidenziato 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 28 cm a partire da gennaio 2016.
L'orientazione dei vettori tilt continua a mostrare un pattern coerente con la fase di sollevamento del suolo radiale centrato nell'area della città di Pozzuoli.
La campagna gravimetrica effettuata nel mese di ottobre ha evidenziato che nel periodo 10/2018-10/2019 l'area flegrea è stata in generale interessata da variazioni di gravità non rilevanti.
3) TERMOGRAFIA: L'analisi delle serie temporali delle aree campionate della Solfatara e Pisciarelli, seppur in presenza di ampie oscillazioni a breve periodo, mostra un andamento sostanzialmente stabile.
Anche le misure con termocamere mobili effettuate in diversi punti nell'area dei Campi Flegrei mostrano andamenti stabili.
4) GEOCHIMICA: La composizione delle fumarole e i parametri monitorati indicano il perdurare dei trend pluriennali di riscaldamento e pressurizzazione del sistema idrotermale.

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

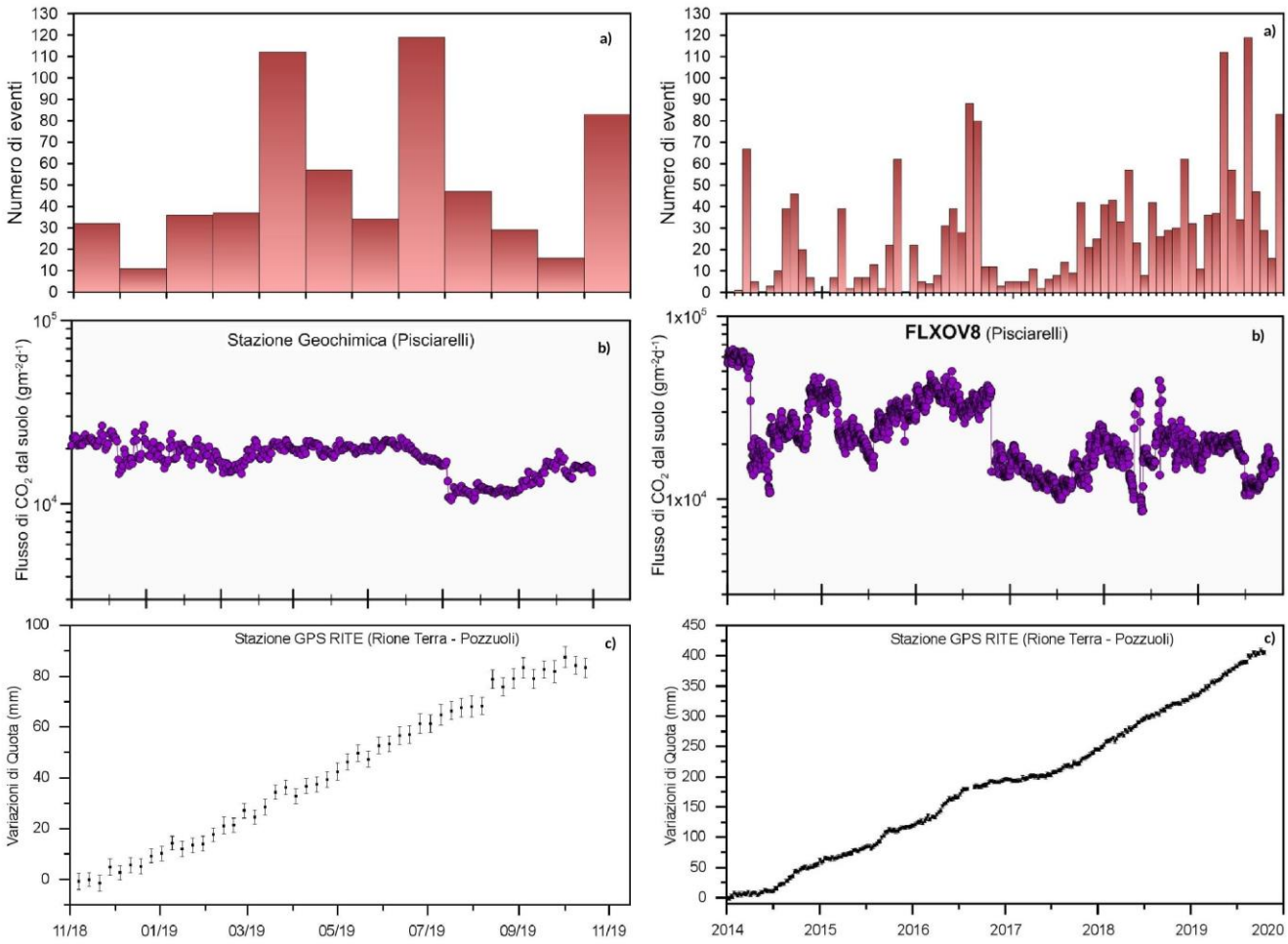


Figura 5.1 *– Frequenza di accadimento degli eventi sismici (a), variazioni del flusso di CO_2 alla stazione geochimica di Pisciarelli (b) e andamento delle deformazioni del suolo alla stazione GPS di RITE (c) negli ultimi dodici mesi (a sinistra) e dal 2014 (a destra).*

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), CO_2/CH_4 ratio in fumaroles a powerful tool to detect magma degassing episodes at quiescent volcanoes., Geophys. Res. Lett., doi: 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. Gelogy, 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 CO_2 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.

Ricco, C., Aquino, I., Borgstrom, S.E. and Del Gaudio, C. (2013) 19 years of tilt data on Mt. Vesuvius: State of the art and future perspectives. Ann. Geophys. 2013, Vol. 56 n. 4.

Ricco, C., Petrosino, S., Aquino, I., Del Gaudio, C. and Falanga, M. (2019) Some Investigations on a Possible Relationship between Ground Deformation and Seismic Activity at Campi Flegrei and Ischia Volcanic Areas (Southern Italy). Geosciences. 2019, Vol. 9 Pag. 1-24. ISSN:2076-3263.

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.

Tamburello G., S. Caliro, G. Chiodini, et al., Escalating CO2 degassing at the Pisciarelli fumarolic system, and implications for the ongoing Campi Flegrei unrest, Journal of Volcanology and Geothermal Research, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.07.005

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.