

Sintesi della tesi di laurea specialistica di

Paolo Caronna

IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO A SCALA REGIONALE SUL BILANCIO DI MASSA ED ENERGETICO DEL GHIACCIAIO DELL'ADAMELLO

Università degli Studi di Brescia

Facoltà di Ingegneria - Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e Territorio

Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente

A.A. 2009/2010

Relatore: **Dr. Ing. Giovanna Grossi** - Correlatore: **Prof. Ing. Roberto Ranzi**

INTRODUZIONE

Con 17.24 km² di estensione superficiale (da immagine ASTER del 2003), il ghiacciaio dell'Adamello può essere considerato il più vasto delle Alpi italiane. Appartiene alle Alpi Retiche meridionali e viene attraversato dal confine tra la Lombardia ed il Trentino-Alto Adige/Südtirol. Il 90% della superficie del ghiacciaio ricade in provincia di Brescia, mentre la restante porzione è situata in provincia di Trento.

Dal punto di vista idrologico, per la presenza di una linea spartighiaccio che risale da Passo Adamè verso il Monte Adamello ed il Corno Bianco (Baroni e Carton, 1996), ben 13.38 km² dei 17.24 km² di superficie complessiva alimentano il bacino del F. Sarca di Genova, identificando l'unità idrografica del Ghiacciaio del Mandrone (I-4L01011-15); i rimanenti 3.86 km² appartengono invece al bacino dell'Oglio.

Lo scopo della tesi è stato quello di simulare la risposta del ghiacciaio nei confronti di possibili future sollecitazioni meteorologiche legate agli scenari previsti dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) per il 21° secolo.

La risposta del ghiacciaio è valutata in termini di bilancio di massa, simulato in precedenti studi (v. Ranzi et al. 2010) per il periodo 1995-2009 tramite il modello PDSLIM, acronimo di *Physically based Distributed Snowmelt Land and Ice Model* (Ranzi e Rosso, 1991; Grossi e Falappi, 2003; Ranzi et al., 2010). Per le simulazioni idrologiche è stata considerata la sollecitazione meteorologica definita dalle serie temporali di dati orari rilevati tra il 1995 e il 2009 da una rete di stazioni meteorologiche poste sul ghiacciaio o nelle sue immediate vicinanze. Le misure sono riferite alle seguenti grandezze: temperatura e umidità relativa dell'aria, pressione atmosferica, precipitazioni totali, radiazione globale, velocità del vento.

Le serie di dati orari sono state quindi modificate sulla base delle proiezioni di due scenari futuri di emissione dei gas di serra (in due distinti intervalli temporali), fornite dal modello climatico regionale COSMO-CLM (*COSMO model in CLimate Mode*), del servizio meteorologico tedesco (Deutscher Wetterdienst). Le serie meteorologiche modificate sono state infine utilizzate per ripetere le simulazioni idrologiche mediante il modello PDSLIM, ottenendo una proiezione del bilancio di massa riferita a scenari climatici e momenti temporali distinti, per un totale di quattro configurazioni.

I CAMBIAMENTI CLIMATICI DEL PASSATO E GLI SCENARI PREVISTI

Prima di prendere in considerazione i modelli climatici si sono valutate le incertezze che ad oggi si riscontrano in questo ambito di studio, ricordando che il sistema climatico globale terrestre è il risultato di un equilibrio energetico a livello planetario, funzione di fattori variabili nel tempo, ed è quindi di per sé stesso mutevole. Grandi oscillazioni climatiche si sono infatti verificate nella storia della Terra su diverse scale temporali. L'aumento delle temperature globali negli ultimi 150 anni è invece attribuito, con alto grado di probabilità, alle attività antropiche e al relativo rilascio di gas serra in atmosfera. In particolare quella alpina è risultata un'area soggetta ad un aumento alquanto marcato delle temperature nell'ultimo secolo (Auer et al., 2007; Brunetti et al., 2009). L'aumento delle temperature a partire dalla fine della Piccola Età Glaciale ha portato la maggior parte dei ghiacciai alpini ad un costante ritiro. Per l'Adamello appare marcato il tasso di perdita di area glacializzata degli ultimi anni (Marchetti, 1978-1993, 1999-2004; Baroni e Carton, 1990; Baroni et al., 2004; Maragno et al., 2009).

