

SISTEMA DI DRENAGGIO di un GHIACCIAIO ALPINO

Studio del sistema di drenaggio di un ghiacciaio alpino attraverso il modello idrologico distribuito GEOtop, fisicamente basato, e un modello di deflusso a serbatoi lineari multipli

Ivan Noldin
ingegnere ambientale,
Cles, Trento

I ghiacciai rivestono una funzione fondamentale per le zone alpine. L'acqua di scioglimento glaciale, infatti, oltre a donare vita alla fauna e alla flora in alta montagna, garantisce lo sviluppo dell'agricoltura nel fondovalle. In questo contesto, una conoscenza più approfondita dell'evoluzione del sistema idrologico dei ghiacciai, permetterebbe di comprendere tempi e modalità con cui lo scioglimento dei ghiacci rende fruibile l'acqua in valle, soprattutto alla luce del cambiamento climatico in atto.

Stefano Endrizzi
Environment Canada,
National Hydrology Research Centre,
Saskatoon, Saskatchewan, Canada

Riccardo Rigon
Dipartimento di Ingegneria Civile ed
Ambientale, Università Degli Studi di Trento

Matteo Dall'Amico
Mountain-eering srl,
via Siemens 19 Bolzano
matteo@mountain-eering.com

Il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Trento, assieme al Comitato Glaciologico della SAT ed il Museo Tridentino di Scienze Naturali, è impegnato dal 2004 nel "Progetto di Studio Sperimentale e di Monitoraggio dei Ghiacciai Alpini volto a misurare e simulare il ciclo idrologico pluriennale dei ghiacciai trentini.

Il presente contributo, basato sulla tesi di laurea dell'ing. Ivan Noldin, si pone l'obiettivo di simulare la dinamica spazio-temporale del ghiacciaio del Mandron (Gruppo Adamello-Presanella) attraverso l'accoppiamento tra un modello idrologico distribuito ed un modello lineare di deflusso a serbatoi. Questo permette di determinare le portate a valle del ghiacciaio sulla base dell'effettivo bilancio termico e dell'evoluzione della superficie del ghiacciaio coperta da neve.

