

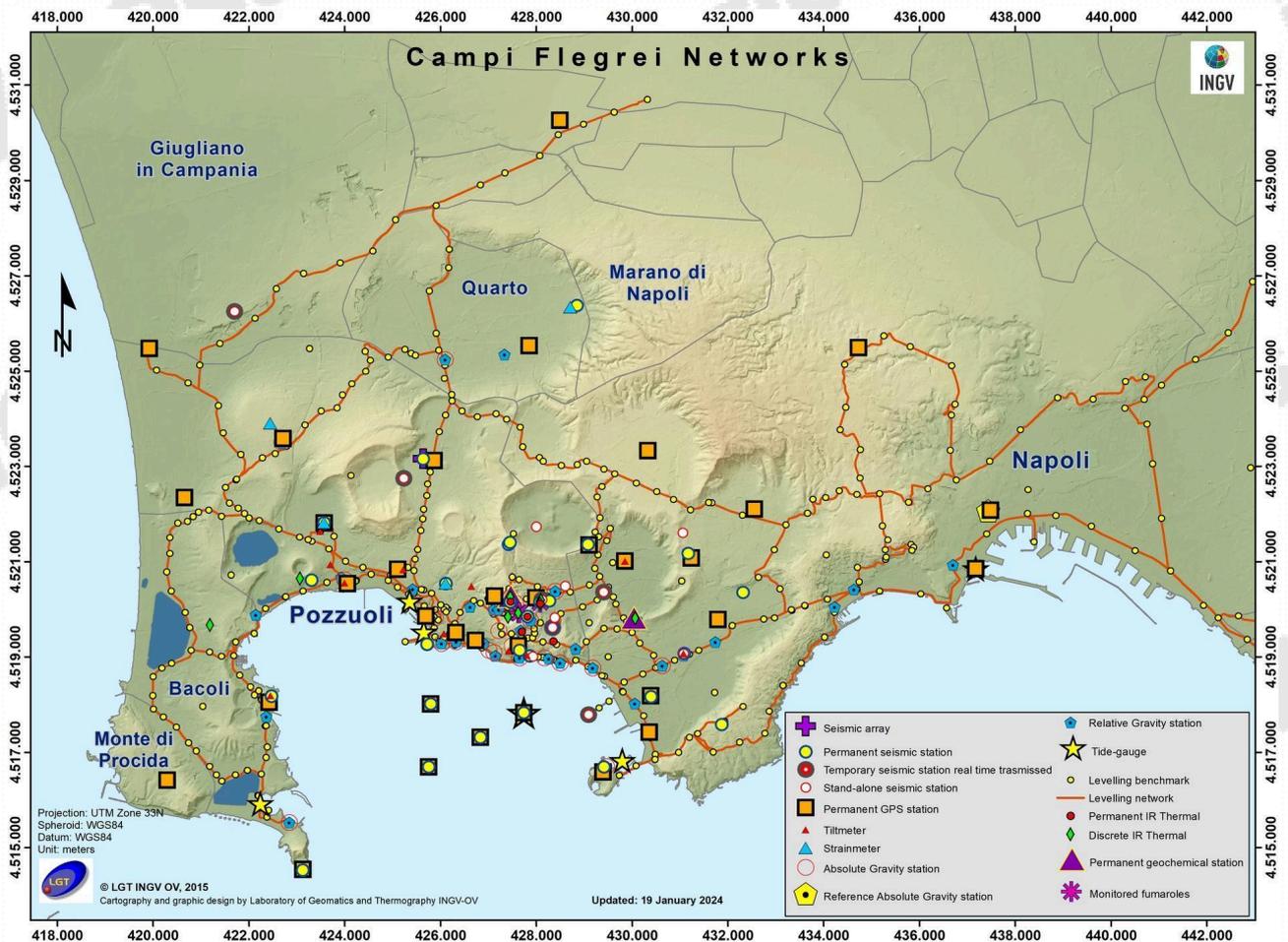


Bollettino di Sorveglianza

CAMPI FLEGREI

APRILE 2024

A cura della Sezione di Napoli | OSSERVATORIO VESUVIANO



1. SISMOLOGIA

La Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei è mostrata in Figura 1.1 ed è costituita da 27 stazioni terrestri e marine, integrata da 5 stazioni della rete mobile in trasmissione continua. L'infrastruttura marina permanente di monitoraggio e ricerca multi-parametrica sperimentale che opera nel Golfo di Pozzuoli, denominata MEDUSA (<http://medusa.ingv.it/>), è costituita da 4 boe geodetiche (CFBA, CFBB, CFBC e CFSB) ed altrettanti moduli sottomarini equipaggiati con strumentazione geofisica, oceanografica e multiparametrica. Allo stato attuale, la stazione CFSB non è funzionante.

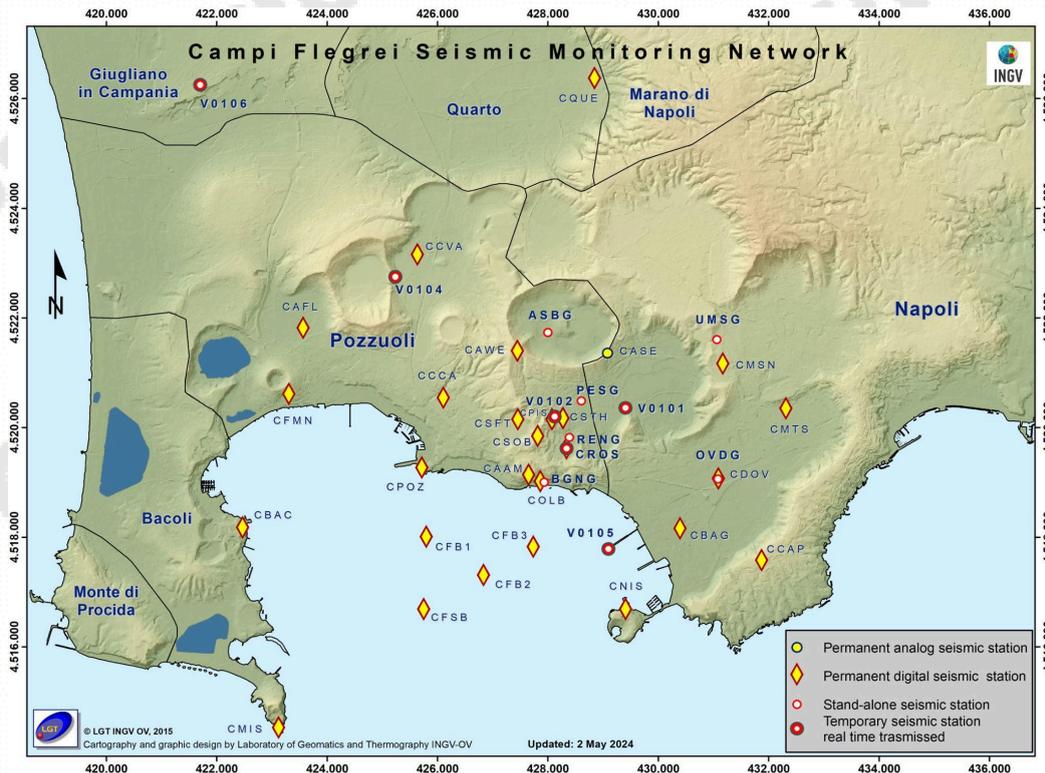


Figura 1.1 - Mappa della Rete Sismica dei Campi Flegrei (DOI: 10.5281/zenodo.5886962).

Nel corso del mese di aprile 2024, ai Campi Flegrei, sono stati registrati 1252 terremoti ($M_{max}=3.9\pm 0.3$; evento del 27/04/2024 alle ore 03:44 UTC (Fig.1.2).

457 degli eventi registrati ($M_d \geq 0.0 \pm 0.3$) sono avvenuti nel corso di 14 sciami sismici riportati in Tab. 1.1

Inizio sciame	Num eventi $M_d \geq 0.0$	M_d max	Area
2024-04-04 05:14 UTC	11	3.2(± 0.3)	Pozzuoli Porto
2024-04-06 11:59 UTC	6	2.5(± 0.3)	Golfo di Pozzuoli
2024-04-06 18:18 UTC	8	2.1(± 0.3)	Pozzuoli
2024-04-07 12:34 UTC	19	2.3(± 0.3)	Pozzuoli, Solfatara, Pisciarelli
2024-04-09 03:39 UTC	7	1.7(± 0.3)	Solfatara

Inizio sciame	Num eventi Md≥0.0	Md max	Area
2024-04-09 20:27 UTC	32	2.8(±0.3)	Pozzuoli, Solfatara, Pisciarelli
2024-04-11 05:23 UTC	57	2.3(±0.3)	Pozzuoli, Solfatara, golfo di Pozzuoli
2024-04-14 07:35 UTC	71	3.7(±0.3)	Pozzuoli, Solfatara, Pisciarelli
2024-04-21 01:20 UTC	30	2.5(±0.3)	Pozzuoli, Solfatara, golfo di Pozzuoli
2024-04-21 06:45 UTC	36	2.1(±0.3)	Pozzuoli, Solfatara
2024-04-23 01:36 UTC	13	1.6(±0.3)	Pozzuoli
2024-04-26 01:38 UTC	95	3.9(±0.3)	Pozzuoli, golfo di Pozzuoli
2024-04-29 17:44 UTC	57	2.2(±0.3)	Pozzuoli
2024-04-30 22:01 UTC	15	2.4(±0.3)	Pozzuoli, golfo di Pozzuoli

Tabella 1.1 – Sciami sismici registrati nel corso del mese di aprile 2024

Il numero di terremoti registrato nel corso del mese di aprile 2024 risulta, attualmente, il più elevato a partire dalla ripresa di questa fase bradisismica iniziata nel 2005 (Figg. 1.8a, 1.9).

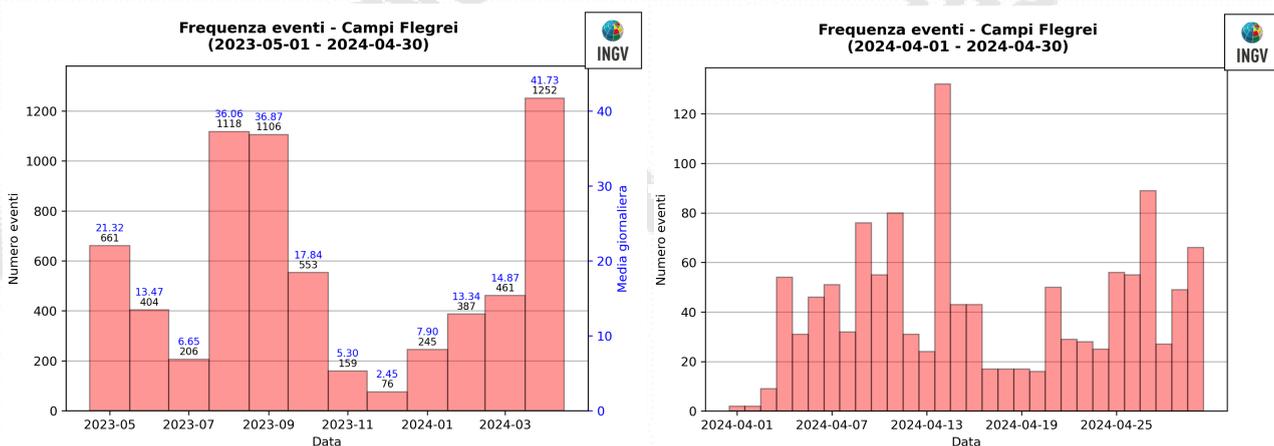


Figura 1.2 - A sinistra numero di eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in totale 6628), mentre a destra quelli avvenuti nell'ultimo mese (in totale 1252).

In totale è stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 979 degli eventi registrati, le cui localizzazioni sono mostrate in rosso in Fig. 1.3.

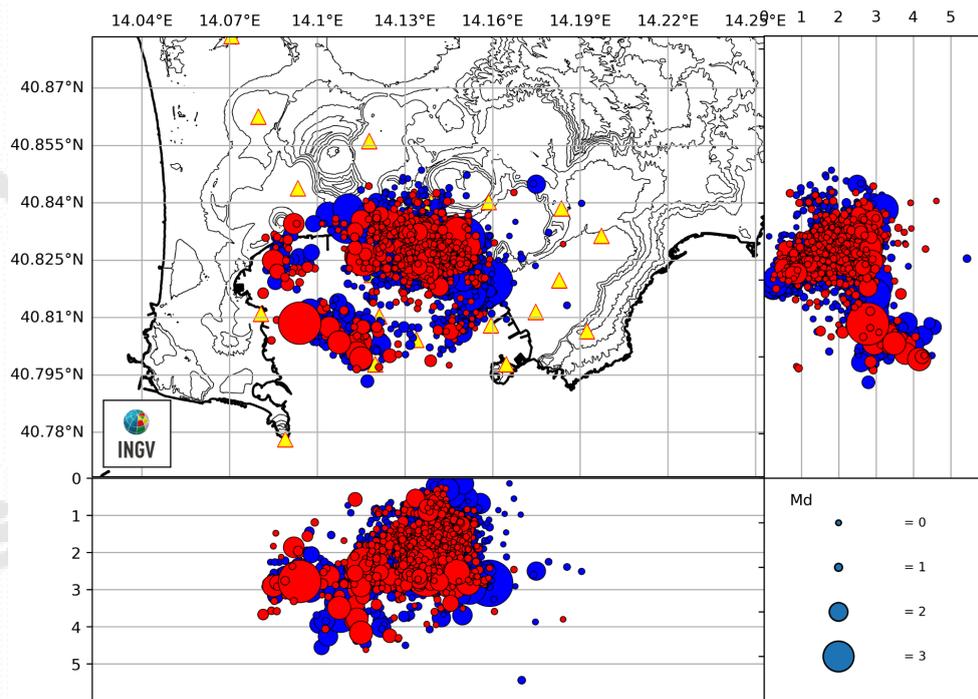


Figura 1.3 - Localizzazioni ipocentrali ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (in blu) e dell'ultimo mese (in rosso). La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo, come indicato nel riquadro in basso a destra.

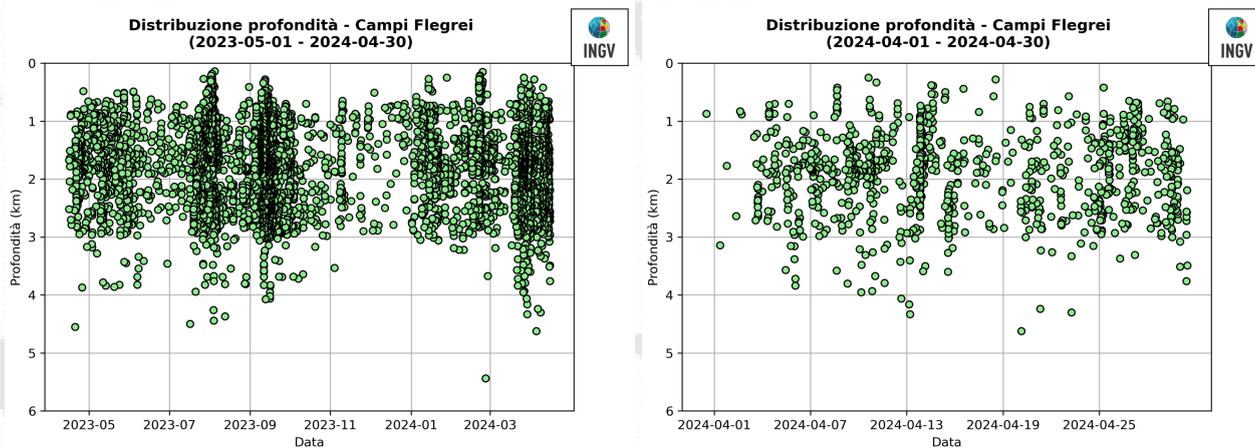


Figura 1.4 - Profondità ipocentrali degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

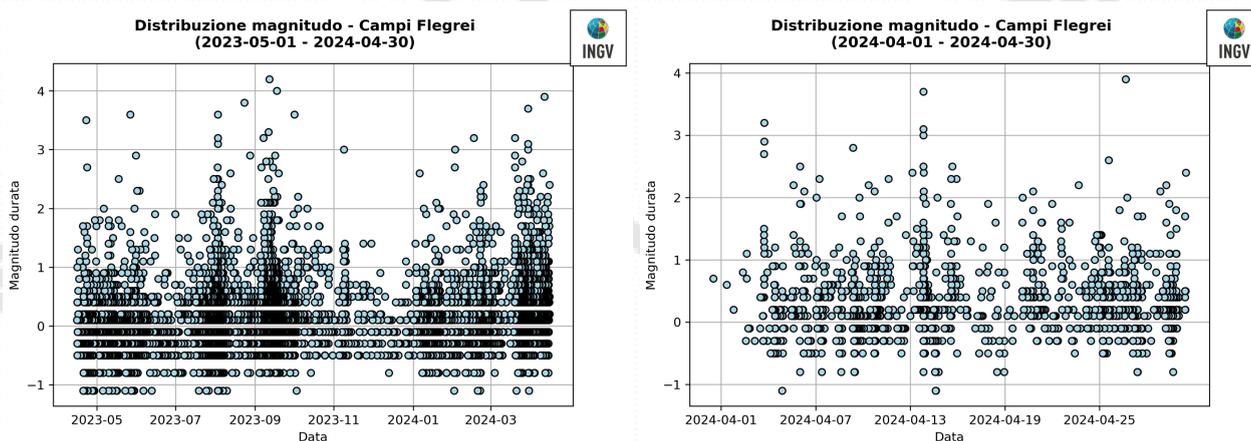


Figura 1.5 - Magnitudo degli eventi registrati ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

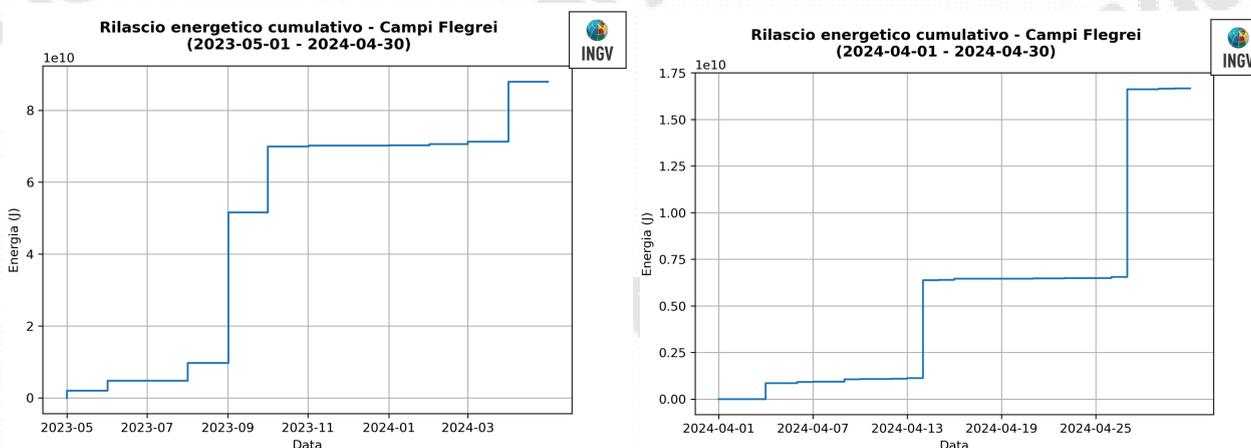


Figura 1.6 - Rilascio cumulativo di energia sismica ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 12 mesi (mensile a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

In Tabella 1.2 è rappresentato il numero di eventi registrati, divisi per classi di magnitudo, e le relative percentuali.

Numero totale terremoti: 1252 $M_{dmax} = 3.9 \pm 0.3$	
Numero terremoti con $M_d < 0.0$	315 (25.16%)
Numero terremoti con $0.0 \leq M_d < 1.0$	675 (53.91%)
Numero terremoti con $1.0 \leq M_d < 2.0$	132 (10.54%)
Numero terremoti con $2.0 \leq M_d < 3.0$	30 (2.40%)
Numero terremoti con $M_d \geq 3.0$	5 (0.40%)
Numero terremoti con M_d N.D.	95 (7.59%)

Tabella 1.2 – Riepilogo mensile della sismicità registrata ai Campi Flegrei divisa per classi di magnitudo e relative percentuali.

