

L'INTERFEROMETRIA SATELLITARE PER LO SCAVO DI GALLERIE IN AREA URBANA

Gianluigi Della Ragione (gianluigi.dellaragione@unina.it)

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli Studi di Napoli Federico II

Emilio Bilotta (bilotta@unina.it)

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli Studi di Napoli Federico II

ABSTRACT. L'Interferometria Radar ad Apertura Sintetica (InSAR) è una tecnologia di monitoraggio che permette di misurare spostamenti lungo la linea di vista (LOS) del sensore con precisione millimetrica. Questo studio è stato condotto per mostrare le potenzialità dei sensori SAR, in questo caso quelli montati sui satelliti della costellazione COSMO-SkyMed, nel rilevare gli spostamenti indotti da scavi di gallerie in area urbana. Qui la costellazione di satelliti ha acquisito dati su una piccola area della città di Napoli, interessata dallo scavo di gallerie gemelle. I dati satellitari sono stati elaborati con il software SARPROZ, mentre i cedimenti indotti dagli scavi sono stati previsti con metodi empirici. Per consentire il confronto, gli spostamenti monitorati lungo la LOS sono stati proiettati nel piano verticale. I risultati indicano un buon accordo tra i dati monitorati e i cedimenti previsti, confermando dunque le potenzialità del telerilevamento satellitare nel rilevare cedimenti indotti dallo scavo di gallerie in area urbana, dove un elevato numero di target (*scatterers*) consente di monitorare l'area di interesse.

1. INTRODUZIONE

La costruzione di gallerie rappresenta il modo più efficace per soddisfare la crescente domanda di mobilità nelle aree urbane, soprattutto nelle città densamente popolate. Tali opere sotterranee possono rappresentare un rischio per l'ambiente circostante, in particolare durante il processo di scavo, dove in superficie si sviluppa una conca di subsidenza (Rankin, 1988). L'entità di quest'ultima può essere limitata, ma non evitata, utilizzando la tecnica di scavo più opportuna in funzione delle condizioni ambientali, delle caratteristiche del sottosuolo, del livello della falda, ecc. Pertanto, un sistema di monitoraggio in grado di rilevare i cedimenti superficiali riveste un ruolo fondamentale nel compito di gestione del rischio (Eskesen et al., 2004).

Al giorno d'oggi l'utilizzo di tecniche di monitoraggio tradizionali (livelli, stazioni totali, inclinometri, ecc.) sono implementati per identificare i potenziali rischi indotti dallo scavo di gallerie. Spesso però nelle aree urbane tale monitoraggio è limitato a pochi edifici o infrastrutture, a causa del suo costo.

Negli ultimi decenni i Radar ad Apertura Sintetica (SAR), come quelli montati sui satelliti COSMO-SkyMed di prima generazione, hanno acquisito immagini radar della superficie terrestre con un periodo di rivisitazione di 4÷16 giorni, ed elevata risoluzione spaziale (1÷3 m). Inoltre, l'uso dell'analisi interferometriche multi-temporali (MT-InSAR) consentono di generare serie temporali di movimenti nel tempo, con precisione millimetrica (Perissin et al., 2021).

La tecnica del MT-InSAR è utilizzata per diverse applicazioni di monitoraggio come ad esempio, ma non limitatamente ad essi, vulcani (Lu et al., 2000, Richter and Froger, 2020), terremoti (Ryder et al., 2007), frane (Moretto et al., 2017), subsidenza (Tomàs et al., 2014). Più recentemente tale tecnica è stata utilizzata anche per rilevare i cedimenti indotti da scavi di gallerie in aree urbane (Perissin et al., 2021, Milillo et al., 2018, Giardina et al., 2019).

L'obiettivo di questo studio è quello di mostrare un'applicazione della tecnica di monitoraggio MT-InSAR su un caso di studio, che prevede lo scavo di gallerie gemelle per una linea metropolitana nella città di Napoli. Supponendo che l'area di studio sia stata interessata da spostamenti prevalentemente verticali, i risultati del monitoraggio (spostamenti lungo la linea di vista del satellite) vengono proiettati in direzione verticale e poi confrontati con i cedimenti previsti dal metodo empirico. Questo studio conferma l'affidabilità di tale tecnica di monitoraggio nel rilevare cedimenti millimetrici indotti dallo scavo di gallerie in area urbana.