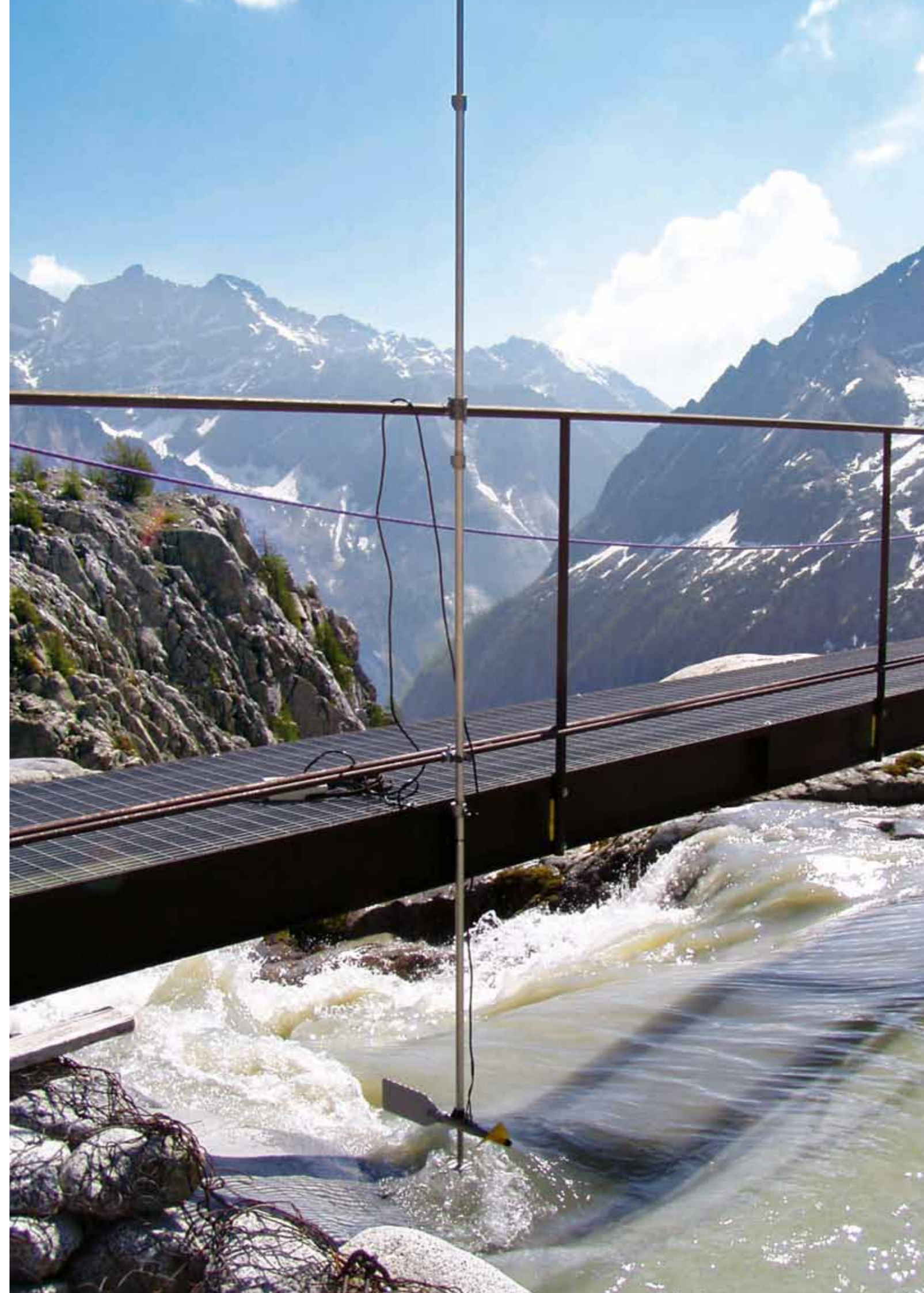




Fig. 1 - Lago Nuovo in prossimità della fronte del ghiacciaio del Mandron (gruppo Adamello-Presanella, Provincia di Trento).

Nella pagina precedente, fig. 2 - Installazione dell'idrometro e misurazione della velocità.

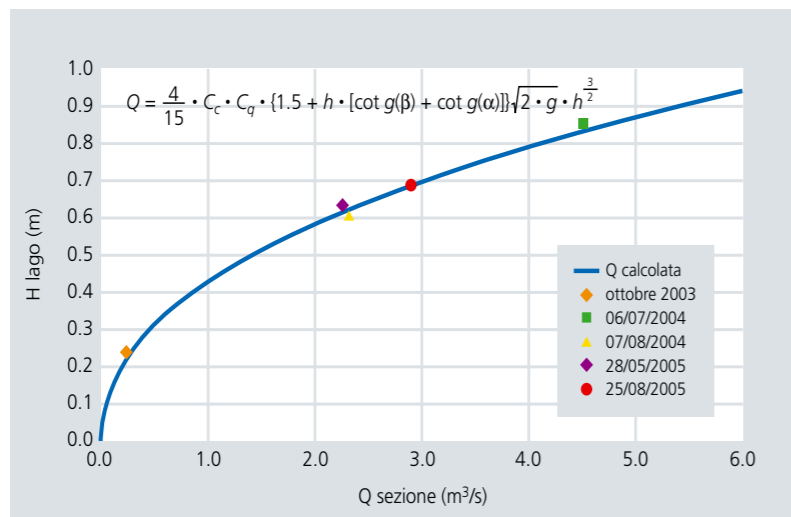


Fig. 3 - Curva delle portate uscenti dal Lago Nuovo in funzione dell'altezza del lago.

BILANCIO DI MASSA E DI ENERGIA

Il deflusso generato da un ghiacciaio alpino è il risultato della relazione esistente tra bilancio di massa e di energia durante la stagione di ablazione, indicativamente da giugno a ottobre. Il bilancio di energia può essere descritto come:

$$R_n + P - H - L = \Delta U$$

dove R_n è la radiazione netta, che si può a sua volta suddividere in una componente a lunghezza d'onda corta, dovuta alla radiazione solare, e ad onda lunga, emessa dalla superficie e dall'atmosfera. P è il flusso di calore fornito dalla precipitazione, H è il flusso di calore sensibile dovuto al gradiente di temperatura tra superficie e atmosfera, e L rappresenta il flusso di ca-

lore latente, effetto della differenza di umidità tra superficie e atmosfera. La somma algebrica di tali forzanti superficiali si traduce in una variazione di energia interna del corpo glaciale ΔU . Il bilancio di massa dipende invece dalle condizioni iniziali di innevamento all'inizio della stagione di ablazione, e quindi dall'accumulo avvenuto nella stagione invernale, e dalla precipitazione caduta nel ghiacciaio nel periodo di ablazione.

