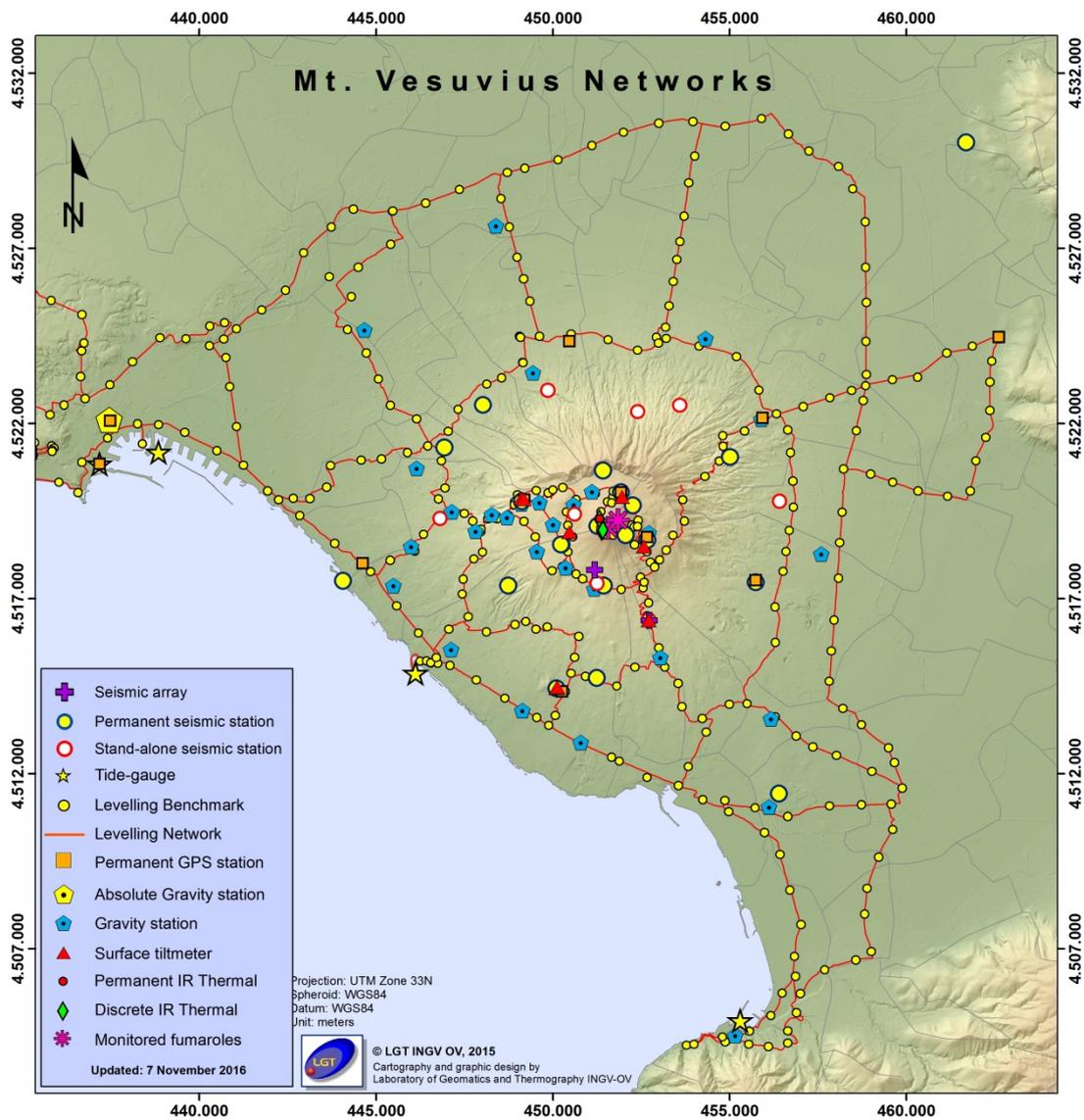




Bollettino di Sorveglianza

VESUVIO

GIUGNO 2018



1. SISMOLOGIA

Nel corso del mese di giugno 2018 al Vesuvio sono stati registrati 97 terremoti (Fig. 1.1). La magnitudo massima è stata pari a $M_d=1.9$ (eventi del 04/06 alle ore 02:34 UTC e del 07/06 alle ore 21:57 e 22:41 UTC).

E' stato possibile determinare l'ipocentro di 88 degli eventi registrati. Le localizzazioni sono mostrate in Fig. 1.2.

Tra le 21:53 (UTC) del 07/06 e le 01:31 (UTC) del 08/06, è stato registrato uno sciame sismico consistito in una sequenza di 21 terremoti con $-0.2 \leq M_d \leq 1.9$, localizzati in area craterica a profondità minori di 1 km.

Non si evidenziano trend significativi nei parametri sismologici (Fig. 1.2, 1.3, 1.4, 1.5).

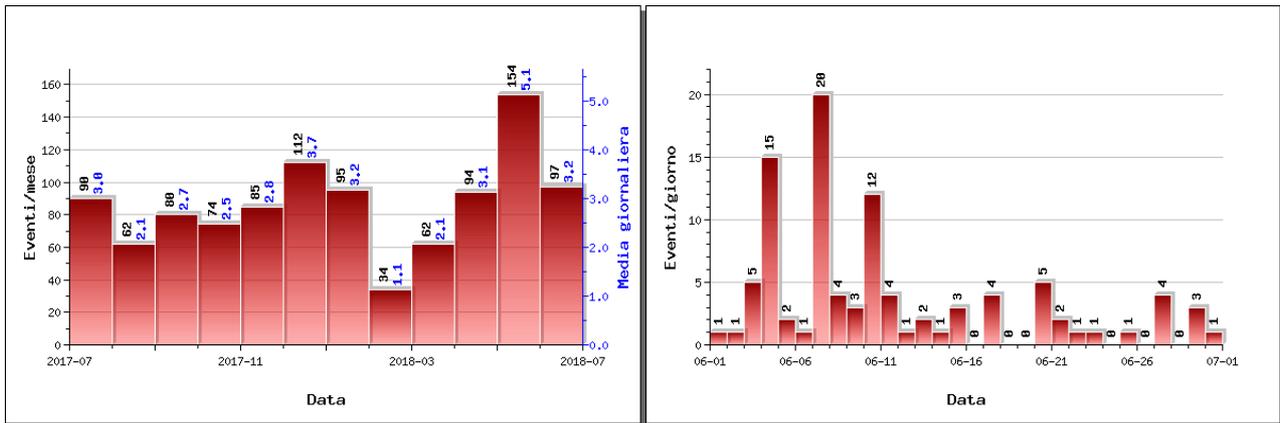


Figura 1.1 - A sinistra il numero di eventi registrati al Vesuvio nel corso degli ultimi 12 mesi (in totale 1039), mentre a destra quelli avvenuti nell'ultimo mese (in totale 97).

