

Sentieri effimeri

Gli itinerari glaciologici fra scienza e divulgazione

di Claudio Smiraglia⁽¹⁾, Antonella Senese^(1, 2), Michele Di Biase^(2, 3), Roberto Ambrosini^(1, 2), Roberto Sergio Azzoni^(1, 2), Daniele Bocchiola^(1, 4), Giuseppe Cola^(1, 3), Massimo Favaron⁽⁵⁾, Davide Fugazza^(1, 2), Daniela Marzano⁽²⁾, Stefano Morosini^(5, 6), Luca Pedrotti⁽⁵⁾, Giovanni Prandi^(1, 3), Riccardo Scotti^(1, 3), Andrea Toffaletti^(1, 3), Michele Zucali⁽²⁾, Manuela Pelfini^(1, 2), Guglielmina Adele Diolaiuti^(1, 2)

1. Fondazione Glaciologica Italiana ETS (già Comitato Glaciologico Italiano - CGI)
2. Università degli Studi di Milano
3. Servizio Glaciologico Lombardo - SGL
4. Politecnico di Milano
5. Parco Nazionale dello Stelvio - ERSAF
6. Università degli Studi di Bergamo

Riassunto

I sentieri glaciologici rappresentano strumenti efficaci per comunicare gli effetti del cambiamento climatico nei paesaggi d'alta montagna. Questo contributo analizza l'evoluzione, le finalità e le sfide di tali itinerari. L'articolo riflette inoltre sulla natura effimera di questi percorsi, soggetti a rapide trasformazioni geomorfologiche, e sulla necessità di strategie comunicative e gestionali adattive. I sentieri glaciologici si configurano così come laboratori a cielo aperto, capaci di coniugare educazione ambientale, turismo sostenibile e consapevolezza climatica. Una particolare attenzione viene dedicata al Ghiacciaio dei Forni, laboratorio naturale nel Parco Nazionale dello Stelvio, e all'evoluzione del suo "sentiero glaciologico". Qui il nuovo sentiero "A. Stoppani – A. Desio" integra osservazione diretta, monitoraggio scientifico, tecnologie digitali e accessibilità inclusiva. Lungo il percorso, tredici punti di sosta documentano il regresso glaciale e offrono contenuti multimediali in tre lingue. Il progetto adotta un modello di governance partecipata e propone un approccio replicabile per altre aree alpine.

Abstract: Ephemeral paths: the "glaciological trails" between science and dissemination

Glaciological trails are effective tools for communicating the impacts of climate change in high mountain landscapes. This paper explores their evolution, purposes, and challenges. The article also reflects on the ephemeral nature of these trails, shaped by rapid geomorphological changes, and the need for adaptive communication and management strategies. Glaciological trails thus emerge as open-air laboratories, combining environmental education, sustainable tourism, and climate awareness. A particular focus is dedicated to the Forni Glacier in the Stelvio National Park, a natural laboratory for environmental monitoring, and to its glaciological trail. Here the new "A. Stoppani – A. Desio" trail integrates direct observation, scientific instrumentation, digital technologies, and inclusive accessibility. Thirteen observation points document the glacier's retreat and offer multilingual multimedia content. The project adopts a participatory governance model and proposes a replicable approach for other Alpine areas.

Introduzione: la crisi del glacialismo

Che il paesaggio dell'alta montagna glacializzata stia subendo rapide trasformazioni in rapporto soprattutto alla crisi climatica in atto e che queste trasformazioni stiano accelerando negli ultimi decenni, è un dato ormai acquisito a livello scientifico, ora anche percepito a livello della pubblica opinione. Fra gli effetti più evidenti vanno sottolineati la degradazione della criosfera, la variazione di bio- e geo- diversità, l'incremento di pericolosità e rischio, il deterioramento di quello che in senso generale potremmo definire "panorama montano". Qui, la degradazione della criosfera trova la sua manifestazione più evidente e di maggior impatto paesaggistico nella crisi del glacialismo.

Questa crisi è caratterizzata da imponenti riduzioni dei ghiacciai delle catene montuose (Hugonnet *et al.*, 2021), con perdite di massa che dal 2000 al 2023 hanno superato quelle delle calotte polari (The GlambIE Team, 2025) e con estinzioni già avvenute, o in corso, di migliaia di ghiacciai (WGMS, 2025), tutti fenomeni che hanno

provocato fra il 1976 e il 2024 un incremento medio del livello marino di circa 25 mm (Dussailant *et al.*, 2025).

Per quanto riguarda le Alpi si osservano riduzioni areali e di lunghezza (Paul *et al.*, 2020), che portano alla frammentazione dei ghiacciai in corpi glaciali di minori dimensioni, con la trasformazione dei ghiacciai vallivi in ghiacciai montani e con la transizione da ghiacciai veri e propri a *glacieret* (glacionevati). Inoltre, si assiste all'incremento della copertura detritica sopragliaciale con la transizione da *debris free glacier* a *debris covered glacier*, l'ampiamiento delle aree proglaciali e la loro ricolonizzazione da parte della vegetazione e della fauna. Emerge dunque la necessità di far conoscere le caratteristiche peculiari, le dinamiche e soprattutto la fragilità dei ghiacciai, una fra le più rilevanti espressioni del paesaggio alpino. Quest'ultimo con l'insieme delle sue componenti biologiche e geologiche, può essere considerato un bene naturale risultato di relazioni complesse che è necessario conoscere, proteggere e valorizzare (Pelfini *et al.*, 2005).

Modalità di divulgazione: i sentieri glaciologici

Per favorire la divulgazione di queste tematiche e per facilitare in particolare la comprensione e l'osservazione degli elementi geomorfologici e naturalistici connessi all'ambiente glaciale attuale e passato, si è diffusa dalla fine del secolo scorso la realizzazione di particolari itinerari, denominati "sentieri glaciologici" (Bonardi, 2001).

Si tratta di percorsi escursionistici, solitamente con limitata difficoltà di percorrenza, creati con finalità dichiaratamente didattiche. Il loro scopo principale è infatti quello di evidenziare il valore e le singolarità degli ambienti attualmente (o in passato) glacializzati. In particolare questi sentieri dovrebbero offrire la possibilità di cogliere integralmente il significato dei ghiacciai come beni geomorfologici o geomorfositi, mostrandone gli attributi culturali, socioeconomici, scenici e scientifici (Giardino e Mortara, 1999; Pelfini *et al.*, 2004). A questa finalità si aggiunge quella divenuta ultimamente più importante, cioè la possibilità di osservare direttamente uno degli effetti più imponenti e significativi della crisi climatica, ossia la rapida, intensa e drammatica riduzione delle masse glaciali.

Uno dei più noti e frequentati a livello internazionale è sicuramente il Sentiero del Ghiacciaio del Morteratsch in Svizzera, che porta all'osservazione del ghiacciaio omonimo situato nel gruppo del Bernina, definibile fino a un decennio fa "l'unico ghiacciaio raggiungibile con un passeggiato". L'itinerario quasi completamente pianeggiante portava infatti fino alla fronte del ghiacciaio (Maisch *et al.*, 1993), oggi raggiungibile solo con una salita ripida su placche montonate. L'ammodernamento continuo delle modalità di comunicazione lungo l'itinerario e online, che tracciano l'evoluzione del ghiacciaio dalla Piccola Età Glaciale, e soprattutto le attuali accresciute difficoltà nel raggiungimento della fronte, ne fanno veramente un esempio significativo per questo tipo di itinerari.

Sentieri glaciologici: finalità e problemi

La progettazione e la realizzazione di questo tipo di itinerari presentano chiaramente gli stessi problemi di base di quelle dei sentieri genericamente definibili "di montagna", spesso amplificati dalle morfologie aspre e dalla quota talora elevata, cui si aggiungono aspetti peculiari legati alle loro finalità non esclusivamente escursionistiche (per le modalità operative e gestionali nel campo della sentieristica montana si può consultare il sito del Club Alpino Italiano (CAI) <https://www.cai.it/organizzazione/strutture-operative/struttura-operativa-sentieri-e-cartografia-sosec/>).

A proposito delle caratteristiche del tutto peculiari dei sentieri glaciologici si può in sintesi affermare che, una volta chiarite le finalità della loro progettazione, e ovviamente della loro percorrenza, è necessario trovare un equilibrio fra esigenze spesso fra di loro contrastanti. Riguardo alle finalità va ribadito che l'obiettivo principale dei sentieri glaciologici deve essere quello di favorire la conoscenza diretta dei ritmi accelerati di evoluzione dell'ambiente naturale collegati alla crisi climatica (Smiraglia *et al.*, 2005). In effetti la visita, debitamente guidata, alla fronte di un ghiacciaio, soprattutto se ripetuta nel corso della stessa estate, può offrire al visitatore impressioni emotivamente forti e incancellabili sulla rapidità delle trasformazioni del paesaggio glaciale. Dove fino a poche settimane prima erano ben visibili pareti o ripidi

In Italia la prima realizzazione di questo tipo risale al 1992 per opera del Servizio Glaciologico Lombardo (SGL) con il Sentiero Glaciologico "Vittorio Sella" al Ghiacciaio del Ventina nel gruppo del Disgrazia in Valtellina (SGL, 1992; SGL, 2010). Nel 1995 seguì il Sentiero Glaciologico "del Centenario" al Ghiacciaio dei Forni, nel gruppo Ortles-Cevedale, sempre in Valtellina, realizzato dal Comitato Glaciologico Italiano (CGI) in occasione dei cento anni dalla sua fondazione (Smiraglia *et al.*, 1995). Seguirono il Sentiero Glaciologico "Luigi Marson" al Ghiacciaio di Fellaria, sempre a cura del SGL (Arzuffi *et al.*, 1997) e poco dopo quelli della Val Martello (Secchieri, 1998) e dell'Antelao (Coppola, 1998). Fra le ultimissime realizzazioni vi sono il "Giardino dei Ghiacciai", sentiero glaciologico per la valorizzazione degli storici segnali posti sulle fronti del Ghiacciaio della Valnontey - Gran Paradiso (Giardino e Mortara, 2022), il Sentiero Glaciologico "Giuseppe Nangeroni - Italo Belotti" al Ghiacciaio di Dosedè Est in Val Viola, Alta Valtellina a cura dell'SGL nel 2023 e quella del Sentiero Glaciologico "Prayer", che guida alla visita dei ghiacciai della Valpelline (Valle d'Aosta), a cura della Fondazione Glaciologica Italiana ETS (già "Comitato Glaciologico Italiano - CGI") nel 2025.

