POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Mappatura degli effetti indiretti della forzante antropica in ambiente glaciale. Proposta di cartografia quantitativa con QGIS e WSL Monoplotting Tool

Original
Mappatura degli effetti indiretti della forzante antropica in ambiente glaciale. Proposta di cartografia quantitativa con QGIS e WSL Monoplotting Tool / Pranzo, A.M.R.. - In: BOLLETTINO DELL'ASSOCIAZIONE ITALIANA DI CARTOGRAFIA. - ISSN 2282-572X. - 171:(2021), pp. 21-36. [10.13137/2282-572x/33430]

Availability:
This version is available at: 11583/2972168 since: 2022-10-08T19:46:00Z

Publisher:
EUT Edizioni Università di Trieste

Published
DOI:10.13137/2282-572x/33430

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

26 November 2026

EUT EDIZIONI UNIVERSITÀ DI TRIESTE

Bollettino della ASSOCIAZIONE ITALIANA di CARTOGRAFIA **2021 (171), 21-36**

ISSN 2282-572X (online) ISSN 0044-9733 (print)
http://www.openstarts.units.it/dspace/handle/10077/9933

DOI: 10.13137/2282-572X/33430

Mappatura degli effetti indiretti della forzante antropica in ambiente glaciale. Proposta di cartografia quantitativa con QGIS e WSL Monoplotting Tool

Mapping indirect effects of anthropic forcing in glacial environments. A quantitative cartography proposal using QGIS and WSL Monoplotting Tool

ANDREA MARCO RAFFAELE PRANZO

Politecnico di Torino, Università di Trento; andrea.pranzo@unitn.it

Riassunto

Di fronte all'odierna accelerazione dei cambiamenti climatici, la geografia applicata necessita oggi con urgenza di nuovi strumenti agili e affidabili per non essere superata dall'evoluzione stessa dei sistemi geomorfologici. La presente ricerca si è posta l'obiettivo di sperimentare l'impiego combinato di due strumenti di geografia digitale, QGIS e WSL Monoplotting Tool, per definire un flusso di lavoro semplificato atto a produrre dati geografici quantitativi sulle dinamiche glaciali. Con un primo test, è stata prodotta una cartografia diacronica di lungo periodo sulle variazioni frontali del ghiacciaio del Lys negli ultimi 150 anni. Con un secondo test, è stata prodotta una cartografia diacronica di breve periodo sulle variazioni frontali del Ghiacciaio di Pré de Bar negli ultimi 30 anni. Sono stati definiti tre metodi per la valutazione dei risultati e sono stati modellati gli errori e le incertezze di procedimento. Quanto ottenuto consente di tracciare ulteriori linee di ricerca per ridurre gli errori e aumentare la precisione dei risultati.

Parole chiave

Cartografia glaciologica, WSL Monoplotting Tool, ghiacciaio del Lys, ghiacciao di Pré de Bar, deglaciazione, ambiente alpino

Abstract

While facing the current acceleration of climate changes, applied geography nowadays urgently needs new rapid and reliable instruments for not being surpassed by the evolution itself of geomorphological systems. This research has the aim to experiment the combined application of two digital geography devices, QGIS and WSL Monoplotting Tool, to define a simplified workflow apt to produce quantitative geographical data about glacial dynamics. With a first test, a long-term diachronic cartography was produced about the terminal variation of Lys Glacier during the last 150 years. With a second test, a short-term diachronic cartography was produced about the terminal variation of Pré de Bar Glacier during the last 30 years. Three methods for assessing the results were defined, and the proceedings errors and uncertainties were modeled. The outcome findings allow to trace further research pathways to reduce errors and improve the accuracy of the results.

Keywords

Glaciological mapping, WSL Monoplotting Tool, Lys glacier, Pré de Bar glacier, deglaciation, alpine environment

1. Introduzione

Seguendo le suddivisioni proposte in geomorfologia (Haff, 2003, Szabó et al., 2010), il disturbo antropico si manifesta in modo diretto o indiretto, a livello locale oppure globale, spesso attraverso l'accelerazione di processi geomorfologici esistenti o la destabilizzazione di sistemi geomorfologici che erano in equilibrio con le condizioni al contorno. Fra i vari tipi di impatto, si propone di testare lo studio geografico di un classico esempio di perturbazione indiretta, di origine globale e con ripercussione locale. Il nesso fra l'incremento delle temperature medie annue e l'aumento dei tassi di ablazione glaciale può essere osservato nella sua manifestazione più iconica, cioè il ritiro delle fronti glaciali e la perdita di aree glacializzate (Fugazza et al., 2020). Lo strumento che si mette alla prova è *WSL Monoplotting Tool* (di seguito, WMT), sviluppato dall'Istituto Federale Svizzero per la Ricerca su Foreste, Neve e Paesaggio (*WSL*)[1].

1.1 WSL Monoplotting Tool

L'intenzione degli sviluppatori di WMT (Bozzini et al., 2011) è stata di creare uno strumento per svolgere analisi geografiche sfruttando il vasto repertorio di fotografie d'archivio da cui ricavare informazioni georeferenziate – e quindi cartografabili – da immagini tridimensionali. Molti studi geografici sono oggi svolti su immagini digitali, ma la possibilità di estrarre dati è limitata dal fatto che le tecnologie di acquisizione satellitare di immagini ad uso civile sono piuttosto recenti. Il recupero delle immagini terrestri oblique consente invece di retrodatare le serie storiche anche di molti anni, talvolta fino alla metà del XIX secolo, e di osservare caratteristiche geografiche più dettagliate e più agevolmente. Si delinea così una fonte alternativa o aggiuntiva alle immagini satellitari, che apre la via a forme di monitoraggio rapido e a basso impiego di risorse (Conedera et al., 2015).

Sono note varie tecniche di monofotogrammetria per trasferire informazioni dal 3D al 2D; gli autori hanno optato per un sistema che fosse il più possibile *user-friendly*, consentendo di giungere speditamente ad un risultato apprezzabile (Bozzini et al, 2012).

Il principio alla base del *monoplotting* risiede nell'idea che "*simulando e riproducendo, il più accuratamente possibile, il sistema ottico al momento in cui è stata scattata la foto*" (Bozzini et al., 2011), sia possibile instaurare una corrispondenza biunivoca fra i punti della fotografia tridimensionale e i punti di un modello digitale di elevazione (DEM, sia DTM che DSM). Serve che siano definiti i parametri intrinseci ed estrinseci della fotocamera: posizione e orientamento nello spazio, distanza focale, centro dell'immagine ed eventuali distorsioni dovute alla lente (Bozzini et al., 2012). Con questi valori, WMT stima la posizione della scena nel mondo reale.

Il nucleo dell'attività risiede nella calibrazione della fotocamera virtuale. L'algoritmo usa le equazioni di collinearità e stima i parametri ignoti (o ricalcola quelli noti) con il metodo dei minimi quadrati (Bozzini et al., 2011). L'utente interviene con l'aggiustamento manuale dei parametri, decisivo per una calibrazione ottimale, e con la fotointerpretazione, poiché deve individuare i punti di controllo necessari all'algoritmo per convergere.

WMT è stato sperimentato nello studio dell'ecotono delle foreste di versante (McCaffrey et al, 2017), nella mappatura della copertura vegetale (Bozzini et al., 2012), nella cartografia di eventi alluvionali (Bozzini et al., 2011; Triglav-Čekada et al., 2014), nel tracciamento della posizione storica dei ghiacciai (Wiesmann et al., 2012), nella mappatura di fenomeni gravitativi (Conedera et al., 2018) e nel cambiamento dell'uso dei suoli (Gabellieri, Watkins, 2019).

