

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

Monitoraggio DInSAR di aree vulcaniche
Monitoraggio di Vulcano e Stromboli

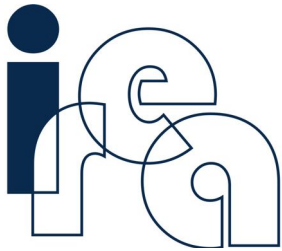
Analisi DInSAR di Vulcano tramite dati Sentinel-1 e COSMO-SkyMed
Aggiornamento al 29 giugno 2024

Gruppo di lavoro:

Manuela Bonano, Francesco Casu, Claudio De Luca, Riccardo Lanari, Michele Manunta, Fernando Monterroso, Giovanni Onorato, Yenni Lorena Belen Roa, Pasquale Striano, Muhammad Yasir, Ivana Zinno

Rif: WP1_EOLI_SNT_24_06_V

5 luglio 2024



istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

Sintesi

La presente relazione fornisce una descrizione degli spostamenti del suolo misurati nell'isola di Vulcano, nel periodo 24 aprile 2015 – 29 giugno 2024, mediante tecniche di Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR) applicate ai dati acquisiti dai sensori Sentinel-1 del programma europeo Copernicus e ai dati COSMO-SkyMed.

Lo stato delle deformazioni osservate si può riassumere come segue:

- Vulcano è interessato sul lungo periodo da un abbassamento dell'area del cratere de La Fossa, con valori massimi dei tassi di deformazione verticale di poco inferiori a 2 cm/anno (fino ad agosto 2021).
- Dall'inizio di settembre 2021 a dicembre 2021, in corrispondenza del cratere de La Fossa, è stato registrato un sollevamento che ha raggiunto un'entità massima di circa 5 cm.
- Da dicembre 2021, il tasso di sollevamento mostra valori in generale stabili nel tempo ad eccezione di un'area molto localizzata all'interno de La Fossa in cui si è registrata una variazione positiva dei trend di deformazione dalla fine del 2022.
- Dalla seconda metà di maggio 2024 internamente al cratere è stato registrato un leggero sollevamento il cui massimo raggiunge circa 1-1,5 cm. Tale andamento, che sarà confermato con la disponibilità di ulteriori acquisizioni, è stato osservato con dati Sentinel-1 ed è visibile anche dall'analisi degli interferogrammi generati con dati acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed.
- I versanti esterni del vulcano sono interessati da uno spostamento verticale in abbassamento, con valori massimi di poco inferiori a 1,5 cm/anno. In queste aree non sono state registrate variazioni significative dei tassi di deformazione negli ultimi mesi.

Vulcano: Analisi delle velocità medie e delle serie temporali di deformazione

L'analisi delle velocità medie di deformazione dell'isola di Vulcano (Figura 1a-b), nel periodo di osservazione (24 aprile 2015 – 29 giugno 2024), mostra in generale un *pattern* di deformazione che evidenzia la presenza di fenomeni d'instabilità dei versanti orientali dell'isola lungo costa. Inoltre, il cratere de La Fossa mostra un comportamento di subsidenza sul lungo periodo, il quale interessa il cratere ed i suoi versanti.

Nel seguito, ci si focalizza sulle deformazioni registrate in corrispondenza de La Fossa, per la quale la Figura 2 mostra uno zoom delle mappe di velocità media di spostamento di Figura 1a-b. In particolare, la componente verticale mostra un abbassamento di lungo periodo interno al cratere (P1 in Figura 2a), con tassi massimi di poco inferiori a 2 cm/anno, pari a circa 11 cm di spostamento totale da aprile 2015 fino ad agosto 2021 (Figura 2c). La componente est-ovest, nello stesso periodo, mostra valori positivi e negativi, congruenti con l'abbassamento registrato (punti P1 e P2 in Figura 2b e grafici di Figura 2d,f).