Attualmente in Italia i sentieri glaciologici "ufficiali" (intendendo con questa definizione gli itinerari appositamente segnalati e descritti in Guide dedicate) sono una decina, distribuiti nei vari settori delle Alpi Italiane, con una sensibile concentrazione nelle Alpi Centrali. In realtà una recente Guida degli itinerari glaciologici sulle montagne italiane, pubblicata dalla Società Geologica Italiana (SGI) a cura del CGI, ne elenca ben ventidue, dalle Alpi Marittime fino alle Alpi Giulie e al Gran Sasso negli Appennini (SGI-CGI, 2017; Smiraglia *et al.*, 2017; Smiraglia & Casarotto, 2018).

pendii di ghiaccio "vivo", si osservano invece complessi detritici di varia granulometria (dai blocchi isolati plurimetrici ai clasti centimetrici, fino agli strati sottili di limo o addirittura di argilla) e diversa morfometria (dai frammenti rocciosi squadrati e spigolosi di trasporto sopraglaciale ai clasti arrotondati, fino alle classiche morfologie da trasporto subglaciale con clasti striati a "ferro da stiro" o a "proiettile"). Il tutto spesso accompagnato da blocchi di ghiaccio di varie dimensioni derivanti dal crollo di volte, caverne e archi di ghiaccio, che fino a poco prima erano talora ben osservabili nella zona frontale del ghiacciaio. A questo solitamente si aggiungono le acque di fusione ruscellanti o incanalate, che percorrono il detrito e che creano nuove morfologie altrettanto effimere, oppure si raccolgono in laghi di varie dimensioni, dapprima di contatto glaciale, successivamente staccati rispetto alla fronte. Percorrere un sentiero glaciologico fino alla fronte glaciale attuale, dovrebbe quindi suggerire che il ghiacciaio in questo quadro evolutivo si configura veramente come a *canary in a coalmine* e si propone come il segnale più avvertibile, pronto e significativo della crisi climatica in atto (Diolaiuti & Smiraglia, 2001).

In sintesi la progettazione di un sentiero glaciologico dovrebbe tendere all'armonizzazione di interessi diversificati e all'equilibrio fra esigenze molteplici, che potrebbero così essere sintetizzate:

- interesse scientifico;
- interesse escursionistico;
- interesse paesaggistico;
- accessibilità rispetto alle difficoltà tecniche di percorrenza;
- tipologia della segnaletica e della comunicazione;
- riduzione dell'impatto paesaggistico;
- rapida evoluzione geomorfologica.

Ciascuno di questi elementi, cui si dovrebbe chiaramente aggiungere l'individuazione della tipologia di pubblico al quale il sentiero vorrebbe rivolgersi, meriterebbe un approfondimento.

In questa sede basterà osservare come in primo luogo l'interesse scientifico, quello escursionistico e quello paesaggistico, dovrebbero armonizzarsi. In altre parole e in un caso ideale, il raggiungimento di una fronte glaciale dovrebbe avvenire con un percorso non particolarmente lungo e tecnicamente poco impegnativo, con evidenze ben osservabili delle tracce morfologiche delle fasi precedenti di ritiro e di avanzata e con possibilità di osservazioni non solo glaciologiche, ma anche di altri sistemi morfodinamici (paraglaciale, periglaciale, gravitativo, fluviotorrentizio, ecc.). Ideale sarebbe anche la possibilità durante l'escursione di osservare elementi non solo del paesaggio naturale genericamente definibile "geologico", ma anche di quello vegetale e animale, nelle sue fasi di progressiva colonizzazione delle aree deglaciate, nonché di quello antropico. Si arriverebbe così all'approfondimento delle relazioni esistenti, ma anche di quelle potenziali, fra il patrimonio glaciologico-geomorfologico-geologico del paesaggio e le risorse naturali, storiche e culturali che emergono durante la percorrenza degli itinerari glaciologici. La qual cosa può certamente favorire un turismo a impronta geo(-morfo)logica che si integra con il concetto più generale

La sfida dei sentieri effimeri

Quanto accennato sulle difficoltà tecniche di percorrenza dei sentieri glaciologici deve essere approfondito tenendo conto dell'accelerazione dei processi geomorfologici in atto negli ultimi decenni in alta montagna (ma ovviamente non solo in questo contesto ambientale!). Nel campo più strettamente alpinistico ed escursionistico numerose sono le ricerche scientifiche volte a evidenziare le trasformazioni recenti degli itinerari di ascensione e di escursione, ad analizzarne le cause e soprattutto a sottolineare l'incremento di pericolosità e rischio a queste collegate, oltre a proporre metodologie di adattamento (si vedano per esempio Mourey *et al.*, 2019, che analizzano fra l'altro l'evoluzione della "via normale" francese del Monte Bianco; Ritter *et al.*, 2011; Salim *et al.* 2021; Smiraglia & Mortara, 2023). Di fatto anche i sentieri glaciologici stanno subendo una rapida evoluzione morfologica (e anche delle modalità di percorrenza e di pericolosità e quindi di rischio) che, seguendo Mourey *et al.*, 2019, possono essere ascritti: 1) alla degradazione del permafrost; 2) alla fusione della copertura di ghiaccio e neve; 3) ai processi paraglaciali; 4) al regresso glaciale.

Per quanto riguarda i sentieri glaciologici va sottolineato che nella quasi totalità degli itinerari esistenti sulle Alpi Italiane non vi è la percorrenza diretta di ghiacciai e quindi le trasformazioni derivano sostanzialmente dai processi paraglaciali e dalla fusione del permafrost, oltre che

di turismo culturale sostenibile. Altri requisiti interessanti per il sentiero glaciologico "ideale" potrebbero essere il percorso "ad anello", che offra quindi la possibilità di un ritorno con osservazioni diverse rispetto all'andata (e anche la possibilità di osservazione degli stessi elementi paesaggistici già osservati, ma da una diversa prospettiva), nonché la presenza di spazi "panoramici" aperti, che permettano suggestioni anche estetiche sulle cime e le valli circostanti.

A proposito poi di accessibilità e difficoltà tecniche di percorrenza, se si è d'accordo sul fatto che questa tipologia di itinerari e soprattutto di messaggio culturale e scientifico che si vuol trasmettere, debba coinvolgere un pubblico il più vasto possibile, è opportuno che i "sentieri" in oggetto non presentino difficoltà tecniche elevate.

Da questo punto di vista ci si può riferire alla classificazione della Commissione Centrale di Escursionismo del CAI, che suddivide gli itinerari con difficoltà crescente in Turistici (T), Escursionistici (E), per Escursionisti Esperti (EE). (<https://www.cai.it/organizzazione/organismi-tecnici-centrali/commissione-centrale-escursionismo-e-cicloescursionismo/>).

Se ci riferisce alle Guide SGI-CGI sopra citate, si constata che la quasi totalità degli itinerari glaciologici è classificata (E), in qualche caso con dei tratti (EE), mentre in solo due casi si indicano tratti di EEA (ci si riferisce a itinerari per escursionisti esperti dotati di attrezzature di autoassicurazione per la percorrenza delle cosiddette "vie ferrate").

In tempi recenti, la progettazione dei sentieri glaciologici ha iniziato a considerare anche l'accessibilità per persone con mobilità ridotta, famiglie con bambini e nuovi fruitori come ciclisti con e-bike (Senese *et al.*, 2023).

L'uso di *joellettes* e altri ausili ha permesso di estendere la fruizione a un pubblico più ampio, rendendo il messaggio scientifico e ambientale più inclusivo e democratico.

dall'intervento antropico. Nel primo caso le zone a più rapida evoluzione sono le morene, soprattutto laterali, per le quali si assiste a un incremento delle dimensioni, a un aumento dell'inclinazione dei versanti, soprattutto quelli interni, e a una loro rapida destabilizzazione con un incremento delle cadute di sassi, delle frane e di colate detritiche. Quest'ultimo fenomeno caratterizza anche i versanti non morenici, grazie anche all'accelerata fusione del permafrost. Altre zone in rapida evoluzione sono quelle proglaciali con intensificazione dei processi di erosione e accumulo a opera del ruscellamento diffuso e soprattutto dei torrenti, la cui portata, derivante in massima parte dalla fusione nivale e glaciale, è estremamente irregolare e spesso imprevedibile. Sulla percorribilità dei sentieri glaciologici certamente più limitati sono gli effetti dei processi strettamente glaciali, in quanto gli itinerari solo raramente portano a contatto diretto con la fronte o, come già detto, prevedono l'attraversamento del ghiacciaio; in questo caso le modalità del regresso possono dare origine a collassi delle fronti e di caverne subglaciali, al crollo di frammenti rocciosi lungo le pareti di ghiaccio più ripide e alla formazione di laghi di contatto glaciale, solitamente molto effimeri.

