

Luca Bonardi, Giuseppe Cola, Antonio Galluccio, Lara La Barbera,  
Paolo Pagliardi, Riccardo Scotti, Fabio Villa

# Il bilancio di massa regionale 2007-2011 (Alpi lombarde)

## Introduzione

Il patrimonio glaciale della Lombardia sta vivendo una fase di incisivo ridimensionamento. A fronte di questa evidenza, diventa importante disporre di un dato complessivo che restituisca la misura della variazione volumetrica alla quale i ghiacciai lombardi sono soggetti.

Il progetto di stima del bilancio di massa regionale con metodo glaciologico, i cui risultati quinquennali sono qui presentati (alcuni esiti preliminari sono in Bonardi *et al.*, 2009), ha preso avvio nella primavera del 2007 ad opera del Servizio Glaciologico Lombardo, con la posa di una rete di paline ablatometriche atte a indagare l'andamento del glacialismo nelle aree più rappresentative della regione.

Nei suoi cinque anni di vita, la rete, in costante ampliamento e ottimizzazione grazie al lavoro di trenta operatori, ha permesso la raccolta di dati puntuali che, a seguito di adeguate spazializzazioni, restituiscono una misura sufficientemente attendibile del bilancio di massa glaciale della Lombardia.

## Metodologia

I dati puntuali di ablazione e di accumulo, successivamente spazializzati, sono stati registrati da 36 paline ablatometriche, distribuite su quattordici ghiacciai (Fig.1 e Tab.1). Le paline utilizzate sono composte da cinque moduli in legno, di due metri ciascuno, graduati con fasce di diverso colore e collegati tra loro tramite filo metallico, installati nel ghiaccio tramite una perforatrice a vapore Heucke. A quote superiori ai 3400 metri, in aree teoricamente di accumulo, le paline sono costituite da due moduli di tre metri ciascuno, in grado di garantire una maggiore emersione dal nevato residuo. Le misure di accumulo sono state integrate da sondaggi di densità del manto nevoso effettuati a fine stagione. Il sistema temporale di riferimento per la raccolta e l'analisi dei dati è quello dell'anno idrologico secondo date fluttuanti.

La pianificazione della rete è stata orientata dai due criteri che, come asodato dalla letteratura esistente, costituiscono i principali fattori di variabilità del budget di massa glaciale: quello altitudinale e quello geografico. Le paline vanno a coprire tutte le fasce altimetriche sulle quali si sviluppa il glacialismo regionale, con una distribuzione conforme all'entità dell'area glacializzata per ogni singola fascia. Dal punto di vista della distribuzione geografica, la rete tocca tutti i settori montuosi ove sia presente il glacialismo; per ogni settore sono stati scelti gli apparati più rappresentativi in termini di estensione areale, esposizione e caratteristiche morfologiche.

La scelta dei siti da indagare è un aspetto cruciale per valutare l'attendibilità di una stima del bilancio di massa di un'area così ampia. Per questo motivo, oltre alla ragionata pianificazione della rete nelle fasi preliminari del progetto, e all'ottimizzazione in itinere della stessa, resa possibile dai tempi relativamente lunghi sui quali si è sviluppato il monitoraggio, si è scelto di operare una scrematura a posteriori sui dati pervenuti. La rete di monitoraggio del SGL conta infatti 52 paline, alcune delle quali solo recentemente installate. Dei dati a disposizione, si è scelto di considerare soltanto le 36 serie sopra citate. La selezione è stata operata in base a due criteri: la completezza delle serie storiche e la rappresentatività delle stesse; quest'ultima, perseguita fin dalle fasi iniziali del progetto, è stata valutata in termini di coerenza interna dei dati (al fine di smorzare eventuali fattori di distorsione micro-locali) e, non secondariamente, attingendo al patrimonio di conoscenze che il SGL ha acquisito in più di vent'anni di capillare lavoro sul campo (concretamente tangibili nel vasto archivio storico-fotografico, nella banca dati delle variazioni frontali e nei progetti di bilancio di massa su specifici apparati).

