



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Il Monitoraggio dei Vulcani Campani

Primo semestre 2019

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli | OSSERVATORIO VESUVIANO



Editor:

Francesca Bianco
Mario Castellano

Febbraio 2021

<http://hdl.handle.net/2122/14589>

INDICE

INTRODUZIONE	3
VESUVIO	6
1 – Monitoraggio Sismologico	6
1.1 – Rete Sismica Permanente	6
1.2 – Rete Sismica Mobile	11
2 – Monitoraggio Geodetico	13
2.1 – Rete GPS	13
2.2 – Rete Tiltmetrica	15
2.3 – Rete Mareografica	19
2.4 – Interferometria SAR	21
3 – Monitoraggio Vulcanologico	24
3.1 – Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine	24
3.2 – Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia	25
4 – Monitoraggio Geochimico	28
4.1 – Monitoraggio Geochimico della Sezione di Napoli	28
4.2 – Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo	32
CAMPI FLEGREI	35
1 – Monitoraggio Sismologico	35
1.1 – Rete Sismica Permanente	35
1.2 – Rete Sismica Mobile	41
2 – Monitoraggio Geodetico	44
2.1 – Rete GPS	44
2.2 – Rete Tiltmetrica	48
2.3 – Rete Mareografica	53
2.4 – Rete Gravimetrica	56
2.5 – Interferometria SAR	59
3 – Monitoraggio Vulcanologico	64
3.1 – Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine	64
3.2 – Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia	68
3.3 – Comparazione della temperatura superficiale da dati satellitari e Rete TIRNet	74
4 – Monitoraggio Geochimico	82
4.1 – Attività fuori Convenzione: Caratterizzazione chimico-fisica delle acque della falda Flegrea	91
ISCHIA	93
1 – Monitoraggio Sismologico	93
1.1 – Rete Sismica Permanente	93
1.2 – Rete Sismica Mobile	97
2 – Monitoraggio Geodetico	98
2.1 – Rete GPS	98
2.2 – Rete Tiltmetrica	100
2.3 – Rete Gravimetrica	102
3 – Monitoraggio Vulcanologico	104
3.1 – Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia	104
4 – Monitoraggio Geochimico	110
4.1 – Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo	110
4.2 – Attività fuori Convenzione: Studio e monitoraggio dell'area fumarolizzata di Mt.Cito	112
RINGRAZIAMENTI	114
DISCLAIMER – Responsabilità e proprietà dei dati	114

INTRODUZIONE

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) è componente del Servizio Nazionale di Protezione Civile, ex articolo 6 della legge 24 febbraio 1992 n. 225 ed è Centro di Competenza per i fenomeni sismici, vulcanici e i maremoti per il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (DPC). L'Osservatorio Vesuviano, Sezione di Napoli dell'INGV, ha nei suoi compiti il monitoraggio e la sorveglianza H24/7 delle aree vulcaniche attive campane (Vesuvio, Campi Flegrei e Ischia). Tali attività sono disciplinate dall'Accordo-Quadro (AQ) sottoscritto tra il DPC e l'INGV per il decennio 2012-2021 e sono dettagliate negli Allegati A e B del suddetto AQ. Il presente Rapporto sul Monitoraggio dei Vulcani Campani rappresenta l'attività svolta dall'Osservatorio Vesuviano e dalle altre Sezioni INGV impegnate nel monitoraggio dell'area vulcanica campana nel primo semestre 2019. Per una informazione rapida sui principali parametri monitorati, si riporta di seguito il Quadro di Sintesi complessivo.

QUADRO DI SINTESI DELLO STATO DEI VULCANI CAMPANI NEL PRIMO SEMESTRE 2019

VESUVIO

SISMOLOGIA - Il numero totale di eventi sismici registrati mostra un modesto incremento rispetto a quello medio degli anni precedenti con un totale di 661 terremoti vulcano-tettonici registrati nel primo semestre 2019. E' stato registrato un solo evento di magnitudo superiore a 2.0 con una $M_{dmax}=2.5\pm 0.3$.

DEFORMAZIONI DEL SUOLO - Le deformazioni del suolo mostrano una sostanziale stabilità con deformazioni limitate all'area del Gran Cono. Tale campo deformativo è associabile a una dinamica di subsidenza locale dovuta a processi di compattazione o gravitativi, non riconducibili a movimenti di masse magmatiche.

I dati della Rete Tiltmetrica, per caratteristiche intrinseche alla sensibilità strumentale, evidenziano dinamiche locali non sempre correlabili con gli altri parametri monitorati. In particolare si nota che l'inclinazione dell'edificio vulcanico avviene con modalità diverse in relazione alla posizione delle stazioni.

GEOCHIMICA - Le indicazioni fornite dalla geochimica dei fluidi sono di una sostanziale stabilità dei trend precedentemente osservati, con variazioni di lieve entità ed ancora non chiaramente interpretabili, rientrando in un andamento pluriennale di diminuzione dell'attività idrotermale nell'area craterica del Vesuvio.

TERMOMETRIA - L'analisi della serie temporale della telecamera termica evidenzia, nel lungo termine, un costante decremento del campo di temperatura superficiale dell'area target fino a dicembre 2017. Dopo tale data e per tutto il primo semestre 2019 l'andamento della temperatura massima evidenzia un'alternanza di periodi durante i quali si osservano sensibili diminuzioni a cui seguono periodi con andamento stabile o in lieve incremento.

I dati delle campagne di misura con Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide non mostrano significative variazioni.

CAMPI FLEGREI

SISMOLOGIA - Nel corso del primo semestre 2019 ai Campi Flegrei sono stati registrati 395 terremoti generalmente di bassa magnitudo ($M_{dmax} = 2.5\pm 0.3$). La maggior parte degli eventi localizzati ricade nell'area compresa tra il bordo sudoccidentale del cratere di Astroni e Pozzuoli-Solfatara-Pisciarelli a profondità comprese nei primi 3 km tranne alcuni eventi nel Golfo di Pozzuoli che hanno raggiunto i 4 km.

Nell'area flegrea, nel suo complesso, non si evidenziano particolari variazioni nell'ampiezza del rumore sismico.

DEFORMAZIONI DEL SUOLO - Nel periodo gennaio-giugno 2019, seppur in presenza di oscillazioni nelle serie temporali, è riscontrabile un sollevamento con valori massimi di circa 0.7cm/mese. Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 25 cm a partire da gennaio 2016.

Tale andamento è visibile anche nel campo tiltmetrico che per le peculiari caratteristiche di sensibilità della strumentazione evidenzia, inoltre, inclinazioni a livello locale non ancora correlabili con gli altri dati monitorati.

L'evoluzione delle deformazioni del suolo nel primo semestre 2019 è anche confermata dalle analisi di telerilevamento satellitare.

Le misure gravimetriche evidenziano che l'area flegrea non è stata interessata da variazioni di gravità statisticamente significative.

GEOCHIMICA - Le attività di sorveglianza geochemica hanno evidenziato significative variazioni in particolare nelle aree di Solfatara e Pisciarelli. Tali variazioni, osservate già a partire dai primi anni 2000 e verosimilmente causate da notevoli input di fluidi magmatici nel sistema di alimentazione profondo, hanno coinvolto l'intero sistema idrotermale inducendo una modifica permanente del sistema. Ciò è testimoniato:

- dalle evidenze di riscaldamento e pressurizzazione delle parti più superficiali del sistema idrotermale della Solfatara;

- dall'aumento, di oltre 5 °C, della temperatura del suolo misurata in punti fissi della Solfatara e di Pisciarelli cui corrisponde un incremento del rilascio energetico dall'area di circa 20%;

- dal generale aumento dei flussi fumarolici, oltre che dall'incremento della componente magmatica nei flussi stessi.

TERMOMETRIA - Le analisi dei dati delle telecamere termiche permanenti e mobili e dei dati satellitari mostrano un andamento sostanzialmente stabile seppur con oscillazioni a vario periodo.

ISCHIA

SISMOLOGIA - Nel corso del primo semestre 2019 sono stati registrati 17 terremoti di bassa magnitudo ($M_{dmax} = 1.2 \pm 0.3$).

DEFORMAZIONI DEL SUOLO - L'analisi delle deformazioni del suolo mostra una generale subsidenza dell'isola con valori più elevati nel settore meridionale.

Nel primo semestre 2019 l'analisi dei dati tiltmetrici mette in evidenza un pattern di inclinazione fortemente polarizzato in direzione N-NNE.

GEOCHIMICA - I dati geochemici acquisiti nel primo semestre 2019, sebbene parziali, non hanno mostrato variazioni rilevanti ricollegabili a modifiche dell'attività vulcanica. La stabilità nella composizione chimica dei fluidi campionati riflette la stabilità del sistema geotermico.

TERMOMETRIA - Le attività di Monitoraggio Termico con Telecamera Mobile e Termocoppia, effettuate con continuità, restituiscono un quadro di sostanziale stabilità dei parametri misurati.

Si rimanda alla lettura del Rapporto per i dettagli sulle Reti di Monitoraggio e le analisi dei dati acquisiti.

Francesca Bianco

Mario Castellano

Il Monitoraggio dei Vulcani Campani

Primo semestre 2019

I. Aquino¹, V. Augusti¹, R. Avino¹, E. Bagnato¹, S. Bellomo³, E. Bellucci Sessa¹, P. Belviso¹, A. Benincasa¹, G. Berrino¹, S. Borgstrom¹, G. Borriello¹, G. Brandi¹, F. Buongiorno², C. Buonocunto¹, S. Caliro¹, F. Capecchiacci¹, A. Caputo¹, T. Caputo¹, A. Carandente¹, F. Cirillo¹, A. Correale³, P. Cusano¹, A. D'Alessandro¹, W. D'Alessandro³, V. D'Errico¹, W. De Cesare¹, P. De Martino¹, A. Di Filippo¹, M. Dolce¹, C. Federico³, E. Gagliano Candela³, D. Galluzzo¹, A. Gattuso³, G. Giuffrida³, S. Guardato¹, L. La Pica³, A. La Rocca¹, F. Liguoro¹, D. Lo Bascio¹, E. Marotta¹, C. Martino¹, C. Minopoli¹, M.G. Misseri³, L. Nardone¹, R. Nave¹, M. Orazi¹, G. Pecoraino³, R. Peluso¹, S. Pinto¹, M. Polcari², V. Prano³, G. Ricciardi¹, P. Ricciolino¹, C. Ricco¹, F. Sansivero¹, A. Santi¹, C. Scaletta³, G. Scarpato¹, M. Silvestri², V. Torello¹, A. Tramelli¹, G. Vilardo¹

¹ INGV - Osservatorio Vesuviano – Napoli

² INGV - Osservatorio Nazionale Terremoti – Roma

³ INGV - Sezione di Palermo



La Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano.

VESUVIO

1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO

Il monitoraggio sismologico del Vesuvio è svolto mediante l'uso congiunto di una Rete Sismica Permanente e una Rete Sismica Mobile. Tali reti consentono di individuare e classificare transienti sismici legati a terremoti o altri fenomeni naturali e artificiali.

1.1 Rete Sismica Permanente

La Rete Permanente di monitoraggio sismico del Vesuvio conta 18 siti di installazione operativi (Figura 1.1.1, Tabella 1.1.1; la stazione OVO presso la Sede Storica è attualmente duplicata: analogica e digitale; la stazione VARP non è funzionante). In ogni sito, secondo i casi, possono insistere più tipologie di stazioni e/o di sensori in base alle logiche di molteplicità di sensori o di ridondanza strumentale.

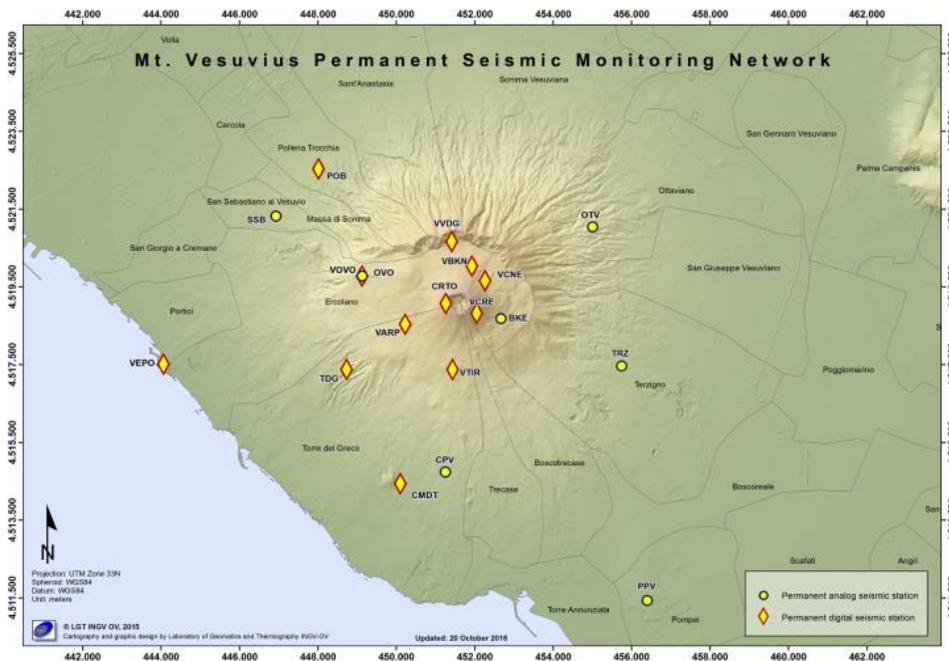


Figura 1.1.1 – Rete Sismica Permanente del Vesuvio.

Ad oggi sulla rete sono presenti 7 stazioni di tipo analogico equipaggiate con sensori da 1Hz di cui tre utilizzano sensori a tre componenti mentre le rimanenti sono a singola componente. Le stazioni di tipo digitale sono 11 (12 con l'apparato digitale della stazione OVO) e sono basate sull'acquisitore GILDA progettato e prodotto presso l'INGV Osservatorio Vesuviano.

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 8 velocimetri a larga banda (Broadband: 0.016-50 Hz), un velocimetro Very Broadband (0.004-50 Hz), un sensore da pozzo Guralp 3TB/5TB costituito da velocimetro Very Broadband (0.008-50 Hz) accoppiato ad un accelerometro, un velocimetro a larga banda Lennartz 3D/20s e un sensore velocimetrico da 1Hz.

A questi si aggiungono un accelerometro, 6 microfoni infrasonici Infracyrus (progettati e prodotti dall'INGV Osservatorio Vesuviano) e un microfono broadband Chaparral.

La Tabella 1.1.1 sintetizza, per ogni sito, il tipo di sensore e di acquirettore presente.

Tabella 1.1.1 – Stato della Rete Sismica Permanente del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
BKE	40.8185N 14.4387E 872m	Vesuvio Bunker Est	Febbraio 1992	3 Geotech S13	Analogica	Radio UHF analogica
CMDT	40.7794N 14.4087E 118m	Camaldoli della Torre	2006	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	ADSL
CPV	40.7822N 14.4220E 181m	Cappella Vecchia	18/2/1992	Mark L4-3D	Analogica	Radio UHF analogica
CRTO	40.8212N 14.4220E 1097m	Cratere Vesuvio Ovest	Settembre 2006	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
OTV	40.8393N 14.4663E 372m	Ottaviano	20/3/1996	Mark-L4C	Analogica	Radio UHF analogica
OVO (duplicata: analogica e digitale)	40.8272N 14.3965E 584m	Sede Storica	Novembre 1971 15/3/2010	3 Geotech S13 Nanometrics Trillium 240s /1 Microfono Larga Banda Chaparral	Analogica GILDA	Radio UHF analogica Wi-Fi
VOVO (pozzo)	40.8283N 14.3956E 493m	Sede Storica	11/3/2015	Guralp 3TB/vel120s 5TB/accelerometro	2 GILDA	Intranet e Wi-Fi
POB	40.8522N 14.3833E 170m	Pollena	9/7/2014	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Radio UHF digitale
PPV	40.7535N 14.4836E 30m	Pompei Scavi	2/3/2004	Mark-L4C	Analogica	Radio UHF analogica
SSB	40.8416N 14.3704E 176m	San Sebastiano	Febbraio 1993	Mark L4-3D	Analogica	Radio UHF analogica
TDG	40.8065N 14.3920E 305m	Torre Del Greco	7/6/2016	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Radio UHF digitale
TRZ	40.8070N 14.4753E 176m	Terzigno	Agosto 1994	Mark-L4C	Analogica	Radio UHF analogica
VARP non operativa	40.8164N 14.4098E 671m	Parco Vesuvio Zona Baracche Forestale	9/2/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VBKN	40.8299N 14.4298E 860m	Vesuvio Bunker Nord	12/5/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VCNE	40.8266N 14.4340E 942m	Vesuvio Cratere Nord Est	19/11/2014	Lennartz-3D 1Hz	GILDA	Wi-Fi

VCRE	40.8190N 14.4314E 1130m	Vesuvio Cratere Est	15/10/2008	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VEPO	40.8047N 14.3367E 2m	Vesuvio Enea Portici	11/9/2014	Lennartz 3D/20s Episensor ES-T	2 GILDA	ADSL
VTIR	40.8059N 14.4242E 619m	Vesuvio Località Tirone	19/6/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VTVA non operativa	40.7971N 14.4396E 366m	Trecase Ingresso Forestale	18/12/2014	6 Guralp VSP Flute (classe 40T 60s)	5 GILDA	ADSL/UMTS
VVDG	40.8356N 14.4239E 855m	Vesuvio Valle del Gigante	7/9/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi

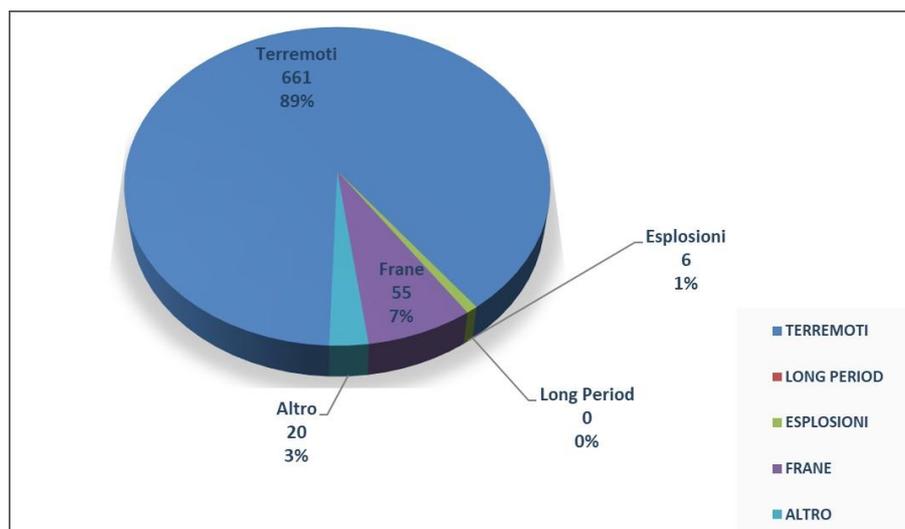
Sono in corso le attività per il ripristino del sito di Trecase (VTVA) nonché della linea elettrica e quella in fibra ottica che collegavano gli apparati installati sul cratere al Rifugio Imbò (quota 1000).

Nel corso del primo semestre 2019, sono stati registrati un totale di 742 eventi locali, ripartiti nelle diverse tipologie riportate in Figura 1.1.2.

I segnali sismici transienti registrati nell'area vesuviana e non classificabili come terremoti sono legati alle attività antropiche locali e identificati, in genere, come esplosioni di natura artificiale. Vi sono poi segnali attribuibili a frane, che interessano generalmente l'area craterica. Altri tipi di segnali, dovuti ad attività sismica non rientrante nelle precedenti categorie o a fenomeni non sismici (es. tuoni e ad altre attività antropiche), sono compresi nella tipologia "ALTRO".

Per quanto riguarda l'attività sismica naturale sono stati registrati 661 terremoti vulcano-tettonici, la maggior parte dei quali di magnitudo inferiore a 2.0 ($M_{dmax} = 2.5 \pm 0.3$). E' stato possibile determinare l'ipocentro di 497 eventi. Persiste un modesto incremento nel numero totale di eventi registrati rispetto a quello medio degli anni precedenti (Figura 1.1.3).

Figura 1.1.2 – Distribuzione percentuale degli eventi per tipologia nel primo semestre 2019. Le esplosioni riportate sono tutte di origine artificiale.



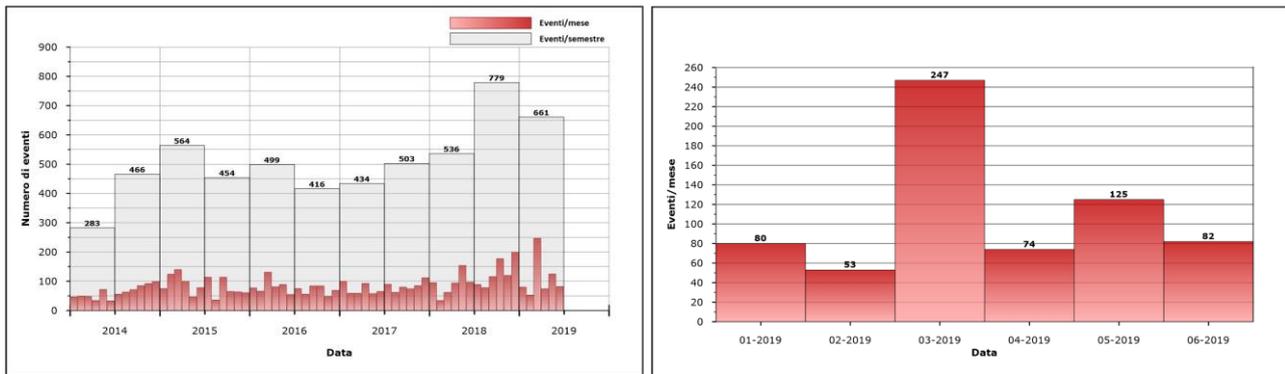


Figura 1.1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

I terremoti sono generalmente localizzati al di sotto dell'area craterica, con ipocentri fortemente concentrati nei primi due chilometri di profondità con un solo evento che ha superato i 4 km (Figure 1.1.4 e 1.1.5).

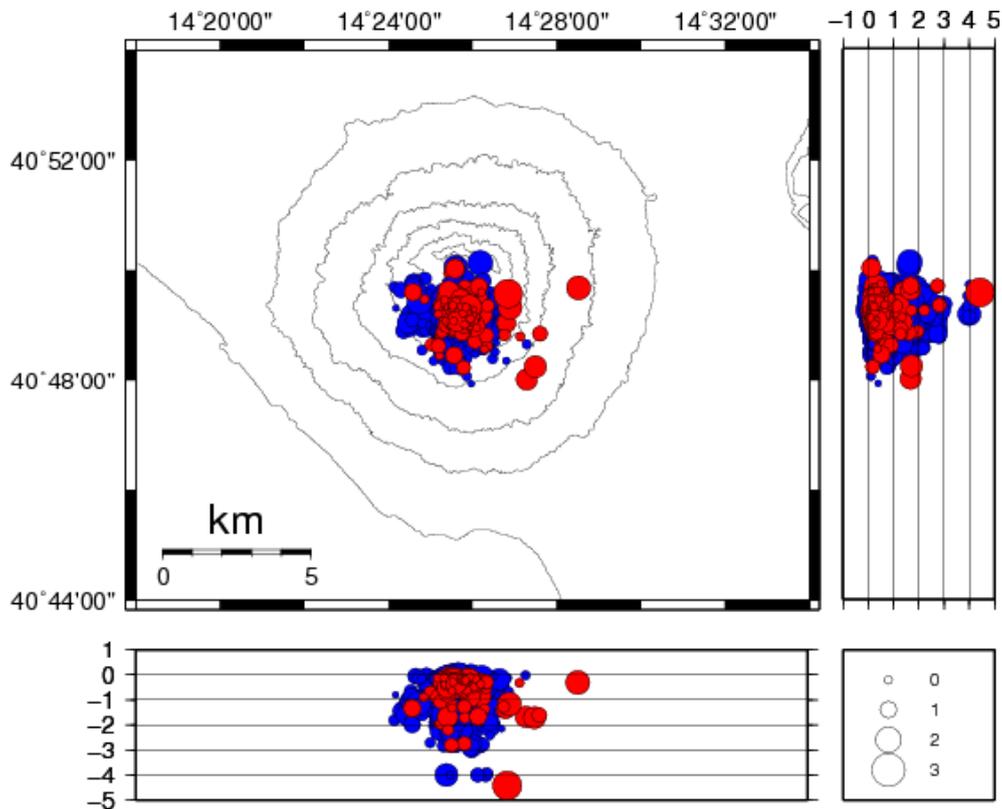


Figura 1.1.4 – Localizzazione degli ipocentri nell'area vesuviana durante gli ultimi 5 anni (in blu) e nel primo semestre 2019 (in rosso).

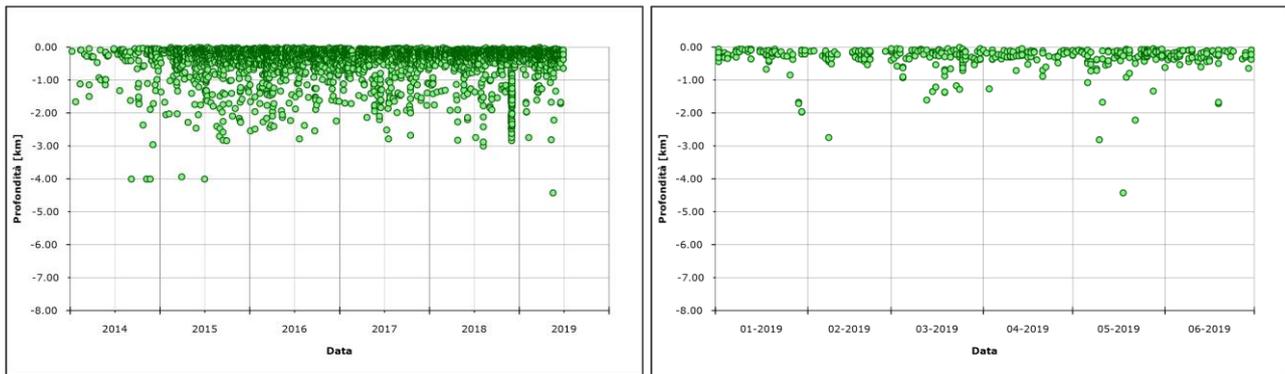


Figura 1.1.5 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti vesuviani localizzati nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

L’analisi del meccanismo focale dell’unico evento di magnitudo ≥ 2.0 (Tab.1.1.2) registrato durante il primo semestre 2019 mostra una soluzione associabile ad un meccanismo di tipo strike-slip (Figura 1.1.6).

Tabella 1.1.2 - Parametri ipocentrali degli eventi vesuviani con $M \geq 2.0$ localizzati nel primo semestre 2019.

Data UTC	Md	Lat N	Long E	Prof. (km)
2019/05/18 21:11:18.30	2.5	40.8262	14.4473	4.42

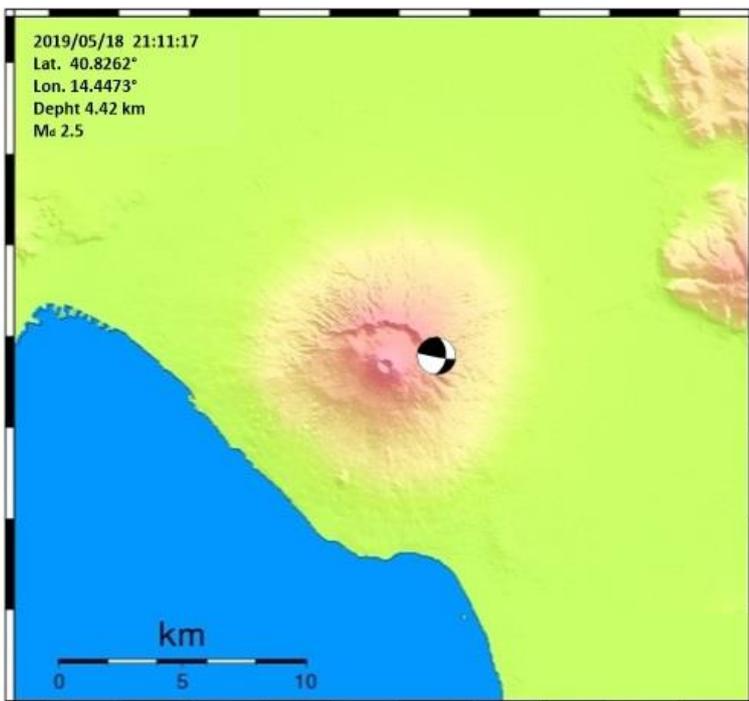


Figura 1.1.6 - Meccanismo focale dell’evento del 18/05/2019 di Md 2.5.

Non si evidenziano particolari andamenti nella frequenza di accadimento (Figura 1.1.3), negli ipocentri (Figura 1.1.4), nella distribuzione temporale delle profondità ipocentrali (Figura 1.1.5), nella distribuzione temporale delle magnitudo (Figura 1.1.7) e nel rilascio cumulativo di energia (Figura 1.1.8).

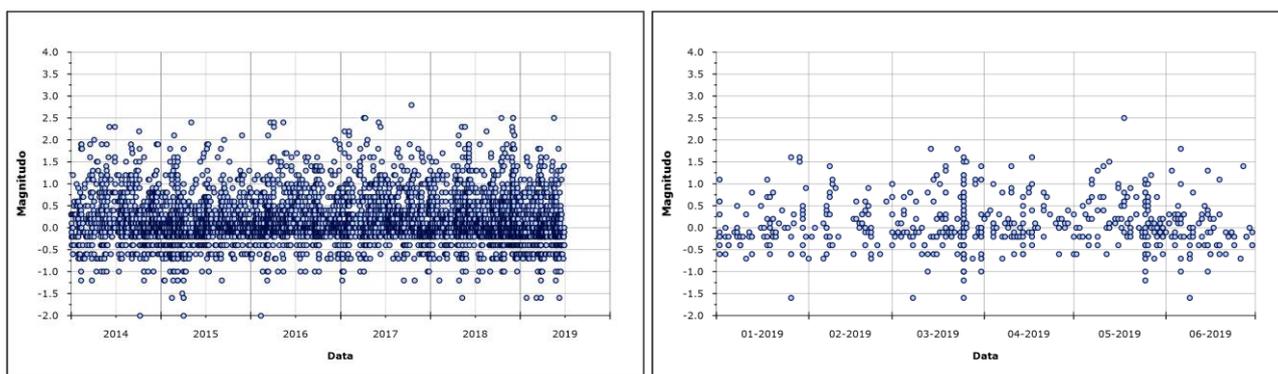


Figura 1.1.7 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

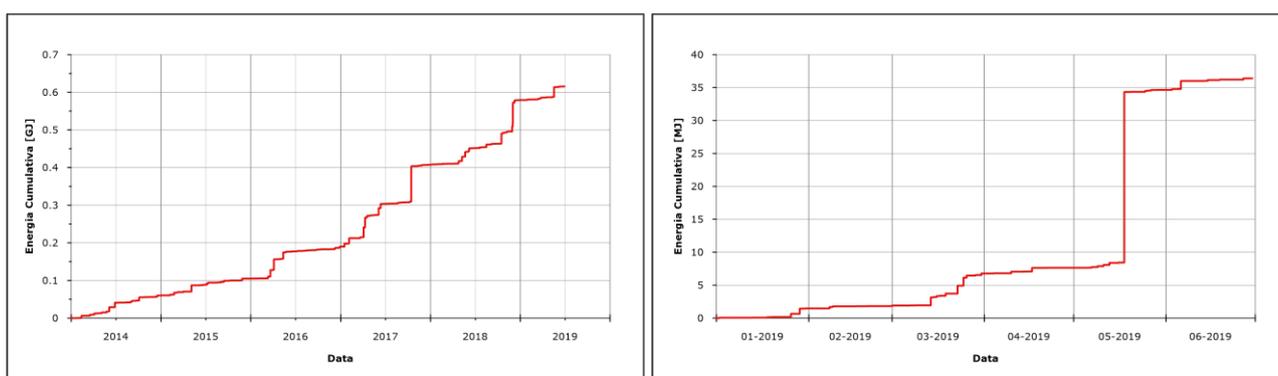


Figura 1.1.8 – Andamento cumulativo dell’energia rilasciata dai terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra) calcolato attraverso la relazione di Gutenberg-Richter $\log E = 2.4 + 2.14 M - 0.054 M^2$.

La sismicità del Vesuvio è spesso caratterizzata, analogamente ad altri vulcani, dalla presenza di sciami sismici. Nella Tabella 1.1.3 sono riportati i principali sciami registrati nel corso del primo semestre 2019.

Tabella 1.1.3 – Principali sciami sismici registrati al Vesuvio nel primo semestre 2019.

Inizio sciame	Fine sciame	N. eventi	M_{max}
2019/03/25 17:26	2019/03/25 23:58	146	1.6
2019/05/25 18:35	2019/05/25 20:14	23	1.0

1.2 Rete Sismica Mobile

A tutto giugno 2019 nell’area del Vesuvio sono operative 6 stazioni sismiche stand-alone a larga banda di cui una dotata anche di accelerometro. Tutta la strumentazione funziona in modalità di acquisizione locale. La configurazione delle stazioni operative durante il primo semestre 2019 è mostrata in Figura 1.2.1, mentre le caratteristiche tecniche sono riassunte nella Tabella 1.2.1.

Figura 1.2.1 – Stazioni della Rete Mobile operative al Vesuvio nel corso del primo semestre 2019.

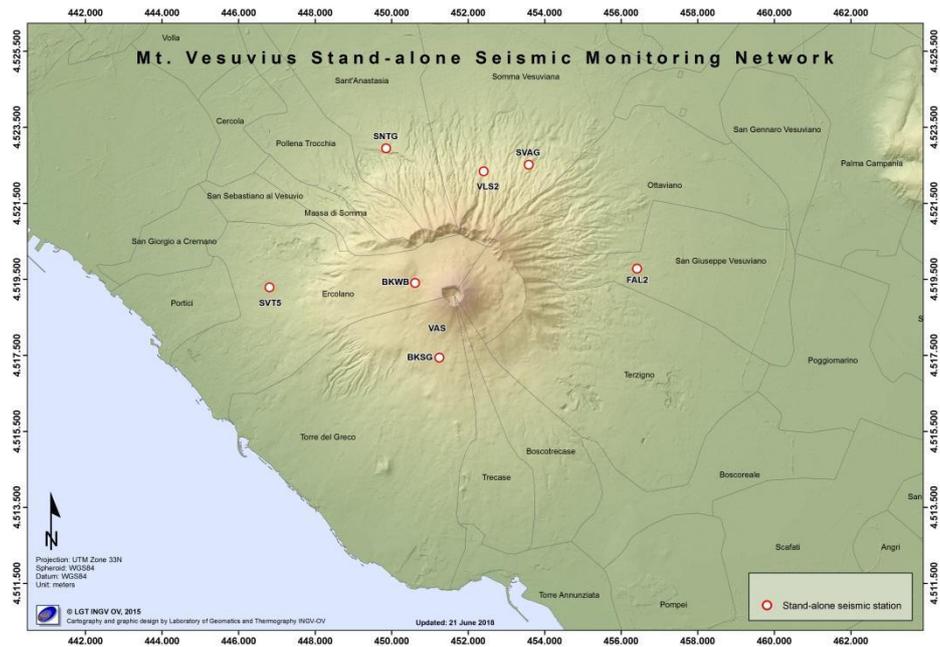


Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Sismica Mobile operativa al Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisitore	Trasmissione
BKSG	40.8065N 14.4220E 600m	Vesuvio Bunker Sud	Ottobre 2008	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
BKWG BKWK	40.8242N 14.4143E 834m	Vesuvio Bunker Ovest	Ottobre 2008	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	Marslite	Locale
FAL2	40.8279N 14.4831E 176m	S.Giuseppe Vesuviano	Marzo 2013	Lennartz LE3D/20s	Marslite	Locale
SNTG	40.8560N 14.4051E 255m	S.Anastasia	Aprile 2014	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
SVAG	40.8524N 14.4493E 373m	Somma Vesuviana	Maggio 2012	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
SVT2	40.8229N 14.3692E 195m	San Vito	Novembre 2015	Lennartz LE3D/20s	Gilda	Locale
VLS2	40.8507N 14.4353E 430m	Monte Somma	Gennaio 2015 dismessa 03/2019	Lennartz LE3D/20s	Taurus	Locale

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il primo semestre 2019 il monitoraggio geodetico del Vesuvio è stato effettuato attraverso misure continue GPS, tiltmetriche, mareografiche e mediante campagne di interferometria SAR.

2.1 Rete GPS

Le stazioni permanenti GPS operanti nell'area vesuviana sono 11 (Figura 2.1.1, Tabella 2.2.2), i dati vengono trasmessi con varie tecnologie in funzione della logistica del sito. Sono stati sostituiti tutti i ricevitori di vecchia generazione RS500 con ricevitori soprattutto della serie GRX1200PRO. I sistemi di trasmissione attualmente comprendono quattro stazioni che si appoggiano alla rete Wi-Fi dell'Osservatorio Vesuviano, cinque che utilizzano linee GSM e due che trasmettono con tecnologia ADSL. Tre sono i siti alimentati con energia solare dotati di pannelli fotovoltaici da 100W; due di questi sono ubicati in zone più in quota sul Vesuvio. Per tutti i siti sono disponibili batterie a tampone per estenderne l'operatività in caso di blackout. I dati vengono trasmessi e le stazioni sono gestite sia tramite software Spider della Leica Geosystems che tramite software creati ad hoc, l'affidabilità del sistema e la stabilità sono ottime.

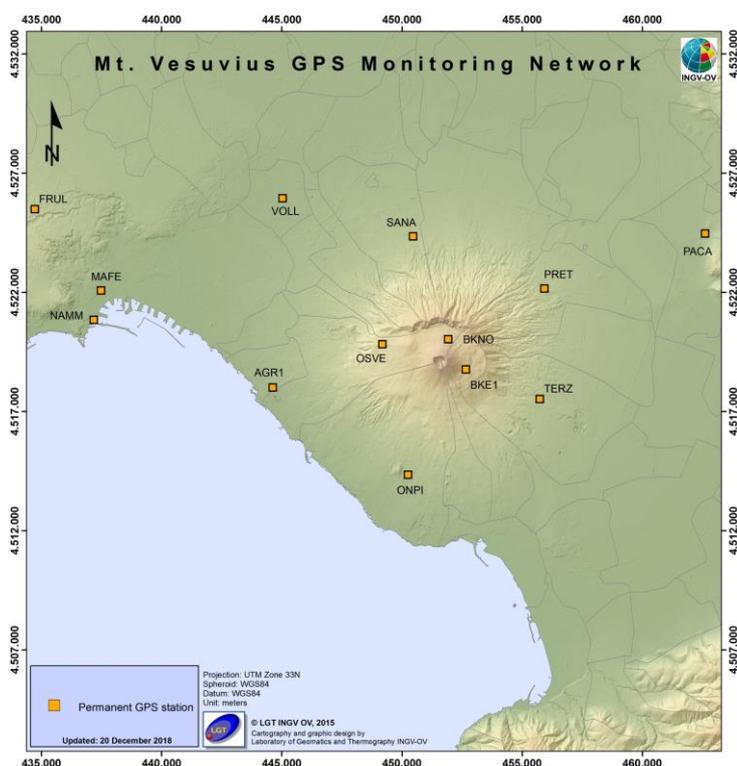


Figura 2.1.1 – Rete GPS del Vesuvio.

Tabella 2.1.1 – Stato della Rete GPS del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
AGR1	40.8112N 14.3434E 116m	Portici Facoltà d'Agraria	2003	Leica GRX1200GGPRO LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL
BKE1	40.8185N 14.4387E 917m	Vesuvio Bunker Est	2006	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	GSM

BKNO	40.8299N 14.4299E 1007m	Vesuvio Bunker Nord	2009	Leica GRX1200GGPRO LEIAT504GG LEIS	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
ENAV	40.5823N 14.3349E 541m	Punta Campanella	2003	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
ONPI	40.7786N 14.4105E 178m	Torre del Greco	2001	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	GSM
OSVE	40.8279N 14.3974E 677m	Sede Storica O. V.	2005	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
PACA	40.8704N 14.5564E 128m	Palma Campania	2002	Leica GRX1200GGPRO LEIAT504 NONE	30sec/flusso 1sec	GSM
PRET	40.8494N 14.7472E 256m	Municipio di Ottaviano	2001	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL
SANA	40.8688N 14.4122E 203m	Sant'Anastasia	2001	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	GSM
TERZ	40.8075N 14.4752E 226m	Terzigno	2001	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
VOLL	40.8828N 14.3476E	Volla	2018	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	GSM

Dalle analisi delle serie temporali dei dati acquisiti non si evidenziano deformazioni del suolo imputabili a fenomeni vulcanici.

Le sole stazioni GPS ubicate nella parte alta dell'edificio vulcanico mostrano una significativa subsidenza e spostamenti orizzontali coerenti con una fase di contrazione del Gran Cono (Figure 2.1.2 e 2.1.3), verosimilmente dovuta a processi di compattazione e/o scivolamento di terreni poco coerenti ed in forte pendenza ed effetti gravitativi.

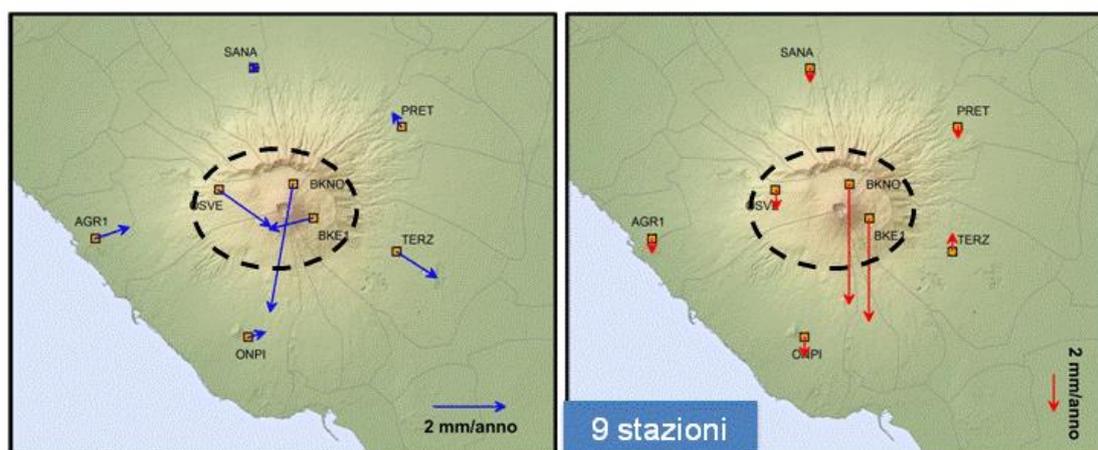


Figura 2.1.2 - Campo di velocità (in mm/anno) degli spostamenti orizzontali (in blu) e verticali (in rosso) nell'intervallo gennaio 2011-giugno 2019.

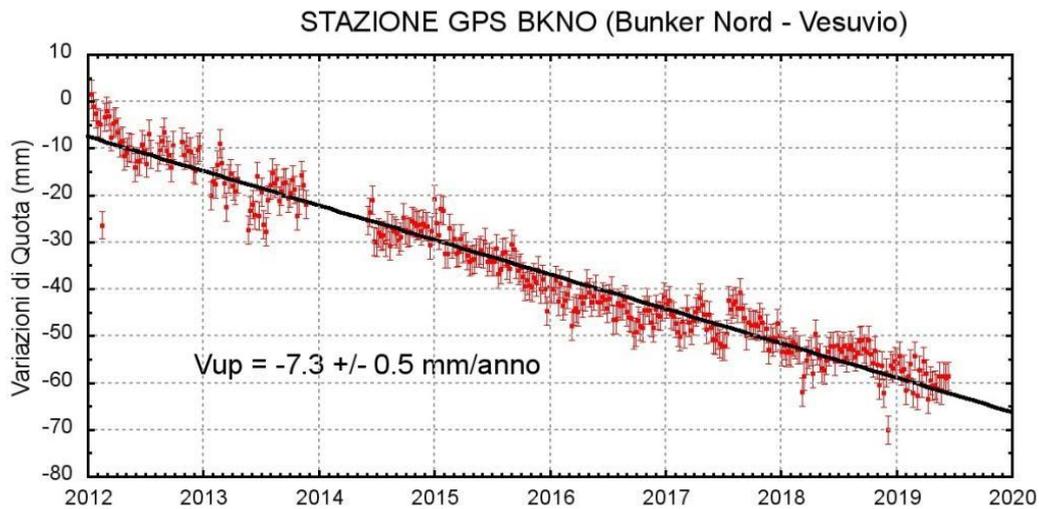


Figura 2.1.3 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di BKNO (Vesuvio) da gennaio 2012 a giugno 2019.

2.2 Rete Tiltmetrica

L'attuale Rete Tiltmetrica del Vesuvio (Figura 2.2.1, Tabella 2.2.1) consiste in 7 stazioni, di cui 3 attrezzate con sensori analogici di superficie, mod. 702 (Applied Geomechanics Instruments) e 4 stazioni attrezzate con sensori digitali da pozzo, mod. Lily (Jewell Instrument) con passo di acquisizione ogni minuto. Tutte le stazioni tranne quella di Trecase (TRC) trasmettono quotidianamente alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano i file dati. Per la stazione di Trecase, distrutta dagli incendi di luglio 2017, si provvede con l'acquisizione locale e lo scarico periodico dei dati.

Il sito CCR è stato perforato ma non ancora strumentato.

Figura 2.2.1 – Rete Tiltmetrica del Vesuvio.

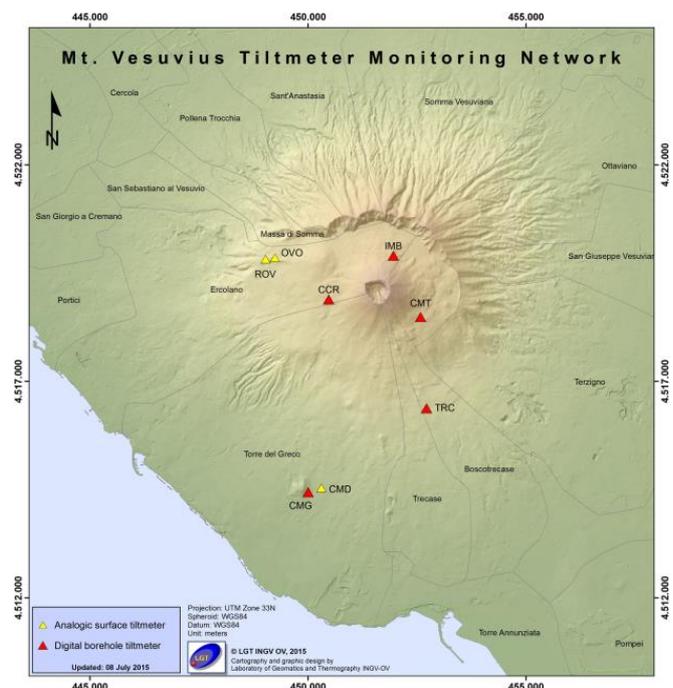


Tabella 2.2.1 – Stato della Rete Tiltmetrica del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmissione
OVO	40.8281N 14.3966E 608 m	Sede Storica OV	18/02/1993	Applied Geomechanics mod. 702	-25 metri	1'	ADSL
ROV	40.8280N 14.3972E 608 m	Sede Storica OV	28/04/2014	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	GSM
CMD	40.7797N 14.4090E 120 m	Torre del Greco Acquedotto Vesuviano	01/06/1996	Applied Geomechanics mod. 702	-2 metri	1'	GSM
TRC	40.7971N 14.4396E 372 m	Trecase Forestale	28/11/2011	Jewell Instrument mod. Lily	-28 metri	1'	Locale
IMB	40.8288N 14.4303E 974 m	Rifugio Imbò	24/11/2014	Jewell Instrument mod. Lily	-22 metri	1'	Wi-Fi
CMG	40.7795N 14.4088E 120 m	Torre del Greco Acquedotto Vesuviano	17/04/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	ADSL
CMT	40.8160N 14.4378E 608 m	Ottaviano Valle dell'Inferno	06/05/2016	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	ADSL

Dai dati tiltmetrici registrati nel primo semestre 2019 si evince che l'inclinazione dell'edificio vulcanico avviene con modalità diverse in relazione alla posizione delle stazioni.

Le 3 direzioni prevalenti di tilting risultano: NNW, NNE nella parte meridionale del Vesuvio ed a quote più basse (rispettivamente CMG e TRC), SW nella porzione settentrionale del vulcano, a quote maggiori ed a SE del Gran Cono (CMT), S sempre nella porzione settentrionale del vulcano, a quote maggiori ed a N del Gran Cono (IMB).

Il pattern di deformazione è visibile nell'odografo di Figura 2.2.2 che riassume il tilting registrato dalle 4 stazioni digitali funzionanti in area vesuviana, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori ad 1 giorno.

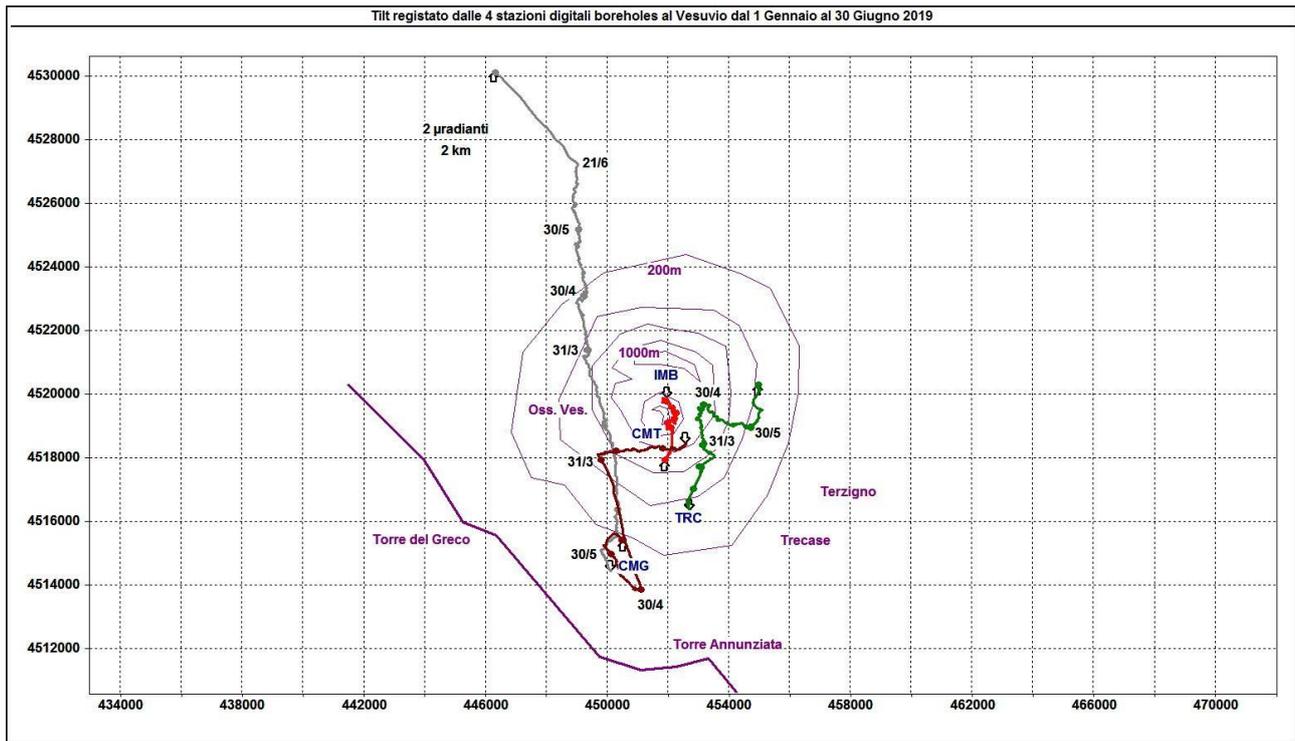


Figura 2.2.2 - Pattern tiltmetrico osservato al Vesuvio alle 4 stazioni digitali nel primo semestre 2019. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 2 μ radianti o 2000 m. L'origine di ogni vettore tilt è siglata con il nome del sito stesso ed indicata convenzionalmente con una freccia puntata verso il basso mentre l'estremo libero è indicato con una freccia puntata verso l'alto. Il verso di ogni vettore (che indica settori di crosta in abbassamento) è univocamente definito dal suo estremo libero. I pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt indicano l'inizio di ogni mese.

Nella Tabella 2.2.2 sono riportate, per le sole stazioni digitali, la variazione di inclinazione del suolo, la direzione di tilting e la variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (\approx -25 m dal p.c.) acquisite nel corso del primo semestre 2019.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato e variazione termica associata relativi alle stazioni digitali.

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione TRC (372 m s.l.m.)	4.5 μ radianti a NE	0.00 °C
Stazione IMB (974 m s.l.m.)	2.0 μ radianti a S	-0.03 °C
Stazione CMG (117 m s.l.m.)	16.2 μ radianti a NNW	-0.06 °C
Stazione CMT (842 m s.l.m.)	3.7 μ radianti a SW	0.21 °C

I segnali registrati dalle 7 stazioni vesuviane (tra analogiche e digitali) sono mostrati in Figura 2.2.3 e non sono corretti del contributo delle stagionalità (essenzialmente di tipo termico).