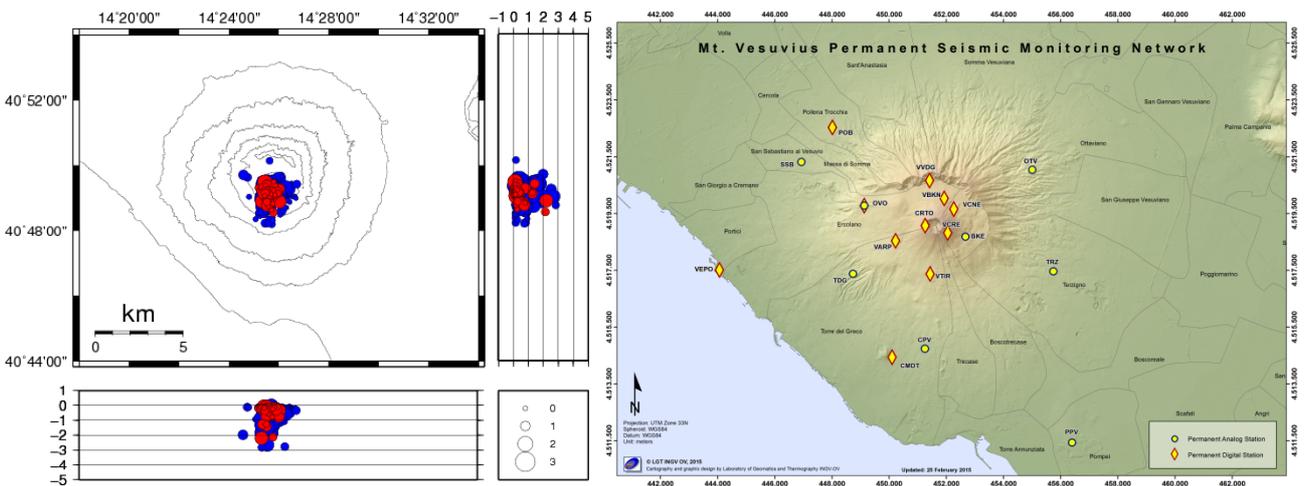


Figura 1.2 - Localizzazioni ipocentrali al Vesuvio nel corso degli ultimi 12 mesi (in blu) e dell'ultimo mese (in rosso). La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo, come indicato nel riquadro in basso. A destra è mostrata la mappa della Rete Sismica Permanente del Vesuvio.

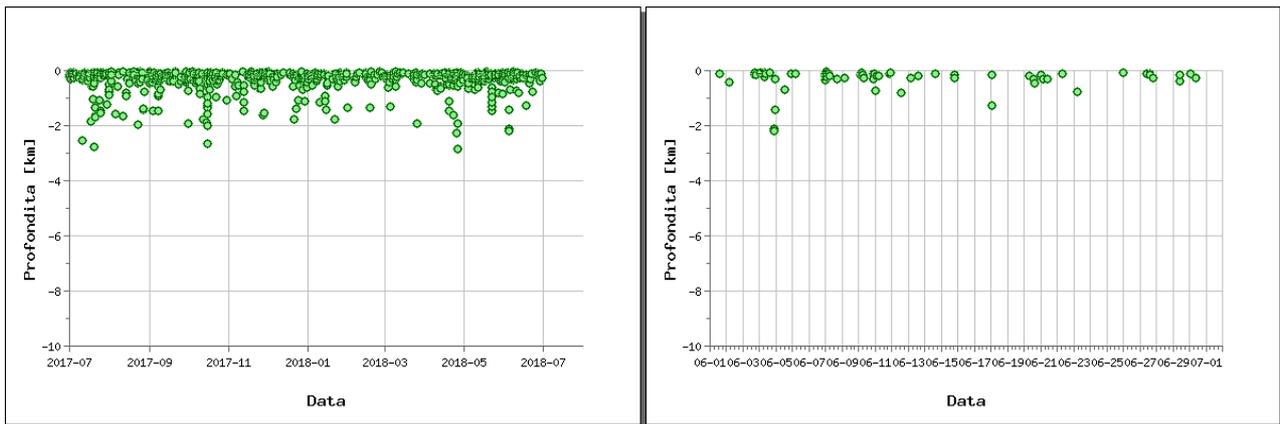


Figura 1.3 - Profondità ipocentrali degli eventi registrati al Vesuvio nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

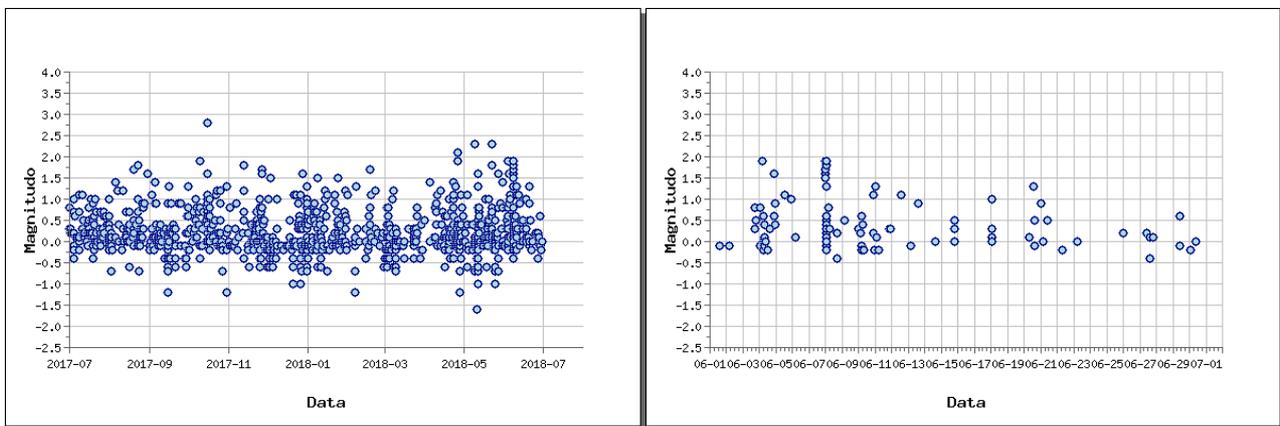


Figura 1.4 - Magnitudo degli eventi registrati al Vesuvio nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

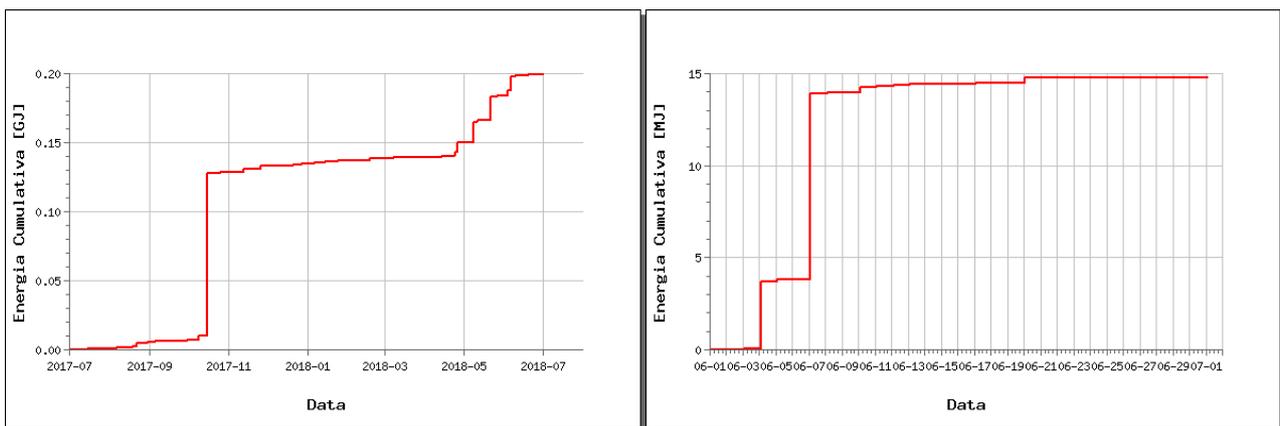


Figura 1.5 - Rilascio cumulativo di energia sismica al Vesuvio nel corso degli ultimi 12 mesi (a sinistra) e dell'ultimo mese (a destra).

2. DEFORMAZIONI DEL SUOLO

GPS

In Figura 2.1 è mostrata la Rete GPS Permanente operativa al Vesuvio con 8 stazioni ubicate sulla struttura vulcanica.

