

Zeitschrift: Bollettino della Società ticinese di scienze naturali
Herausgeber: Società ticinese di scienze naturali
Band: 111 (2023)

Artikel: Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) :
rapporto No. 6 del Gruppo Permafrost Ticino
Autor: Del Siro, Chantal / Antognini, Marco / Scapozza, Cristian
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1044511>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) Rapporto No. 6 del Gruppo Permafrost Ticino

Chantal Del Siro¹, Marco Antognini² e Cristian Scapozza^{1*}

¹ Istituto scienze della Terra (IST), Centro competenze cambiamento climatico e territorio (CCCT),
Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI), 6850 Mendrisio, Svizzera

² Museo cantonale di storia naturale, 6901 Lugano, Svizzera

* cristian.scapozza@supsi.ch

Riassunto: Il monitoraggio dello stato termico e cinematico dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi fra il 2019 e il 2022 ha mostrato delle importanti variazioni inter-annuali. L'ultima anomalia positiva della temperatura della superficie del suolo è stata registrata nel 2020 e ha causato un picco della velocità orizzontale di superficie dei ghiacciai rocciosi tra il 2020 e il 2021. L'inverno 2021/2022 scarsamente innevato ha poi permesso un importante raffreddamento della superficie del suolo, compensato solo in parte dall'estate canicolare seguente, come dimostra la diminuzione del 30% della velocità media dei ghiacciai rocciosi nel 2022. Anche il contenuto in acqua del corpo dei ghiacciai rocciosi ha giocato un ruolo importante nella loro cinematica. Nel 2020/2021 un grande volume di acqua liquida si è infatti infiltrato nei ghiacciai rocciosi grazie all'importante fusione nivale e alle abbondanti precipitazioni, favorendone la deformazione verso valle. L'analisi dell'acqua proveniente dai ghiacciai rocciosi ha permesso di osservare una correlazione positiva tra la conducibilità elettrica e la temperatura della superficie del suolo su scala pluriennale, suggerendo che la degradazione del permafrost ha probabilmente perturbato le caratteristiche fisico-chimiche di queste sorgenti. La fusione del ghiaccio potrebbe infatti aver rilasciato nell'acqua composti chimici di origine atmosferica stoccati nella criosfera in un periodo più freddo del passato.

Parole chiave: Alpi svizzere, cinematica, fattori di controllo, fusione del ghiaccio del suolo, ghiacciaio roccioso, qualità delle acque, temperatura della superficie del suolo

Permafrost in the Ticino Alps (2019/2020, 2020/2021 and 2021/2022). Report No. 6 of the Gruppo Permafrost Ticino

Abstract: The monitoring of the thermal and kinematic state of the rock glaciers in the Ticino Alps during the three-year period between 2019 and 2022 showed important inter-annual variations. The last positive anomaly in ground surface temperature was recorded in 2020 and caused a peak in horizontal surface velocity of rock glaciers between 2020 and 2021. Afterwards, the snow-poor winter of 2021/2022 led to a significant cooling of the ground surface, which was then only partly compensated for by the summer heatwave, as evidenced by the 30% decrease in mean rock glacier velocity recorded in 2022. In addition to the permafrost thermal state, the water content in the body of the rock glaciers also played an important role in their kinematics. In contrast to the hydrological year 2021/2022, in 2020/2021 a large volume of liquid water seeped into the rock glaciers due to significant snowmelt and abundant precipitation, favoring the deformation of these high mountain debris accumulations. Finally, the analysis of water emerging from rock glaciers allowed to observe a positive correlation between electrical conductivity and ground surface temperature on a multi-year scale, suggesting that permafrost degradation has probably disrupted the physico-chemical characteristics of these sources. Indeed, it is assumed that ground ice melting may release in the water chemical compounds of atmospheric origin stored in the cryosphere during a colder period of the past.

Keywords: control factors, ground ice melting, ground surface temperature, kinematics, rock glacier, Swiss Alps, water quality

INTRODUZIONE

Lo stato termico e la cinematica del permafrost nelle Alpi Ticinesi sono monitorati dal 2006 e rispettivamente dal 2009 dall'Istituto di geografia dell'Università di Losanna (tra il 2006 e il 2012) e dall'Istituto scienze della Terra della SUPSI (dal 2012), con il supporto della rete svizzera di monitoraggio del per-

mafrost PERMOS e del Museo cantonale di storia naturale di Lugano. L'attuale rete di monitoraggio del permafrost nelle Alpi Ticinesi include dieci siti di studio situati nella parte più settentrionale del Cantone Ticino. Il ghiacciaio roccioso del Lago di Leità (regione del Campolungo, Valle Leventina) rappresenta l'ultimo sito di studio integrato nella rete di misurazioni, dove dal 2020 è monitorato lo stato termico del per-

Tabella 1: Localizzazione dei punti di misura della temperatura della superficie del suolo (GST). Nella colonna “media MAGST” sono indicati i sensori che permettono di calcolare il valore di riferimento medio di MAGST per il sito del Lago di Leit. Coordinate (Coord.) secondo il sistema svizzero CH1903+ / LV95.

Sito/unità morfologica	Sensore	Coord. E	Coord. N	Altitudine [m slm]	media MAGST
Lago di Leit					
sorgente ghiacciaio roccioso	LEI-L01	2°698'690	1°146'630	2270	
ghiacciaio roccioso	LEI-L02	2°698'635	1°146'595	2280	LEI
ghiacciaio roccioso	LEI-L03	2°698'650	1°146'565	2305	LEI
sorgente falda di detrito	LEI-L04	2°698'530	1°146'600	2280	

mafrost. I dati rilevati negli anni sono stati descritti e discussi nei cinque rapporti biennali precedenti (Mari et al. 2012; Scapozza et al. 2014; 2016; 2018; 2020a). Nel 2019 era stata registrata un'importante anomalia termica della temperatura della superficie del suolo e un'accelerazione della velocità dei ghiacciai rocciosi. L'evento canicolare a inizio estate 2019, che avvenne in presenza di neve al suolo, consentì un'importante infiltrazione di acqua di fusione nivale nel corpo dei ghiacciai rocciosi, influenzando probabilmente la loro reologia. Il confronto tra la temperatura della superficie del suolo e la velocità dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi aveva inoltre mostrato una relazione esponenziale incrementale positiva tra queste due variabili (Scapozza et al. 2020a). Questo rapporto ha l'obiettivo di presentare e analizzare l'evoluzione dello stato termico e della cinematica dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi nello scorso triennio (2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) e di proporre un approfondimento sulle caratteristiche fisico-chimiche delle acque provenienti da questi accumuli detritici di alta montagna. Per quanto concerne lo stato termico e la cinematica dei ghiacciai rocciosi, è proposto il consueto approfondimento alla scala regionale delle Alpi Ticinesi, quale complemento ai rapporti annuali a scala nazionale pubblicati dalla rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS, della quale l'Istituto scienze della Terra SUPSI è un'istituzione partner (PERMOS 2021, 2022, 2023). I dati concernenti le caratteristiche fisico-chimiche delle acque delle sorgenti al fronte dei ghiacciai rocciosi sono state di recente oggetto di una compilazione dei dati storici (Poloni 2021) e di un approfondimento durante la stagione estiva 2020 con misure sistematiche al fronte di cinque ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi e di uno delle Alpi Valsesane (Del Siro 2021), che ha permesso di sviluppare un modello concettuale dell'origine dei soluti (Del Siro et al. 2023).

MATERIALI E METODI

Monitoraggio dello stato termico del permafrost

Il monitoraggio dello stato termico del permafrost è effettuato tramite la misurazione della temperatura della superficie del suolo (GST: *Ground Surface Temperature*), rilevata con sensori autonomi (mini-logger) del tipo UTL-3 (Geotest AG), la cui accuratezza è di $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Le misure biorarie registrate dai sensori sono

dapprima calibrate sulla base della fase di *zero curtain* (vedi Scapozza 2009) e in seguito aggregate in medie giornaliere, la cui media mobile su 365 giorni consente di calcolare la temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST: *Mean Annual Ground Surface Temperature*). La temperatura della superficie del suolo è monitorata su sette siti di studio situati in alta montagna (> 2000 m slm), in ognuno dei quali il numero dei punti di misura può variare tra 4 e 10. Un ulteriore sito di monitoraggio della GST si trova a media altitudine (Ghiacciaia di Rambödt, Olivone, Valle di Blenio, 1350 m slm), in cui sono stati installati due sensori di temperatura. Le informazioni dettagliate riguardanti la posizione dei punti di misura GST e i sensori utilizzati per il calcolo della MAGST media di riferimento per ogni sito di studio sono presentate in Scapozza et al. (2020a), ad eccezione dell'ultimo sito inserito nella rete di monitoraggio (Lago di Leit), le cui caratteristiche sono presentate nella tabella 1.