L'IPCC, fondato dal Programma ambientale delle Nazioni Unite (UNEP) e dall'Organizzazione meteorologica mondiale (WMO), è l'ente di ricerca internazionale preposto allo studio delle cause e degli effetti dei mutamenti in atto, nonché alla loro quantificazione in termini probabilistici. I modelli climatici globali e regionali vengono utilizzati dai diversi istituti coordinati dall'IPCC per determinare gli scenari futuri associati ad una certa probabilità di accadimento, legata ai livelli di emissioni di gas serra previsti per il prossimo secolo, sulla base di considerazioni socio-economiche.

IL MODELLO CLIMATICO COSMO-CLM

Tra gli scenari ipotizzati dall'IPCC, il modello CLM ne simula uno ottimista (B1) ed uno moderatamente pessimista (A1B) in termini di emissioni di gas serra. Si tratta di un modello climatico a scala regionale, non idrostatico, derivato da una disaggregazione spaziale dinamica del modello globale accoppiato oceano-atmosfera ECHAM5/MPI-OM del *Klima Deutsches Rechenzentrum* (DKRZ). L'accesso ai dati, forniti in formato NetCDF, è stato consentito a scopo di ricerca tramite lo standard CERA WWW-Gateway.

La risoluzione spaziale del modello CLM è di circa 20 km, con copertura spaziale dell'intera Europa. In questo studio sono state considerate 8 celle della griglia di calcolo del modello, ed in particolare quella con centro corrispondente alle coordinate geografiche 46.20 N e 10.20 E, avente un'altitudine media di 2168 m s.l.m. e contenente per intero il ghiacciaio dell'Adamello.

Per ciascuna delle 8 celle adottate, si sono considerate le simulazioni a scala giornaliera del modello CLM per tutti i sei parametri elencati in precedenza, necessari alla determinazione del bilancio di massa con il modello PDSLIM.

I periodi temporali per i quali sono stati elaborati i dati CLM sono il ventennio passato 1979-1999 (denominato 'di controllo') e le proiezioni A1B e B1 per i ventenni futuri 2040-2060 e 2079-2099 (indicati anche con gli anni mediani 2050 e 2090).

Per gli scenari futuri e per quello di controllo è stata confrontata, per ogni parametro ed ogni cella (talvolta tramite interpolazioni di più celle), la media mensile ventennale. In seguito, per quanto concerne le temperature, si sono determinati degli indici mensili "A" rappresentanti lo scarto tra il valore medio di un ventennio futuro rispetto a quello di controllo, mentre per i restanti parametri si sono ricavati degli indici "k", sempre mensili, risultato del rapporto delle medie ventennali. Gli indici correttivi sono stati valutati per ciascun parametro in ognuno dei 4 scenari considerati: B1_2050, B1_2090, A1B_2050, A1B_2090. In particolare si è valutata la variazione nel semestre estivo (aprile-settembre), utile per le simulazioni con il modello PDSLIM della stagione di fusione. Per le sole precipitazioni è stato determinato anche un indice k_w , mediato su tutto il semestre invernale, in modo da poter valutare anche i cambiamenti dell'accumulo invernale.

Trascurabili sono risultate le variazioni attese per la pressione atmosferica e la velocità del vento. Le temperature sono previste in forte aumento, in modo particolare per la fine del secolo e soprattutto per lo scenario A1B. Le precipitazioni sono previste in leggera diminuzione estiva e in aumento invernale per tre scenari su quattro. In particolare lo scenario B1_2050 vedrebbe un aumento del 35% delle precipitazioni invernali.