Appare chiaro come i due bilanci siano fortemente interconnessi: il processo fusione è infatti controllato dal bilancio di energia che, a sua volta, influenza il bilancio di massa. Inoltre, la presenza di neve sul ghiacciaio aumenta l'albedo della superficie, e quindi influisce sul bilancio termico, diminuendo l'assorbimento della radiazione solare e quindi ritardando lo

scioglimento. La perdita di massa glaciale si traduce in una portata d'acqua che esce dalla fronte del ghiacciaio che si immette nel lago.

I tempi e i modi con cui l'acqua giunge alla fronte del ghiacciaio dipendono dal sistema di drenaggio glaciale, solitamente costituito da un insieme di inghiottitoi e cunicoli sotterranei interconnessi.

DEFUSSO MENSILE E GIORNALIERO

Per misurare le portate in uscita dal ghiacciaio del Mandron è stato posizionato un idrometro in prossimità del Lago Nuovo, posto alla fronte del ghiacciaio (Figura 1), per determinare la quota del pelo libero del lago (Figura 2, foto a pagina 49).

Dal 2003 al 2006 apposite campagne di misura hanno permesso di determinare la velocità dell'acqua in uscita dal lago derivandone una scala delle portate (Figura 3). La Figura 4 riporta le portate misurate durante la stagione di ablazione 2006.

Si possono notare tre macroperiodi: il mese di giugno, ad inizio estate, si caratterizza da piccole variazioni giornaliere, dovute alla copertura nevosa presente su tutto il ghiacciaio che inibisce un rapido scioglimento del ghiaccio.

Il mese di luglio, media estate, si differenzia per una grande variazione giornaliera di portate, con una media attorno ai $6 \text{ [m}^3 \text{ s}^{-1}]$. In questo periodo il ghiacciaio si trova in gran parte scoperto dalla neve e quindi soggetto a basso albedo e elevati flussi energetici entranti. Infine il periodo fine agosto-settembre, fine estate, è caratterizzato da minori portate, derivanti da una nevicata ad inizio mese e da temperature negative notturne che provocano brina superficiale e un aumento di albedo.

La forma dell'idrogramma giornaliero cambia quindi durante l'intera stagione di ablazione (Figura 5): a giugno e ottobre la curva è caratterizzata da fluttuazioni giornaliere relativamente ridotte, mentre a metà estate la portata ha un picco alle ore 16.00 e oscillazioni giornaliere accentuate. Tali variazioni sono il frutto della diversa entità delle forzanti termiche e della crescente efficienza del sistema di drenaggio

del ghiacciaio nell'avanzare della stagione di fusione.

Si nota infatti che il picco a settembre anticipa di due ore quello di giugno. Tali aspetti, per altro sono concordi a quanto rilevato in letteratura (Hannah et al, 1999,2000 a, Gurnell, 1995).

SISTEMA DI DRENAGGIO DI UN GHIACCIAIO

In Figura 6 è riportato uno schema semplificato dei sistemi di drenaggio di un ghiacciaio alpino secondo Collins (1998). Si può notare come il sistema drenante si differenzi tra zona di ablazione e zona di accumulo.

Nella parte bassa del ghiacciaio (zona di ablazione) l'acqua deriva generalmente dallo scioglimento del ghiaccio in loco e si infila attraverso i crepacci o i condotti endoglaciali (Figura 7) per arrivare velocemente verso la fronte del ghiacciaio.

In questo caso i tempi di residenza dell'acqua sono relativamente brevi.

Nella parte alta del ghiacciaio (zona di accumulo) l'acqua di scioglimento della neve drena verso il lago principalmente tramite moto di filtrazione nella neve stessa, con tempi di residenza più elevati.

Una parte invece drena attraverso canali preferenziali superficiali e sotterranei (Figura 8), con tempi di residenza paragonabili a quelli della zona di ablazione. Data questa schematizzazione, è possibile semplificare i deflussi di un ghiacciaio attraverso un modello lineare a serbatoi, ognuno rappresentante sistemi di drenaggio con caratteristiche e tempi di residenza differenti, come riportato in Figura 9 (Elliston, 1973; Richards et al., 1996).