L'analisi dei meccanismi focali degli eventi più energetici del mese di aprile 2024 mostra soluzioni associabili a meccanismi di tipo normale (Figg. 1.7a,1.7b)

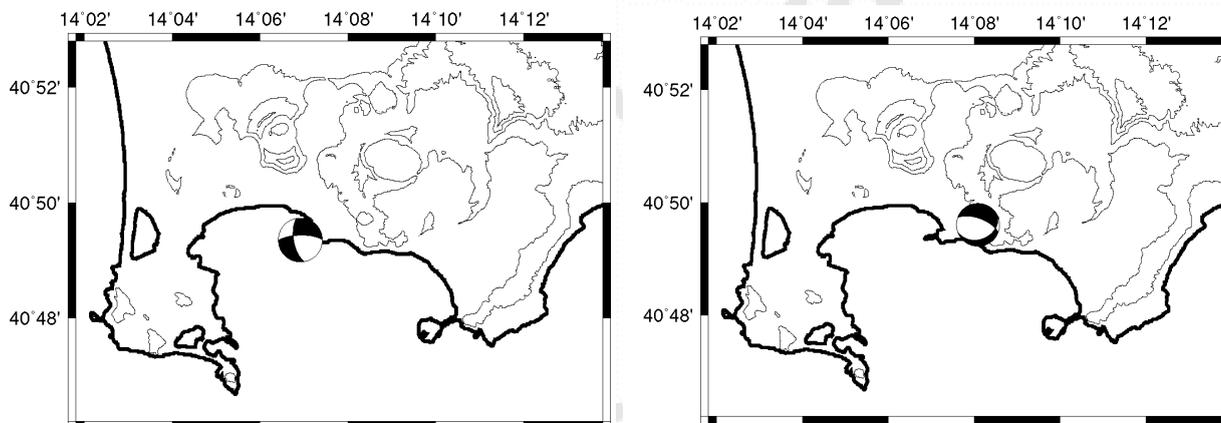


Figura 1.7a - Localizzazione e meccanismo focale dell'evento del 04/04/2024 alle 05:14 UTC Md 2.7 (± 0.3) (a sinistra) e del 14/04/2024 alle 07:44 UTC Md 3.7 (± 0.3) (a destra)

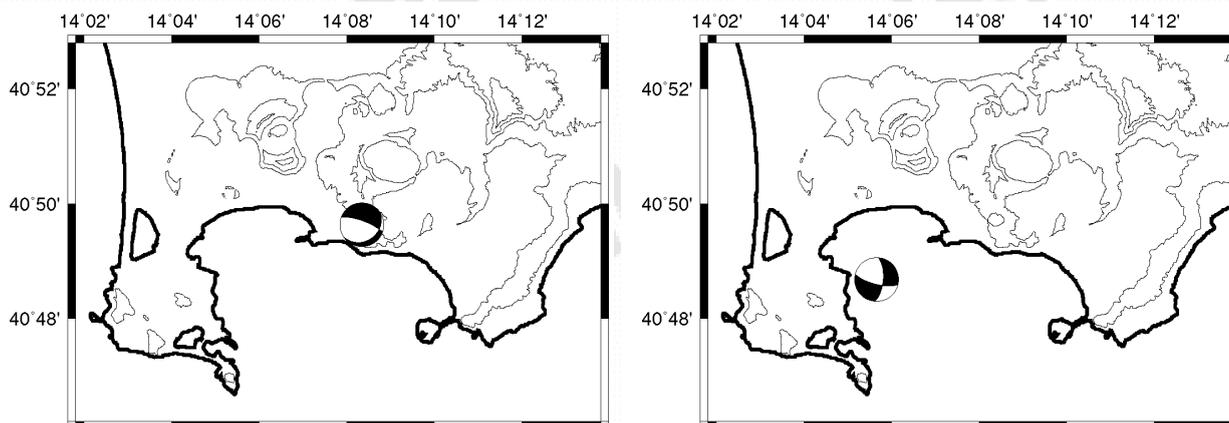


Figura 1.7b - Localizzazione e meccanismo focale dell'evento del 14/04/2024 alle 08:01 UTC Md 3.0 (± 0.3) (a sinistra) e del 27/04/2024 alle 03:44 UTC Md 3.9 (± 0.3) (a destra)

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

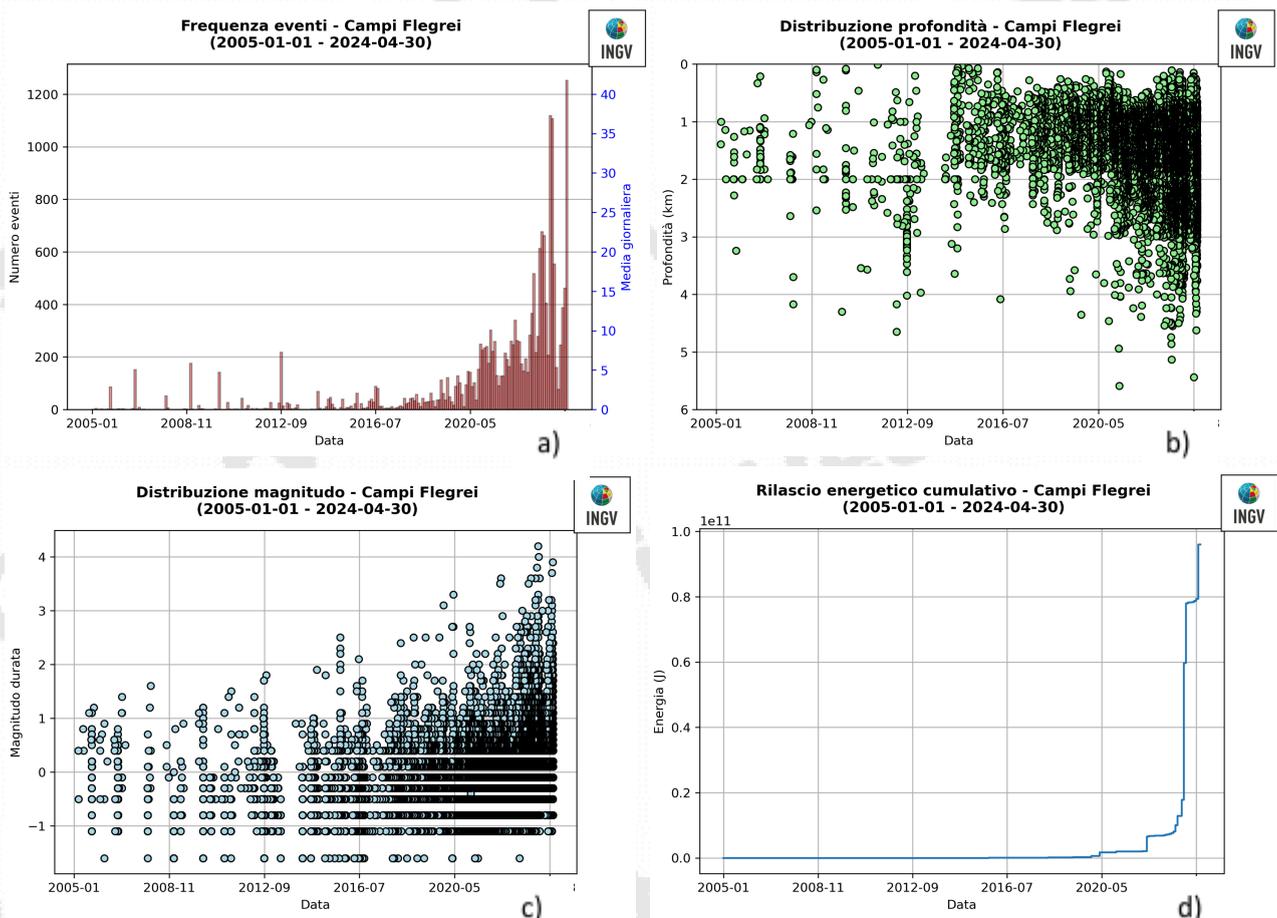


Figura 1.8 - Andamento dei principali parametri sismologici a partire dal 2005: a) frequenza di accadimento; b) profondità ipocentrali; c) magnitudo; d) energia cumulativa.

In figura 1.9 è rappresentata la frequenza di accadimento dei terremoti registrati ai Campi Flegrei dal 1983 e la relativa energia cumulativa.

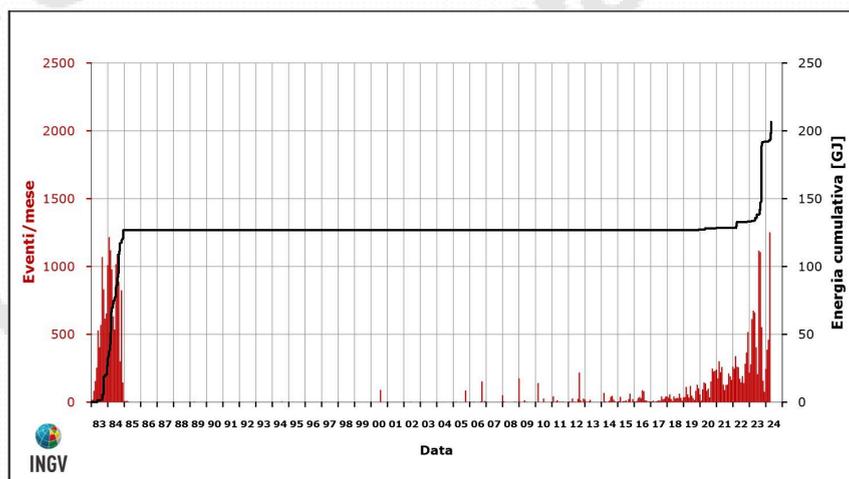


Figura 1.9 - Frequenza di accadimento dei terremoti registrati ai Campi Flegrei dal 1983. La linea nera rappresenta l'energia cumulativa.

2. DEFORMAZIONI DEL SUOLO

2.1 GNSS

La Rete GNSS permanente dei Campi Flegrei (De Martino et al., 2021) è costituita da 35 stazioni terrestri e marine (Figura 2.1.1). L'infrastruttura marina permanente di monitoraggio e ricerca multi-parametrica sperimentale che opera nel Golfo di Pozzuoli, denominata MEDUSA (<http://medusa.ingv.it>), è costituita da 4 boe geodetiche (CFBA, CFBB, CFBC e CFSB) ed altrettanti moduli sottomarini equipaggiati con strumentazione geofisica, oceanografica e multiparametrica (Iannaccone et al., 2018; De Martino et al., 2020; Guardato et al, 2022). Allo stato attuale, la stazione CFSB non è in funzione.



Figura 2.1.1 - Rete GNSS Permanente dei Campi Flegrei (DOI: 10.5281/zenodo.5886962).

Da gennaio agli inizi di aprile 2024, il valore medio della velocità di sollevamento nell'area di massima deformazione è stato di circa 10 ± 3 mm/mese alla stazione GNSS di Rione Terra (RITE) (fascia grigia in Figura 2.1.2). Dal 9 al 16 aprile (fascia rossa in Figura 2.1.2) sono stati registrati alla stazione GNSS di RITE due episodi di sollevamento del suolo, rispettivamente di circa 1 cm (9-10 aprile) e 0.5 cm (15-16 aprile). Successivamente (intervallo 17 aprile - 2 maggio, fascia blu in Figura 2.1.2) non si sono registrate deformazioni significative ad eccezione degli ultimi giorni, successivi all'evento del 27 aprile. In totale nell'ultimo mese si registra un sollevamento nell'area di massima deformazione di circa 3 cm, con andamento discontinuo.

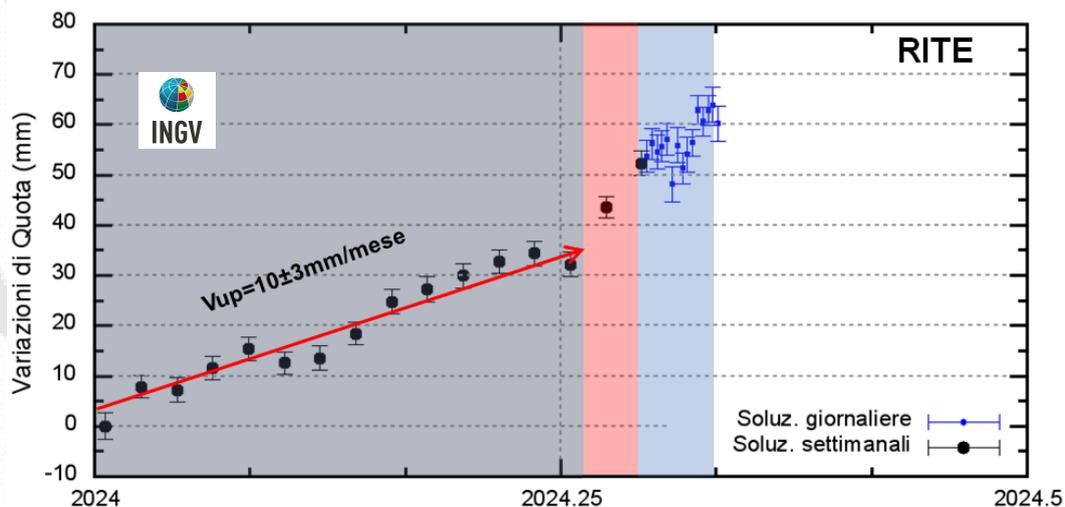


Figura 2.1.2 - Serie temporale delle variazioni in quota della stazione GNSS di RITE dal 01/01/2024 al 02/05/2024

Il sollevamento totale registrato alla stazione GNSS di RITE è di circa 125 cm da novembre 2005, inizio dell'attuale fase di *unrest* (Fig. 2.1.3). Da gennaio 2016 a oggi il sollevamento nell'area di massima deformazione è di circa 92 cm (Fig. 2.1.4).

La figura 2.1.4 riporta le serie temporali delle variazioni in quota dal 2016 di alcune stazioni GNSS ubicate nella zona di massima deformazione dei Campi Flegrei.

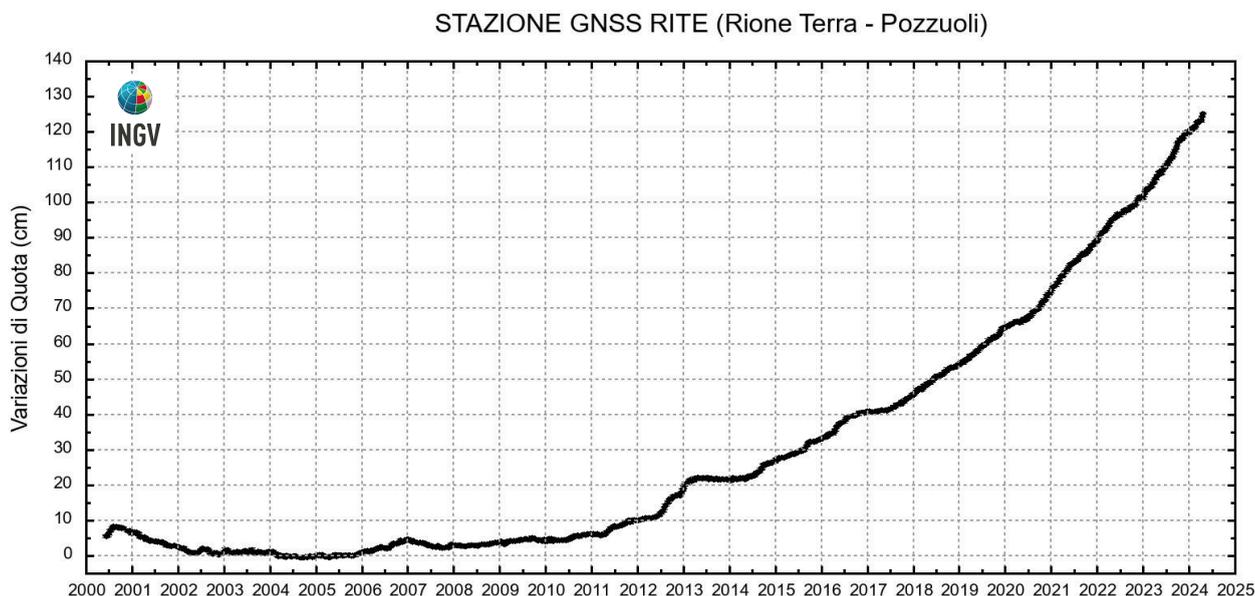


Figura 2.1.3 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di RITE (Pozzuoli – Rione Terra) dal 2000 ad aprile 2024.

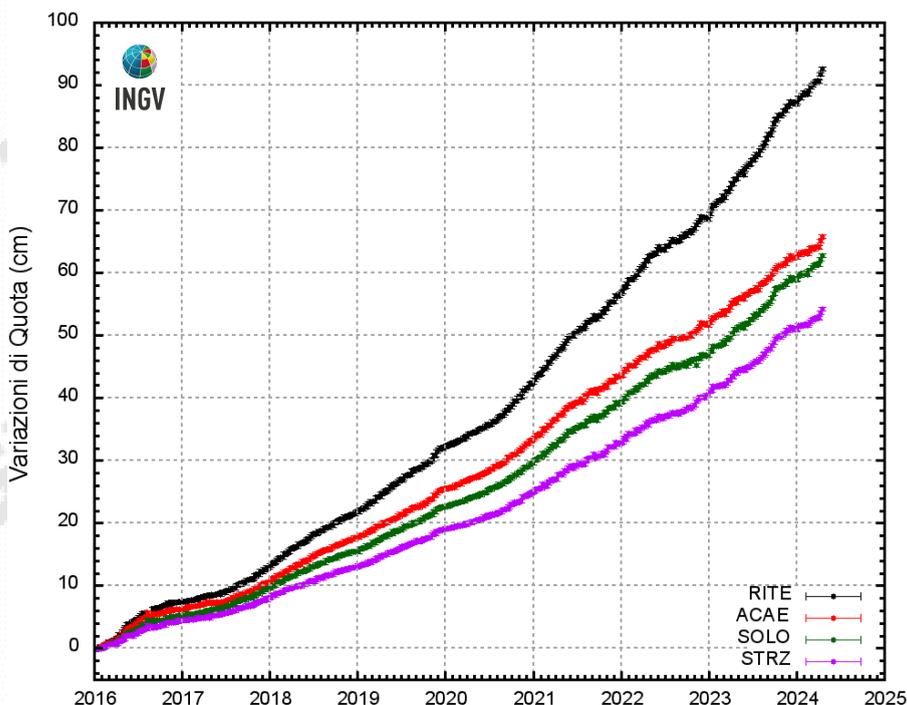


Figura 2.1.4 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di RITE (Pozzuoli - Rione Terra), ACAE (Accademia Aeronautica), SOLO (Solfatara) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) da gennaio 2016 ad aprile 2024.

In Figura 2.1.5 è riportata la mappa dei vettori degli spostamenti orizzontali (a) e delle deformazioni verticali (b) registrati alle stazioni GNSS ai Campi Flegrei dal 2016.

Si conferma la forma radiale del campo di deformazione con la caratteristica forma a campana, simile a quelle già individuate nelle precedenti fasi del sollevamento (De Martino et al., 2021), e la conseguente stabilità della posizione della sorgente di deformazione localizzata qualche centinaio di metri a sud della stazione RITE. Permane la lieve anomalia locale alla stazione GNSS di ACAE dal 2021 riportata nel bollettino mensile di Dicembre 2023.

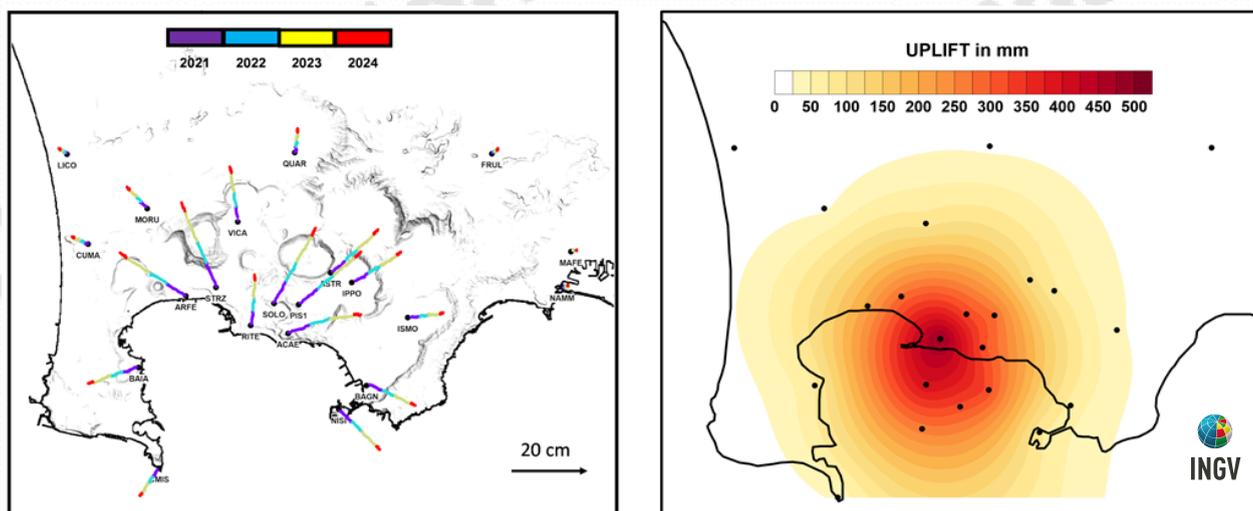


Figura 2.1.5 - Mappa degli spostamenti GNSS orizzontali (a) e verticali (b) registrati nell'area flegrea da gennaio 2021 ad aprile 2024.

Le deformazioni verticali del fondale marino della caldera flegrea registrate dal sistema MEDUSA da aprile 2016 sono riportate in Figura 2.1.6. Alla stazione CFBA il sollevamento totale è di circa 67 cm.

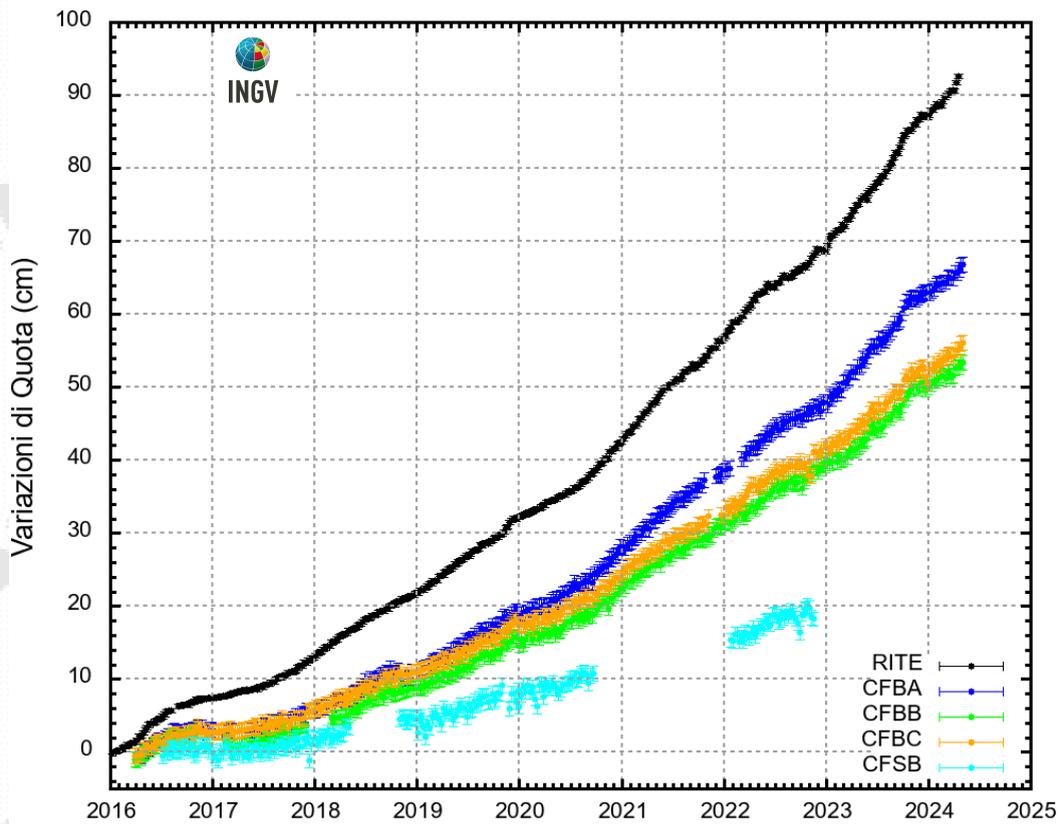


Figura 2.1.6 – Serie temporali delle variazioni settimanali in quota delle stazioni GNSS dell'infrastruttura marina sistema MEDUSA nell'intervallo aprile 2016 - aprile 2024, confrontate con quella della stazione RITE.

