

# il LAGO SUL GHIACCIAIO

## Monitoraggio e simulazione numerica del fenomeno finalizzata alla previsione e gestione dell'emergenza

**Salandin Alessio, Rabuffetti Davide,  
Barbero Secondo, Cordola Marco,**  
ARPA Piemonte

**Volontè Giorgio, Mancini Marco**  
POLITECNICO di Milano

Il ghiacciaio del Belvedere, ai piedi della parete Est del M.Rosa, nel territorio di Macugnaga (VB) in Piemonte, è soggetto, dall'estate dell'anno 2001, ad un fenomeno, interpretato come esempio di surge glaciale, di raro riscontro sull'arco alpino, consistente in un rapido aumento della velocità di scorrimento e in un conseguente progressivo sollevamento della superficie della massa glaciale. A questo fenomeno si è associata la periodica formazione di un lago epiglaciale che raccoglie le acque di fusione dei ghiacciai e dei nevai sovrastanti, raggiungendo nei mesi estivi dimensioni preoccupanti per la sicurezza dei luoghi e delle persone in caso di tracimazione o di svuotamento improvviso per sifonamento. Dal mese di giugno 2002, a seguito di un repentino innalzamento del livello del lago, con l'intervento



# EFFIMERO

## DEL BELVEDERE

del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile venivano individuate misure precauzionali urgenti per garantire la pubblica incolumità e veniva avviato un piano di monitoraggio strumentale del fenomeno. Al fine di studiare il ruolo della fusione nivale nella formazione del lago è stato appositamente sviluppato un modello del bilancio energetico del manto nevoso fisicamente basato che riesce a considerare i singoli fenomeni legati alla fisica della neve alla piccola scala. Il modello così sviluppato è stato impiegato nella simulazione del fenomeno di formazione del lago epiglaciale formatosi nelle estati 2002 e 2003 ed i risultati ottenuti, oltre a testare la validità del modello sulla base delle misure idrometeorologiche

disponibili, hanno consentito di analizzare i fattori che hanno causato il fenomeno e quelli che ne hanno influenzato la dinamica. In particolare si è verificata l'importanza della fusione della neve accumulatasi durante l'inverno ricostruendo le portate di afflusso al lago. Utilizzando poi le misure di livello idrometrico rilevate con continuità, si è provveduto alla stima delle portate defluite a valle del lago. Tali risultati offrono un utile quadro delle possibilità che il modello offre per meglio interpretare i dati provenienti dal monitoraggio e rispondere alle esigenze operative legate all'attività di allertamento ai fini di protezione civile messe in atto durante la formazione del lago.



## INTRODUZIONE

Il ghiacciaio del Belvedere è la lingua terminale del complesso dei ghiacciai che scendono sul versante orientale del Monte Rosa e che coprono le pareti comprese fra la Cima Tre Amici (3516 m), la Punta Nordend (4612 m) e la Punta Dufour (4633 m). Si tratta quindi di un ghiacciaio vallivo composto la cui lingua, lunga oltre tre chilometri, è quasi interamente coperta da materiale detritico e si sviluppa tra le quote 2200 m e 1750 m circa, presso la morena boscosa del Rifugio Belvedere, dove si divide in due rami. La sua superficie complessiva è valutabile in circa 6 Km<sup>2</sup> (Foto pg. 58-59 e Fig. 1).

Dall'anno 2001 è soggetto ad una modificazione morfologica attualmente piuttosto rara tra i ghiacciai alpini; infatti il Belvedere risulta essere uno dei pochi ghiacciai alpini in fase di espansione.

Molto probabilmente si tratta di un fenomeno di "surge" cioè una rapida e improvvisa avanzata della massa glaciale, non attribuibile tanto ad una variazione positiva del bilancio di massa, quanto ad una modificazione del comportamento meccanico del ghiaccio e dei depositi glaciali

di fondo, dovuta ad un aumento della disponibilità di acqua all'interfaccia ghiaccio-substrato, e favorita dalle temperature elevate delle ultime estati.

A partire dalla primavera 2001 la massa glaciale ha cominciato a mostrare una notevole crepacciatura ed un progressivo innalzamento della superficie di circa 20-30 m rispetto all'anno precedente.