In questa sede si propongono due esperimenti per valutare se possa essere definita una procedura utile all' "adattamento metodologico" ai cambiamenti climatici che oggi anche la ricerca geografica applicata deve perseguire con urgenza. Un primo test viene condotto sul Ghiacciaio del Lys, per verificare la fattibilità di uno studio di cartografia storico-ambientale di lungo periodo. Generare serie storiche digitali sui corpi glaciali può consentire di comparare elementi fotografati in condizioni differenti (stagione, angolatura, ombre, meteo), di effettuare valutazioni pre- e post-evento (rotte glaciali, crolli), o avvalorare ricostruzioni

1 https://www.wsl.ch/en/index.html

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

climatiche con il conforto di un dato "osservativo" (per quanto rappresentato).

Un secondo test è condotto sul Ghiacciaio di Pré de Bar per capire quali margini di operatività WMT offra lavorando a risoluzione temporale più fine. L'idea è di valutarne l'impiego come "supporto da remoto" per organizzare il materiale delle campagne glaciologiche. In ambiente alpino l'accelerazione dell'aumento delle temperature medie annue si manifesta infatti in un sempre più accentuato aumento della quota dell'isoterma degli 0°C (Cerutti et al., 2001). Al regresso delle fronti si accompagna un sempre più veloce innalzamento delle loro quote, cosa che complica le routine di monitoraggio. In fase di regresso, diverse fronti glaciali stanno iniziando a localizzarsi presso scivoli di alimentazione impervi e accidentati (Pré de Bar), o gradini glaciali con dislivelli impraticabili (Lys). Aumenta inoltre il pericolo di crolli in ghiaccio, favoriti dalla destabilizzazione delle masse glaciali per l'aumento di frequenza ed intensità delle ondate di calore in estate, che è proprio la stagione in cui devono svolgersi le campagne glaciologiche. Inoltre, come detto, molte fronti non sono più vallive ma di seraccata, quindi intrinsecamente instabili per via degli sforzi di taglio impressi dal flusso glaciale. Superare questi ostacoli potrebbe forse consentire di proseguire con le misurazioni anche "da remoto", attenuando il problema dell'interruzione delle serie storiche di terreno[2].

1.2 Flusso di lavoro

1. Raccolta di una serie di immagini digitali dell'oggetto geografico
2. Selezione temporale delle immagini
3. Selezione qualitativa delle immagini
4. Raccolta dei DTM (*Digital Terrain Models*) con il dato altimetrico georeferenziato
5. Raccolta delle ortofoto con il dato georeferenziato dell'area di studio
6. Preparazione di DTM e ortofoto su QGIS
7. Calibrazione della fotocamera virtuale su WMT: stima del centro dell'immagine
8. Stima del punto di presa dell'immagine
9. Scelta e collimazione dei punti di controllo
10. Digitalizzazione dell'oggetto geografico
11. Esportazione del dato per l'analisi vettoriale
12. Produzione della carta glaciale e del dato numerico
13. Verifica dei dati con confronti multi-fonte

2. Il Ghiacciaio del Lys. Test di cartografia quantitativa storico-ambientale

2.1 Area di studio

Il Ghiacciaio del Lys sorge sul versante sud del Massiccio del Monte Rosa, alla testata della valle di Gressoney (esposizione sud). Il sistema è composto da un ampio plateau a bassa pendenza e forte sviluppo longitudinale, dove si è storicamente collocato il bacino di ablazione con la tipica lingua glaciale, e da due grandi bacini di alimentazione. Il bacino orientale è collocato alle falde della cresta costituita dal Lyskamm Orientale (4527 m s.l.m.), dalla Cima di Scoperta (4335 m) e dalla Piramide Vincent (4215 m s.l.m.), che dividono il Lys dai ghiacciai di Grenz e Indren, Il bacino occidentale è incassato fra la cima del Liskamm Occidentale (4479 m s.l.m.) e lo spartiacque che lo separa dai ghiacciai Felik e Perazzi. Il *nunatak* del "Naso del Liskamm" separa le due principali colate di alimentazione. La variazione della lingua in epoca olocenica ha prodotto un vistoso sistema di morene, soprattutto laterali, di cui sopravvivono le più recenti, consentendo analisi geomorfologiche delle pulsazioni glaciali degli ultimi due secoli (Strada, 1987).

Il Lys è stato scelto poiché, per la sua importanza e per la sua facile raggiungibilità, è stato oggetto di molte ricerche e di molte fotografie, in parte custodite presso il Comitato Glaciologico Italiano di Torino (di seguito CGI). Il Lys è anche un ghiacciaio simbolico, perché ha ormai subito un regresso eclatante, fornendo un quadro chiaro di come i sistemi geomorfologici glaciali reagiscano alla pressione antropica indiretta (Fugazza et al., 2020).

2 Queste considerazioni sono emerse nel corso di conversazioni con gli operatori glaciologici e i ricercatori della sede torinese del Comitato Glaciologico Italiano. Si ringraziano in particolare S. Perona (CNR), G. Mortara (CNR) e A. Perotti (Università di Torino) per i colloqui illuminanti sul tema.

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

2.2 Metodo

Grazie all'aiuto del CGI è stata selezionata una serie che si estende dalla seconda metà del XIX secolo al 2019; è una serie discontinua ma esemplificativa delle dinamiche glaciali di lungo periodo. I criteri di selezione hanno tenuto conto dei suggerimenti (Triglav-Čekada et al., 2014) sulla scelta di immagini che favorissero la convergenza dell'algoritmo:

- Le immagini non devono essere ritagliate;
- Le immagini devono inquadrare riferimenti stabili per la scelta dei punti di controllo;
- Le immagini non devono, per quanto possibile, presentare distorsioni;
- Le immagini non devono essere state scattate con angolo eccessivamente basso rispetto alla superficie da digitalizzare, altrimenti vi sarà difformità di scala fra i pixel in primo piano e i pixel più distanti.

Sono state trovate fotografie idonee per i seguenti anni: 1868, 1898, 1922, 1935, 1942, 1984, 2005, 2019. Fra le immagini reperite alcune sono state scartate, rarefacendo purtroppo la sequenza temporale, a causa di caratteristiche che ne hanno impedito la calibrazione. Per esempio, l'eccessiva profondità dell'immagine ha impedito di includere una foto del 1911; un ridimensionamento post-scatto ha costretto a scartare una foto del 1954; la risoluzione troppo bassa ha impedito di trovare punti di controllo efficienti in una foto del 1973. Sono stati poi preparati i file raster del DTM per fornire a WMT il dato altimetrico, e le ortofoto georeferenziate per effettuare la collimazione (Geoportale Valle d'Aosta). Si è proceduto così iterativamente alla calibrazione della fotocamera virtuale e alla digitalizzazione della fronte, per ogni fotografia idonea.

Il primo passaggio prevede il calcolo automatico del centro della fotografia. Essendo il soggetto delle foto un ghiacciaio, spesso il centro delle immagini ricade proprio in area glacializzata: ciò può essere un fattore di aumento dell'errore, essendo il ghiaccio un riferimento effimero.