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, OLB, 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).

L'alta risoluzione dei sensori tiltmetrici da pozzo consente di registrare variazioni di inclinazione del suolo anche associabili a fenomeni locali dovuti a migrazione di fluidi in aree ad elevata fratturazione che si sovrappongono alle variazioni dovute al campo di deformazione principale dovuto all'uplift in corso nella caldera flegrea (Falanga et al., 2023).

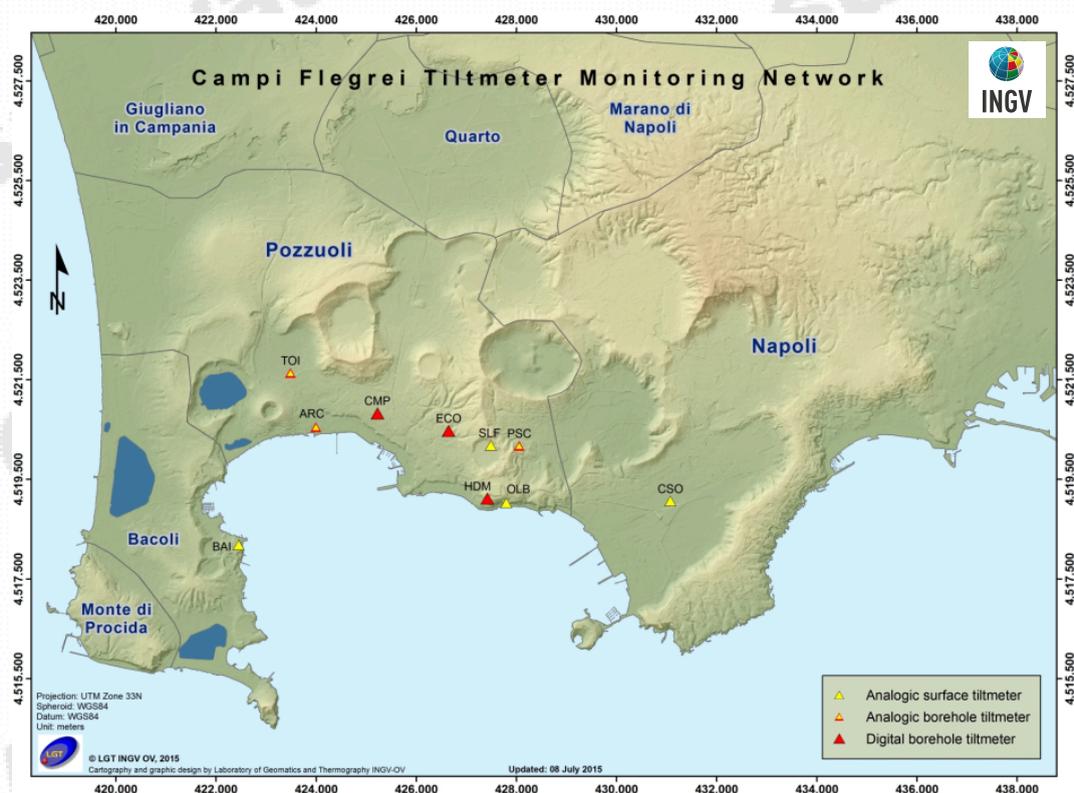


Figura 2.2.1 – Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei (DOI: 10.5281/zenodo.5886962).

Di seguito sono rappresentate le serie temporali e plot del tilt delle stazioni digitali da pozzo (ECO, HDM e CMP) degli ultimi 12 mesi (maggio 2023 - aprile 2024). I segnali nei grafici sono filtrati dalle componenti mareali diurna e semidiurna. In particolare nei diagrammi sono rappresentati:

- Componente NS (valori di tilt crescenti nel tempo indicano la variazione di inclinazione del suolo a N)
- Componente EW (valori di tilt crescenti nel tempo indicano la variazione di inclinazione del suolo a E)
- Rappresentazione del vettore inclinazione nel tempo

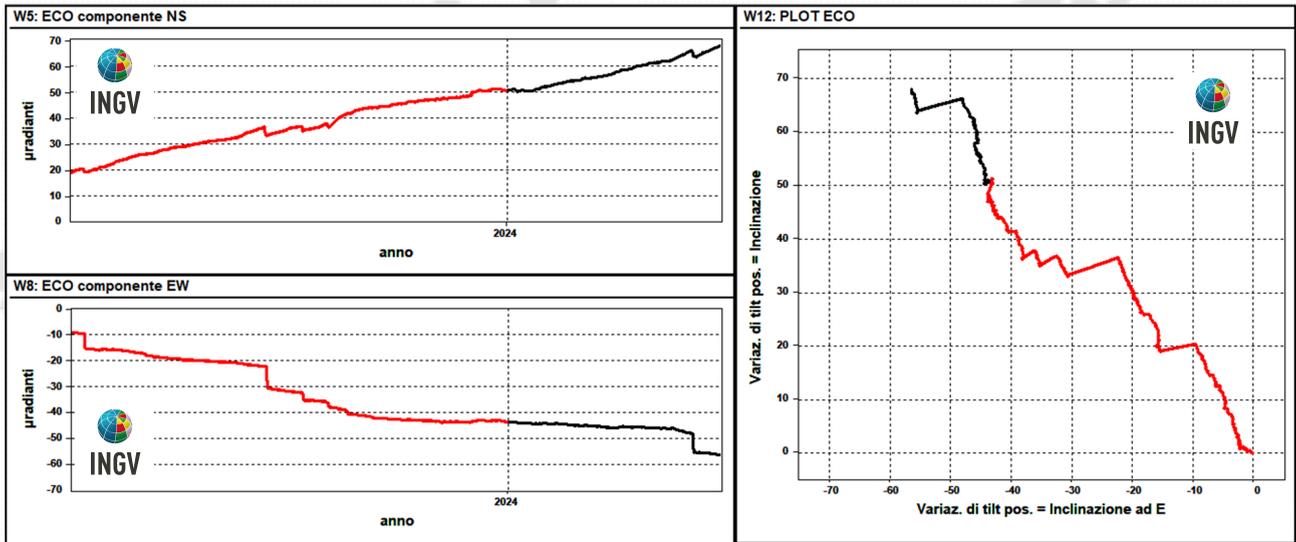


Figura 2.2.2 – Serie temporali e plot del tilt della stazione ECO della rete dei Campi Flegrei registrati negli ultimi 12 mesi (maggio 2023 - aprile 2024).

I segnali registrati alla stazione ECO mostrano, complessivamente, una inclinazione del suolo in direzione NW. Durante l'ultimo anno la componente EW della stazione ECO ha registrato diversi tilt cosmici verso WSW, l'ultimo in corrispondenza degli eventi del 14/04/2024 (Fig. 2.2.2).

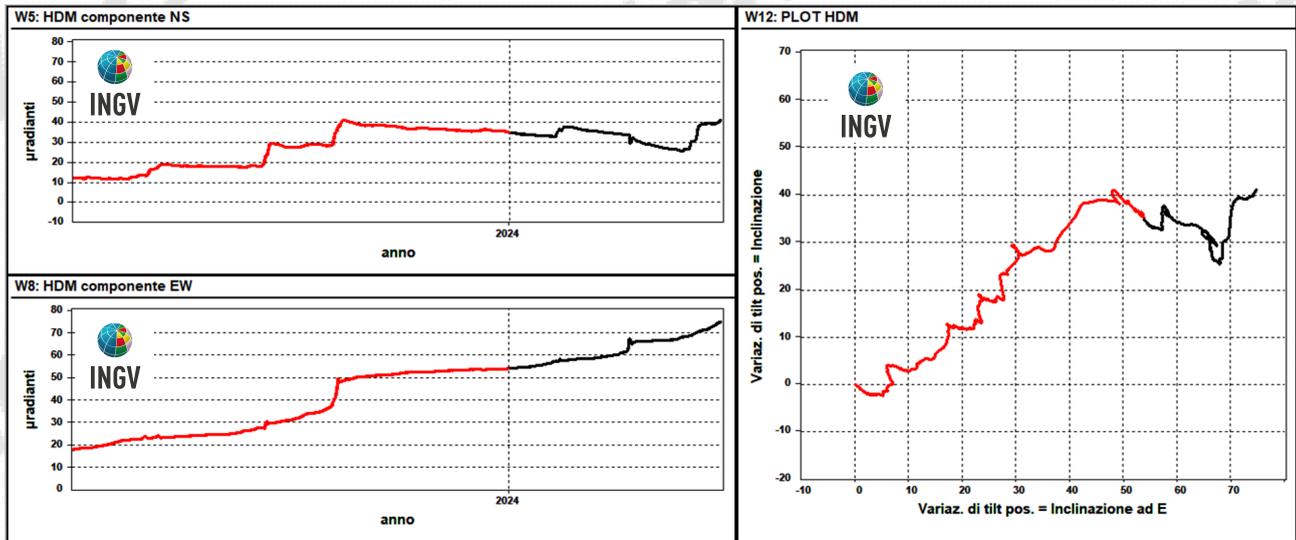


Figura 2.2.3 – Serie temporali e plot del tilt della stazione HDM della rete dei Campi Flegrei registrati negli ultimi 12 mesi (maggio 2023 - aprile 2024).

I segnali registrati alla stazione HDM mostrano, complessivamente, una inclinazione del suolo in direzione NE, pur con delle modeste variazioni negli ultimi mesi e in corrispondenza degli eventi sismici del 03/03/2024 e del 14/04/2024

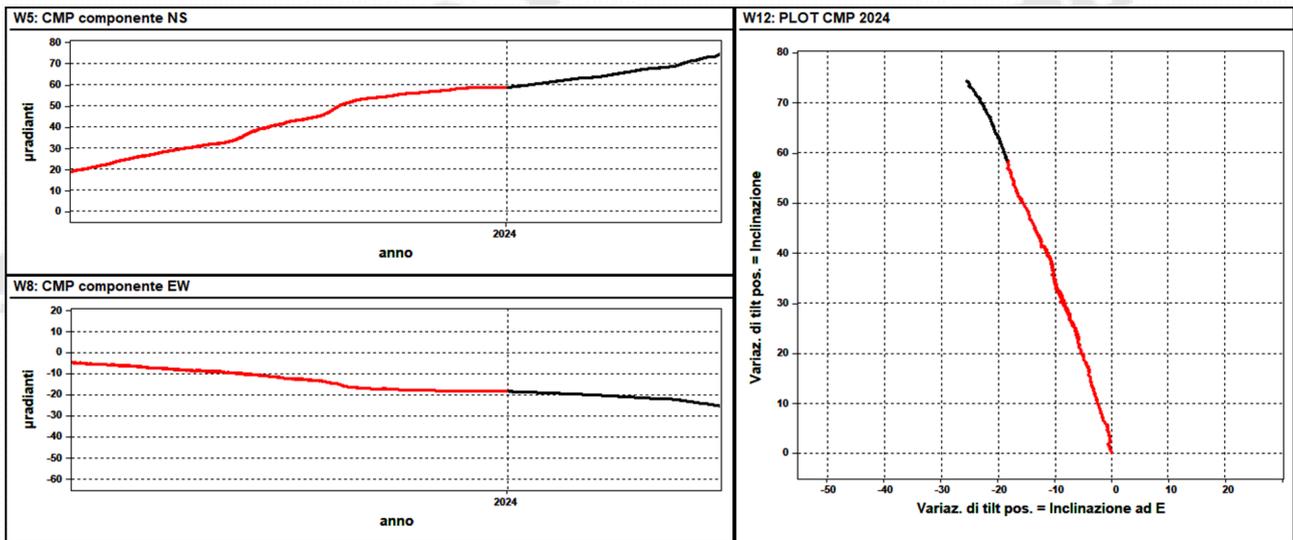


Figura 2.2.3 – Serie temporali e plot del tilt della stazione CMP della rete dei Campi Flegrei registrati negli ultimi 12 mesi (maggio 2023 - aprile 2024).

I segnali registrati alla stazione CMP mostrano, complessivamente, una inclinazione del suolo in direzione NNW

2.3 Mareometria

La Rete Mareografica dei Campi Flegrei è costituita da cinque stazioni con strumentazione basata su sistema a shaft encoder e tecnologia radar (CFB3), ed è riportata in Figura 2.3.1.

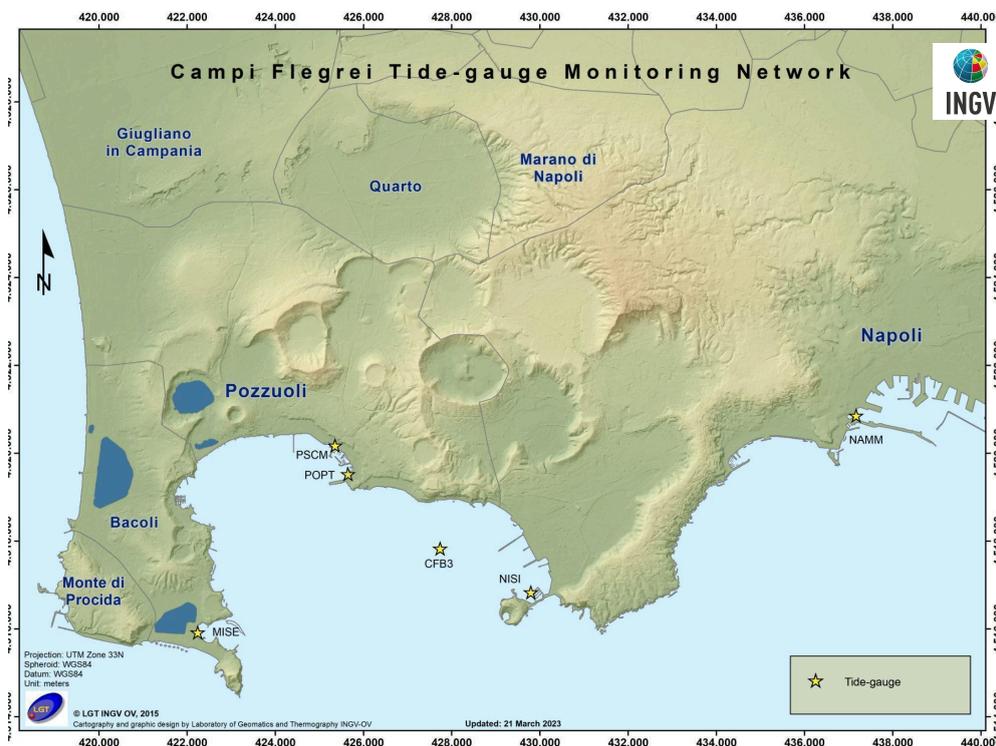


Figura 2.3.1 - Rete Mareografica dei Campi Flegrei.

Nella Figura 2.3.2 sono mostrati i dati mareografici registrati dalla stazione di Pozzuoli Porto (POPT) dai quali si evince un sollevamento dell'area di circa 87.1 cm nel periodo gennaio 2016 – aprile 2024.

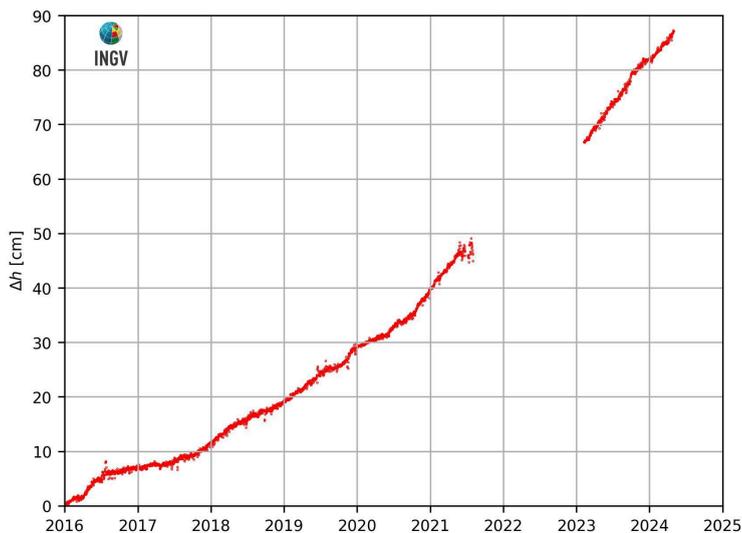


Figura 2.3.2 – Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2016 – aprile 2024, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dalla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT), area centrale della caldera Flegrea. Le variazioni, riportate in cm, rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione mareografica di Napoli, molo San Vincenzo (NAMI).

Nella Figura 2.3.3 sono mostrati i dati mareografici registrati dalla stazione di Pozzuoli Porto (POPT) nel periodo gennaio 2006 – aprile 2024. I dati della serie temporale sono stati raccordati con i dati riferiti all'ex stazione mareografica del Porto di Napoli - NAPT (dismessa a febbraio 2016), potendo considerare questi ultimi omogenei all'interno degli errori di misura.

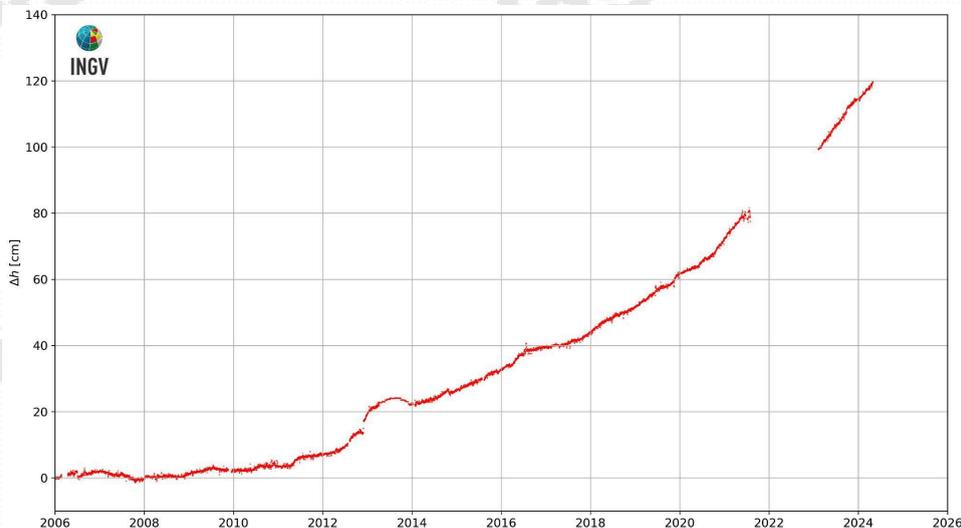


Figura 2.3.3 - Movimenti verticali del suolo nel periodo gennaio 2006 – aprile 2024, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dalla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera Flegrea). Le variazioni, riportate in cm, rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione mareografica di Napoli, molo San Vincenzo (NAMM).

Dal 2006 a oggi, alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto si registra un sollevamento del suolo di circa 119.6 cm. Nella Figura 2.3.4 sono mostrati i dati registrati da tutte le stazioni mareografiche dell'area dei Campi Flegrei nel periodo gennaio 2006 – aprile 2024.

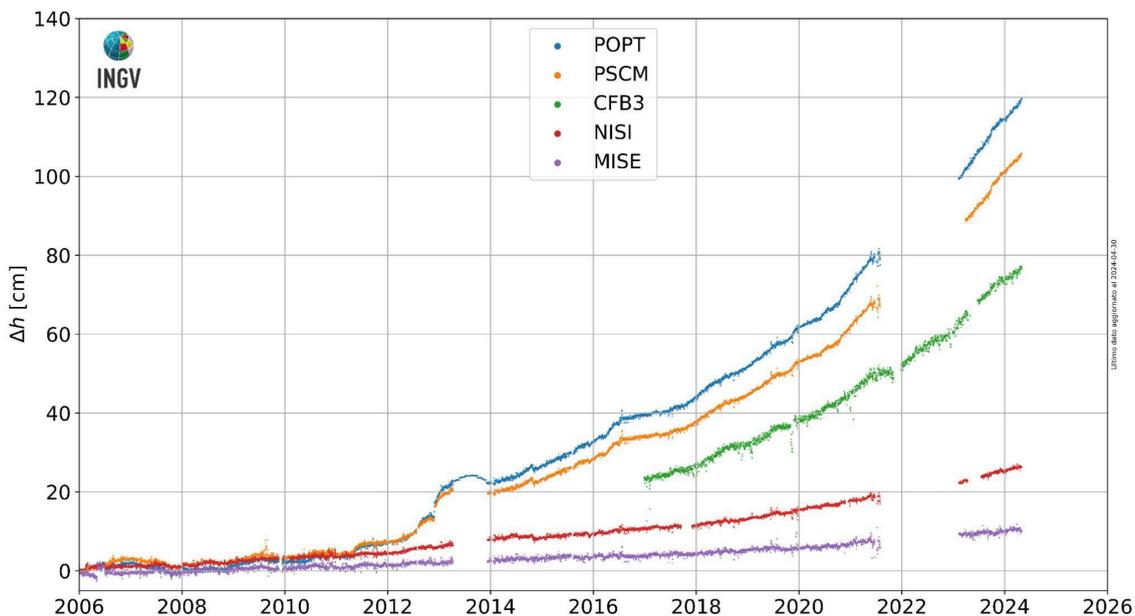


Figura 2.3.4 - Movimenti verticali del suolo nel periodo gennaio 2006 – aprile 2024, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti da tutte le stazioni mareografiche dell'area della caldera Flegrea. Le variazioni, riportate in cm, rappresentano le medie giornaliere e sono tutte riferite alla stazione mareografica di Napoli, molo San Vincenzo (NAMM).