Monitoraggio della cinematica dei ghiacciai rocciosi

Il monitoraggio della cinematica dei ghiacciai rocciosi si basa sulla misurazione periodica della posizione tridimensionale di diversi punti situati sulla superficie del suolo mediante un sistema satellitare globale di navigazione GNSS (*Global Navigation Satellite System*), la cui accuratezza è di 0.5–2 cm sulla posizione orizzontale. La periodicità delle misure GNSS (effettuata ogni uno, due, tre o cinque anni) così come il numero di punti di misura GNSS (compreso tra 22 e 37 per ghiacciaio roccioso) variano da sito a sito. Il confronto inter-annuale tra le posizioni bidimensionali dei punti di misura permette di calcolarne lo spostamento orizzontale (dH), che viene in seguito rapportato all'intervallo di tempo normalizzato su 365 giorni (366 per gli anni bisestili) per ricavare la velocità media orizzontale di superficie annua (vH). Per ogni sito di studio è stata definita una serie di punti di misura rappresentativa del movimento del ghiacciaio roccioso, che in certi casi (come nei siti di Stabbio di Largario, Ganoni di Schenadüi e Alpe Pièi) può anche dividersi su lobi diversi dello stesso ghiacciaio roccioso. La media della vH di questi punti consente di calcolare la velocità orizzontale di riferimento (vH_{ref} anche chiamata *reference value*). In questo studio, le misurazioni dei punti di misura GNSS sono state effettuate con strumentazione Zenith 25 di GeoMax AG. Le informazioni dettagliate sulla periodicità delle misure GNSS, il numero di punti di misura GNSS e quelli

selezionati per il calcolo della vH_{ref} sono presentati in Scapozza et al. (2020a).

Monitoraggio dei parametri fisici dell'acqua

La temperatura dell'acqua che emerge da accumuli detritici può fornire importanti indicazioni sulla presenza di permafrost. Le soglie di temperatura ($PTT = Permafrost Threshold Temperature$) tradizionalmente riportate in letteratura sono di $+1^{\circ}\text{C}$ fra presenza di permafrost probabile e possibile e di $+2^{\circ}\text{C}$ fra presenza di permafrost possibile e improbabile (per es. Haeberli 1975; Frauenfelder et al. 1998; Scapozza 2009). Più di recente, Carturan et al. (2016) propongono di definire delle soglie di temperatura proprie a ogni anno di misura, considerando quale valore limite fra permafrost possibile e improbabile ($P_{ss}PTT$ in Eq. 1) la temperatura massima misurata laddove la presenza di permafrost è probabile ($maxT_{prob}$) sulla base di evidenze di permafrost nell'area (per es. un ghiacciaio roccioso intatto), e quale valore limite fra permafrost probabile e possibile ($ProbPTT$ in Eq. 2) la metà del valore che definisce la soglia fra permafrost possibile e improbabile ($P_{ss}PTT$):

$$P_{ss}PTT = maxT_{prob} \quad (1)$$

$$ProbPTT = \frac{P_{ss}PTT}{2} \quad (2)$$

Sulla base di questo approccio, Carturan et al. (2016) ritrovarono dei valori di $P_{ss}PTT$ compresi fra $+1.8^{\circ}\text{C}$ e $+2.2^{\circ}\text{C}$ e di $ProbPTT$ compresi fra $+0.9^{\circ}\text{C}$ e $+1.1^{\circ}\text{C}$, quindi in linea con le soglie definite tradizionalmente in letteratura (vedi sopra).

La conduttività elettrica è un ulteriore importante parametro fisico dell'acqua che può fornire informazioni sul contenuto degli ioni disciolti e quindi sull'origine dell'acqua (per es. Carturan et al. 2016; Del Siro et al. 2023). In questo studio sono state monitorate due tipologie di sorgenti (vedi Tab. 2):

- le “sorgenti GR” (= “sorgenti al fronte di un ghiacciaio roccioso”), situate alla base del fronte di ghiacciai rocciosi attivi o transizionali (o di *ice-patches* nel caso del Lago Nero);
- le “sorgenti non-GR” (= “sorgenti non influenzate direttamente da un ghiacciaio roccioso”), situate nello stesso bacino idrografico del ghiacciaio roccioso

ma in aree in cui la presenza di permafrost è stata valutata come improbabile sulla base della carta della ripartizione potenziale del permafrost elaborata da Deluigi & Scapozza (2020).

Nel sito dell'Alpe di Sceru I, entrambe le sorgenti monitorate si trovano alla base del fronte di un ghiacciaio roccioso relitto ma sono alimentate dai due versanti opposti della valle (sorgente GR da quello destro e non-GR da quello sinistro). Studi cartografici, geofisici e idro-chimici condotti in passato in questa regione (Scapozza et al. 2011; Mari et al. 2013; Del Siro et al. 2023) hanno mostrato una diversa occorrenza del permafrost tra il versante destro (permafrost probabile) e quello sinistro (permafrost improbabile). La sorgente GR può quindi essere considerata come alimentata direttamente da un settore dove la presenza di permafrost è probabile/possibile, come nel caso di un ghiacciaio roccioso attivo/transizionale.

La temperatura dell'acqua è stata monitorata in modo continuo (ogni due ore) tramite dei sensori UTL-3 nella sorgente GR del Lago Nero e in quelle GR e non-GR del Lago del Leit. La temperatura dell'emissario del Lago Nero (non-GR) è stata invece monitorata tramite un sensore di temperatura OTT CTD, la cui accuratezza è di $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ e la cui cadenza di misura è oraria. Tutti i valori di temperatura sono poi stati aggregati in medie giornaliere. La conduttività elettrica è stata invece misurata in modo puntuale a fine anno idrologico con un conduttivimetro digitale modello EC210 di Extech Instruments, con un'accuratezza di $\pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ sulla conduttività elettrica, $\pm 1 \text{ ppm}$ sui solidi disciolti totali (TDS: *Total Dissolved Solids*) e $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ sulla temperatura.

RISULTATI

Temperatura della superficie del suolo

Dopo l'anomalia termica osservata nel 2019, MAGST ha avuto una leggera tendenza a raffreddarsi fino a inizio primavera 2020, prima di raggiungere un altro picco nel mese di settembre (Fig. 1), in cui sono stati raggiunti i valori massimi del triennio 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, ad eccezione dei ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario (lobo est) e del Pizzo Galina, dove i valori massimi di MAGST sono stati os-

Tabella 2: Localizzazione delle sorgenti analizzate in questo studio. Coordinate (Coord.) secondo il sistema svizzero CH1903+ / LV95.

Sito	Sorgente	Localizzazione	Coord. E	Coord. N	Altitudine [m slm]
Lago Nero	GR	A valle degli <i>ice-patches</i>	2'684'995	1'144'405	2556
	non-GR	Emissario del lago	2'684'485	1'144'605	2387
Ganoni di Schenadüi	GR	Fronte di un ghiacciaio roccioso attivo	2'700'400	1'157'040	2470
	non-GR	A valle di una falda di detrito	2'700'475	1'157'200	2430
Alpe di Sceru I	GR	Fronte di un ghiacciaio roccioso relitto	2'721'970	1'145'950	2000
	non-GR	Fronte di un ghiacciaio roccioso relitto	2'721'950	1'146'200	1970
Lago di Leit	GR	Fronte di un ghiacciaio roccioso attivo	2'698'690	1'146'630	2260
	non-GR	A valle di una falda di detrito	2'698'530	1'146'600	2280