L'accelerazione dello scorrimento del ghiacciaio ha provocato la formazione nel settore superiore, situato a quota 2150 m, di una depressione topografica di elevate dimensioni; questa, è stata parzialmente e periodicamente colmata dalle acque di fusione dei ghiacciai e delle nevi soprastanti dando origine a laghi epiglaciali temporanei, soggetti comunque a spontaneo svuotamento.

Nell'estate 2002 il lago epiglaciale, detto "Effimero" in conseguenza della sua durata stagionale, ha raggiunto la massima estensione (fig. 2) in corrispondenza del periodo di caldo del 15-25 giugno caratterizzato da un flusso di aria molto calda di origine subtropicale che ha invaso il bacino del Mediterraneo portando in Italia temperature massime molto superiori alla

media stagionale. La conseguente ingente e rapida fusione del manto nevoso invernale e del ghiaccio di parete ha prodotto un considerevole apporto d'acqua verso il lago, il cui livello è considerevolmente aumentato; all'inizio dell'ultima decade di giugno l'innalzamento è risultato superiore a 1 m in sole 24 ore, mentre la superficie del lago ha raggiunto 150.000 mq con una profondità di oltre 40 m. In quel momento è stata effettuata la stima di un volume pari a circa 3 milioni di metri cubi.

Si trattava di una quantità d'acqua ragguardevole che, qualora avesse trovato repentinamente vie di deflusso all'interno del ghiaccio o fosse trascinata dall'invaso naturale, sarebbe stata in grado di causare un'onda di piena in grado di trasportare a valle ingenti quantità di detriti rocciosi, con possibili gravi conseguenze per i nuclei abitati di Macugnaga e dei Comuni più a valle, le infrastrutture e i frequentatori della zona.

Nella storia recente del ghiacciaio del Belvedere si sono d'altronde verificati frequenti fenomeni di piena improvvisa, l'ultimo dei quali legato al cedimento di un settore della morena che conteneva il lago delle Locce nel 1979 (Fig. 3).

## LE AZIONI DI SALVAGUARDIA

Attraverso l'intervento del Dipartimento Nazionale di Protezione Civile nel luglio del 2002 si procedette all'installazione di un sistema di pompaggio per l'abbassamento controllato del livello dell'invaso (Fig. 3).

Al fine di garantire la pubblica incolumità vennero adottate misure restrittive per impedire l'accesso delle persone alle aree potenzialmente a rischio in caso di piena improvvisa del T. Anza e vennero

