



Fronte del Ghiacciaio di Lares nel Parco Naturale Adamello Brenta.
Gruppo Adamello Presanella - 2022 - ph Cristian Ferrari

I ghiacciai visti dallo spazio

Sviluppi e prospettive dell'approccio integrato della Commissione Glaciologica della SAT tra telerilevamento e rilievi sul campo

Massimo Santoni⁽¹⁾, Francesca Vallongo⁽¹⁾, Cristian Ferrari⁽¹⁾

1. Commissione Glaciologica SAT

Riassunto

L'articolo presenta l'approccio innovativo e integrato sviluppato dalla Commissione Glaciologica della SAT (Società degli Alpinisti Tridentini) per il monitoraggio dei ghiacciai trentini, che affianca ai tradizionali rilievi sul campo l'impiego sinergico di diverse tecnologie di telerilevamento. A fronte dell'arretramento e della crescente inaccessibilità delle aree glaciali, i dati satellitari consentono un'osservazione quantitativa continua su vasta scala. Lo studio illustra l'utilizzo dei dati ottici multispettrali (Sentinel-2) per la mappatura bidimensionale e l'aggiornamento del catasto glaciale, superando le sfide legate alla copertura nuvolosa e nevosa tramite tecniche di telerilevamento. Per ovviare ai limiti dei sensori ottici, in particolare sui ghiacciai coperti da detrito, viene esplorato l'uso dei dati RADAR ad apertura sintetica (Sentinel-1): l'analisi della coerenza interferometrica si rivela infatti uno strumento chiave per quantificare la stabilità delle superfici e identificare le porzioni di ghiaccio ormai estinte. Infine, l'articolo esplora l'analisi della "terza dimensione" (le variazioni di spessore) mediante l'impiego di laser altimetri satellitari LiDAR (come ICESat-2 e GEDI). In conclusione, lo studio evidenzia come l'imprescindibile sinergia tra la visione globale offerta dallo spazio e il fondamentale lavoro di misurazione sul terreno sia essenziale per comprendere e monitorare la complessa evoluzione della criosfera alpina.

Abstract: Glaciers seen from space

This article presents the innovative and integrated approach developed by the SAT (Società degli Alpinisti Tridentini) Glaciological Commission for monitoring the glaciers in the Trentino region, which combines traditional field surveys with the synergistic use of various remote sensing technologies. In the context of glacier retreat and the increasing inaccessibility of glacial environments, satellite data provides continuous, large-scale quantitative observations. The study outlines the application of multispectral optical data (Sentinel-2) for two-dimensional mapping and updating the glacier inventory, overcoming the challenges posed by cloud and snow cover through remote sensing techniques. To address the limitations of optical sensors, particularly on debris-covered glaciers, the use of Synthetic Aperture Radar (SAR) data (Sentinel-1) is explored: the analysis of interferometric coherence proves to be a key tool for quantifying surface stability and identifying extinct ice portions. Finally, the article delves into the "third dimension" (thickness variations) by employing satellite LiDAR altimeters (such as ICESat-2 and GEDI). In conclusion, the study emphasizes that the indispensable synergy between the global view provided from space and the fundamental on-ground measurements is essential for understanding and monitoring the complex evolution of the Alpine cryosphere.

Introduzione

Nello studio dei ghiacciai i dati telerilevati sono oggi uno strumento con grandi potenzialità per mappare le aree glaciali e i loro cambiamenti. Mediante l'uso di piattaforme di acquisizione satellitari, aeree e ora anche mediante droni è possibile ottenere dati su vaste aree, limitando o eliminando la necessità di recarsi direttamente sul terreno. Infatti, sempre più spesso, a causa dell'arretramento delle fronti, l'accesso a molti ghiacciai è divenuto lungo, impervio e in alcuni casi proibitivo.

A partire già dalla fine del XIX secolo la fotografia e la successiva rifotografia di porzioni di ghiacciai hanno consentito di ottenere una prima serie di dati utili per studiarne i cambiamenti nel tempo. L'informazione visiva raccolta dalla fotografia, in-

fatti, permette di interpretare la geometria della superficie glaciale e valutarne la variazione negli anni mostrando i cambiamenti subiti dal ghiacciaio. Questo approccio, benché estremamente efficace nel mostrare le variazioni in modo qualitativo spesso con confronti davvero d'impatto, applicare metodi quantitativi per quantificare le variazioni del ghiacciaio osservato risulta particolarmente complesso. Con la metà del XX secolo, lo sviluppo di sistemi di telerilevamento satellitare, ha consentito per la prima volta di osservare vaste aree della superficie terrestre con una regolarità fornendo quindi immagini e dati che possono essere analizzati in modo quantitativo. Si dovrà aspettare però il secondo decennio di questo XXI secolo per avere

sistemi in grado di fornire dati con una risoluzione spaziale sufficientemente elevata (dell'ordine di pochi metri per pixel) e una cadenza temporale sufficientemente frequente da poter esser utilizzati in modo efficace per monitorare in modo quantitativo i ghiacciai alpini.

Se da un lato i dati ottici rappresentano l'evoluzione naturale della fotografia tradizionale fornendo immagini interpretabili anche in modo visivo diretto, il panorama del telerilevamento moderno offre una vasta gamma di dati con caratteristiche peculiari e complementari. Oltre alla semplice componente spettrale o visibile, i sensori odierni sono in grado di esplorare differenti porzioni dello spettro elettromagnetico e di impiegare diverse geometrie e principi di acquisizione, permettendo di estrarre informazioni altrimenti invisibili all'occhio umano o ai normali sensori fotografici.

Oltre alle differenze legate alla geometria di osservazione e alla piattaforma di acquisizione utilizzata, che portano a diversi compromessi per quanto riguarda la risoluzione spaziale e il tempo necessario a osservare nuovamente una data area, i sensori utilizzati in questo ambito differiscono tra loro anche per la porzione di spettro elettromagnetico utilizzato (dagli UV e luce visibile fino alle onde radio) e per la natura stessa del funzionamento del sensore che può essere attivo o passivo. I sensori attivi, infatti, emettono un segnale e ne misurano la riflessione del terreno, mentre quelli passivi sfruttano una sorgente esterna, come per esempio il Sole, per illuminare la scena osservata. Analizzando i dati telerilevati più utili allo studio dei ghiacciai si possono quindi trovare:

- Dati ottici multispettrali: dalle semplici fotografie scattate da un drone fino a dati satellitari con bande distribuite nello spettro visibile e infrarosso (Figura 1 a-b). Permettono di osservare la superficie ed estensione del ghiaccio così come la presenza di neve o firn, allo stesso tempo necessitano dell'illuminazione solare; l'eventuale nuvolosità limita la visibilità della superficie. La risoluzione a terra va da pochi cm per pixel, nel caso dei droni, fino a 10-30m/px per i sistemi satellitari più diffusi.
- Dati RADAR (Radio Detection And Ranging) ad apertura sintetica (SAR Synthetic Aperture Radar): questi sistemi attivi emettono un impulso elettromagnetico nello spettro delle onde radio e ne misurano l'eco riflesso dal terreno (Figura 1 c). Grazie alla geometria a scansione laterale, con un'adeguata elaborazione, è possibile ottenere un'immagine della superficie. Essendo un sistema attivo e grazie alle frequenze utilizzate, non necessitano dell'illuminazione solare così come non risentono della copertura nuvolosa.
- Laser Scanner Aerei: anche in questo caso si tratta di sistemi attivi, operanti però nello spettro della luce visibile o del vicino infrarosso (detti LiDAR,

Light Detection And Ranging). Grazie al fatto che spesso questi sistemi sono operati da aereo o elicottero, riescono a generare un dato che rappresenta la struttura tridimensionale del terreno osservato con un ottimo dettaglio geometrico, riuscendo a ricostruire particolari di dimensioni di un metro o meno. Se da un lato sono tra i dati più dettagliati che possono essere utilizzati per descrivere i cambiamenti delle aree glaciali, per loro natura necessitano di acquisizioni dedicate, rendendoli quindi anche molto costosi e discontinui nel tempo. In questo ambito però va notato come i recenti sviluppi riguardo l'elaborazione fotogrammetrica di immagini acquisite da drone consenta di ottenere un dato abbastanza simile a quello LiDAR, permettendo quindi di effettuare una più semplice acquisizione di elementi di questo tipo.