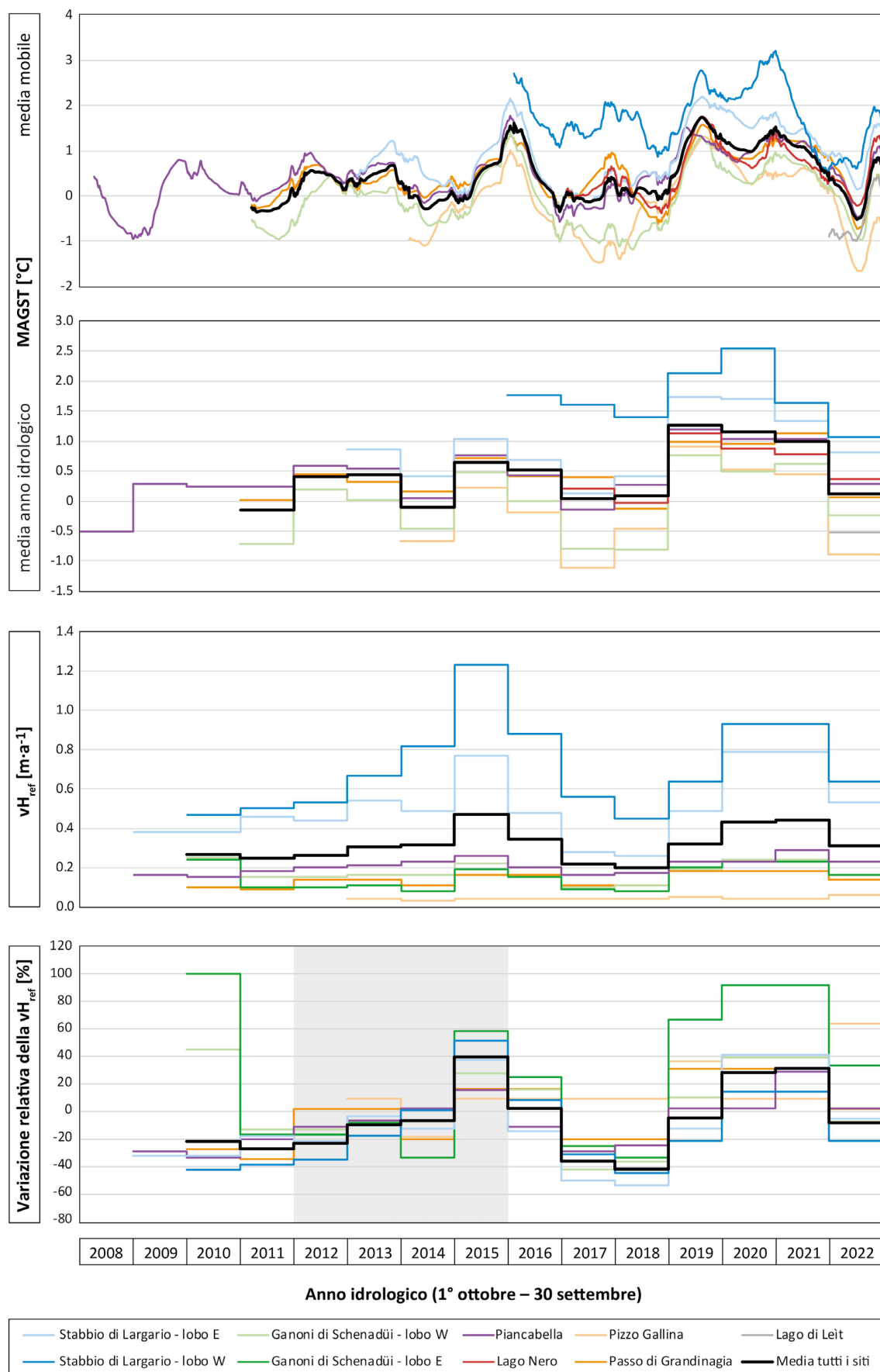


Figura 1: Evoluzione della temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST), della velocità orizzontale di riferimento e di quella relativa al periodo di riferimento 2012–2015 (area grigia) dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi dall'anno idrologico 2007/2008 (segnato come 2008) a quello 2021/2022 (segnato come 2022). La linea nera rappresenta la media su tutti i siti. Per i dati dei siti di Stabbio di Largario e Piancabella (vedi PERMOS 2023), doi:10.13093/permos-2023-01.

Tabella 3: Valori minimi e massimi della temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST) per i ghiacciai rocciosi monitorati e dell'aria (MAAT) per le stazioni meteorologiche MTR e ROE, e valori massimi della temperatura media giornaliera della superficie del suolo (dGST) per i ghiacciai rocciosi monitorati e dell'aria (dAT) per le stazioni meteorologiche MTR e ROE, per il triennio idrologico 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. Dati MTR e ROE: MeteoSvizzera.

No.	Sito	MAGST MAAT [°C]				dGST dAT [°C]		
		MIN	Data	MAX	Data	Diff.	MAX	Data
29b	Pizzo Gallina	-1.66	20.04.2022	0.98	03.10.2019	2.64	12.24	18.07.2022
30	Passo di Grandinagia	-0.73	14.04.2022	1.29	25.09.2020	2.02	14.91	20.07.2022
30b	Lago Nero	-0.22	12.04.2022	1.38	16.09.2020	1.6	16.42	18.07.2022
31	Ganoni di Schenadüi	-0.98	13.05.2022	0.97	24.09.2020	1.95	15.54	18.07.2022
32	Piancabella	-0.46	13.04.2022	1.44	24.09.2020	1.9	14.97	16.07.2022
33	Stabbio di Largario							
	lobo Est	0.14	14.04.2022	1.92	03.10.2019	1.78	16.49	18.07.2022
	lobo Ovest	0.49	22.09.2021	3.21	24.09.2020	2.72	18.30	15.08.2021
MTR	Matro (2171 m slm)	1.79	11.12.2021	3.72	14.09.2022	1.93	17.70	31.07.2020
ROE	Robièi (1896 m slm)	3.21	22.09.2021	5.29	10.09.2022	2.08	19.50	31.07.2020

servati nell'ottobre 2019 (Tab. 3). In seguito, MAGST ha subito un forte raffreddamento che, sulla base della differenza tra i valori massimi e minimi registrati durante il triennio 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, è stato compreso tra -1.60 e -2.72°C (Tab. 3). I valori minimi di MAGST sono stati registrati dopo l'inverno 2021/2022 (ad eccezione del lobo ovest del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario) e sono stati più bassi nei ghiacciai rocciosi situati alle altitudini più elevate, come nei siti del Pizzo Gallina (2723–2739 m slm), dei Ganoni di Schenadüi (2496–2591 m slm) e del Passo di Grandinagia (2614–2632 m slm). Come è ben visibile dal grafico della temperatura media giornaliera della superficie del suolo (dGST in Fig. 2), la scarsa presenza di neve al suolo durante tutto l'inverno 2021/2022 ha permesso un raffreddamento marcato della superficie del suolo, che è poi stato compensato – solo in parte – dall'estate canicolare del 2022. Il susseguirsi di queste due anomalie termiche opposte è evidenziato dall'evoluzione a “V” visibile durante l'anno idrologico 2021/2022 sul grafico di MAGST (Fig. 1). Il rapido riscaldamento di MAGST a partire dalla primavera del 2022 è stato favorito dalla fusione precoce della neve, avvenuta con oltre un mese di anticipo sulla maggior parte dei ghiacciai rocciosi rispetto al 2020 e al 2021. L'assenza dell'effetto tampone esercitato dal manto nevoso ha quindi permesso un'importante trasmissione di calore nel sottosuolo già nel mese di giugno. Durante il mese di luglio sono poi stati registrati i valori massimi di dGST su tutti i ghiacciai rocciosi (ad eccezione del lobo ovest del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario). L'evoluzione della temperatura media annua dell'aria (MAAT: *Mean Annual Air Temperature*), misurata alle stazioni MeteoSvizzera del Matro (MTR, 2171 m slm) e di Robièi (ROE, 1896 m slm), è stata simile a quella di MAGST durante il triennio 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. Un forte raffreddamento di MAAT è stato infatti osservato nel 2021, anche se i valori minimi sono stati registrati prima rispetto a quelli di MAGST (a settembre 2021 a Robièi e a dicembre 2021 sul Matro). L'ondata di caldo regi-

strata a cavallo tra fine luglio e inizio agosto del 2020 ha invece fatto registrare i valori massimi della temperatura media giornaliera dell'aria in altitudine (dAT) durante il triennio 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 (Tab. 3).

Nonostante il picco negativo di MAGST registrato dopo l'inverno 2021/2022 scarsamente innevato, la tendenza termica della superficie del suolo dall'inizio delle misure rimane chiaramente quella di un generale riscaldamento, caratterizzato dai tre picchi positivi del 2015, 2019 e 2020. L'incremento medio di MAGST sull'insieme di tutti i ghiacciai rocciosi è stato di $+0.07^{\circ}\text{C}$ per anno (Fig. 1).

Cinematica dei ghiacciai rocciosi

L'aumento delle velocità dei ghiacciai rocciosi osservato nel 2019 (Scapozza et al. 2020a) è proseguito fino al 2021, raggiungendo valori medi simili a quelli registrati nel 2014 (Fig. 2). È importante notare che nel 2020, nelle Alpi Ticinesi così come per diversi altri siti della rete svizzera (PERMOS 2021), non è stato possibile eseguire le misure GNSS a causa dell'arrivo precoce e abbondante della neve sui vari siti di studio, ad eccezione del ghiacciaio roccioso di Piancabella (in cui sono stati misurati però solo 12 punti GNSS) e quello dell'Alpe Pièi (la cui misurazione è stata effettuata in agosto). Nel 2022 è stato invece possibile osservare un rallentamento delle velocità medie di tutti i ghiacciai rocciosi (ad eccezione di quello del Pizzo Gallina), con valori compresi tra -21% e -33% rispetto al picco registrato nel 2021. Anche le velocità massime hanno fatto registrare un'evoluzione simile, dove la decelerazione più marcata è stata osservata sul lobo est del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario, sul quale sono normalmente misurati gli spostamenti massimi più elevati di tutta la rete di monitoraggio. La velocità media del ghiacciaio roccioso del Pizzo Gallina ha invece seguito un'evoluzione opposta rispetto agli altri ghiacciai rocciosi, facendo registrare un leggero rallentamento nel 2021 e poi una lieve accelerazione nel 2022 (Tab. 4).

