

## MONITORAGGIO SATELLITARE OTTICO E RADAR DEL CAMPO DI GHIACCIO PATAGONICO SUD

Università degli Studi di Firenze (Dipartimento di Scienze della Terra)

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Geologiche (LM-74)

A.A. 2021-2022

Relatore: Federico Raspini

Correlatore: Oriol Monserrat

### INTRODUZIONE

I ghiacciai sono una risorsa naturale importante a livello globale e uno dei principali indicatori del cambiamento climatico sia a scala globale sia a scala regionale e locale. Tra i distinti parametri che caratterizzano i ghiacciai la velocità di spostamento della superficie glaciale è un elemento fondamentale poiché strettamente connesso ai cambiamenti dei ghiacciai stessi e alla base della stima di fattori rilevanti nella dinamica del sistema glaciale, quali: stabilità dei ghiacciai, erosione, bilancio di massa e bilancio idrologico (*mass balance* e *hydro-balance*).

Lo scopo delle attività condotte all'interno del presente elaborato di tesi è stato quello di caratterizzare spazialmente e temporalmente il quadro deformativo indotto dalla dinamica dei ghiacciai, a diverse scale di analisi, attraverso metodi e approcci basati sul telerilevamento (*remote sensing*). Tale attività, condotta in collaborazione con il personale del CTTC (*Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya*), ha esaminato come area di studio l'intera superficie del Campo di ghiaccio Patagonico Sud (SPI), situato nella regione della Patagonia tra Cile e Argentina, lungo la Cordigliera delle Ande meridionali. Si tratta della terza massa di ghiaccio continentale più estesa al mondo con una superficie totale di circa 13.000 km<sup>2</sup> (Aniya et al., 1996) è formato da un insieme complesso di 48 ghiacciai principali, oltre a un centinaio di ghiacciai minori. Come materiali telerilevati utili all'indagine sono state adottate le immagini satellitari di natura ottica e radar, rispettivamente acquisite da sensori passivi, le prime, e da sensori attivi, le seconde. Tali immagini sono il frutto dell'acquisizione da parte dei sistemi satellitari delle missioni Sentinel-1 e Sentinel-2 del progetto Copernicus ESA.

Le tecniche di telerilevamento si propongono come una valida alternativa all'indagine *in-situ*, in quanto forniscono informazioni sinottiche, sempre aggiornate e fruibili a scala globale. Gli approcci impiegati per calcolare i valori di velocità dei ghiacciai sono stati l'*Image Correlation* e l'*Offset-Tracking*, sfruttando i seguenti programmi per l'elaborazione delle immagini satellitari: SNAP ed ENVI (COSI\_Corr) (Leprince et al., 2007). Il risultato finale di questo elaborato si è tradotto difatti nella mappatura delle velocità dei flussi di ghiaccio, espressi in metri al giorno, relative a uno specifico periodo dell'anno. Sono state stimate le deformazioni superficiali glaciali dell'intero SPI relative alla stagione tardo estiva – inizio autunnale, dell'anno 2021; mentre a scala di dettaglio, considerando i due ghiacciai Viedma e Tyndall, sono state analizzate le variazioni stagionali di velocità superficiali tra il 2021 e il 2022.

I risultati sono stati analizzati e discussi, mettendo in evidenza limiti e vantaggi delle due differenti tecniche di elaborazione. Infine, non disponendo di dati misurati a terra, i risultati ottenuti sono stati validati tramite le informazioni messe a disposizione dal CTTC, che da anni opera nel campo del monitoraggio da remoto delle zone coperte da ghiacciai in America meridionale. L'analisi effettuata nel seguente studio testimonia, naturalmente nei limiti specifici ed intrinseci delle tecniche di telerilevamento, la fattibilità e l'utilità di un monitoraggio sistematico e regolare da remoto tramite l'uso di dati satellitari di natura ottica e *radar* per la stima delle velocità di flusso glaciale di un sistema geomorfologico complesso ed esteso quale il Campo di ghiaccio Patagonico Sud.

### MATERIALI E METODOLOGIA

I dati di partenza per questo studio sono immagini satellitari, come detto *radar* e ottiche, rese disponibili grazie alle acquisizioni dei satelliti lanciati dalle missioni Sentinel-1 e Sentinel-2 del progetto Copernicus della Commissione Europea.