2.4 Gravimetria relativa (misure in continuo)

A partire da gennaio 2023 sono in corso delle misure gravimetriche in continuo con un gravimetro gPhoneX (#116) installato presso l'Oasi Naturale WWF di Astroni. I dati raw acquisiti vengono processati per rimuovere i contributi gravimetrici legati alle maree, gli effetti di tilt, atmosferici, dei terremoti e la deriva strumentale.

La serie temporale raw di gravità, nel periodo 25 Marzo-30 Aprile e la serie temporale residua sono riportate in Figura 2.4.1a-b. Si osservano due periodi di interruzione nei dati a causa di problemi tecnici in fase di acquisizione (bande verticali grigie). Nella serie raw si osserva l'effetto di alcuni terremoti avvenuti in area Flegrea (in particolare gli effetti del Md 3.2 avvenuto il 3 Aprile e del Md 3.9 del 27 Aprile) e del terremoto di Mw 7.4 avvenuto a Taiwan; nella serie residua invece si osserva un incremento dell'ampiezza dei residui in corrispondenza di periodi caratterizzati da avverse condizioni meteorologiche. Nel corso del mese di Aprile il PC, che gestisce l'acquisizione dati del gPhonex#116, ha sofferto di due "stalli" dovuti ad instabilità del sistema operativo, le cui cause sono in via di accertamento; ciò ha comportato una perdita di dati. Pertanto 2 gap (bande grigie in Fig. 2.4.1) con inizio il 5 Aprile (durata 4 giorni) e 12 Aprile (durata 3 giorni) caratterizzano attualmente la serie acquisita. Esclusi questi effetti, la serie temporale residua mostra variazioni di limitata ampiezza ($< 5 \mu\text{Gal}$) nel periodo considerato.

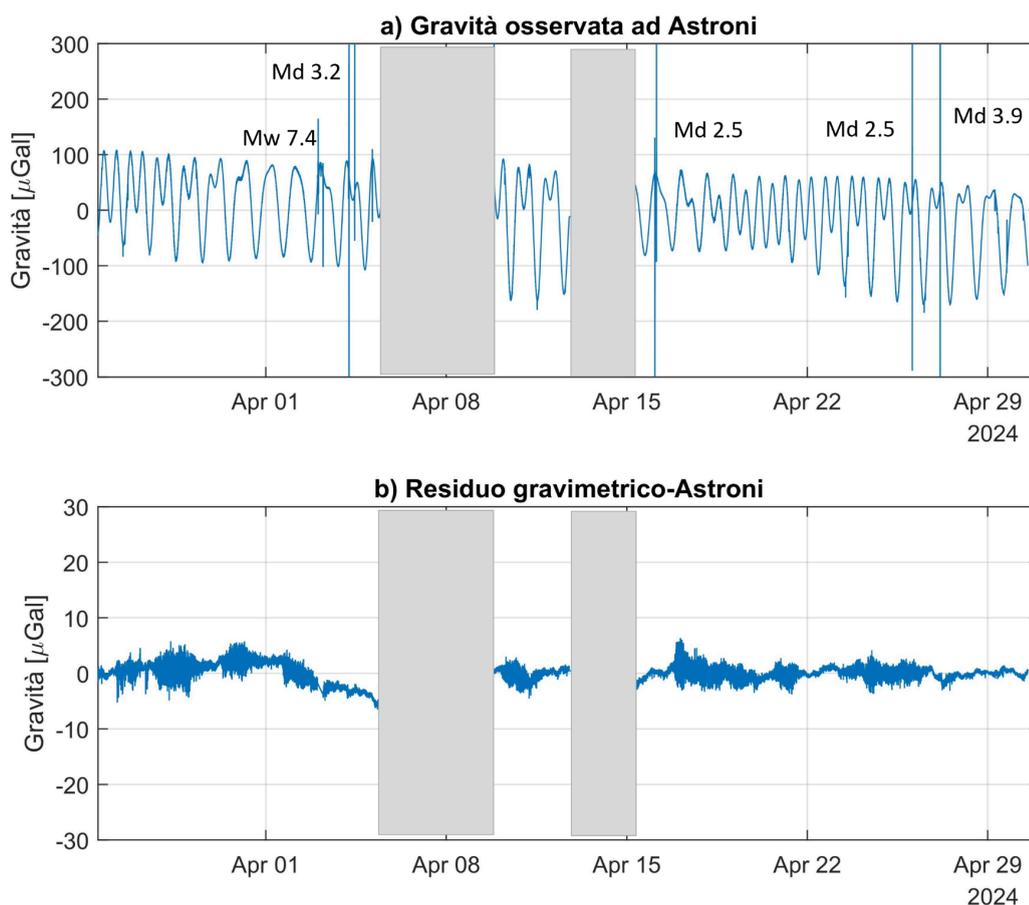


Figura 2.4.1 a: serie temporale raw (risoluzione temporale 1 minuto) registrata dal gPhone. Si osserva il contributo dominante delle maree. b: serie residua di gravità; le variazioni di gravità hanno ampiezza limitata, generalmente inferiori ai $5 \mu\text{Gal}$. I periodi di interruzione delle osservazioni per problemi al PC di acquisizione sono riportati con delle bande grigie verticali.

2.5 Dilatometria

La rete dilatometrica installata ai Campi Flegrei consta di 4 siti d'acquisizione (Figura 2.5.1), equipaggiati con dilatometri Sacks-Evertson installati a partire dal 2004 grazie al progetto DINEV (siti Quarto, Monterusciello e Rione Toiano) e VULCAMED (sito Pozzuoli), in collaborazione con il gruppo di ricerca della Carnegie Institution of Washington DC (USA). Attualmente il solo dilatometro di Quarto è in acquisizione, tramite il proprio datalogger SHOE-box, gli altri saranno ripristinati a breve nell'ambito delle attività di riorganizzazione della rete Dilatometrica

I dilatometri di Sacks-Evertson hanno precisioni nominali dell'ordine di 10^{-12} , rispetto ad ampi intervalli di frequenze (da 10^{-7} fino a 10^2 Hz), e sono caratterizzati da un'elevata dinamica (140 dB). I dilatometri sono installati in pozzi di profondità compresa tra 120 e 180 m per minimizzare l'effetto delle variazioni termiche in superficie e delle attività antropiche sulla registrazione dei dati. Essi misurano le variazioni del campo di strain locale: il dato così acquisito è espresso come una grandezza adimensionale, e rappresenta la variazione relativa della dimensione del volume monitorato.

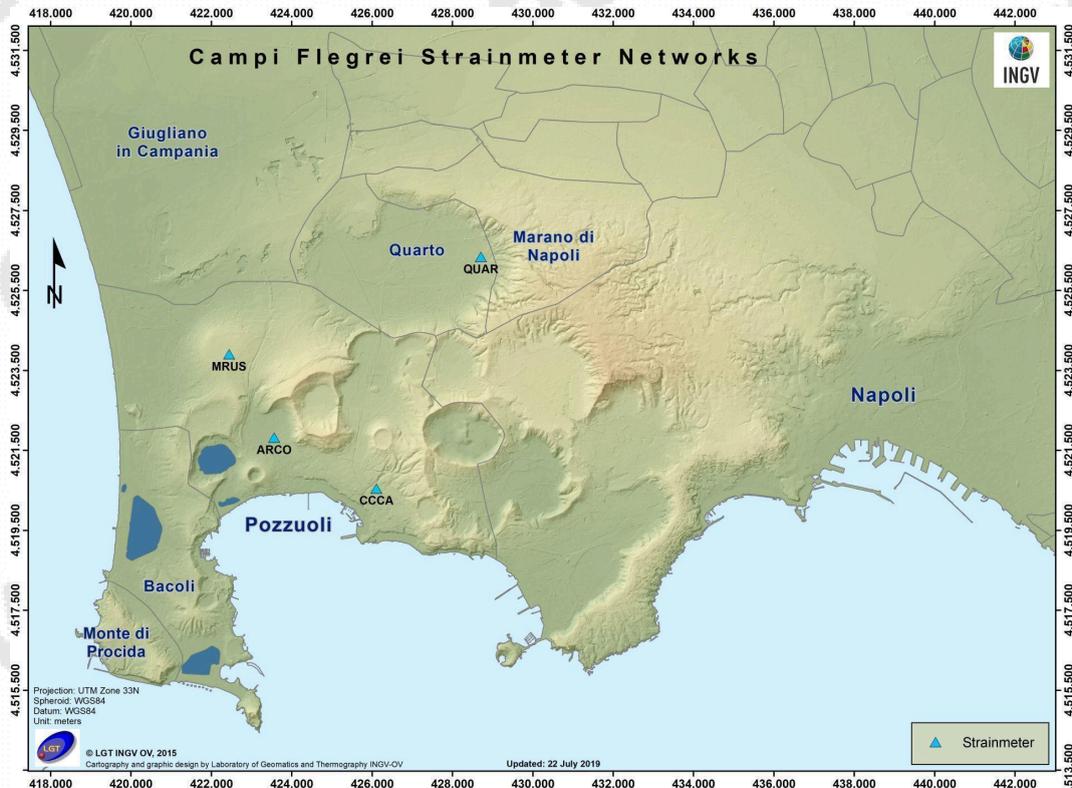


Figura 2.5.1 – Rete Dilatometrica dei Campi Flegrei

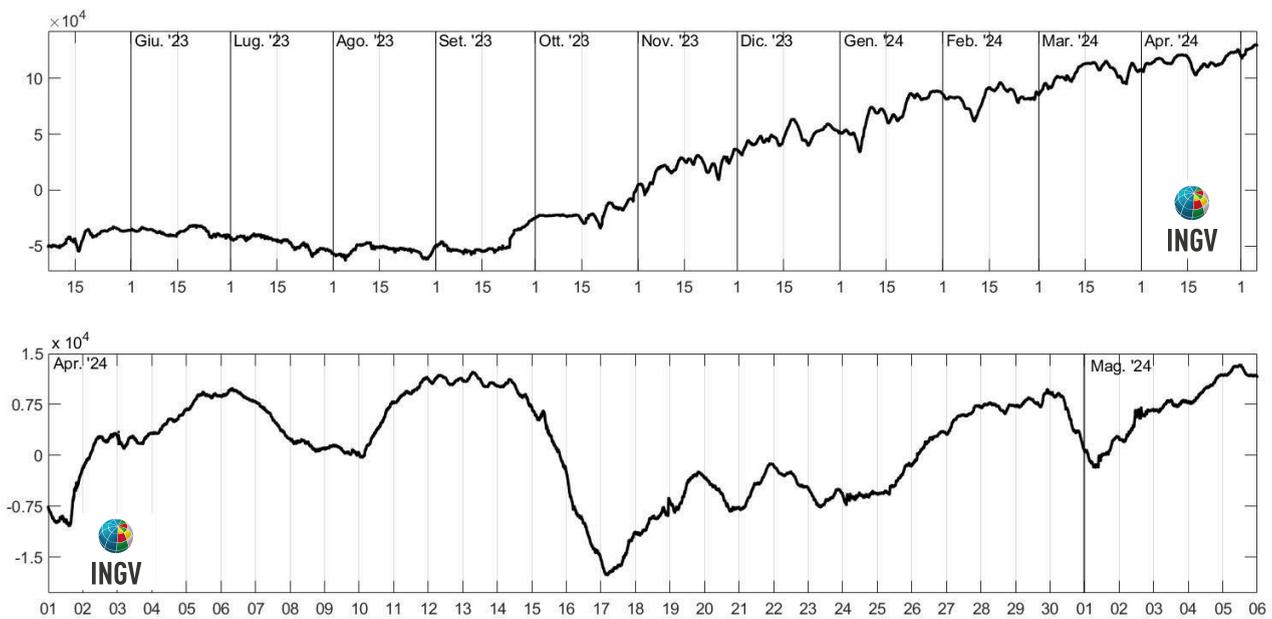


Figura 2.5.2 - a) Strain registrato nell'ultimo anno, dalle 00:00 UTC del 7/5/2023 alle 24:00 UTC del giorno 5/5/2024. b) Strain registrato nell'ultimo mese, dalle 00:00 UTC del giorno 1/4/2024 alle 24:00 UTC del giorno 5/5/2024.

Nel dato dilatometrico, durante l'ultimo mese, non si osservano variazioni significative per l'andamento dello strain.

3. MONITORAGGIO TERMICO AD IMMAGINE

3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine

La stazione SF2 della Rete Permanente di Monitoraggio Termico dei Campi Flegrei (TIRNet) acquisisce immagini notturne all'infrarosso termico con risoluzione 640x480 del settore settentrionale del versante interno del cratere della Solfatara, mentre la stazione PS1 acquisisce immagini 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).

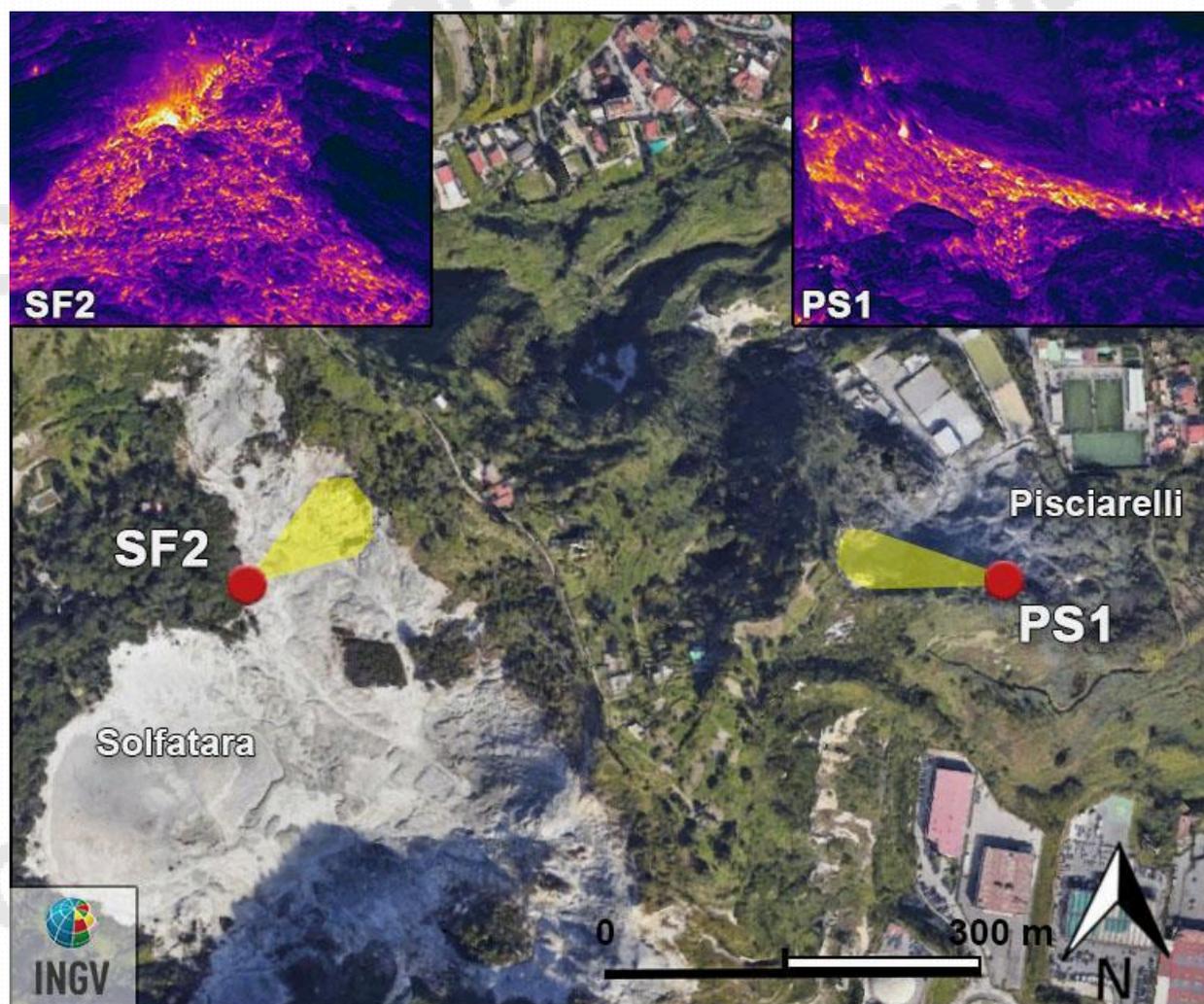


Figura 3.1.1 - Mappa della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad immagine (TIRNet) con l'ubicazione delle stazioni SF2 e PS1. Pallini rossi: indicano i punti di ripresa; aree gialle: indicano schematicamente le aree acquisite.

Le figure seguenti mostrano l'elaborazione delle serie temporali dei valori di temperatura massima delle immagini IR acquisite dalle stazioni SF2 (Fig. 3.1.2) e PS1 (Fig. 3.1.3), processati con metodologia di rimozione della stagionalità basata sull'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition; Vilardo et al., 2015, Sansivero et al., 2019). I trend a lungo termine sono ottenuti applicando un fitting LOESS di 2° alle temperature massime destagionalizzate con STL.

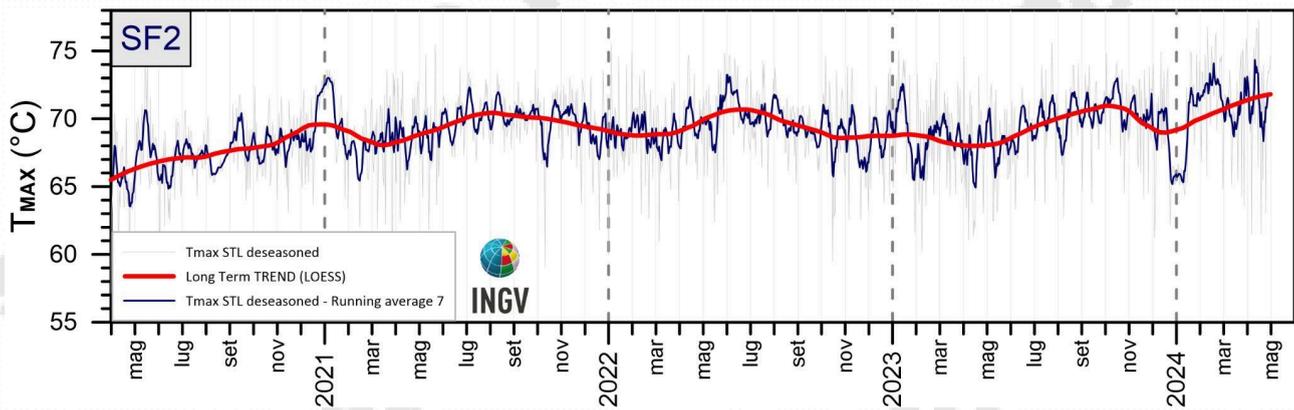


Figura 3.1.2 - Stazione SF2: Serie temporali dei valori di temperatura massima giornaliera rilevata nelle immagini IR, destagionalizzate mediante applicazione dell'algoritmo STL [medie settimanali (blu); trend a lungo termine (rosso)]. Il trend a lungo termine è ottenuto applicando un fitting LOESS di 2° alle temperature massime destagionalizzate.

I valori di temperatura al suolo rilevati dalla **stazione SF2** (Fig. 3.1.2) raggiungono un rilevante picco positivo intorno alla metà del mese di aprile 2024 per poi ritornare ai valori medi registrati nel mese precedente. Il trend a lungo termine (in rosso) mostra valori soggetti a lieve aumento negli ultimi mesi.

La **stazione PS1** (Fig. 3.1.3) mostra una forte oscillazione dei valori di temperatura al suolo intorno alla metà del mese di aprile 2024 seguita da un ritorno ai valori medi del mese precedente. Il trend a lungo termine (in rosso) evidenzia il perdurare della lieve tendenza all'aumento dei valori di temperatura al suolo, iniziata da gennaio 2024.

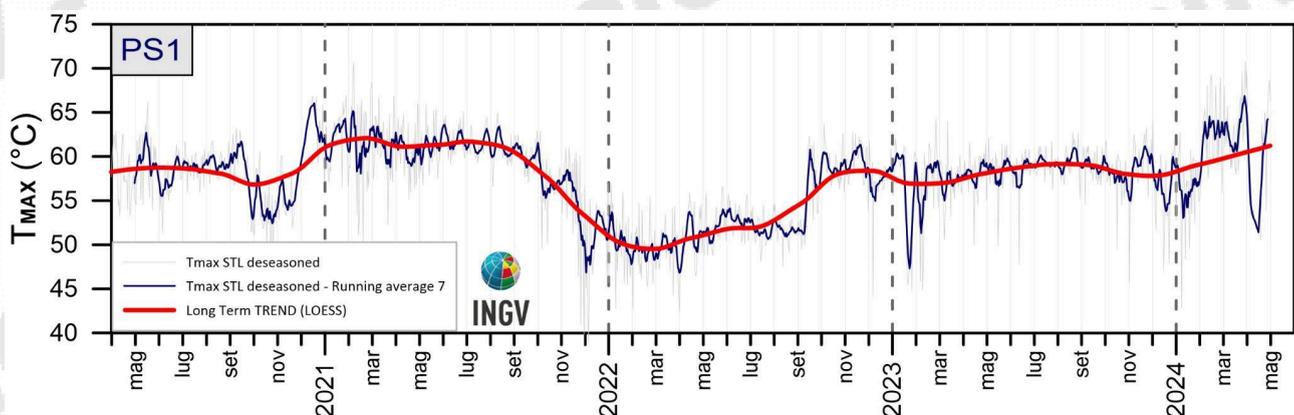


Figura 3.1.3 - Stazione PS1. Serie temporali dei valori di temperatura massima giornaliera rilevata nelle immagini IR destagionalizzate mediante applicazione dell'algoritmo STL [medie settimanali (blu); trend a lungo termine (rosso)]. Il trend a lungo termine è ottenuto applicando un fitting LOESS di 2° alle temperature massime destagionalizzate.

Il trend a lungo termine (ottobre 2007 – aprile 2024) delle temperature massime superficiali rilevate dalle immagini IR acquisite alla **stazione PS1** nel mese di aprile 2024, ottenuto mediante applicazione di un fitting LOESS di 2° su temperature massime destagionalizzate con algoritmo STL (Fig. 3.1.4), conferma l'aumento registrato a partire dalla seconda metà del 2023.

