

# Il permafrost nelle Alpi ticinesi (2017/2018 e 2018/2019). Rapporto no. 5 del gruppo Permafrost Ticino

Autor(en): **Scapozza, Cristian / Deluigi, Nicola / Del Siro, Chantal**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bollettino della Società ticinese di scienze naturali**

Band (Jahr): **108 (2020)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-1002963>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2017/2018 e 2018/2019)

## Rapporto No. 5 del Gruppo Permafrost Ticino

Cristian Scapozza<sup>1\*</sup>, Nicola Deluigi<sup>1,2</sup>, Chantal Del Siro<sup>1,3</sup>,  
Alessandra Pollo<sup>1,4</sup> e Marco Antognini<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Istituto scienze della Terra (IST), Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI), 6952 Canobbio, Svizzera

<sup>2</sup> Stream Biofilm and Ecosystem Research Laboratory, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),  
1015 Lausanne (affiliazione attuale), Svizzera

<sup>3</sup> Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST), Université de Lausanne, 1015 Lausanne, Svizzera

<sup>4</sup> Scuola di Scienze della Natura, Università degli Studi di Torino, 10126 Torino, Italia

<sup>5</sup> Museo cantonale di storia naturale, 6901 Lugano, Svizzera

\* [cristian.scapozza@supsi.ch](mailto:cristian.scapozza@supsi.ch)

**Riassunto:** Dall'anno idrologico 2017/2018 la temperatura media annua della superficie del suolo ha subito un riscaldamento compreso fra 1.70 e 2.71°C. Il riscaldamento è stato più marcato con l'aumentare della quota del ghiacciaio roccioso. La temperatura del suolo ha subito soprattutto l'influsso del periodo caldo di inizio agosto 2018, quando non c'era più l'effetto tampone della neve, come indicato dai valori massimi registrati fra gennaio e maggio del 2019. L'evoluzione sul lungo periodo della media annua della temperatura del suolo è stata caratterizzata dalle anomalie positive del 2015 e del 2019, che ne hanno causato un riscaldamento compreso fra 0.8 e 1.1°C nel decennio 2010-2019. La velocità orizzontale di superficie dei ghiacciai rocciosi, dopo la sostanziale diminuzione misurata nel 2016 e 2017, si è assestata nel 2018 su valori simili a quelli del 2017, mentre ha subito una significativa accelerazione nel 2019. Il riscaldamento della temperatura del suolo compreso fra 1.12 e 1.92°C in relazione alle anomalie termiche del 2015 e del 2019 ha causato un incremento di velocità di un fattore compreso fra 1.4 e 2.5 volte, con una relazione incrementalmente positiva fra il fattore di accelerazione e l'aumento di temperatura. Il confronto fra il 2015 e il 2019 consente di osservare come i valori più elevati di velocità dei ghiacciai rocciosi siano stati osservati durante estati calde che seguivano un inverno nevoso, mentre al contrario le velocità risultavano più contenute quando l'estate calda seguiva un inverno secco.

**Parole chiave:** acqua liquida, Alpi svizzere, fattori di controllo, cinematica, ghiacciaio roccioso, temperatura della superficie del suolo

### Permafrost in the Ticino Alps (2017/2018 and 2018/2019). Report No. 5 of the Gruppo Permafrost Ticino

**Abstract:** Since the hydrological year 2017/2018 the mean annual ground surface temperature has warmed up between 1.70 and 2.71°C. The warming has been more pronounced with the increase of the rock glacier elevation. The ground temperature was mainly influenced by the warm period at the beginning of August 2018, when there was no longer a snow buffer effect, as indicated by the maximum values recorded between January and May 2019. The long-term evolution of the mean annual ground surface temperature was characterised by two positive anomalies in 2015 and 2019, which caused a warming comprised between 0.8 and 1.1°C in the 2010-2019 decennium. The rock glaciers surface horizontal velocity, after the substantial decrease measured in 2016 and 2017, settled in 2018 at values similar to those of 2017, while it accelerated significantly in 2019. The warming of the ground temperature comprised between 1.12 and 1.92°C in relation to the temperature anomalies of 2015 and 2019 caused a velocity increase by a factor comprised between 1.4 and 2.5 times, with an incremental positive relationship between the acceleration factor and the temperature increase. The comparison between 2015 and 2019 allows to observe how the higher rock glacier velocities were observed during hot summers following a snowy winter, whereas at the opposite the velocities were lower when the hot summer followed a dry winter.

**Keywords:** control factors, ground surface temperature, kinematics, liquid water, rock glacier, Swiss Alps

## INTRODUZIONE

Il monitoraggio dello stato termico e della cinematica del permafrost nei detriti rocciosi delle Alpi ticinesi è fondato su una rete di otto ghiacciai rocciosi ripartiti fra la Val Bavona e la Valle di Blenio, ai quali si ag-

giunge una ghiacciaia naturale posta a 1350 m slm a monte di Olivone (per la localizzazione, vedi Scapozza et al. 2018). Questa rete di nove siti è gestita dall'Istituto scienze della Terra SUPSI, in collaborazione con la rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS (Noetzi et al. 2019; PERMOS 2019) e con il Museo

cantonale di storia naturale di Lugano. Su territorio ticinese, sono monitorati da parte dell'Università di Friburgo due ulteriori ghiacciai rocciosi sul Monte Prosa nella regione del Passo del San Gottardo (Noetzi et al. 2019). Per il ghiacciaio roccioso del Lago Nero, ultimo sito integrato nella rete di monitoraggio, un approfondimento legato all'evoluzione della temperatura negli anni idrologici 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018 è stato esposto in Scapozza et al. (2020).

Questo rapporto, che è il quinto della serie (per i rapporti precedenti, vedi Mari et al. 2012; Scapozza et al. 2014; 2016; 2018), ha l'obiettivo di presentare nel dettaglio i dati concernenti i due anni idrologici 2017/2018 e 2018/2019, di commentare l'effetto dell'estate canicolare 2019 e di discutere l'evoluzione dello stato termico e della cinematica dei ghiacciai rocciosi nell'ultimo decennio. Il biennio 2017/2018 e 2018/2019 segue un periodo durante il quale la temperatura della superficie del suolo aveva subito un raffreddamento e la velocità orizzontale della superficie dei ghiacciai rocciosi era diminuita dopo il picco di entrambi gli indicatori durante l'anno idrologico 2014/2015, con i valori più alti mai registrati fin dal 2006 (Scapozza et al. 2016). In particolare, per quanto concerne lo stato precedente al periodo coperto in questo contributo (vedi Scapozza et al. 2018), l'inverno 2015/2016 senza precipitazioni nevose di rilievo aveva permesso un raffreddamento significativo della temperatura della superficie del suolo (compreso fra  $-1.6$  e  $-2.5^{\circ}\text{C}$ ) tra il 5 settembre 2015 e metà agosto/fine settembre 2016. L'inverno 2016/2017 di nuovo asciutto aveva poi mantenuto stabile la temperatura della superficie del suolo, senza riscaldamenti significativi fino a maggio-giugno 2017. Ne conseguì una diminuzione compresa tra il 39% e il 64% della velocità orizzontale della superficie dei ghiacciai rocciosi dal 2015 al 2017, con le velocità medie del 2017 che furono le più basse dal 2009 per i siti di Stabbio di Largario (lobo E), Piancabella e Ganoni di Schenadüi.

## MATERIALI E METODI

### Monitoraggio della temperatura della superficie del suolo

Lo stato termico del permafrost è monitorato sulla base della misura della temperatura della superficie del suolo (GST: *Ground Surface Temperature*) grazie a sensori autonomi (mini-logger) del tipo UTL-3 (Geotest AG), con un'accuratezza di  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Le misure sono acquisite a cadenza bioraria (12 misure giornaliere fra la 1.00 e le 23.00), calibrate grazie alla fase di *zero curtain*, dove al momento della fusione del manto nevoso GST rimane invariabilmente a  $0^{\circ}\text{C}$  per diverse settimane (Scapozza 2009), e aggregate in GST medie giornaliere. Il monitoraggio di GST è eseguito in sei siti di alta quota (fra 2000 e 3000 m slm) e su di un sito (Ghiacciaia di Rambött) situato a media quota (fra 1000 e 2000 m slm). In alta quota, ogni sito è equipaggiato con 4 mini-logger al minimo, che possono essere anche 10 nei siti dove sono monitorati più elementi geomorfologici (ghiacciaio roccioso, falda di detrito, *ice patches*), come al Lago Nero e a Piancabella - Valle di Sceru (Tab. 1).