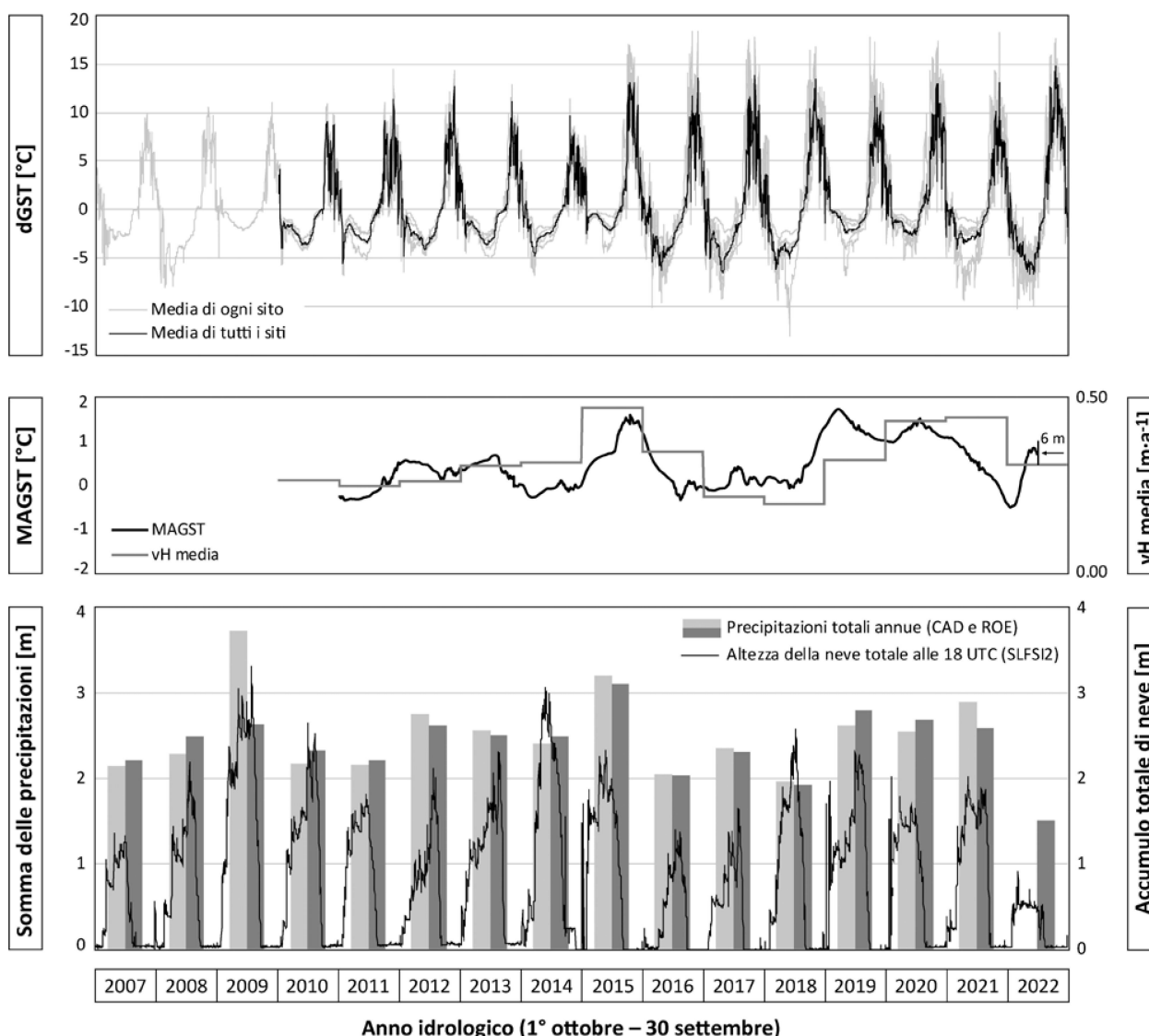


Figura 2: Evoluzione della temperatura media giornaliera del suolo (dGST), della relazione fra temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST) e della velocità orizzontale di riferimento (vH) media, e delle precipitazioni totali e nevose in alta quota dal 1.10.2006 al 30.9.2022. CAD: Cavagnoli Diga (2°682'219/1°145'480; 2332 m slm), dati MeteoSvizzera (non disponibili per il 2022). ROE: Robièi (2°682'587/1°144'091; 1896 m slm), dati MeteoSvizzera. SLFSI2: Piano del Simano (2°718'450/1°147'400; 2450 m slm), dati Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF. Per i dati dei siti di Stabbio di Largario e Piancabella (vedi PERMOS 2023), doi:10.13093/permos-2023-01.

Temperatura e conduttività elettrica delle sorgenti

Sia l'andamento della temperatura media giornaliera nel sito del Lago Nero (Fig. 3), sia i valori puntuali misurati manualmente al Lago Nero, Alpe di Sceru I, Lago di Leit e Ganoni di Schenadii (Tab. 5), mostrano delle evoluzioni termiche dell'acqua nettamente diverse tra le sorgenti GR e non-GR. Per quanto concerne il Lago Nero, l'acqua proveniente dagli *ice-patches* è stata infatti caratterizzata da temperature nettamente più basse durante i periodi estivi rispetto a quelle registrate nell'emissario del lago. Analogamente, l'acqua proveniente dal ghiacciaio roccioso del Lago di Leit ha fatto registrare temperature globalmente più fredde durante il periodo estivo del 2021 rispetto a quelle osservate nella sorgente ai piedi della falda di detrito, anche se le differenze sono meno marcate di quelle misurate al Lago Nero. Tuttavia, variazioni termiche giornaliere sono ben visibili durante i periodi estivi in tutte le sorgenti. Le temperature estive molto elevate potrebbero

derivare dall'assenza di flusso idrico al punto dove è localizzato il sensore. Che si tratti della reale temperatura dell'acqua o della temperatura dell'aria alla sorgente, è comunque evidente come l'estate estremamente calda del 2022 abbia determinato le temperature massime più elevate di tutta la serie di misure. Per quanto concerne al contrario le temperature registrate nei periodi invernali, queste sono spesso uguali o inferiori a zero, indicando che il sensore non era più in contatto con l'acqua liquida.

Le misure puntuali di temperatura dell'acqua mostrano una netta differenza fra le sorgenti influenzate direttamente dalla presenza di permafrost (sorgenti GR) e quelle dove la presenza di permafrost è improbabile (sorgenti non-GR). Considerando tutti i valori presentati nella tabella 5, la temperatura minima delle sorgenti non-GR è di +2.0°C, quindi perfettamente in corrispondenza con il limite classico fra permafrost possibile e improbabile. A livello di temperatura me-

Tabella 4: Evoluzione della velocità orizzontale di riferimento [vH] media e massima fra il 2018 e il 2022 e confronto fra il valore massimo e il 2022.

No.	Sito	vH media [$\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$]					[%]	vH massima [$\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$]					[%]
		2018	2019	2020	2021	2022		2018	2019	2020	2021	2022	
29	Pizzo Nero	0.06	0.06	0.06	0.06	–	–	0.18	0.18	0.18	0.18	–	–
29b	Pizzo Gallina	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	20	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14	0
30	Passo di Grandinaglia	0.11	0.18	0.18	0.18	0.14	–22	0.25	0.45	0.45	0.45	0.31	–31
31	Ganoni di Schenadüi												
	lobo Ovest	0.11	0.19	0.24	0.24	0.16	–33	0.26	0.36	0.45	0.45	0.32	–29
	lobo Est	0.08	0.20	0.23	0.23	0.16	–30	0.13	0.38	0.43	0.43	0.30	–30
32	Piancabella	0.17	0.23	0.23	0.29	0.23	–21	0.41	0.51	0.61	0.57	0.52	–15
33	Stabbio di Largario												
	lobo Est	0.26	0.49	0.79	0.79	0.53	–33	0.68	1.00	1.44	1.44	0.88	–39
	lobo Ovest	0.45	0.64	0.93	0.93	0.64	–31	0.46	0.65	0.96	0.96	0.68	–29
33b	Alpe Pièi												
	lobo inferiore	0.01	0.01	0.01	–	–	–	0.02	0.02	0.02	–	–	–
	lobo superiore	0.02	0.02	0.02	–	–	–	0.03	0.03	0.03	–	–	–

Tabella 5: Confronto fra i dati di temperatura dell'acqua e di conduttività elettrica per quattro siti delle Alpi Ticinesi e definizione delle soglie di temperatura locali fra permafrost improbabile e possibile ($PossPTT$, vedi Eq. 1) e fra permafrost possibile e probabile ($ProbPTT$, vedi Eq. 2). Per la localizzazione delle sorgenti, vedi la tabella 2. Per una rappresentazione grafica dei dati, vedi la figura 3.