Inoltre, è doveroso menzionare che una piccola percentuale dei dati utilizzati sono ottenuti per interpolazione, negli sporadici casi in cui una serie fosse deficitaria di un dato di terreno annuale (per interpolare una serie storica A, mancante di un dato annuale, con una serie storica completa B - o

## BILANCIO DI MASSA REGIONALE

con una media di serie storiche complete - è stata calcolata la differenza media tra i dati annuali di A e B. Per stimare il dato mancante della serie A, la differenza media è stata applicata al valore di B relativo all'anno mancante).

L'interpolazione, eseguita per prossimità di quota e valutando il coefficiente di correlazione tra le serie, si è resa necessaria soltanto per il 9% dei dati annuali, una percentuale che crediamo non vada in alcun modo a inficiare la stima complessiva quinquennale. L'interpolazione lineare è stata infine utilizzata per validare il dato di terreno proveniente dalle paline nella fascia di quota più elevata, un ambito in cui la raccolta dei dati di accumulo presenta intrinseci aspetti di criticità.

La spazializzazione dei dati di terreno è stata eseguita in base alla discriminante altimetrica, a fronte della consolidata evidenza che, almeno per i ghiacciai alpini, il bilancio di massa sia fortemente e in prima istanza correlato all'altitudine (dove il gradiente negativo di temperatura favorisce l'aumento delle precipitazioni nevose e diminuisce l'ablazione). Nei primi

anni di test del progetto non è stata individuata alcuna correlazione tra i dati di misura raccolti e il parametro di esposizione. Per ognuna delle sette fasce di quota individuate si è quindi pervenuti a un valore medio di bilancio quinquennale (che tiene adeguatamente conto della variabilità geografica), poi spazializzato.

L'unica eccezione a tale procedimento è rappresentata dai ghiacciai delle Orobie, dove un unico dato di bilancio (quello del ghiacciaio del Lupo) è stato applicato indiscriminatamente rispetto all'altitudine. Le osservazioni fotografiche, raccolte ogni anno su un gran numero di apparati, hanno infatti permesso di valutare che per questo settore (che già spazia su un ristretto range altitudinale) la specifica caratterizzazione geografica appare come l'elemento fondamentale nel determinare un andamento poco in linea con il resto della regione. A tale proposito, si tenga comunque conto che il glacialismo orobico, con i suoi 202 ha di superficie complessiva, pesa per una percentuale assai ridotta (meno del 2%) sul totale regionale.

Fascia altimetrica (m slm)	Ghiacciaio	Esposizione	N. di paline	Settore
< 2500	Ventina	Nord	1	Disgrazia-Mallero
	Lupo	Nord	5	Orobie
2500 - 2750	Forni	Nord/Nord-Ovest	5	Ortles-Cevedale
	Adamello	Nord	1	Adamello
2751 - 2900	Suretta Sud	Sud	1	Spluga-Lej
	Forni	Nord/Nord-Ovest	2	Ortles-Cevedale
2901 - 3050	Vazzeda	Nord-Est	2	Disgrazia-Mallero
	Dosegù	Sud-Ovest	2	Ortles-Cevedale
	Campo Nord	Nord-Ovest	1	Livigno
3051 - 3200	Scerscen Sup.	Sud-Ovest	2	Bernina
	Predarossa	Sud/Sud-Ovest	2	Disgrazia-Mallero
	Cedec	Nord-Ovest	1	Ortles-Cevedale
	Adamello	Nord	2	Adamello
	Forni	Ovest	1	Ortles-Cevedale
	Alpe Sud	Sud-Est	2	Ortles-Cevedale
3201 - 3400	Pisgana	Nord	2	Adamello
	Forni	Ovest	2	Ortles-Cevedale
> 3400	Fellaria Est	Sud	1	Bernina
	Forni	Nord-Ovest	1	Ortles-Cevedale
<b>TOTALE</b>			<b>36</b>	

