



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Il Monitoraggio dei Vulcani Campani

Secondo semestre 2019

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



Editor:

**Francesca Bianco
Mario Castellano**

Settembre 2021

<http://hdl.handle.net/2122/14820>

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	23
3.1 – Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine	23
3.2 – Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia	25
4 – Monitoraggio Geochimico	28
4.1 – Monitoraggio Geochimico dell'Osservatorio Vesuviano	28
4.2 – Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo	32
CAMPI FLEGREI	36
1 – Monitoraggio Sismologico	36
1.1 – Rete Sismica Permanente	36
1.2 – Rete Sismica Mobile	42
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	73
4 – Monitoraggio Geochimico	81
4.1 – Monitoraggio Geochimico dell'Osservatorio Vesuviano	81
4.1 – Monitoraggio Geochimico della Sezione Roma 1	93
ISCHIA	95
1 – Monitoraggio Sismologico	95
1.1 – Rete Sismica Permanente	95
1.2 – Rete Sismica Mobile	99
2 – Monitoraggio Geodetico	101
2.1 – Rete GPS	101
2.2 – Rete Tiltmetrica	103
2.3 – Interferometria SAR	105
3 – Monitoraggio Vulcanologico	107
3.1 – Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia	107
4 – Monitoraggio Geochimico	113
4.1 – Monitoraggio Geochimico della Sezione di Palermo	113
4.2 – Attività fuori Convenzione: Studio e monitoraggio dell'area fumarolizzata di Mt.Cito	115
RINGRAZIAMENTI	118
DISCLAIMER – Responsabilità e proprietà dei dati	118

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 secondo 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 SECONDO SEMESTRE 2019

VESUVIO

SISMOLOGIA - Nel corso del secondo semestre 2019 sono stati registrati 566 terremoti vulcano-tettonici la maggior parte dei quali di magnitudo inferiore a 2.0 ($M_{dmax}=2.1\pm 0.3$).

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.

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. Nel secondo semestre 2019 è operativa una nuova stazione i cui dati preliminari confermano l'andamento precedente.

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

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.

CAMPI FLEGREI

SISMOLOGIA - Nel corso del secondo semestre 2019 ai Campi Flegrei sono stati registrati 404 terremoti la maggior parte dei quali di magnitudo inferiore a 2.0 ($M_{dmax} = 3.1\pm 0.3$). Il terremoto di Md 3.1 del 06/12/2019 alle 00:17 UTC risulta, attualmente, l'evento di massima energia registrato ai Campi Flegrei a partire dalla ripresa di questa fase bradisismica iniziata nel 2005. La maggior parte degli eventi localizzati ricade nell'area compresa tra il bordo meridionale del cratere di Astroni e Pozzuoli-Solfatara-Pisciarelli a profondità fortemente concentrate nei primi 2 km.

DEFORMAZIONI DEL SUOLO - Nel periodo luglio-dicembre 2019, seppur in presenza di oscillazioni nelle serie temporali, è riscontrabile un sollevamento con valori massimi di circa 0.7cm/mese che ha mostrato un incremento nelle settimane tra la fine di novembre e gli inizi di dicembre per poi ritornare ai consueti valori medi dopo lo sciame del 6 dicembre (con evento di Md=3.1). Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 31 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 secondo 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.

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.

GEOCHIMICA - Le attività di sorveglianza geochimica 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 6 °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.

ISCHIA

SISMOLOGIA - Nel corso del secondo semestre 2019 sono stati registrati 9 terremoti di bassa magnitudo ($M_{dmax} = 0.9 \pm 0.3$).

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

Le direzioni d'inclinazione del suolo confermano il pattern d'inclinazione prevalente verso N ma che tende a ruotare verso W.

I dati satellitari non evidenziano deformazioni apprezzabili.

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

GEOCHIMICA - I dati geochimici acquisiti nel secondo semestre 2019 non hanno mostrato variazioni rilevanti ricollegabili a modifiche dell'attività vulcanica. La stabilità nella composizione chimica dei fluidi campionati riflette la stabilità del sistema vulcanico e geotermico.

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

Secondo semestre 2019

Aquino I.¹, Augusti V.¹, Avino R.¹, Bagnato E.¹, Bellomo S.³, Bellucci Sessa E.¹, Belviso P.¹, Benincasa A.¹, Berrino G.¹, Borgstrom S.¹, Borriello G.¹, Brandi G.¹, Buongiorno F.², Buonocunto C.¹, Caliro S.¹, Capecchiacci F.¹, Caputo A.¹, Caputo T.¹, Carandente A.¹, Cirillo F.¹, Correale A.³, Cusano P.¹, D'Alessandro A.¹, D'Alessandro W.³, D'Errico V.¹, De Cesare W.¹, De Martino P.¹, Di Filippo A.¹, Dolce M.¹, Esposito R.¹, Federico C.³, Gagliano Candela E.³, Galluzzo D.¹, Gattuso A.³, Gaudiosi G.¹, Giuffrida G.³, Guardato S.¹, La Pica L.³, La Rocca A.¹, Liguoro F.¹, Lo Bascio D.¹, Marotta E.¹, Martino C.¹, Minopoli C.¹, Misseri M.G.³, Nardone L.¹, Nave R.¹, Orazi M.¹, Pecoraino G.³, Peluso R.¹, Pinto S.¹, Polcari M.², Prano V.³, Ricci T.⁴, Ricciardi G.¹, Ricciolino P.¹, Ricco C.¹, Sansivero F.¹, Santi A.¹, Scaletta C.³, Scarpato G.¹, Silvestri M.², Siniscalchi V.¹, Torello V.¹, Tramelli A.¹, Vilardo G.¹

¹ INGV - Osservatorio Vesuviano – Napoli

² INGV - Osservatorio Nazionale Terremoti – Roma

³ INGV - Sezione di Palermo

⁴ INGV - Sezione Roma 1



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.

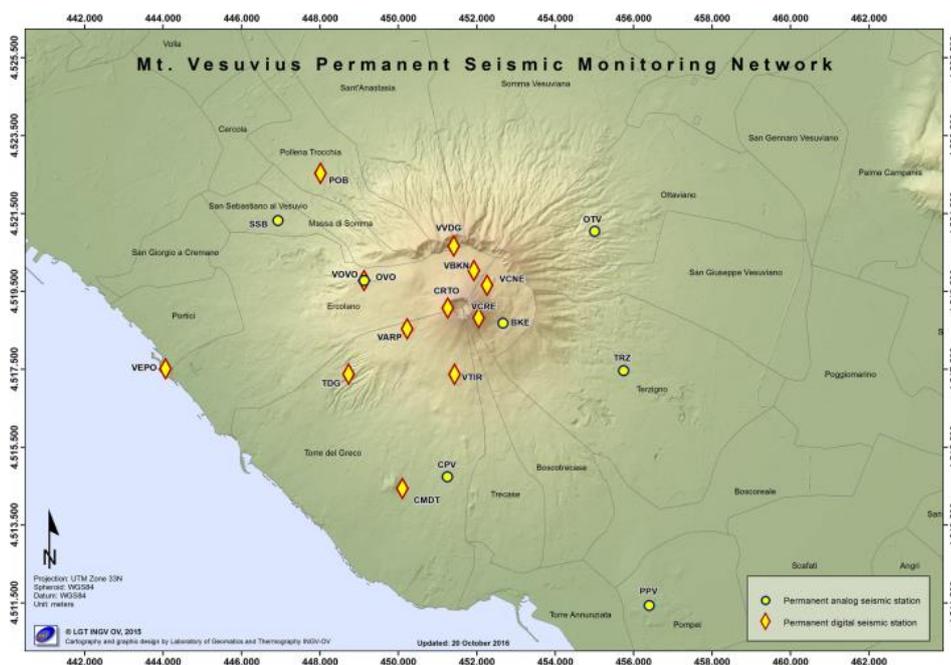


Figura 1.1.1 – Rete Sismica Permanente del Vesuvio.

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 acquisitore presente.

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

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		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

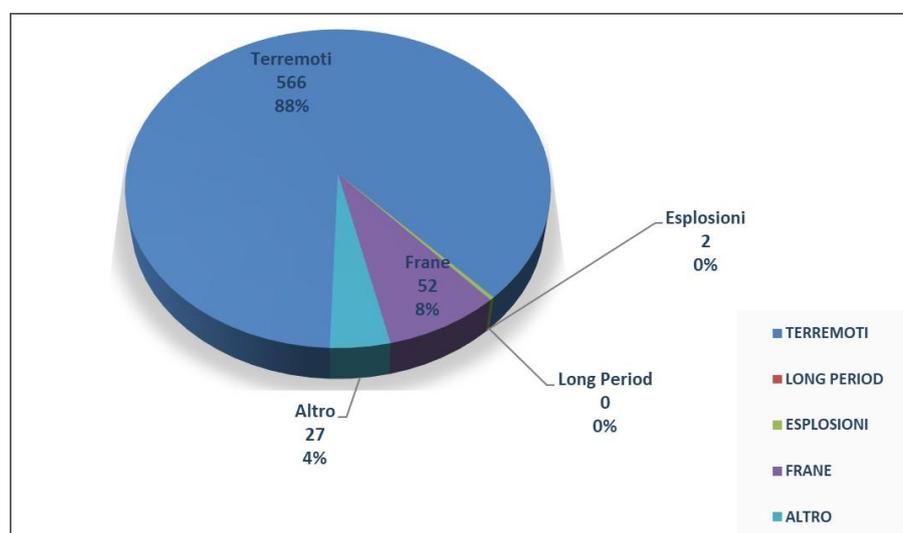
VEPO	40.8047N 14.3367E 2m	Vesuvio Enea Portici	11/9/2014	Lennartz 3D/20s Episensor ES-T	2 GILDA	ADSL
VTIR	40.8059N 14.4242E 619m	Vesuvio Località Tirone	19/6/2009	Guralp CMG-40T 60s, Infracyrus	GILDA	Wi-Fi
VTVA non operativa	40.7971N 14.4396E 366m	Trecase Ingresso Forestale	18/12/2014	6 Guralp VSP Flute (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

Nel corso del secondo semestre 2019, sono stati registrati un totale di 647 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 566 terremoti vulcano-tettonici, la maggior parte dei quali di magnitudo inferiore a 2.0 ($M_{dmax} = 2.1$). E' stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 493 eventi. Il numero totale di eventi registrati non si discosta significativamente da quello medio degli anni precedenti (Figura 1.1.3).

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



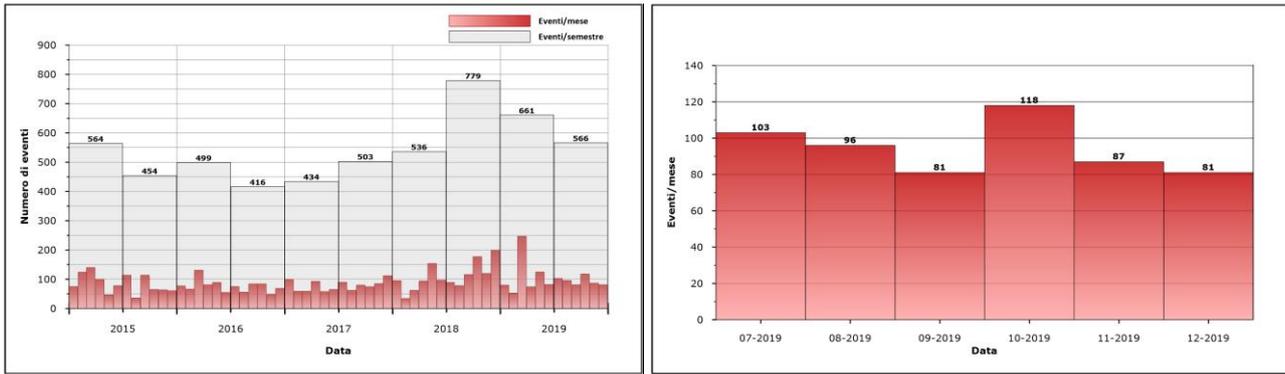


Figura 1.1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

I terremoti sono generalmente localizzati al di sotto dell'area craterica, con ipocentri fortemente concentrati nel primo chilometro di profondità (Figure 1.1.4 e 1.1.5).

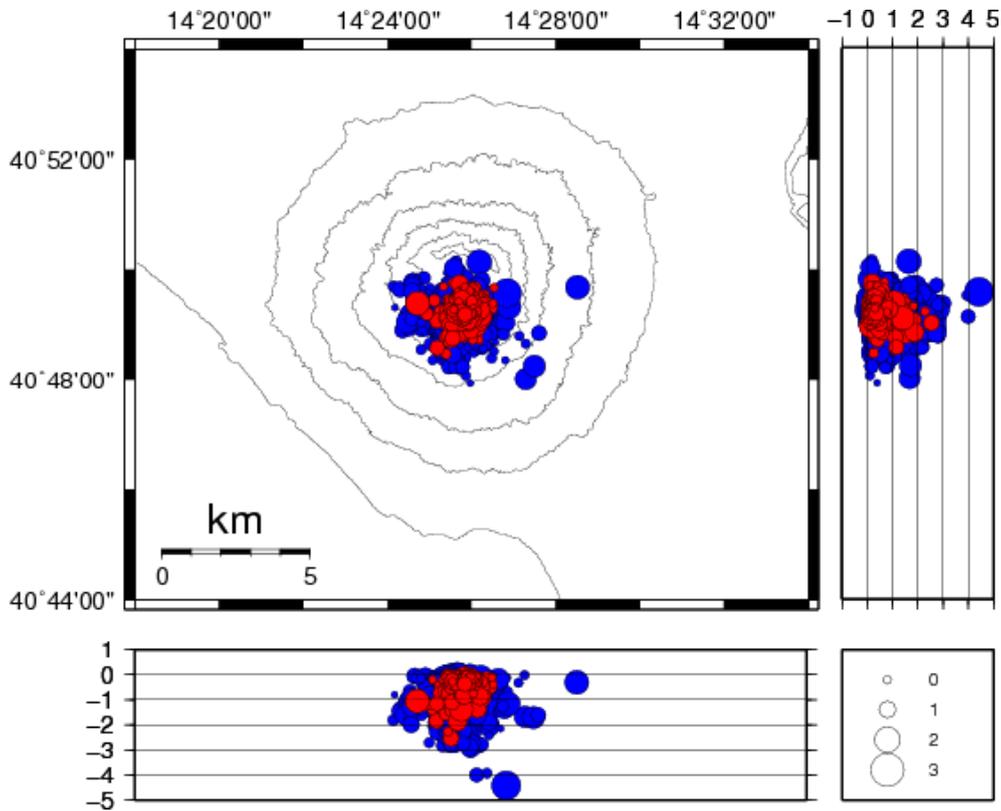


Figura 1.1.4 – Localizzazione degli ipocentri nell'area vesuviana durante gli ultimi 5 anni (in blu) e nel secondo semestre 2019 (in rosso).

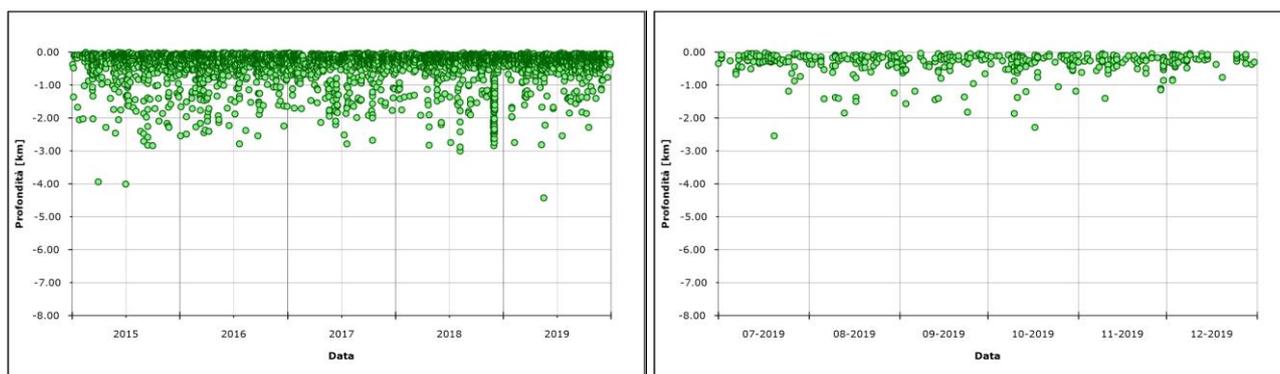


Figura 1.1.5 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti vesuviani localizzati nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

L’analisi del meccanismo focale dell’unico evento di magnitudo ≥ 2.0 (Tab.1.1.2) registrato durante il secondo semestre 2019 mostra una soluzione associabile ad un meccanismo normale con componente obliqua (Figura 1.1.6).

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

Data UTC	Md	Lat N	Long E	Prof. (km)
2019/08/16 20:15:43.98	2.1	40.8185	14.4355	0.69

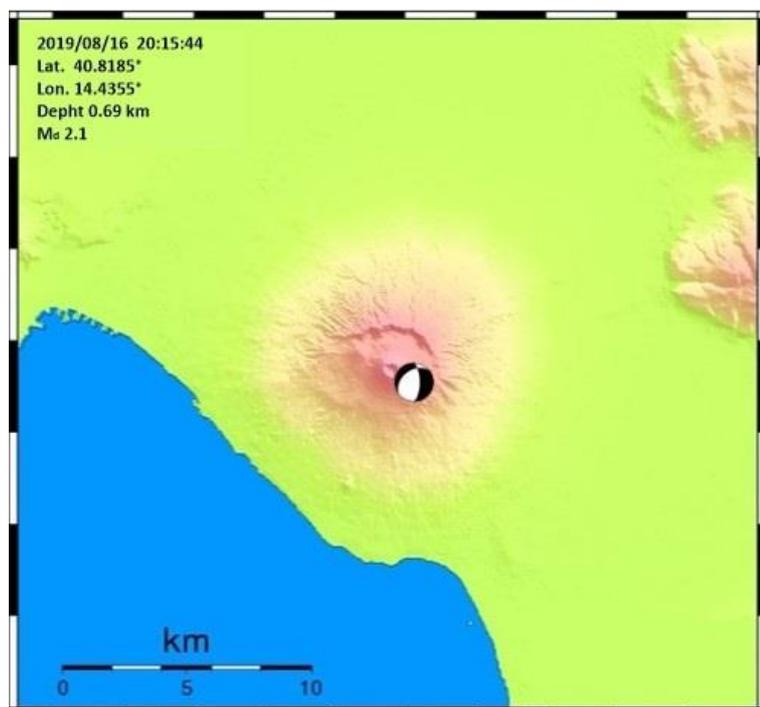


Figura 1.1.6 - Meccanismo focale dell’evento del 16/08/2019 di Md 2.1.

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).

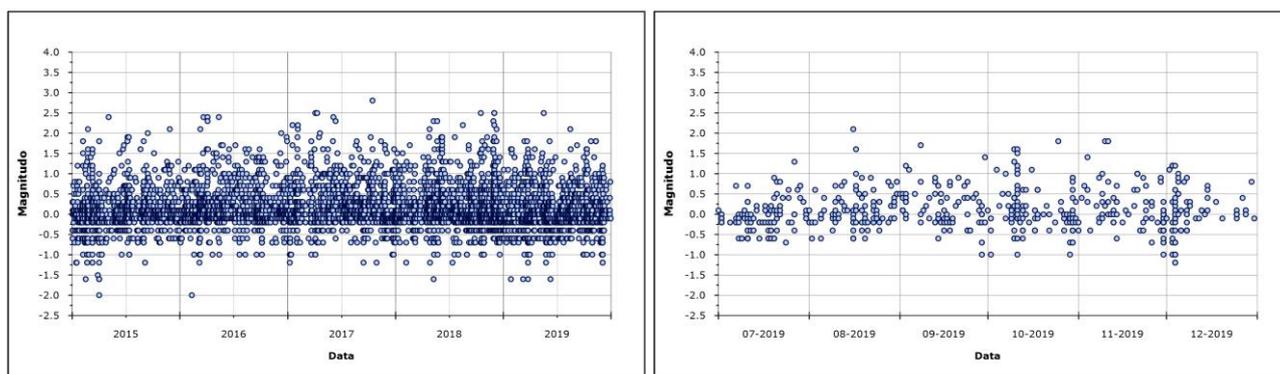


Figura 1.1.7 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

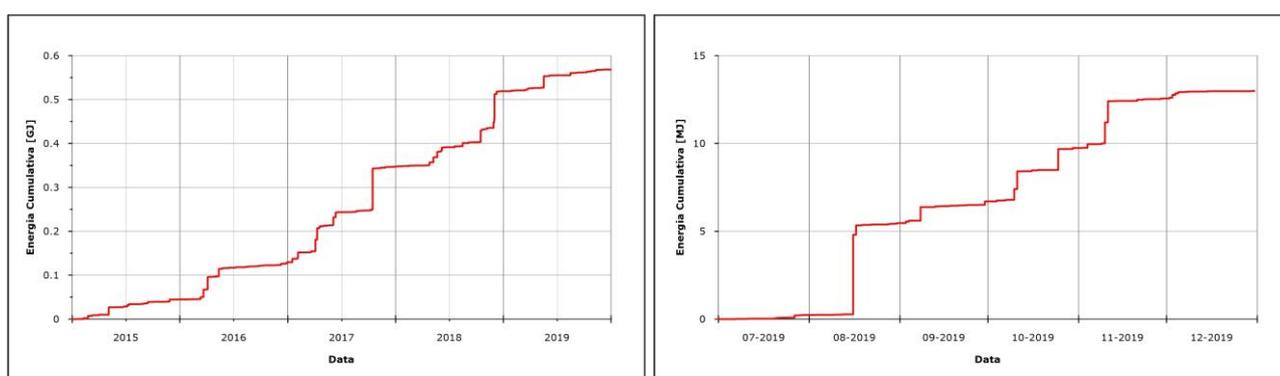


Figura 1.1.8 – Andamento cumulativo dell’energia rilasciata dai terremoti vesuviani nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra) calcolato attraverso la relazione di Gutenberg-Richter $\log E = 2.4 + 2.14 M - 0.054 M^2$.

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 secondo semestre 2019.

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

Inizio sciame	Fine sciame	N. eventi	M_{\max}
2019/10/11 17:14	2019/10/11 20:47	18	1.5
2019/10/30 23:00	2019/10/30 23:41	18	0.9

1.2 Rete Sismica Mobile

A tutto dicembre 2019 nell’area del Vesuvio sono operative 6 stazioni sismiche stand-alone a larga banda di cui una dotata anche di accelerometro e una stazione a corto periodo. Tutta la strumentazione funziona in modalità di acquisizione locale. La configurazione delle stazioni operative durante il secondo 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 secondo semestre 2019.

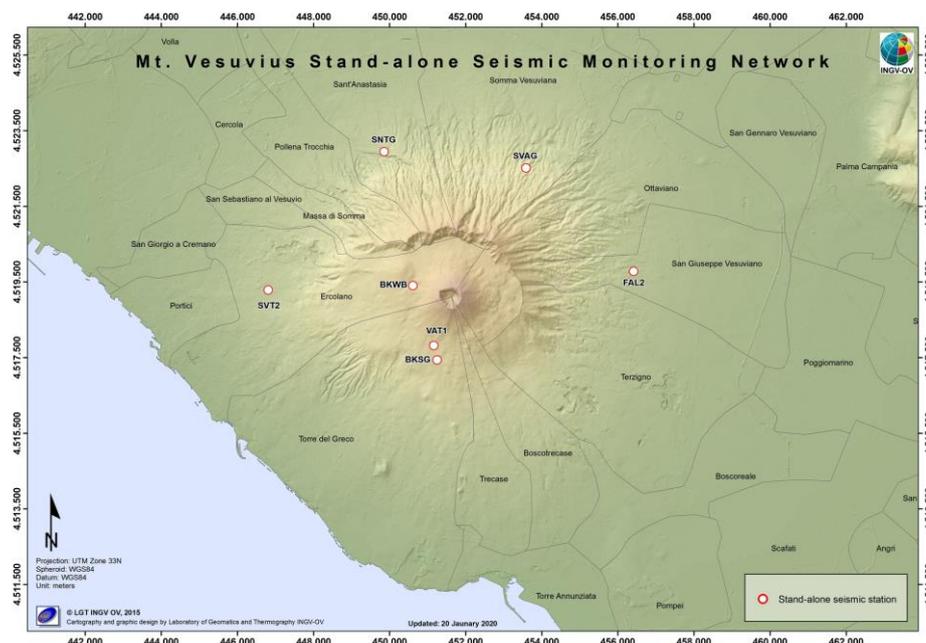


Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Sismica Mobile operativa al Vesuvio.

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
VAT1	40.8099N 14.4210E 677m	Vesuvio Forestale	Settembre 2019	Lennartz LE3Dlite	Gilda	Locale

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il secondo 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 2.1.1), 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.

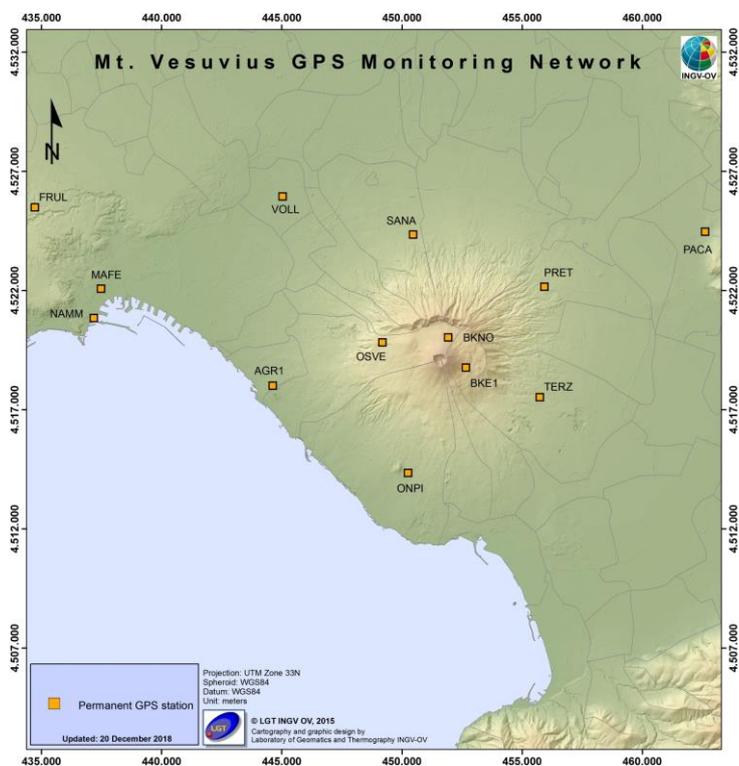


Figura 2.1.1 – Rete GPS del Vesuvio.

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.

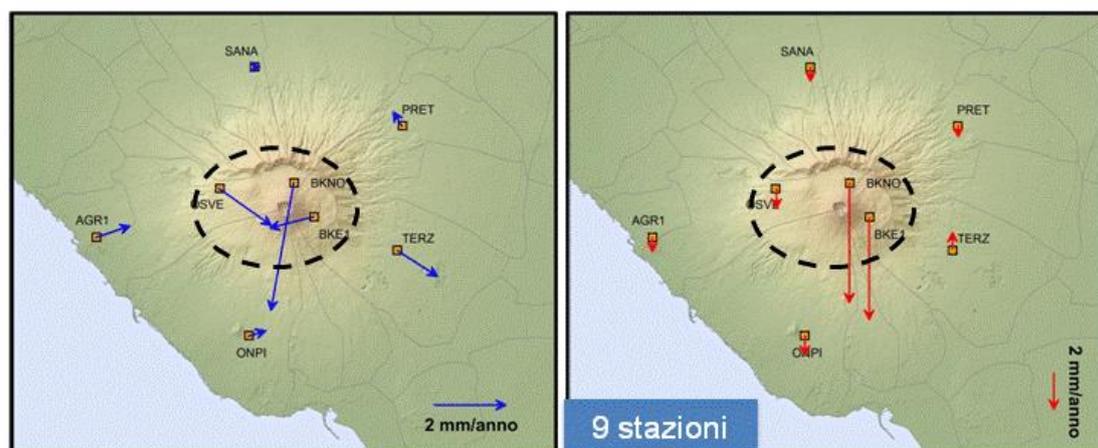


Figura 2.1.2 - Campo di velocità (in mm/anno) degli spostamenti orizzontali (in blu) e verticali (in rosso) nell'intervallo gennaio 2011-dicembre 2019.

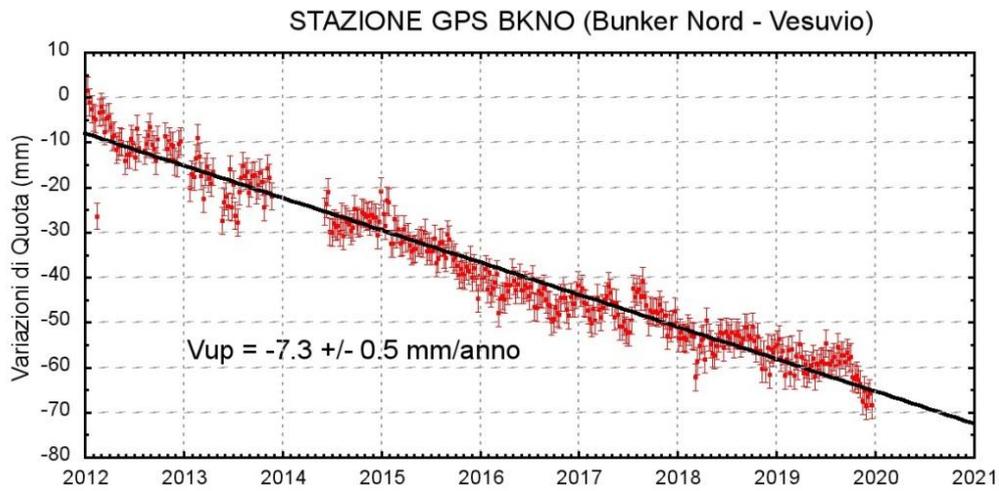


Figura 2.1.3 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di BKNO (Vesuvio) da gennaio 2012 a dicembre 2019.

2.2 Rete Tiltmetrica

L’attuale Rete Tiltmetrica del Vesuvio (Figura 2.2.1) consiste in 7 stazioni (le cui specifiche sono riportate nella Tabella 2.2.1), 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.

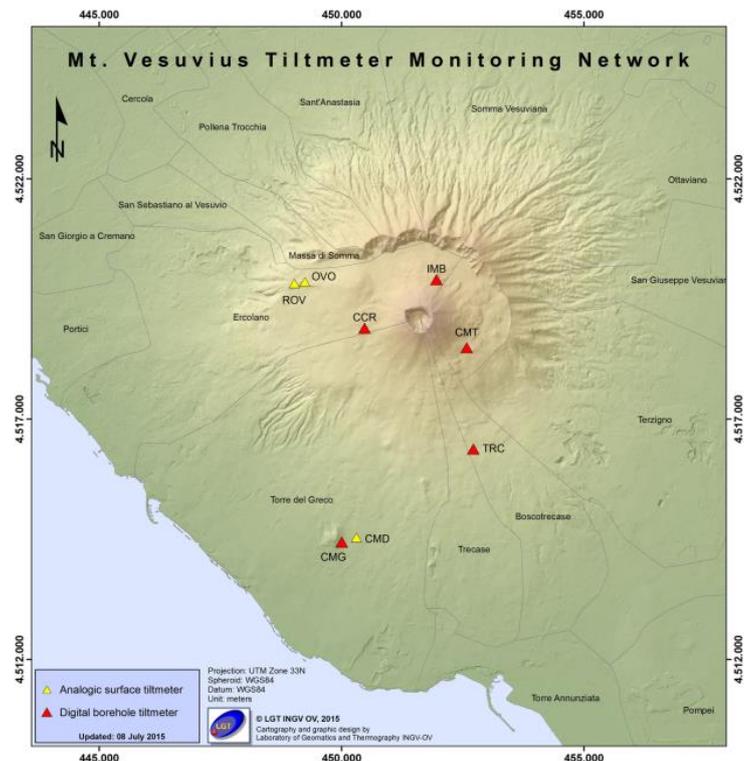


Tabella 2.2.1 – Stato della Rete Tiltmetrica del Vesuvio.

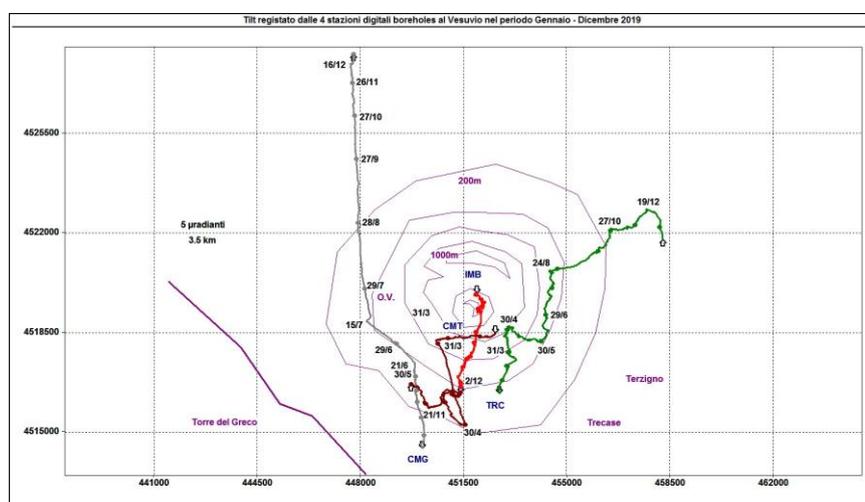
Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Profondità	Acquisizione	Trasmissione
OVO	40.8281N 14.3966E 608 m	Sede Storica OV	18/02/1993	Applied Geomechanics mod. 702	-25 metri	1'	ADSL
ROV	40.8280N 14.3972E 608 m	Sede Storica OV	28/04/2014	Applied Geomechanics mod. 702	Piano campagna	1'	GSM
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 secondo 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), SSW 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 2019. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 5 μ radianti o 3500 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. L'odografo di CMG è ridotto di 3 volte per facilitare il confronto tra le varie stazioni. I pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt indicano l'inizio di ogni mese.



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). 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 (≈ -25 m dal p.c.) acquisite nel corso del 2019.

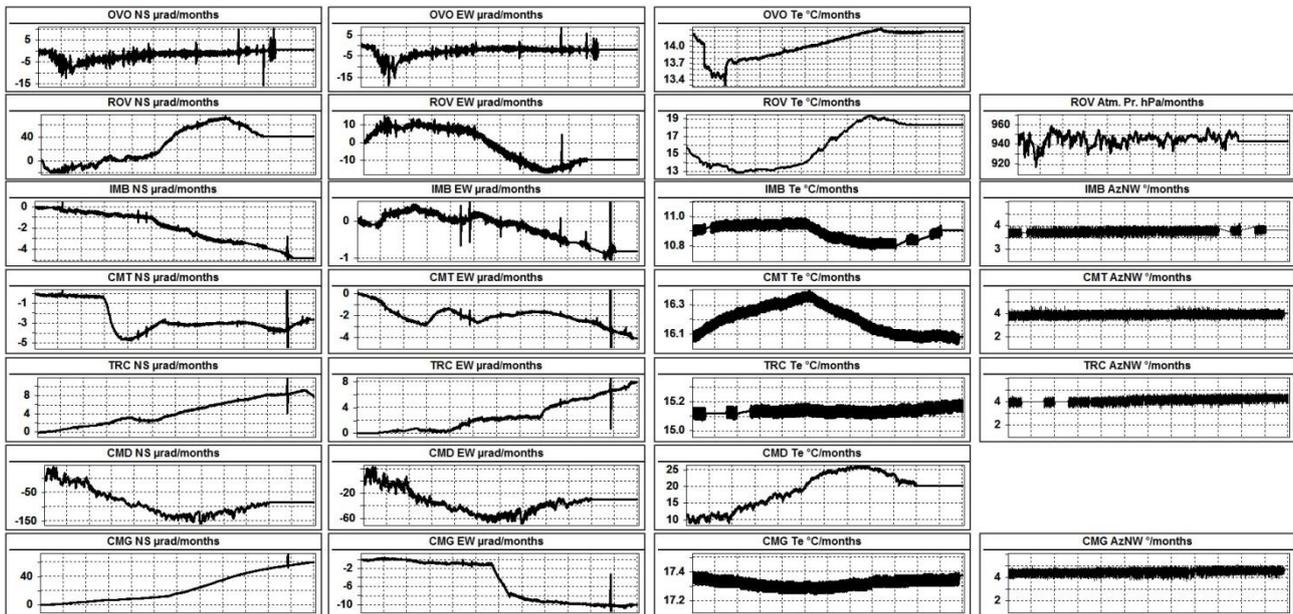


Figura 2.2.3 - Segnali registrati nel 2019 dai 7 sensori analogici e digitali della rete del Vesuvio. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW in μ radianti i cui valori di tilt crescenti nel tempo indicano rispettivamente la variazione di inclinazione del suolo a N e ad E. La terza colonna 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.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato e variazione termica associata relativi alle stazioni digitali durante il 2019.

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione TRC (372 m s.l.m.)	11.1 μ radianti a NE	0.05 $^{\circ}$ C
Stazione IMB (974 m s.l.m.)	4.7 μ radianti a SSW	-0.01 $^{\circ}$ C
Stazione CMG (117 m s.l.m.)	60.1 μ radianti a NNW	-0.01 $^{\circ}$ C
Stazione CMT (842 m s.l.m.)	4.8 μ radianti a SW	-0.02 $^{\circ}$ C

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; poiché, inoltre, i segnali acquisiti rappresentano una variazione di tilt e non una misura assoluta, sono stati tutti azzerati a partire da inizio anno.

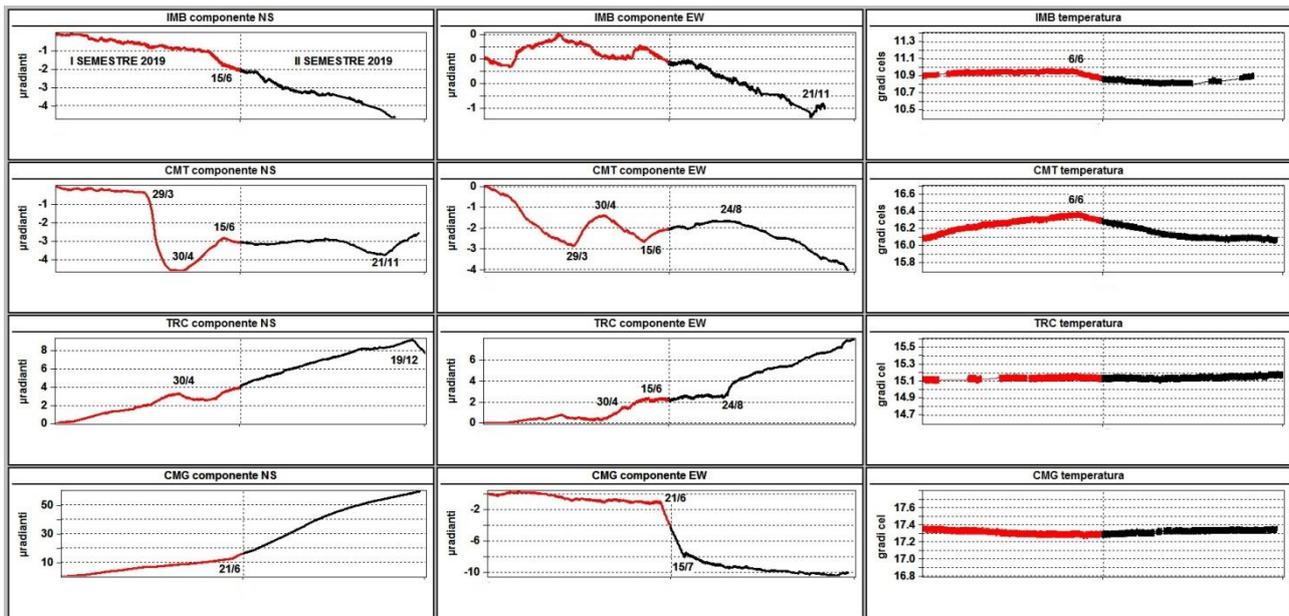


Figura 2.2.4 - Segnali registrati dalle 4 stazioni “borehole” della Rete Tiltmetrica del Vesuvio. Sono ordinate dal basso verso l’alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è invece relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 colonne riportano le componenti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

Successivamente ai tilting reversal osservati alle 4 stazioni nel primo semestre 2019 (alla cui Relazione semestrale si rimanda per i dettagli), il 15 luglio la stazione CMG mostra una decisa rotazione oraria della sua direzione di tilting che interrompe la polarizzazione in direzione NW che essa aveva mostrato dal 21 giugno. Successivamente, le componenti EW di TRC e CMT mostrano un chiaro cambiamento in azimuth dal 24 agosto, mentre a fine novembre CMT (comp. NS) e IMB (comp. EW) invertono nuovamente il loro trend, seguite il 19 dicembre da TRC (comp. NS).

In conclusione, dal mese di marzo 2019 sono state complessivamente rilevate 7 variazioni nella direzione di tilting, le quali hanno interessato in fasi alterne tutte le stazioni.

In ordine temporale, le anomalie in direzione hanno interessato in maggiore misura CMT il 29/3, CMT e TRC il 30/4, IMB il 30/5, IMB, CMT e TRC il 15/6, CMG il 21/6 ed il 17/7, TRC il 19/12. Il quadro cinematico che emerge da tali osservazioni mostra che dal marzo 2019 si sono verificate in area vesuviana diffuse variazioni tiltmetriche, peculiari in quanto hanno seguito a volte andamenti simili o speculari e che si sono maggiormente concentrate sulla porzione sudorientale della base del Gran Cono, non tralasciando però anche parte della zona costiera (Camaldoli della Torre).

Tali variazioni si configurano come un campo di deformazione aggiuntivo a quello generato dalla subsidenza del cratere e che tenderebbe a modulare quest’ultimo almeno dalla fine di marzo di quest’anno. Probabilmente esso è generato da variazioni di pressione di poro connesse a modifiche nella circolazione idrica sotterranea.

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.

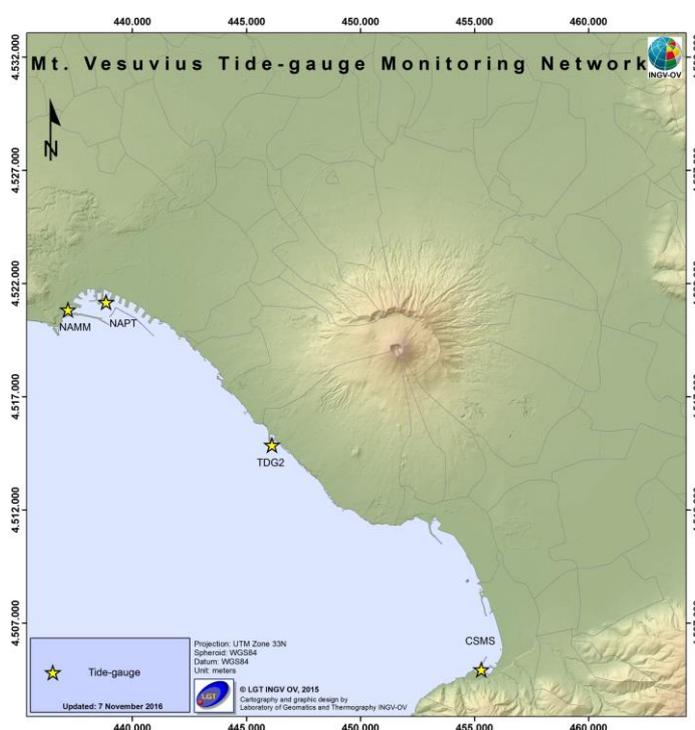


Figura 2.3.1 – Rete Mareografica del Vesuvio.

Tabella 2.3.1 – Stato della Rete Mareografica del Vesuvio.

