

EFFETTI delle MISURE di PROTEZIONE GLACIALE ATTIVA SUL BILANCIO ENERGETICO PUNTUALE del GHIACCIAIO PRESENA in PROVINCIA DI TRENTO

**Guglielmina Diolaiuti^{1,2},
Antonella Senese¹,
Boris Mosconi¹, Carlo D'Agata^{1,2},
Claudia Mihalcea^{1,2},
Claudio Smiraglia^{1,2}**

¹Università degli Studi di Milano
²Comitato Glaciologico Italiano

Alberto Trenti
Provincia Autonoma di Trento (PAT)

L'intensa fase di regresso glaciale in atto da più di un secolo sta avendo pesanti ed evidenti impatti non solo sulle risorse idrologiche ed energetiche delle regioni alpine, ma anche sull'utilizzo turistico delle aree di alta quota. Un caso particolare è rappresentato dalle stazioni sciistiche d'alta quota ove tradizionalmente la stagione sciistica si allunga sia in anticipo che in posticipo rispetto all'ordinario, e le cui infrastrutture, soprattutto impianti di risalita e piste, vedono pesantemente ridotto o addirittura impedito il loro funzionamento (Diolaiuti et al., 2006; Fisher et al., 2011). Da tempo sono quindi poste in atto metodologie e tecniche di adattamento alle mutate condizioni climatiche e di mitigazione dei loro effetti, in particolare con la produzione di neve artificiale per prolungare la durata del manto nevoso stagionale e con la copertura delle aree glaciali per ridurre la fusione. Mentre nel primo caso gli studi e le applicazioni sono da decenni ormai entrate nelle normali procedure di gestione delle stazioni sciistiche, nel secondo caso solo dai primi anni del XXI secolo si sono compiute ricerche sugli effetti delle coperture artificiali nella riduzione della fusione sulla superficie dei ghiacciai. I primi esperimenti sono stati compiuti sulle Alpi Austriache, Svizzere e anche in Germania (per gli aspetti teorici e pratici sull'utilizzo e sul funzionamento di queste tecniche si rimanda a Olefs e Obleitner, 2007; Olefs e Fisher, 2008; Fischer, 2008; Diolaiuti et al., 2009a; Olefs e Lehning, 2010).

Si tratta di un campo di studio di grande interesse che unisce temi di glaciologia e nivologia classici, come i bilanci energetici e i bilanci di massa, con temi più applicativi (mantenimento delle piste da sci e degli impianti di risalita). Sulle Alpi Italiane le prime sperimentazioni sono state compiute sul Ghiacciaio Dosdè Orientale in alta Valtellina su parcelle di limitate estensioni nell'ambito del progetto "Acqua e Ghiacciai: Conoscenza e Conservazione" condotto da ricercatori dell'Università di Milano e sostenuto da Levissima, Gruppo Sanpellegrino (Diolaiuti et al., 2009a), mentre le prime applicazioni su vasta scala sono state realizzate sul Ghiacciaio Presena nella Provincia di Trento. Su questo ghiacciaio con misure di terreno e con l'applicazione di modelli numerici si è quantificata l'evoluzione del manto nevoso e del ghiaccio sottostante sia a livello puntuale sia a livello distribuito in condizioni naturali e con copertura artificiale.



IL GHIACCIAIO DI PRESENA: APPLICAZIONE DI STRATEGIE PER LA PROTEZIONE GLACIALE ATTIVA

Il Ghiacciaio di Presena Occidentale (46°13'30"N, 10°34'50"E) è situato nelle Alpi Retiche, nel gruppo Adamello-Pre-sanella alla testa della Val Presena ed è compreso nel bacino idrografico Vermigliana-Noce-Adige; viene classificato di tipo *montano* (pendio). Nel Catasto dei Ghiacciai Italiani (CNR-CGI, 1961), si riportava una superficie pari a 82 ha con lunghezza massima di 1200 m e larghezza di 1100 m. La superficie glaciale si è ridotta a circa 68 ha nel 1987 (dati Provincia Autonoma di Trento, PAT) (75 ha secondo il Catasto SAT all'inizio degli anni '90, in Bombarda, 1996), mentre dai rilievi più recenti 2003 (DEM PAT) risulta un'estensione areale di circa 33 ha. Questo valore si riferisce al solo Presena Occidentale, ormai nettamente staccato dalla più ridotta porzione (8 ha) denominata "del Corno di Lago Scuro". Secondo le ultime stime PAT il Presena Occidentale nel 2011 ha una superficie di 26 ha, mentre il Corno di Lago Scuro si è ulteriormente ridotto a 6 ha. La superficie del ghiacciaio è regolare, l'alimentazione deriva principalmente dalle precipitazioni nevose dirette, data l'assenza di grandi pareti rocciose a monte. Negli ultimi dieci anni il controllo delle fluttuazioni della fronte (a cura della Società Alpinisti Tridentini, SAT) ha messo in evidenza un costante ritiro e intere porzioni del ghiacciaio sono scomparse; in alcuni settori la fronte si è ritirata di più di 50 m dal 1990 al 1999. Questo ghiacciaio è molto noto in quanto su di esso si è praticato per molti anni lo sci estivo, grazie agli impianti di risalita che partono dal Passo del Tonale e raggiungono dapprima Capanna Presena a quota 2730 e poi la sommità del ghiacciaio a quota 3000. L'utilizzo sciistico di quest'area inizia negli anni '60 del secolo scorso, dopo lo sviluppo della zona del Passo Tonale a partire dagli anni '30. Nel 1963 viene inaugurata la funivia Paradiso che dà accesso al Ghiacciaio Presena. Nel

1966-67 nasce lo sci estivo che fino agli anni 1984-85 vede aumentare ogni anno l'affluenza degli sciatori estivi, che rappresentano circa il 35-40% delle presenze totali annue (De Franco, 2001); negli anni '80 la stagione sciistica estiva arrivava fino alla fine di luglio. È appena il caso di notare che questo sviluppo, così come quello delle altre stazioni sciistiche estive, corrisponde a quella breve fase fredda e nevosa 1965-1985, che ha visto l'ultima recente fase di espansione glaciale sulle Alpi (Patzelt, 1985; Wood, 1988; Rossi et al., 2003). Dopo l'imponente sviluppo urbanistico del Tonale, il comune di Vermiglio acquistò nel 1987 gli impianti, creando la Società Carosello, attualmente Carosello-Tonale spa (Donati, 2011). Nel decennio successivo già alla fine di giugno il Presena non è più in condizioni di garantire lo sci estivo e le condizioni meteorologiche dell'inizio del XXI secolo aggravano la situazione, solo in parte mitigata dalla diffusione delle tecniche di innevamento artificiale. L'evoluzione del Presena nell'ultimo decennio si allinea con quella degli altri ghiacciai trentini e alpini in generale, con bilanci di massa costantemente negativi (Paul et al., 2004); il Ghiacciaio del Careser, ad esempio, per il quale si dispone della più lunga serie italiana di dati, ha fatto registrare fra il 2000 e il 2005 un bilancio medio annuo negativo di 1,9 m w.e. (Carturan e Seppi, 2007); tenendo conto dei dati più recenti (fonte PAT), la media 2000-2010 è di -1,8 w.e. Sulla base degli esperimenti pilota sopra citati condotti in Austria, Svizzera e anche Italia, si è proceduto a partire dal 2008 ad interventi di mitigazione per ridurre la fusione estiva di neve e ghiaccio e permettere la pratica dello sci almeno fino alla fine di giugno. Grazie ad uno specifico programma sperimentale approvato dalla Provincia di Trento e ad una apposita convenzione fra questa e la Società Carosello-Tonale spa si è predisposto un progetto che avesse non solo finalità economico-applicative, ma anche scientifico-conoscitive, questo grazie ad apposite convenzioni con le Università di Milano e Trento. Fra le varie tecniche di mitigazione si è scelta quella delle coperture