La media mobile su 365 giorni di GST medio giornaliero consente di calcolare la temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST: *Mean Annual Ground Surface Temperature*), che permette di quantificare le fluttuazioni stagionali/annuali di GST e di osservare la sua correlazione con le variazioni della cinematica dei ghiacciai rocciosi. La localizzazione, le caratteristiche, il numero di punti di misura di GST e i sensori utilizzati per calcolare MAGST per ogni sito sono presentati nella Tabella 1.

### Monitoraggio della cinematica dei ghiacciai rocciosi

Il monitoraggio della cinematica dei ghiacciai rocciosi è basato sulla misura della posizione tridimensionale di una serie di blocchi alla superficie del terreno grazie a un sistema satellitare globale di navigazione GNSS (*Global Navigation Satellite System*), con un'accuratezza di 0.5-2.0 cm sulla posizione orizzontale e di 1.0-2.5 cm (massimo 5.0 cm) sulla posizione verticale, acquisita con strumentazione Leica Geosystems SR530. Il confronto fra la posizione bidimensionale di ogni blocco da un anno all'altro consente di quantificarne lo spostamento orizzontale (dH), che è normalizzato su un periodo di 365 giorni per determinare la velocità media orizzontale di superficie annua (vH). La media di vH per una serie invariabile di punti di misura che sono considerati rappresentativi del movimento di insieme del ghiacciaio roccioso permette di calcolare la velocità orizzontale di riferimento ( $vH_{\text{ref}}$ , detta anche *reference value*). Nel caso di ghiacciai rocciosi complessi come quelli di Stabbio di Largario, dei Ganoni di Schenadüi e dell'Alpe Pièi,  $vH_{\text{ref}}$  è computata separatamente per ogni singolo lobo del ghiacciaio roccioso. Il numero di punti di misura GNSS e dei valori di riferimento per il calcolo di  $vH_{\text{ref}}$  sono presentati nella Tabella 2.

La relazione fra  $vH_{\text{ref}}$  e MAGST che, in assenza di misure dirette in perforazioni nel permafrost, costituiscono i due indicatori principali utilizzati nel monitoraggio svolto nelle Alpi Ticinesi, consente di valutare lo stato e l'evoluzione di questa componente della criosfera nei ghiacciai rocciosi nell'attuale periodo di riscaldamento climatico che interessa soprattutto l'alta montagna.

## RISULTATI

### Temperatura della superficie del suolo

Il confronto fra i valori minimi e massimi mostra un riscaldamento di MAGST compreso fra  $1.70$  e  $2.71^{\circ}\text{C}$  dall'anno idrologico 2017/2018, con un valore medio di ben  $2.16^{\circ}\text{C}$  (Tab. 3). Il riscaldamento è stato più marcato nei ghiacciai rocciosi situati più a nord e alle altitudini più alte, come quelli dei Ganoni di Schenadüi (2496-2591 m slm), del Passo di Grandinaglia (2614-2632 m slm) e del Pizzo Gallina (2723-2739 m slm), mentre è rimasto inferiore a  $0^{\circ}\text{C}$  sui due ghiacciai rocciosi situati più a sud e alle quote più basse, quelli di Stabbio di Largario (2291-2469 m slm) e Piancabella (2482-2569 m slm). Sull'evoluzione di MAGST ha influito soprattutto il periodo caldo di inizio agosto 2018, quando non c'era più l'effetto tampone della neve, come indicato dai va-

Tabella 1: Localizzazione e caratteristiche dei sensori per la misura della temperatura della superficie del suolo (GST), e sensori utilizzati per calcolare la temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST) per i siti di monitoraggio del permafrost gestiti dalla SUPSI. \* Sito PERMOS. Coordinate (Coord.) secondo il sistema svizzero CH1903+ / LV95.

No.	Sito/unità morfologica	Sensore	Coord. X	Coord. Y	Altitudine [m slm]	media MAGST
<b>29b</b>	<b>Pizzo Gallina</b>					
	ghiacciaio roccioso	GAL-L01	2'673'433	1'149'199	2723	GAL
	ghiacciaio roccioso	GAL-L02	2'673'367	1'149'238	2739	GAL
	ghiacciaio roccioso	GAL-L03	2'673'361	1'149'154	2716	
	ghiacciaio roccioso	GAL-L04	2'673'351	1'149'275	2736	
<b>30</b>	<b>Passo di Grandinagia</b>					
	ghiacciaio roccioso	PDG-L01	2'680'609	1'146'160	2632	PDG
	ghiacciaio roccioso	PDG-L02	2'680'682	1'146'165	2614	PDG
	ghiacciaio roccioso	PDG-L03	2'680'735	1'146'170	2594	
	ghiacciaio roccioso	PDG-L04	2'680'679	1'146'294	2589	
<b>30b</b>	<b>Lago Nero</b>					
	aria a 200 cm	LNE-L01	2'684'336	1'144'692	2406	
	suolo a -5 cm	LNE-L02	2'684'379	1'144'639	2412	
	suolo a -10 cm	LNE-L03	2'684'379	1'144'639	2412	
	suolo a -20 cm	LNE-L04	2'684'379	1'144'639	2412	
	ghiacciaio roccioso	LNE-L05	2'685'040	1'144'580	2585	LNE
	ghiacciaio roccioso	LNE-L06	2'685'060	1'144'555	2592	LNE
	ghiacciaio roccioso	LNE-L07	2'685'090	1'144'530	2600	LNE
	sorgente <i>ice patches</i>	LNE-L08	2'684'995	1'144'405	2556	
	<i>ice patches</i>	LNE-L09	2'685'030	1'144'400	2571	
<i>ice patches</i>	LNE-L10	2'685'075	1'144'365	2593		
<b>31</b>	<b>Ganoni di Schenadüi</b>					
	ghiacciaio roccioso	GDS-L01	2'700'326	1'156'997	2496	GDS
	ghiacciaio roccioso	GDS-L02	2'700'332	1'156'909	2520	GDS
	ghiacciaio roccioso	GDS-L03	2'700'320	1'156'824	2547	GDS
	ghiacciaio roccioso	GDS-L04	2'700'323	1'156'728	2591	GDS
<b>32</b>	<b>Piancabella – Valle di Sceru*</b>					
	affioramento roccioso	SCE-L01	2'720'151	1'145'742	2483	
	ghiacciaio roccioso	SCE-L02	2'720'154	1'145'630	2482	SCE
	ghiacciaio roccioso	SCE-L03	2'720'133	1'145'575	2504	SCE
	ghiacciaio roccioso	SCE-L04	2'720'060	1'145'449	2569	SCE
	falda di detrito	SCE-L05	2'720'064	1'145'655	2473	
	falda di detrito	SCE-L06	2'719'986	1'145'653	2516	
	falda di detrito	SCE-L07	2'719'936	1'145'631	2547	
	falda di detrito	SCE-L08	2'720'129	1'145'671	2460	
	ghiacciaio roccioso	SCE-L09	2'720'173	1'145'613	2480	
	ghiacciaio roccioso	SCE-L10	2'720'083	1'145'507	2530	SCE
<b>33</b>	<b>Stabbio di Largario*</b>					
	lobo Est ghiacciaio roccioso	SDL-L01	2'718'828	1'148'515	2349	SDL-E
	lobo Est ghiacciaio roccioso	SDL-L02	2'718'865	1'148'405	2368	SDL-E
	lobo Est ghiacciaio roccioso	SDL-L03	2'718'880	1'148'320	2438	SDL-E
	lobo Est ghiacciaio roccioso	SDL-L04	2'718'890	1'148'187	2469	SDL-E
	lobo Ovest ghiacciaio roccioso	SDL-L05	2'718'731	1'148'485	2300	SDL-O
	lobo Ovest ghiacciaio roccioso	SDL-L06	2'718'714	1'148'500	2291	SDL-O
–	<b>Ghiacciaia di Rambött</b>					
	aria nella ghiacciaia	RAM-L01	2'713'900	1'152'930	1350	
	aria esterna a 200 cm	RAM-L02	2'713'900	1'152'930	1350	

Tabella 2: Frequenza delle misurazioni, reti di punti di misura GNSS e dei valori di riferimento per il calcolo della velocità orizzontale di riferimento (vH<sub>ref</sub>) per i siti di monitoraggio del permafrost gestiti dalla SUPSI. \* Sito PERMOS.