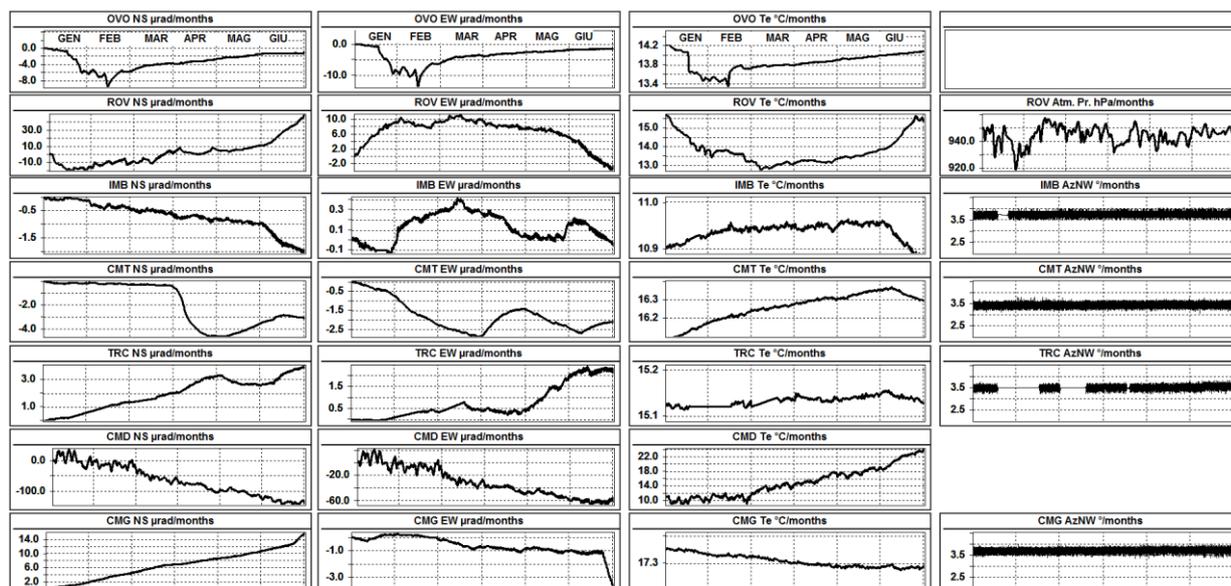


Figura 2.2.3 - Segnali registrati nel primo semestre 2019 dai 7 sensori analogici e digitali della rete del Vesuvio. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E. La terza colonna riporta le temperature in $^{\circ}$ C registrate da ogni sensore ed infine l'ultima colonna è riservata ai segnali non rilevati da tutte le stazioni, come la pressione atmosferica in hPa acquisita a ROV e la variazione di declinazione magnetica in gradi registrata dai sensori Lily. Per questi ultimi, la dicitura AzNW significa azimuth antiorario misurato dalla bussola a fondo pozzo.

In Figura 2.2.4 sono riproposti gli andamenti 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 ivi rappresentato parte dal 1 gennaio 2018; poiché, inoltre, i segnali acquisiti rappresentano una variazione di tilt e non una misura assoluta, sono stati tutti azzerati a partire da quell'epoca.

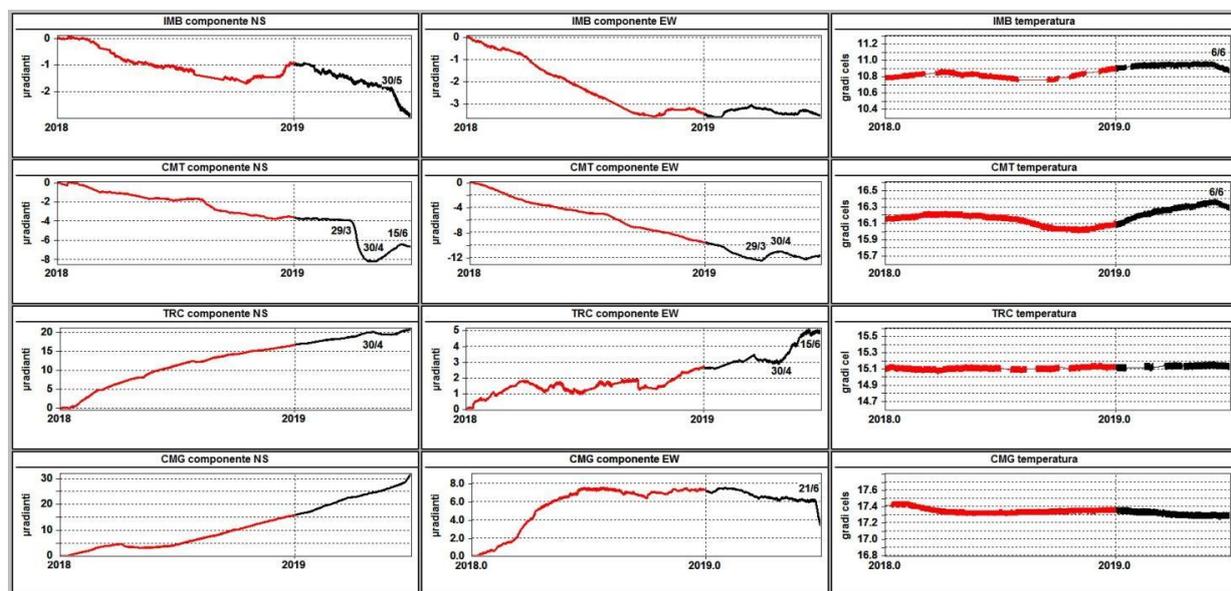


Figura 2.2.4 - Segnali registrati dalle 4 stazioni "borehole" della Rete Tiltmetrica del Vesuvio. Sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è invece relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 colonne riportano le componenti 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 2018 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel primo semestre 2019.

Si osserva, a partire dal 29 marzo, un *tilting reversal* antiorario alla stazione CMT che si conclude il 30 aprile contemporaneamente al verificarsi di un fenomeno analogo alla stazione TRC (Figura 2.2.5). Il 30 maggio anche la stazione IMB viene interessata da un incremento tiltmetrico nella sua componente NS (maggiore abbassamento verso il cratere) mentre il 15 giugno si verificano 2 ulteriori *reversal* di nuovo a CMT e TRC. Il 21 giugno, infine, la stazione CMG mostra una decisa rotazione antioraria della sua direzione di tilting. Dal mese di marzo 2019 sono state complessivamente rilevate 5 variazioni nella direzione di tilting, le quali hanno interessato in fasi alterne tutte le stazioni.

In ordine temporale, le anomalie in direzione hanno riguardato maggiormente CMT il 29/3, CMT e TRC il 30/4, IMB il 30/5, CMT e TRC il 15/6, CMG il 21/6; inoltre, le temperature registrate in quota (IMB e CMT) hanno subito un decremento di 0.08 °C dal 6 giugno.

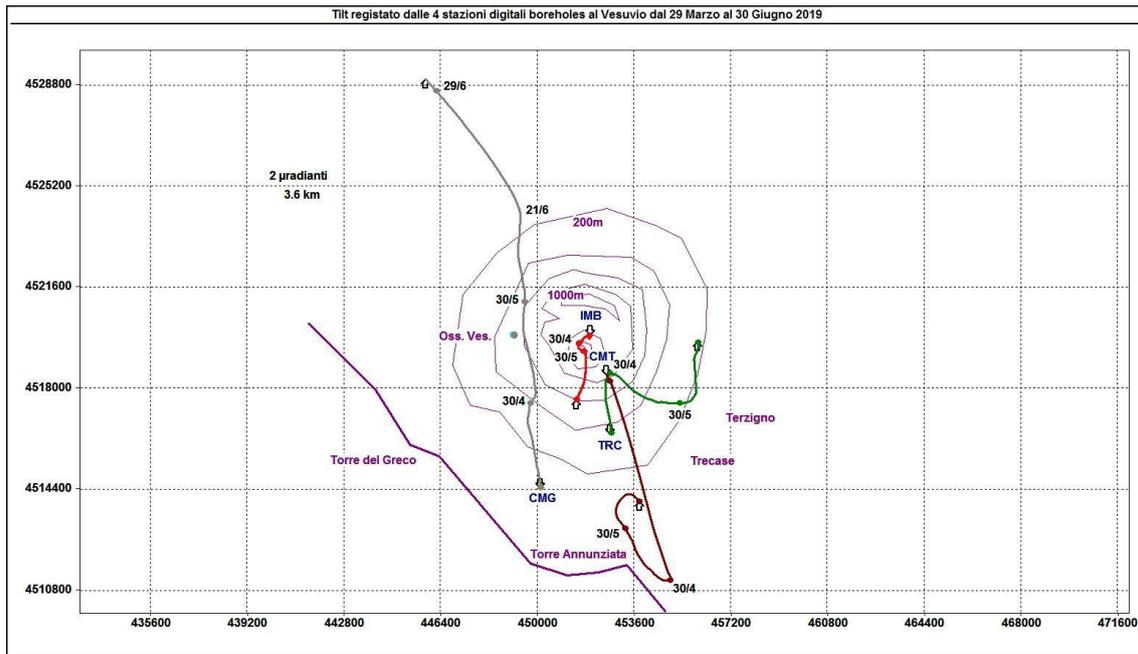


Figura 2.2.4 - Ingrandimento degli ultimi tre mesi della Figura 2.2.1. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 2 μradianti o 3.6 km. I pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt sono distanziati di 30 giorni.

Il quadro cinematico che emerge dal monitoraggio tiltmetrico mostra che negli ultimi 3 mesi si sono verificate in area vesuviana delle deformazioni del suolo le quali, sebbene siano a carattere estremamente locali, dell'ordine del microradiante e quindi di piccola entità, risultano alquanto peculiari in quanto seguono andamenti simili ed a volte speculari. Esse sono maggiormente concentrate sulla porzione sudorientale della base del Gran Cono ma interessano anche parte della zona costiera (Camaldoli della Torre).

2.3 Rete Mareografica

Le Rete Mareografica del Vesuvio consiste in 2 stazioni (Figura 2.3.1, Tabella 2.3.1). Il monitoraggio del livello mareometrico è realizzato mediante sensori a galleggiante (in tubo di calma) collegati ad un encoder digitale. I segnali, campionati ogni minuto, sono acquisiti e trasmessi via modem GSM. L'alimentazione è del tipo solare con pannelli fotovoltaici. Le stazioni sono installate in cabine metalliche o contenitori in vetroresina.

L'ubicazione in ambiente marino condiziona notevolmente le strutture di alloggio, pertanto, è indispensabile una frequente manutenzione. Periodicamente sono effettuati lavori di sturo ai tubi di calma da personale subacqueo specializzato.

A fine giugno 2019, nella cabina di Torre Del Greco è stata installata in prova un'altra stazione (TDG3), allo scopo di ottenere un riscontro più accurato della deformazione in abbassamento che si è registrata da inizio aprile 2019.

In prossimità delle stazioni mareometriche sono materializzati capisaldi della rete di livellazione dell'Osservatorio Vesuviano.

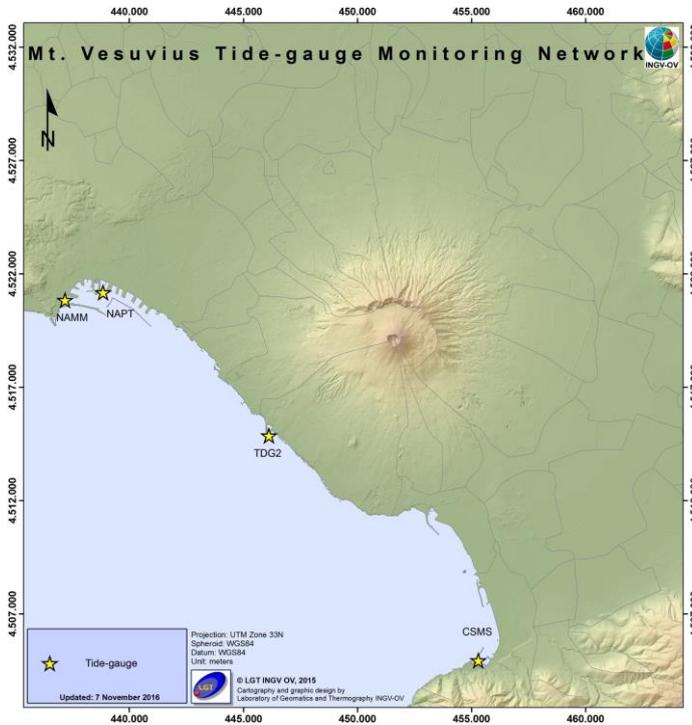


Figura 2.3.1 – Rete Mareografica del Vesuvio.

Tabella 2.3.1 – Stato della Rete Mareografica del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
TDG2	40.7830N 14.3614E	Torre del Greco	02/09/2008	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1min
CSMS	40.6911N 14.4742E	C.Mare di Stabia	30/04/2003	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1min
Stazioni di riferimento Napoli						
NAPT (dismessa)	40.8411N 14.2697E	Napoli Porto	29/04/2003	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1min
NAMM	40.8364N 14.2547E	Napoli S.Vincenzo	06/10/2015	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1min

Nell'area vesuviana si osserva, alla stazione mareografica di Torre del Greco, un anomalo abbassamento del suolo di circa 2 cm, avvenuto nel periodo aprile - giugno 2019 (Fig. 2.3.2). Per tale motivo è stata affiancata alla stazione "TDG2" nello stesso sito, un'altra stazione mareometrica "TDG3" in prova, per monitorare in sicurezza tali deformazioni.

Le analisi alla stazione di Castellammare di Stabia (Fig. 2.3.3) non evidenziano significative deformazioni del suolo.

Figura 2.3.2 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2019 – giugno 2019, 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 (NAMM).

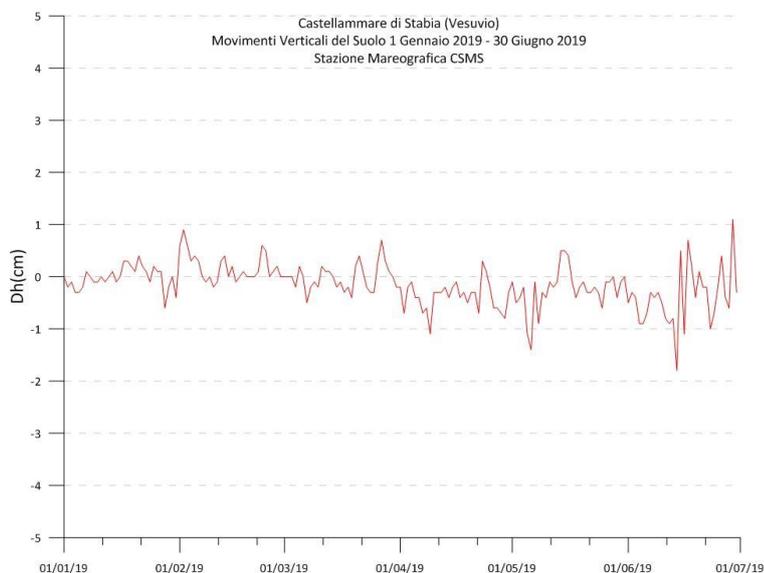
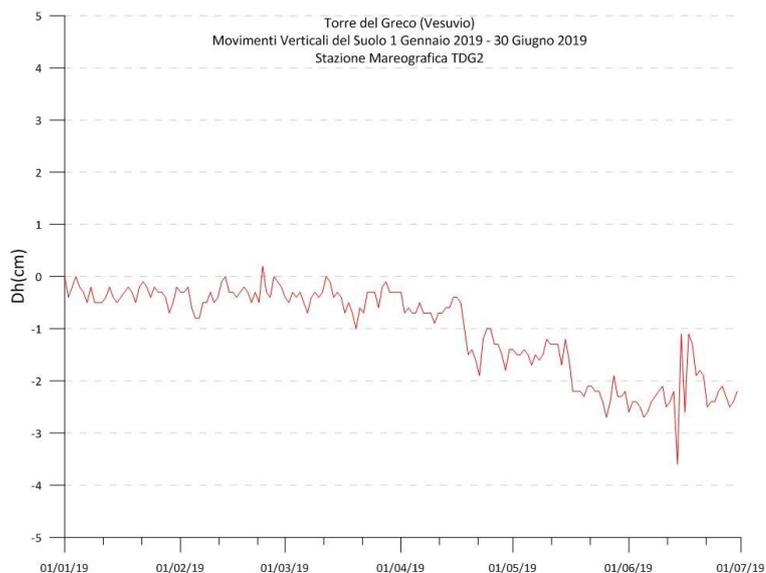


Figura 2.3.3 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2019 – giugno 2019, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Castellammare di Stabia (CSMS). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione Napoli Molo S.Vincenzo (NAMM).

2.4 Interferometria SAR (Osservatorio Vesuviano e Osservatorio Nazionale Terremoti)

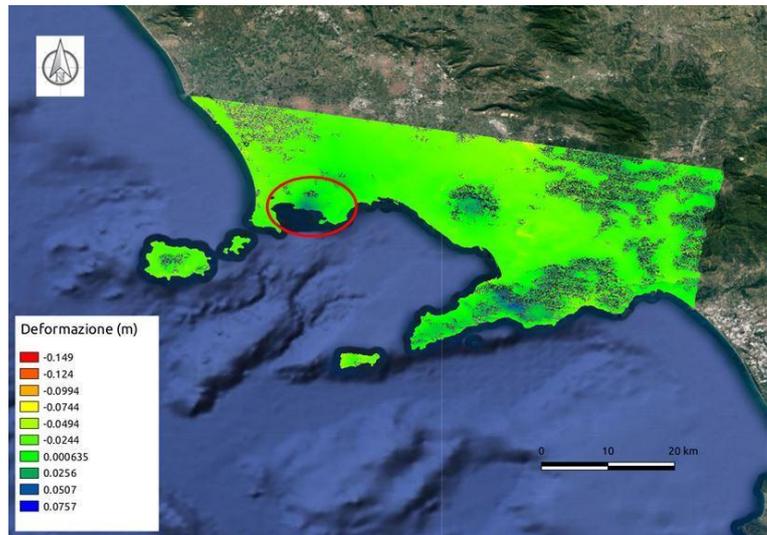
L'analisi interferometrica delle deformazioni nell'area del Vesuvio è stata effettuata analizzando i dati acquisiti dalle principali costellazioni satellitari attualmente operative: COSMO-SkyMed (CSK) dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e Sentinel-1 (S1) del programma europeo Copernicus, gestita dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA).

InSAR - Interferometria differenziale classica

E' stata elaborata una coppia interferometrica dai dati del sensore Sentinel-1A dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA, European Space Agency), operante in banda C e resi disponibili a titolo gratuito dalla suddetta Agenzia attraverso i propri canali web. L'area analizzata comprende l'intero Distretto Vulcanico Napoletano.

L'interferogramma differenziale 02/01/2019-13/07/2019 ha perciò consentito di produrre la mappa di deformazione in linea di vista riportata in Figura. 2.4.1.

Figura 2.4.1 - Mappa di deformazione nella linea di vista del sensore Sentinel-1A per il periodo 02/01/2019-13/07/2019; Dati IWS - TOPS mode, swath 1, orbite discendenti, B perp. = 22 m; (l'unità di misura della deformazione è in m).



InSAR - Analisi multi-temporale

Relativamente al monitoraggio satellitare delle aree dei Campi Flegrei e Vesuvio in modalità multi-temporale, è stato elaborato un dataset composto da 462 immagini SAR fornite dalle missioni COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

I dati sono stati acquisiti in un intervallo temporale di oltre 8 anni, da Gennaio 2011 a Giugno 2019, con un campionamento temporale molto fitto (massimo tempo di rivisita tra due acquisizioni pari a 16 giorni).

I parametri caratterizzanti la geometria di acquisizione sono i seguenti:

- Orbita: Ascendente
- Angolo di Incidenza (θ): $\sim 49^\circ$
- Angolo di Azimuth (α): $\sim 13^\circ$
- Risoluzione: $\sim 3 \times 3$ m

I dati sono stati elaborati mediante approccio InSAR multi-temporale implementato nel software GAMMA, che consente di calcolare il trend lineare di deformazione del suolo e le serie temporali. Per ridurre lo speckle tipico delle immagini SAR, si è scelto di utilizzare fattori di multi-look tali da avere una dimensione del pixel a terra di circa 30 m sia in range che in azimuth.

Per la rimozione del contributo topografico nella fase interferometrica è stato invece utilizzato il modello di elevazione digitale del terreno a 12 metri di risoluzione fornito dalla missione TanDEM-X del DLR (*German Aerospace Center*), opportunamente sottocampionato a 30 m per poter correttamente georiferire il dato in output alla catena interferometrica.

Per quanto riguarda i dettagli dell'elaborazione, si è scelto di considerare le coppie interferometriche caratterizzate da baseline spaziale massima di 250 m ed intervallo temporale massimo di 120 giorni. Ciò ha restituito una rete molto fitta e ridondante di 3203 interferogrammi (Figura 2.4.2), che sono stati quindi filtrati e srotolati per calcolare i parametri di interesse.

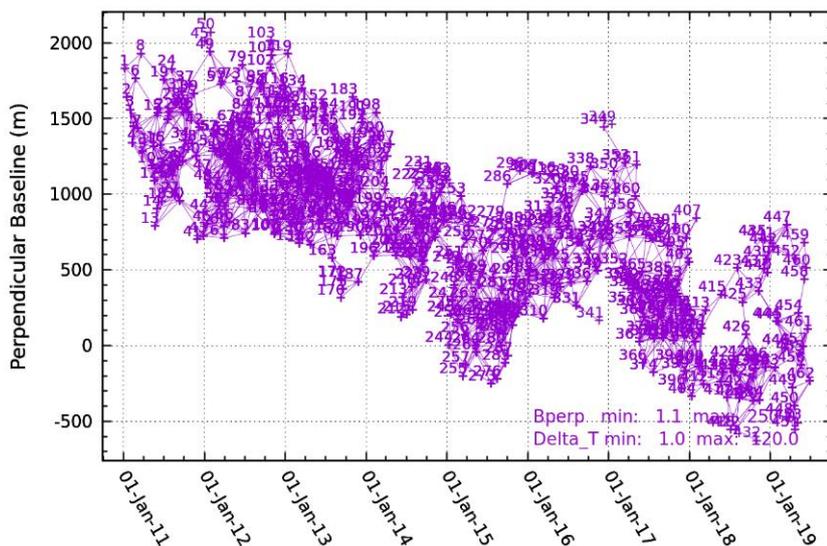


Figura 2.4.2 - Rete di interferogrammi considerata.

Il prodotto ottenuto in termini di velocità di deformazione calcolata lungo la linea di vista (*LoS, Line-of-Sight*) del satellite è mostrato in Figura 2.4.3. Velocità negative sono osservate in corrispondenza del Gran Cono del Vesuvio.

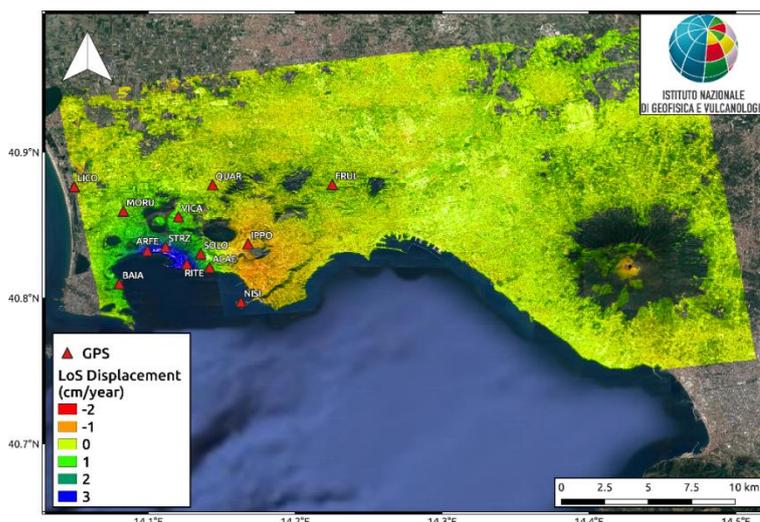


Figura 2.4.3 - Mappa della velocità di deformazione del suolo stimata lungo la linea di vista con dati InSAR COSMO-SkyMed.

In Figura 2.4.4 è mostrata la serie temporale di deformazione nell'area del Vesuvio. Per quanto riguarda l'analisi InSAR sul Vesuvio, è stata rilevata una subsidenza di circa 7 cm (serie VESUVIO) in corrispondenza del Gran Cono, probabilmente imputabile a fenomeni gravitativi e di compattazione naturale.

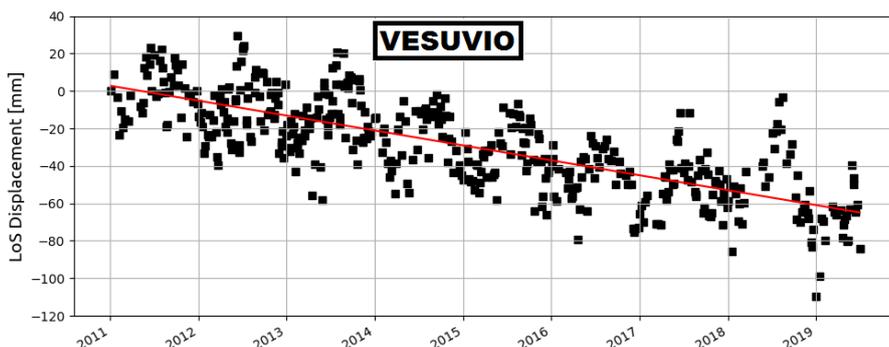


Figura 2.4.4 - Serie temporale della deformazione del suolo estratte su punti nell'area del Vesuvio.

3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

Le attività di monitoraggio vulcanologico vengono svolte con una Rete Permanente di Telecamere Termiche e con campagne di misure con Termocamera Mobile e Termocoppia.

3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine

Nell'area vesuviana è operativa una stazione permanente per l'acquisizione d'immagini all'infrarosso termico ubicata sul bordo del cratere del Vesuvio (Figura 3.1.1, Tabelle 3.1.1). Tale stazione inquadra il versante interno sud-occidentale del cratere del Vesuvio, che risulta essere interessato da una consistente anomalia termica.

La stazione è stata installata nel luglio 2004. Per le condizioni atmosferiche estreme in cui opera, ha subito nel corso degli anni diversi danneggiamenti che l'hanno resa inattiva in differenti periodi. La sua totale funzionalità è stata ripristinata nel maggio del 2013, e da allora è stata ininterrottamente operativa fino al 19 aprile 2019 acquisendo regolarmente n. 3 scene IR nel corso della notte (00:00; 02:00; 04:00). Il funzionamento della strumentazione è stato riattivato il 30 aprile 2019 ma, a causa di ulteriori problemi di connettività e di usura della strumentazione, le acquisizioni si sono nuovamente interrotte l'11 giugno 2019. Per tale motivo, il 18 giugno 2019 è stato effettuato un intervento di manutenzione straordinaria che ha riguardato la sostituzione della termocamera, della custodia in acciaio e dell'intera elettronica della stazione remota. Tale nuova catena strumentale è tuttora in corso di collaudo.



Figura 3.1.1 - Mappa della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine operante al Vesuvio.

Tabella 3.1.1 - Stato attuale della rete permanente di monitoraggio termico ad immagine operante al Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
VES	40.8214N 14.4219E 1165m	Cratere Vesuvio Bordo nord-occidentale	Luglio 2004 Aggiornamento Giugno 2019	Termocamera FLIR A655 (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Remote Monitoring System ICARO	Wi-Fi

Nella Figura 3.1.2 è riportata l'elaborazione della serie temporale relativa alle acquisizioni notturne effettuate nel periodo maggio 2013 – 10 giugno 2019.

In particolare, i valori rappresentati nel grafico mostrano l'elaborazione della serie temporale dei valori di temperatura massima delle immagini IR processati mediante applicazione dell'algoritmo di destagionalizzazione analitica STL (Seasonal Trend Decomposition)

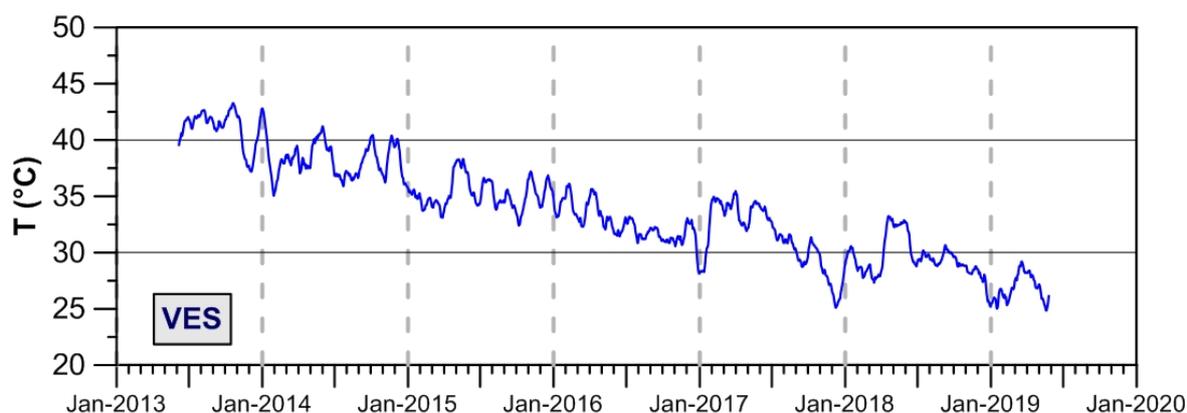


Figura 3.1.2 - Stazione Vesuvio (VES). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

L'analisi della serie temporale in Figura 3.1.2 evidenzia, nel lungo termine, un costante decremento del campo di temperatura superficiale dell'area target fino a dicembre 2017. Dopo tale data e fino a giugno 2019 la serie temporale delle temperature massime evidenzia un'alternanza di periodi durante i quali si osservano sensibili diminuzioni a cui seguono periodi con andamento stabile o in lieve incremento. Tuttavia, seppure in presenza di tali oscillazioni di varia ampiezza e periodo il trend a lungo termine della temperatura massima mostra un andamento stazionario con leggera tendenza alla diminuzione.

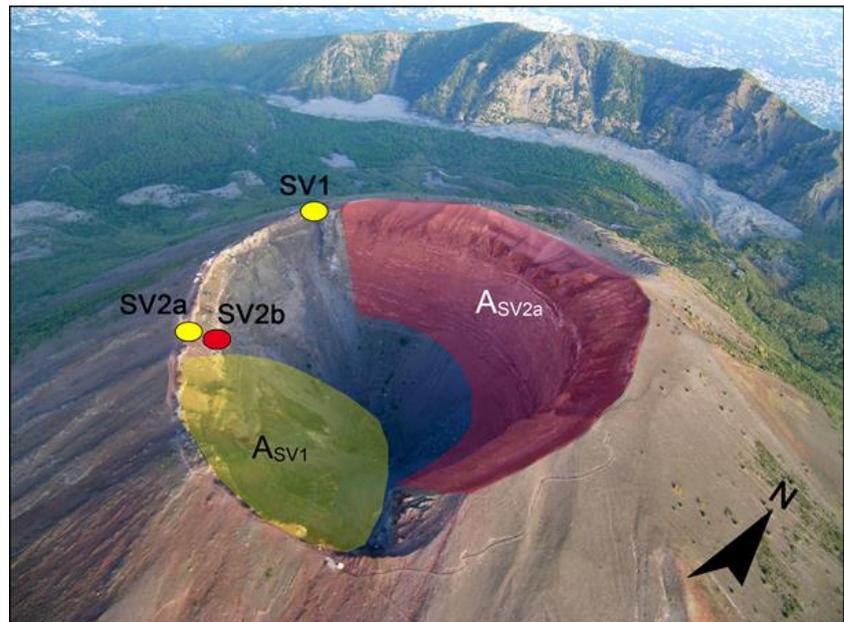
3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia

La sorveglianza vulcanologica tramite Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide ha come principale obiettivo l'individuazione di eventuali variazioni nel tempo dei valori di temperatura misurati al suolo in punti discreti e/o di aree a maggiore temperatura in modo da evidenziare eventuali modificazioni nella distribuzione areale del campo fumarolico.

I rilievi sono eseguiti mensilmente in condizioni di non irraggiamento solare (essenzialmente di notte), utilizzando una termocamera portatile FLIR SC640 ad alta risoluzione (640 x 480 pixel) e sensibilità (<0.06°C +30°C). La termocoppia utilizzata è di tipo K, con errore strumentale di circa 0.1°C nell'intervallo -200÷1260 °C. Le misure ottenute con la termocamera sono confrontate, quando possibile, con quelle eseguite con termocoppia rigida.

I rilievi vengono eseguiti solamente con telecamera termica dai punti stazione SV1 e SV2a, e con l'ausilio di termocoppia rigida al punto stazione SV2b (Figura 3.2.1).

Figura 3.2.1 – Cratere del Vesuvio. In giallo sono riportati i punti stazione dai quali vengono effettuati i rilievi con telecamera termica, in rosso quello nel quale vengono effettuati anche rilievi con termocoppia rigida. L'area in rosso (ASV2a) è quella ripresa dal punto stazione SV2a, mentre l'area in giallo (ASV1) è ripresa dal punto stazione SV1.



Nel corso del primo semestre 2019 sono state effettuate misure periodiche mensili ad eccezione del mese di gennaio a causa del franamento del sentiero che conduce al cratere e avverse condizioni climatiche.

La comparazione delle fotocomposizioni d'immagini termiche del versante interno orientale del cratere, riprese dal punto stazione SV2a (Figura 3.2.1) durante il primo semestre 2019, non evidenzia significative modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico (Figura 3.2.2b, b1, b2).

La freccia gialla in Figura 3.2.2 indica il punto costantemente a più alta temperatura (che varia da circa 57 a circa 71 °C). Questa temperatura massima non mostra significative variazioni rispetto agli anni passati fatta eccezione per le variazioni stagionali.

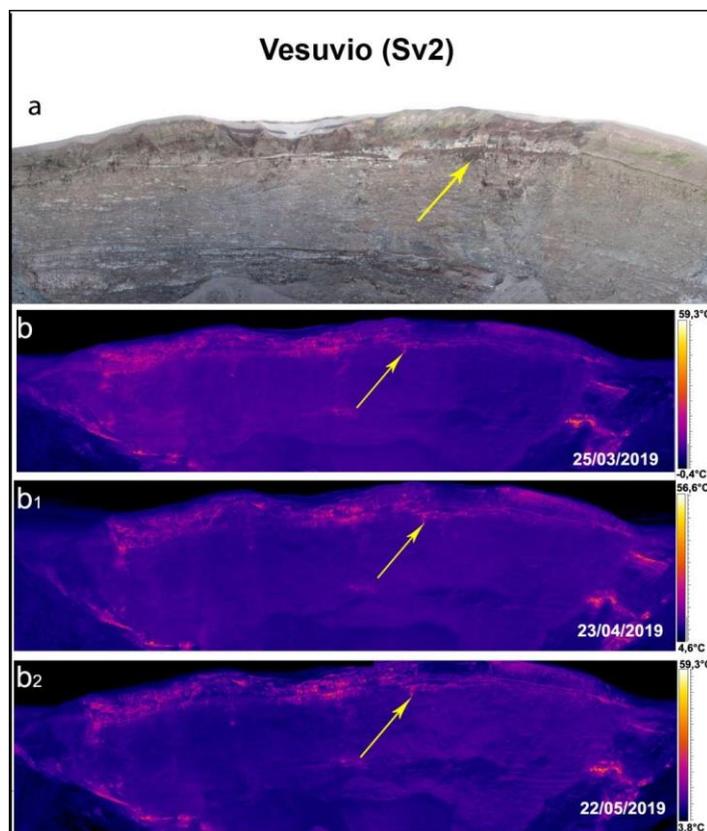
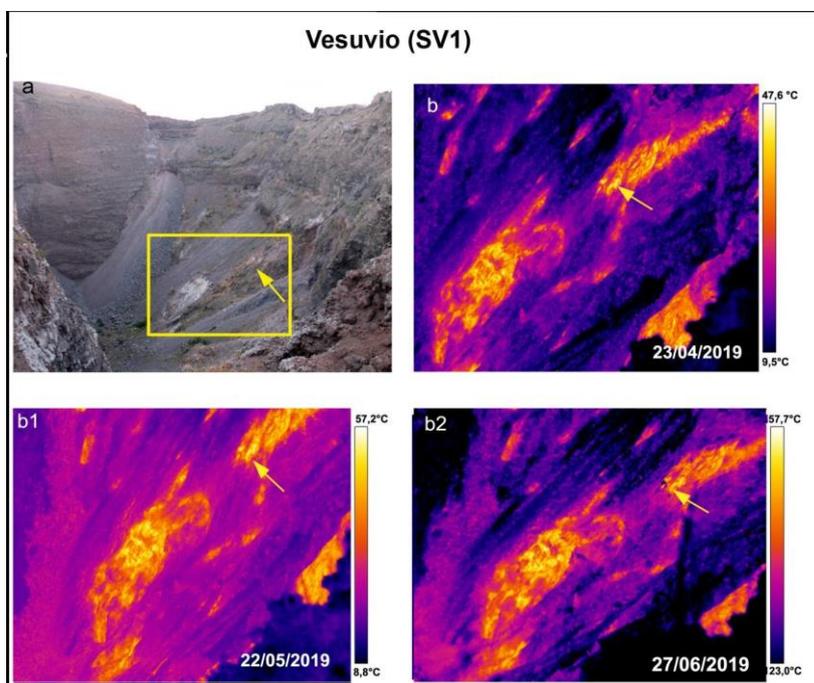


Figura 3.2.2 – Settore orientale del cratere del Vesuvio. Fotocomposizioni di immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 25/03/2019 (b), 23/04/2019 (b1) e 22/05/2019 (b2) dal punto stazione SV2a di Fig. 3.2.1.

Anche la comparazione di fotocomposizioni delle immagini termiche effettuate dal punto stazione SV1 (Figura 3.2.1), non evidenzia significative modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico (Figura 3.2.3b, b1, b2). La freccia gialla in figura 3.2.3 indica il punto costantemente a più alta temperatura (che varia da circa 43 a circa 58 °C). Questa temperatura massima non mostra significative variazioni rispetto agli anni passati fatta eccezione per le variazioni stagionali.

Figura 3.2.3 – Settore meridionale del cratere del Vesuvio. Immagini nel visibile (a) e immagini termiche, relative all'area ricadente nel riquadro giallo (a), riprese il 23/04/2019 (b), il 22/05/2019 (b1) e il 27/06/2018 (b2) dal punto stazione SV1 di Figura 3.2.1; la freccia gialla indica l'area che costantemente è a più alta temperatura.



I valori di temperatura massima della fumarola del punto stazione SV2b (Figura 3.2.1), nel settore meridionale del cratere del Vesuvio, sono riportati in Figura 3.2.4 dove sono mostrate le variazioni di temperatura massima della termocamera, della temperatura misurata con termocoppia e della temperatura atmosferica. Le temperature rilevate rientrano nelle medie stagionali degli anni precedenti.

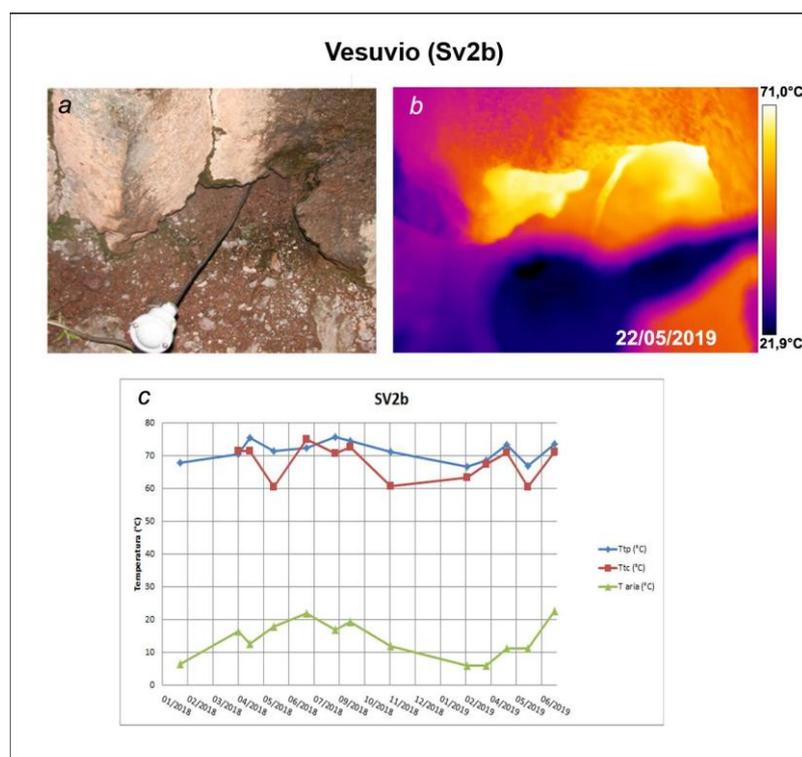


Figura 3.2.4 – Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese al punto SV2b di Figura 3.2.1, di una fumarola ubicata sul settore occidentale del cratere del Vesuvio. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria (c) misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c).

4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO

Le attività di sorveglianza geochimica al Vesuvio vengono svolte dalla Sezione di Napoli “Osservatorio Vesuviano” e dalla Sezione di Palermo.

4.1 Monitoraggio Geochimico della Sezione di Napoli “Osservatorio Vesuviano”

La Rete Geochimica del Vesuvio (Figura 4.1.1) è costituita da due stazioni multiparametriche: FLXOV6, installata in area bordo cratere (settore SW) e FLXOV7 installata in area di fondo cratere, entrambe per la misura in continuo del flusso di CO₂ dal suolo, della temperatura della fumarola principale e del gradiente di temperatura del suolo. La stazione FLXOV7 è stata ripristinata a seguito di un evento franoso che ne ha seriamente danneggiato il sistema di alimentazione combinato eolico-solare. In Tabella 4.1.1 sono riportate le stazioni geochimiche installate in area vesuviana.

Figura 4.1.1 - Ubicazione della stazione multiparametrica FLOX6 (bordo cratere), della stazione FLXOV7 (fondo cratere) e dei siti dove sono eseguite le 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).



Le attività di sorveglianza geochimica del Vesuvio svolte dall’Osservatorio Vesuviano sono consistite: nell’acquisizione in continuo di dati di flusso di CO₂ dal suolo, della temperatura della fumarola principale e del gradiente di temperatura del suolo, tramite le stazione multiparametriche (FLXOV6) installata in area bordo cratere (settore SW) e la stazione FLXOV7 installata in area di fondo cratere; nell’esecuzione di campagne periodiche di misura del flusso di CO₂ e della temperatura del suolo a 10 cm di profondità, su una maglia di 40 punti fissi ubicati nell’area di fondo cratere del Vesuvio; nel campionamento della fumarola di fondo cratere (Figura 4.1.1); per le attività in area di fondo cratere è prevista l’attivazione un contratto con una figura professionale specifica.

Inoltre nel periodo d’interesse sono continuate le misure periodiche del flusso di CO₂ e della temperatura del suolo in punti fissi in area di bordo cratere (area anemometro) ed il campionamento delle maggiori fumarole di bordo cratere (fumarole B1 e B3, Figura 4.1.1).

Tabella 4.1.1 - Rete Geochimica dell’Osservatorio Vesuviano al Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data Installazione	RETE	Parametri monitorati
FLXOV6	40.8202N 14.4233E 1155 m	Vesuvio Bordo Cratere	2015	OV	Flusso di CO ₂ , multiparametrica
FLXOV7	40.8212N 14.4254E	Vesuvio Fondo Cratere	2017	OV	Flusso di CO ₂ , multiparametrica

Composizione chimica delle fumarole

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/CO_2 che della p_{CO_2} stimata sulla base di geoindicatori gassosi. Contemporaneamente si è verificata la diminuzione del rapporto H_2/CO_2 e l'incremento del rapporto CO_2/CH_4 (Figura 4.1.2). Tali variazioni sono state interpretate come un incremento dell'input di fluidi magmatici più ossidanti, poveri in CH_4 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).

A causa delle copiose precipitazioni avvenute nello scorso semestre, si sono verificate diverse frane in area craterica del Vesuvio. Una frana ha interessato l'area di emissione della fumarola FC2 di fondo cratere rendendo impossibile il campionamento dei fluidi. In alternativa, è stata campionata un'altra fumarola denominata FC5 (Chiodini et al., 2001), che aveva mostrato caratteristiche simili, situata in prossimità della stazione geochimica di fondo cratere (Fig. 4.1.1), ma di cui non esiste un record continuo della composizione chimica. I dati analitici comparati con quelli della fumarola FC2 nei diagrammi di Figura 4.1.2, mostrano composizioni simili e variazioni composizionali contemporanee, pertanto i dati composizionali di questa fumarola possono essere utilizzati come una valida alternativa nel monitoraggio del sistema idrotermale.

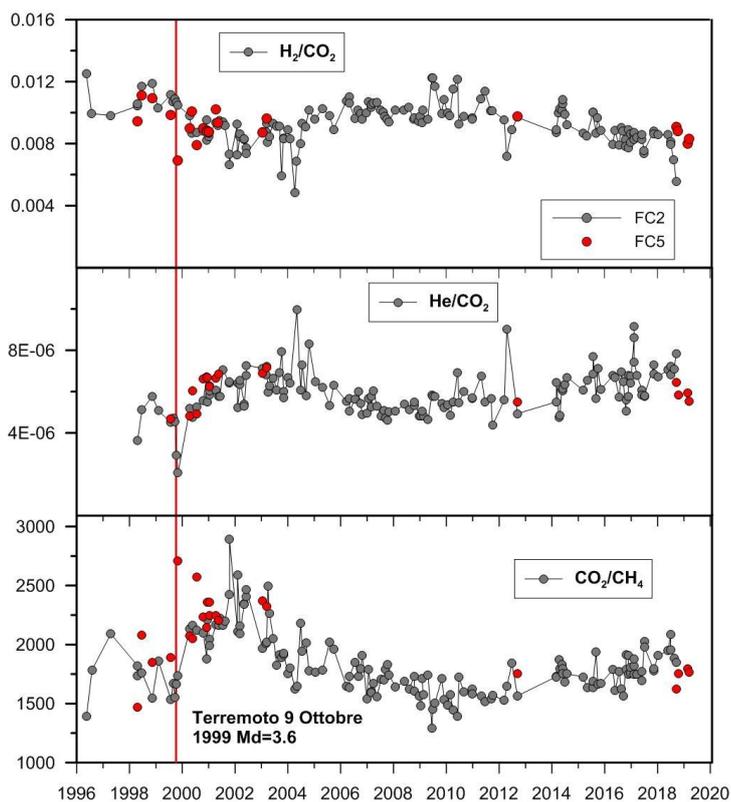
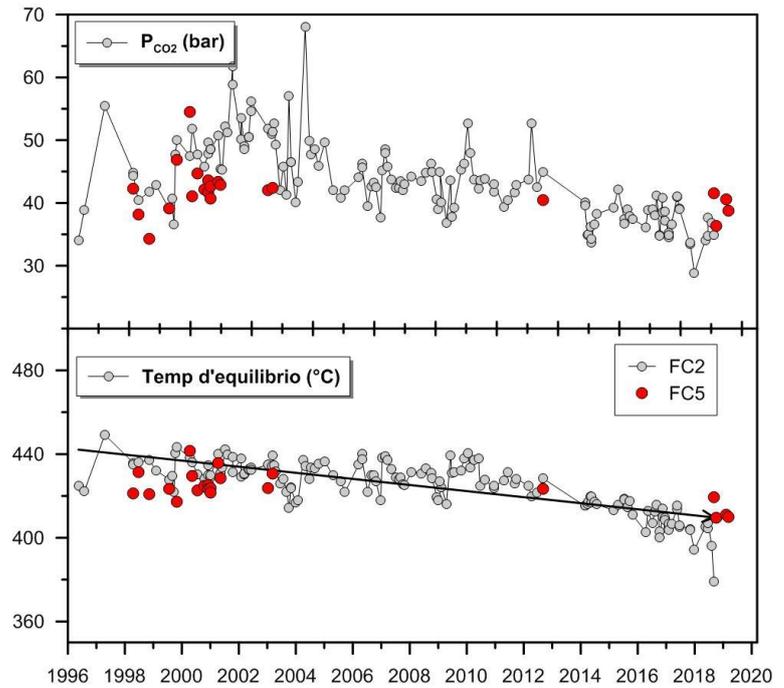


Figura 4.1.2 - Variazioni composizionali delle fumarole FC2 (simboli grigi) e FC5 (simboli rossi) nel periodo 1996-2019.

Va comunque segnalato che nei campioni degli ultimi anni si registra un lieve aumento del rapporto CO_2/CH_4 ed He/CO_2 , 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 composizioni dei campioni mostrano una diminuzione dei valori di equilibrio di temperatura e pressione parziale di CO_2 (stime basate sul CO) rispetto ai periodi precedenti, rientrando in un trend pluriennale di diminuzione dell'attività idrotermale all'interno del cratere del Vesuvio (Figura 4.1.3).

Figura 4.1.3 - Cronogramma dei valori d'equilibrio della temperatura e pressione parziale di CO₂ stimati per il sistema idrotermale del Vesuvio sulla base della composizione della fumarola FC2 (simboli grigi) e FC5 (simboli rossi). Le stime per entrambe le fumarole indicano una diminuzione nel tempo dei valori d'equilibrio.



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 misurati nel primo semestre 2019 non ha mostrato variazioni significative rispetto ai periodi precedenti (Caliro et al., 2011) (Figura 4.1.4).

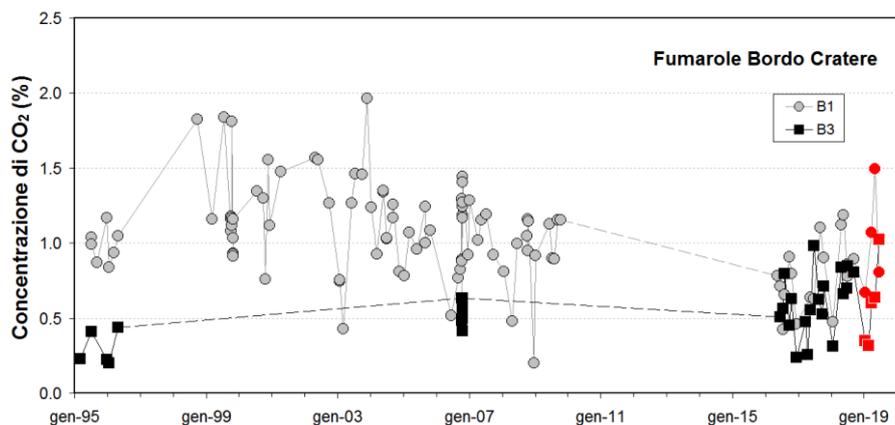


Figura 4.1.4 - Variazione temporale della concentrazione di CO₂ delle fumarole di bordo cratere). Con i simboli rossi sono riportati i campioni relativi al primo semestre 2019.

Misure di flusso di CO₂ e temperatura al suolo

La stazione multiparametrica, installata in area bordo cratere (settore SW), misura in continuo:

- flusso di CO₂ dal suolo
- gradiente di temperatura nel suolo
- temperatura della maggiore emissione fumarolica dell'area
- pressione atmosferica
- temperatura dell'aria

I parametri misurati nel periodo di interesse non hanno mostrato variazioni significative (Figura 4.1.5). Le lievi variazioni osservate sono da mettersi in relazione a particolari eventi meteorologici (pioggia, vento forte, bassa pressione etc.).

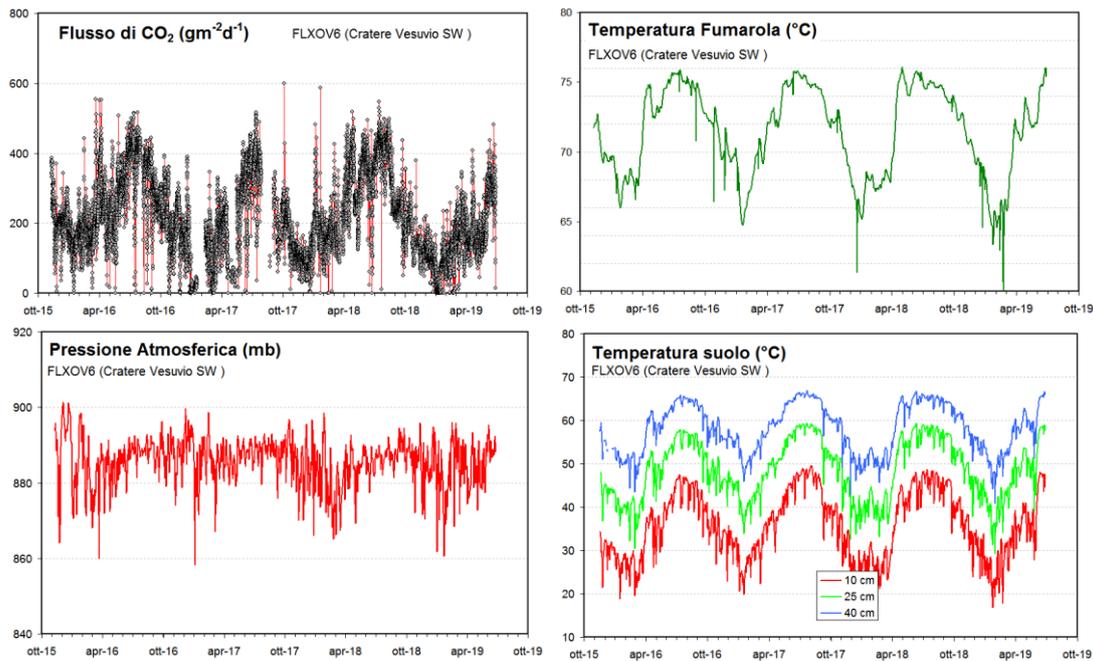


Figura 4.1.5 - Serie temporali di alcuni parametri misurati dalla stazione geochimica FLXOV6 installata in area bordo cratere del Vesuvio (settore SW). I valori, eccetto il flusso di CO₂ dal suolo, sono riportati come medie giornaliere.

La stazione multiparametrica di fondo cratere (FLXOV7) ha acquisito i seguenti parametri:

- flusso di CO₂ dal suolo
- gradiente di temperatura nel suolo
- temperatura della maggiore emissione fumarolica dell'area
- pressione atmosferica

Il sistema di alimentazione eolico-solare ha risposto bene alle severe condizioni meteo del periodo ma a causa del malfunzionamento del sistema di trasmissione la stazione è al momento in manutenzione e sarà ripristinata nel più breve tempo possibile. In Figura 4.1.6 sono riportati i parametri acquisiti dalla stazione.