Tab. 1. Distribuzione delle paline ablatometriche per fasce di quota, apparato, esposizione e settore montuoso

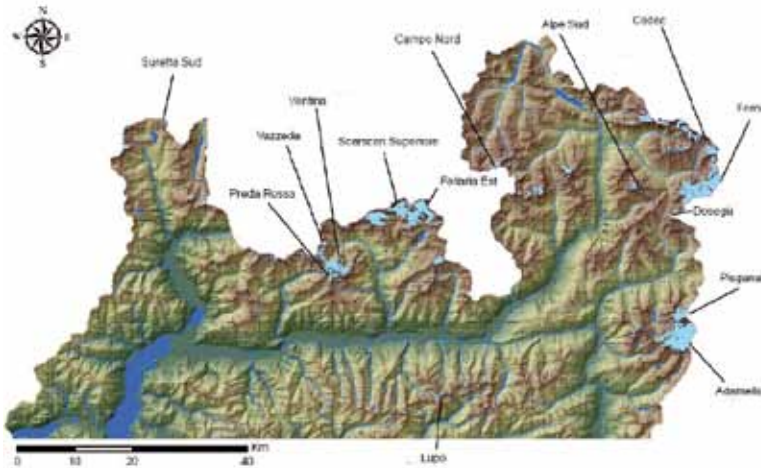


Fig. 1. I ghiacciai interessati dalla rete di paline SGL

### Le basi cartografiche

La spazializzazione è stata effettuata grazie alla digitalizzazione a mano, in ambiente GIS, di tutti i corpi glaciali lombardi. Le basi cartografiche utilizzate sono costituite dalle ortofoto 2007 fornite dalla Regione Lombardia. I limiti digitalizzati sono stati in seguito sottoposti a una fase di controllo da parte degli operatori glaciologici, al fine di correggere eventuali errori dovuti a zone d'ombra presenti sulle ortofoto o a copertura detritica.

Infine, per la suddivisione delle superfici glacializzate in fasce altimetriche, si è utilizzato il Modello Digitale della Superficie (DSM) del 2007, con risoluzione a terra di 2 x 2 m, prodotto dalla Compagnia Generale Riprese Aeree di Parma e in concessione dalla Regione Lombardia. Per ogni porzione di apparato che ricade all'interno di una fascia di quota, sono state calcolate superficie, quota media ed esposizione.

### Risultati e discussione

Nel quinquennio 2007-2011 si stima che, complessivamente, il bilancio dei ghiacciai lombardi sia stato negativo per circa 615 milioni di m<sup>3</sup> di acqua. In volumi di ghiaccio, il valore equivale alla perdita di circa 676 milioni di m<sup>3</sup>. L'evidenza della marcata negatività del dato, diventa ancor più incisiva se si pensa che esso corrisponde al 16% dell'intero glacialismo della regione, stimato, nel 2003, a 3,91 miliardi di m<sup>3</sup> di acqua (Smiraglia e Diolaiuti, s.d.).

La figura 2 mostra il bilancio di massa quinquennale differenziato per fasce altimetriche, espresso in m d'acqua. Come atteso, il bilancio più negativo è osservabile entro le due fasce di quota meno elevate, dove i minori apporti nevosi e le temperature più elevate vanno a intaccare più prepotentemente il patrimonio glaciale. È evidente come, a scala regionale, si tratti di un bilancio molto lontano dall'equilibrio.

La figura 3 propone lo stesso tipo di analisi, differenziata questa volta per settori montuosi. La perdita media nell'intera regione è di circa 7,6 m di ghiaccio, equivalenti a circa 6,9 m di acqua (w. eq).