- Altimetri LiDAR e RADAR: sebbene simili in natura ai laser scanner aerei, l'elevata distanza del sensore dal terreno e la grande velocità di movimento dovuta all'orbita portano a ottenere una densità delle misurazioni e una risoluzione spaziale di vari ordini di grandezza superiore. Per questi motivi, generalmente i dati vengono acquisiti lungo uno o più profili nella direzione di movimento, con l'obiettivo principale di studiare le grandi masse di ghiaccio polari e le variazioni di livello degli oceani. I più recenti altimetri LiDAR presentano però un'impronta a terra nell'ordine di 20 m, che quindi li rende interessanti anche nello studio dei ghiacciai alpini.

Di pari passo con lo sviluppo tecnologico dei sensori, sempre più dataset sono stati resi di libero accesso grazie a diversi programmi realizzati dalle principali agenzie spaziali. Programmi come Landsat e MODIS realizzati da NASA e, negli anni recenti, Copernicus della Commissione Europea ed ESA hanno reso disponibili grandi quantità di dati acquisiti in modo regolare sull'intera superficie globale. Questa disponibilità di informazioni, facilmente accessibili, porta quindi una nuova sfida tecnologica volta a sfruttare in modo sinergico e quanto più automatico possibile sempre più osservazioni disponibili al fine di estrarne informazioni sempre più dettagliate e affidabili. Nel caso di dati ottici, per esempio, la disponibilità di osservazioni multiple distribuite nel tempo permette di superare i limiti posti dalla copertura nuvolosa. Vi sono quindi grandi potenzialità per la realizzazione di sistemi automatici per l'analisi delle aree glaciali alpine volti a monitorarne lo stato e l'estensione, permettendo così di coadiuvare ed estendere le classiche misure effettuate in situ.

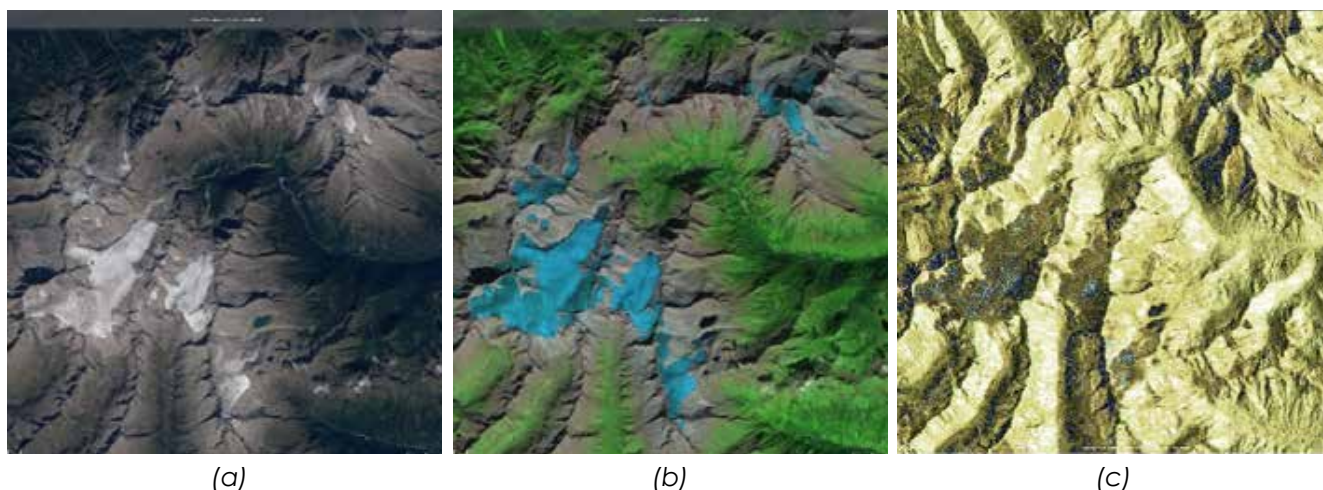


Figura 1 - Esempio di dati ottici multispettrali e SAR acquisiti dai satelliti Sentinel-2 e Sentinel-1 nel settembre 2023 sull'area del gruppo Adamello e Presanella. (a) Composizione in veri colori Sentinel-2; (b) composizione falso colore delle bande nell'infrarosso di Sentinel-2; (c) composizione in falsi colori del coefficiente di riflessione superficiale del dato RADAR Sentinel-1. Contiene dati Sentinel 2023 modificati, processati con EO Browser

Il monitoraggio dei ghiacciai del Trentino: l'approccio della Commissione Glaciologica della SAT

La Commissione Glaciologica della SAT a partire dal luglio 2021 ha quindi affiancato ai tradizionali metodi di osservazione dei ghiacciai trentini, condotti dai suoi operatori già da lungo tempo, il loro monitoraggio attraverso dati telerilevati.

L'obiettivo di questo approccio integrato tuttora in fase di sviluppo è quello di fornire un quadro completo e coerente dello stato e delle dinamiche dei ghiacciai trentini, fornendo dati che possano integrare il lavoro in situ e permettere di ottenere maggiori informazioni su aree più estese con una maggiore frequenza temporale. Proprio sulla frequenza temporale, il continuo sviluppo tecnologico in questo settore apre nuove prospettive per il monitoraggio glaciale, consentendo l'acquisizione

e l'analisi di lunghe serie temporali di dati che permettono di osservare i processi che caratterizzano un'intera stagione di ablazione, fornendo quindi un punto di vista diverso rispetto alle tradizionali misure in situ.

Tra i vari strumenti a disposizione grande attenzione è stata rivolta ai dati Sentinel-2, per la loro combinazione di risoluzione geometrica e temporale (Sez. 3); ai dati RADAR Sentinel-1, per la loro capacità di monitorare in modo indipendente dalle condizioni meteorologiche con elevata sensibilità a cambiamenti anche piccoli nel terreno (Sez. 4); e ai dati altimetrici LiDAR per la loro capacità di fornire informazioni tridimensionali sui ghiacciai (Sez 5).

Mappatura 2D delle Aree glaciali con Immagini Ottiche Sentinel-2

Il primo passo nello sviluppo della metodologia di monitoraggio ha riguardato la perimetrazione delle superfici glaciali, con l'obiettivo primario di fornire un aggiornamento del catasto dei ghiacciai trentini. Per questo fine, i dati ottici multispettrali forniti dalla missione Sentinel-2 si sono rivelati la scelta naturale e più idonea: la combinazione di una risoluzione spaziale di 10 metri e di un tempo di rivisita elevato consente infatti di avere a disposizione immagini in grado di delineare i corpi glaciali e di seguirne l'evoluzione nel corso della stagione ablativa.

Vengono utilizzate le immagini satellitari Sentinel-2 (Drusch *et al.* 2012) selezionate nel periodo tra il 10 agosto e il 1 ottobre di ogni anno al fine di ottenere dati con la minor copertura nevosa possibile. Le immagini impiegate sono generalmente acquisite a intervalli di 3-10 giorni, in funzione della zona

e della posizione relativa dell'orbita dei satelliti. Aspetto importante da sottolineare è che la presenza di copertura nuvolosa ha reso necessario l'impiego di tecniche innovative nel campo del remote sensing al fine di ottenere una mappatura il quanto più completa e affidabile.

L'attività effettuata fino a oggi in questo settore sui ghiacciai del Trentino, si è concretizzata in un primo lavoro (Vallongo *et al.*, 2023, Figura 2) e segue metodologicamente lo studio proposto da Paul *et al.*, (Paul *et al.*, 2020) che utilizza le immagini Sentinel-2 (S2) per realizzare un nuovo inventario dei ghiacciai alpini e documentarne il continuo ritiro. Come sottolineato in quest'ultimo studio, l'accelerazione della riduzione della superficie glaciale alpina in atto dagli anni Ottanta in poi, fa sì che la risoluzione spaziale di 10 metri che offrono le immagini S2, risulti particolarmente