artificiali, risultata dalle sperimentazioni la più efficace. In realtà sul Presena erano già state sperimentate tecniche di mitigazione alla fine degli anni '90 soprattutto sul lato destro idrografico del ghiacciaio per garantire il funzionamento degli ski-lift che portano al Passo Presena, che prevedevano spostamenti e accumuli di masse di neve invernale, accumuli di neve artificiale mediante cannoni a bassa pressione, protezione dei rilevati nevosi con materiali diversi: all'inizio con operazioni di pacciamatura mediante paglia, successivamente, anche per ovviare agli evidenti problemi di impatto ambientale, mediante stendimento di teli bianchi di tessuto-non tessuto (geotessile), solitamente usati in lavori di tipo ingegneristico. Il progetto iniziato nel 2008 è stato animato, come si è sottolineato, anche da finalità scientifiche, e si è proposto non solo di permettere il funzionamento degli ski-lift, ma anche di ridurre la negatività del bilancio di massa del ghiacciaio. Si è quindi intervenuti non solo sul settore destro idrografico, ma anche nel settore centrale dove l'emersione di parti del fondo roccioso avrebbero potuto compromettere in pochissimi anni l'integrità del corpo stesso del ghiacciaio, fenomeno quest'ultimo in rapida diffusione sulle Alpi Italiane (basti ricordare i casi classici della Brenva, del Fellaria Orientale, del Pisgana Occidentale, ormai frammentati in due tronconi). All'inizio dell'estate 2008 si è quindi provveduto alla stesura di 28000 m² di tessuto sulla linea degli ski-lift e nel settore centrale ("ginocchio"). Nel 2009 la copertura è stata ampliata a 37300 m², che sono diventati 76400 nel 2010 con la copertura di vasti settori a monte e a valle del "ginocchio". Nel 2011 si è provveduto a ricoprire 57800 m² di superficie glaciale (fig. 1). Il geotessile utilizzato è denominato TOPTEX GLS 340 ed è prodotto a Linz in Austria. Per le caratteristiche tecniche, dimensionali e fisiche dei geotessuti impiegati in glaciologia si rimanda ai protocolli delle ditte produttrici; per le modalità di funzionamento si vedano Olefs e Obleitner, 2007; Olefs e Fisher, 2008; Fischer, 2008; Diolaiuti et al., 2009a; Olefs e Lehning, 2010 (Fig. 1).



Fig. 1 - Localizzazione della copertura geotessile sulla superficie del Ghiacciaio Presena nei diversi anni di sperimentazione di questa strategia di protezione glaciale attiva (da sinistra a destra copertura 2008, 2009, 2010, 2011).

METODOLOGIE UTILIZZATE

I risultati che verranno riportati in questo lavoro si riferiscono al 2010, quando il ghiacciaio è stato protetto con una copertura (estesa su 76400 m²) collocata alla fine di giugno e rimossa i primi di settembre. Al momento dello stendimento del geotessile sono state realizzate da PAT nell'area da ricoprire, delle trincee nivologiche per valutare, secondo i protocolli AINEVA, spessore, densità e caratteristiche del manto nevoso e quantificare il valore dell'accumulo al momento iniziale dell'intervento di *protezione attiva*. Parallelamente ai margini delle aree sottoposte a copertura con geotessile ed in altre aree esterne alla zona trattata sono state collocate paline ablatometriche per seguire l'evoluzione dell'ablazione di neve e ghiaccio. Le paline sono state monitorate a cadenza quindicinale. È stata poi installata da PAT una stazione meteorologica automatica (AWS, *Automatic Weather Station*) sulla superficie del ghiacciaio in un'area lontana da finestre rocciose e *nunatak* che potessero influenzare i flussi energetici e la temperatura dell'aria circostante (fig. 2). La AWS era fornita di un *data logger* e di sensori per misurare la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità e la direzione del vento, la pressione atmosferica, la radiazione solare in entrata ed in uscita in un *range* dello spettro di 0.3 - 3 μm e la radiazione ad infrarossi in un intervallo di 5 - 50 μm proveniente dall'atmosfera e dalla superficie del ghiacciaio (dati rilevati tramite quattro elementi del radiometro netto Kipp & Zonen, CNR-1). Sono stati anche installati un pluviometro

(dimensioni di 1000 cm²) e un nivometro ad ultrasuoni (*sonic ranger*) per misurare il livello, rispettivamente, della pioggia e della neve. L'alimentazione della stazione era fornita da un pannello solare (40 W di potenza) che tamponava una batteria di 100 Ah e 12 V. L'intero sistema era appoggiato direttamente sulla superficie del ghiacciaio tramite un treppiede in acciaio inox. I sensori erano localizzati sul palo stazionale (altezza complessiva m 5) a diversa altezza in accordo ad un compromesso tecnico-pratico tra i suggerimenti del WMO (*World Meteorological Organization*) e le peculiari condizioni ambientali sopraglaciali. Si sottolinea inoltre che rispetto alle altre stazioni sopraglaciali alpine (Citterio et al., 2007; Diolaiuti et al., 2009b), la AWS Presena ha dovuto operare in un sito ad elevata frequentazione antropica (sciatori e operatori delle piste, gatti delle nevi, etc..) e quindi il suo posizionamento ha rappresentato anche un compromesso tra sito ad elevata rappresentatività glaciale e località che non costituisse intralcio o rischio per gli sciatori frequentanti le piste. La AWS Presena Ghiacciaio è stata localizzata sulla superficie del Ghiacciaio Presena a circa 2900 m di quota ed ha rilevato dati per circa un anno (da Settembre 2009 a Settembre 2010). La sequenza dei dati rilevati presenta alcune interruzioni, concentrate soprattutto nel primo autunno di funzionamento e nel periodo invernale (Fig. 2). I dati di flusso energetico rilevati presso la stazione Presena Ghiacciaio sono stati fondamentali per quantificare la fusione sopraglaciale avvenuta tra la primavera e l'autunno 2010. Per completare la serie di dati meteorologici e disporre



Fig. 2 - Stazione meteorologica automatica (AWS) installata da PAT sul Ghiacciaio Presena (febbraio 2010).

così di sequenze di estensione annuale si è fatto invece riferimento a serie ricostruite attraverso modelli climatici fisici (per i dettagli dei metodi si vedano Brunetti et al., 2009a; 2009b) a partire da dati registrati da stazioni strumentali localizzate in un intorno di 100 km. Per la validazione delle serie ricostruite si è fatto riferimento alle registrazioni strumentali della stazione Presena Ghiacciaio. Nel periodo ablativo, inoltre, i flussi energetici sono stati misurati non solo presso la stazione Presena Ghiacciaio (i.e.: sulla superficie glaciale non sottoposta ad interventi di protezione glaciale attiva e perciò definita "in condizioni non modificate"), ma anche nell'area ricoperta con geotessile.