MODELLO A SERBATOI LINEARI

L'efflusso da un serbatoio lineare, presumendo assenza di ricarica, può essere espresso come:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\frac{t-t_0}{K}}$$

dove $Q_t \text{ [m}^3 \text{ s}^{-1}]$ è la portata uscente al tempo $t \text{ [s]}$; $Q_0 \text{ [m}^3 \text{ s}^{-1}]$ è la portata uscente al

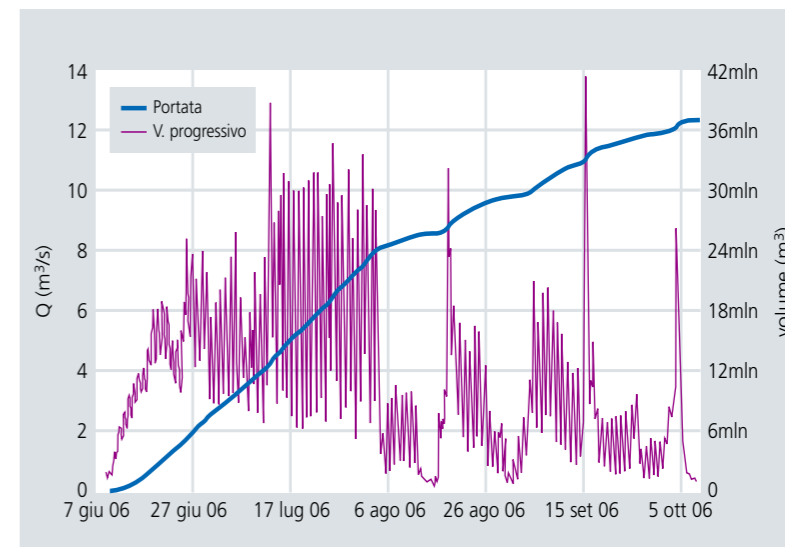


Fig. 4 - Portate al Lago Nuovo durante la stagione di fusione 2006 (curva rossa) e andamento dei volumi defluiti (curva blu).

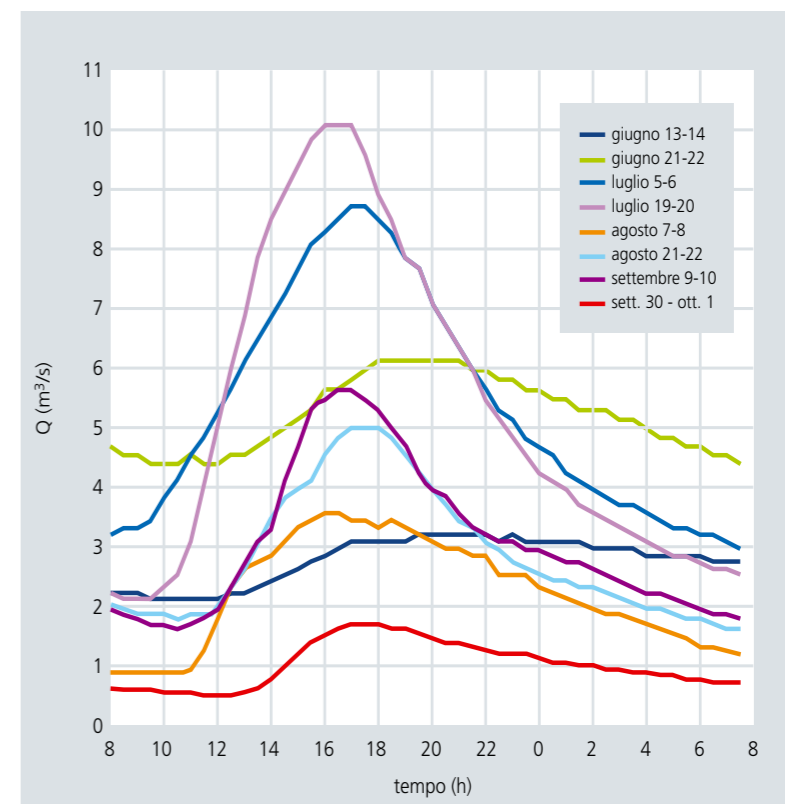


Fig. 5 - Portate giornaliere al Lago Nuovo. Da notare che il massimo di portata giornaliera viene raggiunto verso le ore 17.00 e la curva si spanci con il proseguire della stagione di ablazione.



Fig. 6 - La struttura dei sistemi di drenaggio di un ghiacciaio alpino (Collins 1998, modificato).