Fig. 1: Posizione del ghiacciaio e lingua terminale nel 2001

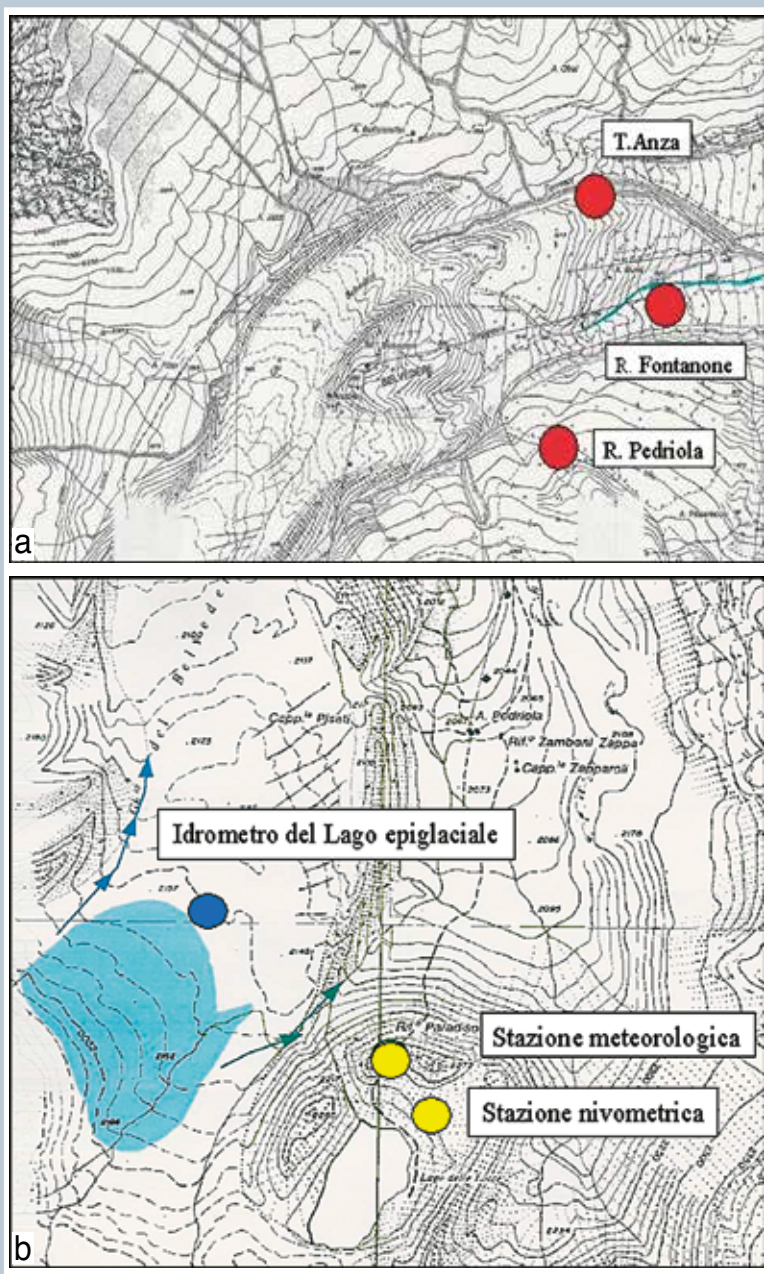
Fig. 2: Foto del ghiacciaio Belvedere e del lago Effimero nel 2002 (sopra) e 2003 (sotto)

Fig. 3: Sistema di pompaggio per l'abbassamento controllato del livello del lago Effimero

Fig. 4: Ubicazione delle fotocamere per il controllo dei deflussi e delle stazioni di misura automatiche



Fig. 4



riprese. La gestione della strumentazione installata venne affidata all'ARPA Piemonte che, attraverso la Sala Situazione Rischi Naturali a Torino effettuò il controllo in remoto con continuità negli orari di operatività; quale supporto alla programmazione dei lavori di cantiere per l'installazione del sistema di pompaggio venne inoltre emesso un bollettino di previsione meteorologica



Fig. 2a



Fig. 2b

perimetrare, sulla base delle caratteristiche geomorfologiche e di apposite verifiche idrauliche, le aree a diversa pericolosità, per le quali vennero definite procedure di evacuazione e di Protezione Civile da porre in atto in caso di emergenza. In parallelo alla definizione delle misure di sicurezza, venne definito un sistema di monitoraggio del ghiacciaio del Belvedere e del lago epiglaciale, con il supporto tecnico dell'ARPA Piemonte. La figura 4 mostra il posizionamento delle stazioni di misura e delle fotocamere, mentre la figura 5 rappresenta alcune immagini



Fig. 3

Fig. 5: Immagini in tempo reale dalle fotocamere per il controllo dei deflussi



locale giornaliero. Una struttura operativa gestita da volontari della locale stazione del Corpo Nazionale Soccorso Alpino e Speleologico era incaricata di attivare le procedure di allertamento in caso di raggiungimento delle situazioni di preallarme e allarme, definite sulla base di soglie critiche della velocità di abbassamento della superficie del lago, che potevano preludere ad una piena improvvisa. Il progressivo svuotamento dell'invaso si protrasse in modo regolare per tutto il mese di agosto 2002, giungendo a compimento alla fine del mese, senza che si verificassero situazioni tali da richiedere l'adozione di misure di protezione civile.

Il fenomeno della formazione del lago epiglaciale si è ripetuto a partire dalla fine di maggio 2003 raggiungendo l'invaso massimo il 16 giugno con 2,4 milioni di metri cubi.

A seguito del riformarsi del fenomeno l'Arpa Piemonte, sulla scorta dei compiti affidati e delle intese operative intercorse con il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, della Direzione Opere Pubbliche regionale e del Comune di Macugnaga, si è attivata per ripristinare la componente di monitoraggio a

supporto delle azioni di salvaguardia intraprese dalla Regione per la messa in sicurezza del territorio di Macugnaga. A partire dal 4 giugno 2003 è entrato in funzione il rilevamento continuativo automatico del livello del lago ed è stata ripristinata la centrale di acquisizione di Macugnaga, con il relativo servizio di allertamento.