Sotto, fig. 3 - I processi più importanti che determinano i flussi energetici a livello dell'interfaccia ghiacciaio-atmosfera e la struttura termica nello strato più superficiale del ghiacciaio.

A questo scopo un secondo radiometro netto (CNR1, Kipp & Zonen), alimentato da una singola batteria e dotato di un *data logger*, è stato collocato da PAT sulla superficie (a poco più di 1,5 m di altezza) del geotessile.

Questa seconda stazione satellite ha funzionato per il periodo fine Luglio - inizio Settembre 2010, permettendo di raccogliere dati utili al confronto tra il bilancio energetico calcolato per la zona sottoposta a protezione ed il bilancio energetico calcolato per la superficie glaciale naturale. Al momento della asportazione del geo-

tessile anche la stazione satellite è stata rimossa. Di seguito verranno esposti i risultati ottenuti nell'anno idrologico 2009-2010 relativi alla quantificazione del bilancio energetico superficiale e dell'ablazione glacio-nivale a livello puntuale in condizioni naturali e sotto l'azione di strategie di "protezione glaciale attiva".

BILANCIO ENERGETICO IN CONDIZIONI NATURALI

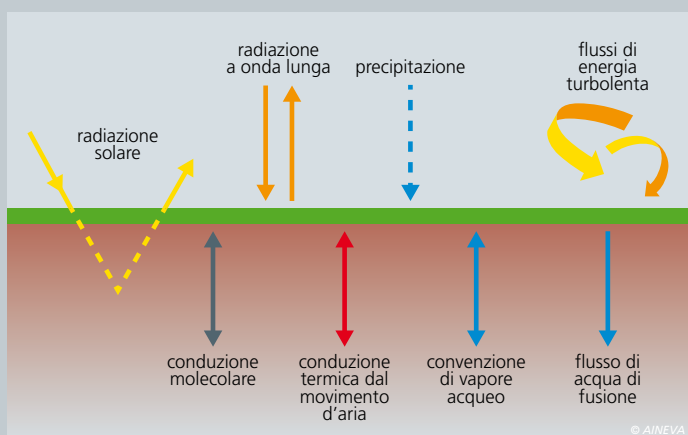
Il bilancio energetico superficiale, ovvero

il bilancio tra i flussi energetici in entrata (ad onda corta, ovvero radiazione solare, ad onda lunga, ovvero radiazione atmosferica) e quelli in uscita (anche questi ad onda corta, o radiazione solare riflessa, ad onda lunga, ovvero radiazione termica emessa dalla superficie) e i flussi di calore sensibile e latente (contributi non radiativi), è fondamentale nel determinare l'energia netta a disposizione per riscaldare l'atmosfera e quindi per determinare il micro e macro clima di un'area e la conseguente fusione (vedere BOX qui sotto). Sul Ghiacciaio Presena i principali pro-

Il bilancio energetico superficiale (R_s) è, in generale, funzione della quantità di energia in arrivo sulla porzione di territorio investigata. Il maggior input energetico è costituito dal flusso solare che è a sua volta funzione della latitudine, della stagione, dell'ora del giorno e dello stato del cielo. Esso è fondamentale su un ghiacciaio nel determinare l'energia netta disponibile per la fusione del ghiaccio e/o della neve. Su un ghiacciaio, infatti, l'energia netta disponibile non viene immagazzinata, nemmeno per brevi periodi, ma utilizzata per l'ablazione, riducendo quindi l'effettivo valore di energia disponibile per redistribuzione attraverso flussi orizzontali. Il bilancio può venire, quindi, scritto sotto forma di flussi energetici per unità di area che attraversano verticalmente l'interfaccia aria-superficie e viene misurato in W/m^2 (Oerlemans, 2001). È dato dalla somma di radiazione ad onda corta netta o *SW netta* ($SW_{in} - SW_{out}$), di radiazione ad onda lunga netta o *LW netta* ($LW_{in} - LW_{out}$), di flusso di calore sensibile (SH) e latente (LE) e di flusso di calore conduttivo (G):

$$R_s = SW_{netta} + LW_{netta} + SH + LE + G$$

Tutti i flussi, valutati alla superficie del ghiacciaio, vengono considerati positivi se diretti verso la superficie. Il flusso di calore conduttivo (G) nel caso del Ghiacciaio Presena è stato trascurato perché non erano disponibili dati di temperatura del profilo della neve e a livello del ghiaccio superficiale. In ogni caso durante la stagione di ablazione (ovvero l'estate e parte dell'autunno), quando sono in atto i processi di fusione e la temperatura del ghiaccio superficiale è circa pari a $0^\circ C$, G è considerato nullo e quindi si può calcolare R_s senza considerare il flusso di calore conduttivo; invece quando la superficie del ghiacciaio non è al punto di fusione (ovvero in primavera, in inverno e parte dell'autunno), il valore di G non è pari a 0 e quindi deve essere valutato. Ne consegue che trascurare



G nel nostro studio comporta solo una leggera sovrastima (meno del 2%) della fusione del ghiaccio. Il bilancio energetico superficiale è dunque fondamentale per i processi di fusione ed i flussi maggiori sono costituiti da quelli radiativi, di solito caratterizzati da potenze per unità di superficie di poche centinaia di W/m^2 (Fig. 3). Una grande quantità di radiazione solare che raggiunge la superficie viene riflessa, in maniera maggiore nel caso di neve fresca, minore con neve vecchia o ghiaccio, molto piccola quando la superficie è coperta da materiale detritico. La radiazione solare penetra all'interno della neve e del ghiaccio; infatti la riflessione misurata alla superficie è il risultato di complicati processi di *scattering* da parte dei cristalli di ghiaccio o neve che costituiscono lo strato superficiale del ghiacciaio. Riguardo la radiazione ad onda lunga, la superficie è caratterizzata da un valore di emissività (e di assorbimento) pari a circa 1. La quantità di radiazione ad onda lunga riflessa dalla superficie è trascurabile (è assorbita quasi completamente). Le radiazioni infrarosse entranti e uscenti si compensano; in genere la quantità emessa dalla superficie è di poco maggiore (poche decine di W/m^2) rispetto a quella proveniente dall'atmosfera, rendendo così negativo il bilancio netto ad onda lunga. Il bilancio netto ad onda lunga risulta essere positivo solo quando l'aria è calda e umida e il cielo è coperto da nubi che incrementano la radiazione in arrivo. Per quanto concerne gli effetti delle nubi sul bilancio radiativo ad onda corta (solare incidente e riflesso) e ad onda lunga (atmosferica e terrestre), questi sono di segno opposto. Più nubi implicano, infatti, una minore quantità di radiazione ad onda corta entrante ed una maggiore quantità di radiazione ad onda lunga atmosferica. L'effetto netto dipende in gran parte dall'albedo della superficie analizzata e dalla trasmissività della copertura nuvolosa (Ambach, 1974; Bintanja & Van den Broeke, 1996, Oerlemans, 2005). Nei casi di elevata albedo superficiale (e.g. come si verifica ad esempio dopo una nevicata) la variazione netta di radiazione ad onda lunga per un dato incremento di copertura nuvolosa è maggiore del cambiamento netto di radiazione solare incidente. Diversamente nei casi di minore albedo superficiale (e.g. come si verifica quando la superficie glaciale espone ghiaccio vivo) l'effetto di diminuzione della radiazione solare è dominante e quindi il bilancio energetico radiativo diminuisce all'aumentare della copertura nuvolosa. Lo scambio turbolento di calore e vapore risulta in generale molto meno importante ai fini del bilancio energetico rispetto alla componente radiativa; la massima influenza si ha in inverno (quando il sole è basso) o in estate quando la temperatura dell'aria è elevata. La direzione dei flussi risulta dai gradienti dei profili delle temperature medie e dell'umidità. Quando la temperatura dell'aria è al di sopra del punto di fusione, il flusso di calore sensibile è sempre verso la superficie, mentre il flusso di calore latente può essere diretto in entrambe le direzioni, in base all'umidità dell'aria.