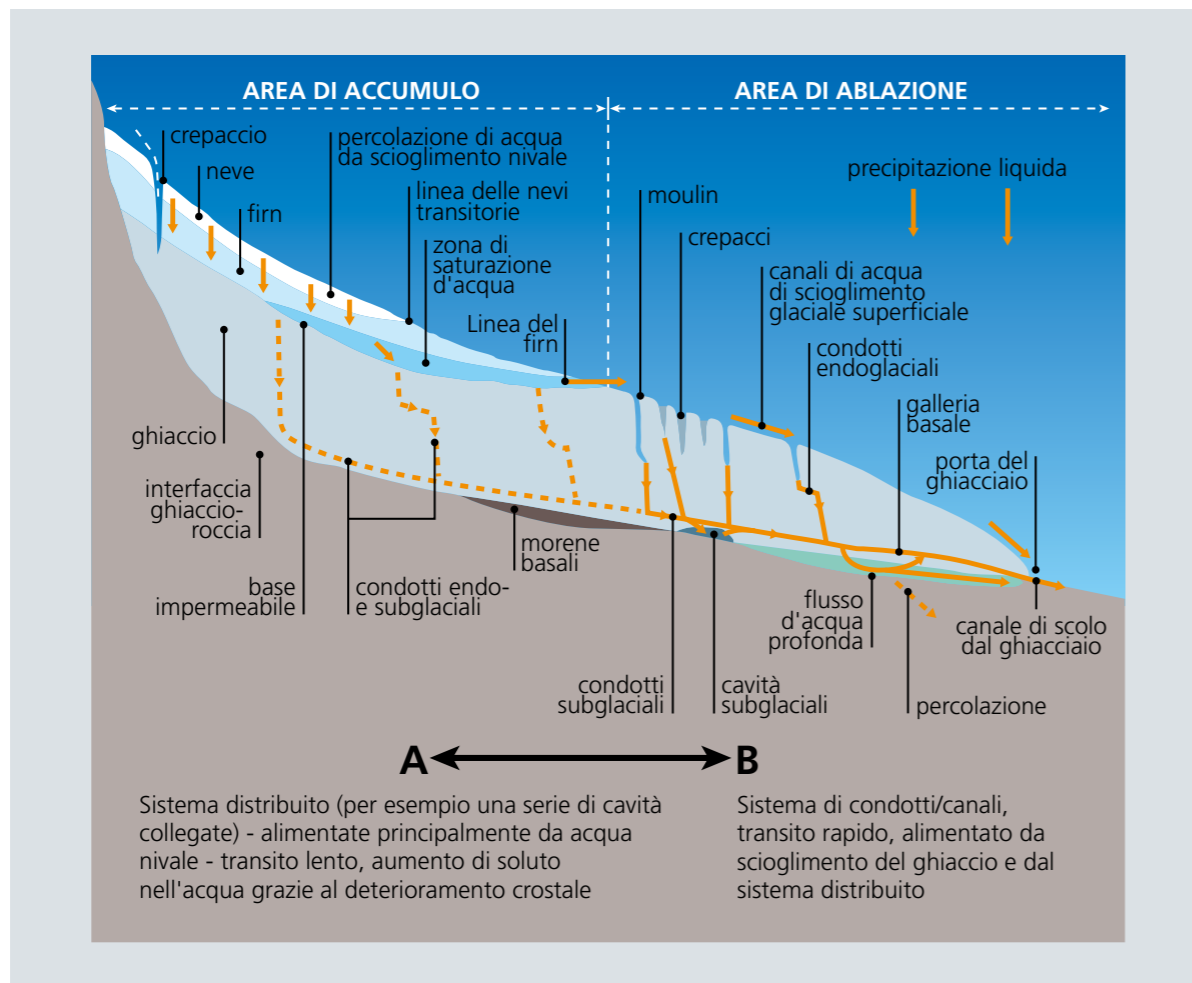


Fig. 7 - Acqua di scioglimento si infila velocemente nell'inghiottitoio del ghiacciaio.



tempo iniziale t_0 [s] mentre K [s] è il tempo di residenza medio all'interno del sistema di drenaggio stesso. Sulla base di un'analisi delle porzioni discendenti degli idrogrammi giornalieri (Figura 5), si sono identificati due serbatoi in parallelo: uno lento per la porzione del ghiacciaio coperta da neve, uno veloce per

quella quota scoperta, con valori dei relativi tempi di residenza K pari rispettivamente a 30 e 5 ore (Figura 10). Oerter et al (1981) identificano valori di ritenzione per i relativi serbatoi di 4-4.5 ore e 28.75-30 ore per il Vernagtferner, un ghiacciaio austriaco per estensione superficiale simile.