Non si evidenziano deformazioni del suolo imputabili a fenomeni vulcanici. In Figura 2.2 viene riportata la serie temporale delle variazioni in quota della stazione GPS di BKNO (Bunker Nord) da cui si evidenzia la lieve subsidenza verosimilmente dovuta a processi di compattazione e/o scivolamento di terreni poco coerenti.

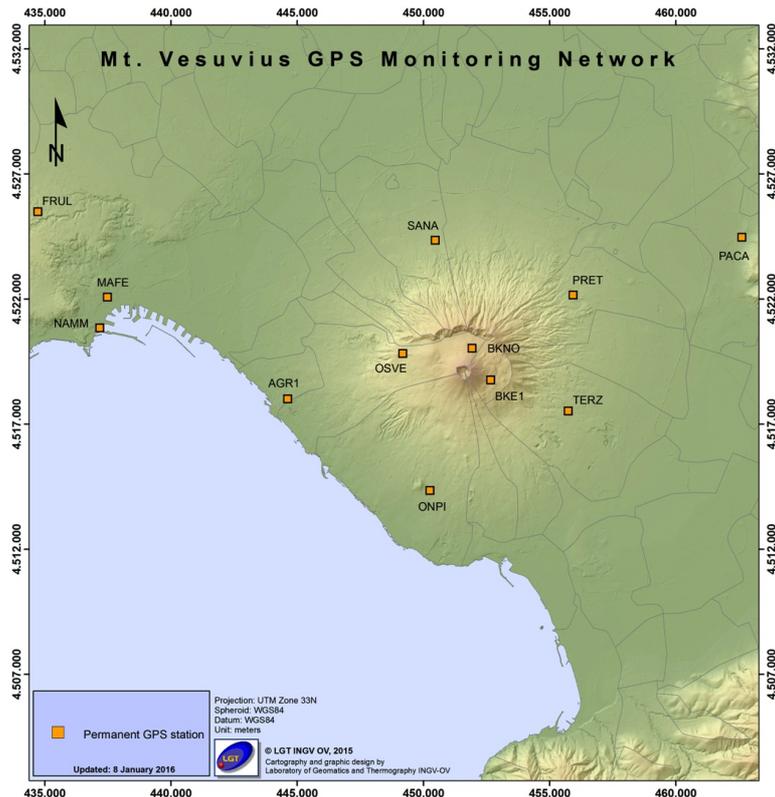


Figura 2.1 - Rete GPS Permanente del Vesuvio.

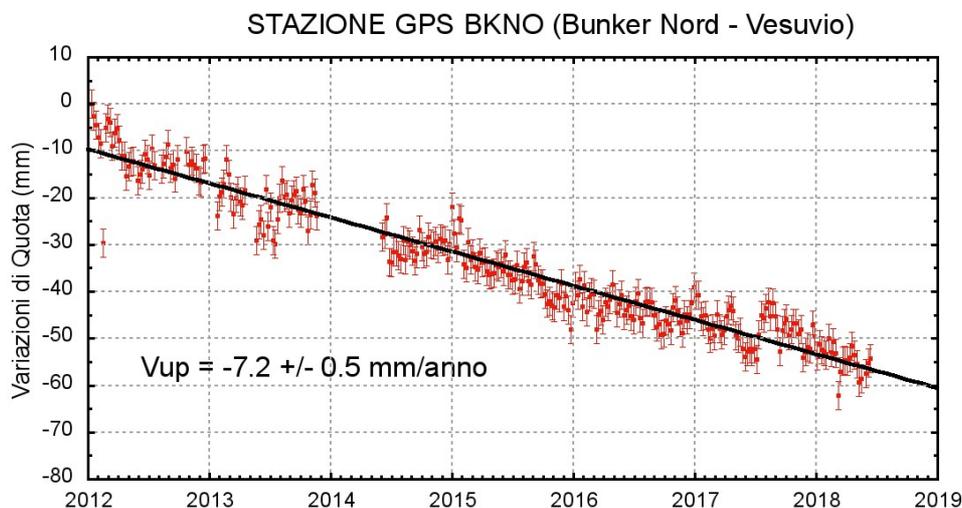


Figura 2.2 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione BKNO (Vesuvio) da gennaio 2012 a giugno 2018.

Mareometria

In Figura 2.3 è mostrata la Rete Mareografica operativa al Vesuvio.

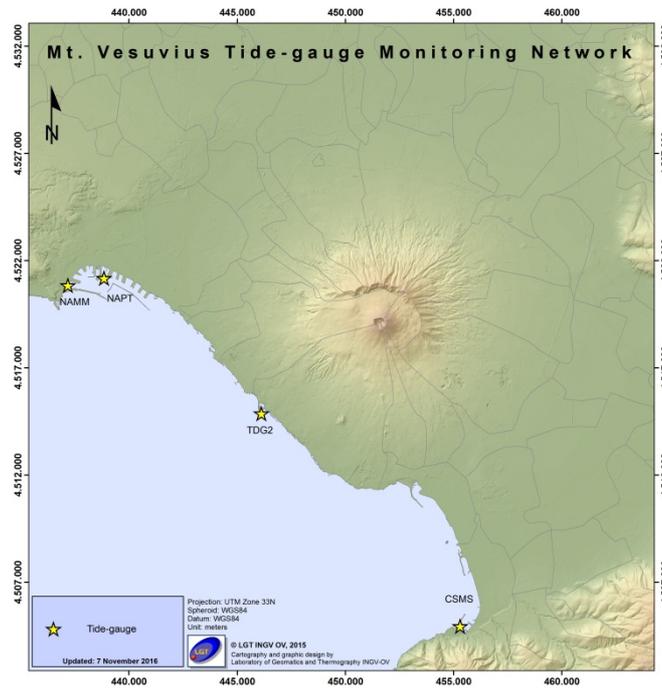


Figura 2.3 - Rete Mareografica del Vesuvio

Nell'area vesuviana si osservano leggeri movimenti verticali del suolo (circa 2 cm in abbassamento dal 2014) non imputabili a fenomeni vulcanici come rilevato dalle analisi dei dati alle stazioni di Torre del Greco (TDG2) (Figura 2.4).

Il picco visibile verso la fine del mese di luglio 2016 è stato determinato dal malfunzionamento temporaneo del sensore della stazione di riferimento NAMI.

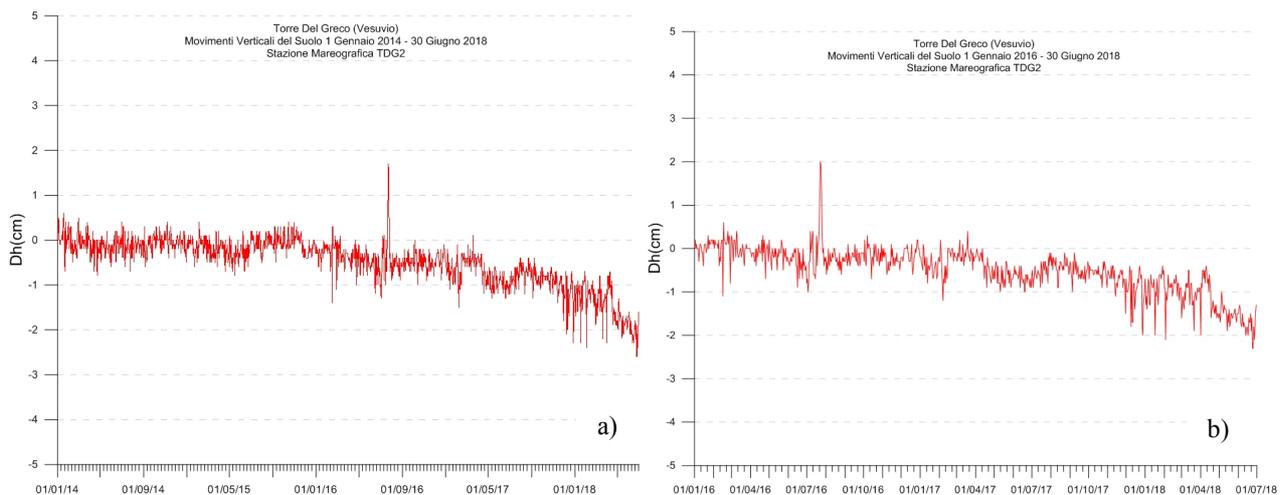


Figura 2.4 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2014 - giugno 2018 (a) e gennaio 2016 - giugno 2018 (b), ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Torre del Greco (TDG2). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli Molo S.Vincenzo (NAMI).