Sito	Data	Sorgente GR		Sorgente non-GR	
		Temperatura [°C]	Conduttività elettrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Temperatura [°C]	Conduttività elettrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Lago Nero	12.10.2015	–	87.8	7.6	15.6
	20.09.2016	0.4	33.3	10.0	18.9
	17.10.2017	0.1	62.2	–	20.0
	09.10.2018	1.4	59.4	8.0	17.9
	01.10.2019	0.7	57.4	9.5	13.8
	20.10.2020	1.0	66.0	4.8	26.0
	06.10.2021	0.1	100.0	8.1	28.0
	04.10.2022	0.3	103.0	9.3	24.0
	$PossPTT$	1.4			
	$ProbPTT$	0.7			
Alpe di Sceru I	16.09.2005	2.1	27.8	3.7	35.5
	12.10.2020	2.1	150.0	3.7	100.0
	17.09.2021	2.3	140.0	4.0	86.0
	20.09.2022	2.3	152.0	4.2	139.0
	$PossPTT$	2.3			
	$ProbPTT$	1.2			
Lago di Leità	13.10.2020	1.0	84.0	2.3	57.0
	09.09.2021	1.5	76.0	3.0	57.0
	09.09.2022	1.6	46.0	4.0	45.0
	$PossPTT$	1.6			
	$ProbPTT$	0.8			
Ganoni di Schenadüi	19.10.2020	1.0	90.0	2.0	28.0
	28.09.2021	3.4	55.0	–	–
	22.09.2022	3.2	58.0	5.8	15.0
	$PossPTT$	3.4			
	$ProbPTT$	1.7			
Tutti i siti	MIN	0.1	27.8	2.0	13.8
	MEDIA	1.4	80.4	5.6	42.7

dia, con $+1.4^{\circ}\text{C}$ nelle sorgenti GR si rimane all'interno del campo di presenza possibile di permafrost, mentre con $+5.6^{\circ}\text{C}$ nelle sorgenti non-GR si è nettamente al di sopra.

Per quanto concerne la conduttività elettrica, le misure puntuali effettuate a inizio autunno nelle sorgenti GR nei siti del Lago di Leit, Ganoni di Schenadüi, Lago Nero e Alpe di Sceru I sono globalmente più elevate di quelle registrate nelle rispettive sorgenti non-GR situate negli stessi siti di studio (Fig. 3 e Tab. 5). Tanto il valore minimo quanto il valore medio di tutti i siti, per le sorgenti GR è maggiore di un fattore 2 rispetto alle

sorgenti non-GR. Il sito del Lago Nero, che presenta la serie storica più completa, mostra inoltre una tendenza all'aumento della conduttività elettrica nell'acqua proveniente dagli *ice-patches* su scala pluriannuale (Fig. 3).

DISCUSSIONE

Relazione fra la cinematica e la temperatura dei ghiacciai rocciosi

Il caldo record del 2020, che con il 2018 rappresenta a livello nazionale l'anno più caldo mai misurato dal

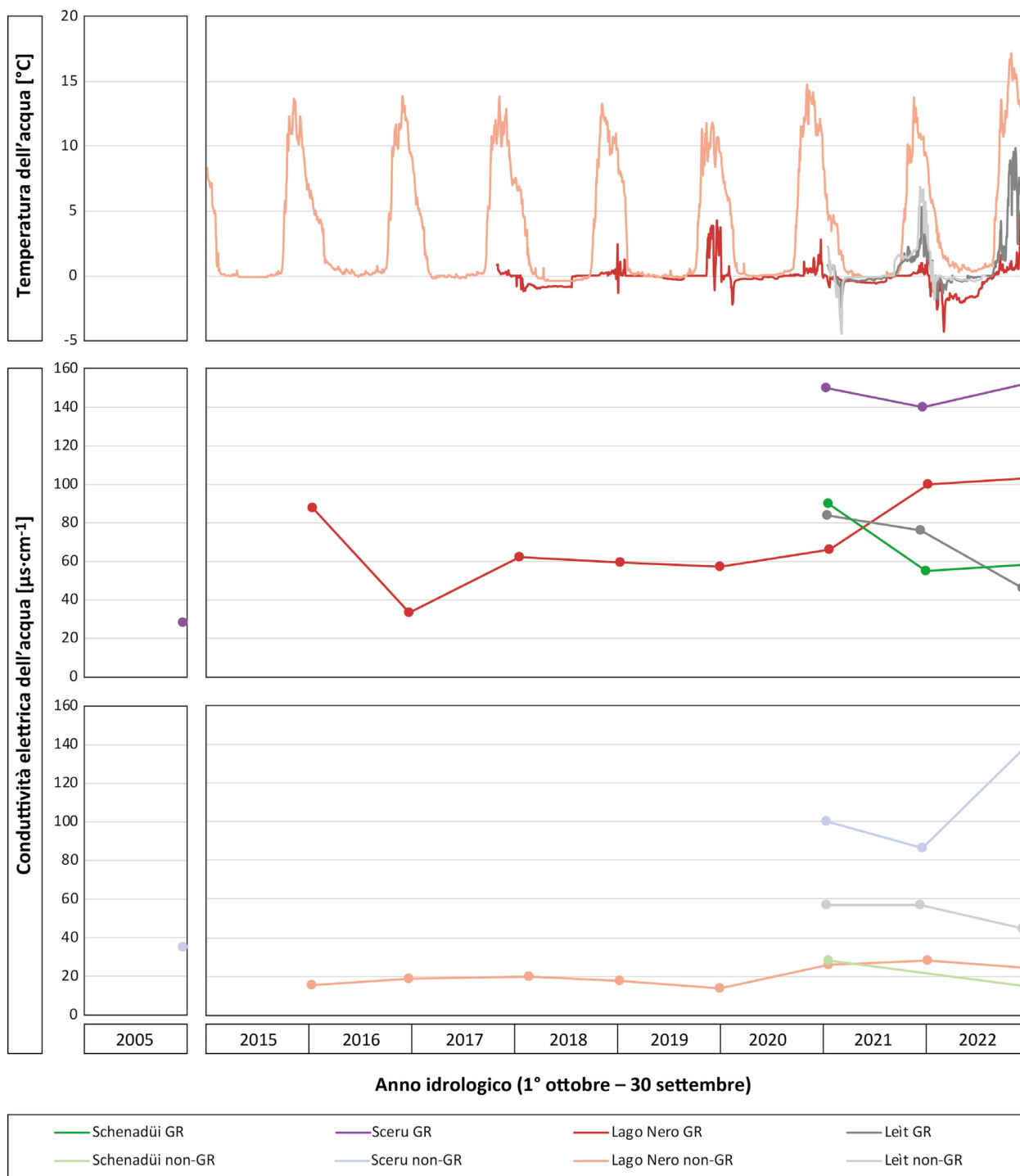


Figura 3: Evoluzione della temperatura media giornaliera dell'acqua misurata nei siti del Lago Nero e del Lago di Leit. Nella figura sono anche rappresentate le misure puntuali della conduttività elettrica effettuate a fine anno idrologico sia nelle sorgenti alimentate dai ghiacciai rocciosi ("GR") sia in quelle situate in zone in cui la presenza di permafrost è improbabile ("non-GR").

1864 (MeteoSvizzera 2021), ha fatto registrare l'ultima importante anomalia positiva di MAGST. In seguito, la primavera fredda e l'estate poco canicolare del 2021 ma soprattutto l'inverno 2021/2022 poco nevoso (MeteoSvizzera 2022a) hanno influito sulla temperatura della superficie del suolo, causando un forte raffreddamento di MAGST che è culminato nella primavera del 2022. La scarsità di neve nell'inverno 2021/2022 non solo ha permesso un forte raffreddamento del terreno, ma ha anche favorito la fusione anticipata della copertura nevosa, favorendo un'importante trasmissione di calore nel sottosuolo già nel mese di giugno, quando è stato registrato il primo periodo caldo dell'estate 2022 (MeteoSvizzera 2022b). Il secondo e prolungato periodo caldo osservato nel mese di luglio (MeteoSvizzera 2022b) ha fatto poi registrare i valori dGST più elevati del triennio 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. Gli effetti dell'estate canicolare del 2022 sul permafrost sono stati però limitati grazie all'importante raffreddamento del terreno registrato nel precedente inverno, come dimostrato dal rallentamento del 30% della velocità media dei ghiacciai rocciosi misurato nel 2022. La cinematica dei ghiacciai rocciosi è infatti fortemente correlata alla temperatura del terreno, come è anche ben visibile nella figura 2 (per la relazione teorica vedi Arenson & Springman 2005; Müller et al. 2016; per la relazione specifica alle Alpi Ticinesi, vedi Scapozza et al. 2018; 2020a): nello specifico, più la temperatura del corpo del permafrost si avvicina a 0°C e più il ghiaccio si deforma facilmente. Questo è dimostrato anche dalla relazione esponenziale incrementale positiva tra MAGST e vH_{ref} osservata per i ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario, Piancabella e Ganoni di Schenadüi, dove un aumento di MAGST di +1°C causa un incremento della velocità di un fattore pari a 2 (Scapozza et al. 2020a).