Nel caso di attraversamento o di percorso direttamente sul ghiacciaio, intervengono ovviamente tutti quei fenomeni che caratterizzano le ascensioni su questo tipo di



Figura 2 – La lingua del Ghiacciaio Morteratsch con la vetta del Pizzo Bernina. La lingua è ormai osservabile solo risalendo le ripide placche rocciose che sovrastano il termine del Sentiero - ph Claudio Smiraglia



Figura 3 – Il massiccio del Monte Rosa visto dal Rifugio Pastore (Piemonte) lungo il Sentiero Glaciologico del Parco Naturale Alta Valsesia - ph Claudio Smiraglia



Figura 4 – Il Ghiacciaio del Ventina (Gruppo del Disgrazia, Lombardia) visto dall'inizio del Sentiero Glaciologico "Vittorio Sella", il primo itinerario di questo tipo realizzato dal Servizio Glaciologico Lombardo nel 1992 - ph Claudio Smiraglia



Figura 5 – Morene frontali della Piccola Età Glaciale visibili lungo il Sentiero Glaciologico "Vittorio Sella" al Ventina - ph Claudio Smiraglia

terreno, come l'incremento numerico e dimensionale dei crepacci, il crollo di seracchi, le modifiche dell'idrologia sopragliaciale. Di fatto nella progettazione di un sentiero glaciologico va tenuto conto che si tratterà di un percorso "effimero", soprattutto nel suo settore più elevato e che la sua evoluzione geomorfologica potrà avvenire in tempi relativamente brevi (questo per esempio nel caso di eventi di precipitazioni concentrate o di periodi di rapido incremento termico e di conseguente brusco aumento della portata dei corsi d'acqua ad alimentazione nivo-glaciale); sarà quindi indispensabile prevenire una serie di interventi volti a garantirne la percorribilità

La sfida della comunicazione

A fronte di questa rapida evoluzione dei percorsi alpinistici ed escursionistici, e quindi anche dei sentieri glaciologici, che si sono definiti in modo efficace "effimeri", e che spesso si concretizza in un incremento della loro pericolosità, si apre un'altra sfida: quella della comunicazione. È questo un settore in cui rapidità e dimensioni del cambiamento possono davvero essere paragonate a quelle della morfodinamica alpina. Quando in Italia sono stati creati i primi sentieri glaciologici, la divulgazione della loro realizzazione con tutto il corollario di informazioni conseguenti (descrizione dell'itinerario, note scientifiche, informazioni per la percorrenza, difficoltà tecniche, ecc.) era affidata soprattutto a guide cartacee (per esempio SGL, 1992 per il Ventina; Smiraglia *et al.*, 1995 per i Forni; Secchieri, 1998 per la Val Martello; Coppola *et al.*, 1998 per l'Antelao). Le metodologie per divulgare informazioni, e quindi caratteristiche e fattori attrattivi di questi itinerari, utilizzate da questi volumi sono paragonabili, fatte le debite proporzioni, a quelle delle ben note Guide dei Monti d'Italia editi dal Club Alpino Italiano e dal Touring Club Italiano, mitici libri sui quali si sono formate intere generazioni di alpinisti e di appassionati di montagna, pubblicati dall'inizio del secolo scorso fino al 2013. L'abbandono di questa collana può essere stato sicuramente dovuto a problemi editoriali o economici, ma certamente deve avere influito anche la constatazione che pochi anni dopo la pubblicazione del volume, la descrizione degli itinerari, soprattutto per quelli delle aree glaciali, diveniva del tutto desueta e inadeguata.

Anche per la descrizione dei sentieri glaciologici è quindi necessario utilizzare nuove strategie ed è indispensabile che le Guide cartacee vengano sostituite, o al limite affiancate, da tutte quelle tecnologie che offre la comunicazione moderna; ciò in particolare è indispensabile per aggiornare in tempi rapidi Guide e manuali e per attrarre il pubblico giovane che è sempre più connesso a Internet e utilizza massivamente cellulari, computer e altri device elettronici. Le nuove modalità di comunicazione includono l'uso di QR code collocati lungo il percorso, che permettono l'accesso a contenuti multilingue (italiano, inglese, tedesco) sotto forma di testi, immagini e video. Alcuni progetti pilota hanno anche sperimentato l'uso di realtà virtuale e video immersivi a 360°, utili per eventi divulgativi in città e per avvicinare il pubblico giovane alla glaciologia. La rapidità dell'aggiornamento delle condizioni di percorribilità dell'itinerario, nonché ovviamente delle condizioni meteorologiche, diventa essenziale per ridurre i rischi della percorrenza di questi sentieri, soprattutto in quelle zone dove i processi geodinamici di tipo paraglaciale sono in evidente accelerazione ed esten-

o addirittura a modificarne il tracciato, come è avvenuto in tempi recenti per alcuni sentieri di ghiacciai italiani, come quelli dei ghiacciai del Ventina, dei Forni, di Solda. Un cenno meritano anche le trasformazioni derivanti dai processi antropici, che solitamente si concretizzano in sbancamenti o in altre opere talora invasive, volte ad ampliare la larghezza del sentiero e a ridurre la ripidezza e le irregolarità del percorso. Questo tipo di intervento sta caratterizzando recentemente numerosi itinerari con il proposito certamente di rendere più agevole e quindi meno rischioso il percorso, ma anche di agevolarne l'accesso per le mountain bike.

sione areale. La risposta alla rapida evoluzione geomorfologica e meteo-climatica per una frequentazione il più possibile sicura dell'alta montagna va dunque ricercata in una serie di strategie basate su tre gruppi di processi:

1. informativi;
2. educazionali;
3. adattativi.

Il primo gruppo, come si è accennato, deve basarsi su una divulgazione il più possibile rapida, aggiornata e attendibile rispetto alle condizioni di percorribilità dei sentieri, soprattutto nel caso di eventi parossistici (frane, colate detritiche, ecc.).

Il secondo deve diventare un compito essenziale per gli enti e le strutture che si occupano di montagna e di scienza della montagna perché i possibili frequentatori dei sentieri glaciologici (e ovviamente di ogni altro tipo di percorso) abbiano chiare non solo le difficoltà tecniche e le possibili pericolosità e i conseguenti rischi degli itinerari, ma anche le proprie capacità e i propri limiti fisiologici e psicologici.

Il terzo gruppo di processi, l'adattamento, vede l'utilizzo di tutti quegli interventi di modifica concreta degli itinerari utili per ridurre i rischi di percorrenza (per esempio collocazione di attrezzature fisse di sicurezza, come catene, gradini, ponti, ecc., cui si possono aggiungere sbancamenti, disgaggi, pulizia dei versanti e altre tecniche di geingegneria). In questo gruppo si può inserire anche la cartellonistica che deve essere certamente informativa sullo svolgersi dell'itinerario, ma deve soprattutto, quando necessario, indicare possibili pericoli e in casi estremi segnalare che il sentiero non è più percorribile.

A tutto ciò si potrebbe aggiungere un adattamento definibile "psicologico", basato sulla necessità di adattarci e di cambiare i nostri comportamenti in relazione ai cambiamenti della montagna, ben sintetizzato da quanto scritto dal Club Alpino Accademico Orientale dopo la tragedia della Marmolada del luglio 2022: "Di questi tempi, dove la velocità del cambiamento è elevata, dobbiamo imparare ad adattare rapidamente le nostre abitudini e obiettivi, ricordando che anche la rinuncia o il cambio di programma, non rappresentano una sconfitta ma una forma di intelligenza adattativa".

Per concretizzare le strategie sopra indicate è anche necessario ripensare il modello di progettazione e di gestione dei sentieri glaciologici, finora affidati in massima parte a ricercatori e associazioni di volontariato. Diventa quindi indispensabile il coinvolgimento delle autorità locali ai vari livelli, delle Guide alpine, delle scuole, dei parchi e aree protette (ovviamente se il percorso si col-

loca al loro interno). Tutto ciò, pur tenendo conto delle complicazioni e delle lungaggini anche burocratiche che questo tipo di gestione può creare, dovrebbe favorire la realizzazione di un "prodotto" che possa soddisfare le necessità e le richieste anche di coloro che vivono in quel territorio e di quel territorio.

La necessità di un lavoro corale e comunitario, con la creazione di un vero e proprio network territoriale, diventa evidente, per esempio, nel controllo delle condizioni di percorribilità dei sentieri, negli interventi di manutenzione, nella divulgazione il più possibile rapida di interruzioni o modifiche di percorso, nella segnalazione di rischi, nella progettazione e realizzazione di una segnaletica a ridotto impatto ambientale.

