

Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2013/2014 e 2014/2015)

Rapporto No. 3 del Gruppo Permafrost Ticino

Cristian Scapozza¹, Elisa Giaccone^{2*}, Stefano Mari³, Marco Antognini⁴,
Simona Fratianni² e Christian Ambrosi¹

¹ Istituto scienze della Terra (IST), Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI),
Campus Trevano, CH-6952 Canobbio

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, Via Valperga Caluso 35, I-10124 Torino

³ Liceo di Lugano 2, Nuova Via S. Gottardo, CH-6942 Savosa

⁴ Museo cantonale di storia naturale, Viale Carlo Cattaneo 4, CP 5487, CH-6901 Lugano

cristian.scapozza@supsi.ch

Riassunto: In questo contributo sono presentati i dati climatici e le velocità di spostamento di sette ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi. Per il periodo dal 2010 al 2015, si è osservato un aumento significativo delle temperature del suolo in zone di permafrost (+ 1.4 °C in media) a seguito dell'estate e autunno 2011 molto caldi e, soprattutto, dell'anno 2015 estremamente caldo. Questo riscaldamento ha causato un'accelerazione delle velocità di spostamento di quasi tutti i ghiacciai rocciosi, con valori fino al 50% superiori rispetto all'inizio delle misurazioni nel 2009. Il 2015 è stato da primato per quanto concerne le temperature della superficie del suolo, con un riscaldamento della superficie dei ghiacciai rocciosi monitorati compreso tra 1.7 e 2.2 °C. L'aumento di temperatura del permafrost ha probabilmente avuto un effetto importante sulle velocità di spostamento dei ghiacciai rocciosi monitorati, che hanno subito un incremento dal 126 al 174%. Si è potuta stabilire una relazione matematica di tipo esponenziale tra le temperature dell'aria, della superficie del suolo e le velocità medie e massime di spostamento dei ghiacciai rocciosi. Questo implicherebbe che il grande aumento di velocità osservato alla fine dell'anno idrologico 2014/2015 non sarebbe dovuto esclusivamente all'estate eccezionalmente calda del 2015, ma all'effetto cumulato del quinquennio 2011-2015, il più caldo dal 1864.

Parole chiave: ghiacciaio roccioso, cinematica, temperatura della superficie del suolo, DGPS, Alpi svizzere

Permafrost in the Ticino Alps (2013/2014 and 2014/2015). Report No. 3 of the Gruppo Permafrost Ticino

Abstract: In this contribution the climatical data and the displacement velocities of seven rock glaciers of the Ticino Alps are presented. We observed for the period 2010-2015 a significant increase in ground surface temperatures in permafrost zones (+1.4 °C in mean) following the very warm summer and autumn 2011 and, particularly, the very hot year 2015. This warming caused an acceleration of displacement velocities for almost all the rock glaciers, with values up to 50% higher with respect of the beginning of monitoring in 2009. Year 2015 established a record concerning the ground surface temperatures, with a surface warming of the monitored rock glacier comprised between 1.7 and 2.2 °C. The permafrost temperature warming had probably a significant effect on displacement velocities of monitored rock glaciers, which presented an increase from 126 to 174%. It was possible to establish an exponential mathematical relationship between air temperature, ground surface temperatures and mean and maximum rock glacier displacement velocities. This implies that the significant speed up observed at the end of hydrological year 2014/2015 is not only related with the exceptionally warm summer 2015, but probably results from the cumulative effect of the 2011-2015 period, that was the warmest since 1864.

Keywords: rock glacier, kinematics, ground surface temperature, DGPS, Swiss Alps

INTRODUZIONE

Monitoraggio del permafrost in Ticino

Dalle prime misurazioni sistematiche della temperatura della superficie del suolo (GST – *Ground Surface Temperature*) e della cinematica dei ghiacciai rocciosi iniziate nel 2009, il monitoraggio dello stato e dell'evoluzione del permafrost nelle Alpi Ticinesi ha oramai superato il lustro di attività. In questo terzo rapporto del Gruppo Permafrost Ticino, si farà lo stato sull'evoluzione del

permafrost nelle Alpi Ticinesi per gli anni idrologici 2013/2014 e 2014/2015. Per i primi cinque anni di misure (periodo 2006-2011), vedi Mari et al. (2012), mentre per il biennio idrologico 2011/2012 e 2012/2013, vedi Scapozza et al. (2014a). Faremo riferimento a quest'ultima pubblicazione per quanto concerne il contesto scientifico nel quale si è sviluppata la rete di mo-

* Attualmente presso: Institut des Dynamiques de la Surface Terrestre (IDYST), Université de Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne.

monitoraggio del permafrost gestita dall'Istituto scienze della Terra SUPSI, la descrizione dettagliata dei siti di studio e dei parametri monitorati. Un riassunto della temperatura e movimenti dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi dal 2006 al 2014, così come un'analisi climatica condotta in collaborazione con l'Università degli Studi di Torino, sono presentati in Scapozza et al. (2015) e Giaccone et al. (2016a, b).

