MONITORAGGIO DEI CAMBIAMENTI DEI GHIACCIAI UTILIZZANDO IMMAGINI SATELLITARI OTTICHE: IL CASO DEL GHIACCIAIO DEI FORNI

L. Ranaldi^{1,*}, V. Belloni¹, M. Crespi^{1,3}

 ¹ Divisione di Geomatica e Geodesia, DICEA, Sapienza Università di Roma, Roma, Italia ranaldi.lorenza@gmail.com, <valeria.belloni, mattia.crespi>@uniroma1.it
³ Scuola Superiore di Studi Avanzati, Sapienza Università di Roma, Roma, Italia

KEY WORDS: Glaciers monitoring, Digital Surface Models, Coregistration, Optical satellite images, UAV data.

ABSTRACT

I ghiacciai sono uno tra gli indicatori piu importanti del cambiamento climatico ed' e quindi necessario un costante monitoraggio' di questi sistemi per preservare il territorio. In questo studio, sfruttando tecniche di elaborazione satellitare ottica fotogrammetrica, si sono utilizzate stereo-coppie di immagini dai satelliti Ikonos-2 e Pleiades-HR per generare Modelli Digitali del Terreno (DSM)` del ghiacciaio dei Forni (gruppo Ortles-Cevedale, Italia) e calcolare le sue variazioni morfologiche tra il 2009 e il 2016. Sono stati inoltre utilizzati DSM generati da acquisizioni con drone (UAV), raccolti durante campagne estive tra il 2014 e il 2021, per avere a disposizione modelli ad altissima risoluzione sulla porzione terminale del ghiacciaio da utilizzare per un confronto con i dati satellitari. Per eseguire analisi morfologiche accurate, e stata applicata la coregistrazione tra i DSM per rimuovere' i bias tra questi dovuti ad inconsistenze nella georeferenziazione delle diverse coppie di immagini satellitari. Si e utilizzato` l'algoritmo di Nuth e Kaab, potendo ottenere un'accuratezza finale nell'allineamento dei DSM dell'ordine del metro. I risultati di variazione altimetrica successivamente ricavati dai DSM ottici si sono dimostrati coerenti con la variazione media annua del ghiacciaio suggerita da diverse analisi condotte con DSM UAV, confermando una perdita media di 5,00 m/a sulla lingua dei Forni nel periodo 2014-2016. Inoltre, sulla base di dati sia UAV che ottici, si e constatato che i cambiamenti climatici' stiano causando un'accelerazione nel processo di scioglimento, con valori medi stimati di 3,3 m/a nel periodo 2009-2013, 3,8 m/a nel 2009-2016 e 4,7 m/a nel 2009-2021 sulla zona della lingua. In conclusione, nonostante le limitazioni legate alle condizioni meteorologiche e al tempo di rivisita, si e potuto constatare che le immagini satellitari ottiche ad alta risoluzione possono' certamente essere utilizzate per stimare le variazioni morfologiche rilevanti dei ghiacciai considerando variazioni dell'ordine di m/a.

Glaciers are one of the most important indicators of climate change. Monitoring their evolution is, therefore, crucial for safeguarding the Earth's ecosystem. In this study, exploiting photogrammetric optical satellite processing techniques, we used image pairs from Ikonos-2 and Pleiades-HR satellites to generate Digital Surface Models (DSMs) of Forni Glacier (Ortles–Cevedale group, Italy) and compute its morphological variations between 2009 and 2016. In addition, we used DSMs generated from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) acquisitions collected during summer campaigns from 2014 to 2021 for comparison with very high-resolution DSMs on the terminal portion of the glacier including its tongue. To evaluate the glacier height loss, DSMs co-registration was applied to remove DSM biases due to inconsistencies in the georeferencing of the different satellite image pairs, considering the use of Nuth and Kaab algorithm. The DSM height differences after co-registration highlighted a final accuracy of one meter. Results from optical DSMs were consistent with the average annual variation of the glacier suggested by UAV DSMs analysis, confirming an average 5.00 m/y loss on the Forni tongue during 2014-2016. Furthermore, based on both UAV and optical data, melting trends have highlighted how climate change is causing an acceleration in the melting process, with values averaging 3.3 m/y in the period 2009-2013, 3.8 m/y in 2009-2016 and 4.7 m/y in 2009-2021. Our results suggested that despite the limitations related to weather conditions (e.g. cloud coverage) and time revisit, high-resolution optical satellite imagery can certainly be used to estimate relevant morphological variations of glaciers in the order of meter/years, offering the opportunity of monitoring large-scale areas.