A questo proposito, sempre in ambito plurigestionale e comunitario, andrebbe discussa la contraddizione di base insita nella volontà di divulgare e pubblicizzare itinerari in ambienti fragili come quello dell'alta montagna glacializzata con l'intento di richiamare un numero di fruitori sempre più elevato. L'auspicato incremento della frequentazione turistica è infatti un fenomeno che, se non opportunamente gestito attraverso efficaci adattamenti

educazionali, potrebbe portare a forme di *over tourism* che possono modificare o addirittura annullare quelle caratteristiche ambientali originali che fungevano da fattore polarizzante per l'itinerario in questione. I sentieri glaciologici devono quindi inserirsi in un quadro generale non solo di divulgazione della conoscenza, ma anche di sostenibilità e rispetto ambientale.

Come unico esempio di questa complessa e variegata tematica si possono ricordare le modalità di illustrazione e comunicazione *in situ* delle note escursionistiche e scientifiche di cui devono fruire i frequentatori di quell'itinerario. Come già accennato, nelle prime realizzazioni di fine Novecento il tutto era basato su una cartellonistica collocata lungo il percorso nei siti di maggiore interesse paesaggistico e scientifico, eventualmente accompagnata da una Guida cartacea in forma di volumetto o di pieghevole. Nelle realizzazioni più recenti questa modalità di comunicazione viene considerata sempre più impattante, tenendo conto anche del rapido degrado cui pannelli e cartelli sono soggetti, e viene sostituita o affiancata dalle già citate tecnologie di comunicazione da remoto.



Figura 6 – Sentiero del Morteratsch: cartello di pericolo alla fine del sentiero per i possibili rischi da caduta sassi lungo le ripide placche residue di "ghiaccio morto". Viene anche suggerito di non edificare "ometti" se non per favorire l'orientamento degli escursionisti - ph Claudio Smiraglia



Figura 7 – Pannelli esplicativi collocati all'inizio del Sentiero Glaciologico "Vittorio Sella" nei pressi del Rifugio Gerli-Porto - ph Claudio Smiraglia



Figura 8 – Pannello esplicativo all'inizio del Sentiero Glaciologico della Vallelunga-Val Venosta - ph R. Dinale

L'esempio del Ghiacciaio dei Forni

Nel quadro complesso sopra delineato è possibile collocare l'esempio di uno dei primi sentieri glaciologici realizzati sulle montagne italiane, quello del Ghiacciaio dei Forni nel settore lombardo del gruppo Ortles-Cevedale e nel Parco Nazionale dello Stelvio. Quello dei Forni è sicuramente uno dei più noti e frequentati ghiacciai italiani, sia per motivazioni escursionistiche sia per motivazioni scientifiche.

A tutt'oggi questo ghiacciaio può davvero essere considerato un laboratorio di alta montagna dove i temi più propriamente scientifico-naturalistici, affrontati in una prospettiva pluridisciplinare, si integrano con i problemi della valorizzazione turistica e del suo impatto su un ambiente molto delicato e fragile e con quelli della sua pericolosità e del rischio conseguente, soprattutto negli ultimissimi decenni (si veda Diolaiuti & Smiraglia, 2010; Smiraglia *et al.*, 2017; Smiraglia *et al.*, in revisione).

Il Ghiacciaio dei Forni è anche sede di un articolato sistema di monitoraggio ambientale, attivo da oltre vent'anni. Il progetto IdroStelvio, avviato nel 2010, ha installato una rete di stazioni idrologiche che copre oltre il 90% delle aree glacializzate del Parco, permettendo di acquisire dati fondamentali sul deflusso delle acque di fusione (Bocchiola *et al.*, in revisione). Dal 2005 è attiva una stazione meteorologica automatica (AWS) sulla lingua glaciale, che registra parametri energetici e climatici utili alla modellazione della fusione (Senese *et al.*, 2012a; 2012b; 2014; 2016; 2018). A supporto, vengono utilizzate aste ablatometriche e radiometri per la misurazione dell'albedo, confermando anche il fenomeno del *glacier darkening* osservato grazie al *remote sensing* negli ultimi anni (Fugazza *et al.*, 2019).

Il Ghiacciaio dei Forni è stato a lungo classificato come "ghiacciaio vallivo a bacini composti o confluenti", costituito da tre bacini collettori dai quali scendevano altrettante colate che confluivano in una lingua centrale. Con una superficie di circa 11 km² era il secondo ghiacciaio per estensione delle Alpi Italiane, dopo quello dell'Adamello. L'imponente regresso della lingua principale e la costante riduzione di spessore hanno determinato a partire dal 2015 la frammentazione in tre colate distinte, per cui il ghiacciaio ha perso la sua unità morfostrutturale nonché toponomastica.

L'evoluzione del sentiero glaciologico dei Forni ha accompagnato l'involuzione del ghiacciaio, che di fatto ne è stata la causa. Realizzato, come si è già accennato, nel 1995 per celebrare i cento anni di fondazione del Comitato Glaciologico Italiano (inizialmente Commissione Glaciologica del Club Alpino Italiano e oggi Fondazione Glaciologica Italiana ETS), venne denominato "Sentiero Glaciologico del Centenario al Ghiacciaio dei Forni".

L'itinerario partiva dal Rifugio dei Forni percorrendo il versante destro idrografico della Valle del Frodolfo lungo le morene tardoglaciali (le fasi tardoglaciali si collocano all'incirca fra 17.000 e 11.700 anni fa), raggiungeva il Rifugio Branca, seguiva la morena della Piccola Età Glaciale (PEG, con la massima espansione verso la metà del XIX secolo) e con una breve discesa raggiungeva la superficie del ghiacciaio, che veniva attraversato in tutta la sua larghezza. Si toccavano successivamente sul versante sinistro idrografico le morene della PEG e le morene del Tardoglaciale (per il Ghiacciaio dei Forni sono state recentemente individuate da Longhi & Guglielmin, 2021,

sei fasi glaciali prima della PEG da 15.000 a 1500 anni fa); si tornava poi al Rifugio dei Forni, dopo avere incontrato dieci punti di sosta in corrispondenza delle evidenze più interessanti e spettacolari dal punto di vista glaciologico e paesaggistico. Si era appena conclusa la breve fase di espansione 1965-1990 e la lingua del ghiacciaio si spingeva ancora ben al di sotto del Rifugio Branca. In breve l'itinerario divenne un classico dell'escursionismo alpino che vedeva ogni estate centinaia di escursionisti e turisti percorrere il sentiero, del quale venivano apprezzati sia l'attrazione paesaggistica, sia l'interesse scientifico, sia infine il percorso "ad anello", che poteva essere compiuto nei due sensi di marcia (Garavaglia *et al.*, 2012).

La ripresa e l'accelerazione del regresso, valutabile in oltre 1,2 km a partire dal 1990, insieme alla rapida riduzione di spessore, provocarono un incremento di pericolosità e rischio nella percorrenza del sentiero, soprattutto nella fase di discesa sulla superficie del ghiacciaio.

Le numerose lenti di ghiaccio, rimaste sepolte nel morenico, al di sotto della morena PEG, cominciarono infatti a crollare, originando frequenti colate di fango (*mud flow*) e colate di detriti (*debris flow*), che suggerirono numerose modifiche dell'itinerario. Il raggiungimento e l'attraversamento del ghiacciaio divenivano in ogni caso sempre più complicati e rischiosi, sia nella fase di discesa per raggiungere la sua superficie, sia nella fase di risalita per riprendere le morene PEG (Pelfini & Smiraglia, 2007). Il ritiro della lingua al di sopra del salto di rocce levigate dall'erosione glaciale ben visibile dal Rifugio Branca, impedì poi la percorrenza dell'itinerario "ad anello"; era infatti impossibile attraversare i due impetuosi torrenti provenienti dalla fronte del ghiacciaio, che si gettavano in due profonde forre incise sulla parete di rocce levigate. Il problema venne risolto all'inizio degli anni Duemila con la collocazione di due ponti sospesi che permettevano di superare i due torrenti, che in breve, con la denominazione di "ponti tibetani", divennero un importante ed emozionante richiamo turistico.

Successivamente il percorso divenne più articolato e suddiviso in due itinerari, il "Sentiero Glaciologico Alto" e il "Sentiero Glaciologico Basso". Il primo, più lungo e lievemente più impegnativo, ma anche più spettacolare anche dal punto di vista paesaggistico, dal parcheggio dei Forni risale il versante sinistro idrografico della valle del Frodolfo, arriva ai "ponti tibetani" e porta poi a osservare da vicino la fronte del ghiacciaio in veloce e costante disfacimento e regresso. Ritornati ai "ponti" si può scendere al Rifugio Branca e poi tornare al parcheggio del Rifugio dei Forni, dopo avere compiuto un percorso ad anello (si vedano Smiraglia & Diolaiuti, 2012; Smiraglia *et al.*, 2017).