2. AREA DI STUDIO

Nel 2013 il Comune di Napoli decise di appaltare il prolungamento della Linea 1 della metropolitana, per aumentare la mobilità tra l'Aeroporto di Capodichino e il centro città. Questo articolo si concentra sulla tratta Capodichino-Poggioreale del prolungamento della Linea 1 della metropolitana, mostrata in Figura 1(a).

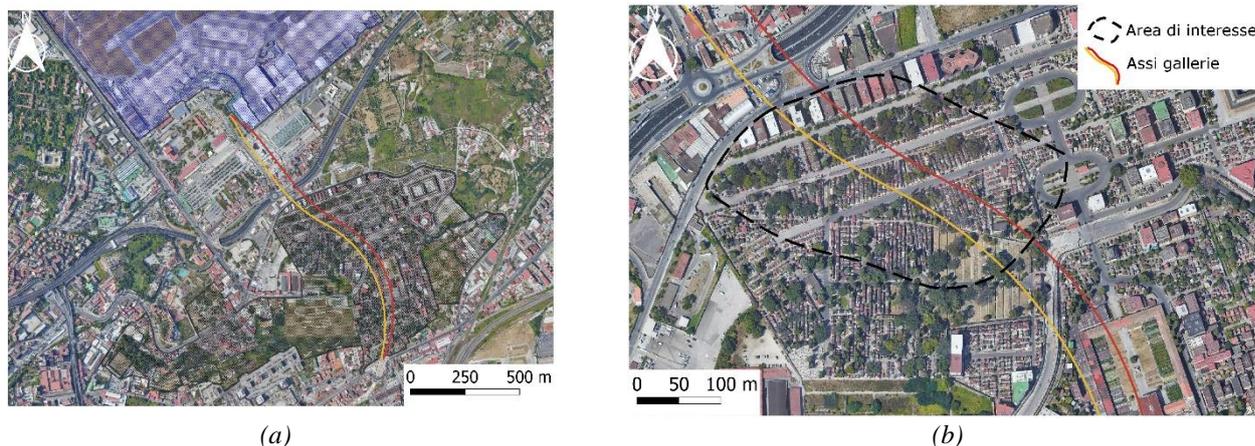


Figura 1: (a) Tracciato delle gallerie (modificato dopo Di Pace et al., 2021): in rosso la prima galleria scavata, in giallo la seconda. In blu l'aeroporto di Capodichino, in nero il cimitero di Poggioreale; (b) ingrandimento sul cimitero di Poggioreale. La linea tratteggiata nera evidenzia l'area di interesse per il caso studio. Mappe prese da Google Earth.

Due gallerie, poste a sud-ovest dell'aeroporto di Capodichino, collegano quest'ultimo con la Stazione di Poggioreale, per una lunghezza complessiva di circa 1.000 m. Entrambi gli scavi sono stati eseguiti utilizzando una TBM (Tunnel Boring Machine) con una testa fresante di 7 m in diametro. Le operazioni di scavo sono avvenute principalmente in uno strato di roccia tenera (ignimbrite campana) ricoperto da depositi sabbiosi e limosi. Lo scavo della prima galleria è iniziato dal pozzo di Capodichino (40 m sotto il livello del piano campagna) nel luglio 2020 ed è terminato alla stazione di Poggioreale (10 m sotto il livello del piano campagna) nel marzo 2021. La TBM è stata quindi smontata e riportata a Capodichino per essere successivamente utilizzata per lo scavo della seconda galleria (Di Pace et al., 2021).