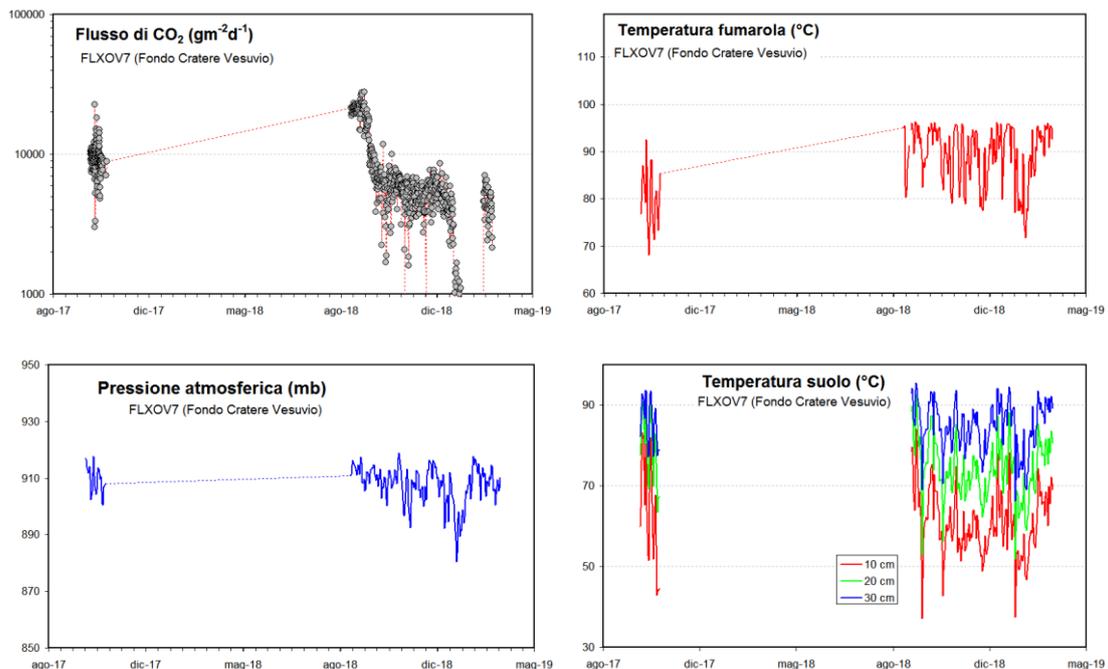


Figura 4.1.6 - Parametri misurati dalla stazione geochimica (FLXOV7) installata in area di fondo cratere del Vesuvio. I valori, eccetto il flusso di CO₂ dal suolo, sono riportati come medie giornaliere.

4.2 Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo

Le attività di sorveglianza geochimica del Vesuvio svolte dalla Sezione di Palermo sono consistite in campionamenti periodici delle acque di alcuni pozzi e sorgenti, in gran parte sul fianco sud-occidentale del vulcano, e in misure continue della temperatura della falda acquifera e delle fumarole ubicate sul bordo del cratere.

La rete geochimica della Sezione di Palermo nell'area vesuviana consta di tre stazioni (Figura 4.2.1, Tabella 4.2.1), delle quali due relative alla misura della temperatura delle falde sotterranee, installate in un pozzo ed in una sorgente con registrazione locale dei dati, e la terza dedicata alla misura della temperatura delle fumarole, installata sul bordo del cratere del Vesuvio. Per quanto concerne quest'ultima, la stazione non è attualmente funzionante a causa del deterioramento della stessa e dell'impossibilità di raggiungere il sito per motivi logistici, per cui è in fase di valutazione il ripristino della stessa.

A questi si aggiungono altri 5 siti dedicati alla sorveglianza dell'acquifero del Vesuvio e campionati durante campagne periodiche (Tabella 4.2.1).

Sui campioni viene effettuata l'analisi chimica dell'acqua (elementi maggiori) e dei gas disciolti (H₂, O₂, N₂, CO, CH₄, CO₂). Al momento del prelievo sono misurati i principali parametri chimico-fisici: temperatura, conducibilità elettrica, pH, potenziale redox.

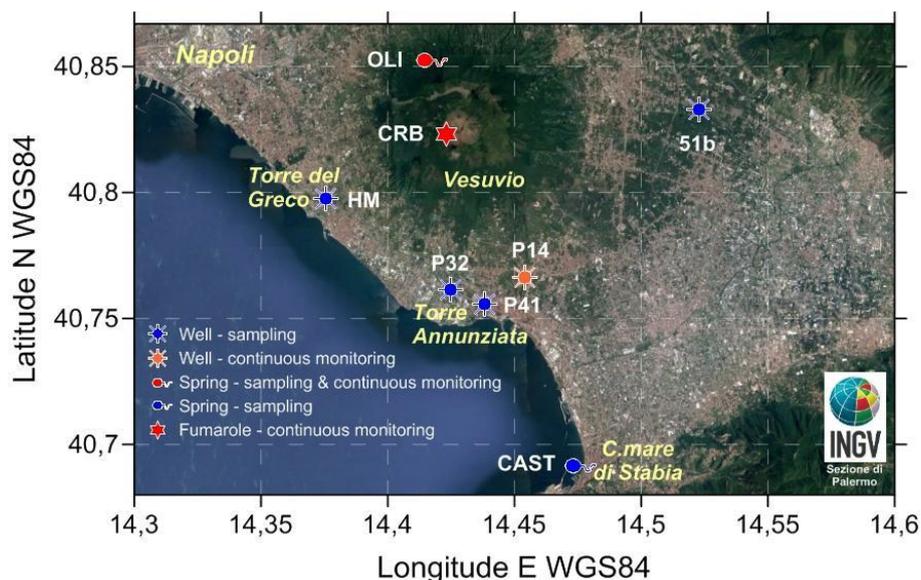


Figura 4.2.1 - Localizzazione dei siti di campionamento della Sezione di Palermo.

Tabella 4.2.1 - Rete di campionamento delle falde sotterranee della Sezione di Palermo al Vesuvio.

Nuovo codice	Vecchio codice	Tipologia	Dati chimico-isotopici	Monitoraggio continuo
OLI	47	Sorgente	SI	SI
HM	29	Pozzo	SI	NO
P32	19	Pozzo	SI	NO
P41	13	Pozzo	SI	NO
51b	1	Pozzo	SI	NO
P14	14	Pozzo	NO	SI
CAST	70	Sorgente	SI	NO

Dei siti di monitoraggio della Sezione di Palermo 3 sono localizzati sul fianco meridionale del vulcano, dove sono state identificate le zone di più intensa risalita di fluidi vulcanici, uno ciascuno sui fianchi occidentale, settentrionale ed orientale, in prossimità di strutture tettoniche attive, ed uno all'esterno della struttura vulcanica (CAST), in prossimità di una discontinuità tettonica ed utilizzato come termine di confronto (Figura 4.2.1).

I siti selezionati per la sorveglianza presentano caratteristiche peculiari e sono rappresentativi dell'eterogeneità geochimica dell'acquifero vesuviano. Si tratta di acque fredde o debolmente termali ($9 < T^{\circ}\text{C} < 24.5$), di salinità compresa tra 600 e 13000 mg/l e pH tra 5.9 e 8.0.

Tra i parametri misurati si riportano in forma grafica quelli che più direttamente forniscono informazioni utili a valutare lo stato di attività del sistema vulcanico, essendo legati al flusso dei fluidi di origine profonda, magmatica e/o idrotermale: la temperatura delle acque sotterranee e la concentrazione dello ione bicarbonato, la cui origine è in gran parte legata alla dissoluzione e idrolisi della CO_2 ; i grafici relativi sono riportati nelle Figure 4.2.2 e 4.2.3.

Le osservazioni sono aggiornate al 21/05/2019, data dell'ultima campagna di misure.

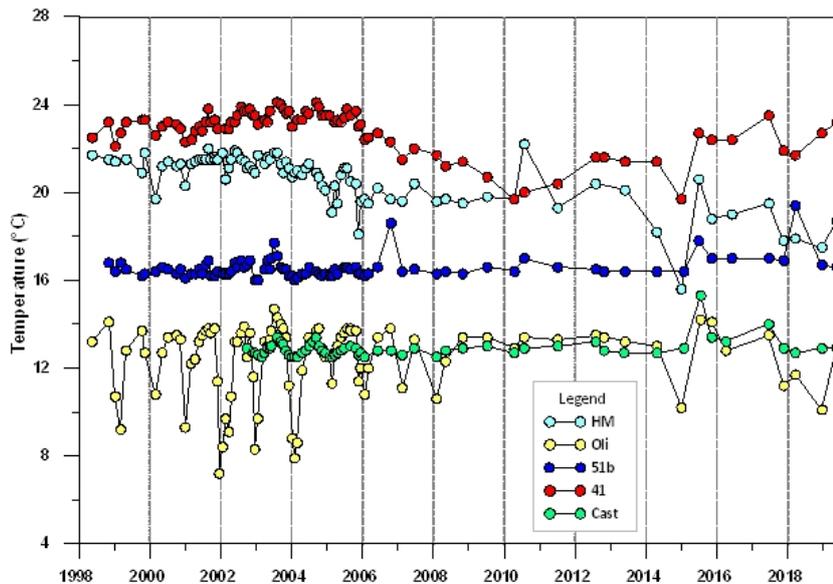


Figura 4.2.2 - Variazioni temporali della temperatura delle falde sotterranee.

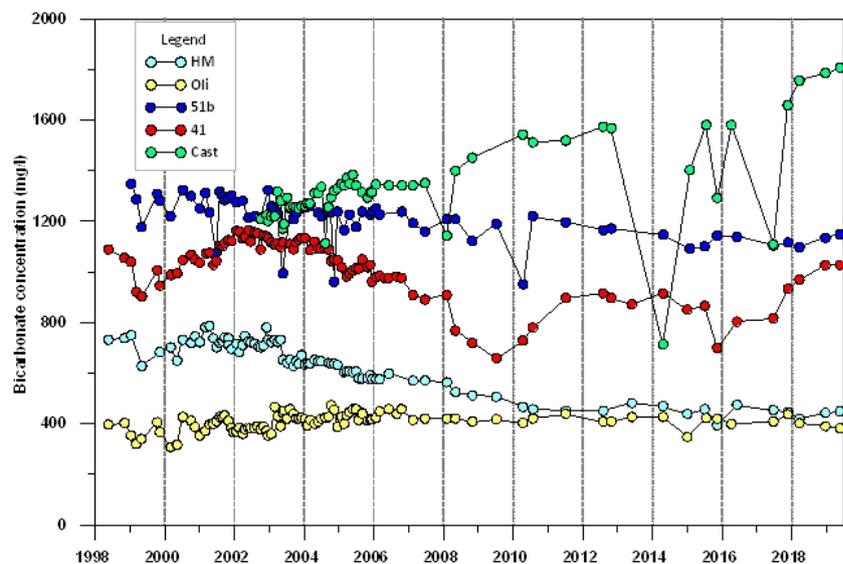


Figura 4.2.3 - Variazioni temporali della concentrazione dello ione bicarbonato nelle acque sotterranee.

I dati di temperatura misurati a partire dal 1998, non mostrano variazioni di rilievo, le variazioni in tutti i siti sono in linea con le oscillazioni medie registrate nell'intero periodo di osservazione.

Le concentrazioni dello ione bicarbonato non mostrano variazioni di rilievo, fatta eccezione per il sito Cast che mostra un trend in aumento per quanto riguarda lo ione bicarbonato correlato al graduale incremento di CO_2 disciolta (Figg. 4.2.3 e 4.2.4).

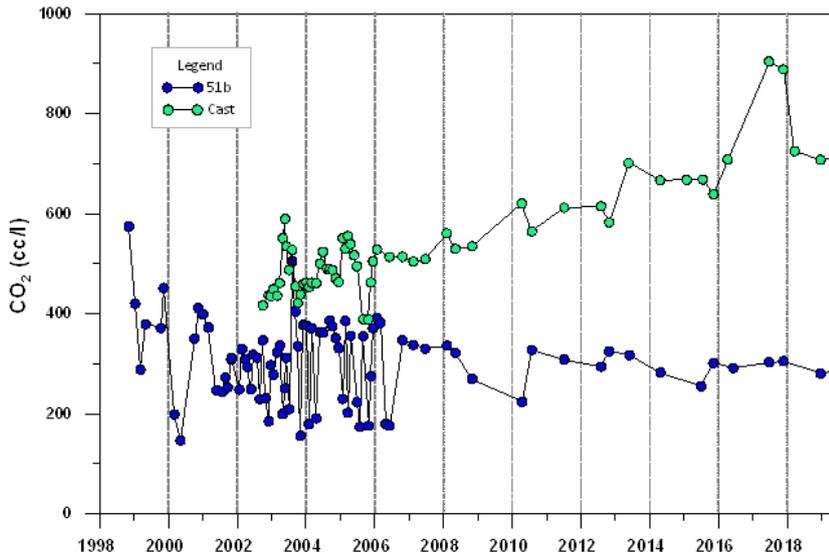


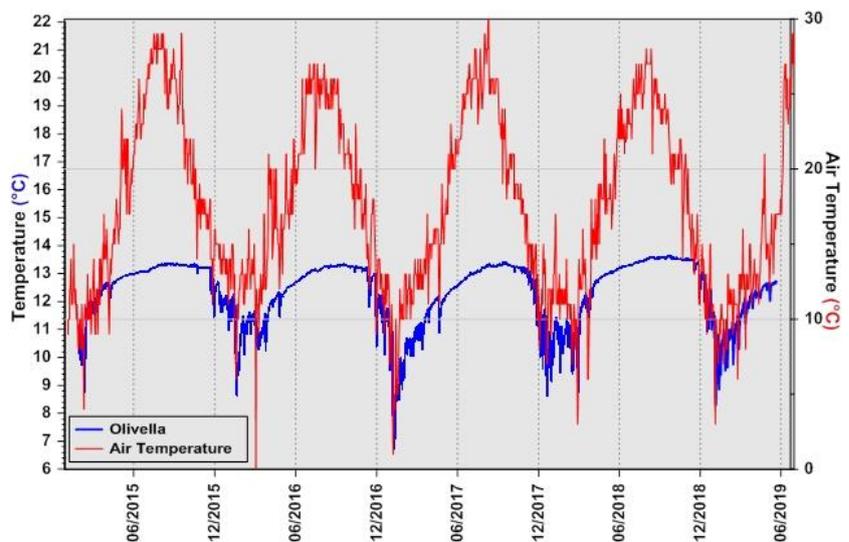
Figura 4.2.4 – Variazioni temporali della CO₂ disciolta (cc/l) nelle acque.

Per quanto concerne il monitoraggio in continuo delle temperature, i dati relativi sono riportati in Figura 4.2.5.

Durante la campagna di maggio 2019 sono stati installati dei nuovi modelli di datalogger sia nel sito P14 come ripristino che ad Olivella come sostituzione del vecchio datalogger quasi completamente deteriorato. I dati registrati ad Olivella mostrano delle variazioni nella norma degli andamenti medi stagionali, senza nessuna variazione di rilievo, e sono ben correlabili con gli andamenti della temperatura media dell'aria registrati nella stazione meteo di Sant'Anastasia.

In conclusione, i parametri geochimici osservati forniscono informazioni indicative di un sistema vulcanico la cui attività non è interessata da variazioni di rilievo.

Figura 4.2.5 - Variazione delle temperature della falda sotterranea misurate in continuo nella sorgente Olivella.



CAMPI FLEGREI

1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO

Il monitoraggio sismologico dei Campi Flegrei viene svolto mediante l'uso congiunto di una Rete Permanente ed una Rete Mobile. Tali reti consentono di individuare e classificare transienti sismici (legati a terremoti o altri fenomeni naturali ed artificiali).

1.1 Rete Sismica Permanente

La Rete Permanente di monitoraggio sismico dei Campi Flegrei conta 26 siti di installazione terrestre e marina (Figura 1.1.1, Tabella 1.1.1; il sito del Castello di Baia è duplicato con una stazione digitale CBAC e una analogica BAC). In ogni sito, secondo i casi, possono insistere più tipologie di stazioni e/o di sensori in base alle logiche di molteplicità di sensori o di ridondanza strumentale.

Nella rete sono presenti 5 stazioni di tipo analogico equipaggiate con sensori da 1Hz di cui due utilizzano sensori monocomponente. Le 22 rimanenti stazioni sono digitali: quelle terrestri sono basate sull'acquisitore GILDA, progettato e realizzato presso l'INGV Osservatorio Vesuviano, mentre quelle marine sono basate su acquisitori Guralp DM24 (3 stazioni) e Quanterra Q330 (1 stazione).

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 12 velocimetri a larga banda (Broad Band: 0.016-50 Hz), 1 sensore da pozzo Guralp 3TB/5TB costituito da velocimetro Very Broad Band (0.008-50 Hz) accoppiato ad accelerometro, 3 Trillium compact OBS (120s), 3 velocimetri attivi a corto periodo (1-80 Hz), 1 velocimetro da 20s, 2 accelerometri da superficie. La rete dispone anche di 4 microfoni infrasonici Infracyrus e un array infrasonico di 4 elementi basato su questi stessi sensori ed installato sul tetto dell'edificio dell'Osservatorio Vesuviano. Il totale dei sensori infrasonici è di 8.

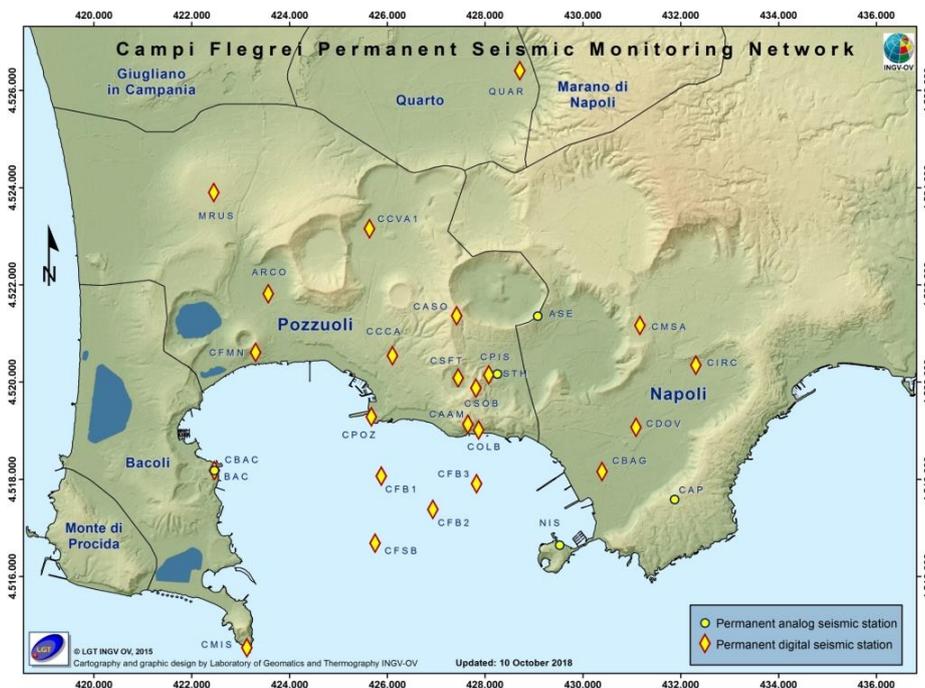


Figura 1.1.1 – Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.

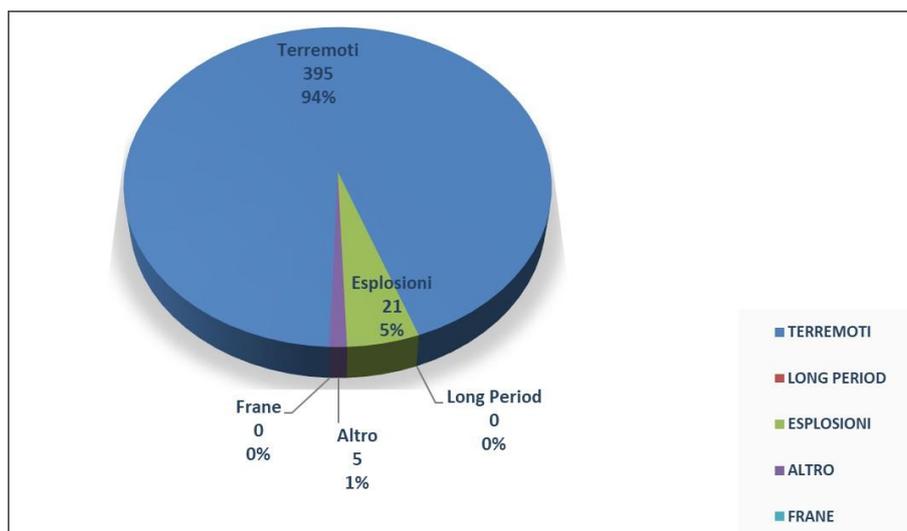
Tabella 1.1.1 – Stato della Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei. In grigio le stazioni non operative.

Stazione	Località	Coordinate	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
ARCO	Arco Felice	40.8438N 14.0933E 22 m	01/02/2006	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	ADSL
ASE	Astroni Est	40.8402N 14.1587E 107 m	28/07/2000	Mark L4-C 1Hz	Analogica	Radio UHF analogica
CAAM	Accademia Aeronautica Militare	40.8200N 14.1420E 100 m	09/12/2011	Guralp CMG-40T 60s Microfono Infracyrus	GILDA	ADSL
CAP	Posillipo	40.8064N 14.1923E 166 m	20/04/2005	Mark L4-C 1Hz	Analogica	Acquisizione diretta
CASO	Astroni Ovest	40.8401N 14.1390E 222 m	01/07/2015	Lennartz 3D-Lite	GILDA	Wi-Fi
CBAC BAC	Castello di Baia	40.8110N 14.0807E 33 m	15/09/2009 01/05/1970	Lennartz 3D-Lite Geotech S13	GILDA Analogica	Wi-Fi Radio UHF
CBAG	Bagnoli	40.8115N, 14.1747E 169 m + 5 m	20/05/2014	Guralp 3TB(120s)/5TB pozzo Guralp CMG-40T 30s superficie	2 GILDA 1 GILDA	Wi-Fi
CCCA	Zona Celle Pozzuoli	40.8326N 14.1236E -26m	23/05/2016	Guralp 3TB(120s)/5TB pozzo	2 GILDA	UMTS
CCVA	Via Campana	40.8561N 14.1177E -25m, -51,5m, -78m, - 104,5m, - 131m, - 157,5m	09/03/2015	6 Guralp VSP Flute (classe 40T 60s)	5 GILDA	UMTS
CDOV CAID	Sede di Via Diocleziano	40.8197N 14.1828E 18 m	28/05/2011	Lennartz 3D-Lite Array Microfoni 4 Infracyrus	GILDA GILDA	Rete dati interna
CFB1	Golfo di Pozzuoli	40.8103N 14.1212E -40 m	Luglio 2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrysSF- 300L, 2 SQ02 idrophone, Paroscientific 8CDP130-I pressure sensor	Guralp DM24	Wi-Fi
CFB2	Golfo di Pozzuoli	40.8042N 14.1338E -74 m	Luglio 2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrysSF- 300L, 2 SQ02 idrophone, Paroscientific 8CDP130-I pressure sensor	Guralp DM24	Wi-Fi

CFB3	Golfo di Pozzuoli	40.8090N 14.1442E -38 m	2016	Trillium compact OBS (120s), ColibrysSF-300L, 2 SQ02 idrophone, Paroscientific 8CDP130-I pressure sensor	Guralp DM24	Wi-Fi
CSFB	Golfo di Pozzuoli	40.7978N 14.1198E -96 m	2008	SQ03-10 idrophone, ColibrysSF-300L	Kinematics Q330, GILDA	Wi-Fi
CFMN	Oasi WWF Monte Nuovo	40.8329N 14.0904E 50 m	23/09/2014	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Wi-Fi
CIRC	Via Metastasio Fuorigrotta	40.8314N 14.1972E 40 m	05/02/2016	Lennartz 3D-Lite 20s	GILDA	UMTS
CMIS	Capo Miseno	40.7782N 14.0890E 82 m	12/10/2015	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Wi-Fi
CMSA	Monte S. Angelo Dip. Scienze Fisiche	40.8386N 14.1836E 95 m	28/11/2008	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	ADSL
COLB	Galleria SEPSA Olibano	40.8190N 14.1446E 8m	06/07/2011	Guralp CMG-40T 60s Microfono Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
CPIS	Pisciarelli	40.8292N 14.1470E 69 m	29/01/2010	Guralp CMG-40T 60s Microfono Infracyrus	GILDA	Radio UHF digitale
CPOZ	Pozzuoli Darsena	40.8212N 14.1186E 3 m	19/07/2011	Guralp CMG-40T 60s Episensor ES-T	2 GILDA	Wi-Fi
CSOB	Solfatarà Bordo Est	40.8267N 14.1439E 177 m	2007	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	2 GILDA	Wi-Fi
CSFT	Solfatarà	40.8290N 14.1395E 108 m	Gennaio 2013	Guralp CMG-40T Microfono Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
NIS	Nisida	40.7978N 14.1646E 1 m	1983	Mark L4-3D	Analogica	Linea CDA
QUAR	Quarto	40.8856N 14.1538E 65 m ... -180 m		Guralp CMG-40T	GILDA	ADSL
STH	Solfatarà Tennis Hotel	40.8294N 14.1491E 65 m	1983	Mark L4-3D	Analogica	Linea CDA

Nel corso del primo semestre 2019, sono stati registrati un totale di 421 eventi locali, ripartiti nelle diverse tipologie riportate in Figura 1.1.2.

Figura 1.1.2 – Distribuzione percentuale degli eventi per tipologia nel primo semestre 2019. Le esplosioni riportate sono tutte di origine artificiale.



La maggior parte dei segnali sismici transienti registrati nell’area flegrea e non classificabili come terremoti sono legati alle attività antropiche locali e identificati, in genere, come esplosioni di natura artificiale. Altri tipi di segnali, dovuti ad attività sismica non rientrante nelle precedenti categorie o a fenomeni non sismici (es. tuoni e ad altre attività antropiche), sono compresi nella tipologia “ALTRO”.

Per quanto riguarda l’attività sismica naturale nel corso del primo semestre 2019 sono stati registrati 395 terremoti vulcano-tettonici generalmente di bassa magnitudo ($M_{dmax}=2.5\pm 0.3$). E’ stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 281 eventi.

Il numero totale di eventi registrati mostra un modesto incremento rispetto a quello medio degli anni precedenti (Figura 1.1.3). La maggior parte degli eventi localizzati ricade nell’area compresa tra il bordo sudoccidentale del cratere di Astroni e Pozzuoli-Solfatara-Pisciarelli con profondità comprese nei primi 3 km tranne alcuni eventi localizzati nel settore occidentale del Golfo di Pozzuoli localizzati intorno ai 4 km di profondità (Figura 1.1.4).

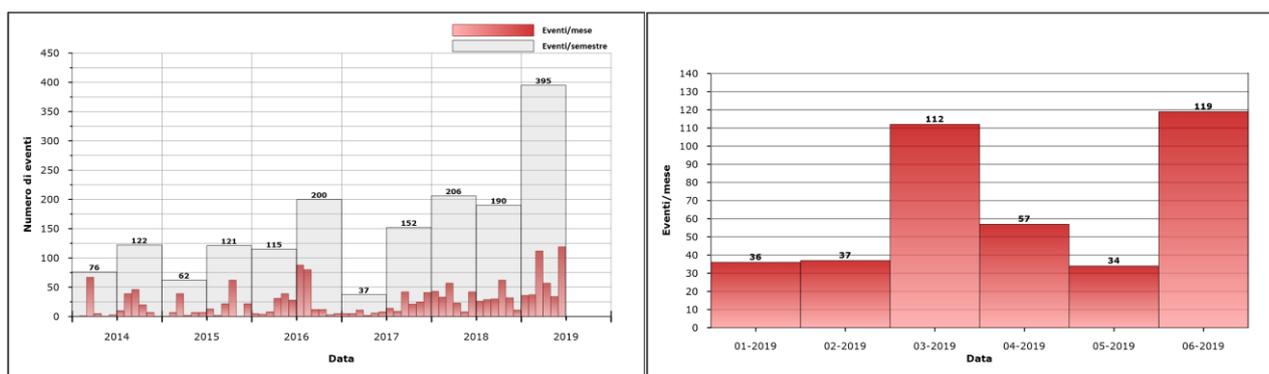


Figura 1.1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

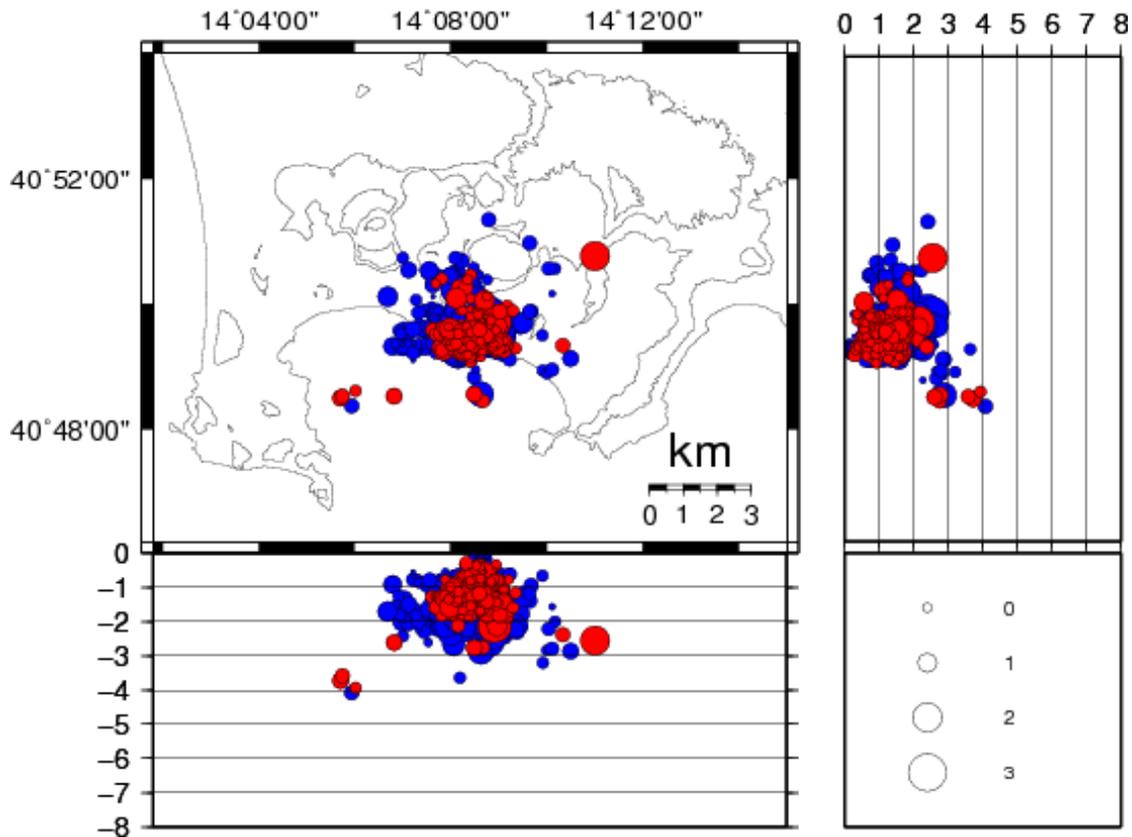


Figura 1.1.4 – Localizzazione degli ipocentri nell’area flegrea durante gli ultimi 5 anni (in blu) e nel primo semestre 2019 (in rosso).

Non si evidenziano particolari andamenti nella distribuzione delle localizzazioni (Figura 1.1.4), nelle profondità ipocentrali (Figura 1.1.5), nella distribuzione temporale delle magnitudo (Figura 1.1.6) e nel rilascio cumulativo di energia (Figura 1.1.7).

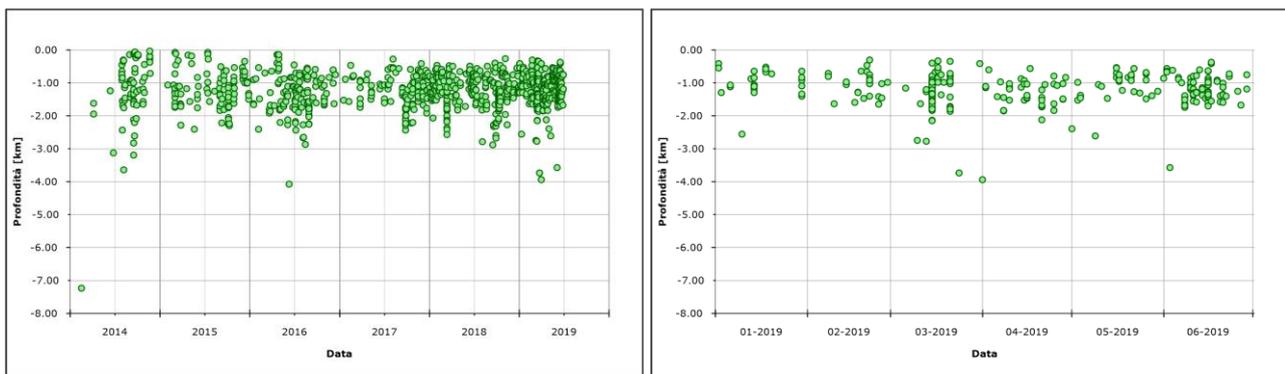


Figura 1.1.5 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti nell’area flegrea localizzati nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

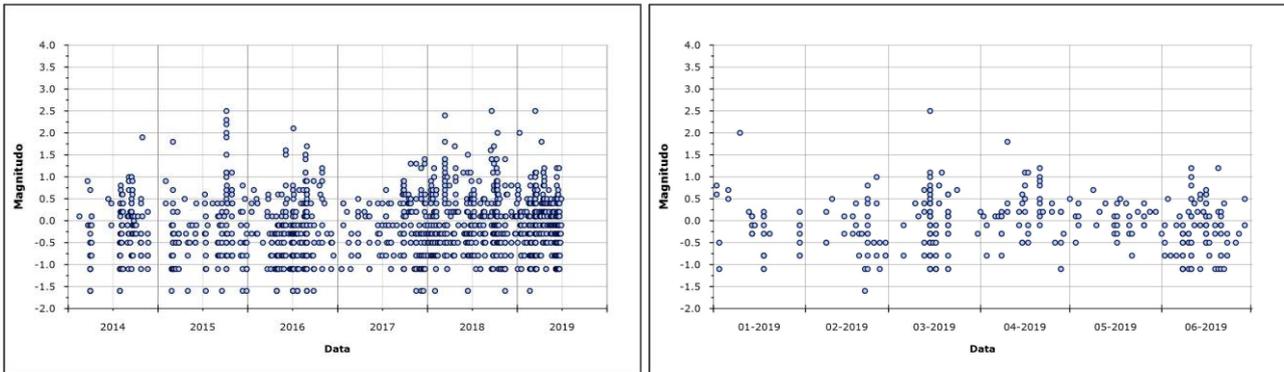


Figura 1.1.6 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti nell'area flegrea nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

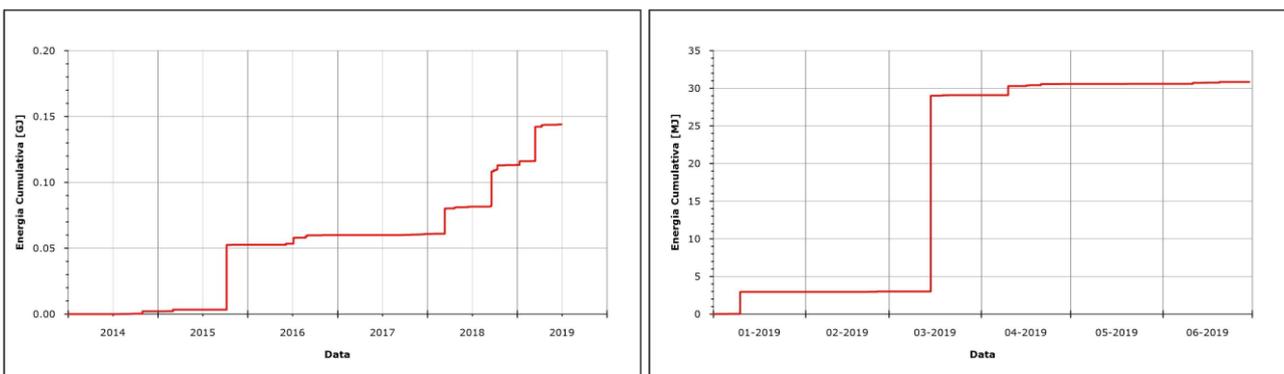


Figura 1.1.7 – Andamento cumulativo dell'energia rilasciata dai terremoti nell'area flegrea nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra) calcolato attraverso la relazione di Gutenberg-Richter $\log E = 2.4 + 2.14 M - 0.054 M^2$.

L'analisi dei meccanismi focali di 2 dei 3 eventi di magnitudo ≥ 1.5 (Tabella 1.1.2) registrati ai Campi Flegrei nel corso del primo semestre 2019, mostra, per tutti e 2 gli eventi, soluzioni associabili a meccanismi di tipo normale con componente obliqua (Figura 1.1.8). Non è stato possibile elaborare il meccanismo focale dell'evento del 10/04 alle 22:56 UTC di Md 1.8, a causa della forte incertezza sulle polarità dei primi impulsi ad alcune stazioni, dovuta all'elevato rumore di fondo.

Tabella 1.1.2 - Parametri ipocentrali degli eventi con $M_d \geq 1.5$ registrati ai Campi Flegrei nel primo semestre 2019.

Data UTC	Md	Lat N	Long E	Prof. (km)
2019/01/10 00:28:09.03	2.0	40.8460	14.1835	2.56
2019/03/15 04:26:41.82	2.5	40.8287	14.1485	2.13
2019/04/10 22:56:47.21	1.8	40.8272	14.1435	1.18

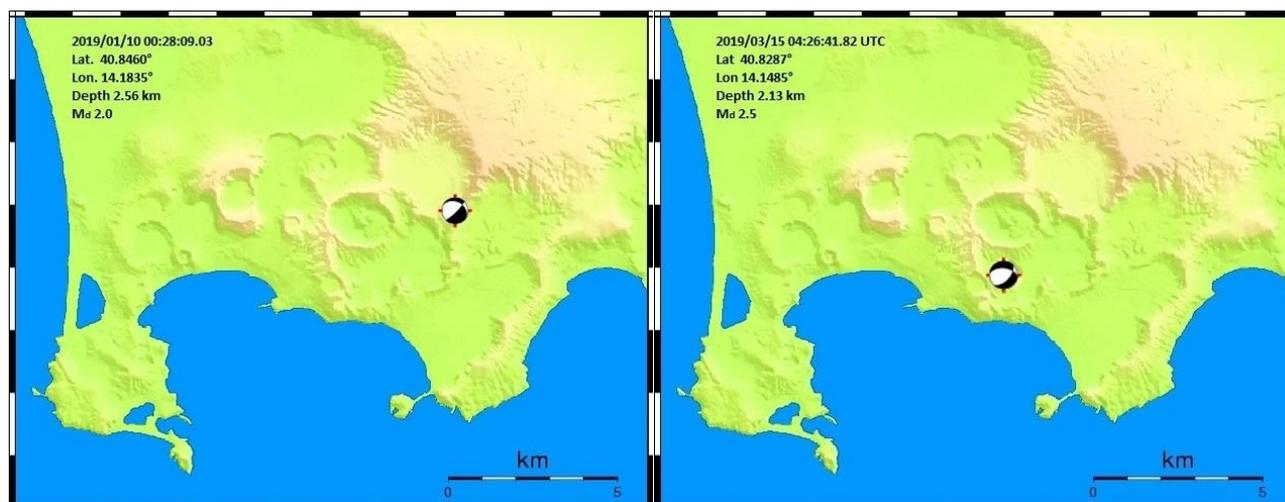


Figura 1.1.8 - Meccanismi focali elaborati per eventi di magnitudo > 1.5 registrati ai Campi Flegrei nel primo semestre 2019.

La sismicità dei Campi Flegrei è spesso caratterizzata, analogamente ad altri vulcani, da sciami sismici. In Tabella 1.1.3 sono riportati i principali sciami registrati nel corso del primo semestre 2019.

Tabella 1.1.3 - Principali sciami sismici registrati ai Campi Flegrei nel corso del secondo semestre 2019.

Inizio sciame	Fine sciame	N. eventi	M_{dmax}
2019/02/22 21:42	2019/02/22 22:40	10	0.8
2019/03/15 02:32	2019/03/15 06:09	66	2.5
2019/03/21 02:35	2019/03/21 03:11	7	0.6
2019/04/21 14:45	2019/04/21 18:06	9	1.2
2019/06/11 04:17	2019/06/11 05:43	15	1.2
2019/06/16 09:19	2019/06/16 11:27	15	0.7

1.2 Rete Sismica Mobile

Nel primo semestre 2019 la Rete Sismica Mobile dell'Osservatorio Vesuviano ha continuato a svolgere l'attività di monitoraggio nell'area vulcanica dei Campi Flegrei utilizzando stazioni sismiche in acquisizione locale.

A tutto giugno 2019 nell'area dei Campi Flegrei sono installate e funzionanti 13 stazioni sismiche a larga banda di cui 2 dotate anche di accelerometro. La configurazione delle stazioni operative è mostrata in Figura 1.2.1, mentre le caratteristiche tecniche sono riassunte nella tabella Tabella 1.2.1.

Figura 1.2.1 – Rete Sismica stand-alone dei Campi Flegrei.

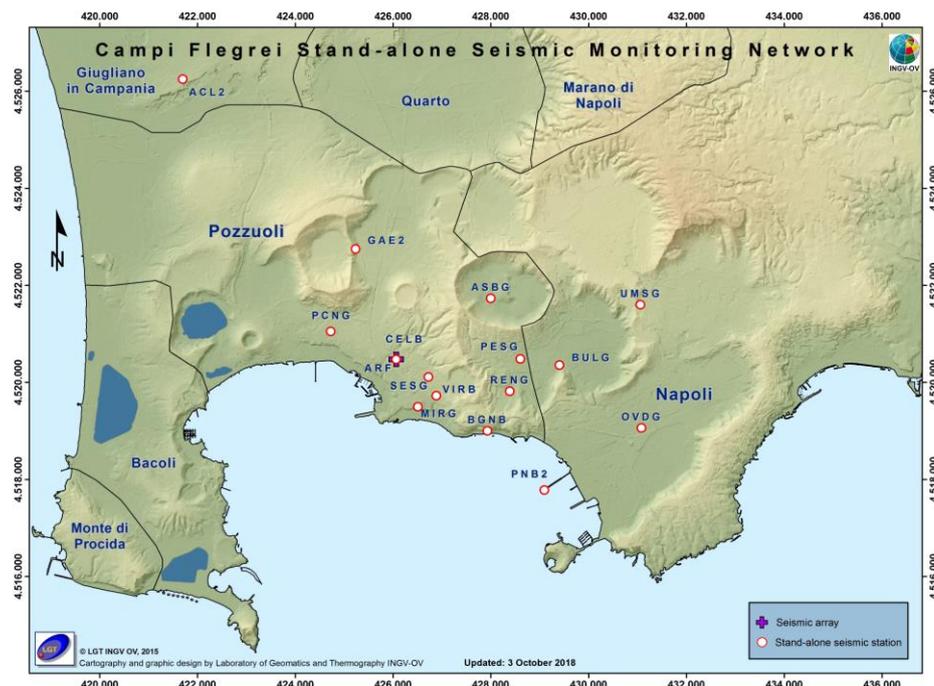


Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Sismica Mobile ai Campi Flegrei. La stazione CELG/K (CELB in Fig. 1.2.1 evidenziata in grigio) ha smesso di funzionare il 3 aprile 2019 per mancanza di energia elettrica.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
ACL2	40.8836N 14.0706E 55 m	Licola	Gennaio 2011	Lennartz LE3D/20s	Marslite	Locale
ASBG	40.8435N 14.1459E 12 m	Astroni	Novembre 2004	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
BGNG BGNK	40.8189N 14.1454E 4 m	Bagnoli La Pietra	Ottobre 2005	Guralp CMG-40T Episensor FBA ES-T	Reftek 130	Locale
BULG	40.8312N 14.1627E 18 m	Agnano Monte Spina	Febbraio 2010	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
CELG CELK	40.8320N 14.1231E 50 m	Pozzuoli Località Celle	Marzo 2008	Geotech KS2000 Episensor FBA ES-T	Reftek 130	Locale
MIRG	40.8232 14.1285 35	Residence Miramare	Luglio 2015	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
OVDG	40.8197N 14.1827E 14 m	Sede di Via Diocleziano	Aprile 2009	Geotech KS2000	Marslite	Locale
PCNG	40.8371N 14.1073E 50 m	Pozzuoli exOlivetti	Marzo 2015	Guralp CMG-40T	Taurus	Locale
PESG	40.8323N 14.1532E 45 m	Agnano Pisciarelli	Febbraio 2011	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale

PNB2	40.8080N 14.1593E 10 m	Pontile Bagnoli	Ottobre 2014	Lennartz LE3D/20s	Marslite	Locale
RENG	40.82630N 14.15072E 55 m	Agnano	Gennaio 2011	Guralp CMG-40T	Marslite	Locale
SESG	40.82876N 14.13096E 75 m	Pozzuoli	Luglio 2015	Guralp CMG-40T	Gilda	Locale
UMSG	40.84256N 14.18222E 120 m	Università M. S. Angelo	Maggio 2013	Geotech KS2000	Reftek 130	Locale
VIRG	40.8253N 14.1329E 65 m	Pozzuoli	Marzo 2015	Guralp CMG-40T	Reftek 130	Locale
VIRK			Ottobre 2015	Episensor FBA ES-T	Reftek 130	

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il primo semestre 2019 il monitoraggio geodetico dei Campi Flegrei è stato effettuato attraverso misure continue GPS, tiltmetriche e mareometriche, nonché mediante campagne di misura gravimetriche ed interferometria SAR.

2.1 Rete GPS

La rete di stazioni permanenti GPS operanti nell'area Napoli Campi Flegrei è costituita da 25 siti terrestri e marini (Figura 2.1.1). Nella Tabella 2.1.1 sono riportati i nomi dei siti e le coordinate, inoltre sono riportate le specifiche della strumentazione, con i *rate* di acquisizione ed i sistemi di trasmissione.

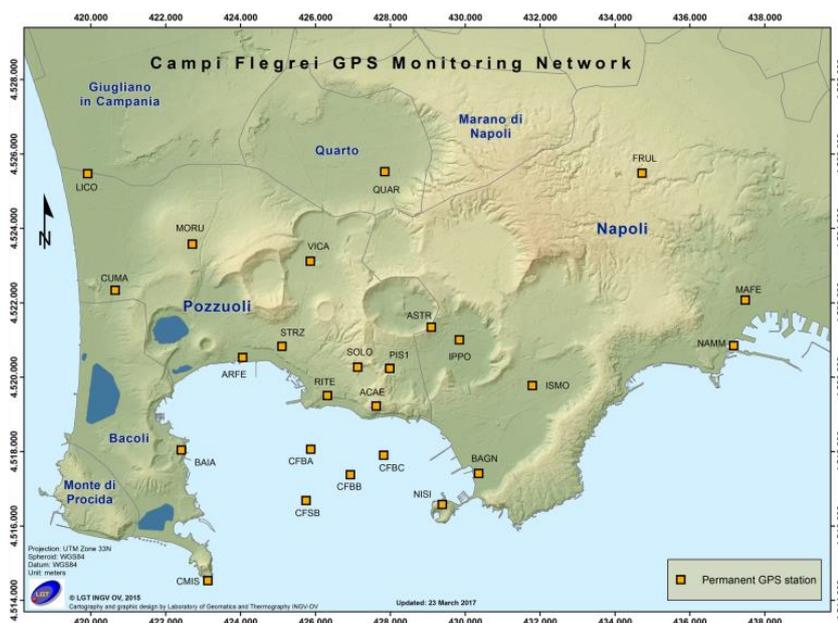


Figura 2.1.1 – Mappa della Rete GPS dei Campi Flegrei.

Tabella 2.1.1 – Stato della Rete GPS dei Campi Flegrei

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
ACAE	40.8209 N 14.1417 E	Accademia Aeronautica (Pozzuoli)	2000	Leica GRX1200PRO TRM29659.00 NONE	30sec/flusso 1sec	ADSL
ARFE	40.8323 N 14.0993 E	Arco Felice	2000	Leica GRX1200GPRO LEIAT504 NONE	30sec/flusso 1sec	ADSL
ASTR	40.8401 N 14.1590 E	Astroni	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec/flusso 1sec	UMTS/4G
BAGN	40.8048 N 14.1741 E	Città della Scienza Bagnoli	2012	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	30sec	Wi-Fi
BAIA	40.8097 N 14.0802 E	Castello di Baia	1999	Leica GRX1200GGPRO TRM29659.00 NONE	30sec/flusso 1sec	ADSL
CFBA	40.8097 N 14.1202 E	Meda A (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	Wi-Fi
CFBB	40.8035 N 14.1326 E	Meda B (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	Wi-Fi

CFBC	40.8057 N 14.1432 E	Meda C (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	Wi-Fi
CFSB	40.7980 N 14.1198 E	Meda (Pozzuoli)	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	Wi-Fi
CMIS	40.7781 N 14.0889 E	Capo Miseno	2015	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	Wi-Fi
CUMA	40.8482 N 14.0586 E	Cuma	2017	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec/flusso 1sec	UMTS/4G
FRUL	40.8779 N 14.2252 E	Frullone (Napoli)	2003	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL
IPPO	40.8371 N 14.1679 E	Ippodromo Agnano (Napoli)	1999	Leica GRX1200GGPRO TRM29659.00 NONE	30sec/flusso 1sec	ADSL
ISMO	40.8262 N 14.1911 E	CNR - Istituto Motori	2016	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	ADSL
LICO	40.8764 N 14.0496 E	Licola	2003	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL
MAFE	40.8474 N 14.2584 E	Università (Napoli)	2009	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL
MORU	40.8596 N 14.0830 E	Monteruscello	2000	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL
NAMM	40.8363 N 14.2548 E	Porto di Napoli	2015	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	UMTS/4G
NISI	40.7972 N 14.1631 E	Nisida (Napoli)	2009	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec	UMTS/4G
PIS1	40.8300 N 14.1460 E	Pisciarelli (Napoli)	2015	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec	Wi-Fi
QUAR	40.8777 N 14.1437 E	Municipio di Quarto	1999	Leica GRX1200GGPRO TRM29659.00 NONE	30sec/flusso 1sec	ADSL
RITE	40.8233 N 14.1262 E	Rione Terra (Pozzuoli)	2001	Leica GRX1200PRO TRM29659.00 NONE	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
SOLO	40.8303 N 14.1357 E	Solfatara (Pozzuoli)	2006	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec	UMTS/4G
STRZ	40.8351 N 14.1118 E	La Starza (Pozzuoli)	2006	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
VICA	40.8558 N 14.1205 E	Via Campana (Pozzuoli)	2008	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL

Attualmente 19 siti sono attrezzati con ricevitore Leica GR10, mentre i restanti 6 sono operativi con ricevitori della serie GRX1200PRO. Undici di questi siti trasmettono i dati acquisiti alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano di via Diocleziano attraverso linee ADSL, 5 utilizzano la connettività UMTS/4G, 9 utilizzano la rete Wi-Fi dell'Osservatorio Vesuviano. La maggior parte di queste stazioni, fruiscono di alimentazione attraverso rete elettrica e batteria a tampone, per garantire una continuità di funzionamento per almeno 15 giorni in caso di blackout elettrico. Cinque siti (BAGN, NISI, PIS1, NAMM, RITE) e le quattro mede nel Golfo di Pozzuoli (CFBA, CFBB, CFBC, CFSB) sono alimentati invece da un pannello solare di circa 100W.

Dopo la fase di uplift che ha interessato l'area flegrea a partire dalla fine del 2005, con un sollevamento complessivo massimo fino ad aprile 2013 di circa 23 cm alla stazione GPS di Rione Terra (Figura 2.1.2), dal maggio 2013 non si sono registrate deformazioni significative fino agli inizi del 2014, quando si è evidenziato un nuovo lieve trend in sollevamento, con una velocità stimata in circa $2,0 \pm 0,5$ cm/anno alla stazione di RITE.

Nel periodo luglio-ottobre 2014, si è evidenziato un aumento del sollevamento dell'area, con velocità massima alla stazione di RITE di circa 1 cm/mese, seguito da un periodo, fino ad agosto 2015, caratterizzato da brevi periodi di stasi e lievi sollevamenti con una velocità media di 0.5 cm/mese.

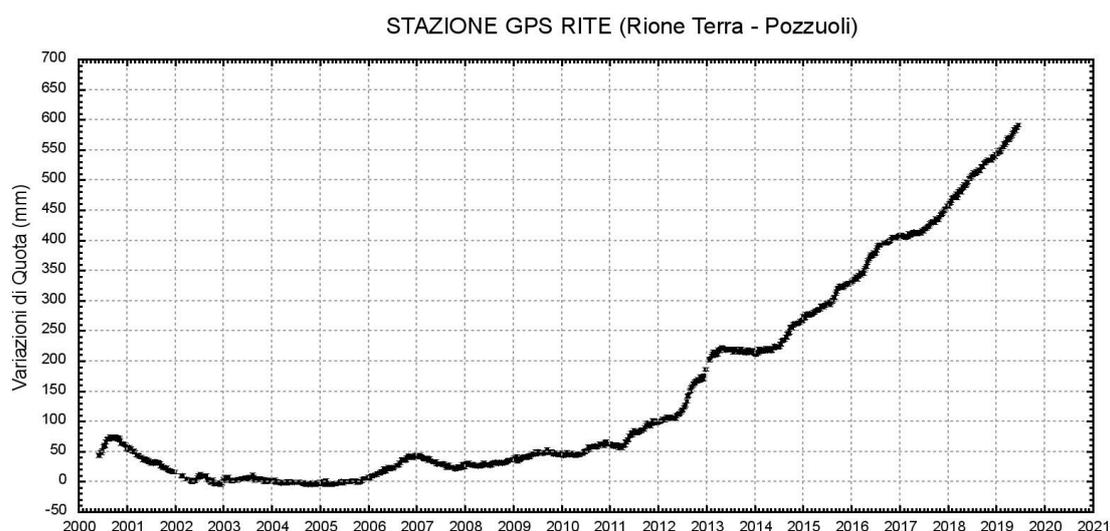
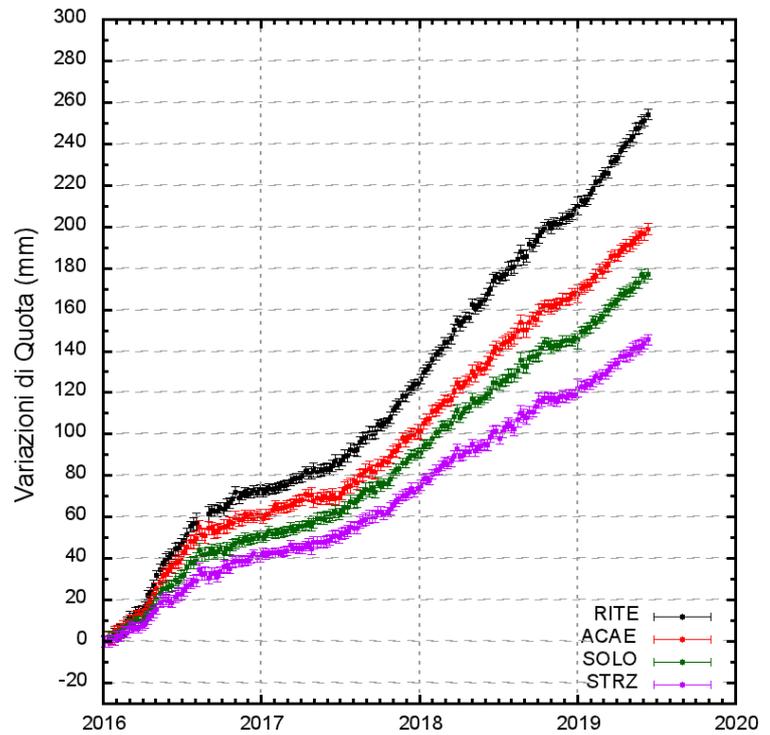


Figura 2.1.2 – Serie temporale delle variazioni in quota settimanali della stazione di RITE (Pozzuoli) dal 2000 a giugno 2019.