Stazione	Coordinate	Località	Data installazione	Sensore	Acquisizione	Trasmissione
TDG2	40.7830N	Torre del Greco	02/09/2008	shaft encoder	<i>thalimedes</i>	GSM 1min
TDG3	14.3614E	Torre del Greco		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). Tale deformazione è da addebitarsi ad un malfunzionamento temporaneo della stazione TDG2, per cui è stata affiancata nello stesso sito un'altra stazione mareometrica "TDG3", per monitorare in sicurezza tali deformazioni. In definitiva, le analisi dei dati alle stazioni di Torre del Greco (TDG2/TDG3) (Fig. 2.3.2) e di Castellammare di Stabia (CSMS) (Fig. 2.3.3) non evidenziano particolari deformazioni.

Figura 2.3.2 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2019 – dicembre 2019, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Torre del Greco (TDG2/TDG3). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione di Napoli Molo S.Vincenzo (NAMM).

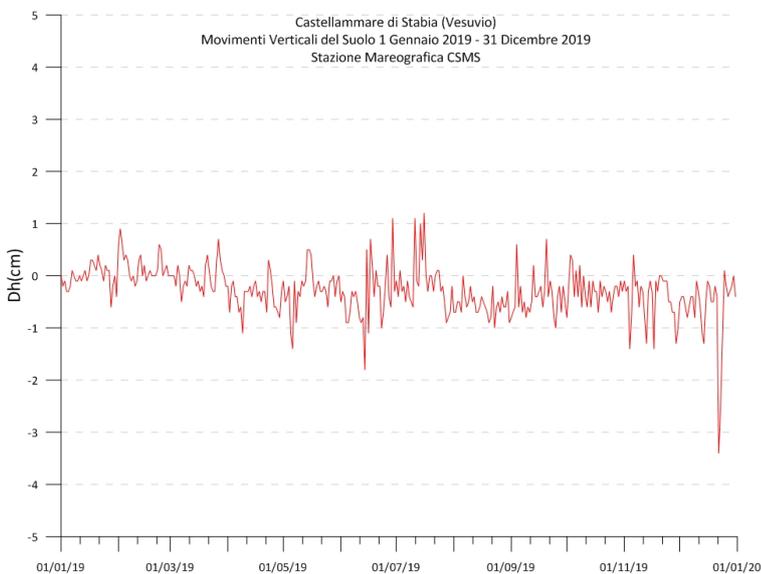
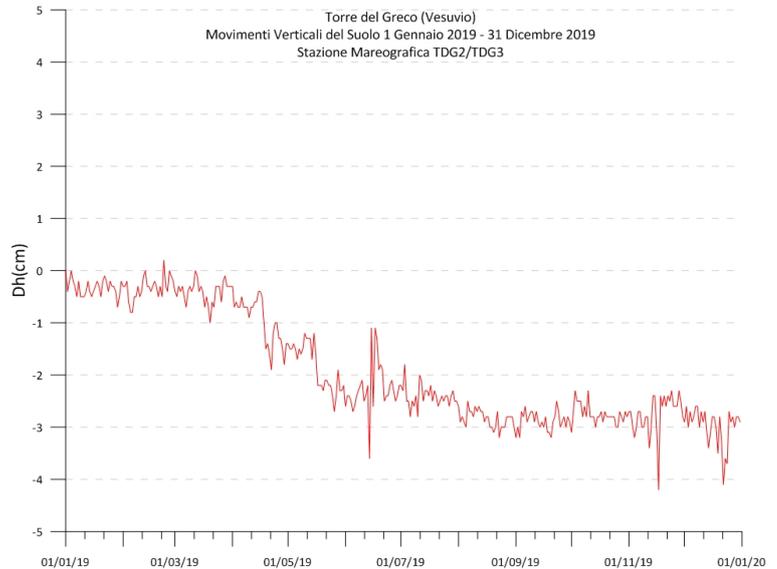


Figura 2.3.3 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2019 – dicembre 2019, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Castellammare di Stabia (CSMS). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e sono riferite alla stazione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

2.4 Interferometria SAR - Osservatorio Vesuviano e Osservatorio Nazionale Terremoti

I dati in banda X dalle missioni COSMO-SkyMed dell'Agencia Spaziale Italiana (ASI) utilizzati per la redazione del presente rendiconto si sono resi disponibili nell'ambito dell'iniziativa internazionale GEO-GSNL (Group on Earth Observations - Geohazard Supersites and Natural Laboratory).

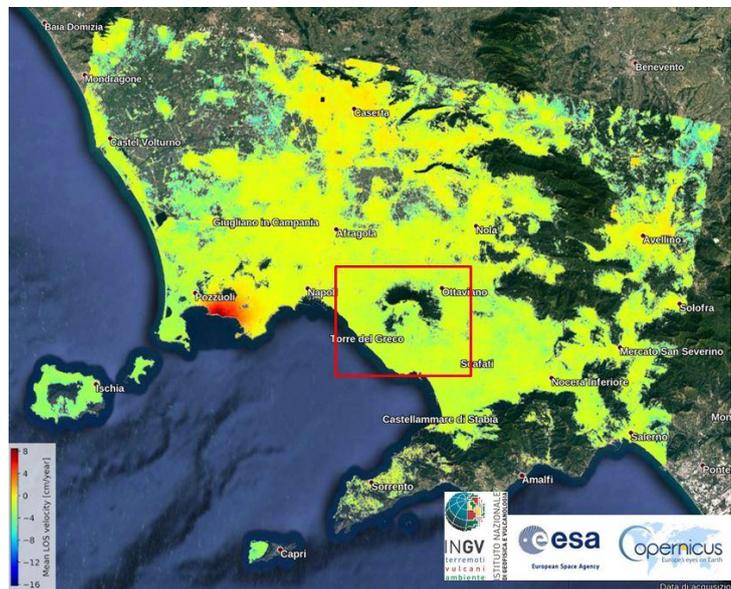
Sono stati inoltre utilizzati dati in banda C dei sensori Sentinel-1A/B dell'Agencia Spaziale Europea (ESA, European Space Agency) disponibili in rete attraverso i canali web della stessa Agencia.

Le elaborazioni interferometriche sono state effettuate avvalendosi di codici sia commerciali, che di pubblico dominio, disponibili in rete attraverso i canali web degli sviluppatori.

Al fine di fornire un quadro d'insieme delle deformazioni agenti nel Distretto Vulcanico Napoletano nel corso del 2019 (02/01/2019-16/12/2019), in Figura 2.4.1 viene riportata una mappa della velocità media di deformazione del suolo in linea di vista del sensore ricavata dai dati dei sensori Sentinel-1A/B dell'ESA.

Ad esclusione dell'area Flegrea, dall'analisi della figura non si evidenziano deformazioni degne di nota nel periodo analizzato, potenzialmente evidenziabili su serie temporali più lunghe, considerata l'entità verosimilmente bassa che le caratterizza.

Figura 2.4.1 - Mappa della velocità media di deformazione nella linea di vista del sensore (Sentinel-1A/B)(02/01/2019-16/12/2019) - nel riquadro in rosso l'area Vesuviana. Dati IWS - TOPS mode, orbite discendenti (22), swath 1.



InSAR - Analisi multi-temporale (anno 2019)

Il monitoraggio interferometrico in modalità multi-temporale dell'area Vesuviana per l'anno 2019 (02/01/2019-16/12/2019), è stato effettuato a partire da un *dataset* composto da 54 immagini dei sensori Sentinel-1A/B dell'ESA, che hanno consentito di generare 255 interferogrammi.

I due parametri *Baseline* temporale (B_{temp} , gg) e perpendicolare (B_{\perp} , m) sono stati, rispettivamente:

- $6 \leq B_{temp} \leq 30$
- $1 \leq B_{\perp} \leq 171$

Altri parametri d'interesse sono:

- Modalità d'acquisizione: TOPS mode, IWS (Interferometric Wide Swath)
- Orbita: Discendente (orbita 22, swath 1)
- Angolo di Incidenza (θ): $\sim 39^\circ$
- Fattore di multi-look: 8×2 (range x azimuth, dimensione del pixel a terra ~ 30 m)

Le orbite precise utilizzate per il processamento dei dati si sono rese disponibili sui canali web dell'ESA. I dati sono stati elaborati mediante codici *public domain*; la correzione del ritardo atmosferico è stata effettuata avvalendosi del modello atmosferico globale ERA-5 dello *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*.

Per la rimozione del contributo topografico nella fase interferometrica è stato utilizzato un modello digitale del terreno ricavato da dati SRTMGL1 (*SRTM Global 1arcsec*) opportunamente ridotto all'ellissoide di riferimento WGS84.

Il risultato di tale elaborazione ha consentito di generare sia la mappa della velocità media di deformazione del suolo (Figura 2.4.1), sia le serie temporali di deformazione su pixel coerenti della scena.

Come si evince dall'analisi della suddetta figura, nel periodo considerato non si evidenziano deformazioni degne di nota nell'area Vesuviana.

Ciò è imputabile ad un'entità verosimilmente bassa/molto bassa delle deformazioni in atto, potenzialmente evidenziabili solo processando serie temporali più lunghe (anni), oltre a considerare l'estesa decorrelazione dovuta alla considerevole copertura vegetale dell'intero edificio vulcanico.

InSAR - Analisi multi-temporale (2011-2019)

L'analisi multi-temporale dell'area Vesuviana per l'intervallo 01/2011-12/2019 è stata effettuata a partire da un *dataset* composto da 493 immagini fornite dalle missioni COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Ciò ha consentito di generare 3782 interferogrammi, che sono stati quindi filtrati e srotolati per calcolare i parametri d'interesse.

I valori massimi dei due parametri *Baseline* temporale (Btemp) e perpendicolare (B \perp) sono stati, rispettivamente:

- Btemp max = 120 giorni
- B \perp max = 280 m

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 l'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* (rumore) tipico delle immagini SAR, si è scelto di utilizzare fattori di *multi-look* tali da avere una dimensione del pixel a terra di ~ 30 m sia in range che in azimuth.

Per la rimozione del contributo in fase della topografia è stato utilizzato il modello di elevazione digitale del terreno a 12 m 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.

Durante il secondo semestre del 2019, è proseguito quindi l'aggiornamento delle serie temporali InSAR delle aree Vesuviana e Flegrea dai dati Cosmo-SkyMed dell'ASI, rispetto a quanto già riportato nel rendiconto del precedente semestre 2019.

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, Tabella 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 il 12 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. Dopo il necessario periodo di test e collaudo dell'intera catena strumentale, la regolare acquisizione di n. 3 scene IR nel corso della notte (00:00; 02:00; 04:00) è ripresa il 12 luglio.



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)

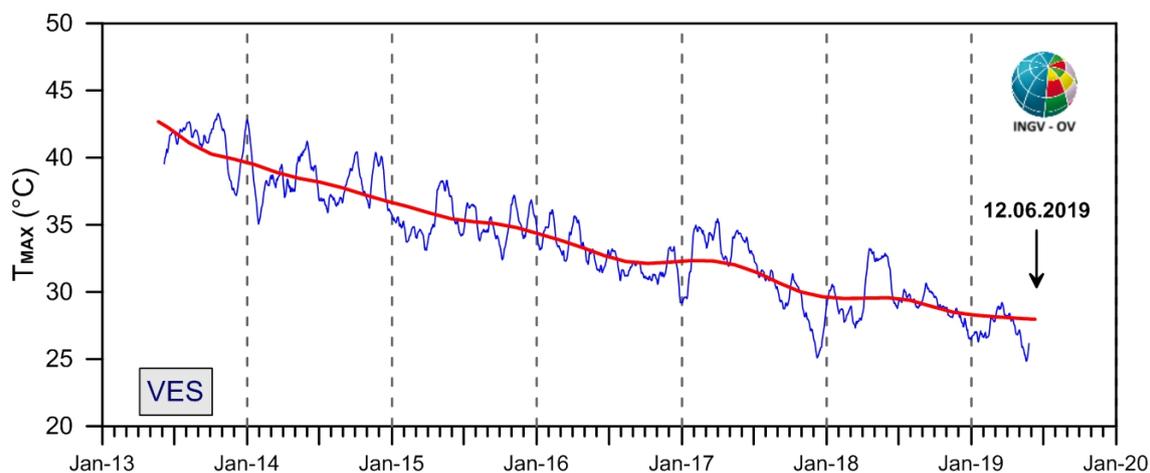


Figura 3.1.2 - Stazione Vesuvio (VES). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR: media mensile (blu), trend a lungo termine (rosso).

Per quanto riguarda i risultati dell'analisi delle serie temporali mostrati in figura 3.1.2 si riporta nel seguito quanto già commentato nella relazione relativa al Primo Semestre 2019.

L'analisi della serie temporale in Figura 3.1.2 evidenzia un costante decremento del campo di temperatura superficiale dell'area target fino a gennaio 2017.

Dopo tale data e fino a giugno 2019, la serie temporale delle temperature massime (linea blu) 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 (linea rossa) mostra un andamento stazionario con leggera tendenza alla diminuzione.

Per quanto invece riguarda l'analisi dei dati acquisiti con la nuova stazione va considerato che, in virtù dell'ancor troppo breve periodo di acquisizione, non è possibile applicare metodi statistici per la rimozione dei trend stagionali dalla serie temporale dei valori di temperatura grezzi ricavati dal processamento dei nuovi dati immagine IR.

Per tale motivo ed allo scopo di effettuare un confronto, anche se qualitativo, tra i dati acquisiti dalle due differenti stazioni, nel grafico di figura 3.1.3 sono riportati i valori di temperatura media relativi ad ogni immagine acquisita con la precedente strumentazione (linea blu) e con la nuova (linea rossa).

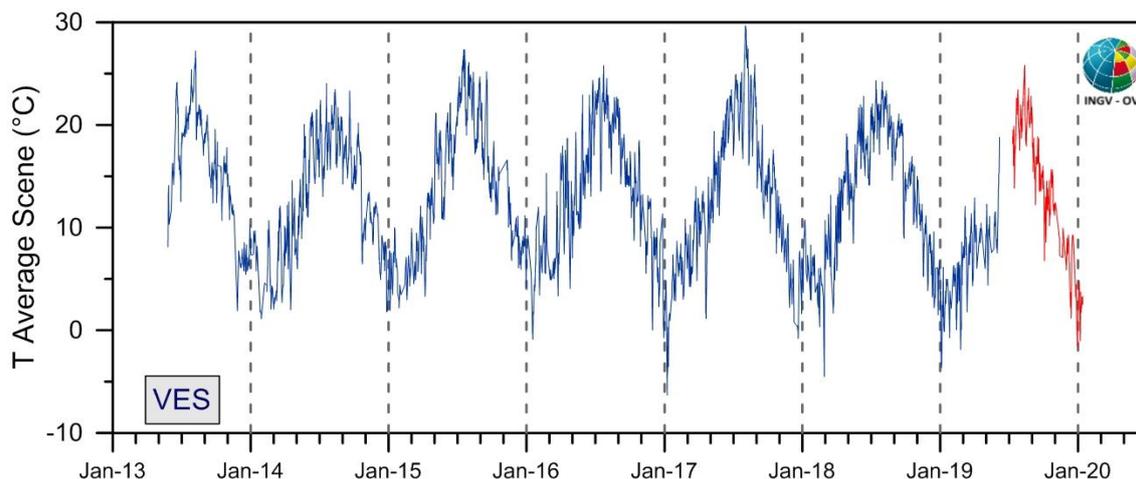


Figura 3.1.3 - Stazione Vesuvio: Serie temporale dei valori di temperatura media relativi ad ogni immagine acquisita con la precedente stazione (linea blu) e con quella di recente installazione (linea rossa).

Ciò che si rileva è che i valori di temperatura media, relativi alla serie temporale delle immagini IR acquisite dalla nuova stazione del Vesuvio nel secondo semestre 2019, sono del tutto confrontabili con quelli misurati in precedenza nello stesso periodo dell'anno.

Tale osservazione suggerisce il perdurare di un andamento sostanzialmente stazionario delle temperature superficiali dell'area monitorata.

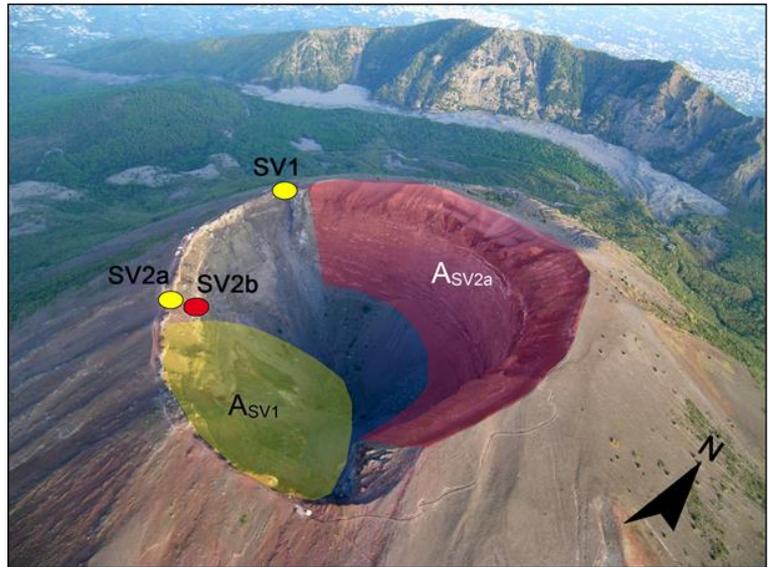
3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia

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 ($<0.06^{\circ}\text{C}$ $+30^{\circ}\text{C}$). La termocoppia utilizzata è di tipo K, con errore strumentale di circa 0.1°C nell'intervallo $-200\div 1260^{\circ}\text{C}$. 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 secondo semestre 2019 sono state effettuate misure periodiche mensili.

Le fotocomposizioni del sito SV2 ripreso dal punto di stazione SV2a e quella del sito SV1 (Fig.3.2.1) sono state effettuate ogni mese ad eccezione di novembre e dicembre a causa di una nebbia intensa che non ha consentito la restituzione di corretti valori di temperatura nelle immagini. Invece è stato possibile rilevare sempre le misure puntuali nel sito SV2b (Fig. 3.2.1).

La comparazione delle fotocomposizioni d'immagini termiche del versante interno orientale del cratere, riprese dal punto stazione SV2a (Figura 3.2.1) da luglio a ottobre 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 50 a circa 68 °C). Questa temperatura massima non mostra significative variazioni rispetto agli anni passati fatta eccezione per le variazioni stagionali.

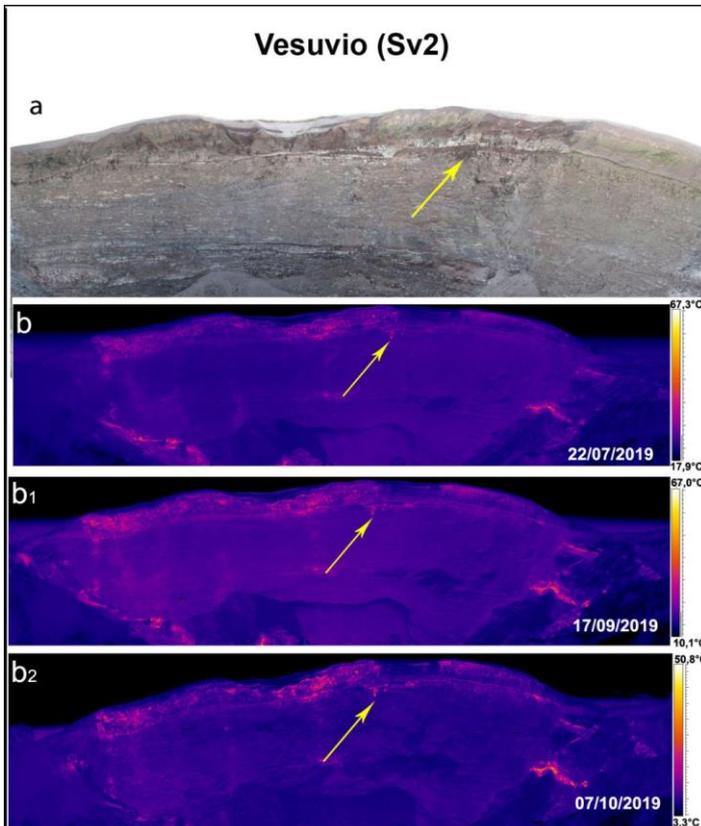
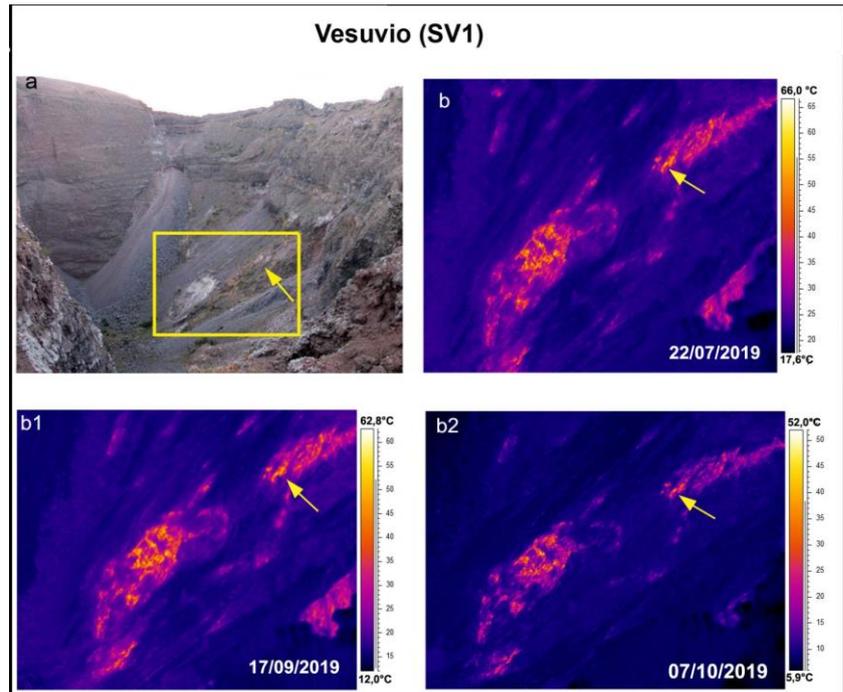


Figura 3.2.2 – Settore orientale del cratere del Vesuvio. Fotocomposizioni di immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 22/07/2019 (b), 17/09/2019 (b1) e 07/10/2019 (b2) dal punto stazione SV2a di Fig. 3.2.1.

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 22/07/2019 (b), il 17/09/2019 (b1) e il 07/10/2018 (b2) dal punto stazione SV1 di Figura 3.2.1; la freccia gialla indica l’area che costantemente è a più alta temperatura.



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 52 a circa 63 °C). Questa temperatura massima non mostra significative variazioni rispetto agli anni passati fatta eccezione per le variazioni stagionali.

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. Le temperature rilevate rientrano nelle medie stagionali degli anni precedenti.

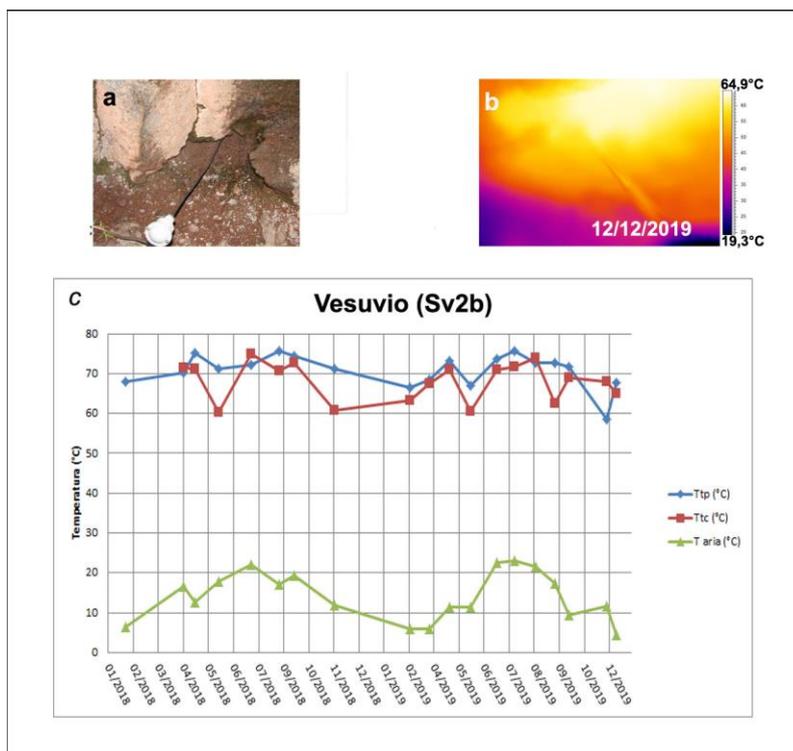


Figura 3.2.4 – Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese al punto SV2b di Figura 3.2.1, di una fumarola ubicata sul settore occidentale del cratere del Vesuvio. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria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



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

L'attività di sorveglianza geochimica effettuata dall'Osservatorio Vesuviano sono di seguito riportate:

- Campagne periodiche di campionamento dei gas fumarolici emessi dalla fumarola FC2 sita a fondo cratere del Vesuvio, analisi della composizione chimica (H₂O, CO₂, H₂S, H₂, Ar, N₂, CH₄, He) ed isotopica (⁴⁰Ar/³⁶Ar, δ¹⁵N_{N2}, δ¹³C_{CO2}; δ¹⁸O_{CO2}, δ²H_{H2O}, δ¹⁸O_{H2O}).
- Campagne periodiche di misura del flusso di CO₂ e della temperatura del suolo a 10 cm di profondità, su una maglia di punti fissi in area di bordo cratere (area anemometro) del Vesuvio.
- Campagne periodiche di campionamento delle maggiori fumarole di bordo cratere e analisi della composizione chimica.
- Misura in continuo del flusso di CO₂ dal suolo (ogni 2 ore), della temperatura della fumarola principale, del gradiente di temperatura del suolo, della pressione e della temperatura atmosferica (ogni 10 minuti) tramite le stazioni multiparametriche FLXOV6 installata in area bordo cratere (settore SW) e la stazione FLXOV7 installata in area di fondo cratere.

Entrambe le stazioni sono basate sull'acquisitore del tipo "GEMMA" sviluppato presso la sezione "Osservatorio Vesuviano" di Napoli, sono collegate via wi-fi alla rete di monitoraggio e trasmettono i dati in tempo reale alla Sala di Monitoraggio dell'Osservatorio Vesuviano.

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 a partire dall'anno scorso, 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.

I campioni prelevati e analizzati per la composizione chimica e isotopica, relativi al secondo semestre 2019, a causa della diminuita attività e scarso flusso della fumarola, sono risultati significativamente contaminati da aria e frazionati, di conseguenza non utilizzabili per fornire stime di pressione e temperatura del sistema idrotermale.

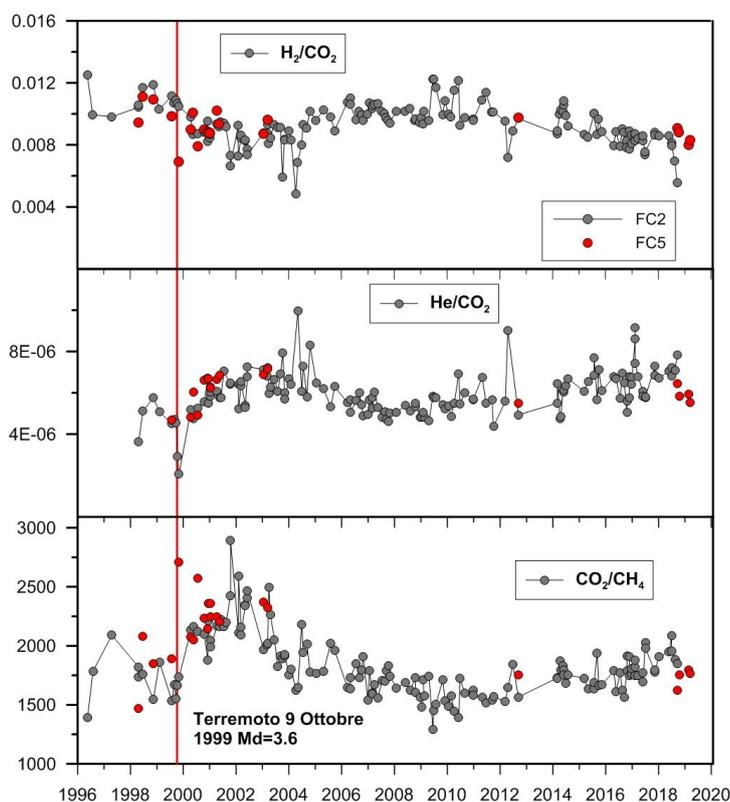
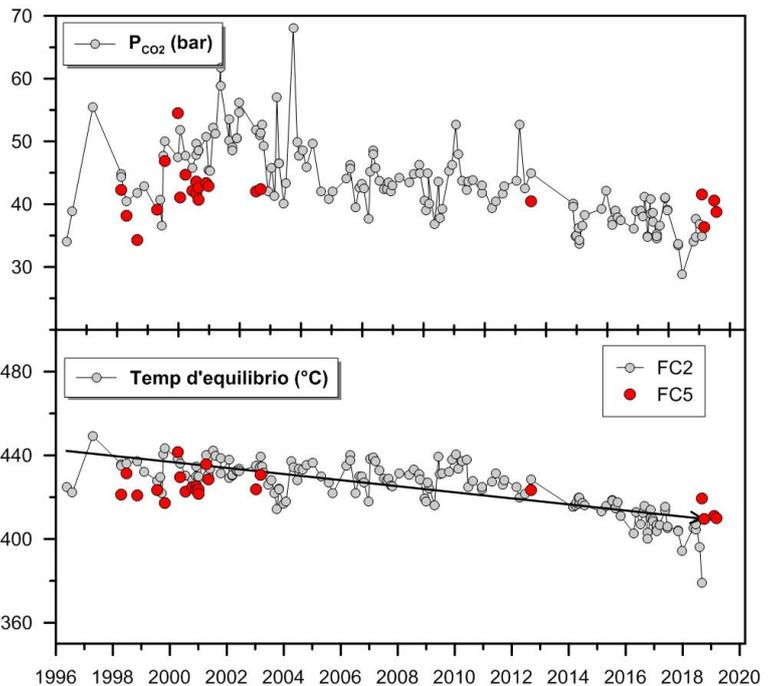


Figura 4.1.2 - Variazioni composizionali delle fumarole FC2 (simboli grigi) e FC5 (simboli rossi) nel periodo 1996-2019.

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 CO_2 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).

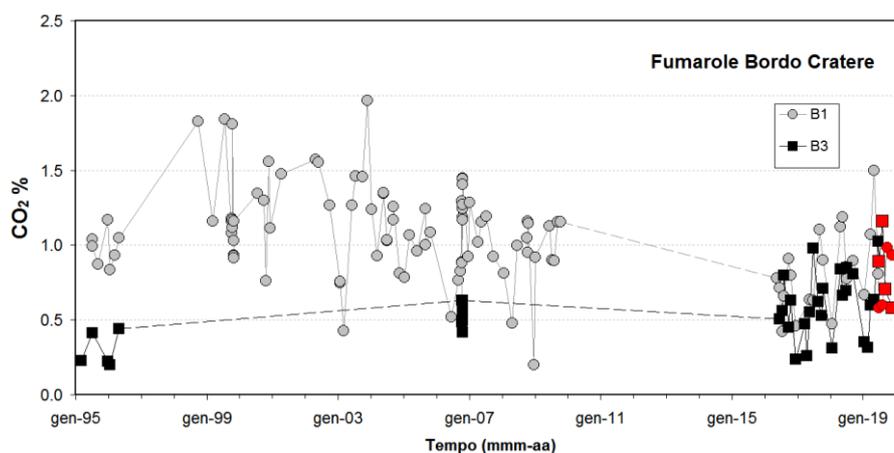


Figura 4.1.4 - Variazione temporale della concentrazione di CO_2 delle fumarole di bordo cratere). Con i simboli rossi sono riportati i campioni relativi al secondo semestre 2019.

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.).

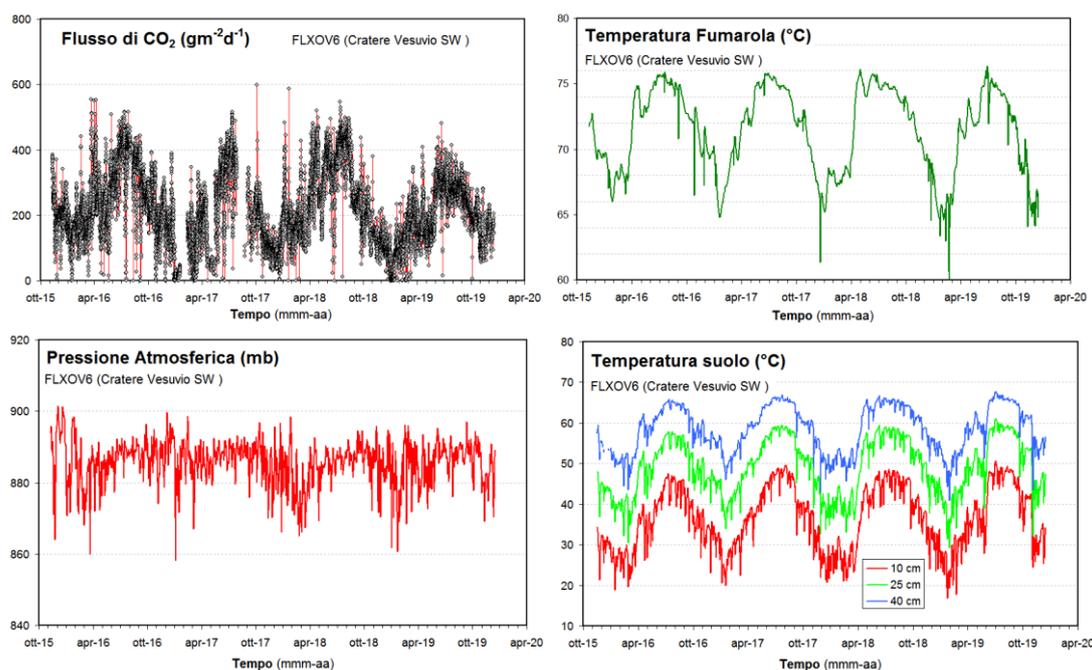


Figura 4.1.5 - Serie temporali di alcuni parametri misurati dalla stazione geochimica FLXOV6 installata in area bordo cratere del Vesuvio (settore SW). I valori, eccetto il flusso di CO₂ dal suolo, sono riportati come medie giornaliere.

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 verificatesi nel periodo. In Figura 4.1.6 sono riportati i parametri acquisiti dalla stazione.

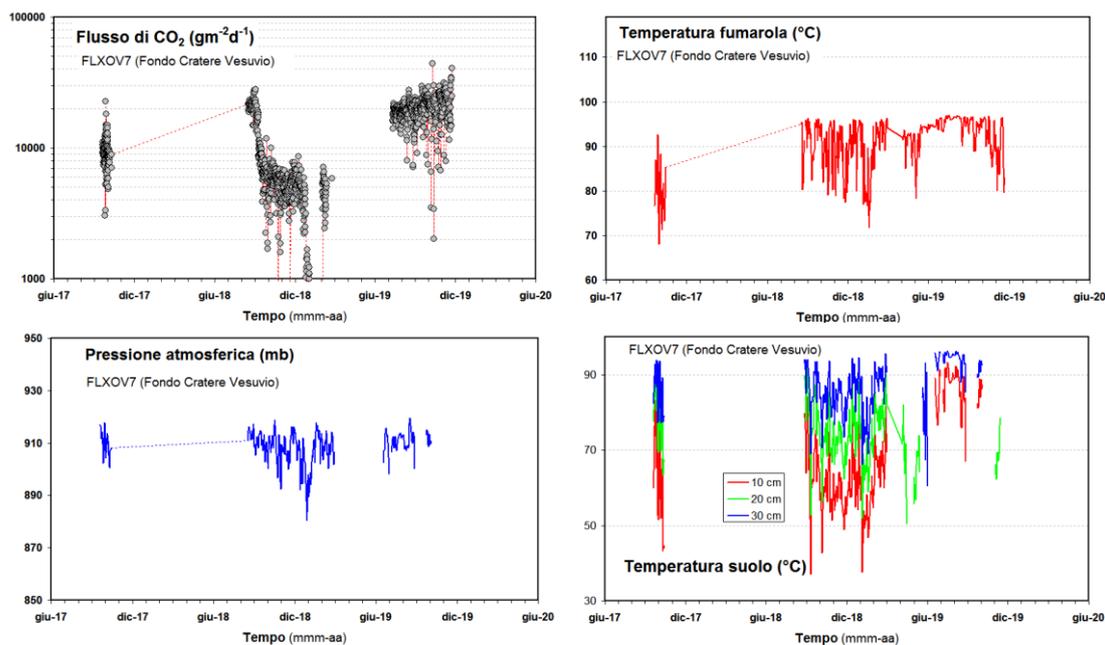


Figura 4.1.6 - Parametri misurati dalla stazione geochimica (FLXOV7) installata in area di fondo cratere del Vesuvio. I valori, eccetto il flusso di CO₂ dal suolo, sono riportati come medie giornaliere.

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.

La rete geochimica della Sezione di Palermo nell'area vesuviana consta di due stazioni (Figura 4.2.1) che misurano la temperatura delle falde sotterranee, installate in un pozzo (P14) ed in una sorgente (Olivella) con registrazione locale dei dati.

L'attività di sorveglianza dell'acquifero del Vesuvio è stata condotta sino al 2016 su 8 siti (pozzi e sorgenti) ubicati sui fianchi dell'edificio vulcanico. Dal 2017 il numero dei siti monitorati si è ridotto a 7, in quanto in uno di questi la proprietà ha dismesso il sistema di pompaggio dell'acqua, rendendo impossibile il campionamento. Di seguito si riporta la tabella descrittiva dei siti che costituiscono attualmente la rete di campionamento delle falde sotterranee, indicante i nuovi codici identificativi che saranno da ora in poi utilizzati in sostituzione dei vecchi, allo scopo di allinearli a quelli del database della Sezione di Palermo, contenente il record completo dei dati geochimici sulle falde vesuviane (Tabella 4.2.1)

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

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

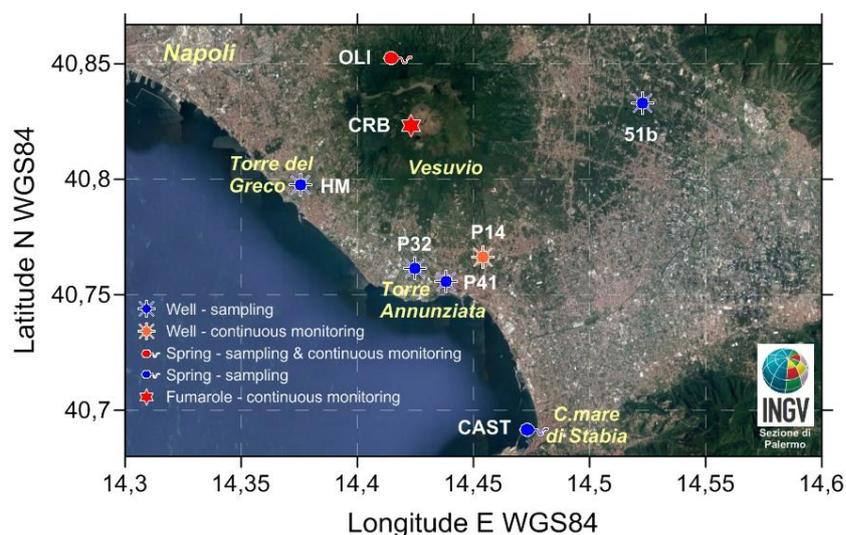


Tabella 4.2.1 - Rete di campionamento delle falde sotterranee della Sezione di Palermo al Vesuvio.

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

In 2 dei 7 siti sopra indicati, OLI e P14 (Fig. 4.2.1), viene effettuato il monitoraggio continuo della temperatura dell'acqua (dati disponibili dal 2004), con registrazione e download locale dei dati, allo scopo di valutare eventuali variazioni dell'input termico nella falda meteorico-idrotermale del Vesuvio. I dati acquisiti sono immagazzinati in appositi database e disponibili, in forma protetta, al personale della Sezione di Palermo e resi pubblici attraverso relazioni e/o pubblicati su riviste specializzate nazionali ed internazionali.

Dei siti di monitoraggio 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 ($9 < T^{\circ}C < 24.5$), di salinità compresa tra 600 e 13000 mg/l e pH tra 5.5 e 8.3. 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 10/12/2019, data dell'ultima campagna di misure.

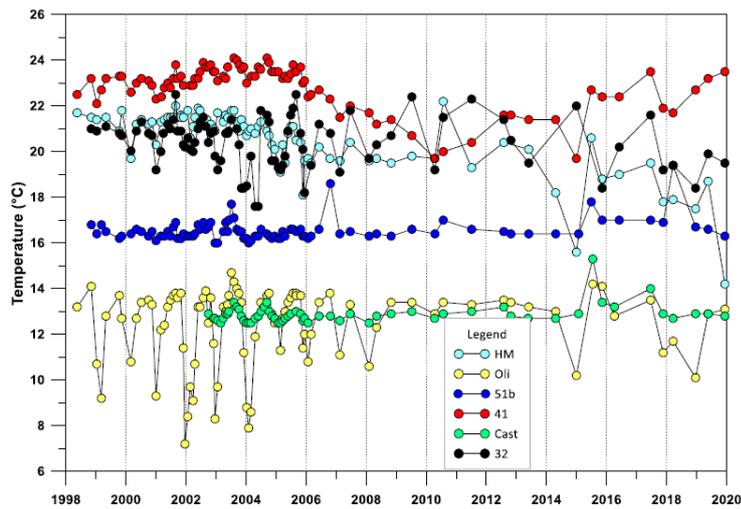
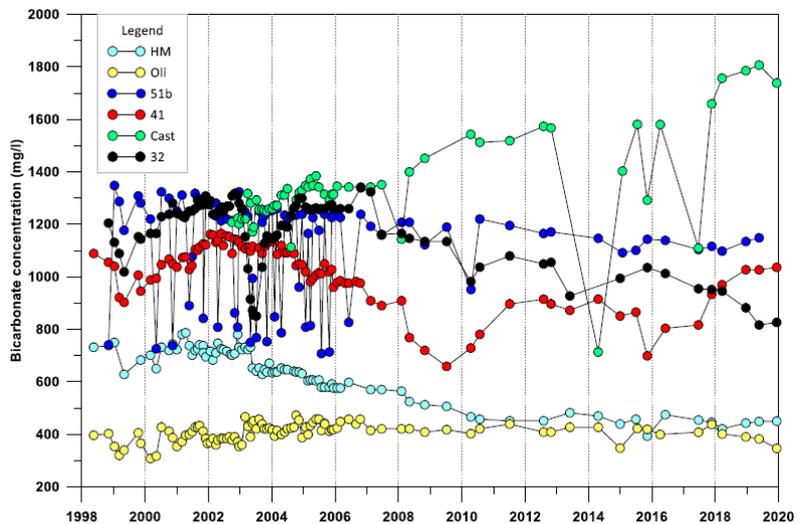


Figura 4.2.2 - Variazioni temporali della temperatura delle falde sotterranee.

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 CO₂ disciolta (Figg. 4.2.3 e 4.2.4).

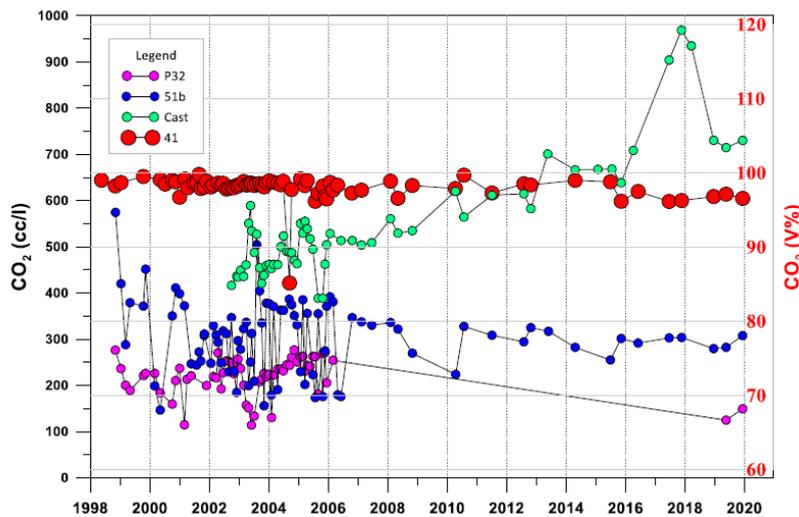


Figura 4.2.4 – Variazioni temporali della CO₂ disciolta (cc/l) nelle acque e della CO₂ libera P41 (V%).