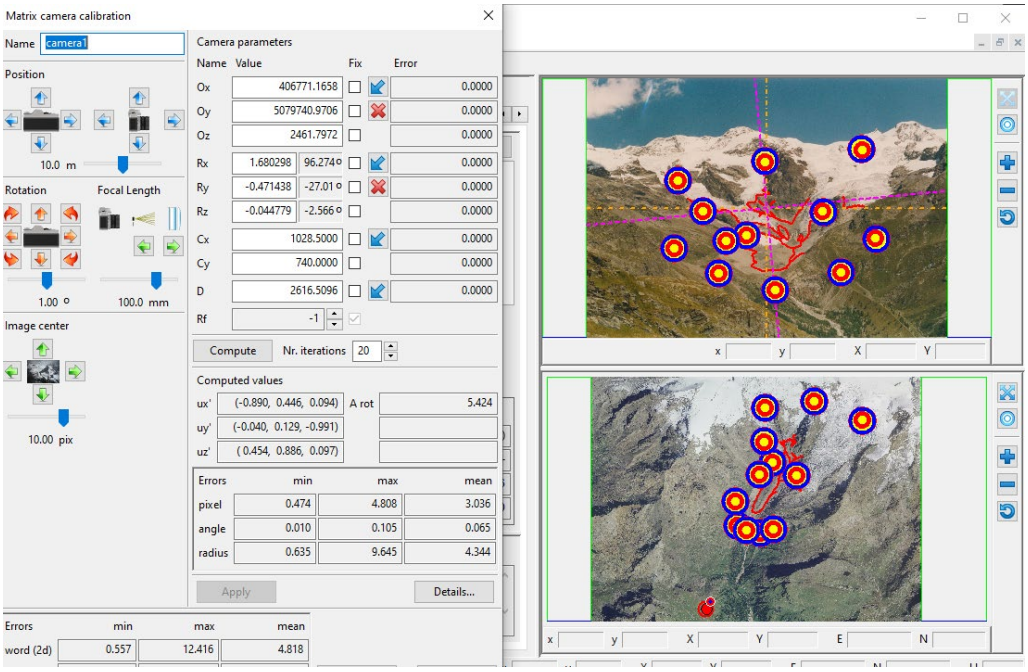
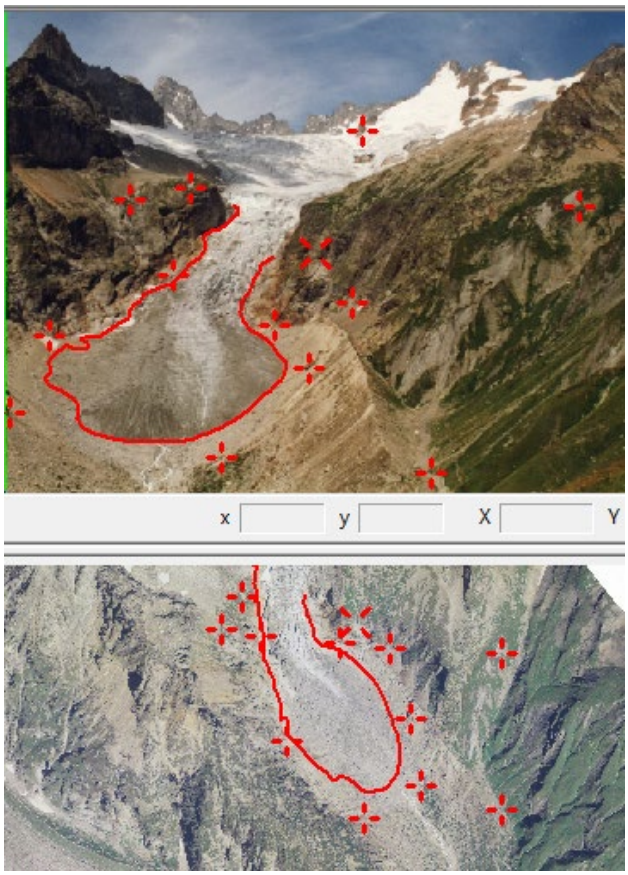


FIGURA 1 - Schermata di lavoro in WMT. Fase di calibrazione

FONTE: Elaborazione propria

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

FIGURA 2 - Schermata di lavoro in WMT. Fase di digitalizzazione



FONTE: Elaborazione propria

Il secondo passaggio è la stima del punto di presa. In molti casi le foto non lo indicavano, e si è proceduto per approssimazioni successive, sfruttando di un alto numero di punti di controllo (Bozzini et al., 2011). Per alcune immagini ci si è avvalsi di indizi esterni e di Google Earth per una comparazione *de visu*. Alcune iscrizioni sul retro delle fonti hanno consentito di identificare punti tradizionali di osservazione (l'altopiano di Sant'Anna, il Ristoro Sitten, l'Alpe Bettaforca).

Segue la fase di collimazione, che procede speditamente se i parametri estrinseci inseriti dall'utente sono ben approssimati. In caso contrario, l'algoritmo fatica a stimare i parametri intrinseci, e servono molte iterazioni. Durante la presente ricerca si è stimato un tempo medio di calibrazione di almeno 4-5 ore, di rado sceso a 2 ore. Data la natura esplorativa del test, la calibrazione è stata ritenuta soddisfacente con errori 3D dei punti inferiori a 2 m, essendo questa la risoluzione geometrica del DTM. Non sempre questo obiettivo è stato raggiunto; in alcuni casi è stato necessario accettare gradi di incertezza maggiori.

Il procedimento si conclude con la digitalizzazione delle fronti. L'operazione è delicata: la calibrazione può non riuscire a minimizzare al meglio gli errori, e vi sono i limiti di dettaglio imposti dalle risoluzioni del DTM e della foto. Altri due fattori determinanti per una buona digitalizzazione sono la profondità dell'immagine, che, se eccessiva, aumenta il rischio di distorsioni, e l'inclinazione della superficie rispetto al cono ottico della fotocamera (Wiesmann et al., 2012). Le polilinee sono state poi esportate in QGIS per l'analisi vettoriale.

2.3 Risultati e discussione

Il risultato del test (Fig. 3) consente una comparazione immediata delle variazioni cumulative di lungo periodo. Le ricostruzioni esistenti sulle variazioni storiche del Lys (Strada, 1987; Fugazza et al., 2020) ne rendono possibile un vaglio qualitativo. Il raffronto con le stime dei trend (Fig. 4) permette di concludere che i risultati di WMT e gli andamenti climatologici ricostruiti convergono. In termini di variazione lineare relativa (Tabella 1) si nota come la posizione relativa delle fronti digitalizzate segua in maniera fedele le oscillazioni stimate con le ricostruzioni climatiche, seppur nei limiti delle forti approssimazioni. Gli arretramenti grezzi relativi sono stati ottenuti calcolando in QGIS le differenze di posizione della punta terminale della lingua, con un metodo semplificato descritto più avanti. Sono anche state stimate le quote cui si è attestata la fronte glaciale nei vari anni. Le similitudini con le quote stimate nei report annuali del CGI (in Rivista Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, GFDQ) sono di ulteriore rassicurazione sulla verosimiglianza dei risultati.