Nel settembre 2015 si è registrato un aumento della velocità del sollevamento con un valore massimo alla stazione di RITE di circa $1,5 \pm 0,5$ cm/mese conclusosi agli inizi di ottobre 2015 in coincidenza con lo sciame sismico del 7 ottobre. Dal dicembre 2015 si è evidenziato un lieve trend di sollevamento di circa 0.5 cm/mese fino ad aprile 2016, quando la velocità di sollevamento è aumentata nuovamente con un valore massimo, sempre alla stazione di RITE, di circa $1,5 \pm 0,5$ cm/mese. Agli inizi di giugno 2016 la velocità massima di sollevamento è ritornata a valori di circa 0.5 cm/mese. Dagli inizi di luglio alla metà di agosto 2016 si è verificato un nuovo aumento della velocità del sollevamento con un valore massimo alla stazione di RITE di circa $1,5 \pm 0,5$ cm/mese. Dalla fine di agosto 2016 non si sono osservate deformazioni del suolo significative. Dagli inizi del 2017, si è riscontrato un leggero sollevamento con valori massimi di circa 1cm/anno. Da luglio 2017 l'area flegrea è interessata da un sollevamento dal valore medio nell'area di massima deformazione di circa 0.7 cm/mese.

Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE (area di massima deformazione) è di circa 59 cm a partire dal 2006, di cui circa 54 cm dal 2011 (Figura 2.1.2). Da gennaio 2016 si è registrato un sollevamento di circa 25 cm (Figura 2.1.3).

Figura 2.1.3 - Serie temporali delle variazioni in quota delle stazioni di RITE (Pozzuoli – Rione Terra), ACAE (Accademia Aeronautica), SOLO (Solfatarata) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) da gennaio 2016 a giugno 2019.



Negli stessi periodi sono state registrate anche significative deformazioni planimetriche.

In Figura 2.1.4 è riportata la mappa dei vettori degli spostamenti orizzontali registrati alle stazioni CGPS ai Campi Flegrei da gennaio 2016 a giugno 2019.

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

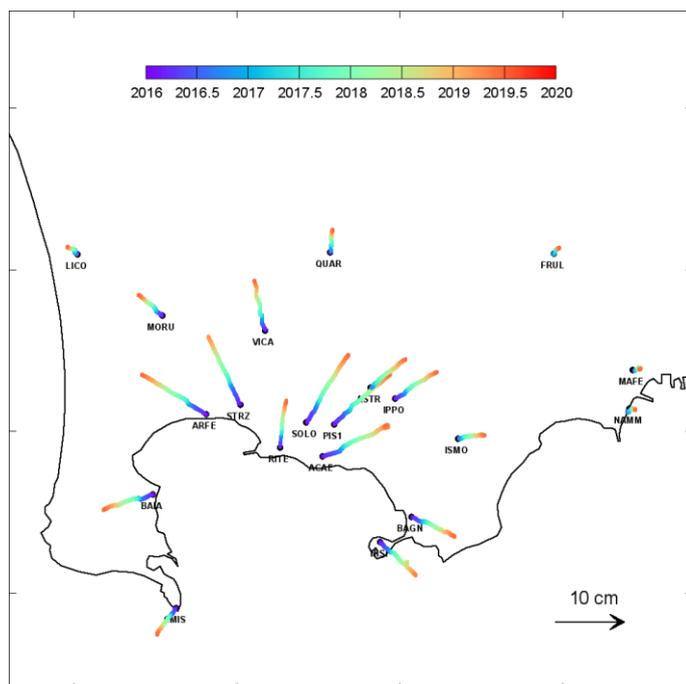


Figura 2.1.4 - Mappa degli spostamenti orizzontali registrati nell'area flegrea da gennaio 2016 a giugno 2019.

2.2 Rete Tiltmetrica

La Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei (Figura 2.2.1) consiste in 10 stazioni (le cui specifiche sono riportate in Tabella 2.2.1), di cui 4 attrezzate con sensori analogici di superficie, mod. 702 (Applied Geomechanics Instruments), 3 attrezzate con sensori analogici da pozzo, mod. 722 (Applied Geomechanics Instruments) e 3 attrezzate con sensori digitali da pozzo, mod. Lily (Jewell Instrument).

Tutte le stazioni acquisiscono con passo di campionamento di un minuto e trasmettono quotidianamente alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano i file dati registrati.

Figura 2.2.1 – Mappa della Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.

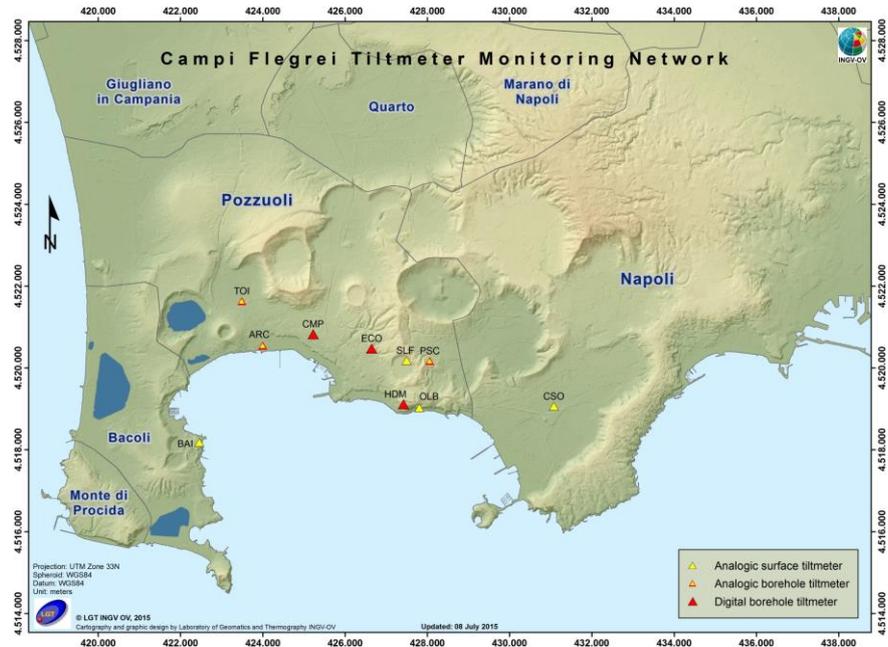


Tabella 2.2.1 – Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmissione
BAI	40.8109N 14.0807E 35 m	Bacoli Castello di Baia	22/05/1992	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi
SLF	40.8293N 14.1399E 104 m	Pozzuoli Solfatara	21/11/2011	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi
OLB	40.8188N 14.1435E 30 m	Pozzuoli Galleria di Monte Olibano	26/02/2006	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	Wi-Fi
CSO	40.8197N 14.1826E 19 m	Napoli Sede OV	26/02/2006	Applied Geomechanics mod. 702	-5 metri	1'	Linea telefonica
TOI	40.8422N 14.0924E 25 m	Pozzuoli Rione Toiano	16/04/2002	Applied Geomechanics mod. 722	-8 metri	1'	GSM
ARC	40.8324N 14.0985E 3 m	Arco Felice	14/12/2003	Applied Geomechanics mod. 722	-6 metri	1'	GSM
PSC	40.8300N 14.1457E 79 m	Pozzuoli Pisciarelli	21/11/2013	Applied Geomechanics mod. 722	-1 metro	1'	GSM

CMP	40.8351N 14.1131E 61 m	Pozzuoli Cimitero Comunale	20/03/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Wi-Fi
ECO	40.8320N 14.1300E 112 m	Pozzuoli	27/03/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
HDM	40.8199N 14.1394E 115 m	Pozzuoli Accademia Aeronautica	12/02/2015	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS

La variazione tiltmetrica osservata ai Campi Flegrei nel primo semestre 2019 segue una simmetria radiale coerente alla fase di sollevamento del suolo. La stazione ECO, la cui direzione di tilting si era discostata dalla metà di luglio 2018 da quella conforme all'uplift, ha iniziato a riallinearsi gradualmente a NNE a partire dal mese di maggio 2019. La deformazione registrata è visibile nell'odografo di Figura 2.2.2 che riassume il pattern tiltmetrico registrato dalle 3 stazioni digitali funzionanti in area flegrea, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori a 1 giorno.

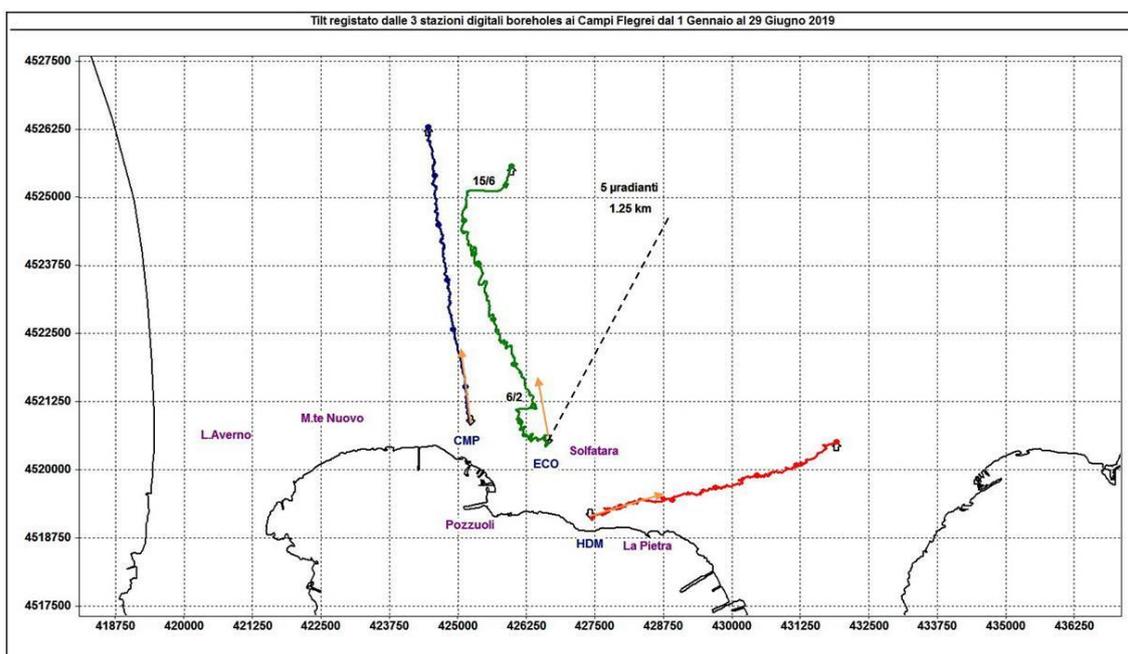


Figura 2.2.2 – Odografo del tilting registrato alle 3 stazioni digitali in pozzo della rete flegrea nel primo semestre 2019. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 5 μ radianti o 1.25 km. I pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt indicano l'inizio di ogni mese. La linea a tratteggio indica la direzione di tilting che ECO dovrebbe avere in piena coerenza con l'attuale fase di uplift e che ha effettivamente seguito dalla fine di settembre 2017 fino a metà luglio 2018. Le frecce arancione sovrapposte (non in scala) indicano la direzione di abbassamento del suolo.

In tale figura 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.

In Figura 2.2.3 sono riportati i segnali originali registrati da 9 delle 10 stazioni flegree (tra analogiche e digitali) non corretti del contributo delle stagionalità (essenzialmente di tipo termico).

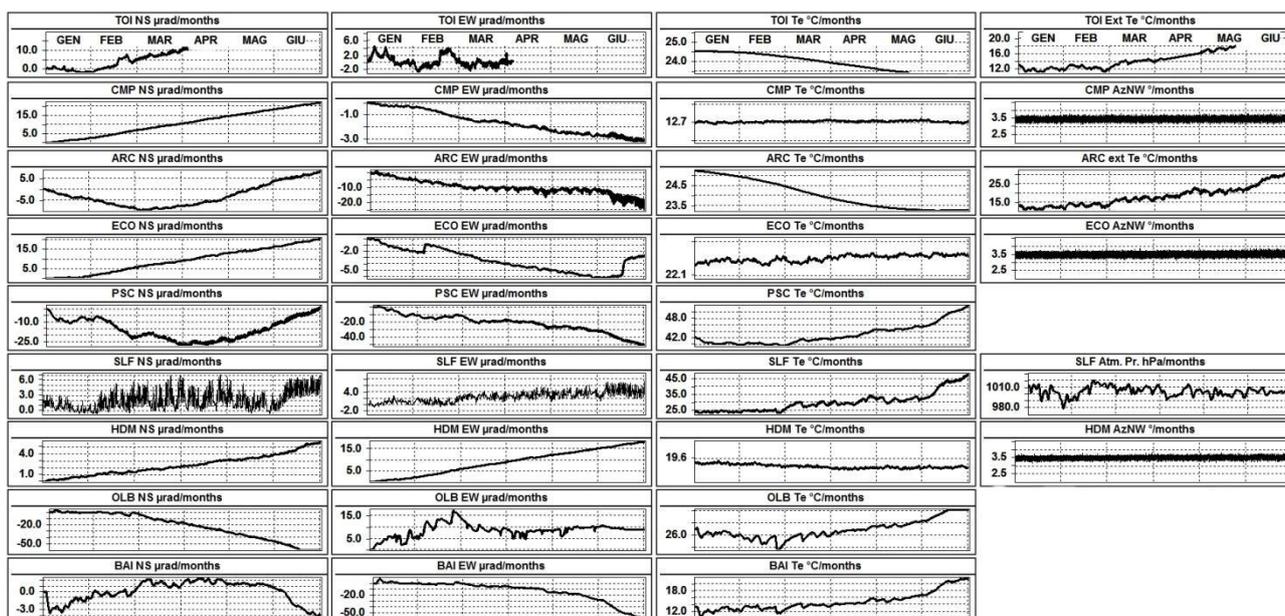


Figura 2.2.3 - Segnali registrati nel primo semestre 2019 da 9 dei 10 sensori della rete flegrea; le stazioni tiltmetriche sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è invece relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 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. La terza colonna riporta le temperature in $^{\circ}$ C registrate da ogni sensore ed infine l'ultima colonna è riservata ai segnali non rilevati da tutte le stazioni, come la temperatura misurata a bocca pozzo ad ARC e TOI, la pressione atmosferica in hPa acquisita a SLF e la variazione di declinazione magnetica in gradi registrata dai sensori Lily. Per questi ultimi, la dicitura AzNW significa azimut antiorario misurato dalla bussola a fondo pozzo.

I dati affidabili della stazione borehole TOI si fermano ad aprile 2019 per l'inaccessibilità del sito e l'impossibilità di effettuare la manutenzione della strumentazione.

In Tabella 2.2.2 sono riportate, per le sole stazioni digitali, la variazione di inclinazione del suolo, la direzione di tilting e la variazione di temperatura registrata a fondo pozzo (\approx -25 m dal p.c.) relative al 2019.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato e variazione termica associata relativi alle stazioni digitali nel primo semestre 2019.

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	20.5 μ radianti a N-NNW	0.03 $^{\circ}$ C
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	22.0 μ radianti a N-NNW	0.00 $^{\circ}$ C
Stazione HDM(112 m s.l.m.)	18.8 μ radianti a ENE	-0.01 $^{\circ}$ C

In Figura 2.2.4 sono mostrati gli andamenti delle componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 3 stazioni borehole.

Per evidenziare la continuità dei segnali, il periodo di tempo ivi rappresentato parte dal 1 gennaio 2018; poiché, inoltre, i segnali acquisiti rappresentano la variazione di tilt, sono stati tutti azzerati a partire da quell'epoca.

Tutte le componenti NS mostrano un trend di inclinazione verso N e quindi un sollevamento del suolo a S delle stesse. Per quanto riguarda le componenti EW, CMP, situata ad W di Pozzuoli, mostra un trend verso W e quindi sollevamento ad E, mentre delle due stazioni ad E di Pozzuoli, HDM mostra un trend opposto ed ECO, invece, deriva verso E dal mese di maggio 2019.

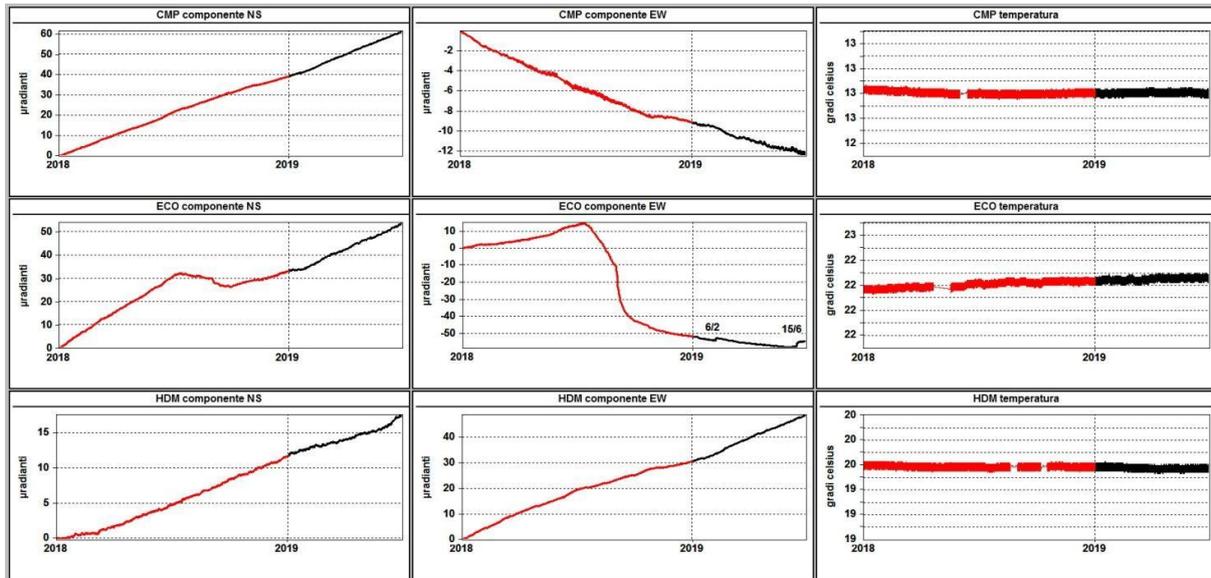


Figura 2.2.4 - Segnali registrati dalle 3 stazioni "borehole" della rete flegrea. Sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è invece relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW 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 $^{\circ}\text{C}$ registrata da ogni sensore.

In rosso sono riportati i segnali relativi al 2018 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel 2019. Sulla componente EW di ECO sono inoltre segnate le date di due stiramenti del segnale verso E, verificatisi rispettivamente il 6 febbraio ed il 15 giugno.

La Figura 2.2.2 mostra come la radialità nella deformazione del suolo registrata da tutte e 3 le stazioni borehole ricominci dal mese di maggio, essendosi interrotta nel luglio dello scorso anno.

Si osserva inoltre che lo stretching più forte verso E della componente EW del tiltmetro di ECO è avvenuto il 15 giugno laddove un fenomeno simile ma con trend opposto si era già verificato il 14 luglio 2018 (11 mesi prima).

Si segnala inoltre che l'evento sismico più energetico ($M_d=2.5$) avvenuto all'interno della sequenza sismica del 15 marzo 2019 (04:26:42 UTC) è stato preceduto da anomalie sui segnali di 5 stazioni tiltmetriche flegree (Fig. 2.2.5). In particolare, 4 tiltmetri borehole (CMP NS, ECO NS/EW, HDM NS/EW e PSC EW) hanno registrato variazioni, anche se di entità molto piccola, da 2 a 30 minuti prima di tale evento. Il corrispondente tilt cosismico è stato invece registrato a TOI NS, CMP NS/EW, ECO EW e HDM NS/EW. Tali osservabili sono compatibili con una oscillazione del suolo, durata meno di un'ora, che ha interessato un'area comprendente la Solfatara e Pisciarelli.

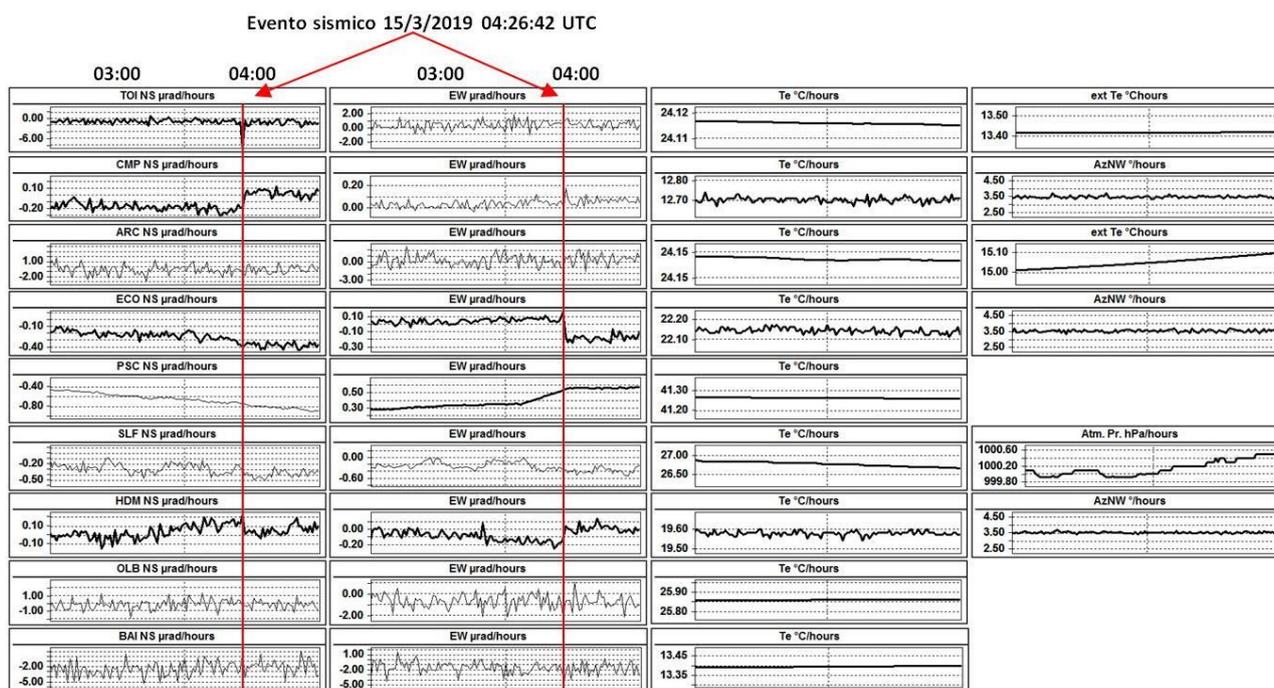


Figura 2.2.5 - Segnali registrati il 15 marzo 2019 dalle 03:00 alle 04:59 UTC da 9 dei 10 sensori della Rete Tiltmetrica flegrea; la linea rossa sovrapposta sulle componenti NS ed EW corrisponde alle ore 04:27.

Invece, diversamente da quanto accaduto nei precedenti semestri del 2017 e 2018, il tiltmetro analogico installato a Pisciarelli ad 1 m di profondità (PSC), non ha registrato particolari anomalie in frequenza ed ampiezza. Si mostrano infine 2 grafici che riportano rispettivamente il confronto tra le serie termiche registrate a partire dal 2015 dal sensore di temperatura a corredo del tiltmetro PSC e quello tra quest'ultima e la temperatura esterna registrata dal sensore di temperatura a corredo del tiltmetro SLF (Figura 2.2.6).

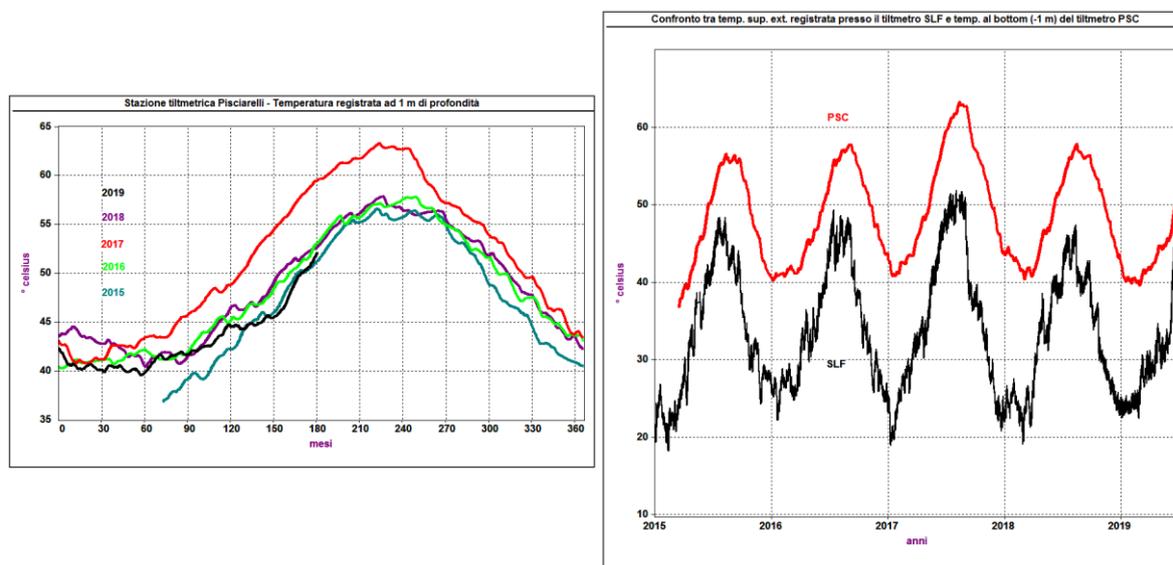


Figura 2.2.6 - A sinistra: temperatura registrata dal sensore termico del tiltmetro borehole in località Pisciarelli (stazione PSC, sensore a -1 m da p.c.). I diversi colori contraddistinguono gli anni: nero 2019, viola 2018, rosso 2017, verde 2016, ciano 2015.

A destra: confronto tra Temperatura esterna registrata presso il tiltmetro SLF (in nero) e Temperatura registrata al bottom del tiltmetro PSC (in rosso) con relativi trend annui. Lo sfasamento osservato tra le 2 termiche è di 26 giorni ed è dovuto al ritardo che l'onda termica accumula propagandosi nel sottosuolo.

2.3 Rete Mareografica

Le Rete Mareografica dei Campi Flegrei consiste in 4 stazioni (Figura 2.3.1, Tabella 2.3.1).

Il monitoraggio del livello mareometrico è realizzato mediante sensori a galleggiante (in tubo di calma) collegati ad un encoder digitale. I segnali, campionati ogni minuto, vengono acquisiti e trasmessi via modem GSM. L'alimentazione è del tipo solare con pannelli fotovoltaici; solo la stazione di Pozzuoli - Porto è collegata alla rete elettrica. Le stazioni sono installate in cabine metalliche e contenitori in vetroresina. L'ubicazione in ambiente marino condiziona notevolmente le strutture di alloggio, pertanto è indispensabile una frequente manutenzione. Periodicamente vengono effettuati lavori di sturo ai tubi di calma da personale subacqueo specializzato.

In prossimità delle stazioni mareometriche sono materializzati capisaldi della rete di livellazione dell'Osservatorio Vesuviano.

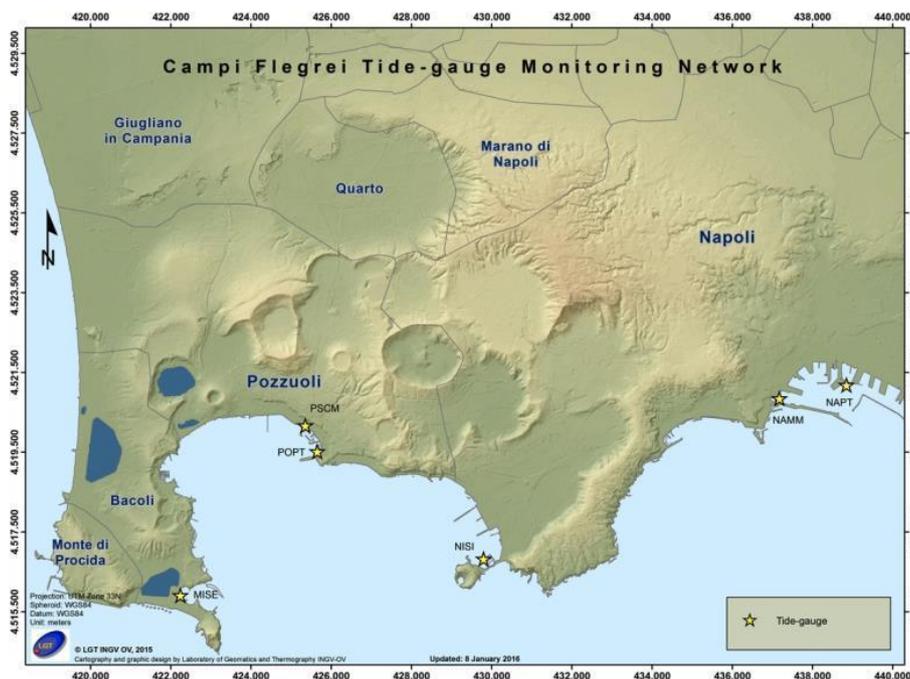


Figura 2.3.1 – Mappa della Rete Mareometrica dei Campi Flegrei.

Tabella 2.3.1 – Rete Mareometrica dei Campi Flegrei

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
NISI	40.7994N 14.1678E	Nisida	19/12/2003	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1 min
POPT	40.8233N 14.1147E	Pozzuoli porto	10/10/2002	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1 min
PMSC	40.8292N 14.1147E	Pozzuoli Molo Sud	12/05/2005	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1 min
MISE	40.7905N 14.0783E	Miseno	10/10/2002	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1 min
Stazioni di riferimento Napoli						
NAPT (dismessa)	40.8411N 14.2697E	Napoli Porto	29/04/2003	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1 min
NAMM	40.8364N 14.2547E	Napoli S.Vincenzo	06/10/2015	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1 min

I dati nella serie temporale della stazione NAMM dal 2011 ad oggi sono stati raccordati con i dati della ex stazione NAPT, potendoli considerare omogenei all'interno degli errori di misura.

I dati mareografici relativi alla stazione di Pozzuoli Porto nel periodo gennaio 2011 – giugno 2019 mostrano l'andamento di Figura 2.3.2 dal quale si evince un sollevamento di circa 51 cm, pari ad una media di 5.4 cm/anno.

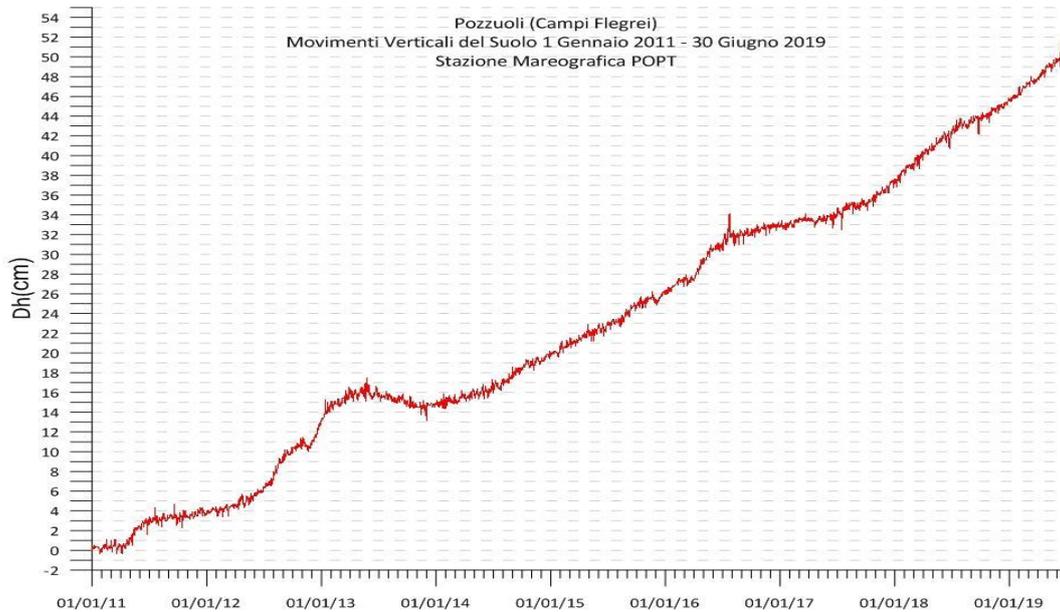
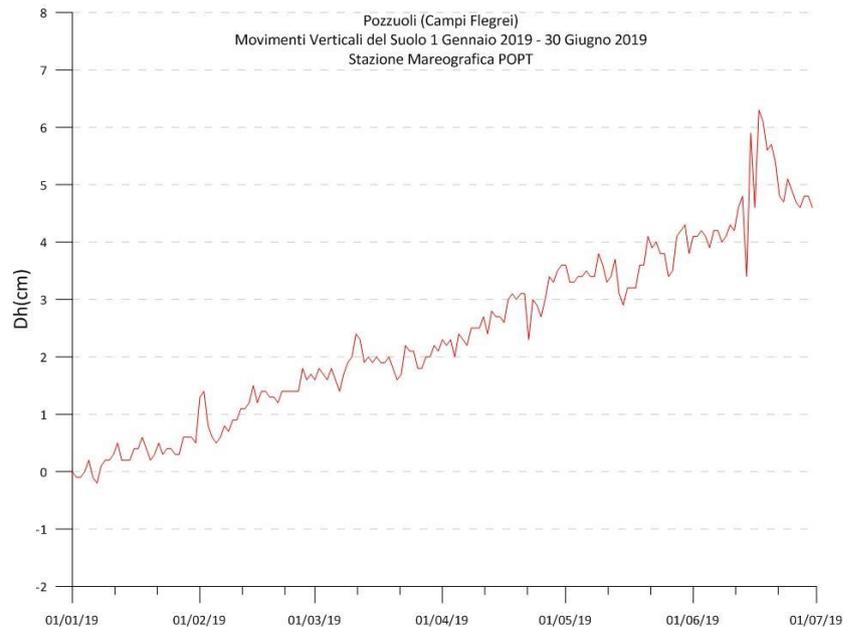


Figura 2.3.2 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2011 - giugno 2019, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli Molo S.Vincenzo (NAMM).

Dal mese di aprile 2011 è stata registrata un'evidente e veloce ripresa del sollevamento che nel periodo gennaio 2011 – maggio 2013 è stato pari a circa +16 cm. Nel periodo maggio-dicembre 2013 è stato registrato un trend di lieve abbassamento, mentre nel restante periodo il trend si inverte recuperando tale abbassamento. Nel primo semestre 2019 si registrano circa 5 cm di sollevamento (Fig. 2.3.3).

I picchi nel grafico di Pozzuoli, verso fine luglio 2016 e fine giugno 2019 sono dovuti a temporanee e parziale occlusione del tubo di calma della stazione di riferimento di Napoli (NAMM), risoltisi con interventi di manutenzione.

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



La stazione di Miseno, nel periodo gennaio – giugno 2019, non mostra significativi movimenti verticali del suolo (Fig. 2.3.4a), mentre quella di Nisida indica circa 2 cm di sollevamento (Fig. 2.3.4b).

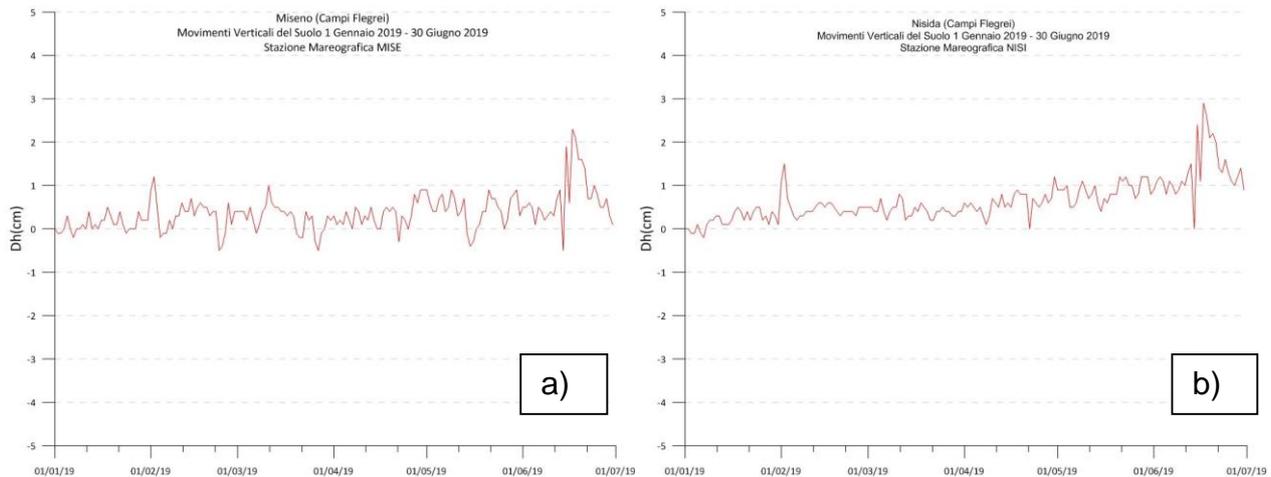


Figura 2.3.4 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2019 – giugno 2019, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti da (a) sensore digitale alla stazione mareografica di Miseno (MISE) (bordo occidentale della caldera flegrea) e (b) alla stazione mareografica di Nisida (NISI) (bordo orientale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli molo S.Vincenzo (NAMM).

2.4 Rete Gravimetrica

La Rete Gravimetrica dei Campi Flegrei è composta da 38 stazioni di misura relativa e di 24 di misura assoluta (Figura 2.4.1).

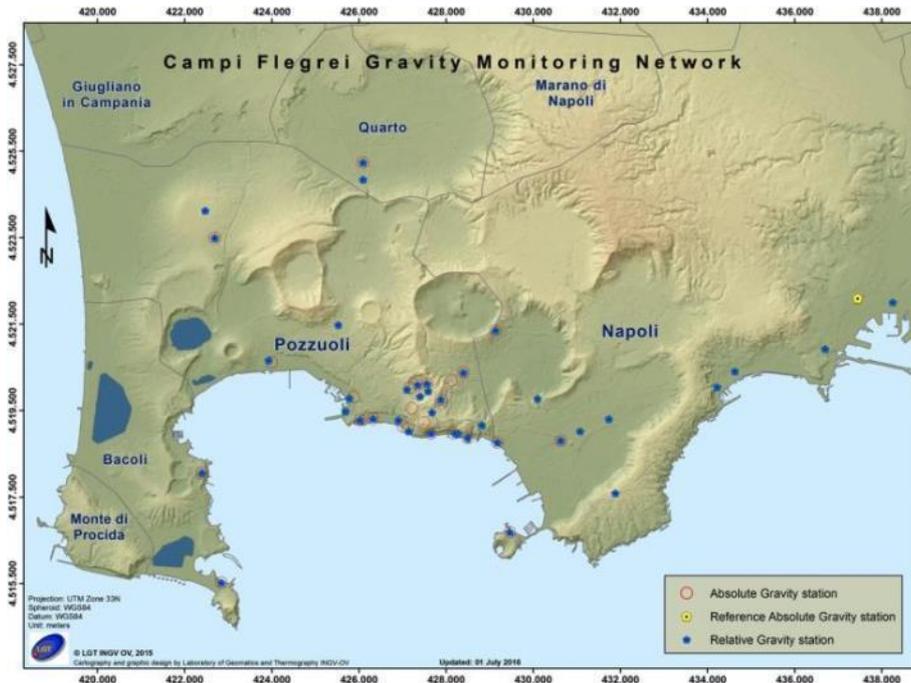


Figura 2.4.1 – Mappa della Rete Gravimetrica dei Campi Flegrei.

Dal 19 febbraio agli inizi di marzo 2019 è stata effettuata una campagna di misure gravimetriche relative nel corso della quale sono state istituite cinque nuove stazioni di misura (indicate in Figura 2.4.2 con quadrati pieni rossi); due di esse (Baia e Quarto) sono state riposizionate allo scopo di sostituire quelle già esistenti in quanto risultate non idonee per le misure assolute.

I dati rilevati sono stati sottoposti a compensazione, risultandone un errore medio sulle misure di $\pm 5 \mu\text{Gal}$. Sono state successivamente calcolate le differenze di gravità di ciascuna stazione rispetto a quella di riferimento di Napoli (Università).

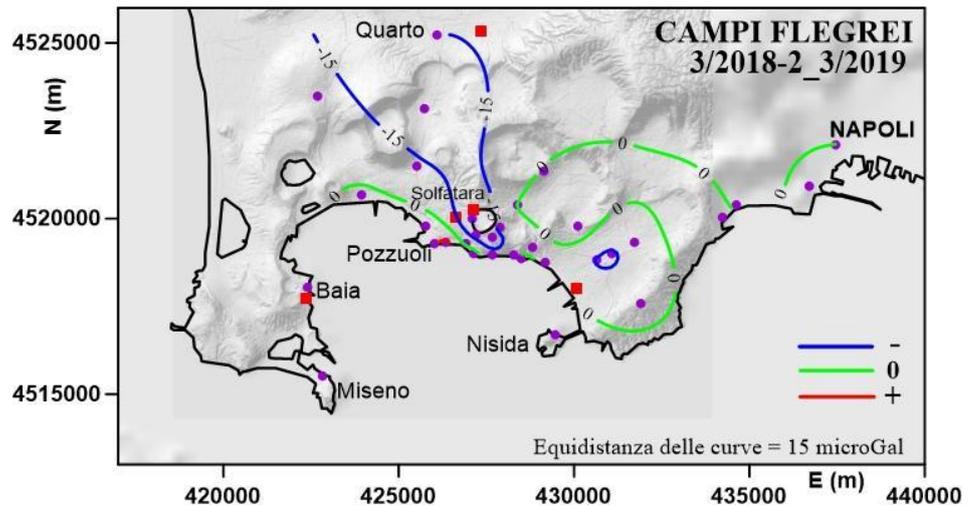
A seguire era prevista una campagna di misure gravimetriche assolute che è stata interrotta a causa di problemi strumentali attualmente in fase di risoluzione.

I Δg riferiti alla stazione di Napoli sono stati confrontati con quelli ottenuti nella precedente campagna di marzo 2018, il cui errore medio è di $\pm 7 \mu\text{Gal}$.

Il confronto evidenzia che nell'intervallo di tempo considerato (marzo 2018- febbraio/marzo 2019) l'area flegrea non è stata globalmente interessata da variazioni di gravità di rilevante entità; risultano comunque individuabili una diminuzione di gravità nella zona centrale della caldera e un aumento di gravità di $19 \mu\text{Gal}$ in corrispondenza di un solo vertice sul lungomare di Pozzuoli. Variazioni statisticamente significative, comprese tra -21 e $-32 \mu\text{Gal}$, sono state rilevate in corrispondenza delle stazioni Accademia Aeronautica, Belvedere S. Gennaro, Ingresso Solfatara e sul vertice in Via Campana Nord. È da sottolineare che la stazione di Via Campana Nord è stata istituita nel marzo 2018 e si ritiene necessario riposizionarla in quanto il sito è risultato particolarmente disturbato da eventi meteo.

In figura 2.4.2 è illustrato il campo variometrico tracciato con equidistanza di $15 \mu\text{Gal}$.

Figura 2.4.2 - Campo delle variazioni di gravità sull'intervallo di tempo marzo 2018 - febbraio/marzo 2019. Le variazioni positive, negative e la linea di zero sono rispettivamente rappresentate con le curve in colore rosso, blu e verde. I cerchi pieni viola rappresentano le stazioni gravimetriche, quelle istituite nel corso dell'ultima campagna sono rappresentate con quadrati rossi.



Le variazioni di gravità ai singoli vertici sono state depurate dell'effetto delle variazioni di quota occorse nello stesso intervallo di tempo, calcolate considerando i dati GPS rilevati alla stazione RITE. Anche i dati residuati (Figura 2.4.3) evidenziano che in generale l'area flegrea non è affetta da variazioni gravimetriche statisticamente significative; solo lungo la costa, in corrispondenza di quattro vertici allineati da Gerolomini a Serapeo, si ottengono residui gravimetrici positivi compresi tra 25 e 38 μGal .

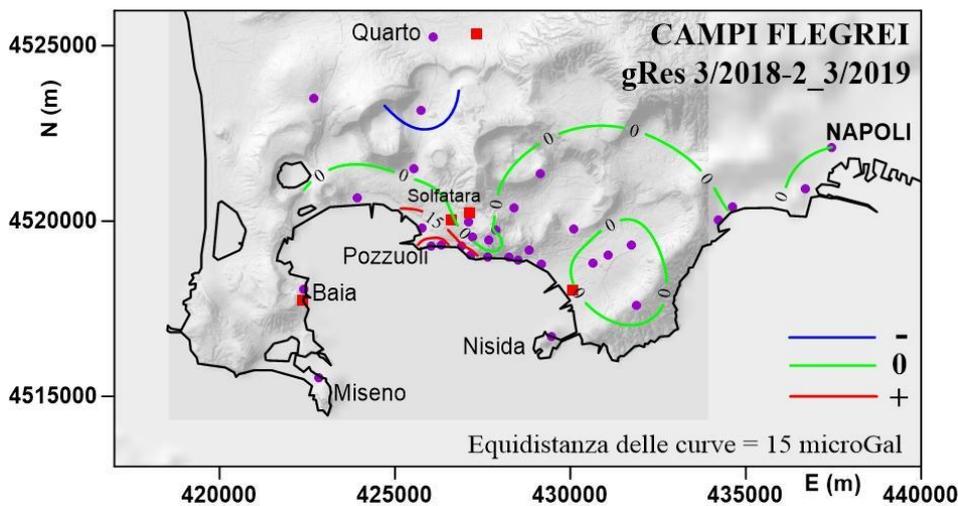


Figura 2.4.3 - Campo delle variazioni di gravità depurate dell'effetto delle variazioni di quota (residui gravimetrici) per l'intervallo marzo 2018 - febbraio/marzo 2019.

2.5 Monitoraggio satellitare con Interferometria SAR

Il monitoraggio interferometrico delle deformazioni dei Campi Flegrei sfrutta i dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR) acquisiti dalle principali costellazioni satellitari attualmente operative: TerraSAR-X (TSX) dell’Agenzia Spaziale Tedesca, COSMO-SkyMed (CSK) dell’Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e Sentinel-1A del programma europeo Copernicus, gestita dall’Agenzia Spaziale Europea (ESA).

InSAR - Interferometria differenziale classica

I dati acquisiti dal sensore TerraSAR-X dell’Agenzia Spaziale Tedesca (DLR, German Aerospace Center), operante in banda X, si sono resi disponibili nell’ambito dell’iniziativa internazionale GEO-GSNL (Group on Earth Observations - Geohazard Supersites and Natural Laboratory).

Al fine di valutare la deformazione in atto durante il primo semestre del 2019, è stata prodotta una mappa di deformazione (Figura 2.5.1, ritaglio), ricavata dall’interferogramma differenziale 02/12/2018-29/06/2019, in cui ogni ciclo di colore corrisponde ad 1 cm di deformazione nella linea di vista del sensore.

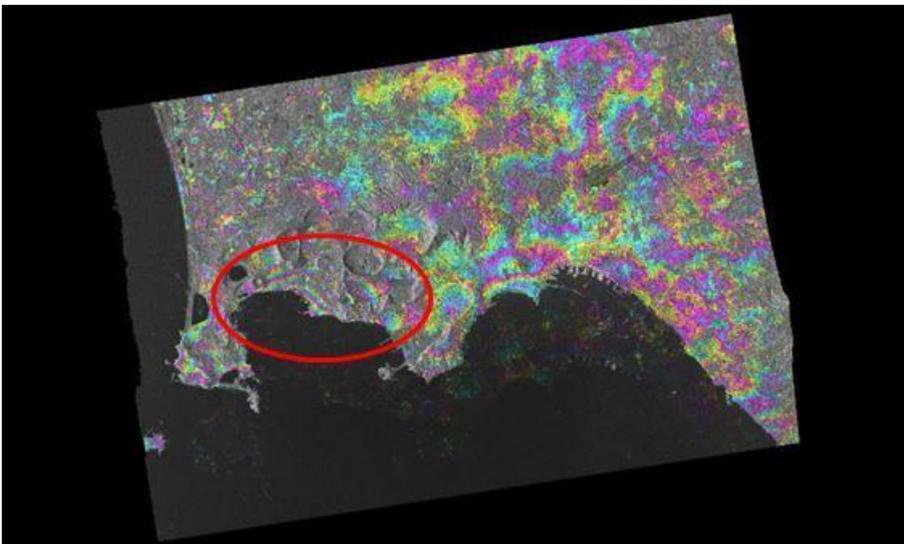


Figura 2.5.1 - Mappa di deformazione nella linea di vista del sensore TerraSAR-X per il periodo 02/12/2018-29/06/2019 - nell'ovale in rosso l'area di massima deformazione (1 cm/ciclo di colore, dati Stripmap, orbite ascendenti, B perp. = 28m).

Dall’analisi della Figura 2.5.1, il sollevamento in atto lungo la zona costiera in prossimità dell’abitato di Pozzuoli (area compresa nell’ovale in rosso) e corrispondente storicamente all’area di massima deformazione, risulta di ≈ 5 cm, benché tale valore non risulti del tutto chiaro a causa dell’estesa decorrelazione presente nelle aree interne dei Campi Flegrei. Per un confronto si riporta il grafico di Figura 2.5.2sx), che mostra le variazioni di quota ricavate da una stazione GPS in continuo (RITE, Rione Terra) localizzata nell’area di massima deformazione (Figura 2.5.2dx).

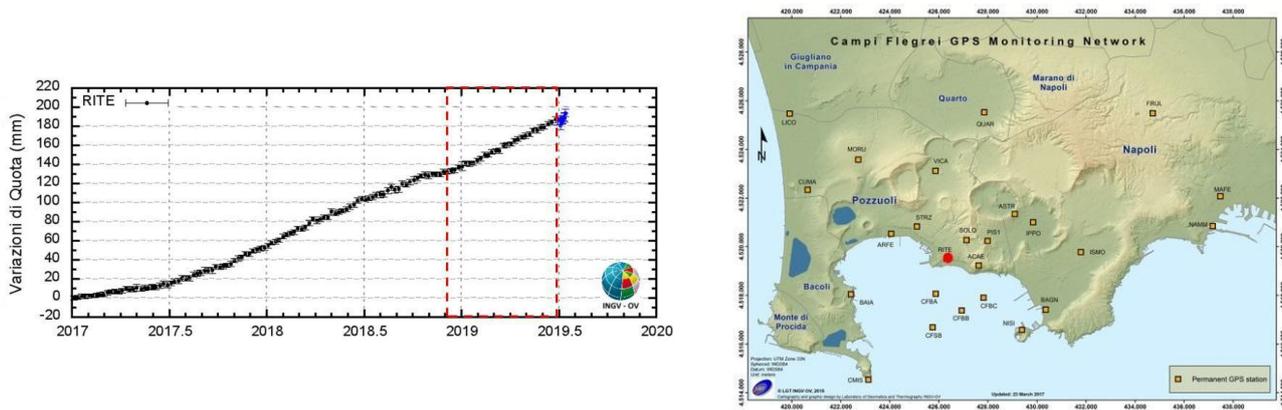


Figura 2.5.2 - sx) Variazioni di quota registrate presso la stazione GPS in continuo RITE (Rione Terra), il box in tratteggio rosso corrisponde all'intervallo temporale della mappa di deformazione di Fig. 2.5.2.1; dx) Schema della rete GPS in continuo dei Campi Flegrei, il cerchio rosso corrisponde al punto in cui è localizzata la stazione GPS RITE.

In Figura 2.5.2sx, il box delimitato dalle linee rosse in tratteggio corrisponde all'intervallo temporale investigato nella mappa di deformazione di Figura 2.5.1, mentre i punti in azzurro rappresentano le variazioni giornaliere calcolate con prodotti rapidi IGS, in attesa della rielaborazione con i prodotti finali IGS (punti neri) appena disponibili.

Benché la mappa di deformazione di Figura 2.5.1 derivi da un singolo interferogramma, potenzialmente affetto da residui atmosferici, si noti che la deformazione rilevata in prossimità della costa rimane ben visibile/inalterata. Il centro della deformazione risulta spostato in direzione ovest rispetto a quello reale, dipendentemente dall'effetto combinato del passaggio ascendente dell'orbita satellitare e la compresenza di una componente planimetrica del moto del suolo, caratteristica dei Campi Flegrei (vedi elaborazione dati GPS §2.1).

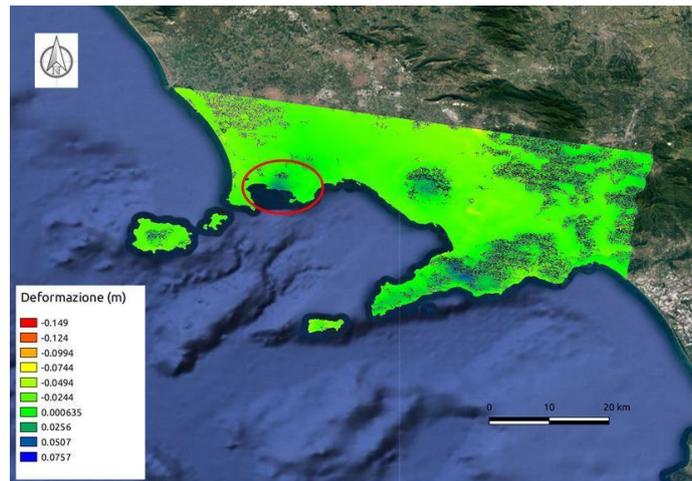
La componente in fase della topografia è stata rimossa avvalendosi di un modello digitale del terreno ricavato da dati TanDEM-X (*Global Elevation Model*) con una spaziatura del pixel di 12 m.

A conferma di quanto evidenziato nella mappa di Figura 2.5.1, si è deciso di calcolare un'ulteriore mappa di deformazione da una differente tipologia di dati satellitari, anche al fine di investigare un'area più estesa che comprendesse l'intero Distretto Vulcanico Napoletano.