I dati nella serie temporale dal 2014 ad oggi sono stati raccordati con i dati riferiti alla ex stazione NAPT (dismessa a febbraio 2016), potendoli considerare omogenei all'interno degli errori di misura.

Tiltmetria

La Rete di Monitoraggio delle inclinazioni del suolo del Vesuvio consiste in 7 stazioni (Fig. 2.5) di cui 3 equipaggiate con sensori analogici di superficie (OVO, CMD, ROV) e 4 con sensori digitali da pozzo (IMB, TRC, CMT, CMG installati a 25 m di profondità).

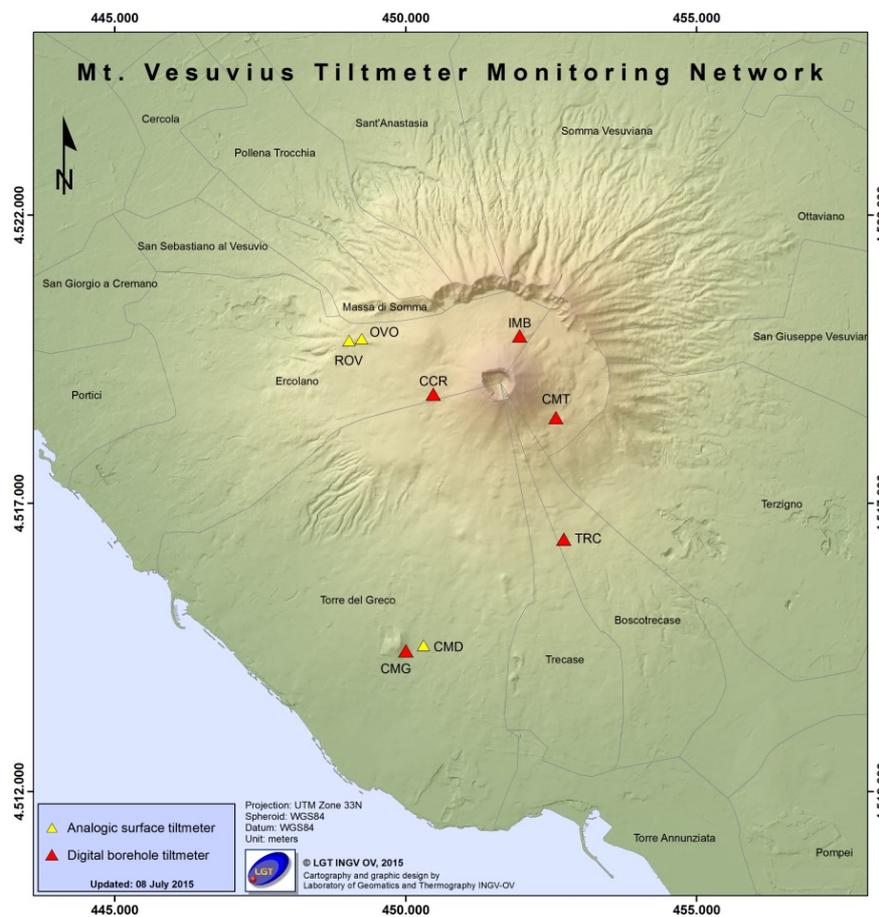


Figura 2.5 – Rete Tiltmetrica del Vesuvio. La stazione CCR è in corso di completamento.

La variazione tiltmetrica osservata al Vesuvio nel periodo gennaio-giugno 2018 avviene con modalità diverse in relazione alla posizione delle stazioni ed è riportata in Figura 2.6.

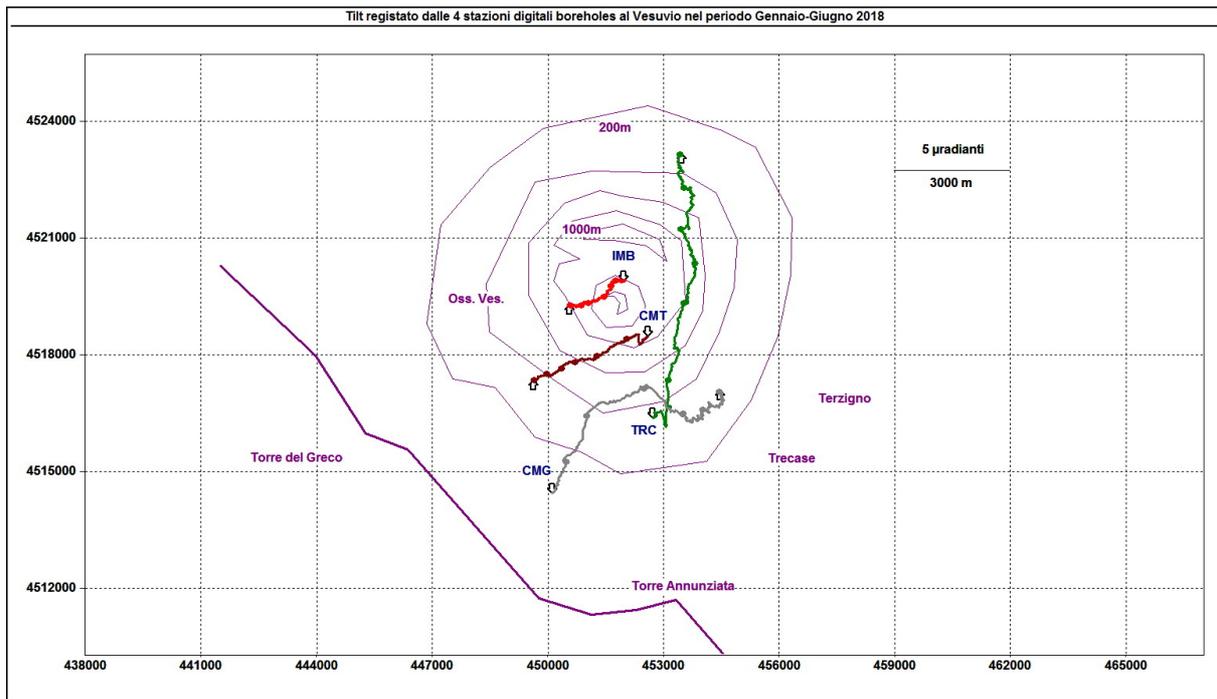


Figura 2.6 – Odografo del tilting registrato alle stazioni del Vesuvio nel periodo gennaio-giugno 2018. Per chiarezza di rappresentazione grafica sono state selezionate solo le stazioni borehole con sensori ubicati tra 20 e 25 m di profondità. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale ad 5 μ radianti o 3.0 km. I pallini sovrapposti sui vettori tilt indicano l’inizio di ogni mese.