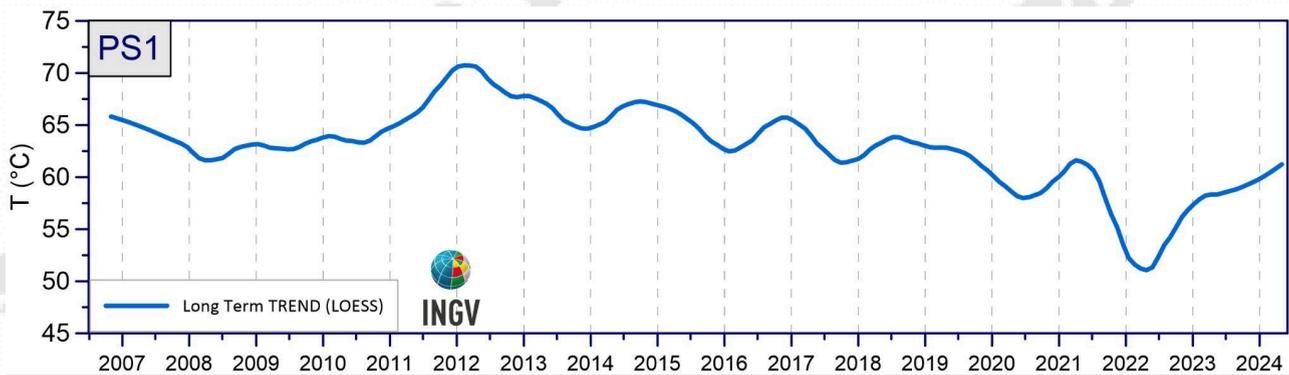


Figura 3.1.4 - Stazione PS1: Trend a lungo termine dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR ottenute mediante applicazione di fitting LOESS di 2° alle temperature massime destagionalizzate con algoritmo STL.

3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile, Termocoppia e Drone

La sorveglianza vulcanica tramite Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide ha come principale obiettivo l'individuazione di eventuali variazioni 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 ($<0.06 \div +30$ °C). La termocoppia utilizzata è di tipo K, con errore strumentale di circa 0.1°C nell'intervallo $-200 \div +1260$ °C. Le misure ottenute con la termocamera sono confrontate, quando possibile, con quelle eseguite con termocoppia rigida.

Da dicembre 2020 si utilizza una nuova termocamera FLIR T1020 con una maggiore risoluzione (1024 x 768 pixel). Quando possibile, contemporaneamente alla FLIR T1020 si continua ad utilizzare anche la FLIR SC640. La doppia misura ha consentito di calibrare i valori rilevati con la nuova termocamera.

Da aprile 2019, in alcuni siti e quando le condizioni lo consentono, contestualmente alla FLIR T1020, le misure di temperatura vengono rilevate anche con l'ausilio di un drone equipaggiato con una termocamera FLIR VUEPRO ad alta risoluzione (640x512 pixel) e precisione ± 5 °C.

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).

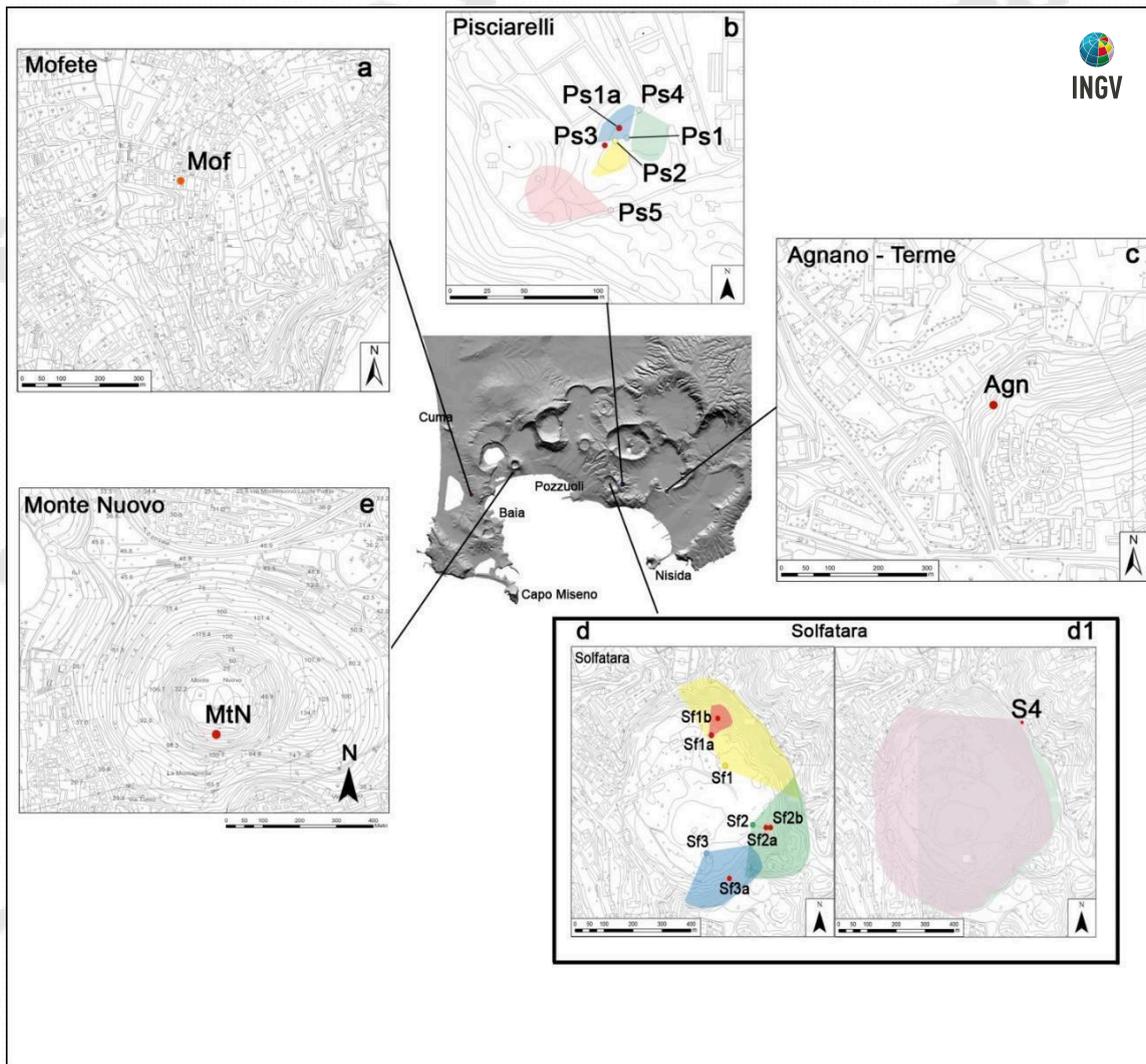


Figura 3.2.1 – Ubicazione dei punti di misura e dei settori indagati ai Campi Flegrei. I pallini rossi indicano i punti stazione dove sono stati effettuati rilievi con termocoppia rigida e telecamera termica. Nel riquadro b, le aree colorate celeste, verde e rosa indicano i versanti rilevati con termocamera 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, in rosa, l'area rilevata con termocamera dalla stazione S4.

In generale, non si osservano variazioni significative di temperatura massima e modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico nei diversi punti di misura. Di seguito si riportano le osservazioni e i dati relativi al mese di aprile corrispondenti ai tre siti di misura selezionati (Pisciarelli, Monte Nuovo e Agnano Terme).

Pisciarelli

A Pisciarelli l'allargamento dell'area della polla è aumentato al punto da impedire l'accesso a tutti i siti di misura (Fig. 3.2.1b). Di conseguenza, il rispetto delle procedure di sicurezza non consente di effettuare le misure strumentali nell'area più prossima alla polla. Pertanto dal mese di aprile 2019 i rilievi sono effettuati prevalentemente con l'ausilio di un drone.

La fotocomposizione termica, come mostrato nei bollettini dei mesi precedenti, evidenzia due aree con maggiore anomalia termica, denominate PsD1 e PsD2 (Fig. 3.2.2a). L'area PsD1 racchiude i versanti che in passato venivano rilevati con termocamera a mano dalle stazioni Ps1 e Ps4 mentre l'area PsD2 include il versante rilevato in passato dalla stazione Ps5 (Fig.3.2.1d), in corrispondenza della telecamera termica fissa TIMNet dell'OV.

I valori di temperatura massima rilevati nel mese di aprile 2024 non presentano variazioni significative rispetto ai mesi precedenti (Fig. 3.2.2b).

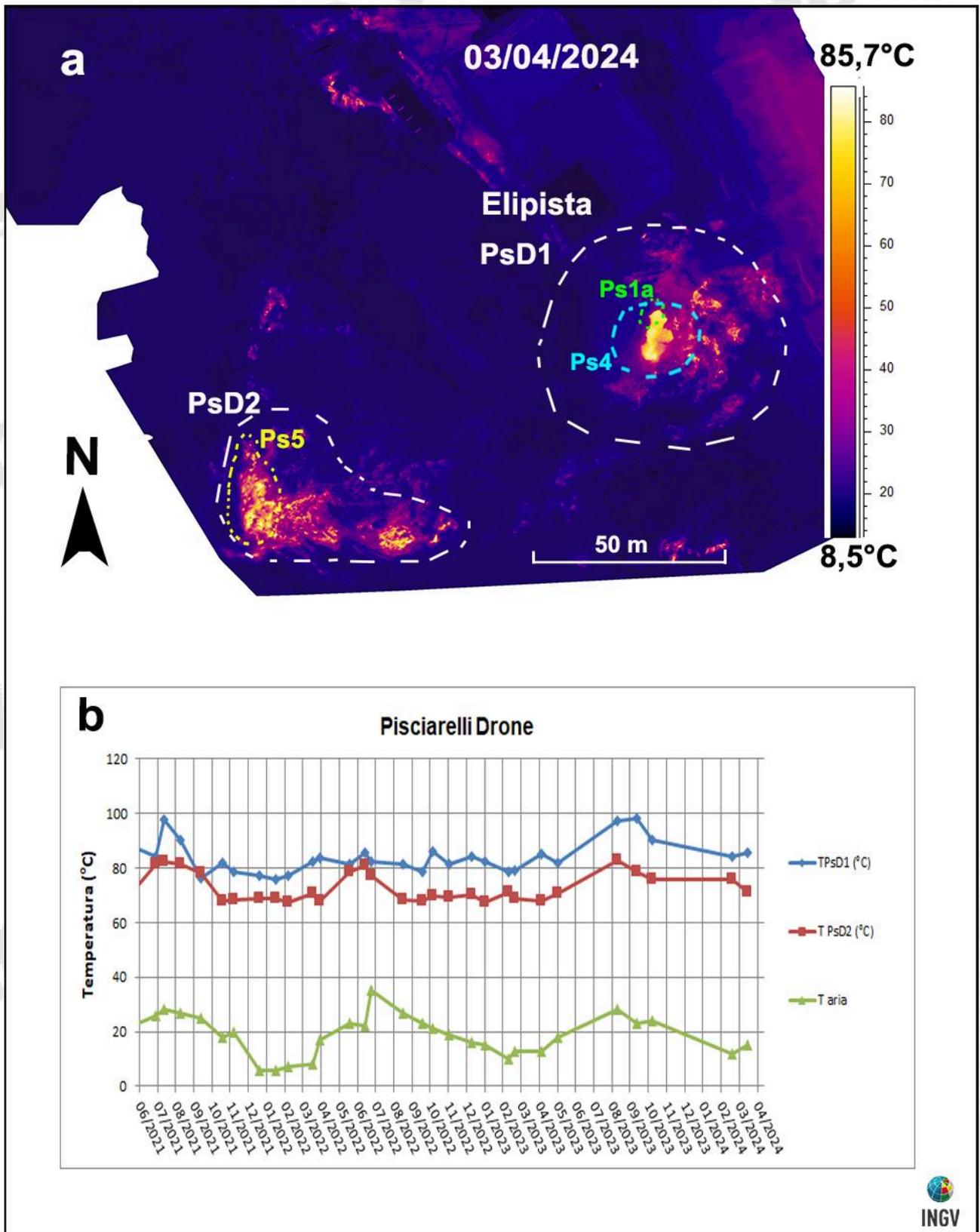


Figura 3.2.2 – Fotocomposizione di immagini termiche rilevate da drone nel mese di aprile 2023 (a) e valori massimi di temperatura (T) delle aree a maggiore anomalia termica (PsD1 e PsD2) confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico da giugno 2021 ad aprile 2024 (b).

Monte Nuovo

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

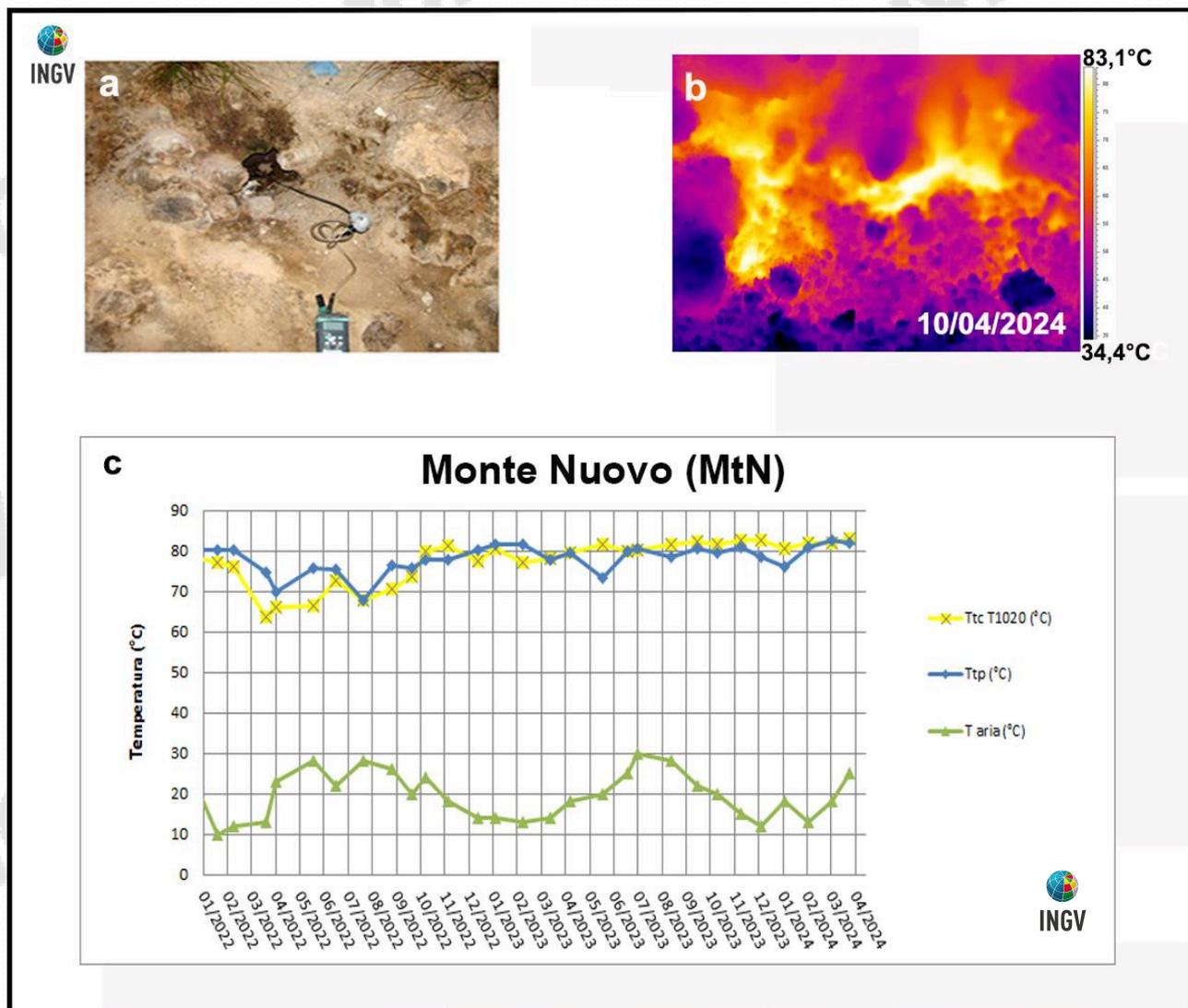


Figura 3.2.3 – Fumarola lungo il versante meridionale di Monte Nuovo. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto MtN di figura 3.2.1e. Valori massimi di temperatura rilevati con la termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con la termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 ad aprile 2024 (c).

Agnano Terme

I valori di temperatura rilevati 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 a meno di variazioni stagionali (Fig. 3.2.4).

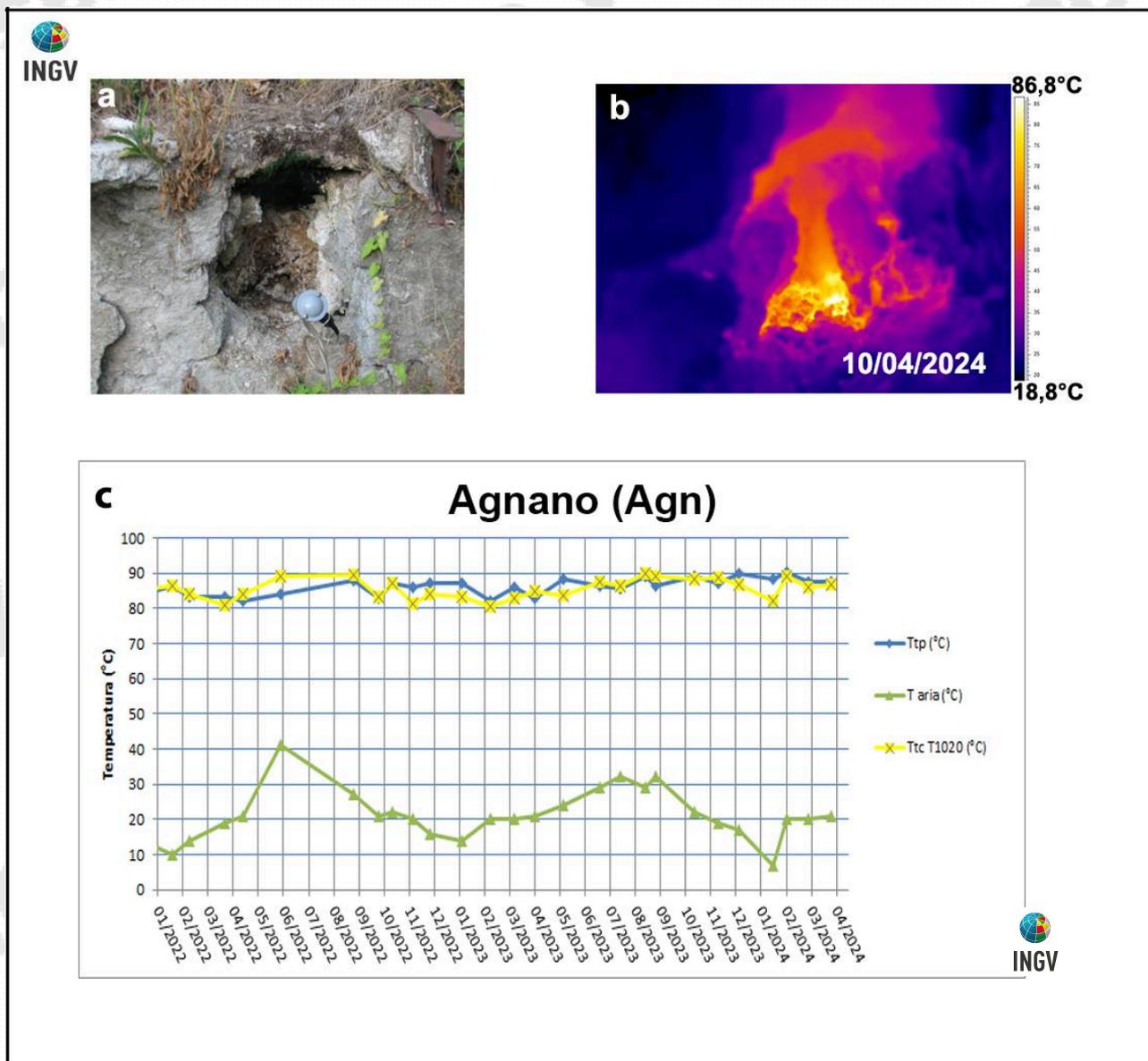


Figura 3.2.4 – Fumarola all’interno dello stabilimento termale delle “Terme di Agnano”. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Agn di Figura 3.2.1c. Valori massimi di temperatura rilevati con la termocamera FLIR T1020 (TtcT1020) e con la termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria (Taria) misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2022 ad aprile 2024 (c).

4. GEOCHIMICA DEI FLUIDI

L'attività di monitoraggio svolta nel mese di aprile 2024 ai Campi Flegrei (Fig. 4.1) ha riguardato:

- l'acquisizione in continuo del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura della fumarola BG e del gradiente termico nel cratere della Solfatara (stazioni V03, che sostituisce la FLXOV1, FLXOV5 e GTS1);
- l'acquisizione in continuo dei dati di flusso di CO₂ 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 una fumarola nell'area di Pisciarelli;
- misure di flusso di CO₂ dal suolo e temperatura del suolo su punti fissi selezionati nell'area della Solfatara e di Pisciarelli.