No.	Sito	Misura	No. punti GNSS	No. punti vH <sub>ref</sub>	Punti vH <sub>ref</sub>
29	Pizzo Nero	Quinquennale	30	25	3-9, 11-23, 30-34
29b	Pizzo Gallina	Biennale	26	20	6-16, 18-26
30	Passo di Grandinagia	Biennale	32	16	1-11, 13-17
31	Ganoni di Schenadüi				
	lobo Ovest	Annuale	25	18	1-16, 14b, 16b
	lobo Est	Annuale	12	12	20-29, 29b, 29c
32	Piancabella*	Annuale	22	20	1-2, 5-22
33	Stabbio di Largario*				
	lobo Est	Annuale	28	21	1-17, 20-23
	lobo Ovest	Annuale	5	4	29-32
33b	Alpe Pièi				
	lobo inferiore	Triennale	17	6	8, 11-12, 14-16
	lobo superiore	Triennale	17	12	21-25, 27, 29-33, 35

Tabella 3: Valori minimi e massimi della temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST) e dell'aria (MAAT) e valori massimi della temperatura media giornaliera della superficie del suolo (dGST) e dell'aria (dAT) per il biennio idrologico 2017/2018 e 2018/2019. Dati MTR e ROE: MeteoSvizzera.

No.	Sito	MAGST/MAAT [°C]				Diff.	dGST/dAT [°C]	
		MIN	Data	MAX	Data		MAX	Data
29b	Pizzo Gallina	-1.40	04.10.2017	1.31	20.05.2019	2.71	13.09	24.07.2019
30	Passo di Grandinagia	-0.62	28.06.2018	1.57	14.05.2019	2.19	12.52	05.08.2018
30b	Lago Nero	-0.38	22.07.2018	1.75	13.05.2019	2.13	13.10	04.08.2018
31	Ganoni di Schenadüi	-1.19	02.01.2018	1.32	30.04.2019	2.51	14.06	05.08.2018
32	Piancabella	-0.17	26.12.2017	1.53	08.01.2019	1.70	12.91	01.08.2018
33	Stabbio di Largario							
	lobo Est	0.21	14.12.2017	2.20	03.05.2019	1.99	14.98	28.06.2019
	lobo Ovest	0.87	28.06.2018	2.77	27.04.2019	1.90	17.72	28.06.2019
MTR	Matro (2171 m slm)	2.11	16.04.2018	3.75	03.04.2019	1.64	21.40	27.06.2019
ROE	Robièi (1896 m slm)	3.43	16.04.2018	4.92	14.04.2019	1.49	21.30	27.06.2019

Tabella 4: Confronto fra i valori massimi della temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST) e della temperatura media annua dell'aria (MAAT) fra le estati canicolari del 2015 e 2019. Dati MTR e ROE: MeteoSvizzera. \* MAGST disponibile solo dall'01.10.2016.

No.	Sito	MAGST 2015 [°C]		MAGST 2019 [°C]		Differenza [°C]
		MAX	Data	MAX	Data	
29b	Pizzo Gallina	1.01	05.09.2015	1.31	20.05.2019	0.30
30	Passo di Grandinagia	1.39	05.09.2015	1.57	14.05.2019	0.18
30b	Lago Nero	1.94	08.08.2017*	1.75	13.05.2019	-0.19
31	Ganoni di Schenadüi	1.42	05.09.2015	1.32	30.04.2019	-0.10
32	Piancabella	1.77	05.09.2015	1.53	08.01.2019	-0.24
33	Stabbio di Largario					
	lobo Est	2.15	05.09.2015	2.20	03.05.2019	0.05
	lobo Ovest	2.71	01.10.2015	2.77	27.04.2019	0.06
MTR	Matro (2171 m slm)	3.63	09.02.2016	3.75	03.04.2019	0.12
ROE	Robièi (1896 m slm)	4.91	09.02.2016	4.92	14.04.2019	0.01

lori massimi registrati fra gennaio (Piancabella) e maggio (Pizzo Gallina) del 2019. L'effetto della presenza del manto nevoso sui siti del Passo di Grandinagia, Lago Nero, Ganoni di Schenadüi e Piancabella durante il periodo canicolare di fine giugno - inizio luglio 2019 è ben documentato grazie al valore massimo della temperatura media giornaliera della superficie del suolo (dGST) registrato a inizio agosto 2018. Sul ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario, dove l'innevamento era troppo scarso o assente per inibire la trasmissione di calore al suolo, questo valore massimo è invece stato toccato il 28.6.2019, in linea con il valore massimo della temperatura media giornaliera dell'aria in altitudine (dAT), registrato il 27.6.2019 dalle stazioni MeteoSvizzera del Matro (2171 m slm) e Robièi (1896 m slm). La data esatta di sparizione della neve nel 2019 è osservabile nell'andamento di GST e conferma quanto riportato sopra. Se essa è avvenuta fra il 20 e il 27 giugno sul ghiacciaio roccioso di Piancabella, fra il 25 giugno e il 4 luglio al Pizzo Gallina, fra il 1° e il 27 luglio al Passo di Grandinagia, fra il 2 e il 22 luglio ai Ganoni di Schenadüi e il 2 agosto sul ghiacciaio roccioso del Lago Nero, è stata più precoce a Stabbio di Largario, dove è avvenuta fra il 3 e il 16 giugno. Nonostante l'estate molto calda, va comunque rilevato come nell'avvallamento situato a nord del ghiacciaio roccioso di Piancabella (sensore SCE-L08) e sull'*ice patch* superiore al Lago Nero (sensore LNE-L10) la neve sia rimasta al suolo per tutto l'anno idrologico 2018/2019.

Il confronto fra i valori massimi di MAGST misurati durante l'estate eccezionalmente calda del 2015, registrati fra inizio settembre e il 1° ottobre 2015, e i valori massimi registrati nel 2019, mostra una differenza contenuta fra  $-0.24$  e  $0.30^{\circ}\text{C}$  (Tab. 4). È interessante notare come i valori massimi di MAGST nel 2019 siano il risultato del riscaldamento avvenuto fra inizio settembre 2018 e maggio 2019, vale a dire grossomodo durante il periodo innevato. L'effetto della canicola di fine giugno -

inizio luglio 2019 è stato quindi più limitato, anche grazie al fatto che in questo periodo persisteva ancora della neve al suolo in alta quota. Per darne un esempio, quando il 27.6.2019 la temperatura media giornaliera superava ampiamente i  $20^{\circ}\text{C}$  sia in cima al Matro sia a Robièi (Tab. 3), il valore medio giornaliero di GST era compreso fra  $1.12^{\circ}\text{C}$  sul ghiacciaio roccioso dei Ganoni di Schenadüi e  $4.10^{\circ}\text{C}$  sul ghiacciaio roccioso del Lago Nero. Dove la neve non era più presente, come sul ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario, il 28.6.2019 sono stati registrati i valori eccezionali di  $14.98^{\circ}\text{C}$  sul lobo Est e di ben  $17.72^{\circ}\text{C}$  sul lobo Ovest (Tab. 3).