LA TRASFORMAZIONE DELLE SERIE STORICHE

Gli indici correttivi, A e k , sono stati utilizzati per modificare le serie storiche di osservazioni registrate nei 15 anni passati, 1995-2009, da diverse stazioni meteorologiche d'alta quota, tra cui quella posta al Passo della Lobbia Alta (3020 m s.l.m.) e quella ubicata presso Passo Adamè (3125 m s.l.m.). In particolare, le temperature sono state corrette tramite i termini additivi A , le restanti grandezze tramite i fattori moltiplicativi k . L'ingresso al modello di fusione non è quindi provenuto direttamente dalle simulazioni dei modelli climatici, ma è il risultato di trasformazioni di valori realmente osservati. Oltre al valor medio di ciascuna variabile, sono presenti tutti gli elementi che caratterizzano le condizioni meteorologiche locali: da periodi estremamente freddi o caldi, a precipitazioni molto intense e viceversa, oltre a tutti gli stati intermedi.

IL MODELLO PDSLIM

Il modello idrologico PDSLIM è stato sviluppato a partire dal nucleo originario (Ranzi e Rosso, 1991) per la simulazione della dinamica del manto nevoso. Nel corso degli anni, molteplici sono state le migliorie e le integrazioni apportate al modello (Ranzi e Rosso, 1995; Grossi e Falappi, 2003). L'integrazione delle immagini satellitari e del modello digitale delle quote del terreno (DEM) ha permesso applicazioni in diversi casi specifici, come per gli studi sul ghiacciaio dell'Adamello. Il passo temporale delle simulazioni è orario, come richiesto per una soddisfacente descrizione di buona parte dei processi fisici coinvolti nella dinamica della copertura nevosa e glaciale.

Per questa applicazione, il dominio spaziale considerato comprende la superficie del ghiacciaio del Mandrone, mentre esclude la minima parte del ghiacciaio dell'Adamello che appartiene al bacino idrografico del Fiume Oglio; il modello è stato precedentemente validato, sia puntualmente che a scala di bacino, anche confrontando l'ablazione glaciale simulata con quella osservata in alcuni punti del bacino del Fiume Sarca di Genova e con il deflusso misurato in alcune sue sezioni. La dimensione delle celle di calcolo utilizzate è di 30m x 30m (risoluzione del relativo DEM). Per ciascuna cella della maglia è nota quindi la quota media ed è stato possibile determinarne la pendenza e l'esposizione.

La quantificazione del processo di fusione è basata sul bilancio energetico che si instaura tra i processi

di scambio all'interfaccia tra atmosfera e strati di neve, ghiaccio e detrito. Deflusso e percolazione sono invece rappresentati con un modello a due strati del manto nevoso, due strati di ghiaccio, uno strato di detrito.

Il bilancio di massa annuale (espresso in termini di volume specifico di equivalente in acqua, fornito dalla somma del bilancio invernale, 1 ottobre - 31 marzo, e di quello estivo, 1 aprile - 30 settembre), è determinato a partire dal bilancio energetico che può essere rappresentato, in maniera semplificativa, dalla seguente equazione:

$$H_m + H_c = Q_N + H_p + H_g + H_l + H_s$$

con i vari termini espressi in termini di energia per unità di tempo e unità di area, rispettivamente

H_m : energia impiegata per la fusione;

H_c : energia interna dello strato di ghiaccio o neve;

Q_N : scambio termico radiativo netto;

H_p : calore advettivo derivante dalle precipitazioni;

H_g : calore da scambio termico con il terreno;

H_l : scambio termico convettivo di calore latente;

H_s : scambio termico convettivo di calore sensibile.

Gli ultimi due termini sono quelli che comportano le maggiori incertezze, trattandosi di fenomeni di elevata difficoltà interpretativa. In questo contesto si è adottata la teoria della lunghezza di mescolamento turbolento.

L'ingresso al codice di calcolo è fornito tramite matrici rappresentanti la distribuzione spaziale delle seguenti caratteristiche: l'altitudine; l'albedo; l'esposizione dei versanti; il fattore di vista del terreno; l'uso del suolo; l'indice di copertura fogliare (per le celle presentanti terreno vegetato); i sottobacini su cui il modello determina i valori medi areali delle componenti di bilancio energetico, della fusione del ghiaccio e della neve, degli afflussi e di tutte le rimanenti variabili d'uscita; l'altezza della copertura detritica, nulla su tutta l'estensione del ghiacciaio per il caso dell'Adamello. Altre matrici in ingresso al modello rappresentano lo stato della copertura nevosa al 1° aprile: l'altezza del manto nevoso; la densità della neve nello strato superficiale (≤ 10 cm) e in quello sottostante; la temperatura associata ai due strati; il contenuto in acqua liquida dei due strati del manto.