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

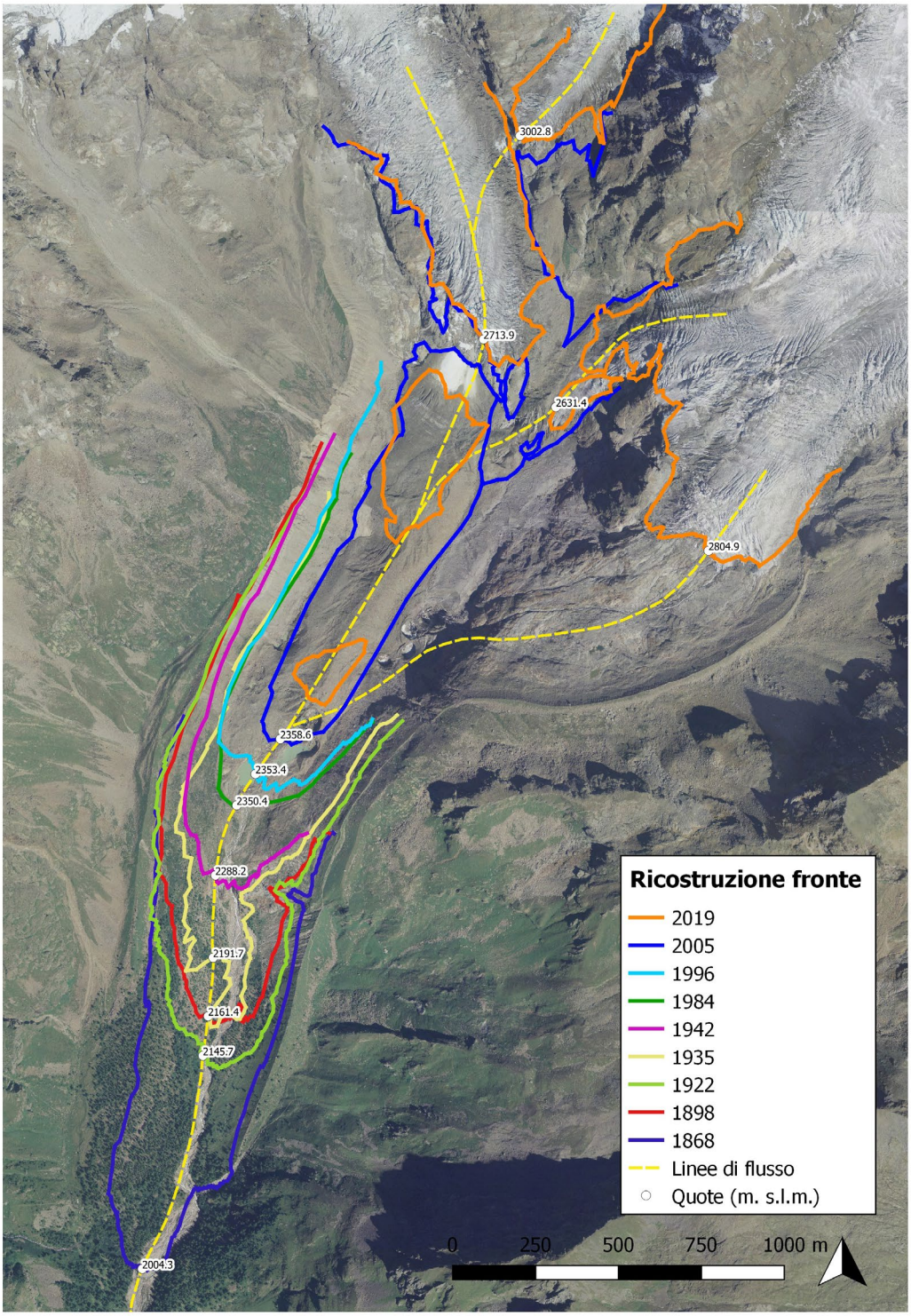


FIGURA 3 - Cartografia diacronica di lungo periodo del Lys. Variazioni frontali nel periodo 1868-2019

FONTE: Elaborazione propria (QGIS). Dati: CGI. Ortofoto: Geoportale Valle d'Aosta

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

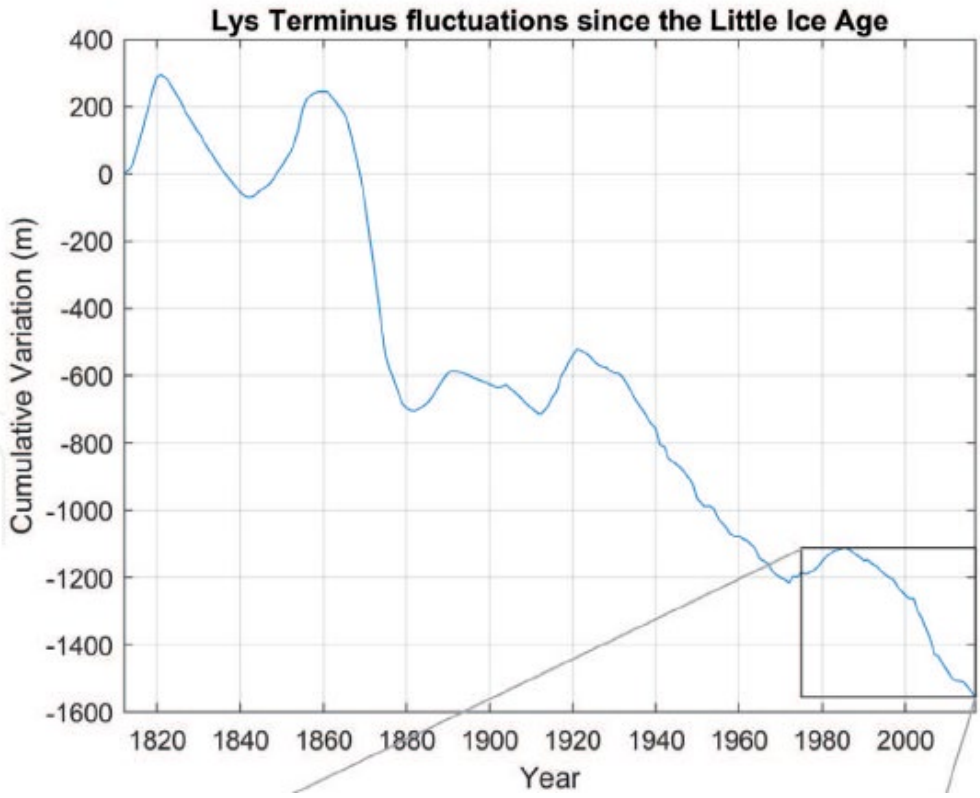


FIGURA 4 - Variazioni della fronte del Lys dalla Piccola Età Glaciale ad oggi

FONTE: Fugazza et al., 2020. Pubblicato su IntechOpen. Licenza CC-BY 3.0

TABELLA 1 - Stime sulla variazione relativa della fronte del Lys

A	B	C	D	E
Anno	Fluttuazione stim. con linea di flusso (m)	Ricostruzione stimata in letteratura (m)	Quota stimata con linea di flusso (m. s.l.m.)	Quota da report glac. (m. s.l.m.)
1868	n/a	n/a	2004.5	n.d.
1898	-788.6	-800	2161.4	n.d.
1922	+120.4	+100	2145.7	n.d.
1935	-298	-250	2191.7	n.d.
1942	-249	-200	2288.2	n.d.
1984	-221	-200	2350.5	(stim)2355
1996	-110	-100	2353.4	(stim)2355
2005	-129	-150	2358.6	(stim)2355
2019	-252.5	-200	(NE)2631.4	(stim)2650

FONTE: Colonne B e D: elaborazione propria con QGIS. Colonna C: dati estrapolati dalle stime di Fugazza et al., 2020; Colonna E: dati tratti dalla rivista GFDQ

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

Attraverso la lettura cartografica delle fronti glaciali si può osservare il momento di culmine dell'ultima grande fase espansiva, negli anni Sessanta dell'Ottocento, reso visibile dall'imponente arretramento che separa la fronte del 1868 da quella del 1898. Per quanto la serie temporale sia scarna, si possono osservare alcune fasi storiche minori come la pulsazione glaciale che porta la fronte del 1922 a superare di oltre 120 m la posizione di fine Ottocento. Non è possibile, invece, percepire la breve fase di espansione degli anni Ottanta del Novecento, mascherata dagli arretramenti cumulativi (e dal fatto che la serie temporale è molto diradata). È ben leggibile anche il regresso iniziato alla fine degli anni Venti del Novecento, secondo ritmi metrici non dissimili da quelli ricostruiti in letteratura. Per la seconda metà del Novecento si possono trarre, dalla cartografia, conclusioni concordanti con quelle del grafico di Fugazza et al. (2020): dopo una fase di pulsazioni che hanno oscillato attorno ad una certa quota di equilibrio (che potrebbe indicativamente essere fissata presso il "Roccione di Saltzen"[3]), si è innescato un regresso inarrestabile, tutt'oggi in atto, che ha contratto la lingua glaciale all'interno del plateau di ablazione (≈1942) separandola dal fronte attivo (≈2005) e consumandola del tutto, e minaccia oggi di approfondirsi ulteriormente, lambendo i bacini di alimentazione (≈2019).