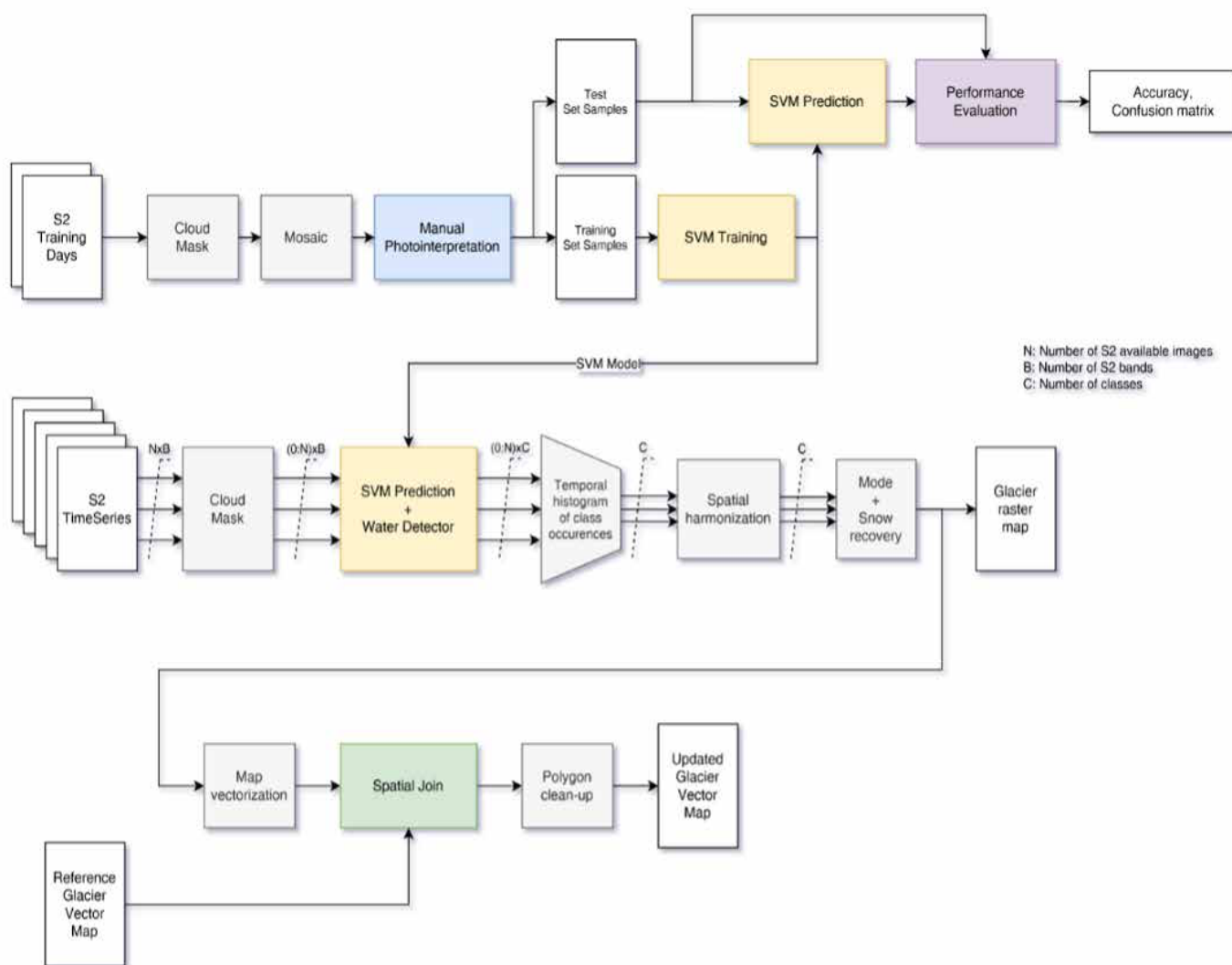


Figura 2 - Schema riassuntivo a blocchi della metodologia sviluppata per l'analisi delle immagini Sentinel-2

utile nella modellazione e nel monitoraggio. Per l'analisi dell'arretramento dei ghiacciai trentini tramite dati telerilevati satellitari sono state scelte, come dato principale, le immagini ottiche multi-spettrali acquisite da Sentinel-2 MSI (*MultiSpectral Instrument*). Questa missione, lanciata nel 2015 e composta da due satelliti gemelli, ha l'obiettivo di fornire un sistema di acquisizioni di immagini con un'alta risoluzione geometrica e alta frequenza temporale per supportare i vari programmi Copernicus attivi in ambito di monitoraggio del terreno, del clima, delle aree marine e in risposta a situazioni di emergenza meteorologica e ambientale. Nel dettaglio, Sentinel-2 MSI è uno scanner pushbroom (quindi costituito da un sensore lineare perpendicolare alla direzione di movimento che sfrutta proprio quest'ultima per costruire un'immagine) operante in orbita polare eliosincrona, che misura la radiazione riflessa dal pianeta in 13 bande spettrali dal VNIR (visibile - vicino infrarosso) al SWIR (infrarosso a onda corta). Il campionamento spaziale a terra di queste immagini è di 10 o 20 m/pixel in funzione delle bande utilizzate. Le immagini

prodotte vengono rese liberamente disponibili sul portale *Copernicus Data Space Ecosystem* e su vari sistemi di calcolo in cloud (es. *Google Earth Engine*, *Microsoft Planetary Compute*, *DIAS* ecc..). Per lo studio dei ghiacciai trentini sono stati utilizzati dati telerilevati e risorse di calcolo in cloud liberamente accessibili, in modo da accedere a una grande quantità di informazioni e allo stesso tempo avere accesso a un'infrastruttura adeguata in grado di gestirli. In particolare, l'elaborazione delle serie temporali di immagini Sentinel-2 è stata sviluppata in *Google Earth Engine*, mentre *Google Colab* è stato utilizzato nella parte di processing geospaziale. Anche il software che è stato utilizzato si basa in gran parte su progetti open source, il cui sviluppo negli ultimi anni ha raggiunto un ottimo livello.

Nel dettaglio, il metodo di analisi sviluppato utilizza un sistema di classificazione basato su tecniche di *machine learning*. Il classificatore viene preventivamente allenato con informazioni ottenute tramite fotointerpretazione e rilievi sul campo e permette di assegnare a ogni pixel di un'immagine satellitare una specifica classe (sei in tutto), indicatrice ciascuna

di ghiaccio, neve, firn, roccia, acqua e vegetazione. Al fine di massimizzare l'osservabilità dell'area glaciale rispetto alla copertura nevosa e nuvolosa, tale classificatore è stato applicato all'intera serie temporale di immagini multispettrali acquisite durante la stagione in analisi. In seguito, dopo aver opportunamente scartato i pixel con copertura nuvolosa, l'informazione portata dalle molte immagini acquisite nel corso della stagione viene

condensata scegliendo per ogni pixel la classe con il maggior numero di occorrenze. Un ulteriore algoritmo permette inoltre di recuperare utili informazioni anche dalle aree che per parte della stagione sono state coperte da neve.

I dati così ottenuti, dopo un opportuno filtraggio, vengono vettorializzati e automaticamente associati ai poligoni di riferimento dei catasti esistenti mediante tecniche di analisi geospaziale.

Aggiornamento del Catasto Glaciologico

Il metodo di classificazione illustrato ha permesso di ottenere i poligoni delle aree glaciali per ogni anno con sufficienti acquisizioni da parte dei satelliti Sentinel-2. Particolare attenzione è stata posta al 2023, anno che ha visto un forte arretramento delle fronti dovuto a un inverno poco nevoso, seguito da un'estate molto calda e altrettanto povera di precipitazioni. La ridotta copertura nuvolosa e la prematura fusione della neve ha consentito l'acquisizione di numerose immagini satellitari, fattore che, come illustrato precedentemente, è d'aiuto a ottenere risultati più attendibili. I poligoni dell'anno 2023 sono stati inoltre validati visivamente mediante fotointerpretazione e confronto con altri dati ottici ad alta risoluzione disponibili (in particolare l'ortofoto aerea acquisita dalla Provincia Autonoma di Trento nell'autunno 2022) integrando così le aree non osservabili da satellite, per esempio a causa della copertura detritica o

a particolari condizioni di illuminazione ed ombre. Questa revisione ha portato alla generazione di un dataset poligonale rilasciato dalla Commissione Glaciologica SAT come riferimento aggiornato delle aree glacializzate in Trentino (<https://doi.org/10.5281/zenodo.15306479>)

La catena di elaborazione automatica è stata inoltre applicata, nel periodo 2016-2023, a tutti gli anni (Figura 7). In particolari aree, i risultati ottenuti dalla parte automatica del metodo di analisi mostrano in modo evidente la riduzione di superficie dei ghiacciai osservata negli ultimi anni anche sul campo. Di seguito si riportano alcune tavole rappresentanti in maggior dettaglio i risultati ottenuti sulle principali aree glaciali (da Figura 3 a Figura 6). È possibile apprezzare come l'approccio proposto mostri in modo evidente la riduzione di area glaciale anche su una scala temporale ridotta, in quelle aree soggette a forte fusione.