Siti di studio

I ghiacciai rocciosi monitorati dalla SUPSI nelle Alpi Ticinesi sono sette (Fig. 1 e Tab. 1). Le osservazioni svolte sui siti ticinesi sono di due tipi (vedi Scapozza et al. 2014a): (1) la misura in continuo della temperatura della superficie del suolo (GSTM); (2) la misura dei movimenti annui o pluriennali dello strato superficiale dei ghiacciai rocciosi mediante GPS differenziale (DGPS). Inoltre, i siti No. 32/Piancabella e No. 33/Stabbio di Largario sono integrati alla rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS (PERMOS, 2013; Paul et al., 2015). Per il sito No. 33/Stabbio di Largario, da settembre 2014 sono pure disponibili i dati di movimento in continuo in due punti misurati con dei ricevitori GPS mono-frequenza installati in collaborazione con la Scuola Politecnica Federale di Zurigo e l'Ufficio federale dell'ambiente (Wirz et al., 2016). Questo sito è diventato nel 2015 il sito di riferimento della rete PERMOS (*PERMOS Reference Site*) per il sud delle Alpi Svizzere.

RISULTATI E INTERPRETAZIONE

Evoluzione della temperatura della superficie del suolo

La tendenza climatica è studiata grazie all'evoluzione della temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST – *Mean Annual Ground Surface Temperature*), che è calcolata mediante una media mobile delle temperature medie giornaliere su 365 giorni (Fig. 2A).

Il periodo analizzato in questo rapporto inizia con una tendenza al raffreddamento di MAGST dopo l'importante riscaldamento avvenuto durante l'estate e autunno 2011 e a seguito dell'inverno 2012/2013, caratterizzato da temperature fredde nelle Alpi e da

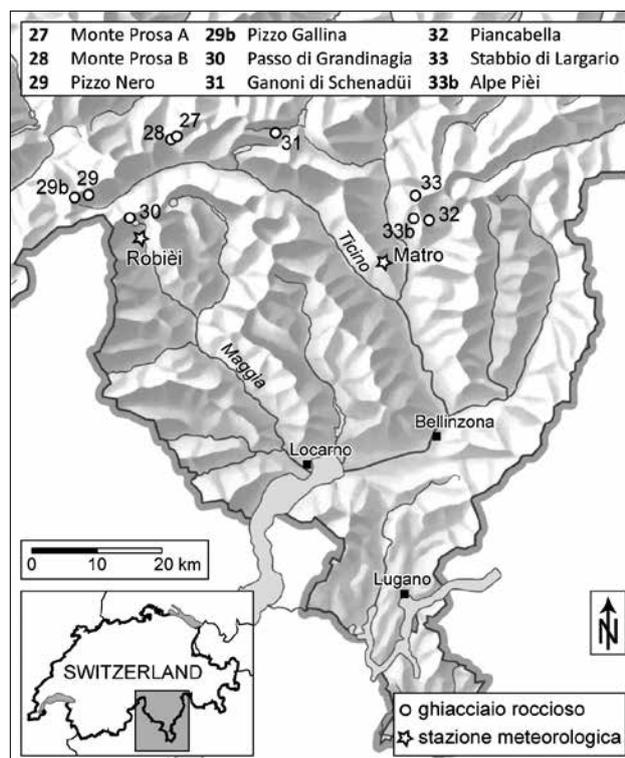


Figura 1: Localizzazione dei ghiacciai rocciosi monitorati nelle Alpi Ticinesi e delle stazioni climatiche di riferimento. Base cartografica: © swisstopo.

precipitazioni nevose scarse al Sud delle Alpi. Il valore minimo di MAGST dal 2010 è quindi stato raggiunto a inizio 2013 per quasi tutti i ghiacciai rocciosi, con un raffreddamento variabile tra 0.73 °C (Passo di Grandinaglia) e 1.1 °C (Piancabella e Ganoni di Schenadüi), registrato tra metà gennaio e fine febbraio. Questo piccolo freddo di MAGST è intervenuto con un ritardo di circa 3-5 mesi rispetto ai valori minimi della temperatura media annua dell'aria (MAAT – *Mean Annual Air Temperature*). Questa si è raffreddata di 1.9 °C a Robièi e di 2.2 °C al Matro tra fine gennaio 2012 e fine settembre 2013 (da +4.7 °C il 31.01.2012 a +2.8 °C il 19.09.2013 a Robièi, e da +3.2 °C il 31.01.2012 a +1.0 °C il 26.09.2013 al Matro). MAGST è poi rimasta sostanzialmente stabile durante la primavera e l'estate 2014. Solo il sito di Stabbio di Largario ha presentato un comportamento leggermente diverso, dove dai

Tabella 1: Confronto tra la velocità orizzontale di superficie massima registrata nel 2015 rispetto alla media del periodo 2009-2014. Per la localizzazione e le principali caratteristiche dei siti, vedi Fig. 1 e Scapozza et al. (2014a).

No.	Sito	Regione	Altitudine [m s.l.m.]	Istituzione responsabile	Vel. max. media 2009-2014 [m a ⁻¹]	Vel. max 2015 [m a ⁻¹]
27	Monte Prosa A*	Gottardo	2430-2600	UniFR	0.67	1.39
28	Monte Prosa B*	Gottardo	2450-2520	UniFR	0.20	-
29	Pizzo Nero	Val Bedretto	2600-2700	SUPSI	0.15	-
29b	Pizzo Gallina	Val Bedretto	2660-2760	SUPSI	0.11	-
30	Passo di Grandinaglia	Val Bavona	2560-2800	SUPSI	0.30	-
31	Ganoni di Schenadüi	Val Cadlimo	2480-2640	SUPSI	0.31	0.40
32	Piancabella*	Val Malvaglia	2440-2550	SUPSI	0.44	0.45
33	Stabbio di Largario*	Val Soi	2240-2550	SUPSI	0.90	1.44
33b	Alpe Pièi	Valle di Blenio	2340-2500	SUPSI	0.05	-

