istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Monitoraggio DInSAR di aree vulcaniche
Monitoraggio di Vulcano e Stromboli

Analisi DInSAR di Stromboli tramite dati Sentinel-1
Aggiornamento al 21 settembre 2023

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

Rif: WP1_EOLI_SNT_23_09_S

27 settembre 2023

www.irea.cnr.it mbox@irea.cnr.it
I-80124 NAPOLI Via Diocleziano, 328 tel. +39 081 5707999 / 5704945 fax +39 081 5705734 C.F. 80054330586 Part. IVA 02118311006

Sintesi

La presente relazione fornisce una descrizione degli spostamenti del suolo misurati nell'isola di Stromboli, nel periodo 24 aprile 2015 – 21 settembre 2023, mediante tecniche di Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR) applicate ai dati acquisiti dai sensori Sentinel-1 del programma europeo Copernicus.
Lo stato delle osservazioni si può riassumere come segue:

- La parte lungo costa del settore settentrionale della Sciara del Fuoco presenta da marzo 2020 fino al 21 settembre 2023 un andamento stabile in abbassamento di circa 2 cm/anno.
- Il segnale di deformazione in abbassamento della parte sommitale della Sciara del Fuoco, registrato in seguito al parossismo del 3 luglio 2019, mostra un andamento stazionario nel tempo fino ad ottobre 2022.
- Da ottobre del 2022, nella parte più prossima alla sommità, si registra un incremento dell'abbassamento e dello spostamento verso ovest. In particolare, dopo un'accelerazione iniziale, il tasso di spostamento è in attenuazione rispetto ai mesi precedenti. In quest'area dal 1° ottobre 2022 al 21 settembre 2023 si misura un abbassamento massimo di circa 7 cm e uno spostamento verso ovest di circa 6 cm.
- L'analisi dei singoli interferogrammi acquisiti lungo orbita discendente, relativi al periodo 28 agosto 2023 – 21 settembre 2023, mostra che il segnale di fase associato alla colata lavica dell'agosto 2019 appare ormai di bassa entità e si confonde con il rumore di fase associato a disturbi atmosferici.
- Inoltre, in congruenza con le serie temporali di deformazione, l'analisi dei suddetti interferogrammi mostra che il segnale di fase in allontanamento localizzato nella parte sommitale del settore settentrionale della Sciara del Fuoco, già evidenziato nelle precedenti relazioni, è di difficile rilevazione ad indicazione del fatto che l'entità del movimento è in progressiva diminuzione.
- Non sono visibili segnali di fase chiaramente riconducibili a deformazione alla scala del vulcano.

www.irea.cnr.it mbox@irea.cnr.it
I-80124 NAPOLI Via Diocleziano, 328 tel. +39 081 5707999 / 5704945 fax +39 081 5705734 C.F. 80054330586 Part. IVA 02118311006

Analisi degli interferogrammi e delle serie temporali di deformazione

Nel periodo aprile 2015 – giugno 2019 (precedente al parossismo del 3 luglio 2019), lo Stromboli è stato interessato da uno spostamento pressoché continuo lungo il versante occidentale dell'isola, caratterizzato da una componente di subsidenza ed una orizzontale (lungo la direzione est-ovest) verso occidente.