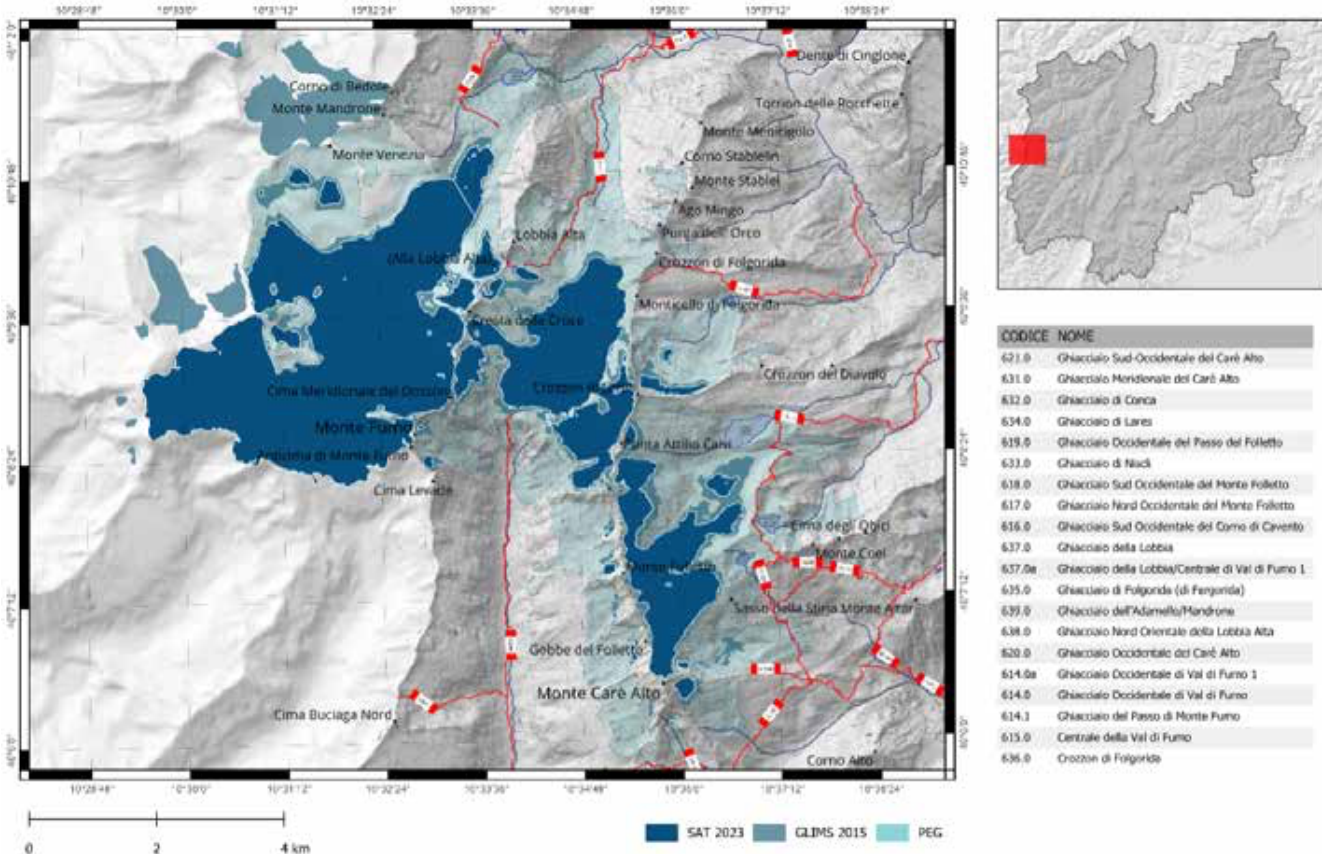


Figura 3 - Mappa dei ghiacciai del Trentino - Area Adamello Caré Alto

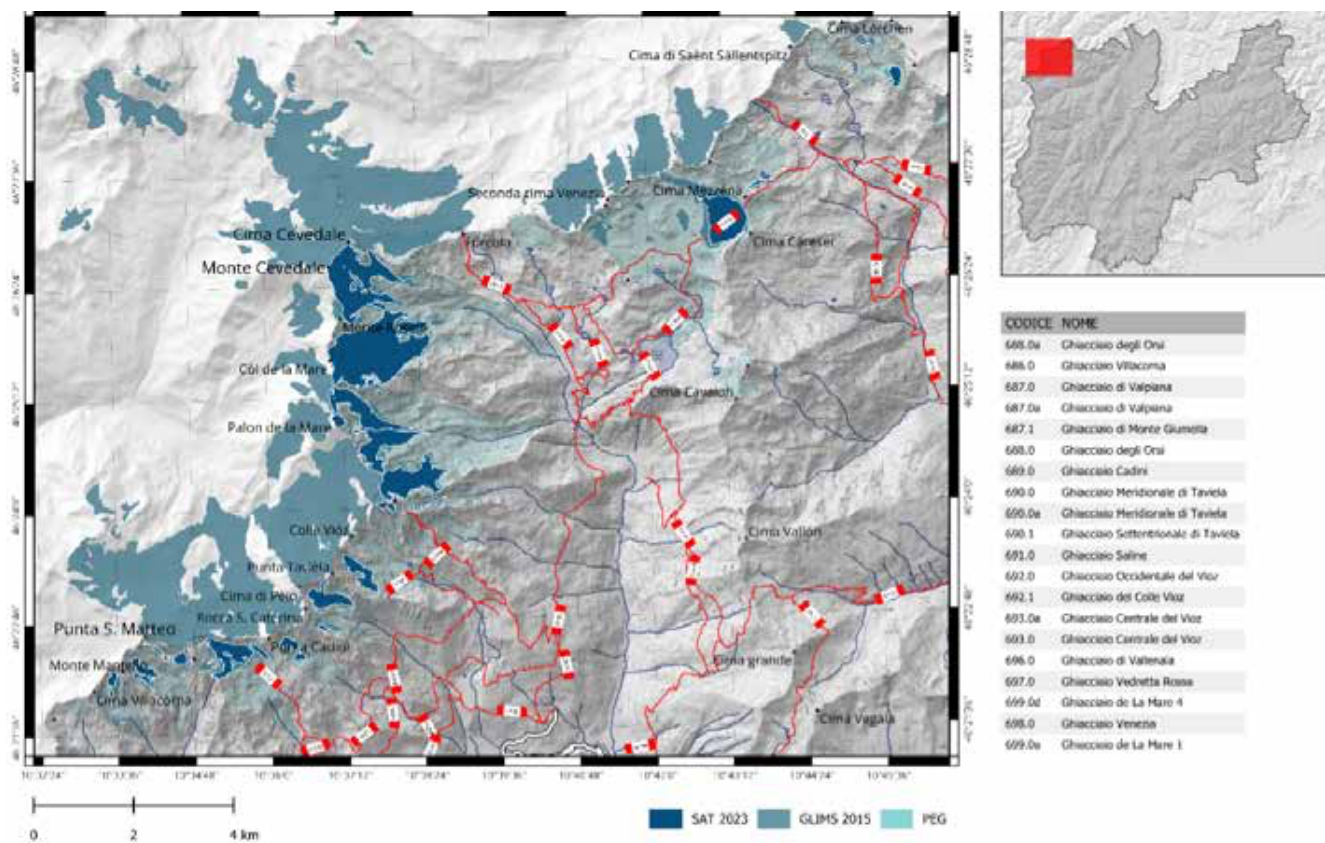


Figura 4 - Mappa dei ghiacciai del Trentino - Area Cevedale

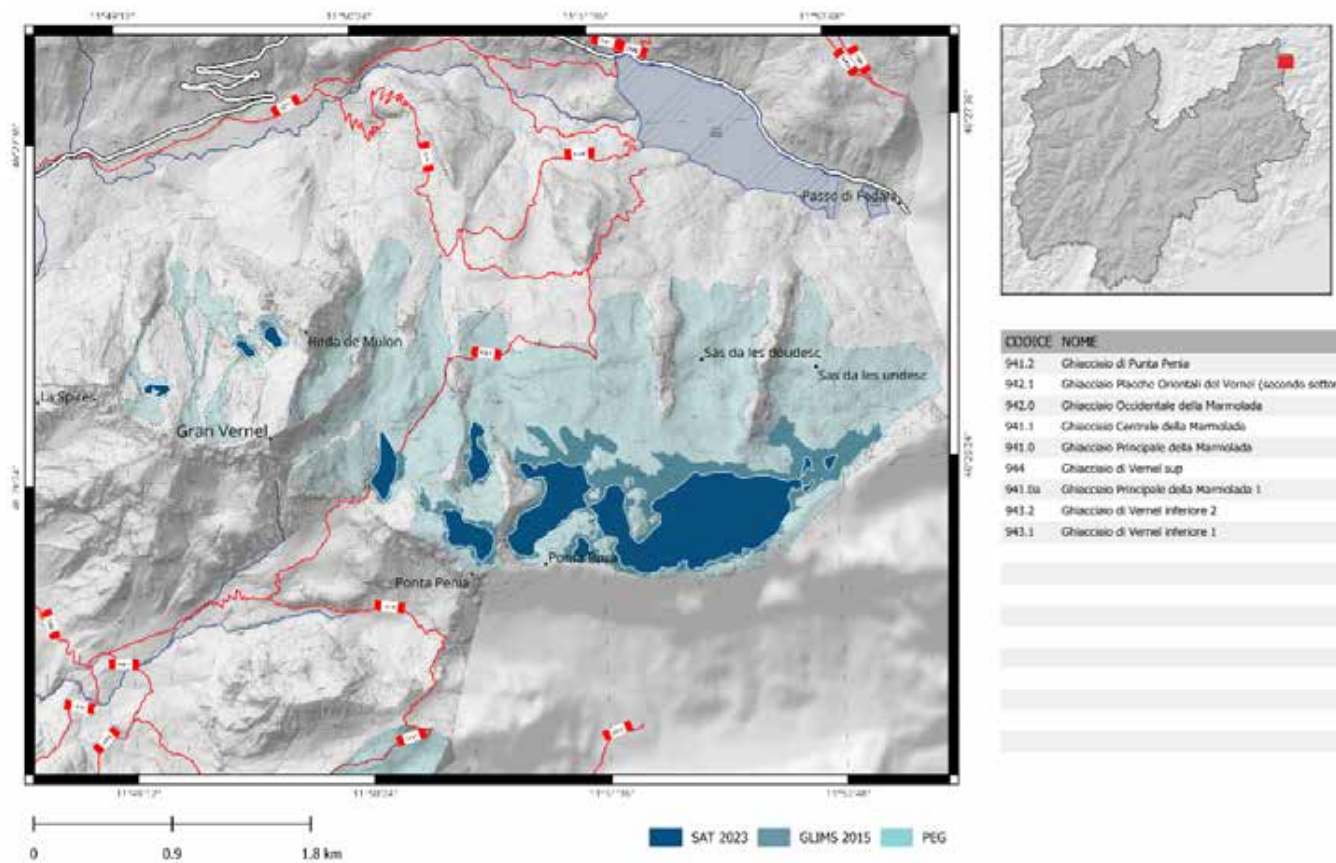


Figura 5 - Mappa dei ghiacciai del Trentino - Area Marmolada

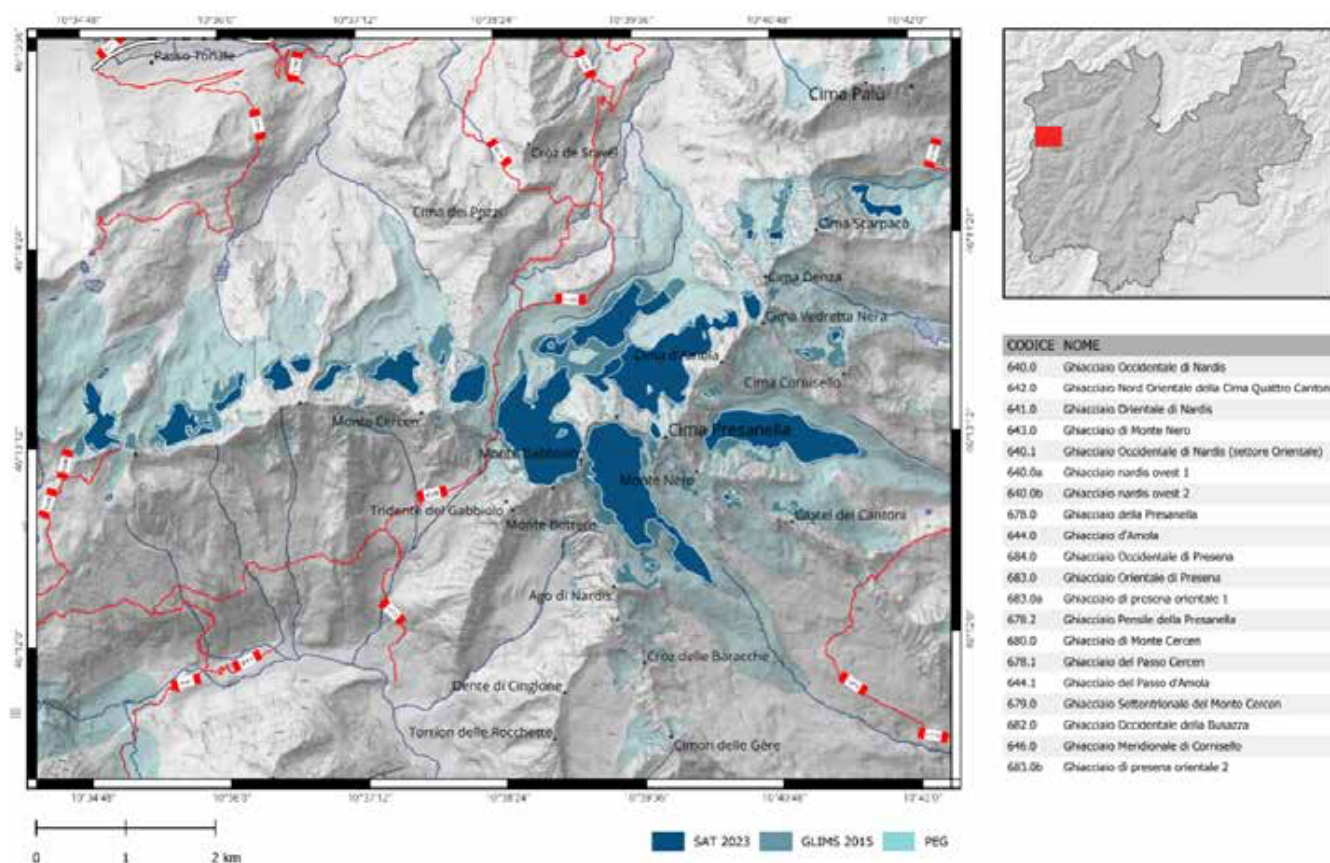


Figura 6 - Mappa dei ghiacciai del Trentino - Area Presanella

634.0 - Ghiacciaio del Lares

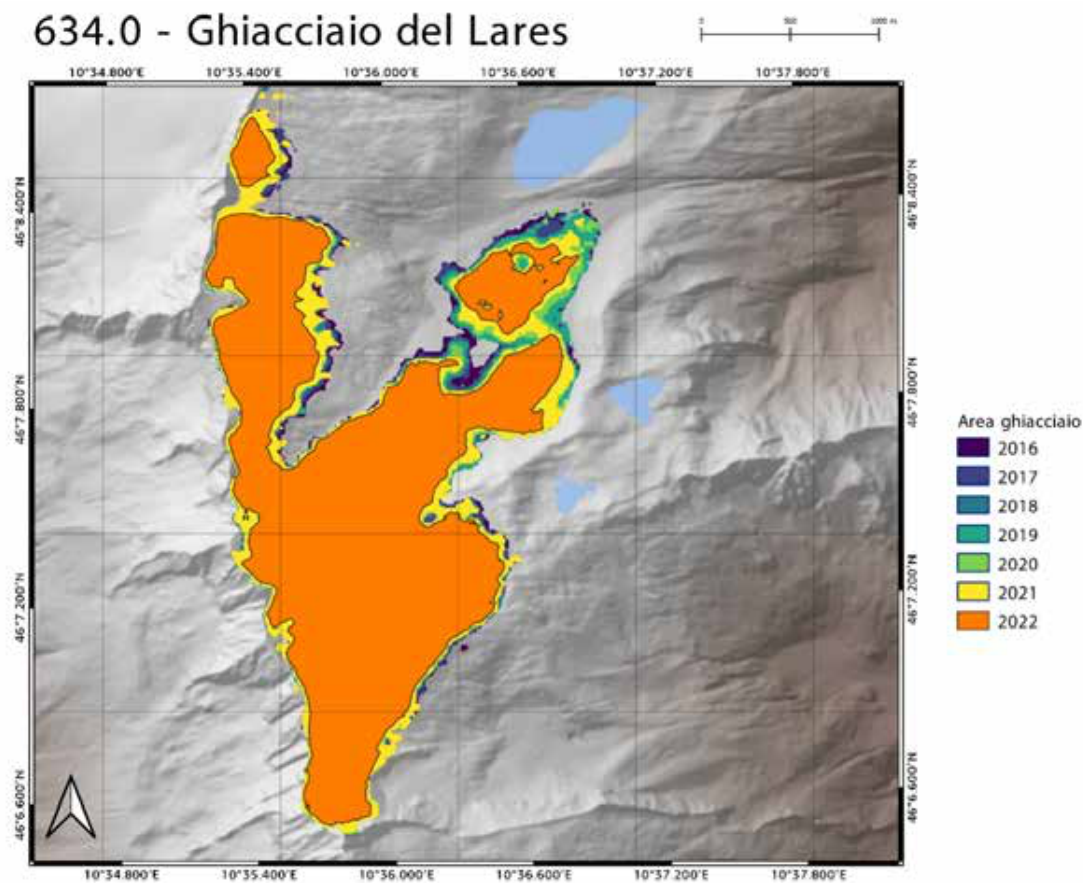


Figura 7 - Evoluzione temporale della mappa di classificazione automatica per il ghiacciaio del Lares nel periodo 2016-2022

Oltre l'Offico: Il RADAR SAR (Sentinel-1) e la Coerenza Interferometrica

Se da un lato i dati ottici multispettrali come quelli di Sentinel-2 rappresentano lo strumento principale per la perimetrazione delle superfici glaciali, essi incontrano limiti invalicabili in presenza di copertura nuvolosa o nei ghiacciai ricoperti da detrito (debris-covered glaciers), dove la roccia superficiale nasconde il corpo di ghiaccio sottostante all'osservazione visiva. Per superare queste limitazioni si ricorre ai sensori RADAR ad apertura sintetica (SAR), in particolare a quelli a bordo della missione Sentinel-1 (Torres *et al.*, 2012).

A differenza dei sensori ottici, il RADAR è un sistema attivo: emette propri impulsi a microonde (con una lunghezza d'onda di 5,6 cm per Sentinel-1) e ne misura l'eco di ritorno. Questa radiazione attraversa le nubi ed è indipendente dall'illuminazione solare, garantendo acquisizioni sia di giorno sia di notte e in qualsiasi condizione atmosferica.

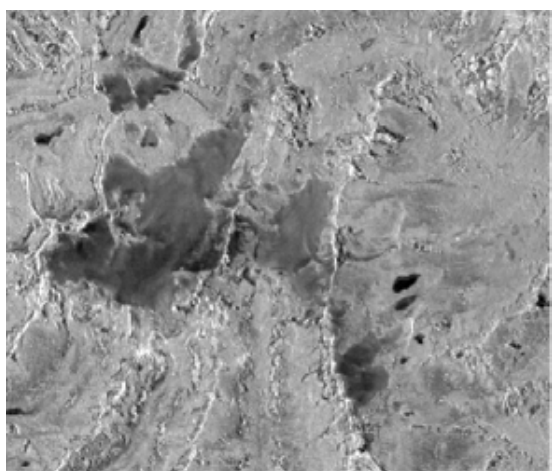
L'aspetto più interessante della tecnologia SAR risiede tuttavia nell'analisi della coerenza interferometrica. Ogni impulso radar inviato dal satellite registra non solo la quantità di energia riflessa, ma anche la "fase" dell'onda elettromagnetica al momento del contatto con il terreno. Se si confrontano due immagini acquisite dalla stessa posizione orbitale a distanza di pochi giorni (per esempio a intervalli di 6 o 12 