* Sito PERMOS

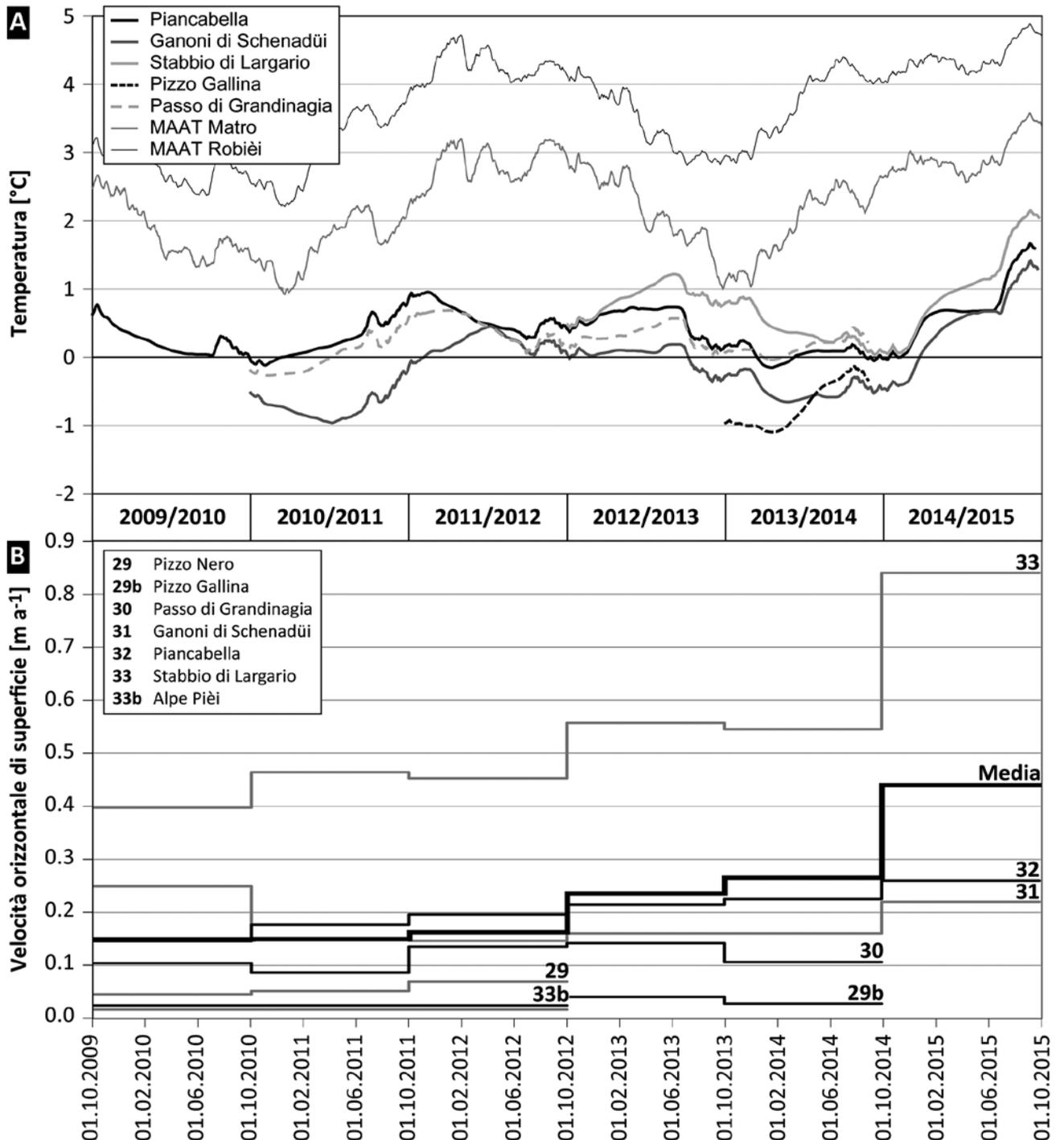


Figura 2: Evoluzione dei parametri monitorati dal 2010 al 2015. A) Temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST – Mean Annual Ground Surface Temperature) dei ghiacciai rocciosi e temperatura media annua dell’aria (MAAT – Mean Annual Air Temperature) per le stazioni del Matro (2171 m s.l.m.) e di Robièi (1896 m s.l.m.) (dati: MeteoSvizzera). B) Velocità orizzontale media di superficie dei sette ghiacciai rocciosi monitorati nelle Alpi Ticinesi.

+1.2 °C di inizio giugno 2013 (i dati per l’anno idrologico 2011/2012 non sono disponibili) si è passati agli 0.0 °C di inizio settembre 2014, che corrispondono al valore più freddo di MAGST mai registrato su questo ghiacciaio roccioso.

Il suolo ha potuto probabilmente mantenere una temperatura costante a seguito delle precipitazioni nevose abbondanti che hanno portato al Sud delle Alpi Svizzere dal 200 al 300% di neve in più, rispetto alla norma, tra ottobre 2013 e fine febbraio 2014 (Paul et al., 2015). L’estate 2014 è poi stata caratterizzata da nuvolosità importante, con valori di soleggiamento compre-

si tra l’80 e il 90% rispetto alla norma 1981-2010 nelle Alpi Ticinesi, e quindi relativamente fresca (MeteoSvizzera, 2015). Dal punto di vista delle temperature, MAAT ha presentato un riscaldamento di +1.6 °C da fine settembre 2013 a inizio luglio 2014, con il valore più caldo del 2014 che è stato di +4.4 °C a Robièi, rispettivamente +2.6 °C al Matro, il 03.07.2014 (Fig. 2A). L’andamento della temperatura dell’aria è più coerente con le condizioni climatiche del 2014 rispetto alla temperatura della superficie del suolo perché non risente della variabilità di innevamento. Dal punto di vista prettamente climatico, infatti, al Sud delle Alpi il

2014 è stato di +1.0 °C più caldo rispetto alla norma 1981-2010.