In particolare, sono sfruttati i prodotti GRD (*Ground Range Detected*) delle immagini Sentinel-1 SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e i prodotti MSI (*Multi Spectral Instrument*) delle immagini Sentinel-2. Sono stati sfruttati come portali di accesso *opensource* e gratuiti per la ricerca, selezione e scaricamento dei materiali telerilevati: *ASF Data Search* (ASF – Data Search Vertex, 2022) per le immagini S-1 SAR e *SciHub Copernicus* (Copernicus Open Access Hub, 2022).

Le immagini satellitari sono state acquisite ed elaborate tramite due diversi *software* di elaborazione: SNAP per quanto riguarda le immagini Sentinel-1 (ESA, 2023) e ENVI (in particolare una sua estensione chiamata COSI\_Corr) per quanto riguarda le immagini Sentinel-2. Duplice è anche stata la metodologia di indagine adottata per stimare le velocità dei ghiacciai: la prima tecnica, applicata alle informazioni di ampiezza contenuta nelle immagini radar è quella denominata *Offset-Tracking*, la seconda, ovvero l'*Image Correlation* opera invece sulle immagini ottiche, fornendo informazioni di spostamento planimetriche, ovvero nelle direzioni est-ovest e nord-sud.

Inizialmente per la stima delle velocità superficiali delle masse glaciali è stata impiegata la tecnica dell'interferometria differenziale SAR (DInSAR), sfruttando l'informazione di fase delle immagini S-1 SLC, la quale per i limiti intrinseci di tale metodologia non ha riportato risultati sufficienti e completi per mappare l'area di studio.

Su COSI\_Corr è stata adoperata come finestra di scena per le correlazioni fra immagini la window size più comunemente utilizzata e raccomandata in letteratura (Yang et al., 2019). Entrambi i metodi consentono di misurare i valori di deformazione superficiale delle masse di ghiaccio. Tali deformazioni sono riferite a specifici intervalli temporali che coincidono con le acquisizioni dei dati satellitari usati. Per l'intera mappatura sono state sfruttate un totale di 24 immagini Sentinel-1 (12 coppie) e 16 immagini Sentinel-2 (8 coppie). Particolare attenzione è stata posta nella scelta delle immagini satellitari, in particolare per le immagini ottiche S-2, le quali per le intrinseche caratteristiche di acquisizione sono soggette al rumore atmosferico. Nell'elaborazione delle mappe di spostamento computerizzate da entrambi i programmi sono state escluse quelle con notevole decorrelazione. Inoltre, si ricorda che le correlazioni svolte per l'analisi temporale a piccola scala, tra 2021 e 2022, dei ghiacciai Viedma e Tyndall, sono state eseguite a massima risoluzione.

## RISULTATI E DISCUSSIONI

I risultati ottenuti sono stati analizzati congiuntamente, sia a scala sinottica su tutta l'estensione del Campo di ghiaccio Patagonico Sud nella stagione tardo-estiva del 2021, sia a scala locale per gli anni 2021-2022 su due specifici ghiacciai: Viedma e Tyndall, presenti sul versante orientale del SPI. Così facendo è possibile analizzare le variazioni di velocità delle due masse glaciali nel corso del tempo, considerando in totale 8 stagioni australi (Grafici 1-4), partendo quindi dall'estate 2021.