I grafici della componente verticale relativi al punto P1 (Figura 2c) e in particolare P2 (Figura 2e), quest'ultimo localizzato al bordo dell'area di massima subsidenza, evidenziano, a partire da settembre 2021, un'inversione di tendenza dello spostamento (sollevamento) all'interno de La Fossa. Ciò è confermato anche dall'analisi della serie temporale di deformazione della componente verticale mostrata in Figura 2g e relativa al punto P3 (Figura 2a). Un'analisi di maggiore dettaglio degli spostamenti verticali (Figura 3) mostra che, lungo un profilo interno al cratere, il segnale di sollevamento ha fatto registrare uno spostamento massimo di circa 5 cm nel periodo che va da settembre 2021 a fine novembre 2021 (Figure 3b-f).

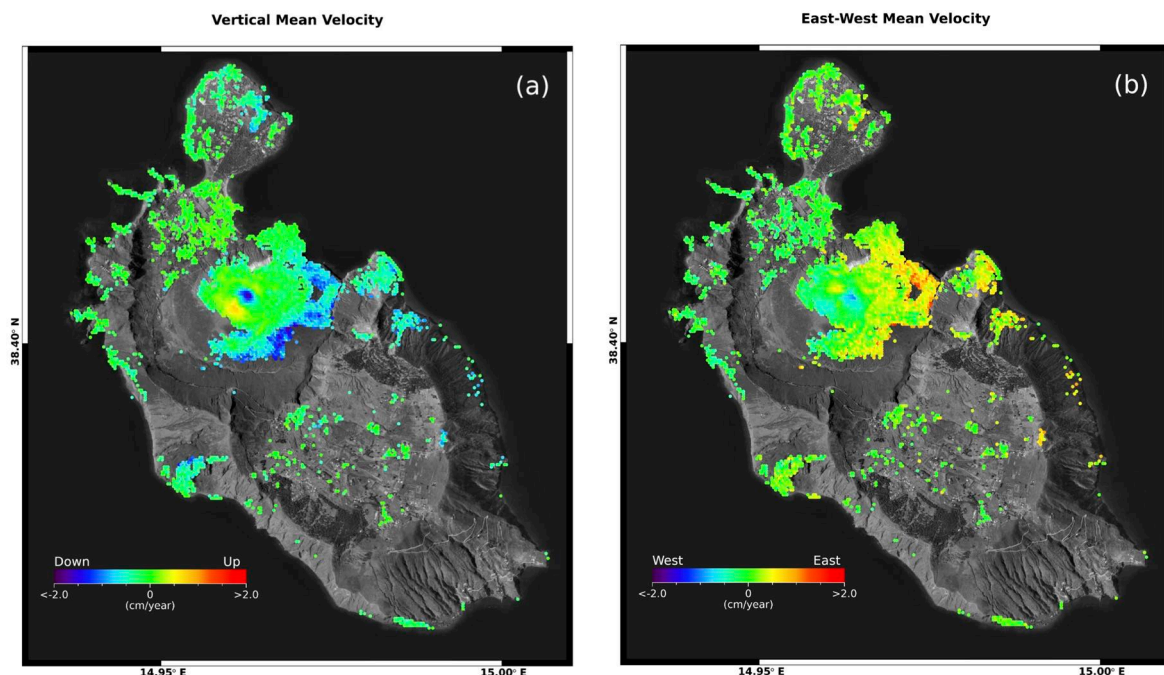


Figura 1. Vulcano: mappe delle componenti Verticale ed Est-Ovest della velocità media di deformazione relative al periodo 24 aprile 2015 – 29 giugno 2024 generate a partire da dati Sentinel-1. a) Componente Verticale. b) Componente Est-Ovest.