Un'analisi inter-annuale dei dati raccolti (Fig. 4) evidenzia come quasi il

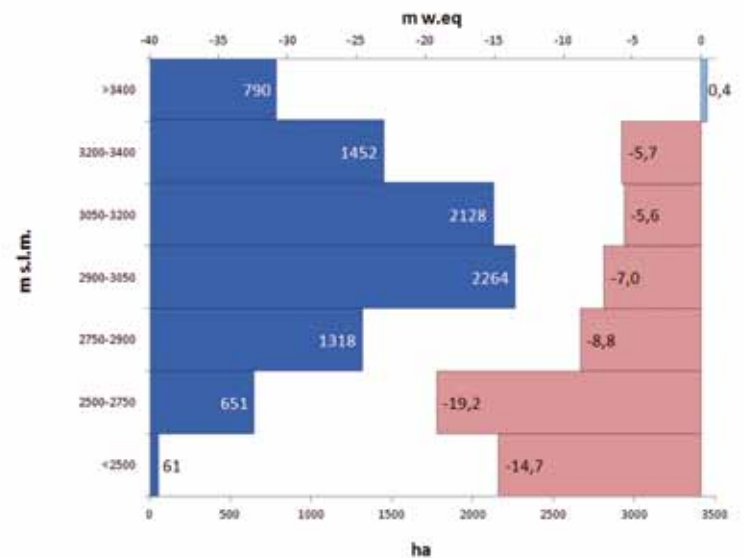


Fig. 2. Distribuzione altimetrica (m s.l.m.) del glacialismo (ha) in Lombardia (escluso il settore Orobie) e bilancio di massa 2007-2011 per fasce altimetriche, espresso in metri di acqua (w.eq). Il grafico non tiene conto del bilancio delle Orobie, che si è deciso di trattare indipendentemente, per i motivi sopra citati. A questo livello di approssimazione, la perdita media risulta comunque invariata, vista la ridotta estensione del glacialismo nel settore

30% della perdita del quinquennio sia da attribuirsi all'annata 2006/2007. Seguono il 2007/2008 e il 2010/2011 che contribuiscono, ciascuno, per circa il 20% al dato di bilancio quinquennale. Il 2008/2009 e ancor più il 2009/2010 sono invece gli anni che hanno registrato le perdite minori, grazie ai residui nevosi prodotti da due stagioni di accumulo particolarmente favorevoli (Colzani *et al.*, 2008; Colzani *et al.*, 2009; Costantini *et al.*, 2010).

Non appena si esce dalla scala ristretta del confronto annuale delle ultime stagioni, il trend di fusione si conferma però in crescita. In tabella 2 sono mostrati i risultati del progetto SGL sul quinquennio 2007-2011, confrontati con le elaborazioni di Smiraglia e Diolaiuti (s.d.) relative a periodi precedenti. La variazione media annua, già raddoppiata con il volgere del millennio, arriva quasi a triplicare.

Interessante anche il confronto del bilancio di massa di un settore per il quale disponiamo di stime riferite ai decenni precedenti: nella tabella 3 i risultati del progetto SGL relativi all'Ortles-Cevedale sono confrontati con le ricostruzioni di Bonardi e Galluccio (2003). Notevole il triplicamento del valore di variazione media annua rispetto all'ultimo decennio del secolo scorso: non casualmente, è proprio in questo settore che si registra il record negativo di bilancio (- 6,2 m di ghiaccio nell'anno 2006/2007, a quota 2578, sul Ghiacciaio dei Forni).

A titolo esemplificativo, si riportano in seguito tre serie storiche riferite a tre siti della rete di monitoraggio SGL. Le serie, provenienti dai ghiacciai dei Forni e del Cedec (nel settore dell'Ortles-Cevedale) e del Suretta Sud (nel settore dello Spluga-Lej), mostrano un andamento abbastanza simile,

Periodo (anni)	Variazione complessiva (milioni di m <sup>3</sup> di ghiaccio)	Variazione complessiva (milioni di m <sup>3</sup> di acqua)	Variazione media annua (milioni di m <sup>3</sup> di ghiaccio)	Variazione media annua (milioni di m <sup>3</sup> di acqua)
1991-1999 (8n)	- 379	- 345	- 47	- 43
1999-2003 (4n)	- 388	- 353	- 97	- 88
2007-2011 (5n)	-676,0	-615,2	-135,2	-123,0