L'evoluzione di MAGST dall'anno idrologico 2007/2008 è chiaramente caratterizzata dai picchi positivi del 2015 e del 2019 (Fig. 1), che hanno causato una netta tendenza al riscaldamento di GST. Questo è stato di  $0.88^{\circ}\text{C}$  in 11 anni sul ghiacciaio roccioso di Piancabella, dove però il periodo 2008-2013 è stato condizionato dall'inverno molto freddo del 2007/2008 e da quello freddo del 2009/2010 (Mari et al. 2012). Per quanto concerne MAGST media di tutti i siti, disponibile dall'autunno del 2010, la mancanza dei dati del periodo 2007-2010 e l'influsso delle estati del 2015 e del 2019 hanno come conseguenza un riscaldamento di  $0.99^{\circ}\text{C}$  in 9 anni (Fig. 1). Nel decennio 2010-2019 il riscaldamento di MAGST nelle Alpi Ticinesi è quindi stato compreso fra  $0.8$  e  $1.1^{\circ}\text{C}$ .

### Cinematica dei ghiacciai rocciosi

Dopo la sostanziale diminuzione misurata nel 2016 e 2017 (vedi Scapozza et al. 2018), nel 2018  $vH_{\text{ref}}$  si è assestata su valori simili a quelli del 2017 (Tab. 5 e Fig. 1). Sul sito di Stabbio di Largario e sul lobo Est del ghiacciaio roccioso dei Ganoni di Schenadüi, dal 2017 al 2018 si è assistito a un ulteriore, seppur lieve, rallentamento della velocità; quest'ultima è stata costante al Passo di Grandinagia, mentre sul lobo Ovest del ghiacciaio roccioso dei Ganoni di Schenadüi e a Piancabella

Tabella 5: Evoluzione della velocità orizzontale di riferimento ( $vH$ ) media e massima fra il 2015 e il 2019 e confronto fra il valore minimo e il 2019 (o, nel caso di Passo di Grandinagia, del 2018 che è l'ultimo dato disponibile).

No.	Sito	$vH$ media [ $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ ]					[%]	$vH$ massima [ $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ ]					[%]
		2015	2016	2017	2018	2019		$\Delta\text{MIN-2019}$	2015	2016	2017	2018	
<b>29</b>	<b>Pizzo Nero</b>	0.07	0.07				-	0.19	0.19				
<b>29b</b>	<b>Pizzo Gallina</b>	0.04	0.04	0.08	0.08	0.05	125	0.16	0.16	0.28	0.28	0.14	88
<b>30</b>	<b>Passo di Grandinagia</b>	0.16	0.16	0.11	0.11		69	0.43	0.43	0.25	0.25		58
<b>31</b>	<b>Ganoni di Schenadüi</b>												
	lobo Ovest	0.22	0.20	0.10	0.11	0.19	190	0.38	0.31	0.16	0.26	0.36	225
	lobo Est	0.19	0.15	0.09	0.08	0.20	250	0.40	0.30	0.17	0.13	0.38	292
<b>32</b>	<b>Piancabella</b>	0.26	0.20	0.16	0.17	0.23	144	0.45	0.41	0.38	0.41	0.51	134
<b>33</b>	<b>Stabbio di Largario</b>												
	lobo Est	0.77	0.48	0.28	0.26	0.49	188	1.44	0.82	0.53	0.68	1.00	189
	lobo Ovest	1.23	0.88	0.56	0.45	0.64	142	1.26	0.90	0.57	0.46	0.65	141
<b>33b</b>	<b>Alpe Pièi</b>												
	lobo inferiore	0.02	0.02	0.02			-	0.03	0.03	0.03			-
	lobo superiore	0.03	0.03	0.03			-	0.04	0.04	0.04			-

si è misurata una lieve accelerazione ( $+0.01 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ). Nel 2019 è stato possibile per contro osservare una significativa accelerazione di quasi tutti i ghiacciai rocciosi monitorati, con valori compresi fra il 142 e il 250% rispetto al minimo registrato nel 2017 o nel 2018. In linea generale, dopo il rallentamento avvenuto fra il 2016 e il 2018,  $vH_{\text{ref}}$  è ritornata a valori simili a quelli misurati nel 2014. Un'evoluzione simile è presente anche nelle velocità massime misurate (Tab. 5), dove l'aumento percentuale rispetto alla velocità media è

sostanzialmente più elevato solamente sul ghiacciaio roccioso dei Ganoni di Schenadüi, segno che il settore più rapido ha registrato un incremento di velocità maggiore rispetto al resto del ghiacciaio roccioso in questi ultimi 2-3 anni.

L'unica eccezione alla tendenza generale è costituita dal ghiacciaio roccioso del Pizzo Gallina, che ha presentato un aumento della velocità media del 200% nel biennio 2017-2018 rispetto al 2016 e una successiva diminuzione del 62.5% dal 2018 al 2019.

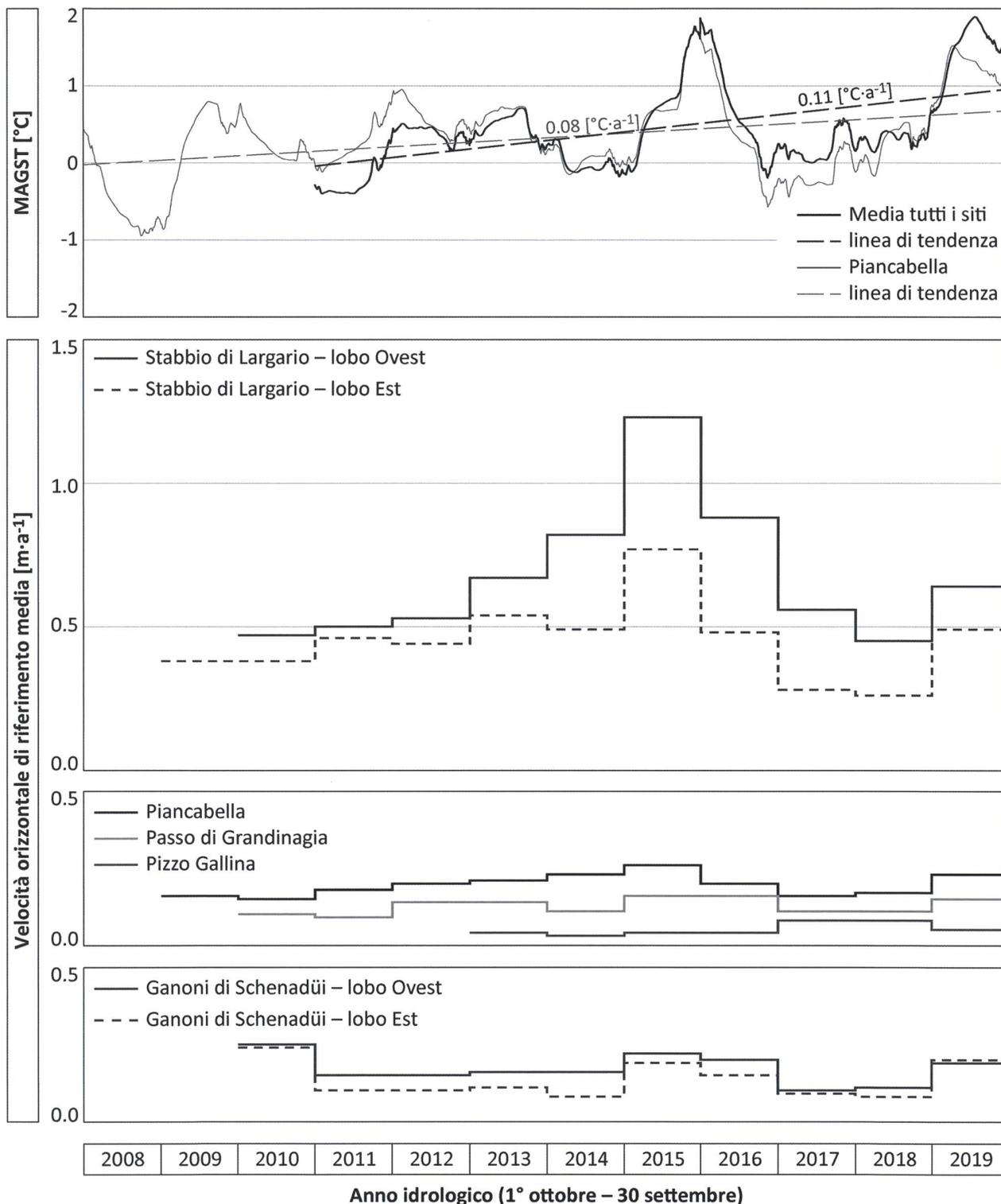


Figura 1: Evoluzione della temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST) e della velocità orizzontale di riferimento media dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi fra gli anni idrologici 2007/2008 (segnato come 2008) e 2018/2019 (segnato come 2019).