Nella discesa al Branca è particolarmente interessante, ma da percorrere con attenzione, il tratto pianeggiante che segue la base della gigantesca morena laterale destra della PEG. La morena presenta infatti una tipica morfologia pseudocalanchiva ed è soggetta a erosione intensa con frequenti crolli di materiali a granulometria molto diversificata (dai *debris flow* ai singoli clasti). Si tratta di un classico esempio di evoluzione da un sistema morfodinamico "glaciale", che ha edificato la morena, a un sistema morfodinamico "paraglaciale" (basato su processi gravitativi e di erosione da acque incanalate - *rill erosion*), che la sta rimodellando. Di particolare interesse, oltre alle morene tardoglaciali, distribuite con

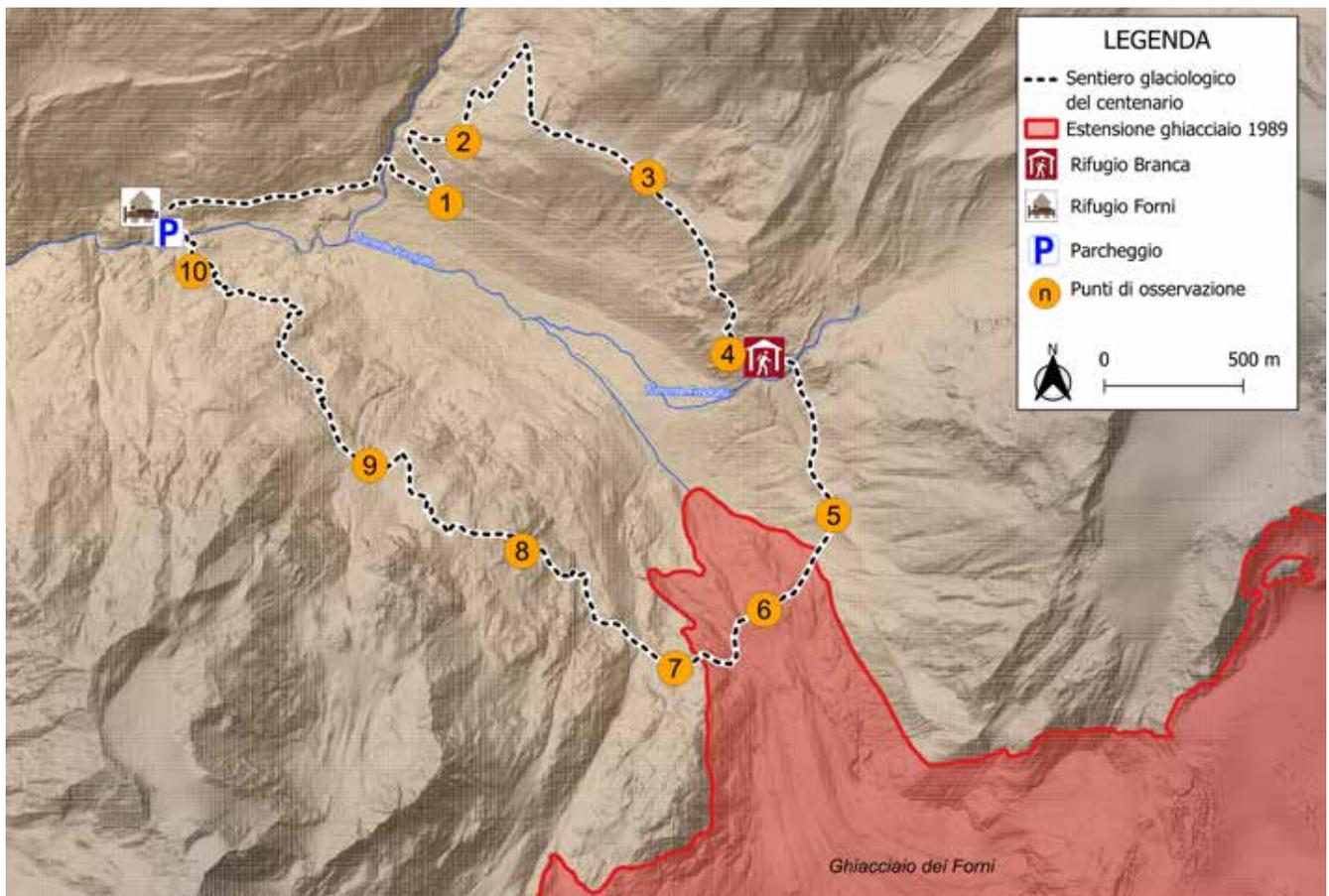


Figura 9 – Il tracciato del "Sentiero Glaciologico del Centenario al Ghiacciaio dei Forni" del 1995 con i dieci punti di sosta e di osservazione - elaborazione M. Di Biase



Figura 10 – Il "ponte tibetano" che permette il superamento del torrente glaciale principale del Ghiacciaio dei Forni lungo il "Sentiero Glaciologico Alto" - ph Claudio Smiraglia



Figura 11 – Il Ghiacciaio dei Forni, il secondo ghiacciaio per estensione delle Alpi Italiane, nel 2005. È ben visibile l'ampio bacino collettore della lingua centrale al di sotto della Punta Cadini (3524 m), con l'ampia seraccata e le morene mediane. La fronte si appoggia ancora sul ciglio della fascia trasversale di ripide rocce montonate - ph R. Scotti



Figura 12 – Il Ghiacciaio dei Forni si riflette nel piccolo lago (Laghetto delle Rosole) creato dallo sbarramento della morena laterale destra della PEG ben osservabile lungo il Sentiero Glaciologico Alto, poco a monte del Rifugio Branca - ph Claudio Smiraglia



Figura 13 – Il Ghiacciaio dei Forni nel periodo 1860-1870 con la lingua che si spinge fin quasi alla posizione dell'attuale Rifugio dei Forni durante la massima espansione della PEG. Si faccia il confronto con la situazione attuale illustrata nella Figura 14 - ph A. Vismara



Figura 14 – Il Ghiacciaio dei Forni nel 2022. Il ghiacciaio ha abbandonato quasi completamente la valle del torrente Frodolfo, che è stata rapidamente colonizzata dalla vegetazione anche arborea, ed è risalito ben oltre la fascia di rocce montonate ben visibile dal Rifugio Branca, con un regresso di oltre 2,3 km. Nel 2015 si è separato in tre frammenti; nella foto sono visibili al centro la breve lingua che scende dal bacino orientale e sulla destra una piccola parte del bacino centrale - ph R. Scotti



Figura 15 – Il masso utilizzato come segnale glaciologico dal 2010 per le misure delle variazioni frontali del Ghiacciaio dei Forni dagli operatori del Servizio Glaciologico Lombardo, quando il ghiacciaio costituiva ancora una struttura unitaria - ph Claudio Smiraglia



Figura 16 – La fronte in rapido disfacimento del Ghiacciaio dei Forni con volte e archi di ghiaccio in fase di collasso, un classico esempio di trasformazione da pericolosità a rischio attraverso la vulnerabilità e l'esposizione ben evidenziate nell'immagine - ph Claudio Smiraglia

regolari creste inerbite lungo entrambi i versanti e a quelle della PEG, come già detto in rapida fase evolutiva, è l'osservazione delle tracce del Primo conflitto mondiale (come le fortificazioni in corrispondenza del Punto 8, oltre a resti di casermette, camminamenti, trincee, ecc), spesso restaurate con cura grazie all'opera del Parco Nazionale dello Stelvio (Morosini, 2022). Recenti studi hanno evidenziato la presenza di microplastiche nei detriti sopragliaciali del Ghiacciaio dei Forni, rendendolo il primo ghiacciaio alpino dove tale contaminazione è stata documentata (Ambrosini *et al.*, 2019; Crosta *et al.* 2025). Parallelamente, ricerche ecologiche hanno analizzato le comunità microbiche e la fauna sopragliaciale, rivelando reti ecologiche complesse e dinamiche stagionali significative (Crosta *et al.* 2024). Questi risultati rafforzano il ruolo del ghiacciaio come ecosistema estremo e indicatore sensibile degli impatti antropici. In sintesi il Sentiero Glaciologico Alto è stato definito sui siti Internet "Una splendida escursione ad anello nella Valle dei Forni per ammirare da vicino i ghiacciai del Parco Nazionale delle Stelvio". Il Sentiero Glaciologico Basso è, come già osservato, sicuramente meno impegnativo e anche meno spettacolare, ma permette in ogni caso interessanti osser-

vazioni sulle varie fasi di avanzata e di ritiro del ghiacciaio e sulle morfologie create dalla sua evoluzione, nonché sulle caratteristiche e l'evoluzione delle fasce vegetazionali della valle. L'itinerario che percorre, sempre ad anello, ma a una quota più bassa, i due versanti della valle, offre comunque dei collegamenti con il Sentiero Alto, che permettono di arrivare vicino alla fronte del ghiacciaio. Negli anni più recenti, in particolare dopo la pandemia, si è assistito a due fenomeni concomitanti: da una parte si è visto un incremento numerico sensibile di escursionisti e turisti che percorrono il Sentiero Glaciologico, cui si aggiungono sempre più numerosi bikers, dall'altra si è sicuramente verificato un incremento della pericolosità e di conseguenza del rischio della sua percorrenza. Quest'ultimo fenomeno si è sviluppato sia in funzione dell'accelerazione dei processi morfodinamici sopra citati, sia spesso per la scarsa preparazione e l'equipaggiamento poco adatto di molti frequentatori. Ne deriva quindi l'esigenza di un'imponente e indispensabile lavoro educativo e comunicativo da parte dei vari enti preposti alla gestione e alla pubblicizzazione del Sentiero, come il Parco Nazionale dello Stelvio, il Club Alpino Italiano attraverso le sue molteplici strutture, le varie amministrazioni.