cessi di ablazione sono rappresentati dalla fusione superficiale che si osserva dalla fine della primavera sino alle prime nevicate autunnali. Quindi, per valutare l'intensità di questo processo (*Melting*, *M*) sono state prese in considerazione solo le giornate caratterizzate da fusione, ovvero con temperatura dell'aria maggiore di 0°C. Solo per le ore con temperatura positiva è stata calcolata la massa persa in kg di neve-ghiaccio secondo la nota relazione:

$$M = \text{Energia disponibile} / \text{Energia necessaria per fondere 1 kg}$$

con *M* negativo e misurato in kg m⁻² o mm w.e. (ovvero in equivalenti in acqua). Per calcolare la fusione dovuta all'energia netta disponibile alla superficie (*Rs*) sono stati considerati solo i valori positivi di questo parametro, divisi per il calore latente di fusione.

Pertanto applicando il metodo proposto da Oerlemans (2005), sono state calcolate la *SW netta*, la *LW netta* (fig. 4a), il flusso turbolento di calore sensibile (*SH*) e il flusso turbolento di calore latente (*LE*) (fig. 4b) e l'energia netta disponibile (*Rs*) alla superficie del Ghiacciaio Presena (fig. 4c). In tal modo si è ottenuto il bilancio energetico superficiale completo, e quindi, l'energia netta disponibile per la fusione del ghiaccio e/o della neve alla quota di 2900 m (ove era ubicata la AWS Presena e alla quale quindi ci si è riferiti per le modellazioni meteorologiche validate con i dati registrati dalla stazione sopragliatale) (Fig. 4). Analizzando i valori medi giornalieri di bilancio energetico completo, si osserva che la *SW netta* è caratterizzata da un andamento a campana con il picco di massimo in estate (tra i 150 e i 200 W/m²), mentre per la *LW netta* i valori oscillano in un intervallo che va da poco più di 0 a -100 W/m² (valore superato solo tra la fine di giugno e l'inizio di luglio 2010), valori che sono caratteristici della superficie di un corpo freddo come il ghiacciaio. Il flusso di calore sensibile è quasi sempre positivo mentre il flusso di calore latente assume valori positivi solo in estate. Il fatto che *LE* sia minore

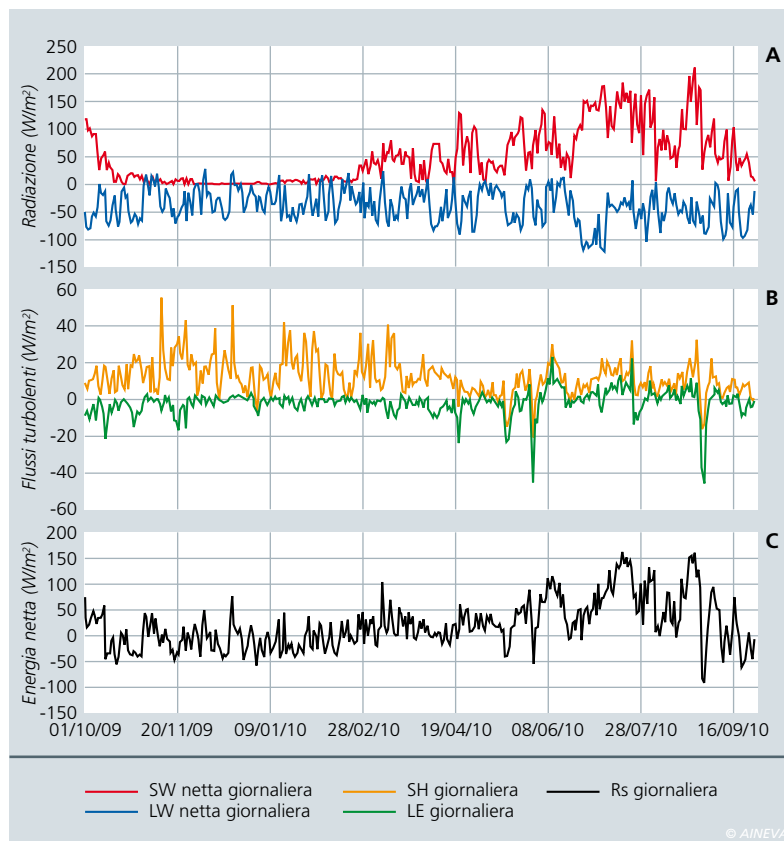


Fig. 4 - Valori medi giornalieri della radiazione netta ad onda corta (*SW netta*) e ad onda lunga (*LW netta*) (a), dei flussi turbolenti di calore sensibile (*SH*) e latente (*LE*) (b) e dell'energia netta superficiale disponibile per la fusione del ghiaccio e/o della neve (c) dall'1 ottobre 2009 al 27 settembre 2010.

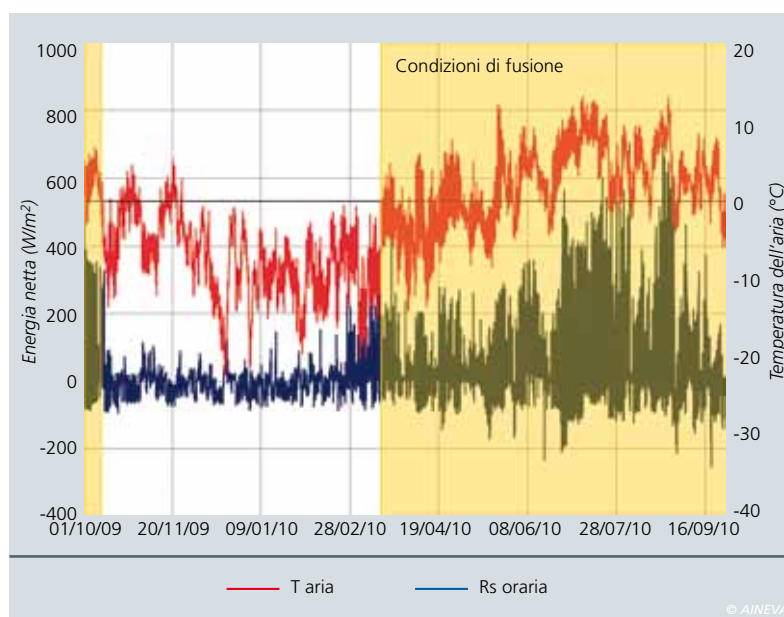


Fig. 5 - Valori orari dell'energia netta superficiale disponibile per la fusione del ghiaccio e/o della neve (*W/m²*) e della temperatura dell'aria (°C) dall'1 Ottobre 2009 al 27 Settembre 2010. In giallo sono evidenziati i periodi in cui prevalgono le condizioni di fusione, ovvero con valori di temperatura dell'aria e di energia netta entrambe positive. Da notare in questo periodo la presenza di poche ore all'interno di una medesima giornata in cui non si verificano condizioni necessarie per la fusione.