Il 17 giugno 2003 aveva inizio un rapido svuotamento del lago a seguito dell'innescarsi di un fenomeno di "rotta" glaciale, ovvero attraverso un'improvvisa attivazione dei canali endoglaciali. Il fenomeno, in una prima fase di rapido sviluppo, ha comportato l'adozione di misure di salvaguardia per garantire la pubblica incolumità, ma si è esaurito in tempi brevi (15 giorni circa) riducendo al minimo i disagi e senza che comunque si verificassero danni. Il sistema di monitoraggio ha permesso l'elaborazione dei dati meteorologici e idrologici acquisiti e la verifica della dinamica del lago sia nel 2002 che nel 2003.

## IL MODELLO DI FUSIONE DISTRIBUITO

La dinamica del manto nevoso è stata oggetto di simulazione al fine di poter stimare i volumi

idrici effettivamente immagazzinati sotto forma di neve nel bacino e valutare quindi l'effettivo ruolo della fusione della neve nella formazione del lago epiglaciale.

Il modello utilizzato nel presente studio è stato realizzato in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture viarie, e Rilevamento sez. Idraulica del Politecnico di Milano nell'ambito di una tesi di Laurea [Salandin A. e Volontè G., 2003].

Il modello riproduce l'accumulo della neve al suolo, la fase di fusione e la propagazione dell'acqua generata all'interno del manto nevoso (Fig. 6). Le grandezze modellate sono l'equivalente idrico (SWE) immagazzinato nel bacino sotto forma di manto nevoso e le portate di acqua di fusione generate dallo scioglimento della neve; non vengono considerate le proprietà legate alla meccanica della neve come, ad esempio, le variazioni di spessore e densità del manto nevoso. Le forzanti meteorologiche utilizzate (precipitazione, temperatura e radiazione solare) distribuite su tutto il bacino sono ricostruite dai dati misurati puntualmente attraverso delle procedure di interpolazione spaziale tenendo conto della topografia del bacino. Nel distinguere il tipo di precipitazione, a partire dalle misure pluviometriche, viene utilizzata la temperatura atmosferica mentre il modello di fusione proposto è basato sul bilancio energetico del manto nevoso in cui vengono calcolati i vari flussi termici che contribuiscono alla fusione della neve (radiazione ad onde corte, lunghe, calore dal terreno e dalla precipitazione, flussi convettivi).

Una volta calcolati i valori distribuiti nello spazio del volume d'acqua di scioglimento, se ne simula la propagazione all'interno del man-

to nevoso, attraverso un modello concettuale; successivamente, le portate generate vengono immesse nel deflusso superficiale e affluiscono alla sezione di chiusura del bacino (Fig. 6).

## LAGO 2002

Il sottobacino che alimenta il lago epiglaciale copre un'estensione di circa 6Km<sup>2</sup> con un'altitudine media di 3180m e comprende la parte più alta della catena montuosa del Monte Rosa.

Il primo risultato ottenuto dalla simulazione è l'andamento del volume idrico immagazzinato sotto forma di neve nel bacino del lago Effimero. In figura 7 si nota come l'andamento temporale del SWE nel bacino del lago subisca una brusca riduzione in corrispondenza del periodo maggio-giugno 2002; il confronto qualitativo con la misura puntuale a Passo del Moro (2820mslm) consente la verifica dei principali periodi di accumulo e scioglimento (Fig. 7). Nella figura 8 viene evidenziato il volume del lago Effimero modellato e misurato. Nota la variazione del volume dell'invaso a partire dal 28 giugno 2002, e calcolate le portate in ingresso attraverso il modello di scioglimento nivale, è stato possibile ricavare le portate uscenti dall'invaso (Fig. 9).