MODELLAZIONE A SCALA STAGIONALE E GIORNALIERA

La modellazione delle portate in uscita dal lago richiede quindi:

1. la quantificazione dello scioglimento del ghiaccio e della neve, derivante dall'interconnessione tra il bilancio di massa e di energia;
2. la localizzazione della superficie del ghiacciaio ricoperta da neve durante la stagione di ablazione, per determinare l'entità dei serbatoi;
3. una taratura finale sui tempi di residenza lenti (K_{slow}) e veloci (K_{fast}). I primi due punti possono essere ottenuti tramite l'applicazione di un modello fisicamente basato, che tenga conto dei fattori topografici (esposizione, pendenza, ombre) e meteorologici (temperatura, precipitazione, vento, umidità relativa) locali. GEOTop (Rigon et al., 2006; Endrizzi 2007, Dall'Amico 2010) è un modello idrologico distribuito e fisicamente basato che risolve le equazioni di bilancio termico e di mas-

sa di un corpo glaciale. Esso permette di quantificare la massa glaciale soggetta a fusione, e localizzarla spazialmente sulla base della quota, le caratteristiche di esposizione e ombra locali e le precipitazioni cadute. La massa liquida di fusione dal ghiacciaio viene quindi data in ingresso a un modello a serbatoi lineari, in grado di descrivere l'effetto del sistema di drenaggio e restituire la portata alla sezione di chiusura. In Figura 10 è riportata la modellazione delle portate derivanti dallo scioglimento nivale (serbatoio lento - linea azzurra) e le portate derivanti dalla fusione del ghiaccio (serbatoio veloce - linea viola), in relazione con le portate misurate al Lago Nuovo (linea blu) su scala temporale stagionale, assumendo il tempo di residenza veloce (K_{fast}) pari a 5 h, e quello lento (K_{slow}) pari 30 h costanti nel periodo. Tale risultato può essere migliorato considerando che i tempi di residenza non siano statici, ma dipendano dall'evoluzione del percorso che l'acqua compie all'interno del ghiacciaio per raggiungere la fronte (Hannah and Gurnell, 2001). Sono stati selezionati cinque periodi di cinque giorni nella stagione di ablazione, uno ad inizio estate e l'altro a metà estate, durante i quali si è calcolata la percentuale del ghiacciaio coperto da neve e i tempi di residenza dei due serbatoi. In Figura 11 sono riportate le analisi dei due periodi. Nel primo si evince come le portate derivino da scioglimento nevoso, differenziato da percorso veloce (Q neve fast), derivante dalla presenza di canali di scolo superficiale preferenziali e da un sistema di drenaggio profondo preesistente, e da un percorso lento (Q neve slow) che rappresenta il moto di filtrazione nella neve. Durante il mese di luglio, le fluttuazioni giornaliere sono da attribuirsi alla fusione del ghiaccio e ad un sistema di drenaggio veloce (Q ghiaccio fast), mentre la quota di portata derivante dalla neve è minoritaria. Da tale analisi possono essere determinati K_{fast} e K_{slow} nella stagione di ablazione (Tabella 1). Per quanto riguarda il serbatoio lento, a inizio giugno K_{slow} è elevato (100 h), in quanto il drenaggio avviene per moto principalmente di filtrazione attraverso neve saturata, per arrivare



Fig. 8 - Acqua di scioglimento ruscella in canali solcati nella neve superficiale.

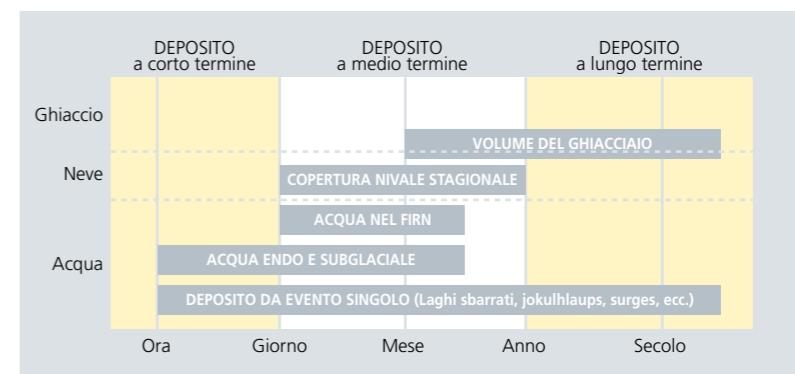


Fig. 9 - Schema rappresentante le differenti forme di immagazzinamento (serbatoi) e tempi di residenza di un ghiacciaio (Jansson P. et al., 2003).