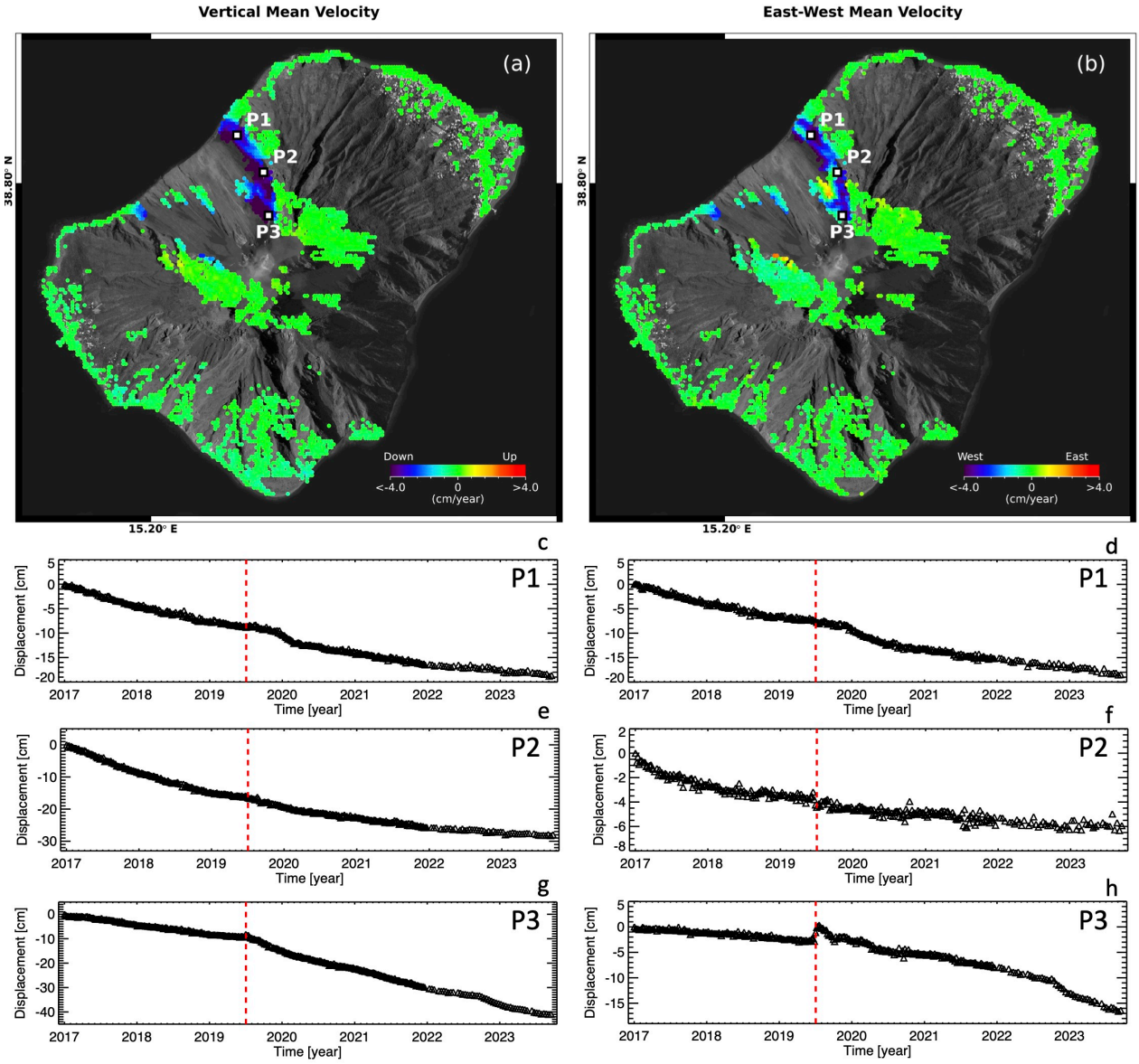

Figura 1. Mappe delle componenti Verticale ed Est-Ovest della velocità media di deformazione relative al periodo 24 aprile 2015 – 21 settembre 2023 generate a partire da dati Sentinel-1. a) Componente Verticale. b) Componente Est-Ovest. c-h) Andamento temporale della deformazione lungo la direzione Verticale (c)(e)(g) ed Est-Ovest (d)(f)(h) in corrispondenza di tre punti identificati come P1, P2 e P3 in (a)-(b) nel periodo gennaio 2017 – 21 settembre 2023. La linea rossa tratteggiata indica il parossismo del 3 luglio 2019.

www.irea.cnr.it
mbox@irea.cnr.it
I-80124 NAPOLI Via Diocleziano, 328 tel. +39 081 5707999 / 5704945 fax +39 081 5705734 C.F. 80054330586 Part. IVA 02118311006

A seguito dei parossismi del 3 luglio 2019 e 28 agosto 2019, nella Sciara del Fuoco si è riscontrato un peggioramento della qualità del segnale di fase (rumore di decorrelazione) a causa principalmente del deposito del materiale emesso durante i suddetti eventi, che ha modificato la scena dal punto di vista elettromagnetico. Ne consegue che, successivamente al 3 luglio, la coerenza temporale è significativamente peggiorata nella parte centro meridionale