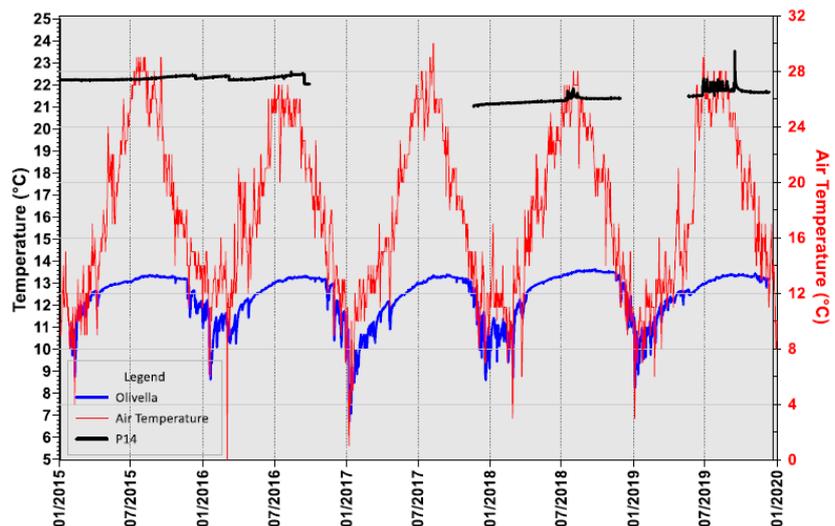
Per quanto concerne il monitoraggio in continuo delle temperature, i dati relativi sono riportati in Figura 4.2.5.

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.

Per quanto concerne i dati relativi alle fumarole ubicate sul bordo del cratere (sito CRB), non vi sono aggiornamenti, in quanto la stazione non è attualmente funzionante, ed è in fase di valutazione il ripristino della stessa.

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 e nel P14, temperatura dell'aria dalla stazione meteorologica di Sant'Anastasia.



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). L'infrastruttura marina permanente di monitoraggio e ricerca multi-parametrica sperimentale che opera nel Golfo di Pozzuoli, denominata MEDUSA (<http://portale.ov.ingv.it/medusa/>), è costituita da 4 boe geodetiche (CFBA, CFBB, CFBC e CFSB) ed altrettanti moduli sottomarini, equipaggiati con strumentazione geofisica, oceanografica e multi-disciplinare.

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. Per esempio, il sito del Castello di Baia è duplicato con una stazione digitale CBAC e una analogica BAC.

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.

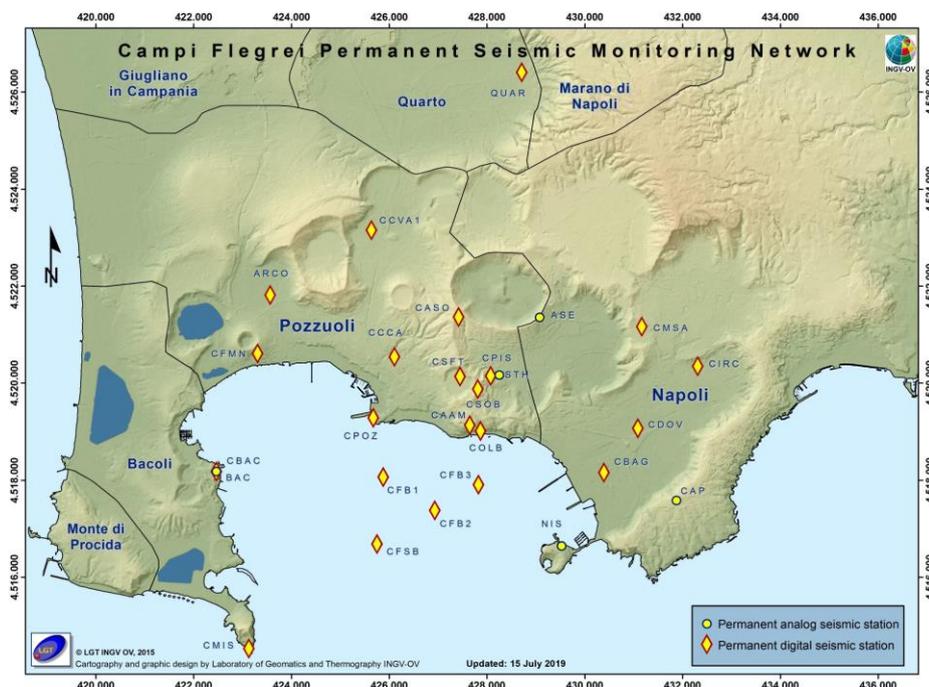


Figura 1.1.1 – Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei.

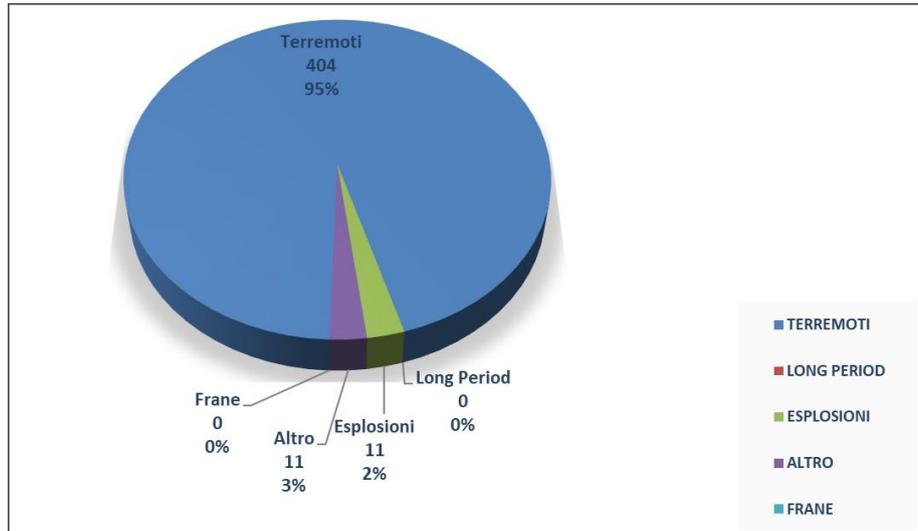
Tabella 1.1.1 – Stato della Rete Sismica Permanente dei Campi Flegrei. In grigio le stazioni non operative.

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 secondo semestre 2019, sono stati registrati un totale di 426 eventi locali, ripartiti nelle diverse tipologie riportate in Figura 1.1.2.

Figura 1.1.2 – Distribuzione percentuale degli eventi per tipologia nel secondo 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 secondo semestre 2019 sono stati registrati 404 terremoti vulcano-tettonici la maggior parte dei quali di magnitudo inferiore a 2.0 ($M_{dmax}=3.1$). Il terremoto di Md 3.1 del 06/12/2019 alle 00:17 UTC risulta, attualmente, l’evento di massima energia registrato ai Campi Flegrei a partire dalla ripresa di questa fase bradisismica iniziata nel 2005. E’ stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 255 eventi.

Permane un modesto incremento nel numero totale di eventi registrati rispetto a quello medio degli anni precedenti (Figura 1.1.3). La maggior parte degli eventi localizzati ricade nell’area compresa tra il bordo meridionale del cratere di Astroni e Pozzuoli-Solfatara-Pisciarelli con profondità fortemente concentrate nei primi 2 km (Figura 1.1.4).

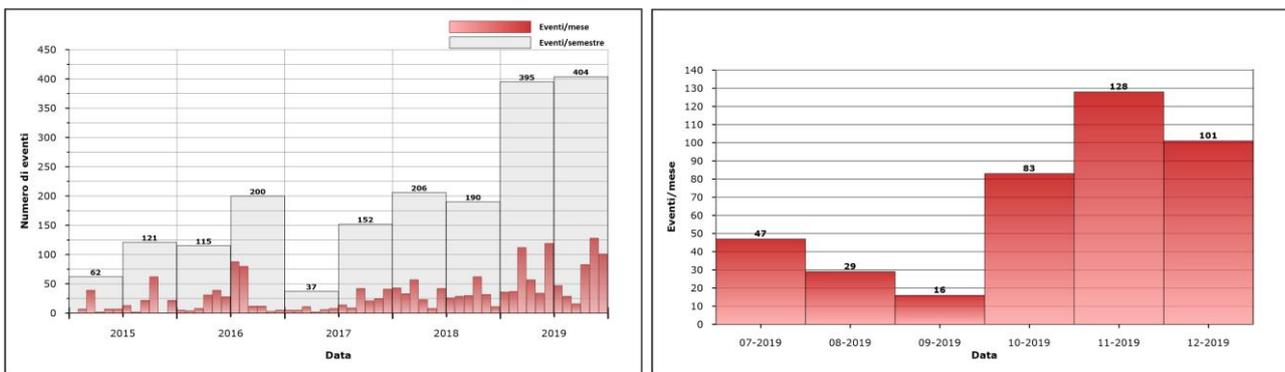


Figura 1.1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti ai Campi Flegrei nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

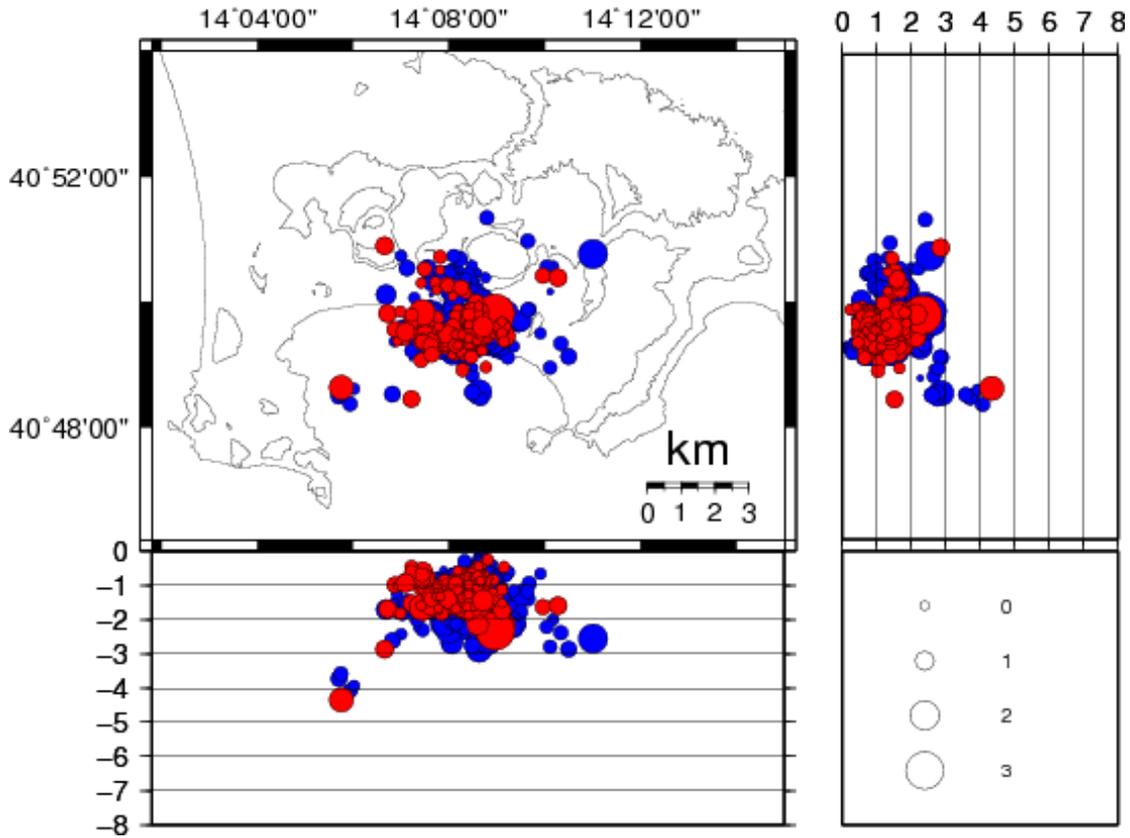


Figura 1.1.4 – Localizzazione degli ipocentri nell’area flegrea durante gli ultimi 5 anni (in blu) e nel secondo semestre 2019 (in rosso).

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).

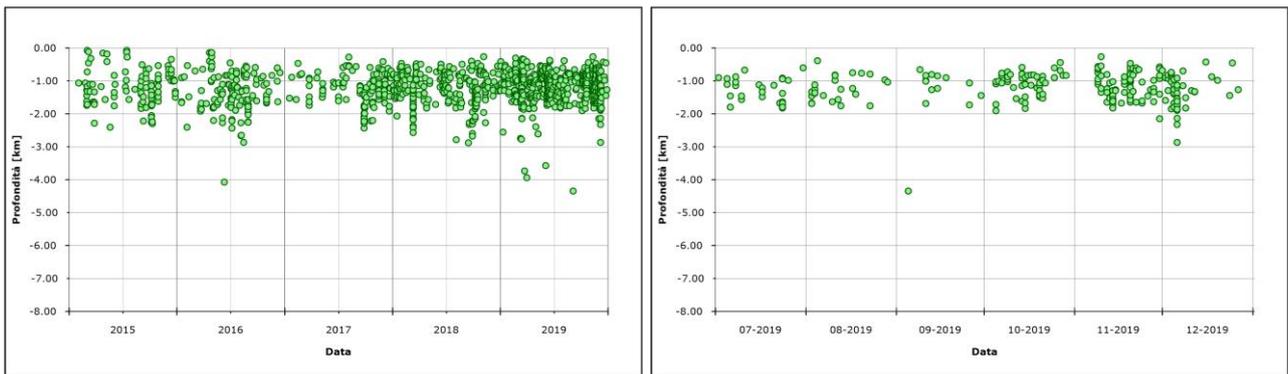


Figura 1.1.5 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti nell’area flegrea localizzati nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

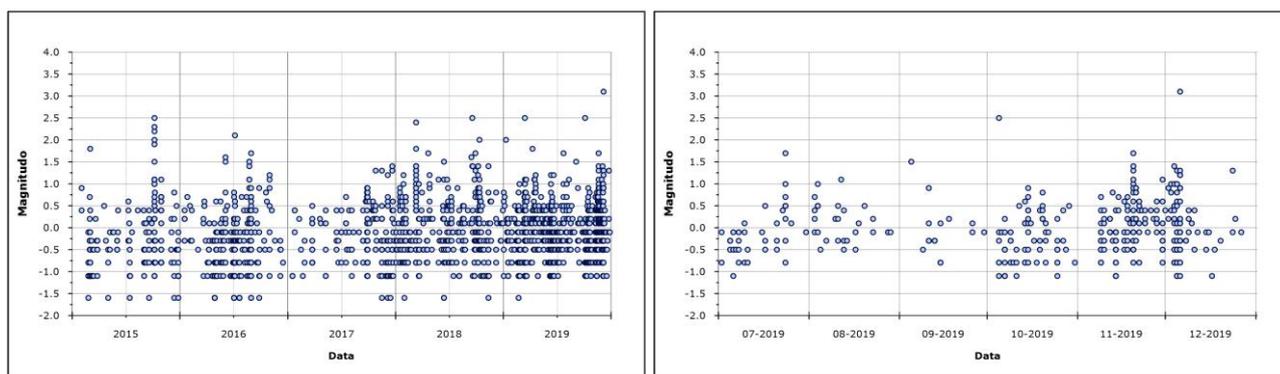


Figura 1.1.6 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti nell’area flegrea nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

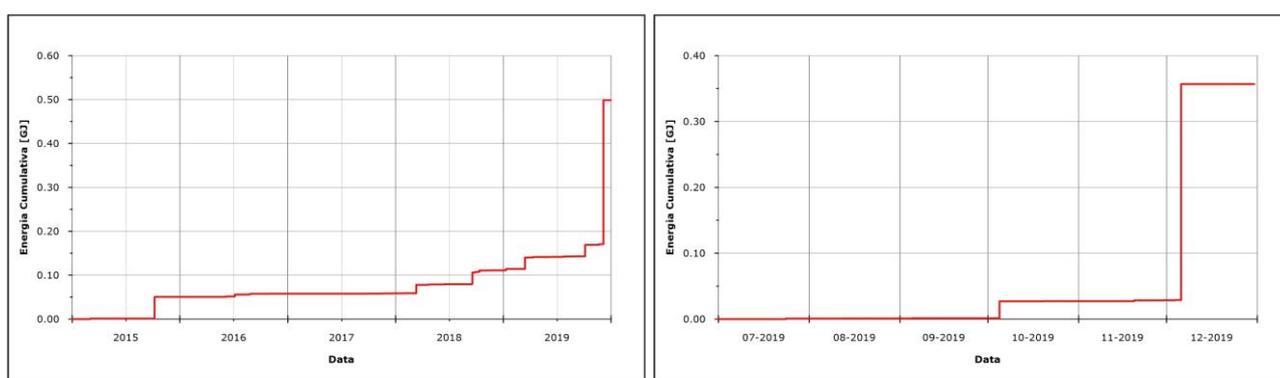


Figura 1.1.7 – Andamento cumulativo dell’energia rilasciata dai terremoti nell’area flegrea nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra) calcolato attraverso la relazione di Gutenberg-Richter $\log E = 2.4 + 2.14 M - 0.054 M^2$.

L’analisi dei meccanismi focali di 3 dei 5 eventi di magnitudo ≥ 1.5 (Tabella 1.1.2) registrati ai Campi Flegrei nel corso del secondo semestre 2019 mostra, per tutti e 3 gli eventi, soluzioni associabili a meccanismi di tipo normale con componente obliqua (Figura 1.1.8). Non è stato possibile elaborare il meccanismo focale per gli eventi del 05/09 alle 04:03 UTC di Md 1.5 e del 20/11 alle 03:44 UTC di Md 1.7, 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 $M_d > 1.5$ registrati ai Campi Flegrei nel secondo semestre 2019.

Data UTC	Md	Lat N	Long E	Prof. (km)
2019/07/24 06:38:37.55	1.7	40.8250	14.1435	1.79
2019/09/05 04:03:01.72	1.5	40.8105	14.0958	4.35
2019/10/05 05:08:37.76	2.5	40.8282	14.1475	1.91
2019/11/20 03:44:08.26	1.7	40.8305	14.1240	1.65
2019/12/06 00:17:23.78	3.1	40.8302	14.1493	2.33

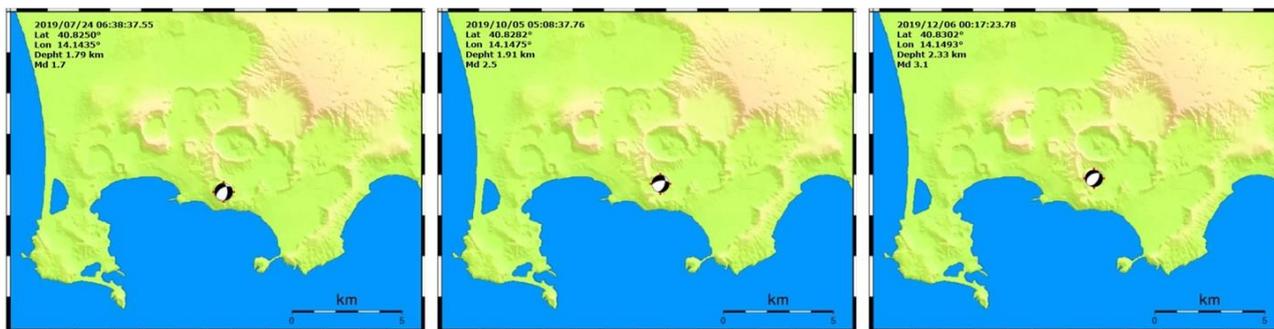


Figura 1.1.8 - Meccanismi focali elaborati per eventi di magnitudo > 1.5 registrati ai Campi Flegrei nel secondo semestre 2019.

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 secondo 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}
2019/08/04 01:46	2019/08/04 01:48	4	0.5
2019/10/25 20:34	2019/10/25 20:37	10	0.2
2019/11/09 11:38	2019/11/09 12:02	6	0.4
2019/11/14 18:36	2019/11/14 18:39	15	0.4
2019/11/20 03:21	2019/11/20 06:39	15	1.7
2019/12/05 23:51	2019/12/06 02:24	34	3.1

1.2 Rete Sismica Mobile

Nel secondo 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 ottobre del 2019 è stata disinstallata la stazione SESG per indisponibilità del sito.

A tutto dicembre 2019 nell’area dei Campi Flegrei sono installate e funzionanti 12 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 1.2.1.

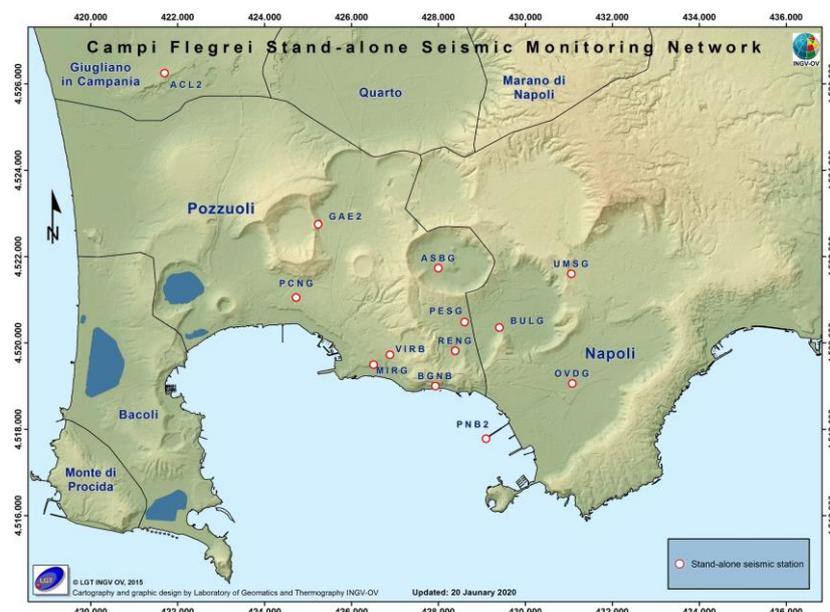


Figura 1.2.1 – Rete Sismica stand-alone dei Campi Flegrei.

Tabella 1.2.1 – Stato della Rete Sismica Mobile ai Campi Flegrei.

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
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 VIRK	40.8253N 14.1329E 65 m	Pozzuoli	Marzo 2015 Ottobre 2015	Guralp CMG-40T Episensor FBA ES-T	Reftek 130 Reftek 130	Locale

2 - MONITORAGGIO GEODETICO

Durante il secondo semestre 2019 il monitoraggio geodetico dei Campi Flegrei è stato effettuato attraverso misure continue GPS, tiltmetriche e mareometriche, nonché mediante campagne di misure gravimetriche e di 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). L'infrastruttura marina permanente di monitoraggio e ricerca multi-parametrica sperimentale che opera nel Golfo di Pozzuoli, denominata MEDUSA (<http://portale.ov.ingv.it/medusa/>), è costituita da 4 boe geodetiche (CFBA, CFBB, CFBC e CFSB) ed altrettanti moduli sottomarini, equipaggiati con strumentazione geofisica, oceanografica e multi-disciplinare. 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.

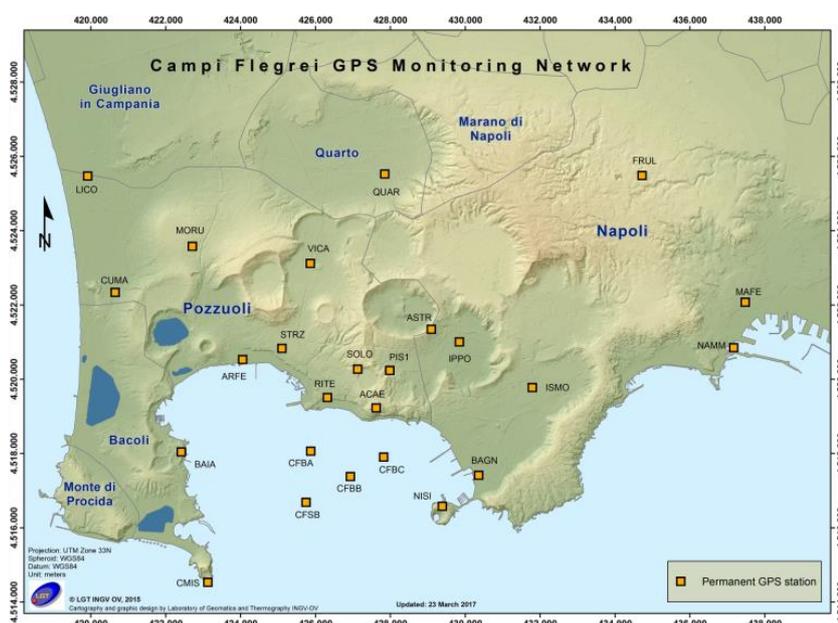


Figura 2.1.1 – Mappa della Rete GPS dei Campi Flegrei.

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 GR10 LEIAR25 LEIT	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 GRX1200GPRO 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 GRX1200GPRO 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 GRX1200GPRO TRM29659.00 NONE	30sec/flusso 1sec	ADSL
RITE	40.8233 N 14.1262 E	Rione Terra (Pozzuoli)	2001	Leica GR10 LEIAR25 LEIT	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 RITE 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 ± 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.

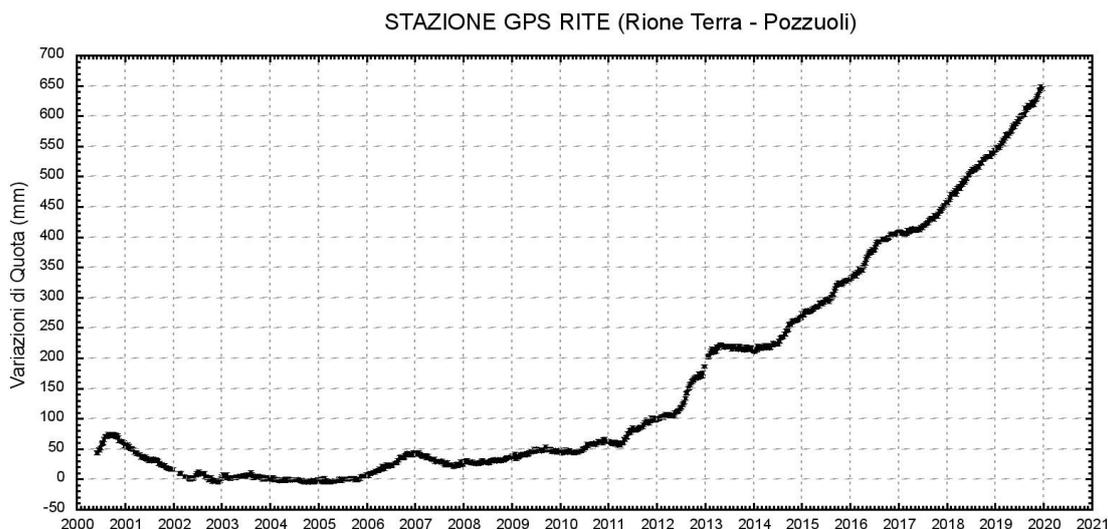
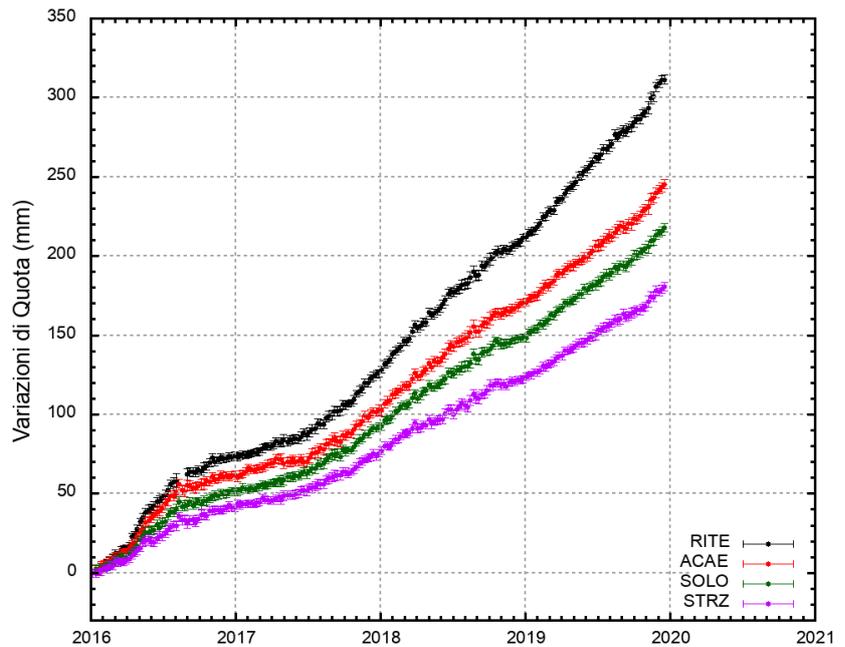


Figura 2.1.2 – Serie temporale delle variazioni in quota settimanali della stazione di RITE (Pozzuoli) dal 2000 a dicembre 2019.

Nel settembre 2015 si è registrato un aumento della velocità del sollevamento con un valore massimo alla stazione di RITE di circa 1.5 ± 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 ± 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 ± 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 (8.5 cm/anno ± 0.5 cm). Tale valore medio ha mostrato un incremento nelle settimane tra la fine di novembre e gli inizi di dicembre (Figura 2.1.3), per poi ritornare ai consueti valori medi dopo lo sciame sismico del 6 dicembre (con evento di $M_d=3.1$). Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE (area di massima deformazione) è di circa 65 cm a partire dal 2006, di cui circa 60 cm dal 2011 (Figura 2.1.2). Da gennaio 2016 si è registrato un sollevamento di circa 31 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 (Solfatara) e STRZ (Pozzuoli - Cimitero) da gennaio 2016 a dicembre 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 dicembre 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.

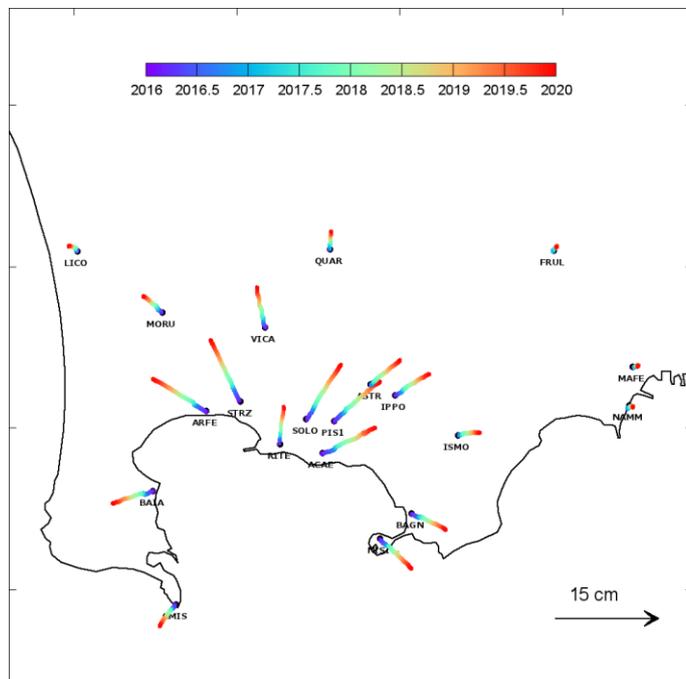


Figura 2.1.4 - Mappa degli spostamenti orizzontali registrati nell'area flegrea da gennaio 2016 a dicembre 2019.

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.

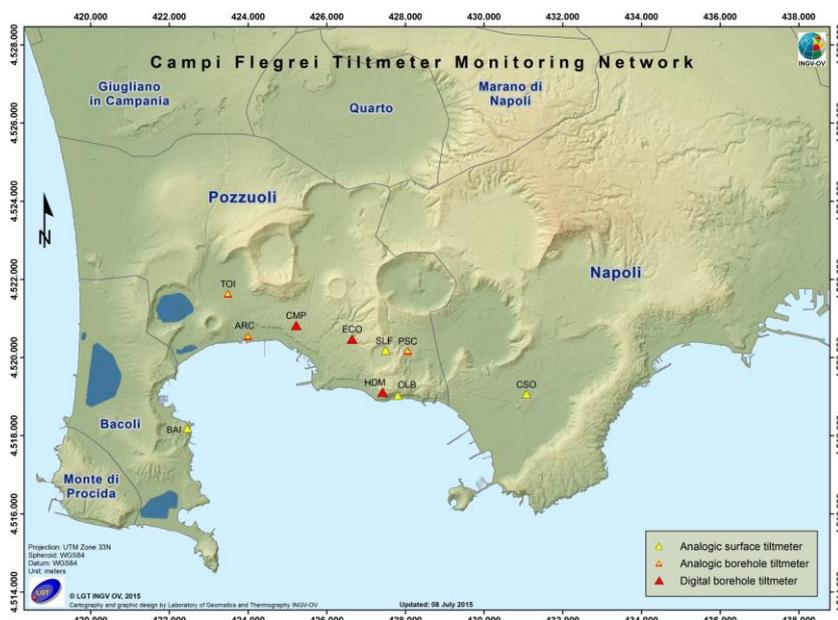


Figura 2.2.1 – Mappa della Rete Tiltmetrica dei Campi Flegrei.

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 secondo semestre 2019 mostra, seppure limitatamente alle sole stazioni CMP ed HDM, un pattern conforme al campo di deformazione generato dalla fase di uplift che interessa Pozzuoli. Per quanto riguarda invece la stazione ECO, il tilt registrato concorda con tale campo solo nel periodo compreso tra gli inizi di giugno e metà ottobre e da metà dicembre in poi. Dalla seconda metà di ottobre alla prima metà di dicembre, l'inclinazione prevalente per questa stazione è avvenuta invece in direzione NNW, riproponendo l'anomalia in azimuth iniziata nella seconda metà di luglio 2018 e durata fino alla fine 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 operanti in area flegrea, i cui segnali sono filtrati delle periodicità inferiori a 1 giorno.

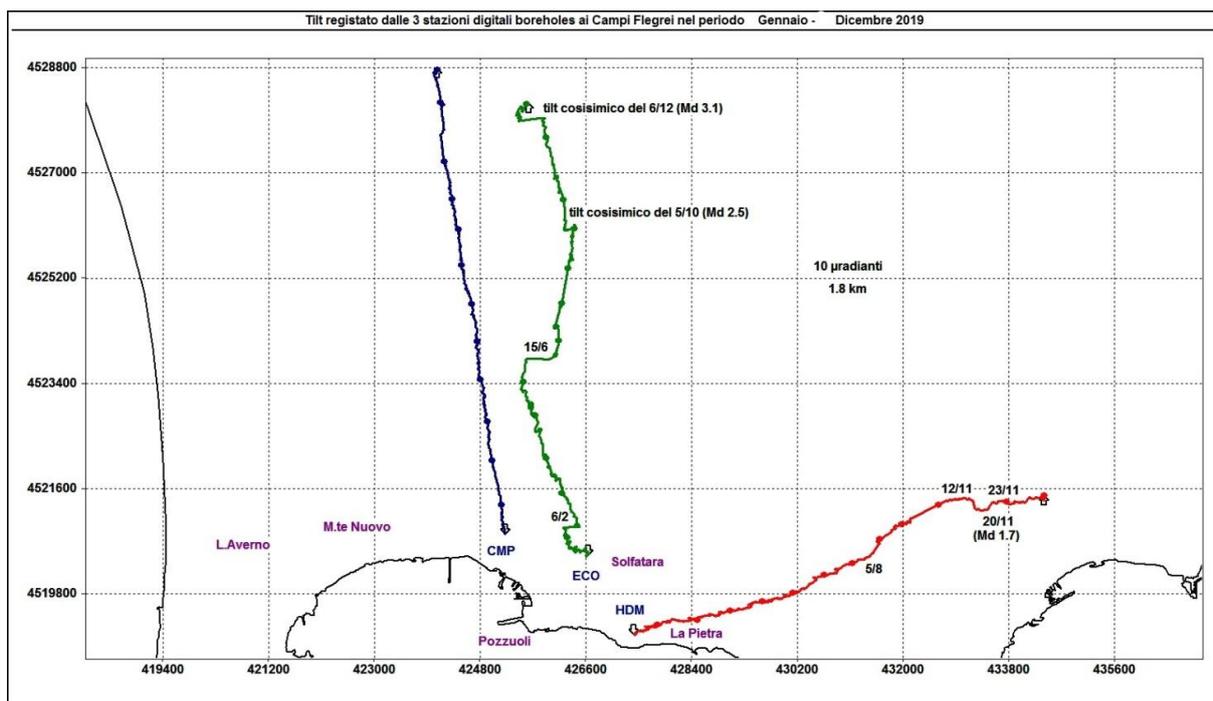


Figura 2.2.2 – Odografo del tilting registrato alle 3 stazioni digitali in pozzo della rete flegrea nel 2019. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 10 μradiani o 1.8 km. I pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt indicano l'inizio di ogni mese. Alla stazione ECO, in corrispondenza dell'evento sismico del 5 ottobre (Md 2.5) si osserva un tilt cosismico permanente verso W di poco inferiore ad 1 μradiane mentre l'evento del 6 dicembre (Md 3.1) ha generato un tilt cosismico permanente sempre verso W di 2 μradiani. Alla stazione HDM, invece, l'evento sismico del 20 novembre (Md 1.7) è avvenuto all'interno di una contrazione della componente NS (forma a sella) verificatasi tra il 12 ed il 23 novembre.

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).

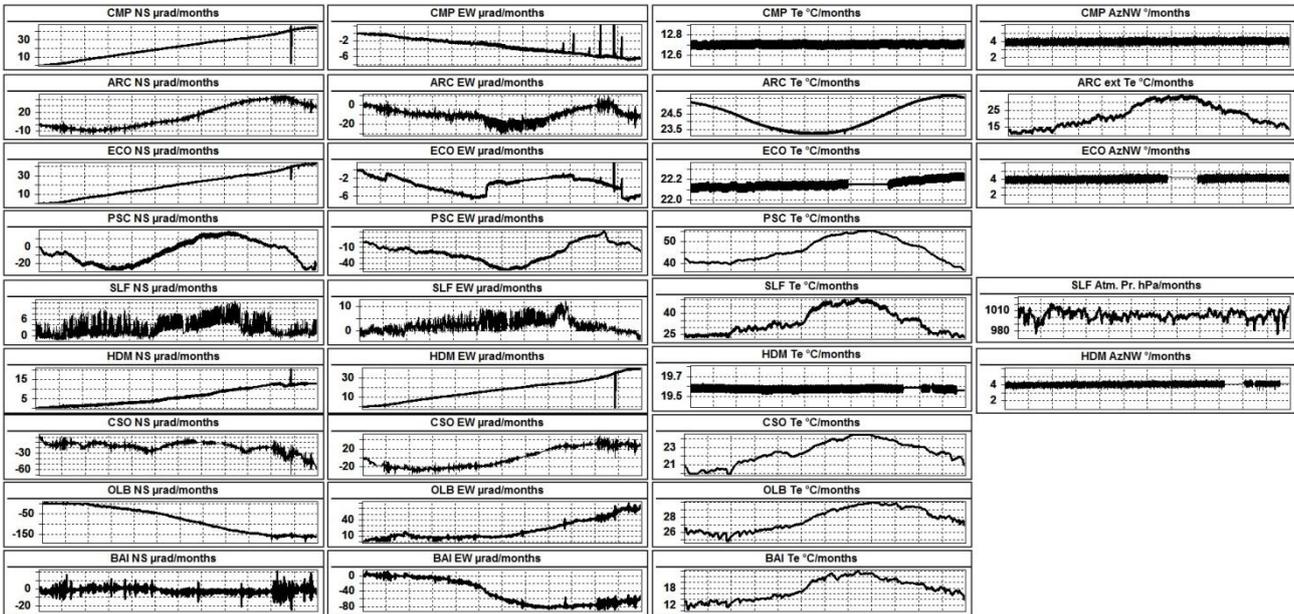


Figura 2.2.3 - Segnali registrati nel 2019 da 9 dei 10 sensori della rete flegrea; le stazioni tiltmetriche sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è invece relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 colonne riportano 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, 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.

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 (≈ -25 m dal p.c.) relative al 2019.

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

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione ECO (89 m s.l.m.)	42.3 μ radianti a N	0.1 $^{\circ}$ C
Stazione CMP (62 m s.l.m.)	44.7 μ radianti a NNW	0.01 $^{\circ}$ C
Stazione HDM(112 m s.l.m.)	41.0 μ radianti a ENE	-0.02 $^{\circ}$ 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.

Poiché i segnali acquisiti rappresentano una variazione tiltmetrica tilt e non una misura assoluta, sono stati tutti azzerati a partire da inizio anno.

Tutte le componenti NS mostrano un trend di inclinazione verso N e quindi un sollevamento del suolo a S delle stesse. La stazione HDM, inoltre, subisce una contrazione con conseguente inclinazione a S tra il 12 ed il 23 novembre mentre ad ECO e CMP si osserva una progressiva diminuzione di "rate" dagli inizi di dicembre.

Per quanto riguarda le componenti EW, CMP (situata a W di Pozzuoli) mostra un trend verso W e quindi sollevamento ad E ma inverte la sua direzione di tilting da metà dicembre.

Delle due stazioni situate ad E di Pozzuoli, HDM mostra un trend opposto ma, dopo un'accelerazione ad E

iniziata a fine novembre, diminuisce il suo “rate” agli inizi di dicembre mentre ECO, dall’inizio di ottobre, ripropone l’anomalia in azimuth iniziata nella seconda metà di luglio 2018 e durata fino alla fine di maggio 2019. Anche quest’ultima, come CMP, inverte la sua direzione di tilting da metà dicembre.

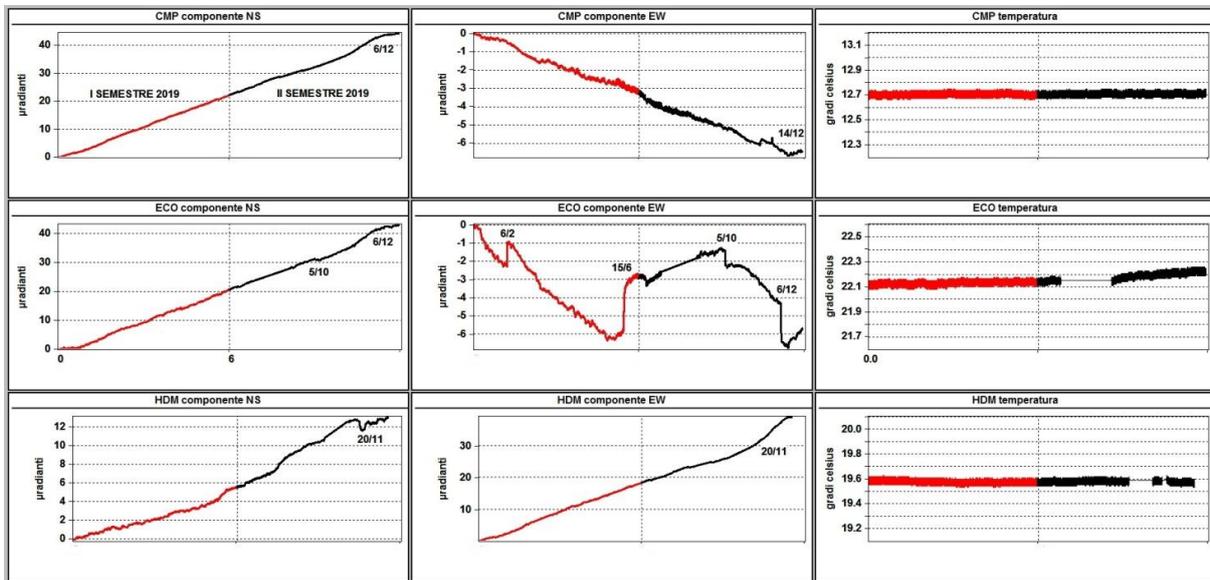


Figura 2.2.4 - Segnali registrati dalle 3 stazioni “borehole” della rete flegrea. Sono ordinate dal basso verso l’alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è invece relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 colonne riportano le componenti NS ed EW 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 $^{\circ}$ C registrata da ogni sensore. In rosso sono riportati i segnali relativi al primo semestre 2019 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel secondo semestre 2019. Sulla componente EW di ECO sono visibili i 2 stretching verso E avvenuti il 6 febbraio ed il 15 giugno nonché i 2 tilt cosmici del 5/10 e del 6/12. Sulla componente NS di HDM è inoltre evidente la contrazione sul segnale avvenuta tra il 12 ed il 23 novembre. Sul segnale di temperatura registrato ad ECO si osserva un aumento a partire dalla fine di settembre.