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

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

Sito	Inclinazione e direzione	Temperatura
Stazione TRC (372 m s.l.m.)	11.4 μ radianti a N-NNE	0.00 °C
Stazione IMB (974 m s.l.m.)	2.5 μ radianti a WSW	0.00 °C
Stazione CMG (117 m s.l.m.)	8.5 μ radianti a ENE	-0.11 °C
Stazione CMT (842 m s.l.m.)	5.3 μ radianti a WSW	0.01 °C

In Figura 2.7 sono riassunti gli andamenti temporali delle componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 4 stazioni borehole.

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

Le componenti NS delle stazioni più in quota (IMB e CMT) mostrano un trend di inclinazione verso S, mentre il trend di quelle EW è in direzione W; una situazione opposta si ha invece alle stazioni

situate a quote più basse (TRC e CMG) dove le componenti NS mostrano inclinazione in direzione N seppure con una evidente inversione riscontrata a CMG dal 5 marzo ma che tende a rientrare. Inoltre, mentre la componente EW di TRC ruota leggermente verso W mentre quella di CMG, stazione situata alla quota più bassa, continua la sua deriva verso E (iniziata il 12 marzo) anche se in misura più contenuta.

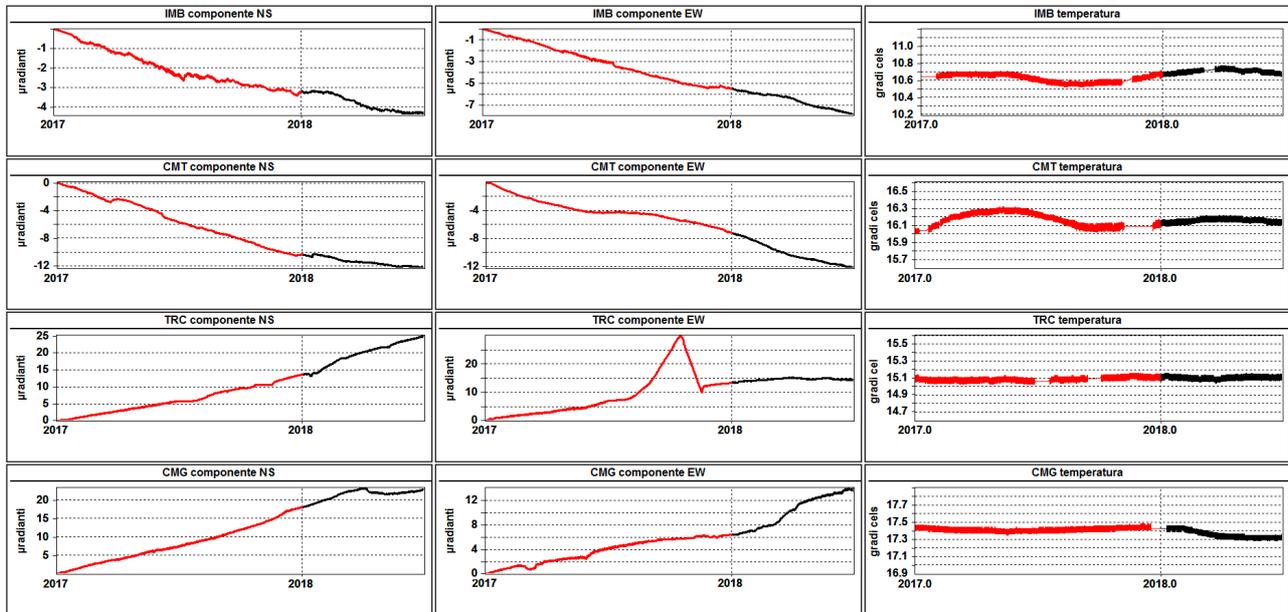


Figura 2.7 – Serie temporali dei segnali registrati a partire da gennaio 2017 dalle 4 stazioni “borehole” della rete vesuviana, con sensori ubicati a 25 m di profondità, ordinate dal basso verso l’alto secondo la latitudine. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E, mentre la terza colonna riporta la temperatura in $^{\circ}$ C registrata da ogni sensore.

In rosso sono riportati i segnali relativi al 2017 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel 2018.

L’inclinazione dell’edificio vulcanico avviene con modalità diverse in relazione alla posizione delle stazioni e più precisamente in direzione N-NE nella parte meridionale del Vesuvio a quota intermedia (TRC) ed a ENE a quota bassa (CMG) mentre il tilting prevalente, riguardante la porzione settentrionale del vulcano ed a quote maggiori (IMB e CMT), si concentra invece in direzione WSW.

Permane l’andamento anomalo del pattern di deformazione registrato a CMG, la cui causa potrebbe essere attribuita a variazioni di livello nella falda acquifera presente nell’area.

Per quanto riguarda le temperature di fondo pozzo risultano tutte stabili tranne quella di CMG che è in diminuzione.

3. MONITORAGGIO TERMICO AD IMMAGINE

La stazione della Rete Permanente di Monitoraggio Termico VES1 acquisisce immagini all'infrarosso del versante interno sud occidentale del cratere del Vesuvio (Fig. 3.1; Sansivero et al., 2013).

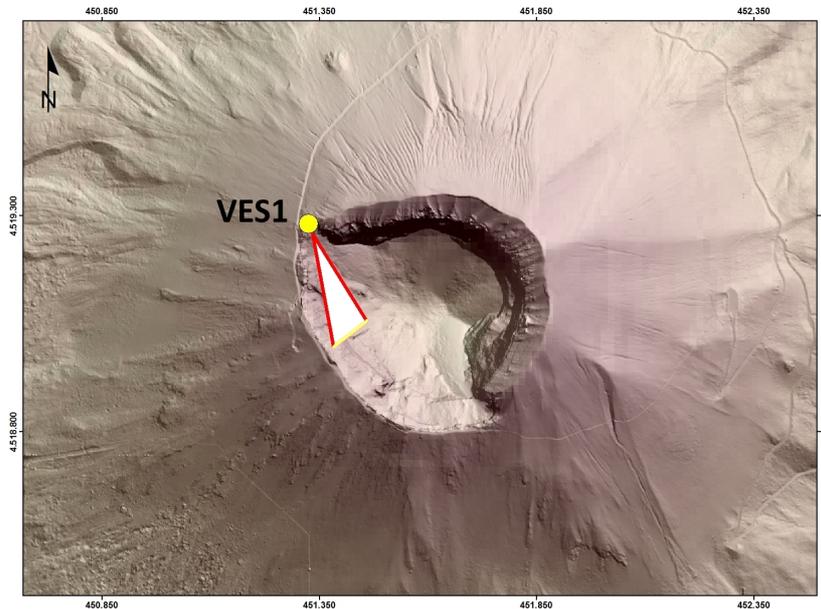


Figura 3.1 - Mappa della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad immagine operante al Vesuvio. Punto giallo: posizione della stazione; base del triangolo: area campionata.