Il 2015 è stato l'anno più caldo registrato in Svizzera dopo il 2011 e il 2014, con una deviazione dalla norma 1981-2010 di +1.3 °C al Sud delle Alpi (MeteoSvizzera, 2016). L'inverno 2014/2015 è stato particolarmente mite al Sud delle Alpi, e può essere considerato il secondo più caldo dall'inizio delle misurazioni nel 1864 dopo quello del 2006/2007 (Luterbacher et al., 2007). L'estate 2015 è risultata estremamente calda, seconda solo a quella del 2003, con uno scarto dalla norma 1981-2010 compreso tra +1.6 e +2.3 °C al Sud delle Alpi (ma con il mese di luglio più caldo in assoluto). Anche l'autunno è stato estremamente mite e soleggiato. L'effetto dell'estate 2015 su MAAT in altitudine è stato marcato, con un riscaldamento di +0.8 °C a Robièi e di +1.0 °C al Matro tra metà aprile e inizio settembre 2015 (Fig. 2A). L'effetto dell'intero anno idrologico 2014/2015, estremamente caldo, sulla temperatura della superficie del suolo è stato molto marcato, e ha portato a un riscaldamento di MAGST di +1.7 °C per il ghiacciaio roccioso di Piancabella, +1.9 °C per quello dei Ganoni di Schenadüi, e di ben +2.2 °C per quello di Stabbio di Largario. Per tutti i siti monitorati, MAGST a inizio settembre 2015 registrava i valori più alti dall'inizio delle misurazioni.

Evoluzione della cinematica dei ghiacciai rocciosi

La velocità orizzontale di superficie dei ghiacciai rocciosi monitorati (Fig. 2B) segue la tendenza all'accelerazione dei movimenti in atto dal 2011. Rispetto al 2012/2013, vi è però stata una leggera diminuzione di velocità per i ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario (da 0.56 a 0.55 m a⁻¹), del Passo di Grandinaglia (da 0.14 a 0.11 m a⁻¹) e del Pizzo Gallina (da 0.04 a 0.03 m a⁻¹, molto prossimi quindi al margine di incertezza delle misure GPS, che è di 2-3 cm) durante il 2013/2014. Ai Ganoni di Schenadüi la velocità è rimasta costante, mentre il solo aumento si è riscontrato per il ghiacciaio roccioso di Piancabella (da 0.21 a 0.23 m a⁻¹). Un aumento di velocità importante è stato però misurato sul ghiaccia-

io roccioso del Monte Prosa A, nella regione del Passo del San Gottardo, con un incremento da 0.43 a 0.53 m a⁻¹ tra il 2014 e il 2015 (comunicazione personale di R. Delaloye, Università di Friburgo). L'anno idrologico 2014/2015 è stato al contrario caratterizzato dalle velocità di spostamento dei ghiacciai rocciosi più rapide mai registrate al Sud delle Alpi Svizzere. Le velocità medie hanno registrato un'accelerazione per tutti e tre i ghiacciai rocciosi per i quali sono disponibili i dati 2015 (Fig. 2B e Tab. 2).

Eccezionalità dell'anno idrologico 2014/2015

L'anno idrologico 2014/2015 è stato eccezionale, sia per quanto concerne le temperature della superficie del suolo, sia per la cinematica dei ghiacciai rocciosi. Per evidenziare le modifiche di temperatura, è stata calcolata un'anomalia di GST rispetto alla media di tutto il periodo precedente all'anno 2014/2015 per i ghiacciai rocciosi di Piancabella, dei Ganoni di Schenadüi e di Stabbio di Largario (Fig. 3A). Fino a settembre 2014, le variazioni di GST erano sempre comprese tra -1.0 e +0.5 °C, ma con una media del periodo inferiore a 0 °C. La media dell'anomalia termica di GST per l'anno idrologico 2014/2015 è invece nettamente positiva, con valori da 0.4 a 0.7 °C più caldi rispetto alla media pre-2015. In termini assoluti, il riscaldamento di GST nel 2015 rispetto alla media 2010-2014 è stato notevole, con valori ben superiori al grado centigrado e che hanno superato addirittura +1.5 °C ai Ganoni di Schenadüi (Tab. 2).

Per quanto concerne la cinematica dei ghiacciai rocciosi, la velocità media del 2015 è stata tra il 126 e il 174% più alta rispetto alla media del periodo 2010-2014, con un aumento di velocità assoluto di 0.05 m a⁻¹ per i Ganoni di Schenadüi, di 0.07 m a⁻¹ per Piancabella e di 0.36 m a⁻¹ per Stabbio di Largario (Tab. 2). Tale tendenza è evidente anche sulle velocità massime registrate per ogni ghiacciaio roccioso (Tab. 1), che indicano per Stabbio di Largario e Monte Prosa A dei valori prossimi o superiori a 1.40 m a⁻¹, corrispondenti a valori di spostamento annui mai misurati sui ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi.

Tabella 2: Velocità orizzontale, temperatura media annua del suolo e anomalia di GST su 18 mesi per tre ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi tra il 2010 e il 2015.