di 0 W/m² in inverno è verosimile, poiché in questa stagione si registra una ridotta umidità relativa dell'aria in combinazione a una minima differenza di temperatura fra il ghiaccio e l'aria sovrastante la superficie. L'energia netta disponibile presenta un andamento sinusoidale con picchi di massimo in estate e di minimo in inverno, rispettivamente di circa 150 e -100 W/m². Per calcolare la perdita di massa alla superficie del Ghiacciaio Presena alla quota di 2900 m si è partiti dai dati radiativi e

da quelli non radiativi, e si è poi proceduto col calcolo della fusione oraria solo per le ore con temperatura maggiore di 0°C (condizioni di fusione). Affinché ci sia fusione è necessario che la temperatura sia uguale al punto di fusione e che l'energia data dalla somma di tutti i processi radiativi e non radiativi, sia positiva. Queste due condizioni sono evidenziate nella Fig. 5, dove sono stati inseriti in un medesimo grafico a dispersione sia i valori orari di temperatura dell'aria (linea

rossa) che quelli di radiazione netta (R_s , linea blu). Da questa analisi emerge che il periodo caratterizzato da assenza di condizioni di fusione corrisponde a quello invernale (quindi di accumulo), più precisamente dal 10 Ottobre 2009 al 18 Marzo

2010 (Fig. 5). A supporto di quanto sopra enunciato sono stati creati altri due grafici rappresentanti i valori orari (fig. 6) e cumulati nel tempo (fig. 7) dell'ablazione puntuale e superficiale. Anche da questo tipo di analisi è possibile osservare che i

processi di fusione sono assenti da inizio Ottobre a metà Marzo: ovvero valori orari nulli di massa persa (Fig. 6) e andamento orizzontale nei valori cumulati (Fig. 7).

Il valore orario massimo di ablazione è stato calcolato per il 23 agosto alle ore 13:00 (pari a $-0,0082$ m w.e.), mentre quello giornaliero massimo il 26 agosto 2010 (pari a $-0,05$ m w.e.).

Il valore totale di ablazione dall'1 Ottobre 2009 al 27 Settembre 2010 è risultato pari a $-2,93$ m w.e. (Fig. 7). Questo valore corrisponde allo spessore di equivalenti in acqua perso dal ghiacciaio per fusione di neve e ghiaccio nel periodo analizzato in assenza di misure di protezione quali la copertura geotessile. In particolare analizzando i valori di albedo (o riflettività) emerge che dal 16 Luglio al 9 Settembre 2010 la superficie del ghiacciaio alla quota a cui è installata la AWS è stata caratterizzata da ghiaccio esposto (*bare ice*).

BILANCIO ENERGETICO IN CONDIZIONI DI COPERTURA CON GEOTESSILE

L'ablazione glaciale sopra descritta, stimata attraverso il calcolo del bilancio energetico completo, è rappresentativa delle condizioni del Ghiacciaio Presena "non modificate" (si preferisce questo termine a "naturali" in quanto l'intero ghiacciaio è sottoposto ad interventi antropici di spostamento e compattazione del manto nevoso ad opera dei "gatti delle nevi" per permettere la pratica dello sci). La situazione è ben diversa se si considerano le porzioni glaciali sottoposte a copertura con geotessile. Per valutare l'efficacia di questa copertura nel modificare gli scambi energetici tra superficie glaciale ed atmosfera e quindi nel ridurre le perdite per fusione di neve e ghiaccio sono state svolte alcune sperimentazioni durante la stagione estiva 2010. Più precisamente a poche centinaia di metri dalla AWS Presena posta sulla superficie libera del ghiacciaio, dopo aver posizionato la copertura geotessile, su alcune aree sottoposte a protezione è stato installato da PAT un

Fig. 6 - Valori orari di fusione superficiale e puntuale calcolati dall'1 Ottobre 2009 al 27 Settembre 2010 per condizioni glaciali non modificate alla quota di 2900 m.

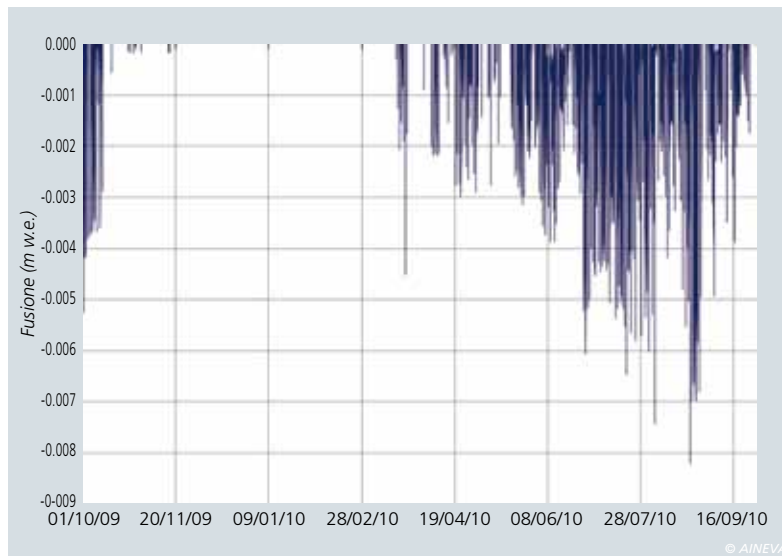


Fig. 7 - Valori orari cumulati nel tempo di fusione superficiale e puntuale calcolati dall'1 Ottobre 2009 al 27 Settembre 2010 per condizioni glaciali non modificate alla quota di 2900 m. In giallo è evidenziato il periodo in cui la superficie è caratterizzata da ghiaccio esposto (*bare ice*).