I dati di monitoraggio, ottenuti dall'analisi MT-InSAR, possono essere influenzati dalla presenza di edifici esistenti a causa dell'interazione terreno-sovrastuttura. Le previsioni empiriche, di contro, si basano sull'ipotesi di condizioni di campo libero (i.e. senza considerare l'interazione terreno-sovrastuttura). Pertanto un confronto diretto tra i dati monitorati e la previsione empirica sarebbe errato. Per tale ragione, questo contributo si sofferma sull'area settentrionale del Cimitero di Poggioreale (Area di interesse di Figura 1(b)), dove sono presenti solo piccole cappelle sepolcrali e loculi. La piccola dimensione di queste strutture permette di trascurare l'interazione terreno-sovrastuttura e di continuare ad utilizzare l'ipotesi di campo libero prevista nelle previsioni empiriche.

L'elaborazione interferometrica, che coinvolge 237 immagini in banda X della costellazione COSMO-SkyMed in geometria ascendente, è stata effettuata utilizzando il software SARPROZ. Il set di dati selezionato copre il periodo di osservazione dal 7 marzo 2018 al 29 gennaio 2022. Questo periodo di tempo corrisponde allo scavo di entrambe le gallerie.

3. METODOLOGIA

3.1 Analisi interferometrica MT-InSAR per la valutazione dei cedimenti

L'analisi MT-InSAR consente di misurare gli spostamenti del suolo o delle strutture con accuratezza millimetrica lungo la direzione della linea di vista del satellite. Si basa sullo sfruttamento di bersagli coerenti, caratterizzati da un'elevata stabilità del segnale radar retrodiffuso. Gli step per l'analisi dei dati, effettuata con il software SARPROZ (Perissin et al., 2011), sono brevemente descritti come segue:

- 1) importazione dati Single Look Complex (SLC);
- 2) selezione dell'immagine di riferimento (immagine master) e allineamento delle rimanenti immagini;
- 3) selezione dei target attraverso la valutazione dell'ampiezza e stabilità del segnale radiometrico;
- 4) importazione del modello di elevazione digitale (DEM) nel sistema di coordinate satellitari;
- 5) calcolo degli interferogrammi e rimozione di artefatti atmosferici dal segnale radar;
- 6) analisi delle serie temporali dei target selezionati. Stima della velocità lineare (mm/anno) per ogni target.

Per ciascun target le serie temporali sono state interpolate utilizzando quattro regressioni lineari:

- I. dal 7 marzo 2018 al 2 luglio 2020 (dall'inizio dell'analisi a fino all'inizio del primo scavo);
- II. dal 2 luglio 2020 al 23 marzo 2021 (dall'inizio alla fine del primo scavo);

III. dal 23 marzo 2021 al 7 settembre 2021 (dalla fine del primo scavo all'inizio del secondo scavo).

IV. dal 7 settembre 2021 al 29 gennaio 2022 (dall'inizio del secondo scavo alla fine dell'analisi).

Non conoscendo a priori la direzione dello spostamento vero, gli spostamenti monitorati lungo la linea di vista del satellite, d_{LOS} , possono essere proiettati in direzione verticale per ottenere lo spostamento verticale w , utilizzando la seguente equazione:

$$w = \frac{d_{LOS}}{\cos \vartheta} \quad (1)$$

dove ϑ è l'angolo formato dalla linea di vista del satellite con la verticale (è un metadato delle immagini satellitari).

3.1 Metodo empirico per la valutazione dei cedimenti

I cedimenti indotti da uno scavo di galleria, in condizioni di campo libero, possono essere previsti utilizzando metodi empirici come quello proposto da Peck (1969). Assumendo una forma gaussiana il profilo dei cedimenti su una sezione ortogonale all'asse di scavo è descritto dalla seguente equazione:

$$w(x) = 0.31 \cdot \frac{V_L \cdot D^2}{K \cdot z_0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2 \cdot K^2 \cdot z_0^2}} \quad (2)$$

dove V_L è la perdita di volume e rappresenta una frazione del volume scavato per unità di lunghezza di avanzamento, z_0 è la profondità dell'asse della galleria, D è il diametro scavato e K è un parametro funzione del tipo di terreno. Per gli scavi eseguiti con Tunnel Boring Machine (TBM) i valori tipici di perdita di volume sono compresi tra 0.5÷1%, mentre K varia da 0.25 a 0.45 per terreni ghiaiosi o sabbiosi (Mair e Taylor, 1999).