No.	Sito	2010	2011	2012	2013	2014	Media 2010-2014	2015	Differenza
Velocità orizzontale di superficie media [m a⁻¹]									
31	Ganoni di Schenadüi	0.25	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.22	126%
32	Piancabella	0.15	0.18	0.20	0.21	0.23	0.19	0.26	134%
33	Stabbio di Largario	0.40	0.46	0.45	0.56	0.55	0.48	0.84	174%
Temperatura media annua del suolo (MAGST) [°C]									
31	Ganoni di Schenadüi	-0.52	-0.14	0.04	-0.27	-0.46	-0.27	1.25	+1.52 °C
32	Piancabella	-0.04	0.86	0.41	0.17	-0.02	0.28	1.51	+1.23 °C
33	Stabbio di Largario			0.48	0.80	0.07	0.45	2.01	+1.45 °C
Anomalia di GST nei 18 mesi precedenti la misura della velocità [°C]									
31	Ganoni di Schenadüi		0.45	1.13	0.65	0.29	0.63	1.52	+0.89 °C
32	Piancabella		0.29	0.79	0.97	0.76	0.62	1.24	+0.62 °C
33	Stabbio di Largario			-0.37	0.91	0.91	0.50	1.36	+0.86 °C

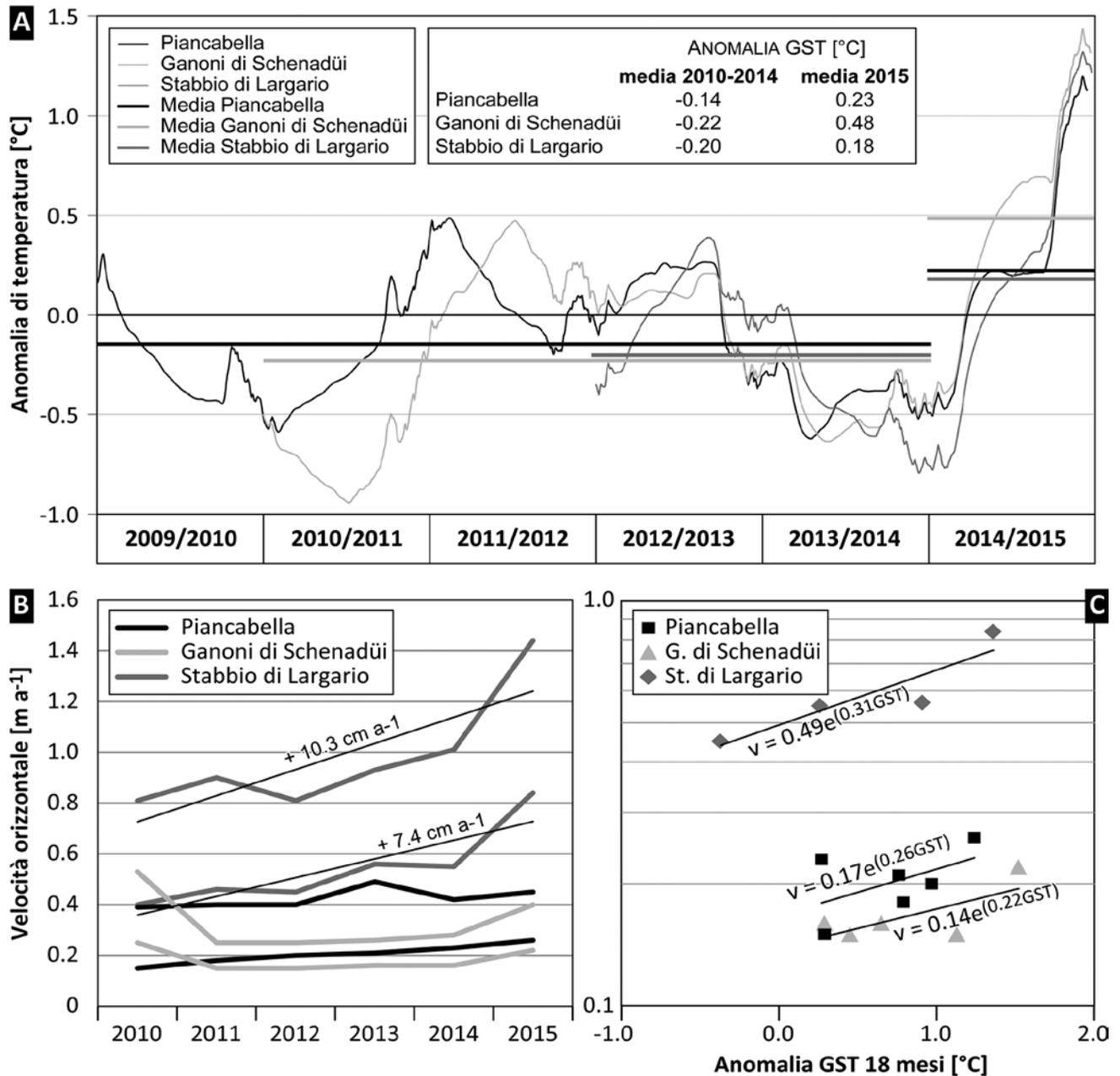


Figura 3: Confronto tra l'evoluzione della temperatura e la cinematica dei ghiacciai rocciosi. A) Anomalia di temperatura della superficie del suolo (GST – *Ground Surface Temperature*) rispetto alla media del periodo 2010-2015 e confronto tra l'anomalia di temperatura media per il periodo precedente il 2014/2015 e per l'anno idrologico 2014/2015. B) Evoluzione della velocità orizzontale media e massima di tre ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi dal 2010 al 2015. C) Relazione tra l'anomalia di temperatura della superficie del suolo su 18 mesi e la velocità orizzontale media di tre ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi.