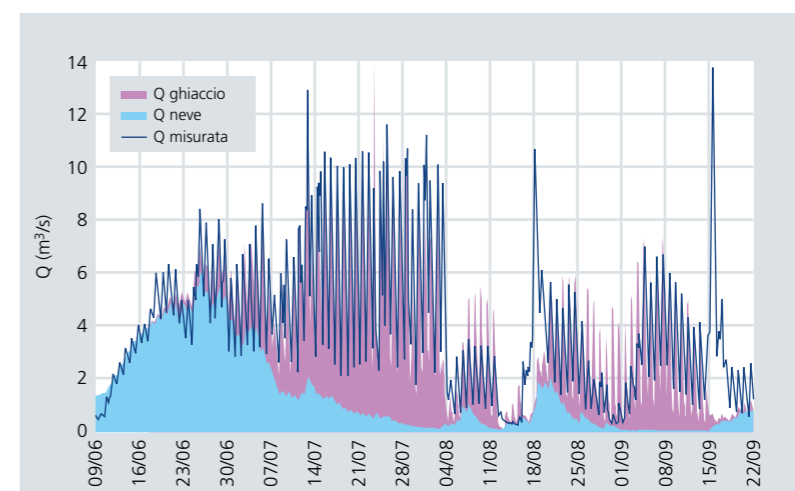
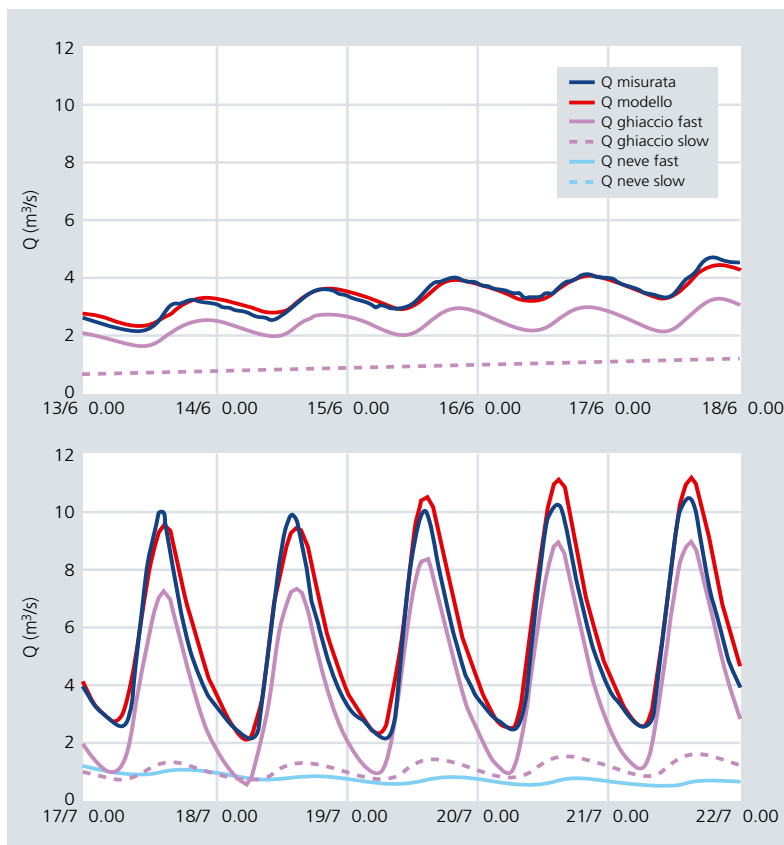


Fig. 10 - Idrogramma modellato su scala temporale stagionale e misurato nell'estate 2006 presso il Lago Nuovo assumendo $K_{fast}=5$ h e $K_{slow}=30$ h costanti nel periodo.