Nella fase di riempimento dell'invaso, le portate uscenti dal lago effimero e quindi entranti nel ghiacciaio, sono basse; una volta che il livello dell'invaso ha raggiunto il suo massimo valore, modificazioni strutturali, note come rotta glaciale, causate dalle elevate pressioni idrostatiche esercitate, hanno consentito il naturale svuotamento dell'invaso attraverso canali sotterranei di svuotamento. La discontinuità nelle portate uscenti è dovuta proprio al cambiamento delle caratteristiche idrauliche dell'in-

vaso non prevedibile dai modelli utilizzati. I modelli implementati hanno permesso di verificare il legame diretto tra lo scioglimento della neve e il livello dell'invaso in termini di volumi. La dinamica del manto nevoso riesce a spiegare in modo soddisfacente la formazione del lago Effimero.

## LAGO 2003

Nel periodo fine maggio-giugno 2003 si è riproposto il fenomeno di riempimento dell'invaso. L'analisi dello SWE immagazzinato nel bacino del lago e il confronto qualitativo con l'altezza di

neve misurata a Passo del Moro conferma anche per quest'anno la stretta correlazione tra la formazione del lago e lo scioglimento della neve accumulata a monte dell'invaso (Fig. 10).

E' stata condotta la stessa analisi sulle portate entranti ed uscenti dal lago con la stima del volume dell'invaso (Fig. 11).

Evidenze sperimentali hanno mostrato come la fase di riempimento del lago sia simile per il 2002 e 2003 mentre la fase di svuotamento risulta essere diversa in quanto nel 2003 la rotta dell'invaso è stata molto più

Fig. 6: Schema semplificato del modello utilizzato

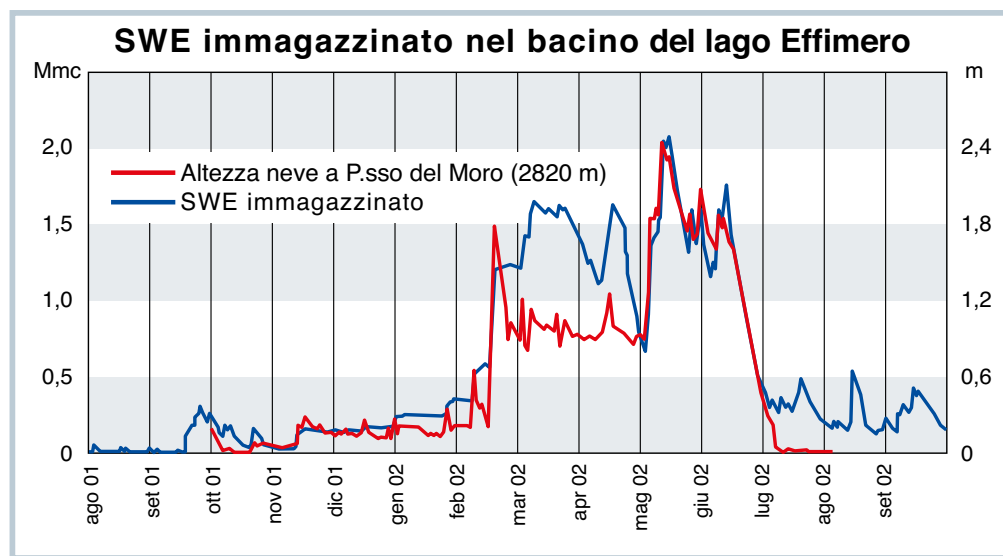
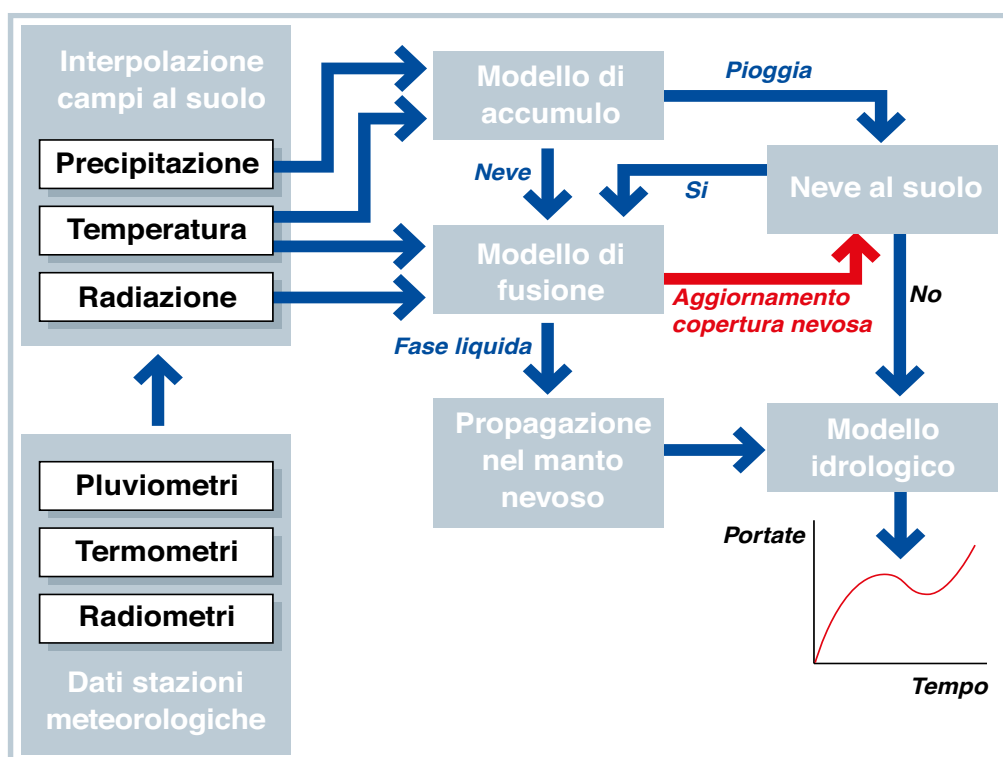