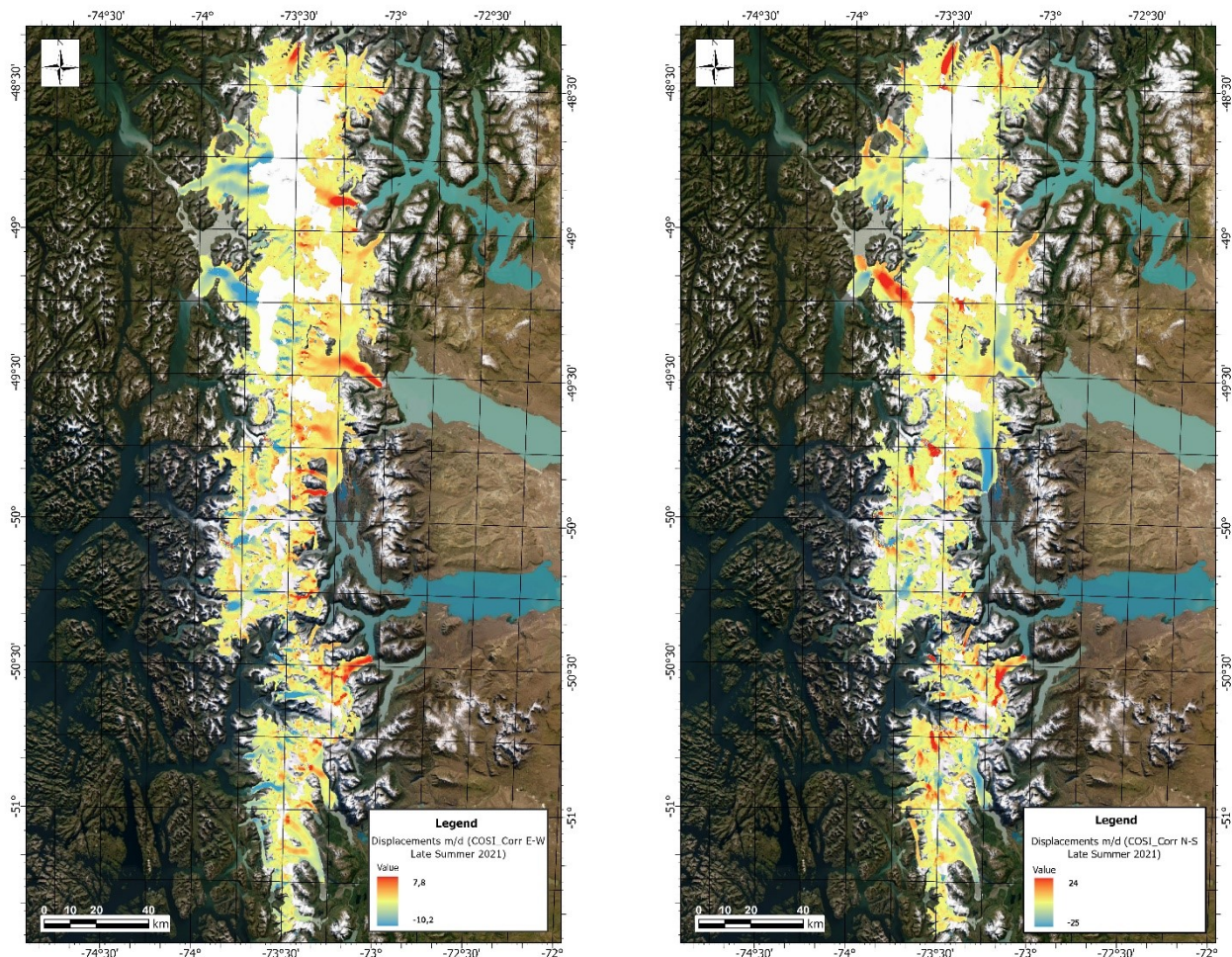
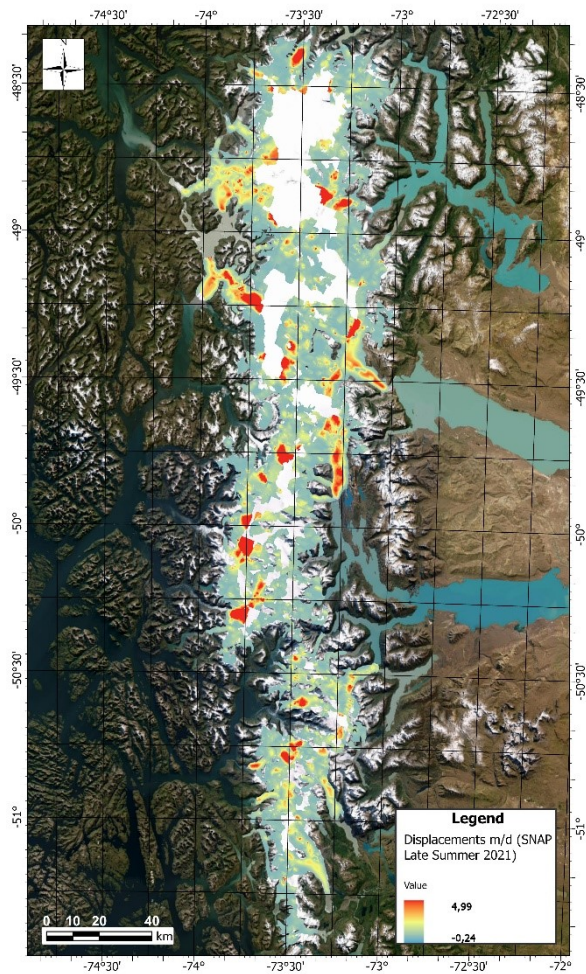