RELAZIONI TRA LA TEMPERATURA E LA CINEMATICA DEI GHIACCIAI ROCCIOSI

Il confronto visuale tra le variazioni di temperatura alla superficie del suolo e di velocità orizzontale di superficie dei ghiacciai rocciosi mostra chiaramente un legame tra questi due parametri (Fig. 2). MAGST non riflette esclusivamente le variazioni di temperatura dell'aria (altrimenti le curve di MAAT e di MAGST riportate nella Fig. 2A sarebbero in buona parte parallele), ma integra pure due importanti offset termici che determinano la trasmissione del calore dall'atmosfera al corpo del permafrost: quello dovuto alla neve (*snow thermal offset*), determinato da variazioni di spessore, densità e durata della copertura nevosa, e quello dovuto alla superficie del suolo stessa (*surface thermal offset*)

determinato da albedo, rugosità, permeabilità, ecc. della superficie del suolo e della parte superficiale dello strato attivo (Scapozza, 2009; Scapozza et al., 2014a). È quindi possibile considerare MAGST come un buon indicatore delle variazioni di temperatura nella parte superiore del corpo del permafrost.

La relazione tra GST e velocità orizzontale è ben visibile nella Fig. 3, dove le curve di variazione annua delle velocità medie e massime dei ghiacciai rocciosi di Piancabella e dei Ganoni di Schenadüi (Fig. 3B) seguono grosso modo l'andamento dell'anomalia di temperatura (Fig. 3A). Le velocità massime per Piancabella presentano infatti un picco nel 2013, in corrispondenza all'anomalia positiva di GST (non visibile però sulle velocità medie), mentre l'andamento delle velocità medie e massime per i Ganoni di Schenadüi presenta

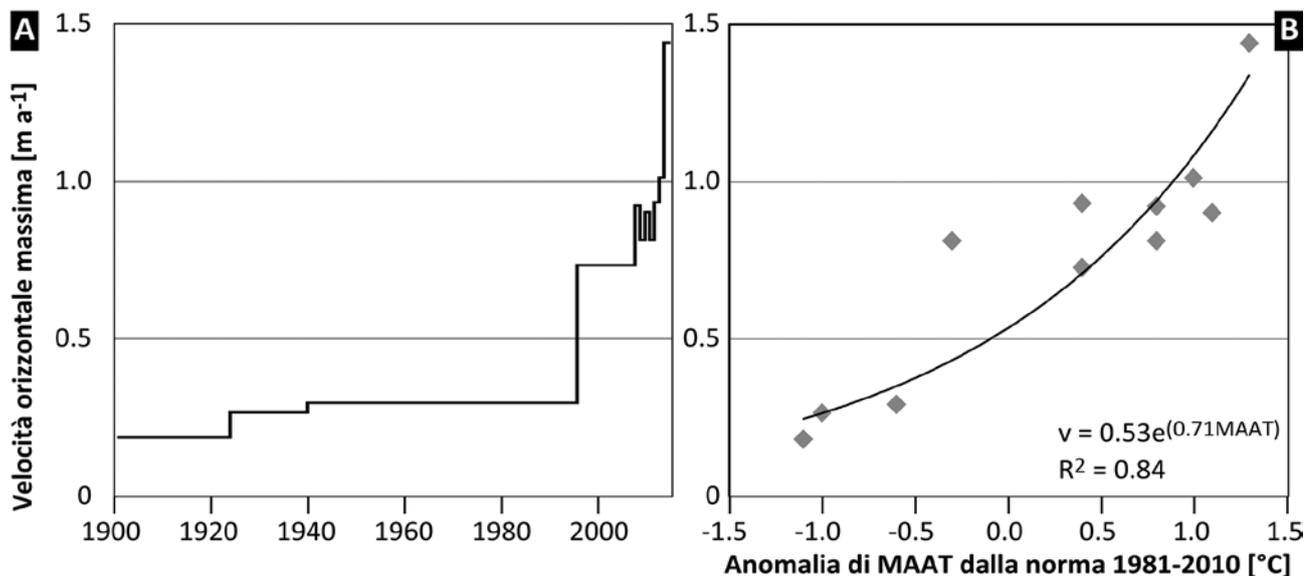


Figura 4: Confronto tra la cinematica di un ghiacciaio roccioso e l'evoluzione della temperatura media dall'inizio del Novecento. A) Compilazione della velocità orizzontale di superficie massima del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario ottenuta tramite analisi monofotogrammetrica digitale (periodo 1901-2008; dati: Scapozza et al., 2014b) e monitoraggio al GPS differenziale (periodo 2009-2015). B) Relazione tra l'anomalia di temperatura dell'aria rispetto alla norma 1980-2010 per la stazione di Lugano (dati: MeteoSvizzera) e la velocità orizzontale massima del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario.

addirittura una diminuzione dei valori tra il 2010 e il 2011, un assestamento tra il 2011 e il 2014 e un nuovo aumento nel 2015, in linea con l'andamento generale di GST per tutto il periodo. Un andamento simile si riscontra anche per Stabbio di Largario, dove la tendenza all'aumento di velocità è però molto più marcata rispetto agli altri due ghiacciai rocciosi. Per questo sito, che è nettamente il più rapido tra tutti quelli monitorati al Sud delle Alpi Svizzere, è possibile quantificare un aumento di velocità annuo di $+0.07 \text{ m a}^{-1}$ per quanto concerne le velocità medie, e di ben $+0.10 \text{ m a}^{-1}$ per le velocità massime, indicando che il settore più rapido del ghiacciaio roccioso ha tendenza ad accelerare più rapidamente rispetto al resto della formazione.