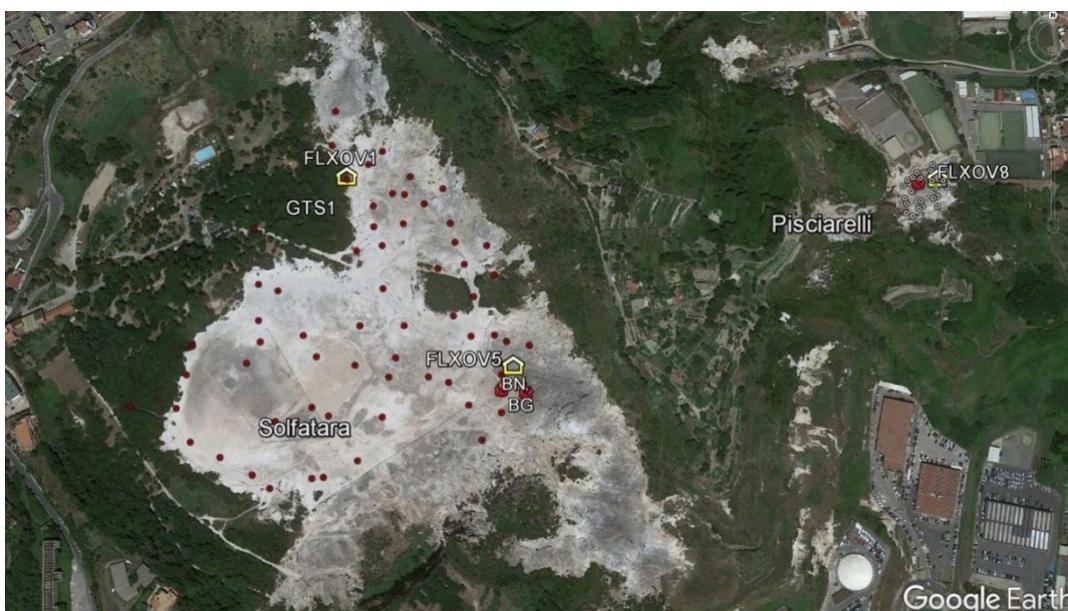


Figura 4.1 - Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. In particolare sono riportate le quattro stazioni geochimiche ubicate in area Solfatara-Pisciarelli, le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e di Pisciarelli, sono inoltre riportati i punti fissi per la misura del flusso di CO₂ 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, 2021), ai quali si rimanda per approfondimento.

Le analisi di laboratorio dei campioni prelevati evidenziano il perdurare dei trend di riscaldamento e pressurizzazione del sistema idrotermale già identificati in precedenza (vedi Bollettini di Sorveglianza precedenti; Figg. 4.2 - 4.5).

Il rapporto CO₂/H₂O delle fumarole (Fig. 4.2) nei campioni di aprile 2024 continua a mostrare valori elevati (~0.41 per la fumarola BG e ~0.42 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 di 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; 2021). 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; Buono et al., 2023).

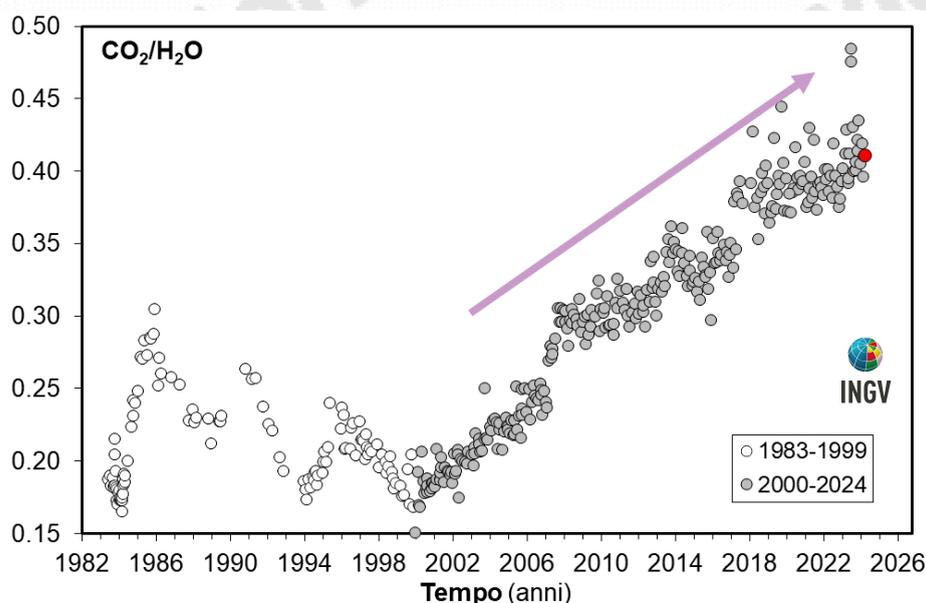


Figura 4.2 - Cronogramma del rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ per la fumarola BG. In grigio sono riportati i dati a partire dal 2000, quando è iniziato un trend d'aumento del rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, in generale, indicativo di una crescente frazione della componente magmatica nei fluidi fumarolici. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di aprile 2024.

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, i valori di concentrazione 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, particolarmente marcato a partire dai campioni del 2018, trend che ha raggiunto un massimo nel luglio 2020, per poi invertirsi fino ai primi mesi del 2022, quando inizia un nuovo aumento fino a settembre 2022 (fumarola BG, Fig. 4.3). I campioni degli ultimi mesi non mostrano ancora un trend ben definito, pur rimanendo su valori elevati.

Tale variazione è, 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 (DP) D'Amore and Panichi (1980), che in generale ben descrive la f_{O_2} in molti sistemi idrotermali del mondo, il trend del CO corrisponderebbe a un aumento di temperatura di circa $35\text{ }^\circ\text{C}$ dagli inizi degli anni 2000 (T circa $215\text{ }^\circ\text{C}$) a oggi (T circa $250\text{ }^\circ\text{C}$), raggiungendo un massimo (T $\sim 263\text{ }^\circ\text{C}$) nel 2018 (Fig. 4.4). In particolare, il campione del mese di aprile 2024 non mostra variazioni significative della concentrazione di CO e della temperatura stimata ($\sim 245\text{ }^\circ\text{C}$) rispetto al mese precedente.

Il processo di riscaldamento del sistema flegreo e le possibili cause sono trattate nei lavori scientifici di Chiodini et al. (2015a; 2016; 2021) a cui si rimanda per approfondimento.

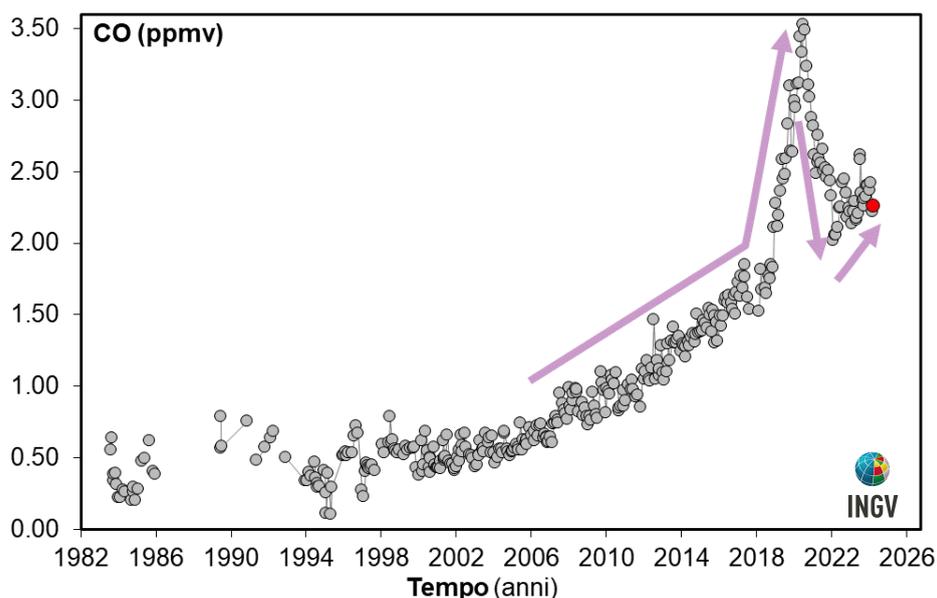


Figura 4.3 – Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di aprile 2024. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici a elevata temperatura, mentre fumarole alimentate da 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.

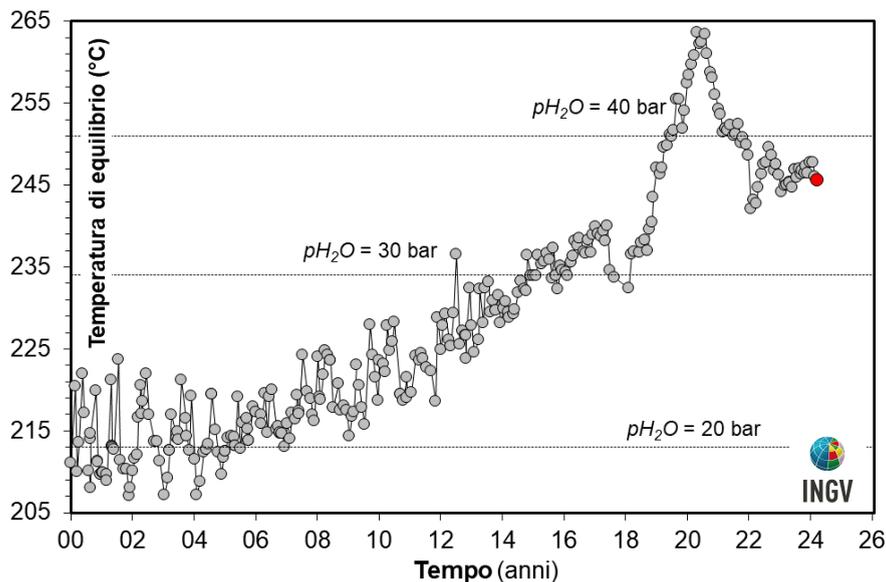


Figura 4.4 – Cronogramma delle temperature di equilibrio per il sistema CO-CO₂, relativo alla fumarola BG, stimate assumendo condizioni redox fissate dalla relazione di D'Amore and Panichi (1980). Tali temperature, rappresentative della parte più superficiale del sistema idrotermale (Caliro et al., 2007), mostrano un trend in aumento a partire dai primi anni del 2000. Con il simbolo rosso è evidenziato il campione di aprile 2024.

Il cronogramma del rapporto CO₂/CH₄ (Fig. 4.5) mostra picchi interpretati come dovuti all'arrivo di fluidi magmatici ossidanti e a basso contenuto in CH₄ nel sistema idrotermale (Chiodini 2009;

Chiodini et al., 2010; 2011; 2012). I vari picchi corrisponderebbero, quindi, a eventi di degassamento magmatico, avvenuti in precedenza, 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 del picco, che ha raggiunto il massimo nel 2017.

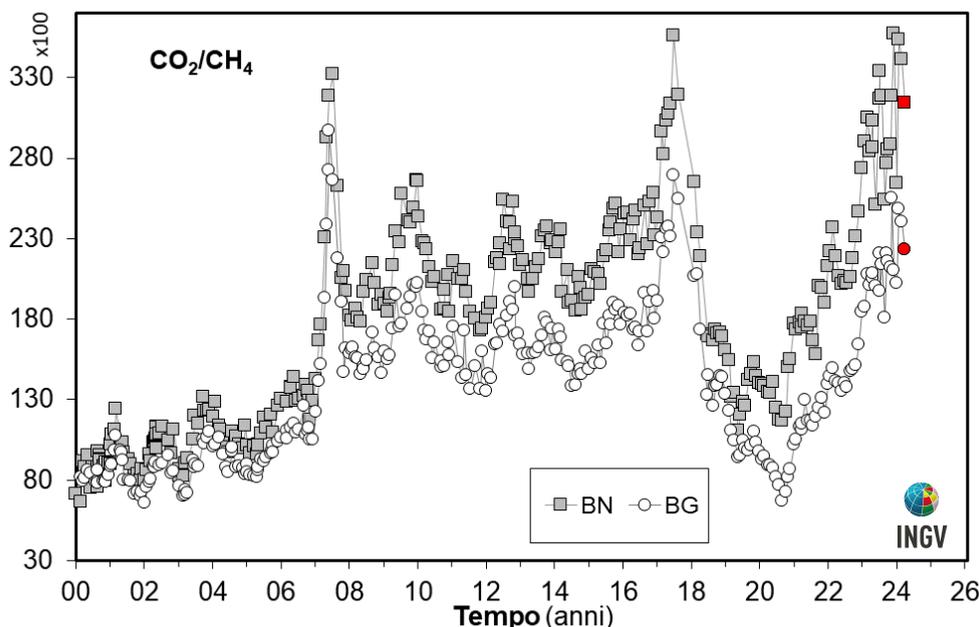


Figura 4.5 – Variazioni del rapporto CO_2/CH_4 per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico avvenuti ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). Con il simbolo rosso sono evidenziati i campioni di aprile 2024.

Dalla fine del 2020 è iniziato un nuovo moderato trend d'aumento del rapporto CO_2/CH_4 sul quale è possibile riconoscere due picchi minori con i massimi ad aprile 2021 e marzo 2022, il trend d'aumento continua fino a raggiungere un massimo nel dicembre 2023. La persistenza di un 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, mostrato nel periodo 2018-2021 evidenzia una variazione del comportamento del sistema idrotermale in risposta a un'iniezione di fluidi magmatici, rispetto a quanto mostrato nei periodi precedenti. I fluidi emessi dal sistema idrotermale, nel periodo 2018-2021, mostrano caratteristiche più riducenti, che secondo le più recenti interpretazioni possono essere indotte da estesi processi di condensazione del vapore nella parte superficiale del sistema in risposta all'aumento delle condizioni di pressione e temperatura. I campioni di aprile 2024 mostrano una lieve diminuzione del valore, ma in generale confermano il trend di aumento del rapporto CO_2/CH_4 .

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 (Fig. 4.6). 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).

Queste misure (~60 punti, Target area in Fig. 4.6a), sono state confrontate con i dati di flusso totale emesso dall'area di degassamento, misurato nelle campagne estese eseguite fino al 2016 (~400

misure per campagna, Cardellini et al., 2017), successivamente sospese fino al 2022, per le note difficoltà di accesso all'area del cratere della Solfatara.

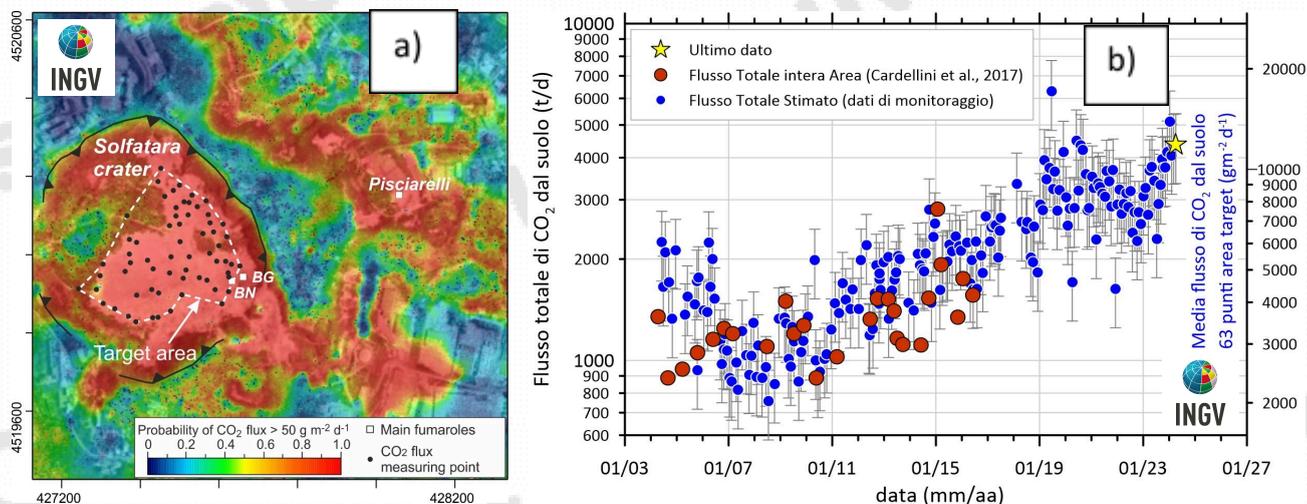


Figura 4.6 – a) Mappa dell'area di degassamento diffuso della Solfatara-Pisciarelli (Cardellini et al., 2017), con l'ubicazione dell'area target; b) Cronogramma dei flussi di CO₂, i punti blu si riferiscono all'emissione dall'area target scalati sull'intera DDS, ottenuta dal confronto con i dati delle 30 campagne estese (simboli rossi) in Cardellini et al. (2017).

La correlazione tra i valori di flusso misurati nell'area target e l'area estesa, ha permesso di stimare un valore medio del flusso dell'intera area di degassamento in ~3200 t/d nel 2020 (Chiodini et al., 2021) e ~3500 t/d nel 2023, valori paragonabili al flusso medio di CO₂ nel *plume* di vulcani attivi a degassamento persistente.

La relazione tra i valori stimati di flusso relativi alle campagne estese e il flusso delle misure mensili sembra essere cambiata per le ultime misure (dal 2022) rispetto a quella riportata in Chiodini et al. (2021). Questa differenza suggerisce una variazione del pattern di degassamento diffuso nell'area, con un incremento relativo nell'area craterica (misurata mensilmente) rispetto a quella esterna interessata dalle misure estese di flusso di CO₂, con conseguente diminuzione del fattore definito in Chiodini et al. (2021).

Va comunque evidenziato che le misure mensili nell'area interna alla Solfatara indicano un significativo aumento del flusso di CO₂ dal suolo per le misure di aprile 2024, che estrapolato all'intera area e in continuità con le misure precedenti può essere stimato in circa 4000 t/d.

La media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, mostra un chiaro andamento stagionale sovrainposto a un trend d'aumento (Fig. 4.7), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 6 °C nel periodo 2002-2024. Nella mappa di Figura 4.8a è riportato l'aumento 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).

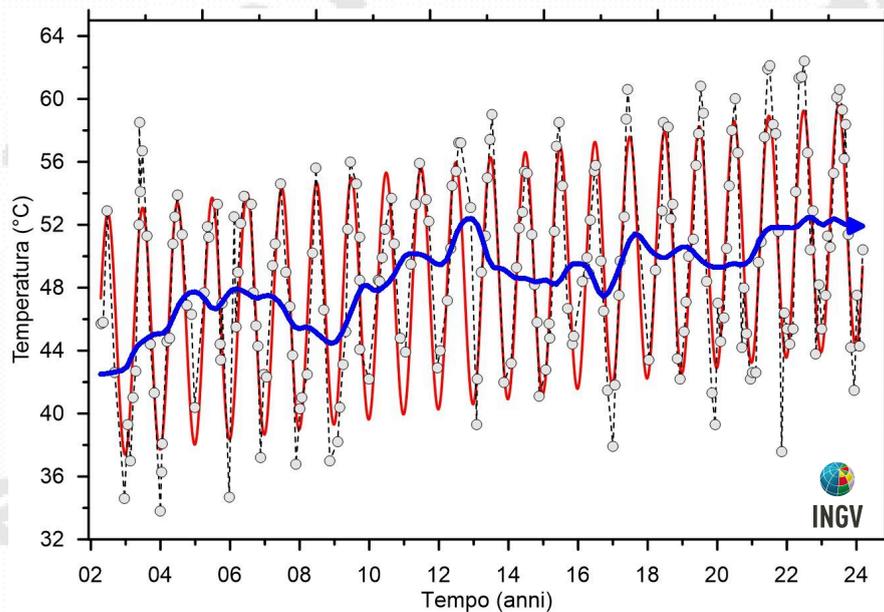


Figura 4.7 – Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 61 punti fissi nell’area craterica della Solfatara. Va evidenziato l’incremento del valore medio nel periodo 2002-2022 di oltre 6 °C. Il trend depurato dalla componente stagionale mediante l’utilizzo dell’algoritmo di destagionalizzazione STL (Seasonal-Trend decomposition based on Loess, Cleveland et al., 1990), è riportato con la linea blu.

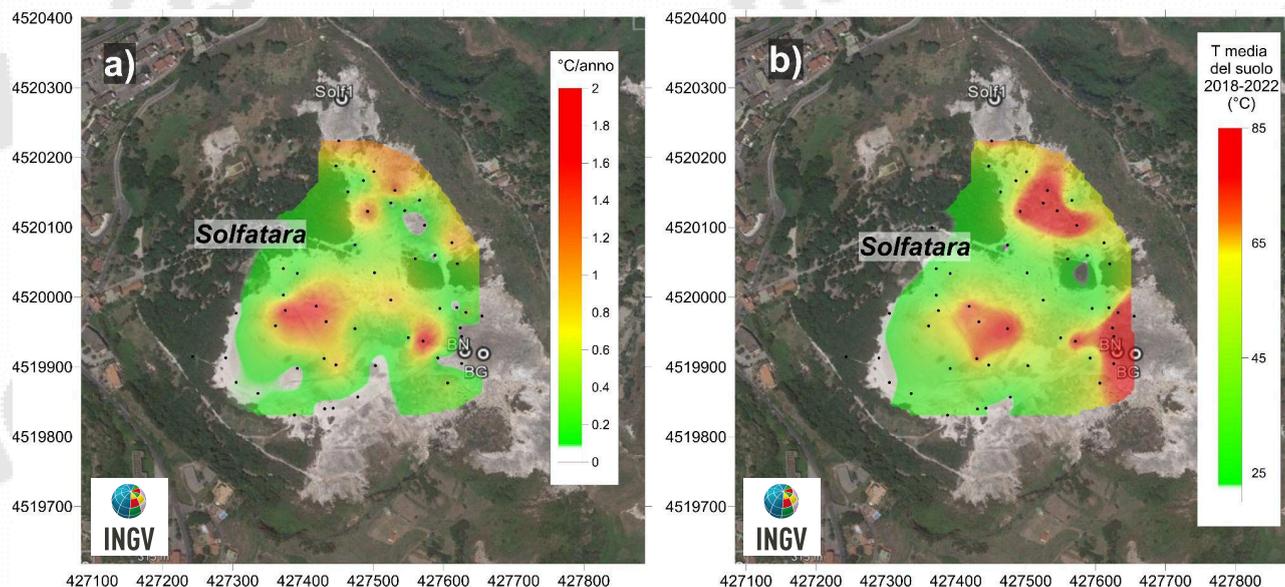


Figura 4.8 – a) Mappa dell’incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L’incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l’area craterica con un massimo nella zona centrale. L’incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo 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 2018 al 2022).

Tale processo di riscaldamento è evidenziato anche da misure analoghe di flusso di CO₂ 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.