Variazioni frontali del Ghiacciaio dei Forni (1810-2024)

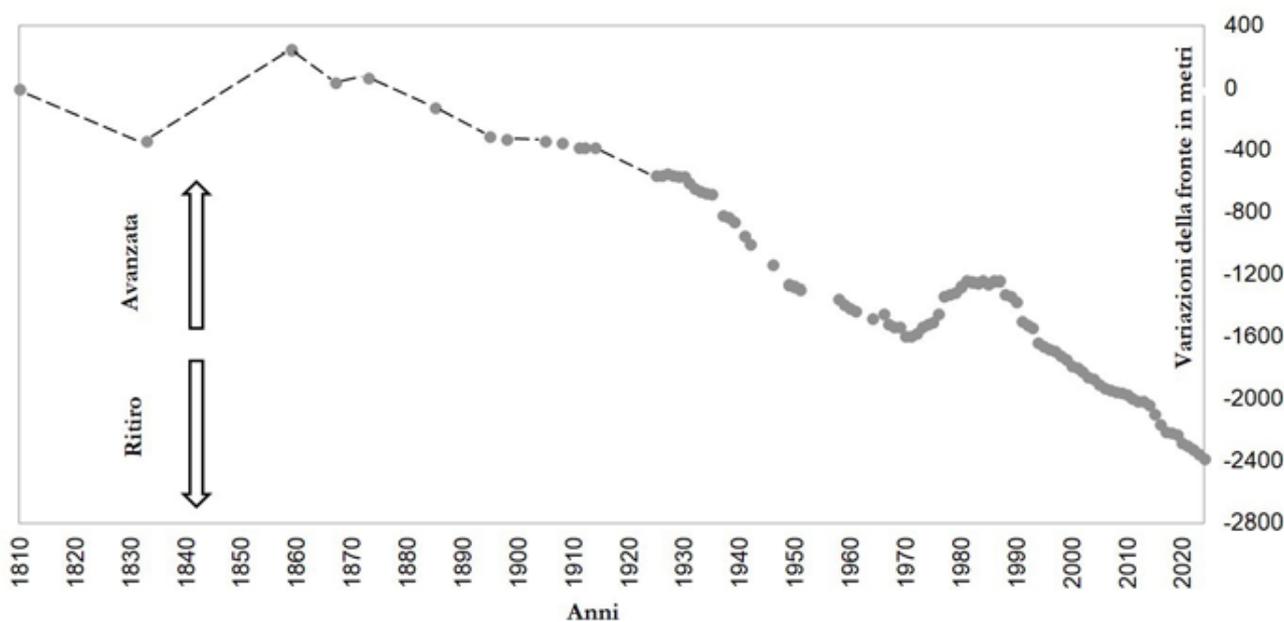


Figura 17 – Grafico delle variazioni frontali del Ghiacciaio dei Forni dal 1810 al 2024 - Elaborazione G. Cola

Un nuovo progetto: il Sentiero "Antonio Stoppani - Ardito Desio" al Ghiacciaio dei Forni

In tempi recenti il sempre maggiore interesse della pubblica opinione per gli effetti dei cambiamenti climatici e per le conseguenti trasformazioni dei paesaggi di alta montagna, in particolare glaciali, ha suggerito la progettazione di un nuovo percorso, che, partendo da sentieri preesistenti, unisce una parte del Sentiero Basso con il settore superiore del Sentiero Alto. L'obiettivo è quello di seguire e osservare, debitamente guidati, le tracce lasciate dal ghiacciaio nella sua ultrasecolare evoluzione fino alla sua fronte attuale, e in particolare le trasformazioni ambientali degli ultimi decenni. Il progetto, che nasce sulla spinta di esperti e appassionati della zona e delle Guide alpine locali, ha visto il coinvolgimento di strutture gestionali e amministrative locali e di numerosi

istituti di ricerca e divulgazione scientifica. Il sentiero, il cui progetto è stato elaborato fra il 2023 e il 2025, è dedicato a due studiosi, Antonio Stoppani e Ardito Desio, che in tempi diversi hanno compiuto importanti ricerche sul Ghiacciaio dei Forni. Fra l'altro va sottolineato come nel 2024 cadessero il bicentenario della nascita di Stoppani e il settantesimo anniversario della prima scalata del K2 condotta dalla spedizione guidata da Desio. Nel 2025 inoltre si celebra l'Anno Internazionale della Conservazione dei Ghiacciai dichiarato tale dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite e dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale, cui si aggiunge il trentennio di realizzazione del primo Sentiero Glaciologico dei Forni.

Il sentiero "A. Stoppani - A. Desio" si snoda lungo la Valle



Figura 18 – Paesaggio effimero: il Ghiacciaio dei Forni, dopo avere perso la sua unità strutturale ed essersi diviso in tre frammenti, sta perdendo la sua lingua centrale. La fascia di rocce emergenti si sta sempre più allargando, preludio a una prossima separazione. Il Ghiacciaio dei Forni Centrale si evolverà da "ghiacciaio vallivo" a "ghiacciaio di circo", lasciando più a valle solo una lingua di "ghiaccio morto", in gran parte coperta da detriti - ph G.P. Verza, settembre 2025

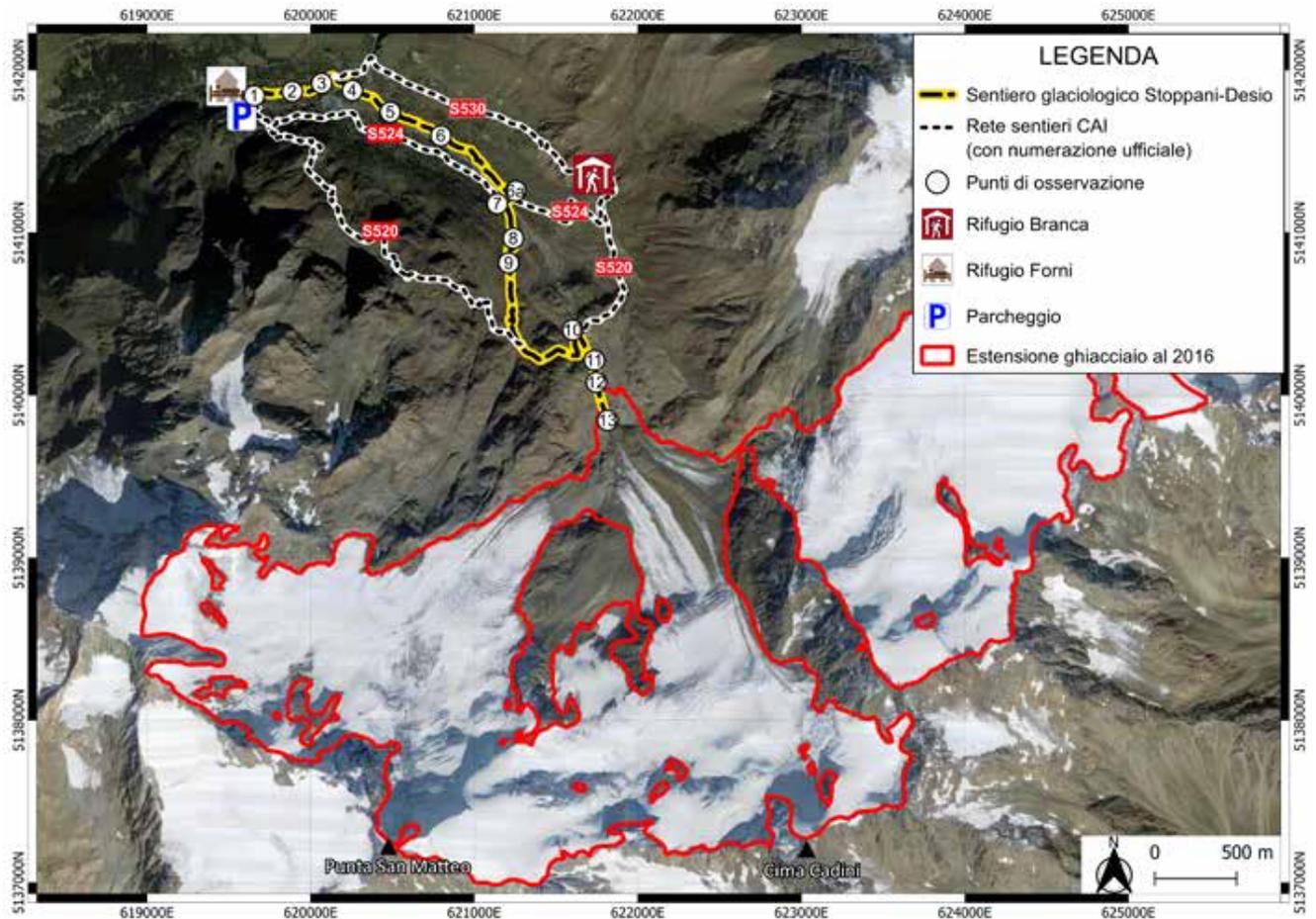


Figura 19 – Il tracciato del sentiero glaciologico "A. Stoppani – A. Desio" (evidenziato in giallo); sono tracciati anche gli altri sentieri CAI (S520-530 Sentiero Glaciologico Alto; S524 Sentiero Glaciologico Basso) - Elaborazione M. Di Biase)

dei Forni fin quasi alla fronte attuale del ghiacciaio. L'itinerario percorre inizialmente il versante destro idrografico della valle partendo dal parcheggio basso del Rifugio dei Forni, dove il ghiacciaio arrivava nel 1859 con la sua massima espansione della Piccola Età Glaciale. Successivamente, dopo avere superato il torrente Frodolfo, si alza ripido sul versante sinistro idrografico fino a incontrare il Sentiero Glaciologico Alto e spingersi verso la fronte del ghiacciaio. Lungo l'itinerario vi sono individuati tredici punti di sosta in corrispondenza delle più evidenti morfologie, in particolare lembi di morene frontali e laterali, che permettono di ricostruire le varie fasi sia di espansione e soprattutto di regresso del ghiacciaio dalla metà del XIX secolo a oggi, sia di evoluzione paesaggistica. I punti di osservazione sono segnalati da targhette su roccia e/o su paletti che riportano il numero del punto,