Normalmente i picchi di velocità di un ghiacciaio roccioso rispetto a quelli di GST sono ritardati da tre a sei mesi. Questo comportamento è dovuto al tempo necessario al calore per penetrare in profondità nel corpo del permafrost e raggiungere l'orizzonte di taglio dove avviene la maggior parte della deformazione (Delaloye et al., 2010). Con l'obiettivo di analizzare la relazione tra velocità del ghiacciaio roccioso e GST è stata calcolata un'anomalia di GST che tenga conto dei 18 mesi precedenti la fine dell'anno idrologico per il quale è stata misurata la velocità di spostamento. In altre parole, se si considera che gli spostamenti annui, misurati di norma tra la metà di settembre e inizio ottobre, siano un indicatore della variazione di velocità dall'anno precedente, grazie alla media di GST su 18 mesi si tiene conto delle condizioni di temperatura dei sei mesi precedenti all'anno idrologico in esame.

La relazione che risulta tra la velocità orizzontale e l'anomalia di GST su 18 mesi è di tipo esponenziale (Fig. 3C). È interessante notare come le tre regressioni calcolate siano grosso modo parallele, indicando un'evoluzione simile dei tre ghiacciai rocciosi studiati, indipendentemente dalla loro velocità di spostamento assoluta. Tali dati sono coerenti con quanto calcolato

da Staub (2015) per il ghiacciaio roccioso della Gemmi, nelle Alpi Bernesi, che ha trovato la seguente relazione esponenziale tra velocità e anomalia di GST su 18 mesi:

$$v \approx 1.25 e^{(0.9 \text{ GST})} [\text{m a}^{-1}]$$

Per avere una maggiore profondità temporale, i dati di monitoraggio al GPS differenziale del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario sono stati completati per il periodo tra il 1901 e il 2008 da dati di spostamento calcolati grazie alla monofotogrammetria digitale da parte di Scapozza et al. (2014b) (Tab. 3). Tenendo conto che la monofotogrammetria ha permesso di desumere le velocità di spostamento sulla base della posizione del fronte del ghiacciaio roccioso, che si trova poco a valle del settore che presenta i movimenti più rapidi di tutta la formazione (vedi Scapozza et al., 2014a), tali valori devono essere considerati quasi come delle velocità orizzontali massime; le velocità di spostamento del fronte del ghiacciaio roccioso dovrebbero difatti essere leggermente inferiori rispetto alla velocità della lingua. Il quadro generale è quello di un'accelerazione graduale lungo tutto il Novecento e l'inizio del XXI secolo, con importanti aumenti di velocità alla fine del secolo scorso e tra il 2014 e il 2015 (Fig. 4A). La relazione con l'anomalia di MAAT rispetto alla norma 1981-2010 è significativa (Fig. 4B), con un coefficiente di determinazione (R^2) di 0.84, corrispondente a un coefficiente di correlazione (R) di 0.92, che permette di considerare i due parametri fortemente dipendenti. Ne consegue quindi che, per un aumento della temperatura, l'accelerazione di velocità del ghiacciaio roccioso che ne consegue è esponenziale, secondo la relazione:

$$v_{\text{max}} \approx a e^{(b \text{ MAAT})} [\text{m a}^{-1}]$$

dove, per Stabbio di Largario: $a = 0.53$; $b = 0.71$

Questa relazione non è sorprendente, poiché è stato dimostrato dal confronto tra la velocità massima di un campione globale di ghiacciai rocciosi e MAAT al fronte che la reptazione (*creep*) del permafrost aumenta in modo esponenziale con l'aumento della temperatura del permafrost in prossimità del punto di fusione del ghiaccio (Kääb et al., 2007). I valori teorici del coefficiente b calcolati da Kääb et al. (2007) si situano tra 0.6 e 0.8. Il valore del coefficiente b di 0.71 ritrovato per il ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario, oltre che a inserirsi perfettamente tra i valori teorici, ha il pregio di essere derivato dalla relazione empirica tra velocità e MAAT per un solo ghiacciaio roccioso.

Possiamo quindi concludere che, tanto i modelli teorici, quanto le osservazioni compiute sui ghiacciai rocciosi del Sud delle Alpi Svizzere, indicano che un aumento continuo di MAGST ha l'effetto di incrementare le velocità di spostamento di un ghiacciaio roccioso, soprattutto in condizioni di permafrost quasi temperato (temperature molto prossime a 0 °C).

La crescita esponenziale della velocità di spostamento in funzione della temperatura potrebbe indicare che un ghiacciaio roccioso non reagirebbe solamente alle variazioni climatiche dell'anno precedente, ma che molto probabilmente risenta di un effetto cumulato di più stagioni/anni idrologici con tendenza al riscaldamento delle temperature (Noetzi et al., 2016; PERMOS, 2016). Il grande aumento di velocità registrato alla fine dell'anno idrologico 2014/2015 non sarebbe quindi dovuto esclusivamente all'estate eccezionalmente calda del 2015, ma risulterebbe dall'effetto cumulato del 2014 (terzo anno più caldo dopo il 2015 e il 2011) e forse anche degli anni precedenti, con il quinquennio 2011-2015 che è stato il più caldo in assoluto dal 1864.