3. Il Ghiacciaio di Pré de Bar. Test per una proposta di supporto al monitoraggio glaciologico

3.1 Area di studio

Il Ghiacciaio di Pré de Bar si sviluppa presso l'estremità nord della Val Ferret, e fa parte del vasto apparato glaciale del Massiccio del Monte Bianco (esposizione SE). Il bacino di alimentazione è racchiuso dalle creste del Monte Dolent (3819 m s.l.m.) a nord e dell'Aguille de Triolet (3874 m) a nord-ovest. Uno stretto scivolo glaciale di raccordo (2600 – 2300 m) comunica con il bacino di ablazione, dove, fino a non molti anni fa, si sviluppava un'imponente lingua glaciale valliva del tipo "a coda di volpe" (Cerutti et al., 2005), oggi completamente svanita.

Il Pré de Bar è stato un ghiacciaio di grande impatto visivo e di facile accessibilità, vista anche la quota relativamente bassa cui si è lungamente attestata la sua fronte valliva, e vanta una fra le più fitte collezioni documentali, oltre ad essere oggetto di campagne glaciologiche continuative da decenni. Ciò lo rende un contesto ideale per il test.

Il Pré de Bar, inoltre, riveste un ruolo interessante come sistema geomorfologico locale fortemente connesso con il sistema climatico globale. Già molti anni fa alcuni geografi (Cerutti, 1985) si erano accorti della peculiarità delle aree glacializzate del Massiccio del Monte Bianco. Questi rilievi, con andamento longitudinale (NE-SO), vengono direttamente investiti dai venti occidentali che spirano dall'Atlantico, carichi di umidità. Le condizioni per il glacialismo sono molto favorevoli, anche quando non lo sono altrove, come sul Monte Rosa, la cui disposizione orografica (esposizione sud dei versanti italiani, orientamento latitudinale) fa prevalere la circolazione atmosferica locale su quella sinottica (Cerutti, *cit.*). Sul Monte Bianco, pertanto, le precipitazioni nevose medie annue sono piuttosto generose (Cerutti, *cit.*), mentre nel bilancio di massa dei ghiacciai del Monte Rosa possono addirittura prevalere gli accumuli eolici e gravitativi rispetto alle nevi (Motta, 1995). Nonostante questo, oggi si assiste al regresso inarrestabile anche del ghiacciaio del Pré de Bar (Cerutti et al., 2005), che ha rapidamente perso l'intera porzione terminale. La domanda di ricerca è se la tecnica del *monoplotting* e l'analisi topologica in QGIS possano fornire un ausilio quantitativo nell'indagare queste dinamiche così veloci.

3.2 Metodo

Con una serie quasi continua di immagini recenti (archivio CGI) sono state ricostruite le ultime tre decadi di evoluzione del ghiacciaio. Si è optato per una analisi

3 Si tratta dell'imponente affioramento roccioso sulla sinistra idrografica del Lys, all'altezza del fronte del 1942. La sporgenza del substrato altera il percorso della lingua glaciale costringendola a curvare e generando quella discontinuità visibile sul bordo orientale.

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

aggregata secondo bienni, così da evitare che il rumore generato dai numerosi fattori di incertezza nascondesse i segnali annuali rendendo difficili le valutazioni di accuratezza. Sono state trovate fotografie adatte per tutti gli anni dispari dal 1993 al 2019, con l'eccezione del 1995.

3.2 Elaborazione dati e analisi vettoriale

La cartografia in Figura 5 costituisce l'output grafico del test. Le polilinee identificano l'assetto della lingua di ablazione in ognuno degli anni in cui sono state scattate le fotografie. Lavorando a risoluzione temporale così fine i rischi di errore sono notevoli, ma diventa interessante e proficuo riuscire a individuarli. WMT calcola in automatico una serie di errori: l'errore di scostamento sui pixel, l'errore sull'angolo di orientazione e l'errore sul raggio. Nella pratica, gli sviluppatori indicano che errori d'angolo inferiori a 0.1 sono da considerarsi ottimi. Anche in questo caso l'obiettivo di calibrazione è stato di ottenere un'incertezza prossima ai 2 m. Non sempre questo standard è stato raggiunto: con un tempo stimato di 5-6 ore di lavoro per ogni foto, in alcuni casi non è stato possibile scendere al di sotto dei 3-4 m (1997, 2011). In un solo caso non è stato possibile ottenere un errore migliore di 5 m (2009). Ciononostante, osservando sia la media sia i singoli dati, l'applicativo ha dato prova di poter raggiungere errori ben al di sotto della soglia prescelta. Le calibrazioni hanno generato un errore medio 2D di 2.6 m e uno 3D di 3.0 m. Gli errori minimi, tuttavia, si mantengono fra 0.5 e 0.7 m, senza mai superare 1.7 m. Ciò è rilevante, in quanto si possono ottenere precisioni molto elevate nelle parti di foto d'interesse (presso le fronti glaciali), anche se si rinuncia alla convergenza perfetta in altre parti dell'immagine (Conedera et al., 2018).

Sono proposti tre metodi di controllo per valutare l'integrazione di WMT e QGIS per la gestione dei dati quantitativi con analisi vettoriale. Gli esiti dei controlli sono confrontati con le misure reali degli arretramenti glaciali, tratte dalla rivista GFDQ.

3.3.1 Primo controllo: il metodo della linea di flusso

La linea di flusso glaciale è una linea teorica impiegata nella cartografia glaciologica (modello monodimensionale) per identificare la direzione seguita dal flusso glaciale spinto dalla gravità verso fondovalle (Zuo, Oerlemans, 1997; Wallinga, van de Wal, 1998). Essa attraversa l'intero profilo longitudinale del ghiacciaio, collegandone il punto più alto con quello più basso, e ha un andamento fortemente condizionato dalla topografia e dal comportamento plastico delle masse glaciali. Tende ad attraversare i punti di maggior spessore della massa glaciale, sovrapponendosi con il vettore di massima velocità. Pur non potendo dire granché sui regressi multidirezionali, può fornire una stima molto approssimativa ma molto rapida dell'entità del ritiro. In QGIS si possono sfruttare le intersezioni fra essa e le fronti digitalizzate per ricavare una sequenza di segmenti, la cui lunghezza offre una stima grezza del regresso lineare fra due posizioni.

3.3.2 Secondo controllo: il metodo dei capisaldi virtuali

L'impiego di capisaldi per misurare i movimenti frontali dei ghiacciai è una tecnica universalmente adoperata dagli operatori glaciologici sul campo. Sottraendo la nuova distanza della fronte dalla distanza misurata l'anno precedente, l'operatore ne calcola lo spostamento relativo. Una serie di regole empiriche disciplina la procedura (Desio, 1971). I capisaldi devono essere segnati con vernice e identificabili con codici univoci. Ne devono essere ricostruibili le coordinate, e deve trattarsi di elementi fissi come affioramenti rocciosi e massi erratici, purché siano sufficientemente grandi da non poter essere spostati da valanghe o dalle acque di fusione. Il numero dei capisaldi varia da due a cinque (di solito tre); esso dipende molto dalla conformazione della fronte glaciale, ma anche dalle peculiarità delle sue variazioni, che sono spesso anisotrope poiché la velocità di fusione del ghiaccio è condizionata da molti