4. RISULTATI

In Figura 3(a) è mostrata la mappa della velocità di spostamento (mm/anno) nell'area di interesse, ottenuta dall'elaborazione dei dati dal 7 marzo 2018 al 29 gennaio 2022. Si noti la concentrazione di target giallo/rossi (i.e. subsidenza) in prossimità di entrambe le gallerie, mentre quasi nessun movimento si è verificato lontano da esse.

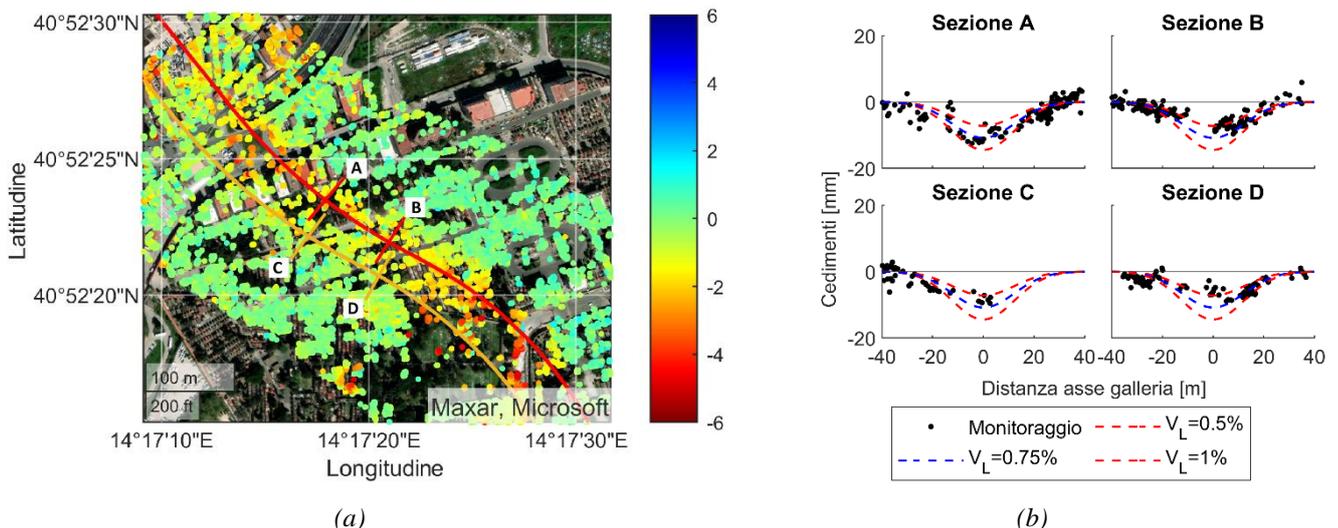


Figura 3: (a) mappa delle velocità di spostamento (mm/anno) nell'area di interesse. Si noti che questi sono spostamenti lungo la linea di vista del satellite; (b) spostamenti monitorati proiettati in direzione verticale vs previsione empirica. Le sezioni A e B appartengono alla prima galleria scavata (linea rossa), mentre le sezioni C e D appartengono alla seconda (linea gialla).

Per ogni target presente in Figura 3(a), la sua serie temporale è interpolata con la regressione lineare multipla descritta nella Sezione 3.1. Gli spostamenti vengono quindi convertiti in cedimenti verticali da confrontare con le previsioni empiriche. Per il primo scavo, i cedimenti relativi si ottengono sottraendo i cedimenti ante scavo da

quelli ottenuti al termine dello stesso. Per il secondo scavo i cedimenti relativi si ottengono sottraendo i cedimenti al termine del primo scavo da quelli ottenuti al termine del secondo scavo.

Si scelgono, infine, due sezioni ricadenti nell'area di interesse della prima galleria e due sezioni della seconda. Sulle sezioni vengono proiettati i target non più lontani di 10 metri da ciascuna di esse. Per la previsione empirica viene mantenuto costante il valore di K , pari a 0.35, mentre vengono scelti tre diversi valori di perdita di volume, che sono $V_L=0.5\%$, 0.75% e 1% . Per la profondità dell'asse della galleria z_0 viene scelto un valore costante di 35 m per tutte e quattro le sezioni. Un confronto tra i dati monitorati e la previsione empirica è mostrato nella Figura 3(b). Da quest'ultima figura si può notare come i dati monitorati seguono il tipico profilo gaussiano, inoltre l'entità dei cedimenti sembra essere in buon accordo con la previsione empirica.