1. Introduzione

Lo studio e il monitoraggio dei ghiacciai risultano di fondamentale importanza per mitigare la perdita di acqua, una risorsa fondamentale per l'ecosistema terrestre ma anche indispensabile per uso potabile civile, agricolo e industriale e la cui disponibilità viene oggi minacciata a causa delle conseguenze del cambiamento climatico. Nell'ottica di tale problematica, nel corso del tempo si sono sviluppate diverse tecniche di monitoraggio dei ghiacciai. In particolare, gli approcci geodetici e di telerilevamento si sono rivelati promettenti e affidabili per queste analisi grazie alla possibilità di generare modelli tridimensionali della superficie terrestre (Digital Surface Models – DSM). Nel caso specifico dei ghiacciai, quando si considerano DSM che rappresentano superfici glaciali relative a diversi anni, è possibile eseguire analisi di differenza tra i vari modelli, associati ai diversi periodi temporali, al fine di valutare la variazione morfologica sviluppata dal ghiacciaio nel corso degli anni considerati. In generale, le immagini satellitari e da drone (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) sono particolarmente adatte per la generazione e lo studio di DSM inerenti ad aree glaciali (Rita et al., 2020), poiché, a partire da queste, si possono sviluppare' analisi di variazioni temporale senza la necessita di recarsi sul' luogo di indagine e di camminare quindi al di sopra della superficie glaciale, che risulta spesso di difficile accessibilità. Lo' scopo di questo progetto e stato quello di indagare il potenziale' dei dati ottici satellitari per la generazione di DSM in ambiente glaciale. Infatti, i dati satellitari ottici presentano un vantaggio importante rispetto al dato UAV, legato alla possibilità di acquisire informazioni su larga scala. A tal

^{*} Autore corrispondente

proposito, anche se generalmente meno risolute rispetto alle acquisizioni con UAV, le immagini satellitari si possono considerare come uno strumento attendibile per la stima delle variazioni dell'intero apparato glaciale nel corso del tempo.

2. Caso studio

Le analisi condotte nel presente lavoro afferiscono ad un particolare sito di interesse, il Ghiaccio dei Forni, ubicato in Nord Italia, Lombardia, nel Parco Nazionale dello Stelvio. Tale ghiacciaio di tipo vallivo e considerato come uno tra i più importanti nel suo genere sul territorio italiano, con un'estensione pari a 10,83 km² (2012) ed una quota altimetrica che varia tra i 2600 e i 3670 metri (Azzoni et al., 2017). L'interesse nel suo monitoraggio non risiede soltanto in una prevenzione di tipo glaciologico, ma anche a causa della frequenza con cui sia d'estate che d'inverno viene visitato da turisti. In tal senso risulta necessario un costante monitoraggio per valutarne lo scioglimento e i fenomeni di caduta e instabilità dei massi` che potrebbero costituire un rischio per i turisti ma anche per l'equilibrio dell'intero apparato glaciale (Fugazza et al., 2018).



Figura 1. Ortofoto del Ghiacciaio dei Forni, Lombardia, Italia (2022).



Figura 2. Fotografia della parte terminale del Ghiacciaio dei Forni, Lombardia, Italia (2022).

3. Dati utilizzati

Al fine di condurre analisi di monitoraggio del Ghiacciaio dei Forni, sono state utilizzate immagini ottiche satellitari. Tra le varie piattaforme satellitari ad alta risoluzione, e stato selezionato un set di dati composto da una stereo-coppia acquisita dal satellite Pleiades e da due stereo-coppie del satellite Ikonos-2. Le immagini che compongono le stereo-coppie Pleiades sono state acquisite il 3 novembre 2016 e hanno un valore di risoluzione a terra, ovvero Ground Sample Distance (GSD), pari a 50 cm. Per quanto riguarda i dati acquisiti dal satellite Ikonos-2, sono state utilizzate due diverse coppie di immagini. Nel primo caso, sono state acquisite il 30 agosto 2009 e consistono in una stereo-coppia con un GSD di 80 cm. La seconda coppia e definita nuovamente da un GSD di 80 cm, ma' in questo caso la coppia e stata generata dalla combinazione di' immagini acquisite rispettivamente il 30 luglio (immagine 1) e il 2 agosto (immagine 2) 2013. Inoltre, grazie ad una collaborazione tra l'area di Geodesia e Geomatica di Sapienza Università di Roma e il Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali dell'Università Statale di Milano, si sono utilizzati direttamente; quindi, senza necessita di processamento fotogrammetrico dei dati nativi, DSM generati dall'acquisizione di dati UAV durante campagne estive, tra il 2014 e il 2021, al fine di eseguire un confronto con i DSM derivati dai dati satellitari ottici.