I RISULTATI OTTENUTI

Definiti i dati iniziali, le condizioni al contorno, e le serie di dati orari relativi alle grandezze meteorologiche citate, è stato possibile eseguire le simulazioni di bilancio di massa ed energetico per i 4 scenari futuri considerati, oltre a quello di controllo.

In tutti gli scenari l'accumulo invernale, espresso in millimetri di spessore equivalente in acqua, risulta sostanzialmente sempre inferiore, in valore assoluto, alla fusione estiva, amplificando in maniera marcata quanto già accade nel quindicennio di controllo (figura 1).

Solo lo scenario B1_2050 mostra sia in aprile che in maggio un andamento comparabile con quello degli ultimi 15 anni, ossia un bilancio in pari se non talvolta in leggerissimo campo positivo. Considerando però l'intero anno medio, nemmeno con incrementi di oltre il 30% delle precipitazioni invernali previste da questo scenario, l'accumulo invernale riesce a bilanciare la perdita di massa nel semestre estivo (legata ad un aumento pur non eccessivamente marcato, 0.9°C , delle temperature medie). Ciò appare in sostanziale accordo con quanto ipotizzato da alcuni studi secondo cui, per la maggior parte dei ghiacciai, in caso di aumento di 1°C di temperatura media, sarebbe necessario un incremento del tasso di precipitazioni nevose e di conseguente accumulo pari a oltre il 40-50% per mantenere costante il bilancio di massa (Alley, 2003).

I rimanenti scenari prevedono tutti un anticipo della fusione primaverile; inoltre, a partire dal mese di giugno, il deficit di massa delle proiezioni climatiche appare in continuo aumento rispetto alla simulazione di controllo.

I comportamenti peculiari delle annate 2001 (inverno particolarmente nevoso) e 2003 (estate estremamente calda e siccitosa) si sono riflessi sulle relative proiezioni. Risulta in particolare amplificato l'effetto negativo sul bilancio di massa della torrida estate del 2003. In proiezione futura la perdita di tale anno sarebbe addirittura doppia secondo lo scenario A1B_2090, il più pessimista, proiettato a fine secolo. Analogo discorso vale per gli anni 2008 e 2009.

Appare evidente la correlazione tra incremento di temperature e accelerazione dei processi di fusione. Bisogna quindi tenere in considerazione che il modello CLM proietta scenari fortemente pessimistici in termini di temperature, soprattutto estive. Gli scenari A1B e B1_2090 potrebbero dunque ritenersi difficilmente realizzabili in futuro, ma non escludibili a priori.