giorni), si ottiene un valore di coerenza: un indicatore prezioso che quantifica la stabilità geometrica della superficie. I valori di coerenza variano tra 0 e 1. Si osserva alta coerenza (valori vicini a 1) su superfici perfettamente stabili e immobili nel tempo (come rocce affioranti, versanti consolidati o strutture artificiali). L'eco riflessa mantiene la stessa forma d'onda, conservando la "impronta elettromagnetica" della scena. Al contrario, si registra bassa coerenza (valori vicini a 0) su superfici soggette a movimento, micro-spostamenti

o trasformazioni fisiche (come lo scorrimento del ghiaccio, la fusione superficiale, il compattamento della neve o la variazione dell'umidità).

Questa metrica è di fondamentale importanza nello studio dei ghiacciai: la continua dinamica della massa glaciale e i processi di fusione estivi provocano un'alterazione costante del segnale riflesso, facendo crollare la coerenza a valori molto bassi e rendendo l'individuazione dell'area occupata dal ghiaccio molto più evidente, come mostrato in Figura 8.

Un'applicazione particolarmente promettente riguarda i ghiacciai neri o coperti da detrito. Anche se ricoperto di pietre, un ghiacciaio sottostante continua a muoversi e a fondere, determinando una bassa coerenza nel dato SAR. Quando il ghiaccio sottostante si estingue definitivamente e rimane solo materiale roccioso stabile o fermo, la coerenza interferometrica torna ad assumere valori elevati. Confrontando le mappe di coerenza elaborate lungo le stagioni estive (per esempio tra il 2023 e il 2025) è quindi possibile individuare con elevata sensibilità le porzioni glaciali che hanno perso la loro dinamica e si sono ormai estinte.

Sebbene l'elaborazione interferometrica sia storicamente complessa e computazionalmente onerosa, la recente disponibilità di algoritmi di calcolo in cloud all'interno del Copernicus Data Space Ecosystem consente oggi di generare mappe di coerenza su ampie aree in tempi ridotti, aprendo la strada a una mappatura automatizzata e complementare a quella ottica. Questa tecnica sviluppata nell'ambito del progetto ESA-CLOUDInSAR (VITO e EURAC Research 2026), viene resa disponibile nel catalogo APEx (*openEO Sentinel-1 Coherence* 2026) e apre la strada a molte applicazioni in ambito di monitoraggio ambientale.