5 CONCLUSIONI

MT-InSAR è una tecnica di monitoraggio oggi utilizzata per diverse applicazioni, tra cui recentemente il monitoraggio delle attività scavo di gallerie. Un dataset di 237 immagini radar, acquisite in direzione ascendente dalla costellazione di satelliti COSMO-SkyMed, è stato analizzato con il software SARPROZ. Da questa analisi è stato possibile indagare la conca di subsidenza indotta dallo scavo di due gallerie nella città di Napoli. Nell'ipotesi di spostamenti verticali, i dati monitorati sono stati confrontati con le previsioni empiriche. I risultati hanno mostrato chiaramente la capacità di questa tecnica nel rilevare la forma e l'entità dei cedimenti indotti da entrambi gli scavi.

Gli autori sono grati per la collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, le società EO59 e RASER Limited che hanno fornito la licenza per il software SARPROZ. Gli autori inoltre ringraziano il Professore Daniele Perissin e il dott. Alfredo Rocca per il supporto. Prodotto originale COSMO-SkyMed ASI Agenzia Spaziale Italiana (2016–2021).

5. BIBLIOGRAFIA

- Di Pace, M., Cocchi, R., De Guglielmo, M.L. (2021). Scavo Meccanizzato: TBM a spasso per Napoli. *Le Strade*, (6): 82-87.
- Eskesen, S. D., Tengborg, P., Kampmann, J., Veicherts, T.H. (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No.2. *Tunneling and Underground Space Technology*, 19(3): 217-237.
- Giardina, G., Milillo, P., DeJong, M.J., Perissin D. e Milillo G. (2019). Evaluation of InSAR monitoring data for post-tunnelling settlement damage assessment. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(2)
- Lu, Z., Mann, D., Freymueller, J.T., Meyer, D.J. (2000). Synthetic Aperture Radar interferometry of Okmok volcano, Alaska: Radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 105(B5): 10791-10806.
- Mair, R. J., Taylor, R. N. (1999). Bored tunnelling in the urban environment. In *14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering vol. 4, Hamburg, Germany*.
- Milillo, P., Giardina, G., DeJong, M. J., Perissin, D., Milillo, G. (2018). Multi-temporal InSAR structural damage assessment: The London crossrail case study. *Remote Sensing*, 10(2): 287.
- Moretto, S., Bozzano, F., Esposito, C., Mazzanti, P., Rocca, A. (2017). Assessment of landslide pre-failure monitoring and forecasting using satellite SAR interferometry. *Geosciences*, 7(2), 36.
- Peck, R. B., 1969. *Deep excavations and tunneling in soft ground*. 225-290.
- Perissin, D., Wang, Z., Lin, H. (2021). Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73: 58-67.
- Perissin, D., Wang, Z., Wang, T. (2011). The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. *Proc. of the ISRSE vol. 1015, Sidney, Australia*.
- Rankin, W. J. (1988). Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. *Engineering Geology Special Publications*, 5(1): 79-92.
- Richter, N., Froger, J. L. (2020). The role of Interferometric Synthetic Aperture Radar in detecting, mapping, monitoring, and modelling the volcanic activity of Piton de la Fournaise, La Réunion: A review. *Remote Sensing*, 12(6): 1019.
- Ryder, I., Parsons, B., Wright, T. J., Funning, G. J. (2007). Post-seismic motion following the 1997 Manyi (Tibet) earthquake: InSAR observations and modelling. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1009-1027.
- Tomàs, R., Romeo, R., Mulas, J., Marturià, J. J., Mallorquí, J.J., Lopez-Sanchez, J.M., Herrera, G., Gutiérrez, F., González, P.J., Fernández, J., Duque, S. Concha-Dimas, A., Cocksley, G., Castañeda, C., Carrasco D., Blanco P. (2014). Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain. *Environmental Earth Sciences*, 71(1): 163-181.