Fig. 7

rapida con un aumento notevole delle portate uscenti (Fig. 12). Si noti come lo svuotamento del lago sia avvenuto in un limitato periodo, circa 15 gg, mentre per il 2002 il fenomeno si è prolungato per circa 2 mesi.

## CONCLUSIONI

Il fenomeno di surge glaciale del Belvedere è associato alla periodica formazione di un lago epiglaciale che raccoglie le acque di fusione dei ghiacciai e dei nevai sovrastanti, raggiungendo nei

mesi estivi dimensioni preoccupanti per la sicurezza dei luoghi. Dal mese di giugno 2002, veniva avviato un piano di monitoraggio strumentale del fenomeno, con l'intervento di ARPA Piemonte e del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile.

I dati raccolti nelle campagne di misura e nel monitoraggio sono stati utilizzati in una applicazione sperimentale del modello idrologico di scioglimento nivale. Ciò ha consentito anzitutto, di verificare il legame tra le temperature elevate del Giugno 2002 e la formazione del lago, quindi di verificare che il fenomeno del lago Effimero fosse spiegabile quasi esclusivamente attraverso lo scioglimento di massa nevosa. E' stato riscontrato come anche nel mese di giugno 2003, con condizioni meteorologiche analoghe a quelle del 2002, persista il fenomeno a conferma delle ipotesi effettuate riguardo il legame con lo scioglimento nivale. In generale, osservando le diverse leggi d'efflusso che caratterizzano le fasi di riempimento e svuotamento dell'invaso, è stato possibile rilevare le mutazioni nell'assetto dell'apparato glaciale nel suo complesso, e quindi del quadro delle situazioni di rischio. In questo contesto il modello implementato diventa un utile strumento per il monitoraggio del fenomeno. Il modello così validato assume anche una importante valenza in fase previsionale: una volta stimata la copertura nevosa accumulata nell'inverno, grazie alla simulazione numerica, e ipotizzando diversi scenari climatici, è possibile valutare la successiva fase di scioglimento e calcolare il volume di formazione del lago nella stagione primaverile-estiva.

## Ringraziamenti

Si ringrazia Federico Volpati per l'elaborazione delle immagini digitali.