(a)



(b)

Figura 8 - Confronto tra immagine SAR Sentinel-1 (mosaico VV per il mese di settembre 2025) e immagine di coerenza interferometrica (massimo della serie temporale, stagione estiva 2025). Gruppo Adamello – Caré Alto. Contiene dati modificati Copernicus Sentinel 2025

Nel caso specifico della mappatura dei ghiacciai del Trentino, il confronto delle mappe di coerenza estratte dalla stagione 2023 (considerata come baseline in seguito all'aggiornamento del catasto dei ghiacciai svolto per quell'anno, vedi Sez. 3) con quelle della scorsa stagione (2025) ha permesso una stima preliminare delle aree non più coperte da ghiaccio (riportate in Tabella 1). Nel dettaglio, in questo confronto vengono valutate le aree che mostrano una bassa coerenza nel 2023 e un valore alto nel 2025, considerando quindi la casistica in cui il segnale riflesso sia ora stabile a causa dell'esaurimento della massa di ghiaccio in quella determinata area. Questo approccio differenziale è stato introdotto per eliminare dal calcolo le zone in cui il segnale SAR risulta alterato da

fattori esterni al ghiacciaio, come la presenza di pareti rocciose particolarmente prominenti che limita l'osservabilità della superficie glaciale. Nonostante queste limitazioni, i risultati preliminari ottenuti sono estremamente promettenti e mostrano una buona sensibilità anche su ghiacciai coperti da detrito proprio per i movimenti comunque presenti nella massa di ghiaccio coperta. Allo stato attuale, la metodologia di segmentazione delle mappe di coerenza richiede ancora alcune evoluzioni per essere affidabile nella generazione automatica dei poligoni dei ghiacciai, nell'ottica di ridurre al minimo la necessità di revisione manuale dei risultati. Nonostante ciò, i risultati preliminari ottenuti sono molto promettenti e permetteranno ulteriori sviluppi nei mesi a venire.