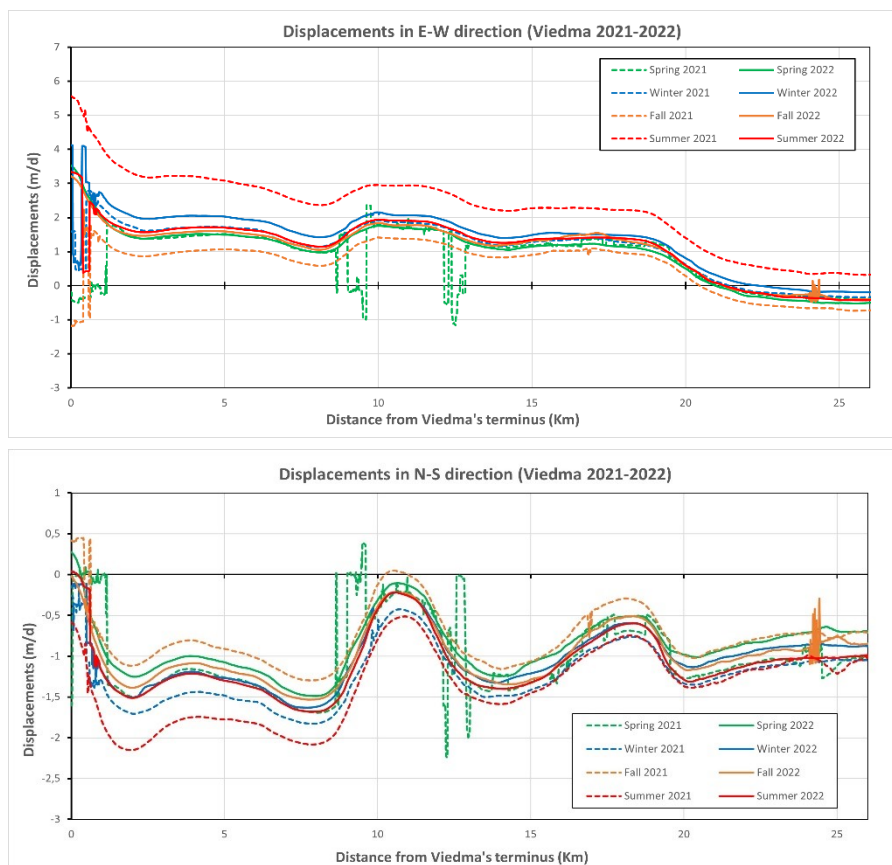
Figure 1 e 2: Mappe delle velocità dei ghiacciai del SPI espresse in metri al giorno (ArcGIS Pro). Valori ottenuti attraverso Image Correlation (COSI\_Corr) da immagini ottiche Sentinel-2 riferite alla stagione tardo estiva dell'anno 2021. Spostamenti rappresentati da rosso e blu rispettivamente per la direzione est/nord ed ovest/sud.



I valori computerizzati da COSI\_Corr (Figura 1 e 2) e SNAP (Figura 3) relativi alle velocità dei ghiacciai di sbocco (*outlet glaciers*) e di montagna (vallivi e di circo) variano da 1-3 m/giorno fino a 5-7 m/giorno nei casi più estremi. I cambi nella morfologia sottostante i ghiacciai, la latitudine, gli intervalli di tempo considerati, la presenza di neve e ghiaccio al suolo sono fra i fattori principali che influenza la magnitudo di spostamento delle masse glaciali. Vi sono certamente valori anomali (*outliers*) elaborati dai programmi impiegati che possono inquinare l'analisi dei risultati. Questi valori sono dovuti al rumore strumentale e alla decorrelazione nell'applicazione delle tecniche.