Tuttavia, la cinematica dei ghiacciai rocciosi non è controllata solo da fattori termici ma anche idrologici. L'importante infiltrazione di acqua può infatti aumentare la pressione nel corpo del ghiacciaio roccioso, causando una diminuzione della resistenza all'attrito nella zona di taglio e quindi un'accelerazione dello spostamento (per es. Wirz et al. 2016; Cicoira et al. 2019). Il contenuto di acqua nei ghiacciai rocciosi è controllato dall'apporto idrico legato alle precipitazioni, alla fusione nivale e alla fusione del ghiaccio interno (Fleischer et al. 2021; Thibert & Bodin 2022). Il ruolo del contenuto di acqua sulla reologia dei ghiacciai rocciosi è osservabile anche nelle Alpi Ticinesi, dove i picchi di velocità registrati nel 2015 e nel 2021 corrispondono ad anni idrologici caratterizzati da importanti precipitazioni e accumuli nevosi (vedi Fig. 2). Al contrario, l'importante rallentamento dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi osservato nel 2022 corrisponde a un anno idrologico caratterizzato da deboli precipitazioni e da scarsi accumuli nevosi. Infatti, alla stazione MeteoSvizzera di Robièi (alta Val Bavona), è stata registrata una somma delle precipitazioni di 1508 mm durante l'anno idrologico 2021/2022, che è nettamente più bassa di quella registrata l'anno precedente (2597 mm). Analogamente, alla stazione SLF del Piano del Simano, l'altezza massima del manto nevoso ha raggiunto

0.91 m durante l'anno idrologico 2021/2022, contro i 2.03 m misurati l'anno precedente. La scarsa infiltrazione di acqua nel corpo dei ghiacciai rocciosi, unitamente all'importante raffreddamento invernale del terreno, sarebbero quindi le cause principali della diminuzione delle velocità osservata nel 2022.

Impatti della fusione del ghiaccio del suolo sulla qualità delle acque

Le misure di temperatura delle sorgenti presentate in questo contributo confermano che questo parametro può essere utilizzato come indicatore della presenza di permafrost. Le soglie di temperatura locali determinate grazie alle Equazioni 1 e 2 permettono di definire un valore compreso fra +0.7°C e +1.7°C per il permafrost probabile ($ProbPTT$) e fra +1.4°C e +3.4°C per il permafrost possibile ($PossPTT$). Al di là di questo dato puntuale, che può essere eventualmente interessante per spazializzare l'informazione concernente la ripartizione del permafrost, va sottolineato come le sorgenti non-GR presentino temperature nettamente superiori (di un fattore variabile fra 2 e 81) rispetto alle sorgenti GR, a parità di altitudine e di orientazione del versante. Il monitoraggio a lungo termine della temperatura di una sorgente in zona periglaciale potrebbe quindi fornire delle indicazioni chiare quanto alla degradazione del permafrost in un determinato settore.

L'aumento della temperatura della superficie del suolo non solo influenza la temperatura interna e quindi la reologia dei ghiacciai rocciosi, ma anche la qualità delle acque che emergono da questi accumuli detritici rocciosi di alta montagna. Infatti, come mostrato dalla figura 4, esiste una chiara correlazione positiva tra GST media dei 6 mesi che precedono la misura della conduttività elettrica e il valore di questo parametro fisico nella sorgente GR del Lago Nero, come testimonia il coefficiente di determinazione (R^2) di 0.69, corrispondente a un coefficiente di correlazione (R) di 0.83. In altre parole, più la temperatura media della superficie del suolo è alta, maggiore è l'energia termica trasmessa nel sottosuolo e più importante è la degradazione del permafrost e il suo impatto sulla qualità delle acque. Nei depositi sciolti, come nei ghiacciai rocciosi, l'aumento della temperatura del sottosuolo può infatti causare la fusione del ghiaccio presente tra i detriti di roccia, che a sua volta può alterare la composizione chimico-fisica dell'acqua attraverso diversi meccanismi (per una revisione della letteratura, vedi Colombo et al. 2018 e Jones et al. 2019). In primo luogo, la fusione del ghiaccio al suolo può favorire il rilascio ionico innescato dal contatto tra aria/acqua e superfici rocciose appena esposte all'alterazione (per es. Williams et al. 2006; Ilyashuk et al. 2018). In secondo luogo, la degradazione del permafrost può favorire l'attività microbica nel sottosuolo e di conseguenza la produzione e il rilascio di composti chimici (in particolare i nitrati) nel terreno (per es. Williams et al. 2007; Barnes et al. 2014). Infine, l'elevata mineralizzazione dell'acqua proveniente dai ghiacciai rocciosi può essere attribuita al rilascio di depositi atmosferici che sono stati stoccati nel ghiaccio durante un periodo più freddo del passato (Scapozza et al. 2020b). Recenti studi condotti nelle Alpi Lepontine

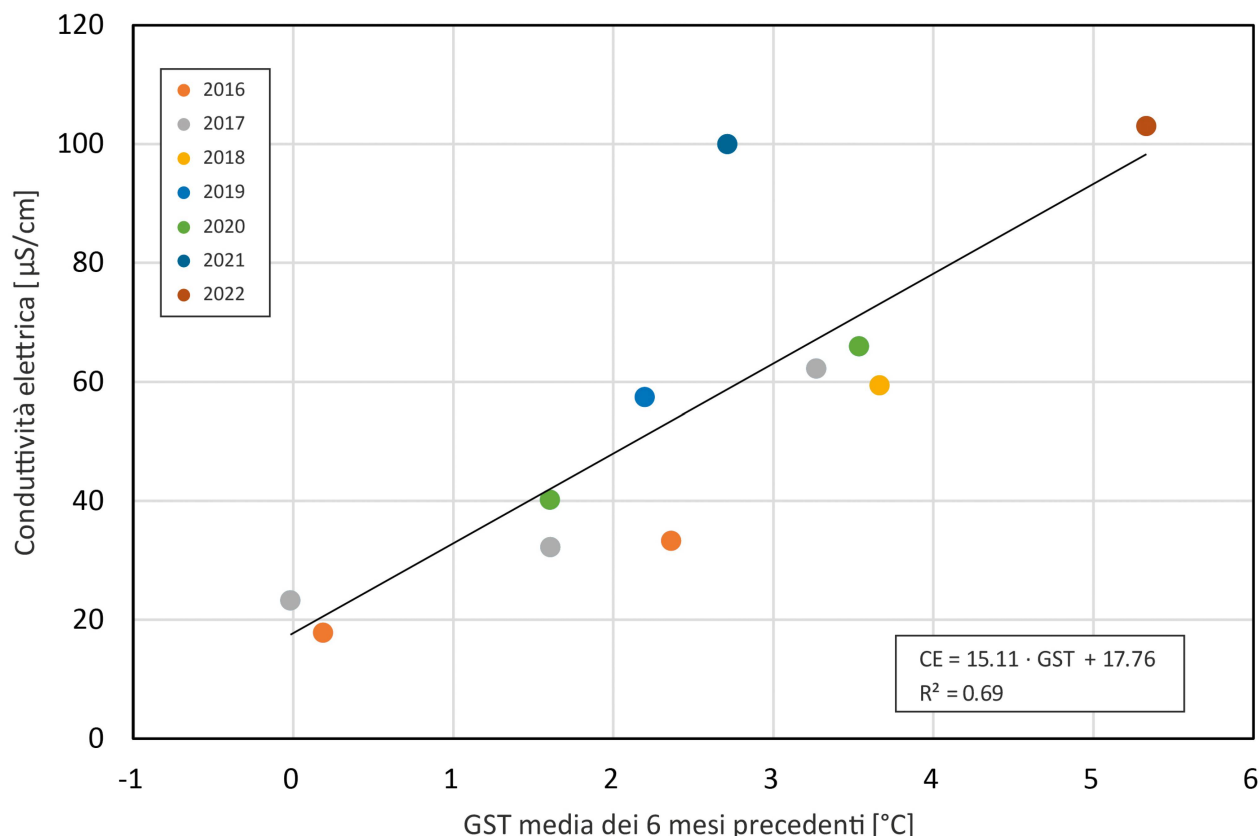


Figura 4: Confronto tra la conduttività elettrica misurata nella sorgente a valle degli *ice-patches* e la temperatura media della superficie del suolo del ghiacciaio roccioso del Lago Nero dei 6 mesi precedenti alla misura puntuale nell'acqua.