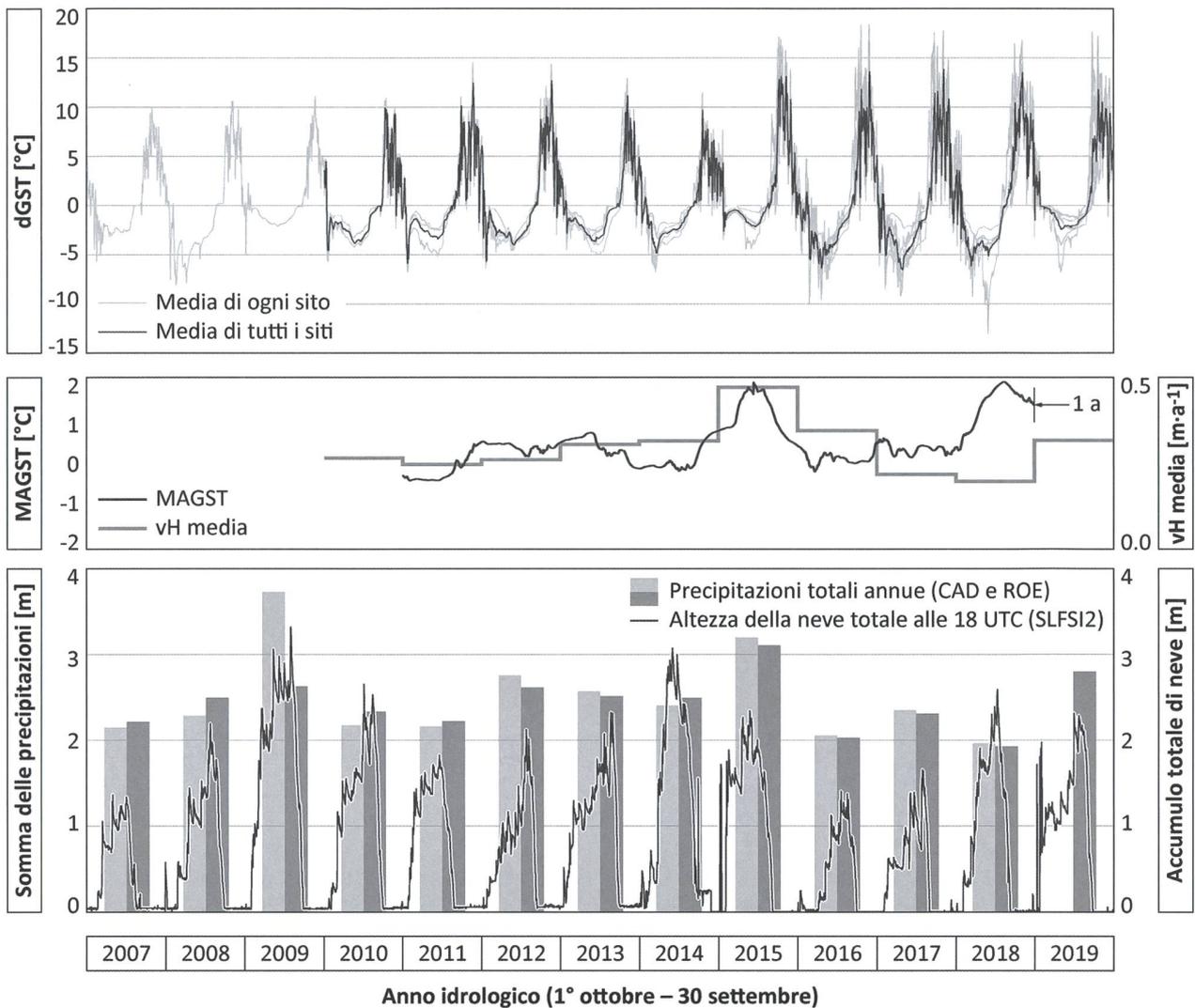


Figura 2: Evoluzione della temperatura media giornaliera del suolo (dGST), della relazione fra temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST; che è stata spostata indietro nel tempo di 1 a) e velocità orizzontale di riferimento (vH) media, e delle precipitazioni totali e nevose in alta quota dal 1.10.2006 al 30.9.2019. CAD: Cavagnoli Diga (2°682'219/1°145'480; 2332 m slm), dati MeteoSvizzera (non disponibili per il 2019). 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.

## DISCUSSIONE

### Relazione fra la cinematica e la temperatura dei ghiacciai rocciosi

Come già evidenziato, anche in maniera quantitativa, nei precedenti rapporti sul permafrost nelle Alpi Ticinesi (vedi, in particolare, Scapozza et al. 2018), l'evoluzione della velocità dei ghiacciai rocciosi è correlata con l'andamento di MAGST. Questo legame è particolarmente evidente per quanto concerne le anomalie termiche positive registrate nel 2015 e nel 2019, in risposta alle quali si è assistito a una significativa accelerazione della velocità dei ghiacciai rocciosi (Figg. 1 e 2). Va poi considerato come GST non rifletta solamente le variazioni di temperatura dell'aria, ma integri anche le variazioni di innevamento (data, spessore, durata), le caratteristiche della superficie del terreno e i processi di trasferimento di calore nel sottosuolo (Staub et al. 2015). Se gli ultimi due fattori sono poco variabili a corto-medio termine (fatta eccezione per modifiche alla superficie dovute all'apporto di materiale detritico da

parte di valanghe, crolli o flussi di detrito o modifiche sostanziali della porosità del sottosuolo dovute all'aumento dell'aria a scapito del ghiaccio), è chiaro come il monitoraggio di GST consenta di valutare l'effetto delle variazioni delle temperature atmosferiche e dell'innevamento sulla superficie del suolo.

Ne abbiamo un ennesimo esempio durante l'inverno 2018/2019 quando, a causa delle condizioni meteorologiche molto miti al Sud delle Alpi e all'innevamento tardivo e abbondante nelle Alpi (MeteoSvizzera 2020), dGST sono state fra le più calde dall'inverno 2006/2007, superate solamente da quelle registrate durante l'inverno 2014/2015 (Fig. 2).

Il paragone fra l'anomalia positiva di GST del 2019 e quella registrata nel 2015 permette di valutare l'effetto tampone esercitato dall'innevamento. Nel 2015 il picco di riscaldamento di MAGST avvenne in concomitanza con il picco di riscaldamento della temperatura media annua dell'aria (MAAT: *Mean Annual Air Temperature*). Considerando che l'estate 2015 fu estremamente calda e fu preceduta dall'inverno 2014/2015 particolarmente

mite al Sud delle Alpi, l'effetto dell'intero anno idrologico 2014/2015 portò a un riscaldamento di MAGST di  $+1.7^{\circ}\text{C}$  per il ghiacciaio roccioso di Piancabella,  $+1.9^{\circ}\text{C}$  per quello dei Ganoni di Schenadüi, e di ben  $+2.2^{\circ}\text{C}$  per quello di Stabbio di Largario (Scapozza et al. 2016). Visto lo scarso innevamento primaverile e l'assenza di neve a inizio estate, l'anomalia positiva di MAAT ebbe un effetto diretto sull'anomalia positiva di MAGST, causando una significativa accelerazione di  $vH_{\text{ref}}$  che fu praticamente sincrona al riscaldamento delle temperature dell'aria e del suolo. Per quanto concerne il 2019, al contrario, l'inizio estate molto caldo (con il secondo mese di giugno più caldo dal 1864; MeteoSvizzera 2020) ha avuto un influsso minore su GST a causa della persistenza della neve al suolo. Questa differenza fra il 2015 e il 2019 è ben visibile nella sovrapposizione fra la curva di MAGST spostata indietro nel tempo di un anno rispetto all'andamento di  $vH$  (Fig. 2), dove i picchi di entrambi gli indicatori sono sincroni nel 2015 e spostati nel tempo nel 2019.