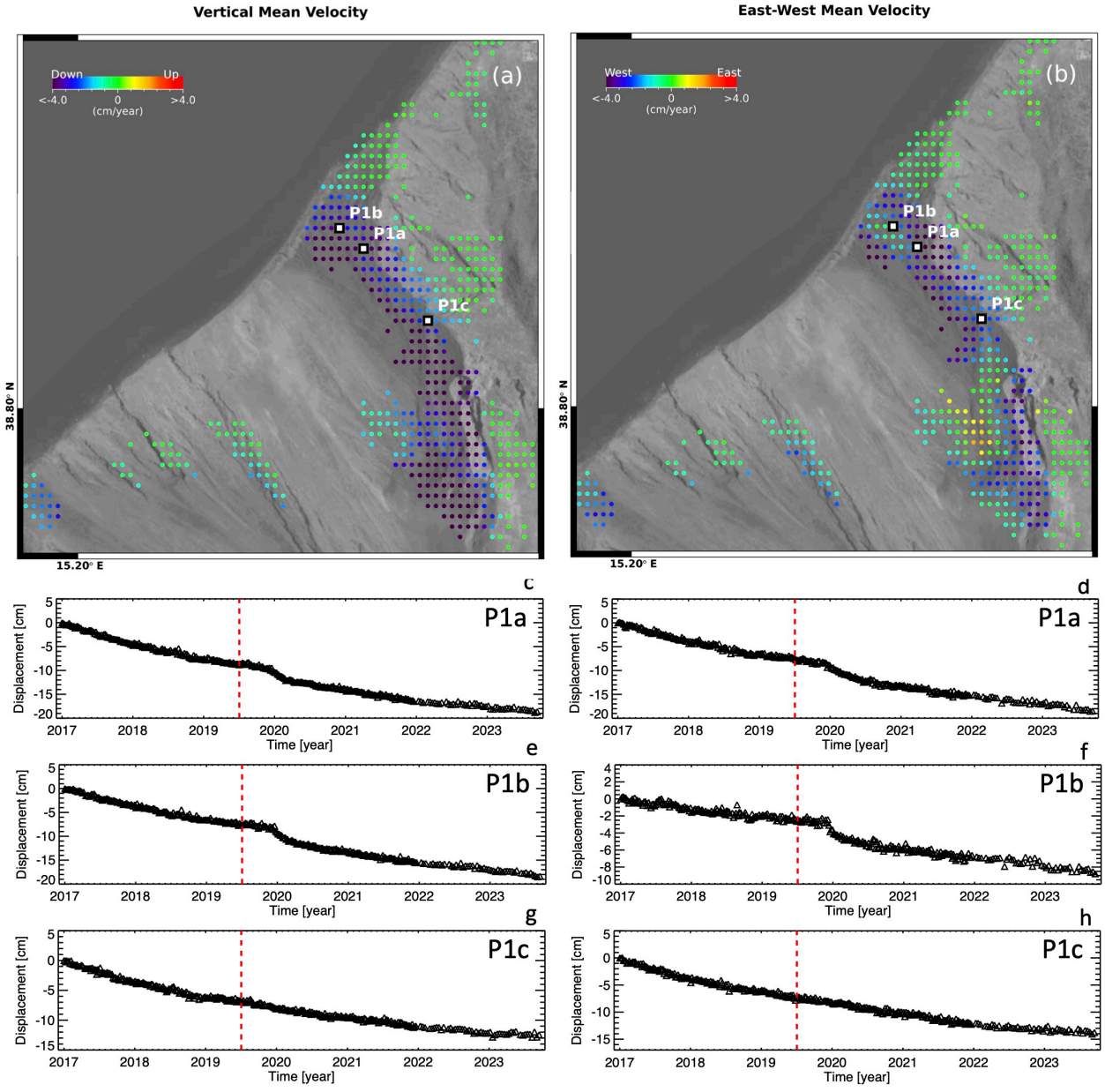

Figura 2. Mappe delle componenti Verticale ed Est-Ovest della velocità media di deformazione dell'area settentrionale della Sciara del Fuoco relative al periodo 24 aprile 2015 – 21 settembre 2023. a) Componente Verticale. b) Componente Est-Ovest. c-h) Andamento temporale della deformazione lungo la direzione Verticale (c)(e)(g) ed Est-Ovest (d)(f)(h) in corrispondenza di tre punti identificati come P1a, P1b e P1c in (a)-(b) nel periodo gennaio 2017 – 21 settembre 2023. La linea rossa tratteggiata indica il parossismo del 3 luglio 2019.

www.irea.cnr.it
mbox@irea.cnr.it
I-80124 NAPOLI Via Diocleziano, 328 tel. +39 081 5707999 / 5704945 fax +39 081 5705734 C.F. 80054330586 Part. IVA 02118311006

della Sciara del Fuoco, mantenendo invece valori elevati solo nel settore settentrionale della stessa. Resta invariato lo scenario per il resto dell'isola.
Ciò premesso, in Figura 1 sono mostrate le serie temporali di deformazione, relative ad alcuni punti della Sciara del Fuoco, a partire dal 2017 fino al 21 settembre 2023. Si può notare come le zone lungo costa e centrali del settore settentrionale siano interessate da un andamento della deformazione (punti P1 e P2 in Figura 1a-b) la cui entità non è stata influenzata in maniera significativa dagli eventi parossistici di luglio e agosto 2019 (l'evento del 3 luglio 2019 è indicato con una linea rossa tratteggiata nei grafici di Figura 1), come evidenziato dall'evoluzione temporale, sia nelle componenti verticali (Figura 1c,e) sia est-ovest (Figura 1d,f), della deformazione.