L’evento sismico avvenuto il 6 dicembre 2019 (ore locale 01:17:23.78, Md 3.1) è stato registrato da tutte le stazioni tiltmetriche flegree.

In particolare, SLF ha registrato variazioni su entrambe le componenti 1 minuto prima dell’evento, OLB, ARC e BAI hanno rilevato variazioni sulla componente EW sempre 1 minuto prima mentre ECO (componente NS), PSC ed HDM (componenti EW) hanno registrato una lenta contrazione oltre un’ora prima del verificarsi del terremoto (Figura 2.2.5).

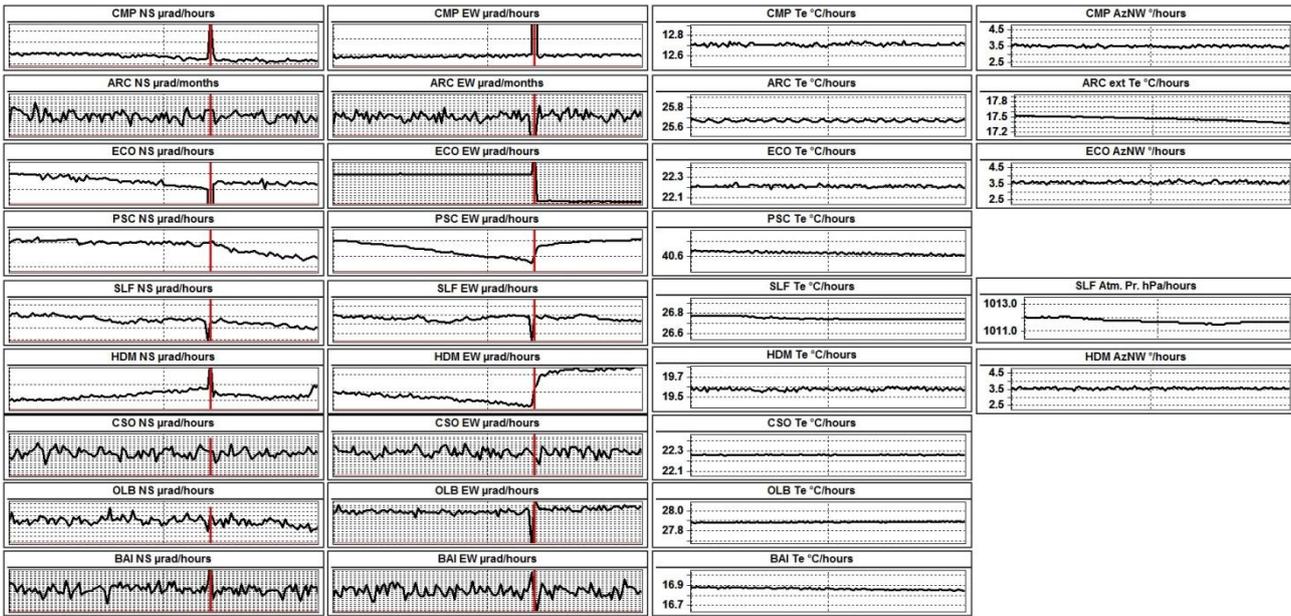


Figura 2.2.5 - Segnali registrati il 6 dicembre 2019 dalle 00:00 alle ore 02:00 (ora locale) da 9 dei 10 sensori della rete flegrea; La linea rossa sovrapposta sulle componenti tiltmetriche NS ed EW corrisponde alle ore 01:18. La spaziatura verticale su queste ultime è di 0.2 μ radianti.

Si mostrano infine 2 grafici che riportano rispettivamente il confronto tra le serie termiche registrate nel periodo 2015-2019 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).

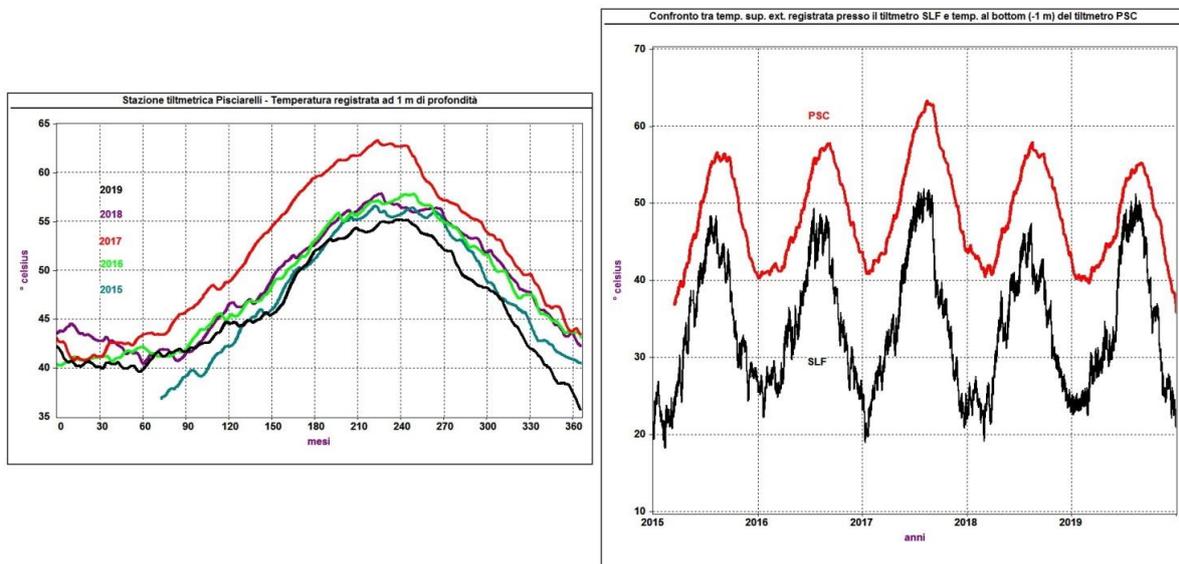


Figura 2.2.6 - A sinistra: temperatura registrata dal sensore termico del tiltmetro borehole in località Pisciarelli (stazione PSC, sensore a -1 m da p.c.). I diversi colori contraddistinguono gli anni: nero 2019, viola 2018, rosso 2017, verde 2016, ciano 2015.

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.

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.

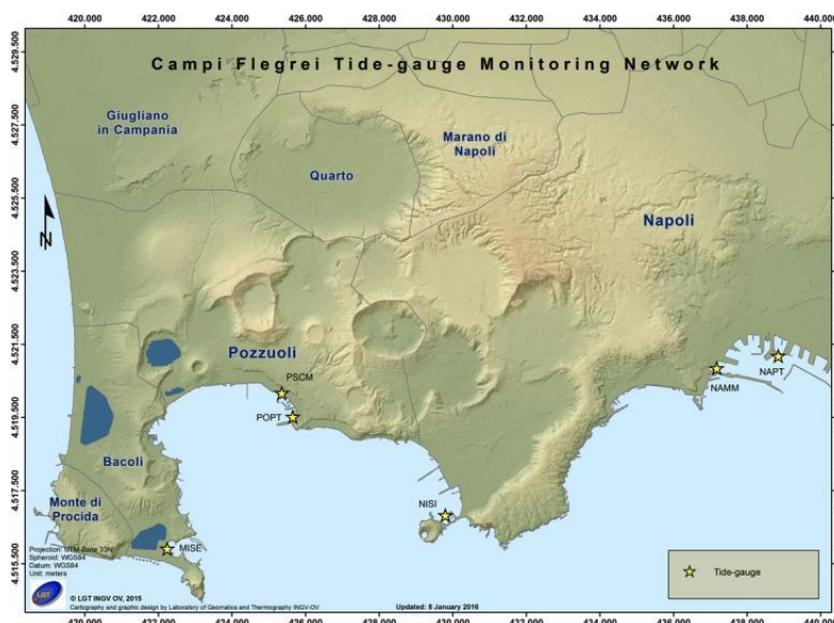


Figura 2.3.1 – Mappa della Rete Mareometrica dei Campi Flegrei.

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	thalimedes	GSM 1 min
POPT	40.8233N 14.1147E	Pozzuoli porto	10/10/2002	shaft encoder	thalimedes	GSM 1 min
PMSC	40.8292N 14.1147E	Pozzuoli Molo Sud	12/05/2005	shaft encoder	thalimedes	GSM 1 min
MISE	40.7905N 14.0783E	Miseno	10/10/2002	shaft encoder	thalimedes	GSM 1 min
Stazioni di riferimento Napoli						
NAPT (dismessa)	40.8411N 14.2697E	Napoli Porto	29/04/2003	shaft encoder	thalimedes	GSM 1 min
NAMM	40.8364N 14.2547E	Napoli S.Vincenzo	06/10/2015	shaft encoder	thalimedes	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 – dicembre 2019 mostrano l'andamento di Figura 2.3.2 dal quale si evince un sollevamento di circa 56 cm, pari ad una media di 6.2 cm/anno.

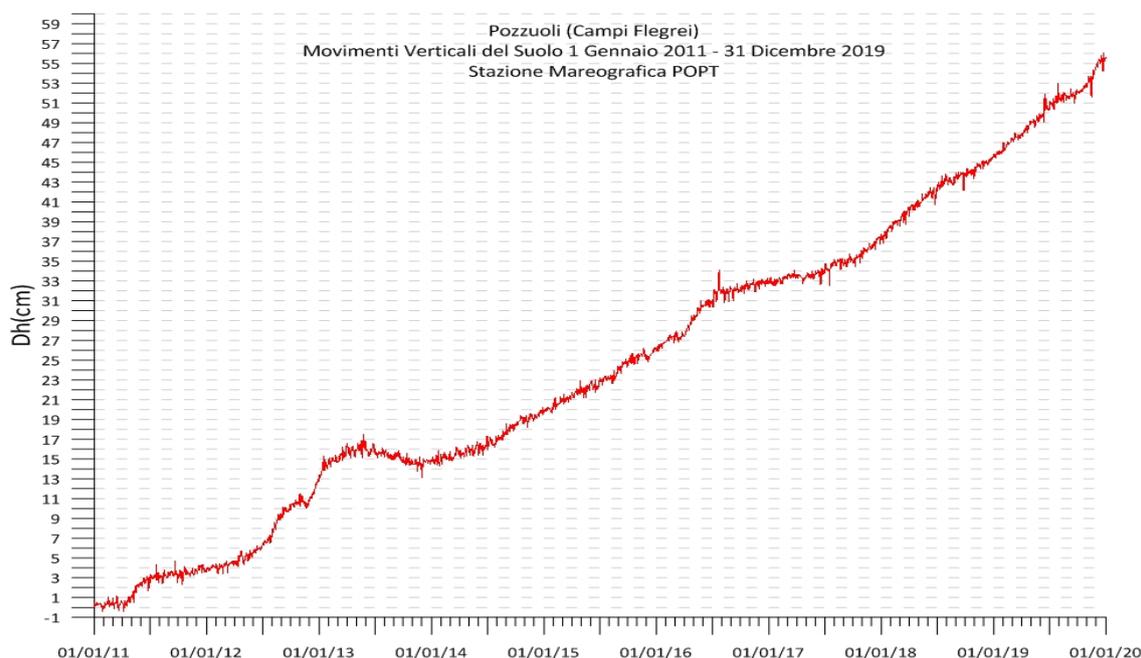
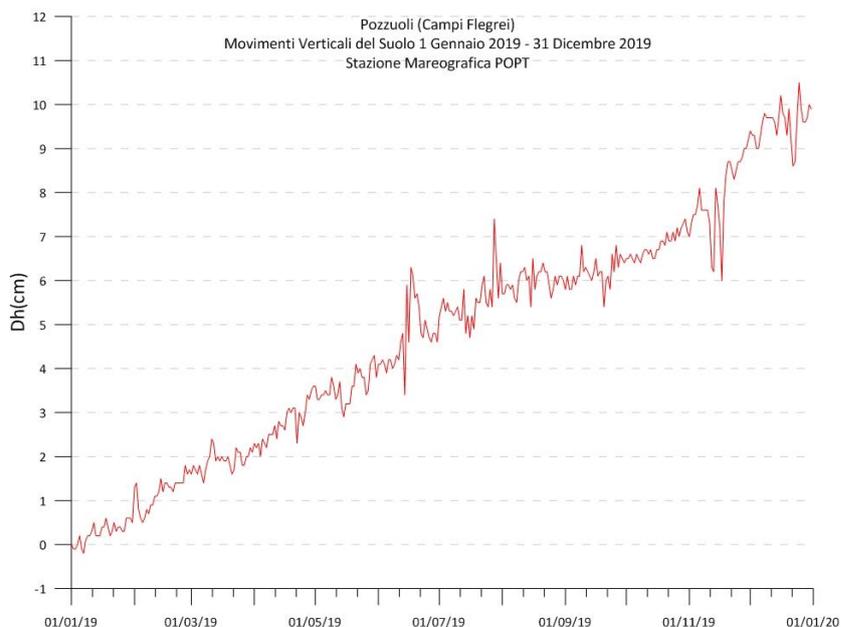


Figura 2.3.2 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2011 - dicembre 2019, ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dal sensore digitale alla stazione mareografica di Pozzuoli Porto (POPT) (area centrale della caldera flegrea). Le variazioni riportate rappresentano le medie giornaliere e 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 con un incremento di circa 41 cm. Nel 2019 si registrano circa 10 cm di sollevamento (Fig. 2.3.3).

Il picco nel grafico di Pozzuoli, verso fine giugno 2019 è dovuto ad una temporanea e parziale occlusione del tubo di calma della stazione di riferimento di Napoli (NAMM), risoltosi poi spontaneamente.

Figura 2.3.3 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2019 – dicembre 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 – dicembre 2019, non mostra significativi movimenti verticali del suolo (Fig. 2.3.4a), mentre quella di Nisida indica più di 2 cm di sollevamento (Fig. 2.3.4b).

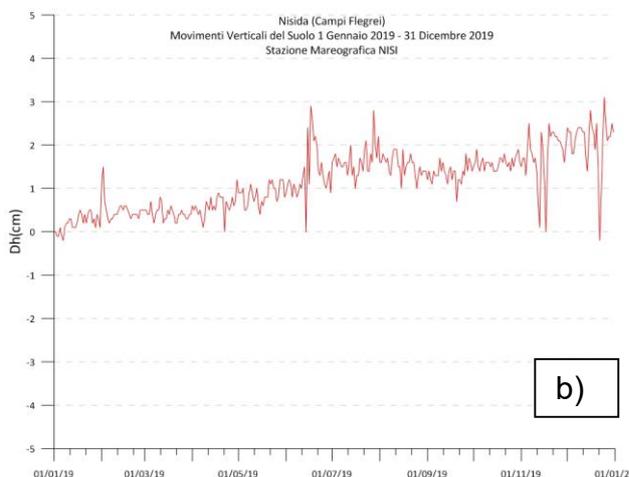
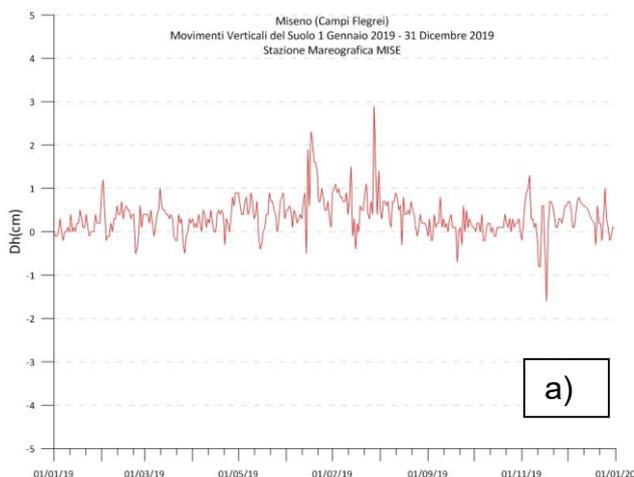


Figura 2.3.4 - Movimenti verticali del suolo, nel periodo gennaio 2019 – dicembre 2019, ottenuti dall’analisi dei dati acquisiti da (a) sensore digitale alla stazione mareografica di Miseno (MISE) (bordo occidentale della caldera flegrea) e (b) alla stazione mareografica di Nisida (NISI) (bordo orientale 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).

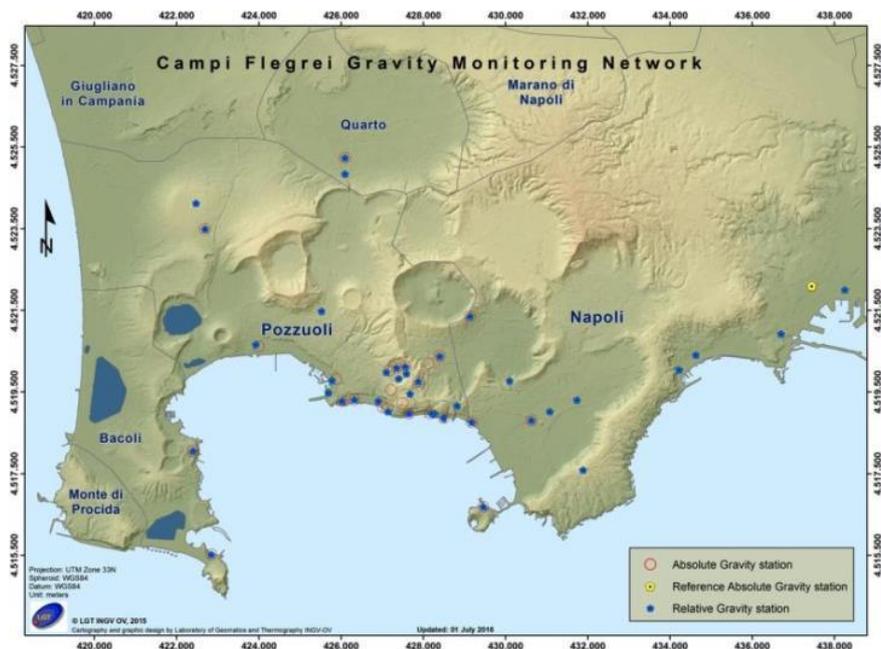


Figura 2.4.1 – Mappa della Rete Gravimetrica dei Campi Flegrei.

Dal 8 al 17 ottobre 2019 è stata effettuata una campagna di misure gravimetriche assolute.

I dati sono stati rilevati su 28 stazioni tutte ubicate all'interno della caldera (figura 1); sono state misurate anche 4 nuove stazioni corrispondenti a quelle istituite nel corso della campagna gravimetrica relativa del febbraio 2019 (Baia, Quarto, Pozzuoli Scuola Diana e Pozzuoli Scuola Rione Solfatara - quadrati gialli in Figura 2.4.2). Le nuove stazioni di Baia e Quarto sono state istituite allo scopo di sostituire quelle già esistenti in quanto risultate non idonee per le misure assolute (Riferimento Relazione I semestre 2019).

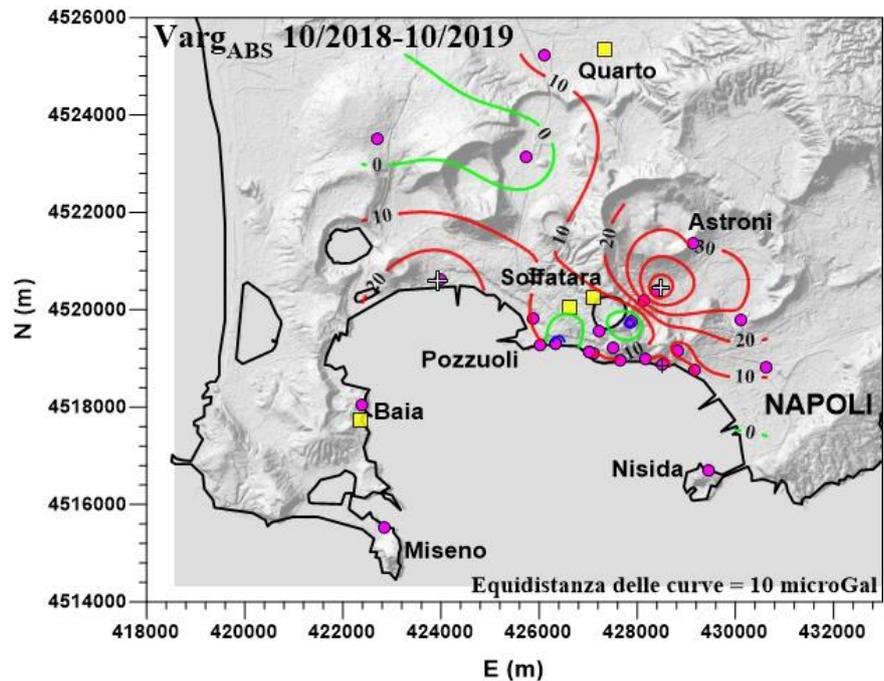
I dati rilevati sono stati messi a confronto con quelli dell'ultima campagna di misure assolute effettuata sull'intera rete (10/2018), considerando le stazioni comuni ai due rilievi.

I risultati ottenuti evidenziano che nel periodo 10/2018-10/2019 l'area flegrea è stata in generale interessata da variazioni di gravità non rilevanti (Figura 2.4.2). Solo in corrispondenza di quattro vertici nel settore centro-orientale della caldera (Pisciarelli Tennis Hotel, Pisciarelli Soffione, Agnano, Astroni), e isolatamente in tre stazioni, due lungo la costa ad Est di Pozzuoli (La Pietra Villino Anna e Lungomare Chiesa Sacro Cuore) e una in Arco Felice, sono stati misurati aumenti di g statisticamente significativi.

Gli aumenti significativi sono compresi tra i 28 e i 32 μGal , tranne che alla stazione di Pisciarelli Tennis Hotel dove è stato misurato un aumento di gravità di 60 μGal che annulla la diminuzione osservata sul periodo 2/2017-10/2018 (Rif. Relazione II Semestre 2018). Inoltre, il campo variometrico ottenuto risulta opposto a quello tutto negativo osservato, sempre da misure assolute, nel precedente periodo 2/2017-10/2018.

Tenendo anche in considerazione le risultanze delle misure relative condotte nel febbraio 2019, dalle quali non si evidenziava in generale per tutta l'area flegrea alcuna significativa variazione di g sul periodo 3/2018-2/2019 (Rif. Relazione I semestre 2019), se ne deduce che la maggior parte dell'aumento di g misurato nell'area di Pisciarelli sarebbe avvenuto nel periodo 10/2018-3/2019, così come ad Arco Felice, mentre quello lungo la costa ad est di Pozzuoli si sarebbe verosimilmente verificato tra il febbraio e l'ottobre del 2019.

Figura 2.4.2 - Campo delle variazioni di gravità ottenute da misure assolute sull'intervallo di tempo ottobre 2018 – ottobre 2019. Il campo è tracciato con equidistanza di 10 μGal . Le variazioni positive, negative e nulle sono rispettivamente rappresentate con le curve in colore rosso, blu e verde. I cerchi pieni magenta rappresentano le stazioni gravimetriche assolute della rete al 2018 e i quadrati pieni gialli le quattro stazioni istituite nel corso dell'ultima campagna.



Al fine di confermare quanto discusso, sono stati confrontati, per le stazioni sopra citate e per il periodo 2017-2019, gli andamenti temporali delle variazioni di g ottenuti indipendentemente e in periodi diversi da misure relative e assolute (Figura 2.4.3); le misure sono state integrate ponendo uno zero temporale comune.

In tale analisi non si è considerata la stazione di Lungomare Sacro Cuore (istituita nell'ottobre 2018) in quanto non è disponibile uno zero temporale comune; tale sito inoltre necessiterebbe di essere ripositionato poiché è risultato molto disturbato.

Nella Figura 2.4.3 le variazioni relative sono rappresentate con un cerchio pieno, mentre quelle assolute con una croce; la linea continua definisce per ciascuna stazione l'andamento delle variazioni temporali per l'intero periodo, considerando sia variazioni relative che assolute. Si sottolinea la buona concordanza tra le variazioni gravimetriche relative e assolute.

Nella Figura 2.4.3 a sinistra sono rappresentate le variazioni alla stazione Pisciarelli Tennis Hotel (simboli blu). In essa sono anche illustrate per confronto le variazioni ottenute alla vicina stazione Pisciarelli Soffione (simboli marrone - misurata nel periodo considerato solo con misure assolute) e alle stazioni di Astroni (simboli rossi) e Agnano (simboli verde). Tutte le stazioni mostrano in generale lo stesso andamento osservato a Pisciarelli Tennis Hotel, confermando quanto dedotto prima per quest'area; inoltre Agnano e Astroni mostrano una diminuzione nel corso del 2019.

Nella Figura 2.4.3 a destra sono rappresentate le variazioni temporali di g alle stazioni di La Pietra Villino Anna ed Arco Felice. Dal grafico si conferma quanto detto prima, ovvero che per la stazione a Est di Pozzuoli (La Pietra) l'aumento di g rilevato in tale area si sarebbe verificato nel corso del 2019. Ad Arco Felice, invece, l'aumento di g si sarebbe verificato nel periodo 10/2018-2/2019; in tale area le variazioni osservate dalle misure assolute sono confermate dalle quelle condotte anche su un sito secondario (Punto "B") molto prossimo (cerchi verde in Figura 2.4.3 - destra).

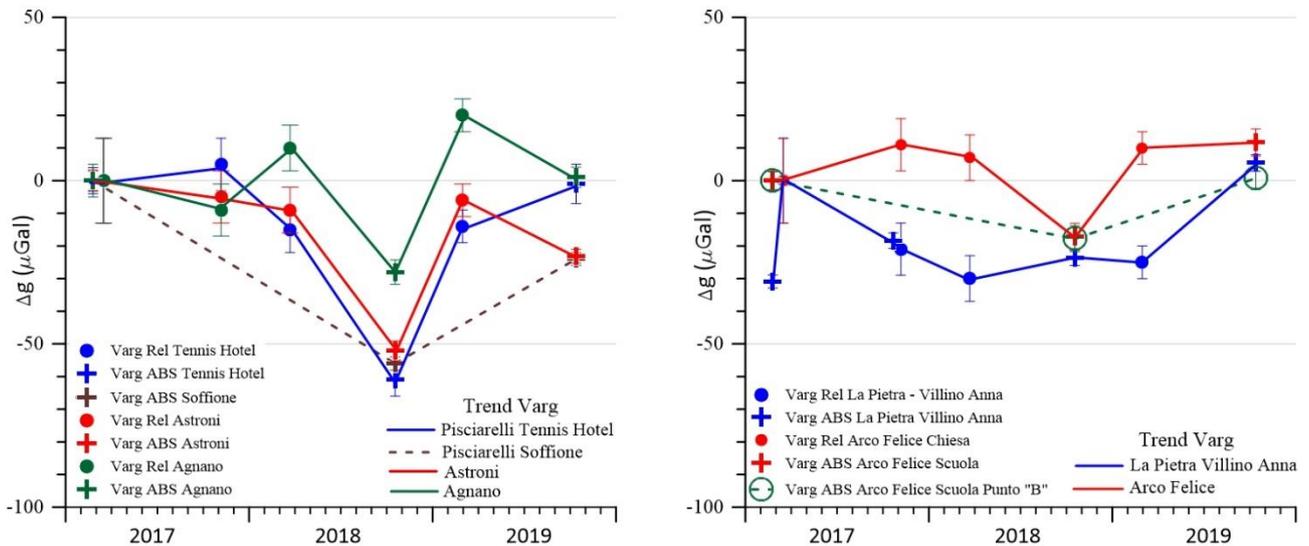


Figura 2.4.3 - A sinistra: variazione temporale di g per il periodo 2017-2019, da misure relative e assolute, alla stazione Pisciarelli Tennis Hotel (simboli e linea blu) e per confronto quelle alle stazioni Pisciarelli Soffione (solo da misure assolute - simboli e linea tratteggiata marrone), Astroni (simboli e linea rossa) ed Agnano (simboli e linea verde). A destra sono rappresentate le variazioni temporali alle stazioni La Pietra Villino Anna (simboli e linea blu) e Arco Felice (simboli e linea rossa); i cerchi aperti verde rappresentano le variazioni assolute rilevate sul sito secondario di Arco Felice (Punto "B").

Confidando sulla buona concordanza tra i due tipi di misure diverse, la procedura sopra descritta è stata applicata per tutte le stazioni utilizzabili. Confrontando quindi le variazioni ottenute da misure relative (2/2019) e assolute (10/2019) è stato tracciato un campo variometrico per il solo 2019.

Il campo ottenuto (Figura 2.4.4) è stato tracciato con equidistanza delle curve di 15 μGal in considerazione degli errori sui due tipi di misure.

Questo tentativo di analisi conferma le conclusioni precedentemente dedotte, indicando chiaramente che nel corso del 2019 l'intera area flegrea è stata in generale interessata da variazioni gravimetriche statisticamente non significative, tranne che isolatamente su due stazioni (La Pietra Villino Anna e Via Napoli Civico 27) posizionate sulla fascia costiera ad Est di Pozzuoli costa (Figura 2.4.4).

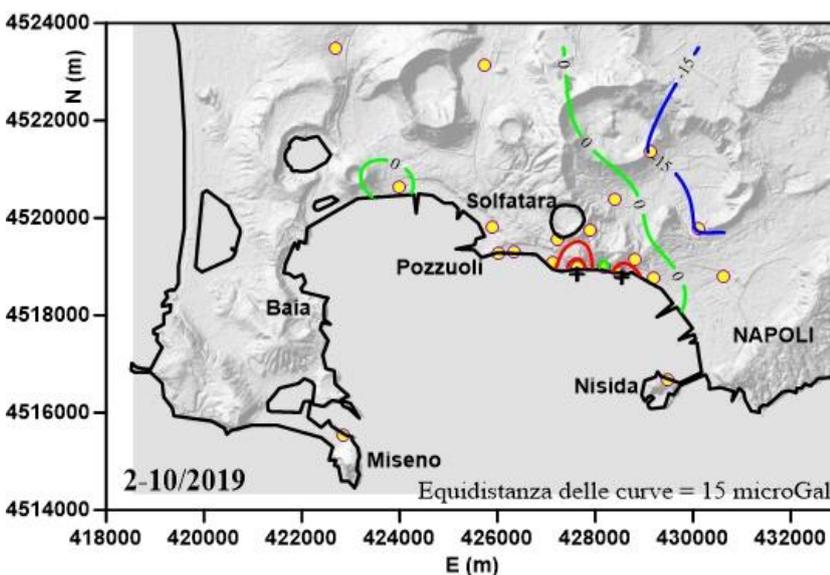


Figura 2.4.4 - Rappresentazione del campo delle variazioni di gravità calcolato per l'intervallo 2-10/2019 dall'integrazione delle misure relative (2/2019) e assolute (10/2019), considerando tutte le stazioni comuni ai due rilievi e utilizzabili ai fini dell'analisi effettuata. Il campo è tracciato con equidistanza di 15 μGal in considerazione degli errori sui due tipi di misure. Le variazioni positive, negative e nulle sono rispettivamente rappresentate con le curve in colore rosso, blu e verde. I cerchi pieni gialli rappresentano le stazioni gravimetriche utilizzate.

2.5 Monitoraggio satellitare con Interferometria SAR

Osservatorio Vesuviano e Osservatorio Nazionale Terremoti

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'Agencia Spaziale Tedesca, COSMO-SkyMed (CSK) dell'Agencia Spaziale Italiana (ASI) e Sentinel-1A/B del programma europeo Copernicus, gestita dall'Agencia Spaziale Europea (ESA).

I dati in banda X dei sensori TerraSAR-X e COSMO-SkyMed utilizzati per la redazione del presente rendiconto si sono resi disponibili nell'ambito dell'iniziativa internazionale GEO-GSNL (Group on Earth Observations - Geohazard Supersites and Natural Laboratory).

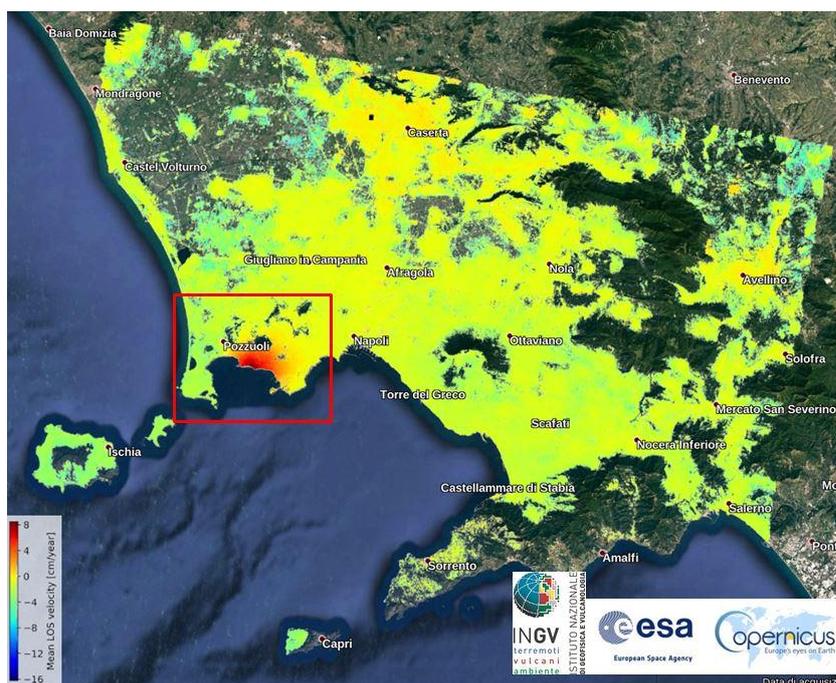
Sono stati inoltre utilizzati dati in banda C dei sensori Sentinel-1A/B dell'Agencia Spaziale Europea (ESA, European Space Agency) disponibili in rete attraverso i canali web della stessa Agencia.

Le elaborazioni interferometriche sono state effettuate avvalendosi di codici sia commerciali che di pubblico dominio, disponibili in rete attraverso i canali web degli sviluppatori.

Al fine di fornire un quadro d'insieme delle deformazioni agenti nel Distretto Vulcanico Napoletano nel corso del 2019 (02/01/2019-16/12/2019), in Figura 2.5.1 viene riportata una mappa della velocità media di deformazione del suolo in linea di vista del sensore ricavata dai dati dei sensori Sentinel-1A/B dell'ESA.

Ad esclusione dell'area Flegrea, dall'analisi della figura non si evidenziano deformazioni degne di nota nel periodo analizzato, potenzialmente evidenziabili su serie temporali più lunghe, considerata l'entità verosimilmente bassa che le caratterizza.

Figura 2.5.1 - Mappa della velocità media di deformazione nella linea di vista del sensore (Sentinel-1A/B) (02/01/2019-16/12/2019) - nel riquadro in rosso l'area Flegrea. Dati IWS - TOPS mode, orbite discendenti (22), swath 1.



InSAR - Interferometria differenziale classica

Al fine di valutare la deformazione in atto ai Campi Flegrei durante il secondo semestre del 2019, è stata elaborata una coppia interferometrica dai dati del sensore TerraSAR-X dell'Agencia Spaziale Tedesca (DLR, German Aerospace Center), operante in banda X.

Ciò ha consentito di produrre una mappa di deformazione (Fig. 2.5.2), ricavata dall'interferogramma differenziale 03/07/2019-06/01/2020, in cui ogni ciclo di colore corrisponde ad 1 cm di deformazione nella linea di vista del sensore (LoS, line-of-sight).

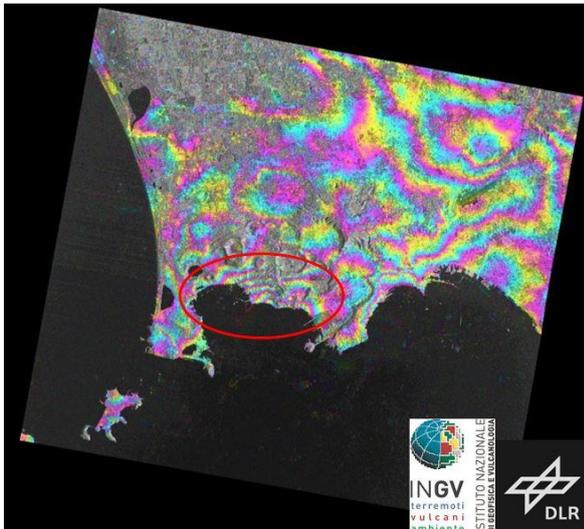
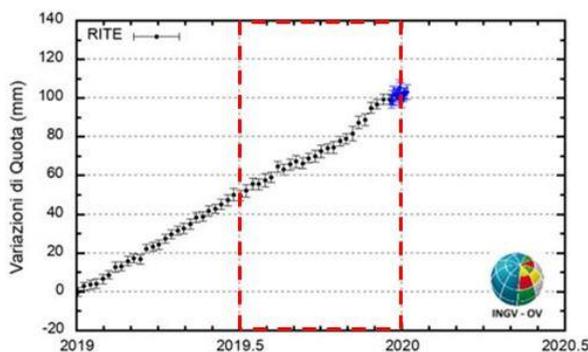


Figura 2.5.2 - Mappa di deformazione nella linea di vista del sensore TerraSAR-X per il periodo 03/07/2019-06/01/2020. Nell'ovale in rosso l'area di massima deformazione (1 cm/ciclo di colore, dati Stripmap, orbite discendenti, $B_{\perp} = 27$ m).

Dall'analisi della Figura 2.5.2, 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 della decorrelazione presente nelle aree più interne dei Campi Flegrei. Per un confronto si riporta il grafico di Figura 2.5.3a che mostra le variazioni di quota ricavate da una stazione GPS in continuo (RITE, Rione Terra, 01/01/2019-06/01/2020) localizzata nell'area di massima deformazione (Fig. 2.5.3b).



a)



b)

Figura 2.5.3 - a) Variazioni di quota registrate presso la stazione GPS in continuo RITE (Rione Terra); b) 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 2.5.3a, 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 2.5.2 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 est rispetto a quello reale, a causa dall'effetto combinato del passaggio discendente 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 SRTMGL1 (SRTM Global 1arcsec), con una spaziatura del pixel di ~30 m, le cui quote geoidiche sono state ridotte all'ellissoide di riferimento (WGS84) a partire dal geoido EGM96.

InSAR – Analisi multi-temporale (anno 2019)

Il monitoraggio interferometrico in modalità multi-temporale dell’area Flegrea per l’anno 2019 (02/01/2019-16/12/2019), è stato effettuato a partire da un dataset composto da 54 immagini dei sensori Sentinel-1A/B dell’ESA, che hanno consentito di generare 255 interferogrammi.

I due parametri Baseline temporale (Btemp, gg) e perpendicolare (B⊥, m) sono stati, rispettivamente:

- $6 \leq B_{temp} \leq 30$
- $1 \leq B_{\perp} \leq 171$

Altri parametri d’interesse sono:

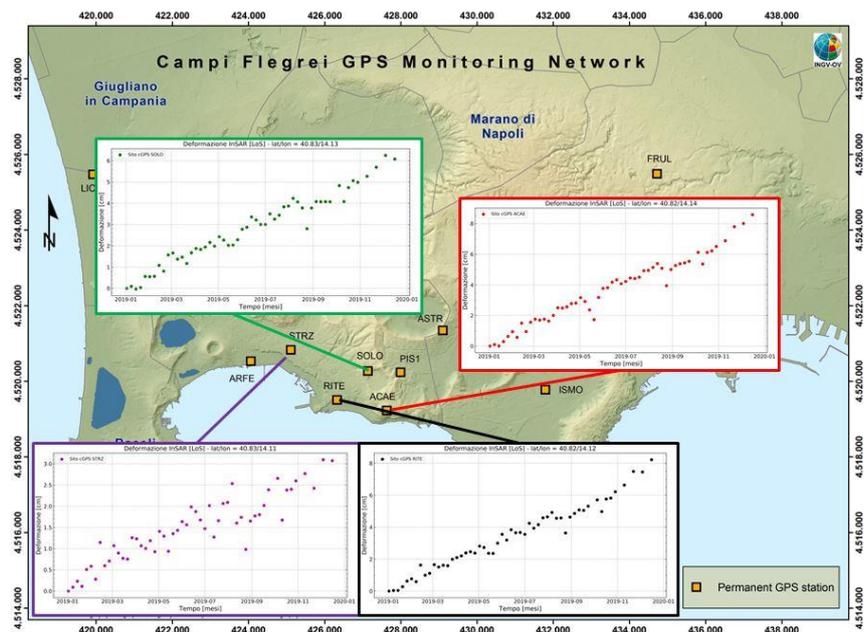
- Modalità d’acquisizione: TOPS mode, IWS (Interferometric Wide Swath)
- Orbita: Discendente (orbita 22, swath 1)
- Angolo di Incidenza (θ): $\sim 39^\circ$
- Fattore di multi-look: 8 x 2 (range x azimuth, dimensione del pixel a terra ~ 30 m)

Le orbite precise utilizzate per il processamento dei dati si sono rese disponibili sui canali web dell’ESA.

I dati sono stati elaborati mediante i codici *public domain* di cui sopra; la correzione del ritardo atmosferico è stata effettuata avvalendosi del modello atmosferico globale ERA-5 dello *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Per la rimozione del contributo topografico nella fase interferometrica è stato utilizzato un modello digitale del terreno ricavato da dati SRTMGL1 (*SRTM Global 1arcsec*) opportunamente ridotto all’ellissoide di riferimento WGS84. Il risultato di tale elaborazione ha consentito di generare sia la mappa della velocità media di deformazione del suolo di cui alla Figura 2.5.1, con un valor medio della velocità di deformazione di + 8cm/anno nel periodo analizzato, sia le serie temporali di deformazione su pixel coerenti della scena.

In Figura 2.5.4 sono rappresentate le serie temporali in LoS su punti coincidenti con i siti della rete GPS in continuo dei Campi Flegrei. Per tutti i punti analizzati risulta evidente il sollevamento in atto nell’area Flegrea verificatosi a partire dal 2011.

Figura 2.5.4 - Serie temporali (02/01/2019-16/12/2019) estratte in corrispondenza delle stazioni GPS in continuo (RITE, ACAE, SOLO, STRZ).



Per un confronto, si riporta il grafico delle variazioni in quota registrate durante il 2019 (01/01/2019-06/01/2020) presso le 4 stazioni GPS in continuo (Figura 2.5.5).