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

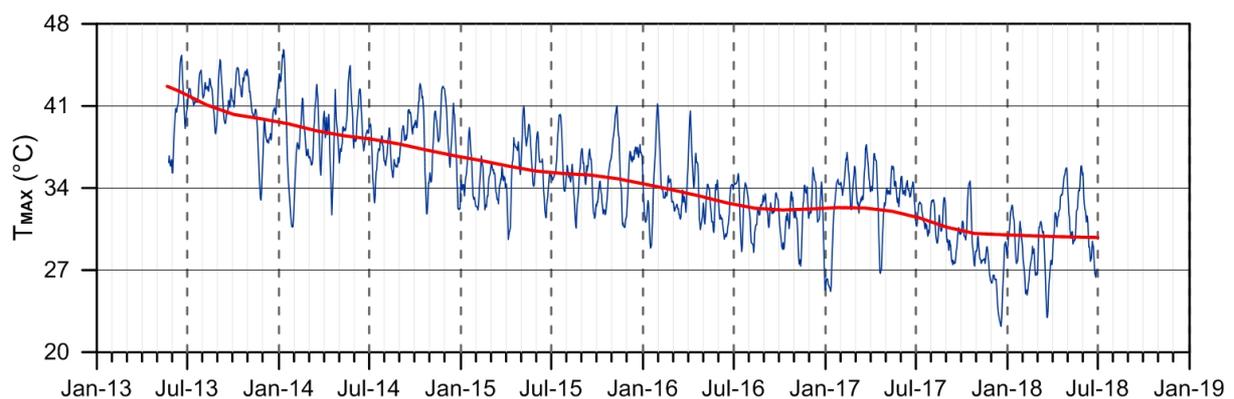


Figura 3.2 - Stazione Vesuvio VES1. Serie temporali delle medie settimanali (blu) e del trend a lungo termine (rosso) dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo di filtraggio analitico STL.

L'analisi della serie temporale in Figura 3.2 evidenzia, nel lungo termine, un decremento del campo di temperatura superficiale dell'area target (linea rossa). Nel mese di giugno 2018, seppur in presenza di un'ampia oscillazione a corto periodo già rilevata nei mesi precedenti, si osserva un andamento sostanzialmente stabile della temperatura massima.

4. GEOCHIMICA DEI FLUIDI

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

- l'acquisizione in continuo di dati di flusso di CO₂ dal suolo, della temperatura della fumarola principale e del gradiente di temperatura del suolo tramite la stazione multiparametrica (FLXOV6) installata in area bordo cratere (settore SW);
- l'esecuzione di misure di flusso di CO₂ dal suolo e temperatura del suolo su punti fissi selezionati in area di Bordo Cratere;
- il campionamento delle fumarole di bordo cratere (Figura 4.1).

Di seguito vengono riportate le osservazioni più rilevanti sulla composizione chimico-isotopica del campione della fumarola FC2 relativo al mese di maggio, non riportate nel precedente bollettino, e sui nuovi dati acquisiti.

Una dettagliata descrizione del modello geochimico interpretativo del sistema idrotermale del Vesuvio è riportata nel lavoro scientifico Chiodini et al., (2001) e nei precedenti rapporti di sorveglianza in cui sono state segnalate variazioni della composizione delle fumarole interne al cratere. In particolare a partire dal terremoto del 9 ottobre 1999 (Md=3.6) sono stati misurati per 2 anni aumenti nel tempo sia del rapporto He/CO₂ che della pCO₂ stimata sulla base di geoindicatori gassosi. Contemporaneamente si è verificata la diminuzione del rapporto H₂/CO₂ e l'incremento del rapporto CO₂/CH₄ (Fig. 4.2). Tali variazioni sono state interpretate come un incremento dell'input di fluidi magmatici più ossidanti, poveri in CH₄ e ricchi in He nel sistema idrotermale. A partire dall'autunno 2002, le composizioni chimiche delle fumarole hanno mostrato un graduale ritorno dei valori verso le condizioni pre-1999. Una dettagliata descrizione delle variazioni e delle possibili interpretazioni sono riportate nel lavoro scientifico Caliro et al. (2011).

Va comunque segnalato che nei campioni degli ultimi anni si registra un lieve aumento del rapporto CO₂/CH₄ ed He/CO₂, rispetto ai valori più bassi raggiunti nel periodo 2009-2010, che potrebbe essere legato ad un aumento nella frazione di fluidi ossidanti (magmatici?). Tuttavia, le analisi relative ai campioni prelevati negli ultimi periodi mostrano una diminuzione dei valori di equilibrio di temperatura e pressione parziale di CO₂ (stime basate sul CO), rientrando in un trend pluriennale di diminuzione dell'attività idrotermale all'interno del cratere del Vesuvio (Fig. 4.3).

La composizione isotopica dell'ossigeno e dell'idrogeno del vapore delle fumarole è stata oggetto di un approfondito studio per la simulazione contemporanea del processo di mixing tra differenti componenti, effetti dovuti alla condensazione e/o aggiunta di acqua, scambio isotopico dell'ossigeno fra le molecole dell'acqua e della CO₂ (Caliro et al., 2011). Nel quadro interpretativo delineato in questo lavoro i campioni del 2014-2018 mostrano una diminuzione della frazione della componente magmatica (Fig. 4.4).

La composizione delle fumarole di bordo cratere, costituita essenzialmente da una miscela di aria e del componente idrotermale profondo (Caliro et al., 2011), nei campioni di Giugno 2018 (fumarole B1 e B3) non ha mostrato variazioni significative rispetto ai periodi precedenti (Fig. 4.5). La stazione multiparametrica, installata in area bordo cratere (settore SW), misura: il flusso di CO₂ dal suolo (ogni due ore), gradiente di temperatura nel suolo, temperatura della maggiore emissione fumarolica dell'area, pressione atmosferica e temperatura dell'aria (ogni 10 minuti). I parametri misurati nel periodo di interesse, non hanno mostrato variazioni significative (Fig. 4.6). Le lievi variazioni osservate sono, comunque, da mettersi in relazione a variazioni stagionali ed a particolari eventi meteorologici (pioggia, vento forte, bassa pressione, temperatura atmosferica etc.). Sono allo studio le azioni necessarie per il ripristino della stazione di fondo cratere (FLXOV7), interessata in precedenza da un evento franoso.

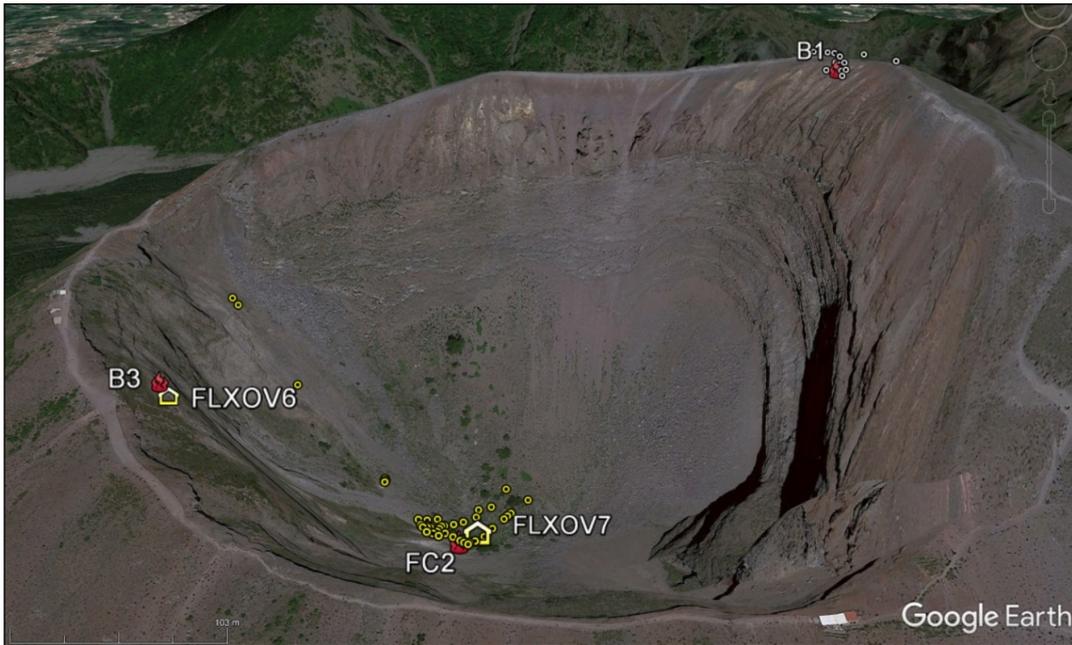


Figura 4.1 - Ubicazione delle stazioni multiparametriche FLXOV6 e FLXOV7, e dei siti oggetto delle attività di sorveglianza geochimica in area craterica. In particolare, sono riportate le principali fumarole di bordo cratere (B1-B3) e di fondo cratere (FC2), sono inoltre riportati i punti fissi per la misura del flusso di CO₂ dal suolo e della temperatura del suolo, in area bordo cratere (simboli bianchi) e in area di fondo cratere (simboli gialli).