Nell'area lungo costa nel periodo dicembre 2019 – febbraio 2020 è stato rilevato un incremento dei tassi di deformazione sia verticale (Figura 1c) sia est-ovest (Figura 1d). In particolare, in Figura 2 sono mostrate le serie temporali di deformazione relative ad alcuni punti localizzati nell'area lungo costa del settore settentrionale della Sciara del Fuoco (Figura 2c-f). Dall'analisi di Figura 2 si nota che l'entità del tasso di spostamento (abbassamento) nel periodo dicembre 2019 – febbraio 2020 è di circa 1 cm/mese, mentre da marzo 2020 fino al 21 settembre 2023 il tasso è pressoché costante con valori della velocità verticale media di circa 2 cm/anno. L'area della Sciara del Fuoco interessata da questo cambio di *trend* deformativo è confinata alla parte più vicina alla costa. A tal riguardo, infatti, in Figura 2g-h sono presentati due grafici che rivelano come l'andamento della deformazione non mostri variazioni significative per aree lontane dalla costa.
Infine, per quanto riguarda l'area più vicina alla sommità, come già evidenziato nelle relazioni precedenti, la stessa presenta, successivamente al 3 luglio 2019, un incremento del tasso di deformazione (punto P3 in Figura 1a-b) rispetto al periodo precedente. In particolare, la