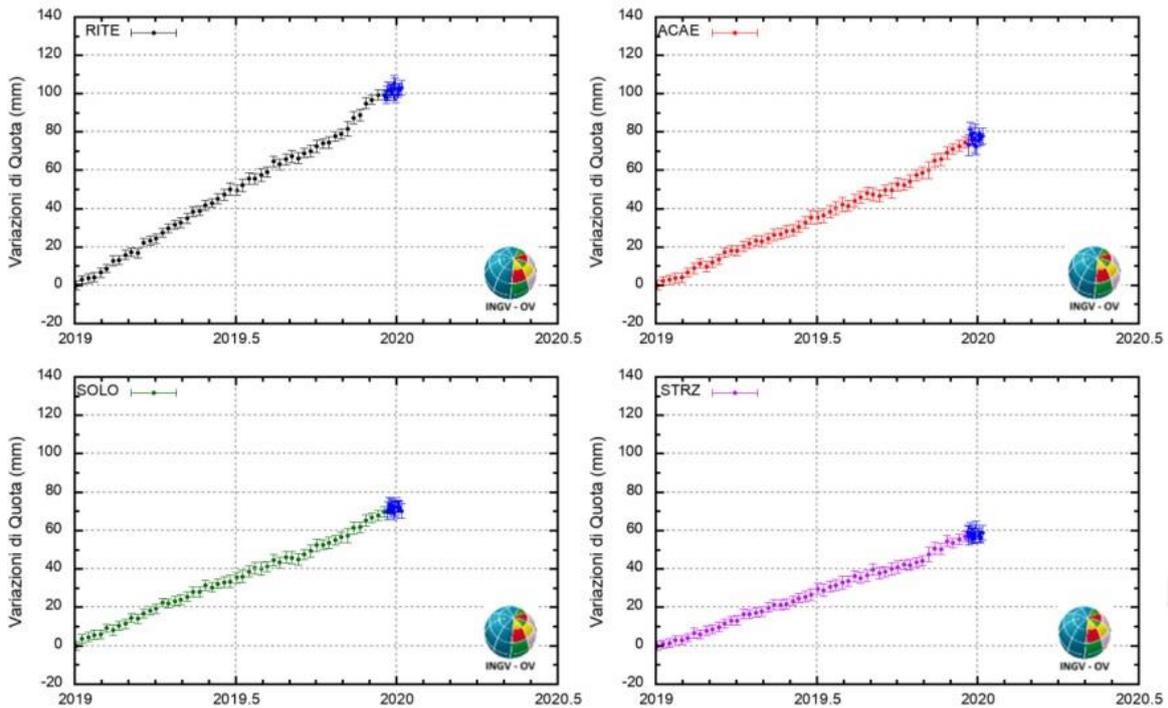


Figura 2.5.5 - Variazioni di quota (01/01/2019-06/01/2020) registrate presso le stazioni GPS in continuo di cui alla Fig. 2.5.1.4. I punti in blu rappresentano le variazioni giornaliere calcolate con prodotti rapidi IGS.

Qui gli andamenti temporali delle deformazioni misurate dalle stazioni GPS in continuo sono comparabili con i valori misurati dall’analisi interferometrica benché i valori assoluti siano diversi, a causa del fatto che il confronto avviene tra dati acquisiti su geometrie diverse (LoS vs. Verticale). Ciononostante, per la sola stazione GPS RITE, che insiste su di un punto in cui la deformazione del suolo è completamente verticale (vedi risultati di precedenti misure GPS/InSAR in letteratura), è stato possibile ridurre alla verticale la deformazione ricavata dall’InSAR, attraverso la relazione:

$$\text{deformazione verticale} \sim \text{deformazione LoS}/\cos \theta \quad (1)$$

Il confronto tra i dati InSAR così ridotti e le variazioni di quota dalle misure GPS è riportato nelle Figure 2.5.6a e 2.5.6b.

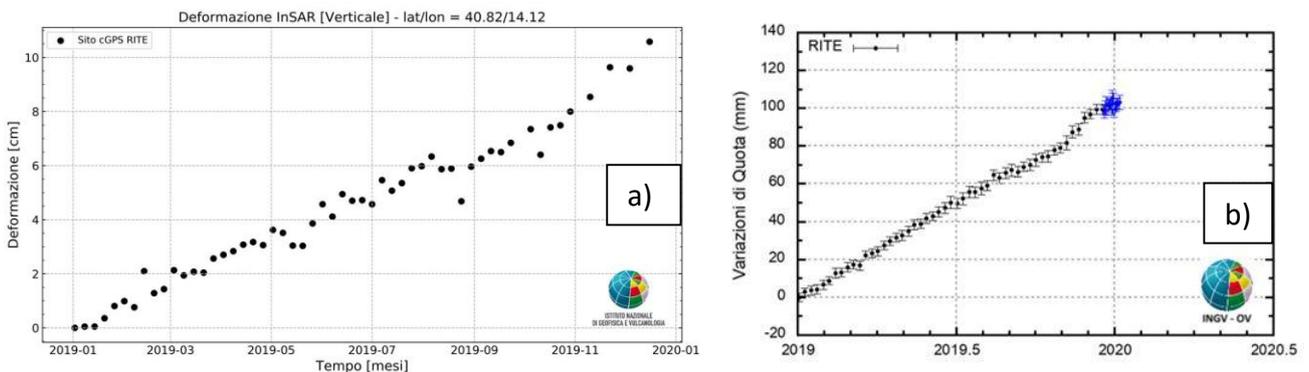


Figura 2.5.6 - a) Serie temporale (02/01/2019-16/12/2019) estratta in corrispondenza della stazione GPS in continuo RITE; b) Variazioni di quota (01/01/2019-06/01/2020) registrate presso la stazione GPS in continuo RITE.

InSAR – Analisi multi-temporale (2011 - 2019)

L'analisi multi-temporale dell'area Flegrea per l'intervallo 01/2011-12/2019 è stata effettuata a partire da un *dataset* composto da 493 immagini fornite dalle missioni COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Ciò ha consentito di generare 3782 interferogrammi, che sono stati quindi filtrati e srotolati per calcolare i parametri d'interesse.

I valori massimi dei due parametri *Baseline* temporale (B_{temp}) e perpendicolare (B_{\perp}) sono stati, rispettivamente:

- B_{temp} max = 120 giorni
- B_{\perp} max = 280 m

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 l'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* (rumore) tipico delle immagini SAR, si è scelto di utilizzare fattori di *multi-look* tali da avere una dimensione del pixel a terra di ~ 30 m sia in range che in azimuth.

Per la rimozione del contributo in fase della topografia è stato utilizzato il modello di elevazione digitale del terreno a 12 m 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.

Durante il secondo semestre del 2019, è stato perciò possibile aggiornare le serie temporali dell'area d'interesse dai dati Cosmo-SkyMed dell'ASI rispetto a quanto già riportato nel rendiconto del precedente semestre 2019.

Nelle Figure 2.5.7a e 2.5.7b viene riportato l'aggiornamento delle serie temporali per i siti GPS in continuo RITE e STRZ, localizzati in prossimità della costa nell'area di massima deformazione.

Il *trend* deformativo è confermato anche in questo secondo semestre 2019 e non sembra decelerare, con velocità di deformazione registrate su RITE e STRZ rispettivamente di ~ 3.5 cm/anno e ~ 2.8 cm/anno in LoS.

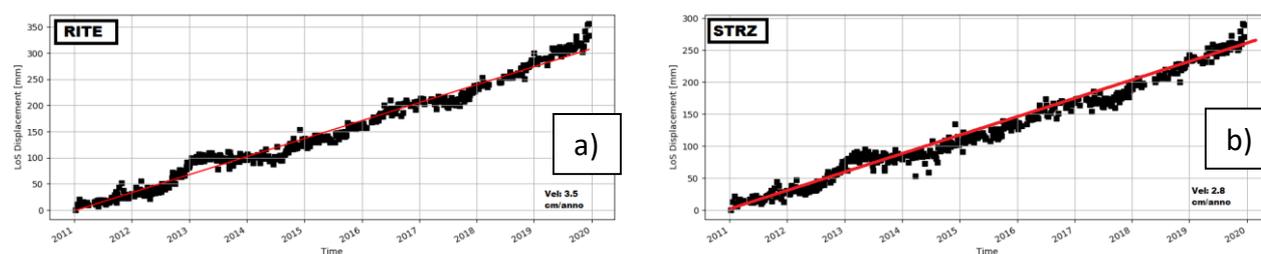


Figura 2.5.7 - Serie temporali 01/2011-12/2019 estratte in corrispondenza delle stazioni GPS RITE (a) e STRZ (b).

Le serie temporali estratti da 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 linea di vista del sensore per cui, data la geometria di acquisizione, la componente verticale di deformazione è sensibilmente più alta, in accordo con la suddetta relazione (1).

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" in collaborazione con la Sezione di Napoli "Osservatorio Vesuviano" con dati termici satellitari.

3.1 Rete Permanente Monitoraggio Termico ad Immagine - 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 secondo 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.

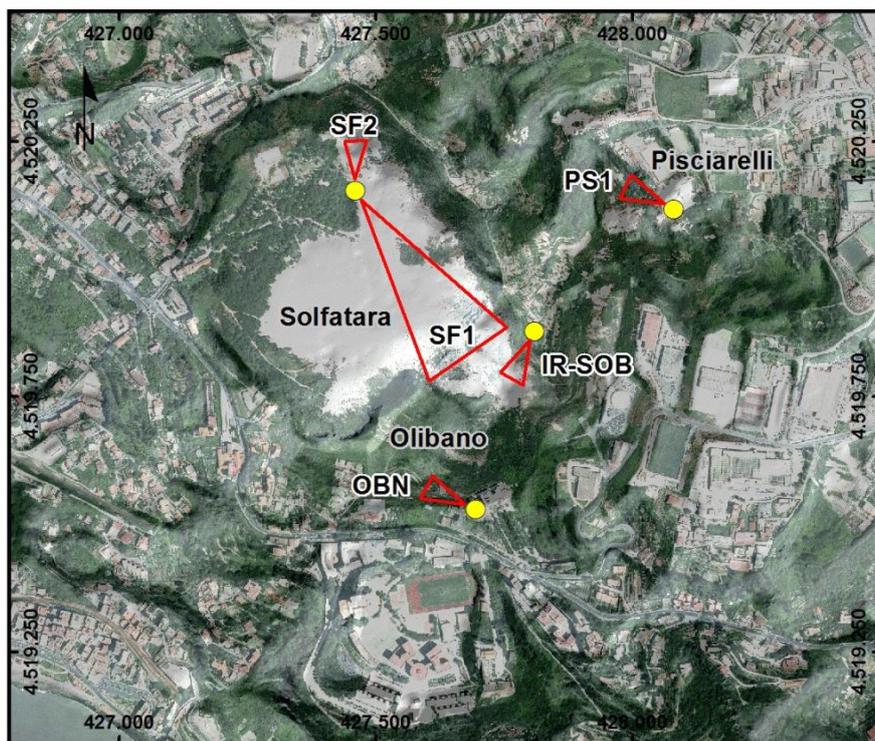


Figura 3.1.1 – Mappa della Rete Permanente di Monitoraggio Termico ad Immagine operante ai Campi Flegrei. Ubicazione stazioni remote (punti gialli), le basi dei triangoli isosceli rappresentano schematicamente le aree target.

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 31 dicembre 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.

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

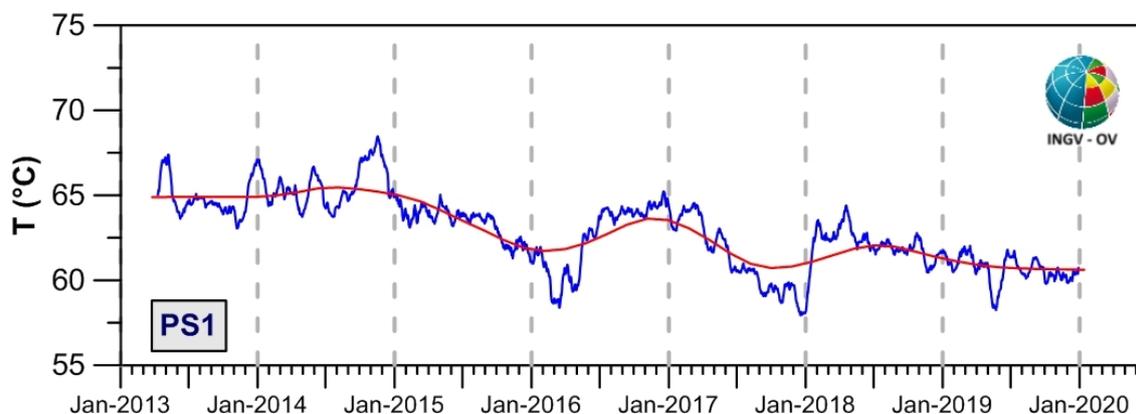


Figura 3.1.2 - Stazione Pisciarelli (PS1). Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR: media mensile (blu), trend a lungo termine (rosso).

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

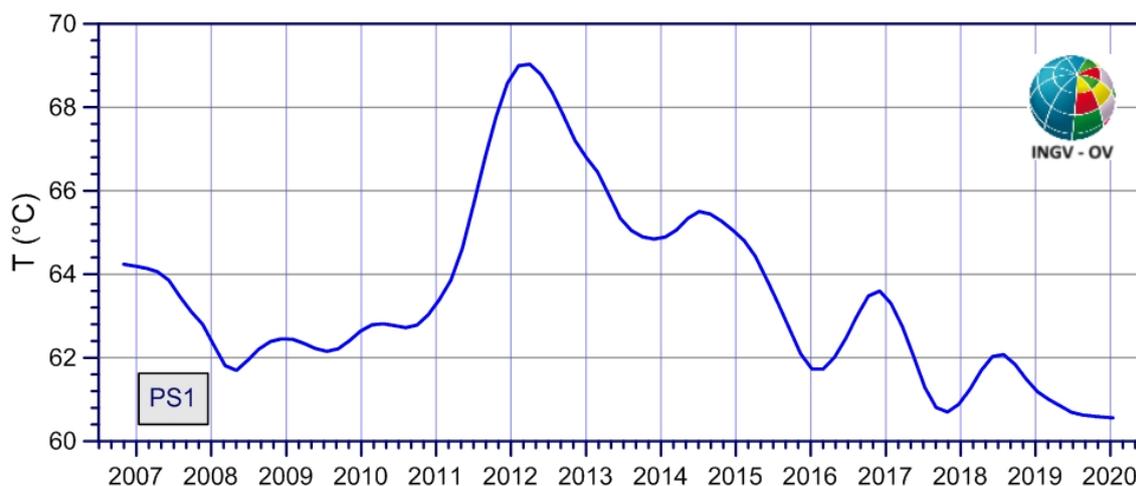


Figura 3.1.3 - Stazione Pisciarelli (PS1). Trend a lungo termine dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR ottenute mediante applicazione dell' algoritmo STL.

Il grafico in Fig. 3.1.3 evidenzia che, dopo il raggiungimento del picco massimo dei valori di temperatura nella prima metà del 2012, si rileva la presenza un trend in costante diminuzione seppure caratterizzato da ampie oscillazioni a lungo periodo.

Dal mese di luglio 2018 a tutto dicembre 2019, il trend a lungo termine della temperatura superficiale dell'area target mostra una leggera e costante tendenza alla diminuzione raggiungendo, nel mese di dicembre 2019, i valori minimi rilevati nell'intero periodo di osservazione.

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.

Dal secondo semestre 2018 fino a tutto dicembre 2019, seppure in presenza di oscillazioni di varia ampiezza e periodo, si osserva un andamento dei valori di temperatura sostanzialmente stazionario.

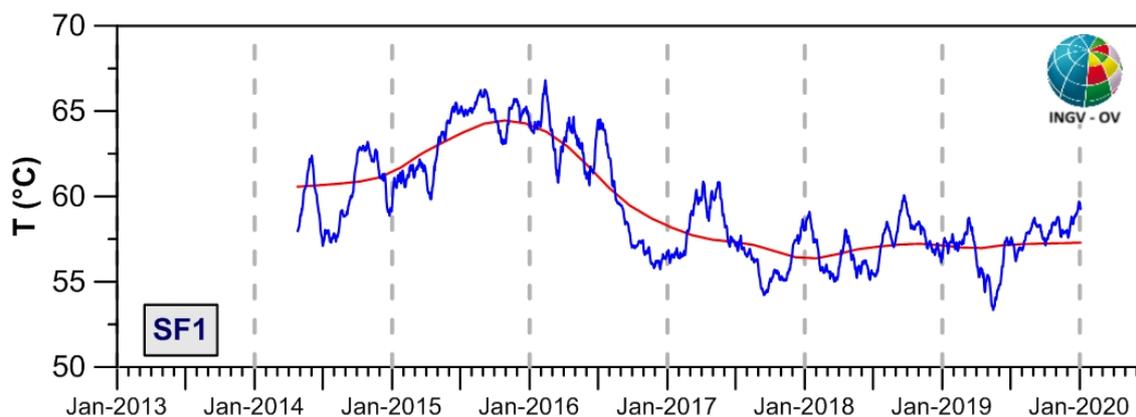


Figura 3.1.4 - Stazione Solfatara (SF1). Serie temporale delle medie mensili dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell' algoritmo STL.

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 secondo 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).

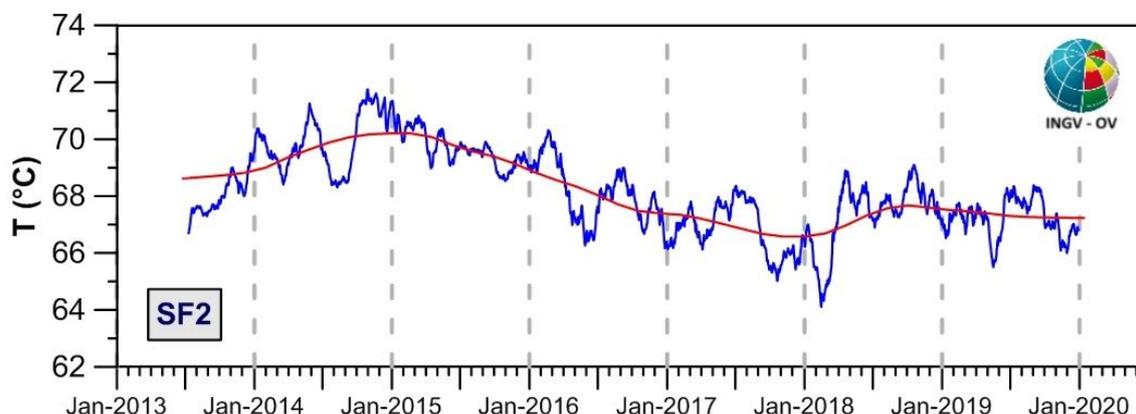


Figura 3.1.5 - Stazione Solfatarata (SF2). Serie temporale delle medie mensili dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

OLIBANO

I dati relativi all'elaborazione dei valori di temperatura massima rilevati dalla stazione OBN mostrano, come già osservato per la stazione PS1, un lieve incremento dei valori da marzo 2015 a dicembre 2016, seguito da lieve diminuzione fino a dicembre 2017 (Figura 3.1.6). 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 secondo semestre 2019 la serie temporale delle temperature massime rilevate dalla stazione OBN è caratterizzata dalla presenza di oscillazioni di varia ampiezza con trend a lungo termine sostanzialmente stabile con lieve tendenza all'aumento (Figura 3.1.6).

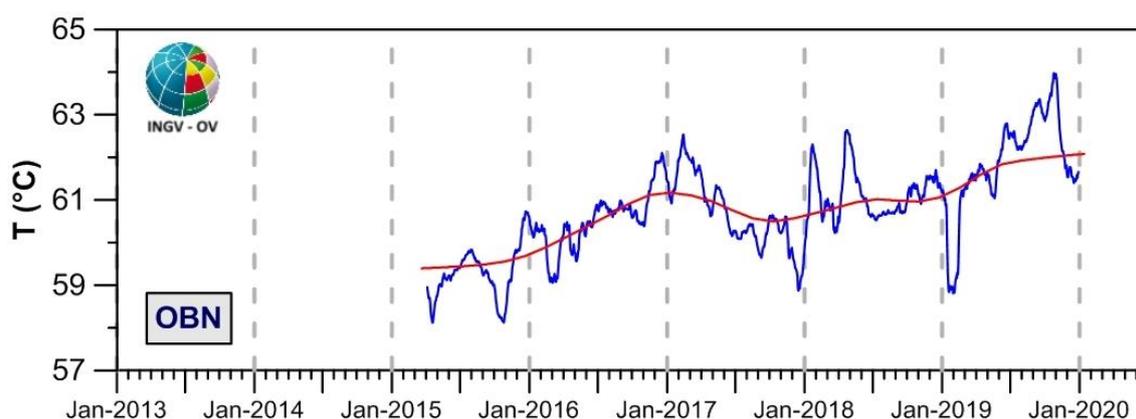


Figura 3.1.6 - Stazione Monte Olibano (OBN). Serie temporale delle medie mensili dei valori di temperatura massima rilevati nell'immagine IR destagionalizzata mediante applicazione dell'algoritmo STL.

IR-SOB

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

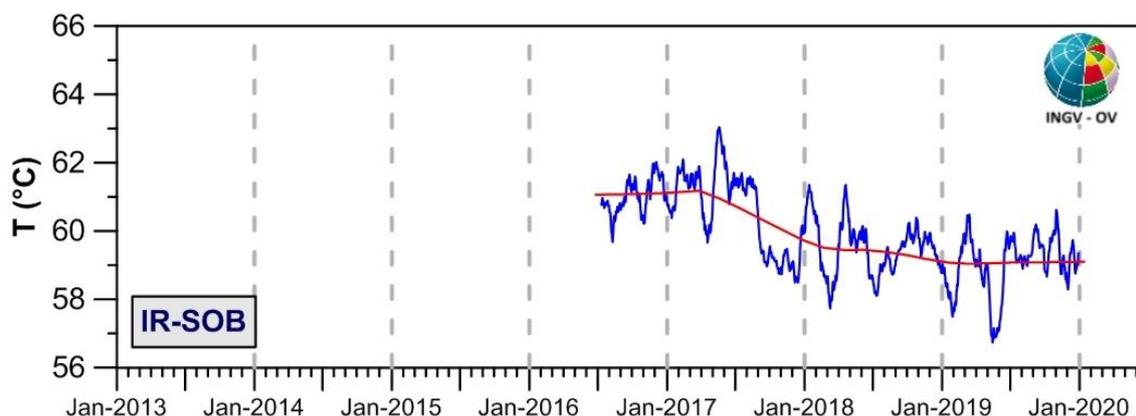


Figura 3.1.7 - Stazione IR-SOB. Serie temporali dei valori di temperatura massima rilevati nelle immagini IR: media mensile (blu), trend a lungo termine (rosso).

3.2 Monitoraggio Termico con Termocamera Mobile e Termocoppia - 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.

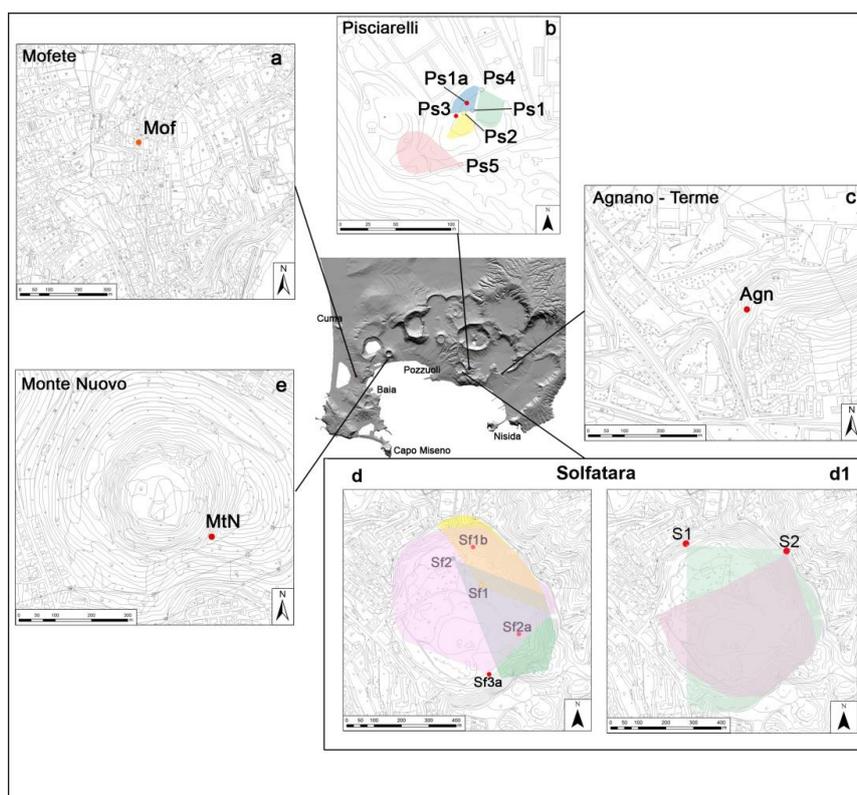


Figura 3.2.1 – Ubicazione dei punti di misura e dei settori indagati ai Campi Flegrei. I pallini rossi indicano i punti stazione dai quali sono stati effettuati rilievi con termocoppia rigida e telecamera termica. Nel riquadro b, le aree colorate in celeste, verde e rosa indicano i versanti rilevati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

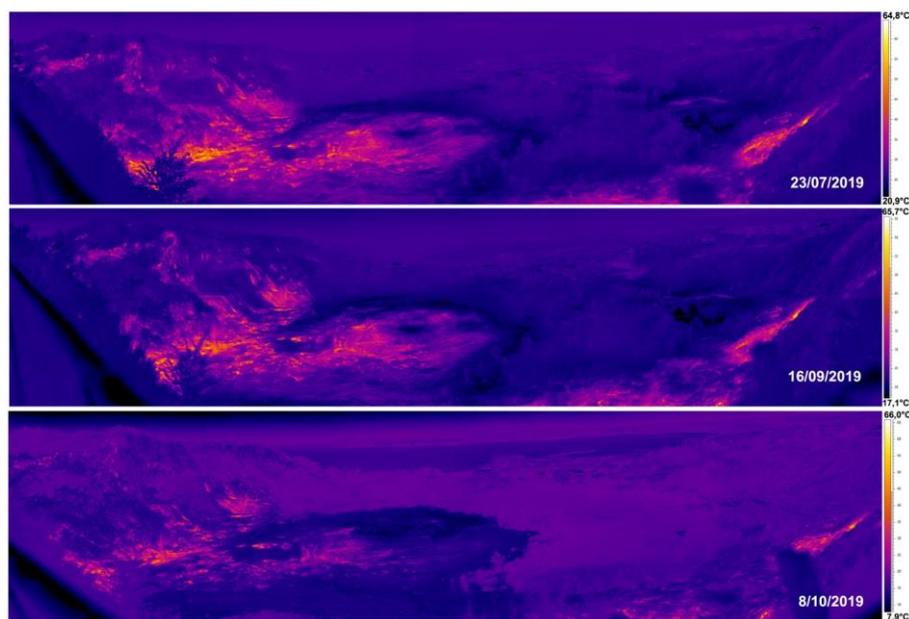
La Solfatara

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 ed è impossibile 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 primo semestre (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 secondo semestre 2019 sono state effettuate misure periodiche mensili tranne che nel mese di novembre a causa di forti piogge che hanno reso inaccessibile la strada. Il confronto delle immagini areali termiche non mostra una significativa variazione nella distribuzione delle temperature (Fig. 3.2.2), anche rispetto al semestre precedente.

Solfatara (S4)

Figura 3.2.2 - Fotocomposizione di immagini termiche riprese dal punto stazione S2 di Figura 3.2.1d1, relative al 23/07/2019, 16/09/2019 e 08/10/2019.



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), 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 secondo semestre 2019, sono stati effettuati rilievi termici da drone ripresi dall'elipista a Pisciarelli (Fig. 3.2.3). Solo nel mese di novembre il drone non è stato utilizzabile perché in manutenzione, pertanto sono stati effettuati rilievi termici da un nuovo punto P provvisorio in prossimità del sito Ps4 (Fig. 3.2.1).

Il drone utilizzato è un FlySmart esacottero equipaggiato da una termocamera FLIR VUEPRO ad alta risoluzione (640x512 pixel) e precisione ± 5 °C.

La fotocomposizione termica dell'area evidenzia due aree con maggiore anomalia termica, da ora in avanti denominate PsD1 e PsD2 (Pisciarelli da Drone 1 e 2; Fig. 3.2.3). L'area PsD1 racchiude i versanti che in passato venivano rilevati con termocamera a mano dalle stazioni Ps1 e Ps4, l'area PsD2 include il versante rilevato in passato dalla stazione Ps5 (Fig. 3.2.1d), in corrispondenza della telecamera termica fissa TIRNet dell'Osservatorio Vesuviano.

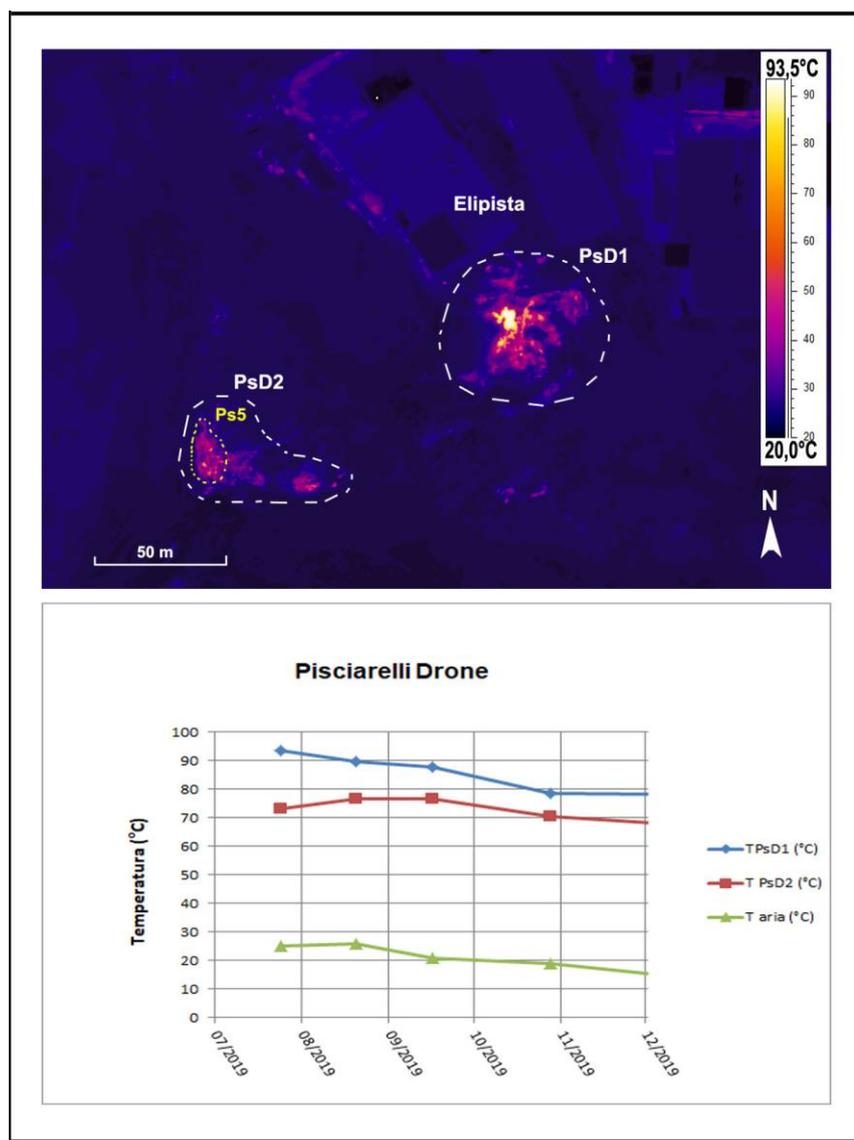


Figura 3.2.3 - Fotocomposizione di immagini termiche rilevate da drone nel mese di luglio 2019 (in alto). Valori massimi di temperatura (T), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico, da luglio a dicembre 2019.

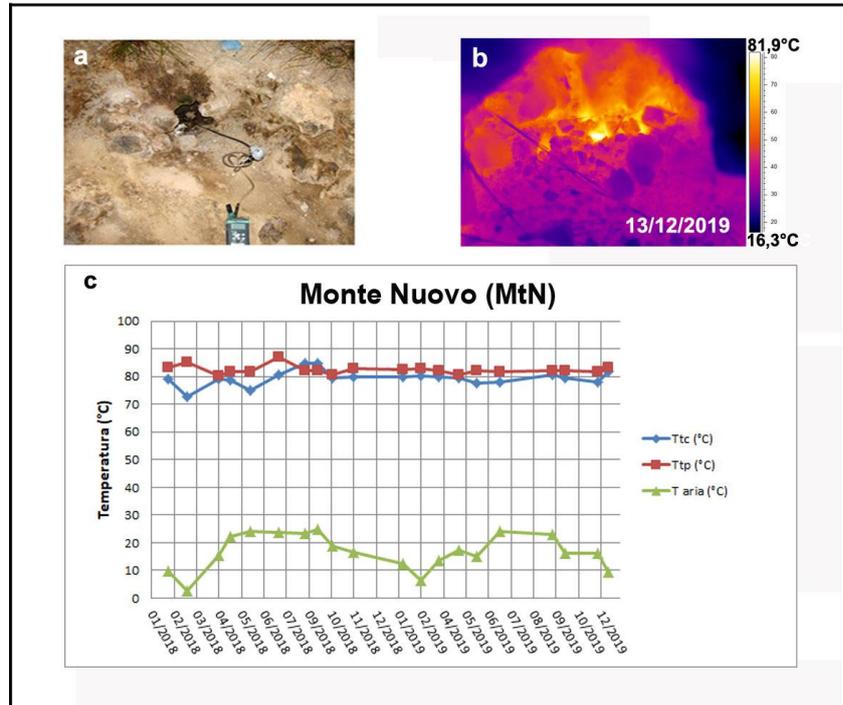
Dalla comparazione della fotocomposizione termica delle immagini riprese da drone nel secondo semestre 2019 è stato possibile effettuare un grafico di temperatura massima delle aree PsD1 e PsD2 nel tempo (Fig. 3.2.3). Tali valori non mostrano significative variazioni anche rispetto al semestre precedente, a meno di variazioni stagionali. Anche il valore di temperatura massima misurato a novembre con termocamera a mano nell'area prossima a Ps4, di circa 83°C, è in linea con quanto rilevato da drone.

Monte Nuovo

Nel corso del secondo semestre 2019 sono state effettuate misure periodiche mensili lungo il versante meridionale dell'edificio di Monte Nuovo (Fig. 3.2.1e) fatta eccezione dei mesi di luglio e agosto per inaccessibilità del sentiero.

I rilievi termici effettuati con telecamera termica e termocoppia rigida (Fig. 3.2.4) mostrano valori di temperatura piuttosto stabili ad eccezione delle variazioni stagionali e simili a quelli misurati nel semestre precedente (Figura 3.2.4c).

Figura 3.2.4 – 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 dicembre 2019 (c).



Agnano Terme

Nel corso del secondo 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. 3.2.5) mostrano valori di temperatura piuttosto stabili, ad eccezione delle variazioni stagionali, e simili a quelli misurati nel semestre precedente (Fig. 3.2.5c).

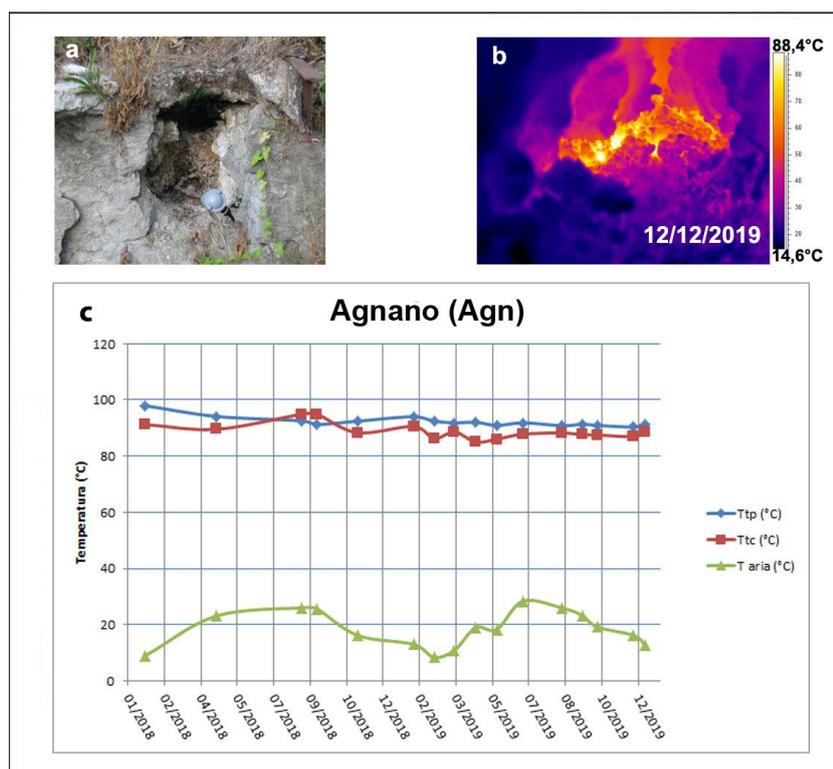
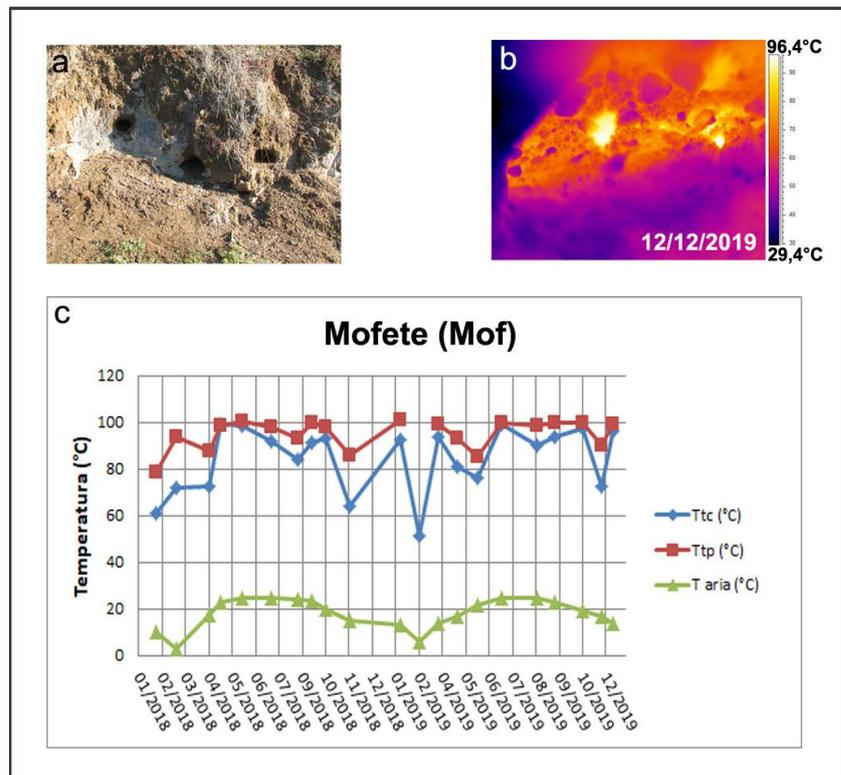


Figura 3.2.5 - Fumarola all'interno dello stabilimento termale delle “Terme di Agnano”. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Agn di figura 1.1c. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico, da gennaio 2018 a dicembre 2019 (c).

Mofete

Nel corso del secondo semestre 2019 sono state effettuate misure periodiche mensili in località Mofete (Fig. 3.2.1a). I valori di temperatura misurati, compresi tra circa 90 e 100 °C per la termocoppia e tra circa 72 e 97 °C per la termocamera, sono in linea con le medie stagionali del semestre precedente (Fig. 3.2.6c).

Figura 3.2.6 - 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 dicembre 2019 (c).



3.3 Comparazione della temperatura superficiale da dati satellitari e Rete TIRNet

Osservatorio Nazionale Terremoti e 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.

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/>)

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 3.3.2 - Caratteristiche di ASTER.

Instrument	VNIR		SWIR		TIR	
	1	0.52-0.60	4	1.60-1.70	10	8.125-8.475
Bands and	2	0.63-0.69	5	2.145-2.185	11	8.475-8.825
Spectral Range (µm)	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 luglio – dicembre 2019 sono stati acquisiti i seguenti dati satellitari ottici:

ASTER Diurni Luglio: Nessuno Agosto: Nessuno Settembre: 8 e 15 Ottobre: Nessuno Novembre: Nessuno Dicembre: Nessuno	ASTER Notturmi Luglio: 13 e 22 Agosto: 7 e 30 Settembre: 8 e 24 Ottobre: 17 Novembre: Nessuno Dicembre: 4 e 13
LANDSAT8 Diurni Luglio: 5, 14, 21 e 30 Agosto: 6, 15, 22 e 31 Settembre: 7 e 16 Ottobre: 9 e 18 Novembre: 26 Dicembre: 28	LANDSAT8 Notturmi Luglio: 30 Agosto: 15 Settembre: 16 Ottobre: 18 Novembre: Nessuno Dicembre: 5

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

N° 2 ASTER Diurni

N° 9 ASTER Notturmi

N° 14 LANDSAT8 Diurni

N° 5 LANDSAT8 Notturmi

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 di tali dati, le informazioni necessarie per il calcolo delle correzioni atmosferiche sono state ricavate dal sito <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

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.

Le riprese diurne delle immagini satellitari contengono informazioni sia di tipo emesso che riflesso, e risulta complesso separare il contributo della radianza emessa dalle superfici indagate dal contributo dell'irraggiamento dovuto alla illuminazione solare. Viceversa, in riprese effettuate di notte, sempre nello stesso intervallo, mancando l'irradianza del sole sarà registrata soltanto la radianza emessa. Inoltre, l'utilizzo di immagini notturne consente di rilevare con maggior precisione eventuali variazioni spaziotemporali della temperatura del suolo in aree caratterizzate da rilascio termico particolarmente elevato anche grazie ad una temperatura di "background" dell'immagine maggiormente uniforme.

Per questo motivo sono stati elaborati e analizzati esclusivamente i dati relativi ai passaggi notturni.

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

Dall'inizio del 2017 è in corso una attività di ricerca finalizzata alla validazione dei risultati relativi alla stima della temperatura superficiale da dati satellitari ed alla valutazione dell'affidabilità e robustezza dell'algoritmo utilizzato per il calcolo delle appropriate correzioni atmosferiche necessarie per ottenere la temperatura di superficie a partire dalla radianza misurata al sensore.

Tale attività è realizzata mediante comparazione tra le misure di temperatura superficiale effettuate in-situ dalle stazioni della rete permanente di monitoraggio IR operanti nell'area dei Campi Flegrei (TIRNet) e quelle ottenute dal processamento delle immagini satellitari.

La rete TIRNet 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 è situata sul bordo sud-orientale del cratere della Solfatara (SOB) [cfr. § 3.1].

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 3.3.1).



Figura 3.3.1 - 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 3.3.2a).

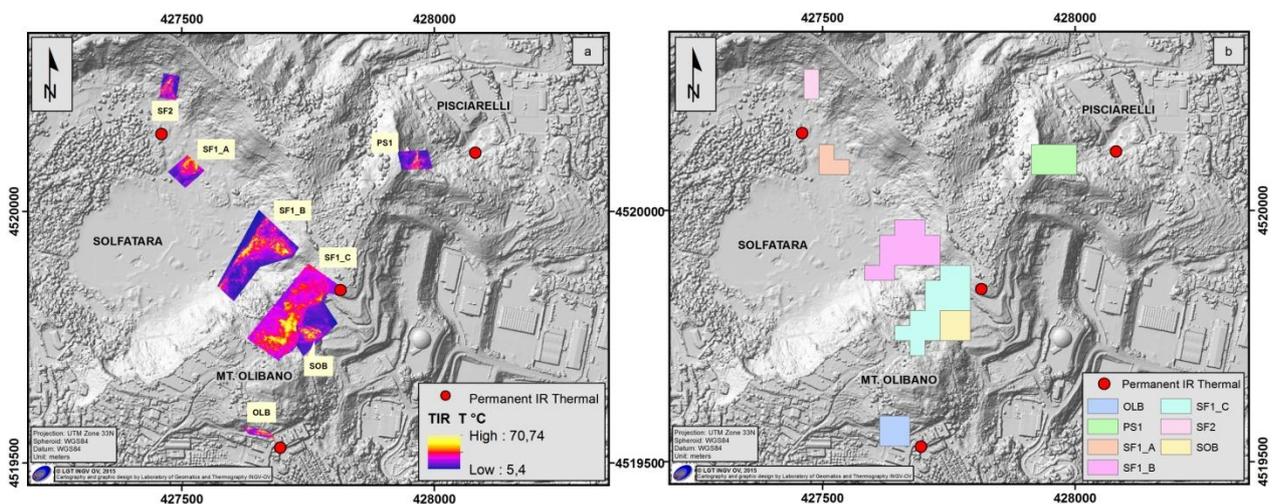


Figura 3.3.2 - Immagini termiche georiferite del 17/10/2019 (a) e aree di analisi (b).