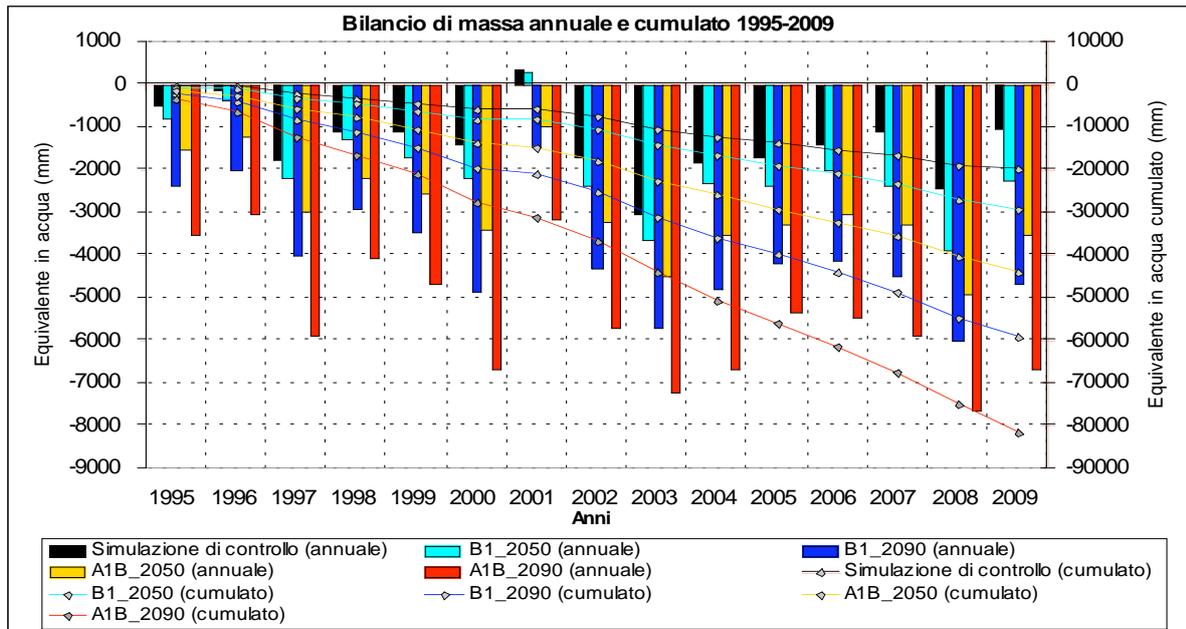


Figura 1: Bilanci di massa annuali mediati sull'area glacializzata ed andamento cumulato nei 15 anni (periodo osservato e scenari futuri)

Il bilancio di massa è stato anche determinato per ciascuno scenario nella sua distribuzione spaziale. Se in futuro le proiezioni di uno qualsiasi dei quattro scenari previsti dal modello CLM e forzanti il PDSLIM si verificassero, non si avrebbero più non solo bilanci di massa annuali positivi mediati spazialmente, circostanza molto rara anche oggi sul ghiacciaio dell'Adamello, ma soprattutto, praticamente ogni settore del ghiacciaio sarebbe in deficit negativo. Già nel quindicennio di controllo solo il 2% di tutta l'area presenta bilancio positivo.

In entrambi gli scenari al 2090 non esisterebbero più zone con un deficit annuale medio minore, in valore assoluto, di un metro di equivalente in acqua, mentre le simulazioni A1B_2050 denotano solamente una piccola area sui pendii di Monte Fumo e Dosson di Genova in perdita non eccessivamente marcata.

Lo scenario B1_2050 mostra invece come le perdite inferiori ai 1000 mm di equivalente in acqua si avrebbero in corrispondenza di vari pendii, quindi lungo il contorno del ghiacciaio (figura 2). Questo potrebbe essere messo in relazione con il fatto che qui la radiazione solare giunge nei momenti più caldi della giornata e dell'anno con un angolo inferiore.

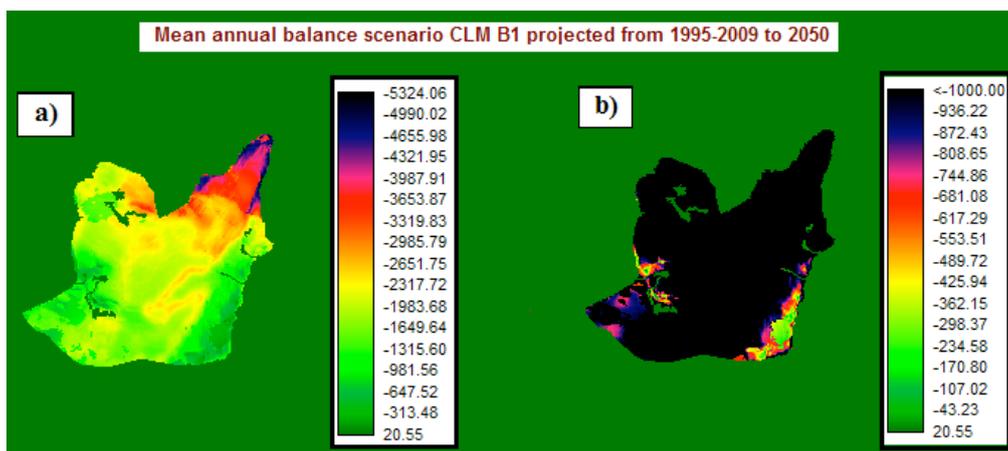


Figura 2: Bilancio di massa medio annuale 1995-2009 (mm) proiettato al 2050 dallo scenario CLM_B1. a) scala dei valori assunti spazialmente dal bilancio di massa; b) in nero sono raffigurate tutte le celle del modello che presentano perdite di massa superiori a 1000 mm di equivalenti in acqua.