### Volume del lago Effimero

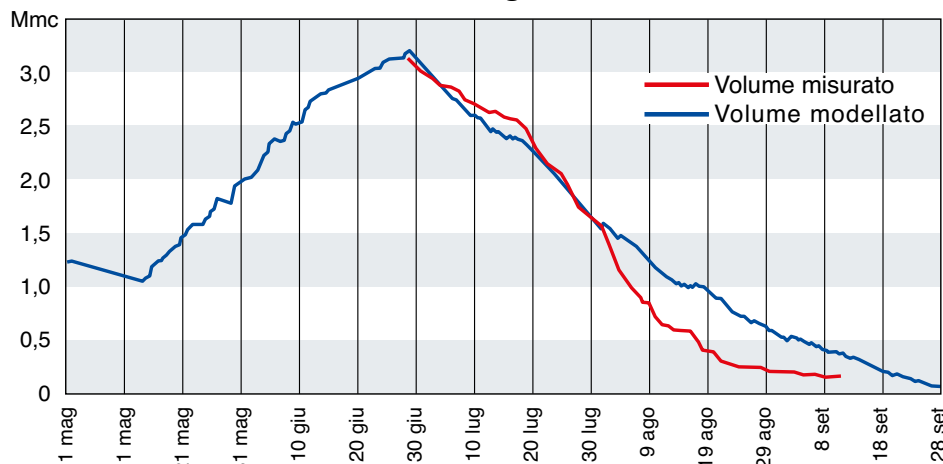


Fig. 8

### Portate entranti e uscenti

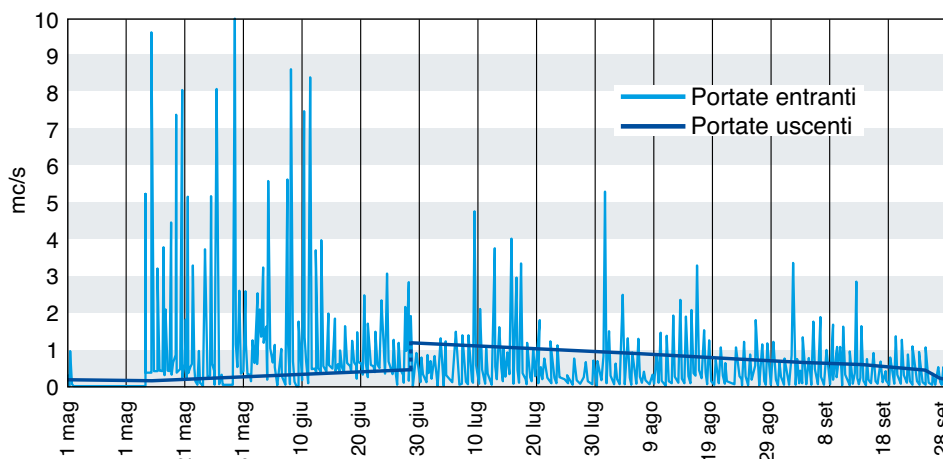


Fig. 9

### SWE immagazzinato nel bacino del lago Effimero

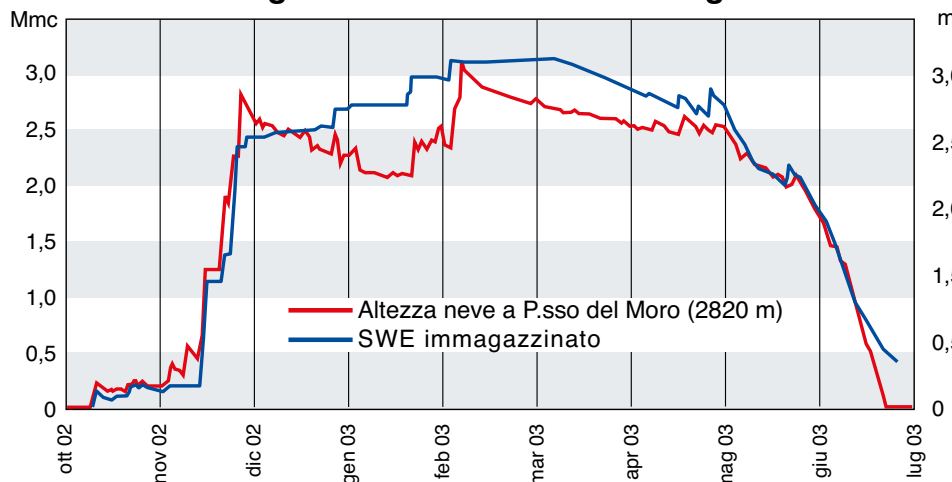


Fig. 10

## Bibliografia

- Haeberli W., Mazza A., Mortara G., Richardson S., "A surge-type movement at Ghiacciaio del Belvedere and a developing slope instability in the east face of Monte Rosa,
- Macugnaga, Italian Alps", Norwegian Journal of Geography Vol. 56, 2002.
- Ranzi R., Un modello idrologico distribuito, su base fisica, dello scioglimento nivale, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, relatore Prof. R. Rosso, 1989.
- Regione Piemonte, Direzione dei servizi tecnici di prevenzione, "Il lago epiglaciale del Belvedere a Macugnaga (VB) ", 2002.