A tal fine è stata elaborata una coppia interferometrica dai dati del sensore Sentinel-1A dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA, *European Space Agency*), operante in banda C e resi disponibili a titolo gratuito dalla suddetta Agenzia attraverso i propri canali web.

L'interferogramma differenziale 02/01/2019-13/07/2019 ha perciò consentito di produrre la mappa di deformazione in linea di vista riportata in Figura 2.5.3, che evidenzia il sollevamento in atto lungo la zona costiera dei Campi Flegrei (ovale in rosso), in accordo con i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati TerraSAR-X.

Figura 2.5.3 - Mappa di deformazione nella linea di vista del sensore Sentinel-1A per il periodo 02/01/2019-13/07/2019 nell'ovale in rosso l'area di massima deformazione; Dati IWS - TOPS mode, swath 1, orbite discendenti, B perp. = 22 m; (l'unità di misura della deformazione è in m).



Per un confronto viene riportato il grafico (Figura 2.5.4) della serie temporale delle variazioni di quota ricavate dalla suddetta stazione GPS RITE per il periodo (box in tratteggio) al quale si riferisce la precedente mappa di deformazione, da cui si ricava nuovamente un sollevamento massimo di ≈ 5 cm.

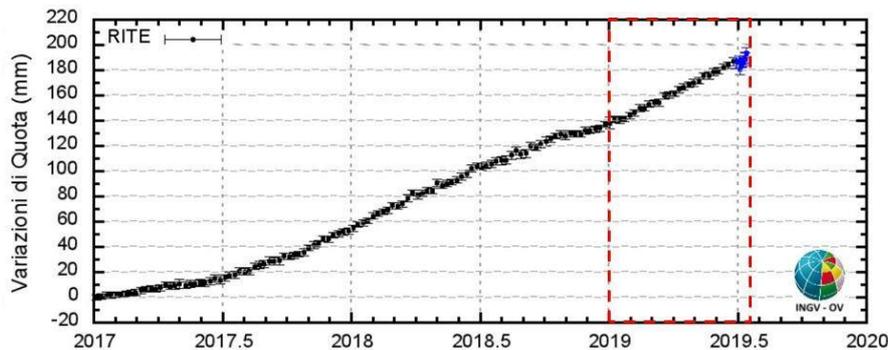


Figura 2.5.4 - Variazioni di quota registrate presso la stazione GPS in continuo RITE (Rione Terra); il box in tratteggio rosso corrisponde all'intervallo temporale della mappa di deformazione di Figura 2.5.1.3.

Rispetto alla mappa di deformazione ottenuta dai dati TerraSAR-X, qui il centro della deformazione risulta spostato in direzione est rispetto a quello reale per effetto del passaggio discendente dell'orbita satellitare, oltre che per la compresenza di una componente planimetrica del moto del suolo.

Per l'elaborazione dei dati Sentinel-1A, la componente in fase della topografia è stata rimossa avvalendosi di un modello digitale del terreno ricavato da dati SRTMGL1 (*SRTM Global 1 arc second*) con una spaziatura del pixel di 30 m

InSAR – Analisi multi-temporale

Relativamente al monitoraggio satellitare dell'area dei Campi Flegrei in modalità multi-temporale, è stato elaborato un dataset composto da 462 immagini SAR fornite dalle missioni COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

I dati sono stati acquisiti in un intervallo temporale di oltre 8 anni, da Gennaio 2011 a Giugno 2019, con un campionamento temporale molto fitto (massimo tempo di rivisita tra due acquisizioni pari a 16 giorni).

I parametri caratterizzanti la geometria di acquisizione sono i seguenti:

- Orbita: Ascendente
- Angolo di Incidenza (θ): $\sim 49^\circ$
- Angolo di Azimuth (α): $\sim 13^\circ$
- Risoluzione: $\sim 3 \times 3$ m

I dati sono stati elaborati mediante approccio InSAR multi-temporale implementato nel software GAMMA, che consente di calcolare il trend lineare di deformazione del suolo e le serie temporali. Per ridurre lo speckle tipico delle immagini SAR, si è scelto di utilizzare fattori di multi-look tali da avere una dimensione del pixel a terra di circa 30 m sia in range che in azimuth.

Per la rimozione del contributo topografico nella fase interferometrica è stato invece utilizzato il modello di elevazione digitale del terreno a 12 metri di risoluzione fornito dalla missione TanDEM-X del DLR (German Aerospace Center), opportunamente sottocampionato a 30 m per poter correttamente georiferire il dato in output alla catena interferometrica.

Per quanto riguarda i dettagli dell'elaborazione, si è scelto di considerare le coppie interferometriche caratterizzate da baseline spaziale massima di 250 m ed intervallo temporale massimo di 120 giorni. Ciò ha restituito una rete molto fitta e ridondante di 3203 interferogrammi (Figura 2.5.5), che sono stati quindi filtrati e srotolati per calcolare i parametri di interesse.

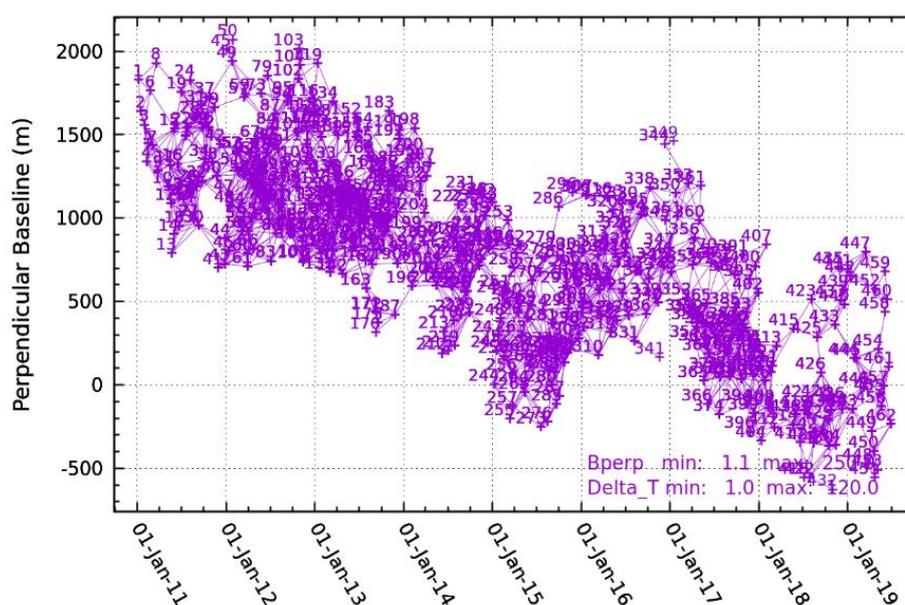


Figura 2.5.5 - Rete di interferogrammi considerata.

Il prodotto ottenuto in termini di velocità di deformazione calcolata lungo la linea di vista (*LoS, Line-of-Sight*) del satellite è mostrato in Figura 2.5.6. L'inflazione vulcanica nella caldera dei Campi Flegrei è chiaramente osservabile con picchi di deformazione, più di 4 cm/anno, localizzati nella zona del porto di Pozzuoli. Velocità negative sono invece osservate nell'area ad est della caldera, dovute alla componente orizzontale di deformazione che, data la geometria di acquisizione del sensore, si sottrae alla componente verticale, oltre che in corrispondenza del Gran Cono del Vesuvio.

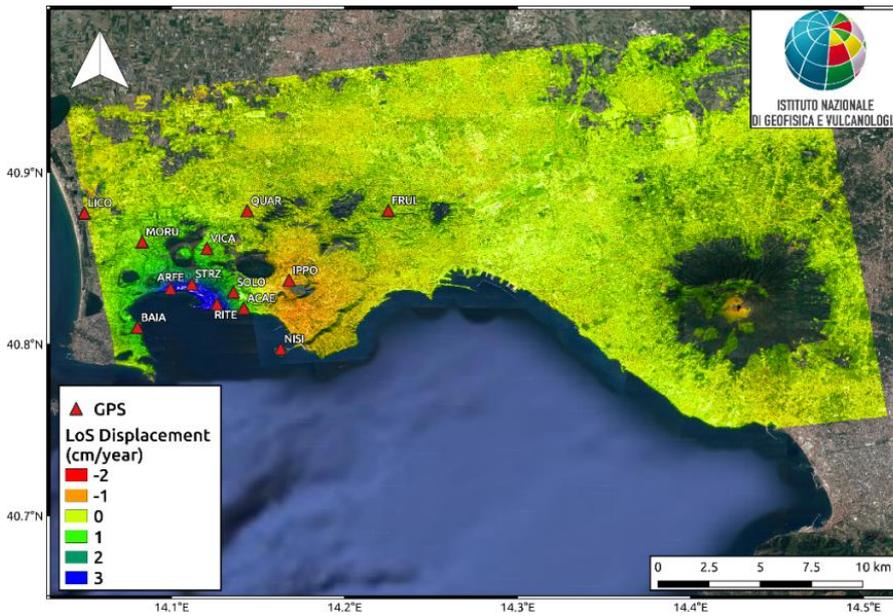


Figura 2.5.6 - Mappa della velocità di deformazione del suolo stimata lungo la linea di vista con dati InSAR COSMO-SkyMed.

Nelle Figura 2.5.7 sono invece mostrate le serie temporali di deformazione di alcuni punti situati all'interno della caldera dei Campi Flegrei.

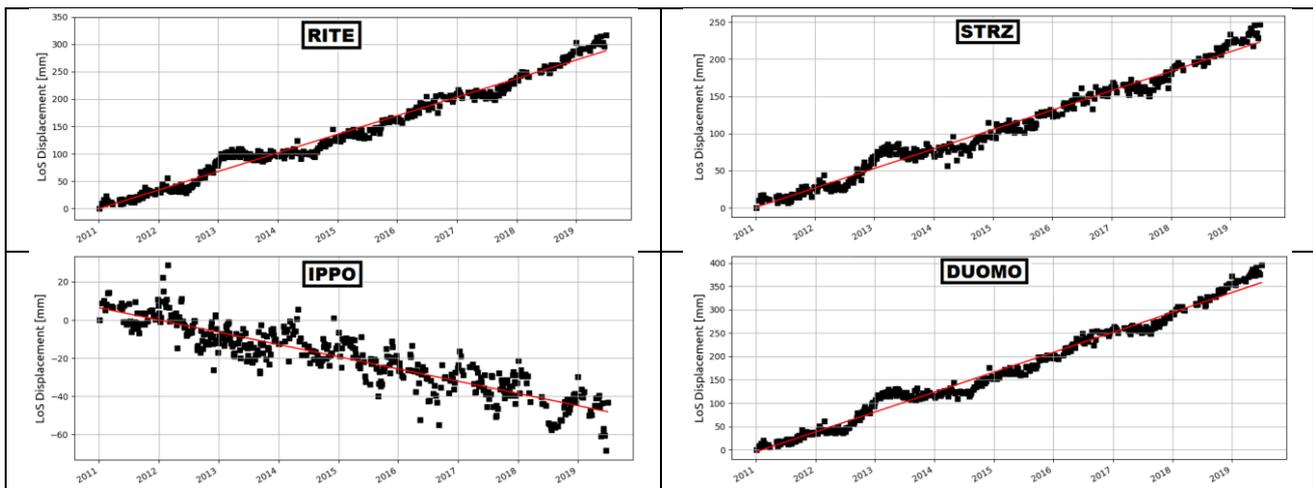


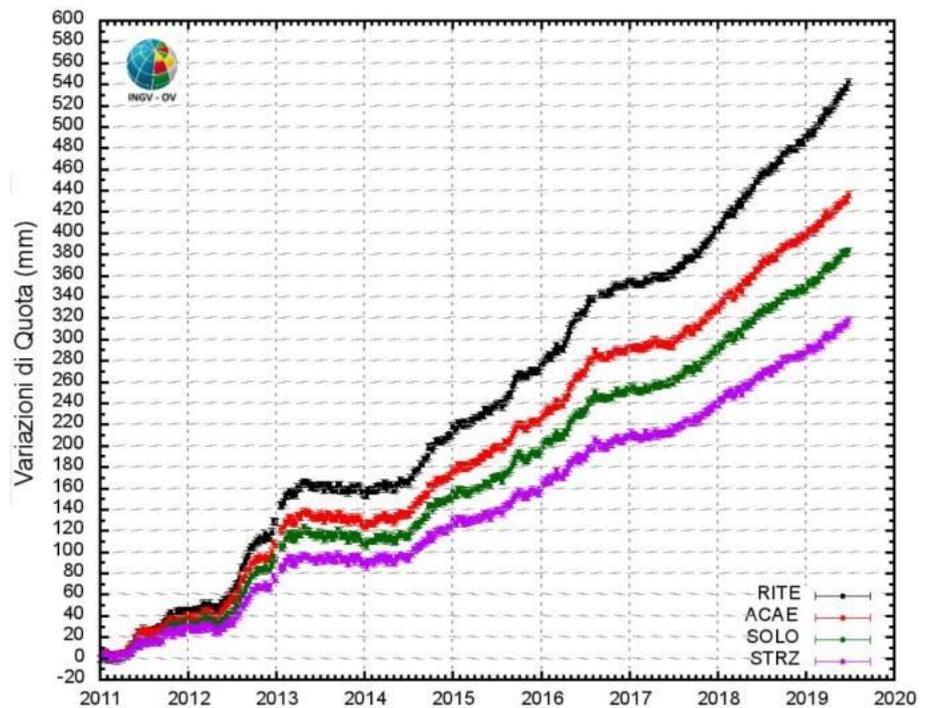
Figura 2.5.7 - Serie temporali della deformazione del suolo estratte su punti nell'area dei Campi Flegrei.

Le serie temporali estratte su punti vicini alle stazioni GPS RITE e STRZ sono concordi con le misure in quota dei GPS. Va sottolineato infatti che le serie temporali InSAR sono stimate lungo la *LoS*, per cui, data la geometria di acquisizione ed in particolare il basso angolo di incidenza (circa 49°), la componente verticale della deformazione è sensibilmente più alta, in accordo con la relazione secondo la quale:

$$UP \sim LoS / \cos \theta$$

Quindi, considerando ad esempio la serie RITE, il massimo sollevamento in *LoS* di circa 33 cm corrisponde ad una deformazione verticale di circa 51 cm, come peraltro confermato dalla serie temporale delle variazioni di quota della stessa stazione GPS RITE per un analogo intervallo temporale (Figura 2.5.8)

Figura 2.5.8 - Serie temporali delle variazioni di quota di stazioni GPS in continuo delle rete geodetica dei Campi Flegrei (01/01/2011-29/06/2019).



La serie InSAR estratta vicino alla stazione GPS IPPO risente invece, come detto, di una forte componente orizzontale verso est che comporta quindi un segnale negativo. Il massimo sollevamento della caldera è stato rilevato nei pressi del Duomo di Pozzuoli (serie DUOMO), nella parte storica del Rione Terra.

3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

Le attività di monitoraggio vulcanologico vengono svolte dalla Sezione di Napoli "Osservatorio Vesuviano" con una Rete Permanente di Telecamere Termiche e con campagne di misure con Termocamera Mobile e Termocoppia e dalla Sezione di Roma "Osservatorio Nazionale Terremoti" con dati satellitari.

3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine INGV-Osservatorio Vesuviano

La Rete TIRNet (Thermal Infrared Imagery Monitoring Network) per la sorveglianza vulcanica continua a lungo termine dei Campi Flegrei tramite acquisizione di immagini all'infrarosso termico è attualmente costituita da 5 stazioni permanenti, di cui due ubicate all'interno del cratere della Solfatara (SF1, SF2), una in località Pisciarelli (PS1), la quarta (OBN) è posizionata alla base del versante SE del duomo di monte Olibano e la quinta (IR-SOB), è situata sul bordo sud-orientale del cratere della Solfatara (Figura 3.1.1).

Nel corso del primo semestre 2019 tutte le stazioni sono state regolarmente operative. Pertanto, sono state effettuate esclusivamente attività di manutenzione ordinaria che hanno riguardato la verifica in situ della funzionalità e dello stato della strumentazione con particolare attenzione al controllo della operatività ed efficienza dei sistemi di alimentazione delle stazioni remote.

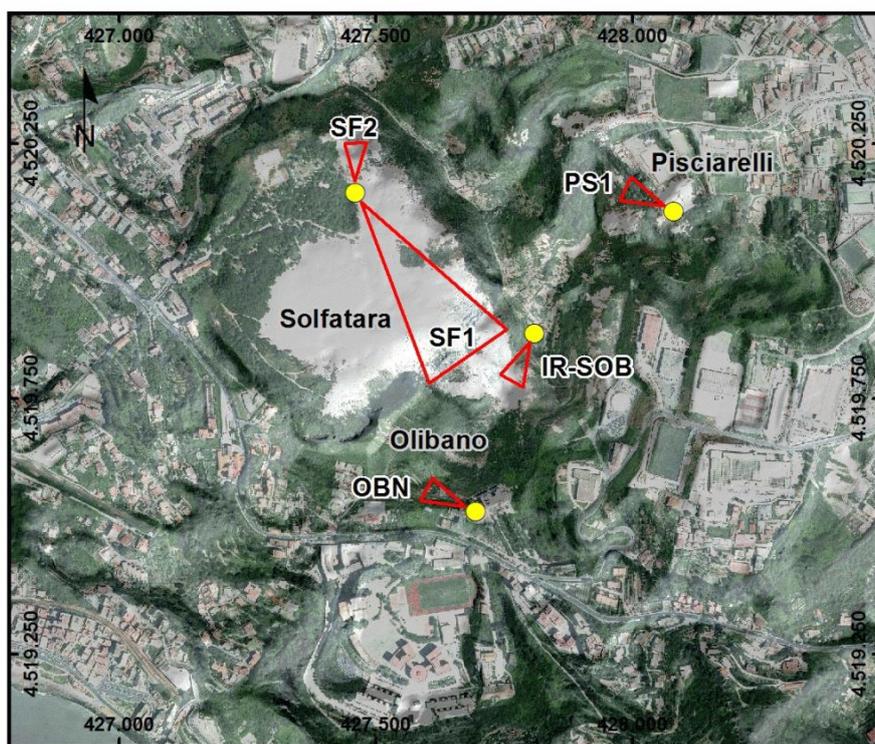


Figura 3.1.1 – Mappa della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine operante ai Campi Flegrei. Ubicazione stazioni remote (punti gialli), le basi dei triangoli isosceli rappresentano schematicamente le aree target.

La Tabella 3.1.1 sintetizza lo stato attuale della rete permanente di monitoraggio termico ad immagine operante ai Campi Flegrei.

Tabella 3.1.1 - Stato attuale della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine operante ai Campi Flegrei.

Stazione	Coordinate UTM (m)	Località	Data installazione	Sensore	Trasmissione
SF1	40.8292N 14.1397E 92 m	Solfatara - Area Target: Area fumarole (BG, BN) versante interno sud-orientale del cratere della Solfatara	Settembre 2004	Termocamera FLIR A655SC (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Wi-Fi
SF2	40.8292N 14.1397E 92 m	Solfatara - Area Target: Settore settentrionale del versante interno del cratere della Solfatara	Giugno 2013	Termocamera FLIR A645SC (640 x 480) FoV: 15° x 11.9°	Wi-Fi
PS1	40.8289N 14.1471E 90 m	Agnano Pisciarelli - Area Target: Parte alta del versante ad ovest della fumarola principale in località Pisciarelli	Ottobre 2006	Termocamera FLIR A645SC (640 x 480) FoV: 15° x 11.9°	UMTS
OBN	40.8236N 14.1425E 150 m	Pozzuoli - Tetto Edificio Scolastico IPSAR "Lucio Petronio" - Area Target: Versante meridionale del Monte Olibano	Marzo 2015	Termocamera FLIR A645SC (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Wi-Fi
IR-SOB	40.8268N 14.1439E 175 m	Bordo sud-orientale cratere Solfatara - Area Target: Bordo esterno sud-orientale cratere Solfatara	Giugno 2016	Termocamera FLIR A655SC (640 x 480) FoV: 25° x 19°	Wi-Fi

Sono riportate nel seguito le elaborazioni delle serie temporali relative alle acquisizioni effettuate dalle diverse stazioni operanti nell'area dei Campi Flegrei aggiornate al 30 giugno 2019.

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

PISCIARELLI

La serie temporale dei valori di temperatura massima (Figura 3.1.2) mostra una sostanziale stabilità nei valori del campo di temperatura superficiale nell'area d'analisi fino a settembre 2015. Da tale data e fino ai primi giorni di marzo 2016 si osserva un andamento costantemente in diminuzione. Da marzo a luglio 2016 si osserva un'inversione di tendenza con un sensibile aumento delle temperatura che poi, fino a marzo 2017, oscillano intorno ai valori di inizio serie. Da marzo 2017 si registra nuovamente una costante diminuzione dei valori di temperatura che si protrae fino alla fine del 2017 raggiungendo i valori tra i più bassi degli ultimi 5 anni.

Nel primo semestre 2018, si osserva un significativo aumento delle temperature nei mesi da gennaio ad aprile. Da maggio 2018 a tutto giugno 2019, la serie temporale delle temperature massime dell'area target mostra un andamento stazionario con leggera tendenza alla diminuzione.

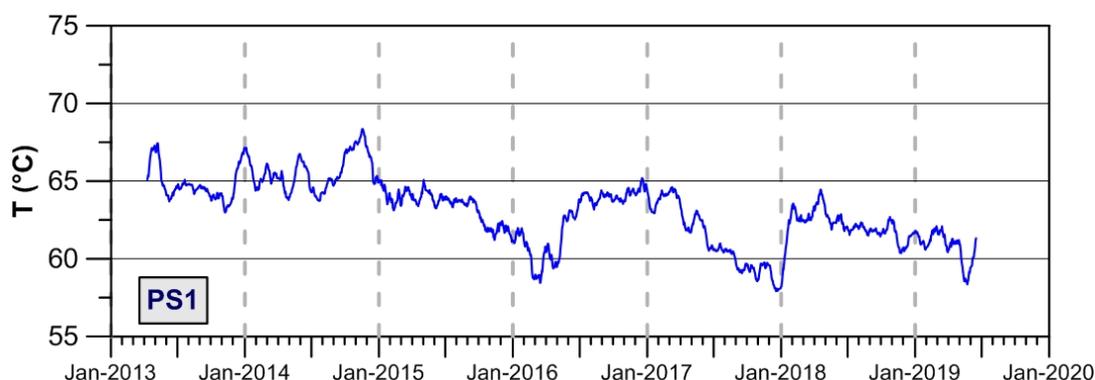


Figura 3.1.2 - Stazione Pisciarelli. Serie temporale delle medie mensili dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

La serie temporale completa dal 2007 a giugno 2019 del trend a lungo termine delle temperature massime è illustrata in Figura 3.1.3.

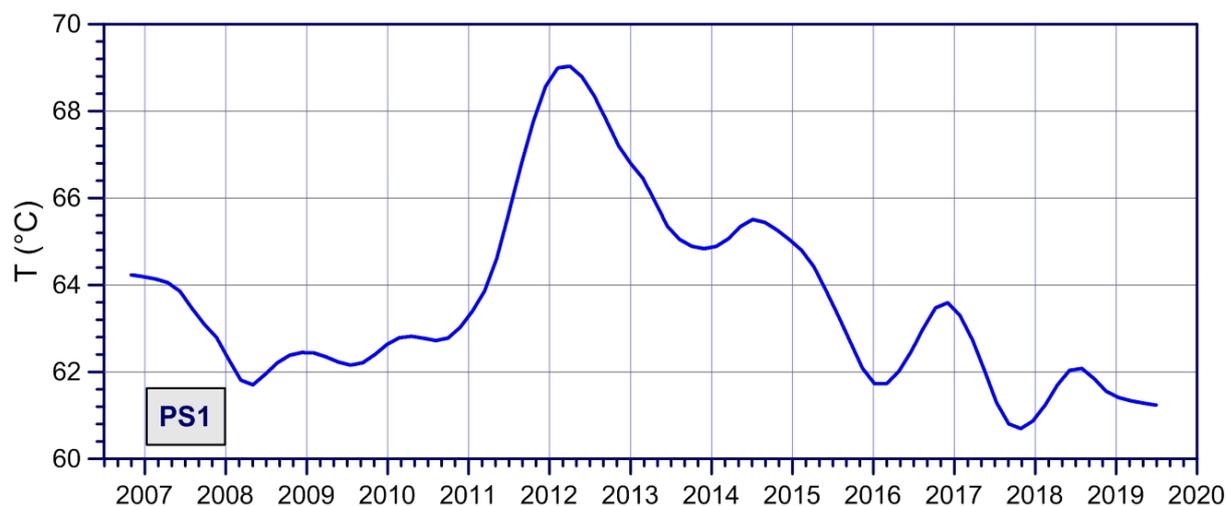


Figura 3.1.3 - Stazione Pisciarelli (PS1). Trend a lungo termine dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR ottenute mediante applicazione dell'algoritmo STL.

Il grafico in Fig. 3.1.3 evidenzia un picco massimo dei valori di temperatura nella prima metà del 2012, seguito da una costante diminuzione, seppure in presenza di ampie oscillazioni a lungo periodo. I valori minimi si sono osservati nella seconda metà del 2017. Negli ultimi due mesi del 2017 e nel primo semestre 2018, l'andamento della temperatura superficiale dell'area target mostra un lieve incremento.

Nel secondo semestre 2018, così come nel primo semestre 2019, anche il trend a lungo termine della temperatura massima dell'area target mostra un andamento stazionario con leggera tendenza alla diminuzione.

SOLFATARA

L'elaborazione delle serie temporali delle temperature massime rilevate dalla stazione **SF1** (Figura 3.1.4) mostra, a partire da agosto 2014, un sensibile incremento dei valori fino ai primi mesi del 2016. Dopo tale data si osserva un trend in lieve e costante diminuzione che si protrae fino a giugno 2018.

Nel secondo semestre 2018 ed ugualmente nel primo semestre 2019, seppure in presenza di oscillazioni di varia ampiezza e periodo, si osserva un andamento dei valori di temperatura sostanzialmente stazionario.

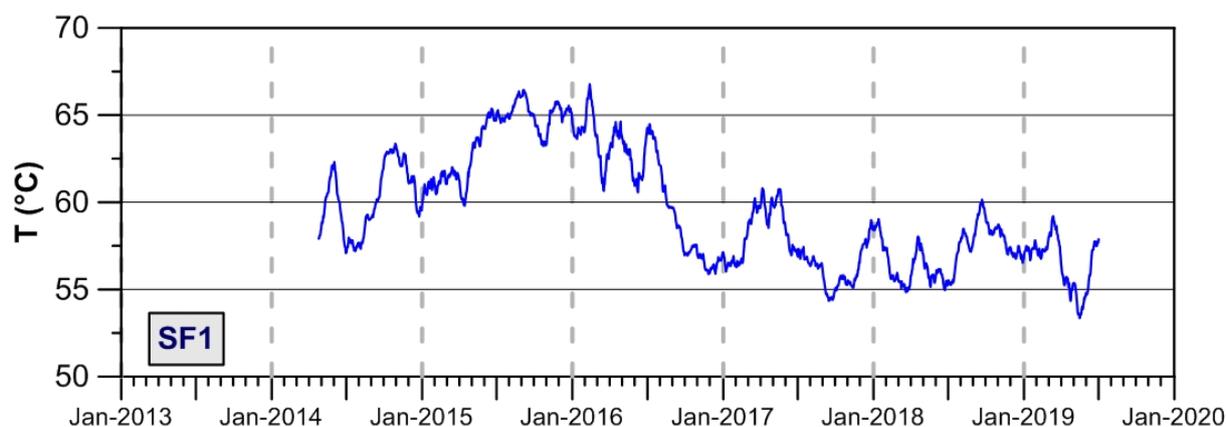


Figura 3.1.4 - Stazione Solfatara (SF1). Serie temporale delle medie mensili dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

L'andamento delle temperature massime rilevate dalla stazione **SF2** mostra, dalla fine del 2014, un trend in lieve e costante diminuzione seppur in presenza di ampie oscillazioni. Dopo aver raggiunto nel mese di febbraio 2018 il valore minimo degli ultimi 5 anni, le temperature massime hanno mostrato un sensibile aumento da marzo ad aprile 2018 per poi stabilizzarsi nei mesi successivi. Nel primo semestre 2019 la serie temporale dei valori di temperatura massima evidenzia un andamento stabile così come osservato nei mesi immediatamente precedenti. (Figura 3.1.5).

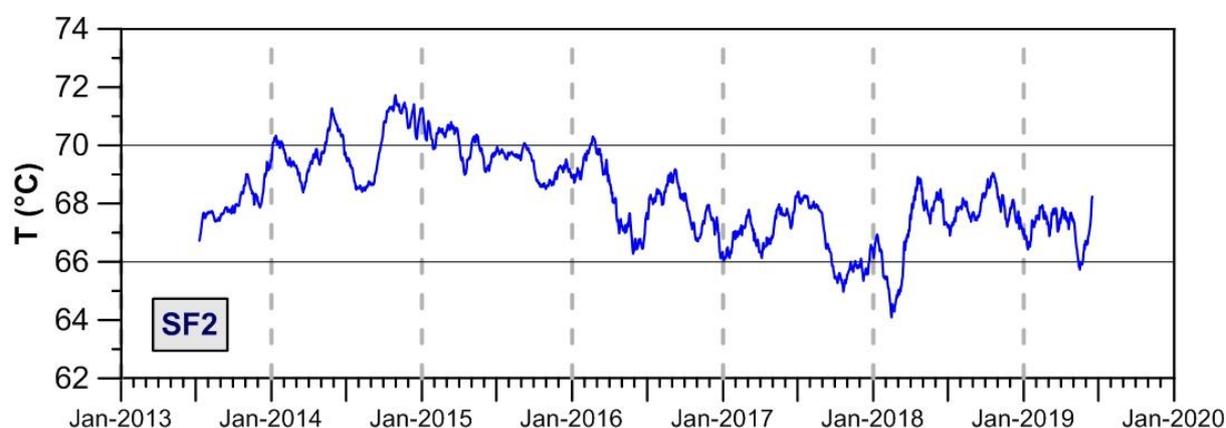


Figura 3.1.5 - Stazione Solfatarà (SF2). Serie temporale delle medie mensili dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

OLIBANO

I dati relativi all'elaborazione dei valori di temperatura massima rilevati dalla stazione OBN mostrano, come già osservato per la stazione PS1 (Figura 3.1.2), un lieve incremento dei valori da marzo 2015 a dicembre 2016, seguito da lieve diminuzione fino a dicembre 2017. Nel primo semestre 2018 si osserva un trend in lieve aumento a cui segue, nel secondo semestre 2018, un andamento dei valori di temperatura stazionario. Nel primo semestre 2019, ad esclusione di un picco negativo osservato nel mese di gennaio ed probabilmente correlato all'influenza di fattori climatici, la serie temporale dei valori di temperatura massima evidenzia un andamento sostanzialmente stabile, se paragonato a quanto osservato nei mesi immediatamente precedenti. (Figura 3.1.6).

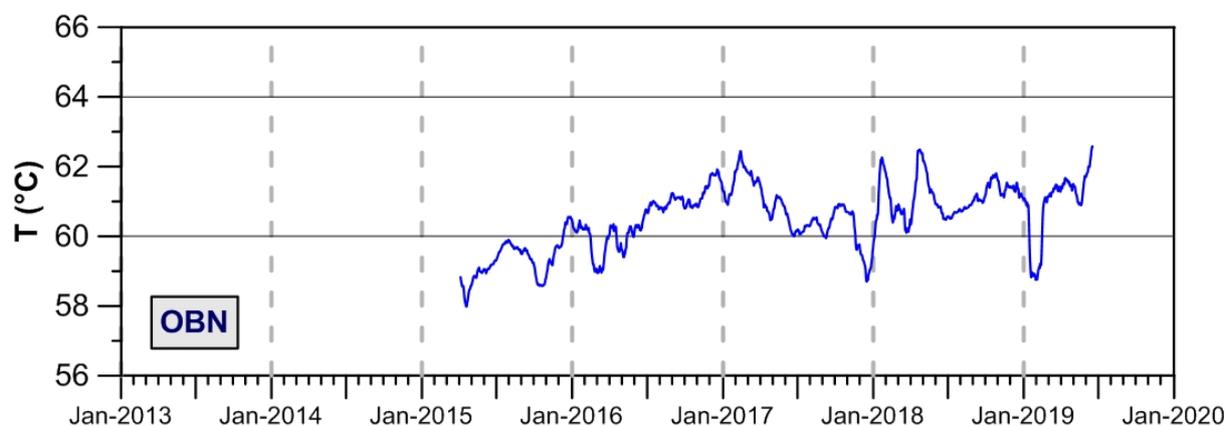


Figura 3.1.6 - Stazione Monte Olibano (OBN). Serie temporale delle medie mensili dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

IR-SOB

I dati relativi all'elaborazione dei valori di temperatura massima rilevati dalla stazione IR-SOB mostrano un andamento stabile, con presenza di ampie oscillazioni, da giugno 2016 ad agosto 2017. Da agosto 2017 a tutto giugno 2019, la serie temporale delle temperature massime dell'area target è caratterizzata dalla presenza di ampie oscillazioni a vario periodo ed evidenzia un andamento sostanzialmente stabile anche se con leggera tendenza alla diminuzione (Figura 3.1.7).

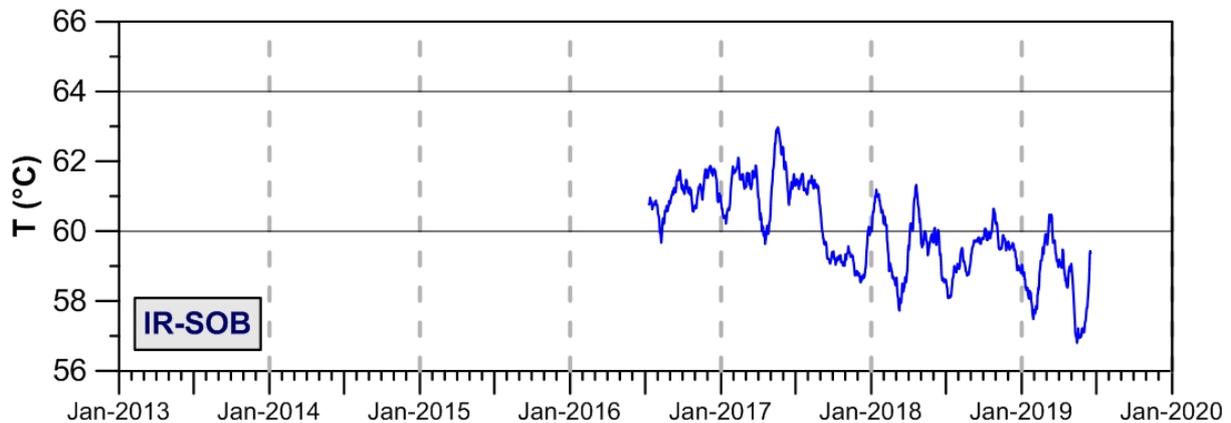


Figura 3.1.7 - Stazione IR-SOB. Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia INGV-Osservatorio Vesuviano

La sorveglianza vulcanologica tramite Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide è cominciata in via sperimentale dal 2008. Tale monitoraggio ha come principale obiettivo l'individuazione di eventuali variazioni nel tempo dei valori di temperatura misurati al suolo in punti discreti e/o di aree a maggiore temperatura in modo da evidenziare eventuali modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico.

I rilievi sono eseguiti mensilmente essenzialmente di notte e comunque in condizioni di non irraggiamento solare, utilizzando una termocamera portatile FLIR SC640 ad alta risoluzione (640 x 480 pixel) e sensibilità (<0,06°C +30°C). La termocoppia utilizzata è di tipo K, con errore strumentale di circa 0,1°C nell'intervallo -200÷1260 °C. Le misure ottenute con la termocamera sono confrontate, quando possibile, con quelle eseguite con termocoppia rigida.

Le aree e i punti in cui vengono effettuate le misure termiche ai Campi Flegrei (Figura 3.2.1) sono distribuite in varie zone del fondo della caldera.

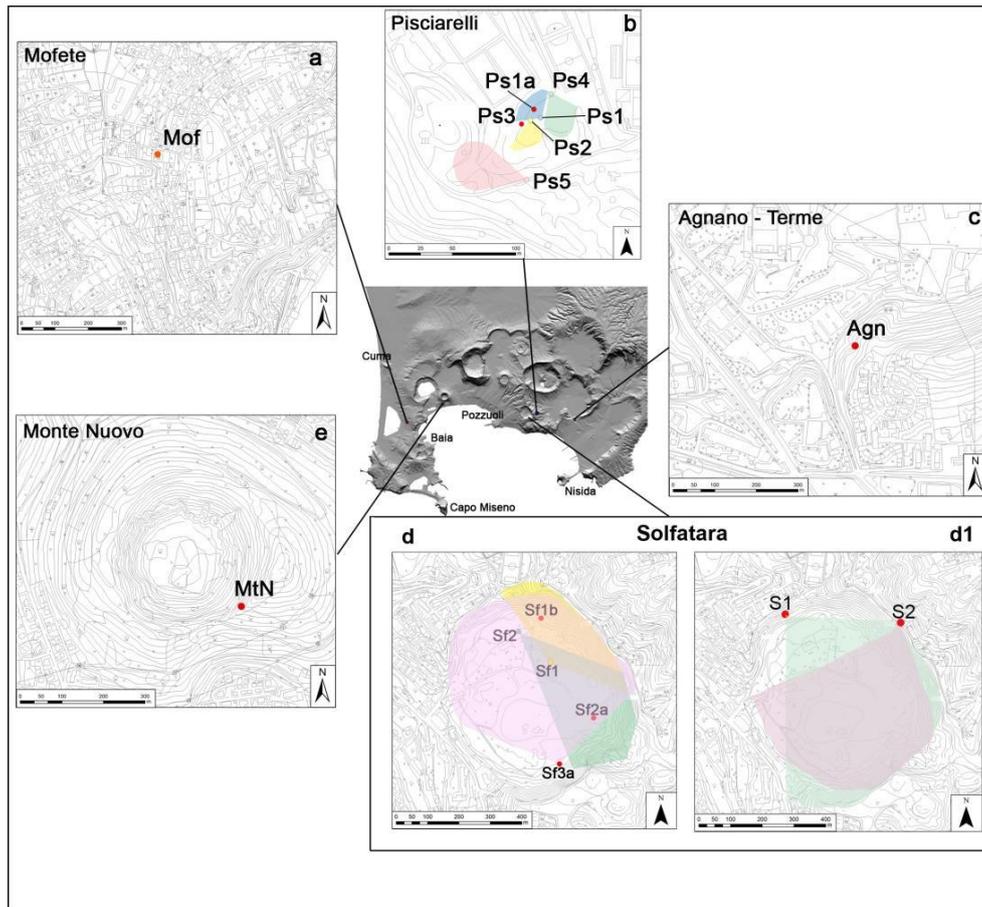


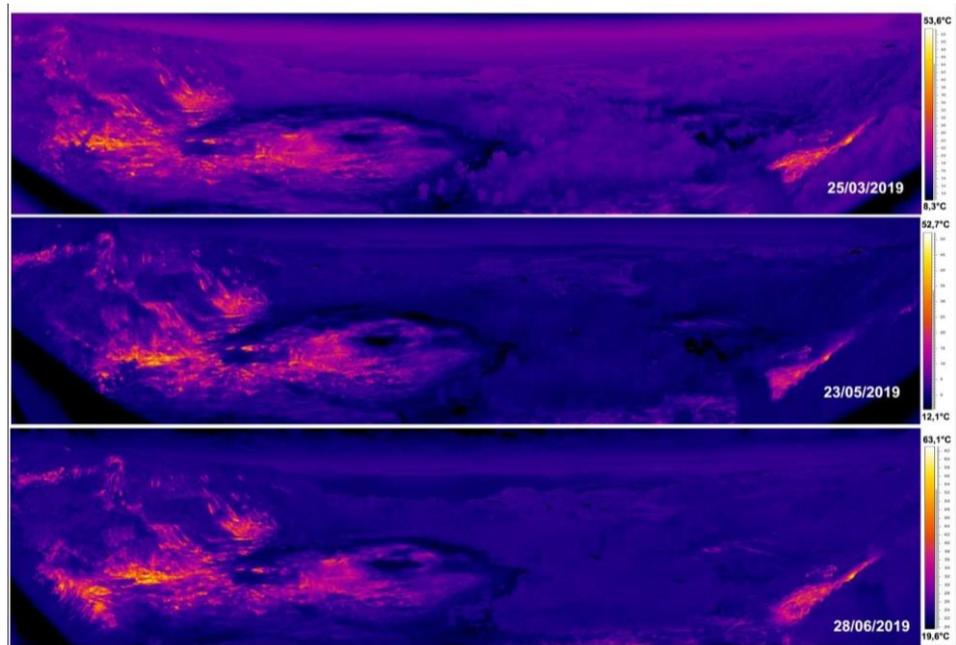
Figura 3.2.1 – Ubicazione dei punti di misura e dei settori indagati ai Campi Flegrei. I pallini rossi indicano i punti stazione dai quali sono stati effettuati rilievi con termocoppia rigida e telecamera termica. Nel riquadro b, le aree colorate in celeste, verde e rosa indicano i versanti rilevati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

La Solfatara

In Figura 3.2.1d sono riportati i punti nel cratere de La Solfatara che venivano misurati prima di settembre 2017. Da quella data, infatti, il cratere è sotto sequestro giudiziario e risulta complesso effettuare le misure termiche notturne. Pertanto era stato scelto un nuovo punto di misura che inquadrasse il fondo craterico dalla strada che ne costeggia il bordo (S1 in Fig. 3.2.1d1). Questo punto è stato usato per soli tre mesi nel 2018 (gennaio, febbraio e aprile) poiché, in seguito a lavori al muro perimetrale della strada, si è persa una corretta visuale. Da maggio 2018 viene usato il punto S2 (Fig. 3.2.1d1) che verrà utilizzato fino a riapertura de La Solfatara.

Da questo punto nel corso del primo semestre 2019 sono state effettuate misure periodiche mensili il cui confronto delle immagini areali termiche non sembra mostrare una significativa variazione nella distribuzione delle temperature (Fig. 3.2.2), anche rispetto al semestre precedente.

Figura 3.2.2 -
Fotocomposizione di
immagini termiche riprese
dal punto stazione S2 di
Figura 3.2.1d1, relative al
25/03/2019, 25/05/2019 e
28/06/2019.



Pisciarelli

A Pisciarelli l'allagamento dell'area della polla, che già dal mese di agosto 2018 non aveva consentito di rilevare la temperatura al punto Ps3 (Fig. 3.2.1.b), dal mese di aprile 2019 è continuato tanto da impedire l'accesso a tutti i siti. Inoltre, il rispetto delle procedure di sicurezza non consente di effettuare le misure strumentali nell'area più prossima alla polla.

Pertanto, nel corso del primo semestre 2019, sono state effettuate misure periodiche mensili dai punti stazione Ps4 e Ps5 (Fig. 3.2.1b), mentre da aprile è stato possibile iniziare a monitorare l'intera area dall'elipista a nord. In particolare nei mesi di aprile e maggio è stato utilizzato un drone mentre a giugno (per drone in manutenzione) ci si è serviti della termocamera a mano.

Dalla comparazione di fotocomposizioni delle immagini termiche sia dal punto stazione Ps4 (Fig. 3.2.3) che Ps5 (Fig. 3.2.4), in corrispondenza della telecamera termica fissa TIRNet dell'OV, non si evincono significative modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico.

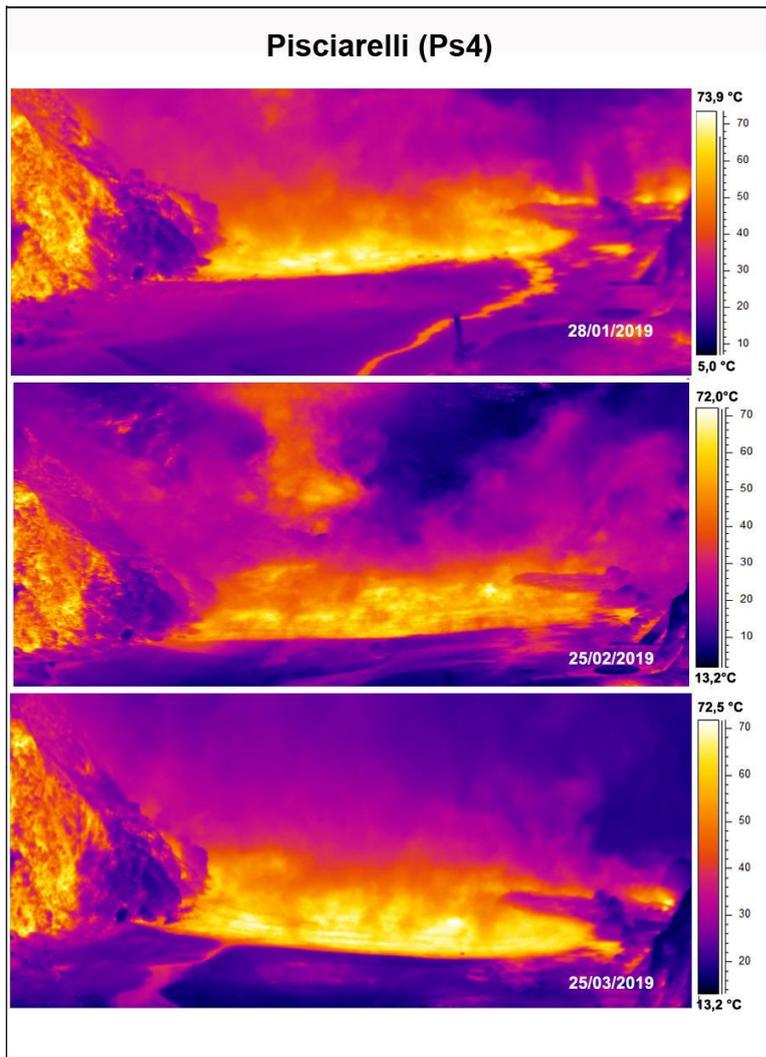


Figura 3.2.3 - Fotocomposizione di immagini termiche riprese dal punto stazione Ps4 di Figura 3.2.1b, relative al 28/01/2019, 25/02/2019 e 25/03/2019.

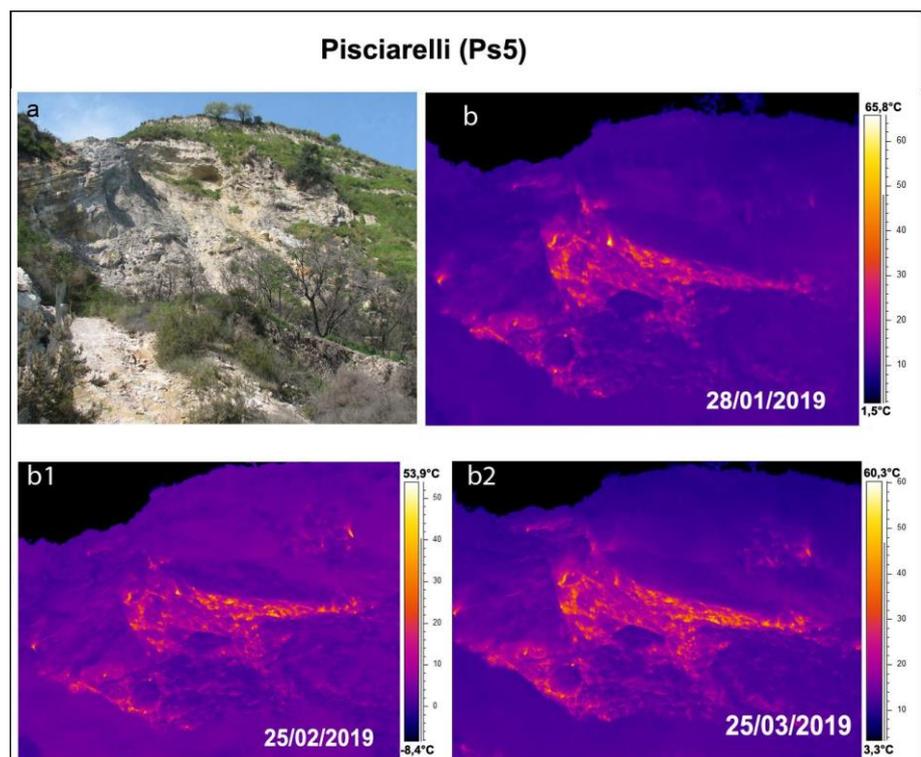


Figura 3.2.4 – Area fumarolizzata in località Pisciarelli. Immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 17.09.2018 (b), 08/10/2018 (b1) e 12/11/2018 (b2) dal punto stazione Ps5 di Figura 3.2.1b.

I valori di temperatura massima rilevati dall'elipista non si discostano comunque da quelli rilevati nei mesi precedenti. In Figura 3.2.5 la panoramica da drone ripresa il 24 aprile 2019. Il drone utilizzato è un FlyBit ottocottero equipaggiato da una termocamera FLIR VUEPRO ad alta risoluzione (640x512 pixel) e precisione $\pm 5^\circ\text{C}$

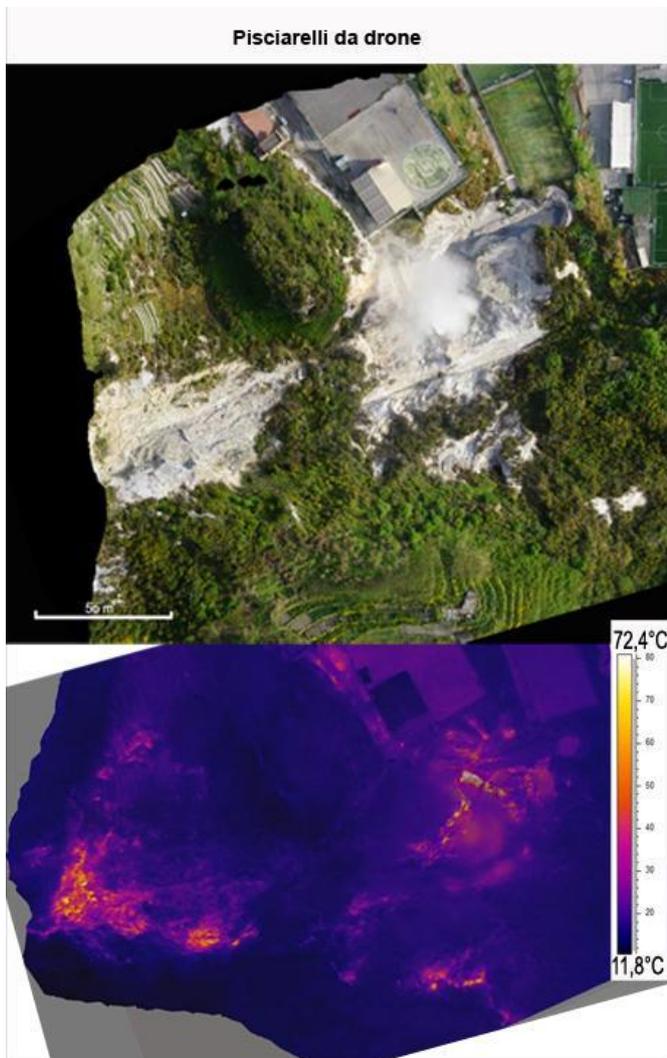


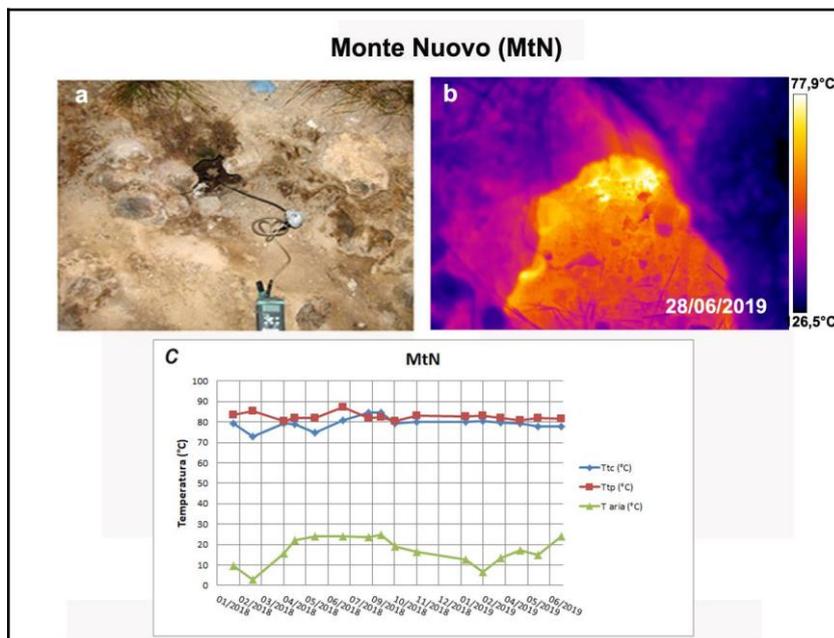
Figura 3.2.5 - Immagini nel visibile (in alto) e nel termico (in basso) riprese dall'elipista il 24 aprile 2019.

Monte Nuovo

Nel corso del primo semestre 2019 sono stati effettuati misure periodiche mensili lungo il versante meridionale dell'edificio di Monte Nuovo (Fig. 3.2.1e).

Rilievi termici effettuati con telecamera termica e termocoppia rigida (Fig. 3.2.6) mostrano valori di temperatura piuttosto stabili ad eccezione delle variazioni stagionali e simili a quelli misurati nel semestre precedente (Figura 3.2.6c).

Figura 3.2.6 – 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 con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c).



Agnano Terme

Nel corso del primo semestre 2019 sono state effettuate le misure periodiche mensili in corrispondenza di una fumarola non captata presso le “Terme di Agnano” (Fig. 3.2.1c).

I rilievi termici effettuati con telecamera termica e termocoppia rigida (Fig. 3.2.7) mostrano valori di temperatura piuttosto stabili, ad eccezione delle variazioni stagionali, e simili a quelli misurati nel semestre precedente (Fig. 3.2.7c).