Partendo dalla relazione esponenziale teorica fra la velocità di reptazione e la temperatura del permafrost (Arenson 2002), è possibile stabilire la relazione empirica tra la velocità massima e la temperatura media annua dell'aria (vedi Scapozza et al. 2016: 42; Scapozza et al. 2018: 18) e quindi fra la velocità orizzontale di superficie media e MAGST, della forma (Scapozza et al. 2018: 18):

$$vH \approx a \cdot e^{(b \cdot \text{MAGST})} \quad (1)$$

Considerando i dati degli anni idrologici 2017/2018 e 2018/2019, in paragone al 2016/2017 i parametri  $a$  e  $b$  variano rispettivamente fra 0.17 e 0.36 (0.20 per tutti i siti considerati assieme) e fra 0.24 e 0.28 (0.44 per tutti i siti considerati assieme). Se in confronto a quanto riportato da Scapozza et al. (2018: 18) la variazione del parametro  $a$  è aumentata di 0.09, quella di  $b$  è stata nettamente più ristretta, diminuendo di conseguenza l'esponenzialità dell'accelerazione di  $vH$  in funzione dell'aumento di *MAGST*.

### Fattori di controllo della cinematica dei ghiacciai rocciosi

Stando ai modelli numerici concernenti la cinematica di un ghiacciaio roccioso (Kääb et al. 2007), considerare una più complessa reologia delle miscele di ghiaccio e detriti (*ice-debris mixtures*) è teoricamente possibile e dovrebbe essere inclusa nei futuri modelli che riproducono la reptazione di un ghiacciaio roccioso (Müller et al. 2016). Fra le informazioni addizionali di tipo quantitativo che dovrebbero essere raccolte sul terreno e che potrebbero aiutare nello sviluppo di modelli più vicini alla realtà, bisognerà considerare soprattutto il ruolo dell'umidità e dell'acqua allo stato liquido (Ikeda et al. 2008; Lambiel 2011; Cicoria et al. 2019). L'apporto di acqua liquida nel corpo di un ghiacciaio roccioso lo possiamo valutare indirettamente considerando i dati delle precipitazioni in alta quota (Fig. 2). Il picco positivo di accelerazione di  $vH$  registrato nel 2015 corrisponde all'anno idrologico con la somma delle precipitazioni più alta dal 2010 (3200 mm alla Diga del Cavagnoli e

3109 mm a Robièi, stazioni gestite da MeteoSvizzera in alta Val Bavona). Anche l'accelerazione registrata nel 2019 corrisponde con un anno dove lo stock idrico è stato importante, con il secondo valore più alto dal 2010 nella somma totale delle precipitazioni registrata a Robièi (2800 mm). Una tendenza simile, seppure meno marcata, si ritrova nella variazione dell'altezza della neve totale misurata al Piano del Simano, in Valle di Blenio (Fig. 2). Per quanto concerne l'innnevamento, l'effettivo apporto idrico nel ghiacciaio roccioso non è direttamente quantificabile senza calcolare il livello di neve equivalente in acqua SWE (*Snow-Water Equivalent*), vale a dire lo spessore dello strato d'acqua corrispondente ottenuta dalla fusione del manto nevoso, che richiede la conoscenza della densità della neve. Questo valore permette però di osservare l'evoluzione e la durata del manto nevoso. Per quanto concerne l'inverno 2018/2019, la neve è arrivata precocemente il 27.10.2018 ed è rimasta al suolo per ben 245 giorni fino al 29.6.2019, tamponando di fatto l'effetto del periodo canicolare di fine giugno. A titolo di paragone, nell'inverno 2014/2015 la data di arrivo della neve è stata leggermente più tardiva (4.11.2014), e la sua sparizione 214 giorni dopo (il 6.6.2015) è avvenuta con ben 23 giorni di anticipo rispetto al 2019.

L'apporto di acqua nel corpo di un ghiacciaio roccioso sembra avere un forte impatto sulle proprietà delle miscele di ghiaccio e detriti, anche se l'effetto di un avvicinamento della temperatura al punto di fusione del ghiaccio deve essere ancora maggiormente compreso (Moore 2014) per stabilire una legge che spieghi correttamente la deformazione di un ghiacciaio roccioso (Müller et al. 2016; Cicoria et al. 2019). Questo aspetto è relativamente complesso poiché il riscaldamento del permafrost non solo influenzerà le proprietà reologiche del ghiaccio stesso, ma cambierà anche il rapporto fra il ghiaccio e i detriti, riducendo il volume di ghiaccio e aumentando di conseguenza la porosità rappresentata dalla frazione volumetrica di aria e/o acqua liquida (Scapozza et al. 2015). Un nuovo rapporto fra il ghiaccio e i detriti avrà l'effetto di alterare la viscosità del ghiacciaio roccioso in maniera eterogenea dal punto di vista spaziale (Müller et al. 2016), poiché è stato dimostrato da diversi autori come gli effetti della fusione del ghiaccio siano spazialmente diversi secondo la quantità di ghiaccio, la pendenza e quindi, la posizione considerata nel ghiacciaio roccioso (Arenson & Springman 2005; Monnier & Kinnard 2016).

Se si può supporre che l'impatto di un cambiamento nel rapporto volumetrico fra ghiaccio e acqua liquida avrà delle conseguenze solamente a medio-lungo termine, è stato altresì dimostrato come le variazioni di umidità dovute a eventi pluviometrici intensi possono avere un impatto sulla reologia di un ghiacciaio roccioso a corto termine, addirittura nell'arco di pochi giorni (Wirz et al. 2016a; Cicoria et al. 2019). I soli dati a disposizione nelle Alpi Ticinesi che potrebbero illustrare questo comportamento a corto termine sono quelli raccolti dal monitoraggio continuo dei movimenti grazie a due ricevitori GPS fissi mono-frequenza installati sul ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario a settembre del 2014 (Wirz et al. 2016b). Purtroppo, a causa di

problemi tecnici, non è ancora stato possibile stabilire una serie temporale di misure che sia completa su più anni idrologici, in maniera da approfondire la reazione del ghiacciaio roccioso ai cambiamenti di umidità del terreno. Questo sarà uno degli aspetti da approfondire in prima priorità nei prossimi anni.

I dati di temperatura e velocità raccolti da più di dieci anni sui ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi permettono però di rivelare il loro comportamento cinematico generale, con il vantaggio di identificare i fattori di controllo più essenziali nell'evoluzione della velocità di un ghiacciaio roccioso. I valori teorici stabiliti da Arenson & Springman (2005) indicano un aumento della velocità di superficie di un fattore variabile fra 1.4, 1.7 e 2.7 volte per un riscaldamento di 1°C, partendo da una temperatura iniziale di riferimento del ghiacciaio roccioso di rispettivamente -2, -1.5 e -1°C (vedi Müller *et al.* 2016: 2875); in altre parole, più la temperatura di un ghiacciaio roccioso è prossima a 0°C e più il fattore di incremento della velocità di reptazione è elevato. Gli stessi fattori di incremento compresi fra 1.4 e 2.7 del tasso di aumento della reptazione di un ghiacciaio roccioso sono stati stabiliti nelle Alpi Svizzere da Müller *et al.* (2016: 2879) utilizzando un modello numerico. Se questo comportamento teorico è consistente con la misurazione di un'accelerazione di vH del 300% durante l'anno idrologico 2003/2004, caratterizzato da condizioni di innevamento eccezionali e da un'estate molto calda (Delaloye *et al.* 2010), esso è visibile anche nell'evoluzione degli indicatori misurati nelle Alpi Ticinesi in relazione alle anomalie positive di MAGST e vH osservate nel 2015 e nel 2019 (Tab. 6). Non sola-