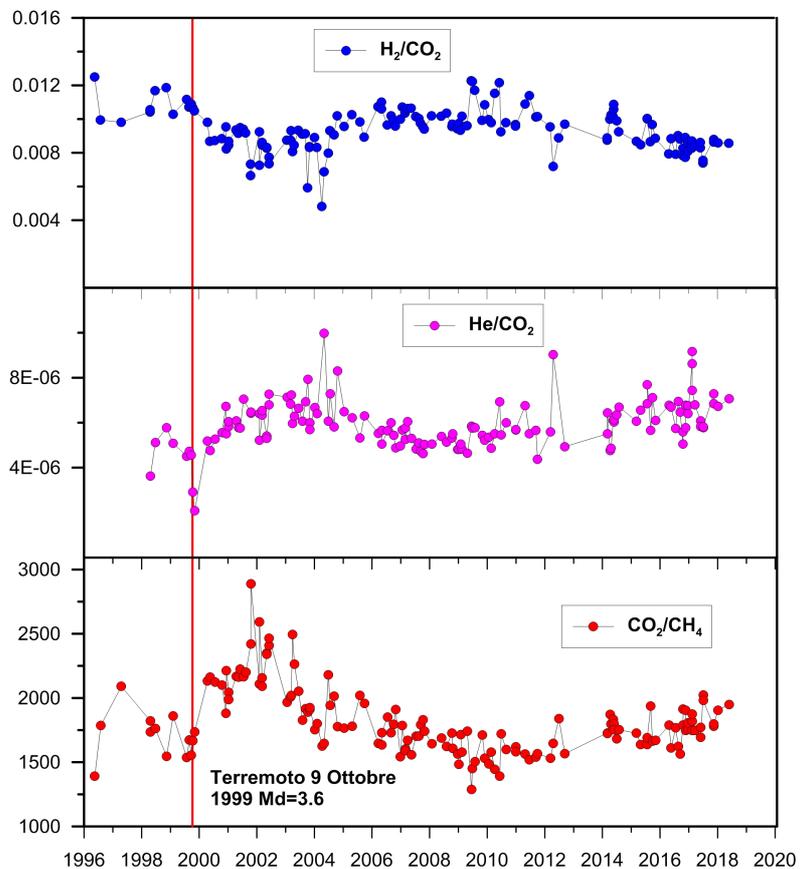


Figura 4.2 - Variazioni composizionali della fumarola FC2 nel periodo 1996-2018.

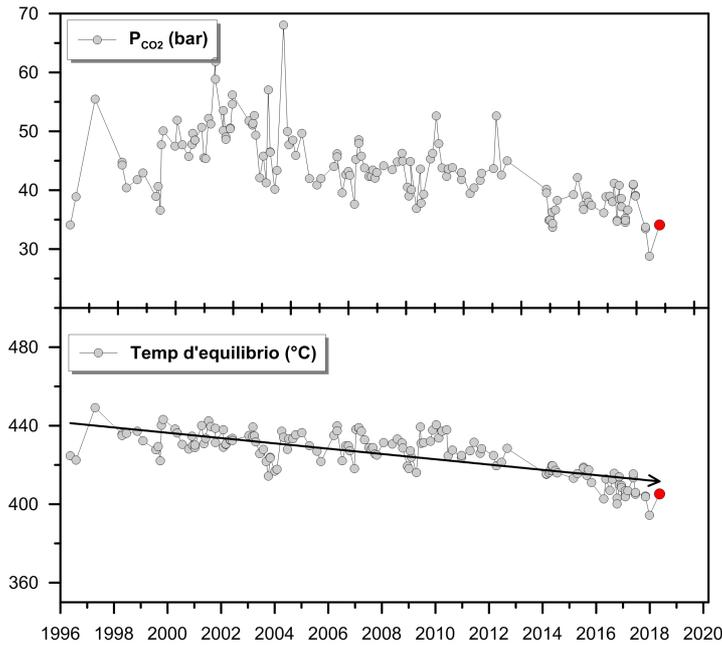


Figura 4.3 - Cronogramma dei valori d'equilibrio della temperatura e pressione parziale di CO_2 stimati per il sistema idrotermale del Vesuvio. Il campione di maggio è riportato con il simbolo rosso.

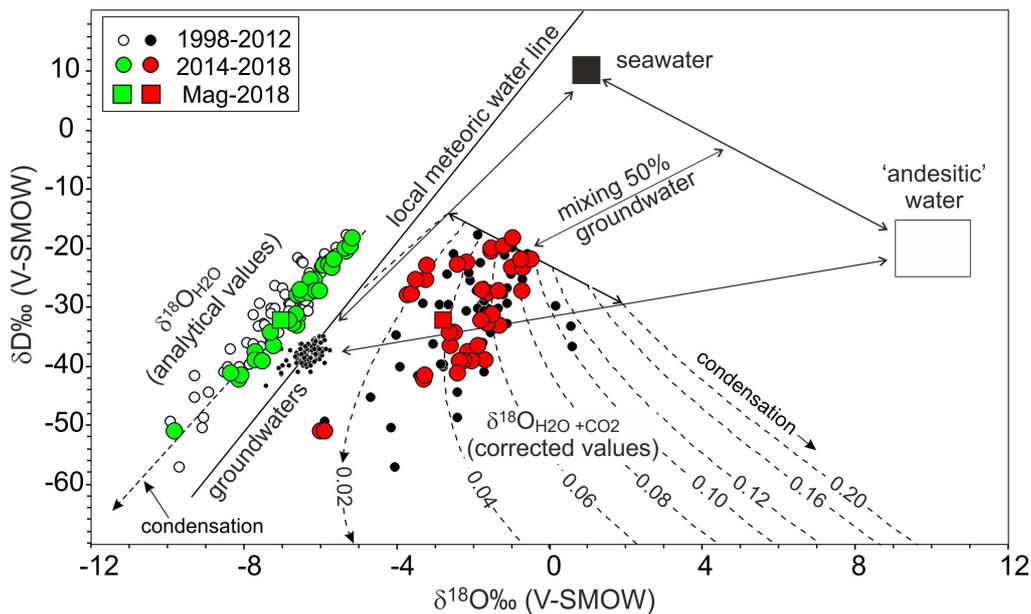


Figura 4.4 - Diagramma della composizione isotopica dell'ossigeno e dell'idrogeno dei vapori emessi dalle fumarole di fondo craterale del Vesuvio. I dati analitici (simboli verdi e bianchi) possono essere interpretati considerando l'equilibrio isotopico dell'ossigeno tra il CO_2 e il vapore e gli effetti di condensazione in accordo con il modello proposto in Caliro et al. (2011), al quale si rimanda per maggiori dettagli e approfondimenti. Tale modello prevede un'origine del vapore fumarolico dovuta al mixing di tre componenti: acqua magmatica di tipo andesitico, acqua di mare e acque meteoriche locali. Le linee tratteggiate indicano le variazioni composizionali del sistema H_2O+CO_2 legate a processi di condensazione del vapore per un fluido originato da differenti miscele delle tre componenti, la cui frazione molare di CO_2 è indicata su ogni linea. La composizione dei campioni calcolata per il sistema H_2O+CO_2 (simboli rossi e neri) individua, nel diagramma, la possibile frazione di CO_2 del fluido originale. Alti valori di questa frazione indicherebbero, quindi, un maggiore contributo di fluidi magmatici nei gas fumarolici.