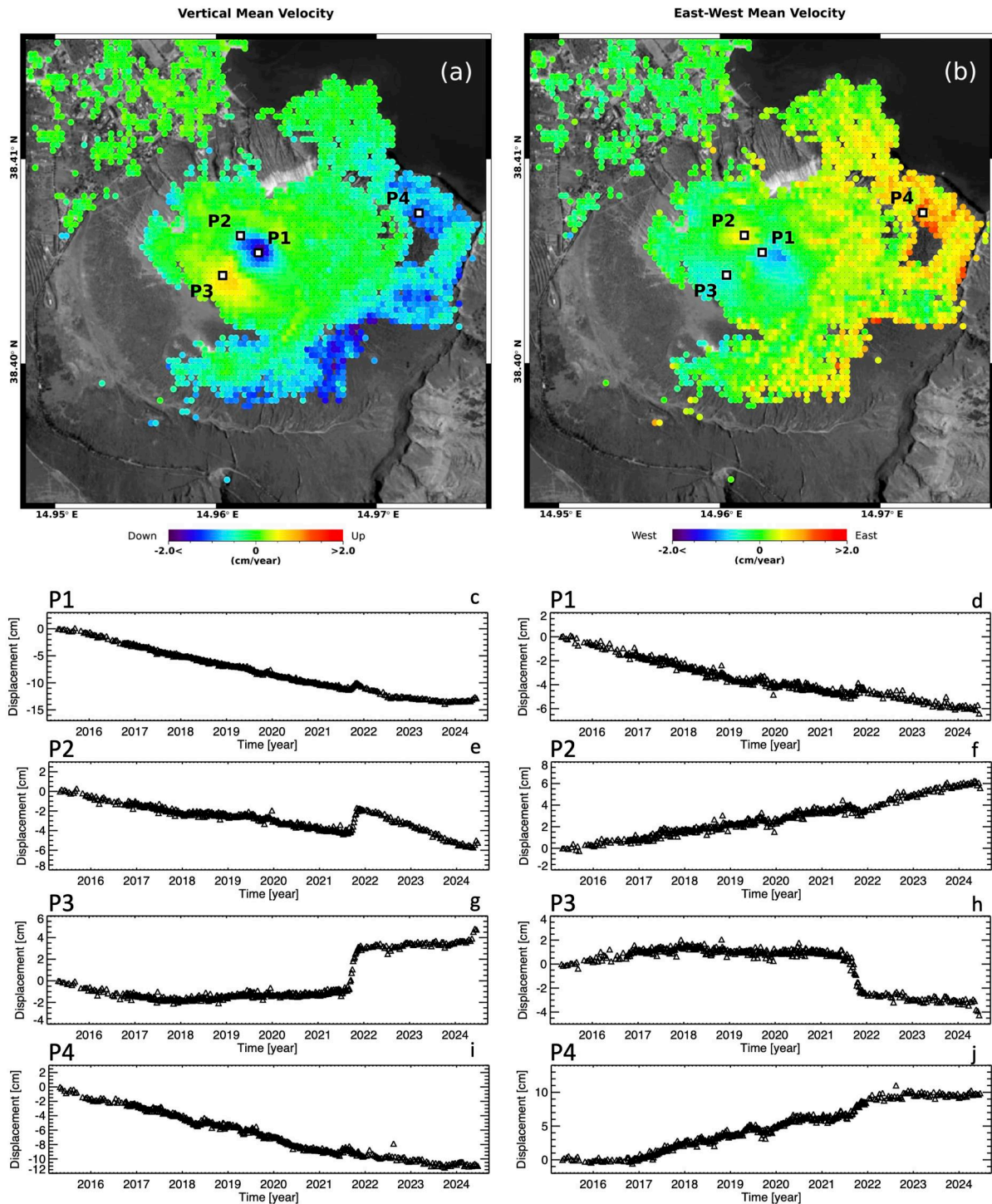


Figura 2. Vulcano – La Fossa: mappe delle componenti Verticale ed Est-Ovest della velocità media di deformazione relative al periodo 24 aprile 2015 – 29 giugno 2024 generate a partire da dati Sentinel-1. a) Componente Verticale. b) Componente Est-Ovest. c-j) Andamento temporale della deformazione lungo la direzione Verticale (c)(e)(g)(i) ed Est-Ovest (d)(f)(h)(j) in corrispondenza di quattro punti identificati come P1, P2, P3 e P4 in (a)-(b).

A partire da novembre 2021 il tasso di sollevamento della componente verticale si è ridotto rispetto al periodo settembre-ottobre 2021. Da dicembre 2021 nell'area interna alla caldera i tassi dello spostamento verticale risultano in generale stabili nel tempo.