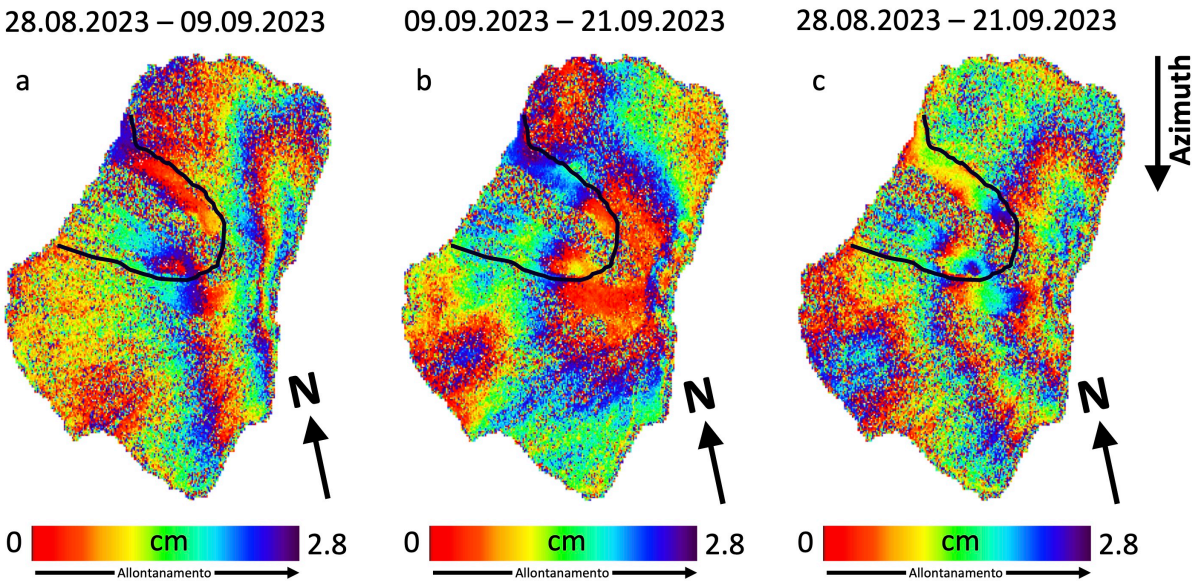

Figura 3. Interferogrammi differenziali, in geometria radar, generati a partire da dati acquisiti lungo orbite discendenti dai sensori Sentinel-1. Gli interferogrammi utilizzano i dati acquisiti a partire dal 28 agosto 2023 fino al 21 settembre 2023. In nero sono indicati i confini della Sciara del Fuoco, per riferimento.

www.irea.cnr.it mbox@irea.cnr.it
I-80124 NAPOLI Via Diocleziano, 328 tel. +39 081 5707999 / 5704945 fax +39 081 5705734 C.F. 80054330586 Part. IVA 02118311006

componente verticale (Figura 1g) mostra uno spostamento massimo verso il basso di circa 32 cm dal 3 luglio 2019 al 21 settembre 2023. La componente Est-Ovest (Figura 1h) è leggermente più rumorosa nei mesi immediatamente successivi al 3 luglio per poi stabilizzarsi entro la prima metà del 2020.
A partire da ottobre del 2022, nella parte più prossima alla sommità (punto P3 in Figura 1a-b, grafici in Figura 1g-h), si registra un incremento dell'abbassamento e dello spostamento verso ovest. In particolare, dopo un'accelerazione iniziale, il tasso di spostamento è in attenuazione rispetto ai mesi precedenti. In quest'area dal 1° ottobre 2022 al 21 settembre 2023 si misura un abbassamento massimo di circa 7 cm e uno spostamento verso ovest di circa 6 cm.
A partire dal 31 agosto 2019 (prima acquisizione successiva al parossismo del 28 agosto 2019), nel settore meridionale della Sciara del Fuoco è stato notato un segnale di fase interferometrica, già evidenziato nelle precedenti relazioni. La Figura 3 mostra, in geometria radar, alcuni degli interferogrammi differenziali generati con i dati acquisiti da Sentinel-1 nell'ultimo periodo (dal 28 agosto 2023 al 21 settembre 2023) lungo orbite discendenti. Come già evidenziato nelle precedenti relazioni, si può notare come il segnale di fase osservato dal 31 agosto 2019 nella porzione sommitale del settore centro-meridionale della Sciara del Fuoco sia difficilmente rilevabile, e si confonda con il rumore di fase associato a disturbi atmosferici.
Inoltre, in congruenza con le serie temporali di deformazione, il segnale di fase di allontanamento localizzato nella parte sommitale del settore settentrionale della Sciara del Fuoco (Figura 3), a ridosso dell'area in decorrelazione al centro della Sciara stessa, è di difficile rilevazione dall'analisi dei singoli interferogrammi, ad indicazione del fatto che l'entità del movimento è in progressiva diminuzione e confrontabile con il rumore di fase associato a disturbi atmosferici.
Infine, l'analisi dei singoli interferogrammi (Figura 3) non mostra segnali di fase chiaramente riconducibili a deformazione alla scala del vulcano.