- Salandin A., Volontè G., Un modello idrologico per la simulazione del manto nevoso. Applicazione al caso di studio del lago epiglaciale del ghiacciaio del Belvedere, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, relatore Prof. M. Mancini, 2003.
- Tarboton David G., Chowdhury, Tanveer G., Jackson Thomas H. "A Spatially Distributed Energy Balance Snowmelt Model", Utah Water Research Laboratory, 1994.
- U.S. Army Corps of Engineers, "Runoff from snowmelt", 1998.

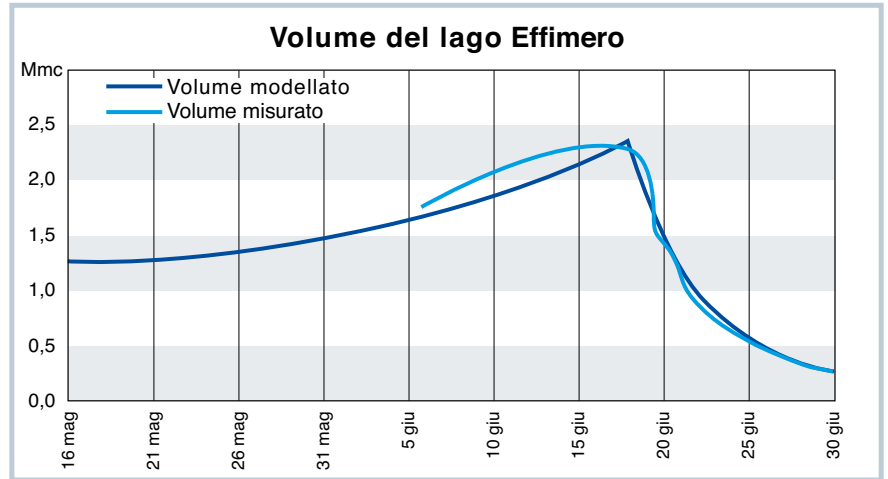


Fig. 11

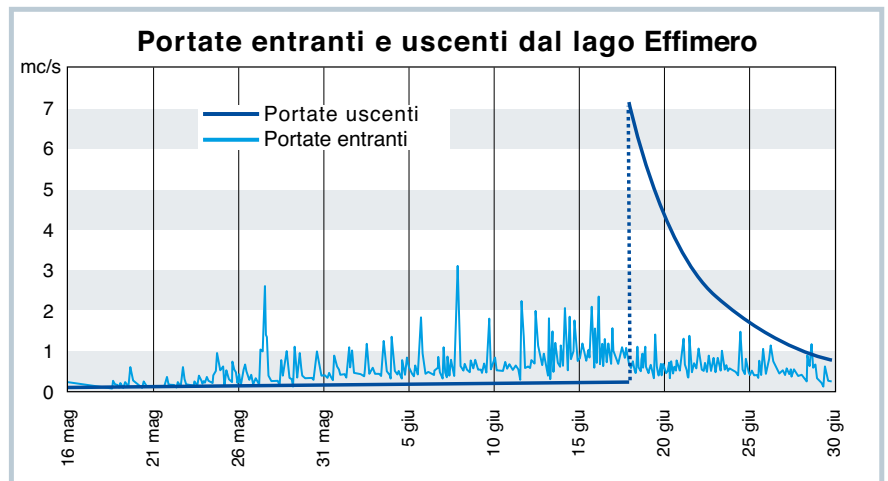


Fig. 12

# ORGANIZZAZIONE E SICUREZZA



m2 • EXPERT • CARBON PRO 240 • STRATUS 32 • SAFETY PLATE

[www.ortovox.com](http://www.ortovox.com)

**ORTOVOX**