Dalla fine del 2022, limitatamente ad alcuni punti all'interno de La Fossa, si registra una variazione positiva del trend di deformazione (Figura 3d1-d2). Dalla seconda metà di maggio 2024 internamente al cratere è stato registrato un leggero sollevamento il cui massimo raggiunge circa 1-1,5 cm (Figura 3b2-f2). Tale andamento, che sarà confermato con la disponibilità di ulteriori acquisizioni, è stato osservato con dati Sentinel-1 (serie temporali in

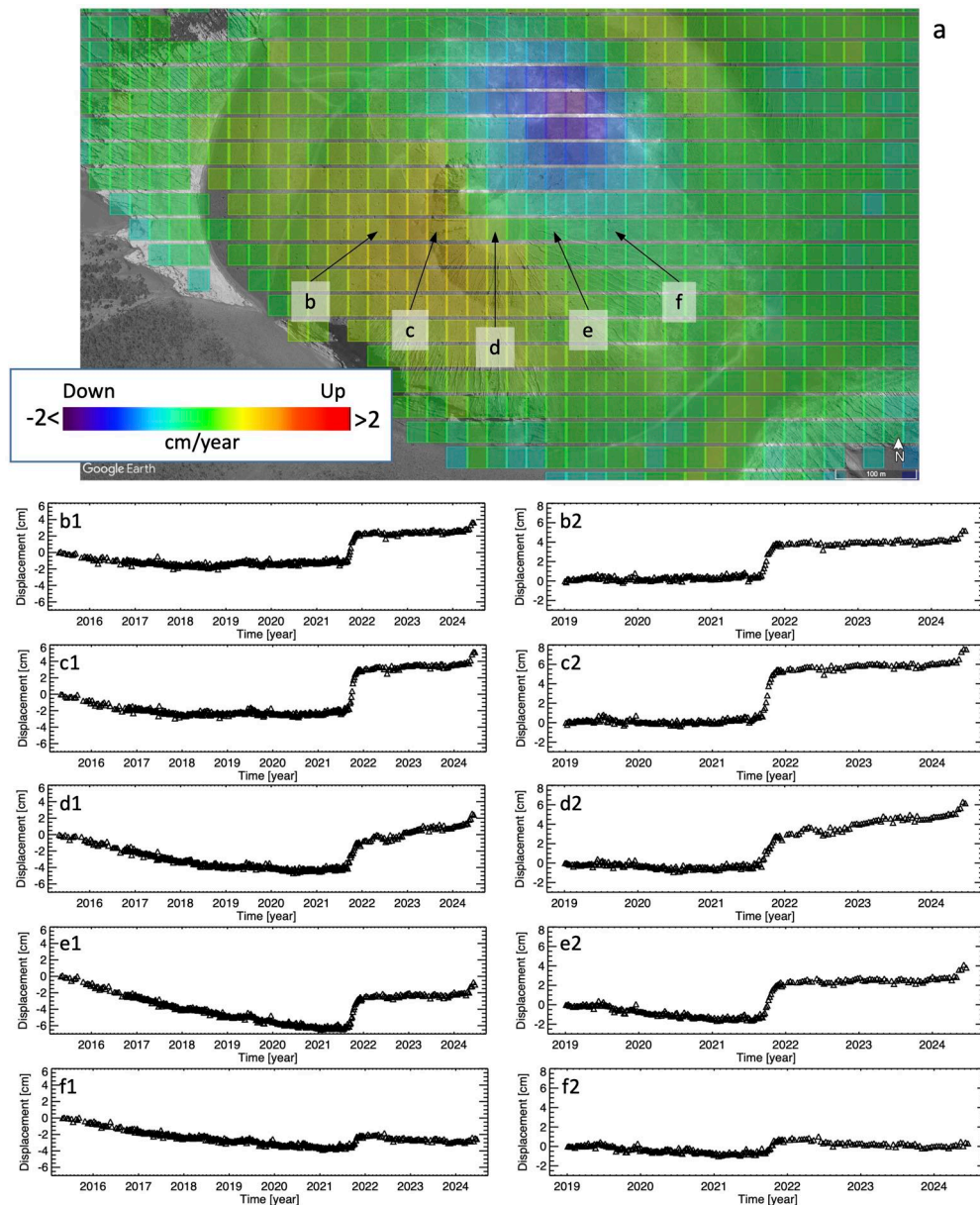


Figura 3. Vulcano – La Fossa: evoluzione temporale dello spostamento verticale per alcuni punti all'interno del cratere. a) mappa della componente Verticale della velocità media di deformazione relativa al periodo 24 aprile 2015 – 29 giugno 2024. b1-f2) grafici dell'andamento temporale dello spostamento verticale per tutto il periodo analizzato (sinistra) e a partire da gennaio 2019 (destra), relativi ai punti identificati come b-f in Figura 3.