4. Metodologia

Per generare i modelli digitali a partire dalle immagini ottiche satellitari, si è implementato il metodo fotogrammetrico,' che consente di trasformare il dato bidimensionale, relativo all'immagine acquisita dal sensore del satellite, in un dato tridimensionale georeferenziato che risulta rappresentativo del territorio di interesse (Brown et al., 2005). Nel presente lavoro sono stati utilizzati due diversi software commerciali, Agisoft Metashape e Catalyst, al fine di valutare quale tra i due garantisse un grado di affidabilità del modello finale migliore. Confrontando il DSM accurato ottenuto dal drone nel 2016 e i rispettivi DSM ricavati con Metashape e Catalyst sulla base dei dati ottici del 2016, si e constatato che il modello digitale pi` u accurato e stato ottenuto tramite l'utilizzo di Agisoft Metashape, così come evidenziato in Tabella 1, che si e quindi scelto come' software di riferimento per il processamento dei dati (Fig. 3).

Software	media	mediana	RMSE	std	NMAD
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Metashape	5.73	5.69	5.83	1.06	0.89
Catalyst	7.89	7.91	8.03	1.52	1.17

Tabella 1. Risultati statistici della differenza tra il DSM UAV 2016 e i DSM Metashape 2016/DSM Catalyst 2016

A seguito dell'elaborazione dei modelli digitali, e stato necessario applicare una procedura di coregistrazione tra questi. Infatti, i DSM vengono generati a partire da immagini acquisiste con sensori diversi, tale per cui i dati nativi che devono esser elaborati possono presentarsi con diversi valori di accuratezza . In tal senso, le ricostruzione del modello digitale potrà essere affetta da errori, che conseguentemente producono una condizione di disallineamento nello spazio dell'ordine anche di alcuni metri tra i modelli considerati. Esistono ad oggi diverse procedure che consentono di eliminare questi bias, tramite trasformazioni di rototraslazione o traslazione che eliminano lo shift tra i modelli e permettono di ottenere quindi dei sistemi digitali che sono coerenti e sovrapposti nello stesso sistema di riferimento.



Figura 3. DSM della fronte del Ghiacciaio dei Forni (Agisoft Metashape).

Per eseguire questa operazione, generalmente si considera un DSM come riferimento e un secondo DSM da coregistrare sul riferimento scelto. In particolare, la fase di coregistrazione si esegue solo su aree stabili comuni ai due DSM, considerate invarianti nel tempo, come quelle rocciose ad esempio, escludendo invece quelle soggette a variazioni morfologiche come, ad esempio, le aree glaciali. Un esempio indicativo e riportato in Figura 4, dove si evidenziano in rosso i bordi dell'area del ghiacciaio che viene mascherata, e al di fuori di essa le aree rocciose stabili, considerando l'area interna al rettangolo verde come quella presa in esame rispetto all'intera disponibile.



Figura 4. Area di indagine (rettangolo verde) della lingua del Ghiacciaio dei Forni e maschera sul ghiacciaio (area rossa).

Nel caso in esame, si è fatto uso dell'algoritmo di coregistrazione sviluppato dai ricercatori Nuth e Kaab dell'Università di Oslo (Nuth and Kaab, 2011). Avendo a disposizione i DSM" accurati generati dal dato UAV, si è deciso dapprima di allineare' il DSM ottico satellitare del 2016, considerato come il riferimento per i dati satellitari, sul DSM dello stesso anno ottenuto tramite dati UAV. In seguito, il DSM ottico satellitare del 2016, allineato con i dati UAV più accurati, sì è utilizzato come riferimento per allineare i DSM ottici satellitari del 2009 e del 2013. L'implementazione del codice di coregistrazione si è sviluppata con linguaggio Python. A seguito di questo processo, è stato possibile eseguire diverse valutazioni sulle condizioni di scioglimento e variazione dello spessore del ghiacciaio, dapprima eseguendo analisi di differenza tra i modelli digitali e successivamente calcolando i trend di scioglimento di porzioni meno estese del ghiacciaio.