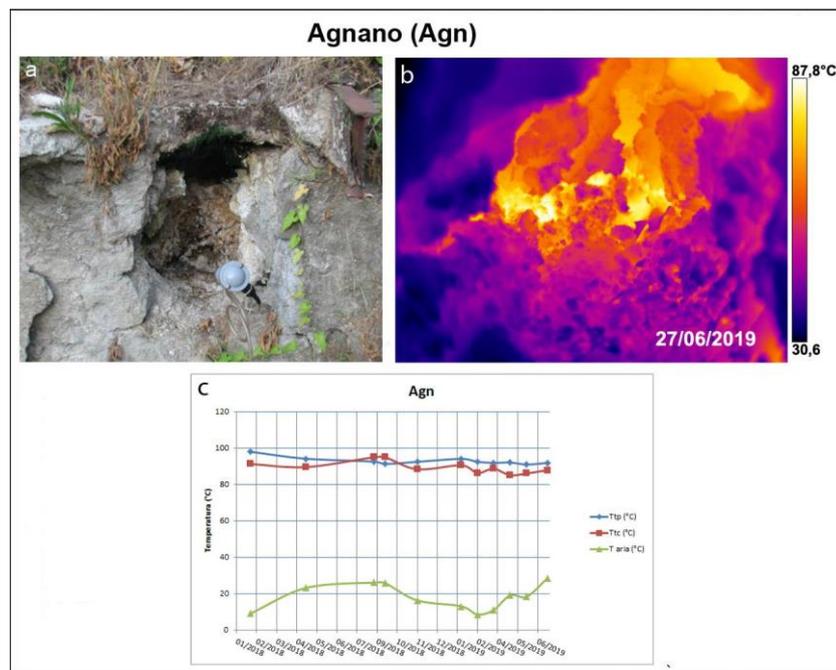


Figura 3.2.7 - Fumarola all’interno dello stabilimento termale delle “Terme di Agnano”. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione AGN di figura 4.8c.

Mofete

Nel corso del primo semestre 2019 sono state effettuate misure periodiche mensili in località Mofete (Fig. 3.2.1a). I valori di temperatura misurati, compresi tra circa 80 e 100 °C per la termocoppia e tra circa 60 e 95 °C per la termocamera, sono in linea con le medie stagionali del semestre precedente (Fig. 3.2.8c).

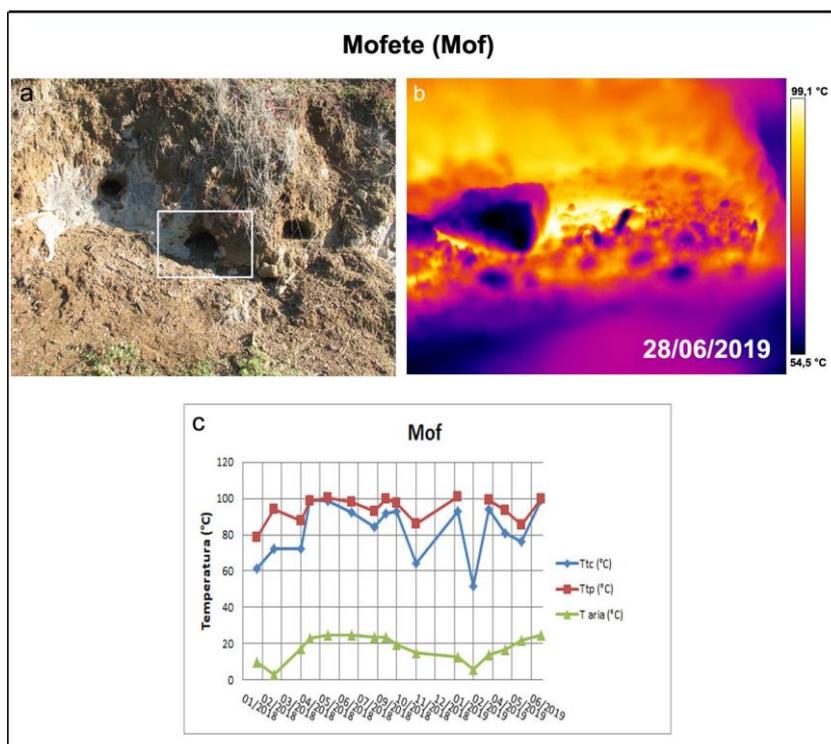


Figura 3.2.8 - Fumarola in località Mofete. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto Mof di Figura 3.2.1a. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c). Il valore di termocoppia (Ttc) mancante a febbraio 2019 è a causa di un guasto alla termocoppia stessa.

3.3 Comparazione della temperatura superficiale da dati satellitari e Rete TIRNet INGV-Osservatorio Nazionale Terremoti e INGV-Osservatorio Vesuviano

L'utilizzo dei dati satellitari offre la possibilità di avere una stima della temperatura superficiale dell'area flegrea con una copertura spaziale più ampia di quella rilevata da una rete di monitoraggio in situ. In particolare l'elaborazione di dati acquisiti da sensori aventi canali che acquisiscono nella regione dell'infrarosso termico permette di ottenere, dopo un'opportuna correzione per la rimozione del contributo atmosferico, una mappa relativa alla stima della temperatura superficiale comparabile con quella misurata dalla Rete TIRNet.

Le missioni satellitari che acquisiscono dati nell'IR termico con risoluzioni spaziali idonee all'analisi del flusso termico presente nei vulcani dell'area napoletana sono le seguenti:

Landsat8: Il satellite ha due sensori a bordo, Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI ha 9 bande che acquisiscono dal visibile al vicino infrarosso (da 0.4 a 2.5 micron) e il TIRS che ha due bande nel termico, da 10.6 a 12.5 micron. Landsat acquisisce con una risoluzione spaziale di 30 metri nelle bande visibile e vicino infrarosso e 100 metri nelle bande nell'infrarosso termico (ricampionate a 30 metri) ed un tempo di rivisita di 16 giorni (Tabella 3.3.1).

In particolare per questa missione, a seguito della definizione del programma congiunto USGS-INGV nel 2014, è stata attivata l'acquisizione dei dati LANDSAT8 sull'orbita ascendente relativa ai passaggi notturni che risultano utili alla discriminazione delle anomalie termiche in fase di prevenzione.

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer): uno dei cinque sensori remoti che si trovano a bordo del satellite per telerilevamento TERRA (EOS AM-1). Il sensore acquisisce in 3 bande nel visibile e 5 nell'infrarosso termico. La risoluzione spaziale è compresa tra 15 e 90 metri, rispettivamente per il visibile/vicino infrarosso e infrarosso termico (Tabella 3.3.2). Il tempo di rivisita è il medesimo del Landsat 8, ossia di 16 giorni, con acquisizioni diurne e notturne. Dal 2009 le bande nel vicino infrarosso (SWIR) non acquisiscono più a seguito di alcuni problemi dello spettrometro SWIR. Il sensore è, inoltre, nella sua fase finale di operatività essendo stato messo in orbita dalla NASA nel 1999.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Launched February 11, 2013	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)	

Tabella 3.3.1 - Caratteristiche delle bande del Landsat 8; * Le bande TIRS sono acquisite a 100metri di risoluzione ma sono ricampionate a 30 metri (<http://landsat.usgs.gov/>)

Tabella 3.3.2 - Caratteristiche di ASTER.

Instrument	VNIR	SWIR	TIR			
	1	0.52-0.60	4	1.60-1.70	10	8.125-8.475
Bands and Spectral Range (µm)	2	0.63-0.69	5	2.145-2.185	11	8.475-8.825
	3N	0.78-0.86	6	2.185-2.225	12	8.925-9.275
			7	2.235-2.285	13	10.25-10.95
			8	2.295-2.365	14	10.95-11.65
			9	2.360-2.430		
Spatial Resolution	15m		30m		90m	
Swath Width	60km		60km		60km	
Cross Track Pointing	± 318km (± 24 deg)		± 116km (± 8.55 deg)		± 116km (± 8.55 deg)	
Quantisation (bits)	8		8		12	
Revisit Time	16 days		16 days		16 days	

Esistono ulteriori missioni che acquisiscono nell'infrarosso termico (MODIS, AVHRR, Sentinel 3 - SLSTR, Meteosat Second Generation con SEVIRI) ma tutte hanno una risoluzione spaziale dell'ordine dei km, pertanto non adatte al monitoraggio di aree di piccole dimensioni (minori di 1kmq) e con gradienti di temperatura in superficie dell'ordine 5-100 °C. Le missioni spaziali LANDSAT e ASTER sono le uniche che attualmente consentono di stimare le temperature superficiali prodotte da emissioni puntuali (fumarole) che presentano gradienti di temperatura alla superficie dell'ordine 5-100 °C.

Per il semestre gennaio – giugno 2019 sono stati acquisiti i seguenti dati satellitari ottici:

<p>ASTER Diurni Gennaio: Nessuno Febbraio: Nessuno Marzo: 23 Aprile: Nessuno Maggio: Nessuno Giugno: Nessuno</p>	<p>ASTER Notturmi Gennaio: Nessuno Febbraio: 12, 28 Marzo: Nessuno Aprile: Nessuno Maggio: Nessuno Giugno: 20</p>
<p>LANDSAT8 Diurni Gennaio: 3, 26 Febbraio: 20, 27 Marzo: 8, 15, 24, 31 Aprile: 9, 16, 25 Maggio: 2, 11 Giugno: 3, 19</p>	<p>LANDSAT8 Notturmi Gennaio: Nessuno Febbraio: 20 Marzo: 24 Aprile: 9 Maggio: Nessuno Giugno: 12, 28</p>

Pertanto, nel suddetto periodo, sono stati acquisiti e processati i seguenti dati:

N° 1 ASTER Diurni

N° 3 ASTER Notturmi

N° 15 LANDSAT8 Diurni

N° 5 LANDSAT8 Notturmi

Per quanto riguarda i dati ASTER, è opportuno sottolineare che l'acquisizione di questi dati avviene "on demand" (a differenza dei dati L8 a copertura globale) attraverso un sistema di pianificazione che vede l'attività di monitoraggio dei Campi Flegrei con priorità inferiore rispetto ad altre acquisizioni sulla stessa orbita o limitrofe. Pertanto a differenza dei dati L8, l'acquisizione dei dati ASTER non è regolare.

Dal momento che le immagini satellitari acquisite di giorno sono fortemente contaminate dalla illuminazione solare, il valore di temperatura superficiale stimato, soprattutto nell'area dove sono presenti possibili anomalie termiche, è poco affidabile. Per questo motivo sono stati elaborati e analizzati principalmente i dati relativi ai passaggi notturni. Le immagini notturne individuano con maggior precisione possibili variazioni di temperatura nelle aree in cui sono presenti punti di emissione termica anche grazie ad una temperatura di "background" più uniforme.

Analisi dei dati satellitari acquisiti nel periodo gennaio – giugno 2019.

Nelle Figura 3.3.1 e Figura 3.3.2 sono riportate le mappe di stima di temperatura superficiale notturna ottenuta da dati ASTER e Landsat8, rispettivamente il 20 e 12 giugno 2019 sull'area Flegrea. Tali mappe sono state scelte come rappresentative per il periodo gennaio - giugno.

L'analisi della temperatura di superficiale stimata dai dati ASTER e LANDSAT non ha evidenziato variazioni anomale della temperatura massima nel Cratere della Solfatara (Figura 3.3.3) corrispondente alle aree di maggiore emissione (Bocca Nuova e Bocca Grande, Pisciarelli).

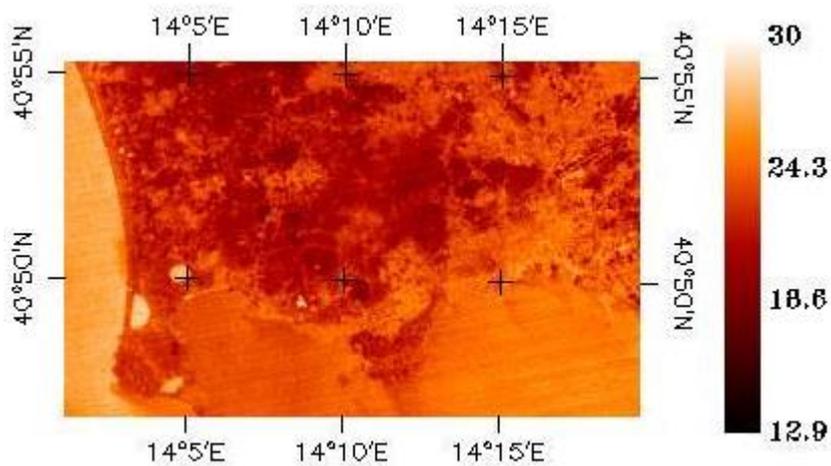


Figura 3.3.1 - Mappa di temperatura superficiale relativa al dato ASTER acquisito alle 21.10 UTC del 20 giugno 2019.

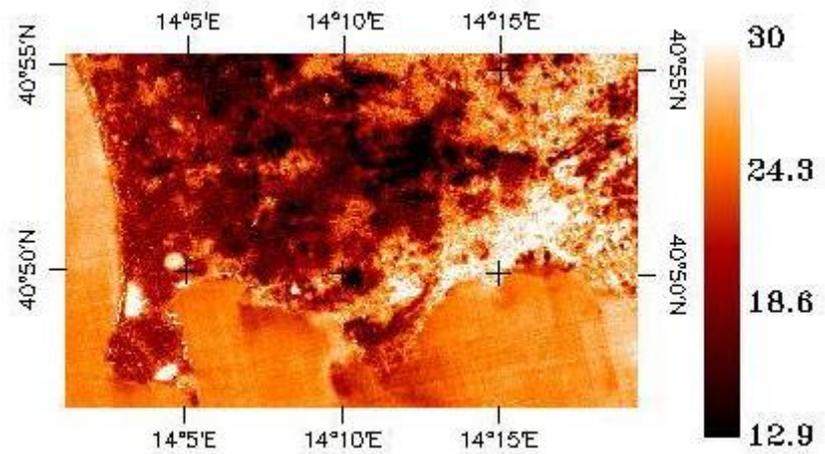


Figura 3.3.2 - Mappa di temperatura superficiale relativa al dato LANDSAT8 acquisito alle 20.46 UTC del 12 giugno 2019.



Figura 3.3.3 - Bocca Nuova (a destra dell'immagine) e Bocca Grande (a centro immagine).

I dati satellitari ASTER e LANDSAT 8 sono distribuiti da USGS (United States Geological Survey) attraverso il sito <http://earthexplorer.usgs.gov/> e www.glovis.usgs.gov.

Per l'elaborazione dei dati satellitari, le informazioni necessarie per il calcolo delle correzioni atmosferiche sono state ricavate dal sito <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

All'inizio del 2017 è iniziata un'attività di studio di comparazione dei risultati ottenuti dalle immagini satellitari e quelli delle termocamere della rete TIRNet (Figura 3.1.1). Le aree monitorate corrispondono generalmente a porzioni di versante caratterizzate da significative anomalie termiche in corrispondenza di aree a degassamento diffuso e intensamente fumarolizzate.

Nel caso della stazione SF1 nell'area inquadrata ricadono porzioni di versante con diverse pendenze, diversa profondità di campo e parte del fondo craterico sub-orizzontale (Figura 3.3.4).



Figura 3.3.4 - Area inquadrata dalla stazione TIR SF1.

Per tale motivo, al fine di confrontare i valori di temperatura ottenuti dal processamento dei dati satellitari con quelli rilevati dalle stazioni al suolo, l'immagine IR ripresa dalla stazione SF1 è stata suddivisa in tre settori corrispondenti alle tre principali distanze focali presenti nel frame di ripresa IR.

Tutte le immagini termiche della TIRNet sono state georiferite nel sistema UTM WGS84 (Figura 3.3.5a).

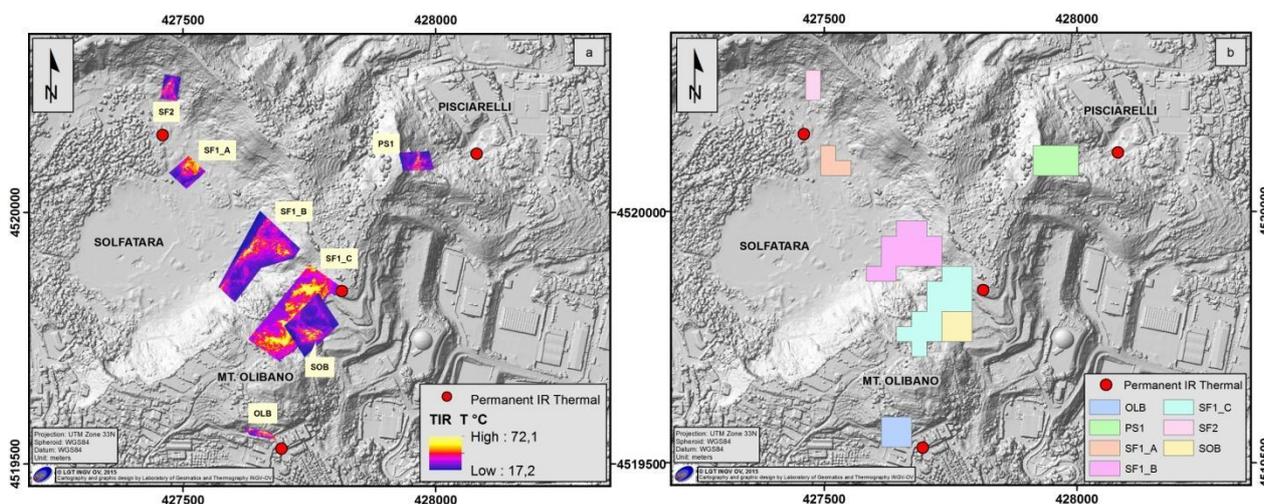


Figura 3.3.5 - Immagini termiche georiferite (a) e aree di analisi (b).

Al fine di confrontare le temperature delle immagini satellitari con le temperature delle immagini termiche della rete TIRNet, è stata creata una griglia regolare di dimensioni 30x30 metri per selezionare aree poligonali corrispondenti alle sole celle in cui ricadono le immagini TIR georiferite riprese dalle differenti stazioni al suolo (Figura 3.3.5b).

Le immagini satellitari ASTER e LANDSAT8, avendo una risoluzione spaziale di 90m, sono state georiferite e ricampionate in celle di 30 m aventi tutte il medesimo valore di temperatura corrispondente a quello della cella di origine (Figura 3.3.6).

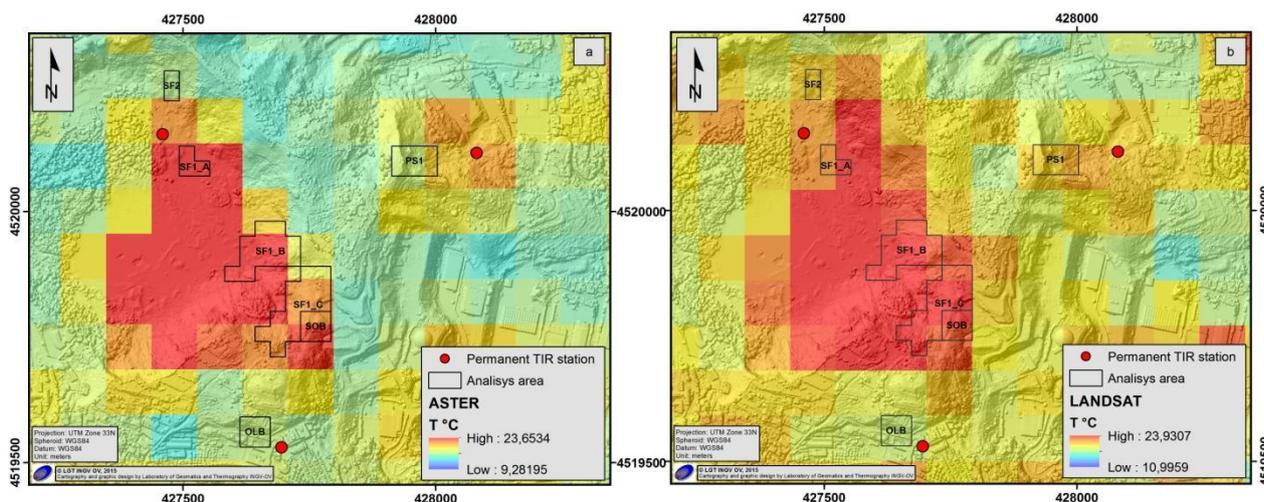
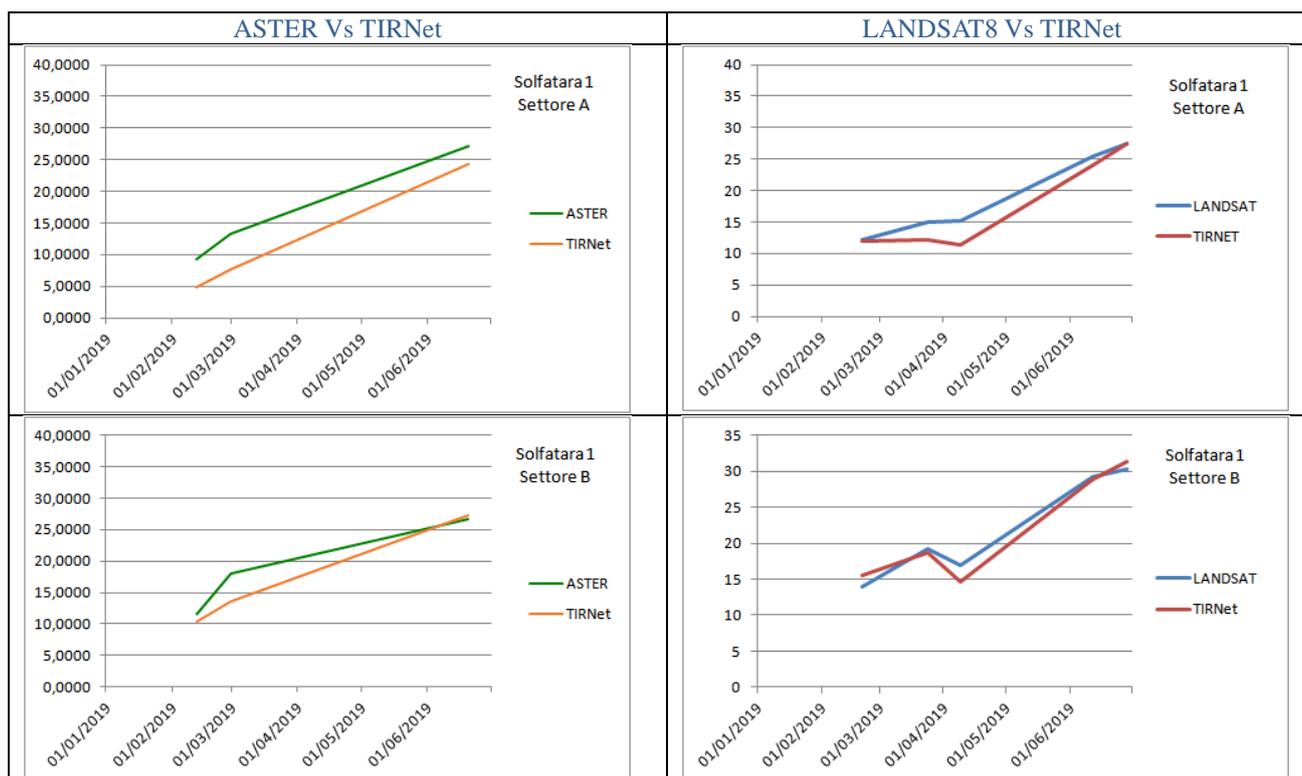
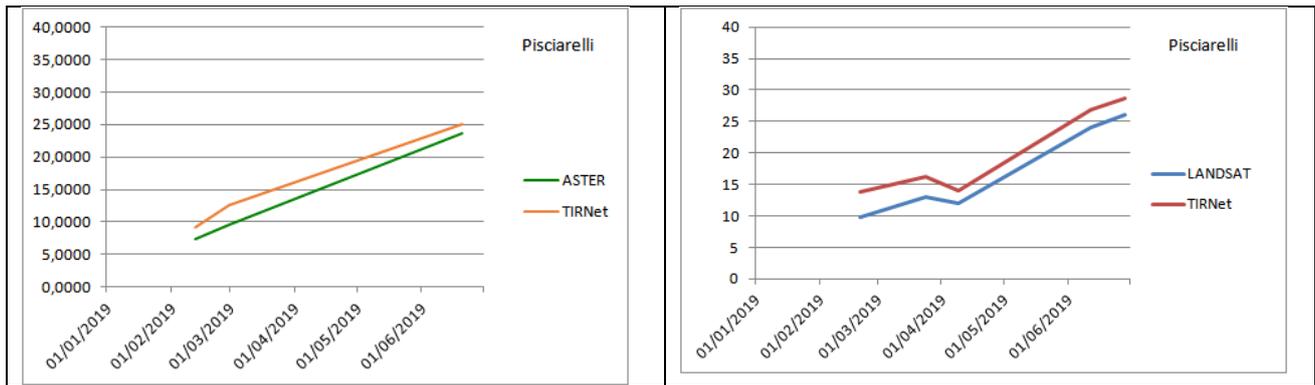


Figura 3.3.6 - Immagini termiche satellitari ASTER (a) e Landsat8 (b) rispettivamente del 20 giugno e del 28 giugno 2019. I poligoni racchiudono le aree inquadrare dalla TIRNet.

Nei grafici che seguono sono riportate le comparazioni tra le temperature medie ottenute dall'analisi dei dati ASTER, LANDSAT8 e quelle delle stazioni della rete TIRNet acquisite nel primo semestre 2019.







Dai grafici è possibile osservare che i risultati ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti da i due sistemi di acquisizione a scale differenti sono comparabili. Questa analisi ha permesso di valutare la robustezza dell'algoritmo utilizzato per la stima della temperatura attraverso i dati satellitari, l'affidabilità delle correzioni atmosferiche necessarie per questa stima e la validazione dei risultati attraverso le misure in situ. Sulla base della metodica sviluppata per la destagionalizzazione delle serie temporali delle immagini termiche acquisite dalla rete TIRNet è in corso l'analisi della rimozione dell'effetto stagionale su tutta la serie storica dei dati satellitari, al fine di individuare ulteriori informazioni sull'andamento delle anomalie termiche presenti sull'area flegrea.

4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO

Le attività svolte dall'Osservatorio Vesuviano hanno riguardato il monitoraggio continuo e discontinuo dell'area craterica della Solfatara di Pozzuoli e della zona di Pisciarelli. Sono inoltre proseguite le attività propedeutiche per il monitoraggio multiparametrico delle acque della falda flegrea.

Lo studio delle composizioni chimico-isotopiche dei fluidi fumarolici, finalizzato alla stima delle condizioni termodinamiche dell'acquifero idrotermale, unitamente alla misura del processo di degassamento diffuso, forniscono importanti indicazioni per la valutazione della dinamica del sistema idrotermale-magmatico dei Campi Flegrei.

Le attività eseguite dall'Osservatorio Vesuviano hanno riguardato lo sviluppo e la manutenzione della rete di monitoraggio geochimico dell'Osservatorio Vesuviano, che è costituita da quattro stazioni (Figura 4.1), due delle quali sono multiparametriche del tipo "GEMMA" sviluppate e realizzate nell'ambito delle attività di ricerca tecnologica dell'Osservatorio Vesuviano, per l'acquisizione di parametri geochimici e ambientali correlati. La stazione multiparametrica FLXOV5, installata in area craterica Solfatara acquisisce in continuo il flusso di CO₂ dal suolo, la temperatura della fumarola principale, la pressione e la temperatura atmosferica e misure Multigas. La stazione multiparametrica FLXOV8 installata in area Pisciarelli, che ha sostituito la stazione FLXOV3, mantenendo la stessa linea di misura del flusso di CO₂ per preservare la compatibilità dei dati acquisiti con i dati pregressi, misura in continuo il flusso di CO₂ dal suolo, la temperatura della fumarola principale dell'area, oltre ad altri parametri per la misura del processo di degassamento. Le altre due stazioni FLXOV1 per il monitoraggio in continuo del flusso di CO₂ dal suolo; e la stazione GTS1 per la misura del gradiente termico del suolo, sono ubicate all'interno del cratere della Solfatara. Le stazioni sono collegate via wi-fi con trasmissione dei dati in tempo reale alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano. Le stazioni sono utilizzate per il monitoraggio operativo del processo di degassamento per fini di Protezione Civile.

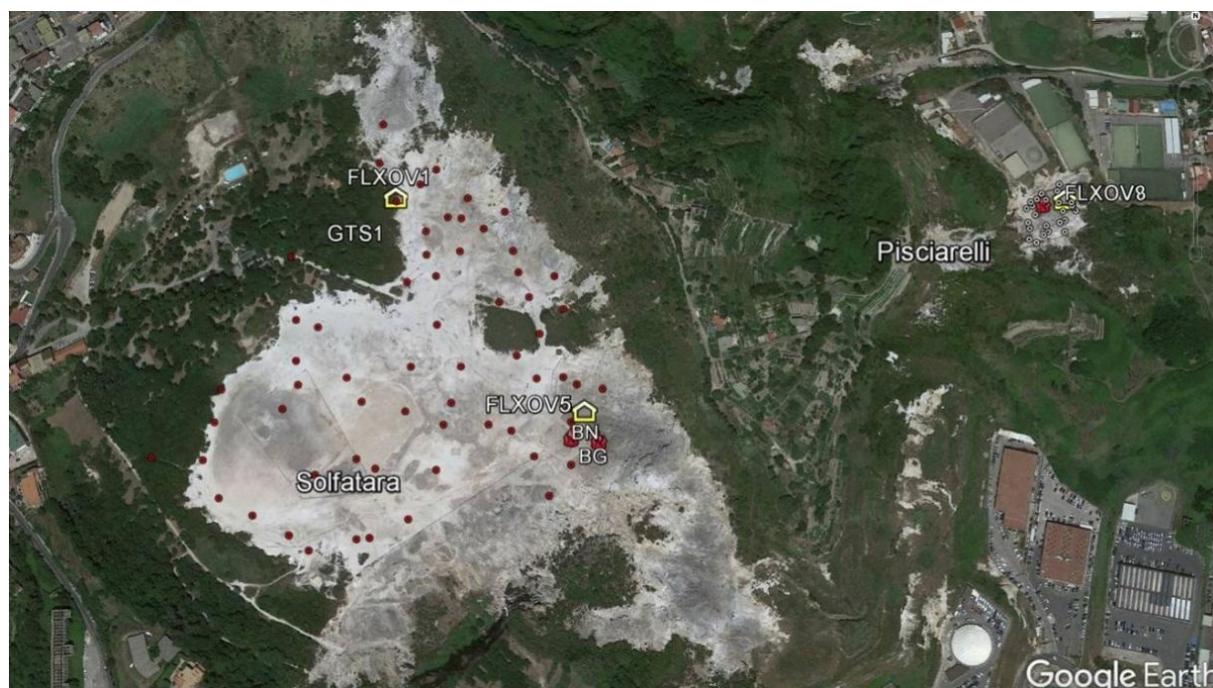


Figura 4.1 - Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. In particolare sono riportate le quattro stazioni geochimiche ubicate in area Solfatara-Pisciarelli, le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e di 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).

La Tabella 4.1 riassume le caratteristiche della Rete gestita dall'Osservatorio Vesuviano per il monitoraggio continuo dei parametri geochimici ai Campi Flegrei.

Tabella 4.1 – Rete Geochimica dei Campi Flegrei.

Stazione	Coordinate	Località	Anno di installazione	Parametri monitorati
FLXOV1	40.8291N 14.1397E 103 m	Pozzuoli Solfatara	1997	Multiparametrica
FLXOV8	40.8292N 14.1473E 74 m	Agnano Pisciarelli	2007 Sostituisce la FLX03 Upgrade 2008	Multiparametrica
FLXOV5	40.8273N 14.1418E 105 m	Pozzuoli Solfatara	2014	Multiparametrica
GTS1	40.8291N 14.1397E 103 m	Pozzuoli Solfatara	2016	Gradiente termico nel suolo

Misure di flusso di CO₂ e temperatura al suolo.

Le campagne mensili di misura del flusso di CO₂ dal suolo, su 61 punti fissi nel cratere della Solfatara, mostrano un andamento caratterizzato da una periodicità annuale, rientrando in un trend di aumento pluriennale dei valori a partire dal 2006 (Figura 4.2). Analogamente, la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, mostra un chiaro andamento stagionale sovrapposto ad un trend costante d'aumento della temperatura (Figura 4.3), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 5 °C nel periodo 2002-2019.

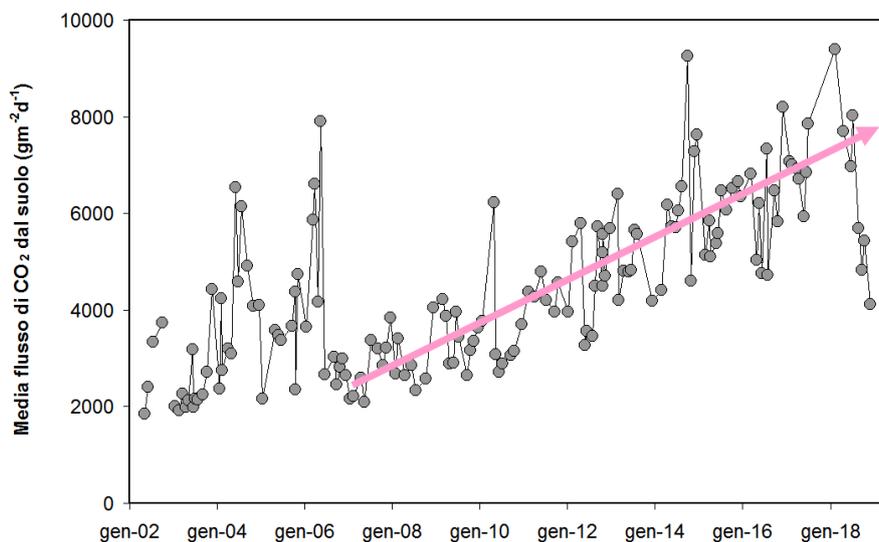
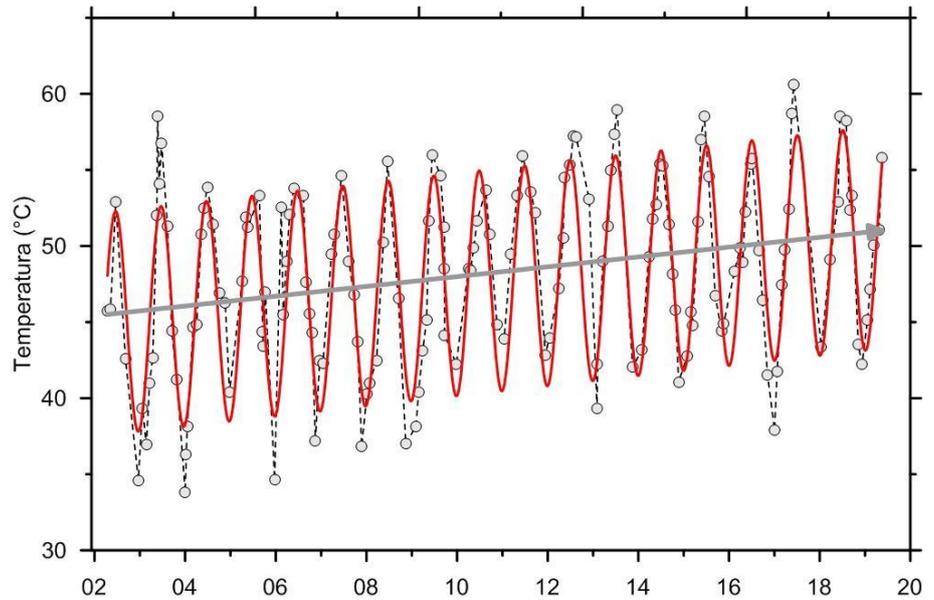


Figura 4.2 - Cronogramma della media dei flussi di CO₂ dal suolo misurati su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara.

Figura 4.3 - Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 61 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. Va evidenziato l'incremento del valore medio nel periodo 2002-2019 di oltre 6 °C.



Nella mappa di Figura 4.4a) è riportato l'incremento di temperatura espresso in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale mentre 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. 4.4b). Utilizzando queste variazioni di temperatura è possibile stimare un incremento del flusso di calore e quindi dell'energia rilasciata dall'area di circa il 20%.

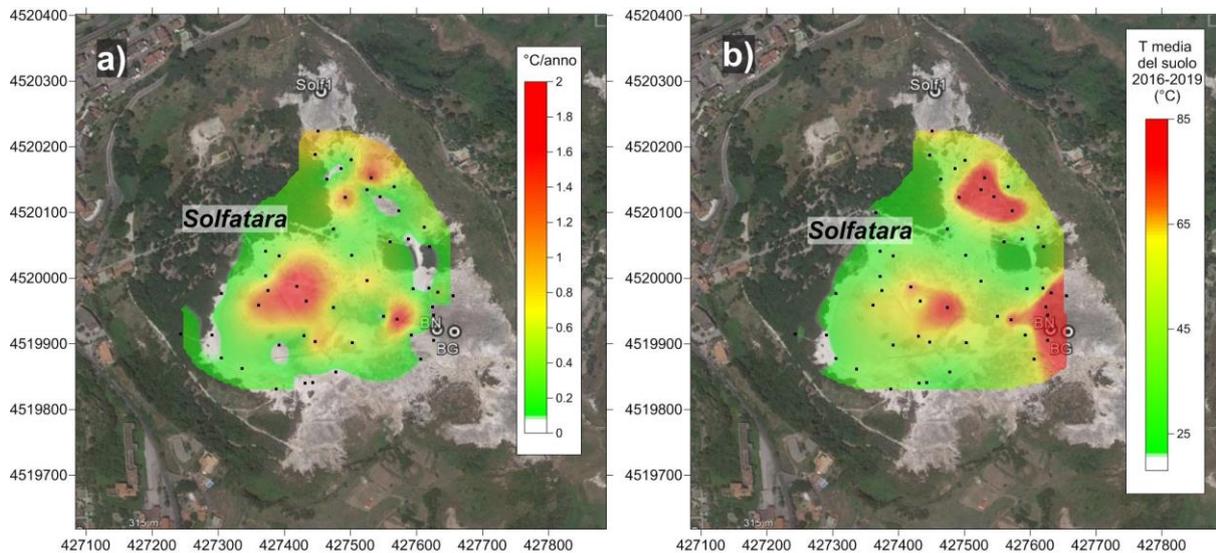


Figura 4.4 - a) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale. L'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del bordo del cratere a NE dove le temperature sono vicine al limite fisico di condensazione per i fluidi emessi dalla Solfatara (~ 95°C). b) mappa delle temperature dei punti misurati (media dal 2016 al 2019).

La stazione multiparametrica FLXOV5, attiva da dicembre 2014 e installata a pochi metri dalla fumarola BG nel cratere della Solfatara, ha misurato un significativo aumento del flusso di CO₂ dal suolo a partire da febbraio 2016 (Figura 4.5). Tale aumento del flusso di CO₂ è da mettere in relazione all'evidente processo di fumarolizzazione dell'area.

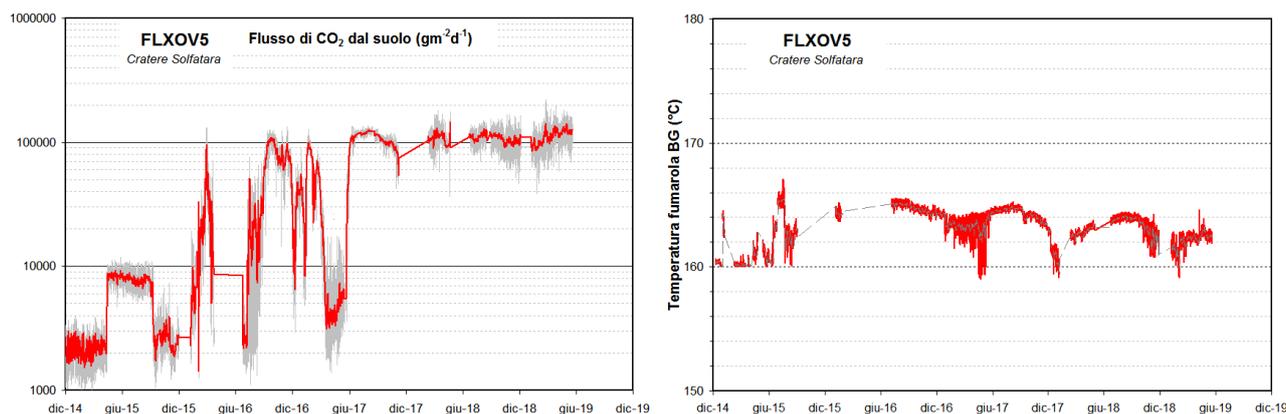


Figura 4.5 - Valori del flusso di CO_2 dal suolo misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara (area fumarole) (la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere). I flussi di CO_2 dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire da febbraio 2016.

La stazione è stata riportata in laboratorio per un intervento di manutenzione che non poteva essere eseguito in situ, sarà riposizionata durante il prossimo accesso al cratere della Solfatara, accesso al momento ancora soggetto a restrizioni.

In Figura 4.6 è riportato il cronogramma del flusso di CO_2 registrato dalla stazione FLXOV8 (Pisciarelli) a partire dal 2007. I dati hanno mostrato un andamento del flusso di CO_2 caratterizzato da un'evidente periodicità annuale con picchi positivi durante la stagione invernale e bassi valori durante quella estiva. Dal 2010 è iniziato un periodo di forte aumento dei flussi. L'intervento di riparazione della stazione, effettuato nel mese di novembre 2016 per il ripristino del sistema per la misura del flusso di CO_2 dal suolo, ha comportato una modifica permanente del sito con valori misurati di flusso di CO_2 più bassi ma caratterizzati da un simile trend d'aumento.

I valori di flusso di CO_2 registrati dalla stazione FLXOV1 non hanno mostrato variazioni significative rispetto ai periodi precedenti.

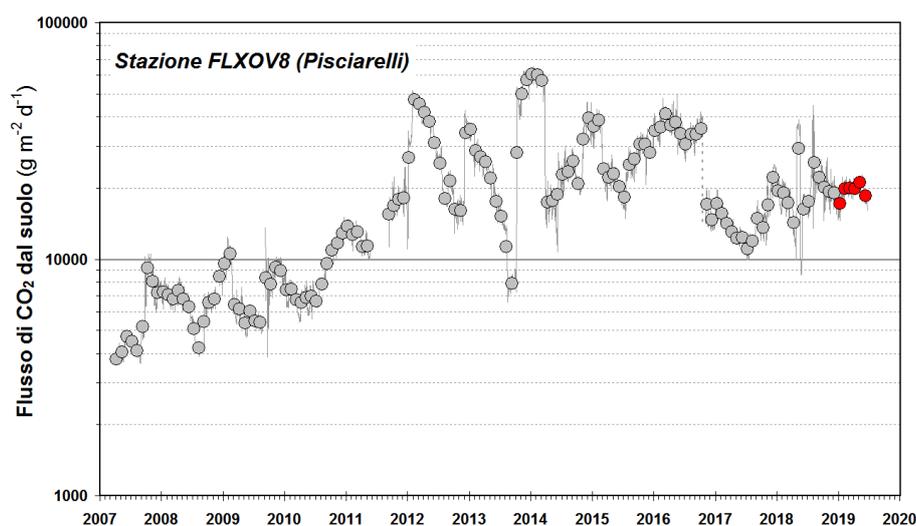


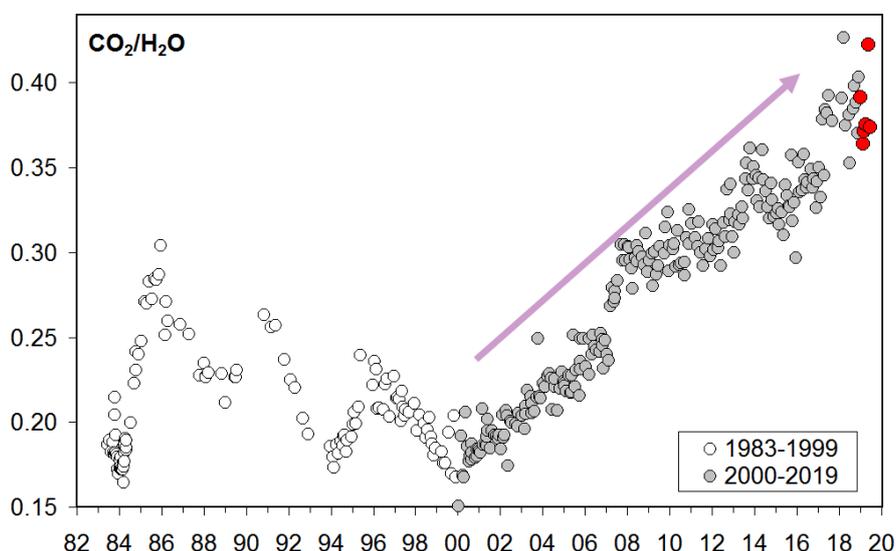
Figura 4.6 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO_2 misurati a Pisciarelli (FLXOV8). I flussi di CO_2 dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2010. L'intervento di riparazione della stazione, effettuato nel mese di novembre 2016, per il ripristino del sistema per la misura del flusso di CO_2 dal suolo, ha comportato una modifica permanente del sito con valori misurati di flusso di CO_2 più bassi. In rosso sono evidenziati i campioni del primo semestre 2019.

Composizione chimica delle fumarole dell'area flegrea.

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, 2015b), ai quali si rimanda per approfondimento. L'analisi temporale delle variazioni della composizione dei gas delle fumarole BG, BN e Pisciarelli, suggerisce le seguenti considerazioni.

Il rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ delle fumarole, in aumento a partire dal 2000 (Figura 4.7), nel periodo di interesse è rimasto su valori elevati che, in generale, testimoniano un'elevata frazione di gas magmatici presente nei fluidi fumarolici (Caliro et al., 2007; Chiodini et al., 2010). In particolare, l'interpretazione di queste variazioni risulta più complessa alla luce dei recenti studi che mettono in evidenza come possibili processi di condensazione del vapore nel sistema idrotermale, in risposta ad un aumento del flusso dei fluidi magmatici (e della pressione), possano contribuire all'aumento del rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ (Chiodini et al., 2015a; 2016). Inoltre è possibile che una frazione della CO_2 emessa dalle fumarole sia prodotta, in seguito all'aumento di temperatura, da reazioni che coinvolgono la calcite di origine idrotermale presente nel sistema (Chiodini et al., 2015b).

Figura 4.7 - 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. In rosso sono evidenziati i campioni del primo semestre 2019.



I geo-indicatori gassosi suggeriscono un significativo aumento nel tempo della temperatura e della pressione delle parti più superficiali del sistema idrotermale (Chiodini et al., 2011; 2015a; 2016). Tali stime sono basate principalmente sulle concentrazioni relative di monossido di carbonio (CO) nei fluidi fumarolici, che a partire dal 2000 mostrano un ben definito trend d'aumento, tuttora in corso e particolarmente marcato nei campioni dell'ultimo anno (Figura 4.8).

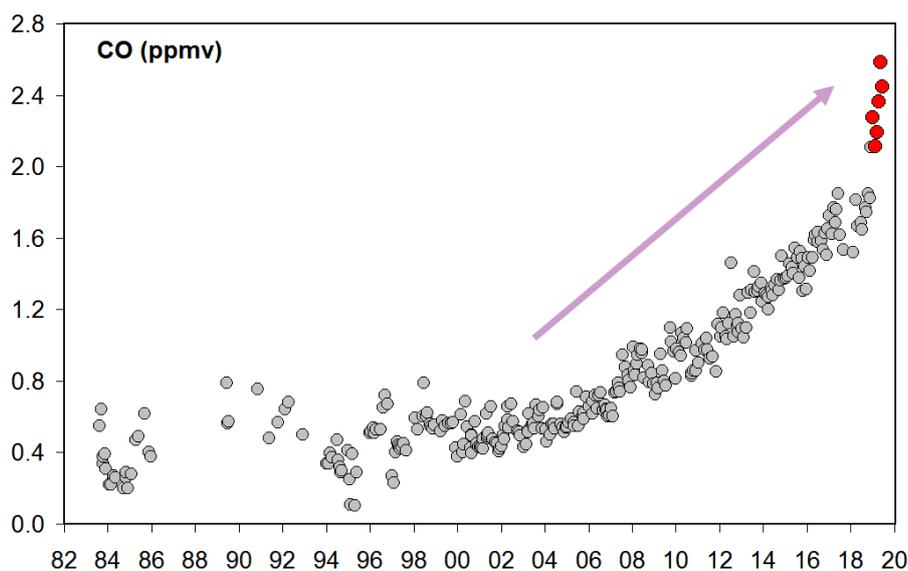
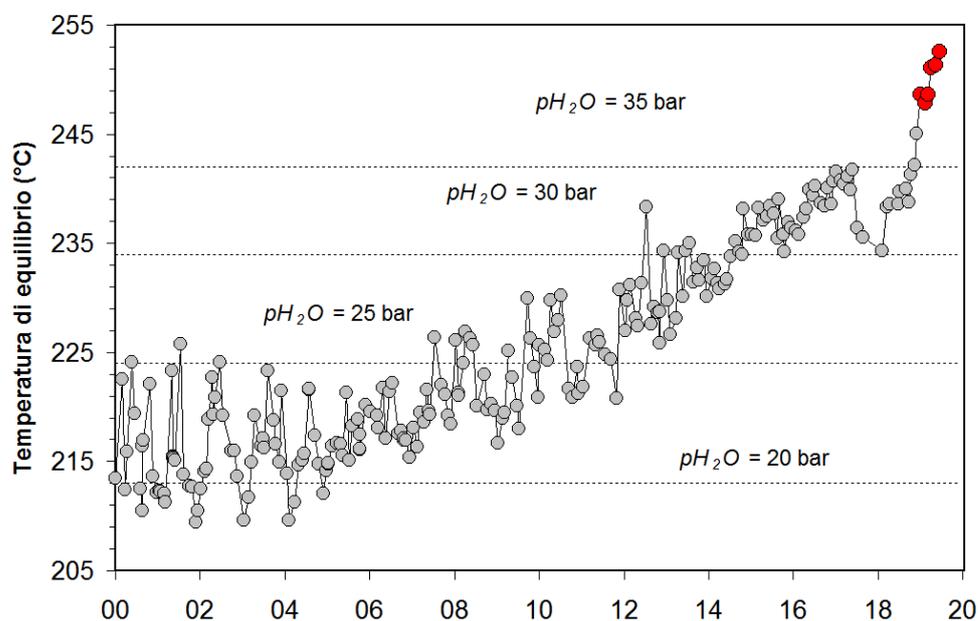


Figura 4.8 - Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. In rosso sono evidenziati i campioni relativi al primo semestre 2019. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici ad elevata temperatura mentre fumarole alimentate da sistemi idrotermali mostrano concentrazioni più basse, in tali sistemi un aumento delle concentrazioni di CO può riflettere un incremento delle condizioni di temperatura e pressione.

Tale incremento è rilevante poiché il CO è fra le specie fumaroliche analizzate quella più sensibile alla temperatura. Assumendo come buffer delle condizioni redox del sistema idrotermale la funzione di D'Amore and Panichi (1980), che in generale ben descrive la f_{O_2} in molti dei sistemi idrotermali del mondo, il trend del CO corrisponderebbe ad un aumento di temperatura della parte più superficiale del sistema idrotermale di circa 20-25°C (da ~215°C a ~240°C) dagli inizi degli anni 2000 (Figura 4.9). Tale processo di riscaldamento del sistema flegreo e le possibili cause sono trattate in modo approfondito nei lavori scientifici Chiodini et al. (2015a; 2016) a cui si rimanda per ulteriori dettagli.

Figura 4.9 - Cronogramma delle temperature di equilibrio per il sistema CO-CO₂, stimate assumendo condizioni redox fissate dalla relazione di D'Amore and Panichi (1980). Tali temperature, rappresentative della parte più superficiale del sistema idrotermale (Caliro et al., 2007), mostrano un trend d'aumento a partire dai primi anni del 2000. In rosso sono evidenziati i campioni del primo semestre 2019.



Il rapporto CO₂/CH₄, le cui variazioni nel tempo sono state interpretate con l'occorrenza di episodi di iniezione di fluidi magmatici nel sistema idrotermale (Chiodini 2009; 2012), ha mostrato negli ultimi mesi la fase discendente di un picco (Figura 4.10). I picchi positivi del rapporto CO₂/CH₄ sono stati interpretati come l'arrivo in superficie dei fluidi coinvolti in episodi di degassamento magmatico avvenuti circa un anno prima. Per una miglior comprensione del modello qui sopra accennato, si rimanda al lavoro di Chiodini et al. (2012).

Nei campioni del primo semestre 2019 il rapporto CO_2/CH_4 è rimasto su valori bassi, simili a quelli mostrati nei periodi precedenti. Inoltre, nel cronogramma di Figura 4.10, è possibile riconoscere un trend d'aumento del rapporto a partire dal 2000 almeno fino alla fase discendente che ha caratterizzato gli ultimi mesi. Sia l'aumento della temperatura di equilibrio della parte più profonda del sistema idrotermale che variazioni delle sue condizioni redox (verso condizioni più ossidanti, magmatiche) possono essere la causa dell'aumento del rapporto CO_2/CH_4 (i.e. diminuzione relativa delle concentrazioni di CH_4) (Chiodini et al., 2015a).

I rapporti N_2/CO_2 e N_2/He , che avevano mostrato una forte variazione a partire dal 2000 (Chiodini et al., 2010), ma più in generale dai primi dati disponibili (1985), nel periodo di interesse (primo semestre 2019) rientrano nel trend di diminuzione già identificato (Figura 4.11). Tali variazioni sono state interpretate come compatibili con un processo di degassamento di un magma, di composizione primitiva, a pressioni decrescenti nel tempo. Tali interpretazioni sono state oggetto di un lavoro scientifico (Caliro et al., 2014), al quale si rimanda per un approfondimento dei modelli di degassamento magmatico utilizzati e dei possibili scenari del plumbing system dei Campi Flegrei.

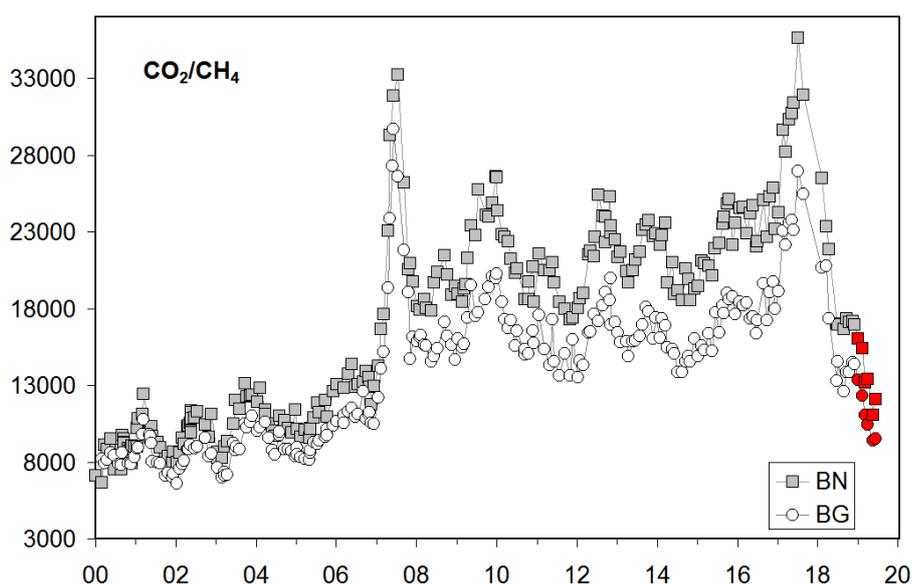


Figura 4.10 - Variazioni del rapporto CO_2/CH_4 per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico occorsi ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). In rosso sono evidenziati i campioni del primo semestre 2019.