Figura 3 e interferogrammi in Figura 4a-b) ed è visibile anche dall'analisi dei dati acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed (Figura 4c-d).

In particolare, l'analisi dei singoli interferogrammi, di cui alcuni esempi sono riportati in Figura 4, mostra che nella parte interna del cratere è presente un segnale in avvicinamento al sensore sui dati acquisiti da entrambe le orbite e per entrambi i sensori, in un periodo a cavallo fra

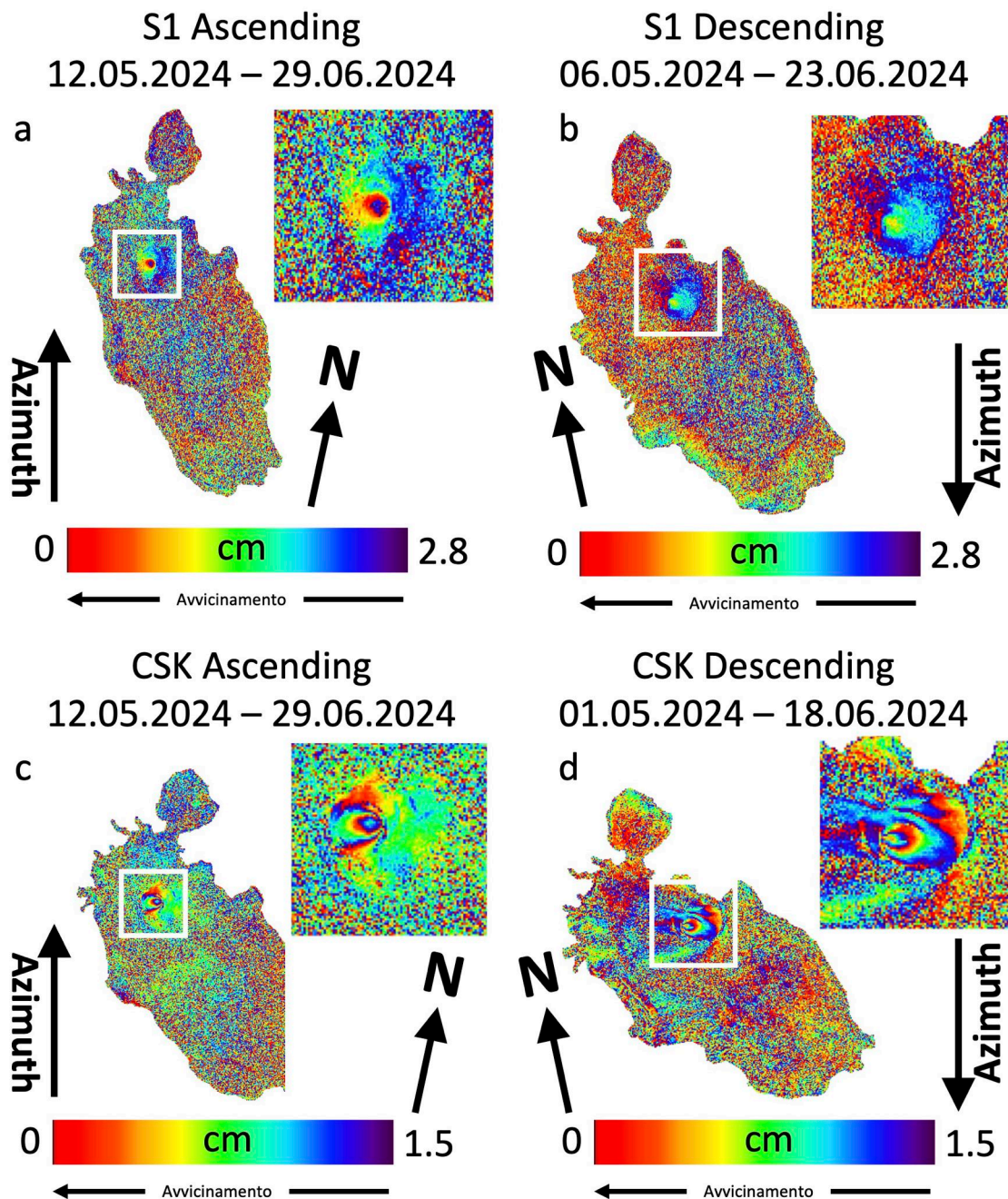
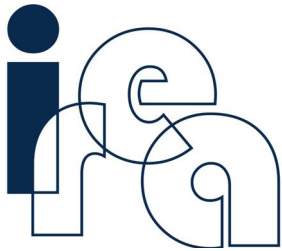