www.irea.cnr.it mbox@irea.cnr.it
I-80124 NAPOLI Via Diocleziano, 328 tel. +39 081 5707999 / 5704945 fax +39 081 5705734 C.F. 80054330586 Part. IVA 02118311006

Appendice A

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

La deformazione superficiale dell'isola di Stromboli 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 15 settembre 2023 per le orbite ascendenti, e al 21 settembre 2023 per quelle discendenti. Nello specifico sono state impiegate 403 immagini SAR acquisite da orbite ascendenti (*Track* 44) e 401 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 –21 settembre 2023. 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

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 – 15/09/2023**	**24/04/2015 – 21/09/2023**
Numero di acquisizioni	**403**	**401**

www.irea.cnr.it mbox@irea.cnr.it
I-80124 NAPOLI Via Diocleziano, 328 tel. +39 081 5707999 / 5704945 fax +39 081 5705734 C.F. 80054330586 Part. IVA 02118311006

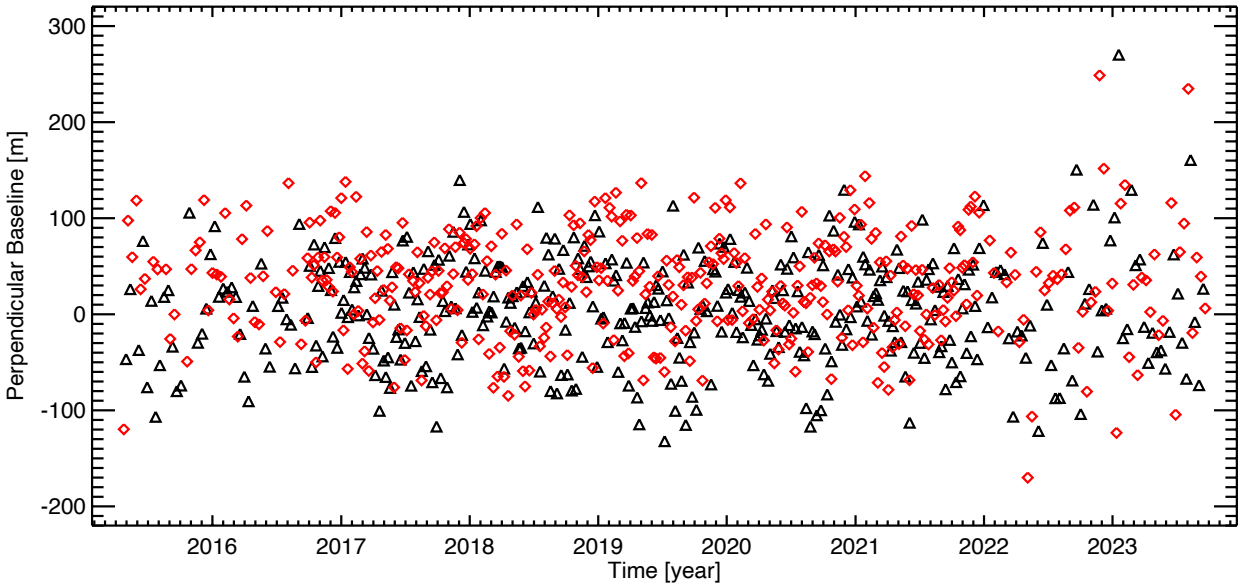

Figura A1. Distribuzione nel piano Tempo/Baseline Perpendicolare dei dati SAR Sentinel-1 utilizzati per l'analisi interferometrica SBAS. In nero e rosso sono rappresentati i dati acquisiti, rispettivamente, da orbite ascendenti e discendenti.

deformazione fra acquisizioni ascendenti e discendenti in 6 giorni fosse trascurabile. In generale, tali assunzioni sono valide nel momento in cui non avvengano 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 sono riferite ad un punto individuato nell'abitato dell'isola.

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.

www.irea.cnr.it mbox@irea.cnr.it

I-80124 NAPOLI Via Diocleziano, 328 tel. +39 081 5707999 / 5704945 fax +39 081 5705734 C.F. 80054330586 Part. IVA 02118311006