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 3.3.2b).

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 3.3.3).

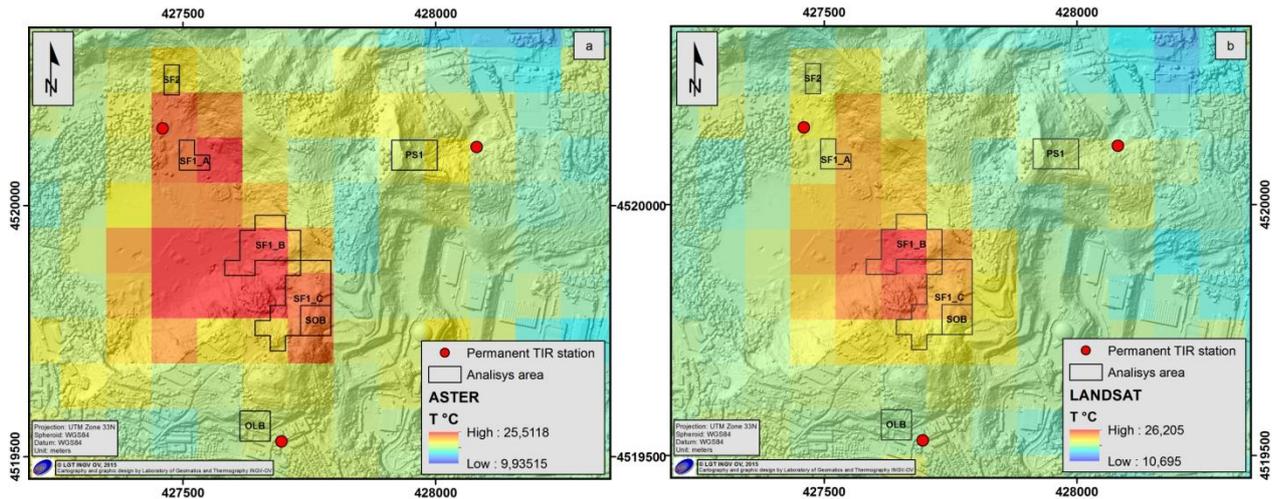
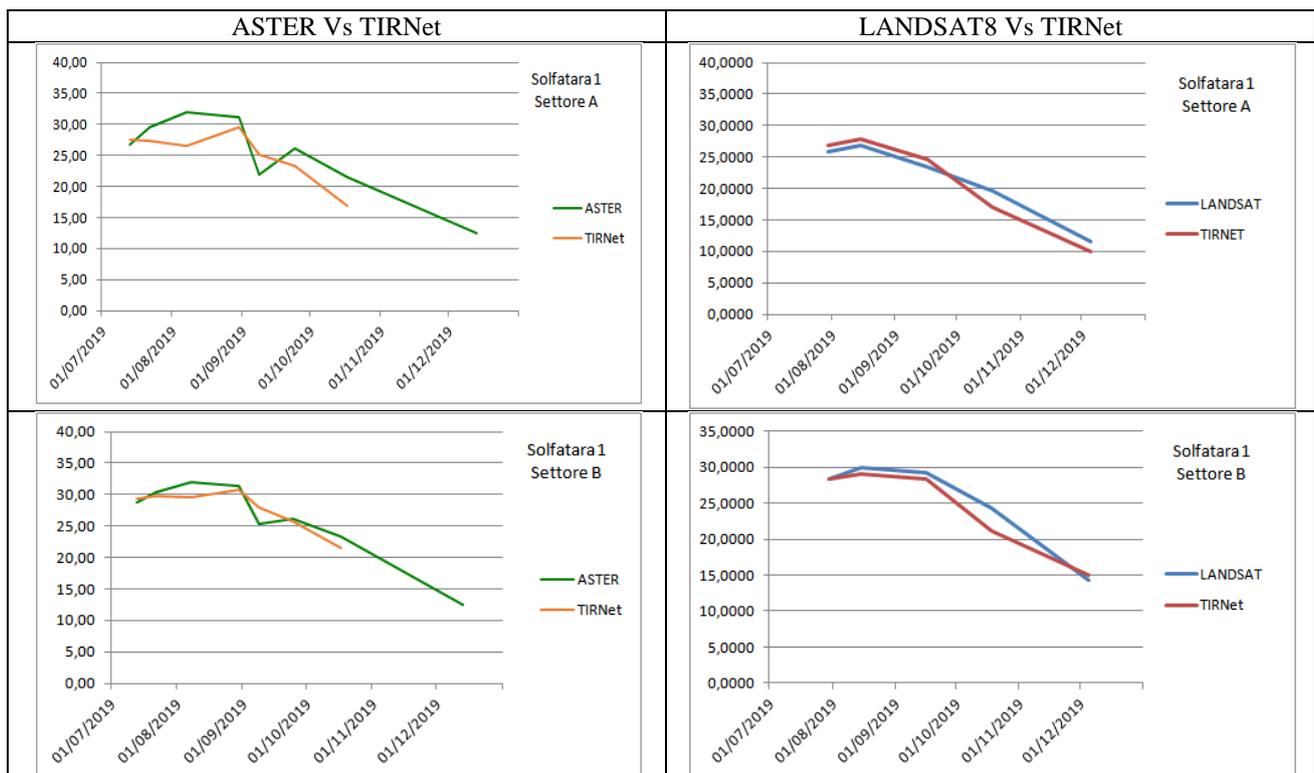


Figura 3.3.3 - Immagini termiche satellitari ASTER (a) e Landsat8 (b) rispettivamente del 17 e del 18 ottobre 2019. I poligoni racchiudono le aree inquadrare dalla TIRNet.

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 secondo semestre 2019.





Dai grafici precedenti è possibile osservare che i risultati ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti dai due sistemi di acquisizione a scale differenti sono comparabili.

Questa osservazione consente di validare la stima della temperatura di superficie ottenuta tramite processamento dei dati satellitari garantendo la robustezza e l'affidabilità dell'algoritmo utilizzato per correggere le immagini dalle distorsioni dovute alle condizioni atmosferiche.

Nelle Figure 3.3.4 e 3.3.5 sono riportate le mappe di stima di temperatura superficiale notturne ottenuta da dati ASTER e Landsat8, acquisite rispettivamente il 17 ed il 18 ottobre 2019 sull'area Flegrea.

Figura 3.3.4 - Mappa di temperatura superficiale relativa al dato ASTER acquisito alle 21.10 UTC del 17 ottobre 2019.

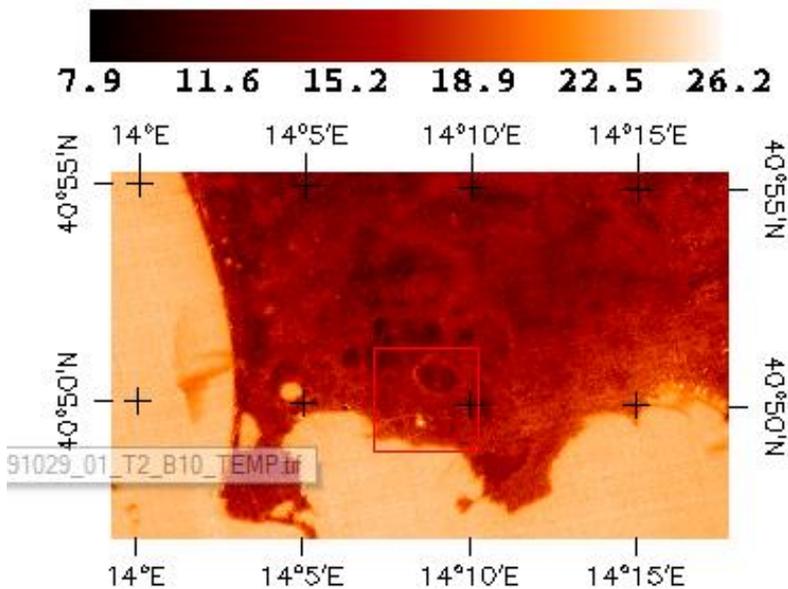
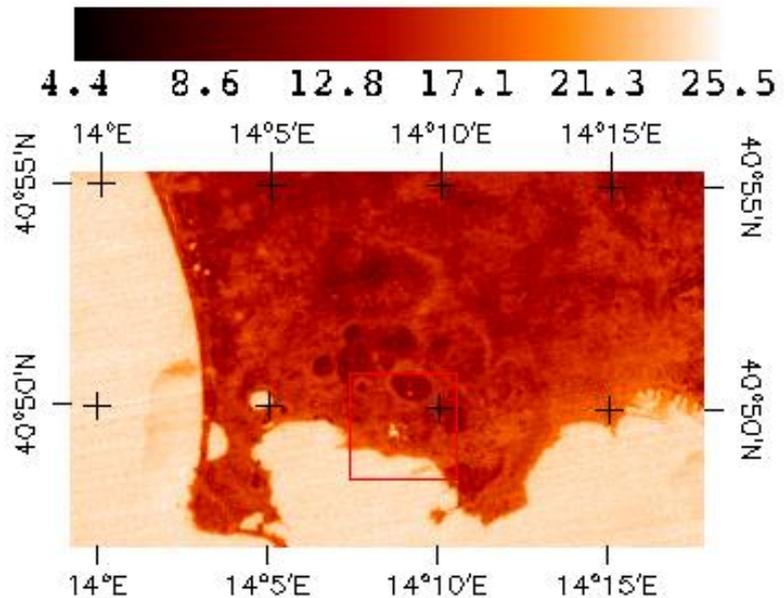


Figura 3.3.5 - Mappa di temperatura superficiale relativa al dato LANDSAT8 acquisito alle 20.46 UTC del 18 ottobre 2019.

In tali mappe, scelte come rappresentative del periodo luglio-dicembre 2019, si osserva come la temperatura superficiale stimata dai dati ASTER e LANDSAT nelle aree di maggiore emissione termica del Cratere della Solfatarata (Bocca Nuova e Bocca Grande - Figura 3.3.6) e nell'area di Pisciarelli non evidenzia nel periodo considerato variazioni significative.



Figura 3.3.6 - Bocca Nuova (a destra dell'immagine) e Bocca Grande (a centro immagine)

4 - MONITORAGGIO GEOCHIMICO

Le attività di Monitoraggio Geochimico dell'area dei Campi Flegrei vengono svolte dalla Sezione di Napoli "Osservatorio Vesuviano" e dalla Sezione di Roma1.

4.1 Monitoraggio Geochimico dell'Osservatorio Vesuviano

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 4.1.1; Tabella 4.1.1), 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.

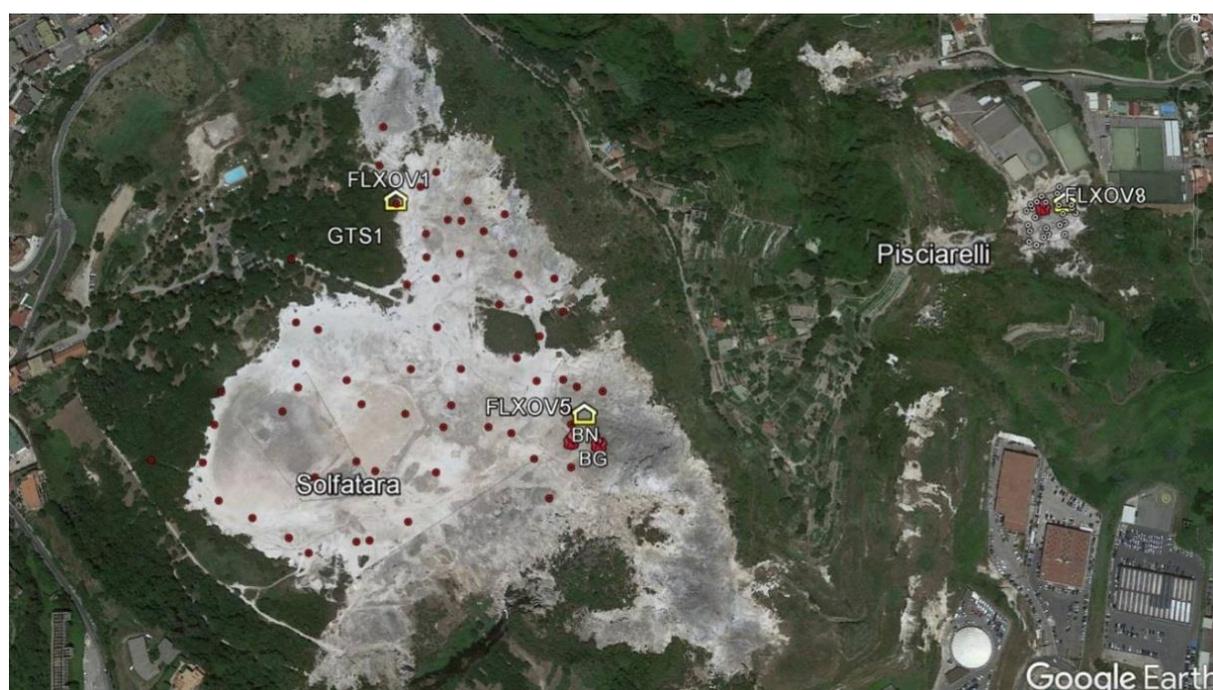


Figura 4.1.1 - Ubicazione delle stazioni della rete geochimica ai Campi Flegrei e dei siti dove sono eseguite le attività di monitoraggio geochimico. In particolare sono riportate le quattro stazioni geochimiche ubicate in area Solfatara-Pisciarelli, le principali fumarole della Solfatara (BG e BN) e 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 4.1.1 riassume le caratteristiche della Rete gestita dall'Osservatorio Vesuviano per il monitoraggio continuo dei parametri geochimici ai Campi Flegrei.

Tabella 4.1.1 – 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 2018	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

La stazione multiparametrica FLXOV5, installata in area cratere 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.

Le attività svolte dall'Osservatorio Vesuviano nell'area flegrea durante il secondo semestre 2019 sono di seguito riportate:

- Campagne mensili di campionamento dei gas fumarolici emessi dalla Solfatara di Pozzuoli e dalla zona dei Pisciarelli, analisi della composizione chimica (H₂O, CO₂, H₂S, H₂, Ar, N₂, CH₄, He e CO) ed isotopica (⁴⁰Ar/³⁶Ar, δ¹⁵N_{N2}, δ¹³C_{CO2}, δ¹⁸O_{CO2}, δ²H_{H2O}, δ¹⁸O_{H2O}).
- Campagne mensili di misura del flusso di CO₂ e della temperatura del suolo a 10 cm di profondità, in circa 60 punti fissi ubicati all'interno del cratere della Solfatara.
- Campagne mensili di misura dei flussi di CO₂ e della temperatura dal suolo su 28 punti fissi nella zona dei Pisciarelli;
- Monitoraggio continuo del flusso di CO₂ dal suolo, gradiente di temperatura nel suolo, temperatura fumarole, pressione differenziale, parametri meteorologici e misure Multigas tramite le stazioni automatiche FLXOV8 (ubicata a Pisciarelli, che ha sostituito la vecchia stazione FLXOV3), FLXOV1 e FLXOV5 (ubicate nel cratere della Solfatara); monitoraggio del gradiente termico del suolo nel cratere della Solfatara (stazione GTS1).
- Inoltre, sono continuate le attività finalizzate al monitoraggio multiparametrico della falda freatica, consistenti nel campionamento, analisi e caratterizzazione geochimica delle acque.

Misure di flusso di CO₂ e temperatura al suolo.

Le campagne mensili di misura del flusso di CO₂ dal suolo, su circa 60 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 4.1.2). 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 4.1.3), con un incremento del valore medio delle temperature misurate di oltre 6 °C nel periodo 2002-2019.

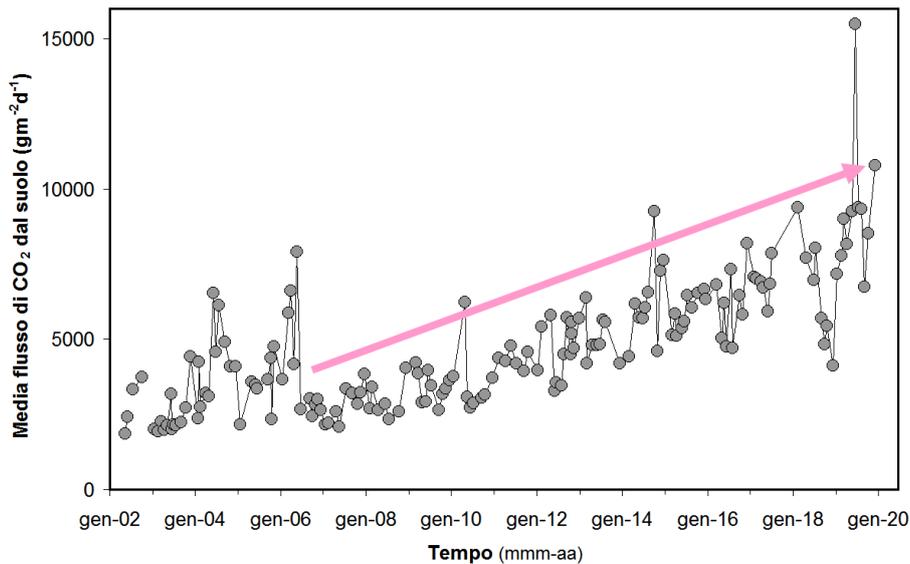
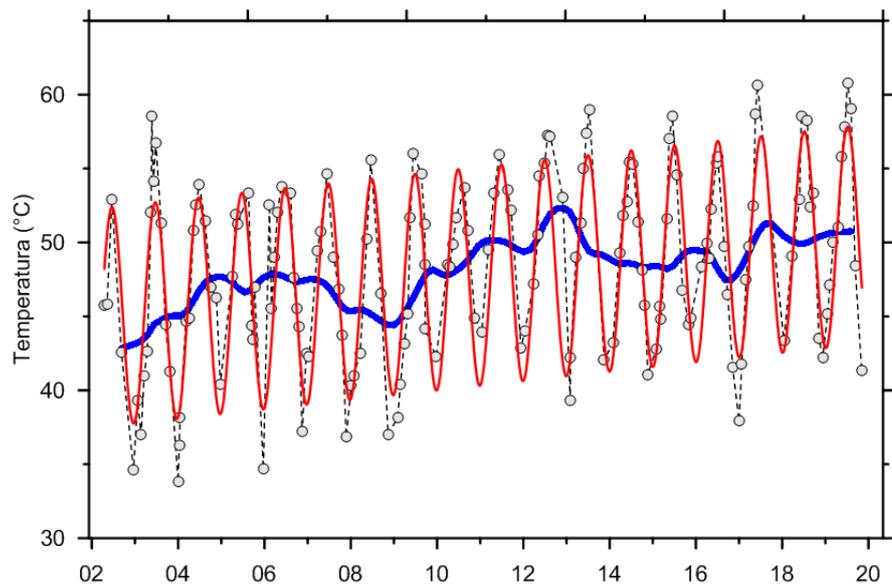


Figura 4.1.2 - Cronogramma della media dei flussi di CO₂ dal suolo misurati su ~60 punti fissi nell'area craterica della Solfatara.

Figura 4.1.3 - Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su circa 60 punti fissi nell'area craterica della Solfatara. Va evidenziato l'incremento del valore medio nel periodo 2002-2019 di oltre 6 °C. I dati sono stati elaborati mediante un algoritmo analitico di destagionalizzazione STL (Seasonal Trend Decomposition), il trend destagionalizzato è riportato con la linea blu.



Nella mappa di Figura 4.1.4a) 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. 4.1.4b). 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%.

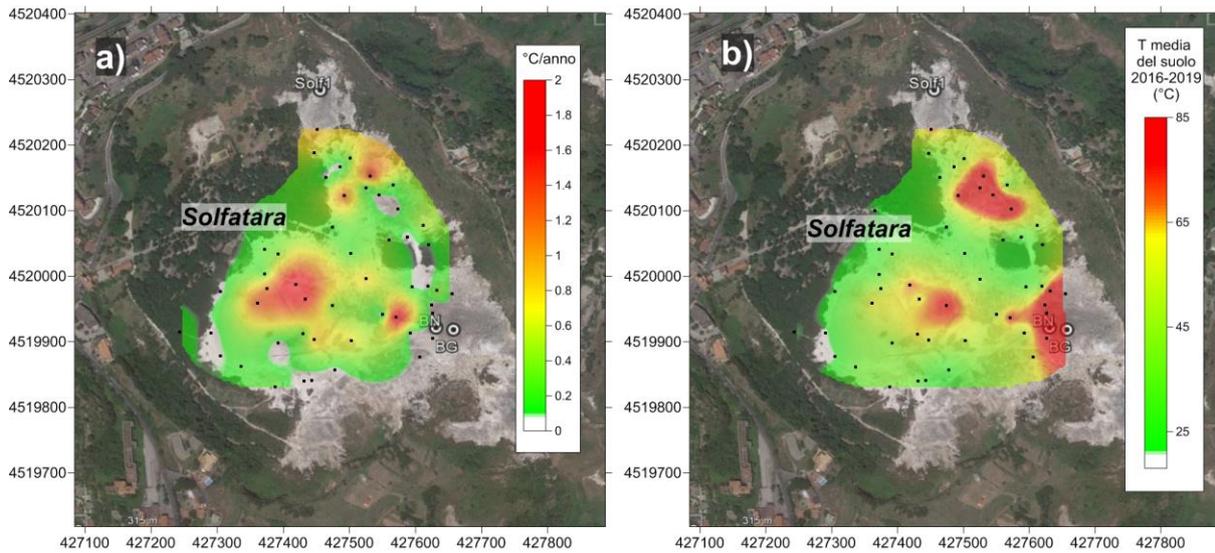


Figura 4.1.4 - a) Mappa dell'incremento di temperatura in °C/anno calcolato per ogni punto misurato a partire dal 2002. L'incremento di temperatura interessa diffusamente tutta l'area craterica con un massimo nella zona centrale. L'incremento di temperatura non interessa le aree delle fumarole e del 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).

Tale processo di riscaldamento è evidenziato anche da misure analoghe, di flusso di CO₂ dal suolo e temperatura del suolo, eseguite periodicamente su 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli. In Figura 4.1.5a è riportata la media delle temperature del suolo, misurate a 10 cm di profondità, che dal 2009 mostra un rilevante trend d'aumento, con un incremento del valore medio di circa 5 °C. Nella mappa di Figura 4.1.5b, dove è riportata la distribuzione areale dell'incremento annuo di temperatura, si nota oltre ad un aumento diffuso delle temperature in tutta l'area indagata la presenza di zone a maggiore riscaldamento legate a processi di fumarolizzazione locale.

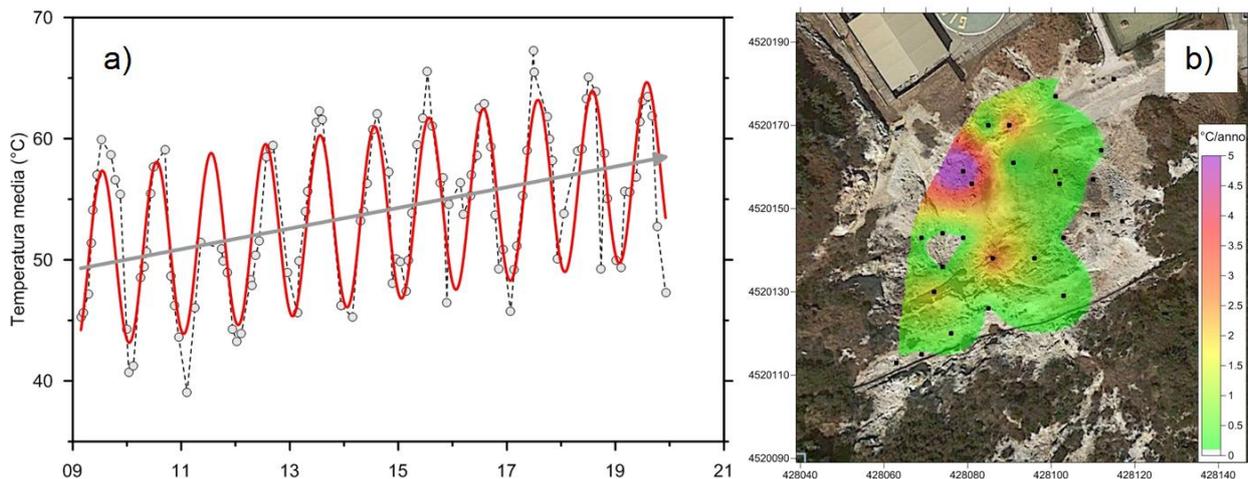


Figura 4.1.5 - Cronogramma della media delle temperature del suolo (a 10 cm di profondità) misurate su 25 punti fissi nell'area di Pisciarelli dal 2009.

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 4.1.6). Tale aumento del flusso di CO₂, che ha raggiunto valori di ~200 kgm⁻²d⁻¹, è da mettere in relazione all'evidente processo di fumarolizzazione dell'area.

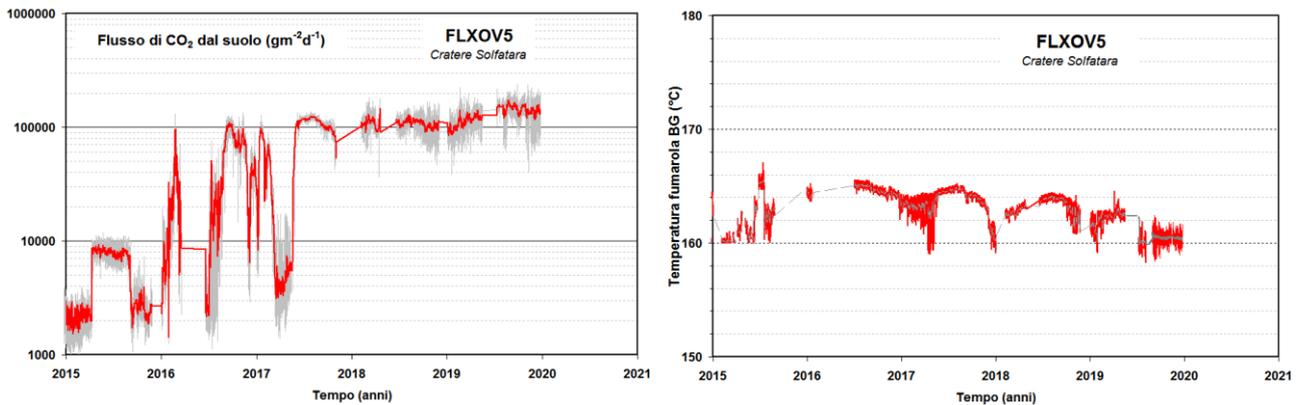


Figura 4.1.6 - Valori del flusso di CO_2 dal suolo misurati dalla stazione FLXOV5 installata nel cratere della Solfatara (area fumarole) (la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere). I flussi di CO_2 dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire da febbraio 2016.

In Figura 4.1.7 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.

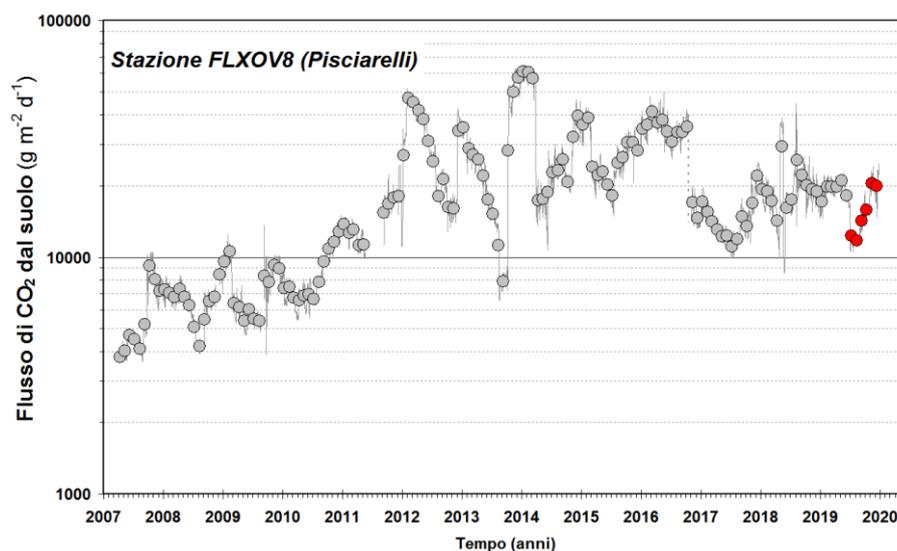


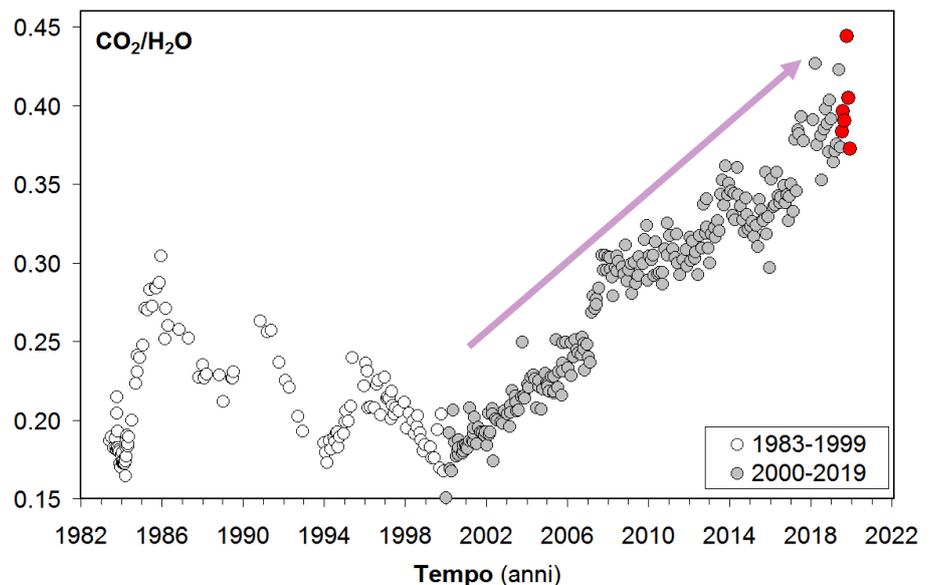
Figura 4.1.7 - Medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) dei flussi di CO_2 misurati a Pisciarelli (FLXOV8). I flussi di CO_2 dal suolo mostrano, in generale, un significativo incremento a partire dal 2010. In rosso sono evidenziate le medie mensili dei valori del secondo semestre 2019. L'intervento 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.

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 4.1.8), 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 nel sistema idrotermale), 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 4.1.8 - 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 secondo 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 4.1.9).

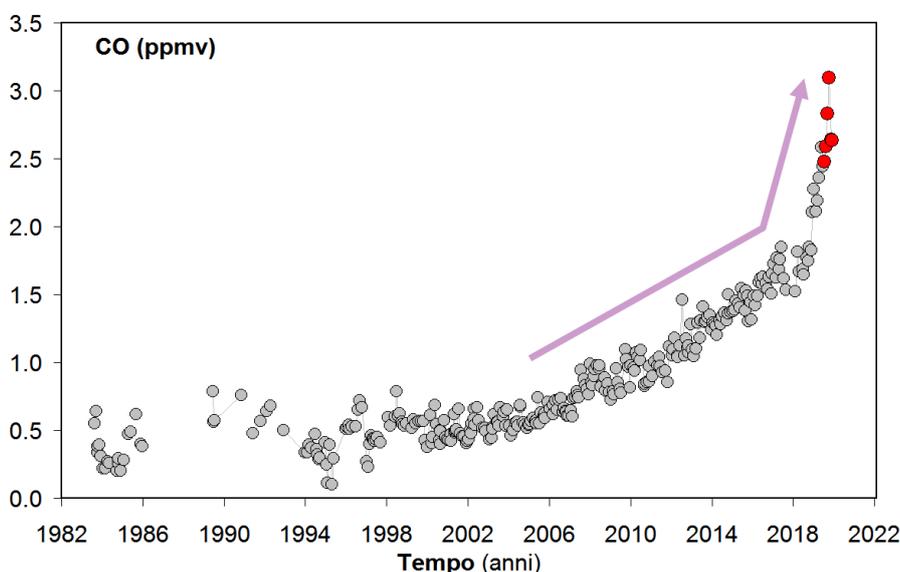
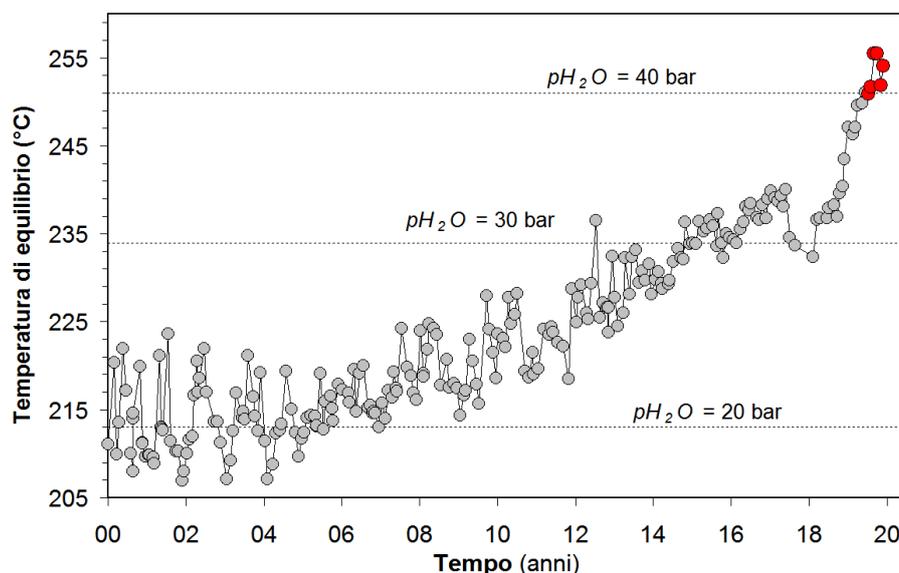


Figura 4.1.9 - Variazioni della concentrazione di monossido di carbonio (CO) misurato alla fumarola BG a partire dal 1983. In rosso sono evidenziati i campioni relativi al secondo semestre 2019. In generale alti contenuti di CO caratterizzano sistemi vulcanici ad elevata temperatura mentre fumarole alimentate 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 35°C dagli inizi degli anni 2000 (T circa 215°C) a oggi (Figura 4.1.10). 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 4.1.10 - 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 secondo semestre 2019.



Il rapporto CO₂/CH₄, le cui variazioni nel tempo sono state interpretate con l'occorrenza di episodi di iniezione di fluidi magmatici, ossidanti e poveri in CH₄, nel sistema idrotermale (Chiodini 2009; 2012), ha mostrato negli ultimi mesi la fase discendente di un picco (Figura 4.1.11). 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 a specifici lavori scientifici (Chiodini et al. 2012; 2016). Nei campioni del secondo semestre 2019 il rapporto CO₂/CH₄ è rimasto su valori bassi, simili a quelli mostrati nei periodi precedenti. Inoltre, nel cronogramma di Figura 4.1.11, è possibile riconoscere un trend d'aumento del rapporto a partire dal 2000 interrotto dalla fase discendente dell'ultimo picco che caratterizza gli ultimi periodi. La persistenza di questo basso valore del rapporto CO₂/CH₄ (i.e. elevate concentrazioni di CH₄) contemporaneamente all'aumento della concentrazione del monossido di carbonio e dell'idrogeno evidenzia una variazione del comportamento del sistema idrotermale in risposta a un'iniezione di fluidi magmatici, rispetto a quanto mostrato nei periodi precedenti. I fluidi emessi in questo periodo dal sistema idrotermale mostrano caratteristiche più riducenti, differenti processi possono essere considerati responsabili delle variazioni osservate, ma al momento non è possibile fornire un'interpretazione univoca.

I rapporti N₂/CO₂ e N₂/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 (secondo semestre 2019) rientrano nel trend di diminuzione già identificato (Figura 4.1.12). 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.

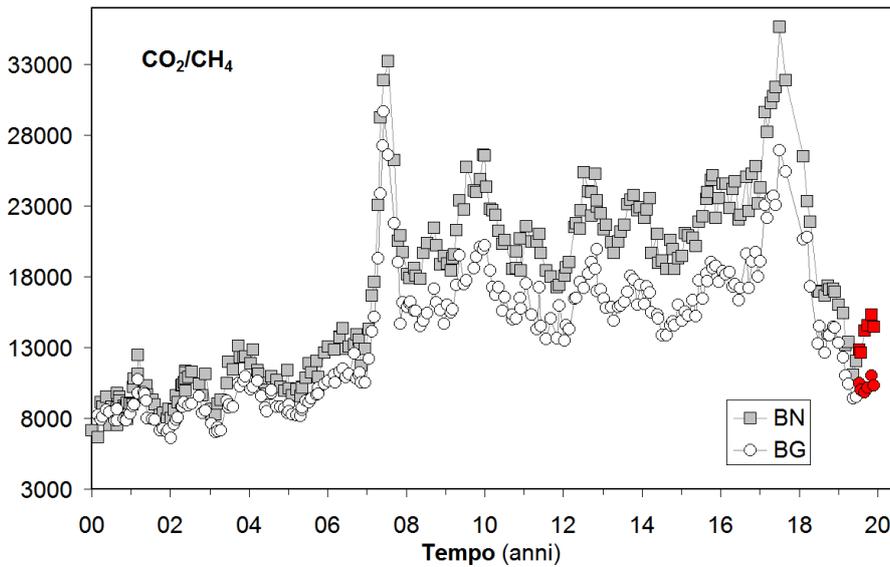


Figura 4.1.11 - Variazioni del rapporto CO_2/CH_4 per le fumarole BG e BN a partire dal 2000. I picchi nel rapporto, registrati in superficie con circa un anno di ritardo, evidenziano episodi di degassamento magmatico occorsi ai Campi Flegrei (Chiodini et al., 2012). In rosso sono evidenziati i campioni del secondo semestre 2019.

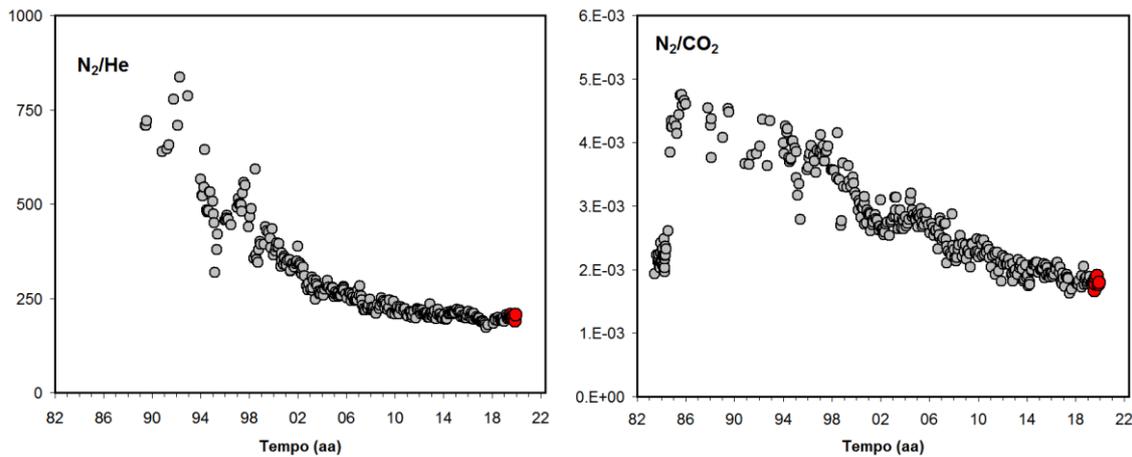


Figura 4.1.12 - Cronogramma dei rapporti N_2/He e N_2/CO_2 relativi alla fumarola BG. In rosso sono evidenziati i campioni del secondo semestre 2019 che confermano i trend di diminuzione già identificati.

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 costante ma in diminuzione nel tempo in accordo con 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 4.1.13 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.

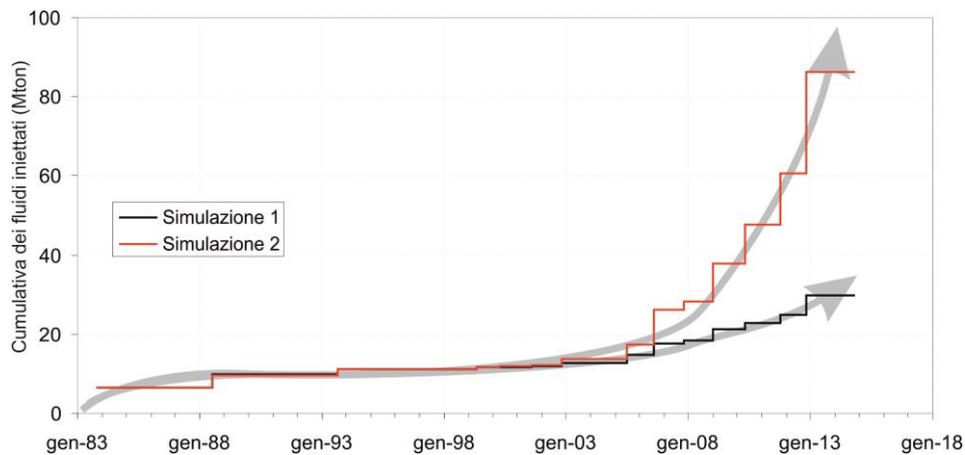


Figura 4.1.13 - Curve cumulative delle quantità di fluidi magmatici iniettate nel sistema idrotermale dei Campi Flegrei riferite alla simulazione 1 (Chiodini et al., 2012) e alla simulazione 2 (Chiodini et al., 2016). Per maggiori dettagli vedi il testo e i lavori citati.

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 4.1.14) 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 4.1.15), nell'aumento dei flussi misurati in continuo dalla stazione FLXOV8 (Figura 4.1.16).

L'incremento del processo di degassamento dell'area è altresì supportato da recenti misure del flusso di CO₂ emesso dalle fumarole (Tamburello et al., 2019), 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 CO₂ in aria (Figura 4.1.16) che, unitamente ad altri parametri, risulta essere strettamente correlata all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017; Giudicepietro et al., 2019). La serie temporale di concentrazione di CO₂ in aria (registrata con frequenza bioraria dalla stazione geochimica FLXOV8) mostra un significativo aumento nel tempo delle concentrazioni (come medie mensili) da ~1000 ppm nel 2012, fino a ~3000 ppm negli ultimi periodi, con un massimo di ~5000 ppm registrato nel gennaio 2019.

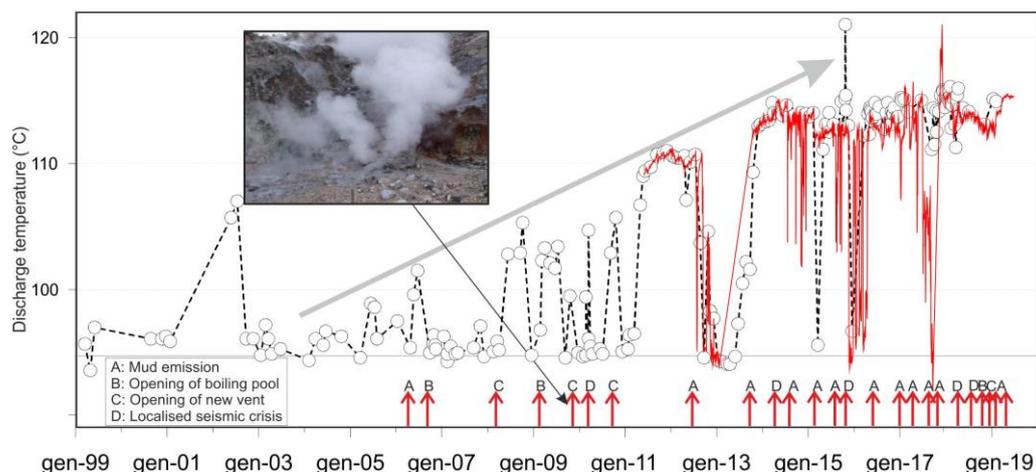


Figura 4.1.14 - Cronogramma delle temperature (°C) della fumarola di Pisciarelli e dei maggiori eventi occorsi legati all'aumento dell'attività idrotermale (i cerchi si riferiscono a misure discrete, la linea rossa si riferisce alle medie giornaliere delle misure in continuo). La temperatura di 95°C 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 4.1.15 - 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.