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

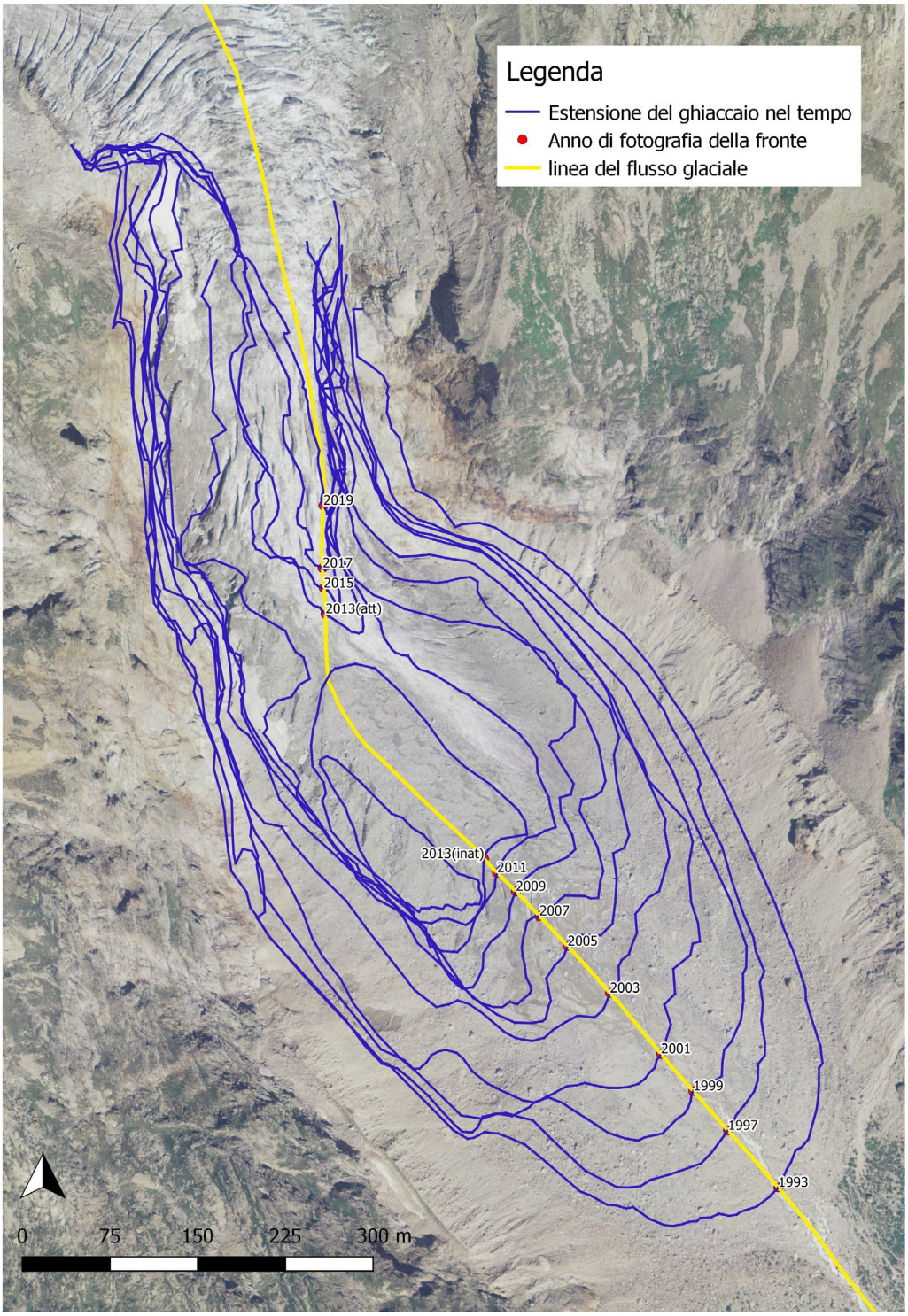


FIGURA 5 - Cartografia diacronica di breve periodo del Pré de Bar. Ricostruzione dello stato della lingua glaciale per il periodo 1993-2019

FONTE: Elaborazione propria (QGIS). Dati: CGI. Ortofoto: Geoportale Valle d'Aosta

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

fattori locali (substrato, copertura detritica, esposizione, ombra, ecc.) (Desio, 1971). Si è sperimentata questa tecnica in modo "virtuale", imitando in QGIS il metodo degli operatori sul campo. Le misure vanno prese con angolo fisso (l'azimut) e con un caposaldo centrato rispetto alla forma della fronte (Desio, 1971). Dal punto di vista vettoriale il principio è identico a quello della linea di flusso, solo che le misure degli arretramenti vengono calcolate lungo direttrici "strategiche". La semiretta uscente dal "caposaldo virtuale" interseca le fronti glaciali di interesse, e riunendo le intersezioni puntuali si generano segmenti che forniscono la misura degli arretramenti. Questo espediente, per quanto non immediato, sembra essere quello che meglio avvicina la tecnica degli operatori glaciologici. Se ne commentano gli esiti più avanti.

3.3.3 Terzo controllo: il metodo della minima distanza

La misura monodimensionale degli arretramenti glaciali è di fatto la stima della distanza media fra due linee spezzate. In QGIS, con la funzione di estrazione dei nodi, il vettore lineare è trasformato in un vettore di punti, così si può calcolare in automatico la distanza minima (*hub-line*) di ogni nodo dalla polilinea adiacente. Anche questo metodo, per quanto rapido, ha degli inconvenienti: se applicato all'intera lingua di ablazione, porta ad un risultato inconsistente, perché nella media ricomprende distanze che non subiscono un vero arretramento lineare, come quelle della colata di alimentazione, collocate a quote superiori. Per moderare questo effetto indesiderato, sono stati inclusi solo i nodi prospicienti la fronte, escludendo tutte le aree a monte (che, in effetti, non sono mai misurate dagli operatori).

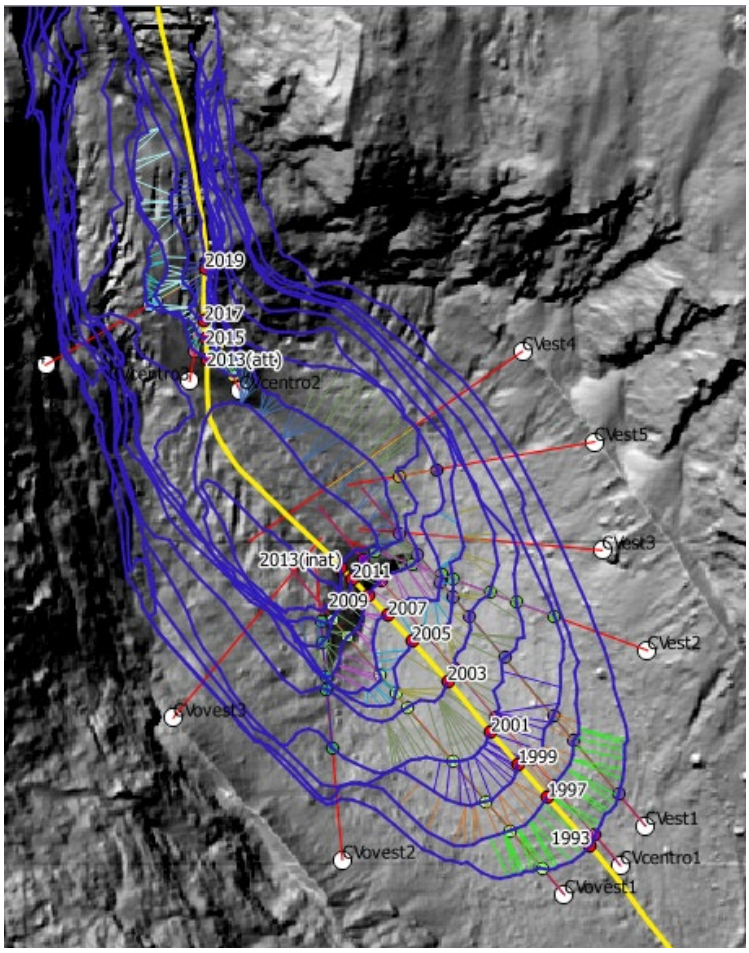


FIGURA 6 - I tre metodi di analisi vettoriale

FONTE: Elaborazione propria (QGIS)