hanno misurato un incremento della conduttività elettrica e del contenuto ionico (in particolare SO_4^{2-} , Ca^{2+} e Mg^{2+}) durante la stagione calda in diverse sorgenti situate a valle di ghiacciai rocciosi attivi, tra cui quelli di Ganoni di Schenadüi, Lago di Leit e Lago Nero. La litologia gneissica e quindi poco alterabile di questi bacini idrografici indica che l'importante mineralizzazione stagionale dell'acqua sarebbe causata in gran parte dal rilascio di depositi atmosferici precedentemente stoccati nel ghiaccio e solo in piccola parte dall'alterazione chimica delle rocce (Scapozza et al. 2020b; Del Siro et al. 2023). L'impatto della degradazione del permafrost sulle qualità fisico-chimiche dell'acqua è confermato dalle differenze riscontrate tra le sorgenti GR e non-GR in questo studio (Fig. 3 e Tab. 5). Infatti, le misure di conduttività elettrica effettuate in tarda stagione calda mostrano dei valori più elevati nelle sorgenti alimentate da ghiacciai rocciosi rispetto a quelle dove la presenza di permafrost è improbabile. Il rapporto fra i due valori è variabile fra 1.0 e 1.6 per i siti dell'Alpe di Sceru I e Lago di Leit, mentre aumenta considerevolmente per essere compreso fra 1.8 e 5.6 per i siti di Ganoni di Schenadüi e del Lago Nero. Associata alla temperatura delle sorgenti, la conduttività elettrica può essere utilizzata quale parametro discriminante per determinare la presenza o meno di ghiaccio nel sottosuolo. Nei ghiacciai rocciosi intatti o per gli *ice patches*, questo parametro permette inoltre di monitorare l'evoluzione della degradazione del permafrost e il conseguente aumento della fusione del ghiaccio.

L'impatto maggiore della degradazione del permafrost sulla qualità fisico-chimica delle acque provenienti dai

ghiacciai rocciosi si verifica a inizio autunno (Fig. 5), come illustra un modello concettuale sviluppato sulla base del monitoraggio delle sorgenti svolto in cinque siti delle Alpi Ticinesi e in uno delle Alpi Vallesane (Del Siro et al. 2023). È infatti in questo momento della stagione calda che il fronte di disgelo raggiunge la sua massima profondità, ovvero la base dello strato attivo: tutto il ghiaccio stagionale presente nello strato attivo è scomparso e può cominciare la fusione del ghiaccio perenne presente nel corpo del permafrost. I composti chimici di origine atmosferica accumulati in passato nel ghiaccio perenne sono quindi rilasciati ed esportati dall'acqua che circola all'interno del ghiacciaio roccioso. Questo processo di esportazione di soluti permetterebbe di spiegare la tendenza generale all'aumento della conduttività elettrica osservata alla sorgente GR del Lago Nero. In effetti, la tendenza al riscaldamento della temperatura della superficie del suolo osservata negli ultimi anni ha probabilmente causato una crescente degradazione del permafrost, portando a un graduale aumento della contribuzione idrica legata alla fusione del ghiaccio perenne.

CONCLUSIONE

Il monitoraggio del permafrost delle Alpi Ticinesi durante il triennio 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 ha permesso di osservare delle importanti variazioni sia dello stato termico sia della cinematica dei ghiacciai rocciosi oggetto delle misurazioni. L'ultima anomalia positiva di MAGST è stata registrata nel 2020

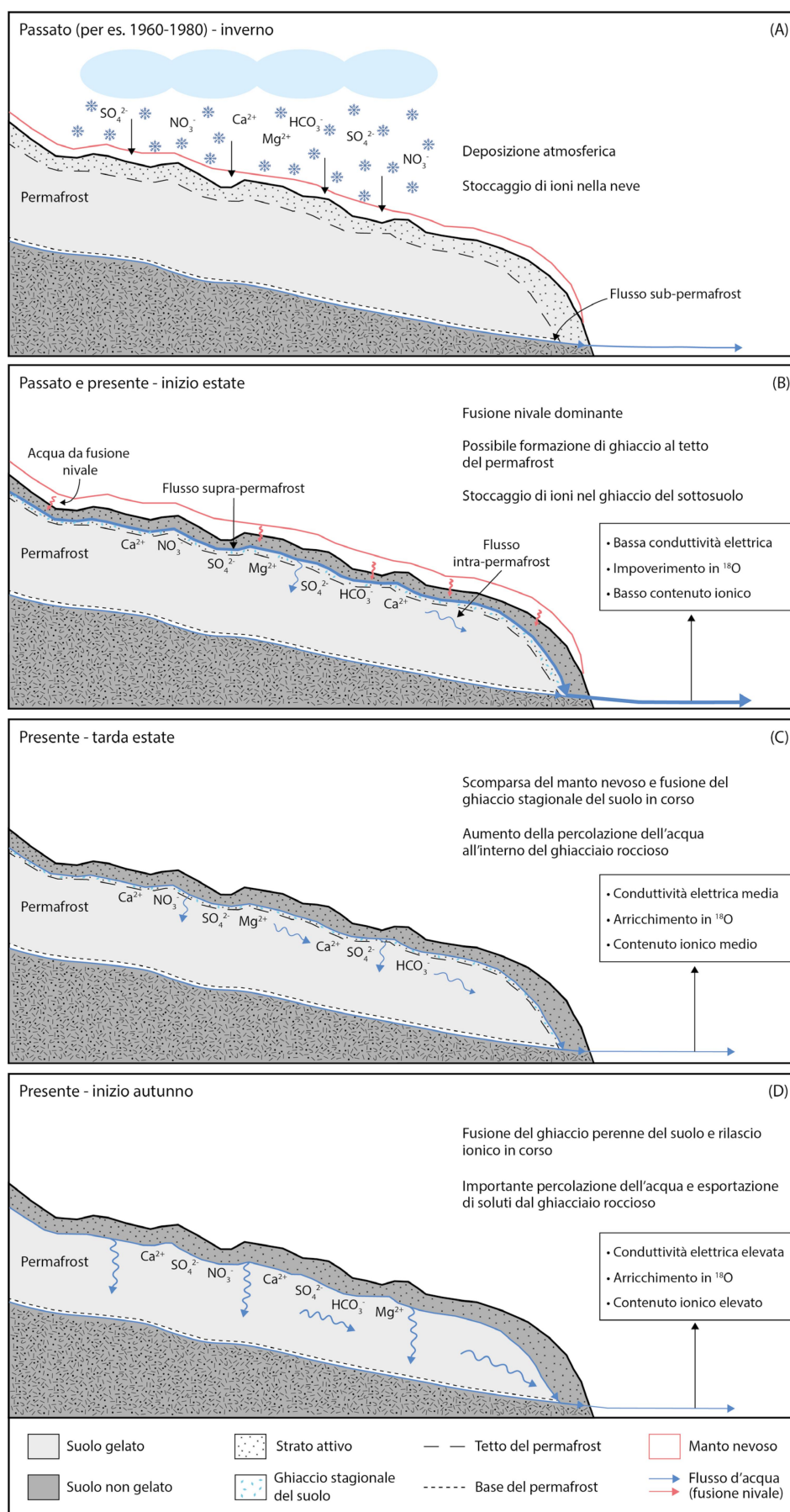


Figura 5: Modello concettuale dei principali processi idro-chimici che avvengono in un ghiacciaio roccioso attivo, suddiviso in quattro fasi temporali: (A) periodo invernale del passato, (B) inizio estate del passato/presente, (C) tarda estate del presente e (D) inizio autunno del presente. Modificato da Del Siro et al. (2023), doi:10.3389/feart.2023.1056305.

e ha avuto un importante influsso sulla cinematica dei ghiacciai rocciosi, come confermato dal picco di velocità raggiunto tra il 2020 e il 2021. L'eccezionale raffreddamento della superficie del suolo registrato dopo l'inverno 2021/2022 scarsamente innevato ha poi causato un rallentamento del 30% della velocità media dei ghiacciai rocciosi nel 2022. Questi importanti cambiamenti inter-annuali dello stato termico e cinematico dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi hanno confermato la forte correlazione tra MAGST e velocità orizzontale di superficie media, già discussa nei rapporti precedenti (Scapozza et al. 2018; Scapozza et al. 2020a). Tuttavia, la reologia dei ghiacciai rocciosi è stata anche fortemente influenzata dall'apporto idrico legato alle precipitazioni e alla fusione nivale. Infatti, se da una parte il picco di velocità registrato nel 2021 corrisponde a un anno idrologico caratterizzato da importanti precipitazioni e accumuli nevosi, dall'altra parte il rallentamento osservato nel 2022 corrisponde a un anno in cui lo stock idrico è stato scarso. Infine, questo lavoro ha mostrato come la qualità fisico-chimica dell'acqua proveniente dai ghiacciai rocciosi possa essere perturbata dal rilascio ionico legato alla fusione del ghiaccio perenne presente nel terreno. In particolare, è stato dimostrato che la temperatura della superficie del suolo è correlata positivamente con la conduttività elettrica misurata nelle sorgenti dei ghiacciai rocciosi, confermando l'impatto della degradazione del permafrost sulla qualità fisico-chimica dell'acqua. In futuro sarà importante continuare il monitoraggio dello stato termico e cinematico del permafrost, così come l'analisi del funzionamento idro-chimico dei ghiacciai rocciosi. Un'analisi comparativa tra questi fattori e parametri climatici quali la temperatura dell'aria, le precipitazioni e l'accumulo nevoso, permetterà infatti di migliorare la comprensione delle risposte dei ghiacciai rocciosi ai cambiamenti climatici, sia in termini cinematici sia idrologici.