Codice	Denominazione	Anno 2015	Anno 2023	Differenza %	Stima riduzione area
		Km ²	Km ²	2023 - 2015	2025 - 2022
639	Ghiacciaio Adamello/Mondrone	16,30	13,98	-14,2%	-6,9%
637	Ghiacciaio della Lobbia	5,86	4,63	-21,0%	-8,6%
634	Ghiacciaio di Lares	4,17	2,82	-32,4%	-20,2%
699	Ghiacciaio de la Mare	3,52	3,00	-14,8%	-20,4%
678	Ghiacciaio della Presanella	2,60	1,83	-29,7%	-31,6%
941	Ghiacciaio principale della Marmolada	1,28	0,73	-43,0%	-27,2%
698	Ghiacciaio Venezia	1,15	0,98	-14,8%	-17,6%
640	Ghiacciaio Occidentale di Nardis	1,18	0,78	-33,9%	-28,6%
701.6	Ghiacciaio del Careser	1,04	0,63	-39,4%	-22,4%

Tabella 1 - Confronto della riduzione delle aree tra gli anni 2015 e 2023 derivata dal confronto tra la mappa dei ghiacciai 2015 (GLIMS) con quanto elaborato con la metodologia presentata in sezione 3. La stima di riduzione di area 2022-2025 è derivata dai risultati preliminari sulle mappe di coerenza interferometrica presentati in sezione 4

La terza dimensione: Laser altimetrici satellitari e variazioni di spessore

Nello studio dei ghiacciai, limitarsi all'analisi dell'area occupata dai corpi glaciali risulta quantomeno riduttivo; infatti, per ottenere il reale bilancio di massa si rende necessaria anche l'informazione riguardante la variazione di spessore del ghiaccio. Generalmente questa misura viene rilevata in loco mediante paline ablatometriche, rilievi geodetici o, più recentemente, tramite rilievi fotogrammetrici da drone. In questa fase, l'impiego di dati telerilevati è stato anche legato a esplorare la possibilità di utilizzare i dati satellitari per valutare le quote delle superfici glaciali.

La nuova generazione di laser altimetri in orbita terrestre si presta molto bene per questo tipo di analisi. ATLAS (Markus *et al.*, 2017), parte della missione ICESat-2, e GEDI (Dubayah *et al.*, 2020) installato sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), pur avendo caratteristiche di ripresa e posizionamento diversi forniscono misurazioni puntuali dell'altezza, utilizzate generalmente per tracciare differenti tipi di cambiamenti in ambito forestale, oceanografico e glaciologico (come le mutazioni dello spessore delle calotte polari, conseguenti alla loro fusione), gli effetti

sull'innalzamento del livello del mare, lo spessore del ghiaccio marino e l'altezza della vegetazione forestale nei vari ecosistemi. Questa tipologia di strumenti, definiti LiDAR, permette di misurare la distanza delle superfici dallo strumento emettendo un impulso luminoso e misurando il tempo di ritorno della luce riflessa. L'operazione viene ripetuta svariate volte al secondo e, essendo in questo caso i sensori installati su satelliti in orbita, l'alta velocità di movimento della piattaforma porta a creare profili lineari di altezza.

ATLAS e GEDI presentano caratteristiche simili ma allo stesso tempo complementari: l'orbita polare estremamente stabile di ICESat-2 porta ad avere poche acquisizioni, disposte in direzione quasi nord-sud, ma estremamente fitte lungo la direzione di acquisizione. L'orbita della ISS è di per sé variabile, tuttavia, alle latitudini dell'arco alpino percorre una direzione indicativamente inclinata di circa 60° rispetto alla direzione N-S, creando quindi interessanti intersezioni con i dati ICESat-2. In Figura 9 viene mostrato un esempio di alcuni dati di questi due sensori sul Ghiacciaio del Lares (gruppo Adamello – Caré Alto).

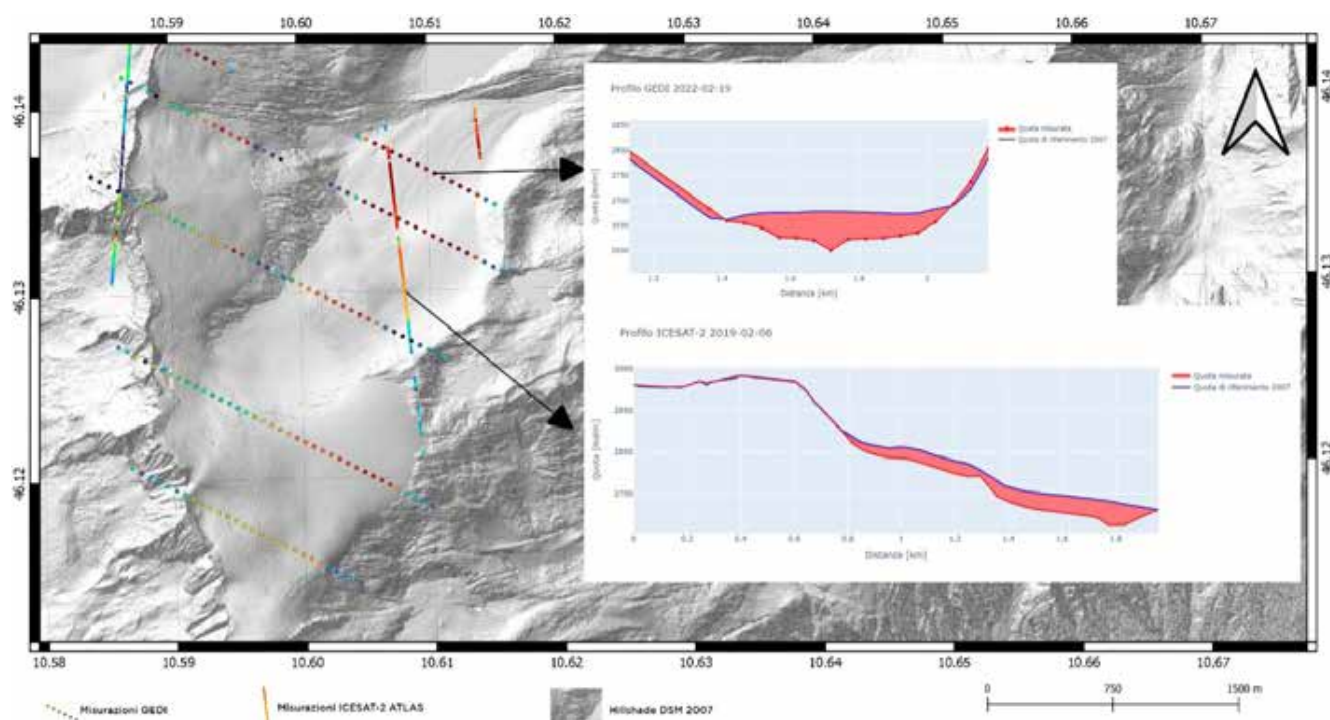


Figura 9 - Esempio di alcuni punti di misurazione ottenuti da dati LiDAR satellitari (blu- verde minor differenza, giallo- arancio -rosso maggior differenza). A sinistra due esempi di sezioni estratti da tali dati, in cui viene confrontata la misura attuale con un modello digitale del terreno di riferimento (PAT 2007)

Benché la catena di elaborazione necessaria per gestire correttamente questa tipologia di dati sia stata in gran parte realizzata, al momento non sono ancora stati integrati con le tecniche di interpolazione geospaziale necessarie per poter spazializzare le misure puntuali ottenute in questo modo con le mappe di estensione delle aree glaciali precedentemente descritte. Il lavoro che verrà realizzato nei prossimi mesi si concentrerà proprio in questa direzione, puntando a ottenere mappe che rappresentino non solo la variazione di estensione ma anche la variazione di volume delle aree glaciali.

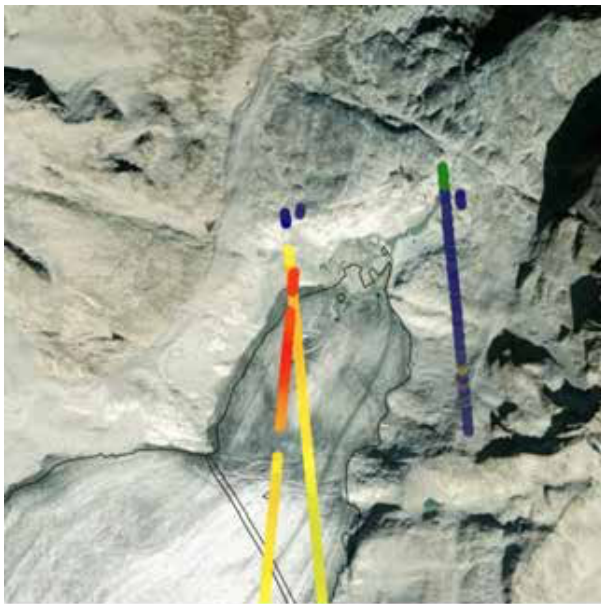
In questa fase ancora sperimentale, gli esperimenti sono stati concentrati in un'area di studio più ridotta e composta principalmente dal Ghiacciaio del Mandrone, della Lobbia e del Lares, al fine di testare le tecniche di elaborazione in un'area che ha visto rilevanti variazioni di spessore negli ultimi anni. I dati di ICESat-2 raccolti tra il 2018 e il 2025 sono stati confrontati con i DEM degli anni 2014 e 2022, realizzati dalla Provincia Autonoma di Trento.