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

3.4 Risultati

TABELLA 2 - Confronto fra i metodi di controllo sulla cartografia del Pré de Bar

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
ANNO	Arretramento medio misurato (m)	Somma arr. Medio (m)	Arretramento frontale misurato (m)	Somma arr. front. (m)	metodo linea di flusso (m)	metodo capisaldi virtuali (m)	metodo minima distanza (m)	quota fronte misurata (m. s.l.m.)	quota fronte (da linea di flusso) (m. s.l.m.)
1993	-12	n/a	-12	n/a	n/a	n/a	n/a	2070(stim)	2059,41
1994	-12	-64	-17,6	-68,1	-65,08	-61,9		2070(stim)	
1995	-17		-15,6					2070(stim)	
1996	-22		-22,16					2067	
1997	-13		-12,7				-53,89	2069,5	2068,79
1998	-22	-38	-22,7	-38,9	-44,95	-35,4		2072,2	
1999	-16		-16,2				-36,48	2073	2074,22
2000	-24	-40	-24	-40,7	-42,12	-49,7		2076	
2001	-16		-16,7				-43,05	2075	2076,87
2002	-27	-52	-31,7	-57,7	-67,98	-50,6		2078,5	
2003	-25		-26				-54,74	2078,5	2081,53
2004	-15	-37,7	-13,5	-36,2	-54,05	-35,8		2080,5	
2005	-22,7		-22,7				-32,07	2081	2084,75
2006	-32,5	-47,5	-32,5	-47,5	-35,35	-31,8		2083	
2007	-15		-15				-23,55	2083	2086,91
2008	-27	-57	-27	-52,0	-29,08	-41,0		2086,5	
2009	-30		-25				-33,27	2089	2088,64
2010	-30	-63	-30	-63,0	-22,78	-44,5		2090,5	
2011	-33		-33				-35,27	2094,5	2115,53
2012	-42	-62	-40	-57,5	-16,29	-40,5		2102	
2013	-20		-17,5				-34,98	(2106inatt) 2150att(stim)	2125,56
2014	(-30)	n/a	(-30)	n/a	-22,09	-20,3		(2113inatt) 2200att(stim)	
2015	NM		NM				-16,79	2233	2238,7
2016	NM	NM	NM	NM	-17,15	-24,6		2264	
2017	NM		NM				-23,25	NM	2249,74
2018	NM	-	NM	-	-53,64	-36,1		NM	
2019	-		-				-25,12	-	2270,64

FONTE: Colonne A, B, C, M, H: rivista GFDQ. Colonne E, F, G, I: elaborazione propria (QGIS)

Nella Tabella 2 sono presentate le misure effettuate con QGIS. I tre metodi riescono a misurare meglio gli arretramenti per i primi bienni (il periodo 1993-1997 è trattato come quadriennio), ma mostrano tutti una tendenza alla sottostima man mano che ci si approssima ad anni più recenti.

Il metodo dei capisaldi virtuali (colonna F) è quello che meglio riesce ad approssimare l'andamento dei regressi reali (Colonna D), producendo su tutto l'arco temporale degli scarti massimo (18,5m), minimo (0,4m) e medio (9,8m) inferiori agli altri metodi. Ciò può spiegarsi non solo con il fatto che la scelta delle misure ad

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

angolo fisso approssima meglio le scelte degli operatori sul campo, ma anche perché è l'unico dei tre controlli che può tenere conto in modo ponderato dell'asimmetria del regresso, che si fa vistosa a partire dal biennio 2008-2009.

I più forti scostamenti fra le misure in QGIS e i dati di campo si osservano proprio a partire dal biennio 2008-2009. Questo può non essere un caso, poiché il DTM utilizzato per i dati altimetrici contiene anche, inevitabilmente, una piccola componente di quota relativa allo spessore di ghiaccio dell'anno in cui è stato acquisito (2008). Una conferma di questo problema potrebbe essere lo scostamento fra le quote del fronte stimate dagli operatori sul posto e quelle calcolate con QGIS, che vedono una inversione da sovrastima a sottostima passando dal 2011 al 2013.

3.5 Gestione degli errori

Le incertezze di misura finora emerse possono essere studiate per impostare futuri test. Vi sono errori assoluti sistematici e accidentali. I primi derivano dai limiti operativi dell'algoritmo e dalle caratteristiche intrinseche degli strumenti adoperati. Solo gli errori sistematici generali (limiti di risoluzione geometrica, limiti di calibrazione) sono quantificabili. Gli altri sono invece l'espressione locale di distorsioni che insorgono in alcune parti dell'immagine.

Errori assoluti sistematici:

1. Il DTM ha una propria risoluzione: nei due casi di studio il passo è di 2 m. Elementi con dimensioni inferiori rischiano di essere mal georeferenziati, anche se sono ben visibili in fotografia. Il DTM può inoltre avere piccole imperfezioni genetiche proprie.
2. Il DTM i cui dati sono acquisiti in un momento in cui la valle è ancora glacializzata include in sé i dati altimetrici del corpo glaciale, perché la tecnologia impiegata non distingue fra superficie glaciale e rocciosa. Se l'utente deve digitalizzare una fronte glaciale che ricade in un punto in cui il DTM mostra una massa glaciale ormai inesistente, possono prodursi distorsioni critiche. È questo forse il più grave contributo all'inesattezza (sottostima) per i bienni 2009-2011 e 2011-2013, in cui le fronti ricadono nel mezzo della lingua glaciale, che era ancora ben sviluppata nell'anno di acquisizione del DTM (2008).
3. La risoluzione della fotografia è un ulteriore limite all'accuratezza della digitalizzazione. Se l'elemento ha dimensioni inferiori al singolo pixel, la sua digitalizzazione è inevitabilmente accompagnata da un certo margine di errore.
4. Il passaggio da 3D a 2D implica un'intensa contrazione delle distanze quando la scena inquadrata ha un forte sviluppo in profondità. In casi estremi la digitalizzazione rischia di divenire fittizia perché si perde una corrispondenza verosimile fra il vettore digitalizzato e i dati del DTM forzati nella foto. Questa è una delle sfide più difficili con cui ci si è dovuti scontrare. Nello studio dei ghiacciai la fotocamera è sempre rivolta da un punto intermedio della valle verso la sua testata, e nell'inquadratura ricade spesso buona parte del profilo longitudinale del truogolo glaciale, che di solito, per via dell'esarazione, presenta un'alternanza fra tronconi a forte pendenza e parti a debole acclività. In questi ultimi settori l'algoritmo concentra molti valori del DTM in una fascia ristretta di pixel. Se la fronte glaciale si colloca in questa fascia, i rischi di errore aumentano. L'uso accorto di un'ortofoto ad alta risoluzione può moderare le incertezze, consentendo per esempio di scartare digitalizzazioni inverosimili sulla base di indizi geomorfologici.
5. L'algoritmo non può operare in presenza di contropendenze. Ciò è intuitivo: il cono ottico attraverso cui un qualsiasi sensore acquisisce un'immagine della superficie terrestre non può ovviamente curvare per acquisire dettagli schermati da ostacoli collocati lungo l'asse ottico. Non è però un problema scontato, in quanto, producendo una cartografia, si preferirebbe ottenere una rappresentazione non discontinua dell'oggetto geografico. Una contropendenza anche piccola, magari difficile da notare per la qualità non eccellente della risoluzione, può creare distorsioni locali spesso insormontabili anche con la fotointerpretazione geomorfologica.

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

Ciò non toglie che possa essere tentato un recupero parziale dell'immagine, qualora il dato geografico sia di particolare rarità.