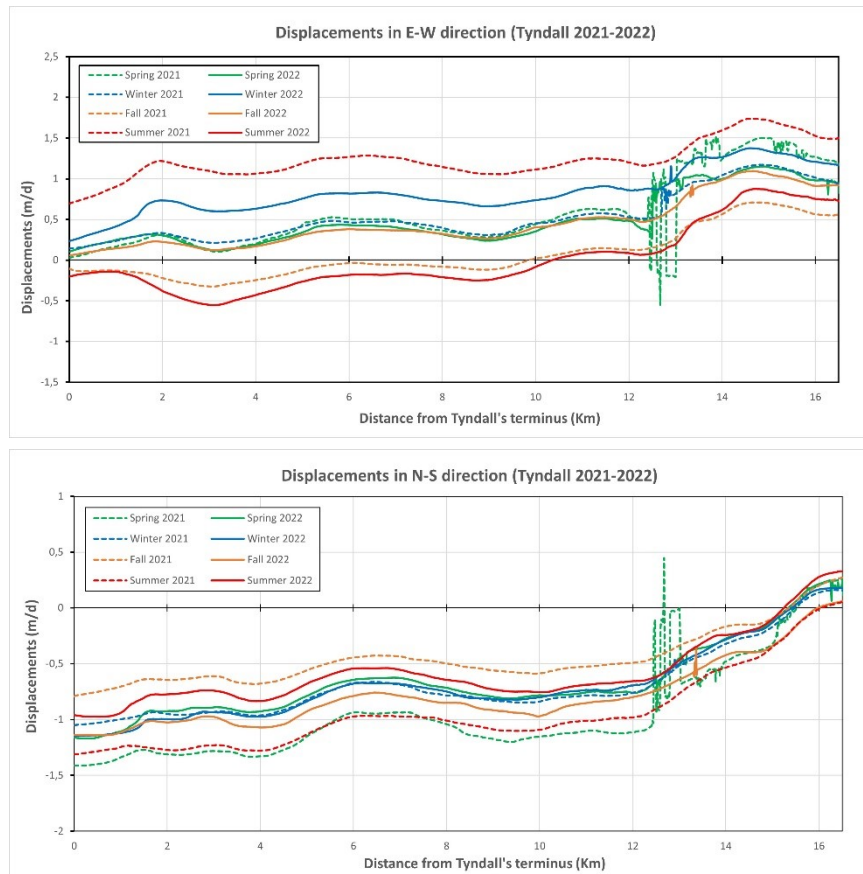
Dai relativi grafici ottenuti, le velocità dei ghiacciai Viedma e Tyndall nei due anni considerati non variano in modo considerevole fra le stagioni e si attestano rispettivamente sui 1,5-3 m/giorno e su 0,5-1,5 m/giorno; la distanza fra i due ghiacciai è di circa 240 km e nell'entità di spostamento il Tyndall, più a sud, risente dalla distinta latitudine.

Figura 3: Mappa delle velocità dei ghiacciai del SPI, espresse in metri al giorno, ottenute tramite Offset Tracking (SNAP) da immagini radar Sentinel-1 riferite alla stagione tardo estiva dell'anno 2021.



Grafici 1 e 2: Spostamenti in metri al giorno relativi al ghiacciaio Viedma in direzione est-ovest e nord-sud tra 2021-2022.

Grafici 3 e 4: Spostamenti in metri al giorno relativi al ghiacciaio Tyndall in direzione est-ovest e nord-sud tra 2021-2022.



## CONCLUSIONI

In conclusione, le tecniche di telerilevamento impiegate hanno portato alla realizzazione di mappe di velocità espressa in metri al giorno dello spostamento dei ghiacciai dell'intera area di studio (SPI). Le velocità di spostamento delle superfici glaciali stimate rispetto alla stagione tardo estiva dell'anno 2021 variano generalmente da 2-3 m a 5-6 m al giorno. Si sottolinea ulteriormente come l'*Offset-Tracking* su SNAP abbia calcolato valori di deformazione superficiale generalmente inferiori a quelli stimati dall'*Image Correlation* su COSI\_Corr. La scelta delle immagini ottiche Sentinel-2 adatte alle elaborazioni da effettuare è risultata più complessa di quella delle immagini *radar* Sentinel-1 per la naturale caratteristica intrinseca di acquisizione satellitare. La notevole disponibilità e fruibilità delle immagini Sentinel ha garantito lo studio delle variazioni di velocità nel corso del tempo a scala locale per i ghiacciai Viedma e Tyndall. Infine, relazionato all'ultima analisi menzionata a scala di dettaglio, è stata osservata una limitata variabilità stagionale nelle velocità dei ghiacciai tra 2021 e 2022.

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

ANIYA M. et al. (1996). The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 62: 1361-1369.

ASF – Data Search Vertex (2022). Link: <https://search.asf.alaska.edu>

Copernicus Open Access Hub (2022). Link: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

ESA (2023). The European Space Agency. SNAP. (Visualizzato in data: 14/03/2023).

Link: <https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>.

LEPRINCE S. et al. (2007). "Automatic and Precise Ortho-rectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 6, pp 1529-1558, 2007.

YANG W. et al. (2019). Retrospective deformation of the Baige landslide using optical remote sensing images. *Landslides* (2020) 17:659–668. Published online: Springer-Verlag GmbH Germany part of Springer Nature 2019. Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University.