Tab. 2. Stima delle variazioni volumetriche complessive e medie annue del glacialismo lombardo nei periodi 1991-99 e 1999-03 (Smiraglia e Diolaiuti, s.d.) e 2007-11

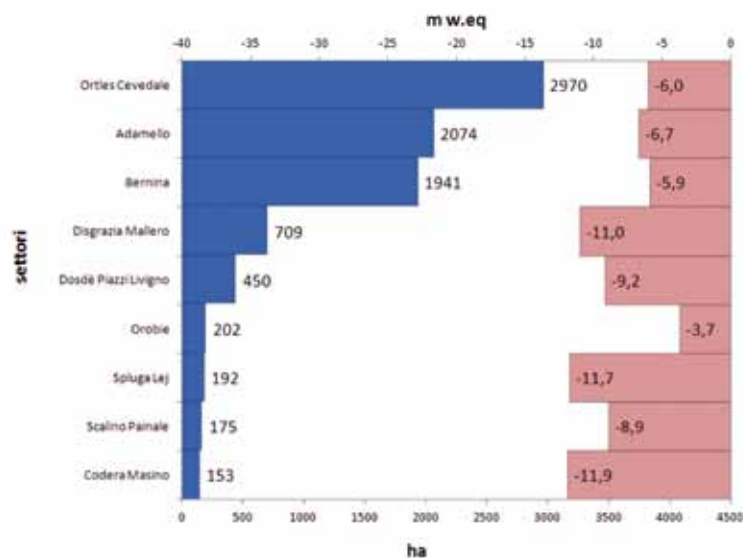


Fig. 3. Superficie glacializzata suddivisa in settori (in ha) e bilancio di massa 2007-2011 espresso in m w. eq. I bilanci settoriali risultano dall'attribuzione a ciascuna fascia altimetrica dei dati medi raccolti sull'intero campione regionale altimetrico di riferimento

seppur quantitativamente differenziato a seconda della quota a cui è stata effettuata la misura.

Un'analisi di dettaglio tra la serie annuale della fascia 2901-3050 del Ghiacciaio di Campo Nord (settore Livigno) e il dato di bilancio complessivo regionale rivela una notevole correlazione ( $R=0,98$ ). Il dato di Campo Nord è sempre più negativo del totale regionale, ma con una differenza sostanzialmente costante anno dopo anno (dagli 0,36 m w.eq del 2007 agli 0,52 m w.eq del 2008).

Si può così ipotizzare che il sito in oggetto sia quello che meglio rappresenta l'andamento del glacialismo a livello regionale.

### Conclusioni

Il progetto di stima del bilancio di massa lombardo, a cinque anni dalla nascita, si è dimostrato un valido strumento per quantificare la risposta glaciale alle forzanti climatiche nella nostra regione.

È però indispensabile sottolineare che senza le risorse di cui il Servizio Glaciologico Lombardo ha potuto disporre (in termini di numero di operatori e di esperienza ventennale sugli apparati indagati, accompagnata da capillari analisi qualitative delle dinamiche glaciali tramite osservazioni fotografiche) l'esportazione di questo tipo di metodologia potrebbe non garantire risultati altrettanto attendibili. Le zone di accumulo si sono rivelate particolarmente critiche a causa di un'elevata variabilità inter-annuale e tra i diversi siti di misura (oltre che per ovvie difficoltà logistiche nell'operare misurazioni a tali altitudini), tanto che è stato necessario validare il dato di terreno grazie all'interpolazione