RINGRAZIAMENTI

L'acquisizione dei dati è stata possibile grazie all'aiuto finanziario della rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS, del Museo cantonale di storia naturale di Lugano e della "Fondazione Avv. Dott. Angelo Berla, console generale, e Teresita Berla nata Veglio". Un ringraziamento particolare a Riccardo Scotti per la rilettura critica del manoscritto, a Reynald Delaloye per i dati di Monte Prosa A, a tutti coloro che hanno fornito il loro contributo nell'acquisizione dei dati sul terreno, e alle Officine Idroelettriche della Maggia SA (Ofima) per il supporto logistico alle misurazioni compiute sul ghiacciaio roccioso del Passo di Grandinagia.

BIBLIOGRAFIA

- 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. [<http://geogr-helv.net/65/135/2010/gh-65-135-2010.pdf>]
- Giaccone E., Fratianni S., Mari S., Antognini M., Ambrosi C. & Scapozza C. 2016a. Le pergélisol au Sud des Alpes Suisses (Tessin): étude de sept glaciers rocheux et relations avec le

Tabella 3: Confronto tra lo scarto di temperatura rispetto alla norma per la stazione climatica di Lugano (dati: MeteoSvizzera) e la velocità massima del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario, ricostruita tra il 1901 e il 2008, e misurata dal 2009.

Periodo	Scarto di MAAT dalla norma 1981-2010 [°C]	Velocità massima [cm a-1]	Osservazioni
1901-1924	-1.1	0.18	Velocità ricostruite grazie alla monofotogrammetria digitale (Scapozza et al., 2014b).
1924-1940	-1.0	0.26	
1940-1996	-0.6	0.29	
1996-2008	0.4	0.73	
2009	0.8	0.92	Velocità basate su spostamenti misurati al GPS differenziale.
2010	-0.3	0.81	
2011	1.1	0.90	
2012	0.8	0.81	
2013	0.4	0.93	
2014	1.0	1.01	
2015	1.3	1.44	

climat. 29^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Besançon, France, 6-9 juillet 2016.

- Giaccone E., Fratianni S., Ambrosi C., Antognini M., Delaloye R., Lambiel C., Mari S. & Scapozza C. 2016b. Recent evolution of mountain permafrost in the Southern Swiss Alps: the results of 2006-2015 period. XI International Conference on Permafrost, Potsdam, Germany, 20-24 June 2016, Abstract 355.
- Kääb A., Frauenfelder R. & Roer I. 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, 56: 172-187.
- Luterbacher J., Menzel A., Estrella N., Della-Marta P.M., Pfister C., Rutishauer T. & Xoplaki E. 2007. Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts. *Geophysical Research Letters*, 34: L12704. DOI: 10.1029/2007GL029951.
- 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. [<http://repository.supsi.ch/2147/>]
- MeteoSvizzera 2015. Bollettino del clima dell'anno 2014. Locarno-Monti, Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, 8 pp.
- MeteoSvizzera 2016. Bollettino del clima dell'anno 2015. Locarno-Monti, Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, 10 pp.
- Noetzi J., Delaloye R., Gärtner-Roer I., Hasler A., Hauck C., Hilbich C., Hoelzle M., Lambiel C., Phillips M., Scapozza C., Springman S.M., Staub B. & Vonder Mühl D. 2016. The contribution of the 2015 heat wave to mountain permafrost warming in Switzerland. XI International Conference on Permafrost, Potsdam, Germany, 20-24 June 2016, Abstract 879.
- Paul F., Bauder A., Marty C. & Nötzli J. 2015. Schnee, Gletschers und Permafrost 2013/14. *Die Alpen*, 9/2015: 46-52.

- PERMOS 2013. Permafrost in Switzerland 2008/2009 and 2009/2010. Noetzli J. (ed.), Glaciological Report Permafrost No. 10/11 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 80 pp.
- PERMOS 2016. Rekordtemperaturen im alpinen Permafrost / Températures record dans le pergélisol alpin. Accademie svizzere delle scienze, Comunicato stampa del 22 febbraio 2016.
- 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. [<http://repository.supsi.ch/3145>]
- Scapozza C., Mari S., Antognini M., Lepori V. & Ambrosi C. 2014a. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2011/2012 e 2012/2013). Rapporto No. 3 del Gruppo Permafrost Ticino. Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali, 102: 59-69. [<http://repository.supsi.ch/5420>]
- Scapozza C., Lambiel C., Bozzini C., Mari S. & Conedera M. 2014b. Assessing the rock glacier kinematics on three different time scales: a case study from the Southern Swiss Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 2056-2069. DOI: 10.1002/esp.3599
- Scapozza C., Giaccone E., Mari S., Antognini M., Fratianni S. & Ambrosi C. 2015. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi: temperatura e movimenti dei ghiacciai rocciosi dal 2006 al 2014. *Dati – Statistiche e società*, 15(2): 100-109. [<http://repository.supsi.ch/6809/>]
- Staub B. 2015. Key messages from observational mountain permafrost research. TEMPS final symposium, Sion, Switzerland, 4-5 February 2015. [<http://www.temps-symposium.ch>]
- Wirz V., Beutel J., Delaloye R., Gsell T., Gruber S., Gärtner-Roer I., Hasler A., Kenner R., Limpach P., Müller J., Phillips M., Raetzo H., Scapozza C., Vieli A. & Weber S. 2016. Short-term variability of rock glacier surface velocities in the Swiss Alps revealed by continuous GPS. XI International Conference on Permafrost, Potsdam, Germany, 20-24 June 2016, Abstract 780.