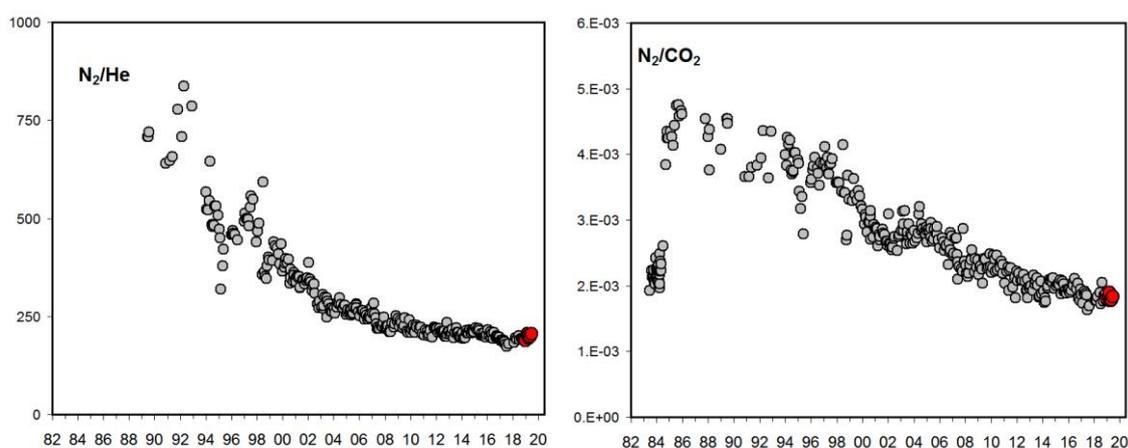


Figura 4.11 - Cronogramma dei rapporti N_2/CO_2 e N_2/He relativi alla fumarola BG. In rosso sono evidenziati i campioni del primo semestre 2019 che confermano i trend di diminuzione già identificati.

Il processo di degassamento così individuato, comporterebbe nel tempo (indipendentemente dal modello di degassamento utilizzato, Chiodini et al., 2016), congiuntamente alle variazioni dei rapporti N_2/CO_2 e N_2/He , anche una diminuzione del rapporto CO_2/H_2O nel gas rilasciato dal magma (Chiodini et al., 2015a; 2016). Questo risultato è stato considerato, come ulteriore raffinamento, nel modello fisico-numerico del sistema idrotermale già riportato in Chiodini et al., 2012. I risultati di questo nuovo modello, considerando un rapporto CO_2/H_2O non fisso ma in diminuzione nel tempo secondo il modello di degassamento magmatico (Chiodini et al., 2016), mostrano come a partire dal 2000 siano necessari input di gas magmatici più ravvicinati nel tempo e con quantitativi di fluidi elevati per spiegare le variazioni composizionali osservate nei fluidi fumarolici. Questo risultato è in accordo col precedente modello (Chiodini et al., 2012), ma i quantitativi di fluidi iniettati alla base del sistema idrotermale durante la simulazione, nonché l'energia ad essi associata, risultano notevolmente maggiori. In Figura 4.12 è riportata la curva cumulativa dei quantitativi di fluidi iniettati alla base del sistema idrotermale durante la simulazione 1 (con CO_2/H_2O fisso a 0.67, Chiodini et al., 2012) e la simulazione 2 (con CO_2/H_2O variabile da 0.67 a 0.22, Chiodini et al., 2016). Dall'analisi del cronogramma sono distinguibili due periodi: il primo, dal 1984 fino al 2000, è caratterizzato da una diminuzione nel tempo delle quantità di fluidi iniettati nel sistema; il secondo, iniziato nel 2000 e ancora attivo, è caratterizzato dall'aumento progressivo nel tempo delle quantità di fluidi magmatici che entrano nel sistema idrotermale e dall'aumento della frequenza di tali eventi.

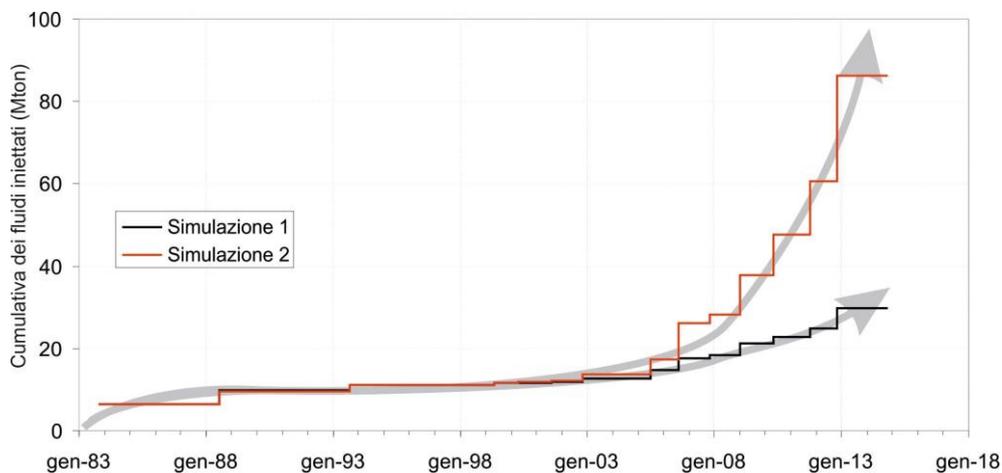


Figura 4.12 - Curve cumulative delle quantità di fluidi magmatici iniettate nel sistema idrotermale dei Campi Flegrei riferite alla simulazione 1 (Chiodini et al., 2012) e alla simulazione 2 (Chiodini et al., 2016). Per maggiori dettagli vedi il testo e i lavori citati.

Variazioni macroscopiche dell'area di Pisciarelli.

Il processo di riscaldamento e pressurizzazione della parte più superficiale del sistema idrotermale, iniziato a partire dal 2007 (Chiodini et al., 2011) e tuttora in corso, causa a nostro avviso le variazioni macroscopiche osservate a Pisciarelli (Figura 4.13) 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 (Figura 4.14), nell'aumento dei flussi misurati in continuo dalla stazione FLXOV8 (Figura 4.4).

L'incremento del processo di degassamento dell'area è altresì supportato da recenti misure del flusso di CO_2 emesso dalle fumarole, misure effettuate nell'ambito di un progetto di potenziamento e di sviluppo di tecniche di monitoraggio dell'attività idrotermale dell'area di Pisciarelli (DPC-INGV All. B2 2019-2021). Inoltre, l'aumento dell'attività di degassamento nell'area di Pisciarelli è anche indicato dalla misura in continuo della concentrazione di CO_2 in aria (Figura 4.15) che, unitamente ad altri parametri, risulta essere strettamente correlata all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017). La serie temporale di concentrazione di CO_2 in aria (registrata con frequenza bioraria dalla stazione geochimica FLXOV8) mostra un significativo aumento nel tempo delle concentrazioni (come medie mensili) da ~1000 ppm nel 2012, fino a ~3000 ppm negli ultimi periodi, con un massimo di ~5000 ppm registrato nel gennaio 2019.

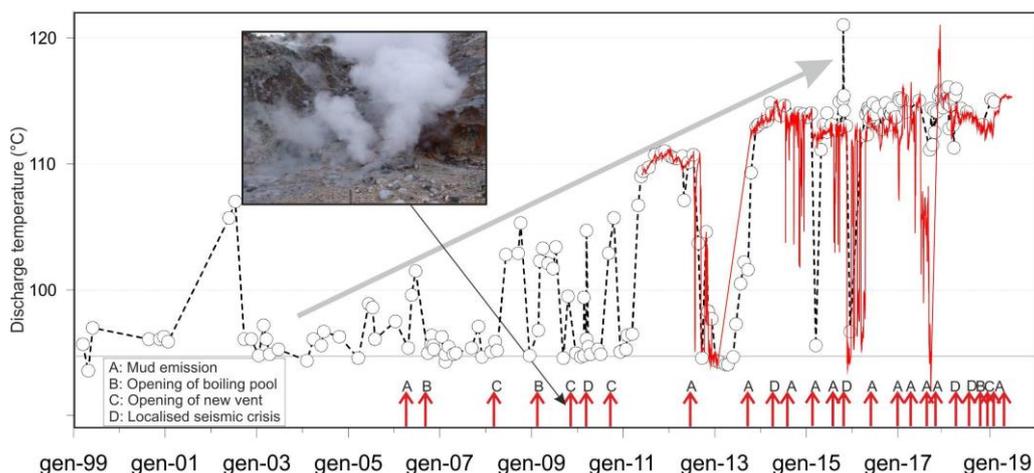


Figura 4.13 - Cronogramma delle temperature (°C) della fumarola di Pisciarelli e dei maggiori eventi occorsi legati all'aumento dell'attività idrotermale (i cerchi si riferiscono a misure discrete, la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere delle misure in continuo). La temperatura di 95°C rappresenta la temperatura di ebollizione per i fluidi fumarolici di Pisciarelli. Nella foto è riportata la nuova vigorosa fumarola sorta il 20 dicembre 2009.

Figura 4.14 - Temperature della fumarola di Pisciarelli registrate in continuo dalla stazione FLXOV8. Poiché la fumarola è un sistema naturale in continua evoluzione, con variazioni macroscopiche del sito di emissione, la temperatura registrata potrebbe non sempre coincidere con la temperatura massima.

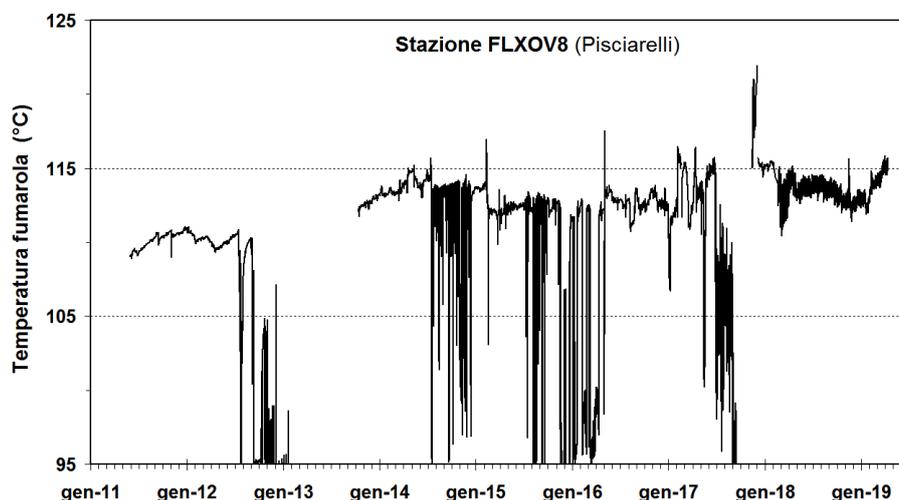
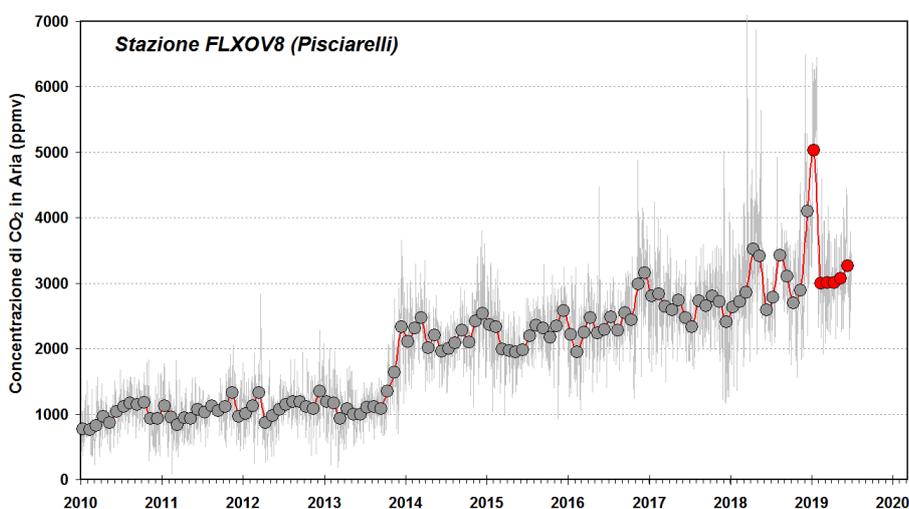


Figura 4.15 - Cronogramma delle medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) della concentrazione di CO₂ registrata in aria con frequenza bioraria dalla stazione geochimica per la misura del flusso di CO₂ dal suolo di Pisciarelli (FLXOV8). Le medie delle concentrazioni mensili del primo semestre 2019 sono riportate con il simbolo rosso. È da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo delle concentrazioni di CO₂ dal 2013, concentrazione in aria che, unitamente ad altri parametri, risulta strettamente correlata all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017).



4.1 Attività fuori Convenzione

Caratterizzazione chimico-fisica delle acque della falda Flegrea (DPC-INGV All. B2 2019-2021)

Nel primo semestre 2019, nell'ambito del progetto di potenziamento del monitoraggio dell'attività idrotermale ai Campi Flegrei (DPC-INGV All. B2 2019-2021), sono state eseguite campagne di misura dei parametri chimico-fisici e del livello piezometrico della falda flegrea, con maggiore dettaglio nelle aree limitrofe di Solfatara – Pisciarelli. E' stato inoltre eseguito il campionamento delle acque di falda per la determinazione della composizione chimica e isotopica. Questa attività ha beneficiato delle conoscenze acquisite nell'estesa campagna di caratterizzazione chimico-isotopica delle acque e di misura del livello e temperatura di circa 100 punti della falda freatica Flegrea, effettuata nel 2013-2014 da ricercatori della sezione INGV-OV (Figura 4.1.1a).

I pozzi investigati hanno una profondità variabile da pochi metri fino ad oltre 180 m e una temperatura massima misurata di ~ 99 °C, l'ubicazione è riportata in Figura 4.1.1b.

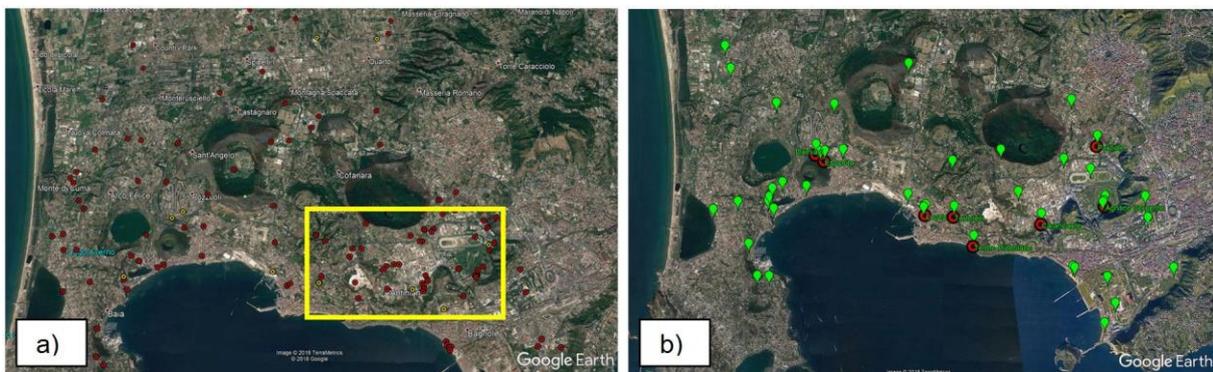


Figura 4.1.1 - a) ubicazione dei punti di misura e campionamento della falda Flegrea relativi alla campagna del 2014, nel riquadro l'area Solfatara-Pisciarelli-Agnano; b) ubicazione dei punti di misura e campionamento relativi alle campagne del 2019, con il simbolo rosso i siti della rete di monitoraggio multiparametrico della falda in fase di realizzazione.

La ricostruzione preliminare della superficie piezometrica, basata sulle misure dirette della profondità della falda effettuate nei pozzi, mostra la risalita della falda centrata nell'area Solfatara - Pisciarelli alimentata verosimilmente da condensati, in accordo con le misure effettuate in campagne precedenti e in generale con le indicazioni fornite da tecniche geoelettriche (Bruno et al., 2007; Byrdina et al., 2014). In Figura 4.1.2 è riportata la superficie piezometrica ricostruita utilizzando anche i nuovi dati misurati.

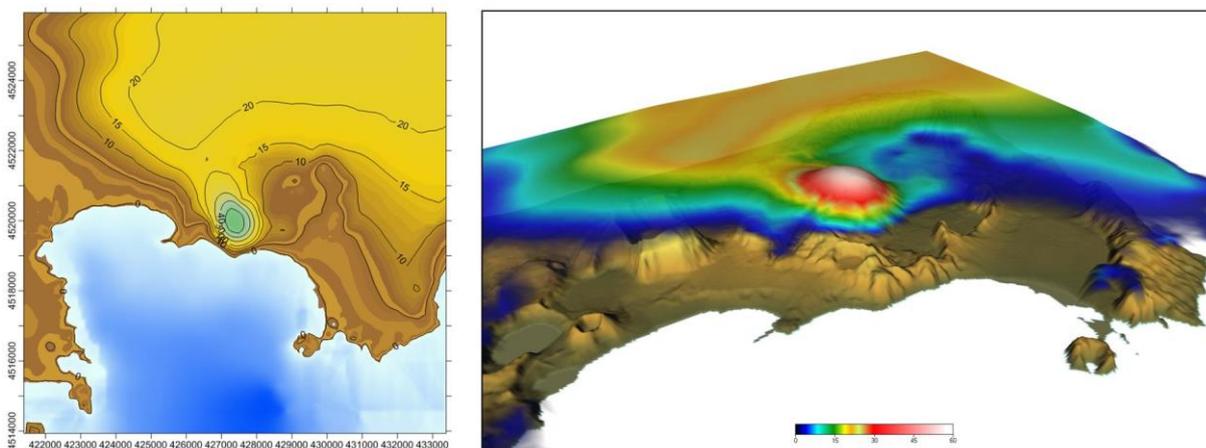


Figura 4.1.2 - Ricostruzione della superficie di falda nell'area flegrea. Si noti l'alto morfologico della superficie piezometrica nell'area Solfatara-Pisciarelli.

La composizione delle acque di falda analizzate, mostra un ampio range di variazione della salinità, da acque diluite con meno di 1 grammo/litro (g/l) ad acque molto saline con oltre 60 g/l. Il pH varia da valori vicini alla neutralità fino a valori notevolmente acidi (pH ~2.0). La composizione chimico-isotopica riassunta in Figura 4.1.3a dai diagrammi ^{34}S vs. ^{34}S e vs. Cl mette in evidenza, per molte delle acque investigate in area Solfatara-Pisciarelli, caratteristiche tipiche delle acque “steam-heated”, ovvero riscaldate da vapori (fumarolici). Queste caratteristiche peculiari suggeriscono un significativo input di fluidi fumarolici condensati nella definizione della composizione delle acque presenti nell’area. Questo input di condensati che, considerando la condensazione del vapore associato al flusso di CO_2 diffuso dal suolo misurato recentemente in area Solfatara-Pisciarelli (Cardellini et al 2017), può essere stimato in circa 40 litri al secondo è probabilmente la causa della forma caratteristica che assume la superficie piezometrica nell’area.

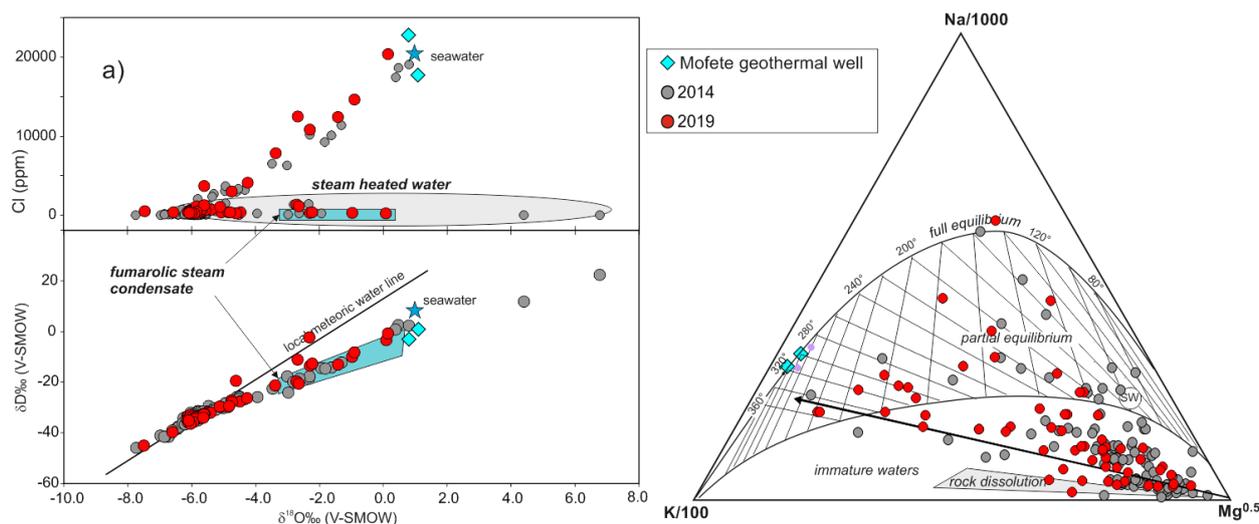


Figura 4.1.3 - a) composizione chimico-isotopica delle acque di falda relative alla campagna del 2014 e quella effettuata nella durata del progetto (simbolo verde), da notare che la quasi totalità delle acque campionate in area Pisciarelli-Solfatara mostrano composizioni che indicano un significativo contributo di fluidi fumarolici; b) diagramma geotermometrico basato sulle composizioni relative di Na-K-Mg (Giggenbach 1988), temperature elevate fino a ~360°C sono stimate per le acque campionate in area Solfatara-Pisciarelli.

In Figura 4.1.3b l’applicazione dei geotermometri basati sulle composizioni relative di Na-K-Mg0.5 (Giggenbach, 1988) delle acque campionate mette in evidenza, oltre ad acque “steam-heated”, anche la presenza di acque in area Solfatara-Pisciarelli equilibrate a temperature elevate fino a circa 360 °C, probabilmente rappresentative almeno localmente della fase liquida profonda del sistema idrotermale, variabilmente miscelata a condensati. L’interpretazione preliminare dei dati acquisiti non evidenzia variazioni significative delle composizioni delle acque rispetto ai dati pregressi.

La caratterizzazione geochimica delle acque di falda è stata finalizzata anche a individuare i siti di maggiore interesse da includere nella rete di monitoraggio multiparametrico della falda, che è al momento in fase di realizzazione (Figura 4.1.1b). Le stazioni di monitoraggio utilizzate per la realizzazione di questa rete sono costituite da una sonda CTD (Conduttività elettrica (C), Temperatura (T) e Profondità (D)) con alimentazione interna sufficiente per diversi anni, e da un modem GSM anch’esso dotato di batteria che ne garantisce il funzionamento per alcuni anni. La strumentazione è stata acquistata su fondi *POR Campania FESR 2007/2013*.

ISCHIA

1 - MONITORAGGIO SISMOLOGICO

Il monitoraggio sismologico di Ischia viene svolto mediante l'uso di una Rete Permanente integrata da una Rete Sismica Mobile installata dopo il terremoto del 21 agosto 2017. Tali reti consentono di individuare e classificare transienti sismici legati a terremoti o altri fenomeni naturali ed artificiali.

1.1 Rete Sismica Permanente

La Rete Permanente di Monitoraggio Sismico di Ischia operativa nel primo semestre 2019 conta 8 siti di installazione sull'isola più 1 sull'Isola di Procida (Figura 1.1.1, Tabella 1.1.1). In ogni sito, secondo i casi, possono insistere più tipologie di stazioni e/o di sensori in base alle logiche di molteplicità di sensori o di ridondanza strumentale. La Tabella 1.1.1 sintetizza, per ogni sito, il tipo di sensore e di trasmissione presente.

Sono presenti 3 stazioni analogiche equipaggiate con sensori a corto periodo a 3 componenti. Le stazioni digitali sono 8: 3 basate sull'acquisitore GILDA e 5 equipaggiate con l'acquisitore Guralp DM24 a sei canali.

I sensori che equipaggiano le stazioni digitali sono i seguenti: 8 velocimetri a larga banda (BroadBand: 0.016-50 Hz) e 4 accelerometri. A questi si aggiungono un microfono infrasonico Infracyrus (presso IOCA) e un microfono broadband Chaparral (presso IFOR).

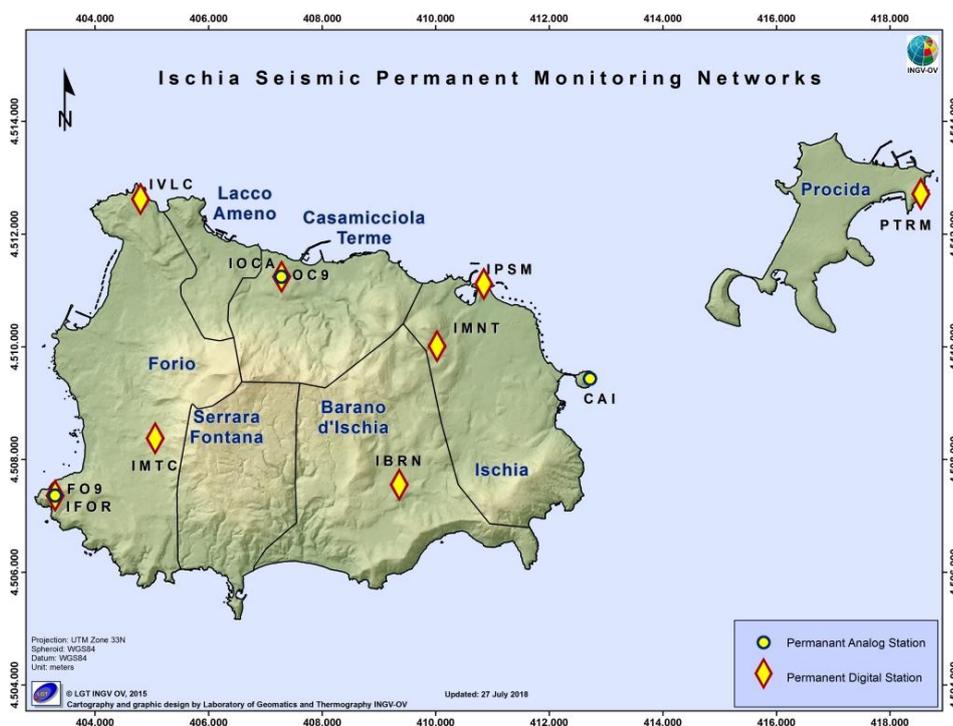


Figura 1.1.1 – Rete Sismica Permanente di Ischia.

Tabella 1.1.1 – Stato della Rete Sismica Permanente di Ischia

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
CAI	40.7322N 13.9655E 103 m	Castello Aragonese	1996	MarkL4-3C	Analogica	Radio UHF analogica
OC9 IOCA	40.7468N 13.9014E 123 m	Ischia Osservatorio di Casamicciola	1993 09/02/2011	MarkL4-3C Guralp CMG-40T 60s Episensor ES-T Microfono Infracyrus	Analogica GILDA GILDA	Radio UHF analogica ADSL
FO9 IFOR	40.7115N 13.8551E 234 m	Forio Punta Imperatore	1995 Ottobre 2009	MarkL4-3C Guralp CMG-40T 60s Microfono Chaparral	Analogica GILDA	Radio UHF Analogica Wi-Fi
IMTC	40.7209N 13.8758E 209 m	Forio Monte Corvo	17/04/2015	Guralp CMG-40T 60s	GILDA	Wi-Fi
PTRM	40.7614N 14.0349E 100 m	Procida Terra Murata	Luglio 2018	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi
IPSM	40.7462N 13.9439E 17 m	Ischia Porto	Luglio 2018	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi
IVLC	40.7590N 13.8718E 50 m	Monte Zaro	Luglio 2018	Guralp CMG-40T Episensor ES-T	Guralp DM24	Wi-Fi
IBRN	40.7140N 13.9268E 100 m	Barano	Luglio 2018	Guralp CMG-40T	Guralp DM24	UMTS
IMNT	40.7362N 13.9343E 100 m	Montagnone	Luglio 2018	Guralp CMG-40T	Guralp DM24	UMTS

Nel corso del primo semestre 2019, le stazioni della Rete Sismica installata ad Ischia hanno registrato 17 terremoti di bassa magnitudo ($M_{dmax} = 1.2 \pm 0.3$; Figura 1.1.2).

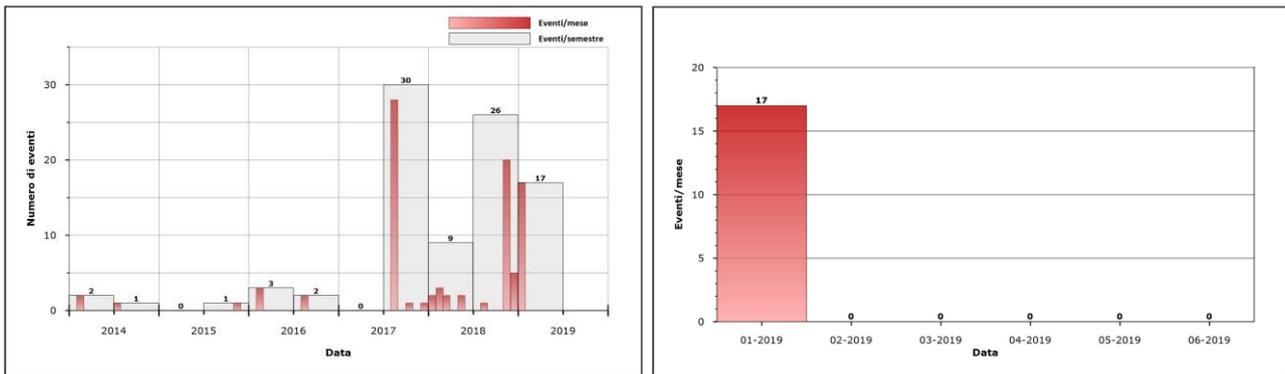


Figura 1.1.2 – Frequenza di accadimento dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

Tutti gli eventi sono stati registrati il 06/01 durante un breve sciame sismico (Tabella 1.1.2). E' stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 1 solo degli eventi registrati che risulta localizzato nell'area di Forio a circa 1 km di profondità (Figura 1.1.3).

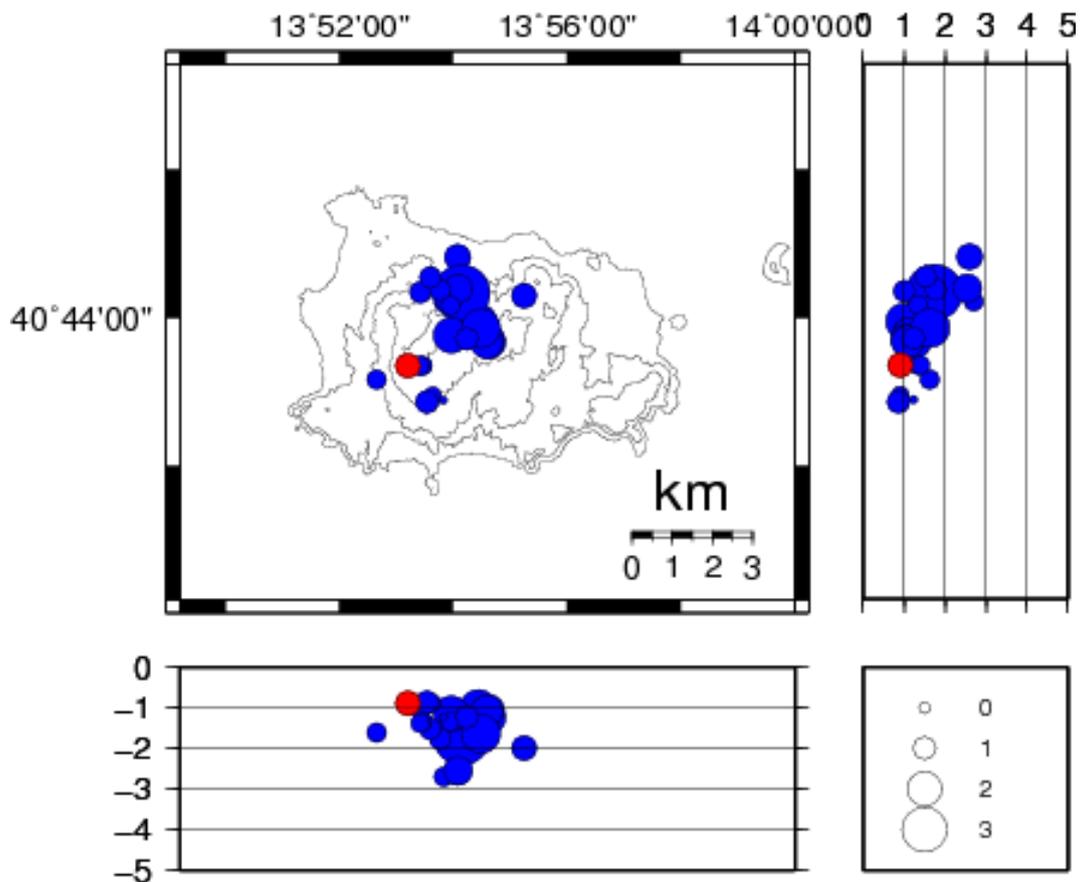


Figura 1.1.3 – Localizzazione degli ipocentri dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (in blu) e nel primo semestre 2019 (in rosso).

Non si evidenziano particolari andamenti nella frequenza di accadimento (Figura 1.1.2), negli ipocentri (Figura 1.1.3), nelle profondità ipocentrali (Figura 1.1.4), nella distribuzione temporale delle magnitudo (Figura 1.1.5) e nel rilascio cumulativo di energia (Figura 1.1.6).

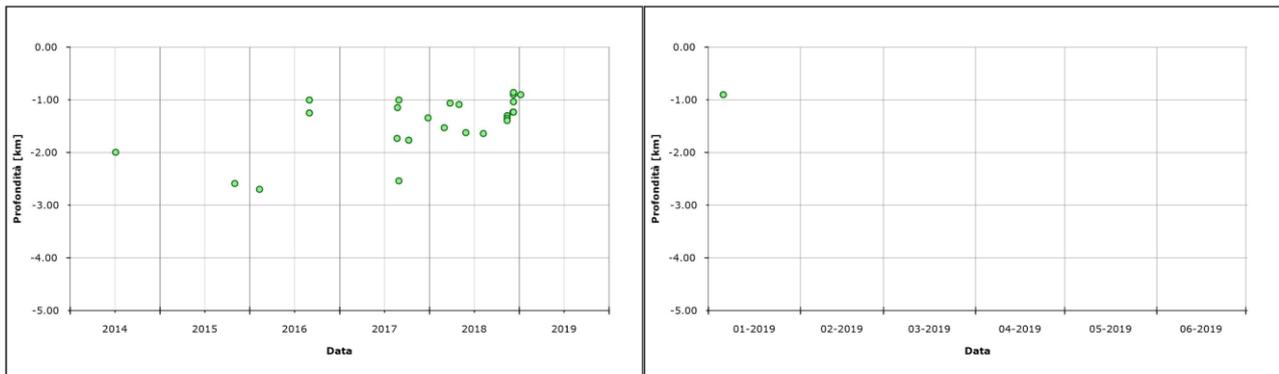


Figura 1.1.4 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti localizzati a Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

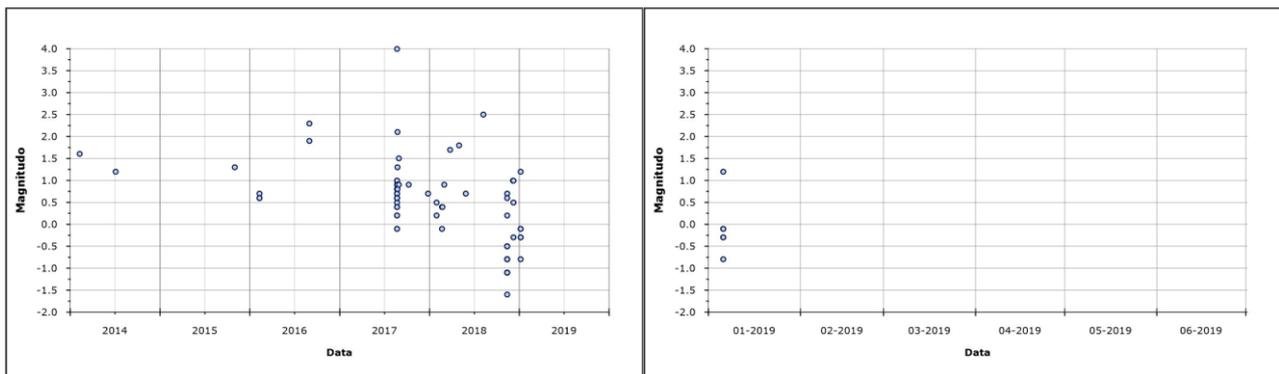


Figura 1.1.5 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra).

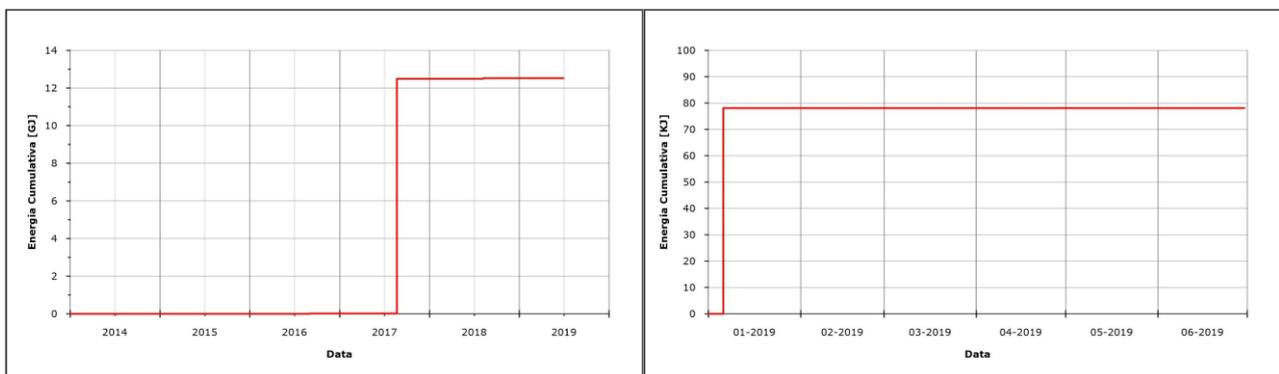


Figura 1.1.6 – Andamento cumulativo dell'energia rilasciata dai terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del primo semestre 2019 (a destra) calcolato attraverso la relazione di Gutenberg-Richter $\log E = 2.4 + 2.14M - 0.054M^2$.

In Tabella 1.1.2 sono riportati gli sciami sismici registrati ad Ischia nel corso del primo semestre 2019.

Tabella 1.1.2 - Sciami sismici registrati ad Ischia nel corso del I semestre 2019.

Inizio sciame	Fine sciame	N. eventi	M _{max}
2019/01/06 02:03	2019/01/06 03:05	17	1.2

1.2 Rete Sismica Mobile

L'intervento con Rete Sismica Mobile è stato effettuato nell'ambito delle attività del Gruppo Operativo SISMICO dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Nel primo semestre 2019 sono continuate le attività di controllo e manutenzione delle stazioni sismiche della Rete Mobile installate sull'isola d'Ischia con la verifica del corretto funzionamento e dello stato di carica delle batterie. In considerazione della conclusione del potenziamento della Rete Sismica Permanente, alcune stazioni sono state spostate per un'ottimizzazione della geometria della rete.

A tutto giugno 2019 sono installate e operative 4 stazioni sismiche digitali di cui 3 trasmesse e acquisite in Sala di Monitoraggio, integrando in continuo la Rete Permanente (Figura 1.2.1). In Tabella 1.2.1 sono riportate le informazioni relative alla configurazione della Rete Sismica Mobile installata all'Isola d'Ischia.



Figura 1.2.1 – Mappa della Rete Sismica Mobile operativa ad Ischia alla fine di giugno 2019.

Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Mobile installata a Ischia. In nero le stazioni operative, in grigio quelle dismesse.

Stazione	Coordinate	Località	Data Installazione	Sensore	Acquisitore	Trasmissione
T1361	40.7567N 13.8789E 7 m	Lacco Ameno Parco Negombo	26/08/2017 Dismessa 28/02/2019	Lennartz LE-3Dlite	Lennartz MARSlite	UMTS
T1363	40.7455N 13.9135E 50 m	Casamicciola T. Via Cretaio	31/08/2017	Lennartz LE-3Dlite Episensor ES-T	Lunitek Atlas	UMTS
T1364	40.7426N 13.8905E 129 m	Lacco Ameno Hotel Grazia	31/08/2017 Dismessa 20/11/2018	Lennartz LE-3Dlite	Nanometrics Taurus	Locale
T1365	40.7014N 13.9181E 130 m	Barano Hotel Villa a Mare	18/09/2017	Lennartz LE-3Dlite	Gilda	Locale
T1366	40.7373N 13.9046E 213 m	Casamicciola T. Via S. Barbara	03/10/2017 Dismessa 01/02/2019	Lennartz LE-3Dlite Episensor ES-T Lennartz LE- 3D/20s	Reftek 130 Nanometrics Taurus	UMTS (Reftek)
T1367	40.7435N 13.8952E 81 m	Casamicciola T. Hotel V.Jantò	23/10/2017	Lennartz LE-3Dlite	Lennartz MARSlite	UMTS
T1368	40.7109N 13.9161E 314 m	Barano Casolare Madonna	25/10/2018	Lennartz LE-3Dlite	Reftek 130	UMTS

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il primo semestre 2019 il monitoraggio geodetico di Ischia è stato effettuato attraverso misure continue GPS e tiltmetriche, nonché mediante una campagna di misure gravimetriche.

2.1 Rete GPS

Sull'isola di Ischia sono operative sei stazioni GPS (Figura 2.1.1, Tabella 2.1.1), mentre una stazione è in funzione sull'isola di Procida. Su tutti i siti sono operativi ricevitori di ultima generazione GR10 o della serie GRX1200PRO. Le stazioni sono alimentate principalmente tramite rete elettrica, solo i siti di Santantuono (SANT) e Monte Epomeo (MEPO) sono attrezzati con alimentazione a pannelli solari.

I sistemi di trasmissione attualmente in uso sono principalmente con connettività UMTS/4G (3 siti), mentre 2 trasmettono con connettività Wi-Fi e 1 via ADSL. Solo sull'isola di Procida, è attiva una connessione su linea GSM.

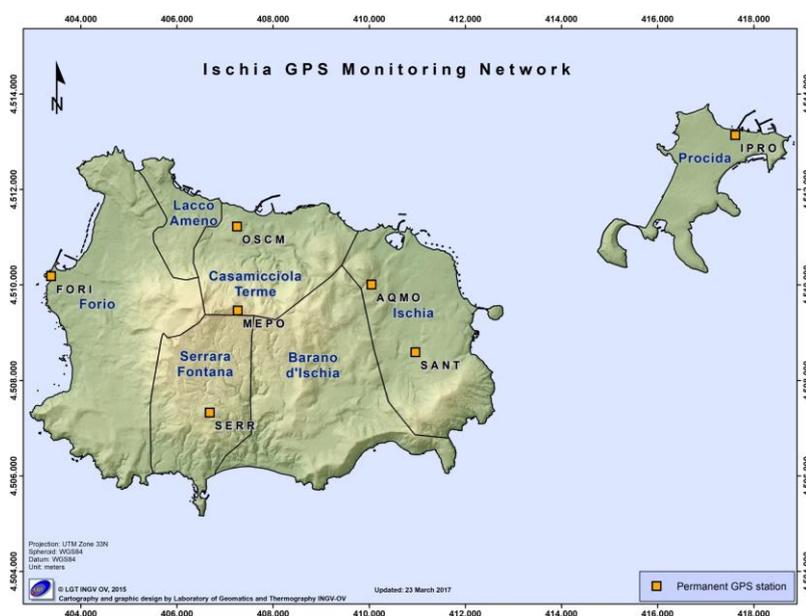


Figura 2.1.1 – Mappa Rete GPS di Ischia.

Tabella 2.1.1 – Stato della Rete GPS ad Ischia

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
AQMO	40.7361N 13.9346E	Acquedotto Montagnone (Ischia)	2001	LeicaGR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	UMTS/4G
FORI	40.7369N 13.8557E	Municipio di Forio d'Ischia	1999	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
MEPO	40.7309N 13.9018E	Monte Epomeo	2017	Leica GR10 LEIAR20 LEIM	30sec/flusso 1sec	Wi-Fi
OSCM	40.7467N 13.9013E	Casamicciola Terme (Ischia)	2010	Leica GRX1200GGPRO LEIAT504GG LEIS	30sec/flusso 1sec	ADSL
SANT	40.7234N 13.9453E	Santantuono (Ischia)	2010	Leica GRX1200PRO LEIAT504 NONE	30sec/flusso 1sec	UMTS/4G
SERR	40.7116N 13.8952E	Serrara (Ischia)	2001	Leica GR10 LEIAT504 LEIS	30sec/flusso 1sec	UMTS/4G
IPRO	40.76516N 14.0239E	Procida	2003	Leica GRX1200PRO LEIAT504 LEIS	30sec	GSM

L'analisi delle serie temporali GPS conferma la generale subsidenza dell'isola con valori più elevati nel settore meridionale dell'isola (Figure 2.1.2 e 2.1.3).

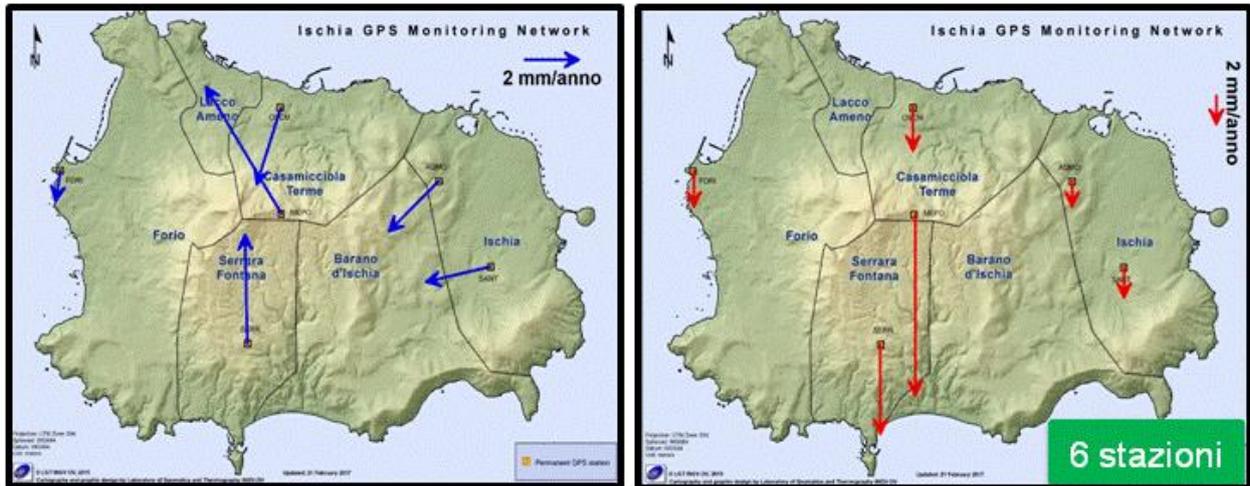


Figura 2.1.2 - Campo di velocità (in mm/anno) degli spostamenti orizzontali (in blu) e verticali (in rosso) nell'intervallo gennaio 2011-giugno 2019.

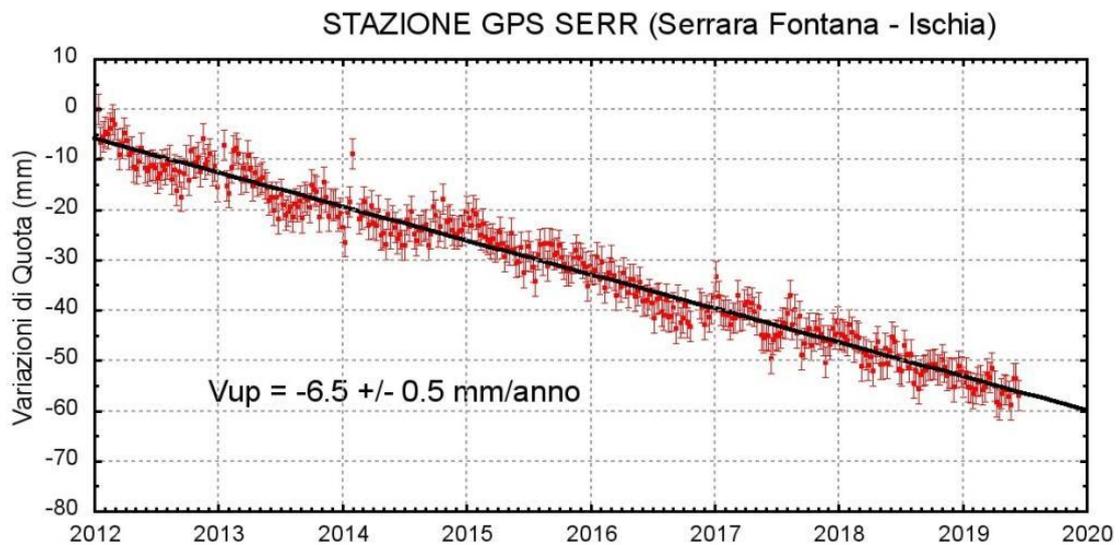


Figura 2.1.3 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di SERR (Ischia) da gennaio 2012 a giugno 2019.

2.2 Rete Tiltmetrica

La Rete Tiltmetrica dell'Isola di Ischia (Figura 2.2.1) consiste in 3 stazioni (le cui specifiche sono riportate in Tabella 2.2.1), attrezzate con sensori digitali da pozzo, mod. Lily (Jewell Instrument) con passo di acquisizione ogni minuto. Tutte le stazioni trasmettono quotidianamente alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano i file dati.

Figura 2.2.1 – Mappa della Rete Tiltmetrica di Ischia.

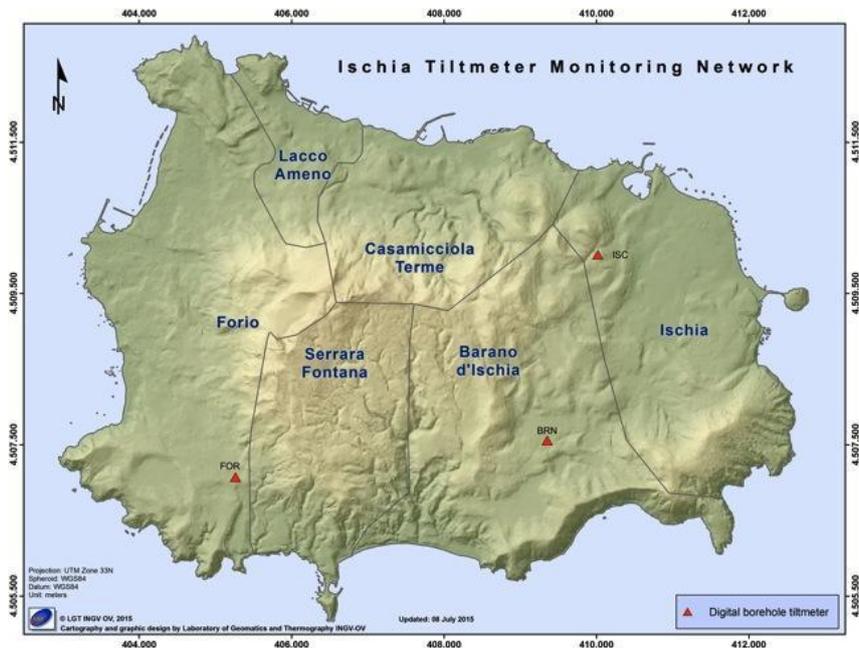


Tabella 2.2.1 – Stato della Rete Tiltmetrica di Ischia

Stazione	Coordinate	Località	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmissione
ISC	40.7362N 13.9343E	Acquedotto EVI, Ischia	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
BRN	40.7140N 13.9268E	Cimitero Comunale, Barano d'Ischia	Jewell Instrument mod. Lily	-25 metri	1'	Router UMTS
FOR	40.7091N 13.8785E	Scuola D'Abundo, Forio	Jewell Instrument mod. Lily	-27 metri	1'	Router UMTS

La variazione tiltmetrica che interessa l'isola di Ischia nel primo semestre 2019 mostra un pattern di inclinazione fortemente polarizzato in direzione N-NNE, con una maggiore inclinazione confinata nel settore orientale dell'isola.

La deformazione registrata è visibile nell'odografo di Figura 2.2.2 che riassume il pattern tiltmetrico registrato dalle 3 stazioni digitali, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori a 1 giorno.

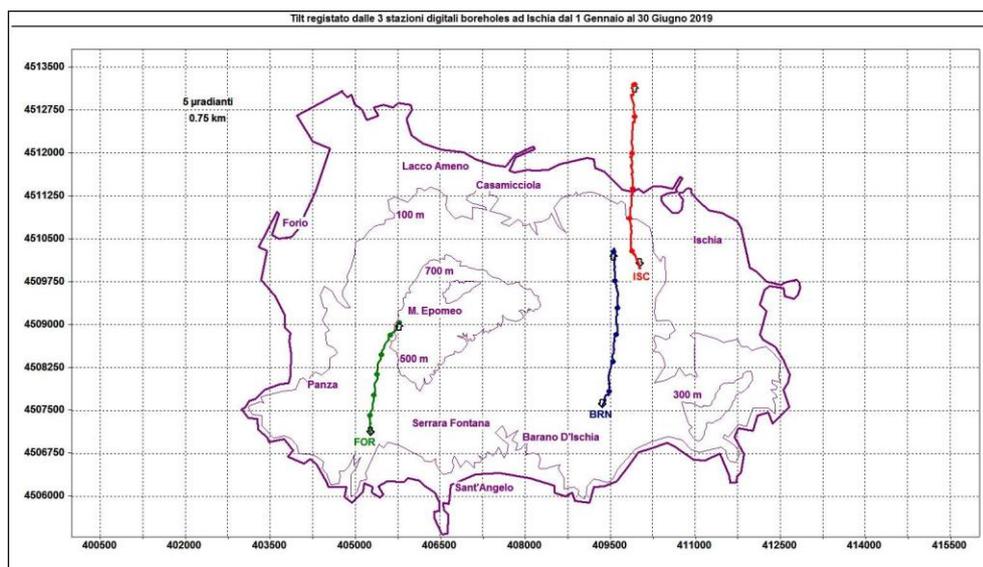


Figura 2.2.2 – Pattern tiltmetrico osservato a Ischia. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 5 μ radianti o 0.75 km. I pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt indicano l’inizio di ogni mese.