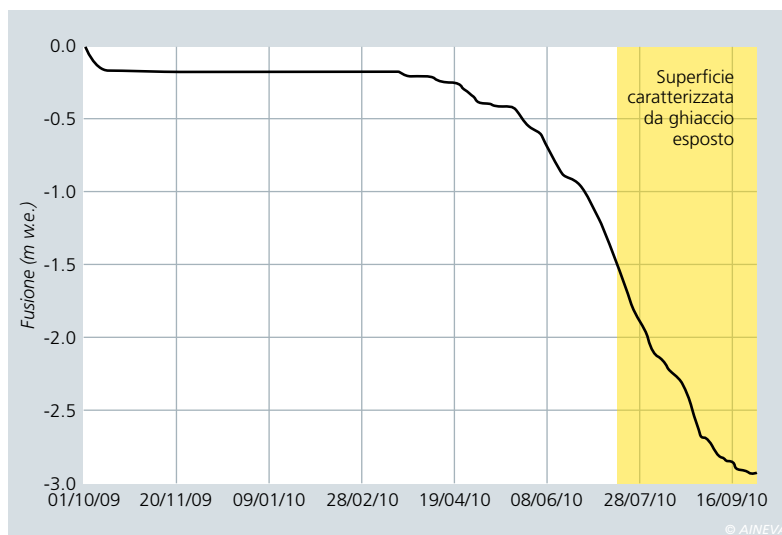


Fig. 8 - Radiometro netto installato sulla superficie della copertura geotessile posizionata sul Ghiacciaio Presena.



radiometro netto per la misura della radiazione ad onda corta e ad onda lunga alla superficie del telo (Fig. 8). In questo modo è stato possibile effettuare un confronto fra i dati radiativi misurati alla superficie non modificata del ghiacciaio e quelli radiativi rilevati alla superficie del telo dal 31 Luglio 2010 al 29 Agosto 2010. Poiché le proprietà delle due superfici in questione (ghiacciaio non modificato e telo) sono completamente diverse, differenti saranno anche i valori della radiazione ad onda corta riflessa (e quindi dell'albedo) e di quella ad onda lunga emessa dalle superfici stesse. Per quanto riguarda, invece, la radiazione in ingresso sia ad onda corta che ad onda lunga, come ovvio, esse assumono lo stesso andamento in entrambi i siti di indagine. L'effetto del telo si manifesta soprattutto nel limitare la quantità di energia solare netta assorbita (SW netta, Fig. 9) e quindi nel limitare l'energia complessivamente assorbita dalla superficie (Rs, Fig. 10). Il valore di albedo media calcolata per lo stesso periodo per i due siti di indagine (superficie glaciale non modificata e quella sottoposta a copertura con geotessile) è ben diverso (Fig. 11), più precisamente la porzione coperta con il telo ha evidenziato valori medi di albedo di 0,64 contro un valor medio di 0,43 per la superficie glaciale non modificata. Ne deriva che in media presso il telo l'assorbimento di energia solare è stato del 36%, mentre la superficie non modificata del ghiacciaio ha assorbito il 57% dell'energia solare. Questa differenza è ovviamente da attribuire all'azione del telo, che presenta una colorazione bianco puro abbastanza stabile che riduce l'assorbimento solare; diversamente la superficie naturale del ghiacciaio vede la progressiva modificazione delle condizioni della neve (che assorbe particolato e polveri divenendo sempre meno candida, aumenta il contenuto in acqua e pertanto riduce via via la sua albedo sino a raggiungere i valori propri del ghiaccio di ghiacciaio). Questo effetto ha portato, nel periodo di analisi e nelle ore in cui la temperatura era positiva (condizioni di fusione), ad

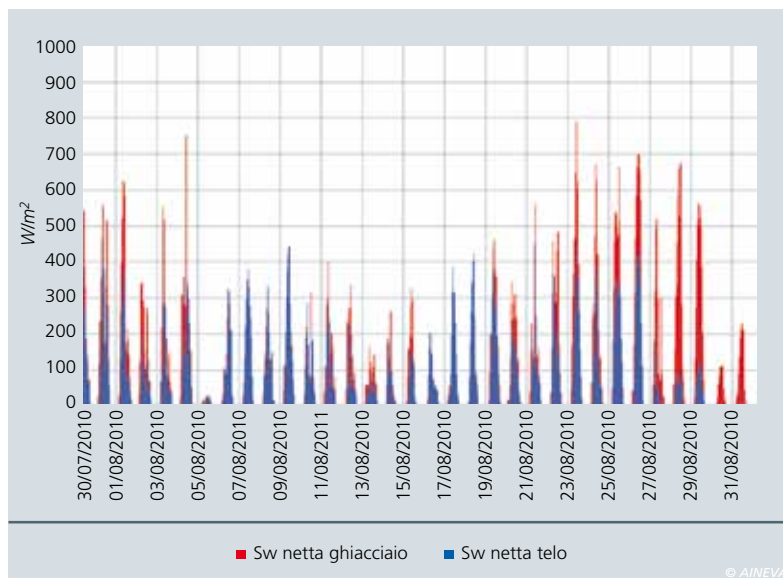


Fig. 9 - Valori medi orari di radiazione ad onda corta solare netta (SW netta) dal 31 luglio al 29 agosto 2010 sul Ghiacciaio Presena in condizioni non modificate (colore rosso) e con la copertura geotessile (colore blu).

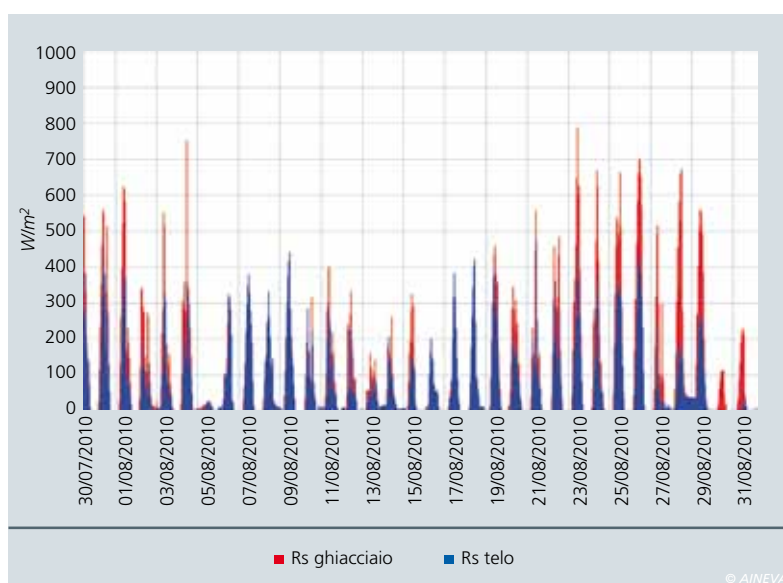


Fig. 10 - Valori orari di energia netta assorbita (Rs) dal 31 luglio al 29 agosto 2010 sul ghiacciaio (colore rosso) e sulla copertura geotessile installata (colore blu). Si noti come la presenza della copertura geotessile ha limitato l'assorbimento di energia (e quindi la fusione nivo-glaciale).