6. Infine, vanno ricordati gli errori di calibrazione. Si può però affermare che, durante il test, l'applicativo ha raggiunto livelli di errore quasi sempre soddisfacenti per gli scopi del presente lavoro. Inoltre, elevati errori di calibrazione non necessariamente dipendono da quanto la fotografia prescelta sia datata o a bassa risoluzione, mentre sono fortemente dipendenti dalla corretta stima del punto di presa.

Errori assoluti accidentali:

1. Un errore accidentale deriva dall'inevitabile componente interpretativa che l'intervento umano introduce con la scelta dei punti di controllo, che è rimessa alla discrezionalità dell'utente, e dipende dalle sue capacità di riconoscimento e fotointerpretazione di dettagli del paesaggio.
2. Alcuni fattori possono complicare la digitalizzazione, per esempio il fatto che la fotografia sia in bianco e nero, o presenti delle parti in ombra. Un elemento di incertezza molto grave e purtroppo ineliminabile è dato dalla copertura detritica. Nei punti di "ghiaccio nero" la difficoltà di digitalizzazione diventa molto elevata.

4. Discussione e conclusione

I metodi qui presentati sono solo un primo spunto, e ancora molto lavoro dev'essere svolto per comprendere fino a che punto l'estrazione di dati digitali da foto oblique possa generare dati validi per il monitoraggio di sistemi geomorfologici così complessi come le valli glacializzate. Tuttavia, i risultati raggiunti sono promettenti. La modifica dei DTM potrebbe minimizzare gli errori di scostamento individuati nel test, e alcuni accorgimenti, inseriti in una routine di studio "a distanza", potrebbero attenuare alcuni degli errori esposti, rendendo più rapida la produzione della cartografia.

1. Fissare una stazione fotografica con coordinate GPS per ogni scatto fa sì che l'algoritmo abbia già i valori per stimare il punto di presa.
2. Scattare la foto sempre dal medesimo punto può ridurre lo spazio di interpretazione dei dettagli del paesaggio aumentando la controllabilità del risultato.
3. Scattare la foto della fronte glaciale adottando una prospettiva obliqua, che minimizzi lo sviluppo dell'immagine in profondità, può diminuire la perdita di informazioni del DTM per l'effetto di "schiacciamento".
4. Scattare la foto evitando di inquadrare contropendenze può scongiurare problemi di offset e punti ciechi.
5. Scattare la foto sempre alla medesima ora del giorno, privilegiando le ore centrali, può consentire serie di immagini con illuminazione omogenea, evitando così di condizionare l'occhio dell'operatore.
6. Includere nell'inquadratura elementi del paesaggio inequivoci può alleggerire il lavoro di scelta dei punti di controllo.

Concludendo, la combinazione fra analisi vettoriale in QGIS ed estrazione di dati geografici con WMT consente di generare dati cartografici quantitativi su fenomeni naturali seguendo un flusso di lavoro controllabile. I dati quantitativi così generati si mostrano in accordanza con le misurazioni di campo e possono fornire una forma vicaria di stima approssimativa, nonostante alcune importanti limitazioni. Gli errori che possono inficiare la creazione di dati affidabili sono modellabili, e se ne può studiare la minimizzazione.

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

Bibliografia

Bozzini, C., Conedera, M., Krebs, P. (2011), "A new tool for obtaining cartographic georeferenced data from single oblique photos", In *Proceedings of the XXIIIrd International CIPA Symposium*, Praga, Repubblica Ceca, 1216, p. 6.

Bozzini C., Conedera M., Krebs P. (2012), "A New Monoplotting Tool to Extract Georeferenced Vector Data and Orthorectified Raster Data from Oblique Non-Metric Photographs", *International Journal of Heritage in the Digital Era*, , 1(3), pp. 499-518.

Cerutti V. (1985), "Le variazioni glaciali e climatiche durante l'ultimo secolo nei gruppi del Monte Bianco e del Monte Rosa", *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 8, pp. 124-136.

Cerutti V. (2001), "Le oscillazioni della quota dell'isoterma 0°C e le variazioni dei ghiacciai del Monte Bianco", *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, *Supplementi*, pp. 29-39.

Cerutti V., Franchino A., Bianchi Potenza B., Fusinaz A., (2005) "Il Ghiacciaio di Pré-de-Bard", *Relazione definitiva 200*5, Archivi del CGI, sede di Torino.

Conedera M., Bozzini C., Ryter U., Bertschinger T., Krebs P. (2018), "Using the Monoplotting Technique for Documenting and Analyzing Natural Hazard Events", *IntechOpen* http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.77321

Conedera M., Bozzini C., Scapozza C. (2015), "La monofotogrammetria applicata al settore forestale. Nuovo software sviluppato dal WSL", *Rivista Forestale Sherwood*, 210, pp. 27-30.

Desio A. (1971), (aggiornamento a cura di Severino Belloni), *Osservazioni Glaciologiche*, *Manualetto di istruzioni scientifiche per alpinisti*, III ed., Comitato Scientifico del CAI, 1971. Doi:10.1080/07038992.2017.1384309.

Fugazza D., Senese A., Azzoni R. S., D'Agata C., Cat Berro D., Mercalli L., Ventura F., Smiraglia C., Diolaiuti G. A. (2020), "Variations of Lys Glacier (Monte Rosa Massif, Italy) from the Little Ice Age to the Present from Historical and Remote Sensing Datasets", *IntechOpen*, http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.91202

Gabellieri N., Watkins C. (2019), "Measuring long-term landscape change using historical photographs and the WSL Monoplotting Tool", *Landscape History*, 40(1), pp. 93-109, https://doi.org/10.1080/01433768.2019.1600946

Haff P. K., (2003), "Neogeomorphology, Prediction, and the Anthropic Landscape", in Wilcock P., Iverson R. M. (a cura di), *Prediction in Geomorphology*, AGU Series 135, American Geophysical Union, pp. 15-26. https://doi.org/10.1029/135GM02

McCaffrey D. R., Hopkinson C. (2017), "Assessing Fractional Cover in the Alpine Treeline Ecotone Using the WSL Monoplotting Tool and Airborne Lidar", *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43(5), pp. 504-512.

Motta M. (1995), "Studio del rapporto accumulo/ablazione in un ghiacciaio alpino di grandi dimensioni: l'esempio del ghiacciaio del Lys (Monte Rosa)", *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 18, pp. 305-313.

Oerlemans J. (1986), "An Attempt to Simulate Historic Front Variations of Nigardsbreen, Norway", *Theoretical and Applied Climatology*, 37, pp. 126-135.

Strada E. (1987), "Le variazioni del ghiacciaio del Lys dalla «Piccola glaciazione» ai nostri giorni", *Natura Bresciana*, 24, pp. 275-288.

Szabó J., Dávid L., Lóczy D. (2010, a cura di), *Anthropogenic Geomorphology. A guide to man-made landforms*, Springer, Dordrecht - Heidelberg. DOI 10.1007/978-90-481-3058-0

Triglav-Čekada M., Bric V., Zorn M. (2014), "How to decide which oblique image has the highest mapping potential for monoplotting method: a case studies on river erosion and floods", *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5), pp. 379-384.

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)

Wallinga J., van de Wal R. S. W. (1998), "Sensitivity of Rhonegletscher, Switzerland, to climate change: experiments with a one-dimensional flowline model", *Journal of Glaciology*, 44(147), pp. 383-393.

Wiesmann S., Steiner L., Pozzi M., Bozzini C., Bauder A., Hurni L. (2012), "Reconstructing Historic Glacier States Based on Terrestrial Oblique Photographs", *Proceedings - AutoCarto 2012* - Columbus, Ohio, USA.

Zuo Z., Oerlemans J., (1997), "Numerical modelling of the historic front variation and the future behaviour of the Pasterze glacier, Austria", *Annals of Glaciology*, 24, pp. 234-241.

ISSN 2282-572X (online)
ISSN 0044-9733 (print)