5. Risultati

5.1 Procedura di coregistrazione

Il primo importante risultato si è ottenuto a seguito del processo di coregistrazione, potendo ottenere un corretto allineamento tra i modelli. Infatti, già durante la prima fase si sono evidenziati shift di circa 5 metri tra il dato satellitare e quello da drone relativi all'anno 2016 sulle aree stabili, come rappresentato in Figura 5, nonostante i due modelli siano realizzati utilizzando immagini acquisite a soli due mesi di distanza. In tal senso, si sarebbero potute generare delle successive valutazioni errate sulle condizioni di variazione morfologica del ghiacciaio, influenzate appunto da tali errori dell'ordine di svariati metri. Grazie all'algoritmo di coregistrazione, tali bias sono stati eliminati, e applicando la stessa procedura anche per tutti i modelli satellitari ottici considerati, e stato possibile coregistrare tutti i DSM nello stesso sistema di riferimento con accuratezza media dell'ordine del metro.



Figura 5. Differenze tra i DSM ottico e da drone (2016) prima e dopo la coregistrazione su aree stabili.

Coregistratione	media	mediana	RMSE	std	NMAD
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Prima	5.31	5.34	1.19	5.44	0.74
Dopo	0.01	0.00	1.11	0.72	0.72

Tabella 2. Risultati delle statistiche tra le differenze dei DSM ottico e da drone (2016) prima e dopo la coregistrazione su aree stabili

5.2 Variazione altimetrica del ghiacciaio

Successivamente ci si è incentrati sulle analisi di variazione morfologica. In primo luogo, una volta che i DSM sono risultati correttamente allineati tra loro, e stato possibile procedere con le operazioni di confronto tra questi per ottenere il dato di variazione altimetrica. Ad esempio, nel periodo 2009-2016 si sono registrati, sulla zona critica della lingua del Ghiacciaio dei Forni, dei valori di perdita di spessore dell'ordine di 40 metri (Figura 6). Questo risultato e in linea con il dato identificato da studi pregressi con drone, in cui è stato stimato un valore di perdita media annuale di 5 m sulla zona della lingua (Fugazza et al., 2018). Per zone che si trovano a quote più elevate, al di sopra della lingua del ghiacciaio, si sono registrati valori di perdita di 20-25 metri tra i 2600 e 2800 m.s.l.m., e circa 10 metri oltre i 3000 metri di quota sempre nei sette anni di riferimento. Tali valutazioni sono state poi ripetute anche per un periodo temporale più breve, tra il 2013 e il 2016, considerando le aree di analisi prima citate ed è stata nuovamente attestata una perdita di 5 m/anno nella lingua dei Forni e perdite invece meno consistenti

per quote più elevate. Inoltre, per evidenziare ancor meglio le perdite del ghiacciaio, si sono estratte alcune sezioni



Figura 6. Differenze tra i DSMs ottici 2009-2016 prima e dopo la coregistrazione sulle aree del ghiacciaio.

longitudinali e trasversali (Figura 7) dai diversi DSM satellitari ottici disponibili. Queste hanno messo in risalto in maniera chiara da una parte, il fenomeno di riduzione di spessore delle aree ghiacciate, lì dove le sezioni presentano variazione, mentre dall'altra, la condizione di allineamento delle zone rocciose dovuto al processo di coregistrazione, evidente dove le sezioni risultano sovrapposte.



Figura 7. Profilo longitudinale (A-A') e trasversale (B-B') di sezioni sulla lingua del Ghiacciaio dei Forni.

5.3 Trend di scioglimento del ghiacciaio

In seguito, si sono stimati i trend di scioglimento caratteristici di alcuni punti dell'apparato glaciale, al fine di valutare, seppur localmente, la modalità di evoluzione di questo fenomeno. Per le zone della lingua dei Forni si sono utilizzati sia dati da drone che satellitari, eseguendo una stima per il periodo 20092021, mentre nelle aree più elevate si sono considerati i soli dati satellitari, unico dato a disposizione per le aree più estese del ghiacciaio, considerando il solo periodo 2009-2013. In ogni caso si sono prese come riferimento delle zone con estensione di 10x10 pixel, estrapolando un valore medio di quota e ripetendo il procedimento per i diversi anni considerati. In questo modo e