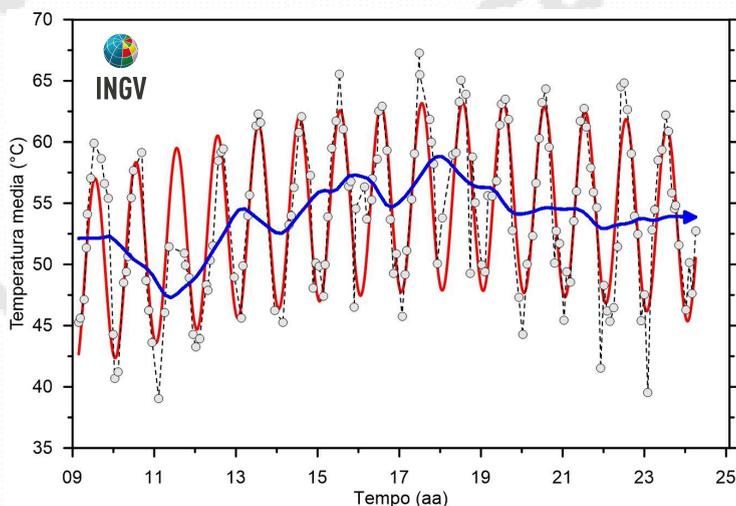


Figura 4.9 – Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli dal 2009. Il trend destagionalizzato, mediante l'utilizzo dell'algoritmo di destagionalizzazione STL (Seasonal-Trend decomposition based on Loess, Cleveland et al., 1990), è riportato con la linea blu.

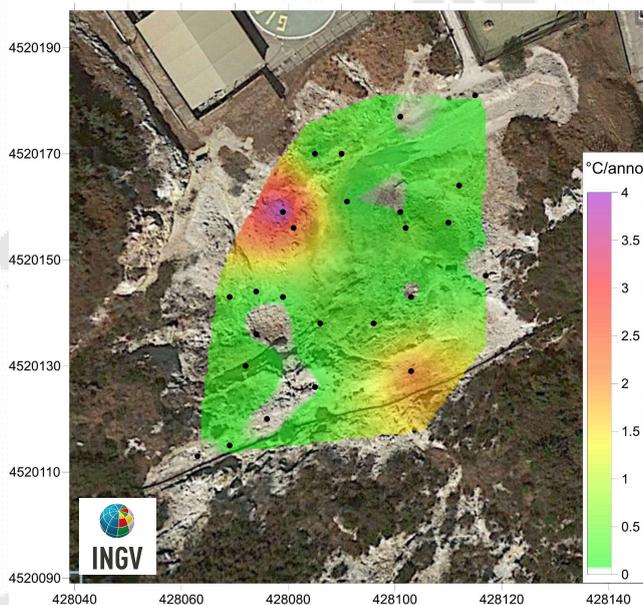


Figura 4.10 – Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ognuno dei 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli misurati a partire dal 2009. L'incremento di temperatura interessa tutta l'area indagata con le zone di maggiore riscaldamento legate a processi di fumarolizzazione locale.

Il flusso di CO₂ dal suolo misurato dalla stazione multiparametrica FLXOV5, installata nel cratere della Solfatara, ha mostrato un significativo aumento a partire dal febbraio 2016 (Fig. 4.11). Tale aumento è da mettere in relazione all'evidente processo di fumarolizzazione che interessa l'intera area. I valori raggiunti di $\sim 3 \times 10^5 \text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$, rappresentano un limite massimo di misura strumentale. La stazione sarà sostituita, con una stazione del nuovo tipo che andrà a potenziare la rete di monitoraggio geochimico, dopo un sufficiente periodo di test e di affiancamento in situ.

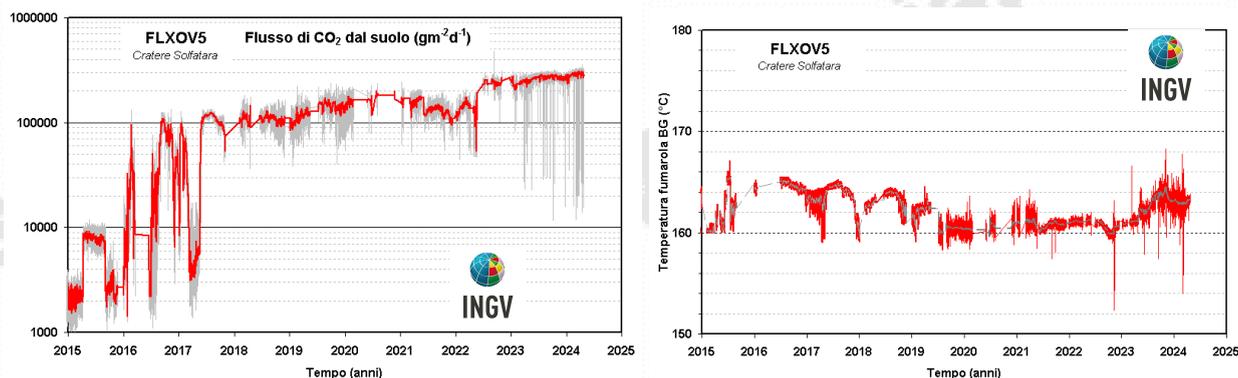


Figura 4.11 – Valori del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura della fumarola BG misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara, a pochi metri dalla fumarola principale BG. I valori di flusso di CO₂ dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2016 (la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere).

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 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 CO₂ dal suolo misurati in continuo dalla stazione geochimica (Fig. 4.14). Il flusso di CO₂ dal suolo misurato dalla stazione FLXOV8, così come la concentrazione di CO₂ in aria, nel mese di aprile 2024 non hanno mostrato variazioni significative dei valori rispetto ai periodi precedenti (Fig. 4.15).

La polla di Pisciarelli dal mese di luglio 2023 fino a tutto settembre è rimasta completamente secca (Fig. 4.12). Tale fenomeno, già osservato negli ultimi anni (2020-2023), è verosimilmente legato a un ridotto apporto del liquido che alimenta la polla, composto da una miscela di condensati fumarolici e di acque di origine meteorica. Appare evidente, quindi, il crescente controllo delle condizioni meteo rispetto all'attività vulcano-idrotermale sulla dinamica della polla, sulla temperatura della fumarola e più in generale sulle variazioni locali del sito di degassamento.

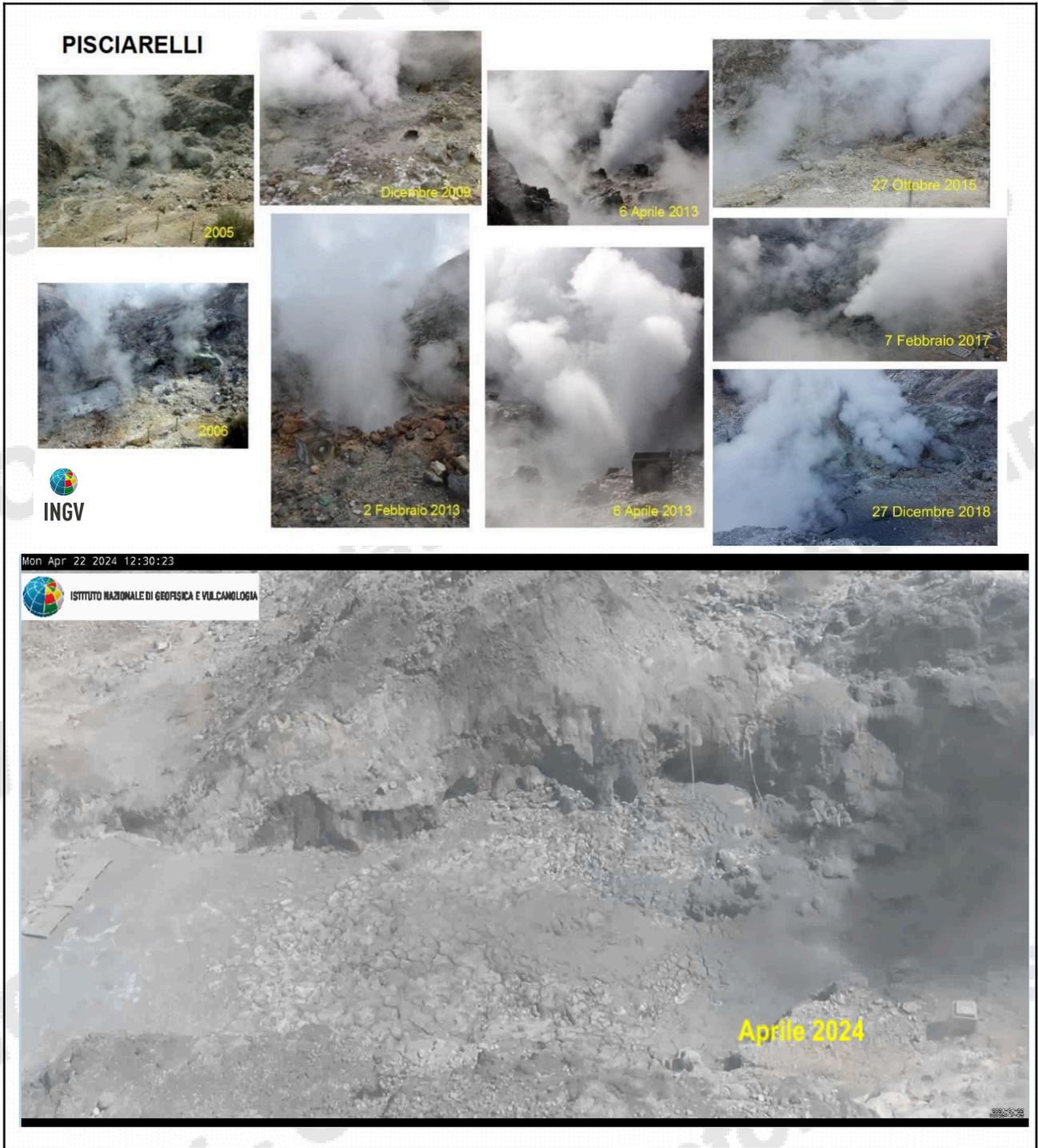


Figura 4.12 - Variazioni macroscopiche dell'area di emissione di Pisciarelli dal 2005.

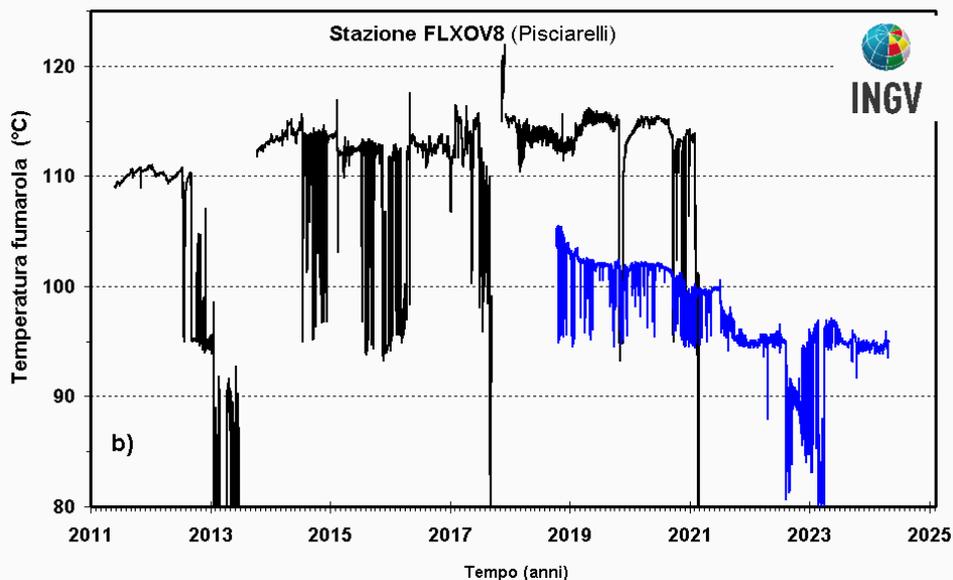


Figura 4.13 – Cronogramma dal 2011 della temperatura della fumarola principale di Pisciarelli. Con la linea blu sono riportati i valori di temperatura misurati in continuo, a partire dal mese di ottobre 2018, in un'altra emissione fumarolica nell'area di Pisciarelli sita a pochi metri di distanza dalla fumarola principale e caratterizzata da una minore temperatura di emissione.

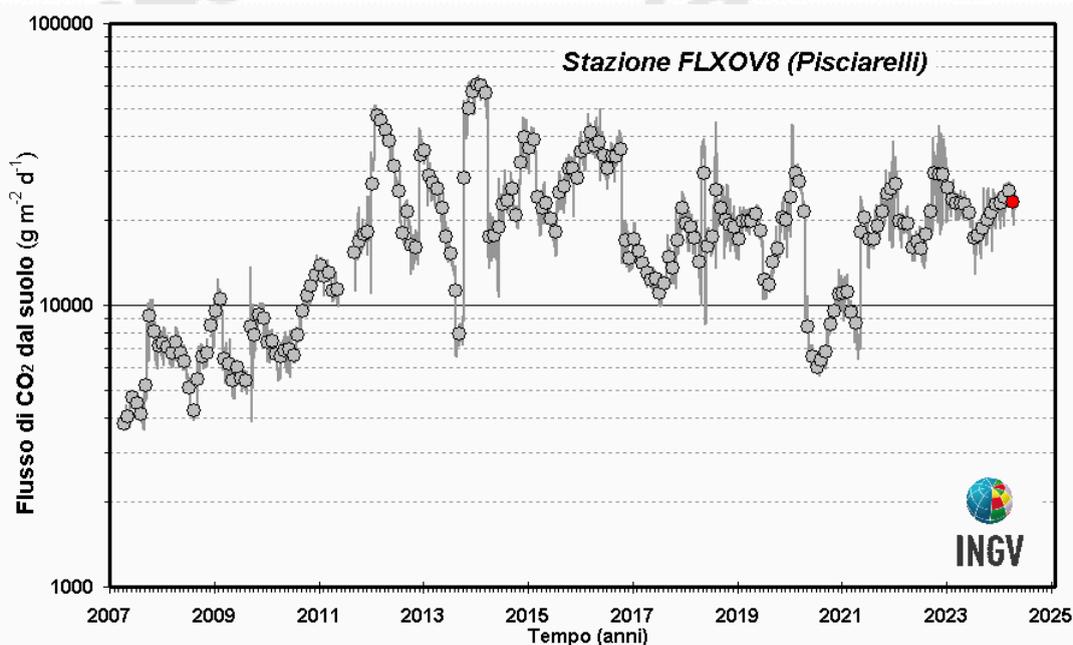


Figura 4.14 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO_2 misurati dalla stazione automatica a Pisciarelli. È da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo a partire dal 2007 del flusso CO_2 . La media dei flussi relativa al mese di aprile 2024 è riportata con il simbolo rosso. Il flusso di CO_2 dal suolo misurato dalla stazione FLXOV8, che dal mese di aprile 2020 fino a maggio 2021 aveva mostrato una diminuzione dei valori, negli ultimi periodi ha mostrato valori simili a quelli registrati nei primi mesi del 2020.

In Figura 4.13 (linea blu) sono riportati i valori di temperatura misurati in continuo a partire dal mese di ottobre 2018 in un'altra emissione fumarolica nell'area di Pisciarelli, caratterizzata da una minore temperatura di emissione e sita a pochi metri di distanza dalla fumarola principale. Nel

mezzo di aprile 2024 i valori di temperatura misurati hanno mostrato un valore medio di ~95 °C, temperatura di ebollizione per il fluido fumarolico emesso.

L'incremento del processo di degassamento nell'area è supportato dalle misure del flusso di CO₂ delle fumarole (Tamburello et al., 2019) (Fig. 4.14). Inoltre, l'aumento dell'attività di degassamento nell'area di Pisciarelli è anche indicato dalla misura in continuo della concentrazione di CO₂ in aria e dal tremore fumarolico (RSAM, Real-time Seismic Amplitude Measurement) misurato dalla stazione sismica CPIS (Fig. 4.15) e generato dall'attività fumarolica, parametri che risultano strettamente correlati all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017, Giudicepietro et al., 2019; 2020).

Tale processo è visibile fino alla prima metà del 2020, poi mostra una diminuzione.

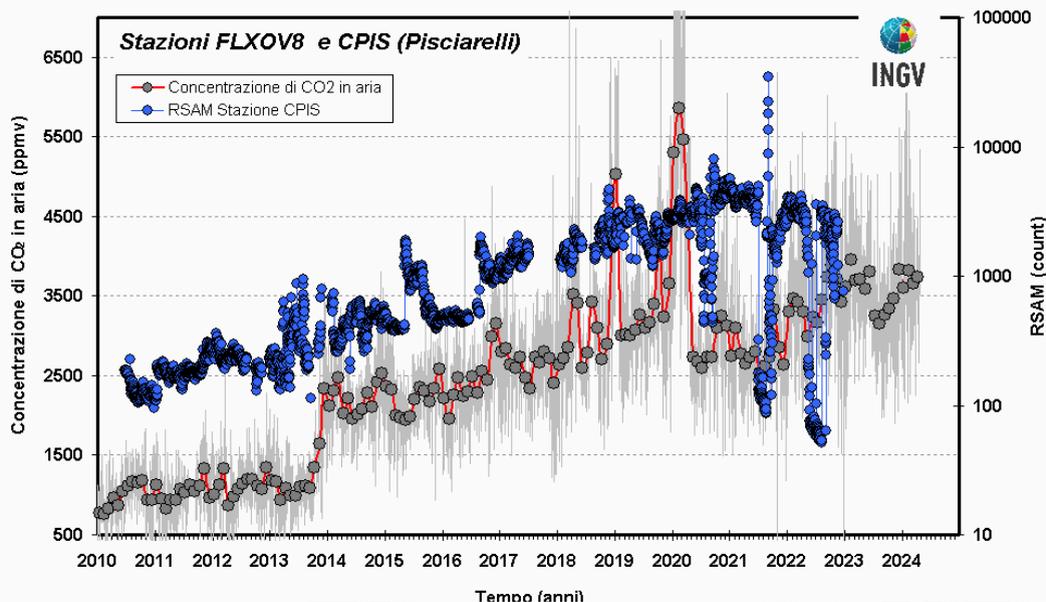


Figura 4.15 - Cronogramma delle medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) della concentrazione di CO₂ registrata in aria con frequenza bioraria dalla stazione geochimica per la misura del flusso di CO₂ dal suolo di Pisciarelli (FLXOV8). Nel cronogramma è riportata anche la serie temporale dell'ampiezza del tremore fumarolico su base giornaliera registrata dalla stazione sismica CPIS, installata a pochi metri dalla fumarola principale. Questi parametri risultano strettamente correlati tra di loro e all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017, Giudicepietro et al., 2019). E' da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo delle concentrazioni di CO₂ in aria e dell'ampiezza del tremore fumarolico dal 2013 al 2021, successivamente i trend mostrano una lieve diminuzione.

In particolare, la serie temporale di concentrazione di CO₂ 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, con un massimo di ~ 5000 ppm registrato nei periodi gennaio-marzo 2019 e gennaio-marzo 2020. Negli ultimi mesi, la concentrazione di CO₂ misurata in aria ha mostrato un lieve trend d'aumento, con un valore medio di ~3600 ppm nel mese di aprile 2024.

Analogamente, l'ampiezza del tremore fumarolico (RSAM) mostra, a partire dal 2013, un rilevante aumento nel tempo raggiungendo un massimo nel 2021. Il tremore fumarolico non è attualmente o acquisito a causa di problemi tecnici della stazione sismica CPIS.

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 misura e di manutenzione delle strumentazioni nell'area interessata dalla polla.

5. AGGIORNAMENTO ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO NELL'AREA CIRCOSTANTE IL POZZO "GEOGRID"

5.1 Misure di flusso diffuso di CO₂ dal suolo in area del cantiere del pozzo del Progetto GEOGRID

Al fine di rilevare eventuali variazioni locali del processo di degassamento diffuso dal suolo, a partire dal mese di settembre 2020, sono state ripetute mensilmente le campagne di misura del flusso di CO₂ dal suolo in circa 30 punti distribuiti in un'area di circa 0.25 km², centrata sul cantiere della perforazione eseguita nell'ambito del progetto GEOGRID (Fig. 5.1.1a). Le misure sono state confrontate con quelle relative al database di misure del flusso di CO₂ diffuso eseguite dal 1998 al 2016 (Cardellini et al., 2017), riguardanti la stessa area (Fig. 5.1.1b).