Fig. 11 - Portata misurata e modellata in vari periodi della stagione di ablazione



Tab. 1

| TEMPI DI RESIDENZA K [H] dei vari serbatoi stimati nella modellazione del sistema di drenaggio del ghiacciaio del Mandron a scala temporale giornaliera | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|---------------|
| PERIODO | K _{slow} [h] | K _{fast} [h] | % SUP COPERTA |
| 13/06 - 17/06 | 100 | 2 | 100.0 |
| 27/06 - 01/07 | 20 | 4 | 80.5 |
| 17/07 - 21/07 | 16 | 4 | 8.0 |
| 06/08 - 10/08 | 12 | 8 | 35.0 |
| 08/09 - 12/09 | 20 | 2 | 3.0 |

a 12 h in piena stagione di fusione. Per quanto riguarda il serbatoio veloce, K_{fast} in generale è dell'ordine delle 2-4 h, tuttavia risente delle precipitazioni solide che possono ostruire i canali e quindi aumentare il tempo di residenza repentinamente, cosa che accade ad inizio agosto quando K_{fast} passa da 4 a 8 h a seguito ad una nevicata.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro propone l'accoppiamento del modello idrologico GEOTop con un modello a serbatoi per il calcolo del deflusso in uscita dal ghiacciaio del Mandron sul gruppo Adamello-Presanella. Le portate simulate sono state confrontate con le portate misurate durante la stagione 2006 in prossimità del Lago Nuovo, e successivamente tarate sulla base dei valori dei tempi di residenza dei serbatoi. I risultati

suggeriscono che i tempi di residenza variano nel tempo in conformità con l'evoluzione del sistema di drenaggio glaciale. Lo studio inoltre suggerisce la presenza di una sistema di drenaggio veloce, attivo e pienamente sviluppato già in primavera. Per il Ghiacciaio del Mandron questo potrebbe rappresentare la conseguenza delle numerose recenti annate di bilanci di massa negativi, che hanno incentivato la formazione di canali superficiali preferenziali e condotti endoglaciali ad efficiente capacità di drenaggio.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento al Comitato Glaciologico della SAT di Trento per l'aiuto logistico nel reperimento delle misure, in particolare all'ing. Fabrizio Zanotti, Mario Chemelli, Vittorino Betti e Giuseppe Alberti.

Bibliografia

- COLLINS D.N. (1998) - Rainfall-induced high-magnitude runoff events in highly-glacierized Alpine basins, IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, vol. 248, pag. 69-78.
- DALL'AMICO M. (2010) - *Coupled water and heat transfer in permafrost modeling*, Tesi di Dottorato in Ingegneria Ambientale, Università di Trento.
- ELLISTON G.R. (1973) - Movement of water through the Gornergletscher Symposium on the Hydrology of Glaciers (Proceedings of the Cambridge Symposium) vol. 95, IAHS publication pp. 79-84.
- ENDRIZZI S. (2007) - *Snow cover modelling at local and distributed scale over complex terrain*. Tesi di Dottorato in Ingegneria Ambientale, Università di Trento, 2007.
- GURNELL A.M. (1995) - *Sediment and Water Quality in River Catchments*, Wiley, Chichester, pp. 407-435.
- HANNAH D.M., GURNELL A.M., MCGREGOR G.R. (1999) - *A methodology for investigation of the seasonal evolution in proglacial hydrograph form*, Hydrological Processes 13, pp. 2603-2622.
- HANNAH D.M., SMITH B.P.G., GURNELL A.M., MCGREGOR G.R. (2000 a) - *An approach to hydrograph classification*, Hydrological Processes 14, pp. 317-338.
- HANNAH D.M., GURNELL A.M. (2001) - *A conceptual, linear reservoir runoff model to investigate melt season changes in cirque glacier hydrology*. Journal of Glaciology, 246, pp. 123-141.
- NOLDIN I. (2008) *Bilancio idrologico e modellazione del sistema di drenaggio di un ghiacciaio alpino*. Tesi di laurea in Ingegneria Ambientale, Università di Trento.
- OERTER H., BAKER D., MOSER H. AND REINWARTH O. (1981) - *Glacial-hydrological investigations at the Vernagtferner Glacier as a basis for a discharge model*, Nordic Hydrology 12, pp. 335-348.
- RICHARDS K.S., SHARP M., ARNOLD N., GURNELL A.M., CLARK, M., TRANTER M., NIENOW P., BROWN G., WILLIS I. and LAWSON W. (1996) - *An integrated approach to modelling hydrology and water quality in glacierized catchments*. Hydrological Processes 10, pp. 479-508.
- RIGON R., G. BERTOLDI, T. (2006) - *Over, GEOTop: A distributed hydrological model with coupled water and energy budgets*. Accettato per pubblicazione su Journal of Hydrometeorology.
- ZANOTTI F., S. ENDRIZZI, G. BERTOLDI, and R. RIGON, (2004) - *The GEOTop snow model*, Hydrological Processes, 18, 3667-3679.