In tale figura 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 2.2.2 sono riportate le variazioni di inclinazione del suolo con le relative direzioni di tilting, nonché quella termica registrata a fondo pozzo (≈ -25 m dal p.c.), acquisite nel periodo considerato.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato e variazione termica associata relativi alle stazioni digitali.

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione FOR (157 m s.l.m.)	13.5 μ radianti a NNE	0.04 °C
Stazione BRN (145 m s.l.m.)	18.1 μ radianti a N	0.02 °C
Stazione ISC (173 m s.l.m.)	23.3 μ radianti a N	-0.02 °C

In Figura 2.2.3 sono invece riassunti gli andamenti delle componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 3 stazioni borehole.

Per evidenziare la continuità dei segnali, il periodo di tempo ivi rappresentato parte dal 1 gennaio 2018; poiché, inoltre, i segnali acquisiti rappresentano la variazione di tilt, sono stati tutti azzerati a partire da quella data.

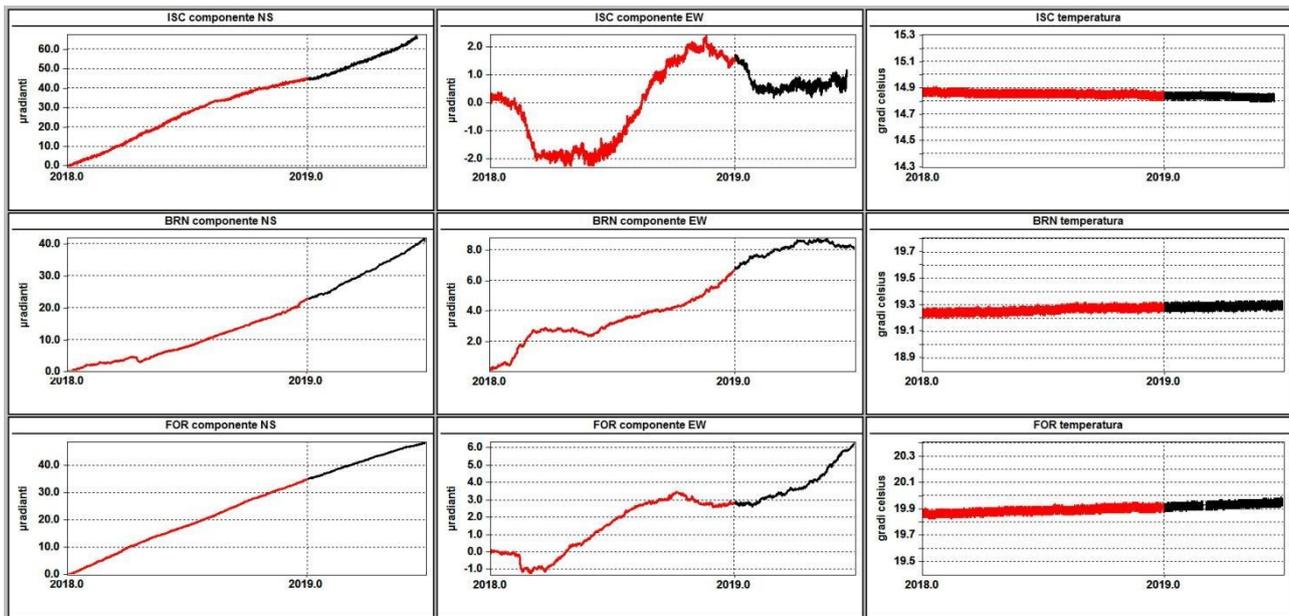


Figura 2.2.3 - Segnali registrati a partire dal 2018 dai 3 sensori digitali Lily della rete di Ischia; le stazioni tilmetriche sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 colonne 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. La terza colonna riporta la temperatura in $^{\circ}$ C registrata da ogni sensore. In rosso sono riportati i segnali relativi al 2018 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel primo semestre 2019.

Tutte le componenti NS mostrano un trend di inclinazione verso N e quindi un abbassamento del suolo a N delle stesse, mentre le componenti EW, pur mostrando andamenti stagionali, tendono ad oscillare intorno ad una posizione di blocco ad eccezione di FOR che deriva verso E.

Le variazioni tilmetriche osservate nei primi 6 mesi del 2019 a FOR ed ISC risultano minori di quelle relative allo stesso periodo del 2018 (rispettivamente del 75% e 85%) mentre quella registrata alla stazione BRN risulta il 222% maggiore.

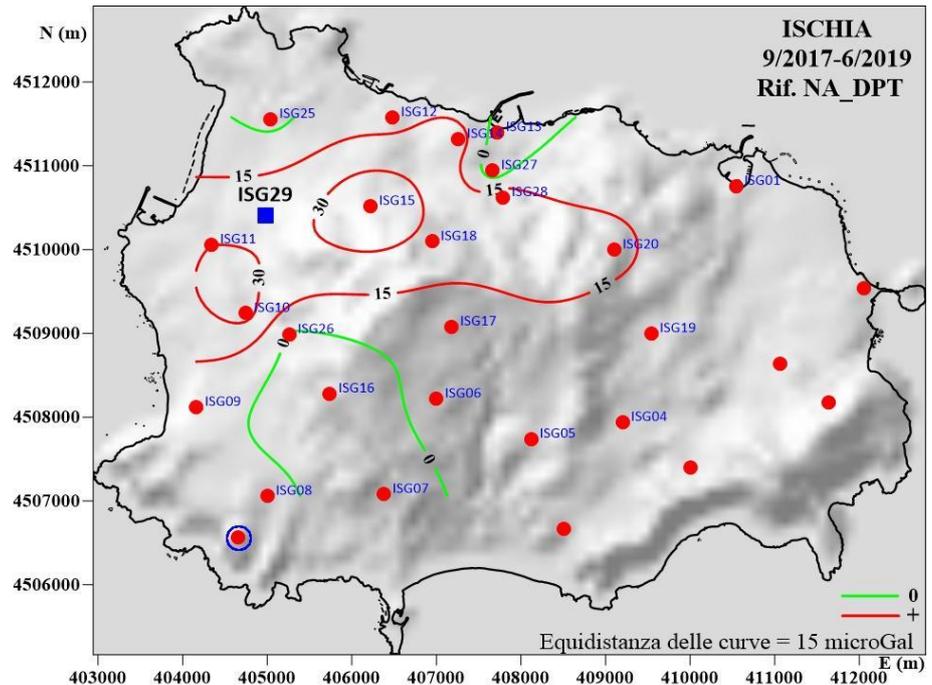
Ciò significa che la deformazione osservata in 3 punti diversi dell'isola, fortemente sbilanciata negli anni precedenti nel settore nord-orientale, tende a riequilibrarsi alle 3 stazioni in un contesto molto dinamico.

2.3 Rete Gravimetrica

Dal 3 al 18 giugno 2019 è stata effettuata una campagna di misure gravimetriche relative acquisite su tutti i vertici della rete (Figura 2.3.1 – punti pieni rossi).

Nel corso della campagna è stata istituita una nuova stazione nella zona di Forio, lungo la strada Borbonica alla base del Monte Epomeo (ISG29 - quadrato pieno blu nella Figura 2.3.1). Inoltre è stato anche riposizionato, nello stesso luogo, il vertice ISG24 (evidenziato con un cerchio blu nella Figura 2.3.1) ubicato nella zona sud-occidentale dell'isola (Panza Cimitero). I dati acquisti (differenze di gravità tra coppie di vertici corrette degli effetti di carico mareale e atmosferico e di deriva strumentale) sono stati sottoposti a compensazione rigorosa, che ha fornito un errore medio di $\pm 10 \mu$ Gal. Successivamente sono stati calcolati i Δg tra le singole stazioni della rete e il riferimento in Napoli (Università "Federico II").

Figura 2.3.1 - Campo della distribuzione delle variazioni di gravità all'isola di Ischia, con riferimento alla stazione di Napoli, nell'intervallo di tempo settembre 2017 – giugno 2019. I colori rosso e verde indicano rispettivamente le variazioni positive e nulle. Le isolinee sono tracciate con equidistanza di 15 μGal . I cerchi pieni rossi indicano le stazioni gravimetriche e la loro posizione; le stazioni utilizzate per il confronto sono indicate con la rispettiva sigla in blu. Il quadrato pieno blu mostra la posizione del nuovo vertice (ISG29); il vertice ISG24 riposizionato è evidenziato con un cerchio blu.



Il collegamento tra la stazione di riferimento locale sull'isola (Ischia Porto – ISG01) e quello esterno in Napoli non ha evidenziato alcuna variazione rispetto ai periodi precedenti.

I Δg riferiti alla stazione di Napoli sono stati confrontati con quelli della precedente campagna del settembre 2017, affetta da un errore medio di $\pm 9 \mu\text{Gal}$. Si ricorda che la campagna del 2017 fu effettuata straordinariamente a seguito dell'evento sismico del 21 agosto 2017 (si veda: Relazione Ischia II Semestre 2017); le misure furono condotte escludendo le stazioni della rete ubicate nel settore sud-orientale dell'isola. Fu anche esclusa la stazione ISG24 in quanto necessitava di essere riposizionata, cosa effettuata nel corso della campagna del 2019.

Il confronto 9/2017-6/2019 evidenzia che in generale l'isola è stata interessata da variazioni gravimetriche non significative o ai limiti della significatività statistica.

È comunque individuabile un'area di aumento di gravità, sempre ai limiti della significatività statistica, nel settore nord-occidentale dell'isola. Variazioni significative si osservano solo in corrispondenza di 3 vertici: Fango (ISG15, +45 μGal); Forio Monterone (ISG11, +30 μGal) e Località Cuotto (ISG10, +36 μGal).

Considerando l'intervallo di tempo analizzato non possono essere esclusi effetti stagionali. Il campo delle variazioni di g sul periodo analizzato è illustrato nella Figura 2.3.1; esso è stato tracciato con equidistanza di 15 μGal in considerazione degli errori ottenuti nelle singole campagne.

3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

Le attività di monitoraggio vulcanologico vengono svolte dalla Sezione di Napoli "Osservatorio Vesuviano" con campagne di misure con Termocamera Mobile e Termocoppia.

La sorveglianza vulcanologica tramite Telecamere Termiche Mobili (TTM) e termocoppie rigide ha come principale obiettivo l'individuazione di eventuali variazioni nel tempo delle temperature misurate al suolo in punti discreti e/o nelle aree a temperatura maggiore in modo da evidenziare eventuali modifiche nella distribuzione areale del campo fumarolico.

I rilievi sono eseguiti mensilmente in condizioni di non irraggiamento solare (essenzialmente di notte), utilizzando una termocamera portatile FLIR SC640 ad alta risoluzione (640 x 480 pixel) e sensibilità (<0,06°C +30°C). La termocoppia utilizzata è di tipo K, con errore strumentale di circa 0.1°C nell'intervallo -200÷1260 °C. Le misure ottenute con la termocamera sono confrontate, quando possibile, con quelle eseguite con termocoppia rigida.

Ubicazione dei punti di misura ad Ischia

I rilievi termici a Ischia in genere sono effettuati in otto punti stazione ubicati in diversi contesti strutturali (Figura 3.1a-h). Dal marzo 2018 è stato aggiunto un ulteriore punto di misura in località Fondo d'Oglio (Figura 3.1.i) in corrispondenza di una fumarola precedentemente coperta da fitta vegetazione bruciata durante un incendio.

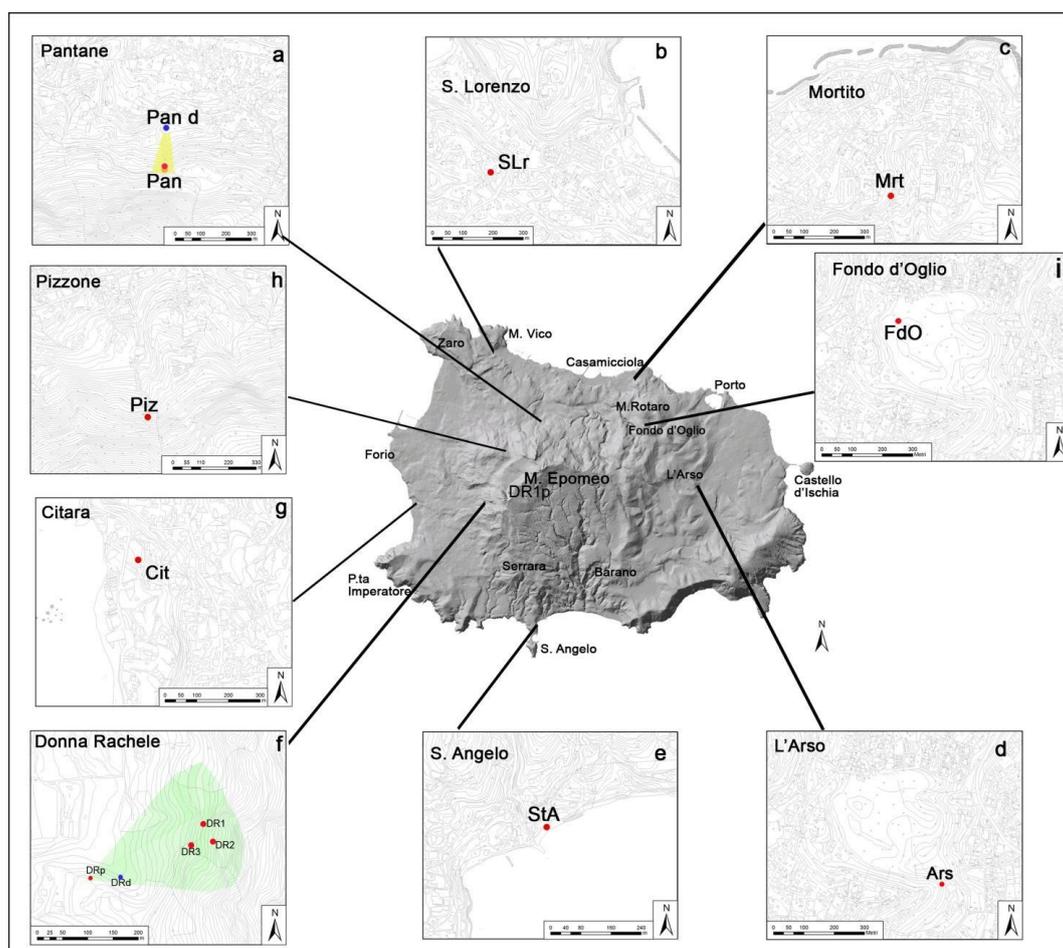


Figura 3.1 – Ubicazione dei punti di misura a Ischia.

Località Donna Rachele – Forio

La comparazione delle fotocomposizioni di immagini termiche del versante occidentale del Monte Epomeo, riprese dal punto stazione DRp (Fig. 3.1f) durante il primo semestre 2019, non evidenzia significative variazioni nella distribuzione areale del campo fumarolico (Fig. 3.2 b, c, d) anche rispetto al semestre precedente.

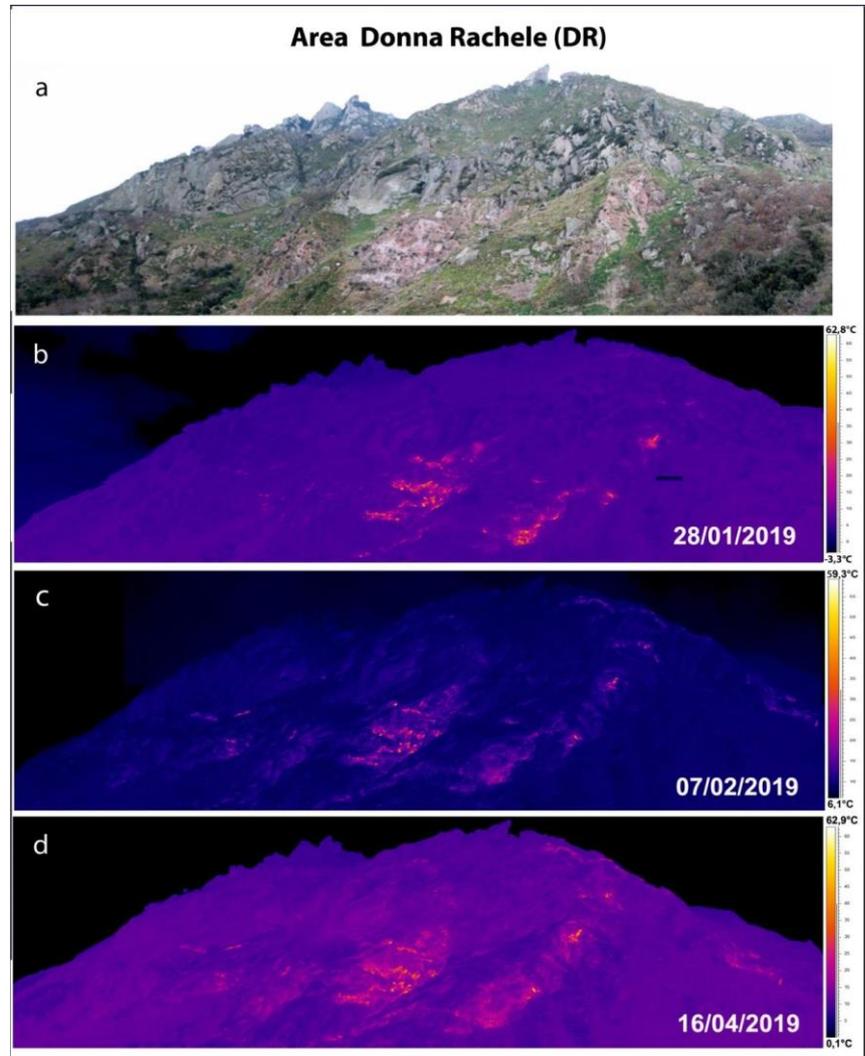


Figura 3.2 - Versante in località Donna Rachele a Ischia. Fotocomposizioni di immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 28/01/2019 (b), 07/02/2019 (c) e 16/04/2019 (d) dal punto stazione DRp di figura 4.1.

S. Angelo

A S. Angelo, nel settore meridionale di Ischia (Figura 3.1e), i valori di temperatura massima misurati con termocamera e i valori di temperatura misurati con termocoppia rigida mostrano un andamento simile intorno ai 100 °C (Figura 3.3c). Non si segnalano variazioni significative rispetto agli anni precedenti.

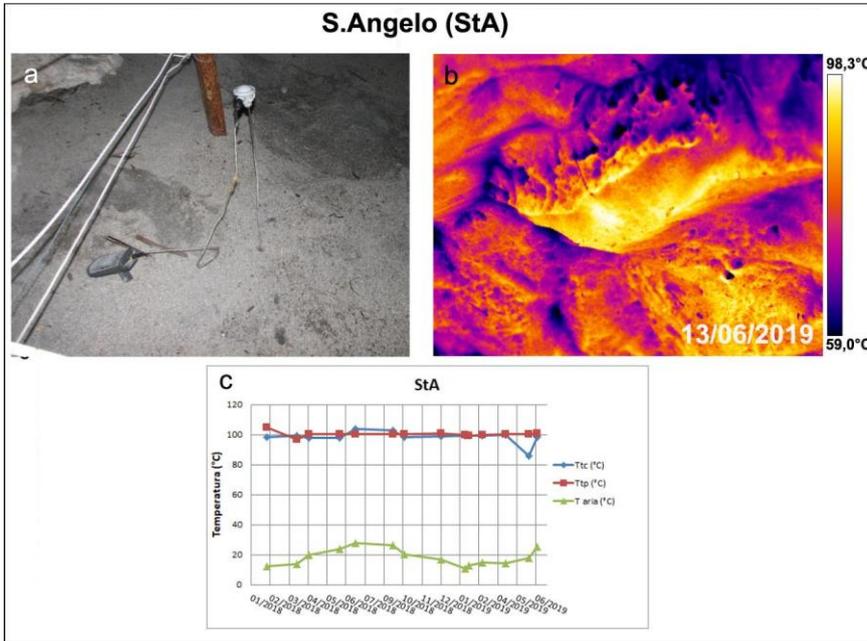
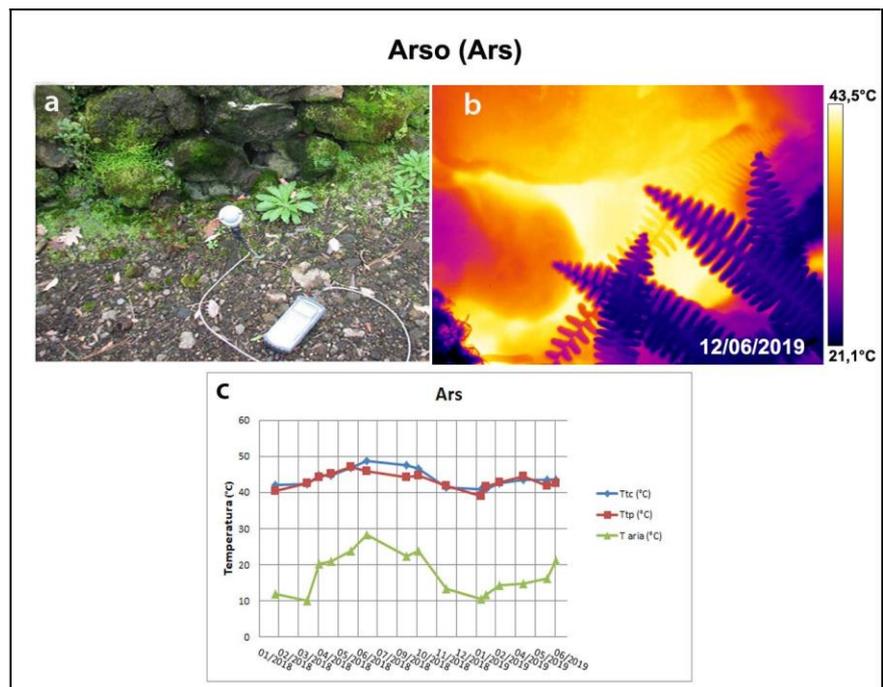


Figura 3.3 – Fumarola in località S. Angelo a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione StA di Figura 4.1e. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c).

Cratere dell’Arso

All’interno del cratere dell’Arso, nel settore orientale dell’isola di Ischia (Figura 3.1d), i valori di temperatura rilevati nel primo semestre 2019 sono stabili, confermando l’andamento dei semestri precedenti, a meno delle variazioni stagionali (Figura 3.4c).

Figura 3.4 - Cratere dell’Arso a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Ars di Figura 4.1d. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c).



Pantane

In località Pantane, a nord del Monte Epomeo (Fig. 3.1a), i valori di temperatura rilevati nel primo semestre 2019 con telecamera termica e termocoppia rigida sono stabili, confermando l'andamento dei semestri precedenti, a meno di variazioni stagionali (Figura 3.5c).

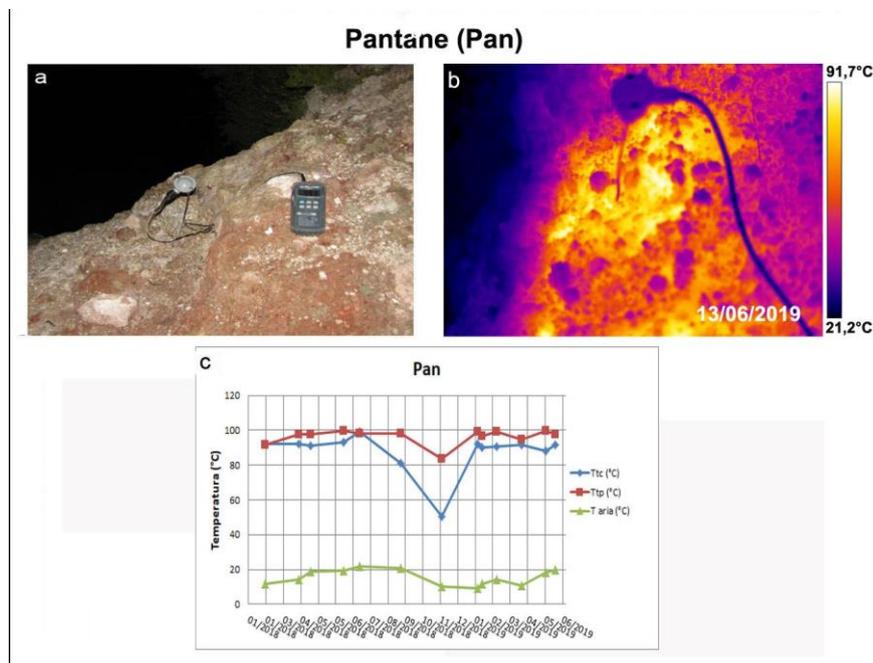
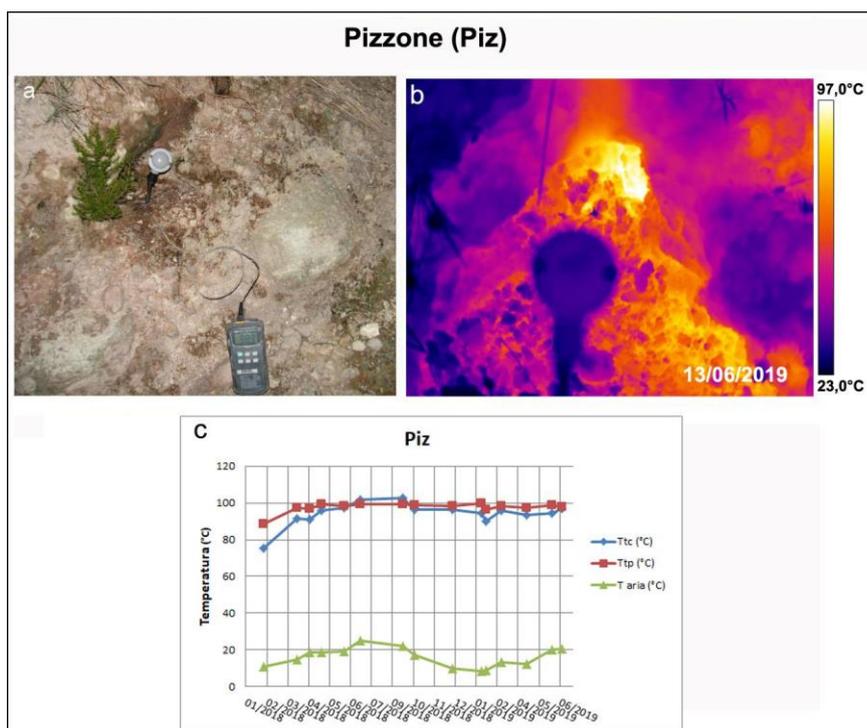


Figura 3.5 – Fumarola in località Pantane a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto di misura Pan di Figura 4.1a. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura alla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c).

Pizzone

In località Pizzone, a nord-ovest del Monte Epomeo (Figura 3.1h), i valori di temperatura misurati, compresi tra circa 96 e 100°C per la termocoppia e tra circa 90 e 97°C per la termocamera, sono in linea con le medie stagionali del periodo anche rispetto al semestre precedente (Figura 3.6c).

Figura 3.6 – Fumarola in località Pizzone a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Piz di Figura 4.1h. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c).



S. Lorenzo

In località S. Lorenzo, nel settore nord-occidentale di Ischia (Figura 3.1b), i valori di temperatura misurati si attestano intorno ai 40 °C sia per la termocoppia che per la termocamera e sono in linea con le medie stagionali del periodo anche rispetto ai semestri precedenti (Figura 3.7c).

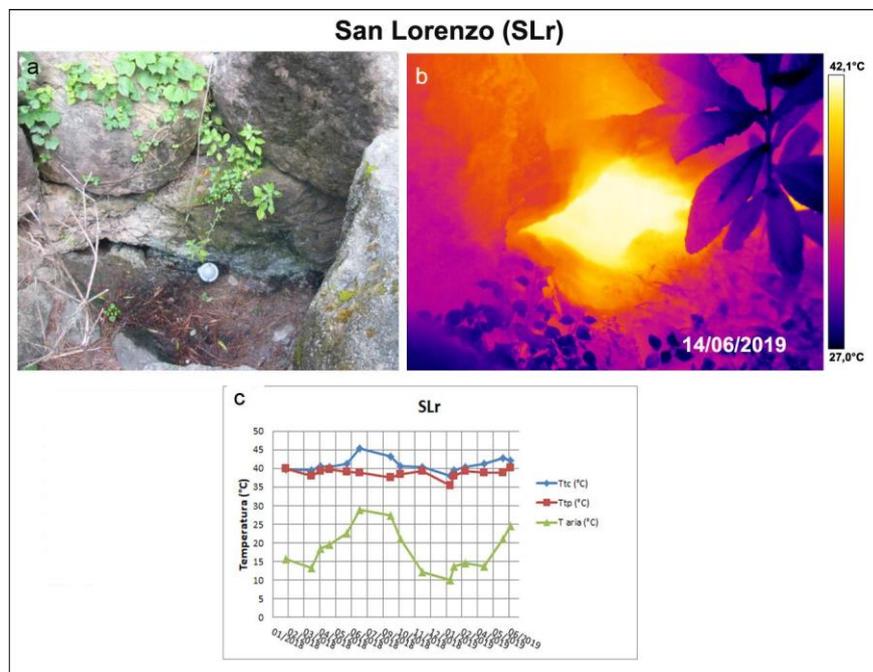
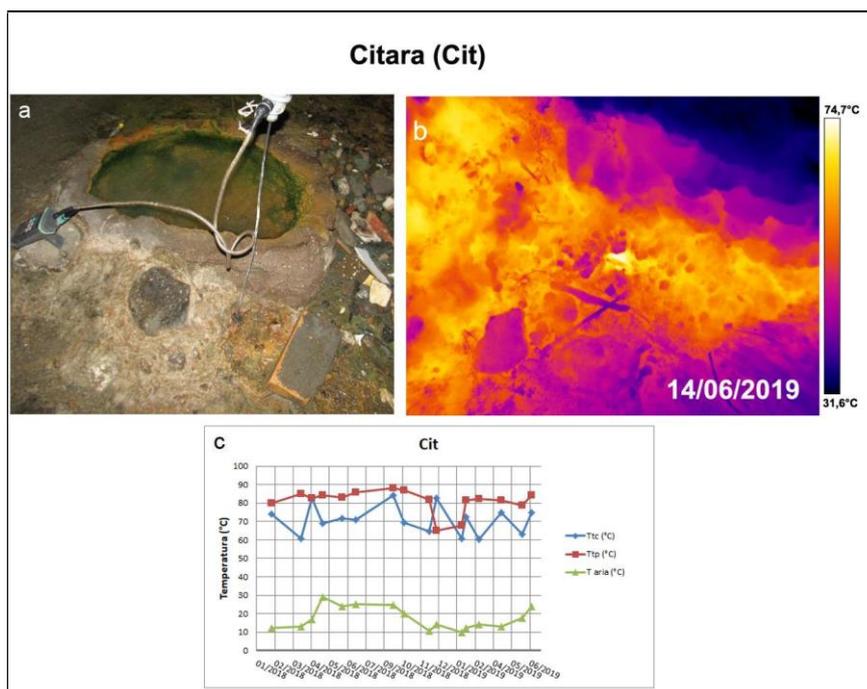


Figura 3.7 – Fumarola in località S. Lorenzo a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto di stazione SLr di Figura 4.1b. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c).

Citara

In località Citara, nel settore occidentale di Ischia (Figura 3.1g), i rilievi termici effettuati con telecamera termica e termocoppia rigida sono in linea con le medie stagionali del periodo anche rispetto ai semestri precedenti (Figura 3.8c).

Figura 3.8 – Fumarola in località Citara a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Cit di Figura 4.1g. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a giugno 2019 (c).



Fondo d'Oglio

In località Fondo d'Oglio, nel settore nord orientale di Ischia (Figura 3.1i), rilievi termici effettuati con telecamera termica e termocoppia rigida sono in linea con le medie stagionali del periodo anche rispetto al semestre precedente (Figura 3.9c).

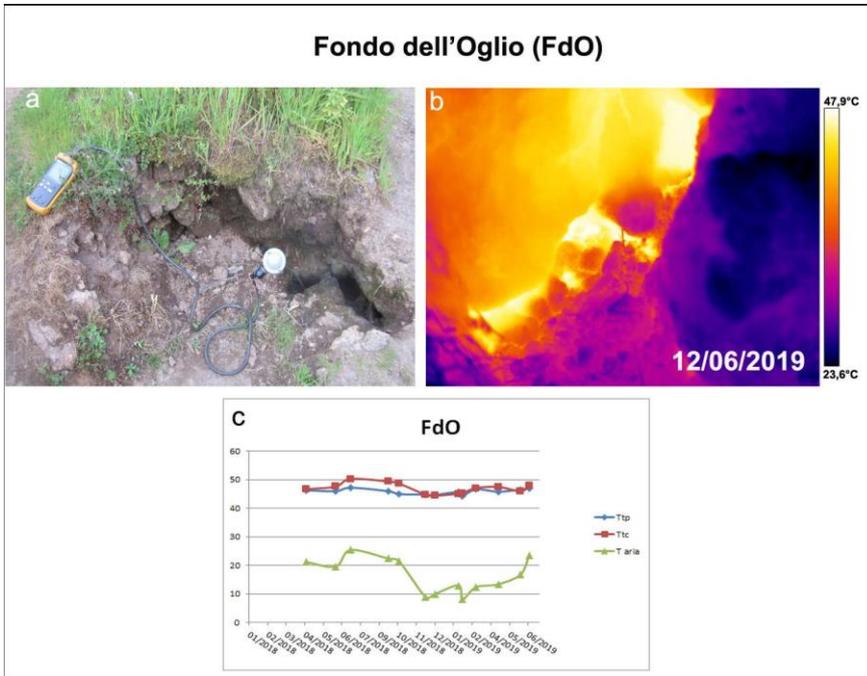


Figura 3.9 – Fumarola in località Fondo d'Oglio a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione FdO di Figura 4.1i. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico da aprile 2018 a giugno 2019 (c).

4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO

Le attività di sorveglianza geochimica all'Isola d'Ischia nell'ambito della Convenzione INGV – DPC sono di competenza dalla Sezione INGV di Palermo.

4.1 Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo

Le attività di sorveglianza geochimica dell'isola d'Ischia svolte dalla Sezione di Palermo sono consistite in misure e campionamenti periodici di campioni di acque termali e di gas liberi. Lo studio delle variazioni chimico-fisiche dei gas e delle acque fornisce importanti indicazioni sulla circolazione dei fluidi e sulle dinamiche del sistema geotermico.

Nell'ambito del programma di sorveglianza sono stati campionati 14 acque termali (tra pozzi e sorgenti) e 2 emissioni gassose (Figura 4.1.1). Oltre ai campioni che fanno parte della Rete di Sorveglianza, sono state prelevate le acque di 4 pozzi che hanno subito variazioni termiche prima del sisma del 21 agosto 2017. Le caratteristiche chimico-fisiche dei campioni prelevati permettono di ricavare indicazioni sullo stato del sistema geotermico dell'isola.

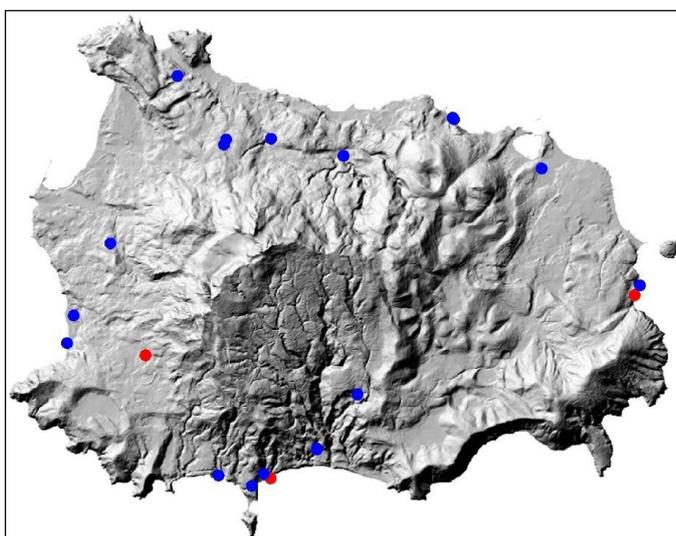


Figura 4.1.1 – Ubicazione dei punti di campionamento: blu = acque, rosso = gas liberi.

Il sistema idrotermale di Ischia è interposto tra la sorgente magmatica e le falde superficiali. Il sistema idrotermale è composto da reservoir sovrapposti e probabilmente interagenti (Di Napoli et al., 2009, 2011): i reservoir più superficiali (150-300 m sotto il livello del mare e temperature stimate di circa 150-200°C), denominati endmember Serrara e Citara, alimentano il settore SW dell'isola, il più profondo (>-1000 m slm e T di 270°C e bassa salinità) noto come endmember di Casamicciola, alimenta la porzione N dell'isola. Le variazioni composizionali delle manifestazioni termali presenti nell'isola riflettono il mixing tra (almeno) 5 componenti: acqua marina, acqua meteorica, gli endmember idrotermali di Casamicciola e Serrara di origine meteorica e l'endmember idrotermale di Citara che rappresenta un'acqua marina chimicamente modificata per interazione con le rocce e parzialmente diluita da acque meteoriche. La composizione delle acque sotterranee è determinata dal mescolamento in varie proporzioni tra due o più termini dei suddetti componenti.

La composizione isotopica di C della CO₂ (tra 0 ‰ e -3.0 ‰) e dell'He (~3.5 R/Ra) nei fluidi campionati testimoniano l'interazione fra fluidi magmatici, geotermici e i sistemi idrici superficiali. Dal 19 al 21 giugno sono stati eseguiti i campionamenti di acque termali e gas fumarolici appartenenti alla rete geochimica di monitoraggio. In ogni campione sono stati determinati la composizione chimica e isotopica (¹⁸O e ¹³C dell'acqua e ¹³C_{CO2} e He R/Ra nel gas).

I parametri chimico-fisici delle acque (pH, EC, T, Eh) sono stati misurati sul campo così come le temperature dei gas fumarolici. La analisi chimiche delle acque non sono state ancora effettuate e le valutazioni per il primo semestre saranno fatte sui parametri chimico-fisici.

L'osservazione dei dati acquisiti non ha evidenziato variazioni rilevanti rispetto quelli degli anni precedenti. Le variazioni osservate, infatti, ricadono nei range delle oscillazioni stagionali e sono riconducibili a processi di mixing fra acque marine, meteoriche ed una componente profonda, nonché a fenomeni di interazione con rocce. L'entità delle variazioni non è sostanzialmente variata negli ultimi dieci anni indicando una sostanziale stabilità delle condizioni dei reservoir geotermali (Figura 4.1.2).

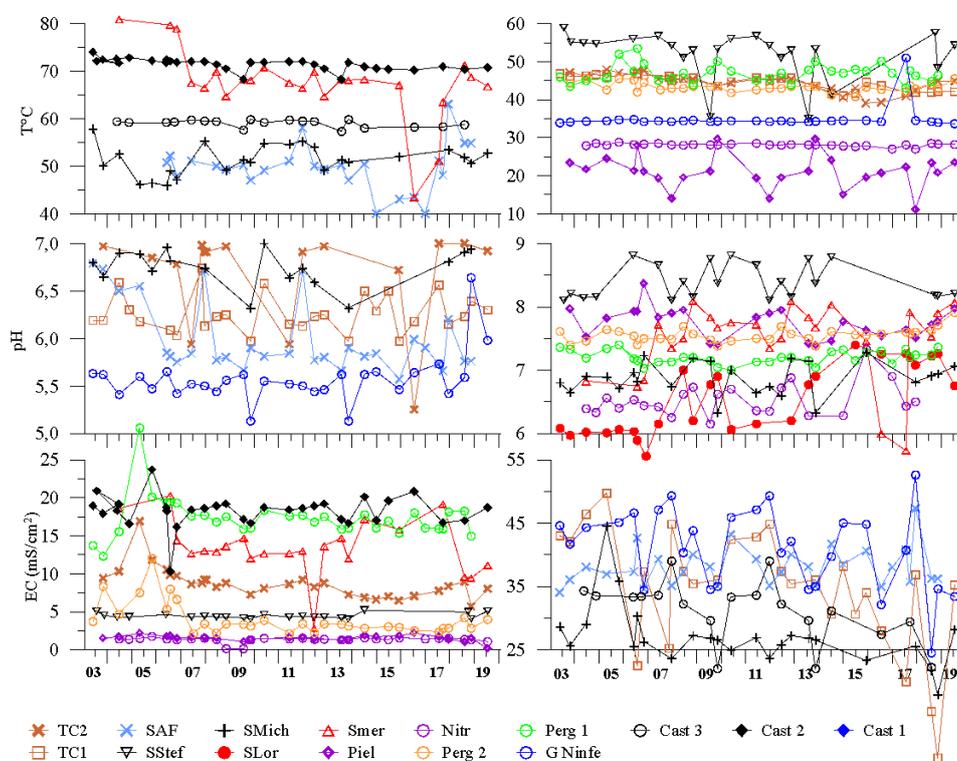


Figura 4.1.2 – Variazioni temporali di temperatura (°C), conducibilità (mS/cm²) e pH delle acque campionate.

Le concentrazioni di alcalinità totale (HCO₃ e CO₃) nelle acque campionate (Figura 4.1.3) non presentano variazioni significative. Il trend in aumento osservato nel campione Perg 2 a partire dal 2017 è contenuto nel range compositazionale tipico di questo campione.

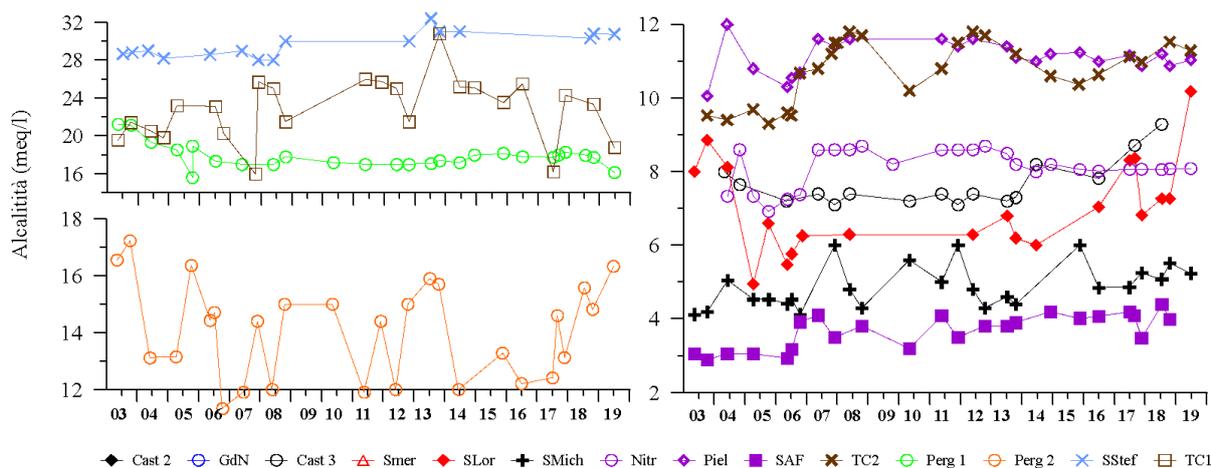


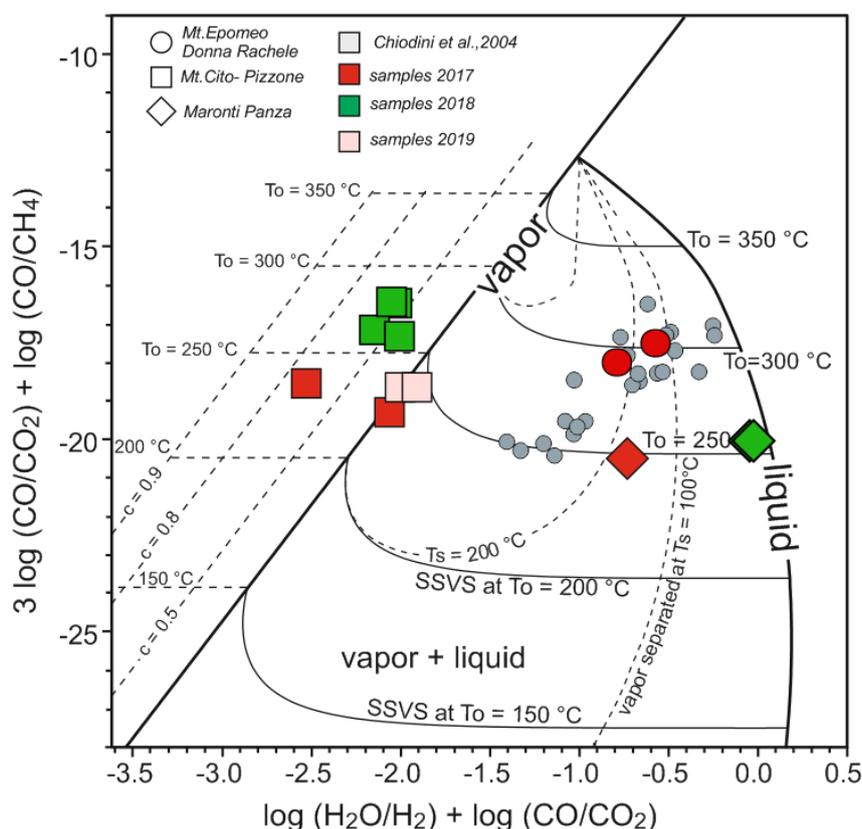
Figura 4.1.3 - Variazione temporale dell'alcalinità totale (meq/l) nelle acque campionate.

4.2 Attività fuori Convenzione (a cura di INGV – Osservatorio Vesuviano)

Studio e monitoraggio dell'area fumarolizzata di Mt.Cito.

Nel primo semestre 2019, da parte dell'Osservatorio Vesuviano, sono proseguite le attività di studio e monitoraggio dell'area fumarolizzata del Mt. Cito (località Pizzone), dove erano state segnalate variazioni dell'attività di degassamento in concomitanza con gli eventi sismici dell'agosto 2017. In particolare era stato segnalato un aumento di temperatura delle fumarole e la presenza di vegetazione secca nelle aree limitrofe. A settembre 2017 era stata campionata per la prima volta in tempi recenti la maggiore emissione fumarolica nell'area in località Pizzone caratterizzata da un elevato flusso e da una temperatura di emissione di ~ 98 °C. La composizione dei campioni raccolti indicava per il serbatoio idrotermale che alimenta queste manifestazioni condizioni di equilibrio a temperatura di ~ 230 °C e una bassa frazione di vapore separata. Temperature di equilibrio più basse rispetto alle condizioni stimate per le fumarole di "Donna Rachele" (Mt. Epomeo), dove le condizioni di equilibrio suggeriscono $T >$ di 300 °C con una frazione di vapore separata molto elevata, indicativa di una ebollizione energetica del sistema idrotermale (Figura 4.2.1; Chiodini et al., 2004). Nel diagramma geotermometrico di Figura 4.2.1, (per la cui interpretazione si rimanda ai lavori di Chiodini e Marini (1998) e Chiodini et al., 2004) sono riportate le composizioni chimiche dei campioni prelevati dopo gli eventi sismici dell'agosto 2017 insieme alle composizioni disponibili delle fumarole di "Donna Rachele".

Figura 4.2.1 - Diagramma di equilibrio $3\log(X_{CO}/X_{CO_2}) + \log(X_{CO}/X_{CH_4})$ vs $\log(X_{H_2O}/X_{H_2}) + \log(X_{CO}/X_{CO_2})$ nel sistema H-C-O (Chiodini e Marini 1998). Nel diagramma sono riportati i valori teorici di una fase di vapore saturo (linea di vapore) e di una fase liquida saturo (linea liquido); i vapori che sono generati per ebollizione di un liquido a temperatura fissa e a diverse temperature di separazione T_s (linee SSVS); i vapori che si generano per ebollizione di un liquido a diverse temperature originarie e a temperatura di separazione fissa T_s (linee 100 °C e 200 °C T_s); Le composizioni dei fluidi fumarolici di Ischia (Donna Rachele, simboli grigi) sono da Tedesco, (1996); Chiodini et al. (2004) e dati non pubblicati INGV-OV.



E' da segnalare che per le manifestazioni del Mt.Cito, nei periodi seguenti il campionamento di settembre 2017 sono state rilevate diminuzioni della temperatura di emissione dei fluidi e dell'attività fumarolica fino alla scomparsa di alcune manifestazioni, che in più occasioni non ha permesso il prelievo di campioni di gas rappresentativi (non contaminati, condensati o frazionati). Infatti, i pochi campioni prelevati nel 2018 sono risultati significativamente frazionati (condensati).

La composizione chimica dei campioni prelevati nel primo semestre 2019, indica condizioni di equilibrio simili a quelle stimate per i campioni del settembre 2017, ovvero di una temperatura di equilibrio in fase gas di ~ 230 °C.

Le variazioni dell'attività fumarolica osservate in questa area risultano sicuramente anomale e di difficile interpretazione. Poiché l'area è stata oggetto di numerose segnalazioni avvenute in concomitanza degli eventi sismici dell'agosto 2017 e riconducibili a variazioni dell'attività di degassamento, si è proceduto ad installare una stazione temporanea per la misura della temperatura della principale manifestazione fumarolica dell'area.

Le temperature registrate localmente con frequenza oraria nel periodo 3 marzo -12 giugno hanno mostrato ripetute oscillazioni, da valori di ~98 °C (temperatura di ebollizione del fluido fumarolico) fino a raggiungere un minimo di ~38 °C (Figura 4.2.2). Le numerose diminuzioni di temperatura dell'emissione registrate dalla stazione, a una prima analisi non sembrano essere correlate con variazioni dei parametri meteorologici (precipitazioni). Al momento non è possibile fornire un'interpretazione univoca delle variazioni osservate, i dati preliminari saranno utilizzati per definire le future attività da implementare per il monitoraggio dell'area.

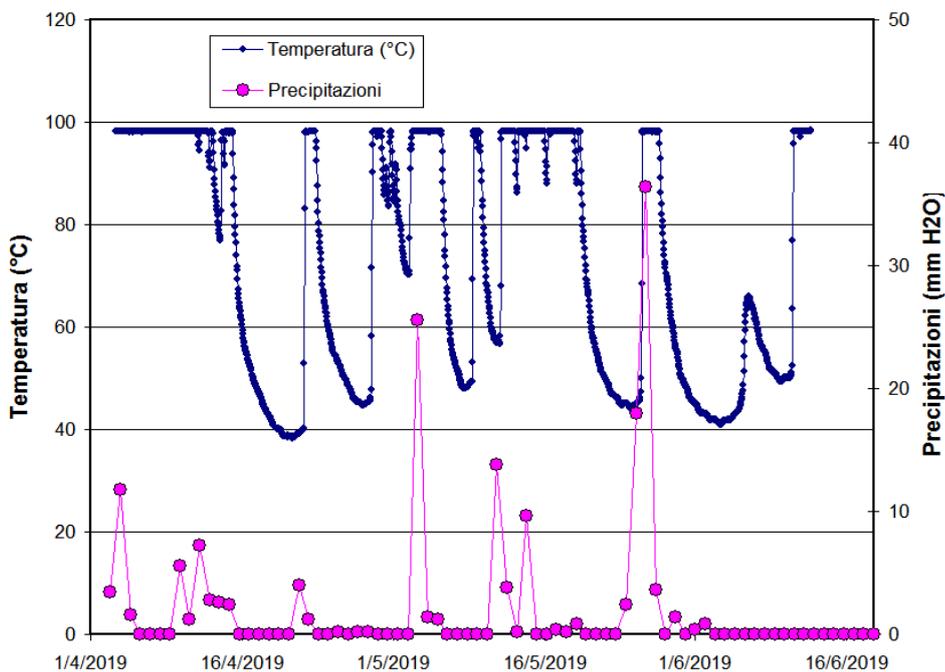


Figura 4.2.2 - Temperature misurate in continuo dell'emissione fumarolica di Mt.Cito (Pizzone), le precipitazioni registrate dal pluviometro di Forio sono riportate per confronto.

CONTRIBUTI PRINCIPALI

Acquisizione dati e Sala di Monitoraggio

A. Benincasa, G. Borriello, F. Cirillo, A. D'Alessandro, W. De Cesare, A. Di Filippo, S. Guardato, C. Martino, R. Peluso, G. Scarpato, V. Torello

Monitoraggio Sismologico

C. Buonocunto, A. Caputo, P. Cusano, D. Galluzzo, F. Liguoro, D. Lo Bascio, L. Nardone, M. Orazi, P. Ricciolino, A. Tramelli

Monitoraggio Geodetico

I. Aquino, V. Augusti, G. Berrino, S. Borgstrom, G. Brandi, V. D'Errico, P. De Martino, M. Dolce, A. La Rocca, S. Pinto, M. Polcari, G. Ricciardi, C. Ricco

Monitoraggio Vulcanologico

E. Bellucci Sessa, P. Belviso, F. Buongiorno, T. Caputo, A. Carandente, E. Marotta, R. Nave, F. Sansivero, M. Silvestri, G. Vilardo

Monitoraggio Geochimico

R. Avino, E. Bagnato, S. Bellomo, S. Caliro, F. Capecchiacci, A. Correale, W. D'Alessandro, C. Federico, E. Gagliano Candela, A. Gattuso, G. Giuffrida, L. La Pica, C. Minopoli, M.G. Misseri, G. Pecoraino, V. Prano, A. Santi, C. Scaletta

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia tutto il personale dell'Osservatorio Vesuviano e delle altre Sezioni INGV che a vario titolo ha contribuito al mantenimento del Sistema di Monitoraggio dei vulcani campani e alle attività di Sorveglianza garantendo sempre un elevato livello di funzionamento degli apparati e la qualità delle elaborazioni e analisi dei dati.

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 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.

Questo documento rientra nella categoria di livello 3 come definita nei “Principi della politica dei dati dell’INGV (D.P. n. 200 del 26.04.2016)”