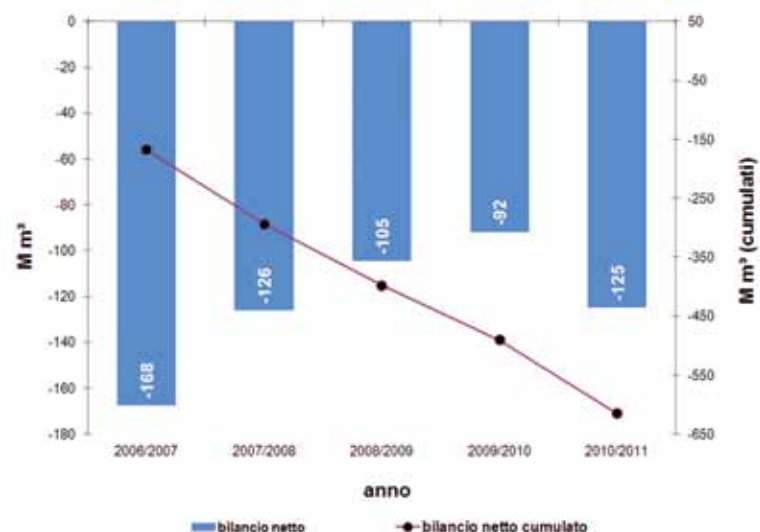


Fig. 4. Bilancio di massa dei ghiacciai lombardi nell'ultimo quinquennio, in milioni di m³ d'acqua

lineare con le fasce inferiori prima di inserirlo nel bilancio.

I risultati mettono in luce un bilancio quinquennale estremamente negativo, quantificato in una perdita di 615 milioni di m³ di acqua, sintomo di un clima che non è più in grado di sostenere il glacialismo alle nostre latitudini e altitudini. Ancor più rilevante, la negatività ha visto un trend crescente negli ultimi due decenni, in linea con l'aumento delle temperature medie (in particolare, per quanto è di nostro interesse, estive) registrato a scala regionale così come globale.

Una perdita del 16% dell'intero patrimonio glaciale in cinque anni (due dei quali, tra l'altro, eccezionalmente nevosi) decreta una "data di scadenza" non troppo lontana per buona parte delle superfici glacializzate lombarde così come le conosciamo e così come siamo abituati a fruirne; dalle evidenze raccolte sul campo, e illustrate nell'articolo, emerge infatti che per individuare una teorica zona di accumulo a scala regionale bisogna necessariamente portarsi al di sopra dei 3400 m. Al di sotto, il bilancio di massa lombardo è nel suo complesso negativo (anche se alcuni singoli apparati possono vedere la propria *Equilibrium Line Altitude* posizionarsi a quote diverse da quella individuata per l'ELA teorica regionale, sotto l'influenza di peculiarità morfologiche, topografiche e dei micro climi locali). È evidente che per riequilibrare un tale scarto tra aree di accumulo e di ablazione, il ridimensionamento delle superfici glacializzate dovrà essere davvero consistente. La velocità di questo ridimensionamento sarà funzione del futuro trend climatico e, considerate le proiezioni più accreditate (IPCC, 2007), essa si prospetta in accelerazione.

Periodo (anni)	Variazione complessiva (milioni di m³ di ghiaccio)	Variazione complessiva (milioni di m³ di acqua)	Variazione media annua (milioni di m³ di ghiaccio)	Variazione media annua (milioni di m³ di acqua)
1961-1981 (n20)	102,8	93,5	5,1	4,7
1981-1991 (n10)	-143,7	-130,8	-14,4	-13,1
1991-2001 (n10)	-126,6	-115,2	-12,6	-11,5
2007-2011 (n5)	-196,8	-179,1	-39,4	-35,8

Tab. 3. Stima delle variazioni volumetriche complessive e medie annue del glacialismo nel settore Orties - Cevedale (versante lombardo) nei periodi 61-81, 81-91, 99-03 e 07-11