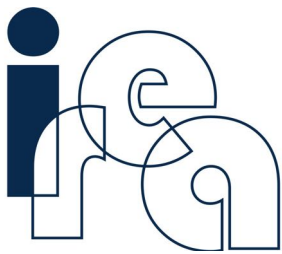
Figura 4. Interferogrammi differenziali, in geometria radar, generati a partire da dati acquisiti dai sensori (a-b) Sentinel-1 e (c-d) COSMO-SkyMed rispettivamente lungo orbite ascendenti e discendenti. Gli inserti mostrano una visione ravvicinata delle aree delimitate dai quadrati bianchi.



istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

maggio e giugno 2024. Tale comportamento è compatibile con un segnale di spostamento verticale, come osservato dalle serie temporali ottenute con i soli dati Sentinel-1.

Infine, sui versanti esterni de La Fossa sono stati registrati degli abbassamenti nel lungo periodo. In queste aree gli spostamenti massimi sono di poco inferiori a 1,5 cm/anno (es. P4 in Figura 2a). In questo caso, il comportamento della deformazione verticale (Figura 2i, 2j) non mostra anomalie nell'ultimo periodo di osservazione.



Appendice A

Stato delle acquisizioni Sentinel-1 utilizzate e dettagli tecnici dell'elaborazione DInSAR

La deformazione superficiale dell'isola di Vulcano è stata studiata tramite i dati acquisiti dai sensori SAR della costellazione Sentinel-1. Dal 23 dicembre 2021 in poi il satellite Sentinel-1B non ha più acquisito a causa di un problema all'alimentazione del sistema radar. Di conseguenza, successivamente a questo evento, per generare le serie temporali delle componenti verticale ed est-ovest della deformazione, sono state utilizzate le acquisizioni del solo Sentinel-1A fino al 29 giugno 2024 per le orbite ascendenti, e al 23 giugno 2024 per quelle discendenti. Nello specifico sono state impiegate 427 immagini SAR acquisite da orbite ascendenti (*Track* 44) e 424 da quelle discendenti (*Track* 124).

In Tabella A1 sono riassunte le principali caratteristiche dei dati Sentinel-1 utilizzati. In Figura A1 è mostrata la distribuzione delle acquisizioni nel piano Tempo/Baseline Perpendicolare nell'intervallo temporale 24 aprile 2015 – 29 giugno 2024. Da questi dati sono state generate, per ciascun'orbita, le relative serie temporali di deformazione e le mappe di velocità media nella linea di vista del sensore (LOS), sfruttando l'algoritmo di interferometria SAR differenziale denominato SBAS (Small BAseline Subset) [1]. Per l'elaborazione SBAS è stato impiegato un DEM SRTM dell'area con una risoluzione spaziale di 30 m. Sia gli interferogrammi differenziali sia le successive mappe e serie storiche di deformazione hanno una risoluzione spaziale di circa 30 m, ottenuta a valle di un'operazione di *multilooking*. La disponibilità di informazioni da entrambe le orbite (ascendente e discendente) ha permesso di scomporre lo spostamento in LOS osservabile dal SAR lungo le direzioni Verticale ed Est-Ovest, seguendo l'approccio presentato in [2] (si noti che la proiezione della componente Nord-Sud dello spostamento lungo la linea di vista del sensore è trascurabile, dal momento che i satelliti percorrono orbite polari). Essendo lo scarto temporale fra passaggi ascendenti e discendenti di circa 12 ore e assumendo che la variazione di deformazione sia trascurabile in un intervallo così breve, è stato possibile combinare le singole acquisizioni ascendenti e discendenti per generare le serie temporali delle componenti di deformazione Verticale ed Est-Ovest. Ciò è valido da settembre 2016 al 23 dicembre 2021, in concomitanza della piena operatività di Sentinel-1B. Per i periodi antecedente (aprile 2015 – settembre 2016) e successivo, per i quali si dispone di un unico sensore, si è assunto che la variazione di deformazione fra acquisizioni ascendenti e discendenti