RINGRAZIAMENTI

L'acquisizione dei dati sui ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi è finanziata dalla rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS, dal Museo cantonale di storia naturale di Lugano e dalla Fondazione Avv. Dott. Angelo Berla, console generale, e Teresita Berla nata Veglio. La raccolta dei dati sul terreno ha beneficiato del supporto di Daphné Giacomazzi e Alessandro De Pedrini. Un ringraziamento particolare ad Alessio Poloni, che si è occupato di creare e aggiornare una banca dati delle temperature e conduttività elettriche misurate in numerose sorgenti di alta montagna delle Alpi Ticinesi dal 2005, e a Valentina Togni per la rilettura del manoscritto.

REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

- Arenson L.U. & Springman S.M. 2005. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0°C. *Canadian Geotechnical Journal*, 42: 431-442.
- Barnes R.T., Williams M.W., Parman J.N., Hill K. & Caine N. 2014. Thawing glacial and permafrost features contribute to nitrogen export from Green Lakes Valley, Colorado Front Range, USA. *Biogeochemistry*, 117(2-3): 413-430.
- Carturan L., Zuecco G., Seppi R., Zanoner T., Borgia A., Carton A. & Dalla Fontana G. 2016. Catchment-scale permafrost mapping using spring water characteristics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27: 253-270.
- Cicoira A., Beutel J., Faillettaz J., Gärtner-Roer I. & Vieli A. 2019. Resolving the influence of temperature forcing through heat conduction on rock glacier dynamics: a numerical modelling approach. *The Cryosphere*, 13(3): 927-942.
- Colombo N., Salerno F., Gruber S., Freppaz M., Williams M., Fratianni S. & Giardino M. 2018. Review: Impacts of permafrost degradation on inorganic chemistry of surface fresh water. *Global and Planetary Change*, 162: 69-83.
- Del Siro C. 2021. Origine et qualité de l'eau émergeant des glaciers rocheux. Études de cas dans les Alpes suisses. Mémoire de Master, Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement, 132 pp. <https://igd.unil.ch/memoires/memoires/1884> (ultima consultazione: 26.1.2023).
- Del Siro C., Scapozza C., Perga M.-E. & Lambiel C. 2023. Investigating the origin of solutes in rock glacier springs in the Swiss Alps: A conceptual model. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1056305. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1056305>
- Deluigi N. & Scapozza C. 2020. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi: ripartizione potenziale attuale e futura. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 108: 15-27.
- Fleischer F., Haas F., Piermattei L., Pfeiffer M., Heckmann T., Altmann M., Rom J., Stark M., Wimmer M.H., Pfeifer N. & Becht M. 2021. Multi-decadal (1953-2017) rock glacier kinematics analysed by high-resolution topographic data in the upper Kaunertal, Austria. *The Cryosphere*, 15(12): 5345-5369.
- Frauenfelder R., Allgöwer B., Haeberli W. & Hoelzle M. 1998. Permafrost investigations with GIS – a case study in the Fletschhorn area, Wallis, Swiss Alps. In: Lewkowicz A.G. & Allard M. (eds), *Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost*, 23-27 June 1998, Yellowknife, Canada, pp. 291-295.
- Haeberli W. 1975. Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialettsch (Graubünden). Mitteilung der Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 17: 1-221.
- Ilyashuk B.P., Ilyashuk E.A., Psenner R., Tessadri R. & Koinig K.A. 2018. Rock glaciers in crystalline catchments: Hidden permafrost-related threats to alpine headwater lakes. *Global Change Biology*, 24(4): 1548-1562.
- Jones D.B., Harrison S., Anderson K. & Whalley W.B. 2019. Rock glaciers and mountain hydrology: a review. *Earth Science Reviews*, 19: 66-90.
- Mari S., Scapozza C., Delaloye R. & Lambiel C. 2012. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2006-2011). Rapporto No. 1 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 100: 135-139.

- Mari S., Scapozza C., Pera Ibarguren S. & Delaloye R. 2013. Prove di multitracciamento di ghiacciai rocciosi e ambienti periglaciali nel Vallon de Réchy (VS) e nella Valle di Sceruo (TI). *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 101: 13-20.
- MeteoSvizzera 2021. *Bollettino del clima dell'anno 2020*. Locarno-Monti, Ufficio federale di meteorologia e climatologia, 11 pp.
- MeteoSvizzera 2022a. *Bollettino del clima dell'anno 2021*. Locarno-Monti, Ufficio federale di meteorologia e climatologia, 13 pp.
- MeteoSvizzera 2022b. *Bollettino del clima Estate 2022*. Locarno-Monti, Ufficio federale di meteorologia e climatologia, 9 pp.
- Müller J., Vieli A. & Gärtner-Roer I. 2016. Rock glaciers on the run – understanding rock glacier landform evolution and recent changes from numerical flow modelling. *The Cryosphere*, 10: 2865-2886.
- PERMOS 2021. *Swiss Permafrost Bulletin 2019/2020*. Noetzli J. & Pellet C. (eds), 21 pp. <https://doi.org/10.13093/permos-bull-2021>
- PERMOS 2022. *Swiss Permafrost Bulletin 2021*. Noetzli J. & Pellet C. (eds), 21 pp. <https://doi.org/10.13093/permos-bull-2022>
- PERMOS 2023. *Swiss Permafrost Bulletin 2022*. Noetzli J. & Perret C. (eds), No. 4, 23 pp. <https://doi.org/10.13093/permos-bull-23>
- Poloni A. 2021. Estimation de la répartition du permafrost dans les Alpes tessinoises avec la méthode d'analyse de la température et de la conductivité des sources. Travail de Bachelor, Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement, 38 pp.
- Scapozza C. 2009. Contributo dei metodi termici alla prospezione del permafrost montano: esempi dal massiccio della Cima di Gana Bianca (Val Blenio, Svizzera). *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 97: 55-66.
- Scapozza C., Lambiel C., Gex P. & Reynard E. 2011. Prospection géophysique multi-méthodes du pergélisol alpin dans le Sud des Alpes Suisses. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 17(1): 15-32.
- Scapozza C., Mari S., Antognini M., Lepori V. & Ambrosi C. 2014. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2011/2012 e 2012/2013). Rapporto No. 2 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 102: 59-69.
- Scapozza C., Giaccone E., Mari S., Antognini M., Fratianni S. & Ambrosi C. 2016. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2013/2014 e 2014/2015). Rapporto No. 3 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 104: 37-44.
- Scapozza C., Antognini M. & Ambrosi C. 2018. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2015/2016 e 2016/2017). Rapporto No. 4 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 106: 13-22.
- Scapozza C., Deluigi N., Del Siro, C., Pollo, A. & Antognini, M. 2020a. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2017/2018 e 2018/2019). Rapporto No. 5 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 108: 13-23.
- Scapozza C., Deluigi N., Bulgheroni M., Pera S., Pozzoni M., Colombo L. & Lepori F. 2020b. Assessing the impact of ground ice degradation on high mountain lake environments (Lago Nero catchment, Swiss Alps). *Aquatic Sciences*, 82: 5.
- Thibert E. & Bodin X. 2022. Changes in surface velocities over four decades on the Laurichard rock glacier (French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 33(3): 323-335.
- Williams M.W., Knauf M., Caine N., Liu F. & Verplanck P.L. 2006. Geochemistry and source waters of rock glacier outflow, Colorado Front Range. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17(1): 13-33.
- Williams M.W., Knauf M., Cory R., Caine N. & Liu F. 2007. Nitrate content and potential microbial signature of rock glacier outflow, Colorado Front Range. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(7): 1032-1047.
- Wirz V., Gruber S., Purves R.S., Beutel J., Gärtner-Roer I., Gubler S. & Vieli A. 2016. Short-term velocity variations of three rock glaciers and their relationship with meteorological conditions. *Earth Surface Dynamics*, 4: 103-123.