stato possibile costruire un dataset contenente le informazioni di elevazione media di diverse aree e per diversi anni. Rappresentando graficamente i dati ottenuti, e stato possibile individuare delle tendenze chiaramente decrescenti per i valori di elevazione, che evidenziano una forte coerenza tra le due fonti di dati. In particolar modo, e possibile notare come nelle Figure 8 e 9, in tutti i casi, ci sia una modifica di pendenza delle rette che uniscono i primi punti, riferiti al periodo 2009-2016, rispetto alla pendenza delle rette che uniscono i punti del periodo successivo, fino al 2021. Tale risultato evidenzia un fenomeno di accelerazione dello scioglimento del ghiacciaio. A dimostrazione di questo, per il caso della zona critica della lingua, si sono calcolate le variazioni nel trend annuale di scioglimento dal 2009 fino al 2021, come riportato in Tabella 3, ottenendo un risultato che chiaramente identifica la crescita di questo valore nel corso del tempo considerato.



Figura 8. Trend di scioglimento dei punti 1 e 3 durante il periodo 2009-2021.



Figura 9. Trend di scioglimento dei punti 2 e 4 durante il periodo 2009-2021.

2009-	2009-	2009-2016	2009-2016	2009-	2009-
2013	2014	UAV	SAT	2018	2021
3.20 m	3.50 m	3.80 m	3.90 m	4.10 m	4.70 m

Tabella 3. Valore medio annuo di perdita dell'area 4 del ghiacciaio in intervalli temporali compresi tra il 2009 e il 2021.

6. Conclusioni

A seguito delle analisi condotte sul Ghiacciaio dei Forni, si è evidenziato come il fenomeno di scioglimento risulti particolarmente intensivo nel corso degli ultimi anni. Tale risultato e stato raggiunto utilizzando immagini ottiche satellitari, acquisite dai satelliti Ikonos-2 e Pleiades, e DSM ottenuti da indagini con drone. L'applicazione dell'algoritmo di coregistrazione di Nuth e Kaab sui modelli si è dimostrato affidabile per eliminare i problemi di georeferenziazione presenti tra questi e condurre successive analisi morfologiche accurate. Sia le valutazioni inerenti ad una variazione media di spessore sull'intero apparato glaciale, sia le analisi puntuali per stimare i trend di scioglimento in micro-aree, hanno messo in mostra il fenomeno di scioglimento accelerato a cui e soggetto questo ghiacciaio, con perdite medie annue di circa 5 m sulla lingua, così come precedentemente stimato con soli dati UAV. Si può quindi affermare che, sebbene le immagini satellitari ottiche presentino alcune limitazioni legate alle condizioni metereologiche, come ad esempio la copertura nuvolosa o al tempo di rivisita, e comunque possibile riconoscerne il potenziale in riferimento allo studio dei ghiacciai e alla possibilità di derivare diverse informazioni sullo stato di variazione di questi sistemi nel corso del tempo, soprattutto considerando le informazioni acquisite su larga scala. In futuro l'obiettivo sarà quello di acquisire ulteriori immagini ottiche per estendere l'indagine sul Ghiacciaio dei Forni. Inoltre, sarà possibile indagare ulteriori tecniche a supporto del dato ottico satellitare, come ad esempio i sistemi satellitari SAR, i quali sono in grado di fornire dati anche in condizioni metereologiche limitanti per il dato ottico satellitare.

Bibliografia

Azzoni, R. S., Fugazza, D., Zennaro, M., Zucali, M., D'Agata, C., Maragno, D., Cernuschi, M., Smiraglia, C., Diolaiuti, G. A., 2017. Recent structural evolution of Forni Glacier tongue (Ortles-Cevedale Group, Central Italian Alps). *Journal of Maps*, 13(2), 870-878. https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1394227.

Brown, C. W., Lillibridge, J., Nalli, N. R., 2005. An introduction to satellite sensors, observations and techniques.

Fugazza, D., Scaioni, M., Corti, M., D'Agata, C., Azzoni, R. S., Cernuschi, M., Smiraglia, C., Diolaiuti, G. A., 2018. Combination of UAV and terrestrial photogrammetry to assess rapid glacier evolution and map glacier hazards.

Nuth, C., Kaab, A., 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5(1), 271–290. https://tc.copernicus.org/articles/5/271/2011/ (Accessed 31 August 2023)

Rita, D., M., Fugazza, D., Belloni, V., Diolaiuti, G., Scaioni, M., Crespi, M., 2020. GLACIER VOLUME CHANGE MONI-TORING FROM UAV OBSERVATIONS: ISSUES AND POTENTIALS OF STATE-OF-THE-ART TECHNIQUES. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2020, 1041–1048.