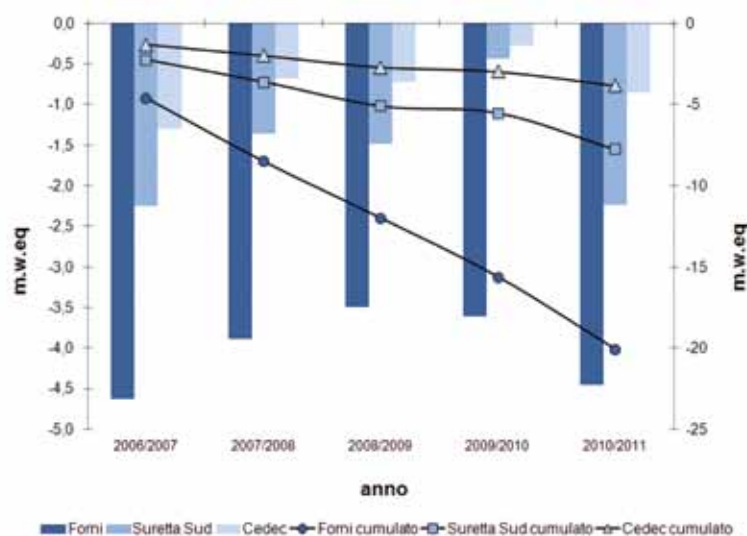


Fig. 5. Dati di ablazione annuali e cumulati in m di acqua (w. eq) relativi a tre diverse fasce altimetriche e a tre ghiacciai: Forni, 2500-2750 m slm, Suretta Sud 2751-2900 m slm e Cedec 3051-3200 m slm

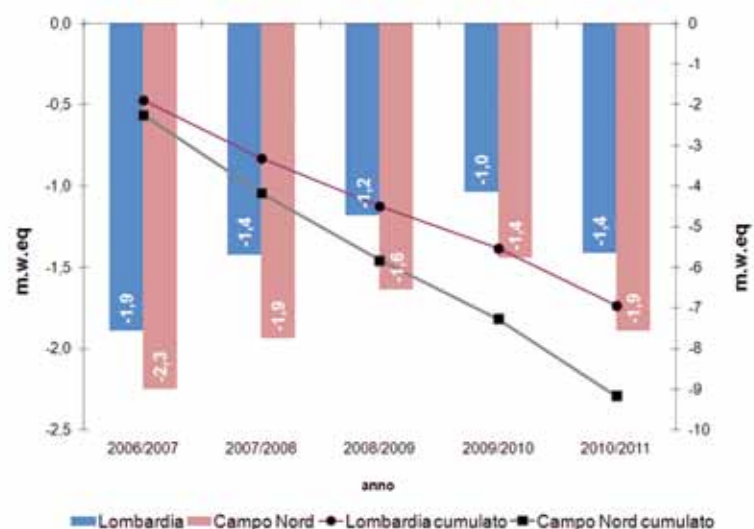


Fig. 6. Dati di ablazione annuali e cumulati in m di acqua (w. eq) per la fascia altimetrica 2901-3050 m slm del ghiacciaio di Campo Nord confrontata con il dato annuale complessivo regionale

Ghiacciai	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011
Forni (2500-2750 m)	- 4,6	- 3,9	- 3,5	- 3,6	- 4,5
Suretta Sud (2751-2900 m)	- 2,3	- 1,4	- 1,5	- 0,4	- 2,2
Cedec (3051-3200 m)	- 1,3	- 0,7	- 0,7	- 0,3	- 0,9
<b>Lombardia (complessivo)</b>	<b>- 1,9</b>	<b>- 1,4</b>	<b>- 1,2</b>	<b>- 1,0</b>	<b>- 1,4</b>

Tab. 4. Dati di ablazione registrati a fine stagione in tre siti della rete di monitoraggio ed il dato complessivo regionale (m di acqua). Accanto al nome del ghiacciaio è indicata la fascia altimetrica entro la quale sono posizionate le paline

Con la collaborazione di: A. Bera, L. Bonetti, M. Butti, D. Colombarolli, M. De Zaiacomo, L. Farinella, M. Lojacono, F. Rota Nodari, F. Roveda, L. Ruvo, A. Scaltriti, A. Tamburini, A. Toffaletti, M. Zambenedetti.

La ricerca è stata condotta grazie al contributo del Club Alpino Italiano e della Regione Lombardia.