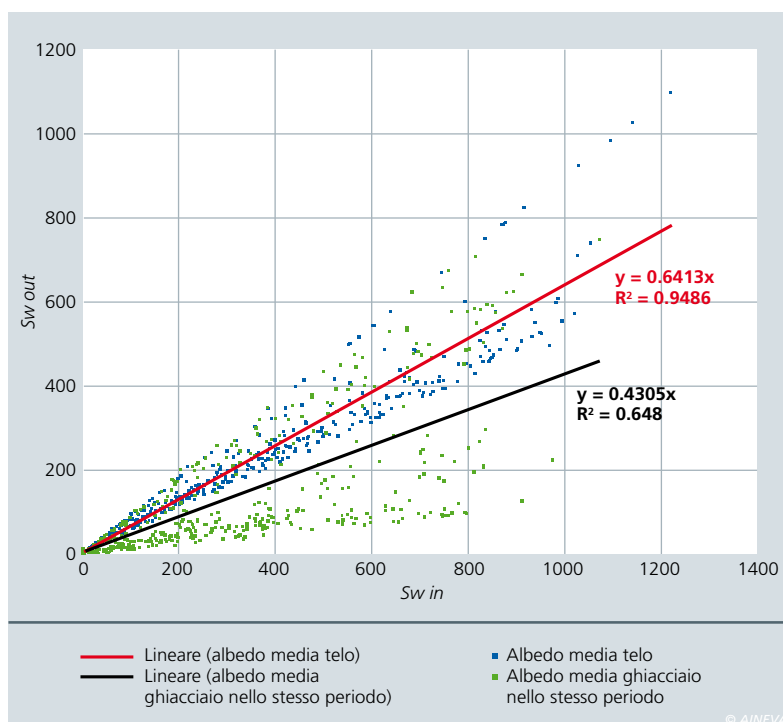


Fig. 11 - Confronto tra l'albedo media calcolata a partire da dati di radiazione orari per il periodo dal 31 luglio al 29 agosto 2010 sulla copertura geotessile installata sulla superficie del Ghiacciaio Presena (linea rossa, dispersione di punti blu) e l'albedo media calcolata per le condizioni glaciali non modificate (linea nera, dispersione di punti verde).

SW NETTA	LW NETTA	R _s
407.96	2.32	410.28
SW NETTA	LW NETTA	R _s
185.11	12	197.11

© AI/NEVA

Fig. 12 - Valori cumulati (MJ/m²) medi orari dei flussi radiativi netti alla superficie glaciale in condizioni naturali (priva di copertura geotessile) (sopra) e con il geotessile (sotto). Si sono considerati i valori registrati dal 31 luglio al 29 agosto 2010 nelle sole ore con T>0°C.

un assorbimento di radiazione ad onda corta netta (SW netta) pari a 407,96 MJ/m² presso la superficie non modificata del ghiacciaio e ad un assorbimento di radiazione ad onda corta netta (SW netta) pari a 185,11 MJ/m² presso la superficie coperta con il geotessile.

Diverso è invece l'effetto del telo sulla radiazione ad onda lunga emessa e quindi sul valore netto di onda lunga assorbita. La superficie glaciale non emette intensamente radiazione ad onda lunga poiché per tutto l'anno la temperatura superficiale (dalla quale dipende l'intensità dell'emissione) è pari a 0°C (in caso di condizioni di fusione) o inferiore a 0°C. Diversamente il telo presenta alla sua superficie valori termici più elevati che possono

raggiungere anche i +5 e +7°C, portando a valori di emissione infrarossa maggiori. Ne consegue che presso il ghiacciaio nel periodo considerato e nelle ore in cui la temperatura era positiva, il valore netto di radiazione ad onda lunga (Lw netta) è stato pari a 2,32 MJ/m², mentre presso il telo nello stesso periodo la radiazione netta assorbita è stata pari a 12 MJ/m². Per valutare l'effetto complessivo dato dalla riduzione dell'energia ad onda corta assorbita e dall'aumento di quella ad onda lunga emessa si è calcolato per i due siti di indagine il valore della radiazione netta (SW netta + LW netta) assorbita.

Alla superficie non modificata del ghiacciaio la radiazione netta (R_s) assorbita è risultata pari a 410,28 MJ/m² mentre al geotessile la radiazione netta (R_s) assorbita è risultata pari a 197,10 MJ/m² (Tabella di Fig. 12). Questi valori di energia radiativa assorbita corrispondono ad una fusione di circa 59 cm w.e. nel settore glaciale sot-

toposto a copertura e ad una fusione di circa 123 cm w.e. nel settore glaciale non modificato. Questo significa che complessivamente l'azione del telo nel modulare i flussi energetici radiativi assorbiti dal ghiacciaio avrebbe portato nel periodo considerato ad una riduzione dell'ablazione puntuale del 52%. Si consideri inoltre che l'efficacia protettiva del geotessile è stata sicuramente maggiore in quanto alla maggiore riflessione (conseguenza della stabilità nel colore del telo, bianco puro) dell'energia solare rispetto alla superficie glaciale non modificata, si è anche associata la ridotta conduzione dell'energia assorbita alla superficie e dei conseguenti flussi termici. Questo ha sicuramente determinato un'ulteriore riduzione della fusione nivo glaciale al di sotto della copertura.

Per quanto riguarda invece i flussi non radiativi (calore latente e sensibile), responsabili in condizioni naturali sino al 20% della fusione nivoglaciale (Oerlemans & Klok, 2002), questi sono stati sicuramente modificati dalla presenza della copertura geotessile ma l'effetto di questa variazione sulla fusione nivoglaciale è da considerarsi trascurabile a causa dell'effetto isolante prodotto dalla copertura stessa. Se si considera pertanto una efficacia protettiva del 52% (si ricordi però che questo valore è stato quantificato solo per il breve periodo fine Luglio-fine Agosto 2010 e che è calcolato solo dal contributo radiativo del bilancio di massa senza tenere conto della conduzione termica, assai limitata, del telo) e lo si applica al valore calcolato per le condizioni non modificate sull'intero periodo di ablazione 2010 (risultato pari -2,93 m w.e.), si otterrebbe una fusione teorica in condizioni di protezione attiva (ovvero sotto il telo) di circa 1,40 m w.e. e uno spessore conservato di circa 1,50 m w.e., valore che è molto vicino allo spessore del gradino risultante dalla protezione del telo osservata a fine estate (circa 1,50 - 2 m) (Figg. 13-14).

Se la copertura con il geotessile avesse avuto un'efficacia del 100%, il gradino rispetto alla zona non protetta avrebbe do-

Fig. 13 - Il gradino creato dalla protezione del geotessile a fine luglio 2010.



Fig. 14 - Ghiaccio Presena a fine estate 2010.



vuto essere alto almeno 3 m. In letteratura le percentuali di efficacia del geotessile nel ridurre l'ablazione variano dal 68,8% nel 2008 (Diolaiuti et al 2009a) al 60% nel 2003-2008 (Olefs e Fischer 2008), ma sono evidentemente condizionate dalle differenze di altitudine, di radiazione solare e di accumulo (Fischer et al 2011).

CONCLUSIONI

Lo studio condotto in margine al progetto di mitigazione dell'ablazione sul Ghiacciaio Presena ha permesso di quantificare il bilancio energetico puntuale del ghiacciaio e l'entità della fusione nivo-glaciale. Inoltre, grazie alla presenza nell'estate 2010, seppure per un limitato periodo, di un radiometro posto direttamente al di sopra del geotessile, è stato possibile valutare i flussi radiativi sia in condizioni non modificate (dati rilevati dalla AWS Ghiacciaio Presena) che in presenza di copertura geotessile.

Grazie ai dati radiativi raccolti si è anche calcolata l'albedo del geotessile e la si è confrontata con quella del ghiacciaio in condizioni non modificate per il periodo fine luglio-fine agosto.