Alla luce dei risultati ottenuti è stata ipotizzata una suddivisione semplificativa della superficie del ghiacciaio in zone che in futuro potrebbero risentire in maniera diversa degli effetti dei mutamenti climatici, qualora questi si presentassero come sono attualmente previsti dai modelli, o comunque se proseguisse l'attuale tendenza di aumento delle temperature sull'area. Le parti maggiormente vulnerabili sarebbero costituite dal settore settentrionale della vedretta del Mandrone e dalla lingua glaciale in discesa dal Monte Venerocolo, entrambe in fase di rapido ritiro già oggi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Alley R.B., 2003. Comment on ‘‘When Earth’s Freezer Door is Left Ajar’’. *EOS* 84, 315.

Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schoener W., Ungersboeck M., Matulla C., Briffa K., Jones P., Efthymiadis D., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Mestre O., Moisselin J.-M., Begert M., Mueller-Westermeier G., Kveton V., Bochnicek O., Stastny P., Lapin M., Szalai S., Szentimrey T., Cegnar T., Dolinar M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Majstorovic Z., E. Nieplova, 2007. - Histalp - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region, *International Journal of Climatology*, 27, 17-46.

Baroni C., Carton A. 1990. Variazioni oloceniche della Vedretta della Lobbia (Gruppo dell’Adamello Alpi Centrali). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 13, 105-119.

Baroni C., Carton A., 1996. Geomorfologia dell’alta Val di Genova (Gruppo dell’Adamello Alpi Centrali). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 19, 3-17

Baroni C., Carton A., Seppi R., 2004. Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello-Presanella Massif (Italian Alps), *Permafrost and Periglacial Processes*, 15 (3), 243-259.

Grossi G., Falappi L., 2003. Comparison of energy fluxes at the land surface-atmosphere interface in an Alpine valley as simulated with different models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(6), 920-936

IPCC, 2007. *Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.]

Maragno D., Diolaiuti G., D’Agata C., Mihalcea C., Bocchiola D., Bianchi Janetti E., Riccardi A., Smiraglia C., 2009. New evidence from Italy (Adamello Group, Lombardy) for analysing the ongoing decline of Alpine glaciers, *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 32, 31-39.

Marchetti V., 1978-1993, Relazioni delle campagne glaciologiche: Gruppo Adamello-Presanella (versante trentino). Ghiacciai della Lobbia e del Mandron. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 1(1) (1978); 2 (2) (1979); 3 (2) (1980); 4 (2) (1981); 5 (2) (1982); 7 (2) (1985); 9 (1) (1987); 9 (1) (1987); 10 (2) (1988); 11 (2) (1989); 12 (2) (1990); 13 (2) (1991); 14 (2) (1992); 15 (1993).

Marchetti F., 1999-2004. Relazioni delle campagne glaciologiche: Ghiacciai del Gruppo Adamello-Presanella. Ghiacciaio del Mandron. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 22 (2) (1999); 23 (2) (2000); 24 (2) (2001); 25 (2) (2002); 26 (2) (2003); 27 (2) (2004).

Ranzi R., Rosso R., 1991. A physically based approach to modelling distributed snowmelt in a small alpine catchment, in: *Snow Hydrology and Forests in High Alpine Areas*, edited by H. Bergmann, H. Lang, W. Frey, D. Issler, B. Salm, *IAHS Publ. no.205*, Wallingford, UK, pp.141-150.

Ranzi R., Rosso R., 1995. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin, *J. of Hydrology*, 166, 461-478

Ranzi R., Grossi G., Gitti A., Taschner S., 2010. Energy and mass balance of the Mandrone Glacier (Adamello, Central Alps), *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 33, 45-60