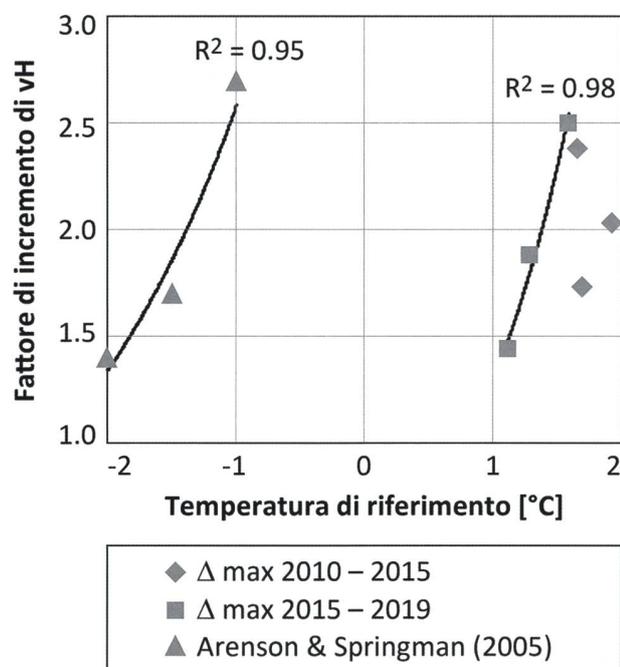


Figura 3: Relazione fra la temperatura di riferimento (la temperatura del ghiacciaio roccioso riscaldata di 1°C per Arenson & Springman 2005, il riscaldamento di MAGST per i ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi) e il fattore di incremento della velocità orizzontale di superficie (vH). Le linee di regressione sono di tipo esponenziale. Da notare la differenza di 2.6-3.1°C fra la temperatura del sottosuolo e della superficie del suolo.

Tabella 6: Confronto fra la differenza di temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST) e l'incremento della velocità orizzontale di riferimento (vH) in relazione ai picchi dei due indicatori registrati nel 2015 e nel 2019. GDS: Ganoni di Schenadüi; SCE: Piancabella (Valle di Sceru); SDL - E: Stabbio di Largario, lobo Est.

	Ghiacciaio roccioso		
	GDS	SCE	SDL - E
<b>Δ max 2010-2015</b>			
MAGST [°C]	1.66	1.70	1.92
vH [m · a <sup>-1</sup> ]	0.11	0.11	0.39
vH [%]	238	173	203
<b>Δ max 2015-2019</b>			
MAGST [°C]	1.59	1.12	1.29
vH [m · a <sup>-1</sup> ]	0.12	0.07	0.23
vH [%]	250	144	188

mente il riscaldamento di MAGST compreso fra 1.12 e 1.92°C ha causato un incremento di vH di un fattore compreso fra 1.4 e 2.5 volte (e fino a 2.9 volte per le velocità massime, vedi Tab. 5), ma più MAGST aumenta e più il fattore di incremento di vH cresce. È difficile stabilire una relazione con i fattori determinati da Arenson & Springman (2005), poiché nel nostro caso si tratta di temperature della superficie del suolo. Ciò nonostante, la tendenza evolutiva è simile, con le linee di regressione che sono quasi parallele, soprattutto fra i dati teorici di Arenson & Springman (2005) e l'evoluzione fra il 2015 e il 2019 (Fig. 3). È stata adottata una regressione esponenziale coerentemente a quanto proposto da Arenson & Springman (2005) in Müller *et al.* (2016: 2871) e per analogia con la relazione stabilita fra vH e MAGST presentata nell'Equazione 1 (cf. Arenson 2002; Staub 2015; Scapozza *et al.* 2018). Da notare come, fra la temperatura del ghiacciaio roccioso (e quindi del sottosuolo) e quella della superficie del suolo, vi sia una differenza compresa fra 2.6 e 3.1°C, coerente con quanto è possibile osservare nelle perforazioni nel permafrost delle Alpi Svizzere fra la superficie e 10 m di profondità (PERMOS 2019).

Considerando le misurazioni svolte sui ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi e quanto osservato da Wirz *et al.* (2016a) e da Cicoria *et al.* (2019), si potrebbe ipotizzare che i picchi di velocità siano stati causati principalmente da forti infiltrazioni d'acqua dovute a intensa fusione nivale e/o a forti precipitazioni nei giorni precedenti l'inizio dell'accelerazione. Il ghiacciaio roccioso potrebbe quindi funzionare a ciclo stagionale di velocità, con un'accelerazione estiva fortemente influenzata dall'acqua di fusione nivale (e quindi dalle quantità di neve accumulatisi durante il periodo autunnale-primaverile) e dagli eventi pluviometrici intensi estivo-autunnali, e una decelerazione invernale influenzata dal raffreddamento del suolo in inverno (anch'esso dipendente dalla data di arrivo e dal quantitativo totale della neve).

I dati di monitoraggio raccolti nelle Alpi Ticinesi indicano che nessuno dei ghiacciai rocciosi è stato destabilizzato dal riscaldamento delle temperature os-

servato in questo ultimo decennio, contrariamente a quanto avvenuto per altri siti delle Alpi Svizzere, dove l'accelerazione dei movimenti ha condotto a cambiamenti significativi della loro cinematica e morfologia (per es. Lambiel 2011; Marcer et al. 2019; Vivero & Lambiel 2019). Un'avvisaglia avrebbe potuto essere la risposta del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario all'importante riscaldamento avvenuto nel 2015 (con un'accelerazione di  $vH$  del 150% rispetto al 2014), ma la successiva decelerazione e la limitata accelerazione delle velocità nel 2019 hanno fatto rientrare questo potenziale allarme. Non è stato il caso in altre regioni delle Alpi (per es. Ravelin et al. 2017; Marcer et al. 2019), dove l'ondata di caldo dell'estate 2015 ha avuto effetti significativi sul permafrost montano, che possono aver favorito le condizioni iniziali di un processo di destabilizzazione di un ghiacciaio roccioso (Vivero & Lambiel 2019). La successiva evoluzione delle condizioni meteorologiche con numerose estati calde, indica che la fusione nivale concentrata potrebbe aver indotto una lubrificazione per opera dell'acqua liquida nell'orizzonte di taglio dove avviene la maggior parte della deformazione, portando in alcuni casi a dei veri e propri distacchi di intere parti della sezione inferiore di un ghiacciaio roccioso (per es. Vivero & Lambiel 2019). L'effetto dell'aumento di temperatura sulla reologia del ghiacciaio roccioso è quindi osservabile nel comportamento stagionale/annuale dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi, dove  $vH$  presenta delle oscillazioni in linea con le fluttuazioni di MAGST. Le anomalie positive di temperatura del 2015 e del 2019 sembrerebbero inoltre indicare che, a questa tendenza a medio-lungo termine, si possa sommare un'influenza a corto termine legata all'effetto dell'apporto in acqua liquida dovuto alla fusione nivale concentrata e/o agli eventi pluviometrici più intensi nel modificare la reologia dei medi porosi con ghiaccio, detriti di roccia, acqua liquida e aria (cf. Cicoria et al. 2019). Il proseguo del monitoraggio continuo degli spostamenti in atto sul ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario potrà, nel prossimo futuro, fornire maggiori dati di terreno a supporto di questa ipotesi.