Tabella A1		
Caratteristiche principali dei dati S1 utilizzati per l'analisi interferometrica		
	Ascendente	Discendente
Lunghezza d'onda	5,5 cm	
Modalità di acquisizione	Terrain Observation by Progressive Scans	
Angolo di vista a centro scena	~39°	
Risoluzione spaziale dato interferometrico	~30 m x 30 m	
Track	44	124
Periodo di osservazione	30/04/2015 – 29/06/2024	24/04/2015 – 23/06/2024
Numero di acquisizioni	427	424

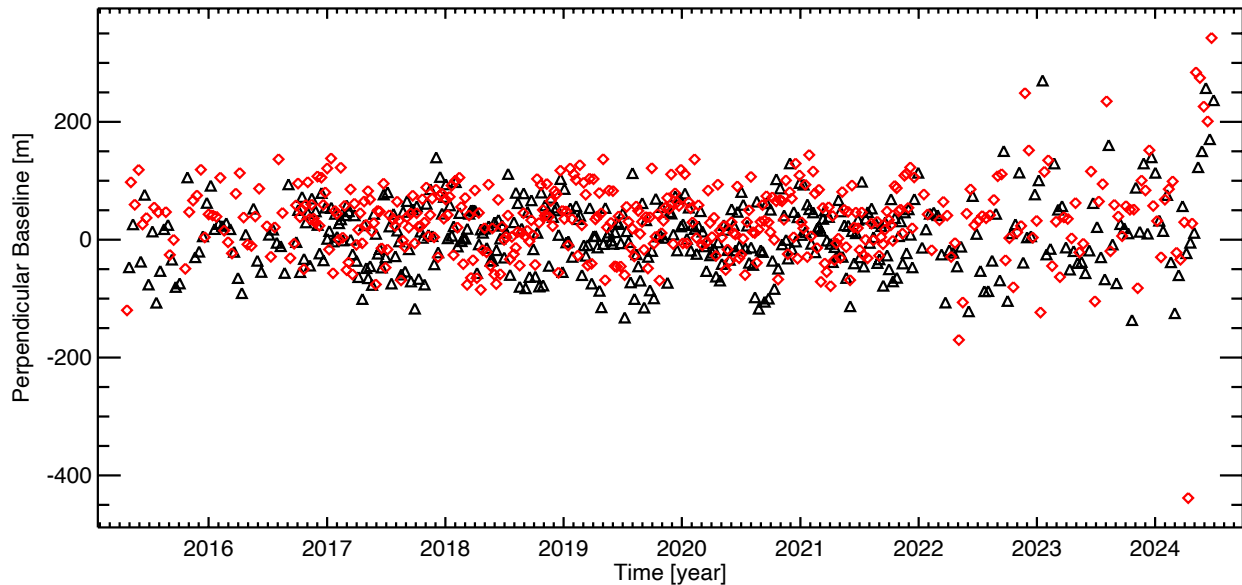


Figura A1. Distribuzione nel piano Tempo/Baseline Perpendicolare dei dati SAR Sentinel-1 utilizzati per l'analisi interferometrica SBAS. In nero e rosso sono rappresentati i dati acquisiti, rispettivamente, da orbite ascendenti e discendenti.

in 6 giorni fosse trascurabile. In generale, tali assunzioni sono valide nel momento in cui non avvengono deformazioni improvvise e di elevata entità (ad esempio terremoti di elevata magnitudo o eruzioni) nel periodo che intercorre fra i due passaggi, come nel caso in esame. Infine si rimarca che le misure relative a Vulcano sono riferite spazialmente ad un punto in località Piano.

Riferimenti

- [1] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 11, pp. 2375–2383, Nov. 2002.
- [2] F. Casu and A. Manconi, "Four-dimensional surface evolution of active rifting from spaceborne SAR data", *Geosphere*, 2016, doi: 10.1130/GES01225.1.