Conclusioni

Le imponenti trasformazioni in corso legate al cambiamento climatico stanno velocemente ridisegnando i paesaggi glaciali della montagna, la qual cosa, se ci si vuole orientare verso un turismo "culturale" e sostenibile, richiede strategie innovative che favoriscano la sensibilizzazione dei possibili fruitori. I sentieri glaciologici possono contribuire a queste finalità. Per quanto riguarda le Alpi Italiane questo tipo di itinerari cominciò a diffondersi verso la fine del secolo scorso con l'obiettivo di offrire agli escursionisti una conoscenza diretta e scientificamente corretta dell'evoluzione dei ghiacciai e dei suoi effetti sull'ambiente. Questi sentieri, al di là di permettere l'accesso ai paesaggi modellati dai ghiacciai, possono favorire la creazione di un rapporto emozionale diretto fra i visitatori e i *vanishing glaciers*, dal quale a sua volta dovrebbe scaturire una maggiore consapevolezza dei problemi ambientali e dei comportamenti più sostenibili. Da questo punto di vista i sentieri glaciologici si presentano non solo come itinerari nello spazio, ma anche come viaggi a ritroso nel tempo, fino alle "glorie della Piccola Età Glaciale". Si sollecitano quindi in questo modo lo sviluppo della conoscenza e la celebrazione della memoria, e soprattutto si genera un invito per un'azione efficace di preservazione dei valori culturali e scientifici dei ghiacciai. In altre parole il sentiero glaciologico dovrebbe presentarsi come un dinamico laboratorio *open-air*, dove convergono:

1. l'interpretazione del paesaggio;
2. la consapevolezza dell'incremento di pericolosità e rischio;
3. un primo accostamento alle metodologie della ricerca scientifica.

Al di là delle molteplici esigenze che racchiude la progettazione di un sentiero glaciologico, in tempi recenti si è constatato come questi itinerari possano veramente definirsi "effimeri", in quanto possono essere rapidamente modificati dall'accelerazione in corso dei processi morfodinamici dell'alta montagna, che può portare all'obliterazione parziale o totale del sentiero. Ne scaturisce quindi da una parte la necessità di un ripristino o di un rimodellamento dell'itinerario, dall'altra l'esigenza di una verifica degli eventuali incrementi di pericolosità e quindi di possibili rischi per i frequentatori. A questo si aggiunge l'esigenza di un ammodernamento delle modalità di progettazione e di comunicazione di tutto ciò che riguarda i sentieri glaciologici, che non possono prescindere dalle sempre più rapide e diffuse innovazioni tecnologiche. Oltre alla funzione escursionistica, questi sentieri diventano strumenti di educazione

l'anno in cui il ghiacciaio raggiungeva la posizione della targhetta, e dei QR code da inquadrare con e-device per accedere a materiale multimediale (testi, foto, filmati) che permetteranno di approfondire le conoscenze su specifici aspetti osservabili nei singoli punti.

Lungo il percorso si possono anche osservare strumenti e centraline di monitoraggio che rivelano come questa valle sia un vero e proprio laboratorio a cielo aperto per lo studio del *climate change* e dei suoi impatti ambientali. Informazioni dettagliate sul percorso, nonché approfondimenti testuali e iconografici sui singoli punti di osservazione sono disponibili sul sito <https://sites.unimi.it/glaciol/index.php/it/sentiero-glaciologico-stoppani-desio/>.

Il sentiero "A. Stoppani - A. Desio" verrà inaugurato all'inizio dell'estate 2026

ambientale e di cambiamento comportamentale, favorendo una connessione emotiva e cognitiva con i ghiacciai in regressione. Il modello del sentiero "A. Stoppani - A. Desio" può essere replicato in altri contesti alpini, grazie alla sua struttura modulare, alla governance condivisa e all'uso di tecnologie digitali. Le trasformazioni del sentiero che guida all'osservazione del Ghiacciaio dei Forni e della sua evoluzione nel settore lombardo del gruppo Ortles-Cevedale, Parco Nazionale dello Stelvio, dal 1995 a oggi (dal "Sentiero Glaciologico del Centenario" ai sentieri "Alto" e "Basso", fino al recente sentiero "A. Stoppani - A. Desio"), possono costituire un esempio di adattamento strategico e di valida risposta alle esigenze sopra indicate.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Parco Nazionale dello Stelvio - ERSAF, il Comitato Glaciologico Italiano, il Servizio Glaciologico Lombardo, il Comitato Scientifico Centrale del Club Alpino Italiano, il Comune di Valfurva, il CAI Valfurva e sono grati per il supporto ricevuto nel progetto "Sentiero A. Stoppani - A. Desio al Ghiacciaio dei Forni" a Federico Secchi, Mirco Bertolina e Stefano Faifer.

Bibliografia

- AMBROSINI R., AZZONI R. S., PITTINO F., DIOLAIUTI G., FRANZETTI A. & PAROLINI M. (2019) - *First evidence of microplastic contamination in the supraglacial debris of an alpine glacier*. Environmental Pollution, 253, 297-301
- ARZUFFI L., CANETTA N. & MONTRASIO A. (1997) - *Lanzada dal Bernina allo Scalino. Il Sentiero Glaciologico al Fellaria e dieci escursioni in Valmalenco*. Lysis, Sondrio
- BOCCHIOLA D., STUCCHI L., FUGAZZA D., ALBORGHETTI M., ALMAGIONI C., AZZONI R. S., BARBAGALLO B., BERNASCONI D., COMPOSTELLA C., DEZUANNI P., FERRARIN L., MORGESE S., TRAVERSA G., VERZA G.P., SENESE A. & DIOLAIUTI G.A. (in revisione) - *Development of guidelines for monitoring snow-ice fed mountain streams. The IdroStelvio network (Stelvio National Park, Italy)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria
- BONARDI L. (2001) - *Un approccio meditato all'ambiente alpino. L'esperienza dei sentieri glaciologici*. In: Smiraglia C. & Diolaiuti G. (a cura di), "Ghiacciai e aree protette. Conoscenza, conservazione, valorizzazione. Atti del Convegno Internazionale, Sondrio, Italia, 30 ottobre 1997", 11-14, Comune di Sondrio