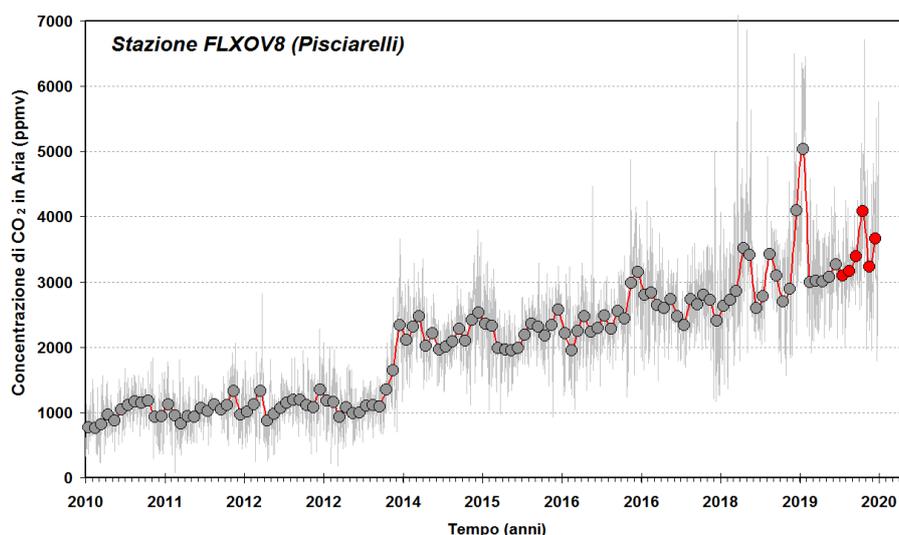
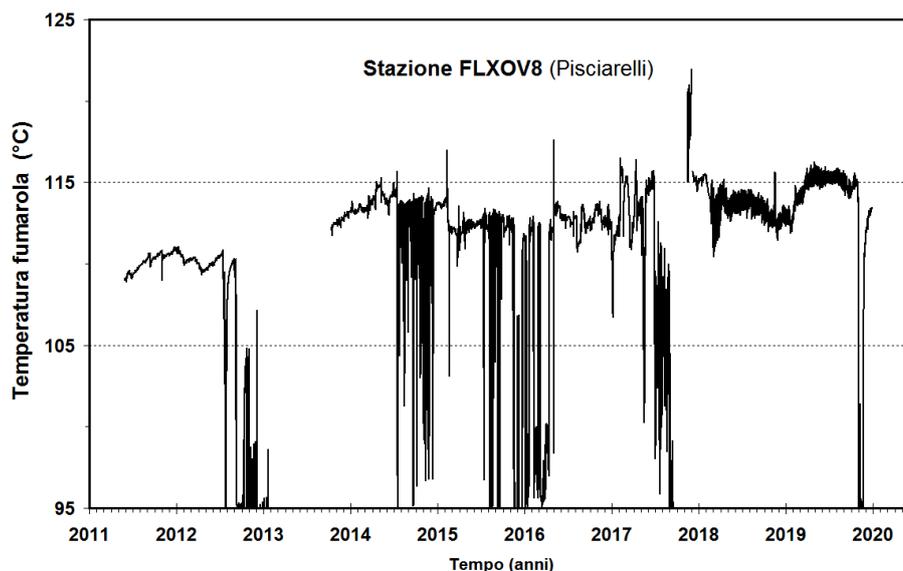


Figura 4.1.16 - Cronogramma delle medie giornaliere (linea) e medie mensili (cerchi) della concentrazione di CO_2 registrata in aria con frequenza bioraria dalla stazione geochimica per la misura del flusso di CO_2 dal suolo di Pisciarelli (FLXOV8). Le medie delle concentrazioni mensili del secondo semestre 2019 sono riportate con il simbolo rosso. E' da evidenziare il continuo trend d'aumento nel tempo delle concentrazioni di CO_2 dal 2013, concentrazione in aria che, unitamente ad altri parametri, risulta strettamente correlata all'intensità dell'attività idrotermale (Chiodini et al., 2017).

In seguito agli eventi sismici del 5-6 dicembre, è stato registrato un aumento delle concentrazioni di CO_2 misurate in aria che, sebbene non siano le più elevate registrate in valore assoluto, suggeriscono un significativo aumento del flusso di fluidi emessi.

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

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

Nel secondo 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.

Nel periodo d'interesse è proseguita l'installazione delle stazioni che costituiscono la rete di monitoraggio multiparametrico della falda flegrea (Fig. 4.1.17). I siti di monitoraggio sono stati selezionati sulla base dei risultati dell'estesa campagna di campionamento delle acque, misura dei parametri chimico-fisici e livello piezometrico della falda flegrea, eseguita nel primo semestre 2019.

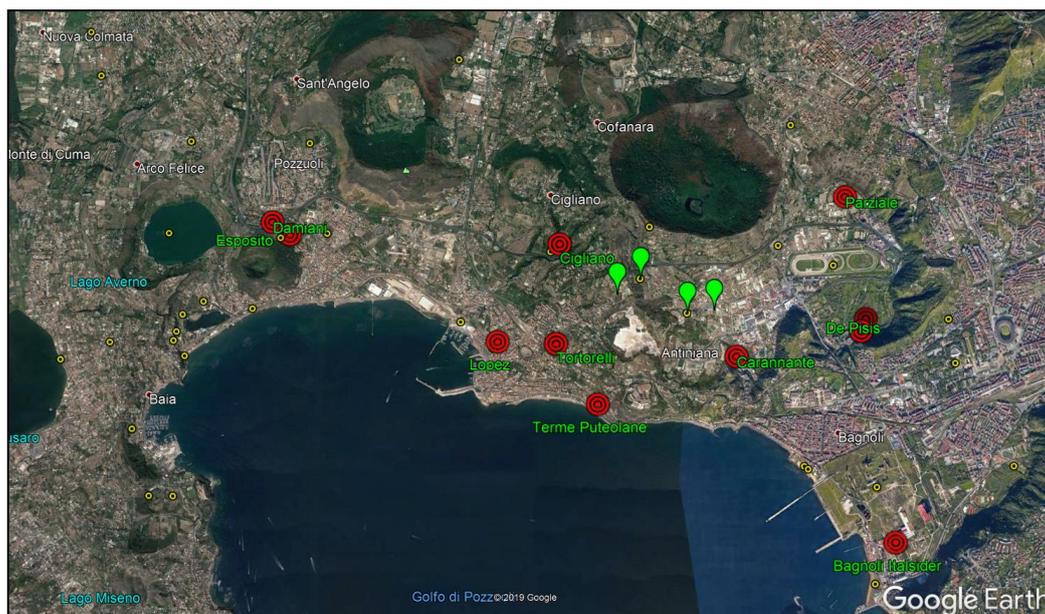


Figura 4.1.17 - Ubicazione dei punti di misura e campionamento delle acque di falda relativi alle campagne del 2019 (simboli gialli), con il simbolo rosso sono riportati i siti della rete di monitoraggio multiparametrico in continuo della falda.

Le stazioni di monitoraggio utilizzate per la realizzazione di questa rete sono costituite da una sonda CTD (Conducibilità 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. I dati sono acquisiti con frequenza oraria ed elaborati automaticamente. La strumentazione è stata acquistata su fondi POR Campania FESR 2007/2013 e integrata con i fondi del progetto DPC-INGV All. B2 2019-2021.

Nel secondo semestre 2019 è stata ripetuta una campagna di campionamento dei siti monitorati e di altri siti di sicuro interesse per il monitoraggio (Figura 4.1.17).

I pozzi investigati hanno una profondità variabile da pochi metri fino a oltre 180 m e una temperatura massima misurata di ~99 °C. La ricostruzione preliminare della superficie piezometrica, basata sulle misure dirette della profondità della falda eseguite nei pozzi, mostra una risalita della superficie freatica con la massima variazione 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 4.1.18 è riportata la ricostruzione della superficie piezometrica basata su i dati disponibili.

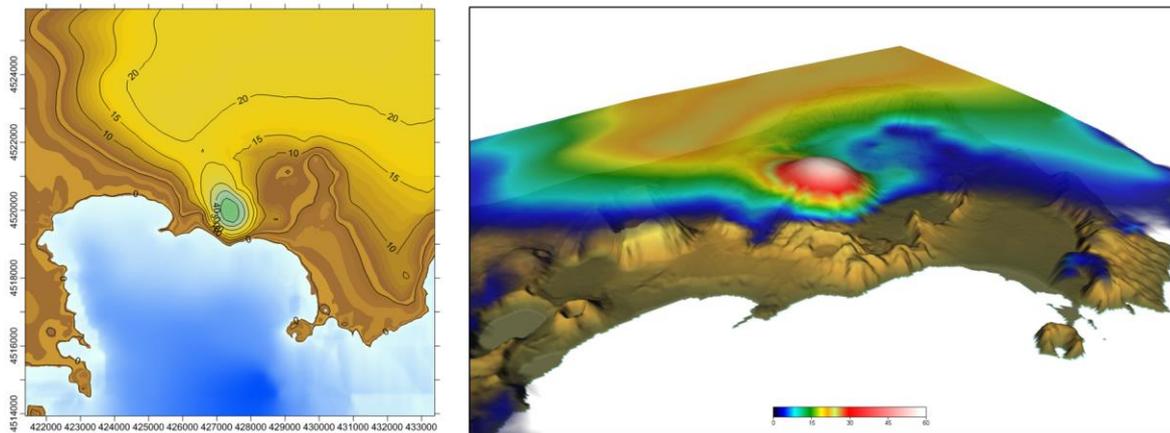


Figura 4.1.18 - Ricostruzione della superficie di falda nell'area flegrea. Si noti l'alto morfologico della superficie piezometrica nell'area Solfatara-Pisciarelli.

La composizione chimica delle acque di falda, 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 4.1.19a dai diagrammi $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD 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 chimico isotopica della falda locale. 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 dell'alto morfologico che assume la superficie piezometrica nell'area.

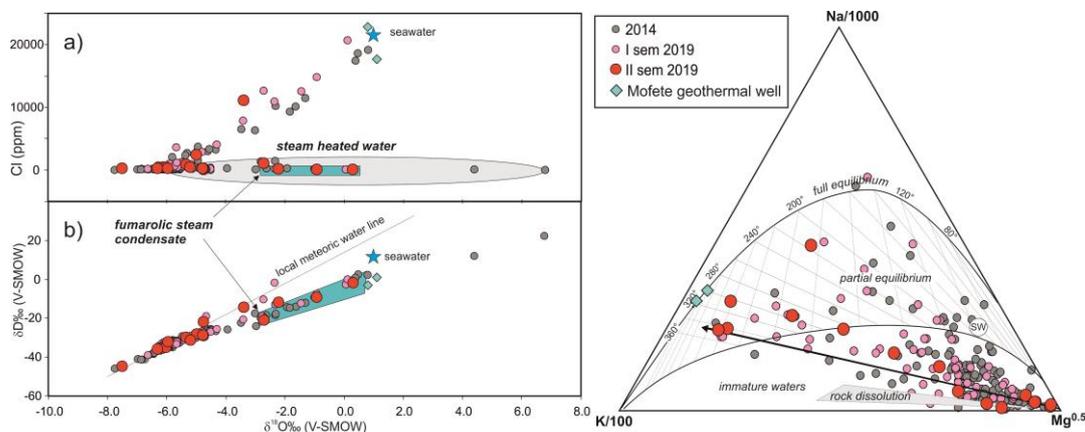


Figura 4.1.19 - a) composizione chimico-isotopica delle acque di falda relative alla campagna del 2014 e quella effettuata nella durata del progetto (simbolo verde), da notare che la quasi totalità delle acque campionate in area Pisciarelli-Solfatara mostrano composizioni che indicano un significativo 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 4.1.19b l'applicazione dei geotermometri basati sulle composizioni relative di Na-K-Mg^{0.5} (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.

4.2 Monitoraggio Geochimico della Sezione “Roma 1”

Il monitoraggio in continuo delle temperature del suolo effettuato dalla Sezione Roma 1 (Tabella 4.2.1) è attualmente realizzato tramite una stazione per la misura delle temperature su profili verticali nel suolo (10, 30, 50 e 70 cm) ubicata nel settore centro-orientale della Solfatara (SLF, installata a marzo 2017).

Tabella 4.2.1 – Sito di misura della temperatura al suolo.

Stazione	Località	Lat	Long	Parametri monitorati
SLF	Solfatara	40.8285	14.1419	Temperatura del suolo

Il monitoraggio a SLF è stato ripristinato ad ottobre 2019 dopo l’interruzione dovuta alle restrizioni riguardanti l’accesso alla Solfatara, in seguito all’incidente avvenuto il giorno 11 settembre 2017. L’andamento temporale della temperatura (valori orari, gradiente geotermico e coefficiente di determinazione – R2) è riportato in Figura 4.2.1. Il trattamento dei dati con il coefficiente di determinazione R2 (Ricci et al., 2015) permette di discriminare le variazioni del flusso di calore (conduttivo vs. convettivo).

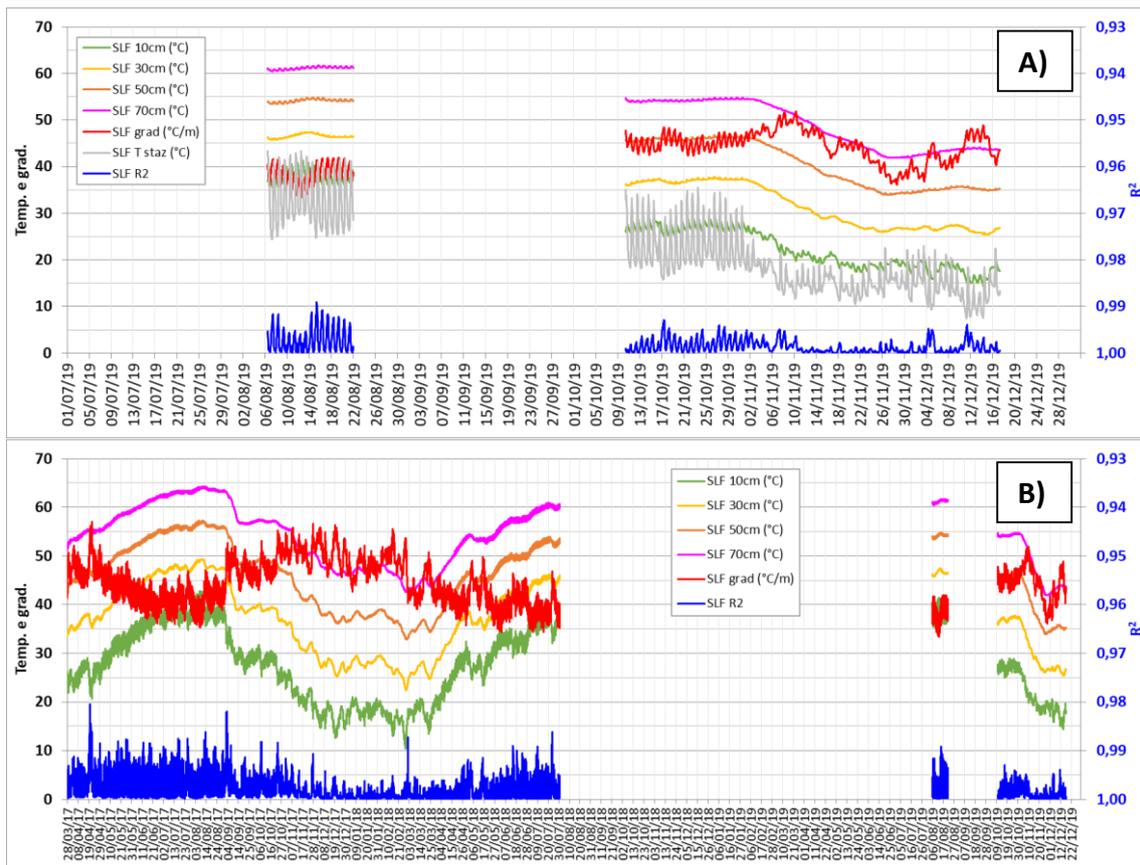


Figura 4.2.1 –Variazioni dell’attività termica superficiale alla Stazione SLF nel periodo A) luglio – dicembre 2019 e B) marzo 2017 – dicembre 2019.

La serie temporale di SLF (Fig. 4.2.1) evidenzia, nei periodi con disponibilità di dati relativi al secondo semestre 2019 (Fig. 4.2.1B), variazioni di temperatura, gradiente e R2 compatibili con le fluttuazioni periodiche stagionali di origine esogena che caratterizzano il sito (Fig. 4.2.1B).

Il sito di installazione della stazione di monitoraggio della temperatura del suolo PSC, ubicata nel settore più elevato di Pisciarelli e non funzionante a causa di problemi tecnici, è stato caratterizzato da erosione e si sta valutando la possibilità di installazione in altro sito nella stessa area.

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. Rete Sismica Permanente

La Rete Permanente di Monitoraggio Sismico di Ischia operativa nel secondo semestre 2019 conta 8 siti di installazione sull'isola più 1 sull'Isola di Procida (Figura 1.1; Tabella 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 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).

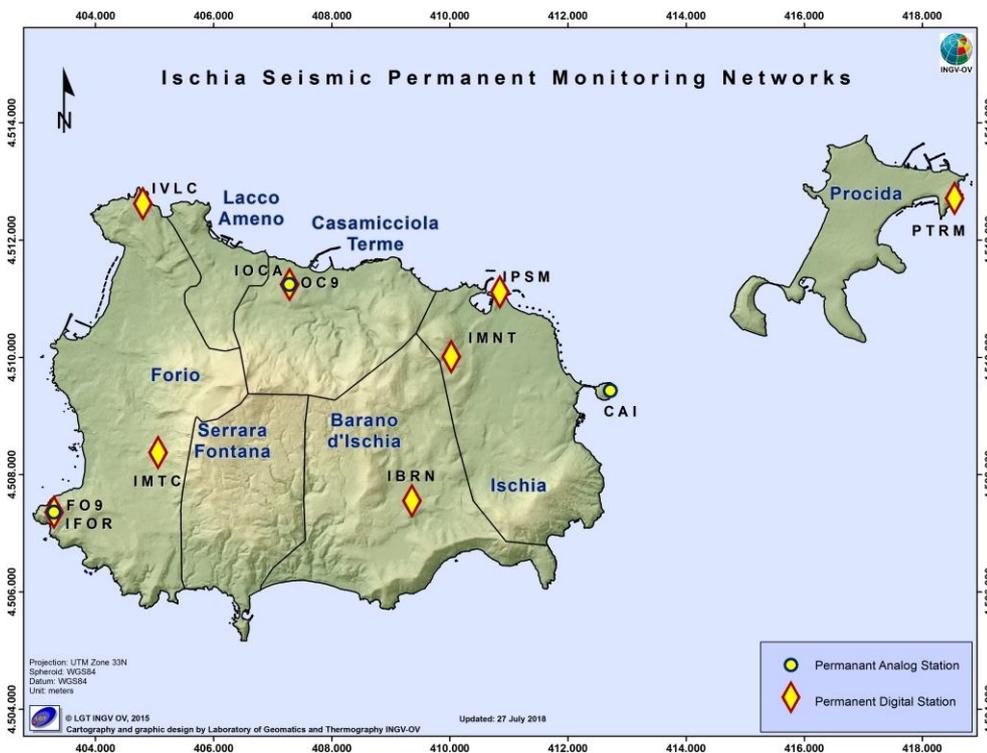


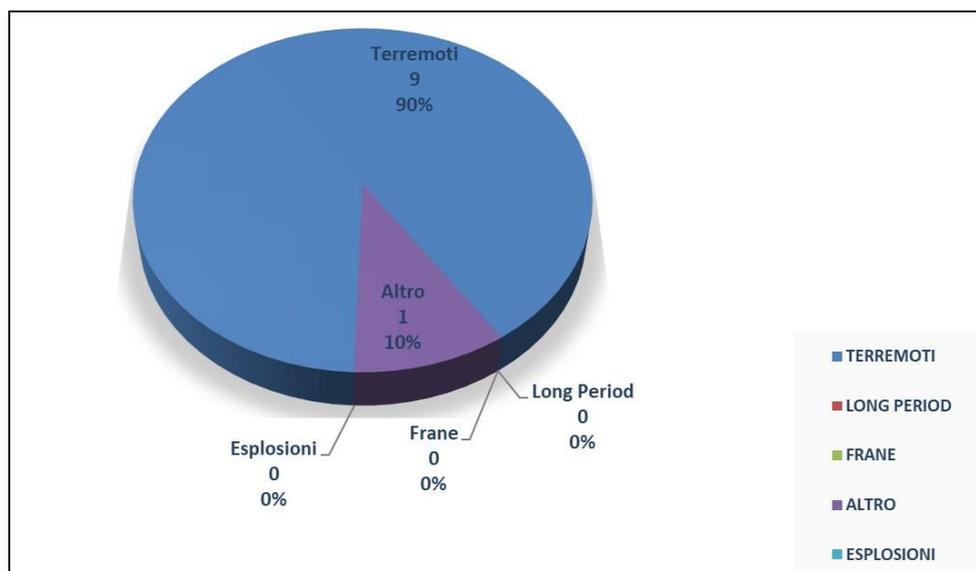
Figura 1.1 – Rete Sismica di Ischia.

Tabella 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 secondo semestre 2019, le stazioni della Rete Sismica installata ad Ischia hanno registrato 10 eventi locali ripartiti nelle diverse tipologie riportate in Figura 1.2. La maggior parte dei segnali sismici transienti registrati nell'area di Ischia 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".

Figura 1.2 – Distribuzione percentuale degli eventi per tipologia nel secondo semestre 2019.



Per quanto riguarda l'attività sismica naturale nel corso del secondo semestre 2019 sono stati registrati 9 terremoti di bassa magnitudo ($M_{dmax} = 0.9$) (Fig. 1.3 e 1.6).

E' stato possibile determinare i parametri ipocentrali di 4 degli eventi registrati che risultano localizzati nell'area compresa tra Casamicciola e Forio a profondità comprese nei primi 2 km (Fig. 1.4 e 1.5).

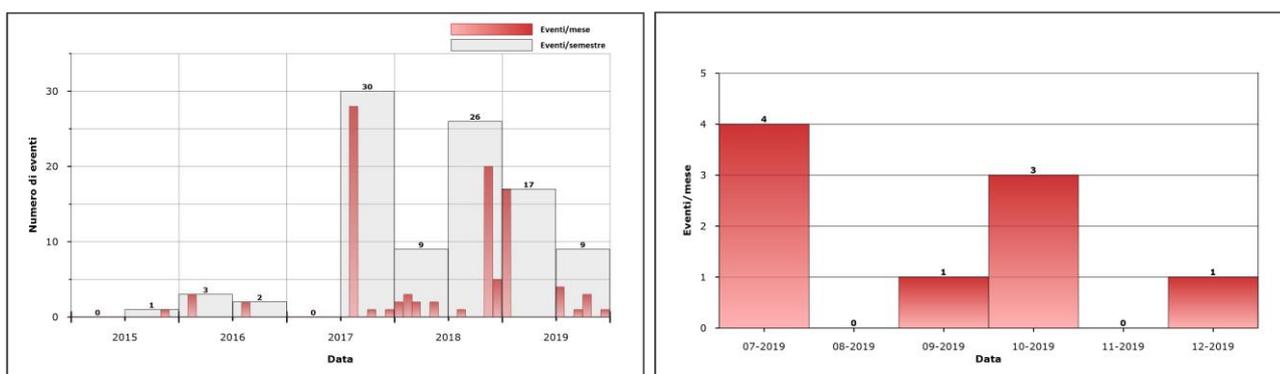


Figura 1.3 – Frequenza di accadimento dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

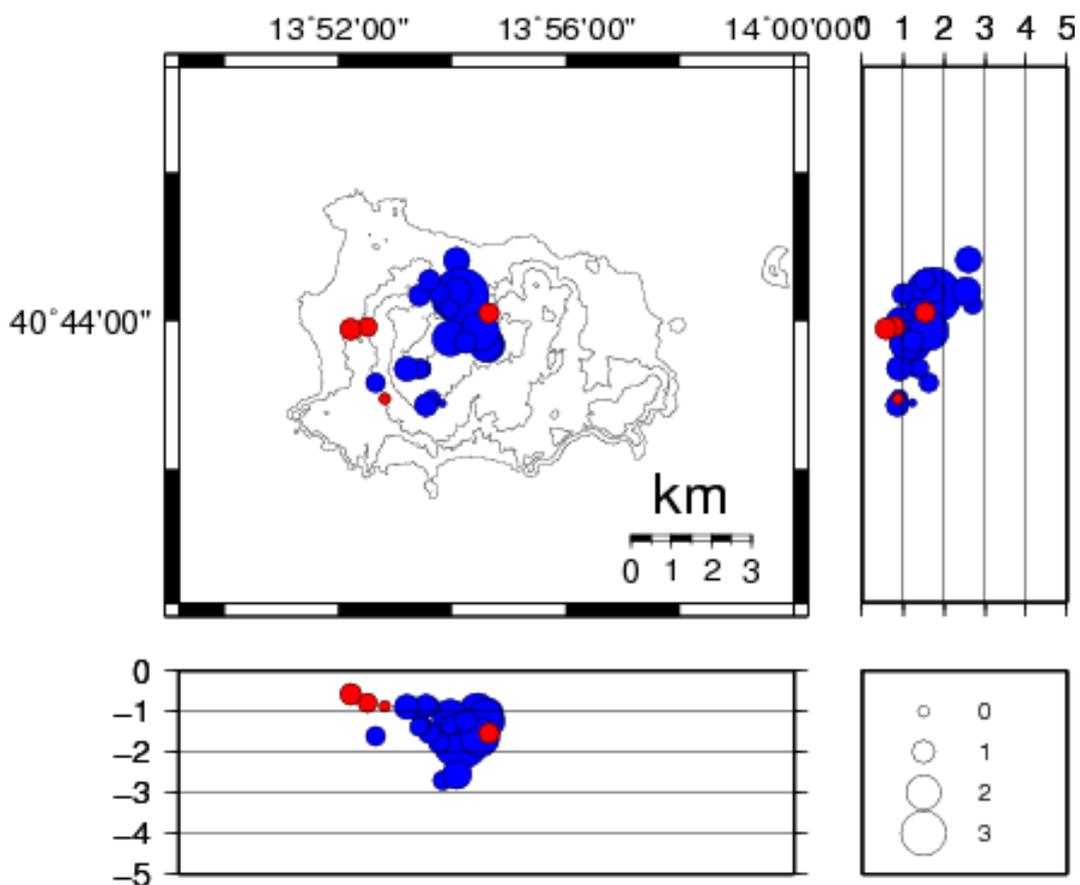


Figura 1.4 – Localizzazione degli ipocentri dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (in blu) e nel primo semestre 2019 (in rosso).

Non si evidenziano particolari andamenti nella frequenza di accadimento (Figura 1.3), nella distribuzione degli ipocentri (Figura 1.4), nelle profondità ipocentrali (Figura 1.5), nella distribuzione temporale delle magnitudo (Figura 1.6) e nel rilascio cumulativo di energia (Figura 1.7).

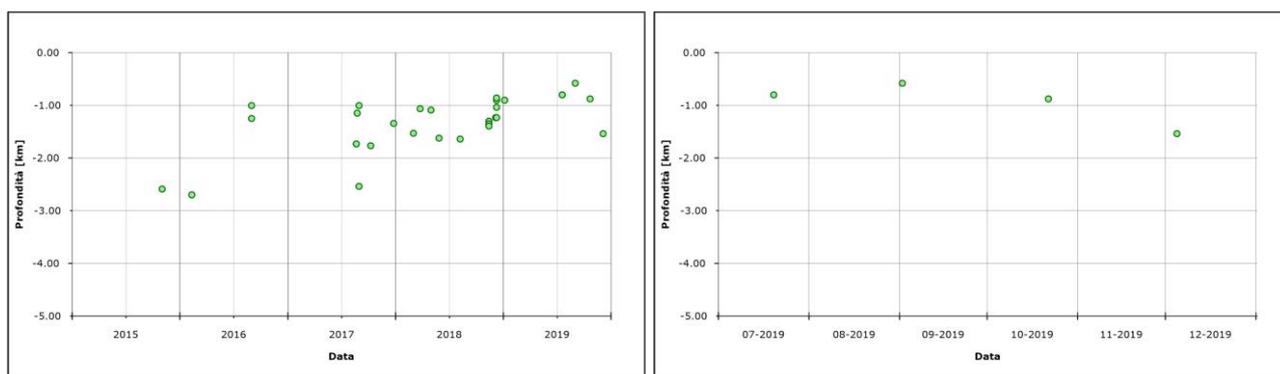


Figura 1.5 – Variazione temporale della profondità ipocentrale dei terremoti localizzati a Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

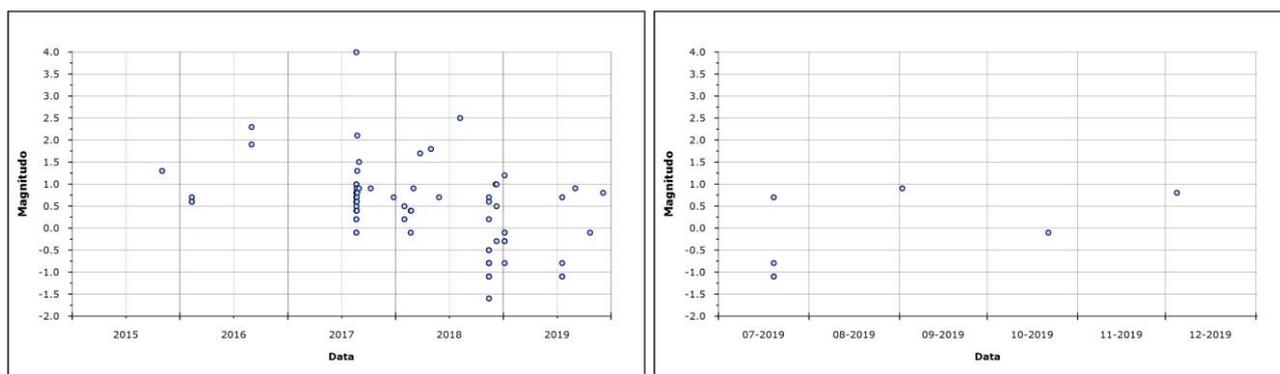


Figura 1.6 - Variazione temporale della magnitudo dei terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra).

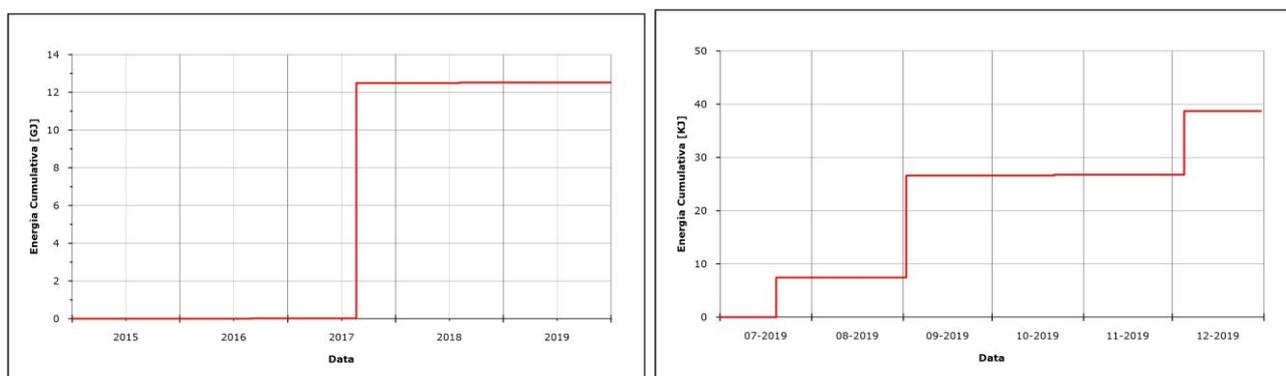


Figura 1.7 – Andamento cumulativo dell'energia rilasciata dai terremoti registrati ad Ischia nel corso degli ultimi 5 anni (a sinistra) e del secondo semestre 2019 (a destra) calcolato attraverso la relazione di Gutenberg-Richter $\log E = 2.4 + 2.14M - 0.054M^2$.

1.2 Rete Sismica Mobile

L'intervento è stato effettuato nell'ambito delle attività del **Gruppo Operativo SIMIKO** dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Nel secondo 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 dismesse o spostate per un'ottimizzazione della geometria della rete.

A tutto dicembre 2019 sono installate e operative 3 stazioni sismiche digitali 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 a dicembre 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	Lunitec 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 secondo semestre 2019 il monitoraggio geodetico di Ischia è stato effettuato attraverso misure continue GPS e tiltmetriche ed elaborazione di dati satellitari.

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.

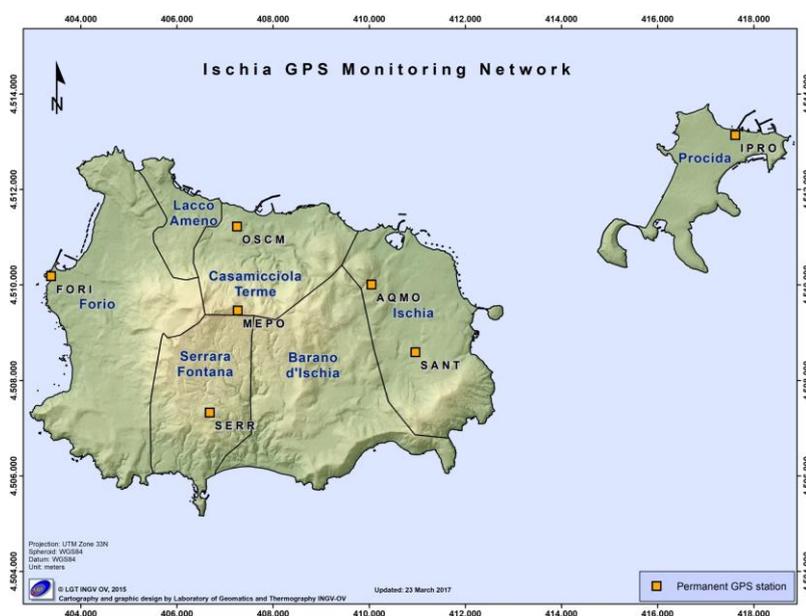


Figura 2.1.1 – Mappa Rete GPS di Ischia.

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 centro-meridionale dell'isola (Figure 2.1.2 e 2.1.3).

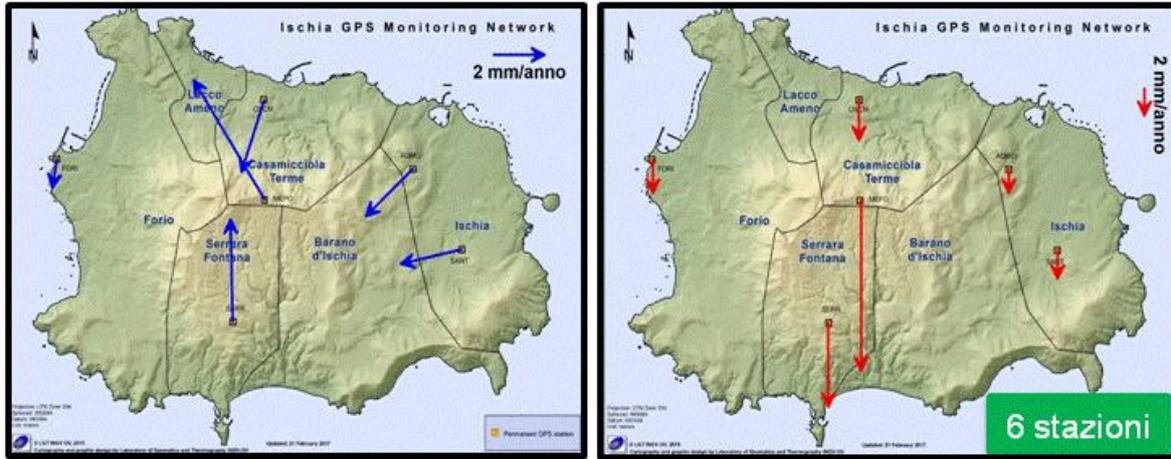


Figura 2.1.2 - Campo di velocità (in mm/anno) degli spostamenti orizzontali (in blu) e verticali (in rosso) nell'intervallo gennaio 2011 - dicembre 2019.

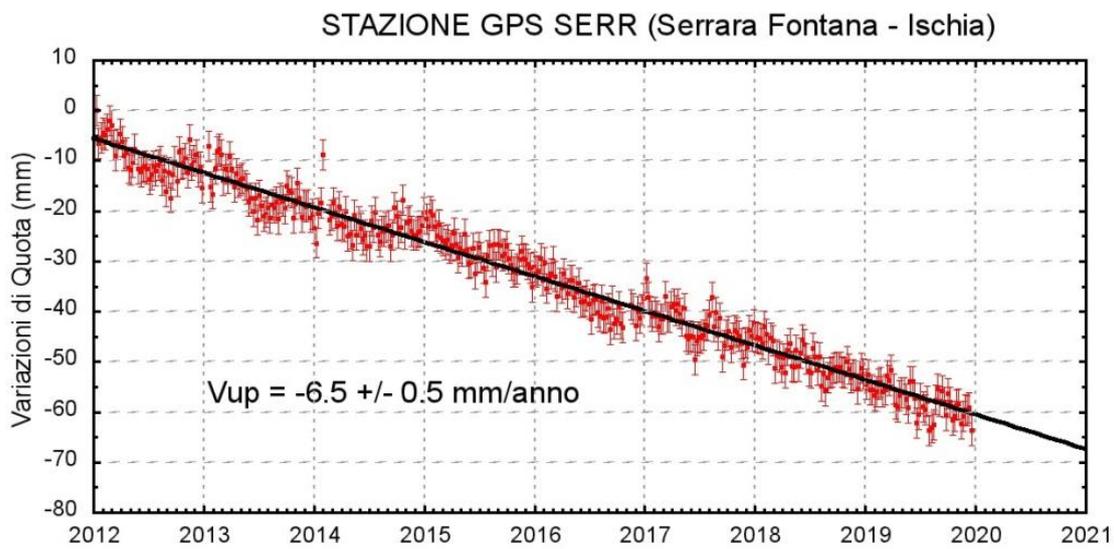


Figura 2.1.3 - Serie temporale delle variazioni settimanali in quota della stazione di SERR (Ischia) da gennaio 2012 a dicembre 2019.

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 secondo semestre 2019 mostra un pattern di inclinazione fortemente polarizzato in direzione N ma che tende a ruotare verso W, diversamente da quanto osservato nel primo semestre 2019 in cui la polarizzazione avveniva in direzione N-NNE con una maggiore inclinazione confinata nel settore orientale.

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.

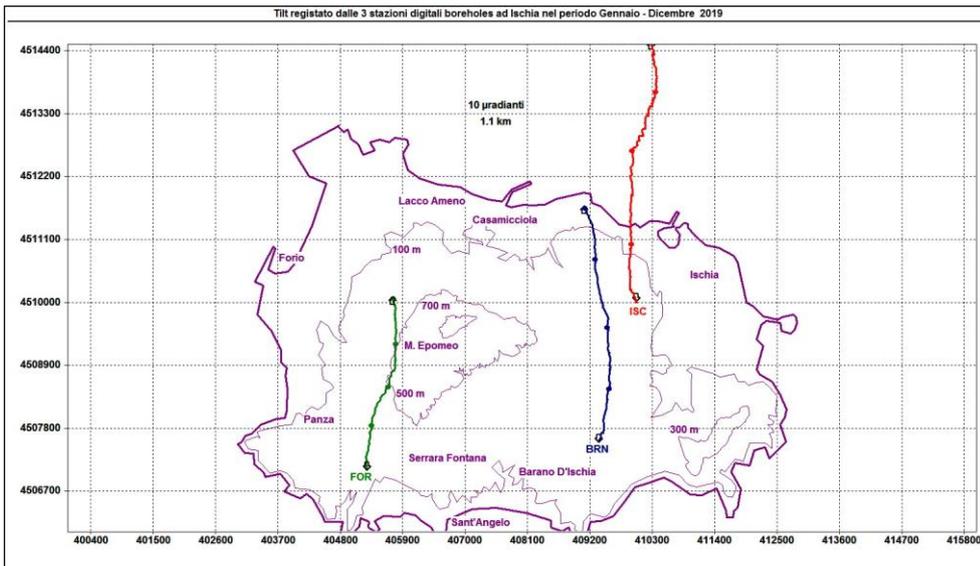


Figura 2.2.2 – Pattern tiltmetrico osservato a Ischia. Il lato di ogni maglia del reticolo equivale a 10 μ radianti o 1.1 km. I pallini in colore sovrapposti sui vettori tilt indicano intervalli di 90 giorni.

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 (\approx -25 m dal p.c.), acquisite nel corso del 2019.

Tabella 2.2.2 - Tilt registrato e variazione termica associata relativi alle stazioni digitali durante il 2019.

Stazione	Inclinazione	Temperatura
Stazione FOR (157 m s.l.m.)	27.7 μ radianti a N-NNE	0.06 °C
Stazione BRN (145 m s.l.m.)	37.5 μ radianti a NNW	0.03 °C
Stazione ISC (173 m s.l.m.)	41.3 μ radianti a NNE	-0.04 °C

In Figura 2.2.3 sono riproposti gli andamenti delle componenti tiltmetriche (filtrate dalle periodicità giornaliere) e termica registrate da ognuna delle 3 stazioni borehole; poiché, inoltre, i segnali acquisiti rappresentano la variazione di tilt e non una misura assoluta, sono stati tutti azzerati a partire da inizio anno.

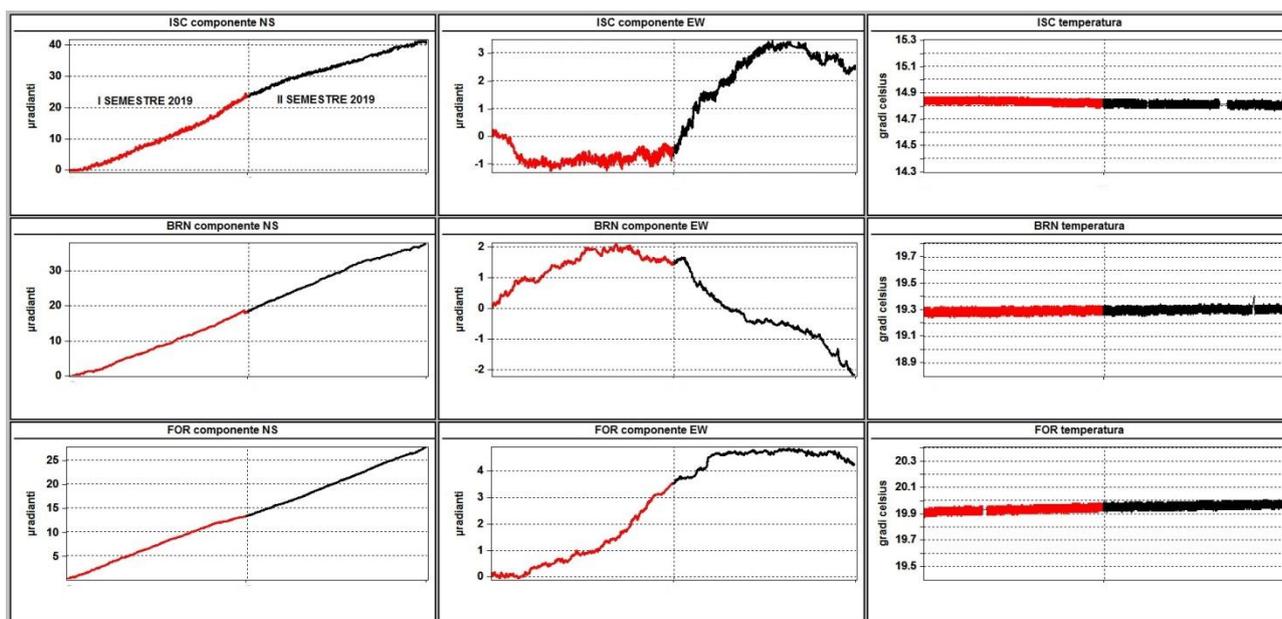


Figura 2.2.3 - Segnali registrati dai 3 sensori digitali Lily della rete di Ischia; le stazioni tiltmetriche sono ordinate dal basso verso l'alto secondo la latitudine e ad ognuna di esse è riservata una riga, mentre ogni colonna è relativa ad una componente acquisita. Le prime 2 colonne riportano le 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 primo semestre 2019 mentre in nero sono rappresentati quelli registrati nel secondo semestre 2019.