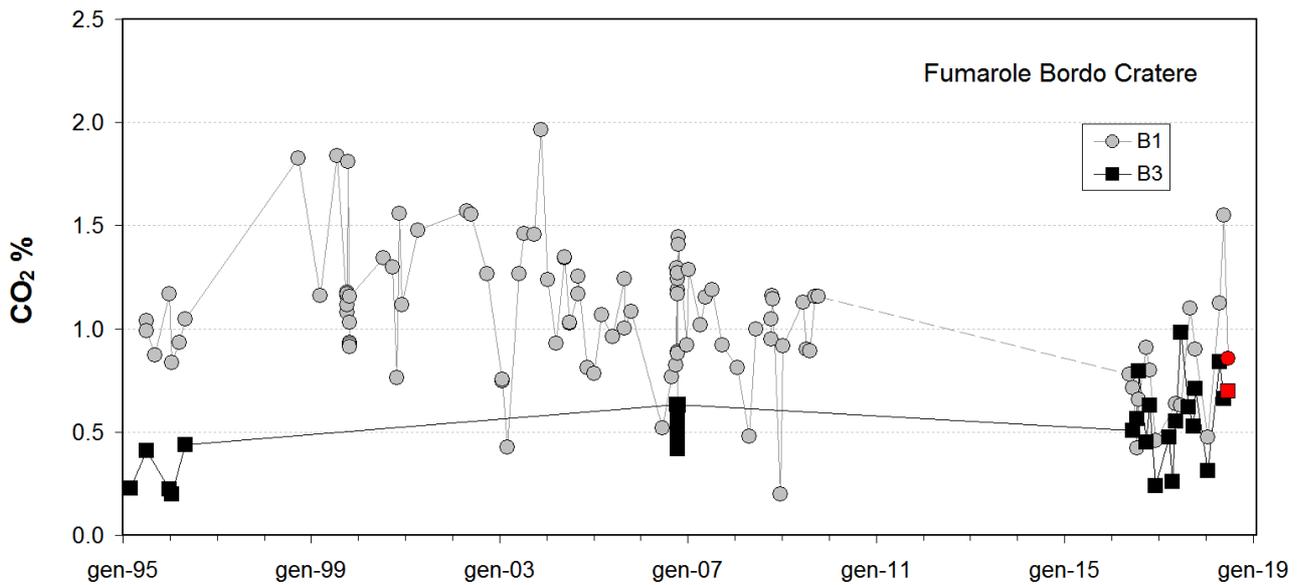


Figura 4.5 - Cronogramma della concentrazione di CO₂ delle fumarole di bordo cratere B1 (area anemometro) e B3 (settore SW). I campioni di giugno 2018 sono riportati con il simbolo rosso.

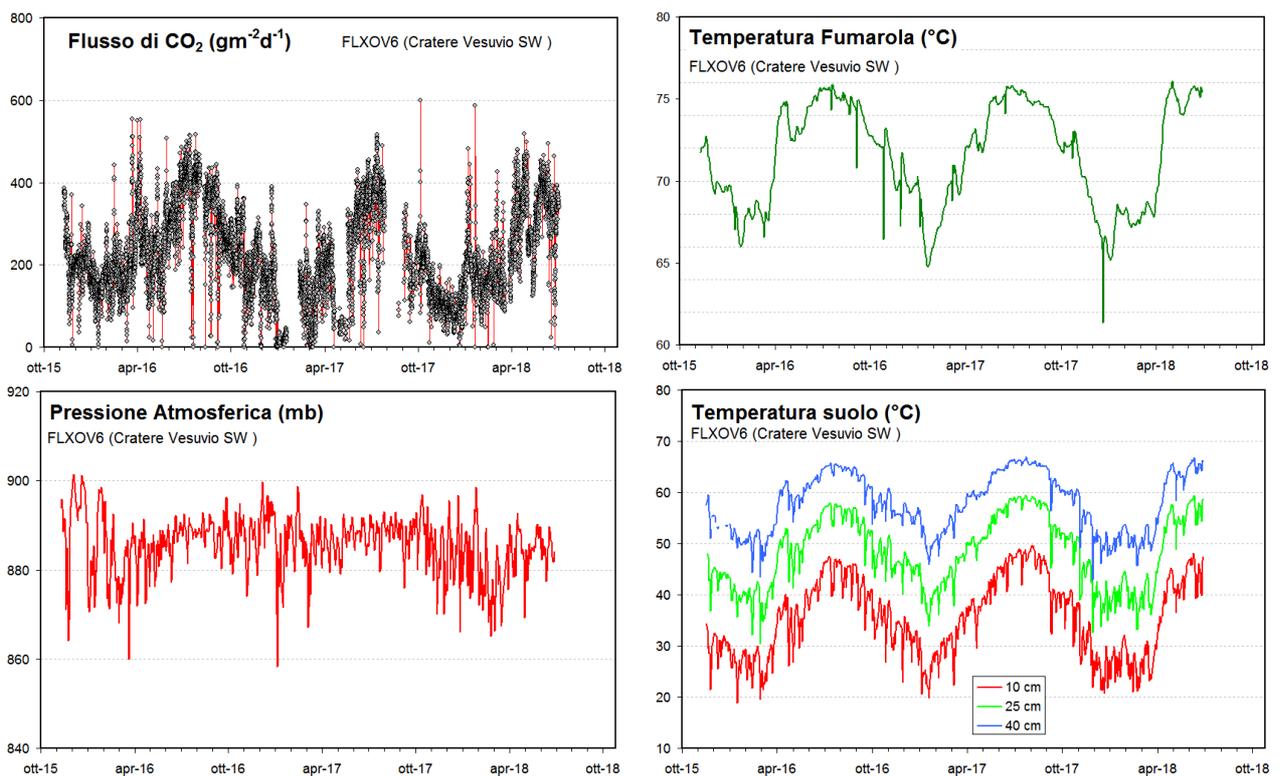


Figura 4.6 - Parametri misurati dalla stazione geochimica (FLXOV6) installata in area bordo cratere del Vesuvio (settore SW). I valori, eccetto il flusso di CO₂ dal suolo, sono riportati come medie giornaliere.

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

- 1) SISMOLOGIA: Al Vesuvio permane una lieve sismicità di fondo con 97 terremoti registrati nel mese di giugno 2018 ($M_{dmax}=1.9$).
- 2) DEFORMAZIONI: Dai dati GPS, Marografici e Tiltmetrici non si osservano deformazioni riconducibili a sorgenti vulcaniche.
- 3) TERMOGRAFIA: I dati della telecamera termica evidenziano nel mese di giugno 2018, nell'ambito di un generale trend in decremento del campo di temperatura, un andamento sostanzialmente stabile della temperatura massima.
- 4) GEOCHIMICA: Le analisi geochimiche non evidenziano variazioni significative alle fumarole presenti sul bordo del cratere.

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.

Bibliografia

- Caliro S., Chiodini G., Avino R., Minopoli C., and Bocchino B. (2011) Long time-series of chemical and isotopic compositions of Vesuvius fumaroles: evidence for deep and shallow processes. *Annals Geophysics* **54**, 137-149. doi: 10.4401/ag-5034.
- Chiodini G., Marini L., and Russo M. (2001) Geochemical evidence for the existence of high-temperature hydrothermal brines at Vesuvio volcano, Italy. *Geochim. Cosmochim. Acta* **65**, 2129-2147.
- 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.
- 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 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.