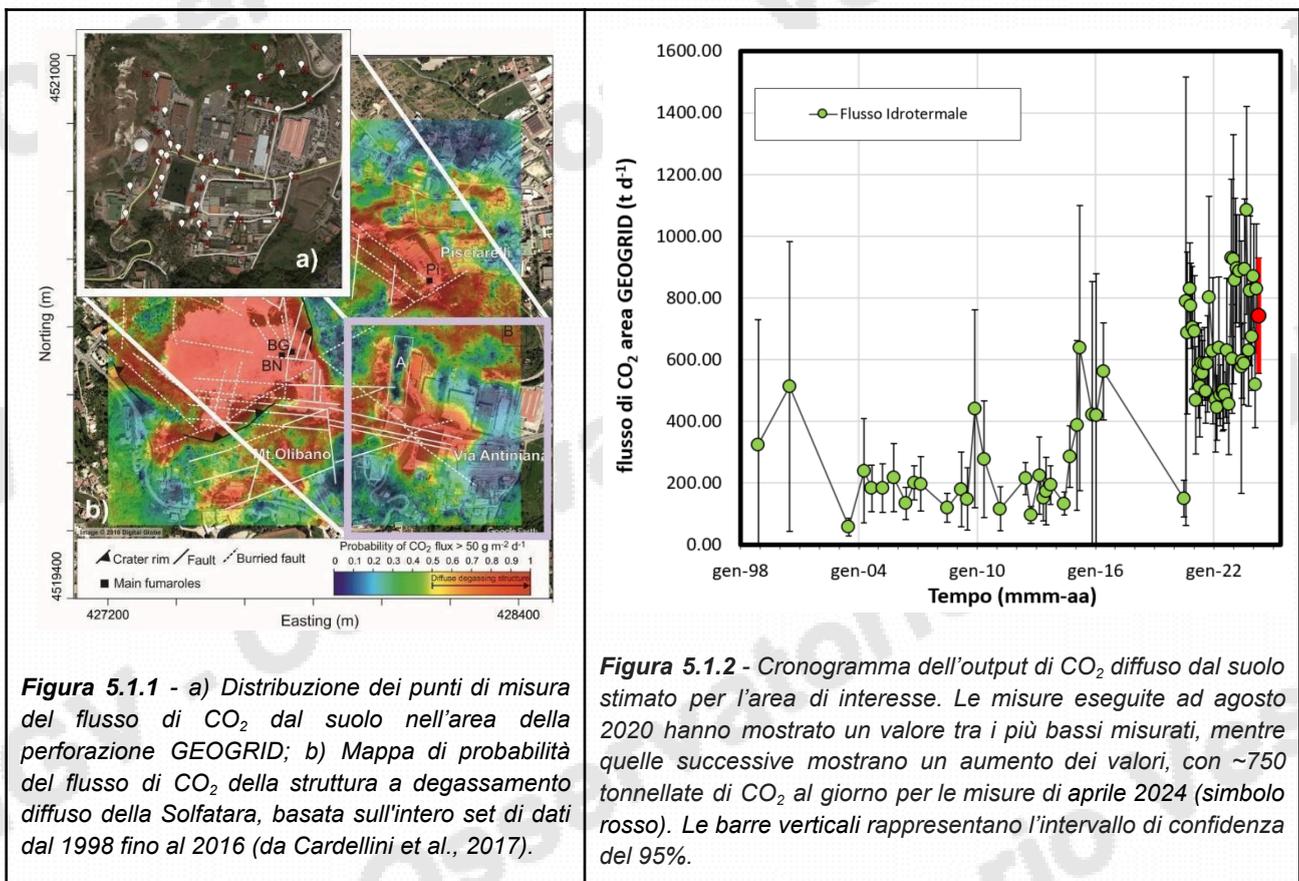


Figura 5.1.1 - a) Distribuzione dei punti di misura del flusso di CO₂ dal suolo nell'area della perforazione GEOGRID; b) Mappa di probabilità del flusso di CO₂ della struttura a degassamento diffuso della Solfatara, basata sull'intero set di dati dal 1998 fino al 2016 (da Cardellini et al., 2017).

Figura 5.1.2 - Cronogramma dell'output di CO₂ diffuso dal suolo stimato per l'area di interesse. Le misure eseguite ad agosto 2020 hanno mostrato un valore tra i più bassi misurati, mentre quelle successive mostrano un aumento dei valori, con ~750 tonnellate di CO₂ al giorno per le misure di aprile 2024 (simbolo rosso). Le barre verticali rappresentano l'intervallo di confidenza del 95%.

I valori di flusso di CO₂ emesso dall'area indagata hanno mostrato un *range* compreso tra 58 e 638 t/d nel periodo dal 1998 al 2016, con un valore medio di circa 250 t/d. Tuttavia è da notare che gli ultimi valori disponibili fino al 2016 mostravano un trend in aumento, mentre il valore stimato per le misure eseguite nel mese di agosto 2020, di circa 150 t/d, risulta tra i valori più bassi misurati nell'area. Le misure successive mostrano un aumento dei valori fino a ~800 t/d a ottobre 2020 e ~900 t/d nei primi mesi del 2023, in linea con il trend d'aumento mostrato fino al 2016; le ultime misure del mese di aprile 2024, mostrano un valore del flusso di CO₂ stimato di ~750 t/d (Fig. 5.1.2).

5.2 Monitoraggio Termico ad Immagine – Stazione ANTN

La stazione ANTN della Rete Permanente di Monitoraggio Termico dei Campi Flegrei (TIRNet) acquisisce immagini all'infrarosso termico dell'area di Antiniana, compresa tra il versante esterno sud-orientale del cratere della Solfatara e il versante a sud dell'area di Pisciarelli, laddove è stata effettuata la perforazione realizzata nel contesto del Progetto Geogrid (Fig. 5.2.1).

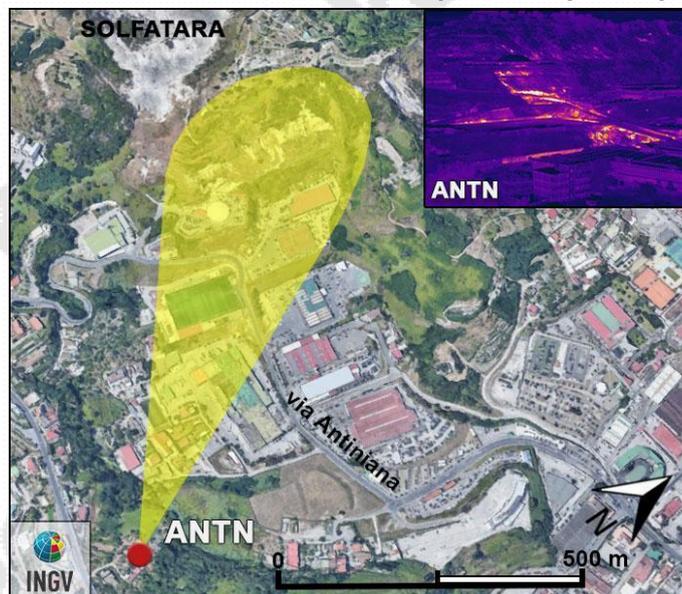


Figura 5.2.1 - Stazione ANTN. Pallino rosso: punto di ripresa; area gialla: indica schematicamente l'area acquisita.

La figura seguente mostra l'elaborazione della serie temporale dei valori di temperatura massima delle immagini IR acquisite dalla stazione ANTN (Fig. 5.2.2).

Tali dati sono relativi ad una zona circoscritta, interessata dal maggiore rilascio termico dell'area indagata, e sono stati processati con metodologia di rimozione della stagionalità basata sull'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition; Vilardo et al., 2015, Sansivero et al., 2019). Il trend a lungo termine è ottenuto applicando un fitting LOESS di 2° alle temperature massime destagionalizzate con STL.

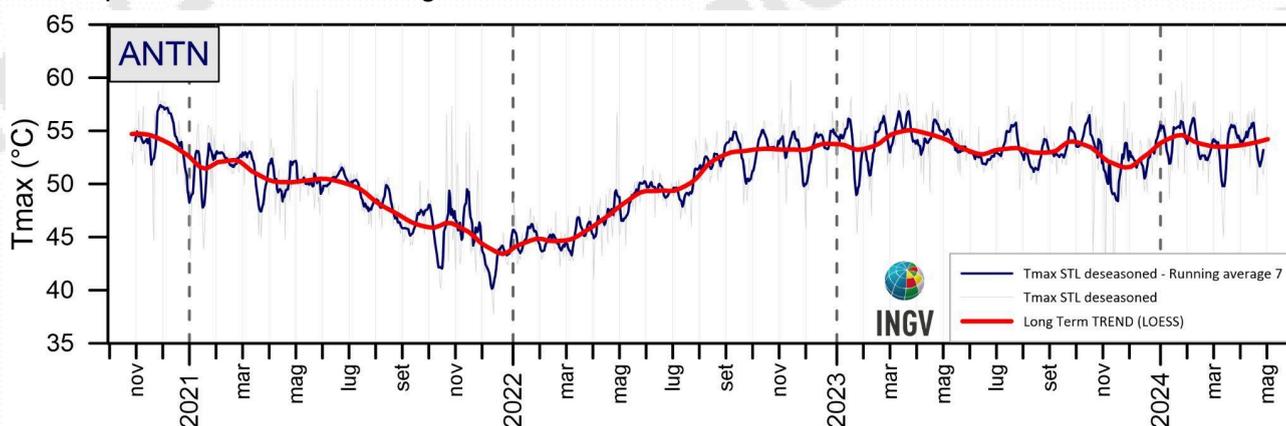


Figura 5.2.2 - Stazione ANTN. Serie temporale dei valori di temperatura massima giornaliera rilevata nelle immagini IR destagionalizzate mediante applicazione dell'algoritmo STL [medie settimanali (blu); trend a lungo termine (rosso)]. Il trend a lungo termine è ottenuto applicando un fitting LOESS di 2° alle temperature massime destagionalizzate.

I valori di temperatura al suolo rilevati dalla stazione ANTN (Fig. 5.2.2) nel mese di aprile 2024 sono fondamentalmente stabili e caratterizzati da sensibili oscillazioni. Il trend a lungo termine (in rosso) conferma la sostanziale stabilità dei valori negli ultimi mesi.

6. QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEL VULCANO NEL MESE DI APRILE 2024 E VALUTAZIONI

1) **SISMOLOGIA:** Nell'area dei Campi Flegrei sono stati registrati 1252 terremoti ($M_{max}=3.9\pm 0.3$), di cui 979 localizzati, avvenuti prevalentemente tra Pozzuoli, Agnano, l'area Solfatara-Pisciarelli, Bagnoli e il Golfo di Pozzuoli, con profondità concentrate nei primi 3 km e profondità massima di circa 4.5 km.

2) **DEFORMAZIONI:** Nell'ultimo mese si registra un sollevamento nell'area di massima deformazione di circa 3 cm, con andamento discontinuo. Il sollevamento registrato alla stazione GNSS di RITE è di circa 125 cm da novembre 2005, di cui circa 92 cm da gennaio 2016.

Le variazioni tiltmetriche e mareografiche sono coerenti con la fase di uplift che interessa l'area.

3) **TERMOGRAFIA:** Le serie temporali delle temperature superficiali acquisite dalla rete permanente di telecamere IR nelle aree di Pisciarelli e Solfatara confermano nel mese di aprile 2024 il lieve aumento dei valori osservato nei mesi precedenti. L'area di Antiniana mostra invece temperature fondamentalmente stabili e in linea con i valori medi dei mesi precedenti.

Le misure con termocamere mobili effettuate in diversi punti dei Campi Flegrei mostrano andamenti piuttosto stabili.

4) **GEOCHIMICA:** La composizione delle fumarole e i parametri monitorati indicano il perdurare dei trend pluriennali di riscaldamento e pressurizzazione del sistema idrotermale che ha raggiunto un massimo nel luglio 2020, per poi invertirsi fino ai primi mesi del 2022, quando è iniziato un nuovo trend d'aumento. I campioni degli ultimi mesi non mostrano un trend ben definito. I campioni di aprile 2024 mostrano una lieve diminuzione del valore del rapporto CO_2/CH_4 , ma in generale confermano il trend di aumento .

Il flusso di CO_2 diffuso dal suolo stimato per l'intera area della Solfatara nel mese di aprile 2024 è pari a circa 4000 t/d.

Nella Figura 6.1 sono rappresentati i parametri di monitoraggio più indicativi in un confronto temporale a breve e medio termine.

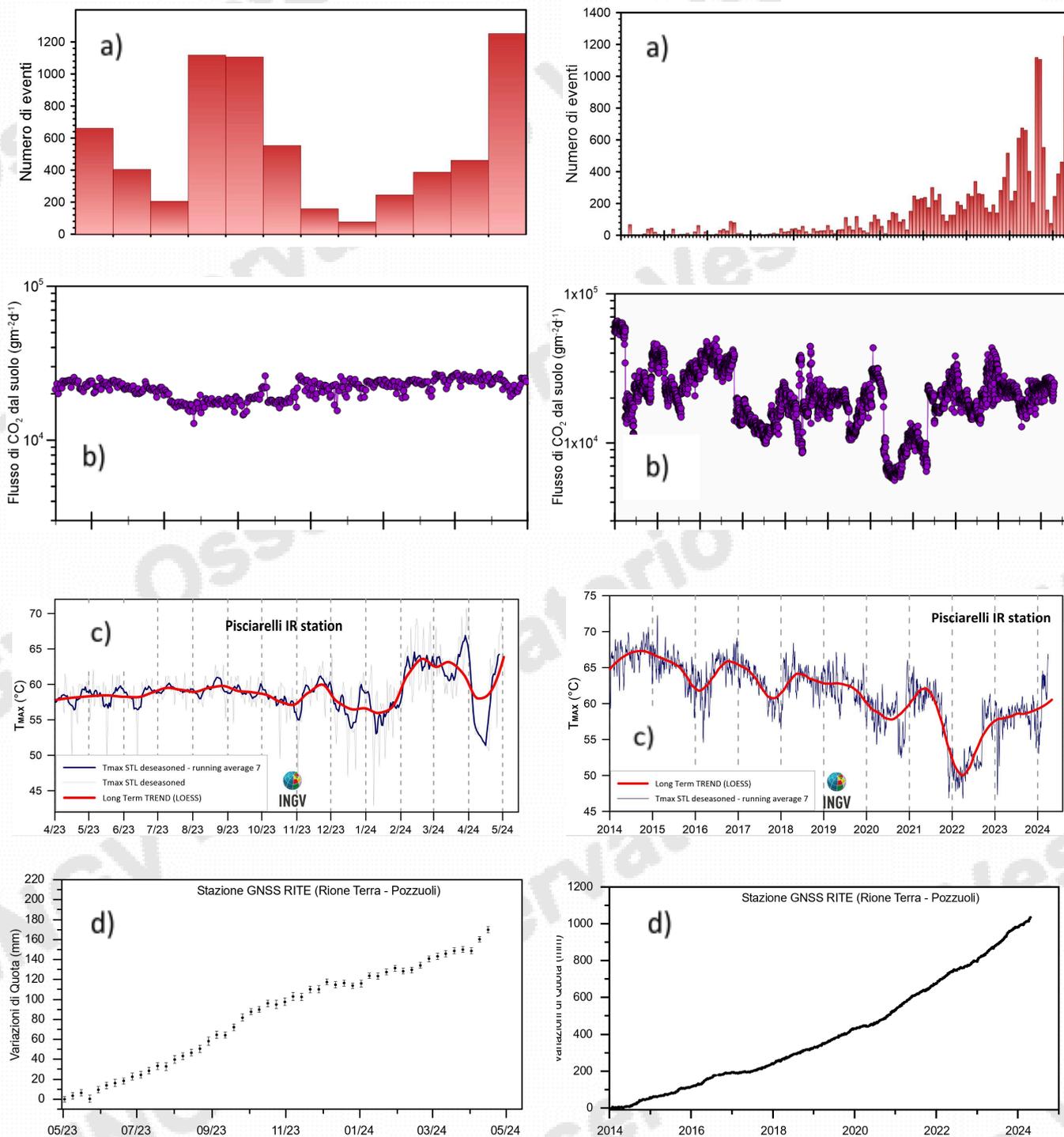


Figura 6.1 – Frequenza di accadimento degli eventi sismici (a), variazioni del flusso di CO₂ alla stazione geochimica di Pisciarelli (b), trend delle temperature massime superficiali destagionalizzate delle telecamera all’infrarosso termico a Pisciarelli (c) e andamento delle deformazioni del suolo alla stazione GNSS di RITE (d), 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, che possano comportare una diversa evoluzione dei fenomeni sopra descritti, saranno oggetto di approfondimenti tempestivamente comunicati.

Il monitoraggio dell'area flegrea permane al livello di allerta "Giallo".

Bibliografia

- Bellucci Sessa, E., Borriello G., Cirillo F. & Working Group NAPLES (2022). NAPLES (moNitoring mAps of camPania voLcanoES) (1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5886962>.
- Berrino, G., Rymer, H., Brown, G. C., & Corrado, G. (1992). Gravity-height correlations for unrest at calderas. *Journal of volcanology and geothermal research*, 53(1-4), 11-26.
- Buono G., Caliro S., Paonita A., Pappalardo L., Chiodini G. (2023). Discriminating carbon dioxide sources during volcanic unrest: The case of Campi Flegrei caldera (Italy). *Geology* ; doi: <https://doi.org/10.1130/G50624.1>
- 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., G. Vilardo, V. Augusti, D. Granieri, S. Caliro, C. Minopoli, and C. Terranova (2007) Thermal monitoring of hydrothermal activity by permanent infrared automatic stations: Results obtained at Solfatara di Pozzuoli, Campi Flegrei (Italy). *J. Geophys. Res.*, 112, B12206, doi:10.1029/2007JB005140
- 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
- Chiodini G., Caliro S., Avino R., Bini G., Giudicepietro F., De Cesare W., Ricciolino P., Aiuppa A., Cardellini C., Petrillo Z., Selva J., Siniscalchi A., Tripaldi S. (2021) Hydrothermal pressure-temperature control on CO₂ emissions and seismicity at Campi Flegrei (Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 414 (2021) 107245. doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107245.
- Cleveland, R.B., Cleveland, W.S., McRae, J.E., and Terpenning, I., (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess: *Journal of Official Statistics*, v. 6, p. 3–73.
- Cusano P., Petrosino S. and Saccorotti G. (2008) Hydrothermal origin for sustained Long-Period (LP) activity at Campi Flegrei Volcanic Complex, Italy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.07.019.

- 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.
- D'Auria, L., Giudicepietro, F., Aquino, I., Borriello, G., Del Gaudio, C., Lo Bascio, D., Martini, M., Ricciardi, G. P., Ricciolino, P., and Ricco, C. (2011), Repeated fluid-transfer episodes as a mechanism for the recent dynamics of Campi Flegrei caldera (1989–2010), *J. Geophys. Res.*, 116, B04313, doi:10.1029/2010JB007837.
- De Martino, P.; Guardato, S.; Donnarumma, G.P.; Dolce, M.; Trombetti, T.; Chierici, F.; Macedonio, G.; Beranzoli, L.; Iannaccone, G.(2020), Four Years of Continuous Seafloor Displacement Measurements in the Campi Flegrei Caldera. *Front. Earth Sci.* 2020, 8, 615178. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.615178>
- De Martino P, Dolce M, Brandi G, Scarpato G, Tammaro U. The Ground Deformation History of the Neapolitan Volcanic Area (Campi Flegrei Caldera, Somma–Vesuvius Volcano, and Ischia Island) from 20 Years of Continuous GPS Observations (2000–2019). *Remote Sensing.* 2021; 13(14):2725. <https://doi.org/10.3390/rs13142725>
- Falanga, M., Aquino, I., De Lauro, E., Petrosino, S., & Ricco, C. (2023). New insights on ground deformation at Campi Flegrei caldera inferred from kinematics and dynamics investigation of borehole tilt. *Earth and Space Science*, 10, e2022EA002702. <https://doi.org/10.1029/2022EA002702>
- Giudicepietro F., Chiodini G., Caliro S., De Cesare W., Esposito A. M., Galluzzo D., D. Lo Bascio, G. Macedonio, M. Orazi, P. Ricciolino, and J. Vandemeulebrouck. (2019). Insight into Campi Flegrei Caldera Unrest through seismic tremor measurements at Pisciarelli Fumarolic Field. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5544–5555. <https://doi.org/10.1029/2019GC008610>.
- Giudicepietro, F., Chiodini G., Avino R., Brandi G., Caliro S., De Cesare W., Galluzzo D., Esposito A., La Rocca A., Lo Bascio D., Obrizzo F., Pinto S., Ricci T., Ricciolino P., Siniscalchi A., Tramelli A., Vandemeulebrouck J. and Macedonio G. (2020). Tracking Episodes of Seismicity and Gas Transport in Campi Flegrei Caldera Through Seismic, Geophysical, and Geochemical Measurements, *Seismol. Res. Lett.* XX, 1–11, doi: 10.1785/022020022
- Guardato, S., Donnarumma G.P., Riccio R., et al. InSEA Project: Initiatives in Supporting the Consolidation and Enhancement of the EMSO Infrastructure and Related Activities (2022), *Frontiers in Marine Science* Vol. 9, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.846701>
- Hector, B., Hinderer, J. (2016). PyGrav, a Python-based program for handling and processing relative gravity data. *Comput. Geosci.* 91, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.03.010>.
- Iannaccone, G.; Guardato, S.; Donnarumma, G.P.; De Martino, P.; Dolce, M.; Macedonio, G.; Chierici, F.; Beranzoli, L. Measurement of Seafloor Deformation in the Marine Sector of the Campi Flegrei Caldera (Italy). *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2018, 123, 66–83. <https://doi.org/10.1002/2017JB014852>
- Riccardi U., Carlino S., Pivetta T., Hinderer J., Rosat S., Ricciardi G. (2023). Continuous gravity observations at Mt. Somma-Vesuvius with a new generation recording spring gravimeter: in-depth instrumental response characterization and tidal model. Submitted in *Pure and Applied Geophysics*.
- 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.

- Sansivero F., Scarpato G. and G. Vilardo (2013). The automated infrared thermal imaging system for the continuous long-term monitoring of the surface temperature of the Vesuvius crater. *Annals of Geophysics*, 56, 4, S0454; doi:10.4401/ag-6460.
- Sansivero, F. and Vilardo, G. (2019). Processing Thermal Infrared Imagery Time-Series from Volcano Permanent Ground-Based Monitoring Network. Latest Methodological Improvements to Characterize Surface Temperatures Behavior of Thermal Anomaly Areas. *Remote Sens.*, 11, 553; <https://doi.org/10.3390/rs11050553>.
- Schüller, K. (2020). Theoretical basis for earth tide analysis and prediction. Manual-01-ET34-X-V, Surin, Thailand, PP. 217.
- Beilin, J. (2006). Apport de la gravimétrie absolue à la réalisation de la composante gravimétrique du Réseau Géodésique Français. *Inst. Géogr. Natl., Paris, France*.
- 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. (2019). 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>.
- Trombetti, T., Burigana, C., De Martino, P., Guardato, S., Macedonio, G., Iannaccone, G. and Chierici, F. On the seafloor horizontal displacement from cGPS and compass data in the Campi Flegrei caldera. *J Geod* 97, 62 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01751-z>
- Vilardo G., Sansivero F. and G. Chiodini (2015). Long-term TIR imagery processing for spatiotemporal monitoring of surface thermal features in volcanic environment: a case study in the Campi Flegrei (Southern Italy). *J. Geophys. Res. - Solid Earth*, 120 (2), 812-826, doi:10.1002/2014JB011497.
-

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 sismiche 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 nella convenzione biennale attuativa per le attività di servizio in esecuzione dell'Accordo Quadro tra il Dipartimento della Protezione Civile e l'INGV (Periodo 2022-2025), alle attività previste nell'ambito del Sistema Nazionale di Protezione Civile. In particolare, questo documento, redatto in conformità all'Allegato Tecnico 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 arrecati 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.