In tale figura, le componenti NS dei 3 tiltmetri mostrano un evidente trend di inclinazione verso N e quindi un abbassamento in tale direzione, mentre quelle EW registrano variazioni minori con oscillazioni di periodo annuale.

La variazione tiltmetrica osservata ad Ischia mostra una chiara stagionalità in quanto nel primo semestre la polarizzazione del tilting avviene in direzione N-NNE, mentre a partire dalla prima decade di luglio si osserva la graduale rotazione dei piani di inclinazione delle 3 stazioni in senso antiorario e quindi a NNW. Inoltre, la stazione collocata a SE dell'isola (BRN) si è inclinata nel 2019 molto di più degli anni precedenti (48% in più rispetto al 2017 e 76% in più rispetto al 2018).

2.3 Monitoraggio Satellitare con Interferometria SAR

Sono stati elaborati i dati acquisiti dai sensori Sentinel 1A-1B dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA, European Space Agency). Tali dati, operanti in banda C, sono disponibili a titolo gratuito sui canali web della stessa Agenzia.

Al fine di valutare la deformazione in atto sull'Isola d'Ischia per il secondo semestre 2019, sono state prodotte mappe di deformazione in LoS (Line of Sight) ricavate da interferogrammi differenziali da dati provenienti da orbite sia ascendenti che discendenti. Il periodo considerato va da luglio 2019 a dicembre dello stesso anno.

Dall'analisi dei dati elaborati, la subsidenza che interessa la parte centrale dell'isola, in particolare a ridosso del M. Epomeo, non risulta apprezzabile nel semestre considerato per due motivi: i) l'entità contenuta della deformazione, ii) l'estesa decorrelazione che interessa l'isola a causa dell'elevata vegetazione presente sul M. Epomeo nonché per la presenza di effetti atmosferici.

A titolo di esempio, vengono riportati solo i risultati in LoS derivanti dall'elaborazione dei dati della coppia 01.07.2019-28.12.2019, sia in geometria ascendente che discendente (Figg. 2.3.1 a-d):

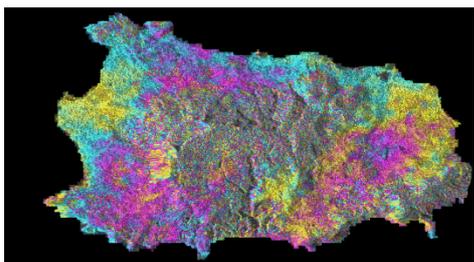


Figura 2.3.1 - a) interferogramma 01.07.2019-28.12.2019 orbita ascendente, burst IW3-7, B.L.=27.9m.

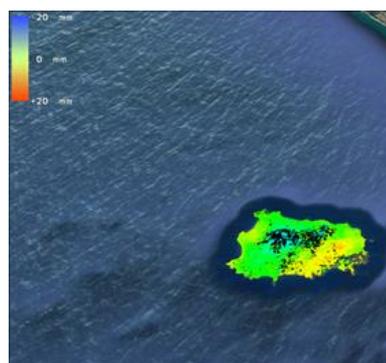


Figura 2.3.1 - b) mappa di deformazione della coppia 01.07.2019-28.12.2019, orbita ascendente.

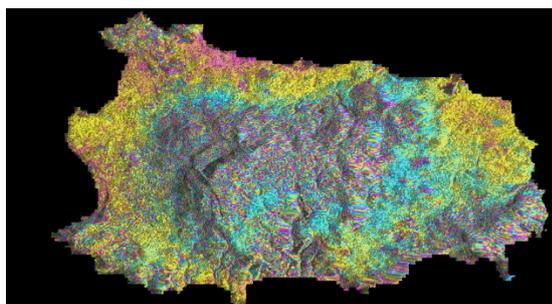


Figura 2.3.1 - c) interferogramma 01.07.2019-28.12.2019 orbita discendente, burst IW1-6, B.L.=60.7m.

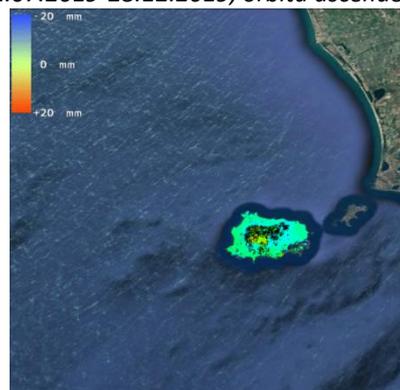


Figura 2.3.1 - d) mappa di deformazione della coppia 01.07.2019-28.12.2019, orbita discendente.

A conferma di quanto fin qui riportato, ed avendo a disposizione le informazioni di entrambe le orbite (ascendenti e discendenti), è stato possibile scomporre lo spostamento in LoS osservabile dal SAR lungo la direzione UP e Est-Ovest (Figg. 2.3.2 a-b):

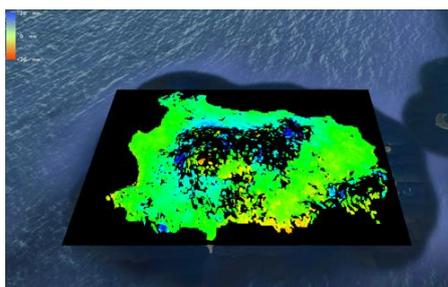


Figura 2.3.2 - a) componente verticale in LoS

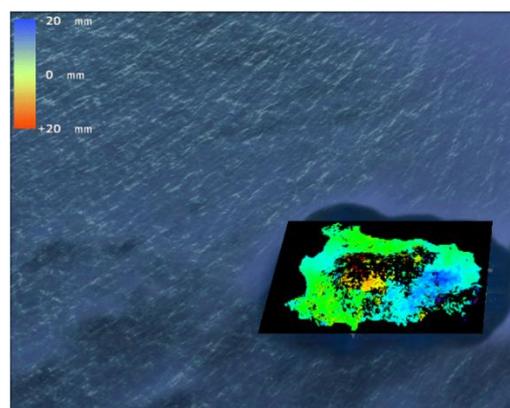


Figura 2.3.2 - b) componente orizzontale in LoS

In entrambi i casi, data l'elevata decorrelazione e la presenza di artefatti atmosferici, il contributo per entrambe le componenti non risulta essere apprezzabile.

3 - MONITORAGGIO VULCANOLOGICO

3.1 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 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 3.1i) in corrispondenza di una fumarola precedentemente coperta da fitta vegetazione bruciata durante un incendio.

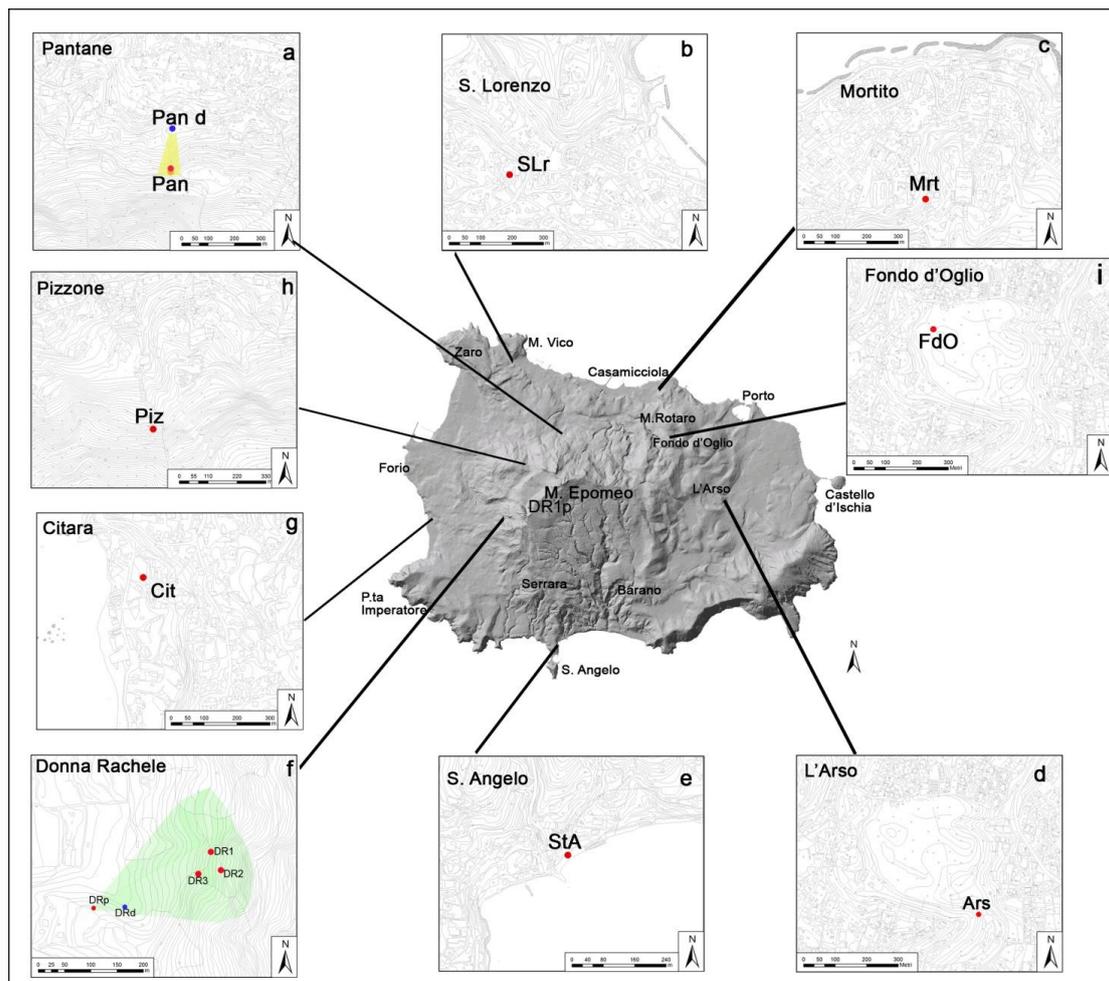


Figura 3.1 – Ubicazione dei punti di misura a Ischia.

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 secondo semestre 2019, non evidenzia significative variazioni nella distribuzione areale del campo fumarolico (Fig. 3.2 b, c, d) anche rispetto al semestre precedente.

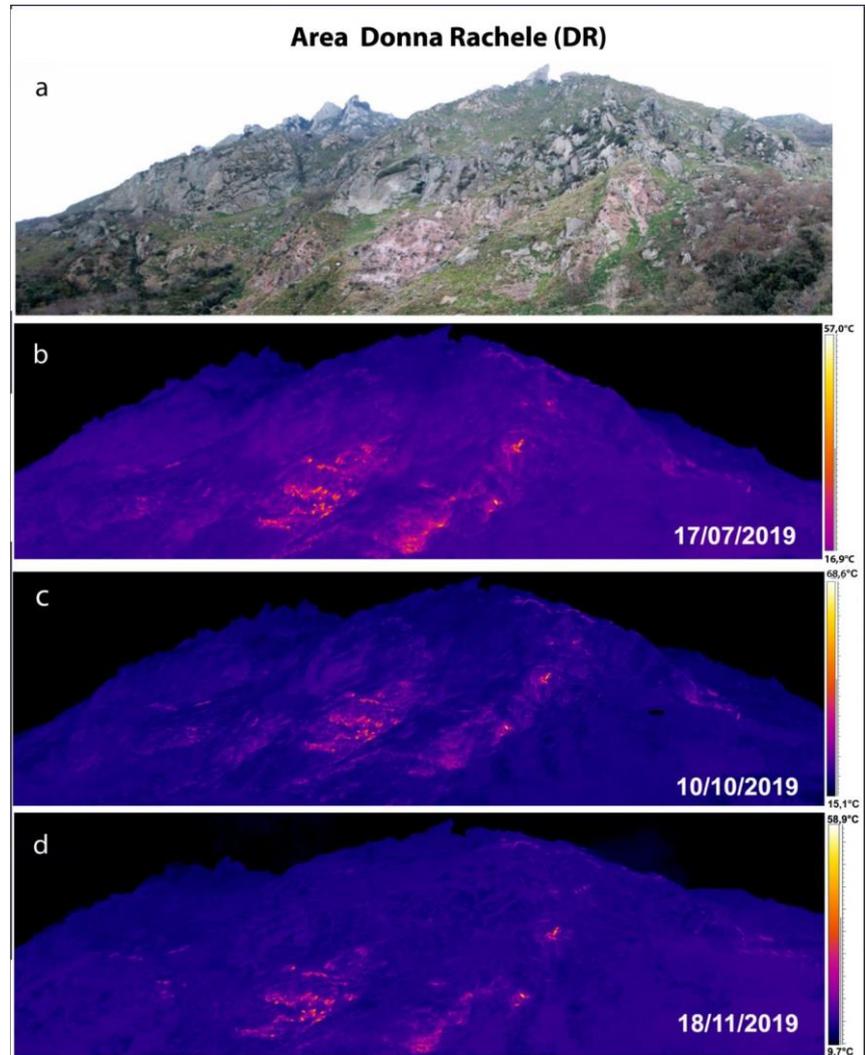


Figura 3.2 - Versante in località Donna Rachele a Ischia. Fotocomposizioni di immagini nel visibile (a) e delle corrispondenti immagini termiche relative al 17/07/2019 (b), 10/10/2019 (c) e 18/11/2019 (d) dal punto stazione DRp di figura 3.1.

S. Angelo

Nel secondo semestre 2019, in località 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.

Il valore mancante nel mese di novembre è dovuto all’innalzamento del mare che aveva coperto interamente la spiaggia.

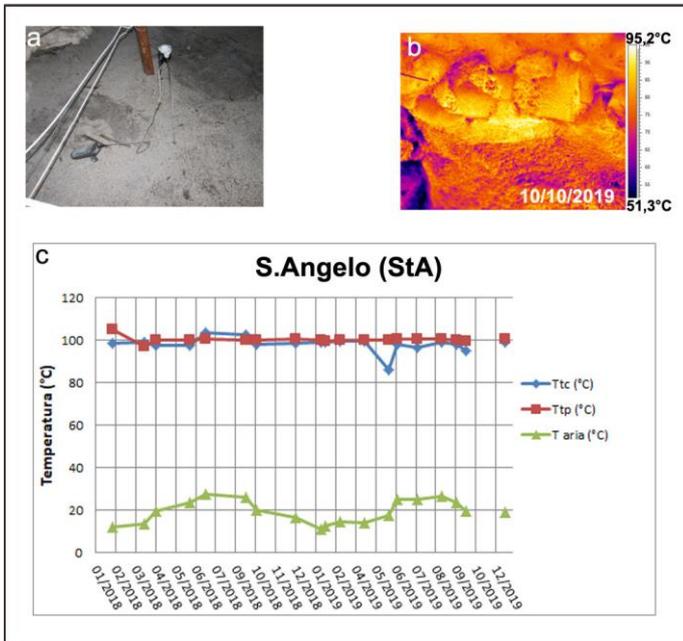
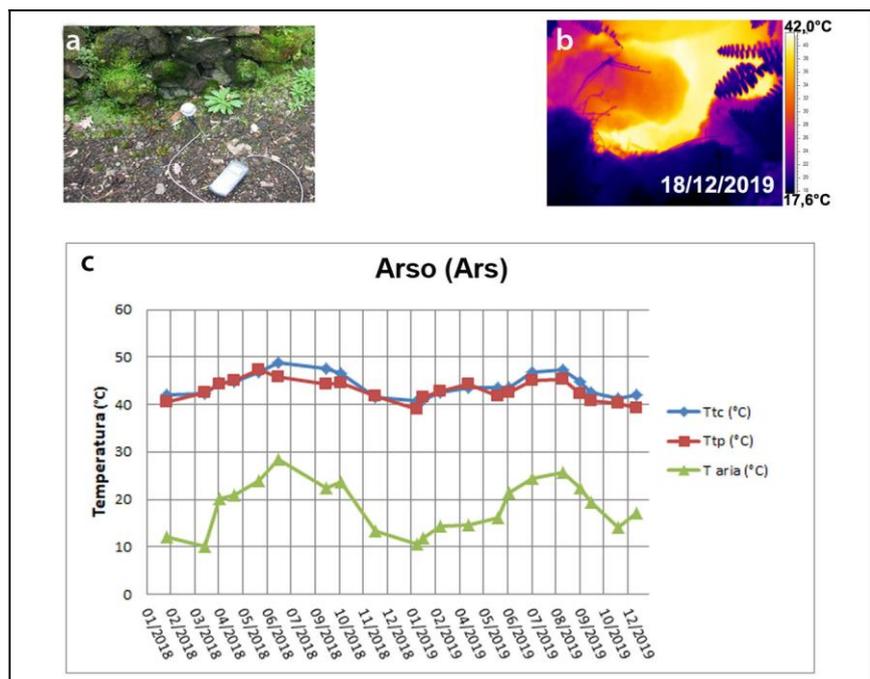


Figura 3.3 – Fumarola in località S. Angelo a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione StA di Figura 4.1e. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a dicembre 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 secondo 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 3.1d. 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 dicembre 2019 (c).



Pantane

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

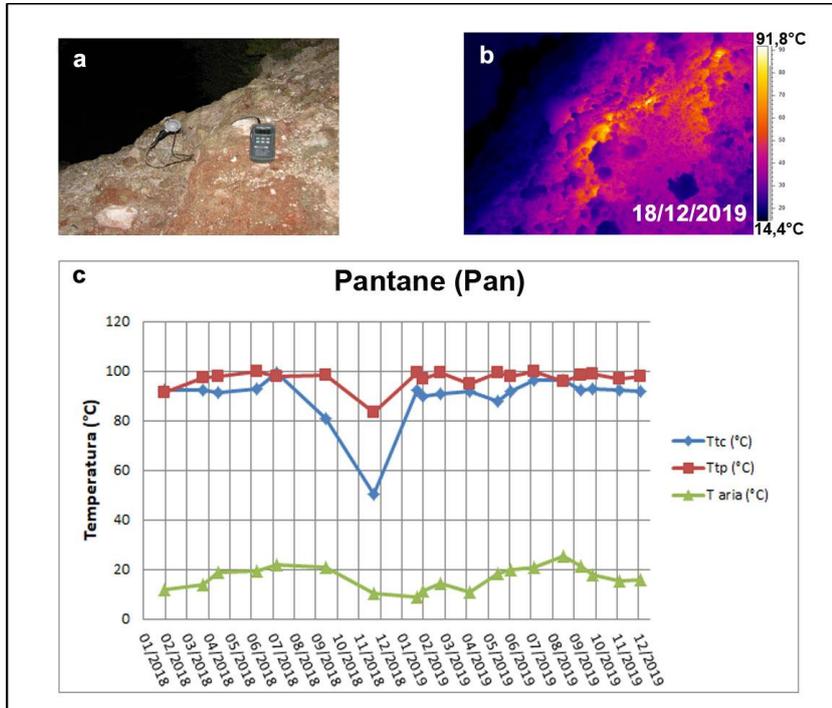


Figura 3.5 – Fumarola in località Pantane a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto di misura Pan di Figura 3.1a. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura alla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a dicembre 2019 (c).

Pizzone

In località Pizzone, a nord-ovest del Monte Epomeo (Figura 3.1h), i valori di temperatura misurati, compresi tra circa 90 e 99°C per la termocoppia e tra circa 87 e 97°C per la termocamera, sono in linea con le medie stagionali del periodo anche rispetto al semestre precedente (Figura 3.6c).

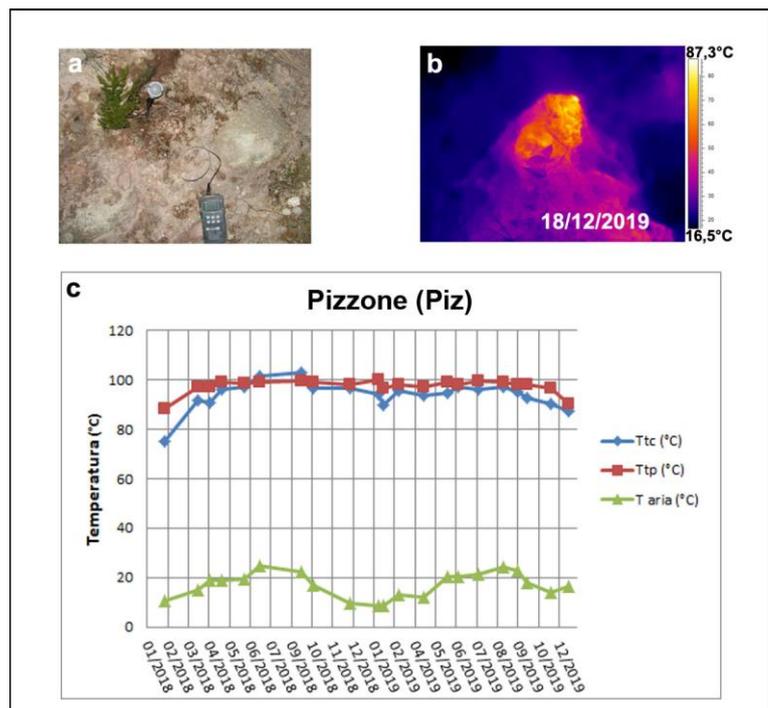


Figura 3.6 – Fumarola in località Pizzone a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Piz di Figura 3.1h. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a dicembre 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).

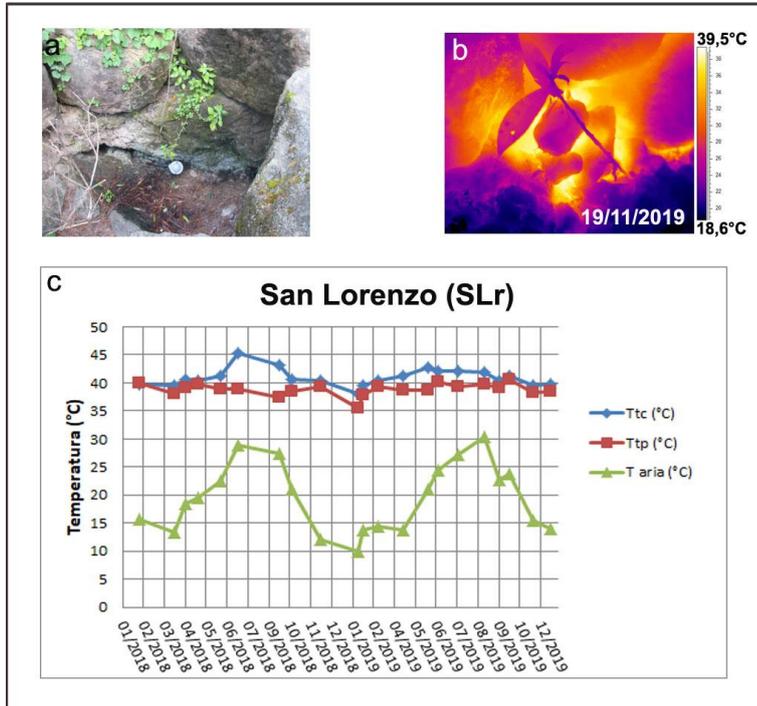


Figura 3.7 – Fumarola in località S. Lorenzo a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto di stazione SLr di Figura 3.1b. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a dicembre 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).

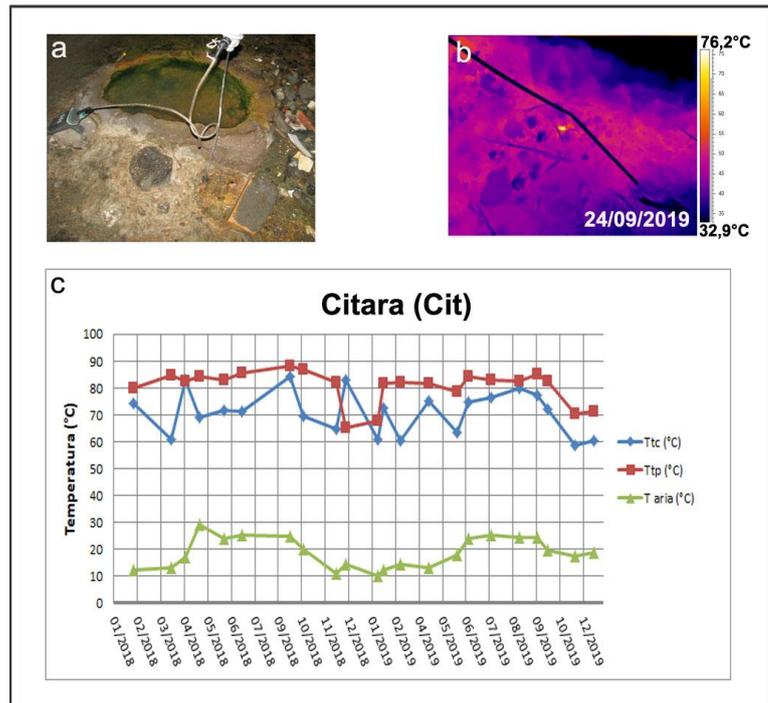


Figura 3.8 – Fumarola in località Citara a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione Cit di Figura 3.1g. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell’aria misurata nel momento del rilievo termico da gennaio 2018 a dicembre 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).

Il valore mancante nel mese di agosto è stato dovuto all'impossibilità di accedere al sito per momentanei lavori in corso.

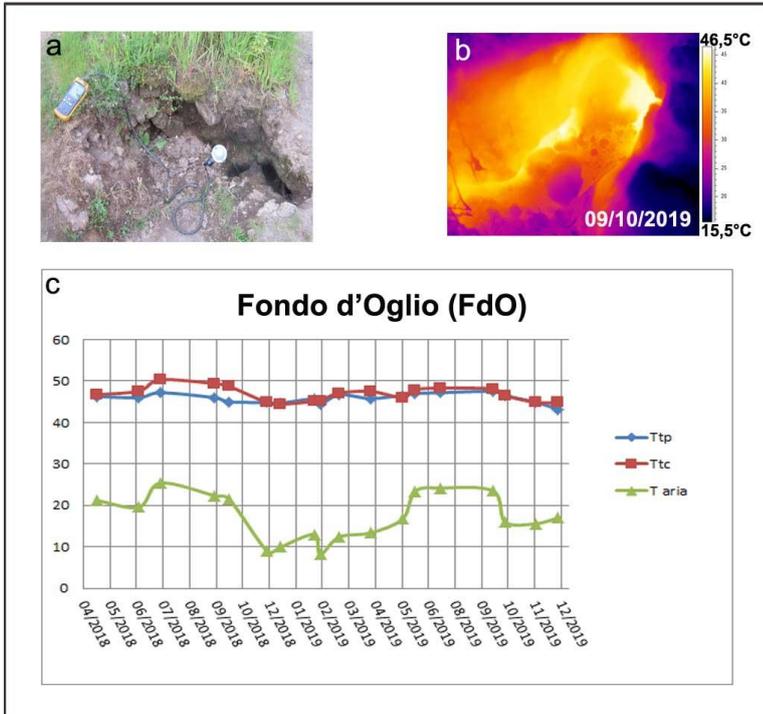


Figura 3.9 – Fumarola in località Fondo d'Oglio a Ischia. Immagini nel visibile (a) e termica (b) riprese dal punto stazione FdO di Figura 3.1i. Valori massimi di temperatura con termocamera (Ttc) e valori di temperatura dalla termocoppia (Ttp), confrontati con la temperatura dell'aria misurata nel momento del rilievo termico da aprile 2018 a dicembre 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.

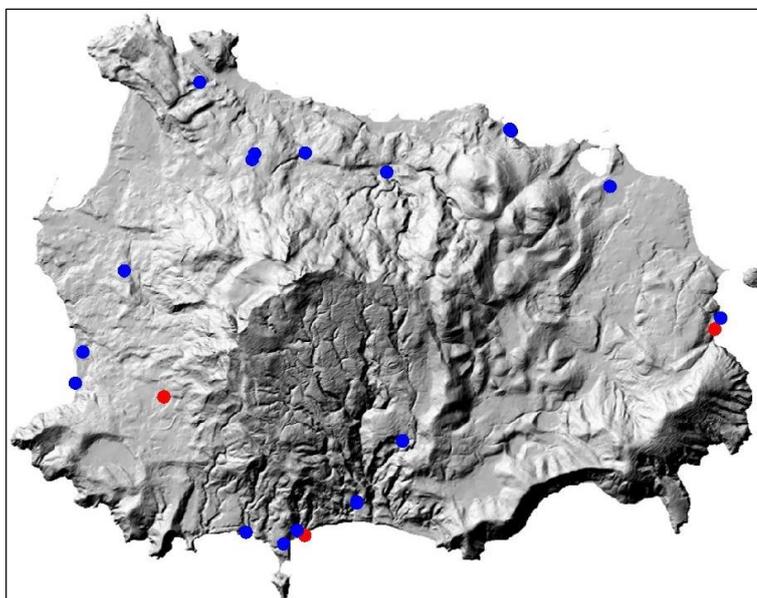


Figura 4.1.1 – Ubicazione dei punti di campionamento: blu = acque, rosso = gas liberi.

Ischia ospita un sistema idrotermale complesso, interposto tra la sorgente magmatica e le falde superficiali, che modula il trasferimento di fluidi (e di calore) profondi verso la superficie. Il sistema idrotermale è composto da reservoir sovrapposti e probabilmente interagenti, con temperature stimate tra 150 e 300°C e profondità comprese tra 150 e 1000 m (Di Napoli et al., 2009, 2011). I reservoir più superficiali (150-300 m sotto il livello del mare), con temperature stimate di 150-200°C (endmember Serrara e Citara), alimentano il settore SW dell'isola. Il più profondo (>-1000 m slm) con T di 270°C e bassa salinità (endmember 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. 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. Durante il 2019 sono stati eseguiti due campionamenti (giugno e settembre) di acque termali e gas fumarolici appartenenti alla rete geochimica di monitoraggio. In ogni campione sono stati determinati la composizione chimica e isotopica (δD e δ¹⁸O dell'acqua e δC_{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.

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 una componente profonda, acque marine e meteoriche, 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).

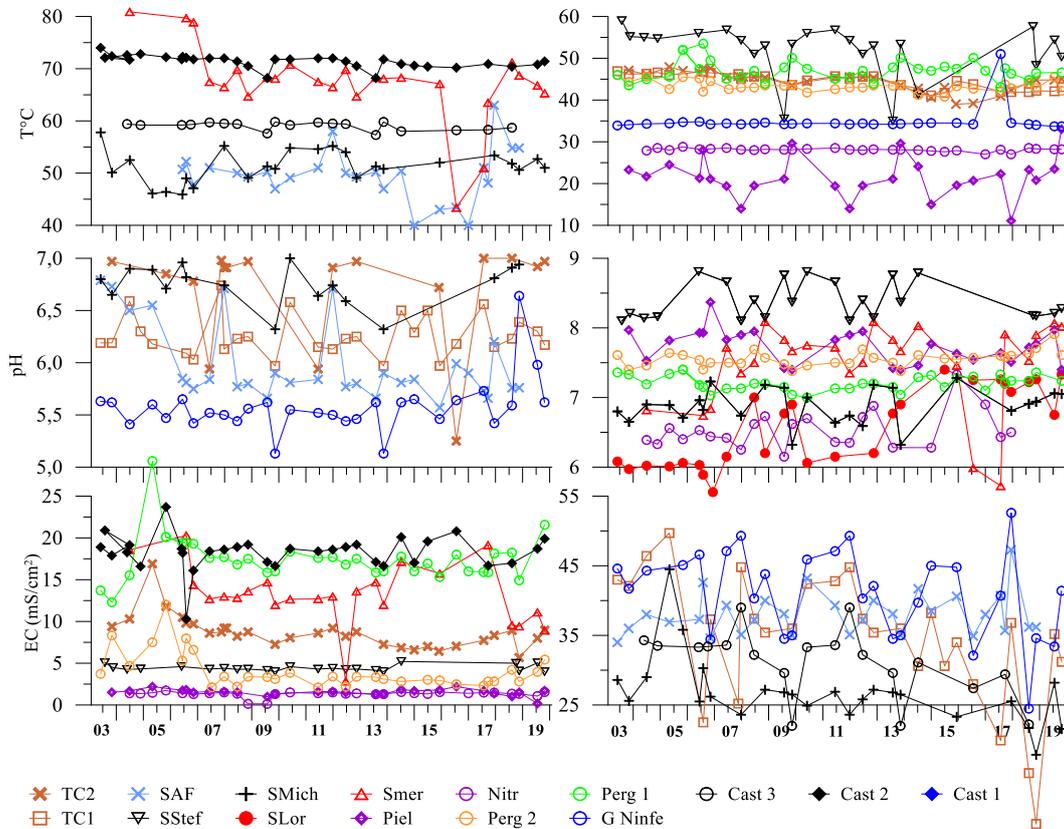


Figura 4.1.2 – Variazioni temporali di temperatura (°C), conducibilità (mS/cm²) e pH delle acque campionate.

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.

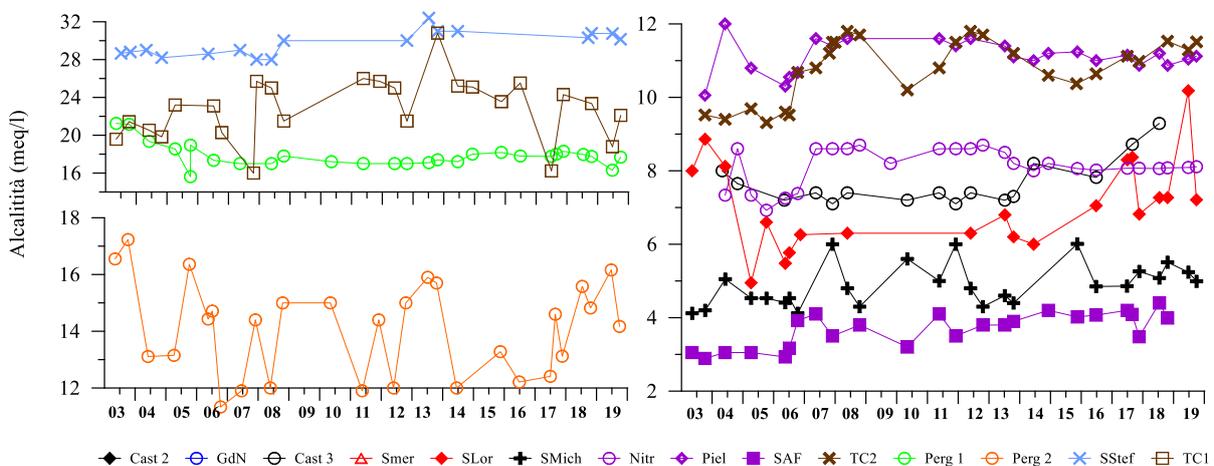


Figura 4.1.3 - Variazione temporale dell'alcalinità totale (meq/l) nelle acque campionate.

Le stime geotermometriche effettuate sulla base della composizione chimica delle acque termali e dei gas prelevati hanno evidenziato che non vi sono variazioni di rilievo nel tempo testimoniando la stabilità del sistema vulcanico e geotermico (Figura 4.1.4).

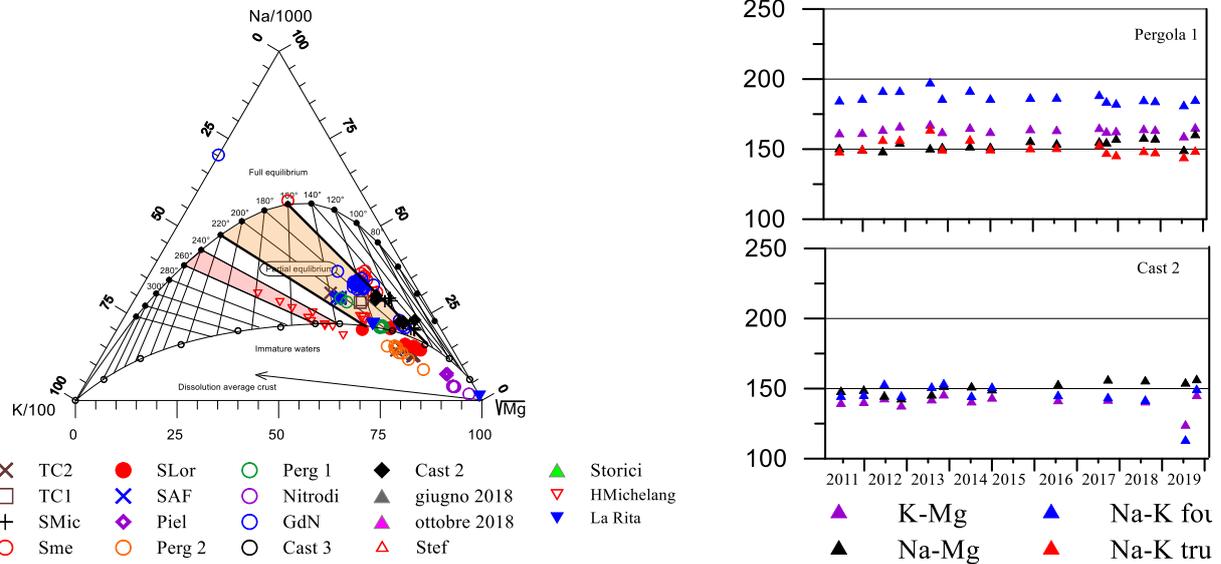


Figura 4.1.4 - Geotermometri in fase liquida. A destra la variazione temporale delle temperature calcolate con diversi geotermometri nei campioni Pergola 1 e Castiglione 2.

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

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

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

Nel secondo 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 4.1.1; 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”.

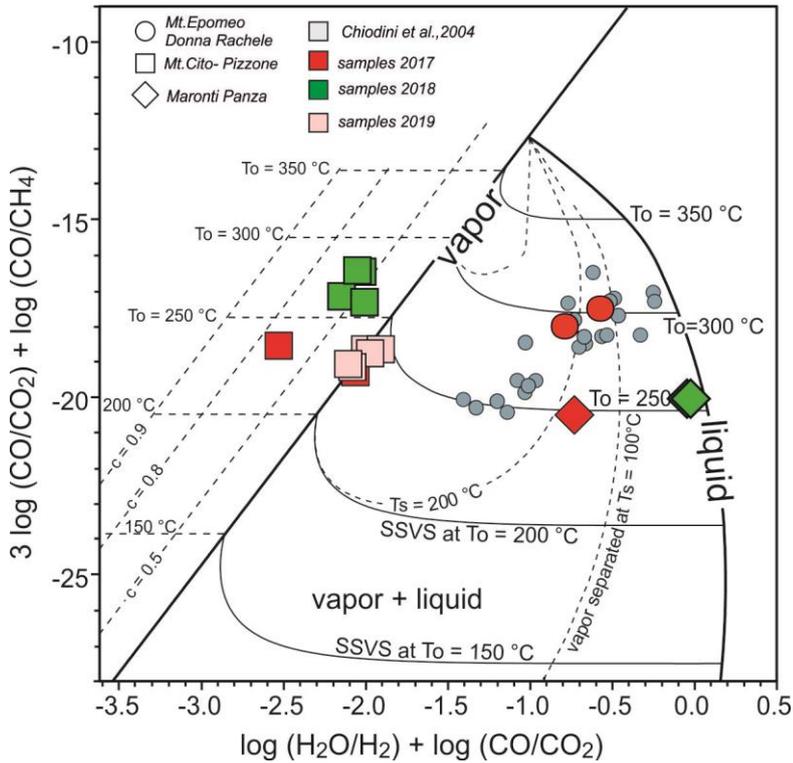


Figura 4.2.1 - Diagramma di equilibrio $3 \log (X_{CO}/X_{CO_2}) + \log (X_{CO}/X_{CH_4})$ vs $\log (X_{H_2O}/X_{H_2}) + \log (X_{CO}/X_{CO_2})$ nel sistema H-C-O. Nel diagramma sono riportati i valori teorici di una fase di vapore saturata (linea di vapore) e di una fase liquida saturata (linea liquido); 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 $100^\circ C$ e $200^\circ C$ 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 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 $\sim 230^\circ C$.

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 aprile-novembre 2019 hanno mostrato ripetute oscillazione, da valori di $\sim 98^\circ C$ (temperatura di ebollizione del fluido fumarolico) fino a raggiungere un minimo di $\sim 37^\circ C$ (Figura 4.2.2). Le variazioni di temperatura dell'emissione registrate dalla stazione, a una prima analisi, non sembrano essere correlate a variazioni delle condizioni meteorologiche (i.e. precipitazioni, Figura 4.1.2), riflettendo la dinamica di processi diversi, probabilmente legati a variazioni dell'attività idrotermale. 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.

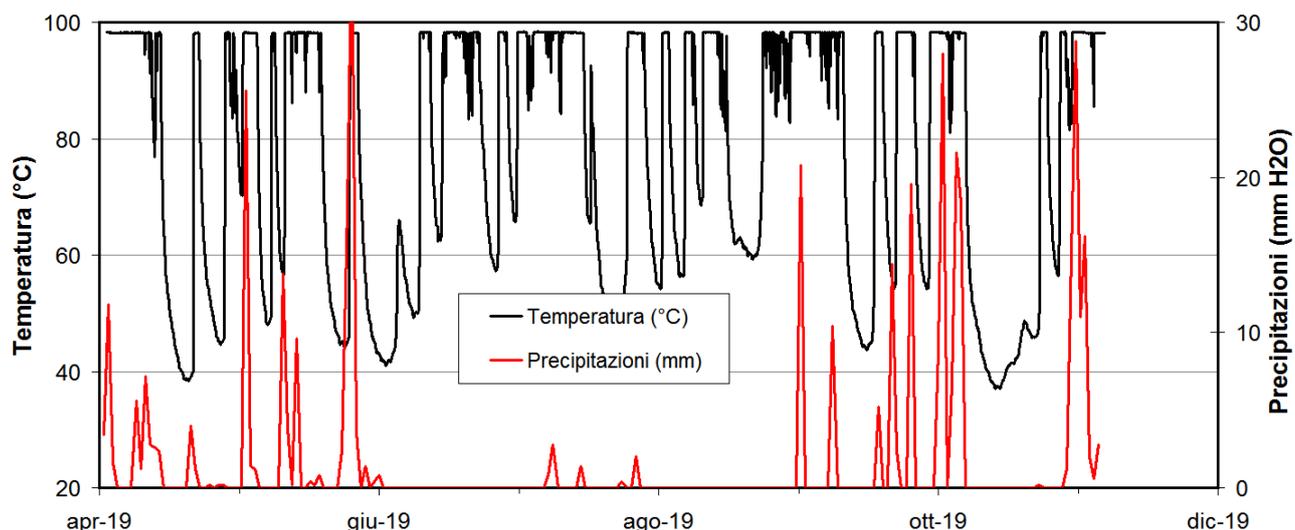


Figura 4.2.2 - Temperature misurate in continuo dell'emissione fumarolica di Mt.Cito (Pizzone), le precipitazioni registrate dal pluviometro di Forio sono riportate per confronto.

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, R. Esposito, D. Galluzzo, G. Gaudiosi, 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, V. Siniscalchi

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, T. Ricci, 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 recati a terzi derivanti dalle stesse decisioni.

La proprietà dei dati contenuti in questo documento è dell'INGV. La diffusione anche parziale dei contenuti è consentita solo per fini di protezione civile ed in conformità a quanto specificatamente previsto dall'Accordo Quadro sopra citato tra INGV e Dipartimento della Protezione Civile.

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)"



Publicato sotto licenza Creative Commons