- COPPOLA C. (a cura di) (1998) - *Il Sentiero Naturalistico-Glaciologico dell'Antelao*. Club Alpino Italiano-CSVFG, Padova, 88 pp
- CROSTA A., VALLE B., CACCIANIGA M., GOBBI M., FICETOLA F., PITTINO F., FRANZETTI A., AZZONI R.S., LENCIONI V., SENESE A., CORLATTI L., BUDA J., PONIECKA E., NOVOTNÁ JAROMĚŘSKÁ T., ZAWIERUCHA K. & AMBROSINI R. (2024) - *Ecological interactions in glacier environments: a review of studies on a model Alpine glacier*. *Biological Reviews*, 100, 227-244
- CROSTA A., DE FELICE B., MINOLFI V., AZZONI R.S., PITTINO F., FRANZETTI A., ORTENZI M.A., GAZZOTTI S., GIANNOTTI V., RONCOLI M., CONTEROSITO E., FICETOLA G.F., KINYANJUI R.N., PAROLINI M. & AMBROSINI R. (2025) *Latitudinal patterns of microplastic contamination in remote areas*. *Environmental Research*, 277, 121553
- DIOLAIUTI G. & SMIRAGLIA C. (2001) - *A new method for sustainable ecotourism in protected mountain environment areas: the glacier trails in the Lombardy Alps*. *Geotema*, 14, 38-41
- DIOLAIUTI G. & SMIRAGLIA C. (2010) - *Changing glaciers in a changing climate: How vanishing geomorphosites have been driving deep changes in mountain landscapes and environments*. *Geomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 2, 131-152.
- DUSSAILLANT I., HUGONNET R., HUSS M., BERTHIER E., BANNWART J., PAUL F. & ZEMP M. (2025) - *Annual mass change of the world's glaciers from 1976 to 2024 by temporal downscaling of satellite data with in situ observations*. *Earth System Science Data*, 17, 1977-2006
- FUGAZZA D., SENESE A., AZZONI R.S., MAUGERI M., MARAGNO D. & DIOLAIUTI G.A. (2019)- *New evidence of glacier darkening in the Ortles-Cevedale group from Landsat observations*. *Global and Planetary Change*, 178, 35-45
- GARAVAGLIA V., DIOLAIUTI G., SMIRAGLIA C., PASQUALE V. & PELFINI M. (2012) - *Evaluating Tourist Perception of Environmental Changes as a Contribution to Managing Natural Resources in Glacierized Areas: A Case Study of the Forni Glacier (Stelvio National Park, Italian Alps)*. *Environmental Management*, 50, 1125-1138
- GIARDINO M., MORTARA G., (1999) - *La valorizzazione dei beni geomorfologici: uno studio di geositi nel Parco Nazionale del Gran Paradiso*. *Rev. Valdotaïne Hist. Nat.*, 53, 5-20
- GIARDINO M., MORTARA G., (2022) - *I segnali Glaciologici nella Valnontey: "Il Giardino dei Ghiacciai" - Gran Paradiso*. *Ricerca fotografica e scientifica, Forte di Bard, Collana "L'Adieu des Glaciers"*, 3, 89-93
- HUGONNET R., MCNABB R., BERTHIER E., MENOUNOS B., NUTH C., GIROD L., FARINOTTI D., HUSS M., DUSSAILLANT I., BRUN F. & KÄÄB A. (2021) - *Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century*. *Nature*, 592, 726-731
- LONGHI A. & GUGLIELMIN M. (2021) - *The glacial history since the Last Glacial Maximum in the Forni Valley (Italian Central Alps). Reconstruction based on Schmidt's Hammer R-values and crystallinity ratio indices of soils*. *Geomorphology*, 387
- MAISCH M., BURGA C.A. & FITZE P. (1993) - *Lebendiges Gletschervorfeld. Gletscherlehrpfad Morteratsch*. Engadin Press, Samedan, 138 pp
- MOROSINI S. (2022) - "Following in the footsteps of history". *Sixteen Multimedia Itineraries through the First World War sites in the Stelvio National Park and Adamello Park (Italy)*. In: Svensson D., Saltzmann K. & Sörlin S. (eds), "Pathways. Exploring the Routes of a Movement Heritage", The White Horse Press Winwick - Cambridgeshire, 114-127
- MOUREY J., MARCUZZI M., RAVANEL L., PALLANDRE F. (2019) - *Effects of climate change on high Alpine environments: evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century*. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 1938- 4246
- PAUL F., RASTNER P., AZZONI R. S., DIOLAIUTI 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 System Science Data*, 12, 1805-1821
- PELFINI M. & SMIRAGLIA C. (2007) - *Incremento del rischio geomorfologico e turismo naturalistico. Il caso del "sentiero Glaciologico della Valle dei Forni*. In: Piccazzo M., Brandolini P., Pelfini M. (a cura di), *Clima e rischio geomorfologico in aree turistiche*, 95-116. Patron, Bologna
- PELFINI M., DIOLAIUTI G. & SMIRAGLIA C. (2004) - *Proposte ed esempi di fruizione turistica dell'alta montagna glacializzata: metodi di indagine per la percezione dei beni geomorfologici e per la loro valorizzazione*. In: Adamo F. (a cura di), "Turismo e Territorio in Italia", Patron, Bologna, 355-363
- PELFINI M., DIOLAIUTI G. & SMIRAGLIA C. (2005) - *I ghiacciai come beni geomorfologici dell'alta montagna alpina: identificazione e valorizzazione*. In: Teranova R., Brandolini P., Firpo M. (a cura di), "La valorizzazione turistica dello spazio fisico come via alla salvaguardia ambientale", Patron, Bologna, 345-368
- RITTER F., FIEBIG M. & MUHAR A. (2011) - *Impacts of Global Warming on Mountaineering: A Classification of Phenomena Affecting the Alpine Trail Network*. *Mountain Research and Development*, 32, 4-15
- SALIM E., RAVANEL L., DELINE P. & GAUCHON C. (2021) - *A review of melting ice adaptation strategies in the glacier tourism context*. *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 0(0), 1-18
- SECCHIERI F. (1998) - *Il Sentiero Glaciologico della Val Martello*. CAI Alto Adige-SG, Bolzano, 208 pp
- SENESE A., PELFINI M., MARAGNO D., BOLLATI I.M., FUGAZZA D., VAGHI L., FEDERICI M., GRIMALDI L., BELOTTI P., LAURI P., FERLIGA C., LA ROCCA L. & DIOLAIUTI G.A. (2023) - *The Role of E-Bike in Discovering Geodiversity and Geoheritage*. *Sustainability (Switzerland)*, 15 (6), 4979
- SENESE A., MAUGERI M., MERALDI E., VERZA G.P., AZZONI R.S., COMPOSTELLA C. & DIOLAIUTI G. (2018) - *Estimating the snow water equivalent on a glacierized high elevation site (Forni Glacier, Italy)*. *Cryosphere*, 12 (4), 1293-1306
- SENESE A., MAUGERI M., FERRARI S., CONFORTOLA G., SONCINI A., BOCCHIOLA D. & DIOLAIUTI G. (2016) - *Modelling shortwave and longwave downward radiation and air temperature driving ablation at the Forni Glacier (Stelvio National Park, Italy)*. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 39 (1), 89-100

- SENESE A., MAUGERI M., VUILLERMOZ E., SMIRAGLIA C. & DIOLAIUTI G. (2014) - *Using daily air temperature thresholds to evaluate snow melting occurrence and amount on Alpine glaciers by T-index models: The case study of the Forni Glacier (Italy)*. *Cryosphere*, 8 (5), 1921-1933
- SENESE A., DIOLAIUTI G., MIHALCEA C. & SMIRAGLIA, C. (2012a) - *Energy and mass balance of Forni glacier (Stelvio National Park, Italian Alps) from a four-year meteorological data record*. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44 (1), 122-134
- SENESE A., DIOLAIUTI G., VERZA, G.P. & SMIRAGLIA C. (2012b) - *Surface energy budget and melt amount for the years 2009 and 2010 at the Forni Glacier (Italian Alps, Lombardy)*. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 35 (1), 69-77
- SERVIZIO GLACIOLOGICO LOMBARDO (a cura di Catasta G.) (1992) - *Il sentiero glaciologico "Vittorio Sella" al Ghiacciaio della Ventina*. Il Melograno, Milano, 32 pp
- SERVIZIO GLACIOLOGICO LOMBARDO (a cura di Catasta G.) (2010) - *Il Ghiacciaio Ventina e il Sentiero Glaciologico "Vittorio Sella"*. Morbegno, 33 pp
- SMIRAGLIA C. & CASAROTTO C. (2018) - *Itinerari glaciologici sulle montagne italiane: un importante strumento didattico per capire meglio l'ambiente glaciale e la sua evoluzione*. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 45, 101-106
- SMIRAGLIA C. & DIOLAIUTI G. (2012) - *Sentieri Glaciologici dell'Alta Valtellina Itinerari sulle aree 'liberate' dall'arretramento dei ghiacciai*. *Montagne 360°*, Giugno 2012, 23-26
- SMIRAGLIA C. & MORTARA G. (2023) - *Cambiamenti climatici e cambiamenti degli itinerari in alta montagna. Un'introduzione al tema*. Il Bollettino. Comitato Scientifico Centrale Club Alpino Italiano, 11-28
- SMIRAGLIA C., CASAROTTO C. & BARONI C. (2017) - *Montagna che cambia. i sentieri glaciologici come utile strumento per la conoscenza di un paesaggio in rapida evoluzione*. 6° Congresso Nazionale Geologia e Turismo – Milano, 28-29 settembre 2017
- SMIRAGLIA C., CASARTELLI G. & PELFINI M. (1995) - *Il Ghiacciaio dei Forni in Valfurva. Sentiero Glaciologico del Centenario*. Lysis, Sondrio, 64 pp
- SMIRAGLIA C., DIOLAIUTI G. & PELFINI M. (2005) - *Valorizzazione e salvaguardia dell'alta montagna. I sentieri naturalistici: riflessioni teoriche, realizzazioni, proposte*. In: Terranova R., Brandolini P. & Firpo M. (a cura di), "La valorizzazione turistica dello spazio fisico come via alla salvaguardia ambientale", Patron, Bologna, 303-316
- SMIRAGLIA C., DIOLAIUTI G., PELFINI M., AZZONI R.S., BOLLATI I. & ZUCALI M. (2017) – *Il Ghiacciaio dei Forni. Sulle tracce di Antonio Stoppani e del suo Ghiacciaio del Forno*. In: Società Geologica Italiana-Comitato Glaciologico Italiano, "Itinerari glaciologici sulle montagne italiane", vol. 3, 107-134
- SMIRAGLIA C., SENESE A., DI BIASE M., AMBROSINI R., AZZONI R.S., BOCCHIOLA D., COLA G., FAVARON M., FUGAZZA D., MARZANO D., MOROSINI S., PEDROTTI L., PRANDI G., SCOTTI R., TOFFALETTI A., PELFINI M. & DIOLAIUTI G.A. (in revisione) – *The challenges of the "ephemeral path". Problems and issues of explaining climate change and its environmental impact through the development of glaciological trails*. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*
- SOCIETA' GEOLOGICA ITALIANA-COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (a cura di Smiraglia C., Casarotto C. e Baroni C.) (2017) - *Itinerari glaciologici sulle montagne italiane*. 3 vol., 639 pp
- The GLAMBE Team (2025) - *Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023*. *Nature*, 639, 382-388
- WGMS (2025) - *Fluctuations of Glaciers Database*. World Glacier Monitoring Service (data set)