## CONCLUSIONE

L'analisi delle anomalie termiche positive registrate nel 2015 e 2019, in risposta alle quali è stata misurata una significativa accelerazione della velocità dei ghiacciai rocciosi, ha permesso di rafforzare la relazione empirica fra la velocità orizzontale di superficie media e MAGST (Eq. 1) già proposta nei rapporti precedenti. Le temperature della superficie del suolo dei ghiacciai rocciosi osservati nelle Alpi Ticinesi indicano uno stato termico già relativamente "temperato" del permafrost, vale a dire prossimo a 0°C, e mostrano una tendenza a un ulteriore riscaldamento, in linea con quanto osservato a livello svizzero (Nötzli et al. 2019; PERMOS 2019) e alpino (Kellerer-Pirklbauer et al. 2018). Nelle Alpi Ticinesi il riscaldamento di MAGST compreso fra 1.10 e 1.92°C legato alle anomalie termiche del 2015 e del 2019 ha causato un incremento di velo-

cità dei ghiacciai rocciosi di un fattore compreso fra 1.4 e 2.5 volte. Si è inoltre osservato come più MAGST aumenta e più il fattore di incremento della velocità cresce di conseguenza. Questi dati sono perfettamente in linea con il modello teorico proposto da Müller et al. (2016), dove per un riscaldamento di 1°C partendo da una temperatura del ghiacciaio roccioso di -2°C il fattore di aumento di velocità risulta essere di 1.4 volte, mentre esso raddoppia e diventa di 2.7 volte per lo stesso riscaldamento di 1°C applicato a una temperatura iniziale del ghiacciaio roccioso di -1°C.

Il confronto fra le due significative accelerazioni di velocità dei ghiacciai rocciosi avvenute nel 2015 e nel 2019 ha portato a interrogarsi sull'effetto tampone esercitato dalla presenza della neve durante un evento canicolare e sul conseguente ruolo dell'infiltrazione di acqua liquida proveniente dalla fusione del manto nevoso e/o dall'apporto durante eventi pluviometrici particolarmente intensi. Se, da una parte, come mostrato da Wirz et al. (2016) e da Cicoria et al. (2019), i picchi di velocità potrebbero essere stati causati principalmente da forti infiltrazioni d'acqua dovute a intensa fusione nivale e/o a forti precipitazioni nei giorni precedenti l'inizio dell'accelerazione, dall'altra le condizioni di innevamento più tardivo registrate nel 2019 rispetto al 2015 avrebbero avuto l'effetto di inibire la trasmissione di calore nel sottosuolo durante l'evento canicolare di fine giugno/inizio luglio. Considerato che i due processi hanno differenti velocità di trasporto di calore, resta da valutare quale può essere il bilancio termico, a corto-medio termine, fra: (1) la presenza della neve al suolo in periodi di temperature dell'aria estremamente elevate (che inibisce la trasmissione di calore nel sottosuolo) e; (2) la sua successiva infiltrazione sotto forma di acqua liquida nel periodo di fusione (che favorisce la trasmissione di calore nel sottosuolo). Sappiamo già da ora che questo bilancio termico consente di osservare i valori più elevati di  $vH$  durante estati calde che seguono inverni nevosi, e  $vH$  più basse quando l'estate calda segue un inverno secco.

Considerando sia il legame fra MAGST e la velocità di un ghiacciaio roccioso, sia quello fra la disponibilità di acqua liquida e lo stato termico del permafrost, tanto i modelli teorici quanto i valori misurati nelle Alpi Ticinesi indicano che la prosecuzione del riscaldamento del permafrost avrà probabilmente l'effetto di amplificare ulteriormente la risposta in accelerazione dei ghiacciai rocciosi.

## RINGRAZIAMENTI

L'acquisizione dei dati sui ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi è stata 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 Stefano Bergamaschi, Dorota Czerski, Alessandro De Pedrini e Arturo Di Giacinto. La versione finale del manoscritto ha beneficiato dei commenti di Andrea Pedrazzini e Filippo Schenker.

## REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

- Arenson L. 2002. Unstable alpine permafrost: a potentially important natural hazard – Variations of geotechnical behaviour with time and temperature. PhD Thesis, ETH Zürich, Diss. ETH No. 14801, 271 pp.
- 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.
- Cicoria A., Beutel J., Faillettaz J. & Vieli A. 2019. Water controls the seasonal rhythm of rock glacier flow. *Earth and Planetary Science Letters*, 528: 115844.
- Delaloye R., Lambiel C. & Roer I. 2010. Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps. Seasonal rhythm, interannual variations and trends over several decades. *Geographica Helvetica*, 65: 135-145.
- Ikeda A., Matsuoka N. & Kääh A. 2008. Fast deformation of perennially frozen debris in a warm rock-glacier in the Swiss Alps: an effect of liquid water. *Journal of Geophysical Research*, 113: F01021.
- Kääh A., Frauenfelder R. & Roer I. 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, 56: 172-187.
- Kellerer-Pirklbauer A., Delaloye R., Lambiel C., Gärtner-Roer I., Kaufmann V., Scapozza C., Krainer K., Staub B., Thibert E., Bodin X., Fischer A., Hartl L., Morra di Cella U., Mair V., Marcer M. & Schoeneich P. 2018. Interannual variability of rock glacier velocities in the European Alps. Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Conference on Permafrost (EUCOP5), Chamonix, Mont-Blanc, 23<sup>rd</sup> June-1<sup>st</sup> July 2018: 396-397.
- Lambiel C. 2011. Le glacier rocheux déstabilisé de Tsaté-Moiry (VS): caractéristiques morphologiques et vitesses de déplacement. In: Lambiel C., Reynard E. & Scapozza C. (éds), *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte*. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie, Olivone, Suisse, 3-5.9.2009. Université de Lausanne, Institut de Géographie, *Géovisions*, 36, pp. 211-224.
- Marcer M., Serrano C., Brenning A., Bodin A., Goetz J. & Schoeneich P. 2019. Evaluating the destabilization susceptibility of active rock glaciers in the French Alps. *The Cryosphere*, 13: 142-155.
- 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.
- MeteoSvizzera 2020. *Bollettino del clima dell'anno 2019*. Locarno-Monti, Ufficio federale di meteorologia e climatologia, 13 pp.
- Monnier S. & Kinnard C. 2016. Interrogating the time and processes of development of the Las Liebres rock glacier, central Chilean Andes, using a numerical flow model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 1884-1893.
- Moore P.L. 2014. Deformation of debris-ice mixtures. *Reviews of Geophysics*, 52: 435-467.
- 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.
- Nötzli J., Pellet C. & Staub B. (eds.) 2019. *Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018*. Glaciological Report Permafrost No. 16-19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 104 pp.
- PERMOS 2019. PERMOS Database. Swiss Permafrost Monitoring Network, Fribourg and Davos, Switzerland. <http://dx.doi.org/10.13093/permos-2019-01>
- Ravanel L., Magnin F. & Deline P. 2017. Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of the Total Environment*, 609: 132-143.
- 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., 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., Baron L. & Lambiel C. 2015. Borehole logging in Alpine Periglacial Talus Slopes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 26: 67-83.
- 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., Bulgheroni M., Pera S., Pozzoni M., Colombo L. & Lepori F. 2020. Assessing the impact of ground ice degradation on high mountain lake environments (Lago Nero catchment, Swiss Alps). *Aquatic Sciences*, 82: 5.
- Staub B. 2015. Key messages from observational mountain permafrost research. *The Evolution of Mountain Permafrost in Switzerland (TEMPS)*, Final Symposium, 4-5.2.2015, Sion, Switzerland.
- Staub B., Marmy A., Hauch C., Hilbich C. & Delaloye R. 2015. Ground temperature variations in a talus slope influenced by permafrost: a comparison of field observations and model simulations. *Geographica Helvetica*, 70: 45-62.
- Vivero S. & Lambiel C. 2019. Monitoring the crisis of a rockglacier with repeated UAV surveys. *Geographica Helvetica*, 74: 59-69.
- Wirz V., Gruber S., Purves R.S., Beutel J., Gärtner-Roer I., Gubler S. & Vieli A. 2016a. Short-term velocity variations of three rock glaciers and their relationship with meteorological conditions. *Earth Surface Dynamics*, 4: 103-123.
- Wirz V., Beutel J., Delaloye R., Gsell T., Gruber S., Gärtner-Roer I., Hasler A., Kenner R., Limpach P., Müller J., Phillips M., Rietzo H., Scapozza C., Vieli A. & Weber S. 2016. Short-term variability of rock glacier surface velocities in the Swiss Alps revealed by continuous GPS. In: Günther F. & Morgenstern A. (eds.), *XI. International Conference on Permafrost – Book of Abstracts*, 20-24.6.2016, Potsdam, Germany. Potsdam, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, pp. 1064-1065.