Nel dettaglio, la catena di elaborazione sviluppata si occupa dell'importazione dei dati, del filtraggio geografico sulle zone di interesse, della riproiezione nel sistema di coordinate di riferimento e del diretto confronto con i modelli digitali del terreno (DEM). L'obiettivo principale è comprendere la relazione tra le quote rilevate dai laser altimetri e la morfologia della superficie glaciale, fornendo così dati su cui sviluppare metodologie che permettano di estrapolare da queste osservazioni che, per

loro natura, sono limitate a pochi profili discreti e a passaggi temporali discontinui, una mappa continua della variazione di spessore del ghiacciaio. Nella parte seguente di questa sezione verranno presentati alcuni esempi puntuali di dati acquisiti da ICESat-2 in zone particolarmente interessate dalla fusione glaciale, al fine di mostrare le potenzialità di questo strumento.

Un esempio di intersezione tra due diverse acquisizioni di ICESat-2 lo si può apprezzare in Figura 10. Tale confronto, effettuato utilizzando il DEM della Provincia del 2014, interessa la fronte del Mandrone e restituisce, come da legenda, valori più elevati di fusione contraddistinti dal colore rosso, valori medi con il colore giallo, mentre il colore blu ne indica la sua assenza (es. roccia). Estrapolando i dati per gli anni 2019 e 2021, si nota come ICESAT restituisca un valore di -25,43 m nel 2019 e -35,05 m nel 2021. Ciò significa che in questo arco temporale di due anni è avvenuta una fusione, ovvero una perdita di "spessore", di circa 10 metri.

In Figura 11 si osserva un ulteriore esempio in prossimità del Rifugio Caduti dell'Adamello. Sempre confrontandolo con il DEM della PAT 2014, restituisce un valore di -11 m con l'acquisizione del 2019 e -27 m con i dati acquisiti nel 2023. Valori che stanno a indicare una perdita di "spessore" pari a 16 metri nell'arco di quattro anni. Ulteriori interpolazioni spaziali basate sulla stima della funzione che descrive il gradiente di ablazione in funzione della quota e del/i DEM di riferimento, saranno oggetto di un prossimo approfondimento.



Differenza rispetto a DEM PAT2014:

2019/02/06 = -25.43 m

2021/02/08 = -35.05 m

In 2 anni sono stati quindi **persi circa 10 m di spessore**. Viene riportata la differenza rispetto al DEM di riferimento, in questo caso 2014

Figura 10 - Esempio di dati ICESat-2 ATLAS nei pressi della fronte del ghiacciaio del Mandrone

Conclusioni e prospettive future

L'esperienza maturata dalla Commissione Glaciologica della SAT sui ghiacciai del Trentino conferma che l'approccio integrato basato sui dati telerilevati rappresenta una svolta metodologica fondamentale per lo studio della criosfera alpina. L'utilizzo sinergico delle moderne piattaforme satellitari si è dimostrato un prezioso strumento, non per sostituire, ma per affiancare e potenziare i tradizionali rilievi effettuati sul campo dagli operatori. La mappatura bidimensionale ottenuta con i dati ottici di Sentinel-2 ha permesso l'aggiornamento del catasto glaciale. Questo strumento si è rivelato particolarmente efficace e ha permesso la generazione di un dataset rappresentante l'estensione aggiornata delle aree glaciali in Trentino. Allo stesso tempo, l'integrazione con i dati RADAR di Sentinel-1 sta permettendo di superare i limiti storici dell'osservazione ottica: l'analisi della coerenza interferometrica offre infatti promettenti soluzioni per tracciare la dinamica dei ghiacciai coperti da detrito e individuare le porzioni di ghiaccio ormai estinte.

Il potenziale di queste tecnologie è tuttavia in continua espansione. Le prospettive future di questo

progetto si rivolgono con forza alla "terza dimensione": l'impiego degli altimetri laser satellitari, come ICESat-2, sta aprendo nuove frontiere per quantificare le variazioni di spessore. L'obiettivo a medio termine è quello di fondere le estensioni areali satellitari, le variazioni di spessore e i dati di regressione e ablazione misurati in situ, per ottenere stime sempre più complete dei bilanci di massa. Inoltre, l'integrazione con rilievi fotogrammetrici da drone permetterà di colmare il salto di dettaglio tra i dati satellitari e le misure in situ.

In conclusione, è solo attraverso questa imprescindibile sinergia tra la visione globale fornita dallo spazio e la fondamentale, instancabile presenza sul terreno della Commissione Glaciologica, che sarà possibile continuare a documentare e comprendere con precisione la rapida e complessa evoluzione dei nostri ghiacciai.

Ringraziamenti

Questo studio della Commissione Glaciologica della SAT (Trento) è stato realizzato con il supporto di Surgiva, acqua minerale del Gruppo Lunelli.



Figura 11 - Ghiacciaio d'Agola nel Parco Naturale Adamello Brenta, Dolomiti di Brenta, fusione di fine estate 2021 - ph Cristian Ferrari



Figura 12 - Ghiacciaio della Marmolada - ph Daniela Mangiola

Bibliografia

- VALLONGO F., SANTONI M., FERRARI C., (2023) - *Analisi dell'arretramento dei ghiacciai trentini tramite dati telerilevati satellitari* – NIMBUS, 89, 16-25, ISSN: 1122-4339
- PAUL F., RASTNER P., AZZONI R., DIOLAUTI G., FUGAZZA D., LE BRIS R., NEMEC J., RABATEL A., RAMUSOVIC M., SCHWAIZER G., SMIRAGLIA C., (2020) - *Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2 Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1805–1821 - <https://doi.org/10.5194/essd-2019-213>
- DRUSCH, M., DEL BELLO, U., CARLIER, S., COLIN, O., FERNANDEZ, V., GASCON, F., HOERSCH, B., ISOLA, C., LABERINTI, P., MARTIMORT, P., MEYGRET, A., SPOTO, F., SY, O., MARCHESE, F., BARGELLINI, P. (2012) - *Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36 - <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- TORRES, R., SNOEIJ, P., GEUDTNER, D., BIBBY, D., DAVIDSON, M., ATTEMA, E., POTIN, P., ROMMEN, B., FLOURY, N., BROWN, M., TRAVER, I.N., DEGHAIE, P., DUESMANN, B., ROSICH, B., MIRANDA, N., BRUNO, C., L'ABBATE, M., CROCI, R., PIETROPAOLO, A., HUCHLER, M., ROSTAN, F. (2012) - *GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24 - <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- MARKUS, T., NEUMANN, T., MARTINO, A., ABDALATI, W., BRUNT, K., CSATHO, B., FARRELL, S., FRICKER, H., GARDNER, A., HARDING, D. (2017) - *The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. Remote Sensing of Environment*, 190, 260–273 - <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029>
- DUBAYAH, R., BLAIR, J.B., GOETZ, S., FATOYINBO, L., HANSEN, M., HEALEY, S., HOFTON, M., HURTT, G., KELLNER, J., LUTHCKE, S., et al. (2020) - *GEDI is the first spaceborne lidar optimized to measure ecosystem structure. Published as "The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography."* *Science of Remote Sensing*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002>
- VITO, EURAC RESEARCH, ESA CLOUDINSAR PROJECT (2026) - *Sentinel-1 SAR Coherence [openEO algorithm]*. APEX Algorithm Catalogue. https://algorithm-catalogue.apex.esa.int/apps/sentinel1_sar_coherence (ultimo accesso: 2026-07-19).
- EUROPEAN SPACE AGENCY (2026) - *Sentinel-1 InSAR processing with openEO in CDSE. EO Science for Society*. <https://eo4society.esa.int/2026/05/18/sentinel-1-insar-processing-with-openeo-in-cdse/> (ultimo accesso: 2026-07-19).
- CLOUDINSAR PROJECT (2026) - *s1-workflows: Collection of Sentinel-1 workflows and tests using ESA SNAP [software repository]*. GitHub. <https://github.com/cloudinsar/s1-workflows> (ultimo accesso: 2026-07-19)