Il settore coperto con il geotessile ha evidenziato valori medi di albedo di 0,64 contro un valor medio di 0,43 per la superficie glaciale non modificata. In media presso il telo l'assorbimento di energia solare è stato quindi del 36% mentre la superficie non modificata del ghiacciaio ha assorbito in media il 57% dell'energia solare.

Questo ha fatto sì che la superficie non modificata assorbisse 408 MJ di energia ad onda corta che ha promosso la fusione nivo glaciale, mentre la porzione sottoposta a protezione ha visto l'assorbimento di soli 185 MJ.

Questi valori di energia assorbita corrispondono ad una fusione di circa 59 cm w.e. nel settore glaciale sottoposto a copertura e ad una fusione di 123 cm w.e. nel settore glaciale non modificato.

Questo significa che complessivamente l'azione del telo nel modulare i flussi energetici radiativi assorbiti dal ghiacciaio porta per il periodo di sperimentazione,

sempre a livello puntuale, ad una riduzione dell'ablazione del 52%.

Se si estrapola questo valore all'intero periodo di ablazione, durante il quale sul ghiaccio non protetto si è calcolata una fusione di 2,93 m w.e., si otterrebbe una fusione di circa 1,40 m w.e. con la conservazione di uno spessore di circa 1,50 m w.e., valore molto simile a quello risultante nella realtà al di sotto del telo

nella zona considerata. Questi risultati evidenziano che, nonostante le percentuali di efficacia dell'utilizzo del geotessile in sperimentazioni precedenti siano più elevate (sino al 68% di riduzione dell'ablazione con stendimento effettuati a fine aprile, si veda Diolaiuti et al., 2009a), l'opera di mitigazione condotta sul Ghiacciaio Presena, è stata più che soddisfacente.

Bibliografia

- Ambach W. (1974) – The influence of cloudiness on the net radiation balance of a snow surface with high albedo. *Journal of Glaciology*, 13, 73-84.
- Bintanja R. & van den Broeke M.R. (1996) – The influence of clouds on the radiation budget of ice and snow surfaces in Antarctica and Greenland in summer. *International Journal of Climatology*, 16, 1281-1296.
- Bombarda R. (1996) – Il cuore bianco. Guida ai ghiacciai del Trentino. Arca Edizioni, Trento, 174 pp.
- Brunetti M., Lentini G., Maugeri M., Nanni T., Simolo C. e Spinoni J. (2009 a) – Estimating local records for Northern and Central Italy from a sparse secular temperature network and from 1961-1990 climatologies. *Advances in Science and Research*, 3, 63-71.
- Brunetti M., Lentini G., Maugeri M., Nanni T., Simolo C. e Spinoni J. (2009 b) – 1961-1990 high-resolution Northern and Central Italy monthly precipitation climatologies. *Advances in Science and Research*, 3, 73-78.
- Carturan L. & Seppi R. (2007) – Recent mass balance results and morphological evolution of Careser Glacier (Central Alps). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 30, 33-42.
- Citterio M., Diolaiuti G., Smiraglia C., Verza Gp. e Meraldi E. (2007) – Initial results from the Automatic Weather Station (AWS) on the ablation tongue of Forni Glacier (Upper Valtellina, Italy). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 30, 141-151
- CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) – CGI (Comitato Glaciologico Italiano) (1961) – Catasto dei Ghiacciai Italiani-Ghiacciai della Lombardia e dell'Ortles-Cevedale. Torino, CGI, III, 390 pp.
- De Franco L. (2001) – Il Ghiacciaio del Presena. Rapporto di Eco-Audit. Progetto "Save the glaciers 2000", Lever-Fabergé Italia spa, 40 pp.
- Diolaiuti G., Smiraglia C., Pelfini M., Belò M., Pavan M. e Vassena G. (2006) – The recent evolution of an Alpine glacier used for summer skiing (Vedretta Piana, Stelvio Pass, Italy). *Cold Regions Science and Technology*, 44, 206-216.
- Diolaiuti G., Smiraglia C. e Meraldi E. (2009a) – Strategie di protezione "attiva" dei ghiacciai. Prime applicazioni italiane e risultati. *Neve e Valanghe*, 65, 58-64.
- Diolaiuti G., Smiraglia C., Verza G.P., Chillemi R. e Meraldi E. (2009b) – La rete micro-meteorologica glaciale lombarda: un contributo alla conoscenza dei ghiacciai alpini e delle loro variazioni recenti. In "Clima e Ghiacciai. La crisi delle risorse glaciali in Lombardia" (a cura di C. Smiraglia, G. Morandi e G. Diolaiuti), Regione Lombardia, 69-92.
- Donati M. (2011) – Interventi di mitigazione della fusione glaciale: il caso del Ghiacciaio Presena. Elaborato finale, Corso di Laurea "Valorizzazione e Tutela dell'Ambiente e del Territorio Montano", Università degli Studi di Milano, Facoltà di Agraria, 75 pp.
- Fischer A. (2008) – Ritiro dei ghiacciai ed effetti degli interventi di copertura. *Neve e Valanghe*, 64, 44-59.
- Fischer A., Olefs M. e Abermann J. (2011) – Glaciers, snow and ski tourism in Austria's changing climate. *Annals of Glaciology*, 52(58), 89-96.
- Oerlemans J. and Klok E.J. (2002) – Energy balance of a glacier surface: analysis of Automatic Weather Station data from the Morteratschgletscher, Switzerland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 34, 477-485.
- Oerlemans J. (2001) – Glaciers and Climate Change. Balkema, Lisse, 148 pp.
- Oerlemans J. (ed). (2005) – The microclimate of glaciers. II. Lecture at Karthaus summer school 2005, Utrecht Univ.
- Olefs M. e Obleitner F. (2007) – Numerical simulations on artificial reduction of snow and ice ablation. *Water Resources Research*, 43, W06405, doi:10.1029/2006WR005065.
- Olefs M. e Fischer A. (2008) – Comparative study of technical measures to reduce snow and ice ablation in Alpine glacier ski resorts. *Cold Regions Science and Technology*, 52, 371-384.
- Olefs M. e Lehning M. (2010) – Textile protection of snow and ice: measured and simulated effects on the energy and mass balance. *Cold Regions Science and Technology*, 62, 126-141.
- Patzelt G. (1985) – Die Gletscher der Oesterreichischen Alpen 1985-1986. *Zeitschrift Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 21, 403-407.
- Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T. e Haeberli W. (2004) – Rapid Disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters*, 31, L21402, doi:10.1029/2004GL020816, 11 pp.
- Rossi S., Diolaiuti G., Forasacco E., Pelfini M., Smiraglia C. e Spreafico P. (2003) – Evidenze geomorfologiche della più recente espansione glaciale correlabile all'episodio freddo degli anni '50-'70 del XX secolo sulle Alpi Lombarde. In: Biancotti A. e Motta M. (a cura di), "Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali", Brigati, Genova, 445 pp.
- SAT (Società Alpinisti Tridentini) - http://www.sat.tn.it/ghiacciai/684_0.htm
- Wood F. (1988) – Global alpine glacier trends 1960s to 1980s. *Arctic and Alpine Research*, 20,4, 404-413.